



lebensministerium.at

Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft

Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und der Technischen Universität Wien
im Auftrag von Bund und Ländern





NACHHALTIG FÜR NATUR UND MENSCH SUSTAINABLE FOR NATURE AND MANKIND

Lebensqualität / *Quality of life*

Wir schaffen und sichern die Voraussetzungen für eine hohe Qualität des Lebens in Österreich.
We create and we safeguard the prerequisites for a high quality of life in Austria.

Lebensgrundlagen / *Bases of life*

Wir stehen für vorsorgende Verwaltung und verantwortungsvolle Nutzung der Lebensgrundlagen Boden, Wasser, Luft, Energie und biologische Vielfalt.
We stand for a preventive preservation and responsible use of the bases of life, soil, water, air, energy, and biodiversity.

Lebensraum / *Living environment*

Wir setzen uns für eine umweltgerechte Entwicklung und den Schutz der Lebensräume in Stadt und Land ein.
We support an environmentally benign development and the protection of living environments in urban and rural areas.

Lebensmittel / *Food*

Wir sorgen für die nachhaltige Produktion insbesondere sicherer und hochwertiger Lebensmittel und nachwachsender Rohstoffe.
We provide for the sustainable production in particular of safe and high-quality foodstuffs and of renewable resources.

IMPRESSUM

Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,
Sektion Wasser, Marxergasse 2, 1030 Wien

Gesamtkoordination: **W. Schimon** (BMLFUW)

Autoren:

W. Schöner, R. Böhm, K. Haslinger
(Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik)

G. Blöschl, H. Kroiß, R. Merz, A. P. Blaschke, A. Viglione, J. Parajka, J. L. Salinas, U. Drabek, G. Laaha, N. Kreuzinger
(Technische Universität Wien)

Wien, April 2011

Layout: **T. Hörhan** (BMLFUW), **J. L. Salinas** (TU Wien)

Copyright: **Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft**

Alle Rechte vorbehalten

Bildnachweis: **Lebensministerium**

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier und mit Pflanzenölfarben



GEDRUCKT MIT
PFLANZENÖLFARBEN



lebensministerium.at

Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft

Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
und der Technischen Universität Wien
im Auftrag von Bund und Ländern



April 2011

10 Thesen der österreichischen Wasserwirtschaft zum Klimawandel bis 2050*

1. Hochwasser

Es werden regional unterschiedliche Änderungen der Abflüsse bei Hochwässern erwartet, die im Bereich von -4% bis +10% liegen dürften. Die Unsicherheiten der Auswirkungen auf Extremereignisse sind jedoch relativ groß, besonders in kleinen Gebieten. Natürliche Schwankungen der Hochwässer sind wesentlich größer, als Änderungen aufgrund des Klimawandels. Die Einführung eines generellen Klimazuschlages für Bemessungswerte ist nach dem derzeitigen Stand nicht erforderlich.

2. Niederwasser

In den Alpen Österreichs werden die Abflüsse bei Winterniederwasser wegen höherer Lufttemperaturen deutlich erhöht, was als positiv zu betrachten ist. In den Flachlandregionen Ost- und Südösterreichs kann eine Abnahme der Abflüsse bei Niederwasser eintreten.

3. Gletscher

Der Rückgang der Gletscher wird sich fortsetzen. Der Abfluss aus Gletscherschmelze dürfte um die Jahre 2040-2050 sein Maximum erreichen. In unmittelbarer Nähe von Gletschern ist in diesem Zeitraum eine deutliche Zunahme der Sommerabflüsse zu erwarten, in größeren Einzugsgebieten ist der Einfluss nur in Trockenjahren relevant.

4. Grundwasser – Menge

Für den Süden Österreichs, wo eine Abnahme der Winterniederschläge erwartet wird, wie auch in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs, ist künftig wieder eine Abnahme der Grundwasserneubildung wahrscheinlich. Im Norden und Westen Österreichs könnte die Grundwasserneubildung zunehmen.

5. Geschiebepotential

Lokal kann im Bereich der Dauerfrostgrenze das Geschiebepotential deutlich zunehmen. In größeren Einzugsgebieten liegt die erwartbare Zunahme weit unter den natürlichen Schwankungen.

6. Wassertemperaturen

Eine Zunahme der Temperaturen von Oberflächengewässern um ca. 0,8°C bis 2050 ist zu erwarten. Diese erhöhte Temperatur entspricht einer Verschiebung in der Seehöhe um ca. 100 m. Damit ist auch mit Verschiebungen der Bioregionen zu rechnen. Die Zunahme der Wassertemperatur konnte auch im Grundwasser gemessen werden. Bei der Beurteilung von Wärmeleitungen (z.B. von Kraftwerken, die Flusswasser als Kühlwasser verwenden) ist diese Temperaturerhöhung zu berücksichtigen.

7. Oberflächenwassergüte

Durch eine geringere Wassermenge – wie es in den Flachlandregionen Ost- und Südösterreichs der Fall sein kann – werden bestimmte Stoffe, wie Schadstoffe, nicht mehr so

*Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft wissenschaftlich fundiert darzulegen, hat das Lebensministerium, Sektion Wasser, gemeinsam mit den wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Bundesländer die Studie „Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ beauftragt. Die 10 Thesen sind die Konzentration der Aussagen auf das Wesentliche.

stark verdünnt und würden in höherer Konzentration auftreten. Angesichts des hohen Standards bei der Abwasserreinigung ist nur in Einzelfällen eine punktuelle Verbesserung erforderlich.

8. Grundwasser – Güte

Das Grundwasser unterliegt Prozessen analog zu denen der Oberflächengewässer. Durch die Temperaturerhöhung laufen die Prozesse im Übergangsbereich zwischen Oberflächen- und Grundwasser etwas rascher und vollständiger ab, wodurch Änderungen in der chemischen Zusammensetzung möglich sind. Eine Weiterführung der bisherigen Grundwasserschutzpolitik ist angebracht.

9. Wasserkraft

Die Leistung der Laufkraftwerke dürfte im Winter zunehmen und sich im Sommer wenig ändern. Dadurch ergibt sich eine bessere Anpassung an den Verbrauch. Durch den Klimawandel ergibt sich für die Wasserkraft kein Handlungsbedarf.

10. Nutzungs- und Bedarfsaspekte

Aufgrund der hohen Wasserverfügbarkeit in Österreich und der zu erwartenden geringen Änderungen ist mit keinem großräumigen Mangel an Rohwasser für die Wasserversorgung zu rechnen. Kleinräumig könnten sich jedoch vorhandene Engpässe in Gebieten mit ungünstigem Wasserdargebot verstärken. Dies ist bei der Bewirtschaftung der Wasserressourcen zu berücksichtigen.

Klimawandel findet statt. Die Bekämpfung der Ursachen des Klimawandels sowie die Anpassung an die Folgen des Klimawandels sind eine globale Herausforderung. Es ist mittlerweile anerkannt, dass die Wasserwirtschaft von den Folgen des Klimawandels betroffen ist - Ausmaß und Art der Betroffenheit sind jedoch stark von der jeweiligen Region abhängig.

Der globale Klimawandel macht auch vor Österreich nicht Halt. Um die Auswirkung auf die österreichische Wasserwirtschaft genauestens zu prüfen, hat mein Ressort gemeinsam mit den Bundesländern eine wissenschaftliche Studie beauftragt. Es freut mich, dass diese Studienergebnisse nun vorliegen und der Öffentlichkeit präsentiert werden können. Als gute Nachricht zeigt die Studie auf, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft nur gering sind. Bei den Hochwässern zum Beispiel ist die natürliche Variabilität wesentlich größer als die Änderung zufolge Klimawandel.



Da Österreich ein sehr wasserreiches Land ist, wird mit keinem großräumigen Mangel an Rohwasser für die Wasserversorgung gerechnet. Kleinräumig vorhandene Engpässe könnten sich aber verstärken. Der Klimawandel führt zu einer Erhöhung der Gewässertemperatur und damit ist mit Verschiebungen der Bioregionen, die durch bestimmte aquatische Lebensgemeinschaften charakterisiert sind, zu rechnen.

Auch wenn die Studie keine schwerwiegenden Auswirkungen durch den Klimawandel aufzeigt, ist es dennoch wichtig, unsere Gewässer laufend zu beobachten. Nur so können wir auf Veränderungen rechtzeitig reagieren. Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre der Studie!

DI Nikolaus BERLAKOVICH

Umweltminister

Österreich war in den letzten Jahren von zahlreichen Naturereignissen betroffen, die in allen Bundesländern große Schäden verursacht haben. Vor allem die Hochwässer haben zu intensiven, auch medialen Diskussionen über Ursachen und Lösungsansätze geführt. Häufig wird dem Klimawandel pauschal die Schuld an der steigenden Zahl von Naturkatastrophen gegeben. Dabei werden oft voreilig Maßnahmen gefordert, ohne dabei auf wissenschaftlich abgesicherte und für die österreichischen Regionen geltende Fakten aufbauen zu können.



Den Bundesländern war es daher ein Anliegen, diese Diskussionen zu versachlichen und objektive Entscheidungsgrundlagen für nötige Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu schaffen. Mit der vorliegenden Studie ist es für den Bereich der Wasserwirtschaft gelungen, das vorhandene Wissen zum Klimawandel in Österreich auf den Tisch zu legen, zu bewerten und daraus die nötigen Schlüsse zu ziehen.

Aus der Studie geht hervor, dass Österreichs Wasserwirtschaft für die Veränderungen des Klimawandels gut gerüstet ist und keine dramatischen Folgen zu befürchten sind. Dies ist zum einen auf die günstigen natürlichen Voraussetzung in Österreich zurückzuführen, zum andern aber auch auf die hervorragende Arbeit, die in Österreich im Bereich der Wasserversorgung, des Hochwasserschutzes und des Gewässerschutzes in den letzten Jahrzehnten geleistet wurde.

Für jene Bereiche, wo sich ein Handlungsbedarf abzeichnet, werden die Länder gemeinsam mit dem Bund und den Gemeinden für entsprechende Lösungen sorgen. Ich bin überzeugt, dass wir alle gemeinsam auch diese Herausforderungen bewältigen und so unsere Verantwortung im Umgang mit dem Wasser auch zukünftig wahrnehmen können.

Dr. Stephan PERNKOPF

NÖ Landesrat für Umwelt, Landwirtschaft und Energie*

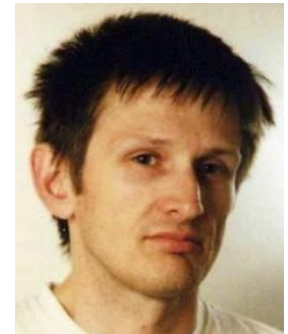
*stellvertretend für alle beteiligten Bundesländer

Die vorliegende Studie „Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ arbeitet die gesamte relevante Literatur mit einem Fokus auf Österreich auf, untersucht die Trends der vergangenen Jahrzehnte auf Basis umfangreicher Datenauswertungen, stellt Projektionen für den Zeitraum 2021-2050 an und schlägt Anpassungsmaßnahmen für alle Sektoren der Wasserwirtschaft vor.

Die Studie beschritt in mehrfacher Hinsicht neue Wege. Zum einen unterscheidet sie „harte Fakten“ von „weichen Fakten“, also Aussagen die mit größerer Zuverlässigkeit als andere getroffen werden können. Diese Unterscheidung ist für tragfähige Lösungsansätze und deren Umsetzung in der Wasserwirtschaft essentiell. Zum anderen verlässt sie sich in den Aussagen nicht ausschließlich auf Szenarienrechnungen, da diese große Unsicherheiten aufweisen, sondern zieht ergänzende Informationen heran. Dabei lag der Fokus auf Mechanismen, die differenziertere und transparentere Aussagen über Ursache-Wirkung erlauben als die Szenarienmethode alleine. Die auf dieser Basis erarbeiteten Anpassungsstrategien münden in zweierlei Maßnahmen: Solche die aus Vorsorgeüberlegungen und Vulnerabilitätsbetrachtungen jedenfalls durchgeführt werden sollen; und adaptive Maßnahmen deren Umsetzung von den Ergebnissen des laufenden Monitorings und der sonstigen Entwicklung abhängen.

Die Studie wurde von Vertretern der wasserwirtschaftlichen Abteilungen aller Länder sowie des BMLFUW während der gesamten Laufzeit begleitet, um Aussagen zu erhalten, die sowohl wissenschaftlich fundierte als auch direkt praxisrelevant sind. Damit soll ein Beitrag zur langfristigen Planung in der wasserwirtschaftlichen Praxis geleistet werden.

**Günter Blöschl, Wolfgang Schöner, Helmut Kroiss,
Wilfried Schimon, Ludwig Lutz**



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1-1
1.1 Ausgangslage und Zielsetzung der Studie	1-1
1.2 Grundprinzipien der Studie	1-2
1.3 Vorgangsweise	1-5
1.4 Zusammenfassende Ergebnisse.....	1-6
1.4.1 Klimaänderung und -variabilität	1-6
1.4.2 Hochwasser	1-6
1.4.3 Wasserdargebot Oberflächenwasser	1-7
1.4.4 Niederwasser	1-7
1.4.5 Wassertemperaturen in Flüssen.....	1-8
1.4.6 Geschiebepotential von alpinen Gewässern und Permafrost	1-8
1.4.7 Wasserdargebot Grundwasser.....	1-8
1.4.8 Seen	1-9
1.4.9 Wasserkraft.....	1-9
1.4.10 Qualität von Wasserkörpern.....	1-9
1.4.11 Nutzungs- und Bedarfsaspekte	1-9
1.5 Schlussfolgerungen und Ausblick	1-10
2. Klimaänderung und -variabilität.....	2-1
2.1 Kurzfassung.....	2-1
2.2 Ausgangspunkte für das Wissen über die Klimavergangenheit und hydrologische Auswirkungen.....	2-3
2.2.1 Natürliche und anthropogene Klimaantriebe in Vergangenheit und Gegenwart.....	2-4
2.2.2 Abschätzung künftiger Klimaantriebe	2-11
2.2.3 Klimadaten aus der instrumentellen Periode	2-14
2.2.4 Globale Zirkulationsmodelle	2-19
2.2.5 Downscaling.....	2-21
2.3 Situation in der Vergangenheit.....	2-23
2.3.1 Großraum Alpen, 1760-2007 – Temperatur – Luftdruck – Sonnenschein.....	2-23
2.3.2 Großraum Alpen, 1800-2007 – Niederschlag	2-25
2.3.3 Lufttemperatur in Österreich 1768-2009.....	2-26
2.3.4 Niederschlag in Österreich	2-29
2.4 Situation in der Zukunft	2-40
2.4.1 Klimaszenarien für den Alpenraum und für Österreich	2-40
2.4.2 Klimaszenarien für den Alpenraum aus Globalen Klimamodellen.....	2-43
2.4.3 Validierung von Klimamodellierungen mit den Regionalmodellen REMO und CLM für den Alpenraum und Österreich	2-48
2.4.4 Klimaszenarien für den Alpenraum und Österreich bis 2050 aus Simulationen Regionaler Klimamodelle.....	2-56
3. Hochwasser	3-1
3.1 Kurzfassung.....	3-1
3.2 Vorgangsweise	3-2
3.3 Prozesse der Hochwasserentstehung in Österreich auf regionaler Ebene	3-3
3.3.1 Saisonalität	3-3
3.3.2 Hochwassertypen und andere Einflussfaktoren.....	3-11
3.4 Situation in der Vergangenheit.....	3-13
3.4.1 Interpretation von Trends und Hochwasserdekaden	3-13
3.4.2 Ergebnisse von Trenduntersuchungen in der Literatur	3-15
3.4.3 Auswertungen in Österreich	3-19

3.5	Situation in der Zukunft	3-38
3.5.1	Interpretation von Szenarien und Unsicherheiten	3-38
3.5.2	Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur	3-39
3.5.3	Auswertungen in Österreich	3-45
3.6	Zusammenschau der Auswertungen für Österreich	3-68
4.	Wasserdargebot Oberflächenwasser	4-1
4.1	Kurzfassung	4-1
4.2	Vorgangsweise	4-3
4.3	Prozesse der Abflussentstehung in Österreich auf regionaler Ebene	4-3
4.3.1	Abflussregime und Saisonalität	4-3
4.3.2	Räumliche Verteilung des Abflusses	4-11
4.4	Situation in der Vergangenheit	4-12
4.4.1	Trends von Niederschlag und Abfluss in Österreich	4-12
4.4.2	Trends der Wasserbilanz in Österreich	4-30
4.5	Situation in der Zukunft	4-32
4.5.1	Interpretation von Szenarien und Unsicherheiten	4-32
4.5.2	Methode der Szenarienrechnungen	4-33
4.5.3	Auswertungen in Österreich	4-37
4.6	Elastizität (zeitlich)	4-48
4.7	Trading space for time (räumlich)	4-52
4.8	Zusammenschau Wasserdargebot Oberflächenwasser	4-57
4.9	Gletscher	4-58
4.9.1	Die Rolle der Gletscher für Wasserkreislauf und Hydrologie	4-58
4.9.2	Ergebnisse aus Studien über den Abflussbeitrag der Gletscher in Österreich	4-61
4.9.3	Zukünftige Entwicklung der Gletscher und Folgen für die Wasserwirtschaft	4-65
4.9.4	Einfluss der Gletscher auf Hochwässer	4-68
4.9.5	Gletscherabfluss und Geschiebeführung	4-69
5.	Niederwasser	5-1
5.1	Kurzfassung	5-1
5.2	Vorgangsweise	5-2
5.3	Prozesse der Niederwasserentstehung in Österreich auf regionaler Ebene	5-3
5.3.1	Saisonalität	5-3
5.3.2	Niederwasser des Jahres 2003	5-8
5.4	Situation in der Vergangenheit	5-10
5.4.1	Ergebnisse von Trenduntersuchungen in der Literatur	5-10
5.4.2	Auswertungen in Österreich	5-10
5.5	Situation in der Zukunft	5-27
5.5.1	Interpretation von Szenarien und Unsicherheiten	5-27
5.5.2	Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur	5-27
5.5.3	Auswertungen in Österreich	5-31
5.6	Zusammenschau der Auswertungen für Österreich	5-34
6.	Wassertemperaturen in Flüssen	6-1
6.1	Kurzfassung	6-1
6.2	Vorgangsweise	6-1
6.3	Situation in der Vergangenheit	6-2
6.3.1	Bestimmung des Ist-Zustandes	6-2
6.3.2	Trendanalysen	6-8
6.4	Situation in der Zukunft	6-16

7.	Geschiebepotential von alpinen Gewässern und Permafrost.....	7-1
7.1	Kurzfassung.....	7-1
7.2	Einleitung.....	7-1
7.3	Bedeutung des Permafrostes für die Geschiebeführung.....	7-2
7.4	Situation in der Vergangenheit von Geschiebe und Schwebstoffen.....	7-6
7.5	Situation in der Zukunft.....	7-10
8.	Wasserdargebot Grundwasser.....	8-1
8.1	Kurzfassung.....	8-1
8.2	Vorgangsweise.....	8-3
8.3	Prozesse der Grundwasserneubildung in Österreich.....	8-3
8.3.1	Grundwasserneubildung aus Niederschlägen.....	8-3
8.3.2	Grundwasserneubildung durch Versickerung aus Oberflächengewässer.....	8-5
8.4	Grundwassertemperatur.....	8-6
8.5	Situation in der Vergangenheit.....	8-7
8.5.1	Interpretation von Trends.....	8-7
8.5.2	Ergebnisse von Trenduntersuchungen in der Literatur.....	8-8
8.5.3	Auswertungen in Österreich.....	8-9
8.5.4	Aussagen aus den Trendanalysen für Grundwassergebiete.....	8-24
8.6	Situation in der Zukunft.....	8-37
8.6.1	Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur.....	8-37
8.6.2	Prozesse der Klimaauswirkungen auf das Grundwasser in Österreich.....	8-39
8.6.3	Auswertungen in Österreich.....	8-40
8.7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	8-44
9.	Seen.....	9-1
9.1	Kurzfassung.....	9-1
9.2	Vorgangsweise.....	9-2
9.3	Prozesse im See.....	9-3
9.4	Situation in der Vergangenheit.....	9-4
9.4.1	Ergebnisse in der Literatur.....	9-4
9.4.2	Trends der Temperaturentwicklung in österreichischen Seen.....	9-4
9.4.3	Bodensee.....	9-6
9.4.4	Neusiedler See.....	9-10
9.5	Situation in der Zukunft.....	9-11
9.5.1	Ergebnisse in der Literatur.....	9-11
9.5.2	Bodensee.....	9-11
9.5.3	Neusiedler See.....	9-13
10.	Wasserkraft.....	10-1
10.1	Kurzfassung.....	10-1
10.2	Vorgangsweise.....	10-1
10.3	Situation in der Vergangenheit.....	10-2
10.3.1	Ergebnisse aus der Literatur.....	10-2
10.3.2	Bestimmung des Ist-Zustandes für Österreich.....	10-2
10.3.3	Trendauswertungen in Österreich.....	10-8
10.4	Situation in der Zukunft.....	10-9
10.4.1	Ergebnisse aus der Literatur.....	10-9
10.4.2	Szenarienrechnung.....	10-9
10.4.3	Auswertungen in Österreich.....	10-10
10.4.4	Änderung der Erzeugungsleistung am Beispiel ausgewählter Donaukraftwerke	10-13

11. Qualität von Wasserkörpern.....	11-1
11.1 Kurzfassung.....	11-1
11.2 Einleitung.....	11-3
11.3 Zusammenhänge Klima und Wassergüte aus der Literatur.....	11-7
11.4 Einflüsse des Klimawandels auf die Gewässergüte in Österreich	11-8
12. Nutzungs- und Bedarfsaspekte.....	12-1
12.1 Kurzfassung.....	12-1
12.2 Einleitung.....	12-3
12.3 Haushalte.....	12-4
12.4 Industrie.....	12-6
12.5 Kühlwasser für thermische Kraftwerke und Industrie.....	12-6
12.6 Landwirtschaft.....	12-9
13. Danksagung.....	13-1
14. Literatur.....	14-1

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1-1: Grundprinzipien der Studie Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft von Bund und Ländern. 1-2
- Abbildung 2-1: Natürliche Klimaantriebe im letzten Jahrtausend. Oben: Rekonstruktionen der zeitlichen Variabilität der solaren Einstrahlung - zusammengesetzt aus direkten Satellitenmessungen, und Rekonstruktionen aus direkten Sonnenfleckenbeobachtungen (Lean et al., 2000) und aus ¹⁴C- und ¹⁰Be-Isotopenreihen aus Baumjarringen und Eisbohrkernen (Bard et al., 2000, Solanki et al., 2004, Lean and Rind, 2008. Unten: 1000-jährige Rekonstruktion des Klimaantriebes durch Vulkanausbrüche, die Schwefeldioxid in die Stratosphäre schleuderten, aus verschiedenen Eisbohrkernen und aus direkten Messungen (Crowley, 2000). 2-6
- Abbildung 2-2: Zusätzliche Klimaantriebe durch den Menschen. Links: Entwicklung der zwei langlebigen Treibhausgase vom Jahr 1000 bis 2007 aus Eisbohrkernen und aus direkten Messungen, Quelle: Robertson et al, 2001 (aktualisiert). Rechts: Sulfatgehalt im Firn und Eis der Hochalpen. Kombiniert aus den stark geglätteten Daten eines Eisbohrkerns (Colle Gnifetti, 4450m, Monte Rosa Gipfelzone) seit 1800 mit jährlichen Messungen im Winterschnee im Sonnblickgebiet (3000m, Hohe Tauern) seit 1982. Quellen: Wagenbach, pers. Mitt, 2008 und Schöner, 1995 (aktualisiert bis 2007). 2-8
- Abbildung 2-3: Direkt gemessene Jahresmittel der Lufttemperatur im Großraum Alpen 1760-2007 (schwarz) und im globalen Mittel 1858-2007 (grau). Dargestellt sind Anomalien zum Mittel des 20. Jahrhunderts. Alpenraum: 4-19°E, 43-49°N, Mittel aus 124 Einzelreihen; Global-Land: Mittel aus 2000 Festland- und Inselstationen. 1: letzte natürliche Periode – solarer und vulkanischer Einfluss dominant. 2: erster merklicher menschlicher Einfluss – die Aerosolperiode. 3: Eintritt ins Treibhauszeitalter. Quellen: Auer et al., 2007 und Jones et al., 1999 (aktualisiert). 2-9
- Abbildung 2-4: Klimamodellauf ERIK-1 für die Mitteltemperaturen Juni-September der Jahre 1000-1990 n. Chr. für Festlandeuropa (10°W-40°E, 35°N-70°N). Pers. Mitt. von E. Zorita, Modellbeschreibung in Zorita et al. (2004). 2-10
- Abbildung 2-5: Rekonstruktion der Sommer-Frühherbst Temperaturen (Juni-September) in den Alpen seit dem Jahr 755 n. Chr. 755-1850: rekonstruiert aus Hunderten Jahrringdichtereihen (Büntgen et al., 2006) 1760-2007: direkt gemessene HISTALP-Daten (Auer et al., 2007a). 2-10
- Abbildung 2-6: Der Weg von den sozio-ökonomischen IPCC-Zukunftsszenarien (links) über die daraus abgeleiteten Treibhausgasverläufe im 21. Jahrhundert (die drei bunten Kurven in der Mitte) zu den physikalische mathematischen Modellen (rechts). Quelle: IPCC-2007.. 2-13
- Abbildung 2-7: Die Haupt-Klimaregionen des Großraums Alpen und das HISTALP-Stationsnetz. 2-15
- Abbildung 2-8: Räumliche Dekorrelation auf 50% gemeinsame Varianz im Europäischen Klimamessnetz von Jahres-, Jahreszeiten-, Monats- und Tageswerten von Temperatur und Niederschlag. Quelle: Scheifinger H, in: Böhm R, coord (2006). 2-16
- Abbildung 2-9: Jährliche längste Trockenperiode (CCD) in Wien (links) und in Innsbruck, 1901–2006. Einzeljahre, 20jährig geglättet und linearer Trend. Beide Trends sind nicht signifikant. Definition des Extremwertindex CCD: aufeinanderfolgende Tage mit weniger als 1 Liter/m² Niederschlag. Quelle: Auer et al. (2008) 2-17
- Abbildung 2-10: Ähnlichkeit zwischen der gesamten Jahressumme des Niederschlages (die 20jährig geglätteten Linien oben in den Abbildungen) und von zwei Niederschlags-Extremwertindizes für den inneralpiner Ort Rauris (Einzeljahre und 20jährig geglättet, unten). Links: Summe der Tagesniederschläge, die in der Klimanormalperiode 1961–1990

nur noch von 1% aller Fälle übertroffen werden (= 99% Perzentil). Rechts: maximale Fünftagesummen eines Jahres. Quelle: Auer et al. (2008)	2-18
Abbildung 2-11: Das Hochwasserereignis des August 2003 im Spiegel langjähriger Zeitreihen der August-Monatssummen des Niederschlages. Quelle: HISTALP-Klimadatenbank der ZAMG, Auer et al. (2005)	2-19
Abbildung 2-12: Prozesskette der globalen Klimamodellierung: a) Unterteilung der Erde in ein dreidimensionales Gitter, b) Erstellen der partiellen Differentialgleichungen für jeden Gitterpunkt, c) Lösung der Gleichungen mittels Hochleistungscomputer, d) Darstellung der Ergebnisse (CMMAP 2010, bearbeitet)	2-20
Abbildung 2-13: Schematische Darstellung eines doppelten Nestingansatzes (www.meteoswiss.admin.ch/web/en/weather/models/cosmo.html , bearbeitet)	2-22
Abbildung 2-14: Mittel 1760-2007 bzw. 1760/61-2007/08 aller mehr als 100 HISTALP-Temperaturreihen des Großraums Alpen. Rot: Sommerhalbjahr (April-September), blau: Winterhalbjahr (Oktober – März). Alle Reihen sind Abweichungen vom Mittel des 20. Jahrhunderts, gezeigt sind Einzeljahre und ein geglätteter Verlauf (30-jähriger Gauß'scher Tiefpassfilter).....	2-24
Abbildung 2-15: Jahresmittelreihen von drei eng gekoppelten Klimaelementen im Großraum Alpen. Grün: Lufttemperatur (Mittel aller Tieflandstationen, Einzeljahre und 30-jährig geglättet), Schwarz: Luftdruck (Mittel aller Tieflandstationen, nur die geglättete Kurve gezeigt), rot: hochalpines Mittel der Sonnenscheindauer (Einzeljahre und 30-jährig geglättet).	2-25
Abbildung 2-16: Jahressummen des Niederschlages zwei gegensätzlichen Subregionen des Großraums Alpen 1800- 2007. Einzeljahre und geglätteter Verlauf (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter), die trockensten und das feuchtesten Jahre sind hervorgehoben.	2-26
Abbildung 2-17: Geglättete Jahresmittelreihen der Lufttemperatur in 5 Subregionen Österreichs von Messbeginn bis 2009. Gelb: WEST, grün: NORD, rot: INNERALPINE TÄLER, schwarz: hochalpin, blau: SÜDOST (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter).....	2-27
Abbildung 2-18: Jahresmittelreihe der Lufttemperatur in Österreich von 1768 bis 2009 Einzeljahre und geglätteter Verlauf (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter), das kälteste und das wärmste Jahr sind hervorgehoben.....	2-28
Abbildung 2-19: Jahreszeitenmittel der Lufttemperatur in Österreich von 1768 bis 2009 (Winter 1768/68-2008/09). Einzelsaisonen und geglätteter Verlauf (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter), das kälteste und das wärmste Jahr sind hervorgehoben.	2-28
Abbildung 2-20: Geglättete Jahresmittelreihen des Jahresniederschlages 4 Subregionen Österreichs von Messbeginn bis 2009. Gelb: WEST, grün: NORD, rot: INNERALPINE TÄLER, schwarz: hochalpin, blau: SÜDOST (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter).....	2-31
Abbildung 2-21: Jahressummen des Niederschlages in vier Subregionen Österreichs von Reihenbeginn bis 2009. Einzeljahre und geglätteter Verlauf (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter), die trockensten und das feuchtesten Jahre sind hervorgehoben.	2-32
Abbildung 2-22: Geglättete Jahreszeitensummen des Niederschlages in vier Subregionen Österreichs von Reihenbeginn bis 2009. Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter.	2-33
Abbildung 2-23: Trends der Niederschlagssumme im Winter (DJF), und Sommer (JJA) für die Periode 1976-2007, aus homogenisierten HISTALP-Stationsdaten (links) und nicht homogenisierten STARTCLIM-Stationsdaten (rechts). Signifikante Trends (95% Signifikanzniveau) sind mit einem + gekennzeichnet.....	2-35

Abbildung 2-24: Trends der Niederschlagsintensität für Tage >95% Quantil, der Tage mit Niederschlag >1mm und der Niederschlagssumme im Winter (DJF) und Sommer (JJA) für die Periode 1976-2007, aus nicht homogenisierten STARTCLIM-Stationsdaten. Signifikante Trends (95% Signifikanzniveau) sind mit einem + gekennzeichnet.....	2-37
Abbildung 2-25: Zeitliche Trends in der Periode 1948-2007 für die Zahl der Tage mit Winterdecke (links) und die Zahl der Tage mit Schneedecke (rechts) aus den StartClim Datensatz (Auer et al., 2007b) oben für signifikante Zeitreihen und unten für alle Zeitreihen..	2-38
Abbildung 2-26: Trends der Niederschlagssumme und der Niederschlagsintensität (mm/Tag) sowohl für alle Niederschlagstage, als auch für NS-Tage über dem 90% Perzentil im Winter (DJF) und Sommer (JJA), für die Periode 1963-2006, aus homogenisierten HISTALP-Stationsdaten und nicht homogenisierten STARTCLIM-Stationsdaten, x = Einzelstation, + = Median. Die Regionalisierung basiert auf einer Studie von P. Seibert (2006). Die Trends wurden nicht auf Signifikanz geprüft. Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter. ..	2-39
Abbildung 2-27: Zugrunde liegende Höhenraster des treibenden Globalmodells ECHAM5 T63 (links) und des in dieser Studie verwendeten genesteten Regionalmodells CLM (rechts) (aus: Hollweg et al., 2008).....	2-41
Abbildung 2-28: Modellkoppelungen, Szenarienauswahl und Ensemblesauswahl für das Projekt PRUDENCE zur Ermittlung von Klimaszenarien und zur Abschätzung der Unsicherheiten (aus Frei et al., 2007).....	2-42
Abbildung 2-29: Änderung der mittleren Jahrestemperatur (oben) unten der Jahresniederschlags-summe (unten) für gefilterte Zeitreihen (Gauß-Filter 30 Jahre) von 1860 bis 2100 bezogen auf die WMO Normalperiode 1961-1990 im erweiterten Alpenraum aus 15+ gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb für den Zeitraum 1860-2000), das SRES Szenario A1B (anthropogener Antrieb von 2001-2100).....	2-44
Abbildung 2-30: Änderung der Lufttemperatur im Winter (DJF, oben) und im Sommer (JJA, unten) (Gauß-Filter 30 Jahre) von 1860 bis 2100 bezogen auf die WMO Normalperiode 1961-1990 im erweiterten Alpenraum aus 15+ gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb für den Zeitraum 1860-2000), das SRES Szenario A1B (anthropogener Antrieb von 2001-2100).	2-45
Abbildung 2-31: Änderung der Niederschlagssumme im Winter (DJF, oben) und im Sommer (JJA, unten) für gefilterte Zeitreihen (Gauß-Filter 30 Jahre) von 1860 bis 2100 bezogen auf die WMO Normalperiode 1961-1990 im erweiterten Alpenraum aus 15+ gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb für den Zeitraum 1860-2000), für das SRES Szenario A1B (anthropogener Antrieb von 2001-2100).	2-46
Abbildung 2-32: Änderung der Jahresmitteltemperatur von 1860 bis 2000 bezogen auf die WMO Normalperiode 1961-1990 in der GAR, aus 4 gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb), ECHAM5, ECHOG, HADCM3 und HADGEM, ungefilterte und 30-jährig gefilterte Werte.....	2-47
Abbildung 2-33: Abweichungen der Modellsimulationen mit REMO und CLM zu den Messdaten von Öklim für die Lufttemperatur, den Niederschlag und die Schneedeckendauer in der Klimanormalperiode 1961-90.....	2-49
Abbildung 2-34: Abweichungen der Modellsimulationen mit REMO und CLM zu den Messdaten von Öklim für den Niederschlag im Winterhalbjahr (oben) und das Sommerhalbjahr (unten) in der Klimanormalperiode 1961-90.....	2-50
Abbildung 2-35: Jahresgang der Lufttemperatur (links) und des Niederschlags (rechts) aus den Modellsimulationen REMO und CLM sowie aus den HISTALP Datensatz für die Greater	

Alpine Region bzw. die Subregion NW+ NO (bessere räumliche Überdeckung für REMO) für die Klimanormalperiode 1961-90.....	2-50
Abbildung 2-36: Trend der Lufttemperatur im Winter (DJF, oben) und Sommer (JJA, unten) für die Periode 1976-2007, aus homogenisierten HISTALP-Stationsdaten und CLM Simulationen. Signifikante Trends in den HISTALP-Stationsdaten sind mit einem + gekennzeichnet.	2-51
Abbildung 2-37: Trend der Niederschlagssumme im Winter (DJF, oben) und Sommer (JJA, unten) für die Periode 1976-2007, aus homogenisierten HISTALP-Stationsdaten und CLM Simulationen. Signifikante Trends in den HISTALP-Stationsdaten sind mit einem + gekennzeichnet.	2-52
Abbildung 2-38: Statistik des Niederschlags im Alpenraum (links: nördlich des Alpenhauptkammes, rechts: südlich des Alpenhauptkammes) in der Periode 1961-90 aus verschiedenen Regionalmodellen im Vergleich zu Beobachtungen (ETHZ). a) und b) Niederschlagstage>1mm; c) und d) Niederschlagsintensität für Niederschlagstage>1mm; e) und f) Intensität von Tagesniederschläge für 5-jährliche Ereignisse; für alle Daten ist ein 90% Bootstrap-Konfidenzinterfall gezeigt (aus Frei et al., 2006).....	2-53
Abbildung 2-39: Statistische Beschreibung der Simulationen des Niederschlags im Alpenraum mit den Modellen REMO, CLM, RecCM, HIRHAM im Vergleich zu Beobachtungsdaten (HISTALP, ECA, CRU) für den Winter (DJF, oben) und den Sommer (JJA, unten) für 1961-90 (aus Smiatek et al., 2009).....	2-54
Abbildung 2-40: Statistische Beschreibung der Simulation des Niederschlags im Alpenraum mit den Modellen REMO, CLM, RecCM, HIRHAM im Vergleich zu Beobachtungsdaten (HISTALP, ECA, CRU) für den Winter (DJF, oben) und den Sommer (JJA, unten) für 1961-90 (aus Smiatek et al., 2009).....	2-55
Abbildung 2-41: oben: Darstellung der HISTALP Regionen unten: Darstellung der im Rahmen der Studie Schweiz2050 verwendeten Gitterpunkte zu Unterscheidung der Regionen Nord (CHN, Gitterpunkte mit Kreissignatur) und Süd (CHS, Gitterpunkte mit Dreiecksignatur).	2-57
Abbildung 2-42: Änderungen der saisonalen Mitteltemperaturen in den 4 GAR-Regionen aus CLM (Szenario A1B), dargestellt als horizontale Balken, und aus Ensemble Analysen der Studie „Klimaänderungen und die Schweiz 2050“ (Szenarien A2 und B2), dargestellt werden die Quantilsbereiche im 95% Konfidenzintervall sowie der Median als horizontaler Balken, gemittelt jeweils 30-jährig um die Zeitpunkte 2030, 2050 und 2070 (Datenquelle: Prudence Daten: Frei et al., 2007 und CLM: Hollweg et al., 2008).....	2-58
Abbildung 2-43: Änderungen der saisonalen Niederschlagssummen in den 4 GAR-Regionen aus CLM (Szenario A1B), dargestellt als horizontale Balken, und aus Ensemble Analysen der Studie „Klimaänderungen und die Schweiz 2050“ (Szenarien A2 und B2), dargestellt werden die Quantilsbereiche im 95% Konfidenzintervall sowie der Median als horizontaler Balken, gemittelt jeweils 30-jährig um die Zeitpunkte 2030, 2050 und 2070 (Datenquelle: Prudence Daten: Frei et al., 2007 und CLM: Hollweg et al., 2008).	2-59
Abbildung 2-44: Änderungen des Winterniederschlags (links oben, DJF) und des Sommerniederschlags (rechts oben, JJA), der Zahl der Tage mit Niederschlag größer 20mm (links DJF und rechts JJA), der mittleren Niederschlagsintensität (links DJF und rechts JJA berechnet aus Niederschlagssumme durch Anzahl der Tage mit Niederschlag > 1mm) sowie der Verdunstung im Winter (links unten) und im Sommer (rechts unten) für die Greater Alpine Region (GAR) aus CLM (Szenario A1B) 2021-2050 gegenüber 1976-2007 (Datenquelle CLM: Hollweg et al., 2008).	2-60
Abbildung 2-45: Änderungen der Wintertemperaturen (links oben, DJF) und Sommertemperaturen (rechts oben, JJA) sowie der Tage mit Schneebedeckung im Winter (links unten, DJF) und Sommer (rechts unten, JJA) für die Greater Alpine Region (GAR) aus	

CLM (Szenario A1B) 2021-2050 gegenüber 1976-2007. (Datenquelle CLM: Hollweg et al., 2008).....	2-61
Abbildung 2-46: Klimaänderungssignal des Niederschlags im Alpenraum für 2071-2100 gegenüber 1961-90 aus verschiedenen Regionalen Klimamodellen des PRUDENCE Projektes für den Winter (oben DJF) und den Sommer (unten, JJA) (fre= Niederschlagstage>1mm, mea=Niederschlagssumme, int= Niederschlagsintensität für Niederschlagstage>1mm, q40=40% Perzentil, q90=90% Perzentil, x1d5= Intensität von Tagesniederschläge für 5-jährliche Ereignisse, x1d10= Intensität von Tagesniederschläge für 10-jährliche Ereignisse, x1d50= Intensität von Tagesniederschläge für 50-jährliche Ereignisse; für alle Daten ist ein 90% Bootstrap-Konfidenzinterfall gezeigt (aus Frei et al., 2006).....	2-63
Abbildung 2-47: Statistische Beschreibung des Klimaänderungssignals 2071-2100 gegenüber 1961-90 für den Alpenraum im Winter (DJF). Die Beschreibung der Untersuchungsgebiete (GAR, UG1, UG2, UG3) sowie die Erklärung der statistischen Maßzahlen ist aus Abbildung 2-39 zu ersehen. (aus Smiatek et al., 2009).....	2-64
Abbildung 2-48: Statistische Beschreibung des Klimaänderungssignals 2071-2100 gegenüber 1961-90 für den Alpenraum im Sommer (JJA). Die Beschreibung der Untersuchungsgebiete (GAR, UG1, UG2, UG3) sowie die Erklärung der statistischen Maßzahlen ist aus Abbildung 2-39 zu ersehen. (aus Smiatek et al., 2009).....	2-65
Abbildung 3-1: Saisonalität der Hochwässer in Österreich. Die Farbe gibt das mittlere Auftretensdatum an (z.B. gelb für Mai, blau für Jänner). Die Farbintensität gibt die Intensität der Saisonalität an. Aus Merz und Blöschl (2003).	3-4
Abbildung 3-2: Saisonalität der maximalen täglichen Niederschläge. Die Richtung der Pfeile gibt das mittlere Auftretensdatum an (z.B. nach links für Juli, nach rechts für Jänner). Die Länge der Pfeile gibt die Intensität der Saisonalität an. Oben: Gesamte Reihe; Unten: nur die drei größten Ereignisse. Aus Parajka et al. (2009).....	3-6
Abbildung 3-3: Saisonalität der maximalen jährlichen Hochwässer. Die Richtung der Pfeile gibt das mittlere Auftretensdatum an (z.B. nach links für Juli, nach rechts für Jänner). Die Länge der Pfeile gibt die Intensität der Saisonalität an. Oben: Gesamte Reihe; Unten: nur die drei größten Ereignisse. Aus Parajka et al. (2009).....	3-7
Abbildung 3-4: Saisonalität der Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Datum gegen Jährlichkeit) (a) Teufelmühle, (b) Wienerbruck, (c) Anger, (d) Rattendorf. Die mittlere Gebietshöhe und Einzugsgebietsflächen sind: Teufelmühle: 751 m, 452 km ² ; Wienerbruck: 1013 m, 36 km ² ; Anger: 994 m, 408 km ² ; Rattendorf: 1380 m, 595 km ² . Aus Sivapalan et al. (2005).....	3-8
Abbildung 3-5: Mittlerer monatlicher Niederschlag, mittlerer monatlicher Abfluss, jährlicher maximaler Abfluss und jährlicher maximaler täglicher Niederschlag im Zeitraum 1951-2005. Abfluss gemessen in Rattendorf / Gail (595 km ²) und Niederschlag in Maria Luggau (1140 m a.s.l.). Aus Blöschl et al. (2009).	3-9
Abbildung 3-6: Längsschnitt zu Abbildung 3-7.	3-10
Abbildung 3-7: Saisonalität hydrologischer Größen entlang des Längsschnitts in Abbildung 3-6. Die Farbe zeigt die Jahreszeit unterschieden nach Dekaden. Niederschlagsstationen und Pegel in einem Bereich von 10 km bzw. 25 km vom Längsschnitt. Aus Parajka et al. (2009).....	3-11
Abbildung 3-8: Relative Häufigkeit von Prozesstypen von 11518 Hochwasserereignissen der Jahre 1971-1997. Die Prozesstypen sind (a) Hochwässer zufolge langer Niederschläge, (b) Hochwässer zufolge kurzer Niederschläge, (c) Hochwässer aufgrund von Gewittern, (d) Regen-auf-Schnee Ereignisse und (e) Schneeschmelzhochwässer. Ein großer Wert der Häufigkeit besagt, dass das Jahreshochwasser oft auf diesen Typ zurückzuführen ist. Aus Merz and Blöschl (2003a).....	3-12

Abbildung 3-9: Statistische Hochwassermomente aufgetragen gegen den langfristigen mittleren Niederschlag (MAP) (oben) und den mittleren Ereignisabflussbeiwert der jährlichen Hochwässer (rcfloods) (unten). Einzugsgebiete mit Reihenlängen größer 25 Jahre sind als große Punkte dargestellt, solche mit kürzeren Reihen als kleine Punkte (aus Merz and Blöschl, 2008c).....	3-13
Abbildung 3-10: Jahreshochwässer der Donau bei Wien für 73 Jahre. Fünf der sechs größten Hochwässer sind in den letzten 20 Jahren aufgetreten. (b) Gesamte Reihe 1828-2008.....	3-14
Abbildung 3-11: Betragsmäßige Differenz der hundertjährigen Hochwässer berechnet aus einer Reihe von 25 Jahren im Vergleich zur Gesamtreihe. 0 bedeutet keine Differenz, 1 bedeutet eine Differenz von 100%. Jeder vertikale Balken ist ein Einzugsgebiet. Die Gebiete sind nach aufsteigender Einzugsgebietsfläche sortiert (links befinden sich die großen Gebiete).....	3-15
Abbildung 3-12: Prozent der Pegel mit signifikanten Trends. Dunkelgraue Balken zeigen ansteigenden Trend, hellgraue Balken fallenden Trend. D= Donau, R= Rhein, W= Weser, E= Elbe. AMAXF= Jahreshochwässer, AWMAXF= Winterhochwässer, ASMAXF= Sommerhochwässer.....	3-17
Abbildung 3-13: Hochwasserdekaden in 14 schweizerischen Einzugsgebieten: Schwarz Hochwasserdekaden in großen Gebieten zufolge langandauernder Niederschläge; grau: Hochwasserdekaden in kleinen Gebieten zufolge konvektiver Niederschläge.....	3-18
Abbildung 3-14: Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die gesamte Reihe bis 2007 mit mindestens 80 Jahren. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.....	3-21
Abbildung 3-15: Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1955-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Oben: Gebiete größer 500km ² , unten: Gebiete kleiner 500km ²	3-22
Abbildung 3-16: Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Oben: Gebiete größer 500km ² , unten: Gebiete kleiner 500km ²	3-23
Abbildung 3-17: Trends der Sommermaxima der Hochwässer für die Reihe 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Oben: Gebiete größer 500km ² , unten: Gebiete kleiner 500km ²	3-24
Abbildung 3-18: Trends der Wintermaxima der Hochwässer für die Reihe 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Oben: Gebiete größer 500km ² , unten: Gebiete kleiner 500km ²	3-25
Abbildung 3-19: Zeitreihen der Hochwässer in ausgewählten Einzugsgebieten. Gezeigt ist der maximale jährliche Hochwasserdurchfluss in m ³ /s.....	3-30
Abbildung 3-20: Lage der ausgewählten Pegel. Oben: Gerinnenname. Unten: Pegelname.	3-31
Abbildung 3-21: Unterscheidung der Trendauswertungen nach nördlichen und südlichen Flussgebieten.....	3-32
Abbildung 3-22: Histogramme der Trends in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Flussgebiete. Unten: südliche Flussgebiete lt. Abbildung 3-21 und Tabelle 3-3.....	3-35
Abbildung 3-23: Histogramme der Trends in der Periode 1955 – 2007, mit mindestens 40 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Flussgebiete. Unten: südliche Flussgebiete lt. Abbildung 3-21 und Tabelle 3-3.....	3-36
Abbildung 3-24: Änderungen des HQ ₁₀₀ für die Periode 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990.....	3-40

Abbildung 3-25: Änderungen des HQ_{100} für die Periode 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990.....	3-41
Abbildung 3-26: Verhältnis HQ_{100} für die Periode 2036-2060 und HQ_{100} für die Periode 1971-2000.....	3-42
Abbildung 3-27: Verhältnis HQ_{100} für die Periode 2011-2035 und HQ_{100} für die Periode 1971-2000.....	3-42
Abbildung 3-28: Sensitivität der HQ_{100} bei bestimmten Annahmen der Änderungen im Niederschlag und der Abflussbildung.....	3-45
Abbildung 3-29: Regionen für die Berechnung der Wenn-Dann Szenarien.....	3-46
Abbildung 3-30: Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags 2021-2050 bezogen auf den Kontrolllauf 1961-1990. Modell: CLM (siehe Kapitel 2).....	3-49
Abbildung 3-31: Vorarlb. Süd, Südl. Innzubringer in Tirol (1): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-51
Abbildung 3-32: Vorarlb. Nord, Lech (2): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-51
Abbildung 3-33: Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach (3): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-52
Abbildung 3-34: Traun, Enns, Erlauf, Traisen und Zubringer (4): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-52
Abbildung 3-35: Innviertel, Mühlviertel (5): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-53
Abbildung 3-36: Waldviertel (6): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-53
Abbildung 3-37: Osten Österreichs (7): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-54
Abbildung 3-38: Mur, Mürz und Zubringer, Gurk, Raab (8): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-54
Abbildung 3-39: Obere Salzach, Isel, Möll (9): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-55
Abbildung 3-40: Gail u. Zubringer (10): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-55
Abbildung 3-41: Vorarlb. Süd, Südl. Innzubringer in Tirol (1): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ_{100} in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-57
Abbildung 3-42: Vorarlb. Nord, Lech (2): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ_{100} in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-58

Abbildung 3-43: Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach (3): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).	3-59
Abbildung 3-44: Traun, Enns, Erlauf, Traisen und Zubringer (4): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).	3-60
Abbildung 3-45: Innviertel, Mühlviertel (5): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-61
Abbildung 3-46: Waldviertel (6): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-62
Abbildung 3-47: Osten Österreichs (7): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-63
Abbildung 3-48: Mur, Mürz und Zubringer, Gurk, Raab (8): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-64
Abbildung 3-49: Obere Salzach, Isel, Möll (9): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-65
Abbildung 3-50: Gail u. Zubringer (10): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).....	3-66
Abbildung 3-51: Saisonalität der Jahreshochwässer in den Regionen nach Abbildung 3-29 Grau: beobachtete Saisonalität aller Datenreihen in jeder Region bis 1997 (Gebiete kleiner 1000 km ²). Grün: Simulationen für den gleichen Zeitraum. Strichlierte vertikale Linien zeigen den Mittelwert.	3-67
Abbildung 3-52: Sensitivität der HQ ₁₀₀ bei bestimmten Annahmen der Änderungen im Niederschlag und der Abflussbildung (Wenn-Dann Szenarien 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007).....	3-68
Abbildung 3-53: Generalisierte Änderungen des HQ ₁₀₀ aus den Szenarienanalysen (Delta-Change) für die einzelnen Mechanismen. 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006.....	3-69
Abbildung 3-54: Generalisierte Änderungen des HQ ₁₀₀ aus den Szenarienanalysen (Delta-Change) für alle Mechanismen gemeinsam. 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006.....	3-69
Abbildung 3-55: Generalisierte Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1955-2007 (mindestens 40 Jahre). Markiert wurden die Regionen nach Abbildung 3-29, in denen mehr als die Hälfte der Stationen signifikante Trends in dieser Periode aufwies (nach Tabelle 3-6).....	3-70
Abbildung 3-56: Generalisierte Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1976-2007 (mindestens 25 Jahre). Markiert wurden die Regionen nach Abbildung 3-29 in denen mehr als die Hälfte der Stationen signifikante Trends in dieser Periode aufwies (nach Tabelle 3-6).....	3-70
Abbildung 4-1: Beispiele für unterschiedliche Abflussregimes in Österreich: Regen Regime (Ried im Innkreis), Voralpines Schnee Regime (Wienerbruck), Alpines Schnee Regime (Kühtai) und Herbstniederschlags Regime (Rattendorf). Gezeichnet ist der beobachtete Abfluss im Jahr 2000 als Beispiel Lage der Pegel siehe Abbildung 4-2.	4-5

Abbildung 4-2. Lage der in Abbildung 4-1 verwendeten Pegel (Rot: Ried im Innkreis; Schwarz: Wienerbruck, Grün: Kühtai; Magenta: Rattendorf)	4-6
Abbildung 4-3: Komponenten der Wasserbilanz für vier Einzugsgebiete mit unterschiedlichem Abflussregime: Regen Regime (Ried im Innkreis), Voralpines Schnee Regime (Wienerbruck), Alpines Schnee Regime (Kühtai), Herbstniederschlags Regime (Rattendorf). Niederschlag und Abfluss ist beobachtet, Verdunstung (ET) und Schneewasserwert (SWE) sind mittels Wasserbilanzmodellierung berechnet. Mittelwerte 1976-2001. Die Balken zeigen die Variabilität innerhalb des Monats und zwischen den Jahren. Lage der Pegel siehe Abbildung 4-2.	4-7
Abbildung 4-4: Saisonalität der Monatsniederschläge (oben) und Saisonalität der Monatsabflüsse (unten) für die Jahre 1951-1997. Eingetragen ist der Monat in dem im Mittel das Maximum auftritt (Farbe) sowie die Intensität der Saisonalität (starke Saisonalität dunkel, schwache Saisonalität hell). Aus Merz und Blöschl (2005).	4-8
Abbildung 4-5: Mittlerer monatlicher Niederschlag, mittlerer monatlicher Abfluss, jährlicher maximaler Abfluss und jährlicher maximaler täglicher Niederschlag im Zeitraum 1951-2005. Abfluss gemessen in Rattendorf / Gail (595 km ²) und Niederschlag in Maria Luggau (1140 m a.s.l.). Aus Blöschl et al. (2009).	4-9
Abbildung 4-6: Mittlerer monatlicher Abfluss am Pegel Donau/Krems für die Zeiträume 1893-1975 und 1976-2008.	4-10
Abbildung 4-7: Mittlerer monatlicher Padé-Koeffizient ($MQ_{\text{mon}}/MQ_{\text{jahr}}$) am Pegel Donau/Krems für die Zeiträume 1893-1975 und 1976-2008.	4-11
Abbildung 4-8: Räumliche Verteilung der beobachteten mittleren Abflussspenden in l/s/km ² für den Zeitraum 1976-2006 sowie Vierteljahresabflüsse.	4-12
Abbildung 4-9: Trends der Jahres- und Vierteljahresabflüsse für die Periode 1976-2007. Pegel mit mindestens 25 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.	4-15
Abbildung 4-10: Trends der Jahres- und Vierteljahresniederschläge für die Periode 1976-2007. Pegel mit mindestens 25 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.	4-16
Abbildung 4-11: Trends der Jahres- und Vierteljahresabflüsse für die Periode 1950-2007. Pegel mit mindestens 45 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.	4-17
Abbildung 4-12: Trends der Jahres- und Vierteljahresniederschläge für die Periode 1950-2007. Pegel mit mindestens 45 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.	4-18
Abbildung 4-13: Trends der durch das Klimamodell CLM simulierten Jahres- und Vierteljahresniederschläge für die Periode 1976-2007. Große Quadrate blau: steigende Trends, Große Quadrate rot: fallende Trends.	4-19
Abbildung 4-14: Zeitreihen der Niederwässer in ausgewählten Einzugsgebieten. Gezeigt ist der Wert MQ in m ³ /s.	4-24
Abbildung 4-15: Lage der ausgewählten Pegel. Oben: Gerinnenname. Unten: Pegelname.	4-25
Abbildung 4-16: Unterscheidung der Trendauswertungen nach nördlichen und südlichen Flussgebieten.	4-26
Abbildung 4-17: Histogramme der Trends in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Flussgebiete. Unten: südliche Flussgebiete.	4-28

Abbildung 4-18: Histogramme der Trends in der Periode 1950 – 2007, mit mindestens 45 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Flussgebiete. Unten: südliche Flussgebiete.....	4-29
Abbildung 4-19: Mittlere Werte des Niederschlages, der Lufttemperatur, der potentiellen Verdunstung, des Abflusses, des Verhältnisses von Abfluss zu Niederschlag (Q/P) und der Schneebedeckung für sechs 5-Jahresperioden im Zeitraum 1976-2006. Schwarze Linie: alle Gebiete, blaue Linie: feuchtere Gebiete mit langfristigem Verhältnis von potentielle Verdunstung zu Niederschlag kleiner als 0,35; rote Linie: trockenere Gebiete mit langfristigem Verhältnis von potentieller Verdunstung zu Niederschlag größer als 0,6 (siehe Abbildung 4-21).....	4-31
Abbildung 4-20: Mittlerer Ereignisabflussbeiwert für sechs 5-Jahresperioden im Zeitraum 1976-2006. (Farbcodierung siehe Abbildung 4-19).....	4-32
Abbildung 4-21: Lage der Pegel mit Ariditätsindex (potentielle Verdunstung / Niederschlag) < 0,35 (dunkelblau) und Ariditätsindex > 0,6 (rot).	4-32
Abbildung 4-22: Abflusssimulationen für den Neukaser Zamserbach (24 km ²)	4-34
Abbildung 4-23: Abflusssimulationen für die Donau bei Wien	4-35
Abbildung 4-24: Vergleich der Mittelwerte der simulierten und beobachteten Abflüsse	4-35
Abbildung 4-25: Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlages 2021-2050 bezogen auf den Kontrolllauf 1976-2006. Modell: CLM (siehe Berichtsteil 2 – Klima, Schöner et al.). Diese Änderungen bilden die Grundlage für den hier verwendeten Delta-Change Ansatz der Szenarienanalyse.....	4-36
Abbildung 4-26: Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlages 2021-2050 bezogen auf den Kontrolllauf 1961-1990. Modell: CLM (siehe Berichtsteil 2 – Klima, Schöner et al.). Diese Änderungen dienen zum Vergleich und wurden in der Szenarienanalyse nicht verwendet.....	4-37
Abbildung 4-27: Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses in % für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.....	4-39
Abbildung 4-28: Unsicherheiten des simulierten Abflusses: Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit unterschiedlichen plausiblen Parametern des Niederschlag-Abflussmodells. Angenommen wird hier, dass die Szenarien des Niederschlages und der Lufttemperatur vollständig zutreffen.	4-40
Abbildung 4-29: Zeitpunkt des Maximums der wöchentlichen Abflüsse	4-41
Abbildung 4-30: Zeitpunkt des Minimums wöchentlichen Abflüsse	4-42
Abbildung 4-31: Änderung des Zeitpunktes des Maximums und des Minimums des wöchentlichen Abflüsse für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Einheit sind Wochen. Rot bedeutet, dass der Abfluss im Zeitraum 2021-2050 früher auftreten wird.	4-43
Abbildung 4-32: Verschiebung des Abflussregimes für den Zeitraum 2021-50 (Szenario - rot) im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 (simuliert - blau und beobachtet - grün)	4-47
Abbildung 4-33: Mittlerer jährlicher Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur für den Zeitraum 1976-2006.	4-49
Abbildung 4-34: Elastizität des Abflusses auf eine Änderung des Niederschlages (oben) bzw. auf eine Änderung der Lufttemperatur (unten).	4-50
Abbildung 4-35: Prozentuelle Änderung des jährlichen Abflusses als Funktion der Änderungen des jährlichen Niederschlages und der Lufttemperatur. Median der jährlichen	

Werte 1976-2006, jeweils Oktober-September für 506 Einzugsgebiete mittels der Elastizitätsmethode.....	4-51
Abbildung 4-36: Änderungen des mittleren jährlichen Niederschlages und der mittleren jährlichen Lufttemperatur nach dem CLM Modell für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006. Diese Änderungen wurde als Basis für die Ergebnisse in Abbildung 4-37 verwendet.....	4-51
Abbildung 4-37: Änderungen (%) des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit der Elastizitätsmethode unter Verwendung der CLM Simulationen in Abbildung 4-36. Blau: Zunahme, rot: Abnahme....	4-52
Abbildung 4-38: Mittlerer jährlicher Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur für den Zeitraum 1976-2006.....	4-54
Abbildung 4-39: Beziehung zwischen Index für die langfristige jährliche potentielle Verdunstung EPI und der langfristigen mittleren jährlichen Lufttemperatur für 291 Einzugsgebiete in Österreich (Punkte). Die rote Linie ist die für Österreich angepasste Beziehung, die strichlierte Linie ist die originale Beziehung nach Turc.....	4-54
Abbildung 4-40: Vergleich der mittels des Turc Modelles berechneten mittleren jährlichen Abflüsse mit den beobachteten mittleren jährlichen Abflüssen für 291 Einzugsgebiete (jeweils Mittelwerte für den Zeitraum 1976-2006.....	4-55
Abbildung 4-41: Mittlerer jährlicher Abfluss (mm) für den Zeitraum 1976-2006 berechnet mittels des Turc Modells.....	4-55
Abbildung 4-42: Änderungen des mittleren jährlichen Niederschlages und der mittleren jährlichen Lufttemperatur nach dem CLM Modell für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006. Diese Änderungen wurde als Basis für die Ergebnisse in Abbildung 4-43 verwendet.....	4-56
Abbildung 4-43: Änderungen (%) des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Turc Modell (Trading space for time) unter Verwendung der CLM Simulationen in Abbildung 4-42. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.....	4-56
Abbildung 4-44: Sensitivität (%) des langfristigen mittleren jährlichen Abflusses auf Änderungen des mittleren jährlichen Niederschlages (N in %) und der mittleren jährlichen Lufttemperatur (T in °C) auf Basis des Turc Modells (Trading space for time).....	4-57
Abbildung 4-45: Zusammenschau der Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 nach den vier Methoden.....	4-58
Abbildung 4-46: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Speicher von Gletschern und deren zugehörige Zeitskala (aus Koboltschnig, 2007 modifiziert nach Jansson et al., 2003).....	4-59
Abbildung 4-47: Das hydrologische System und die Lage von Wasserspeichern in einem temperierten Gletscher (modifiziert nach Röthlisberger & Lang, 1997).....	4-59
Abbildung 4-48: Zeitreihen der Massenbilanz für verschiedene Gebirgstruppen in Österreich (aus Schöner et al., 1998).....	4-61
Abbildung 4-49: Vergleich langjähriger Mittel (1961-90) monatlicher Niederschlagssummen von Stationen im Gebiet des Hintereisferners (Öztaler Alpen) und der Goldberggruppe, die sich etwa auf gleicher Seehöhe befinden (aus Koboltschnig 2007).....	4-65
Abbildung 4-50: Zukunftsszenarien des Abflusses und des Anteils der Eisschmelze für das Flussgebiet des Inns für ausgewählte Pegel mit stark unterschiedlichem Anteil der Vergletscherung (aus Weber et al. (2009).....	4-66

Abbildung 4-51: Zukunftsszenarien (IPCC A1B Zeitpunkt nicht angegeben) des Abflusses für 2 Teileinzugsgebiete das Flussgebiet des Inns (Pegel Gepatsch und Pegel Radurschl) mit stark unterschiedlichem Anteil der Vergletscherung (aus Kuhn et al. (2007))	4-67
Abbildung 4-52: Modellierter und gemessener Abfluss (Gesamt und Eisschmelze) für den Pegel Mittersill im Einzugsgebiet Oberer Pinzgau für das Jahr 2003 (aus Koboltschnig et al. (2008))	4-67
Abbildung 4-53: Stundenmittel des Abflusses und der Niederschlagsintensität an der Pegelstation-Vernagtbach (2640m). Die Höhenlage der Nullgradgrenze im Einzugsgebiet wurde anhand der Temperatur- und Feuchtemessungen an den Klimastationen Vernagtbach, Schwarzkögele (3074m) und Gletschermitte (3075m) abgeleitet (aus Braun und Weber, 2006).....	4-69
Abbildung 5-1: Saisonalitätsverhältnis $Q_{95\text{som}}/Q_{95\text{win}}$ (325 Zwischen-EG, 1977-1996). Rot zeigt Sommerniederwässer, blau zeigt Winterniederwässer. Aus: Laaha and Blöschl (2006)..	5-5
Abbildung 5-2: Saisonalität der Niederwässer. Die Richtung der Pfeile gibt das mittlere Auftretensdatum an (z.B. nach links für Juli, nach rechts für Jänner). Die Länge der Pfeile gibt die Intensität der Saisonalität an. Saisonalitätsindex (325 Zwischen-EG, 1977-1996) Aus: Laaha and Blöschl (2006).....	5-5
Abbildung 5-3: Mittlere Niederwasserspende Q_{95} (325 Zwischen-EG, 1977-1996). Aus: Laaha and Blöschl (2006).....	5-6
Abbildung 5-4: Räumliche Verteilung der Q_{95} Niederwasserdurchflüsse in $l/s/km^2$ für den Zeitraum 1976-2006 sowie Vierteljahresniederwässer.....	5-7
Abbildung 5-5: Beeinflussungen der Abflussmessstellen. Datengrundlage: Stationsdaten und Pegelfußnoten des Hydrografischen Jahrbuchs.	5-8
Abbildung 5-6: Niederwasserdurchfluss des Jahres 2003 (NQ _t). Aus (Laaha und Blöschl, 2007c).....	5-8
Abbildung 5-7: Niederwasserdurchfluss des Jahres 2003 (NQ _t) in Bezug zu Q_{95} (325 Zwischen-EG, 1977-1996). Aus Laaha und Blöschl (2007c).....	5-9
Abbildung 5-8: Trends der Jahres- und Vierteljahresniederwasserdurchflüsse Q_{95} für die Periode 1950-2007. Pegel mit mindestens 45 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Kreuze zeigen Pegel, die durch Überleitung/Speicher beeinflusst sind lt. Abbildung 5-5. .	5-12
Abbildung 5-9: Trends der Jahres- und Vierteljahresniederwasserdurchflüsse Q_{95} für die Periode 1976-2007. Pegel mit mindestens 25 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Kreuze zeigen Pegel, die durch Überleitung/Speicher beeinflusst sind lt. Abbildung 5-5. .	5-13
Abbildung 5-10: Zeitreihen der Niederwasserdurchflüsse in ausgewählten Einzugsgebieten. Gezeigt ist der Wert Q_{95} in m^3/s	5-18
Abbildung 5-11: Lage der ausgewählten Pegel. Oben: Gerinnenname. Unten: Pegelname.	5-19
Abbildung 5-12: Zeitreihe der saisonalen Niederwasserdurchflüsse (Winter Q_{95} u. Sommer Q_{95}) am Pegel Donau/Krems für die Periode 1893-2008.	5-20
Abbildung 5-13: Histogramme der Trends der Niederwasserdurchflüsse in der Periode 1950 – 2007, mit mindestens 45 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: mittlere Einzugsgebietshöhe unter 900 m. Unten: mittlere Einzugsgebietshöhe über 900 m. Alle Pegel sind ausgezählt, beeinflusste und unbeeinflusste.	5-22
Abbildung 5-14: Histogramme der Trends der Niederwasserdurchflüsse in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte:	

mittlere Einzugsgebietshöhe unter 900 m. Unten: mittlere Einzugsgebietshöhe über 900 m. Alle Pegel sind ausgezählt, beeinflusste und unbeeinflusste.	5-23
Abbildung 5-15: Histogramme der Trends der Niederwasserdurchflüsse in der Periode 1950 – 2007, mit mindestens 45 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: mittlere Einzugsgebietshöhe unter 900 m. Unten: mittlere Einzugsgebietshöhe über 900 m. Nur die unbeeinflussten Pegel sind ausgezählt.	5-25
Abbildung 5-16: Histogramme der Trends der Niederwasserdurchflüsse in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: mittlere Einzugsgebietshöhe unter 900 m. Unten: mittlere Einzugsgebietshöhe über 900 m. Nur die unbeeinflussten Pegel sind ausgezählt.	5-26
Abbildung 5-17: Verhältnis Sommer-MNQ für die Periode 2021-2050 und Sommer-MNQ für die Periode 1971-2000.	5-28
Abbildung 5-18: Verhältnis MNQ für die Periode 2021-2050 und MNQ für die Periode 1971-2000.	5-29
Abbildung 5-19: Verhältnis NJ7Q50 für Periode 2011-2035 und NJ7Q50 für die Periode 1971-2000.	5-29
Abbildung 5-20: Verhältnis NJ7Q50 für Periode 2036-2060 und NJ7Q50 für die Periode 1971-2000.	5-30
Abbildung 5-21: Änderungen in % des Q_{95} Niederwasserdurchflusses für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.	5-32
Abbildung 5-22: Unsicherheiten des simulierten Abflusses: Änderungen in % des Q_{95} Niederwasserdurchflusses für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit unterschiedlichen plausiblen Parametern des Niederschlag-Abflussmodells. Angenommen wird hier, dass die Szenarien des Niederschlags und der Lufttemperatur vollständig zutreffen.	5-33
Abbildung 5-23: Generalisierte Änderungen der Q_{95} Niederwasserdurchflüsse aus den Szenarienanalysen (Delta-Change) entsprechend Abbildung 5-21. 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006.	5-34
Abbildung 5-24: Generalisierte Trends von Jahresmaxima der Q_{95} Niederwasserdurchflüsse für die Reihe 1950-2007 (mindestens 40 Jahre) entsprechend Abbildung 5-8.	5-35
Abbildung 5-25: Generalisierte Trends von Jahresmaxima der Q_{95} Niederwasserdurchflüsse für die Reihe 1976-2007 (mindestens 25 Jahre) entsprechend Abbildung 5-9.	5-35
Abbildung 6-1: Entwicklung der Methode zur Messung der Wassertemperatur an Oberflächengewässern in Österreich (ZP ... Schöpfthermometer zum Zeitpunkt, TM ... Tagesmittelwert der analogen Aufzeichnung, DS ... Datensammler)	6-3
Abbildung 6-2: Beobachtete mittlere jährliche Wassertemperatur (°C) der Periode 1976-2007.	6-4
Abbildung 6-3: Abhängigkeit der mittleren jährlichen Wassertemperatur von der Stationshöhe	6-5
Abbildung 6-4: Mittlere jährliche Wassertemperatur (°C) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).	6-5
Abbildung 6-5: Mittlere Wassertemperatur (°C) im Frühling (März-Mai) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).	6-6
Abbildung 6-6: Mittlere Wassertemperatur (°C) im Sommer (Juni-Aug.) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).	6-6

Abbildung 6-7: Mittlere Wassertemperatur (°C) im Herbst (Sept.-Nov.) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).....	6-7
Abbildung 6-8: Mittlere Wassertemperatur (°C) im Winter (Dez.-Feb.) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).	6-7
Abbildung 6-9: Trends in mittl. Gewässertemperaturen für die Reihe 1976-2007: Große Kreise rot: steigende Trends, Große Kreise blau: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.	6-9
Abbildung 6-10: Trends in mittl. Gewässertemperaturen für die Reihe 1986-2007: Große Kreise rot: steigende Trends, Große Kreise blau: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.	6-10
Abbildung 6-11: Zeitreihen der mittleren Wassertemperaturen in ausgewählten Fließgewässern. Schwarz: Jahresmittel, Grün: Frühjahr, Gelb: Sommer. Rot: Herbst, Blau: Winter.....	6-12
Abbildung 6-12: Histogramme der jährlichen Trends in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: Pegelhöhe unter 500 m. Unten: Pegelhöhe über 900 m.	6-13
Abbildung 6-13: Histogramme der saisonalen Trends in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich Sommer. Unten: ganz Österreich Winter.	6-14
Abbildung 6-14: Histogramme der jährlichen Trends in der Periode 1986 – 2007, mit mindestens 15 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: Pegelhöhe unter 500 m. Unten: Pegelhöhe über 900 m.	6-15
Abbildung 6-15: Histogramme der saisonalen Trends in der Periode 1986 – 2007, mit mindestens 15 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich Sommer. Unten: ganz Österreich Winter.	6-16
Abbildung 6-16: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Veränderung der Lufttemperatur.....	6-17
Abbildung 6-17: Mittlere jährl. Wassertemperaturen aufgetragen gegen die mittleren Lufttemperaturen des Klimamodells (CLM) in der Periode 1976-2007. (Jeder Punkt entspricht einem Pegel). Mitte: Mittl. Wassertemperaturen aufgetragen gegen die mittleren Lufttemperaturen des Klimamodells für die einzelnen Jahreszeiten. Unten: Mittl. Wassertemperaturen aufgetragen gegen die mittleren beobachteten Lufttemperaturen (Gebietsmittel).	6-19
Abbildung 6-18: Oben: Steigung der zeitl. Regressionsgeraden zwischen Jahresmittelwerten der CLM Lufttemperatur und der Wassertemperatur. Unten: Steigung der zeitl. Regressionsgeraden zwischen Jahresmittelwerten der beobachteten Lufttemperatur und der Wassertemperatur. 1976-2007.	6-20
Abbildung 6-19: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren jährlichen Wassertemperatur (°C) von 1976-2007 zu 2021-2050.	6-21
Abbildung 6-20: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Frühling (März-Mai) von 1976-2007 zu 2021-2050.	6-22
Abbildung 6-21: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Sommer (Juni-Aug.) von 1976-2007 zu 2021-2050.	6-22
Abbildung 6-22: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Herbst (Sep.Nov.) von 1976-2007 zu 2021-2050.....	6-23

Abbildung 6-23: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Winter (Dez.-Feb.) von 1976-2007 zu 2021-2050.....	6-23
Abbildung 6-24: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren jährlichen Wassertemperatur (°C) von 1961-1990 zu 2021-2050.	6-24
Abbildung 6-25: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Frühling (März-Mai) von 1961-1990 zu 2021-2050.	6-24
Abbildung 6-26: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Sommer (Juni-Aug.) von 1961-1990 zu 2021-2050.	6-25
Abbildung 6-27: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Herbst (Sep.Nov.) von 1961-1990 zu 2021-2050.....	6-25
Abbildung 6-28: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Winter (Dez.-Feb.) von 1961-1990 zu 2021-2050.....	6-26
Abbildung 7-1: Steinschlag im Krummgampental (Kاونertal) Foto: Krainer.....	7-3
Abbildung 7-2: Übersicht der Permafrostkartierung Krummgampental (Kاونertal). Krainer pers. Mitt.	7-3
Abbildung 7-3: Untersuchungsgebiete Permafrost. Krainer pers. Mitt.....	7-4
Abbildung 7-4: Zeitreihe rekonstruierter Murganghäufigkeiten für den Ritigraben in der Schweiz (Stoffel und Beniston, 2006).....	7-5
Abbildung 7-5: Lufttemperatur (Dreiecke) und Abflüsse (Karas) in den Sommermonaten Juni, Juli und August von 1967 bis 2008 für den Pegel Vent an der Rofenache (96,2 km ²). Aus Müller et al. (2009).	7-6
Abbildung 7-6: Zeitreihe des Geschiebes bei Vent an der Rofenache (96,2 km ²).	7-7
Abbildung 7-7: Schwebstoffe: Lienz-Falkensteinsteg/Drau (668 km ²).....	7-8
Abbildung 7-8: Schwebstoffe: Innsbruck/Inn (5792 km ²).....	7-9
Abbildung 7-9: Schwebstoffe: Kössen-Hütte/Grossache (701,4 km ²).....	7-10
Abbildung 7-10: Permafrostverteilung in Österreich. Aus Ebohon und Schrott (2008).	7-11
Abbildung 7-11: Potentielle Permafrostverteilung in der Schweiz. Aus Bommer et al. (2009).	7-12
Abbildung 7-12: Hypsometrische Kurve Österreichs (Höhen über 1000 m).	7-13
Abbildung 8-1: Trends der Jahresniederschläge für die Periode 1976-2007 (siehe Kapitel 4)	8-4
Abbildung 8-2: Trends der Niederschlagssummen für Winter und Frühjahr für die Jahresreihe 1976 bis 2007 (Kapitel 4).....	8-4
Abbildung 8-3: Niederschlagssummen für die Sommer- und Herbstperiode für Österreich der Jahresreihe 1976 bis 2007 (Kapitel 4).	8-5
Abbildung 8-4: Mittlere Jahresabflüsse für Österreich für die Periode 1976 bis 2007 (Kapitel 4).....	8-5
Abbildung 8-5: Niederwasserabflüsse (Q95) für Österreich für die Periode 1976 bis 2007 (Kapitel 5).....	8-6
Abbildung 8-6: Jahresmitteltemperaturen aus HISTALP-Stationsdaten für die Normalperiode 1961-1990 (ZAMG)	8-7
Abbildung 8-7: Mittlere jährliche Wassertemperatur (°C) der Periode 1976-2007 (Kapitel 6) ...	8-7

Abbildung 8-8: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-9
Abbildung 8-9: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006 mit den Standorten der Wasserkraftwerke.....	8-10
Abbildung 8-10: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Westen Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-10
Abbildung 8-11: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Süden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-11
Abbildung 8-12: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-11
Abbildung 8-13: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Norden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-12
Abbildung 8-14: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-12
Abbildung 8-15: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für den Westen Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-13
Abbildung 8-16: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für den Süden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-13
Abbildung 8-17: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-14
Abbildung 8-18: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für den Norden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-15
Abbildung 8-19: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-15
Abbildung 8-20: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für den Westen Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-16
Abbildung 8-21: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für den Süden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-16
Abbildung 8-22: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-17
Abbildung 8-23: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für den Norden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-18
Abbildung 8-24: Ganglinie der Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes der Messstelle 318477 im Unteren Murtal – im Ufernahbereich der Mur.	8-19
Abbildung 8-25: Ganglinie der Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes der Messstelle 317602 im Süden des Südlichen Wiener Beckens.	8-19
Abbildung 8-26: Ganglinie der Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes der Messstelle 303784 im Nördlichen Tullner Feld – im Ufernahbereich der Donau.....	8-20
Abbildung 8-27: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-20
Abbildung 8-28: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für den Westen Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-21
Abbildung 8-29: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für den Süden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-21

Abbildung 8-30: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-22
Abbildung 8-31: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für den Norden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.	8-23
Abbildung 8-32: Zusammenhang der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur mit der Lufttemperatur für Österreich basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006 ...	8-23
Abbildung 8-33: Ganglinie der Jahresmittelwerte der Grundwasser- und Lufttemperatur der Messstelle 311548 im Leibnitzer Feld.....	8-24
Abbildung 8-34: Verteilung der Häufigkeit des Trends für die mittleren Jahresgrundwasserstände getrennt für alle und nur die signifikanten Trends. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Messstellen. Unten: südliche Messstellen.	8-27
Abbildung 8-35: Verteilung der Häufigkeit des Trends für die maximalen Jahresgrundwasserstände getrennt für alle und nur die signifikanten Trends. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Messstellen. Unten: südliche Messstellen.	8-28
Abbildung 8-36: Verteilung der Häufigkeit des Trends für die minimalen Jahresgrundwasserstände getrennt für alle und nur die signifikanten Trends. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Messstellen. Unten: südliche Messstellen.	8-29
Abbildung 8-37: Verteilung der Häufigkeit des Trends für die mittleren Jahresgrundwassertemperaturen getrennt für alle und nur die signifikanten Trends.	8-30
Abbildung 8-38: Änderungen im Niederschlag und der Temperatur auf Basis des gewählten Klimaszenarios B1 (Kapitel 4).	8-42
Abbildung 8-39: Änderungen der mittleren Abflüsse (Kapitel 4).....	8-43
Abbildung 8-40: Änderungen in % des Niederschlags für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot : Abnahme (Kapitel 5).....	8-43
Abbildung 9-1: Mittlere Jahrestemperaturen einzelner österreichischer Seen.....	9-5
Abbildung 9-2: Zeitliche Entwicklung der mittleren Quartalstemperaturen am Neusiedler See (links) und am Hallstätter See (rechts).....	9-6
Abbildung 9-3: Trend der Temperaturdaten seit 1976 nach Jahreszeiten an zwei Messstellen im Attersee.....	9-6
Abbildung 9-4: Mittlere Jahressgänge des Bodenseepiegels Konstanz für verschiedene Zeiträume ab 1817. Aus KLIWA (2007)	9-7
Abbildung 9-5: Mittlere geglättete Jahresverläufe der Alpenrheinzuflussmengen für verschiedene Zeiträume. Oben: ab 1919, unten ab 1960. Zeitfenster der Glättung: +/- 10 Tage. Aus KLIWA (2007).....	9-8
Abbildung 9-6: Oben: Abkühlungsszenario um -4°C. Unten: Erhöhungsszenario um +1°C. Blau: Referenztemperatur, rot: Szenariotemperatur, grün: Differenz der Tiefentemperatur. Zacken in der Tiefentemperatur weisen auf einen vertikalen Austauschvorgang hin, im Erhöhungsszenario treten weniger dieser Zacken auf. Aus KLIWA (2009)	9-12
Abbildung 9-7: Änderungen der Monatsmitteltemperaturen in den Szenarien 2020er-Jahre und 2040er-Jahre.	9-14
Abbildung 9-8: Szenario 1961 – 1990 (links) und Szenario 1991 – 2004 (rechts).....	9-14
Abbildung 9-9: Szenario 2020er-Jahre mit Variation des Niederschlags und Auswirkung auf die Pegelstände.....	9-15

Abbildung 9-10: Einfluss der Dotierungsmenge (0, 1, 2, 4 m ³ /s) auf minimale und maximale Jahrespegel, Szenario 2040. Aus Kubu (2006)	9-16
Abbildung 10-1: Abflusslinienpotenzial (nach Weiss & Faeh, 1990).....	10-3
Abbildung 10-2: Räumliche Verteilung der beobachteten mittleren Abflusspenden in l/s/km ² für den Zeitraum 1976-2006 sowie Vierteljahresabflüsse.	10-4
Abbildung 10-3: Räumliche Verteilung des mittleren jährlichen Wasserkraftpotenzials in GWh/a/km für die Periode 1976-2006 sowie Vierteljahrespotenziale.....	10-6
Abbildung 10-4: Räumliche Verteilung des Wasserkraftpotenzials mit und ohne Vernachlässigung kleiner Seitenbäche (Q<1m ³ /s).....	10-7
Abbildung 10-5: Saisonale Verteilung des Wasserkraftpotenzials in Österreich.	10-7
Abbildung 10-6: Monatliche Verteilung des Potenzials in Österreich (GWh)	10-8
Abbildung 10-7: Inlandstromverbrauch für das Jahr 2009 (nach E-Control) (GWh)	10-8
Abbildung 10-8: Änderungen in % des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.....	10-11
Abbildung 10-9: Änderungen des mittleren jährlichen Wasserkraftpotenzial für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell (in %). Blau: Zunahme, rot: Abnahme. Graue Punkte zeigen Lage der Wasserkraftanlagen nach HAÖ Karte 9.1.....	10-12
Abbildung 10-10: Änderungen der jahreszeitlichen Verteilung des Wasserkraftpotenzials	10-13
Abbildung 10-11: Leistung in Abhängigkeit vom Durchfluss für ausgewählte Donaukraftwerke	10-14
Abbildung 10-12: Jährlicher Verlauf des Abflusses (links) und des ausgebauten Potentials (rechts) für die Periode 1976-2006 (blau) und die Periode 2021-2050 (rot) für ausgewählte Donaukraftwerke.	10-15
Abbildung 10-13: Jährlicher Verlauf des Abflusses (links) und des ausgebauten Potentials (rechts) für die Periode 1976-2006 (blau) und die Periode 2021-2050 (rot) für ausgewählte Donaukraftwerke.	10-16
Abbildung 10-14: Jährlicher Verlauf des Abflusses (links) und des ausgebauten Potentials (rechts) für die Periode 1976-2006 (blau) und die Periode 2021-2050 (rot) für ausgewählte Donaukraftwerke.	10-17
Abbildung 11-1: Zusammenhang zwischen Komplexität und Unsicherheit von Projektionen für unterschiedliche thematische, räumliche und zeitliche Integrationsebenen (verändert nach LAWA 2009). Bereiche, die nach dem heutigen Stand des Wissens (1) weitgehend gesicherte harte, (2) weiche oder (3) nur spekulative Aussagen zulassen.....	11-4
Abbildung 11-2: Skizzenhafte Darstellung von Planung, Ausprägung und Veränderungen der klimatischen Rahmenbedingungen (verändert nach Glen et.al. 2010).....	11-5
Abbildung 11-3: Zeitliche Entwicklung der Phosphorimmissionen und Wassertemperaturtrend für die Donau oberhalb Wiens.	11-6
Abbildung 11-4: Entwicklung der Wassertemperatur der Donau bei Spitz. Tagesmittelwerte als Temperaturganglinie, Quartalsmittelwerte für Winter (DJF), Frühjahr (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) sowie Trendentwicklung für den Zeitraum 1991 bis 2007.....	11-11
Abbildung 11-5: Saisonale Mittelwerte über aller HZB Daten 1974-2007 (Winter (DJF), Frühjahr (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON)) sowie Darstellung eines linearen Trends. Deutlicher Trend im Sommer (+1°C), geringer Trend im Frühjahr (+0,5°C), kein Trend im Herbst/Winter	11-11

Abbildung 11-6: Zusammenhang Temperatur und Sauerstofflöslichkeit (100% Sättigungskonzentration) in wässrigen Lösungen.....	11-12
Abbildung 11-7: Überschreitungen des Ammoniumgrenzwertes der QZV-Chemie als Summenlinie in Abhängigkeit von der Immissionstemperatur. Datensatz: 44550 Datensätze des Immissionsmonitorings 1991-2009	11-15
Abbildung 11-8: Vergleich der Wassertemperaturen als langjähriger Trend (1998-2008) sowie die Situation 2007 im Gewässer sowie im Uferfiltrat	11-18
Abbildung 11-9:a) Vergleich der Orthophosphatkonzentrationen (SRP) sowie b) Silikatkonzentrationen (Si) als langjähriger Trend (1998-2008) sowie die Situation 2007 im Gewässer sowie im Uferfiltrat	11-19
Abbildung 12-1: modellierte Reduktion einer Kraftwerksleistung (kalisches KW) infolge geltender thermischer Einleitkriterien für die Realjahre 1991-2003 sowie extrapoliert auf den Zeitraum 2038-2050	12-8
Abbildung 12-2: Basisdaten aus dem CLM Modellauf Zeitraum 2020-2050 als Eingangsgröße für die Abschätzung des zukünftigen Bewässerungsbedarfs in % bzw °C Zunahme gegenüber Referenzzeitraum 1976-2006. Daten integriert nach Jahreszeiten sowie als Jahresmittel	12-10
Abbildung 12-3: Zunahme der Jahresverdunstung (Aktuelle Evapotranspiration) für den Zeitraum 2020-2050 gegenüber Referenzzeitraum 1976-2006. Links: Werte aus dem CLM Modellauf. Rechts: Werte aus der hydrologischen Simulation (siehe Kapitel 4).	12-11
Abbildung 12-4: Messungen der Verdunstung für 10 Verdunstungswannen in Tirol. Verdunstungssumme für die Monate Mai bis Oktober. Die dicke rote Linie zeigt die Mittelwerte aus den 10 Stationen. Die Regressionsgerade (strichlierte Linie) ergibt einen Anstieg von 1,8 mm pro Jahr.....	12-12
Abbildung 12-5: Zunahme der potentiellen Evapotranspiration (mittlere Jahreswerte der Unterschiede im „delta change“ Ansatz Zeitreihe 1976-2006 gegenüber 2020-2050) in Österreich. Grau: in weiterer Folge näher betrachtete Einzugsgebiete	12-13
Abbildung 12-6: Wasserbedarf von 1 t Zuckerrübe in der Kampagne 2008 („jetzt“) gegenüber einem Klimaszenario von +3°C im „trading space vor time“ Ansatz. „green“: Niederschlagswasser; „blue“: Bewässerungswasser	12-14
Abbildung 12-7: Regionalisierung des potential höheren Bewässerungsbedarfs (rot: Zunahme; „+“)	12-16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Einflussfaktoren auf die Aussageschärfe berechneter Auswirkungen des Klimawandels.....	1-3
Tabelle 2-1: Kurzbeschreibung der drei am häufigsten verwendeten IPCC-Zukunftsszenarien der globalen Entwicklung im 21. Jahrhundert nach Nakicenović und Swart (2000).....	2-12
Tabelle 3-1: Trenduntersuchungen in der Literatur	3-16
Tabelle 3-2: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Hochwässer in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%.	3-31
Tabelle 3-3: Anzahl der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Hochwässer in Österreich (Oben) sowie nördlich (Mitte) und südlich (Unten) des Alpenhauptkammes. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).	3-32
Tabelle 3-4: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Hochwässer in Österreich (Oben) sowie nördlich (Mitte) und südlich (Unten) des Alpenhauptkammes. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).	3-33
Tabelle 3-5: Anzahl der Pegel mit steigenden (steig) und fallenden (fall) Trends der Hochwässer in den HQ – Regionen (siehe Abbildung 3-29).	3-37
Tabelle 3-6: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Hochwässer in den HQ – Regionen (siehe Abbildung 3-29).	3-38
Tabelle 3-7: Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur.....	3-40
Tabelle 3-8:: Parameter der Monte Carlo Sensitivitätsanalysen.....	3-48
Tabelle 3-9:: Ergebnis der Monte Carlo Sensitivitätsanalysen. Mittlerer Monat in dem die Jahreshochwässer auftreten (Mittl. Monat HQ) sowie mittlere Monat für die größten 5% der Hochwässer (Mittl. Monat HQmax). Monat: 0 = 1.Jän., 12 = 31.Dez). Möglicher % Einfluss einzelner Mechanismen auf das HQ ₁₀₀ in einem typischen Gebiet in der Region (2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007).....	3-56
Tabelle 4-1: Die vier hier verwendeten Ansätze zur Beurteilung der Änderungen im Wasserdargebot der Oberflächenwasser	4-3
Tabelle 4-2: Anzahl der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Abflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).	4-26
Tabelle 4-3: Anzahl der Stationen mit steigenden und fallenden Trends des Niederschlags in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).	4-27
Tabelle 4-4: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Abflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).	4-30
Tabelle 4-5: Prozent der Stationen mit steigenden und fallenden Trends der Niederschläge in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).	4-30
Tabelle 4-6: Fläche und Volumen der Gletscher in Österreich.....	4-60
Tabelle 4-7: Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss für das Einzugsgebiete des Inns für Teileinzugsgebiete mit verschieden starker Vergletscherung (aus Weber et al., (2009))	4-63
Tabelle 4-8: Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss für verschiedene Einzugsgebiete in den Hohen Tauern N=Niederschlag, A=Abfluss, E=Eisschmelze (nach Daten aus Koboltschnig (2007))	4-64

Tabelle 4-9: Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss für verschiedene Einzugsgebiete in den Hohen Tauern (nach Daten aus Kuhn et al. (2007) und Kuhn et al. (2009))	4-64
Tabelle 5-1: Ergebnisse von Trenduntersuchungen in der Literatur.....	5-10
Tabelle 5-2: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%). h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Alle Pegel sind ausgezählt, beeinflusste und unbeeinflusste.	5-20
Tabelle 5-3: Anzahl der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%). h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Alle Pegel sind ausgezählt, beeinflusste und unbeeinflusste.....	5-21
Tabelle 5-4: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%). h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Nur die unbeeinflussten Pegel sind ausgezählt.	5-24
Tabelle 5-5: Anzahl der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%). h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Nur die unbeeinflussten Pegel sind ausgezählt.	5-24
Tabelle 5-6: Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur.....	5-27
Tabelle 7-1: Zusammenfassung wesentlicher Literaturstudien	7-5
Tabelle 7-2: Flächen mit wahrscheinlichem Permafrost in Österreich nach den Modellrechnungen von Ebohon und Schrott (2008).....	7-12
Tabelle 7-3: Grobe Abschätzung der Veränderung der Permafrostflächen in Österreich und Vergleich mit tieferliegenden Flächen.....	7-13
Tabelle 8-1: Trenduntersuchungen in der Literatur	8-8
Tabelle 8-2: Anzahl der Grundwassermessstellen mit steigendem bzw. fallendem Trend im Grundwasserstand in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).....	8-25
Tabelle 8-3: Prozent der Grundwassermessstellen in Österreich mit steigendem bzw. fallendem Trend im Grundwasserstand. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).....	8-26
Tabelle 8-4: Anzahl der Grundwassermessstellen in Österreich mit steigenden bzw. fallenden Trend der Grundwassertemperatur. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).....	8-26
Tabelle 8-5: Prozent der Grundwassermessstellen in Österreich mit steigenden bzw. fallenden Trend der Grundwassertemperatur. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).....	8-26
Tabelle 8-6: Szenarienrechnungen in der Literatur.	8-37
Tabelle 9-1: Veränderungen einzelner Parameter unter veränderten Temperaturbedingungen in Bezug auf die Periode 1961 – 1990 bei gleich bleibenden Niederschlagsverhältnissen.....	9-15
Tabelle 10-1: Änderungen in % im Abfluss (DQ) und im erzeugten Potenzial (DP) für die Periode 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 für ausgewählte Donaukraftwerke.	10-15
Tabelle 11-1: Regionalisierung der Ammonium Überschreitungen nach Bioregionen erste Spalte: Messwerte; zweite Spalte: Klimaszenario Wassertemperatur + 1,5°C.....	11-16
Tabelle 12-1: Vergleich des Pflanzenwasserbedarfs für Sommergerste während der Vegetationsperiode in der Referenzperiode 1976-2006 im Vergleich zum Klimaszenario 2020-2050 sowie Ausweisung des effektiven Niederschlags und des Bodenwassergehalts (Feldkapazität) zum Zeitpunkt der Ernte. Werte in mm Niederschlag	12-15

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung der Studie

Der Umgang mit den Ursachen und Folgen des Klimawandels sind globale Herausforderungen. In den letzten Jahrzehnten nahm die mittlere Lufttemperatur der Erde zu und eine weitere Zunahme wird erwartet (IPCC, 2007). Im Alpenraum sind die Änderungen deutlich stärker ausgeprägt als im globalen Mittel mit einer Zunahme in den letzten 30 Jahren von etwa 1,5°C gegenüber 0,5°C im globalen Mittel (Böhm, 2008). Auch Änderungen im Niederschlagsregime sind zu erwarten. Die Wasserwirtschaft ist damit von den Folgen des Klimawandels besonders betroffen, wobei Ausmaß und Art der Betroffenheit stark von der betrachteten Region und dem wasserwirtschaftlichen Themenbereich abhängig sind.

Die Europäische Kommission verweist in ihrem Weißbuch zur Anpassung an den Klimawandel (KOM, 2009) auf die Notwendigkeit einer EU-weiten sowie nationaler Anpassungsstrategien und konkretisiert diese in Sektorenpapieren für Wasser (SEC, 2009) und Landwirtschaft (SEK, 2009). Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel sollen bei der Umsetzung bestehender wasserrelevanter EU Regelwerke, wie der Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG und der Hochwasserrichtlinie 2007/60/EG, oder zukünftiger - z. B. betreffend Wasserknappheit und Dürre - integriert werden. Für die Wasserrahmenrichtlinie wurde im Rahmen der gemeinsamen Umsetzungsstrategie ein entsprechendes Leitdokument erarbeitet (EC, 2009). Der einschlägige Leitfaden der UNECE (United Nations Economic Commission for Europe, 2009) zeigt gleichfalls die Notwendigkeit der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels auf. Darüber hinaus werden Vorschläge für die Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsstrategien und Maßnahmen in der Wasserwirtschaft unterbreitet. Auf nationaler Ebene werden die Anpassungsmaßnahmen bei den Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplänen berücksichtigt.

Zur Entwicklung wasserwirtschaftlicher Handlungsstrategien ist es notwendig, die künftigen Entwicklungen des Wasserhaushaltes zu beurteilen, die Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft zu bewerten und mögliche Risiken einzuschätzen. Dabei besteht allerdings ein großes Wissensdefizit. Aus diesem Grund wurden in vielen Ländern Forschungsprogramme ins Leben gerufen, wie etwa das KLIWA und das KLIWAS Programm in Deutschland (Arbeitskreis KLIWA, 2010; BMVBS, 2009), das CCHydro und das NFP61 Programm in der Schweiz (BAFU, 2010; SNF, 2008; Leibundgut, 2010), sowie internationale Aktivitäten wie das RheinBlick 2050 Projekt (Görgen et al., 2010). Der finanzielle Umfang dieser Projekte ist beträchtlich, beispielsweise ein jährlicher Etat von ca. 4,5 Millionen Euro über 5 Jahre im Falle von KLIWA.

In Österreich wurden 2009 die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und die Technische Universität Wien vom Lebensministerium und den wasserwirtschaftlichen Abteilungen aller Landesregierungen beauftragt, eine derartige Studie durchzuführen. Zielsetzung dieser Studie war es, den aktuellen Stand des Wissens zusammenzuführen, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft mit neuesten Daten und Methoden in konsistenter Weise abzuschätzen und Vorschläge für Anpassungsmaßnahmen zu erarbeiten. Die Studie umfasst die folgenden für die Wasserwirtschaft relevanten Bereiche bzw. Prozesse in Österreich: Klimavariabilität, Hochwasser, Wasserbilanz, Niederwasser, Wassertemperaturen, Geschiebepotential, Grundwasser, Seen, Wasserkraft, Wasserqualität, Nutzungs- und Bedarfsaspekte. Das vorliegende Kapitel 1 stellt vorerst die Grundprinzipien der Studie vor, und fasst dann die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

1.2 Grundprinzipien der Studie

Die Studie widmete sich der Beurteilung der Einflüsse des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Österreich. Andere, insbesondere direkte anthropogene, Effekte wurden zur besseren Fokussierung ausgeklammert. Manchmal sind jedoch klimainduzierte und anthropogene Effekte nicht leicht zu trennen. Der Klimawandel wird für die Wasserwirtschaft, und für den „natürlichen Zustand“ der Gewässer nach EU Wasserrahmenrichtlinie, als eine „natürliche“ Veränderung und nicht als anthropogen verursachte Veränderung der Umweltbedingungen betrachtet, da der Einfluss nationaler wasserwirtschaftlicher Maßnahmen auf das Klima vernachlässigbar gering ist (Montanari et al., 2010). Die globalen Einflüsse des Menschen auf das Klima werden in dieser Studie in Form von Szenarien berücksichtigt. Die Auswertungen erfolgten räumlich differenziert für das gesamte Bundesgebiet. Es handelt sich also um regionale Untersuchungen, die Detailstudien nicht ersetzen können. Für einzelne Regionen sind jeweils Detailstudien durchzuführen.

Die Beurteilung der Einflüsse des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Deshalb verfolgte die Studie drei Grundprinzipien, die sich von den üblichen Klimaimpaktstudien unterscheiden (Abbildung 1-1): (1) Weiche und harte Aussagen wurden unterschieden, um tragfähige Anpassungsmaßnahmen zu finden; (2) Sich ergänzende Informationsquellen wurden herangezogen, um die Zuverlässigkeit der Aussage zu erhöhen und einzuschätzen; (3) Der Fokus wurde auf Mechanismen gelegt, um differenziertere und transparentere Aussagen über Ursache-Wirkung als durch Szenarien alleine zu erhalten. Durch diese Grundprinzipien sollen die Ergebnisse für die Entscheidung über Anpassungsstrategien förderlicher sein, als es die übliche Vorgangsweise erlaubt.

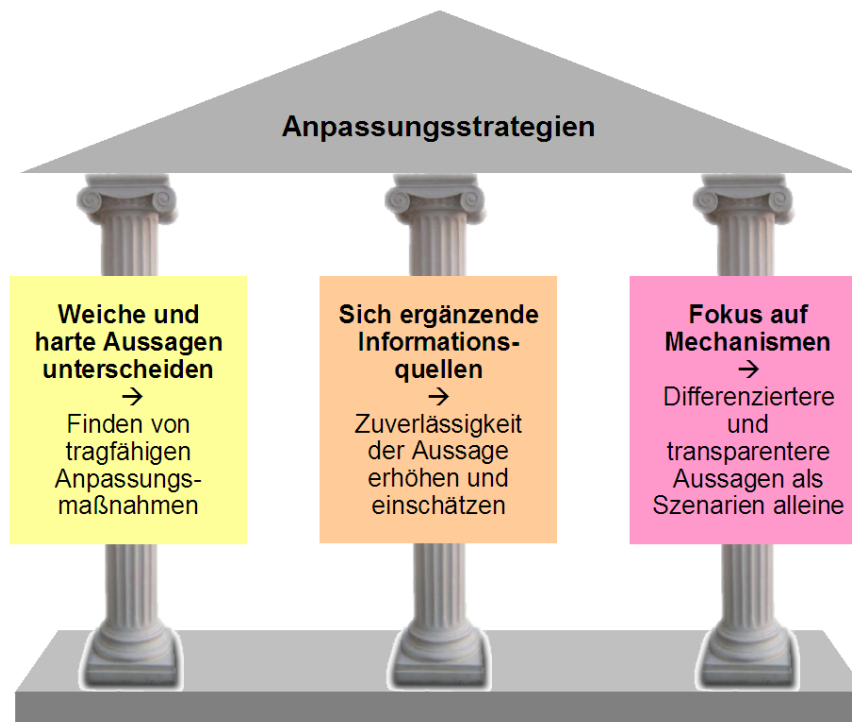


Abbildung 1-1: Grundprinzipien der Studie Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft von Bund und Ländern.

(1) Weiche und harte Aussagen unterscheiden

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft werden üblicherweise mit Hilfe von Szenarien untersucht. Die Vorgangsweise ist einfach (Blöschl and Montanari,

2010): (a) Wahl eines oder mehrerer Emissionsszenarien entsprechend IPCC (2007) die sich durch die politisch-ökonomische Situation unterscheiden; (b) Betreiben eines Globalen Zirkulationsmodells (GCM) auf Basis dieser Szenarien; (c) Hinunterskalieren der GCM Ergebnisse mit Hilfe regionaler Klimamodelle oder statistischer Ansätze; (d) Betreiben eines hydrologischen Modells auf Basis dieser Ergebnisse. (e) Vergleich der Modellergebnisse für die derzeitigen Situation mit den Szenarien, wobei alle anderen Faktoren gleich gelassen werden. Der Vorteil dieser Vorgangsweise besteht darin, dass man immer ein Ergebnis erhält. Dem steht allerdings der Nachteil gegenüber, dass die Ergebnisse nicht überprüfbar sind. Die damit verbundenen Unsicherheiten können sehr groß sein, und es ist auch schwer, das Ausmaß dieser Unsicherheiten abzuschätzen. In jedem Schritt der Modellkette werden Unsicherheiten eingebracht, die sich überlagern und nicht nur die Größe sondern auch das Vorzeichen berechneter Änderungen bestimmen können (Merz et al., 2010). Für die nächsten wenigen Jahrzehnte, die für die wasserwirtschaftlichen Entscheidungen relevant sind, sind die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien klein, die Unsicherheiten aller anderer Schritte jedoch groß.

Generell besteht ein Gefälle bei der Sicherheit der Aussagen von großräumig (gut) zu kleinräumig (schlecht), sowie von langfristig (gut) zu kurzfristig (schlecht) (Tabelle 1-1). Dies hängt mit den Eigenschaften der Mittelwertbildung von Zufallsprozessen zusammen. Ein analoges Gefälle besteht von Aussagen über die Lufttemperatur (gut) zu Aussagen über den Niederschlag (schlecht). Dies hängt mit der Nichtlinearität des Niederschlagsbildungsprozesses zusammen. Extremwerte sind per Definition kleinräumig und kurzfristig weshalb sie sich nach dem derzeitigen State-of-the-art einer Vorhersage weitestgehend entziehen. Das gilt besonders für Extremwerte des Niederschlags. Diese Einflussfaktoren auf die Unsicherheiten treffen (neben den Szenarienanalysen) auch auf andere Methoden von Impaktstudien zu, wie Auswertungen von langen Beobachtungsreihen und sonstige Überlegungen.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden in der vorliegenden Studie durchgängig unterschieden, ob es sich bei den Aussagen um tragfähige (harte) Aussagen handelt bzw. weniger Vertrauen in diese Aussagen gelegt werden kann (mittelharte sowie weiche Aussagen). Dies folgt der von Böhm (2008) vorgeschlagenen Vorgangsweise. Während im IPCC Bericht, eine derartige Einschätzung auch durchgeführt wird, war dies bei hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Untersuchungen von Klimaauswirkungen bisher kaum der Fall. Wenn nicht zwischen abgesicherter und spekulativer Interpretation von Berechnungsergebnissen unterschieden wird, kann es sehr leicht zur Empfehlung von Maßnahmen kommen, die nur teilweise sinnvoll sind (z.B. LFU, 2007). Die Unterscheidung wird deshalb für das Finden tragfähiger Entscheidungen als essentiell erachtet. Beispielsweise (wie im Folgenden ausgeführt) ist eine Zunahme der Gewässertemperaturen in den nächsten Jahrzehnten mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Es handelt sich dabei um eine harte Aussage. Anpassungsmaßnahmen können dies voraussetzen. Umgekehrt ist eine Zunahme von Starkniederschlägen nicht durch Messungen oder Modelle belegt, es handelt sich also um eine weiche Aussage. Es ist nicht auszuschließen, dass sie zunehmen werden, aber es gibt keine belastungsfähige Grundlage dafür. Dementsprechend, kann bei Anpassungsmaßnahmen von der Möglichkeit einer Zunahme ausgegangen werden, nicht jedoch von einer Zunahme per se.

Tabelle 1-1: Einflussfaktoren auf die Aussageschärfe berechneter Auswirkungen des Klimawandels.

Einflussfaktor / Parameter	Kleine Unsicherheit (mittelharte bis harte Aussagen)	Große Unsicherheit (weiche Aussagen)
Raumskala	Kontinente	Einzelne Einzugsgebiete
Zeitskala	Mittelwerte über Jahrzehnte	Einzeljahre, Monatswerte

Betrachtete Größe	Lufttemperatur (und davon abhängige hydrol. Größen)	Niederschlag (und davon abhängige hydrol. Größen)
Statistische Kenngrößen	Mittelwerte	Extremwerte (Starkniederschläge, Hochwasser)

(2) Sich ergänzende Informationsquellen

Wie erwähnt leiden die Szenarienanalysen daran, dass die Unsicherheiten sehr groß sein können, und es auch schwer ist, das Ausmaß dieser Unsicherheiten abzuschätzen. Eine Möglichkeit, einen Eindruck über das Ausmaß dieser Unsicherheiten zu erhalten, besteht aus sogenannten Ensemblesimulationen. Dabei wird entweder ein Klimamodell mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen oder mehrere Klimamodelle parallel betrieben. In analoger Weise können unterschiedliche Annahmen für die hydrologischen Modelle getroffen werden. Die Ergebnisse spannen dann eine Bandbreite der zu erwartenden Änderungen, etwa des Abflusses, auf. Grundsätzlich sind solche Ensemblesimulationen einzelnen Simulation vorzuziehen, da die Auswahl eines einzelnen Modells immer willkürlich sein muss, und deshalb nur *ein* mögliches Ergebnis liefert. Allerdings unterscheiden sich die Modelle nicht in den grundsätzlichen Annahmen. Es ist deshalb zu erwarten, dass die Ergebnisse statistisch abhängig sind, wodurch die Bandbreite von Ensemblesimulationen die tatsächlichen Unsicherheiten unterschätzt. Außerdem helfen Ensemblesimulationen nicht, etwaige systematische Fehler (Biases) zu beurteilen.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden in der vorliegenden Studie, die Untersuchungen auf eine möglichst solide methodische Basis gestellt. Dem grundsätzlichen Ansatz der Wissenschaft folgend, wurde – soweit möglich – die Fragestellung mit mehreren Methoden untersucht, die sich in Hinblick auf Daten und Ansatz grundsätzlich unterscheiden. Wichtig ist, dass es sich nicht um unterschiedliche Modelle oder Szenarien handelt, die einem ähnlichen wissenschaftlichen Paradigma folgen, sondern Methoden, die einem vollkommen anderen Ansatz folgen und sich dadurch ergänzen. Dadurch ist zu erwarten, dass die Zuverlässigkeit der Aussage erhöht wird. In diesem Sinne sind die sich ergänzenden Methoden auch sich gegenseitig validierende Methoden (Gutknecht et al., 2006). Es wurden – soweit möglich – für alle untersuchten Größen sowohl Trendanalysen als auch Szenarienanalysen durchgeführt, da sich Trendanalysen und Szenarienanalysen wesentlich in Hinblick auf Daten und Modellannahmen unterscheiden. Während die Trendanalysen vor allem datenbasiert sind, liegt der Schwerpunkt bei Szenarienanalysen auf der Modellierung. Bei letzteren gibt es Unsicherheiten einerseits bei den Klimaszenarien, andererseits bei der Übertragung dieser Szenarien in den Abfluss. Bei den Trendanalysen ist die Übertragbarkeit auf die Zukunft fraglich und das Beobachtungsfenster hat meist einen entscheidenden Einfluss auf die Aussage. Wegen dieser Unsicherheiten wurden in dem Projekt zwei zusätzliche, neue Methoden für die Wasserwirtschaft angewandt: die Elastizitätsmethode, die die beobachteten zeitlichen Schwankungen auswertet und die „Trading space for time“ Methode, die auf einer Analyse der räumlichen Variabilität der Daten basiert. In Hinblick auf Modellannahmen und Datenbasiertheit liegen die beiden neuen Methoden zwischen Trendanalyse und Szenarienansatz. Kapitel 4 gibt Details zu dieser Methode. Außerdem wurden die Ergebnisse eingebettet in einen umfangreichen Literaturüberblick vergleichbarer Regionen (insbesondere Süddeutschland und die Schweiz).

Als weiterer Schritt im Umgang mit den Unsicherheiten der berechneten zukünftigen Werte wurde die Auswahl der vorgeschlagenen Anpassungsstrategien – wo dies möglich war – auf ein zweites Standbein gestellt. Dabei wurde nicht nur auf Basis von Projektionen abgestellt, sondern auch auf Basis der Vulnerabilität der Wasserressourcen in den unterschiedlichen Regionen Österreichs. Die Vulnerabilität (oder Verletzlichkeit) wasserwirtschaftlicher Systemkomponenten ist nicht von den Klimaszenarien abhängig, sondern von der bestehenden hydrologischen Situation und anderen wasserwirtschaftlichen Kenngrößen.

Wenn etwa eine kleine Änderung des Niederschlags eine große Änderung des Abflusses bewirkt oder sich Wassergüteparameter bereits jetzt in der Nähe der zulässigen Grenzwerte befinden, handelt es sich um vulnerable Situationen. Diese wurden bei den vorgeschlagenen Anpassungsstrategien prioritär behandelt.

(3) Fokus auf Mechanismen

Ein zusätzliches Problem bei Szenarienanalysen besteht darin, dass sie oft als „Black box“ verwendet werden. Das bedeutet, dass zahlreiche Modellkomponenten mit den entsprechenden Annahmen kombiniert werden und dann oft sehr rechenintensive Simulationen durchgeführt werden. Das Ergebnis einer berechneten Änderung lässt sich dann kaum interpretieren. Ein Beispiel sind Hochwasser, die von vielen Prozessen abhängen, wie dem Ausmaß der Konvektivität des Niederschlages (Starkregen), dem saisonalen Niederschlag (Einfluss auf Wasserbilanz), der Höhe der Schneefallgrenze, der Jahreszeit der Schneeschmelze und der Verdunstung. Werden diese Prozesse in Szenariensimulationen verpackt, ist es dann nicht mehr transparent, welcher Prozess zu welcher Änderung des Hochwassers führen könnte. Das ist jedoch entscheidend, da etwa ein Höherwandern der Schneefallgrenze in den nächsten Jahrzehnten viel besser abgesichert ist (harte Aussage), als eine mögliche Zunahme von Starkniederschlägen (weiche Aussage). Die „Black box“ von Szenarienanalysen können das nicht leisten. Ähnliches gilt für die Auswirkung höherer Lufttemperaturen auf die Verdunstung und damit die Wasserbilanz und einen möglichen Bewässerungsbedarf. Werden komplexe Modelle im Rahmen von Szenarienanalysen verwendet, ist es schwer zu unterscheiden, ob die Änderungen auf die zu einem Zeitpunkt höhere Verdunstung und Transpiration zurückzuführen ist, oder Änderungen in der Vegetationsdauer und anderen Effekten, die schwerer zu modellieren sind.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde in der vorliegenden Studie der Fokus auf die Mechanismen gelegt, die zu Änderungen in den hydrologischen, für die Wasserwirtschaft relevanten Parametern führen können. Im Falle von Hochwasser wurden beispielsweise die Mechanismen getrennt modelliert. Im Falle von Niederwasser wurden Sommer und Winterniederwasser unterschieden, die durch unterschiedliche Prozesse ausgelöst werden (Verdunstung bei Sommerniederwasser, Schnee- und Gefrierprozesse bei Winterniederwasser). Generell wurde auf Unterschiede in den Jahreszeiten Wert gelegt. Beispielsweise zeigten sich im Sommer größere Zunahme der Wassertemperaturen als im Winter. Die Saisonalität ist für viele hydrologische Größen der Schlüssel, um zu verstehen, wie sich Änderungen im Klima auswirken. Der Fokus auf Mechanismen führt dann zu differenzierteren Aussagen als wenn man die Ergebnisse von Szenarienrechnungen als allein gültig ansieht. Montanari et al. (2010) sagen dazu: *"Offering insightful explanations for predicted changes may be more helpful than perfecting the estimates of what are inherently uncertain changes. Such a nuanced assessment will gain wider acceptance in society and will bring more credibility to the research community."*

1.3 Vorgangsweise

Für jeden der betrachteten Themenbereiche der Wasserwirtschaft wurde vorerst eine Sichtung der Literatur durchgeführt. Sodann wurde – soweit vorhanden – die entsprechenden Daten der letzten Jahrzehnte ausgewertet, um daraus Schlüsse über die Trends zu ziehen. Dabei wurde im Rahmen des Möglichen unterschieden, ob die Änderungen anthropogene bzw. klimatische Ursachen haben. Bei Änderungen des Abflusses war dies etwa durch einen Vergleich mit dem Niederschlag möglich. Bei Änderungen des Niederwasserregimes wurden Beeinflussungen durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen getrennt ausgewiesen. In einem dritten Schritt wurde Szenarien ausgewertet. Beim Niederschlag, insbesondere im Nordosten Österreichs, fand in den 1970er Jahren ein

markanter Trendwechsel statt. Es wurde daher in der gesamten Studie die Periode 1976-2007 als Bezugsperiode für das gegenwärtige Klima verwendet. Als Zukunftsperiode wurde 2021-2050 gewählt, da sie einem wasserwirtschaftlich relevanten Zeithorizont entspricht. Die Aussagen dieser Studie gelten dementsprechend für mittlere Verhältnisse der Periode 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007. Als Globale Basis wurde das IPCC Multimodel Ensemble (CMIP3) verwendet, für das Herunterskalieren auf die regionale Skala von Österreich wurden die Ergebnisse der Modelle COSMO-CLM (angetrieben mit dem Globalmodell ECHAM5 für das Szenario A1B) herangezogen und mit dem Modell REMO verglichen. Die Aussagen dieser Studie gelten dementsprechend für regionale Verhältnisse in Österreich, nicht jedoch für einzelne kleine und kleinste Einzugsgebiete. Die Szenarienanalysen wurden – je nach wasserwirtschaftlich relevantem Bereich bzw. Prozess durch weitere Auswertungen ergänzt wie z.B. durch die Elastizitätsmethode oder die Trading Space for Time Methode.

1.4 Zusammenfassende Ergebnisse

1.4.1 Klimaänderung und -variabilität

Die Histalp Daten zeigen, dass die Lufttemperatur in Österreich seit Mitte der 1970er Jahre deutlich (fast 1.5 °C) zugenommen hat. Es handelt sich dabei um einen für Österreich sehr einheitlichen Trend. Die Zunahme war stärker im Sommer (fast 2°C) als im Winter (ca. 1°C) (*harte Aussage*). Die Jahressummen des Niederschlags sind seit der Mitte der 1970er Jahre überall gestiegen, außer im Südosten. Dabei war die Zunahme im Norden und inneralpin monoton ansteigend (mehr als 15% im Norden, ca. 10% inneralpin), im Westen und Südosten stark durch dekadische Minima und Maxima geprägt (*harte Aussage*). Die Winterniederschläge sind seit der Mitte der 1970er Jahre nördlich des Alpenhauptkammes etwas gestiegen, südlich des Alpenhauptkammes deutlich gefallen. In den anderen Jahreszeiten gab es tendenziell eine Zunahme des Niederschlags in ganz Österreich mit Ausnahme des Südens wo die Trends sehr gering waren (*harte Aussage*). Die Klimaszenarien ergeben, dass die Lufttemperatur in Österreich gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 um ca. 1° C steigen werden, wobei die Zunahme im Sommer stärker sein wird als im Winter (*harte Aussage*). Gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 werden die Winterniederschläge insbesondere nördlich des Alpenhauptkammes eher zunehmen, die Sommerniederschläge werden eher abnehmen. Eine stärkere Veränderung des Niederschlags ist erst nach 2050 zu erwarten (*mittelharte Aussage*). Die Verdunstung wird gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 zunehmen (*mittelharte Aussage*). Die Größenordnung der Änderung ist jedoch unsicher. Die Aussage, dass Extremwerte des Niederschlags auf Grund der höheren Niederschlagssummen im Winter und des auf Grund physikalischer Zusammenhänge mit dem zu erwartenden Temperaturanstieg einhergehenden höheren Feuchtegehaltes der Atmosphäre im Sommer (konvektive Ereignisse) zunehmen ist derzeit spekulativ, da die bisherigen Niederschlagsdaten in Österreich mit ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung und Genauigkeit keine Hinweise auf eine Zunahme von Extremniederschlägen ergeben.

1.4.2 Hochwasser

In den letzten 30 Jahren haben in etwa 20% der Einzugsgebiete in Österreich die Hochwässer zugenommen, besonders in kleinen Gebieten nördlich des Alpenhauptkammes (*harte Aussage*). Die Trends über die letzten 50 Jahre sind weniger deutlich (*mittelharte Aussage*). Österreichweit haben die Winterhochwässer deutlich stärker zugenommen als die Sommerhochwässer (*mittelharte Aussage*). Die Häufung der Hochwässer in den letzten Jahrzehnten liegt im Rahmen der natürlichen Variabilität von Hochwasserdekaden aber auch ein Einfluss einer Klimaänderung ist nicht auszuschließen (*harte Aussage*). Prognosen über Hochwasseränderungen sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da die

zukünftige Entwicklung der Extremwerte des Klimas nicht ausreichend zuverlässig berechnet werden kann (*harte Aussage*). Hier durchgeführte Wenn-dann Szenarien (Zeithorizont 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007), die die unterschiedlichen Mechanismen der Hochwasserentstehung und ihre Saisonalität abbilden zeigen die folgenden mögliche Änderungen des HQ_{100} in % wenn jeder Mechanismus einzeln auftritt): Schneefallgrenze steigt: 0 bis +4% (*mittelharte Aussage*); Verschiebung des Zeitpunktes der Hochwässer (frühere Frühjahrshochwässer, mehr Winterhochwässer) (*harte Aussage*); frühere Schneeschmelze, höhere Verdunstung: -5 bis +2% (*weiche Aussage*); Änderung der Winter/Sommerniederschläge: -3 bis +2% (*weiche Aussage*); Erhöhung der Konvektion: +2 bis +10% (*weiche Aussage*). Die natürliche Variabilität der Hochwässer ist wesentlich größer, als die erwartete Änderung zufolge des Klimawandels (*harte Aussage*). Im Innviertel und Mühlviertel kann eine gewisse Verschiebung der Hochwässer vom Sommer in den Winter mit steigenden Lufttemperaturen in Zusammenhang gebracht werden, weshalb eine Überprüfung der Bemessungswerte notwendig sein kann. Besonders in kleinen Gebieten ist die Unsicherheit von Bemessungswerten im derzeitigen Klima wesentlich größer als die hier diskutierten Änderungen zufolge Klimawandel. Bei der Bestimmung von Bemessungswerten des Hochwassers ist deshalb die Unsicherheit durch Verwendung einer möglichst weitreichenden, über das Hochwasserkollektiv hinausgehenden, Datenbasis zu reduzieren.

1.4.3 Wasserdargebot Oberflächenwasser

Während in den letzten drei Jahrzehnten im Mittel über Österreich die Niederschläge gestiegen sind, hat sich der Abfluss kaum geändert. Das heißt die Verdunstung ist gestiegen (*harte Aussage*). Regionale Unterschiede zeichneten sich jedoch ab: im Süden und in Vorarlberg fallende, im östlichen Alpenraum hingegen steigende Trends der Jahresabflüsse. Generell waren die sinkenden Abflüsse im Sommer zu verzeichnen, mit Ausnahme des Ostens (*harte Aussage*). Für den Zeithorizont 2021-2050 sind im Vergleich zu 1976-2007 nur kleine Änderungen im mittleren Abfluss zu erwarten (*mittelharte Aussage*). In ganz Österreich mit Ausnahme des Südens ist eine Erhöhung der Winterabflüsse um ca. 20% zu erwarten (*mittelharte Aussage*). Im Osten (Flachland) ist eine Abnahme des Frühjahrsabflusses und im Westen (Alpen) eine Abnahme des Sommerabflusses um jeweils ca. 10-20% zu erwarten (*weiche Aussage*). Insgesamt ist in Österreich mit einem Rückgang der Gletscher bis ca. 2050 zu rechnen (*harte Aussage*). In unmittelbarer Nähe von Gletschern ist bis 2050 eine deutliche Zunahme der Sommerabflüsse zu erwarten, in größeren Einzugsgebieten ist der Einfluss nur in Trockenjahren relevant (*harte Aussage*). Da die natürliche Variabilität des mittleren jährlichen Abflusses zwischen den Jahren deutlich größer als die zu erwartenden Änderungen zufolge Klimaänderung für 2021-2050 ist, erscheinen aus österreichweiter Sicht nicht grundsätzlich andere Bewirtschaftungsmaßnahmen in Hinblick auf das Wasserdargebot der Oberflächengewässer notwendig. Regional betrachtet kann es aber durchaus zu Unterschieden kommen und jene Regionen, die schon jetzt geringe Abflussspenden ($<10 \text{ l/s/km}^2$) aufweisen (vor allem im Osten und Südosten Österreichs), sind bei den Anpassungsmaßnahmen besonders zu berücksichtigen.

1.4.4 Niederwasser

Im den Alpinen Gebieten Österreichs treten die Niederwässer im Winter zufolge Schnee bzw. Gefrierprozesse auf, im Flachland des Ostens im Sommer zufolge Verdunstung. Über 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in 14% der Pegelbezugsgebiete die Niederwasserabflüsse (Q95) zugenommen und in nur 3% der Gebiete abgenommen. Mit einer weiteren Zunahme ist zu rechnen (*harte Aussage*). Unter 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in 10% der Pegelbezugsgebiete die Niederwasserabflüsse (Q95) abgenommen und in nur 5% der Gebiete zugenommen. Eine Abnahme ist insbesondere im

Süden und Südosten Österreichs festzustellen. Dieser Trend dürfte sich in der Zukunft fortsetzen mit Abnahmen von bis zu 10-15% für den Zeithorizont 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007 (*mittelharte Aussage*). Deswegen ist die Vulnerabilität der Gewässer bei Niederwassersituationen in diesen Regionen hoch. Das Niederwasserjahr 2003 eignet sich sehr gut für die Beurteilung von Niederwassersituationen bei Klimaänderung im Sommer, da dies ein extremes Jahr war, wie es auch in Zukunft auftreten kann (*harte Aussage*).

1.4.5 Wassertemperaturen in Flüssen

Bereits in der Vergangenheit konnte ein genereller Anstieg der Wassertemperaturen verzeichnet werden. In den letzten 30 Jahren betrug der Anstieg der Wassertemperaturen in Österreichs Flüssen ca. 1,5°C im Sommer bzw. 0,7°C im Winter (Mittelwert über alle Messstellen) (*mittelharte Aussage*). Für die Zukunft wird eine generelle Zunahme der Wassertemperaturen erwartet (*harte Aussage*). Bei einer Zunahme der Lufttemperatur um 1°C nimmt die Wassertemperatur im Mittel um ca. 0,8°C zu (räumliche Auswertungen) (*mittelharte Aussage*). Für den Zeithorizont 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007 dürfte die Zunahme bei etwa 0,7 bis 1,1°C im Sommer und 0,4 bis 0,5°C im Winter liegen. Die mittlere Zunahme ist ca. 0,8°C (*mittelharte Aussage*). Diese erhöhte Temperatur entspricht einer Verschiebung in der Seehöhe um ca. 100 m. Damit ist auch mit Verschiebungen der Bioregionen zu rechnen (*harte Aussage*). Auch die Temperaturen des Porengrundwassers nahmen deutlich zu (zwischen 0,3 bis 1,2°C) (*harte Aussage*). Bei einer zukünftigen Zunahme der Lufttemperatur um 1°C nimmt die Grundwassertemperatur um ca. 0,2 bis 1°C zu, hängt aber stark von der lokalen Situation ab (*mittelharte Aussage*). Bei der Beurteilung von Wärmeeinleitungen sind diese Temperaturerhöhungen zu berücksichtigen.

1.4.6 Geschiebepotential von alpinen Gewässern und Permafrost

Für das Geschiebepotential sind vor allem zwei klimarelevante Faktoren zu betrachten: das Auftreten von Starkniederschlägen und die Lage der Permafrostgrenze. Die Niederschlagsdaten in Österreich geben bisher keine Hinweise auf eine Erhöhung von Starkniederschlägen. Deswegen ist keine Auswirkung auf das Geschiebepotential ableitbar (*harte Aussage*). Mit einer Erhöhung der Permafrostgrenze ist zu rechnen (*harte Aussage*). Lokal betrachtet könnte deshalb das Geschiebepotential im Bereich der Permafrostgrenze deutlich zunehmen (*mittelharte Aussage*). In größeren Einzugsgebieten liegt die erwartbare Zunahme weit unter den natürlichen Schwankungen (*mittelharte Aussage*).

1.4.7 Wasserdargebot Grundwasser

Die Neubildung des Porengrundwassers erfolgt vor allem im Frühjahr. Änderungen sind also vor allem von den klimatischen Verhältnissen im Frühjahr bestimmt. Die Auswertung der letzten rund 30 Jahren zeigt, dass bei 18 % der Grundwassermessstellen die Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes einen fallenden Trend und bei ca. 12 % einen steigenden Trend aufwiesen (*harte Aussage*). Eine Abnahme der Grundwasserstände wurde für Messstellen in Kärnten, Südsteiermark und Burgenland bis zur Donau verzeichnet, eine starke Zunahme im Süden des südlichen Wiener Beckens. In den nächsten Jahrzehnten ist im Süden Österreichs (Kärnten, Steiermark) eine Abnahme der Grundwasserneubildung zu erwarten (*mittelharte Aussage*), im Norden und Westen könnte die Grundwasserneubildung zunehmen (*weiche Aussage*). Durch die vermutlich geringe Zunahme der Niederschläge und die erwartete Temperaturerhöhung sind in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs eher sinkende Grundwasserstände zu erwarten (*weiche Aussage*). Eine Fortsetzung bzw. Intensivierung der Wasserwirtschaftlichen Planung der Grundwasservorkommen erscheint speziell in den niederschlagsarmen Regionen des

Ostens und Südens Österreichs sinnvoll. Durch steigende Grundwasserstände könnten in Gebieten mit derzeit schon bestehenden Problemen bei Kellervernässungen diese zunehmen (*weiche Aussage*).

1.4.8 Seen

Die oberflächennahen Wassertemperaturen in den Seen Österreichs haben in den letzten Jahrzehnten generell zugenommen und werden auch noch weiter steigen (*harte Aussage*). Die sommerlichen Wasserstände des Bodensees könnten sich in Zukunft reduzieren (*weiche Aussage*). Die Wasserstände des Neusiedler Sees bleiben annähernd gleich wenn die Lufttemperatur um ca. 1°C und der Niederschlag um ca. 5% zunehmen (*weiche Aussage*). Die Durchmischungscharakteristik von geschichteten Seen wird von den Temperaturen des Oberwassers und den Windbedingungen dominiert. Aussagen über die zukünftige Änderung der Mischungscharakteristik der Seen können nicht gesichert gemacht werden.

1.4.9 Wasserkraft

Die Änderungen des mittleren jährlichen Potenzials (theoretischen Wasserkraftpotenzials - Linienpotential, 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006) sind vermutlich kleiner als +/-5% (*mittelharte Aussage*). In ganz Österreich, mit Ausnahme des Südens, ist eine Erhöhung des Wasserkraftpotenzials im Winter um ca. 20% zu erwarten (*mittelharte Aussage*). Im Osten (Flachland) ist möglicherweise eine Abnahme des Wasserkraftpotenzials im Frühjahr und im Westen (Alpen) eine Abnahme des Wasserkraftpotenzials im Sommer um jeweils ca. 10-20% zu erwarten (*weiche Aussage*). Dadurch ergibt sich eine bessere Anpassung an den Verbrauch (*mittelharte Aussage*).

1.4.10 Qualität von Wasserkörpern

Grundsätzlich beeinflusst die Klimavariabilität die Wasserqualität durch die Temperatur sowie das Wasserdargebot. In der Vergangenheit erfolgten die anthropogenen Einflüsse auf die Qualität von Wasserkörpern (Verschmutzung und Sanierung) wesentlich rascher als sich klimatische Rahmenbedingungen verändert haben (*harte Aussage*). Es ist zu erwarten, dass dies auch in Zukunft der Fall sein wird (*harte Aussage*). Für Gewässer, die heute im Grenzbereich zwischen Zielzustand und "mäßigem Zustand" liegen, besteht ein erhöhtes Risiko, infolge der bis 2050 erwarteten Auswirkungen des Klimawandels den "guten Zustand" zu verfehlen, bei gering belasteten Gewässern wird der Einfluss gering sein (*mittelharte Aussage*). Temperaturerhöhungen in den Gewässern werden zu einer Anpassung der aquatischen Biozönosen führen, die Bioregionen werden sich daher verschieben (*harte Aussage*). Die Anpassung der Natur an den Klimawandel (natürlicher Zustand) muss in den Leitbildern der Qualitätszielverordnung abgebildet werden. Wegen der Langsamkeit des Anpassungsprozesses stellt dies eine mittel- bis langfristige Perspektive dar.

1.4.11 Nutzungs- und Bedarfsaspekte

Die Ansprüche der Gesellschaft an die Wasserversorgung und -nutzung hatten in den letzten Jahrzehnten eine raschere Dynamik als die Veränderung der klimatischen Bedingungen (*harte Aussage*). Aufgrund der hohen Wasserverfügbarkeit in Österreich ist von keinem durch Klimaszenarien abgesicherten großräumigen Mangel an Rohwasser für die Wasserversorgung auszugehen (*harte Aussage*). In den Regionen, die bezüglich des

Wasserdargebotes ungünstige Rahmenbedingungen für die Versorgung und Nutzung aufweisen, könnte allerdings die Vulnerabilität steigen (*mittelharte Aussage*). Es ist mit einem erhöhten Wasserbedarf für die Nutzpflanzen zu rechnen (*harte Aussage*). Dieser könnte durch zunehmenden Niederschlag abgedeckt werden (*weiche Aussage*), ansonsten ist zusätzliche Bewässerung notwendig. Wasserversorgungsanlagen in Regionen, die bezüglich des Wasserdargebotes ungünstig sind, sollten sich um ein zweites Standbein oder Vernetzung bemühen. Für den Fall von Nutzungskonflikten in Zeiten von Engpässen sind bereits vorsorglich Priorisierungen der Wassernutzung zu überlegen. Es wird empfohlen, die Erfahrungen aus dem Sommer des Jahres 2003 in Hinblick auf Nutzungs- und Versorgungsengpässe auszuwerten um daraus Schlüsse für Maßnahmen zur Erhöhungen der Redundanz abzuleiten.

1.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Wasserwirtschaft hat eine extrem lange Tradition der Anpassung durch technische und organisatorische Maßnahmen an geänderte Klimabedingungen, die meist durch Extremereignisse (Hochwasser, extreme Trockenperioden, trockene und nasse Dekaden) ausgelöst oder zumindest beschleunigt wurden. Die meisten Anforderungen der Nutzer und Schützer von Wasser und Gewässern an die Wasserwirtschaft (Abdeckung des Wasserbedarfes und/oder einer Einhaltung gewisser Gütekriterien in Grund und Oberflächengewässern, Überschreitung von Mindestdurchflüssen) sind dadurch gekennzeichnet, dass sie „zu jeder Zeit“ (also auch bei seltenen außergewöhnlichen Bedingungen mit hoher Sicherheit erfüllt werden sollen. Diese dauernden Anforderungen haben dazu geführt, dass die Wasserwirtschaft sogenannte „robuste“ Systeme anstrebt. Diese weisen einerseits eine geringe Versagenswahrscheinlichkeit auf, andererseits bleiben bei Versagen (Nichteinhaltung aller Anforderungen an Schutz von Mensch und Umwelt) die Schäden zumindest zeitlich begrenzt und die Reparatur oder Kompensationsmaßnahmen abschätzbar.

Kriterien für eine funktionierende Wasserwirtschaft bzw. Wasserinfrastruktur orientieren sich häufig an selten auftretenden Extremereignissen. Das gilt sowohl für anthropogene Wasserbedarfs- und verbrauchsspitzen als auch für Hoch- und Niedrigwassersituationen. Für die Bewirtschaftung des Grundwassers sind häufig die langfristigen Veränderungen von größerer Bedeutung. Die mittleren Verhältnisse über ein Jahr oder eine Dekade (Temperatur, Niederschlag) mit langsamen Veränderungen über längere Zeiträume spielen daher in vielen Bereichen für technische Anpassungsmaßnahmen eine untergeordnete Rolle, bei der Bewirtschaftung des Grundwassers können sie dominant sein.

Die natürlichen Gewässer und ihre Ökosysteme sind auf Extremereignisse eingerichtet. Sie spielen vermutlich eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und Erhaltung einer hohen Resilienz. Nachdem der anthropogene Einfluss häufig zu einer deutlichen Einschränkung dieser Fähigkeit zur Selbststabilisierung und zu zusätzlichen Belastungen führt, kommt es auch zu regional unterschiedlicher Verringerung der Resilienz der Ökosysteme gegenüber Klimaänderungen und Extremereignissen. Beide können zu einer Verminderung der Robustheit bestehender wasserwirtschaftlicher Systeme und Strukturen führen, die Maßnahmen erforderlich machen.

Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel müssen sich an einem Vorsorgeprinzip orientieren, das Kosten und Risiken für Mensch und Umwelt in einem akzeptablen Gleichgewicht hält. Die Risiken betreffen zwei unterschiedliche Bereiche:

- Einerseits kann die Nutzung von Wasser für verschiedene Zwecke durch den Klimawandel bedroht sein (Einschränkung von Nutzungen), was auch ökonomische Risiken (z.B. Kühlwasserentnahmen für Kraftwerke oder Industrie) oder die Erfüllung von Verpflichtungen (z.B. Trinkwasserversorgung) einschränkt oder mit zusätzlichen Aufwendungen verknüpft. In beiden Fällen sind Veränderungen im Bereich des

Wasserdargebotes und der Umweltbedingungen über die Zeit eng mit den Veränderungen der Beschaffenheit von Wasser und Gewässern gekoppelt.

- Andererseits stellt die Aufgabe des Schutzes aller Gewässer vor Verschlechterung und die Erreichung bzw. Herstellung eines guten Zustandes sowie der Schutz der davon abhängigen Ökosysteme nach WRG 1959 i.d.g.F ein öffentliches Interesse dar. Hier besteht das Risiko für die Wasserberechtigten, dass Veränderungen des Klimas und die damit ausgelösten Anpassungen der lebendigen Umwelt einen Eingriff in bestehende Wasserrechte notwendig machen können. Dieser Eingriff ist juristisch schwierig und an die Bedingung der „Kostenminimierung“ (gelindestes Mittel) auch in Hinblick auf die Verwendung öffentlicher Gelder gebunden.

Daraus folgt, dass eine langfristige Perspektive von Anpassungsmaßnahmen sinnvoll ist, weil einerseits die Veränderungen des Klimas langsam vor sich gehen und auch Anpassungsmaßnahmen meist nicht kurzfristig umzusetzen sind. Dabei ist immer zu beachten, dass die Vulnerabilität der wasserwirtschaftlichen Aktivitäten, also des Wechselspiels zwischen Wassernutzung und –schutz, wesentlich stärker durch die Variabilität des Wettergeschehens an sich bedroht wird als durch die vergleichsweise langsamen Veränderungen des Klimas. Daraus kann man den Schluss ziehen, dass Maßnahmen, die beide Bedrohungen verringern, eine höhere zeitliche Priorität bekommen sollten also solche, die nur die negativen Auswirkungen eines zukünftigen Klimawandels betreffen.

Die Erhöhung der Risiken (potentielle Kosten für Schadensbehebung), die von Wasser zufolge Klimawandel für die Menschen ausgehen kann, insbesondere jene durch Veränderung der Hochwasserregime auch in Siedlungsgebieten, aber auch jene durch Dürren in der Landwirtschaft, erfolgt mit großer Sicherheit wesentlich langsamer als die Erhöhung der Schadenspotenziale zufolge der laufenden Steigerung des Wertes der betroffenen Infrastruktur oder der betroffenen landwirtschaftlichen/forstwirtschaftlichen Flächen auch durch indirekte Auswirkungen wie Hangrutschungen, Windbruch oder Lawinen. Bei Anpassungsmaßnahmen muss daher immer überprüft werden, ob nicht Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkung von Extremereignissen auf die Schadenskosten (z.B. Objektschutz, Freihaltung von Überflutungsflächen) geringere Kosten verursachen als die Aufrechterhaltung eines definierten Schutzniveaus für die bedrohte Infrastruktur durch technische Maßnahmen auf der Basis von für die Zukunft berechneten erhöhten Auftrittswahrscheinlichkeiten für Extremereignisse. Zur Vermeidung von Gefährdungen von Mensch und Umwelt bei Extremereignissen mit sehr geringer Auftretenswahrscheinlichkeit sind zudem folgende Aspekte zu prüfen:

- Ist eine Regeneration der Natur möglich?
- Ist eine Wiederherstellung der technischen Infrastruktur wohl technisch umsetzbar, aber mit kurzfristigen finanziellen Aufwendungen verbunden oder kann das finanzielle (und sonstige) Risiko alternativ durch Versicherungsmodelle oder andere fiskalischen Modelle kostengünstiger (für wen?) verringert werden?
- Sind unbedingt aufwändige technische und organisatorische Vorsorgemaßnahmen, die nur sehr selten zum Einsatz kommen, aber jederzeit eine hohe Funktionssicherheit aufweisen müssen, erforderlich?

Die vorliegende Studie ergab neben der konkreten Beurteilung der verschiedenen Themenbereiche der Wasserwirtschaft eine Reihe methodischer Erkenntnisse, die generell für diese Art von Studien und bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind. Die Studie zeigte, dass die traditionelle Szenarienmethode bei Klimaimpaktstudien problematisch ist und große Unsicherheiten aufweist. Die Unsicherheiten unterscheiden sich je nach Raumskala und Zeitskala. Aussagen für kleine Gebiete und kurze Zeitperioden sind unsicherer als solche über Kontinente und Dekaden. Die Unsicherheiten unterscheiden sich auch nach der betrachteten Größe. Hydrologische Größen die vom

Niederschlag abhängen (z.B. Abfluss) sind unsicherer als solche die von der Lufttemperatur abhängen (z.B. Wassertemperatur). Bei Extremwerten nehmen die Unsicherheiten weiter zu. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden verfolgte die Studie drei Grundprinzipien, die sich von den üblichen Klimaimpaktstudien unterscheiden: (1) Weiche und harte Aussagen wurden unterschieden, um tragfähige Anpassungsmaßnahmen zu finden; (2) Sich ergänzende Informationsquellen wurden herangezogen, um die Zuverlässigkeit der Aussage zu erhöhen und einzuschätzen; (3) Der Fokus wurde auf Mechanismen gelegt, um differenziertere und transparentere Aussagen über Ursache-Wirkung als durch Szenarien alleine zu erhalten. Durch diese Grundprinzipien sollen die Ergebnisse nutzbringender für die Entscheidung über Anpassungsstrategien sein, als es die übliche Vorgangsweise erlaubt.

Obwohl die Studie "Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft" die Fragestellung in umfassender Weise beleuchtet hat, besteht weiterer Forschungsbedarf. Die in absehbarer Zukunft erwartbaren Ensemblesimulationen von Klimamodellen könnten die Unsicherheiten der Klimamodelle bei Impaktanalysen weitergehender abbilden als dies durch die Auswertung der Ergebnisse einzelner Modelle möglich ist. Für hydrologische Fragestellungen müssen Untersuchungen mit regionalen Klimamodellen ein vermehrtes Interesse auf hydrologisch relevante Wetterlagen und deren richtige Simulation durch die Modelle legen. Da nicht zu erwarten ist, dass sich die Genauigkeit der Klimamodelle in nächster Zeit sprunghaft verbessert, sind robuste (empirische) Methoden zu entwickeln, die eine Abschätzung von Extremwerten für die Zukunft zulassen. Das gilt besonders für Hochwasser, da die Veränderungen im Extrembereich weiterhin eine offene Forschungsfrage sind. In Hinblick auf die Frühwarnung vor Extremereignissen wäre die Entwicklung von probabilistischen Hochwasserwarnsystemen in kleinen Einzugsgebieten für flash floods (siehe Borga et al., 2010) sowie Niederwasserprognosen anzudenken. Erfahrungen aus dem Sommer des Jahres 2003 in Hinblick auf Nutzungs- und Versorgungsengpässe auszuwerten wäre empfehlenswert, um daraus Schlüsse für Maßnahmen zur Erhöhungen der Redundanz abzuleiten.

Bei der Bestimmung der Veränderungen der Verdunstung gibt es derzeit Defizite. Eine Ergänzung der bisherigen Wannenmessungen durch eine direkte Messung der Verdunstung etwa durch die Eddy-Correlation Methode wäre deshalb wünschenswert. Auch der Niederschlagsmessung im alpinen Bereich ist vermehrte Aufmerksamkeit zu schenken, um eine langfristige gute Datenbasis zu erhalten. Gleiches gilt für Messreihen der Wasserbeschaffenheit. Hier sollte verstärkt auf qualitativ hochwertige lange Reihen gesetzt werden. Um aus Messdaten Trendänderungen ablesen zu können ist eine sehr hohe Datenqualität nötig. Deswegen besteht Bedarf zur Homogenisierung hydrologischer Daten in ähnlicher Weise wie dies etwa für den Histalp Datensatz (Auer et al., 2007) bereits durchgeführt wurde. Auch die Digitalisierung derzeit nur auf Papier vorhandener Daten wäre wünschenswert, um klimainduzierte Trends besser beurteilen zu können. Mit einer derartig erweiterten Datenbasis sollten anthropogene und klimatische Einflüsse auf den Wasserhaushalt und die Wasserbeschaffenheit schärfer getrennt werden, als dies derzeit möglich ist (Blöschl et al., 2007).

Da die traditionelle Szenarienmethode wegen der großen Unsicherheiten in den Ergebnissen für Klimaimpaktstudien problematisch ist, sind alternative bzw. ergänzende Vorgangsweisen zu entwickeln und zu verfeinern. Alternative Vorgangsweisen für das Abschätzen zukünftiger Änderungen sind etwa die „Trading space for time Methode“ und die Elastizitätsmethode, die in dieser Studie angewendet wurden. Mit solchen ergänzenden Vorgangsweisen ist ein stärkerer Fokus auf die Mechanismen zu legen, die bestimmte Änderungen bewirken, anstatt nur auf die Ergebnisse der komplexen Klima- und Niederschlags-Abflussmodelle zu vertrauen. Essentiell ist dabei, dass die Unsicherheiten getrennt nach Mechanismus ausgewiesen werden. Ohne eine klare Unterscheidung in harte und weiche Aussagen und daraus abgeleitete Empfehlungen lassen sich keine tragfähigen Handlungsentscheidungen für die Wasserwirtschaft ableiten. In der Zukunft wird eine Vorgangsweise an Bedeutung gewinnen, die neben den Projektionen der Auswirkungen des Klimawandels in die Zukunft die Vulnerabilität des hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Systems in den Vordergrund stellt,

um robuste und flexible Instrumente für Anpassungsstrategien der Wasserwirtschaft an den Klimawandel zu entwickeln. Damit kann auch die natürliche Variabilität von Extremsituationen, die ausgeprägter ist als der Einfluss des Klimawandels, besser in die Entscheidungen für Maßnahmen eingebracht werden.

2. Klimaänderung und -variabilität

2.1 Kurzfassung

Grundlagen für das Wissen über die Klimavergangenheit und hydrologische Auswirkungen

- Das Ziel dieses Textes ist die Beurteilung der Einflüsse des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Andere, insbesondere anthropogene, Effekte werden hier zur besseren Fokussierung ausgeklammert. Manchmal sind jedoch klimainduzierte und anthropogene Effekte nicht leicht zu trennen.
- Für die Untersuchung des derzeitigen und des vergangenen Klimas in Österreich wurden in letzter Zeit insbesondere von der ZAMG geprüfte und teilweise auch homogenisierte Messdatensätze erarbeitet (HISTALP, StartClim). Nur Datensätze dieser Qualität sollen für die Untersuchung von Klimaveränderungen verwendet werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Die Datensätze wurden bereits mehrfach einer eingehenden Analyse unterzogen und ergeben ein deutliches Bild der Klimaveränderungen in Österreich. Ein deutliches Ergebnis aus der Vergangenheit, das auch für die Zukunft übertragen werden kann, ist, dass die Jahr-zu-Jahr Änderungen des Klimas (der Temperatur, des Niederschlags, der Schneedeckendauer, etc.) viel größer sind als langfristige Trends des Klimas. Langfristige Trends bleiben daher oft nicht-signifikant.

Skizzierte Klimavergangenheit der letzten 3 Jahrzehnte

- Die Untersuchung des Klimas der Vergangenheit zeigt, dass in den 1970er Jahren eine markante Umstellung im Klimasystem für den Alpenraum stattgefunden hat. Seit damals liegt in ganz Österreich ein stark steigender Temperaturtrend vor. Beim Niederschlag, insbesondere im Nordosten Österreichs, fand ein markanter Trendwechsel statt. Es wird daher in der gesamten Studie die Periode 1976-2007 als Bezugsperiode für das gegenwärtige Klima verwendet.

Allgemeine Grundlagen für Aussagen über die Klimazukunft

- Aussagen über hydrologisch bedeutsame Klimakenngrößen für die Zukunft sind aus Klimamodellrechnungen abzuleiten und durch das Wissen aus der Vergangenheit zu beurteilen. Umfangreiche Klimamodellrechnungen (regionale Klimamodellierung unter Verwendung verschiedener globaler Antriebsmodelle und verschiedener Szenarien) für Österreich sind derzeit (Stand 2010) im Gange und können erst in Zukunft für Impactuntersuchungen verwendet werden. Derzeit muss noch auf Modellierungen aus verschiedenen Projekten (ohne speziellen Fokus auf Österreich) zurückgegriffen werden. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts verhalten sich die unterschiedlichen Treibhausgasszenarien noch nicht signifikant unterschiedlich. Wesentliche Differenzen zwischen dem – bezogen auf die Wirkung – ungünstigsten (rein fossilen) und dem günstigsten (regenerative Energiequellen) Szenario ergeben sich erst in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts.

Problematik der Klimaantriebe in den Modellen

- Es ist wichtig anzumerken, dass Klimamodelle für die Zukunft nur den menschlichen Einfluss auf das Klima in Form von Szenarien erfassen können. Alle Aussagen über die Klimazukunft werden wie folgt gewonnen: Modellläufe mit stetig steigendem anthropogenen Klimaantrieb werden mit Modellläufen mit fixem anthropogenen Klimaantrieb verglichen. Der natürliche Antrieb ist nicht vorhersagbar und findet daher keine Berücksichtigung in den Modellen, obwohl er sicherlich einen deutlichen Einfluss auf die Klimaveränderung hat – vor allem auf dekadische Anomalien. Man spricht daher nicht von Klimaprognose sondern von Klimaszenarien für den

menschlichen Einfluss. Modellergebnisse dürfen nicht als „Langfristwettervorhersage“ (für alle Tage) angesehen werden. Man vergleicht sinnvollerweise lediglich 30-jährige Klimastatistiken zu Beginn und am Ende eines Vorhersagezeitraums. Im Falle dieser Studie wird durchgehend die Ausgangsperiode 1976-2007 mit der Zukunftsperiode 2021-2050 verglichen. Die Aussagen dieser Studie gelten dementsprechend für mittlere Verhältnisse der Periode 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007, nicht jedoch für spezifische Einzeljahre oder Einzelereignisse. Als Globale Basis wurde das IPCC Multimodel Ensemble (CMIP3) verwendet, für das Herunterskalieren auf die regionale Skala von Österreich wurden die Ergebnisse der Modelle COSMO-CLM herangezogen und mit dem Modell REMO verglichen. Die Aussagen dieser Studie gelten dementsprechend für regionale Verhältnisse in Österreich, nicht jedoch für einzelne kleine und kleinste Einzugsgebiete.

Unsicherheiten

- Generell besteht ein Gefälle bei der Sicherheit der Aussagen von Klimamodellen von großräumig-langfristig-(gut) zu kleinräumig-kurzfristig (schlecht).
- Ein analoges Gefälle besteht von Aussagen über die Lufttemperatur (gut) zu Aussagen über den Niederschlag (schlecht).
- Extremwerte sind per Definition kleinräumig und kurzfristig weshalb sie sich nach dem derzeitigen State-of-the-art einer Vorhersage weitestgehend entziehen. Aus den zwei ersten Aussagen folgt, dass das besonders für Extremwerte des Niederschlags gilt.
- Wegen der Unsicherheiten ist es wichtig zu unterscheiden, in welchem Ausmaß den Beobachtungen, Modellergebnissen und sonstigen Überlegungen vertraut werden kann. Deswegen wird in dieser Studie durchgängig unterschieden, ob es sich bei den Aussagen um tragfähige (harte) Aussagen handelt bzw. weniger Vertrauen in diese Aussagen gelegt werden kann (mittelharte sowie weiche Aussagen).

Situation in der Vergangenheit

- Die Lufttemperatur hat in Österreich seit Mitte der 1970er Jahre deutlich (fast 1.5 °C) zugenommen. Es handelt sich dabei um einen für Österreich sehr einheitlichen Trend. Die Zunahme war stärker im Sommer (fast 2°C) als im Winter (ca. 1°C) (*harte Aussage*).
- Die Jahressummen des Niederschlags sind seit der Mitte der 1970er Jahre überall gestiegen, außer im Südosten, wobei die Zunahme im Norden und inneralpin monoton ansteigend war (mehr als 15% im Norden, ca. 10% inneralpin), im Westen und Südosten stark durch dekadische Minima und Maxima geprägt war (*harte Aussage*).
- Die Winterniederschläge sind seit der Mitte der 1970er Jahre nördlich des Alpenhauptkammes etwas gestiegen, südlich des Alpenhauptkammes deutlich gefallen. In den anderen Jahreszeiten gab es tendenziell eine Zunahme des Niederschlags in ganz Österreich mit Ausnahme des Südens wo die Trends sehr gering waren (*harte Aussage*).

Situation in der Zukunft

- Die Lufttemperatur wird in Österreich gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 um ca. 1° C steigen, wobei die Zunahme im Sommer stärker sein wird als im Winter (*harte Aussage*).
- Der Anteil des Schneeniederschlags und die Schneedeckendauer werden gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 weiter abnehmen. Die Veränderung von Schneeniederschlag und Schneedeckendauer ist stark von der Seehöhe abhängig und nicht-linear. Es bestehen beim Schnee große regionale Unterschiede, die sich einer komprimierten Beschreibung entziehen (*harte Aussage*).

- Gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 werden die Winterniederschläge insbesondere nördlich des Alpenhauptkammes eher zunehmen, die Sommerniederschläge werden eher abnehmen. Eine stärkere Veränderung des Niederschlags ist erst nach 2050 zu erwarten (*mittelharte Aussage*).
- Die potentielle und auch die aktuelle Verdunstung werden gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 zunehmen (*mittelharte Aussage*). Die Größenordnung der Änderung ist jedoch unsicher.
- Kleinräumige Änderungen des Niederschlags sind ebenfalls zu erwarten (*weiche Aussage*). Die derzeitigen Modellergebnisse sind jedoch unzuverlässige und widersprüchlich.
- Die Aussage, dass Extremwerte des Niederschlags auf Grund der höheren Niederschlagssummen im Winter und des auf Grund physikalischer Zusammenhänge mit dem zu erwartenden Temperaturanstieg einhergehenden höheren Feuchtegehaltes der Atmosphäre im Sommer (konvektive Ereignisse) zunehmen ist derzeit spekulativ, da die bisherigen Niederschlagsdaten in Österreich mit ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung und Genauigkeit keine Hinweise auf eine Zunahme von Extremniederschlägen ergeben.

2.2 Ausgangspunkte für das Wissen über die Klimavergangenheit und hydrologische Auswirkungen

- **Klimaantriebe:** wirken von außen auf das globale vernetzte Klimasystem.
- **Klimadaten:** direkte Messdaten aus der instrumentellen Periode und indirekte „Proxydaten“ für die Zeit davor.
- **Klimamodelle:** versuchen durch Anwendung physikalischer Gesetze und mittels unterschiedlich komplexer mathematischer Algorithmen das zu berechnen, was die Klimaantriebe im Klimasystem bewirken.

Wenn man das Klima mit seinen unterschiedlichen räumlichen Ausformungen erfassen, seine Veränderungen in der Vergangenheit verstehen und seine Zukunft vorhersagen will, ist die Grundvoraussetzung dafür, die „Klimaantriebe“ zu kennen, die von außen her auf das Klimasystem einwirken. Erst dann kann man versuchen, das Wissen um die physikalischen Gesetze, die die Bewegungen, die Energieflüsse, die Zustandsgrößen der Atmosphäre (Luft), der Hydrosphäre (flüssiges Wasser), der Kryosphäre (Schnee und Eis) in ein Gedankenmodell zu vereinen, das ein schlüssiges raum-zeitliches Bild des Klimas der Erde erzeugt. Dieses kann dann in physikalisch- mathematische Gleichungen übersetzt werden, und auf Großrechenanlagen das Klima der Vergangenheit und auch der Zukunft durchspielen. Die dritte Grundlage für die Analyse „des Klimawandels“ sind Messdaten der Klimaparameter. Sie geben Auskunft über die Entwicklungen der Vergangenheit und Gegenwart, und sie liefern die einzige Basis zur Evaluierung der Modellergebnisse.

- **Zeitdimension:** die verschiedenen Klimaantriebe sind auf ganz unterschiedlichen Zeitskalen wirksam, die von hunderten von Millionen von Jahren (geologische Vorgänge) bis zu Zeitauflösungen von Tagen bis Sekunden reichen (Böenspitzen von Stürmen).
- **Raumdimension:** Klima und Klimavariabilität spielt sich auch auf ganz unterschiedlichen räumlichen Skalen ab, die von globalen (globale Erwärmung) über kontinentale bis zu regionalen (Alpenraum, Südostösterreich) und lokalen (Starkregen, Tornado) Effekten reichen.
- **Raum-Zeit-Verknüpfung:** Im Allgemeinen ist die räumliche eng mit der zeitlichen Dimension des Klimas verknüpft. Derzeitige „state of the art“ Klimamodelle kommen

eher mit gröberen Raum- und Zeitskalen zurecht. Dasselbe gilt auch für aus Messdaten ableitbare Klimastatistiken.

Bei allen drei hier zu besprechenden Teilaspekten – Klimaantrieben, Klimadaten und Klimamodelle - muss man danach trachten, die verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen nicht aus dem Auge zu verlieren. Das Klima ist ein weites Feld, in dem es global wirksame Komponenten gibt, wie zum Beispiel den derzeitigen Anstieg der Treibhausgase oder die von der Sonne gelieferte Energie. Großräumige Luft- und Meeresströmungen verteilen die Energie im kontinentalen Maßstab, die durch die Erddrehung und die Reibung abgelenkt werden und auch einen Drehimpuls erhalten, der die bekannten großen Tief- und Hochdruckgebiete erzeugt. Andere Wirkungsmechanismen wie die unterschiedliche Wärmeleitung in der Erde und im Wasser machen die Kontinente im Winter kälter und im Sommer wärmer als die Ozeane oder sorgen beispielsweise in Indien durch dem Monsunregen für die Lebensgrundlage von hunderten Millionen von Menschen. Besonders in gebirgigen Gegenden, die im Fall des Alpenlandes Österreich im Vordergrund der Betrachtung stehen, bewirken vor allem die Höhenunterschiede des Geländes, aber auch Bebauung oder Bewaldung Temperatur-, Feuchte-, Wind- und Sonneneinstrahlungsunterschiede auf kleinstem Raum, die oft stärker sind als gemeinhin erwartet. Die durch großräumige Luftdruckunterschiede erzeugten Luftströmungen können in einem Alpental völlig abgeschirmt sein, wenn die Windrichtung nicht mit der Talrichtung übereinstimmt. Sie können sich jedoch auch verstärken, wenn sie in einem engen Tal „kanalisiert“ werden, oder wenn der Föhn starke, trockene Höhenluft ins Tal stürzen lässt. Die Ablenkung der Luftströmung, im Verein mit dem Dünnen- und Kälterwerden der Luft (die dadurch weniger Feuchtigkeit behalten kann) verstärkt den Niederschlag im Luv des Gebirges und schwächt ihn im Lee ab. Das kann im Extremfall Wüsten entstehen lassen, wie hinter den mächtigen amerikanischen nord-südlich verlaufenden Gebirgsketten oder zu den stärksten Niederschlagssummen der Erde führen, wie in Neuseeland, Hawaii oder an den südlichen Ausläufern des Himalaya. Aber auch vergleichsweise unbedeutende „Gebirgszüge“ wie die Hügelkette des Wienerwaldes erzeugen im Raum Wien Unterschiede der Jahressummen des Niederschlages von rund 500mm im flachen Osten der Stadt bis rund 800mm auf den nur rund 300m höheren Wienerwaldbergen.

Alle diese oft verwirrend und nicht zur Gänze verstandenen Facetten des komplizierten vernetzten Klimasystems können hier nicht ausführlich und vollständig beschreiben werden. Sehr wohl können jedoch die großen Wirkungsmechanismen, die globalen Klimaantriebe skizziert werden, die den hier interessierenden „Klimawandel“ verursachen – der die „Hintergrundbelastung“ der regionalen Klimavariabilität in Österreich darstellt.

- **Harte und weiche Fakten:** Zusammen mit noch nicht bekannten bzw. noch nicht adäquat in die Datenrekonstruktion oder die Klimamodelle einbaubaren physikalischen Zusammenhängen stellen vor allem die räumliche und/oder die zeitliche Auflösbarkeit den Hauptgrund dar für eine Unterteilung des Wissensstandes über die Klimavariabilität in Vergangenheit und Zukunft in harte und weiche Fakten.

2.2.1 Natürliche und anthropogene Klimaantriebe in Vergangenheit und Gegenwart

- **Interne Rückkopplungen im Klimasystem:** wichtig für alle Klimavariationen, da sie die für sich meist wenig wirksamen äußeren Klimaantriebe verstärken (positive Rückkopplung) oder das Klima stabilisieren (negative Rückkopplung).
- **Treibhausgase (natürlich):** wirksam auf allen Zeitskalen durch die Verminderung der Wärmeabstrahlung der Erde in den Weltraum, veränderlich durch geologische Vorgänge und auch durch Rückkopplungen z. B. durch die variable Löslichkeit im Ozeanwasser.

- **Treibhausgas Wasserdampf (natürlich):** Wasserdampf ist das stärkste Treibhausgas, da wärmere Luft mehr Wasserdampf enthalten kann als kältere wirkt das Treibhausgas Wasserdampf als verstärkender Faktor für alle Klimaschwankungen in Form einer positiven Rückkopplung.
- **Kontinentalverschiebung (natürlich):** Zeitskala Jahrmlionen und länger, wichtig für Eiszeitalter (Permo-Karbon, Quartär) und lange Wärmeperioden (Mesozoikum, frühes Tertiär).
- **Zyklen der astronomischen Erdbahnparameter (natürlich):** Zeitskala Jahrzehnbis Jahrhunderttausende, wichtig für den Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten in einem Eiszeitalter.

Zum Verständnis und zur Simulation der Vergangenheit des globalen Klimas kann man auf direkt gemessene oder indirekt rekonstruierte physikalische Klimaantriebe zurückgreifen, deren für das letzte Jahrtausend wichtigste in den Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2 dargestellt sind. Auf der längeren Zeitskala von Jahrmlionen und Jahrhunderttausenden sind noch andere als die hier gezeigten Klimaantriebe wirksam, wie etwa die Kontinentalverschiebung oder die veränderlichen astronomischen Erdbahnparameter wie Exzentrizität der elliptischen Bahn der Erde um die Sonne, Neigung der Erdachse, Wanderung des Frühlingspunktes auf der Ekliptik (Details in Berger und Loutre, 1991). Für unsere Zwecke, den Klimaeinfluss auf unsere heutige Zivilisation, kann man sich auf diejenigen Faktoren beschränken, die in den letzten und den kommenden Jahrhunderten wichtig sind. Alle längerfristig wirksamen Klimaantriebe im Maßstab von Jahrhunderttausenden (Eiszeiten-Zwischeneiszeiten) bis Jahrmlionen und hunderten Jahrmlionen der Erdgeschichte sind hier ausgeblendet. Sie sind an dieser Stelle lediglich der Vollständigkeit halber erwähnt, da gerade das Durcheinanderbringen unterschiedlicher Zeitskalen Grund für Missverständnisse in der Debatte über den Klimawandel ist. So ist z.B. der Hinweis darauf, dass wir uns langfristig bereits wieder auf eine neue Kaltzeit zu bewegen richtig, nur für unser Leben völlig irrelevant, da das erst nach einigen Jahrzehntausenden schlagend wird. Davor – für die nächsten Jahrhunderte – werden wir uns mit dem auf der Skala von Jahrzehnten bis Jahrhunderten wirksamen Klimaantrieben auseinander zu setzen haben, die hier besprochen werden.

- **Solarer Antrieb (natürlich):** Zeitskala Jahrzehnte bis Jahrhunderte, geringe aber klimawirksame Schwankungen der Intensität der kurzwelligen Einstrahlung der Sonne sind wichtig für Phänomene wie das mittelalterliche Wärmeoptimum, die „kleine Eiszeit“ und den Temperaturanstieg im 19. und der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts.
- **Explosiver Vulkanismus (natürlich):** Explosive Vulkanausbrüche schleudern große Aerosolmengen über die Sperrschicht der Tropopause hinaus, sodass sie längere Zeit (Monate bis 1-2 Jahre) in der Stratosphäre bleiben und in Summe abkühlend auf die Luftschichten darunter wirken.

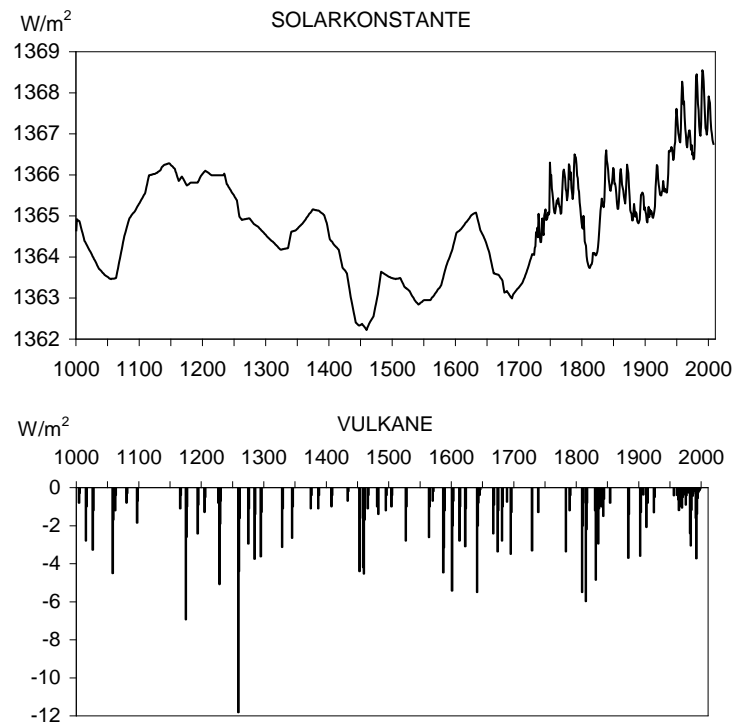


Abbildung 2-1: Natürliche Klimaantriebe im letzten Jahrtausend. Oben: Rekonstruktionen der zeitlichen Variabilität der solaren Einstrahlung - zusammengesetzt aus direkten Satellitenmessungen, und Rekonstruktionen aus direkten Sonnenfleckenbeobachtungen (Lean et al., 2000) und aus ^{14}C - und ^{10}Be -Isotopenreihen aus Baumjahren und Eisbohrkernen (Bard et al., 2000, Solanki et al., 2004, Lean and Rind, 2008). Unten: 1000-jährige Rekonstruktion des Klimaantriebes durch Vulkanausbrüche, die Schwefeldioxid in die Stratosphäre schleuderten, aus verschiedenen Eisbohrkernen und aus direkten Messungen (Crowley, 2000).

Die Abbildung 2-1 zeigt oben eine aktuelle Rekonstruktion der zeitlichen Veränderungen der von der Sonne gelieferten Energie, die als kurzweilige Strahlung an der Obergrenze der Erdatmosphäre eintrifft. Das untere Diagramm zeigt die (abkühlende) Wirkung von Vulkanen, die durch die Rückstreuung an den durch explosive Ausbrüche in hohe Luftschichten geschleuderten „Aerosolen“ zustande kommt. Diese beiden natürlichen Faktoren haben bis vor etwa fünfzig Jahren vorwiegend die Klimavariationen des letzten Jahrtausends beherrscht, die mit einem „mittelalterlichen Wärmeoptimum“ begannen, dann in eine „kleine Eiszeit“ übergingen von der sie sich mit steigender Solarintensität schließlich wieder bis Mitte des 20. Jahrhunderts etwa auf den Stand des Mittelalters „erholten“. Erwähnenswert (hier nicht gezeigt) ist, wie Solanki et al., 2004 zeigen konnten, dass der solare Antrieb des Erdklimas in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts einen absoluten Höchststand nicht nur der letzten 1000 Jahre erreicht hat, sondern dass auch in den letzten 10.000 Jahren nichts Vergleichbares aufgetreten ist.

- **Treibhausgase (anthropogen):** Spurengase wie CO_2 , CH_4 , N_2O und andere erwärmen die untere Atmosphäre durch Verminderung der Ausstrahlung der Erde im langwelligen Bereich des Spektrums (harter Fakt). Sie haben typische Verweilzeiten in der Atmosphäre zwischen wenigen Jahren bis Jahrhunderten.

Im 20. Jahrhundert begann auch der Mensch mit ins Klima einzugreifen - allerdings durchaus ambivalenter, als es dem gängigen Klischee „ausschließlich anthropogene Klimaerwärmung“ entspricht. Durch das Verbrennen fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) und durch Aktivitäten im Zusammenhang mit der Nahrungsmittelproduktion (Nassfeldanbau, Wiederkäuer...) wurden vor allem die zwei „Leittreibhausgase“ Kohlendioxid (CO_2) und

Methan (CH₄) in der Atmosphäre in immer höheren Konzentrationen angereichert (linkes Diagramm der Abbildung 2-2).

- **Aerosole (anthropogen):** Ebenfalls anthropogen werden Aerosole in die Atmosphäre eingebracht, die (quantitativ weicher Fakt) in Summe abkühlend wirken.

Die erwärmende Wirkung der Treibhausgase wurde jedoch in den ersten Jahrzehnten der extremen, und zunächst auf schmutzigen (z.B. viel Schwefel emittierenden) Technologien beruhenden, Wirtschaftsentwicklung nach dem zweiten Weltkrieg „maskiert“. Diese z.B. Sulfat-Aerosole hatten (wie die durch die Vulkane freigesetzten) in Summe eine abkühlende Wirkung auf das Erdklima, die bis etwa 1980 dauerte. Erst die großen Anstrengungen zur Luftreinhaltung in den westlichen Industriestaaten bewirkten, zusammen mit dem Zusammenbruch der Schwerindustrie im früheren Ostblock, eine Trendwende dieses anthropogenen Klimaantriebes, die – für Mitteleuropa - im rechten Diagramm von Abbildung 2-2 zu sehen ist.

Die Treibhausemissionen allerdings konnten bis heute nicht reduziert werden, was wohl auch für die Zukunft nicht in nennenswertem Ausmaß zu erwarten ist. Zu eng ist offenbar das „Komfortgas“ CO₂, das unsere Räume heizt, unsere Maschinen und Fahrzeuge antreibt, mit unserer Zivilisation verbunden, zu stark ist der Aufholbedarf der Mehrheit der Erdbevölkerung in dieser Hinsicht, und zu eng ist wohl auch die Abhängigkeit der Ernährung der Menschheit von der Freisetzung von Methan – Die COP15 Konferenz in Kopenhagen im Dezember 2009 hat die diesbezüglichen politischen Schwierigkeiten überdeutlich vor Augen geführt.

Der Erfolg bei der Luftreinhaltung und der bisherige Misserfolg bei den Bemühungen, die Emissionen der Treibhausgase einzudämmen führte seit 1980 zum nun tatsächlich erfolgten Eintritt ins „anthropogene Treibhausklima“, das uns wahrscheinlich auch die nächsten Jahrhunderte begleiten wird, zumindest bis weiterer technologischer Fortschritt die zurückgehenden Reserven an „gespeicherter fossiler Solarenergie“ (nichts anderes sind die drei fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas) in nennenswertem Ausmaß zu ersetzen vermag.

- **Natürliche und anthropogene Klimaantriebe:** Ein harter Fakt in der Klimafrage ist die Existenz sowohl natürlicher als auch vom Menschen verursachter (anthropogener) Klimaantriebe.
- **Harter Fakt:** etwa bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts ist die Erwärmung überwiegend von natürlichen Antrieben gesteuert, dann zusätzlich und zunehmend anthropogen.

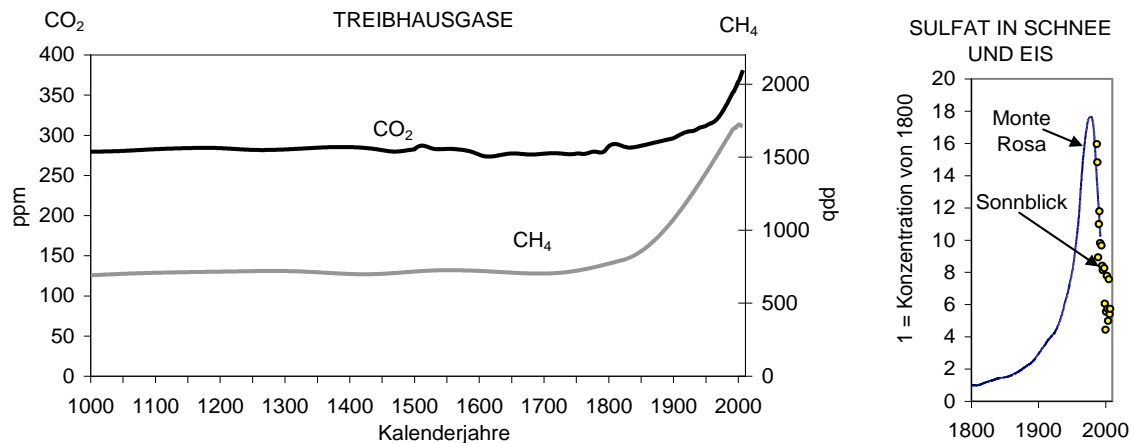


Abbildung 2-2: Zusätzliche Klimaantriebe durch den Menschen. Links: Entwicklung der zwei langlebigen Treibhausgase vom Jahr 1000 bis 2007 aus Eisbohrkernen und aus direkten Messungen, Quelle: Robertson et al, 2001 (aktualisiert). Rechts: Sulfatgehalt im Firn und Eis der Hochalpen. Kombiniert aus den stark geglätteten Daten eines Eisbohrkerns (Colle Gnifetti, 4450m, Monte Rosa Gipfelzone) seit 1800 mit jährlichen Messungen im Winterschnee im Sonnblickgebiet (3000m, Hohe Tauern) seit 1982. Quellen: Wagenbach, pers. Mitt, 2008 und Schöner, 1995 (aktualisiert bis 2007).

Die Zusammenstellung und kurze Skizzierung dessen, was das Klima global antreibt, sollte nicht zuletzt vermitteln, wie unsinnig der in der Öffentlichkeit ausgefochtene Streit über die Ursachen des Klimawandels ist. Meist stehen die Extrempositionen einander unversöhnlich gegenüber: zwischen „alles natürlich“ bis zu „wir sind an allem schuld“ scheint es keinen Kompromiss zu geben. Dabei vermittelt schon unser kurzer Überblick, dass auch schon bei geringfügig längeren Nachdenken klar ist, dass wir es bei der Klimavariabilität und deren Ursachen mit einem Zusammenspiel sowohl natürlicher als auch anthropogener (= von uns verursachter) Faktoren geht.

In den direkt gemessenen Temperaturkurven der letzten 250 Jahre der Abbildung 2-3 ist das erwähnte Zusammenspiel natürlicher und anthropogener Einflüsse durch spezielle Markierungen hervorgehoben. Das starke Auf und Ab von Jahr zu Jahr im Vergleich zu dem geglätteten Verlauf der Kurven möge außerdem hier bereits erstmals darauf aufmerksam machen, dass zwischen einzelnen extremen Ausreißern und dem langjährigen „Hintergrundtrend“ nicht notwendigerweise Übereinstimmung bestehen muss. Der einzelne heiße oder kühle, trockene oder verregnete Sommer, oder der schneereiche oder apere Winter sollte nicht als Hauptargument für oder gegen „den bereits eingetretenen Klimawandel“ verwendet werden – man läuft sonst Gefahr, dass einem der nächste prompt folgende Ausschlag in die Gegenrichtung dieses griffige (und viel zu oft gehörte) Argument aus der Hand schlägt. Sachlichkeit und zunächst wertfreie wissenschaftliche Analyse liefert die „nachhaltigeren“ Argumente. Mit den großräumigen Klimaantrieben wurden die globalen Rahmenbedingungen dazu abgesteckt.

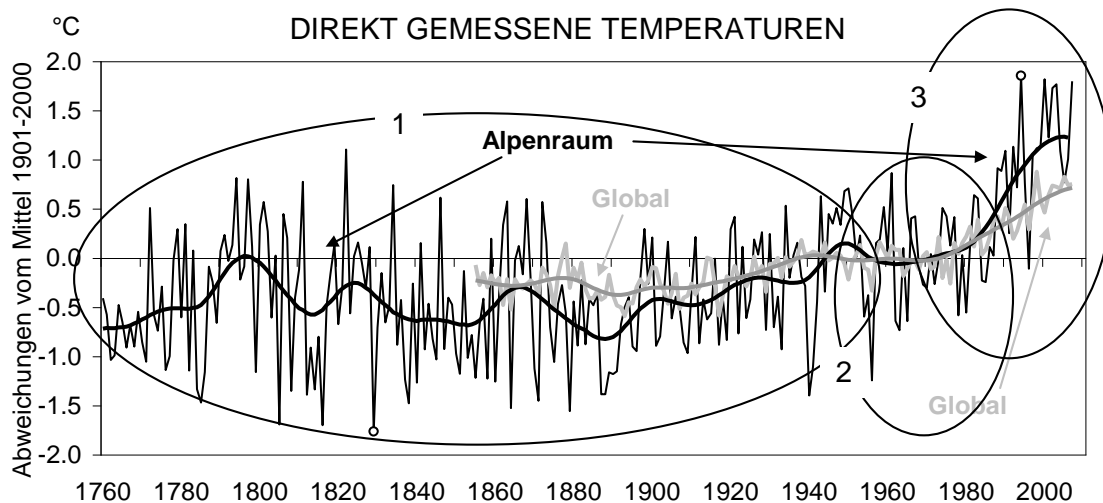


Abbildung 2-3: Direkt gemessene Jahresmittel der Lufttemperatur im Großraum Alpen 1760-2007 (schwarz) und im globalen Mittel 1858-2007 (grau). Dargestellt sind Anomalien zum Mittel des 20. Jahrhunderts. Alpenraum: 4-19°E, 43-49°N, Mittel aus 124 Einzelreihen; Global-Land: Mittel aus 2000 Festland- und Inselstationen. 1: letzte natürliche Periode – solarer und vulkanischer Einfluss dominant. 2: erster merklicher menschlicher Einfluss – die Aerosolperiode. 3: Eintritt ins Treibhauszeitalter. Quellen: Auer et al., 2007 und Jones et al., 1999 (aktualisiert).

Die hier beschriebenen Klimaantriebe in Vergangenheit und Gegenwart bilden die Grundlage für die später besprochene Klimamodellierung (Überblicke in von Storch et al., 1999, Washington and Parkinson, 2005). Wird diese für vergangene Zeiten durchgeführt, können die Klimamodelle mit diesen Antrieben („forcings“) „gefüttert“ werden, und die Modellphysik zeigt dann, was im Klimasystem der Erde durch diese äußeren Antriebe intern bewirkt wird. Die Antriebe liegen dabei als direkt oder indirekt („proxis“) gemessene Information vor. Zusammen mit den ebenfalls direkt gemessen oder als Proxis rekonstruierten Informationen über die Klimaparameter (Lufttemperatur, Niederschlag, Wind, Luftdruck etc...) ermöglicht das eine direkte Überprüfung, ob oder wie gut die Klimamodelle die gemessene „Wirklichkeit“ des Klimasystems wiedergeben können.

In den Kapiteln 2.4.2 und 2.4.3 wird diese Art der Modellvalidierung im Detail für Mitteleuropa und für Österreich beschrieben. Bereits hier zeigen die Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5, dass die Modellierung der dekadischen bis sekularen Trends der Lufttemperatur im großräumigen bis kontinentalen Maßstab bereits akzeptable Ergebnisse liefern kann.

Lässt man die rekonstruierten natürlichen und in letzter Zeit auch durch uns geschaffenen Klimaantriebe auf die virtuelle Welt eines gekoppelten globalen Ozean-Atmosphärenmodelle („Atmosphere-Ocean General Circulation Models“ – AOGCMs) einwirken, dann sollte etwas ähnliches herauskommen, wie die direkten und indirekten Klimadaten der Vergangenheit zeigen. Abbildung 2-4 bringt eine derartige Realisierung der Sommer-Frühherbst Temperaturen in den letzten 1000 Jahren in Europa. Der Vergleich mit der auf Baumringen beruhenden Temperaturrekonstruktion aus alpinen Hochlagen, der in Abbildung 2-5 zu sehen ist, zeigt eine gute Übereinstimmung nicht nur in den wesentlichen Merkmalen der Klimaentwicklung des letzten Millenniums mit einem warmen Beginn, einer Abkühlung danach und einer raschen Erwärmung am Ende des Millenniums. Auch kürzere Besonderheiten kann das Modell liefern, wie die kalten 1810er Jahre, die wir aus historischen Berichten kennen (Slupetzky N und Slupetzky H, 1995) und auch die bekannte und wissenschaftlich gut abgesicherte erste Rückzugsphase nach dem Gletscherhochstand um 1850 (z.B. Böhm et al., 2007) ist im Modelllauf durch zwei Jahrzehnte mit sehr warmen Sommern dokumentiert.

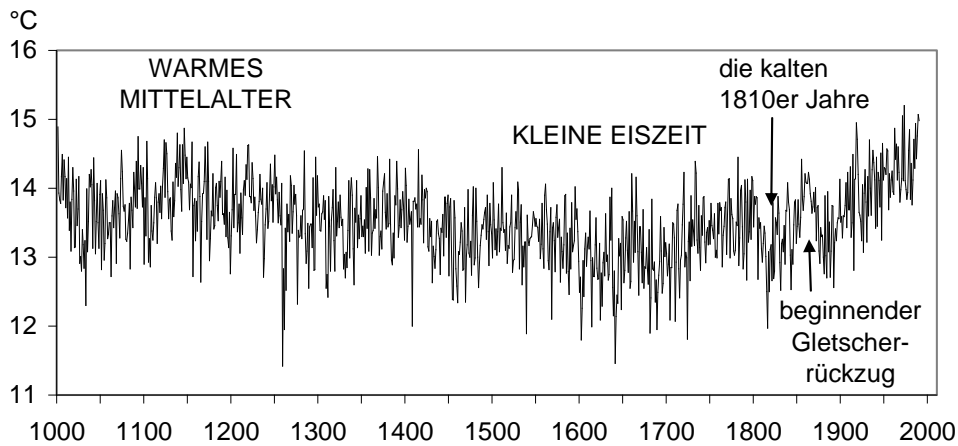


Abbildung 2-4: Klimamodellauf ERIK-1 für die Mitteltemperaturen Juni-September der Jahre 1000-1990 n. Chr. für Festlandeuropa (10°W-40°E, 35°N-70°N). Pers. Mitt. von E. Zorita, Modellbeschreibung in Zorita et al. (2004).

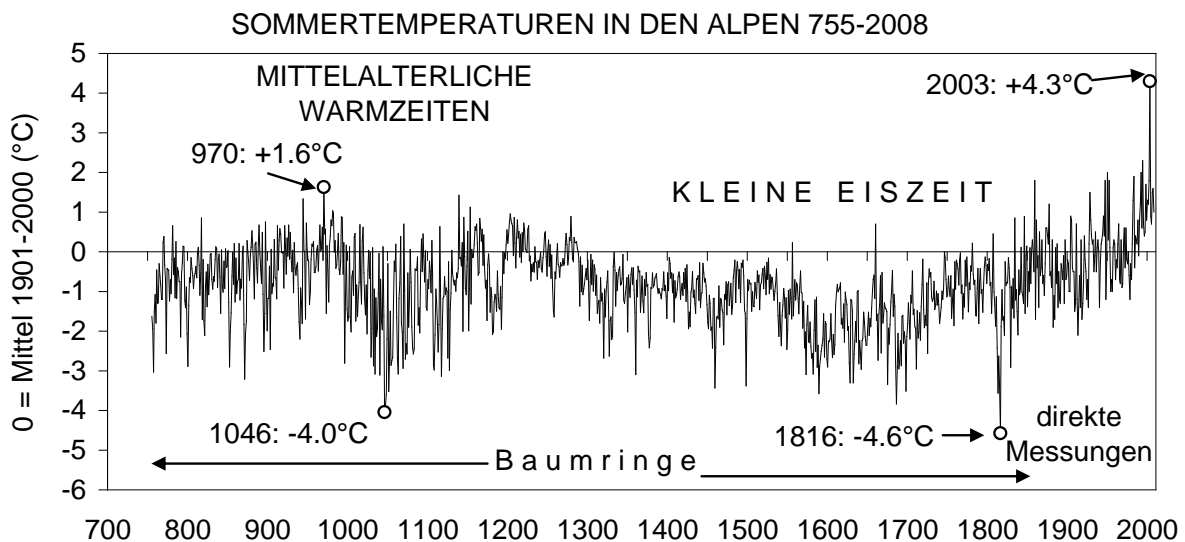


Abbildung 2-5: Rekonstruktion der Sommer-Frühherbst Temperaturen (Juni-September) in den Alpen seit dem Jahr 755 n. Chr. 755-1850: rekonstruiert aus Hunderten Jahrringdichtereien (Büntgen et al., 2006) 1760-2007: direkt gemessene HISTALP-Daten (Auer et al., 2007a).

- **Im kontinentalen Maßstab** kann Klima mathematisch physikalisch modelliert werden, wenn die äußeren Klimaantriebe (engl. forcings) bekannt sind (harter Fakt).

Es scheint also befriedigend zu klappen mit der Simulation des Klimas der Vergangenheit – zumindest im kontinentalen Maßstab und für das Hauptklimaelement Temperatur. Wie es sich auf räumlich feineren Skalen verhält, wie es um die Modellierbarkeit des Niederschlages steht, wird in Kapitel 2.2.5 besprochen, das sich mit dem Herunterskalieren („downscaling“) auf diejenigen Maßstäbe befasst, die in dieser Arbeit vor allem interessieren.

Da wir die Aussagekraft der Klimamodelle für die Zukunft natürlich nicht an der realen Welt direkt testen können – das bleibt unseren Nachfahren vorbehalten – so scheint es zumindest sinnvoll, eine Bestätigung in der Vergangenheit zu suchen. Nur Klimamodelle, die sinnvolle

Ergebnisse des vergangenen Klimas erbringen, erfüllen die notwendige (nicht hinreichende) Voraussetzung, ihnen auch im Hinblick auf die Zukunft zu vertrauen.

2.2.2 Abschätzung künftiger Klimaantriebe

Eine rechnerisch-physikalische Simulation des künftigen Klimaverlaufs allerdings setzt eine Abschätzung des Verlaufs der Klimaantriebe in der Zukunft voraus. Typischerweise werden dazu AOGCMs zweimal laufen gelassen, einmal ohne Veränderung sowohl der natürlichen als auch der anthropogenen äußeren Antriebe und einmal unter dem Einfluss von erwarteten Konzentrationsänderungen der anthropogenen Treibhausgase, die sich aus Abschätzungen der künftigen politischen, wirtschaftlichen, sozialen, technologischen Entwicklungen ergeben. Es sei bereits hier festgehalten (später wird noch genauer darauf eingegangen), dass die Zukunftsabschätzung lediglich die anthropogenen Klimaantriebe umfasst. Über die Entwicklung der für das kommende Jahrhundert wesentlichen natürlichen Antriebe (Solarintensität und explosive Vulkanausbrüche) gibt es keine physikalisch fundierten Prognosen. Erst wenn man sich für die kommenden Veränderungen über Jahrtausende und Jahrhunderttausende hinweg interessiert, hätte man mit den Vorausberechnungen der astronomischen zyklischen Parameter der Erdbahn und der Erdachse wieder verlässliche Grundlagen zur Hand. Diese Zeitskala ist in diesem Gutachten jedoch nicht von Interesse.

- **Künftige natürliche Klimaantriebe** können erst ab Zeitskalen ab Jahrtausenden abgeschätzt werden (Erdbahnparameter hart, Kontinentalverschiebungen weich) – für das solare und das vulkanische forcing ist das auf physikalischer Basis nicht möglich.
- **IPCC-Treibhausgasszenarien** schätzen künftige anthropogene forcings ab – die Unwägbarkeiten der kommenden politischen, wirtschaftlichen, gesellschaftlichen, technologischen Entwicklungen und nicht zuletzt der Entwicklung der Anzahl der Menschen machen diese Schätzungen zu weichen Fakten. Man spricht deshalb von Zukunfts-Szenarien, nicht von Klimaprognosen.

IPCC hat für die Erwartungen der Klimazukunft des 21. Jahrhunderts durch Treibhausgase zahlreiche „Entwicklungsfamilien“ abgeleitet, deren Unterschiede zumindest eine ebenso hohe zusätzliche Unsicherheit zu der aus den mathematisch-physikalischen Modellunsicherheiten resultierenden hinzufügt. Das faszinierende daran ist, dass man auf diese Weise verschiedene Zukunftswelten virtuell durchspielen kann, und so die Möglichkeit besteht, die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf das Erdklima abzuschätzen. Tabelle 2-1 ist ein Versuch, die drei wesentlichen Szenarien-Familien der Entwicklung der Menschheit im 21. Jahrhundert kurz zusammenzufassen. Als Leitszenario wird von IPCC das mit A1B bezeichnete verwendet. Die mit „business as usual“ oder „hässliche Globalisierung“ charakterisierbare A2-Welt zeigt, welche Erwärmung nach oben hin absteckbar ist, die „schöne neue Welt“ des geplanten und global umgesetzten Umweltbewusstseins läuft unter B1 und führt zur geringsten Treibhausgasbelastung.

Tabelle 2-1: Kurzbeschreibung der drei am häufigsten verwendeten IPCC-Zukunftsszenarien der globalen Entwicklung im 21. Jahrhundert nach Nakicenović und Swart (2000).

<p>A1-Familie</p>	<p>Schnelles Wirtschaftswachstum in einer mobilen, global stark vernetzten, immer mehr zusammenwachsenden Welt. Einkommensunterschiede zwischen Individuen und zwischen Ländern bzw. Regionen vermindern sich.</p> <p>Hohe Investitionen in Bildung und Forschung. Höhere Lebenserwartung und bessere Gesundheit führen weltweit zu kleineren Familien. Bis 2050 steigt die Erdbevölkerung auf 9 Mrd., dann fällt sie bis zum Jahr 2100 auf 7 Mrd.</p> <p>Neue Technologien werden schnell eingesetzt. Energieeffizienz steigt an. Sehr unterschiedliche Energieprioritäten, im "Marker Szenario" A1B wird ein ausbalancierter Mix aus verschiedenen Energiequellen benutzt.</p>
<p>A2-Familie</p>	<p>Wenig globale Vernetzung in einer regional differenzierten, kulturell pluralistischen Welt. Verglichen mit A1 insgesamt weniger Wirtschaftswachstum, anhaltend große Einkommensunterschiede zwischen Individuen und zwischen Ländern bzw. Regionen.</p> <p>Fertilitäts- und Sterblichkeitsraten entwickeln sich weniger stark als in den A1-Welten. Die Erdbevölkerung wächst weiter und erreicht im Jahr 2100 15 Milliarden</p> <p>Der Energiemix ist ebenfalls differenzierter als in der A1-Welt und orientiert sich hauptsächlich an der regionalen Verfügbarkeit. Große Teile der Wirtschaftsentwicklung müssen in die Nahrungsproduktion investiert werden, dadurch gibt es in den anderen Sektoren weniger Weiterentwicklung als in A1, auch im Energiesektor</p>
<p>B1-Familie</p>	<p>Das Hauptmerkmal der B1 Entwicklungslinien ist ein hohes Umwelt- und Sozialbewußtsein, das sich in einem global kohärenten Trend zu nachhaltiger Entwicklung führt.</p> <p>Nach unruhigen bis chaotischen Jahrzehnten setzen sich Gemeinschafts-Werte gegenüber Individualismus durch, dabei spielen gesteuerte Erziehung und starke politische Steuermechanismen eine führende Rolle.</p> <p>Reduzierter Konsum und starke Konzentration auf erneuerbare Energieformen führen zu den bedeutendsten Erfolgen auf dem Sektor der Eindämmung der Treibhausgasemissionen. Die Erdbevölkerung entwickelt sich ähnlich wie in den A1-Szenarios, aber aus anderen Gründen, hauptsächlich wegen der erhöhten Sicherheit durch das soziale Engagement der Gesellschaft</p>

Abbildung 2-6 fasst den Weg von den sozio-ökonomisch-politischen Zukunftsszenarien zu den naturwissenschaftlichen Klimamodellen zusammen. Links sehen wir den berühmten IPCC-Entwicklungsbaum, der versucht, ein wenig Systematik in die zahlreichen Entwicklungslinien für das 21. Jahrhundert zu bringen. Die Wurzeln des Entwicklungsbaumes stehen für das, was die Treibhausgasemissionen beeinflusst. Die Baumkrone verzweigt sich in vier verschiedene Hauptgruppen, die in der Vertikalen nach den beiden Grundorientierungen „ökologisch“ und „ökonomisch“ unterteilt sind. In der Horizontalen wird die Unterteilung nach dem grundlegenden räumlichen Muster der globalen Politik, Wirtschaft, Gesellschaft unterschieden in eher „globalisiert“ oder „separiert“. Für die von IPCC-2007 am häufigsten verwendete A1-Familie (also eine global vernetzte Welt, die eher ökonomisch als ökologisch orientiert ist) ist als Beispiel eine Verzweigung in drei Untergruppen eingezeichnet, je nachdem, welche Grundlagen für die Energieerzeugung angenommen wird. A1F1 etwa bleibt bei den fossilen Energieträgern Kohle, Erdöl und Erdgas. In der A1T-Welt kommt es zu sehr weitgehendem technologischen Fortschritt auf dem Gebiet neuer Energieträger und auf dem Gebiet der Energieeffizienz - und zwar aus wirtschaftlichem Interesse heraus, nicht durch legislativ-dirigistische Maßnahmen zum Schutz des Klimas – letzteres wurde ja gerade auf der Weltklimakonferenz COP15 in Kopenhagen mit geringem Erfolg versucht. A1B ist ein Mittelweg aus den beiden mit einem realistisch anmutenden Energiemix aus fossil und nichtfossil.

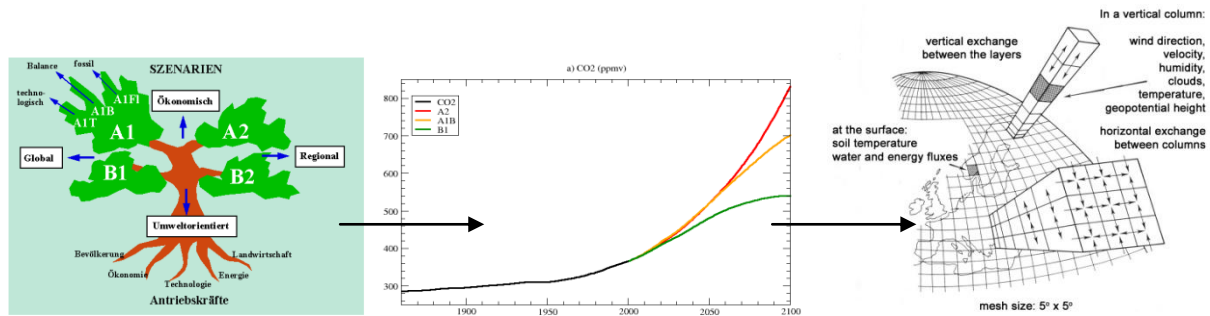


Abbildung 2-6: Der Weg von den sozio-ökonomischen IPCC-Zukunftsszenarien (links) über die daraus abgeleiteten Treibhausgasverläufe im 21. Jahrhundert (die drei bunten Kurven in der Mitte) zu den physikalischen mathematischen Modellen (rechts). Quelle: IPCC-2007

Das mittlere Diagramm zeigt, wie die Mengen an Treibhausgasen, die die Entwicklungslinien der Zukunftswelten im 21. Jahrhundert verursachen, den Gesamtgehalt der Atmosphäre an Treibhausgasen verändern werden. Dem liegt nicht eine einfache Aufsummierung der Emissionen von Jahr zu Jahr zugrunde, sondern es sollte im Idealfall der gesamte komplizierte „Kohlenstoffkreislauf“ modelliert sein, mit den unterschiedlichen „Quellen“ aus den Schornsteinen von Häusern und Fabriken, Auspuffanlagen von Autos, Flugzeugen und Schiffen, aber auch mit den „Senken“, wenn etwa CO_2 im Ozean gelöst wird, von Pflanzen bei der Assimilation aufgenommen, oder künftig vielleicht sogar unter viel Aufwand wieder in möglichst luftdichte geologische Schichten eingepresst wird („carbon storage“). Für die Abschätzung der IPCC-Szenarien konnte das für die verschiedenen Teilaspekte in unterschiedlicher Genauigkeit geleistet werden. Jedenfalls bilden diese Zukunftsszenarien eine dem derzeitigen „state of the art“ entsprechende optimale Grundlage.

Wir sehen, dass die verschiedenen Szenarien zu doch deutlich unterschiedlichen Entwicklungen bei den Treibhausgaskonzentrationen führen. Im B1-Szenario (grün) wird gegen Ende des 21. Jahrhunderts eine Stabilisierung des Treibhausgasniveaus bei ca. 540ppm (parts per million) erreicht, also schwach doppelt so hoch, wie das „vorindustrielle“ Niveau von rund 280ppm. Das IPCC-Leitszenario A1B (gelb) geht bis auf 700ppm hinauf und zeigt gegen Ende des Jahrhunderts zwar eine Abschwächung des Trends, aber keine Stabilisierung. A2 (das mit der regional differenzierten Welt und dem ungebremsen Bevölkerungswachstum (vergl. Tabelle 2-1) geht über 800ppm hinaus und zeigt keinerlei Trendwende. Interessant an den Verläufen ist auch die Tatsache, dass die Aufsplitterung zwischen den Szenarien erst um die Jahrhundertmitte erfolgt. Erst dann macht es Sinn, sich über Nachweise evt. Erfolge politischer Steuerungsversuche („Mitigation“) zur Begrenzung der Emissionen Gedanken zu machen. Ebenso kann zurzeit, und auch noch in den nächsten zwei bis drei Dezennien kaum durch Messungen der tatsächlichen Klimatrends unterschieden werden, auf welcher Entwicklungslinie wir uns tatsächlich bewegen. Daraus ergibt sich die in der Folge in diesem Gutachten befolgte Strategie, den Überlegungen nur ein Szenario zugrunde zu legen, da lediglich eine Abschätzung bis zur Jahrhundertmitte Thema ist. Aus pragmatischen Gründen werden wir auf A1B zurückgreifen, da für dieses Szenario in den letzten Jahren die meisten Realisationen von Klimamodellierungen entstanden sind.

- **A1B** ist das IPCC Leitszenario – es wird in der Folge auch in dieser Studie für die Zukunftserwartungen für das Klima der nächsten 100 Jahre verwendet.

2.2.3 Klimadaten aus der instrumentellen Periode

Der Großraum Alpen ist weltweit das Gebiet mit den meisten langen Klimamessreihen. In mehr als 10jähriger Zusammenarbeit mit den Wetterdiensten, Hydrographischen Ämtern, aber auch Universitäten der Region konnte die HISTALP-Datenbank aufgebaut werden (Auer et al., 2007a). Sie enthält mehr als 500 qualitätsgeprüfte monatliche Klimazeitreihen, deren ältere Teile an den Standort, die Instrumente, die Beobachtungszeiten, die Umgebung und andere Einflussfaktoren des aktuellen Stationszustandes angepasst wurden. Diese aufwendige Arbeit nennt man „homogenisieren“. Erst dadurch zeigen Klimazeitreihen das tatsächliche Klima und sind nicht von Artefakten aus Stationsverlegungen, Instrumentenwechsel, technologischem Fortschritt (z.B. derzeit die Automatisierung der Messnetze) u.a.m. beeinträchtigt, die von derselben Größenordnung wie das „Klimasignal“ selbst sind. Diese HISTALP-Datenbank der ZAMG enthält eine Fülle von Material über die Klimaschwankungen der letzten 150 bis 250 Jahre, aus dem in Kapitel 2.3 eine komprimierte Übersicht gegeben wird. Weitere Details sowie die Daten selbst sind seit Sommer 2009 frei über die Website der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik erhältlich (<http://www.zamg.ac.at/histalp>). Eine deutschsprachige Beschreibung der Website haben Böhm et al., 2009 publiziert.

- Räumlich dichte und mehr als zwei Jahrhunderte zurückreichende Qualitätsdatenbasis für Klimaschwankungen im Großraum Alpen durch HISTALP (Monatsdaten) (*harte Aussage*).

Die Karte des Großraums Alpen in Abbildung 2-7 zeigt seine Unterteilung in unterschiedliche Hauptklimazonen. Die dünnen Linien sind das Ergebnis einer objektiven mathematischen Methode (Hauptkomponentenanalyse), die ähnliche Klimagebiete für die verschiedenen Klimagrößen zusammenfasst. Die west-östlich verlaufende dicke Linie trennt das Mittelmeerklima vom gemäßigten Klima der Westwindzone, die nord-südliche den eher atlantischen (ausgeglichenen) Bereich im Nordwesten vom eher kontinentalen Nordosten (kältere Winter, heißere Sommer). Der mediterrane Süden des Alpenraums wird im Sommer vom „Subtropenhoch“ aufgesucht, zeigt aber in den Übergangsjahreszeiten, deutlich höhere Niederschläge als der Norden des Alpenraums. Im atlantischen Bereich ist die Niederschlagsverteilung über das Jahr eher ausgeglichen, in den nördlichen Zentralalpen gibt es den meisten Niederschlag im Sommer. Österreich hat Anteil an allen dieser Hauptklimazonen, wobei der mediterrane Anteil allerdings sehr gering ist, und es reicht mit seinen hohen Gebirgszügen außerdem noch in eine fünfte (vertikal definierte und in Abbildung 2-7 durch Dreiecke dargestellte) hochalpine Klimazone hinein.

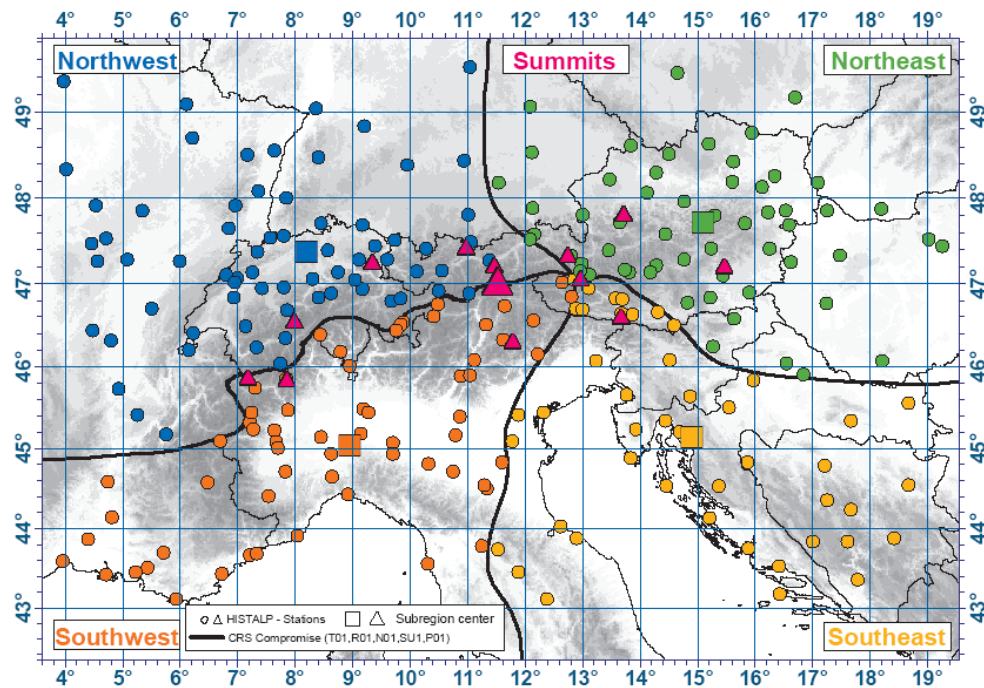


Abbildung 2-7: Die Haupt-Klimaregionen des Großraums Alpen und das HISTALP-Stationsnetz.

- **Weiche Datenbasis** für Klimadaten in höherer zeitlicher Auflösung (Tages- und Subtagesdaten) – besonders für Niederschlagsdaten.

Weniger günstig als für die HISTALP-Klimareihen auf Monatsbasis ist zurzeit die Datenlage bei Zeitreihen höherer zeitlicher Auflösung, insbesondere für das Klimaelement Niederschlag. Verschiedene Gründe sind dafür ausschlaggebend:

Im 2. Weltkrieg ist durch Bombeneinwirkung das damals von Wien in die Zentrale des deutschen Reichswetterdienstes transferierte historische Originaldatenmaterial der Klimastationen der ZAMG verbrannt und auch die für eine Homogenisierung wertvollen Metadaten (Aguilar et al, 2003, Peterson et al., 1998). Es stehen für die Zeiten davor lediglich diejenigen Daten zur Verfügung, die in den Jahrbüchern der ZAMG oder anderswo publiziert worden sind. Das sind im Wesentlichen die Monatswerte, die oben unter HISTALP beschrieben worden sind und insgesamt 6 Stationen, die in den sogenannten „Extensostationen“ als Tageswerte in gedruckter Form vorliegen, und das bis zurück in die 1870er und 80er Jahre. Sie wurden digitalisiert, eignen sich aber nur bedingt zur Homogenisierung und auch zur Analyse, da die Messnetzdichte nicht den Anforderungen entspricht, die durch die relativ hohe räumliche Dekorrelation der täglichen oder subtäglichen Klimafelder im Gebirgsland Österreich entspricht. Abbildung 2-8 zeigt das exemplarisch für die Tages- bis Jahreswerte von Temperatur und Niederschlag in Europa, wobei hier noch die zusätzliche besondere „Empfindlichkeit“ des Klimaelements Niederschlag hervortritt.

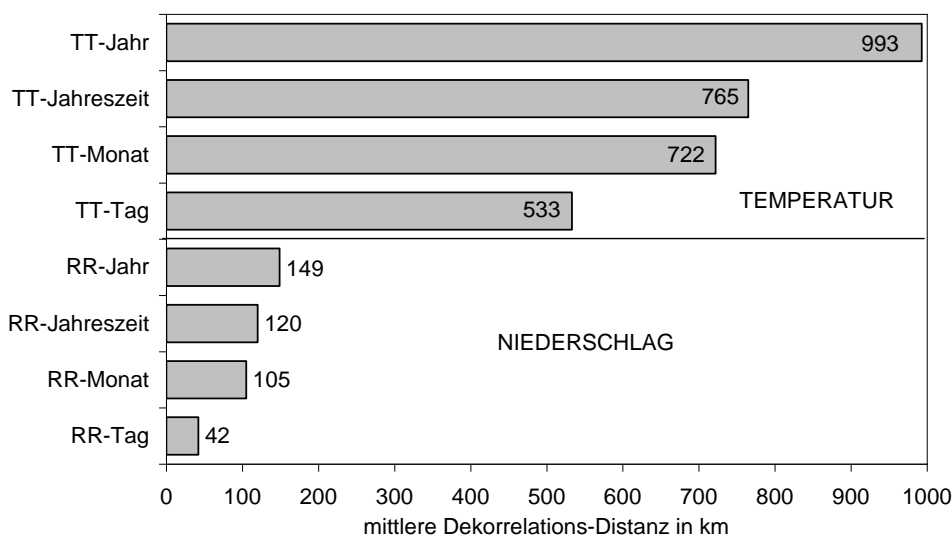


Abbildung 2-8: Räumliche Dekorrelation auf 50% gemeinsame Varianz im Europäischen Klimamessnetz von Jahres-, Jahreszeiten-, Monats- und Tageswerten von Temperatur und Niederschlag. Quelle: Scheifinger H, in: Böhm R, coord (2006).

Im Rahmen einer informellen Zusammenarbeit mit dem Hydrographischen Zentralbüro und den hydrographischen Diensten der Länder konnten für die Klimaelemente Temperatur (allerdings ohne Tagesextremwerte, die an Hydrostationen nicht gemessen werden), Niederschlag und Schnee eine Anzahl von zusätzlichen Reihen aus der Zeit von 1896 bis in die 1940er Jahre digitalisiert werden. Es ist geplant, mit diesen und den entsprechenden ZAMG-Reihen aus der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts einen Grunddatensatz zurück bis etwa 1900 zu erzeugen, als erste Etappe dazu ist bereits ein Projekt eingereicht, das den existierenden StartClim-Datensatz der ZAMG (tägliche Zeitreihen von 70 Klimastationen zurück bis 1950) homogenisieren soll.

Zurückgreifen werden wir dabei auf die Erfahrungen, die derzeit durch die Beteiligung der ZAMG an der internationalen COST-Action ES0601 (Advances of homogenization methods of climate series – an integrated approach) und durch andere Projekte (StartClim Projekte, Alpine Space Projekt FORALPS, HOM-OP-Austria, proVision Projekt „A tale of two valleys“ u.a.) aufgebaut werden konnte bzw. gerade wird.

Wir stehen also zurzeit noch vor dem Dilemma, dass gerade für einen Gegenstand größten Interesses, nämlich die Analyse der Trends von seltenen und kurzfristigen Extremereignissen, noch die adäquate Datenbasis fehlt. Dass diese Feststellung nicht nur für Österreich gegeben ist, sei mit einem Beispiel aus der Datenbasispublikation eines großen europäischen Forschungsprojekts (EMULATE, European and North Atlantic daily to multidecadal climate variability) belegt, das unter anderem auf die Analyse langer Klima-Tageswertreihen im Hinblick auf die Veränderung von Extremwerten zielte. Moberg et al., 2006 stellen schlicht fest: „No overall homogeneity tests have been applied to the entire EMULATE database“, und er führt dann auch die Gründe für dieses Defizit an, die sich weitgehend mit den hier skizzierten decken.

- **Die Abschätzung von Extremwerttrends mittels Monatsdaten** bietet vorläufig eine (weiche) Möglichkeit bis zum Vorliegen homogenisierter Langzeitdaten auf Tages- und Subtagesbasis.

Es scheint jedoch als Überbrückung bis zum Vorliegen von langen und homogenisierten Zeitreihen auf Tagesbasis einen provisorischen Ausweg zu geben: Erste Erfahrungen von Analysen an bereits vorliegenden Zeitreihen auf Tagesbasis (Auer et al., 2008, Auer et al.,

2010) lieferten zwei vorläufige Befunde, die vor allem im Hinblick auf die Verwendbarkeit von Aussagen der HISTALP-Reihen auch für die Abschätzung von Trends von aus Tagesreihen ableitbaren Extremwertindizes interessant sind:

Vorläufiger Befund 1: Es deutet viel darauf hin, dass bei uns die oft zitierte gleichzeitige Zunahme der Starkregen und der Trockenperioden am gleichen Ort nicht stattfindet. Weder im Zentralalpenbereich noch im östlichen Flachland noch im Westen Österreichs zeigen sich entsprechende Trends von 100jährigen und längeren homogenisierten Tageswertreihen des Niederschlages.

Vorläufiger Befund 2: Generell zeigt sich eine auffallende Ähnlichkeit zwischen dem langjährigen Verlauf der extremen Niederschlagsereignisse und dem der Jahressummen, sowie eine entsprechende Ähnlichkeit der Tagesmaxima und Minima der Lufttemperatur mit den Mittelwerten.

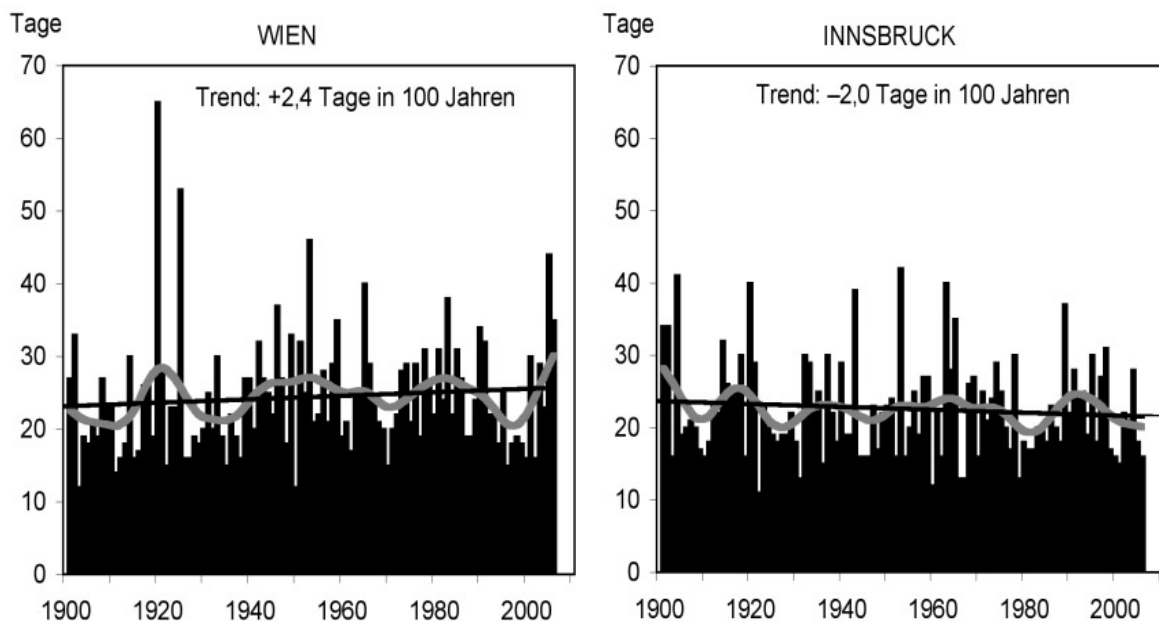


Abbildung 2-9: Jährliche längste Trockenperiode (CCD) in Wien (links) und in Innsbruck, 1901–2006. Einzeljahre, 20jährig geglättet und linearer Trend. Beide Trends sind nicht signifikant. Definition des Extremwertindex CCD: aufeinanderfolgende Tage mit weniger als 1 Liter/m² Niederschlag. Quelle: Auer et al. (2008)

Stellvertretend für die zahlreiche Einzelreihen, die bereits vorliegen, sollen die zwei Diagramme von Abbildung 2-9 den Befund 1 illustrieren. In Wien, mit im 20. Jahrhundert langfristig leicht fallendem Trend des Gesamtniederschlags steigt die Länge der Trockenperioden leicht an, in Innsbruck ist es umgekehrt. Alle Langzeitreihen von Trockenheitsindizes sind gekennzeichnet von einer großen Kurzfristvariabilität von Jahr zu Jahr. Die Trends der Trockenperioden sind über das Jahrhundert gesehen weit davon entfernt, statistisch signifikant zu sein. Dies gilt auch für aus Platzgründen hier nicht gezeigte andere Orte.

Die beiden Diagramme der Abbildung 2-10 zeigen die in Befund 2 beschriebene Ähnlichkeit zwischen den Trends und Schwankungen des Gesamtniederschlags und von zwei verschiedenen Extremwertindizes der Tagesniederschläge.

Man kann somit begründet annehmen, dass innerhalb Österreichs Trends zu mehr Starkniederschlag und zu mehr Trockenheit zu finden sind, jedoch nicht am selben Ort, sondern dort, wo jeweils auch der Trend des Gesamtniederschlags in die jeweilige Richtung deutet: In Westen des Landes also, wie später gezeigt wird, Niederschlagszunahme

insgesamt und auch eine solche der starken Tagesniederschläge, jedoch keine Zunahme der Trockenperioden, im Südosten hingegen fallende Niederschlagstrends in Verbindung mit einem Anstieg der Trockenperioden, jedoch nicht die oft behauptete Zunahme der Starkregen.

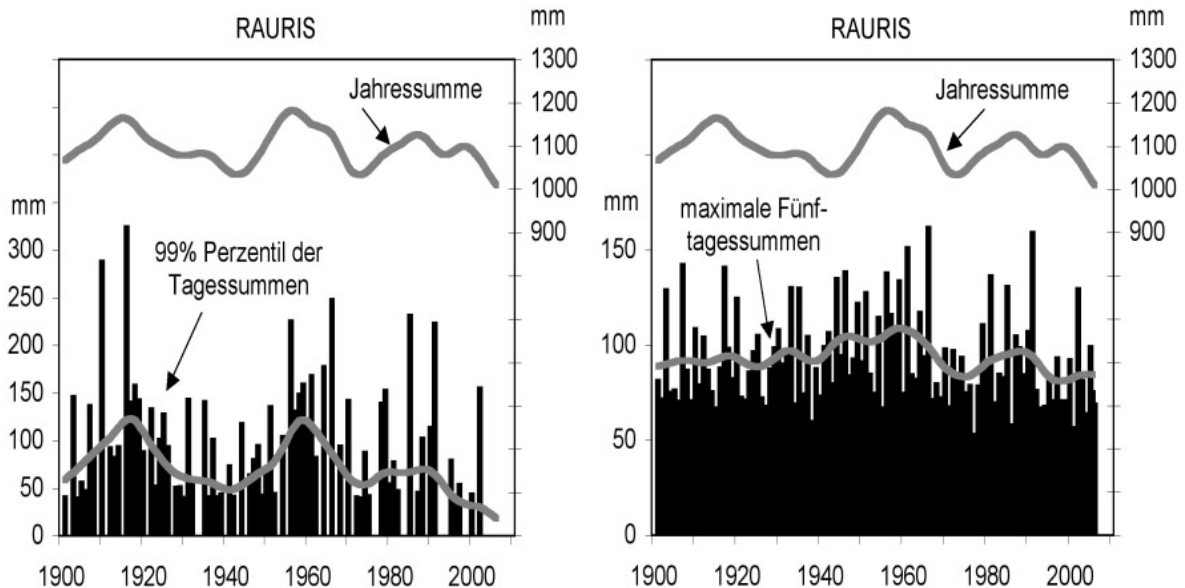


Abbildung 2-10: Ähnlichkeit zwischen der gesamten Jahressumme des Niederschlages (die 20jährig geglätteten Linien oben in den Abbildungen) und von zwei Niederschlags-Extremwertindizes für den inneralpinen Ort Rauris (Einzeljahre und 20jährig geglättet, unten). Links: Summe der Tagesniederschläge, die in der Klimanormalperiode 1961–1990 nur noch von 1% aller Fälle übertroffen werden (= 99% Perzentil). Rechts: maximale Fünftagesummen eines Jahres. Quelle: Auer et al. (2008)

Die beschriebene Ähnlichkeit der Trends von Mittelwerten und Summen mit denen von Extremereignissen in kürzerer zeitlicher Auflösung findet ihren Ausdruck in einem dritten gut untermauertem Fakt, dass sich die Hochwasserereignisse der großen Flüsse auch in den Zeitreihen von Monatssummen widerspiegeln. Abbildung 2-11 zeigt beides anhand des August 2002, der im Norden Österreichs, an der Donau und ihren nördlichen Seitenflüssen, sowie an Moldau und Elbe Überschwemmungen brachte, die enorme Schäden verursachten. Und es waren tatsächlich an einigen Messstellen des betroffenen Gebietes Ereignisse, wie sie in den 130- bis 188-jährigen Messreihen bisher bei weitem nicht registriert worden waren. Das Beispiel des vom Hochwasserzentrum nicht weit entfernten Regensburg, wo im August 2002 kein außergewöhnlicher Niederschlag aufgetreten war, zeigt jedoch auch, wie relativ begrenzt auch derartige Großereignisse sind.

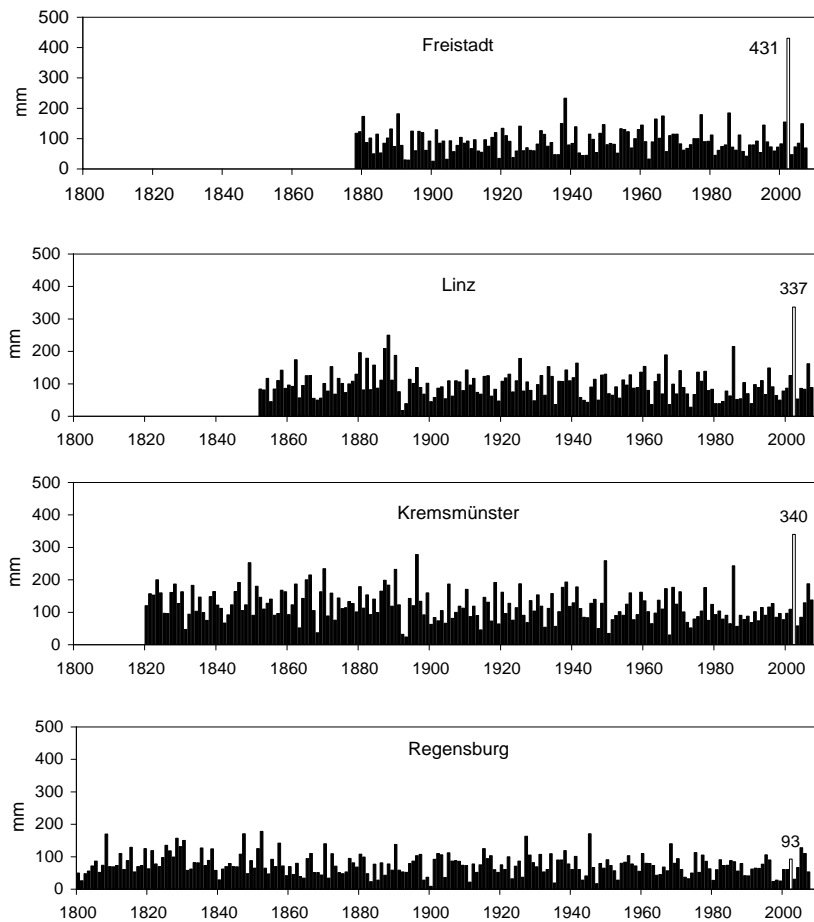


Abbildung 2-11: Das Hochwasserereignis des August 2003 im Spiegel langjähriger Zeitreihen der August-Monatssummen des Niederschlages. Quelle: HISTALP-Klimadatenbank der ZAMG, Auer et al. (2005)

Wie es sich mit den Klimatrends in der instrumentellen Periode in Österreich tatsächlich verhält, wird im Kapitel 2.3 auf der Basis von HISTALP gezeigt. Obwohl in diesem Gutachten der Klimazukunft das Hauptinteresse gilt, wird dort zunächst auf die Klimavergangenheit und Gegenwart eingegangen – nur im Licht dessen, was die Vergangenheit und Gegenwart an Variationen, Trends und Extremen Klimaausformungen zeigt, sind die Abschätzungen für die Zukunft und vor allem deren Auswirkungen im Kontext verständlich. Die natürliche und in den letzten Jahrzehnten auch schon teilweise „anthropogene“ Vergangenheit setzt den Rahmen, innerhalb oder außerhalb dessen sich die Zukunftserwartungen bewegen.

2.2.4 Globale Zirkulationsmodelle

Atmosphere-Ocean General Circulation Models oder Global Climate Models (AOGCMs,) sind komplexe physikalische Modelle die das Klimasystem in vereinfachter Form abbilden. Diese Modelle enthalten grundlegende physikalische Differentialgleichungen aus der Fluidodynamik, Hydrologie und Chemie, sowie Gleichungen für parametrisierte Prozesse. Damit ist es möglich Prozesse des Klimasystems wie bei einem experimentellen Aufbau zu simulieren, um so die Auswirkungen von unterschiedlichen Treibhausgasemissionen auf das zukünftige globale Klima abzuschätzen. Aufgrund des dazu notwendigen großen personellen und finanziellen Einsatzes entwickeln und betreiben nur wenige Länder ihr eigenes globales Klimamodell. Bekannte Beispiele sind ECHAM (Deutschland), UKMO-HadCM (Vereinigtes

Königsreich), MIROC (Japan), CCCMA (Kanada), GISS GCM ModelE (USA), GFDL-CM (USA) und CCSM (USA).

Die Erde (Ozeane, Atmosphäre, Landflächen,...) wird in einem Klimamodell in ein dreidimensionales Gitter geteilt und numerische Methoden zur Lösung der Gleichungen an jedem Gitterpunkt verwendet (Abbildung 2-12). Alternativ erfolgt die Berechnung des Modells auch über spektrale Methoden.

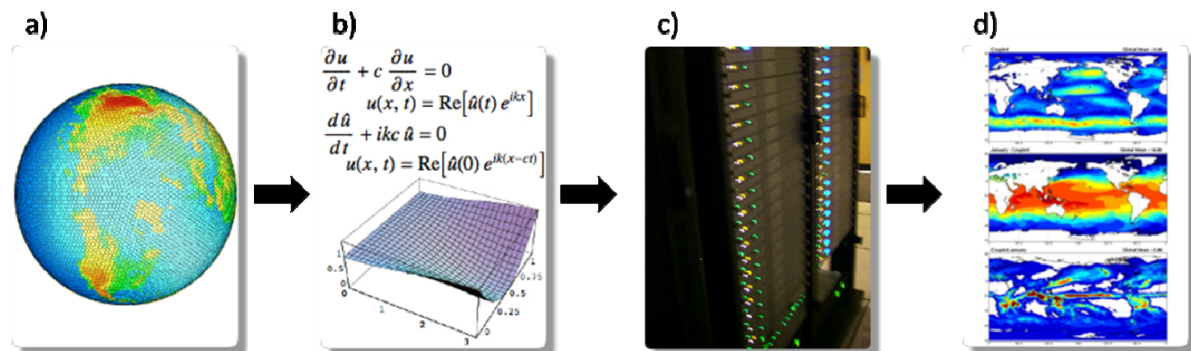


Abbildung 2-12: Prozesskette der globalen Klimamodellierung: a) Unterteilung der Erde in ein dreidimensionales Gitter, b) Erstellen der partiellen Differentialgleichungen für jeden Gitterpunkt, c) Lösung der Gleichungen mittels Hochleistungscomputer, d) Darstellung der Ergebnisse (CMMAP 2010, bearbeitet)

Klimamodelle bestehen aus mehreren unabhängigen Modulen, welche die verschiedenen Einzelteile des Klimasystems beschreiben:

- Atmosphäre: ein meteorologisches Modell, das Temperatur, Wind, Niederschlag, Luftdruck, Geopotential, relative Feuchte, sowie die ein- und ausgehende Strahlung simuliert
- Ozean: ein Ozeanmodell mit Meeresströmungen, ozeanischen Sedimenten, Meeresorganismen und verschiedene Darstellungen der Hochsee und der Küstenregionen
- Chemie: Modelle, die chemische Reaktionen in der Atmosphäre und im Ozean simulieren. Dazu gehören auch Aerosolmodule.
- Kryosphäre: Modelle zur Darstellung von Aufbau- und Abschmelzprozessen von Meereseis und der Eisschilde in den Polar- und Bergregionen. Modelle im globalen Maßstab mit voll integrierter Kryosphäre sind noch Zukunftsmusik, vor allem was die derzeit heftig diskutierte Rolle der Eisdynamik Grönlands und der Antarktis und deren Auswirkung auf den Meeresspiegel anbetrifft.
- Land Oberflächen: ein Bodenmodell mit Vegetation, Böden und Grundwasser. Im Idealfall eines „Earth-System-Modells“ wäre auch die Pflanzendecke der Erde voll in das Modell integriert, was für manche Vorgänge im Klimasystem, wie etwa die Simulation der „grünen Sahara“ im frühen Holozän, notwendig wäre. Im globalen Maßstab befinden sich derartige Modelle erst im Versuchsstadium.

Anmerkung: Die Implementierung der Kryosphäre und der Biosphäre ist Gegenstand der laufenden, wissenschaftlichen Forschung. Die meisten Subsysteme dieser beiden Sphären wurden in den bisherigen Klimasimulationen noch nicht berücksichtigt!

Die Ein- und Ausgangsdaten aus diesen Modulen sind miteinander gekoppelt, damit Wechselwirkungen berücksichtigt werden können und die Rückkopplungen zwischen den unterschiedlichen Teilen des Klimasystems abgeschätzt werden können. Trotz der zunehmenden Komplexität der globalen Klimamodelle können zahlreiche Prozesse noch nicht explizit modelliert werden. Gründe sind die fehlende räumlich/zeitliche Auflösung oder aber auch, dass viele Prozesse und Wechselwirkungen noch unzureichend erforscht sind. Zum Teil werden diese Prozesse parametrisiert (Miteinbeziehung empirisch/physikalischer Zusammenhänge zu anderen bekannten Größen), manche Prozesse bleiben aber derzeit auch gänzlich unberücksichtigt.

Die Klimamodelle aus der Zeit Mitte der 1990er Jahre hatten ein Gitter mit räumlicher Auflösung von rund 200 bis 300 km in den mittleren Breiten. Die typische räumliche Auflösung für die Modelle, die im 4. Sachstandsbericht des IPCC (2007) verwendet werden, ist etwa 100 bis 150 km. Klimamodelle laufen in der Regel mit Zeitschritten von etwa einer halben Stunde und simulieren das Klima für Jahrzehnte oder Jahrhunderte in die Vergangenheit und in die Zukunft. Die räumliche und die zeitliche Auflösung sind nicht unabhängig voneinander wählbar. Je höher die räumliche Auflösung des Modells ist, desto kürzer muss der Zeitschritt sein, um die Prozesse auf der kleineren Skala zu lösen. Dies führt zu hohem Rechenaufwand und die meisten der Klimamodellsimulationen laufen daher auf sehr leistungsfähigen Supercomputern.

Da die meisten AOGCMs eine zu grobe Auflösung, sowie manche auch systematische Fehler aufweisen, werden vor allem extreme Ereignisse im Allgemeinen nicht oder nur unzureichend abgebildet. Dies gilt insbesondere für die Intensität, Frequenz und räumliche Verteilung von extremen Niederschlagsereignissen. Sehr gut wird hingegen das beobachtete Klima auf kontinentaler Skala, einschließlich der Entwicklungen während des 20. Jahrhunderts, abgebildet.

Einige Unsicherheiten über unser zukünftiges Klima rührt vom unvollständigen Verständnis von Prozessen und Rückkopplungen zwischen den verschiedenen Teilen der Klimasystem, wie zum Beispiel die komplexen Wechselwirkung von Feuchtigkeit, Aerosolen und Wolken auf das Klima. Sehr oft wird ein Ensemble von Klimamodellen (viele Modellsimulationen mit verschiedenen Klimamodellen) zur Quantifizierung und Verringerung der Unsicherheiten benutzt. Nach jüngsten Erkenntnissen führt die Vernachlässigung von Subsystemen (z.B.: Kryosphäre, Biosphäre) zu einer Reduktion der regionalen Klimavariabilität, außerdem bleiben mögliche Wechselwirkungen mit diesen Systemen unberücksichtigt.

2.2.5 Downscaling

AOGCMs (**A**tmosphere-**O**cean **G**eneral **C**irculation **M**odels) sind nur sehr eingeschränkt für die Klimafolgenforschung einsetzbar, da auf der für sie relevanten {Skala} von einigen Kilometern keine sinnvollen Aussagen getroffen werden können. Da sich das regionale Klima aus der Wechselwirkung zwischen dem großskaligen Zustand des {Klimasystems} und den regionalen Gegebenheiten zusammensetzt wird angenommen, dass man zusätzliche kleinskalige, anwendungsorientierte Informationen durch eine geeignete Nachbearbeitung der Ergebnisse aus AOGCMs erhalten kann. Für diese Art der Nachbearbeitung sind unterschiedliche Methoden entwickelt worden, welche unter dem englischen Ausdruck „downscaling“ zusammengefasst werden.

Nesting (dynamisches Downscaling)

Während globale Zirkulationsmodelle aktuell mit einer Gitterpunktsdistanz von 150 bis 200 km arbeiten, erreichen regionale Klimamodelle mittlerweile eine Auflösung von bis zu einem Kilometer und mehr. Regionale Klimamodelle können jedoch nur einen begrenzten Ausschnitt der Atmosphäre rechnen, da die momentane Computerleistung globale Klimasimulationen mit wenigen Kilometern Auflösung nicht zulässt. Es müssen daher die hoch aufgelösten Regionalmodelle in die grobmaschigen Globalmodelle eingebettet werden. Dieser Vorgang wird als „Nesting“ bezeichnet und beschreibt eine Methode, bei der die Ränder des Regionalen Modells mit Werten des globalen Modells angetrieben werden. Meist wird ein zweifaches Nesting durchgeführt, um den Skalensprung der Horizontalauflösung zwischen dem antreibenden globalen Zirkulationsmodell (150-200 km) und dem regionalen Klimamodell (10 km oder weniger) nicht zu groß werden zu lassen. Dabei wird die erste regionale Klimasimulation, angetrieben durch das globale Zirkulationsmodell, mit einer mittleren Auflösung von ca. 50 km berechnet. Im zweiten Schritt dient diese Simulation als Antrieb für das regionale Modell in der Zielauflösung von <10 km (Abbildung 2-13).

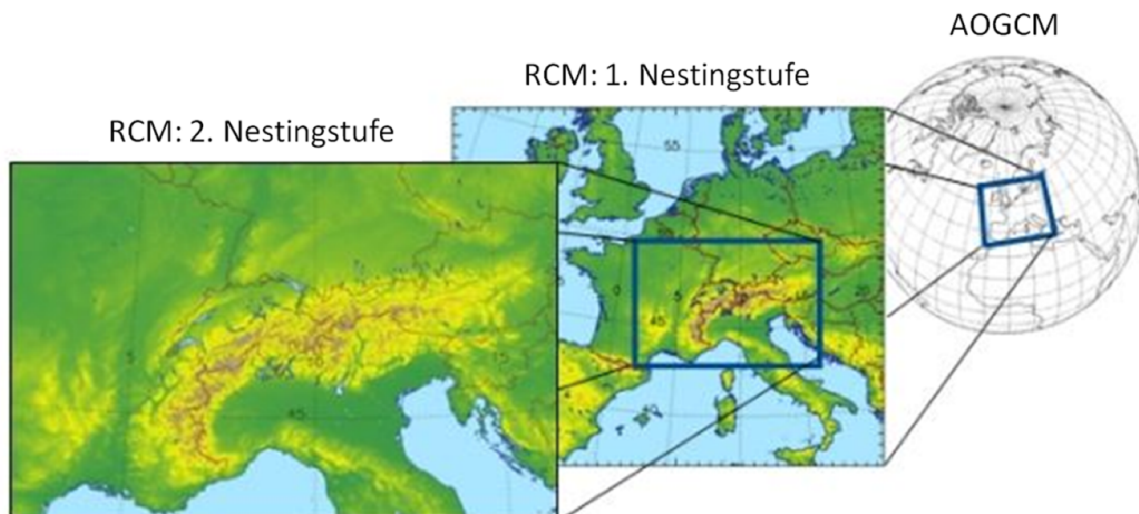


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung eines doppelten Nestingansatzes (www.meteoswiss.admin.ch/web/en/weather/models/cosmo.html, bearbeitet)

Dieser Ansatz löst das Problem der unzureichenden Darstellung kleinskaliger Prozesse nur bedingt, da lediglich eine Verschiebung hin zu kleineren Skalen stattfindet. Auch hochauflöste Modelle haben das prinzipielle Problem, dass sie ihrerseits eine kleinste interpretierbare Skala aufweisen.

Statistisches Downscaling

Eine gänzlich andere Klasse von Downscaling-Ansätzen wird durch den Einsatz statistischer Methoden ermöglicht. Dabei werden zwei Datensätze von Messungen herangezogen. Zum einen Daten für eine Variable (z.B. Temperatur) auf der regionalen Skala, zum anderen Daten auf der großräumigen Skala, die in globalen Zirkulationsmodellen hinreichend gut simuliert werden. Zwischen diesen wird ein statistischer Zusammenhang gesucht, der dann genutzt werden kann, um die Simulationen der globalen Klimamodelle, wie sie auf der großräumigen Skala erscheinen, für die regionale Skala zu interpretieren. Nachteil der

statistischen Ansätze ist, dass die für die Vergangenheit ermittelten statistischen Zusammenhänge zwischen großräumiger atmosphärischer Zirkulation und lokalen Ausformungen des Klimas auf die Zukunft übertragen werden, was nicht zutreffen muss und auch nicht überprüft werden kann.

Ein gutes Beispiel für das Anwendungsgebiet regionaler Klimamodelle bildet der Alpenraum. Durch die grobe räumliche Auflösung AOGCMs werden die Alpen im besten Fall durch 15 bis 20 Gitterpunkte repräsentiert, die Höhe des Gebirges wird durch die Mittelung in der Fläche stark reduziert, auf etwas mehr als 1000m. Selbst große Täler wie das Inntal oder das Salztal werden nicht aufgelöst. Die Abbildung orographischer Eigenschaften gelingt mit feiner aufgelösten regionalen Klimamodellen wesentlich besser, wobei auch hier Limitierungen in Kauf genommen werden müssen, da viele kleinere Alpentäler die Modellskala von einigen Kilometern unterschreiten. Regionale Klimasimulationen bieten trotzdem ansatzweise die Möglichkeit kleinskalige Prozesse nachzubilden und so realistischere Ergebnisse in topographisch stark gegliedertem Terrain zu erzielen.

2.3 Situation in der Vergangenheit

Für den Gegenstand dieser Studie - Anpassungsmaßnahmen der Wasserwirtschaft in Österreich an den Klimawandel – sind seitens der Klimatologie von den in HISTALP vorhandenen sieben Klimaelementen in erster Linie der Niederschlag, aber auch die Temperatur von Interesse. Da die Temperatur das Synonym für den Klimawandel schlechthin ist, wird sie hier an den Anfang der Beschreibung der Trends und der Variabilität der instrumentellen Periode gestellt.

2.3.1 Großraum Alpen, 1760-2007 – Temperatur – Luftdruck – Sonnenschein

Wenn man vom „Klimawandel“ spricht, versteht man darunter in den meisten Fällen die langfristige Temperaturzunahme, die im globalen Maßstab in den letzten 100 Jahren schwach 1°C betrug. Auf die Ursachen für Klimawandel wurde bereits eingegangen. In aller Ausführlichkeit ist der globale Klimawandel im IPCC-Report von 2007 abgehandelt, der frei in voller Länge (900 Seiten) über <http://www.ipcc.ch> erhältlich ist. Die hier in der Folge im Vordergrund stehende regionale Klimavariabilität der letzten beiden Jahrhunderte besitzt mit der HISTALP-Datenbank eine qualitativ gute Grundlage, die in 1.1.3 beschrieben worden ist.

- **Temperaturanstieg** seit Ende des 19. Jahrhunderts im Großraum Alpen etwa doppelt so stark wie im globalen Mittel (*harte Aussage*).

Regional gibt es Abweichungen vom globalen Trend von +1°C, und wie man in Abbildung 2-14 und Abbildung 2-15 erkennt, gehört der Großraum Alpen zu den Regionen, in denen die Erwärmung deutlich stärker ausgefallen ist – etwa doppelt so stark. Die beiden Abbildungen zeigen die regionalen Mittel über alle mehr als 100 Temperaturreihen des GAR, also vom Marseille bis Budapest, von Sarajewo bis Straßburg, von Perugia und Florenz bis hinauf zu den Gipfelobservatorien in 2500 bis 3500m auf dem Säntis, dem Jungfraujoch, Zugspitze, Sonnblick, Dobratsch, Bjelašnica. Die Mittelung über alle Reihen ist sinnvoll, da die Langzeitvariationen und Trends überall in der Region hochgradig ähnlich verlaufen (AUER et al, 2007a). Auf dem Sonnblick, in 3100m Seehöhe zum Beispiel, hat sich die Atmosphäre seit dem Ende des 19. Jahrhunderts exakt um dieselben 2°C erwärmt, wie in Mailand,

München oder Wien – es gab keine Trendunterschiede, weder in der Horizontalen noch in der Vertikalen.

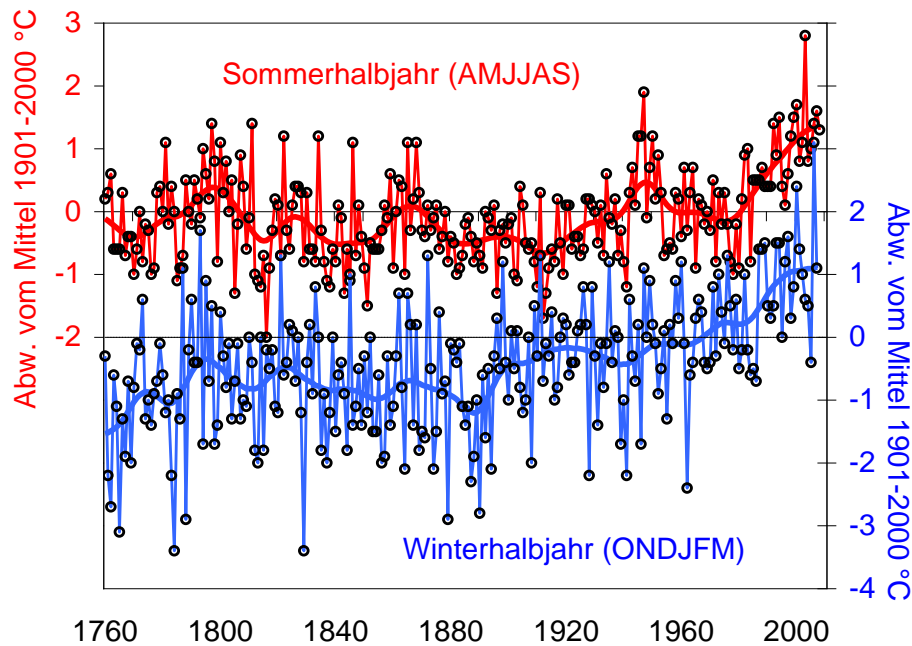


Abbildung 2-14: Mittel 1760-2007 bzw. 1760/61-2007/08 aller mehr als 100 HISTALP-Temperaturreihen des Großraums Alpen. Rot: Sommerhalbjahr (April-September), blau: Winterhalbjahr (Oktober – März). Alle Reihen sind Abweichungen vom Mittel des 20. Jahrhunderts, gezeigt sind Einzeljahre und ein geglätteter Verlauf (30-jähriger Gauß'scher Tiefpassfilter).

- **Temperaturschwankungen** im Großraum Alpen überall gleich – keine stärkere Erwärmung der Berge gegenüber den Tälern und Ebenen. Die Entwicklung verläuft jedoch nicht regelmäßig, und es gibt saisonale Unterschiedlich der dekadischen Schwankungen, die dem Langzeittrend überlagert sind (*harte Aussage*).

Die Erwärmung erfolgte jedoch nicht stetig, sondern sie war von kürzer dauernden (10 bis 30-jährigen) Zwischenmaxima und –minima überlagert, und diese waren jahreszeitlich durchaus unterschiedlich, wie wir in Abbildung 2-14 sehen. So gab es etwa in den 1890er Jahren besonders strenge Winter, in den 1910er Jahren besonders milde, die aber durch kühle Sommer konterkariert waren (was sich in markanten Gletschervorstößen äußerte, die z.B. in Böhm et al., 2007 ausführlich beschrieben sind). Um 1950 waren die Sommer besonders heiß, die Winter wenig auffällig, und ganz selten verliefen die beiden Jahreszeiten synchron, wie gerade in den letzten beiden Jahrzehnten, was nun zu einer besonders starken Erwärmung auch des Gesamtjahres beiträgt (die grüne Kurve in Abbildung 2-15).

- Die stärkere regionale Erwärmung im Alpenraum hängt mit einer Zunahme der Hochdrucklagen und der Sonnenscheindauer zusammen (*mittelweiche Aussage*).

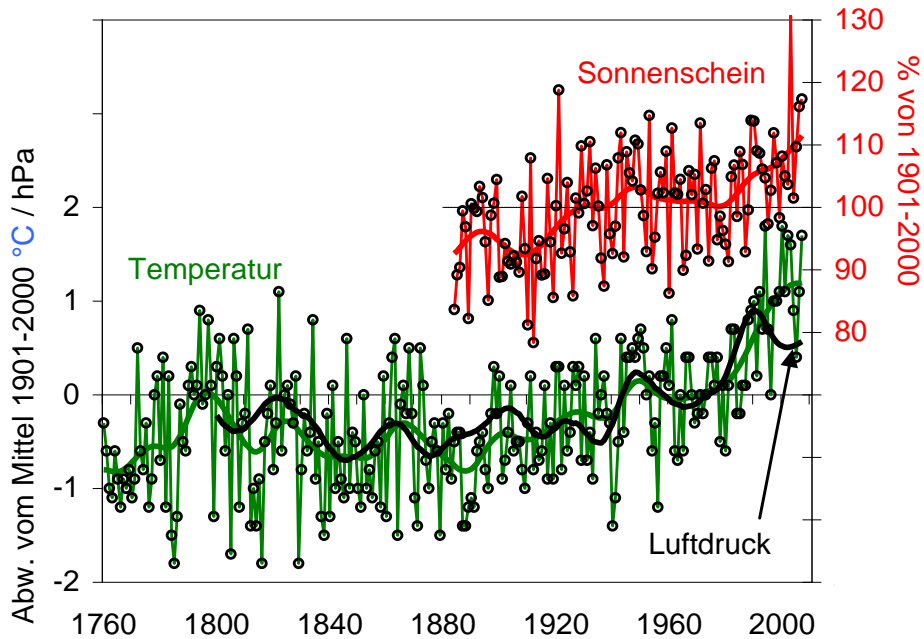


Abbildung 2-15: Jahresmittelreihen von drei eng gekoppelten Klimaelementen im Großraum Alpen. Grün: Lufttemperatur (Mittel aller Tieflandstationen, Einzeljahre und 30-jährig geglättet), Schwarz: Luftdruck (Mittel aller Tieflandstationen, nur die geglättete Kurve gezeigt), rot: hochalpines Mittel der Sonnenscheindauer (Einzeljahre und 30-jährig geglättet).

Abbildung 2-15 liefert die einfache Erklärung für die im Alpenraum stärkere Erwärmung im Vergleich zum globalen Mittel (Abbildung 2-3 bzw. Jones et al., 1999 oder IPCC-2007). Im Wesentlichen liegt der Grund in einer durch das gesamte 20. Jahrhundert hindurch anhaltenden Nordwärtsverlagerung des subtropischen Hochdruckgürtels, die man in der schwarzen, geglätteten Luftdruckkurve der Abbildung 2-15 verfolgen kann. Dieser Luftdruckanstieg wiederum hat für mehr Schönwetter im Alpenraum gesorgt, was in der roten Sonnenscheinkurve der hochalpinen Observatorien zu sehen ist. Die beinahe parallel verlaufenden drei Kurven unterstreichen diesen einfachen Mechanismus, der auch der genaueren Analyse mit Hilfe von komplizierteren Überlegungen und Methoden standhält (Auer et al, 2007a, Efthymiadis et al, 2007).

Damit sind die wesentlichen Grundtatsachen des thermischen Klimawandels in der Region abgesteckt. Es ist auch und besonders im Alpenraum tatsächlich wärmer geworden, allerdings mit jahreszeitlichen Unterschieden und eingelagerten relativen Zwischenmaxima und -minima. Die Erwärmung betrug im Alpenraum und damit auch in Österreich seit dem 19. Jahrhundert rund $+2^{\circ}\text{C}$, und wir kennen den Grund, warum sich gerade unsere Region gegenüber dem „globalen Hintergrundsignal“ von rund $+1^{\circ}\text{C}$ besonders stark erwärmt hat.

2.3.2 Großraum Alpen, 1800-2007 – Niederschlag

Wie der Klimaparameter Niederschlag auf diese Erwärmung reagiert hat kann auf der Basis von 192 Einzelreihen untersucht werden, von denen mehrere bis 1800 zurückreichen. Ganz im Unterschied zur Temperatur zeigt der Niederschlag keine ähnlichen Trends in der gesamten Region. Für zwei Subregionen, den Nordwesten und den Südosten sind sogar die Langzeittrends der letzten 160 Jahre gegenläufig (die Lage der GAR-Subregionen kann der Karte in Abbildung 2-7 entnommen werden. Abbildung 2-16 zeigt im Nordwesten der Region

einen Niederschlagsanstieg seit den trockenen 1860er Jahren um etwa 15% und gleichzeitig einen generellen Niederschlagsrückgang über die gesamten 210 Jahre der instrumentellen Periode um ca. 15%. Nur in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts herrschten in beiden Subregionen sehr feuchte Verhältnisse mit einem in beiden Regionen etwa parallel verlaufendem Trend zu weniger Niederschlag bis zu den 1860er Jahren.

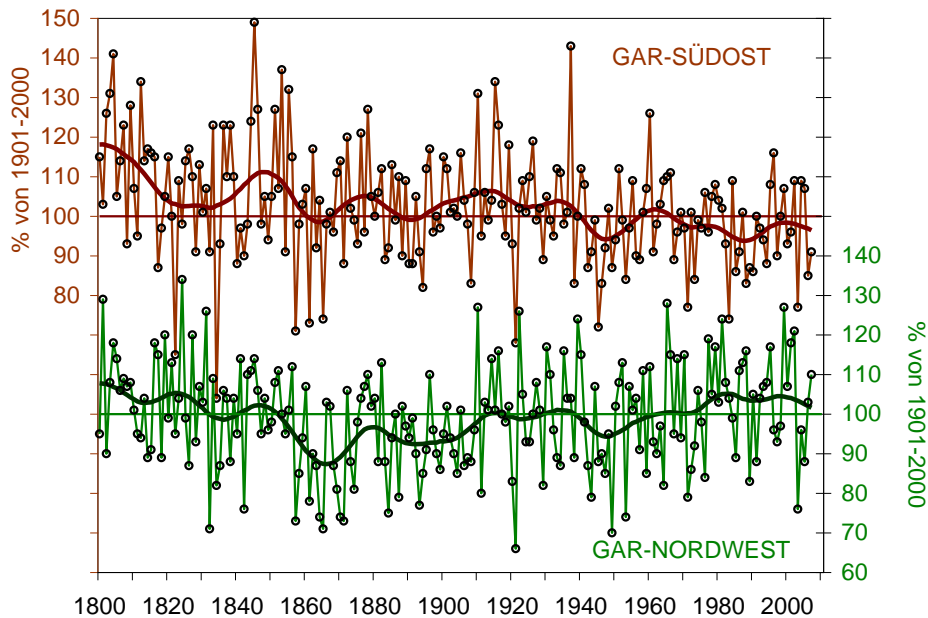


Abbildung 2-16: Jahressummen des Niederschlages zwei gegensätzlichen Subregionen des Großraums Alpen 1800- 2007. Einzeljahre und geglätteter Verlauf (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter), die trockensten und das feuchtesten Jahre sind hervorgehoben.

- Unterschiedliche bis gegenläufige Langzeittrends des Niederschlages im Großraum Alpen (*harte Aussage*).

Weitere Details der Niederschlagsvariabilität im Großraum Alpen sowie die Daten der homogenisierten Zeitreihen können der HISTALP-Website entnommen werden. Hier wird in der Folge speziell das Teilgebiet Österreich besprochen – mit dem Vorteil, dass dafür die Zeitreihen bereits aktualisiert bis 2009 vorhanden sind. Der Beginn der instrumentellen Periode reicht in Österreich für die Temperatur ebenfalls ins 18. Jahrhundert zurück, für den Niederschlag beginnt die instrumentelle Periode in den 1810er Jahren.

2.3.3 Lufttemperatur in Österreich 1768-2009

Regionale HISTALP-Temperaturen aus dem Gebiet Österreichs in Abbildung 2-17 zeigen den wie aus dem ähnlichen Befund für den Großraum Alpen zu erwarten sehr ähnlichen Verlauf in unserem Bundesgebiet. Es ist somit auch für Österreich sinnvoll, lediglich eine räumliche Mittelreihe zu analysieren, die für alle Teilgebiete repräsentative Ergebnisse liefert.

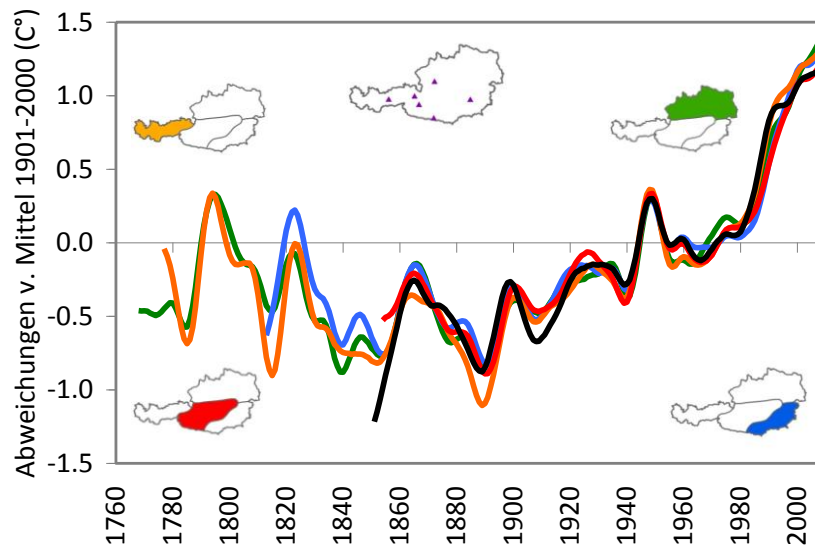


Abbildung 2-17: Geglättete Jahresmittelreihen der Lufttemperatur in 5 Subregionen Österreichs von Messbeginn bis 2009. Gelb: WEST, grün: NORD, rot: INNERALPINE TÄLER, schwarz: hochalpin, blau: SÜDOST (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter).

- Etwa 2 °C Temperaturzunahme seit 1890, davon Abnahme um etwa 1 °C seit einer Warmphase um 1800. Die 1990er und 2000er Jahre zeigen das höchste Temperaturniveau der instrumentellen Periode (*harte Aussage*).
- Letzte Phase mit rückläufigen Temperaturen 1950-1970, dann sehr starker Temperaturanstieg, Trendabschwächung, aber keine Trendumkehr in den letzten 15 Jahren (*harte Aussage*).

Abbildung 2-17 verdeutlicht, dass – und das ist typisch für Klimaentwicklungen – der Temperaturverlauf der letzten beiden Jahrhunderte in Österreich von zwei Langfristrends charakterisiert war, denen kürzere „dekadische“ Trends überlagert sind. Abbildung 2-18 zeigt zusätzlich die diesen beiden lang- und mittelfristigen Mustern noch aufgeprägten kurzfristigen (hochfrequenten) Schwingungen von Jahr zu Jahr, die insgesamt einen absoluten Variationsbereich von mehr als 4°C aufspannen zwischen dem kältesten Jahr (1829) mit -2,3° unter dem Durchschnitt des 20. Jahrhunderts und dem wärmsten (1994) mit +2° darüber. Ausgehend von einer warmen Periode um 1800 dominierte bis Ende des 19. Jahrhunderts ein Sekulartrend von rund -1° pro 100 Jahren, der im 20. Jahrhundert von einem etwa doppelt so starken Erwärmungstrend abgelöst wurde. Die dekadischen Muster zeigen neben dem schon erwähnten Maximum um 1800 weitere Wärmephasen um 1820, 1870, 1950 und das aktuelle Maximum, das bisher die höchsten Temperaturen seit Beginn der instrumentellen Messungen brachte. Die Hauptminima wurden von 1830-1850, und 1890 erreicht, und in der Phase zwischen 1950 und 1970 gab es eine Abkühlung, die auch in den globalen Kurven zu sehen ist (vergleiche Abbildung 2-3), und die auf ein Zusammenwirken eines kurzzeitigen (natürlichen) Rückganges der solaren Aktivität mit einem (anthropogenen) Maximum an Aerosolkonzentration zurückzuführen ist (vergl. Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2).

- Langzeittrends überlagert von starker Streuung von Jahr zu Jahr (Streubereich der Jahresmittel 4.3 °C → ein extremes Jahr (Jahreszeit, Monat) sagt nichts aus über Trends (*harte Aussage*)).

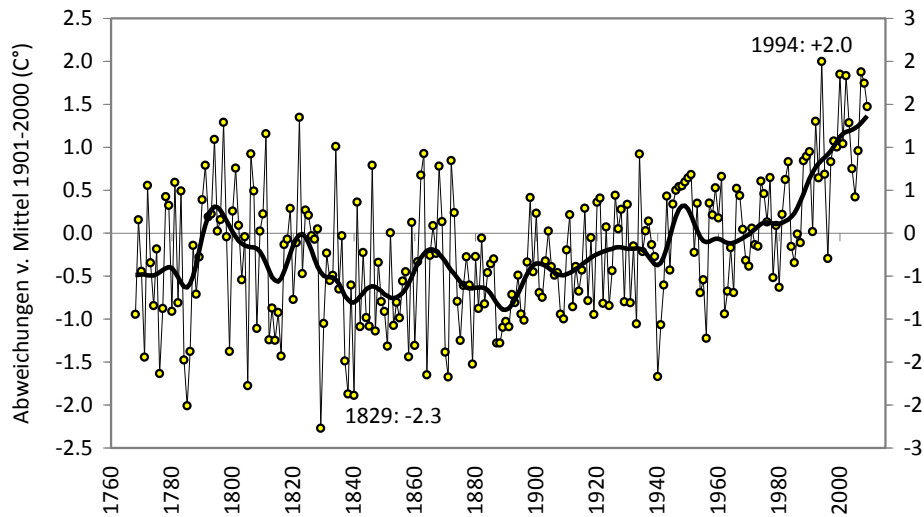


Abbildung 2-18: Jahresmittelreihe der Lufttemperatur in Österreich von 1768 bis 2009 Einzeljahre und geglätteter Verlauf (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter), das kälteste und das wärmste Jahr sind hervorgehoben.

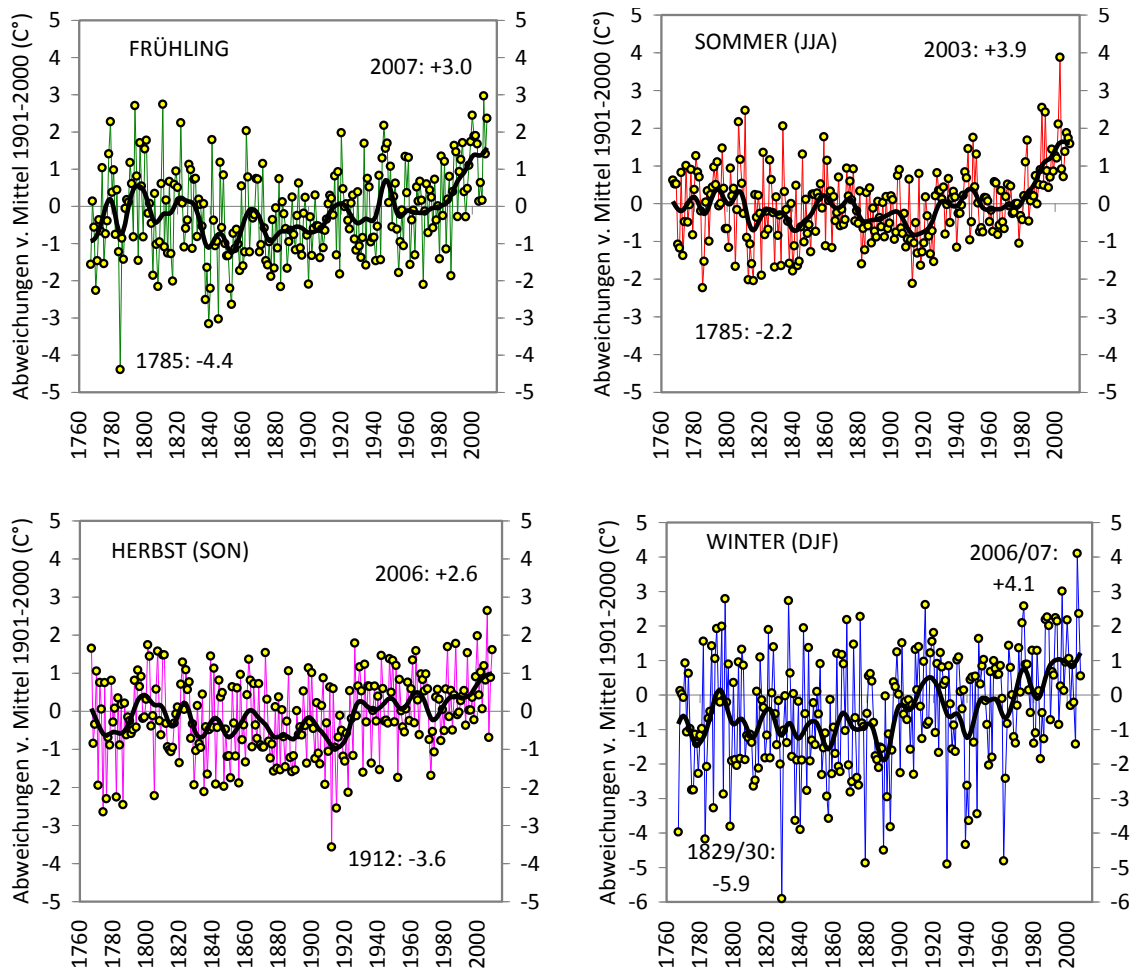


Abbildung 2-19: Jahreszeitenmittel der Lufttemperatur in Österreich von 1768 bis 2009 (Winter 1768/68-2008/09). Einzelsaisonen und geglätteter Verlauf (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter), das kälteste und das wärmste Jahr sind hervorgehoben.

Die in Abbildung 2-19 dargestellten saisonalen Temperaturverläufe zeigen alle die generellen Sekulartrends mit leicht abnehmender Temperatur im Lauf des 19. Jahrhunderts und stärker ausgeprägter Erwärmung im 20. Jahrhundert. Markante saisonale Unterschiede bestehen bei den dekadischen Variationen, bei denen parallele Entwicklungen in allen vier Jahreszeiten die Ausnahme sind. Sogar der starke Temperaturanstieg der aktuellen Dekaden ist im Frühling und Sommer signifikant stärker als im Herbst, und im Winter ist seit den 1970er-Jahren eher eine Stagnation auf allerdings hohem Niveau zu erkennen.

Das andere Extrem, eine Gegenläufigkeit dekadischer Schwankungen ist beispielsweise in den offenbar sehr ozeanischen 1910er Jahren gegeben, in denen die kühlest Sommer der gesamte Reihe mit sehr milden Wintern zusammengefallen sind – wir werde diese Anomalie später (Abbildung 2-20 und folgende) auch noch als besonders niederschlagsreich kennen lernen, was physikalisch durchaus Sinn macht.

Etwas weniger deutlich manifestiert sich eine kontinentale Phase um 1890 mit sehr strengen Wintern und weniger deutlich ausgeprägten, aber durchaus vorhandenen warmen Herbst und Sommern. Konsequenterweise waren diese strengen Winter sehr trocken (Abbildung 2-22).

Typisch für die flächenmäßigen Hauptklimazonen Österreichs, die zum überwiegenden Teil nicht im mediterranen Einflussbereich liegen, ist die Kurzfristvariabilität im Winter deutlich höher als im Sommer, Herbst und Frühling. Die kältesten unterscheiden sich von den wärmsten Wintermitteln im Extremfall um mehr als 10°C, während der absolute Variationsbereich der anderen Jahreszeiten nur bei 6 bis 7° liegt.

Allen Zeitreihen der Abbildung 2-18 und Abbildung 2-19 ist gemeinsam, dass in ihnen kein Trend zu zunehmender Variabilität zu erkennen ist. Das in der öffentlichen Diskussion als oft zitierte „Binsenweisheit“ des Klimawandels a priori postulierte „Verrückterwerden“ des Klimas samt der damit sogar manchmal behaupteten „nicht mehr Vorhersagbarkeit“ hält somit dem Test mit HISTALP Klimazeitreihen nicht stand. Es gibt dazu allerdings erst eine Publikation in der Fachliteratur (Böhm, 2006), unsere Gruppe arbeitet jedoch gerade an einer diesbezüglichen Spezialstudie, deren vorläufige Ergebnisse das hier gesagte voll untermauern: Die Variabilität der Lufttemperatur nahm im Großraum Alpen und damit auch in Österreich in den letzten 200 Jahren signifikant ab, für den Luftdruck weniger stark, jedoch keinesfalls zu, und die Variabilität des Niederschlages zeigt zwar in einzelnen Regionen (hauptsächlich in den mediterranen) und einzelnen Jahreszeiten eine nicht signifikante Zunahme – jedoch dominiert auch beim Niederschlag insgesamt ein Rückgang der Variabilität.

- Stärkste Variabilität (Streuung) im Winter, geringste im Sommer – generell ist kein Anstieg der Kurzfristvariabilität des Temperaturklimas zu erkennen (*harte Aussage*).
- Die hochfrequente Variabilität der Temperatur nimmt langfristig ab – im 19. Jahrhundert war das Temperaturklima signifikant variabler („verrückter“) als im 20. Jahrhundert (*mittelharte Aussage*).

2.3.4 Niederschlag in Österreich

a) Aus homogenisierten Monatsdaten abgeleitetes Wissen

Für den Niederschlag existiert in Österreich instrumentelle Information zurück bis in die 1810er- bzw 1820er Jahre (Regionen Nord und Südost), im inneralpinen Bereich und im Westen zurück bis in die 1850er Jahre. Als markantester Unterschied zur

Temperaturentwicklung ist die beim Niederschlag auch bei den Langzeittrends gegebene Unterschiedlichkeit bis hin zur Gegenläufigkeit, die man in den Abbildung 2-20 und Abbildung 2-21 deutlich sehen kann. So dominiert in der Region Südost über den gesamten Zeitraum seit den 1810er Jahren ein fallender Niederschlagstrend, während im Westen Österreichs, zumindest seit den trockenen 1860ern, eine insgesamt steigende Tendenz. Im Inneralpinum und im Norden ist insgesamt kein Trend zu erkennen, hier dominieren die dekadischen Anomalien.

Sowohl für den Langfristbereich als auch für die dekadischen Schwankungen sind 10-prozentige Trends bzw. Anomalien typisch, im Fall des 200-jährigen Trends im Südosten liegen zwischen dem feuchten Zeitabschnitt vor 1850 und den trockenen 1980ern und 1990ern sogar etwas mehr als 10%.

Eine einzige dekadische Anomalie war für alle Subregionen Österreichs gleichzeitig und etwa gleich stark vorhanden, diejenige der trockenen 1860er Jahre. Hier erfolgte überall in Österreich ein rascher Einbruch um 10%, der in der Gletscherregion zum raschen Rückgang nach dem Höchststand um 1850 beitrug, und der z.B. den Neusiedlersee für einige Jahre zur Gänze austrocknen ließ – ein Phänomen, das seither nie mehr aufgetreten ist.

Auf der anderen Seite des Spektrum liegen die feuchten 1910er Jahre, deren räumliche Gliederung jedoch stärker variiert, und auch die Dauer dieser ausgeprägt feuchten, ozeanischen Phase (vergleiche Abbildung 2-7) war in den verschiedenen Regionen Österreichs unterschiedlich – am massivsten und längsten war sie im Südosten und inneralpin, am wenigsten markant im Westen.

Die Zeit vor 1850, die allerdings nur für den Norden und Südosten mit Niederschlagsreihen dokumentiert ist, scheint eine sehr feuchte gewesen zu sein. Wahrscheinlich gilt das auch für das inneralpine Gebiet, und es steht auch – zusammen mit der Temperaturentwicklung - im Einklang mit den Gletscherhöchstständen, die in den 1810er- und den 1840er Jahren erreicht worden sind. Der Befund eines generell hohen Niederschlagsniveaus vor 1850 wird auch durch die längeren Zeitreihen aus dem Großraum Alpen gestützt, wie er in Auer et al, 2005 und 2007a sowie in Efthymiadis et al, 2006 und 2007 gezeigt, analysiert und diskutiert wird.

- Unterschiedliche dekadische und Langzeitentwicklungen beim Niederschlag auch im kleinen Österreich – einheitlich nur die trockenen 1860er und die feuchten 1910er Jahre. Langfristig im Südosten Niederschlagsabnahme, im Westen Zunahme (*harte Aussage*).
- Trends und dekadische Schwankungen in der Größenordnung von $\pm 10\%$ – größere traten im Klima der letzten 200 Jahre in Österreich nicht auf (*harte Aussage*).

Im Hinblick auf den anthropogenen Klimawandel und die im folgenden Kapitel diskutierten Zukunftsszenarien sind die Entwicklungen der aktuellen Jahrzehnte interessant. In ihnen befinden wir uns ja in einer Zeit (vergleiche Kapitel 2.2), die bereits stark von anthropogenen Klimaantrieben geprägt ist, unter denen wiederum etwa seit 1980 der Faktor Treibhausgase überwiegt. Seit etwa 1970 finden wir im Norden und in den inneralpinen Bereichen Österreichs einen regelmäßigen Anstieg des Niederschlages, der im Norden seit der trockenen Phase davor bereits die Größenordnung von 10% erreicht hat. Im Westen steigen die Niederschlagsmengen ebenfalls, jedoch hier mit einem überlagerten dekadischen Auf und Ab, das wir auch im Südosten finden, hier jedoch mit einem eher stagnierenden jedoch sehr trockenen Niveau, rund 10% unter dem Durchschnitt des 20. Jahrhunderts.

- **Aktuelle Trends seit etwa 1970:** Jahressummen des Niederschlages überall steigend, außer im Südosten – im Norden und inneralpin monoton ansteigend, im Westen und Südosten durch dekadische Maxima und Minima überlagert.

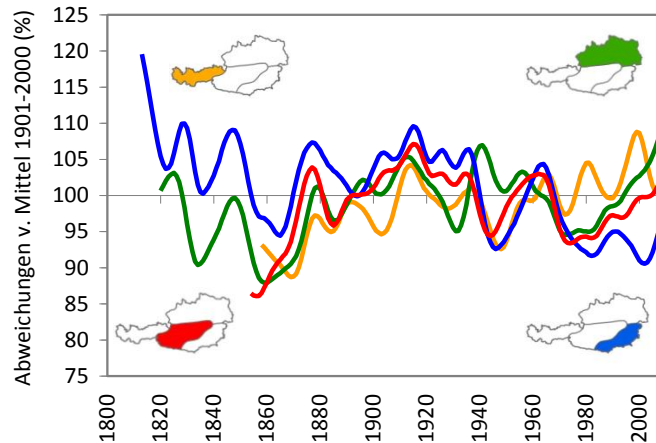


Abbildung 2-20: Geglättete Jahresmittelreihen des Jahresniederschlages 4 Subregionen Österreichs von Messbeginn bis 2009. Gelb: WEST, grün: NORD, rot: INNERALPINE TÄLER, schwarz: hochalpin, blau: SÜDOST (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter).

Die bisher besprochenen Trends und Schwankungen der geglätteten Niederschlagsreihen sind, stärker noch als es bereits für die Temperatur gezeigt worden ist, überlagert von einer sehr lebhaften Kurzfrist-Variabilität von Jahr zu Jahr. Abbildung 2-21 zeigt die geglätteten Jahreskurven der Abbildung 2-20 zusammen mit den einzelnen Jahressummen. In typischen Ausreisserjahren (wie etwa das Jahr 2009 für die Region Nord) weichen sie um 20-25% vom langjährigen Durchschnitt ab, extreme Jahre können sogar zwischen 50 und 150% des Jahrhundertmittels liegen. Diese erhebliche Varianz relativiert die oben besprochenen Trends und dekadischen Anomalien, die nur in wenigen Fällen auch im streng statistischen Sinn signifikant sind. Diese Einschränkung gilt umso stärker je kürzer die betrachteten Zeitspannen sind, wie etwa die gezeigten Trends der aktuellen Jahrzehnte des anthropogenen Klimawandels. Es ist deshalb große Vorsicht gegenüber vorschnellen Schlüssen im Hinblick auf Niederschlagstrends geboten – und es bestehen gerade beim Niederschlag im Hinblick auf statistische Signifikanz (=Unterscheidbarkeit vom Zufall) besondere Anforderungen an die Reihenlänge damit z.B. „trend to noise ratios“ von mehr als 1 erreicht werden, also Trends, die die Streuung übertreffen.

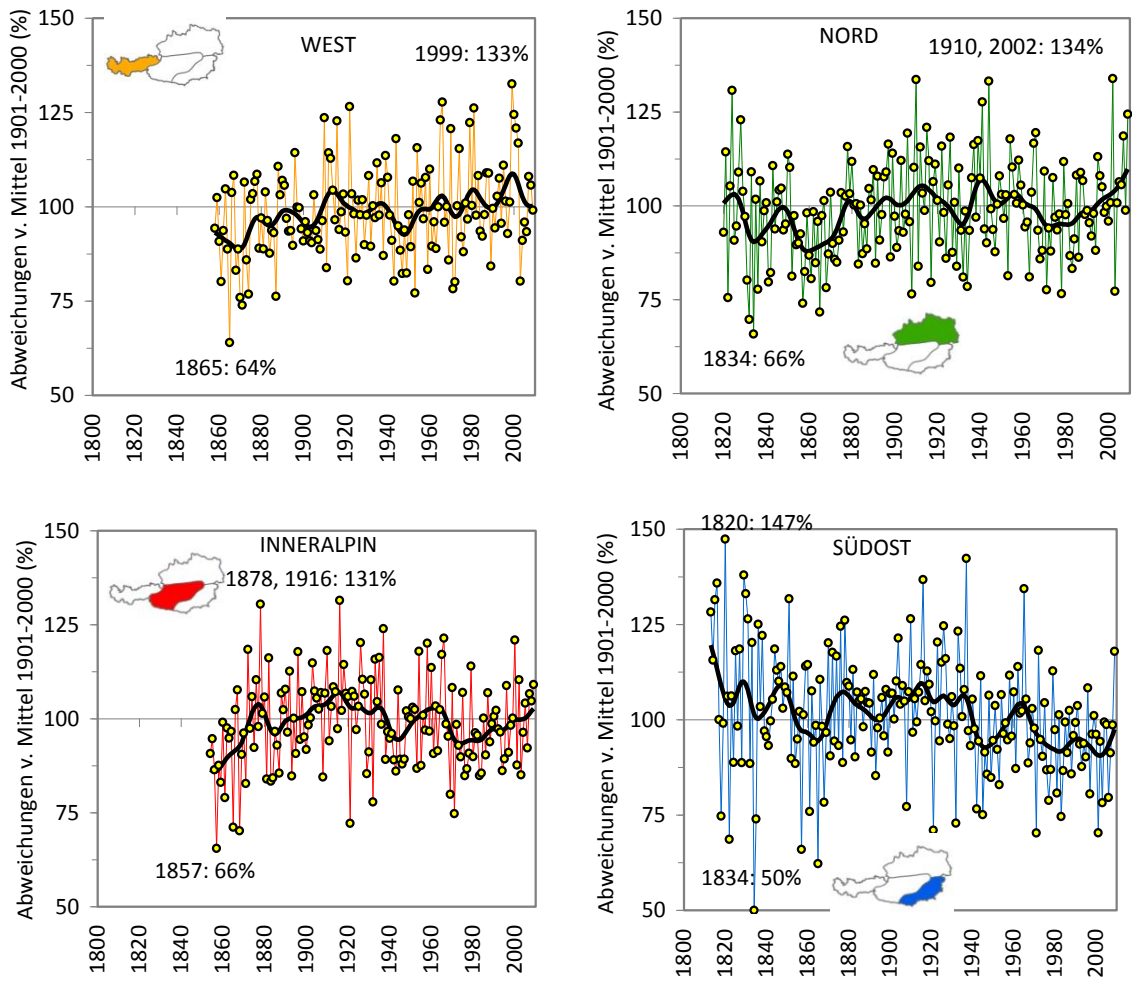


Abbildung 2-21: Jahressummen des Niederschlages in vier Subregionen Österreichs von Reihenbeginn bis 2009. Einzeljahre und geglätteter Verlauf (Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter), die trockensten und das feuchtesten Jahre sind hervorgehoben.

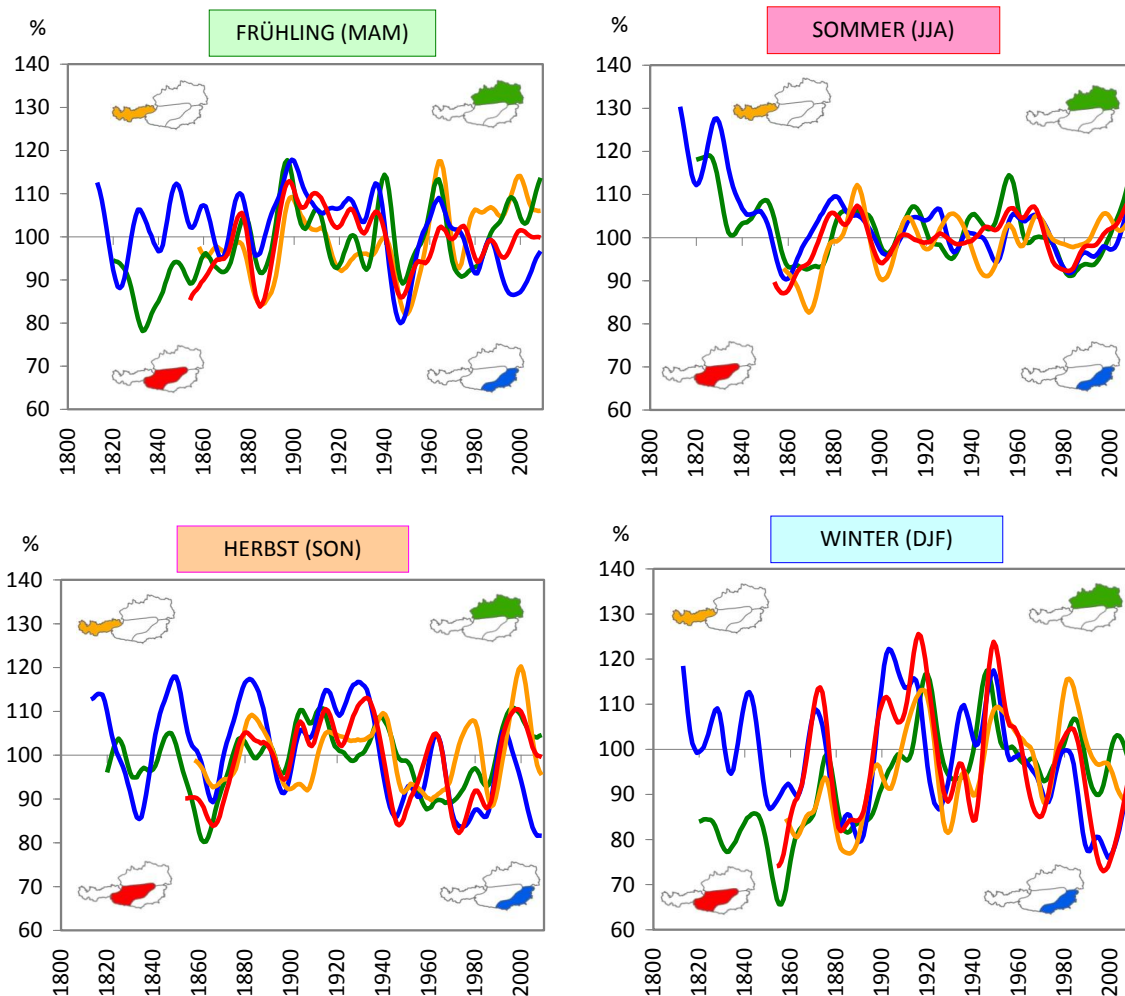


Abbildung 2-22: Geglättete Jahreszeitensummen des Niederschlages in vier Subregionen Österreichs von Reihenbeginn bis 2009. Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter.

- Langzeittrends noch stärker als bei der Temperatur überlagert von starker Streuung von Jahr zu Jahr (Streubereich der Jahresmittel maximal $\pm 50\%$ → ein extrem feuchtes oder trockenes Jahr (Jahreszeit, Monat) sagt nichts aus über Trends (*harte Aussage*)).
- Die hochfrequente Variabilität des Niederschlages nimmt langfristig nicht zu sondern eher ab – es gibt jedoch (anders als bei der Temperaturvariabilität) regionale Unterschiede dieses Befundes (*mittelharte Aussage*).

In den regionalen Saisonaltrends sind nur wenige gemeinsame Entwicklungen zu erkennen, wie etwa die feuchten Sommer vor 1850 (mit der Einschränkung, dass für diese Zeit nur Zeitreihen aus zwei Unterregionen vorhanden sind) und die Trendumkehr der Sommerniederschläge um 1980, die zumindest für drei Subregionen Österreichs die Klimaentwicklung der Niederschläge im „Treibhauszeitalter“ charakterisieren. Ansonsten ist die Langfristentwicklung der Sommerniederschläge eher durch dekadische Schwankungen als durch Langfristtrends gekennzeichnet.

In den drei anderen Jahreszeiten fällt eine mehrere Dekaden anhaltende Periode mit überdurchschnittlichem Niederschlag in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf, innerhalb der es allerdings eine saisonal und regional unterschiedliche Feinstruktur gibt. So findet man im Frühling eher zwei dekadische Maxima an den Rändern dieser Periode, während der

Winterniederschlag eher ein dominantes Maximum für alle Subregionen in den bereits bei der Temperatur erwähnten ozeanischen 1910er Jahren zeigt.

Die bei den Sommerniederschlägen erwähnte aktuelle Niederschlagszunahme ist im Frühling im Westen und Norden auch zu sehen, nicht allerdings in den alpinen und südöstlichen Landesteilen. Die vorerst analoge Tendenz zu feuchteren Herbsten ist im 21. Jahrhundert vorerst wieder gebrochen, die Herbste der ersten Dekade des neuen Jahrhunderts werden wieder trockener. Im Winter besteht seit den sehr niederschlagsreichen 1950er Jahren überall in Österreich eine generelle Tendenz zu weniger Niederschlag, die im inneralpinen Bereich und im Südosten stärker ist, als im Norden und Westen. In allen Landesteilen allerdings war dieser Trend in den 1980er Jahren durch ein markantes Niederschlagsmaximum unterbrochen - stärksten im Westen, am schwächsten im Südosten.

- Nicht nur regional, sondern auch saisonal markant unterschiedliche Entwicklungen → vor räumlichen und auch Jahreszeitlichen Generalisierungen bei der Niederschlagsvariabilität wird gewarnt. Einheitlich lediglich die feuchten Sommer vor 1850 sowie eine Tendenz wieder zunehmender Sommerniederschläge seit 1980 (auch in Südosten) (*harte Aussage*).

b) Aus qualitätsgeprüften Tagesdaten abgeleitetes Wissen

Anders als für Monatsdaten basiert das Wissen über die Veränderungen der Temperatur und des Niederschlags in Österreich aus Tagesdaten auf einer wesentlich kürzeren Zeitperiode und auf nicht-homogenisierten Daten. Das hat einerseits den Grund, dass

- das Archiv an Tagesdaten der ZAMG vor 1948 fast zur Gänze durch einen Brand vernichtet wurde und die Tagesdaten der Hydrographischen Dienste Österreichs nicht digital vorliegen
- derzeit noch keine entsprechenden Methoden zur Homogenisierung von Tageswerten des Niederschlags zur Verfügung stehen (siehe Auer et al., 2007)

Das aus Monatsdaten ableitbare Wissen ist jedoch eingeschränkt und lässt insbesondere nur bedingt Aussagen über Veränderungen von Extremwerten zu. Es sind daher an der ZAMG umfangreiche Bestrebungen im Gange um die Digitalisierung und Homogenisierung von Tagesdaten für Österreich voran zu treiben – vorerst mit dem Zwischenziel zurück bis 1948, später wenn möglich bis 1900. Zum derzeitigen Zeitpunkt müssen aus Tageswerten abgeleitete Aussagen über Veränderungen des Niederschlags andere hydrologisch relevanter Größen in Österreich auf den StartClim Datensatz (Schöner et al., 2003, Auer et al., 2007b) aufbauen, der qualitätsgeprüfte Tagesdaten zurück bis 1948 beinhaltet.

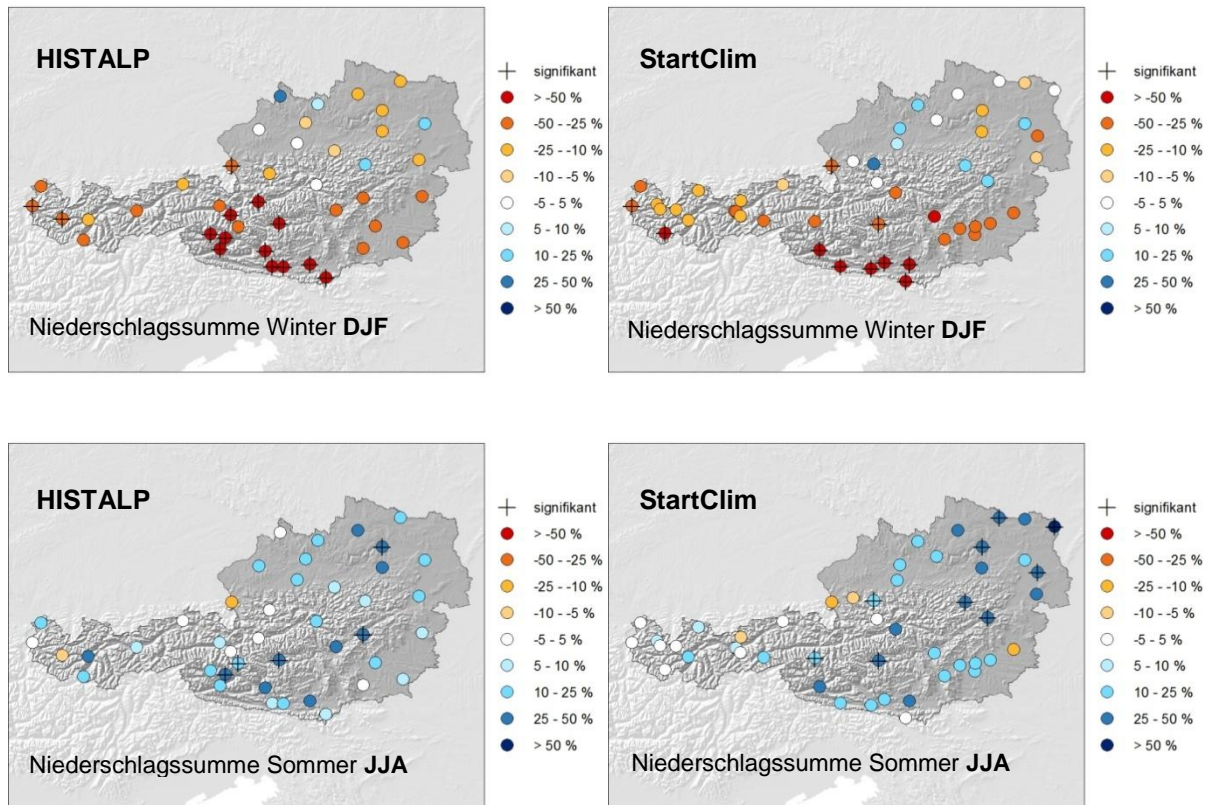


Abbildung 2-23: Trends der Niederschlagssumme im Winter (DJF), und Sommer (JJA) für die Periode 1976-2007, aus homogenisierten HISTALP-Stationsdaten (links) und nicht homogenisierten STARTCLIM-Stationsdaten (rechts). Signifikante Trends (95% Signifikanzniveau) sind mit einem + gekennzeichnet.

Um eine Aussage über die Vergleichbarkeit von homogenisierten Daten mit nichthomogenisierten (aber qualitätsgeprüften) Daten zu ermöglichen, werden in Abbildung 2-23 die zeitlichen Trends des Niederschlags der StartClim Stationen mit jenen von HISTALP verglichen. Es ist hierbei von Vorteil, dass viele der StartClim Stationen mit den HISTALP Stationen ident sind. Für eine gute Vergleichbarkeit wurde die Periode 1976-2007 ausgewählt, die einen guten Kompromiss in Hinblick auf die Anzahl zur Verfügung stehenden Stationen (ohne Datenausfälle) und Reihenlänge darstellt. Darüber hinaus wurde in Kapitel 2.2.1 (insbesondere Abbildung 2-3) schlüssig argumentiert, dass in den späten 1970er Jahren der anthropogene Treibhauseffekt zum dominierenden Klimaantrieb geworden ist. Nicht zuletzt ließ auch die Verfügbarkeit und der Aufbereitungsgrad von hydrologischen Daten den Zeitraum 1976-2007 als sinnvolle Basisperiode erscheinen – auch für die ab Kapitel 3 und in den folgenden hydrologisch geprägten Hauptkapiteln skizzierten und diskutierten Zukunftsabschätzungen für die Mitte des 21. Jahrhunderts.

Die Trends 1976-2007 der einzelnen Stationen zeigen, sowohl für den Winter (DJF) als auch den Sommer (JJA), eine gute Übereinstimmung zwischen StartClim und HISTALP mit

- einer Niederschlagszunahme im Norden Österreichs und einer Niederschlagsabnahme im Süden bis Westen im Winter
- schwachen Trends im Sommer mit einer geringfügigen Abnahme im Süden Österreichs im Sommer.

Alles Trends wurden auf statistische Signifikanz getestet. Die räumliche Homogenität der Trends ist ein guter Hinweis auf die Richtigkeit des Vorzeichens der Trends. Abweichungen zwischen StartClim und HISTALP sind auf die fehlende Homogenisierung von StartClim aber auch auf die unterschiedliche Datenbasis (Tageswerte anstatt Monatswerte) zurück zu führen.

Abbildung 2-24 zeigt die zeitlichen Trends für verschiedene Kenngrößen des Niederschlags. Sowohl für den Winter als auch für den Sommer ist eine gute Übereinstimmung der Trends für die Niederschlagssumme und Niederschlagshäufigkeit zu finden. Die Niederschlagsintensität zeigt ebenfalls ein ähnliches Bild wie die Niederschlagssumme. Daraus ist abzuleiten, dass, mit guter Annäherung Veränderungen der Niederschlagssumme sowohl aus einer Änderung der Niederschlagshäufigkeit als auch aus der Änderung der Niederschlagsintensität erklärt werden können. Weiters sieht man, dass aus den räumlichen Trends die Aussage über die Zunahme des Niederschlags seit ca. 1975 noch etwas verfeinert wird, da die Niederschlagszunahme besonders im Sommer zu sehen ist, während im Winter eine Abnahme im Südosten einer Zunahme im Norden gegenübersteht.

Als weitere hydrologisch interessante Größe wird in Abbildung 2-24 die Entwicklung der Schneedecke gezeigt. Die Daten zur Schneedecke wurden im Rahmen des Projekts StartClim 2007 (Auer et al., 2007b) untersucht und decken die Periode 1948-2007 ab. Für alle Zeitreihen wurde eine detaillierte Qualitätskontrolle durchgeführt. Aus Abbildung 2-25 ist zu entnehmen dass für die große Mehrheit der Zeitreihen ein abnehmender Trend sowohl für die Dauer der Winterdecke als auch für die Dauer der Schneedecke zu finden ist. Viele Zeitreihen zeigen einen signifikanten Trend, einzelne Zeitreihen zeigen keinen Trend. Für keine der Zeitreihen mit positiven Trend ist dieser signifikant. Eine Homogenisierung und detaillierte Auswertung der Zeitreihen der Schneedecke (steht jedoch noch aus. Analysen langer Zeitreihen der Schneedecke aus der Schweiz (Latenser et al., 2003, Scherer et al., 2004) zeigen ebenfalls die generelle Abnahme der Schneedeckendauer für die Schweiz, wobei eine Differenzierung nach der Seehöhe getroffen wird, da die Sensitivität der Schneedeckendauer höhenabhängig ist. Die Nichtlinearität des Zusammenhanges zwischen der Schneedeckendauer und der Änderung der Lufttemperatur (Sensitivität) beziehungsweise zwischen dem Anteil des Festen Niederschlags und der Lufttemperaturänderung wurde auch für Österreich gezeigt (Hantel et al. 2000, Schöner et al 2007).

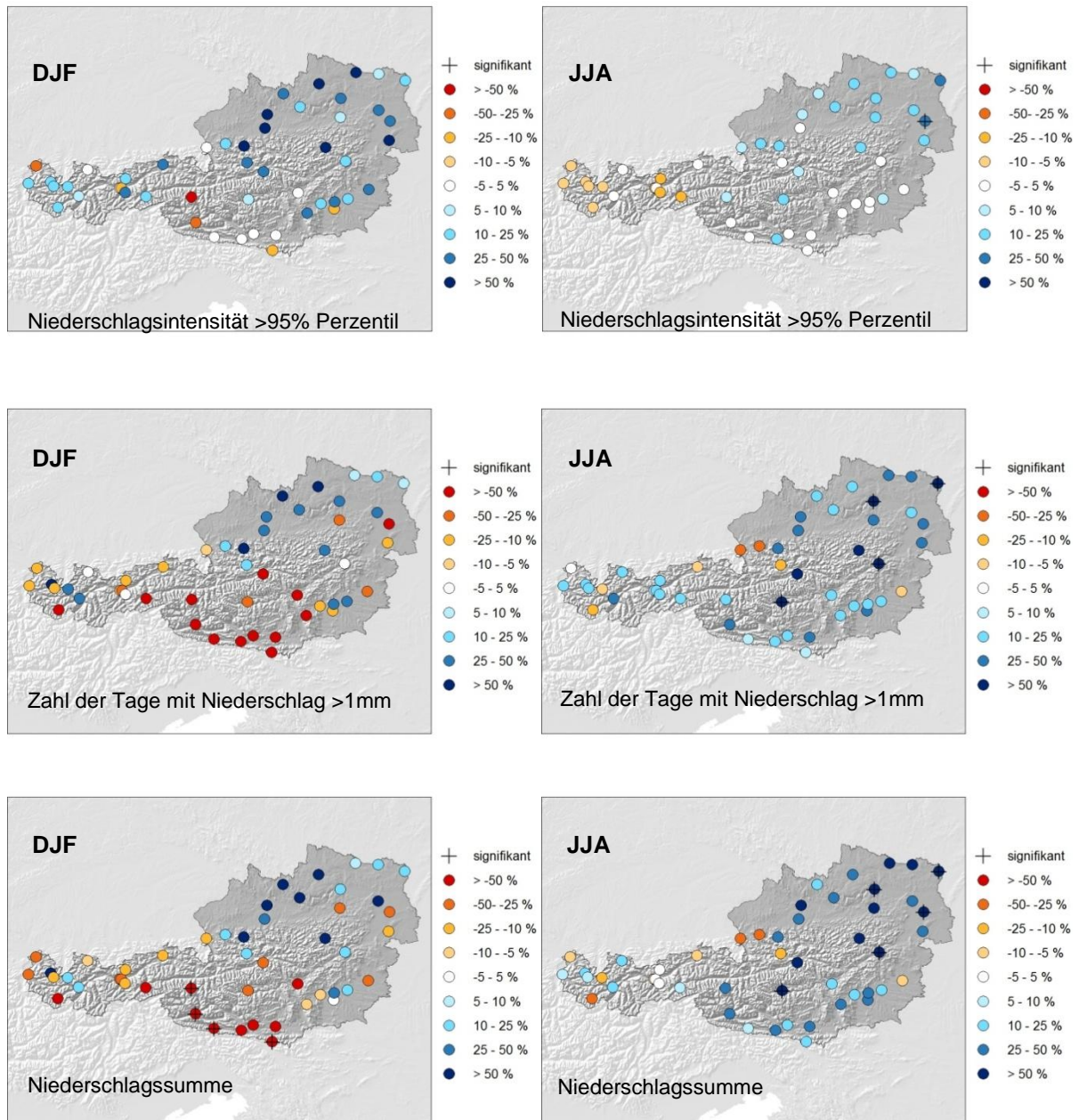


Abbildung 2-24: Trends der Niederschlagsintensität für Tage >95% Quantil, der Tage mit Niederschlag >1mm und der Niederschlagssumme im Winter (DJF) und Sommer (JJA) für die Periode 1976-2007, aus nicht homogenisierten STARTCLIM-Stationsdaten. Signifikante Trends (95% Signifikanzniveau) sind mit einem + gekennzeichnet.

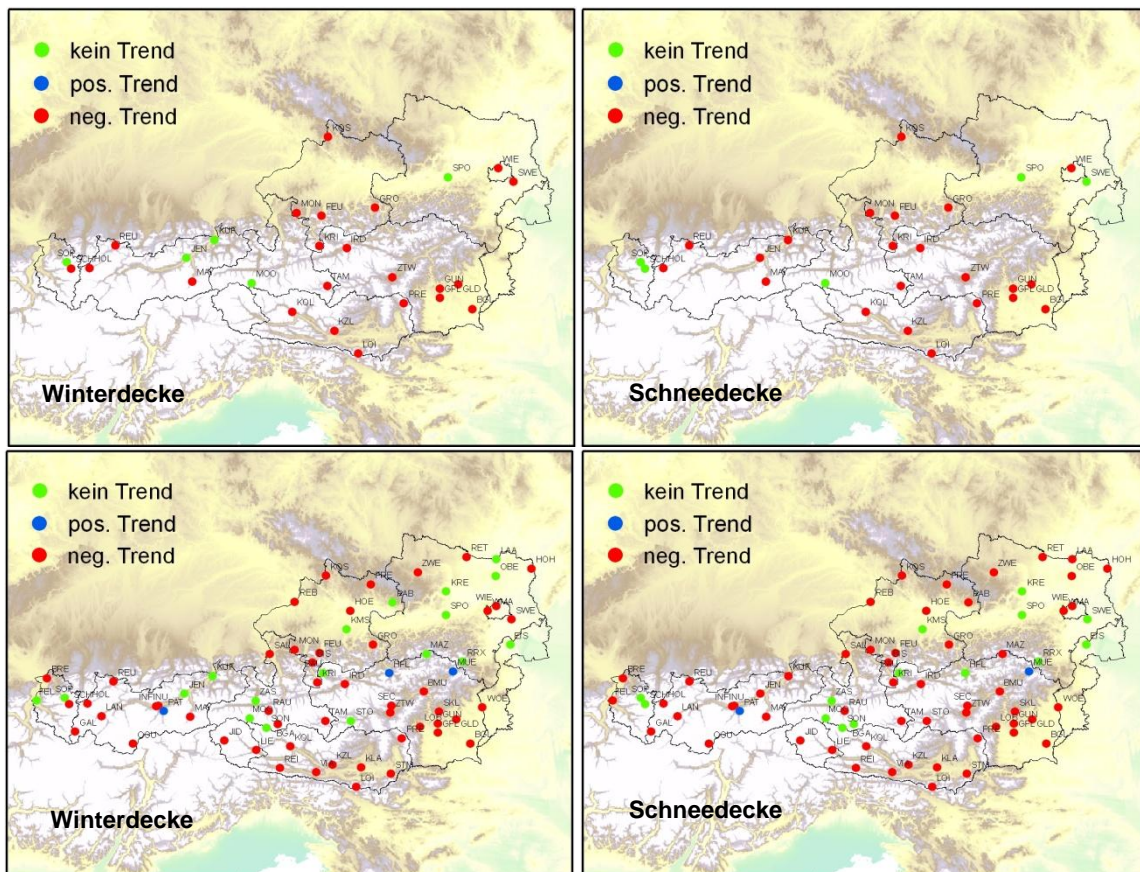
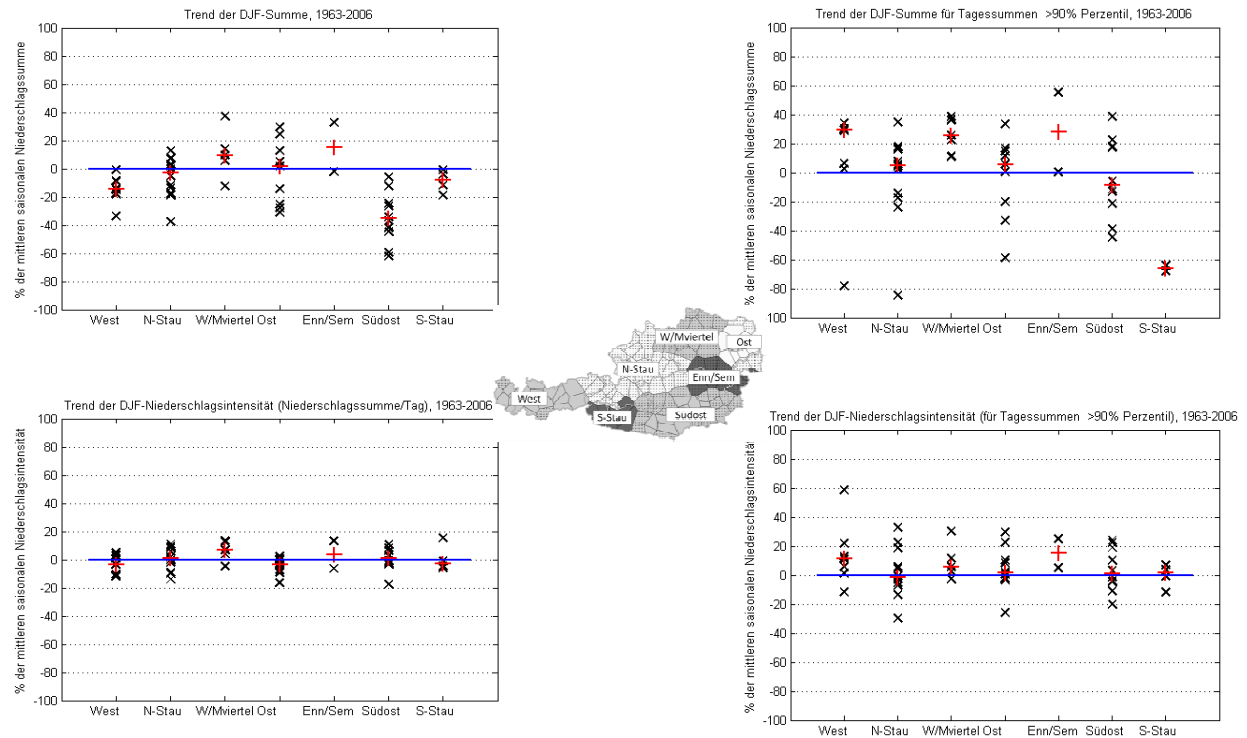


Abbildung 2-25: Zeitliche Trends in der Periode 1948-2007 für die Zahl der Tage mit Winterdecke (links) und die Zahl der Tage mit Schneedecke (rechts) aus den StartClim Datensatz (Auer et al., 2007b) oben für signifikante Zeitreihen und unten für alle Zeitreihen.

Aus vielen Auswertungen über die Schneedecke im Alpenraum ist zu ersehen, dass die Jahr-zu-Jahr Variabilität der Schneedecke sehr hoch ist und größer ist als ein längerfristiges Klimasignal (siehe z.B. Auer et al 2007b für Österreich). Eine gleichgehende Aussage konnte in Kapitel 2.3 auch für den Niederschlag gezeigt werden.

In Abbildung 2-26 wird eine weitergehende Auswertung der StartClim Niederschlagsdaten nach statistischen Kennzahlen für Extremwerte gezeigt. Getrennt nach Winter (DJF) und Sommer (JJA) wird der Trend der Niederschlagssumme mit den Trends der Summe für Tage über dem 90% Perzentil, dem Trend der Niederschlagsintensität aller Niederschlagstage und dem Trend der Niederschlagsintensität für Tage über dem 90% Perzentil verglichen. Auch wenn keine Aussagen basierend auf signifikante statistische Ergebnisse gemacht werden können, ist aus der Auswertung abzuleiten, dass sich zeitliche Veränderung von Extremereignissen auch in den Niederschlagssummen widerspiegeln und, besonders für den Sommer, Intensitäten aller Niederschlagstage auch in einer gleichgehenden Veränderung der Intensitäten der Extremwerte zu finden sind. Es bestätigt auch diese Auswertung die schon vorher getätigte Aussage, dass Veränderungen der Niederschlagssummen sowohl durch eine Veränderung der Häufigkeiten als auch der Intensitäten zustande kommen.

Winter (DJF):



Sommer (JJA):

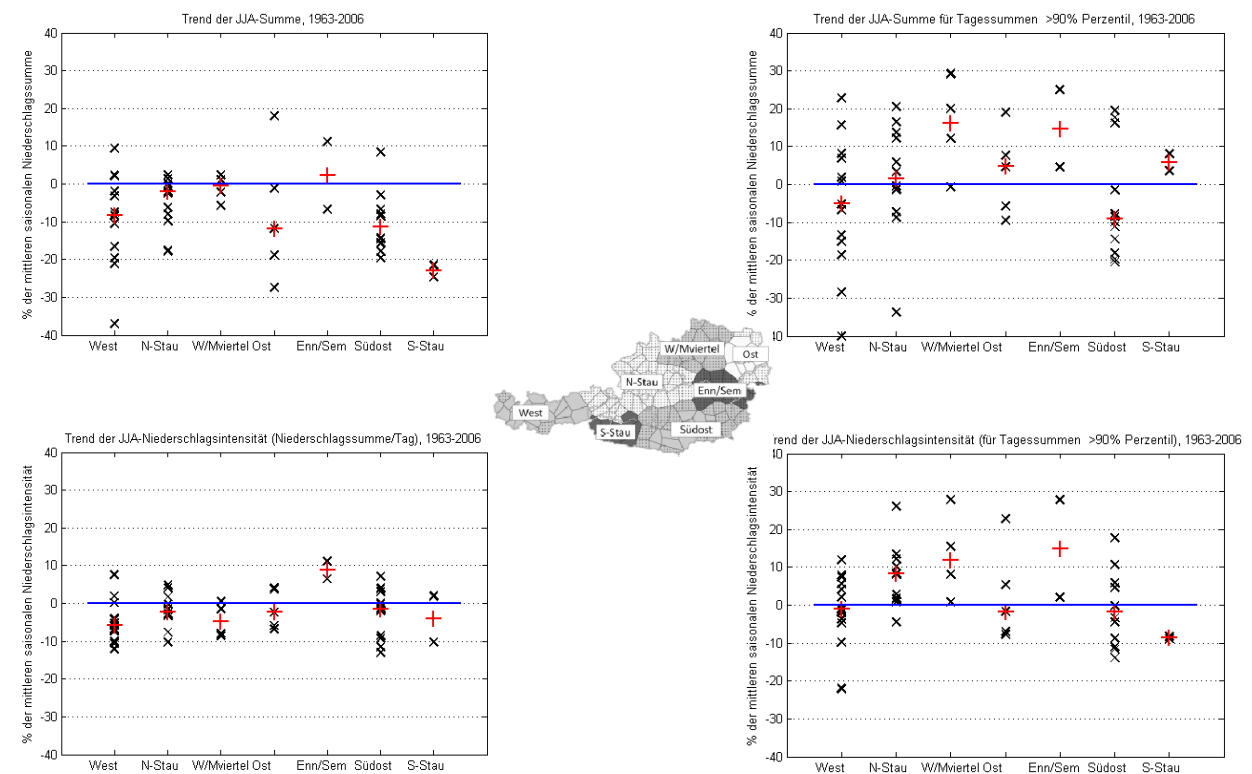


Abbildung 2-26: Trends der Niederschlagssumme und der Niederschlagsintensität (mm/Tag) sowohl für alle Niederschlagstage, als auch für NS-Tage über dem 90% Perzentil in Winter (DJF) und Sommer (JJA), für die Periode 1963-2006, aus homogenisierten HISTALP-Stationsdaten und nicht homogenisierten STARTCLIM-Stationsdaten, x = Einzelstation, + = Median. Die Regionalisierung basiert auf einer Studie von P. Seibert (2006). Die Trends wurden nicht auf Signifikanz geprüft. Glättung mit 20-jährigem Gauß'schen Tiefpassfilter.

Schlussfolgerungen für die aktuelle Situation seit den 1970er Jahren:

Die **Lufttemperatur** hat in Österreich seit Mitte der 1970er Jahre **deutlich (fast 1.5 °C) zugenommen**. Es handelt sich dabei um einen für Österreich sehr einheitlichen Trend. Die Zunahme war stärker im Sommer (fast 2°C) als im Winter (ca. 1°C) (**harte Aussage**).

Die **Jahressummen des Niederschlags** sind seit der Mitte der 1970er Jahre **überall gestiegen, außer im Südosten**, wobei die Zunahme im Norden und inneralpin monoton ansteigend war (mehr als 15% im Norden, ca. 10% inneralpin), im Westen und Südosten stark durch dekadische Minima und Maxima geprägt war (**harte Aussage**).

Die **Winterniederschläge** sind seit der Mitte der 1970er Jahre **nördlich** des Alpenhauptkammes **etwas gestiegen**, **südlich** des Alpenhauptkammes **deutlich gefallen**. In den anderen Jahreszeiten gab es tendenziell eine Zunahme des Niederschlags in ganz Österreich mit Ausnahme des Südens wo die Trends sehr gering waren (**harte Aussage**).

Die **interannuale Variabilität der Schneedecke und des Niederschlags** ist meist **größer als das längerfristige Klimasignal**, wodurch signifikante zeitliche Trends im Signal-to-Noise Verhältnis untergehen.

2.4 Situation in der Zukunft

2.4.1 Klimaszenarien für den Alpenraum und für Österreich

Die Bereitstellung von Klimaszenarien ist der erste wesentliche Schritt für die Untersuchung der Folgen des zukünftigen Klimawandels für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Während Österreich gerade auf dem Weg der Erarbeitung von Szenariendaten ist (reclip Projekte, siehe unten), liegen aus der Schweiz und insbesondere aus Deutschland Ergebnisse aus mehreren Studien vor, die sich diesem Themenkomplex widmen. In Deutschland sind wesentliche Fortschritte durch die Projekte GLOWA-DANUBE (GLOWA steht für Globaler Wandel und Wasserkreislauf www.glowa.org) und GLOWA –ELBE sowie KLIWA (Klimaveränderung und Wasserwirtschaft www.kliwa.de) erzielt worden. Diese Projekte haben teils selbst Klimaszenarien mit verschiedenen Methoden erarbeitet (regionale Klimamodellierung, Wettergenerator, Trendfortschreibungen, statistisch-dynamisches oder rein statistisches Downscaling). Der etwa zur selben Zeit durchgeführte Klimalauf mit dem Regionalmodell REMO im Auftrag des Umweltbundesamtes (Jakob, 2001 Jakob et al., 2007) in Deutschland fand ebenfalls Anwendung in GLOWA und KLIWA. In der Schweiz wurde die Untersuchung der Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft im Kontext mit anderen Klimafolgen untersucht und in mehreren Publikationen beschrieben (z.B. „Klimaänderung und die Schweiz 2050“ herausgegeben durch OCCO einem Beratenden Organ für Klimafragen in der Schweiz, „Das Klima ändert – was nun“ aufbauend auf den IPCC Report 2007). Derzeit wird in der Schweiz der Forschungsschwerpunkt CCHydro im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) durchgeführt in dessen Rahmen die Folgen des Klimawandels für die Hydrologie untersucht und auch neue Klimaszenarien erarbeitet werden.

Die Möglichkeiten und der aktuelle Stand des Wissens zur Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung wurden im Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben. In diesem Abschnitt wird nun speziell auf die für Österreich vorliegenden Ergebnisse der Klimaszenarienrechnungen eingegangen und die für die Hydrologie und Wasserwirtschaft wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Für unser Gebiet liegt eine Vielzahl von Simulationen verschiedener GCMs vor. Wie bereits früher beschrieben ist jedoch die räumliche Auflösung dieser Globalmodelle zu gering (Größenordnung 100km) um für Österreich räumlich differenzierte

Ergebnisse ableiten zu können (Abbildung 2-27). Beachtet man noch dass einerseits einzelne Gitterpunkte nicht als Datenquelle verwendet werden sollen sondern über mehrere Gitterpunkte gemittelte Informationen und andererseits die Orographie der Alpen durch die GCMs sehr schlecht beschrieben werden (höchste Erhebungen gehen nicht über 1500m hinaus) wird die eingeschränkte Nutzbarkeit der GCMs für regionale Aussagen noch weiter verdeutlicht. Es ist daher offensichtlich, dass die Informationen der GCMs räumlich weiter verfeinert werden müssen (Downscaling).

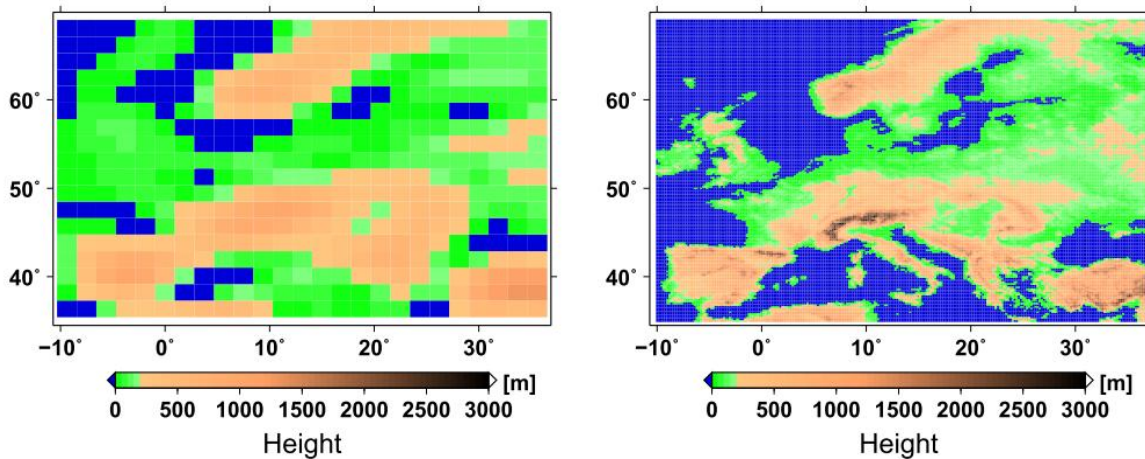


Abbildung 2-27: Zugrunde liegende Höhenraaster des treibenden Globalmodells ECHAM5 T63 (links) und des in dieser Studie verwendeten genesteten Regionalmodells CLM (rechts) (aus: Hollweg et al., 2008).

Für Österreich selbst liegen erste regionalisierte Ergebnisse über Klimaveränderungen für das nächste Jahrhundert durch die Anwendung empirischen Downscalingverfahren vor (Matulla et al., 2002, Matulla et al., 2004). Erst durch das Projekt reclip:more (Loibl et al., 2007) wurden für Österreich auch erste Szenariendatensätze durch regionale Klimamodellierung (Regionalmodelle (RCMs) Aladin und MM5) bereitgestellt. Szenariendaten aus RCMs sind prinzipiell solchen aus empirischen Downscalingmodellen zu bevorzugen, da sie ein physikalisch konsistentes Bild der Zukunft erzeugen. Wie bereits erwähnt ist jedoch der Aufwand für dynamische Downscalingverfahren ein Vielfaches der empirischen Methoden.

Da Simulationen mit RCMs im Bereich der Alpen immer den gesamten Alpenraum modellieren müssen, liegen zwar aus mehreren internationalen Projekten RCM-Läufe für das Gebiet von Österreich vor, die jedoch nicht für das Gebiet von Österreich optimiert und validiert wurden. Zu den wichtigsten Projekten die als Datenquelle für Szenariendaten verwendet werden können zählen PRUDENCE (prudence.dmi.dk) und ENSEMBLES (www.ensembles-eu.org) die auf Grund des Umfangs an Szenarienläufen auch eine Abschätzung von Unsicherheiten ermöglichen. Aus hydrologischer Sicht ist insbesondere auch das Projekt ACQWA (www.acqwa.ch) von Interesse, da es speziell hydrologische und wasserwirtschaftliche Fragestellungen im Alpenraum zum Ziel hat. ACQWA ist derzeit in der Anfangsphase und Ergebnisse sind erst zu einem späteren Zeitpunkt zu erwarten.

Die Ergebnisse des EU-Projektes PRUDENCE wurden verwendet um Klimaszenarien für die Schweiz und deren Unsicherheit im Rahmen der Studie „Klimaänderung und die Schweiz 2050“ abzuschätzen (Frei et al., 2007). Die Auswahl der verschiedenen Modelle und

Szenarien (SRES A2 und B2) ist aus der Abbildung 2-28 zu ersehen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden später verwendet um die in dieser Studie verwendeten Klimaszenarien (CLM-C20 Lauf) mit der Unsicherheit, die sich aus der Klimamodellierung ergibt, zu versehen. PRUDENCE bietet Klimaszenarien in einer räumlichen Auflösung von 50km, was jedoch für viele Impactanwendungen immer noch zu grob ist.

Für das EU-Projekt ENSEMBLES wurden durchgehende Szenarien von 1950 bis 2050 für 17 Simulationen berechnet die alle das Emissionsszenario A1B verwenden. Die Verwendung von nur einem Emissionsszenarios war deswegen sinnvoll, da sich größere Unterschiede zwischen einzelnen Emissionsszenarien erst nach 2050 zeigen. Die räumliche Auflösung der Simulationen beträgt 25km. Eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse von ENSEMBLES für Österreich liegt derzeit noch nicht vor.

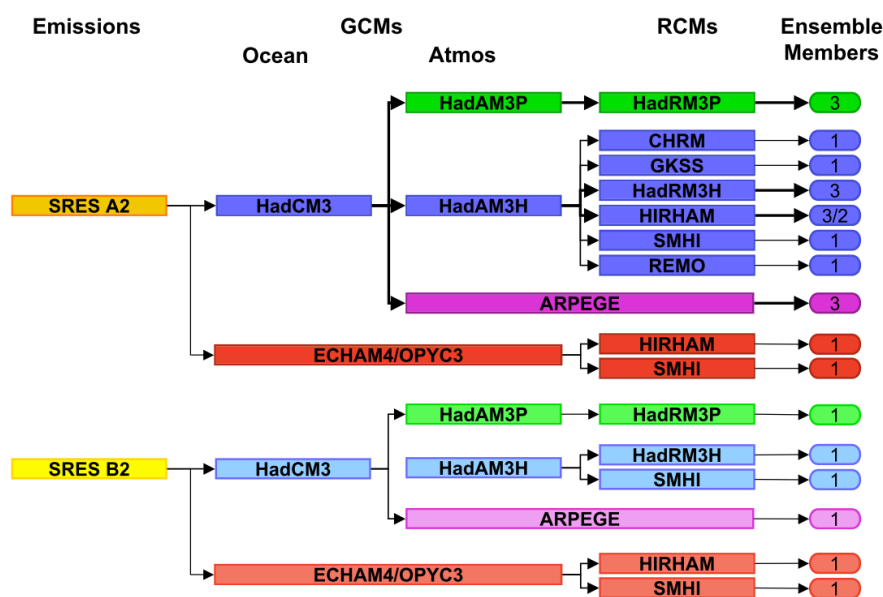


Abbildung 2-28: Modellkoppelungen, Szenarienauswahl und Ensemblesauswahl für das Projekt PRUDENCE zur Ermittlung von Klimaszenarien und zur Abschätzung der Unsicherheiten (aus Frei et al., 2007).

Neben den Simulationen aus PRUDENCE und ENSEMBLES liegen auch 2 Regionalmodellläufe aus Deutschland vor die sehr gut das Gebiet von Österreich abdecken. Das ist einerseits der transiente REMO-UBA Lauf (Jakob, 2001 finanziert vom Deutschen Umwelt-Bundesamt) der die Periode 1950 bis 2100 mit einer räumlichen Auflösung von 10km simuliert sowie ein transienter Lauf mit dem Modell COSMO-CLM (Hollweg et al., 2008, Lautenschlager et al., 2007) der die Periode 1960 bis 2100 abdeckt. Beide Simulationen wurden von ECHAM5 SRES A1B angetrieben. Das Modell COSMO-CLM ist die Klimaversion des Lokalmodells des Deutschen Wetterdienstes DWD für die operationelle Wettervorhersage und hat eine räumliche Auflösung von ca. 20km und 32 vertikale Schichten. Das Modell CLM unterscheidet sich vom Modell REMO auch grundlegend in der Modellphysik, da CLM einen nicht-hydrostatischen Ansatz verwendet. Hydrostatische Modelle wie z.B. REMO, setzen die Vertikalbeschleunigung eines Luftteilchens = 0, was auf größeren Skalen berechtigt ist, da die horizontalen Beschleunigungen wesentlich größer sind als die vertikalen. Allerdings ist auf kleiner Skala (z.B. Gewitterwolke) diese Annahme nicht

mehr gültig. Um solche Phänomene zu erfassen, muss ein nicht-hydrostatischer Ansatz verwendet werden.

Beide Modellläufe sind über das Deutsche Klimarechenzentrum zu beziehen. Während der REMO Lauf die Alpen nur im Randbereich abdeckt, bietet der CLM-Lauf den Vorteil die Alpenregion (Greater Alpine Region) zur Gänze zu erfassen. Da Szenariendaten mit speziellen Fokus auf Österreich erst durch die derzeit laufenden Projekte reclip:century1 und 2 (http://reclip.ait.ac.at/reclip_century/) zur Verfügung stehen werden, werden in dieser Studie die Simulationen aus REMO und insbesondere CLM für Aussagen über zukünftige Änderungen des Klimas verwendet.

Klimasimulationen unter Verwendung Regionaler Klimamodelle mit dem regionalen Fokus auf Österreich wurden erstmals im Rahmen des Projektes reclip:more durchgeführt. Dabei wurden Szenarien für 2041-2050 im Vergleich zum Kontrolllauf 1981-90 basierend auf das Globale Klimamodell ECHAM5 (IS92a „Business as usual“) simuliert. Die Verwendung von dekadischen Änderungsgrößen ist jedoch kritisch, da die Klimamodelle dekadische Trends nicht richtig wiedergeben können und erst ab Zeitscheiben von ca. 30 Jahren aussagekräftig werden. Die Problematik der dekadischen Trends ist im Anhang aus Abbildung 13 zu ersehen. Ergebnisse aus reclip:more sind daher mit Vorsicht zu interpretieren. Im Rahmen von reclip:more konnten auch keine transienten Modellläufe durchgeführt werden, sondern es konnten nur die 2 Zeitscheiben (1981-90 und 2041-2050) simuliert werden.

Ein wesentlicher Fortschritt für die Klimamodellierung für Österreich und der Anwendung von Klimaszenarien für die Klimafolgenforschung ist aus den oben erwähnten Projekten reclip:century1 und reclip:century2 zu erwarten. Im Rahmen eines Konsortiums (Universität Graz, Universität für Bodenkultur, AIT, ZAMG) werden umfangreichere Ensemblesläufe durchgeführt die folgende Simulationen enthalten:

- treibende Globalmodelle: ECHAM5 und HADCM3 (SRES A1B und B1)
- Regionalmodelle: MM5 und COSMO-CLM

Die Simulationen werden transient für die Periode 1961 bis 2100 durchgeführt. Zusätzlich werden für beide Regionalmodelle Simulation mit einem Antrieb durch Reanalysedaten (ERA40 Läufe) durchgeführt. Derartige Modellläufe erlauben eine eingehende Validierung der Performance der Regionalmodelle. Erste Daten aus reclip:century sind für den Herbst 2010 zu erwarten und konnten daher im Rahmen dieser Studie nicht verwendet werden.

Neben Klimaszenarien aus dynamischen Downscaling liegen auch mehrere Ergebnisse aus Modellierungen mit empirisch-statistischen Methoden vor. Diese gehen insbesondere auf Arbeiten von Matulla zurück (z.B. Matulla et al. 2002, Matulla et al., 2004).

2.4.2 Klimaszenarien für den Alpenraum aus Globalen Klimamodellen

Zunächst werden die Ergebnisse aller verfügbarer GCM Läufe für den Alpenraum extrahiert und im Vergleich zu den Ergebnissen aus Messdaten (HISTALP) dargestellt (Abbildung 2-29 bis Abbildung 2-31). Für die Beschreibung des erweiterten Alpengebietes wurden für jedes Globalmodell diejenigen Gitterpunkte ausgewählt die den HISTALP Ausschnitt am besten abdecken. Die GCM Daten stammen aus dem IPCC2007 Ensemble (15+ gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb für den Zeitraum 1860-2000), für die SRES Szenarien A1B, A2 und B1 (anthropogener Antrieb von 2001-2100), CMIIP3 Experiment, Meehl et al., 2007). Die Abbildung 2-29 und Abbildung 2-30 zeigen, dass die GCMs auf der Skala der Alpenregion die Lufttemperatur nur eingeschränkt richtig beschreiben können (Median der GCM Läufe als der wahrscheinlichste Verlauf deckt

sich nicht mit den Messungen aus HISTALP). Abbildung 2-29 bis Abbildung 2-31 zeigen, dass für die Lufttemperatur die Modellergebnisse besser sind als für den Niederschlag. Sowohl für die Lufttemperatur als auch für den Niederschlag wird der Sommer durch die GCMs besser wiedergegeben als der Winter.

Ein Vergleich der Temperatursimulationen für die Zeit 1860 bis jetzt der Globalmodelle ECHAM5, HADCM3, ECHO-G und HADGEM mit den Messdaten aus HISTALP (Abbildung 2-32) zeigt deutlich die sehr unterschiedliche zeitlichen Entwicklungen der einzelnen Globalmodelle. Alle Modelle können dekadische Trends ungenügend beschreiben. Einzelne Modelle können jedoch manche Perioden recht gut nachzeichnen.

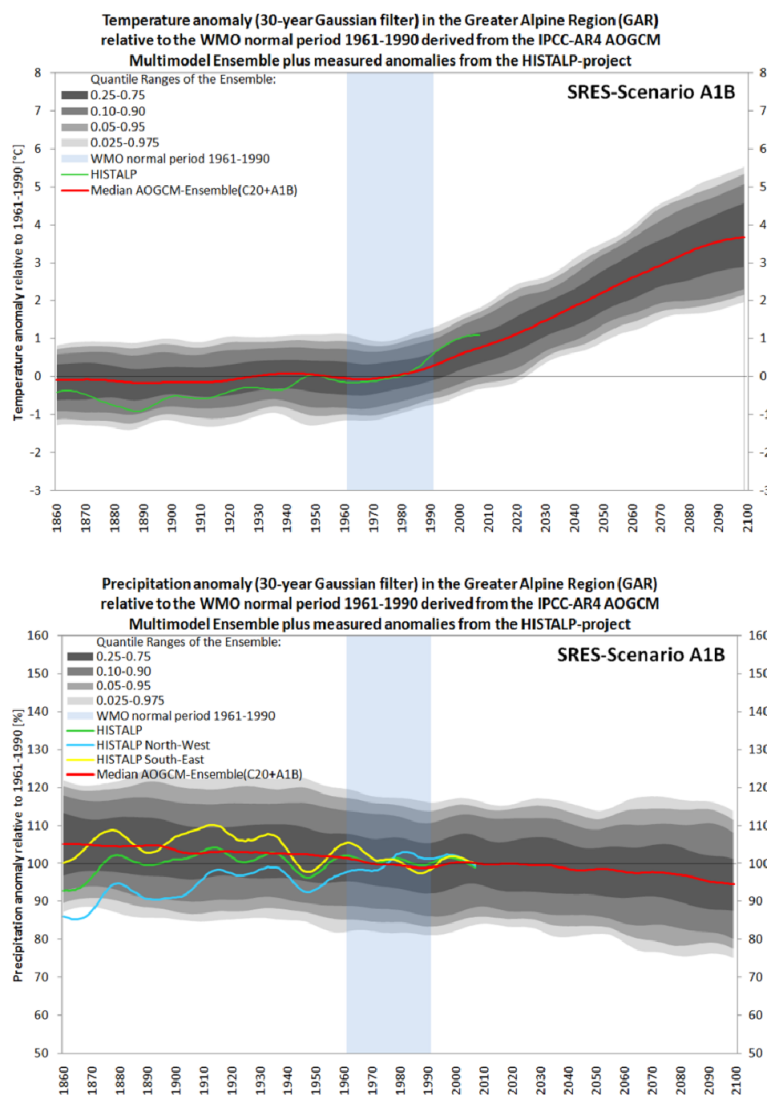


Abbildung 2-29: Änderung der mittleren Jahrestemperatur (oben) unten der Jahresniederschlags-summe (unten) für gefilterte Zeitreihen (Gauß-Filter 30 Jahre) von 1860 bis 2100 bezogen auf die WMO Normalperiode 1961-1990 im erweiterten Alpenraum aus 15+ gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb für den Zeitraum 1860-2000), das SRES Szenario A1B (anthropogener Antrieb von 2001-2100).

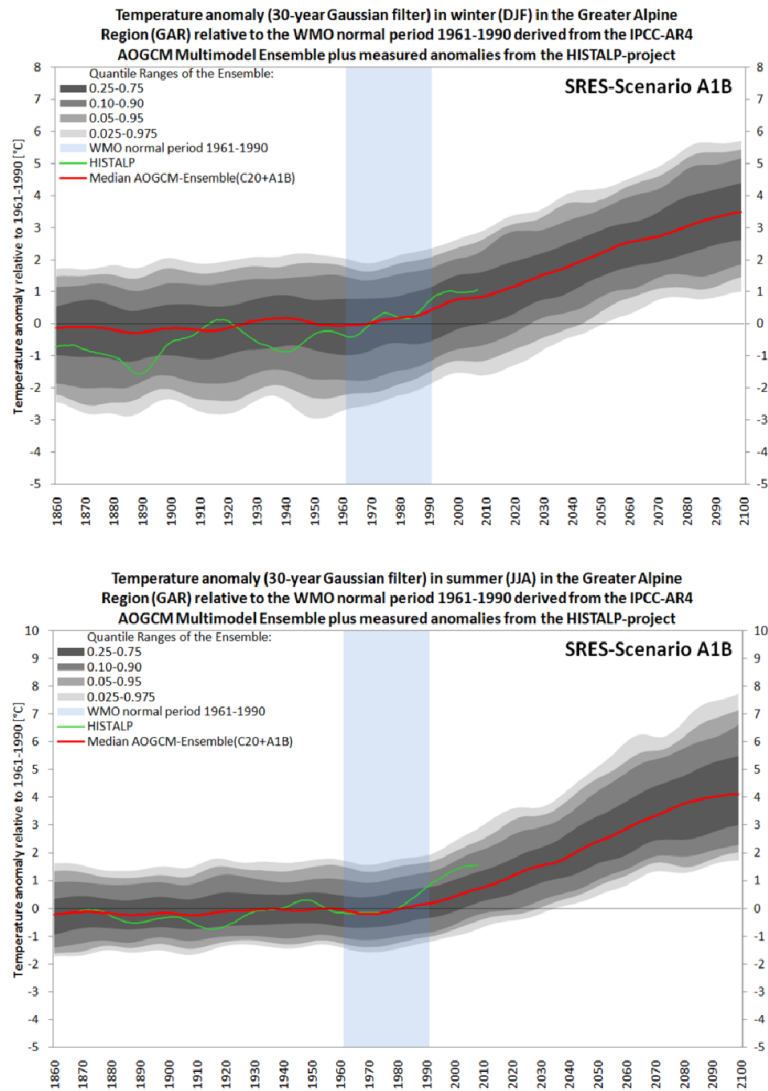


Abbildung 2-30: Änderung der Lufttemperatur im Winter (DJF, oben) und im Sommer (JJA, unten) (Gauß-Filter 30 Jahre) von 1860 bis 2100 bezogen auf die WMO Normalperiode 1961-1990 im erweiterten Alpenraum aus 15+ gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb für den Zeitraum 1860-2000), das SRES Szenario A1B (anthropogener Antrieb von 2001-2100).

Zusammenfassend kann aus der Validierung der GCM-Läufe an den HISTALP Messdaten festgehalten werden, dass die Globalmodelle nur ungenügend in der Lage sind die Klimaentwicklung im Alpenraum zu beschreiben. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Ergebnissen der GCM Modellierung der Vergangenheit auf Globaler Ebene (IPCC, 2007), dann kann daraus geschlossen werden, dass die Skala der Alpen zu klein ist um von den GCMs richtig simuliert zu werden. Erst bei einer Vergrößerung des Ausschnittes auf Mitteleuropa oder größer ist eine Verbesserung der Simulation (im Vergleich zu den Messdaten) zu erwarten. Diese Aussage konnte jedoch im Rahmen dieser Studie nicht überprüft werden.

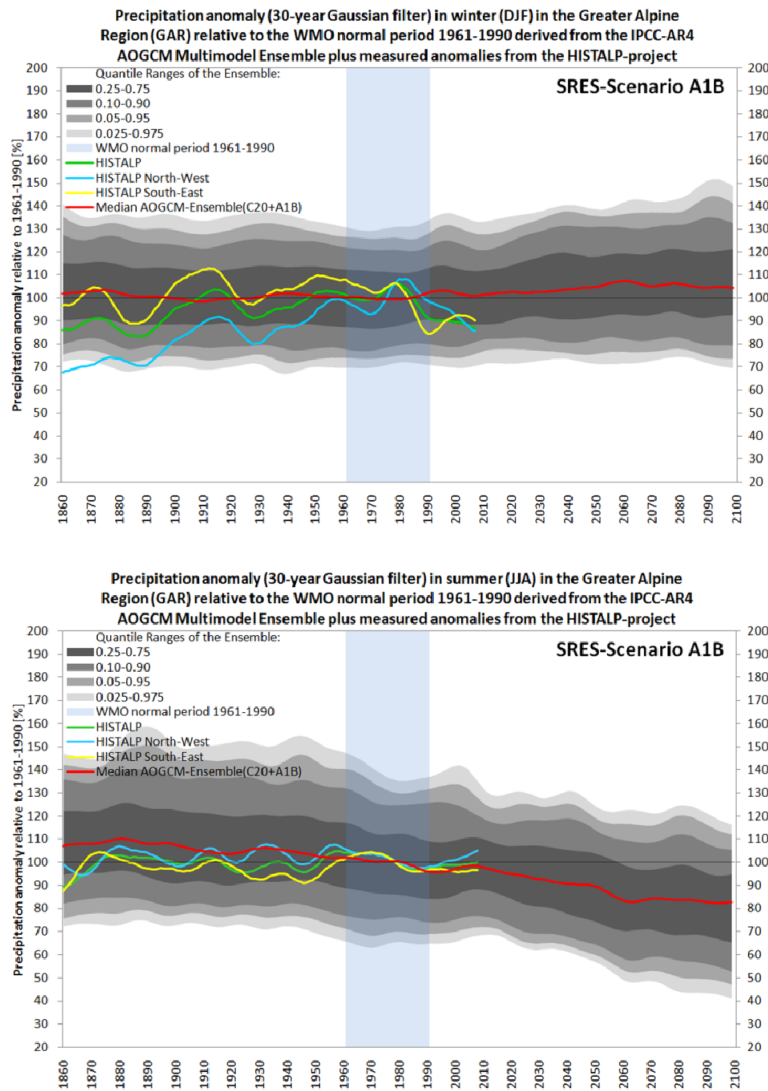


Abbildung 2-31: Änderung der Niederschlagssumme im Winter (DJF, oben) und im Sommer (JJA, unten) für gefilterte Zeitreihen (Gauß-Filter 30 Jahre) von 1860 bis 2100 bezogen auf die WMO Normalperiode 1961-1990 im erweiterten Alpenraum aus 15+ gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb für den Zeitraum 1860-2000), für das SRES Szenario A1B (anthropogener Antrieb von 2001-2100).

Die Analyse der Globalmodelle lässt bereits erste grobe Aussagen betreffend die zukünftige Klimaentwicklung für die Alpenregion zu. Die GCMs zeigen eine deutliche Zunahme der Lufttemperatur bis 2100 die für den Sommer mit ca. 4°C stärker ausfällt als für den Winter, für den ein wahrscheinlichster Anstieg von ca. 3.5°C zu entnehmen ist. Kein Klimamodell zeigt eine Abkühlung. Für den Niederschlag zeigt sich eine deutliche Abnahme bis 2100 für den Sommer auf 80% des Wertes von heute und eine leichte Zunahme auf ca. 105% im Winter.

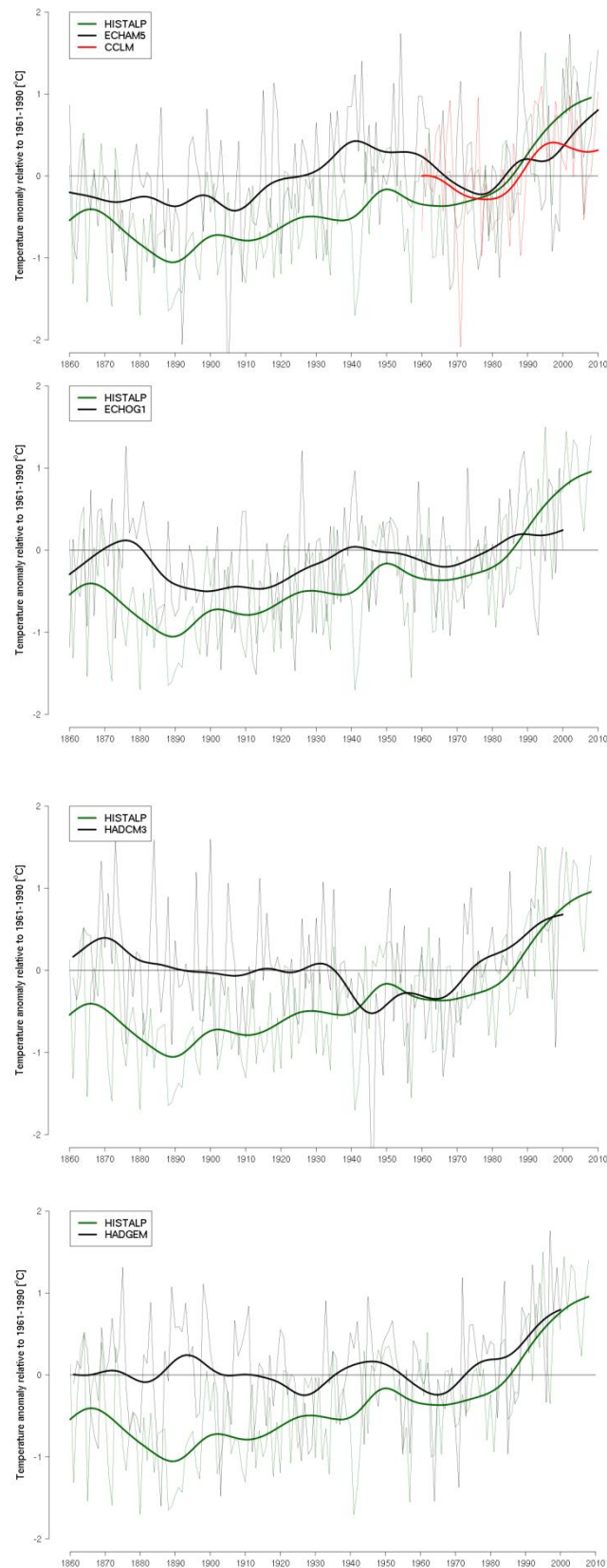


Abbildung 2-32: Änderung der Jahresmitteltemperatur von 1860 bis 2000 bezogen auf die WMO Normalperiode 1961-1990 in der GAR, aus 4 gekoppelten Globalen Ozean-Atmosphären Modellen (natürlicher + anthropogener Antrieb), ECHAM5, ECHOG, HADCM3 und HADGEM, ungefilterte und 30-jährig gefilterte Werte.

Die Simulationsergebnisse der Globalmodelle müssen jedoch mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden. Wie bereits beschrieben können die natürlichen Klimaantriebe (z.B. Vulkanausbrüche, Schwankungen der Sonnenaktivität) für die Zukunft nicht berücksichtigt werden, da sie nicht bekannt sind. GCM Läufe beschreiben ausschließlich das durch den Menschen verursachte Treibhausklima und nicht zukünftige natürliche Klimaschwankungen.

2.4.3 Validierung von Klimamodellierungen mit den Regionalmodellen REMO und CLM für den Alpenraum und Österreich

Um die Unsicherheit der Aussagen über zukünftige Klimaänderungen für eine Region bewerten zu können, ist eine eingehende Validierung der Klimasimulationen notwendig. In diesem Kapitel werden daher die Ergebnisse einer umfangreichen Validierung der oben beschriebenen Simulationen mit den Regionalmodellen REMO und insbesondere CLM für den Alpenraum und Österreich gezeigt. In diese Validierung wurden diejenigen Klimaelemente einbezogen die für eine Abschätzung hydrologisch-wasserwirtschaftlicher Folgen eine wesentliche Bedeutung haben. Zu diesen Klimaelementen zählen:

- die Lufttemperatur in verschiedenen Jahreszeiten (insbesondere Winter und Sommer)
- der Niederschlag (Summe in verschiedenen Jahreszeiten, Extremwerte)
- Schneedecke
- Verdunstung

Die Validierung erfolgt dabei an Messdaten der ZAMG Datensätze HISTALP (Auer et al., 2007), StartClim (Schöner et al., 2003) und Öklim (Auer et al., 2010). Neben den im Rahmen der Studie erarbeiteten Validierungsergebnissen gibt es auch mehrere Arbeiten zur Validierung von RCMs aus der Literatur die den Alpenraum behandeln und die ergänzend angeführt werden.

Die Validierung der Modellsimulationen umfasst mehrere Schritte wobei eine zeitliche und räumliche Differenzierung vorgenommen wird:

- Validierung für 30jährige Klimamittel (Modellbias) der Klimanormalperiode 1961-90
- Validierung der Jahresgänge
- Validierung zeitlicher Trends
- Validierung von Häufigkeitsverteilungen

Abbildung 2-33 vergleicht die simulierte Jahrestemperatur, Jahresniederschlagssumme und Schneedeckendauer der REMO und CLM Simulationen (C20 Kontrolllauf) mit den Öklim Datensätzen für die Klimanormalperiode 1961-90. Für alle Klimaelemente sind deutliche Abweichungen (Bias) der Modelldaten von den Messdaten zu finden. Für die Lufttemperatur sind die Abweichungen für REMO größer als für CLM wobei insbesondere die Tieflandbereiche durch REMO deutlich zu warm wiedergegeben werden (Unterschiede in der Seehöhe zwischen den RCMs und Öklim für die Einzelpixel wurden in dem Vergleich mit mittleren vertikalen Temperaturgradienten korrigiert). CLM gibt die alpinen Bereiche deutlich zu kalt wieder. Für den Bias des Niederschlags ist das Bild für REMO und CLM ähnlich. Die Schneedeckendauer wird durch CLM deutlicher unterschätzt als durch REMO.

In Abbildung 2-34 ist der Niederschlagsbias differenziert nach Winterhalbjahr und Sommerhalbjahr dargestellt. Als generelles Bild zeigt sich, dass die Niederschläge durch beide Modelle im Winter eher überschätzt werden, während sie im Sommer eher unterschätzt werden.

Ein interessantes Ergebnis ist aus Abbildung 2-35 zu erkennen, die den Jahresgang der Lufttemperatur und des Niederschlags von CLM und REMO mit den HISTALP Messdaten wieder für die Klimanormalperiode 1961-90 vergleicht. Während der Jahresgang der Lufttemperatur von beiden Modellen sehr gut nachgezeichnet wird, zeigt das Modell REMO

für den Jahresgang des Niederschlags eine deutlich bessere Performance im Vergleich zu CLM.

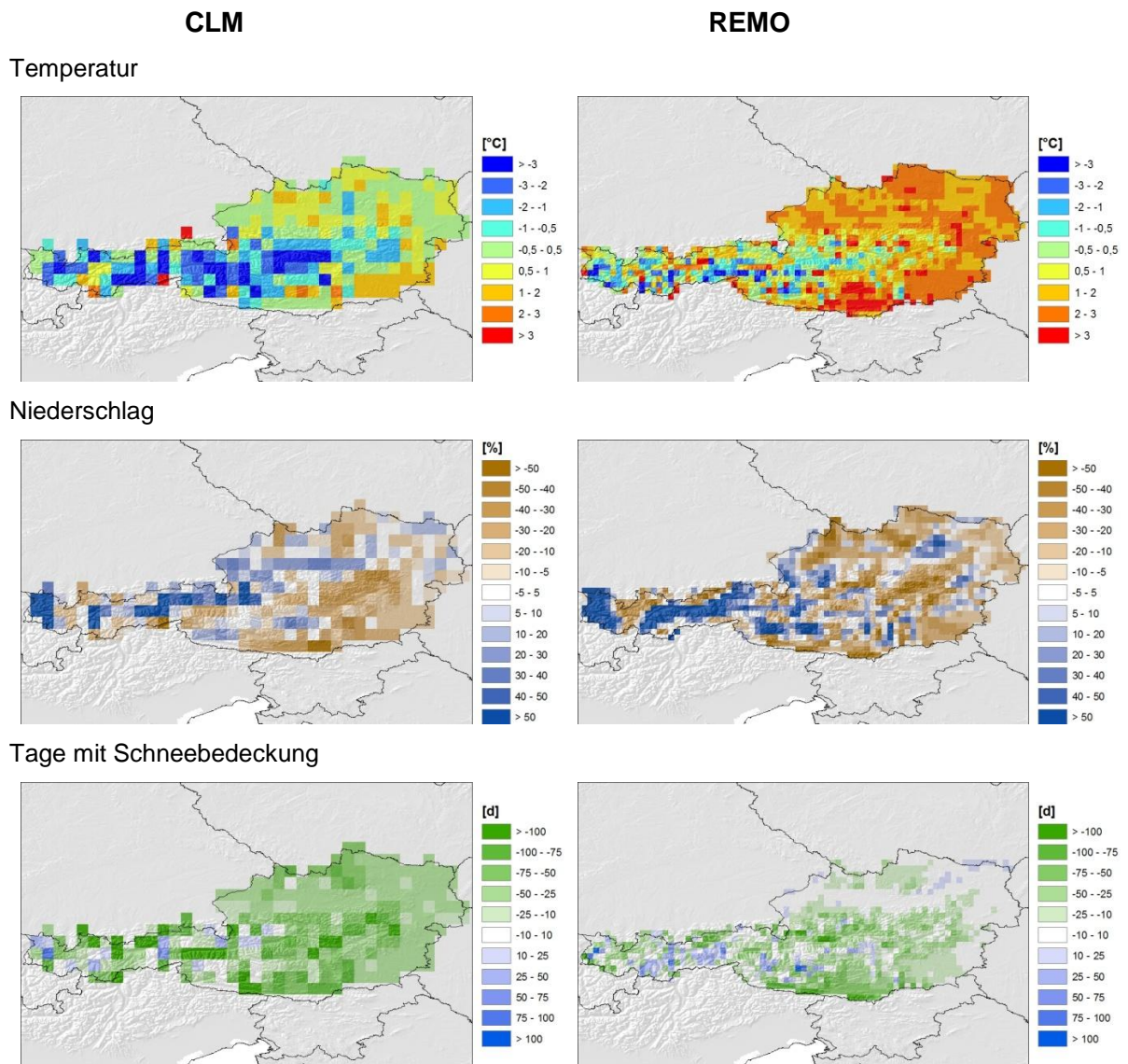


Abbildung 2-33: Abweichungen der Modellsimulationen mit REMO und CLM zu den Messdaten von Öklim für die Lufttemperatur, den Niederschlag und die Schneedeckendauer in der Klimanormalperiode 1961-90.

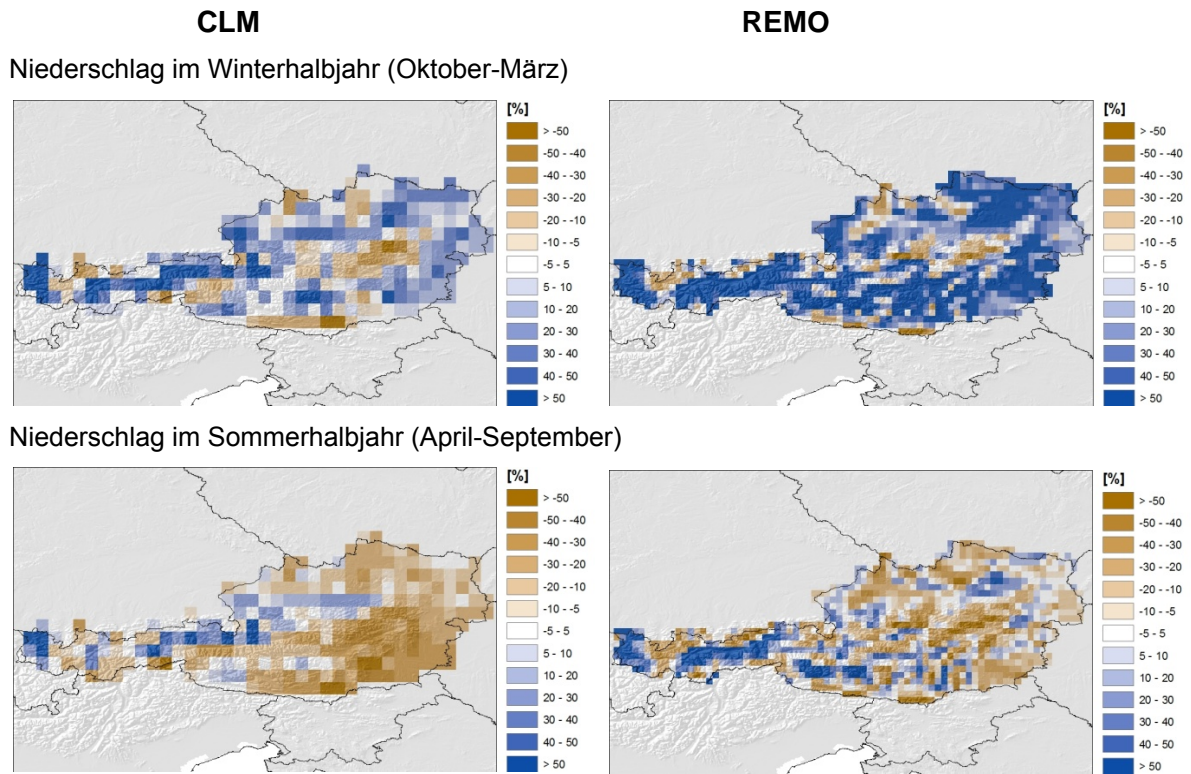


Abbildung 2-34: Abweichungen der Modellsimulationen mit REMO und CLM zu den Messdaten von Öklim für den Niederschlag im Winterhalbjahr (oben) und das Sommerhalbjahr (unten) in der Klimanormalperiode 1961-90.

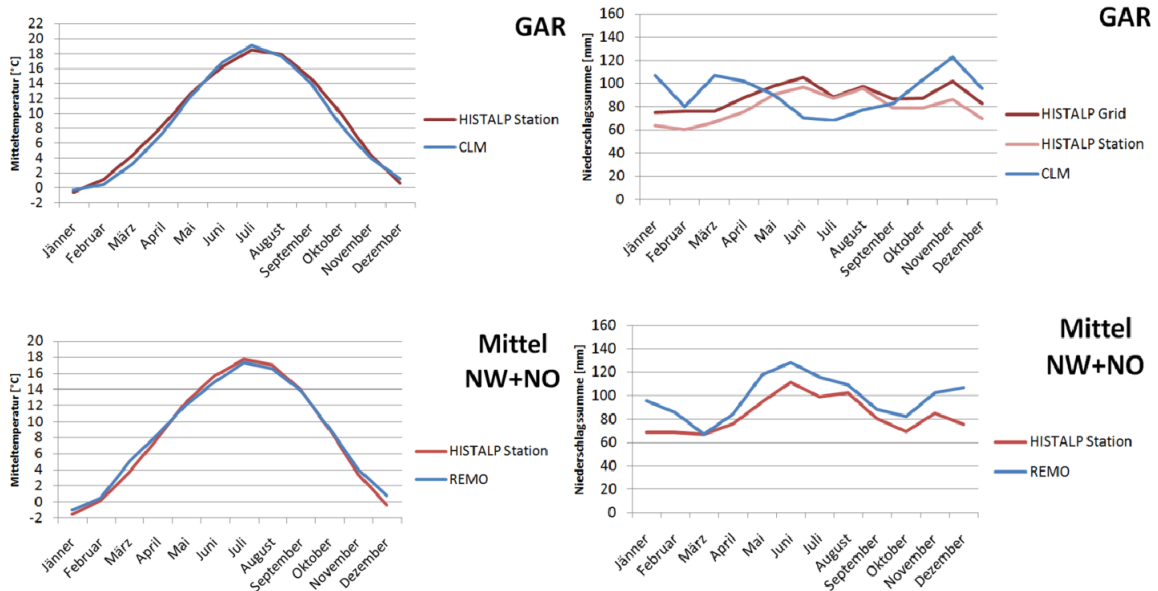


Abbildung 2-35: Jahrgang der Lufttemperatur (links) und des Niederschlags (rechts) aus den Modellsimulationen REMO und CLM sowie aus den HISTALP Datensatz für die Greater Alpine Region bzw. die Subregion NW+ NO (bessere räumliche Überdeckung für REMO) für die Klimanormalperiode 1961-90.

Detaillierte Ergebnisse zur Validierung der Häufigkeitsverteilungen der Modellsimulationen im Vergleich zu Messdaten werden im Anhang gezeigt (Abbildungen 60 bis 69). Aus den Vergleichen ist abzuleiten, dass die Modelle insbesondere für den Niederschlag deutliche Abweichungen für einzelne Häufigkeitsklassen aufweisen. Tagesniederschläge kleiner 5mm werden für alle Jahreszeiten durch die Klimamodelle deutlich überschätzt. Vergleicht man diese Unterschiede mit den Häufigkeitsverteilungen der Änderungssignale für 2021-2050, so zeigt sich, dass die Modellabweichungen in den einzelnen Häufigkeitsklassen viel größer sind als das jeweilige Klimasignal.

Als weiteres Beispiel der Validierung zeigen die Abbildung 2-36 und Abbildung 2-37 zeitliche Trends der Lufttemperatur und des Niederschlags für den Winter (DJF) und den Sommer (JJA) berechnet aus Tageswertzeitreihen. Dazu wurden die Zeitreihen der StartClim Stationen der Periode 1976-2007 verwendet und mit den Zeitreihen der CLM Simulationen verglichen. Während für die Lufttemperatur die Trends vom Vorzeichen recht gut simuliert werden (aber zu schwach im Vergleich zu den Messdaten), zeigen sich für den Niederschlag deutliche Fehler im Vorzeichen für den Winter. Für den Sommer ist dagegen eine recht gut Übereinstimmung in den Niederschlagstrends zu finden.

Da die Schneedeckendauer durch die Regionalmodelle deutlich unterschätzt wird, erscheint es sinnvoller, Informationen über zukünftige Änderungen der Schneedecke möglichst aus Veränderungen der Lufttemperatur abzuleiten weil dadurch eine bessere Sicherheit der Aussagen zu erwarten ist.

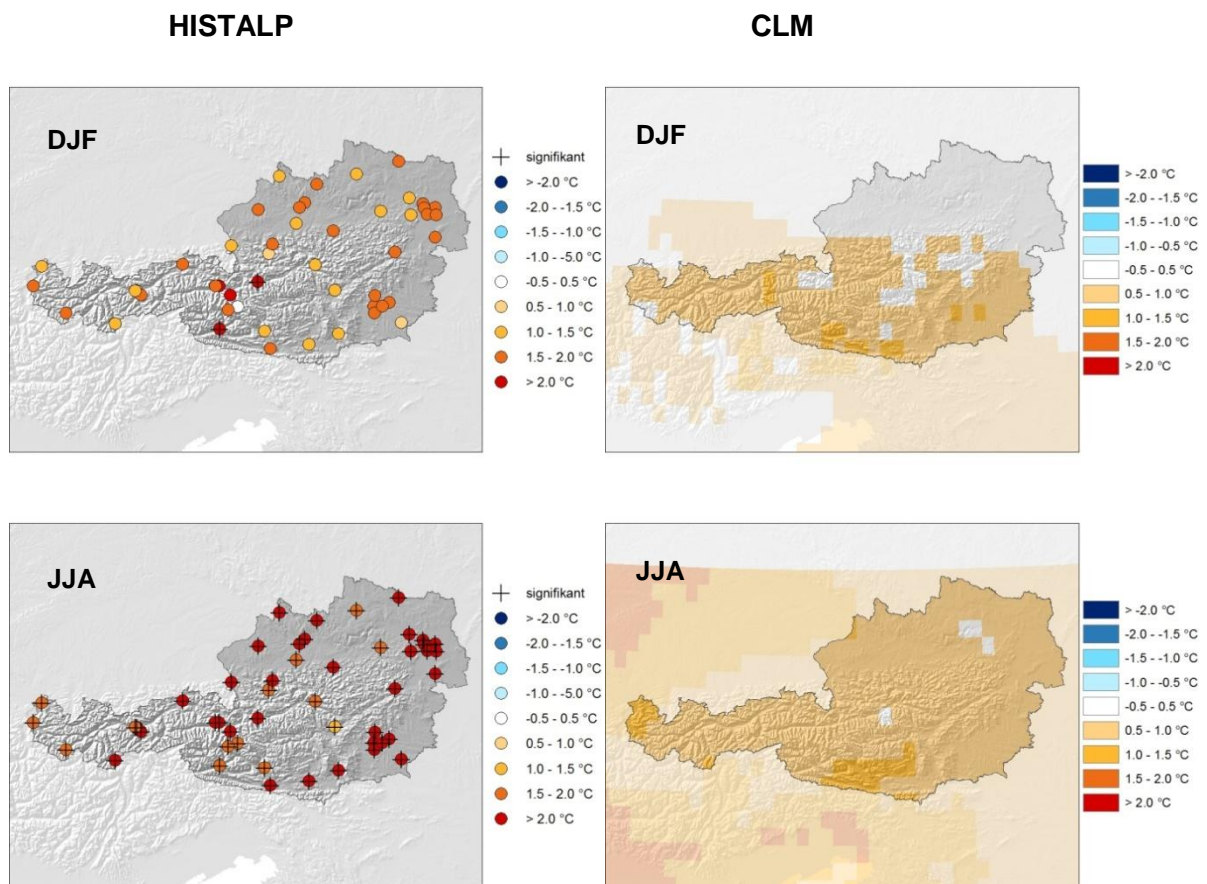


Abbildung 2-36: Trend der Lufttemperatur im Winter (DJF, oben) und Sommer (JJA, unten) für die Periode 1976-2007, aus homogenisierten HISTALP-Stationsdaten und CLM Simulationen. Signifikante Trends in den HISTALP-Stationsdaten sind mit einem + gekennzeichnet.

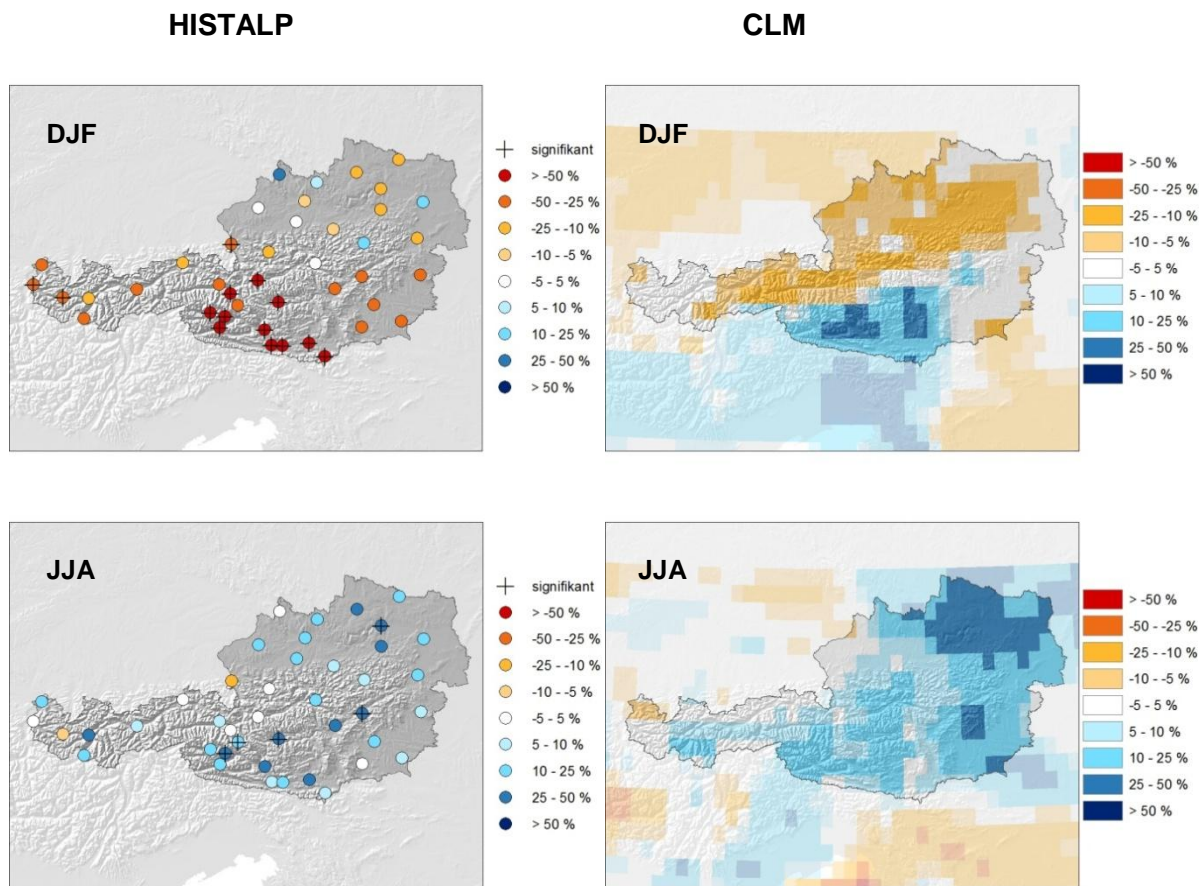


Abbildung 2-37: Trend der Niederschlagssumme im Winter (DJF, oben) und Sommer (JJA, unten) für die Periode 1976-2007, aus homogenisierten HISTALP-Stationsdaten und CLM Simulationen. Signifikante Trends in den HISTALP-Stationsdaten sind mit einem + gekennzeichnet.

Umfangreichere Validierungen unter Einbeziehung mehrerer Regionalmodelle für den Alpenraum und besonderer Berücksichtigung des Niederschlages wurden von Frei et al. (2006) und Smiatek et al. (2009) durchgeführt. In Smiatek et al. (2009) wird auch der in dieser Studie verwendete CLM-Lauf in den Vergleich einbezogen, wodurch sich eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse ergibt.

Die Studie von Frei et al (2006, Abbildung 2-38) zeigt, dass die verwendeten Modelle die Niederschlagshäufigkeiten überschätzen, während die Niederschlagsintensitäten eher unterschätzt werden. Die Niederschlagsintensitäten von Ereignissen mit 5-jährlicher Wiederkehrdauer werden für die Region südlich der Alpen deutlich unterschätzt. Frei et al. (2006) schließen aus den Abweichungen der Modelldaten zu Beobachtungsdaten, dass die Performance der RCMs für Extremwerte nicht schlechter ist als für Niederschlagsintensitäten oder Niederschlagssummen. Es wird jedoch auf den weiteren Forschungsbedarf für Informationen über Änderungen der Extremwerte unter zukünftigen Klimaszenarien hingewiesen.

Smiatek et al. (2009) haben ähnlich wie Frei et al. (2006) eine Validierung der Modellergebnisse verschiedener Regionalmodelle für den Alpenraum bezogen auf die Klimanormalperiode 1961-90 durchgeführt, wobei ebenfalls dem Niederschlag besondere Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Als Beobachtungsdaten wurden HISTALP, CRU (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/>) und ECA (<http://eca.knmi.nl/>) verwendet.

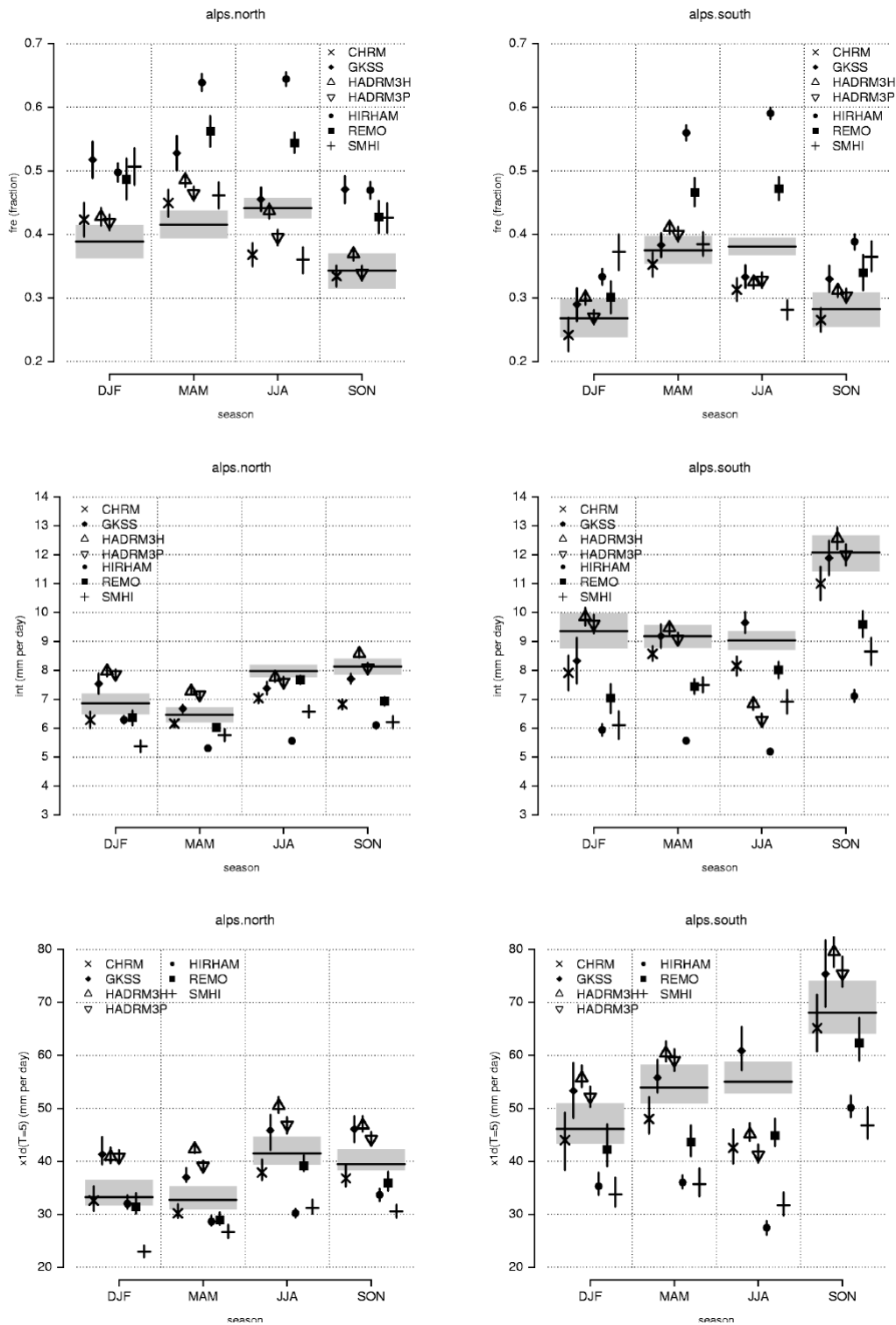
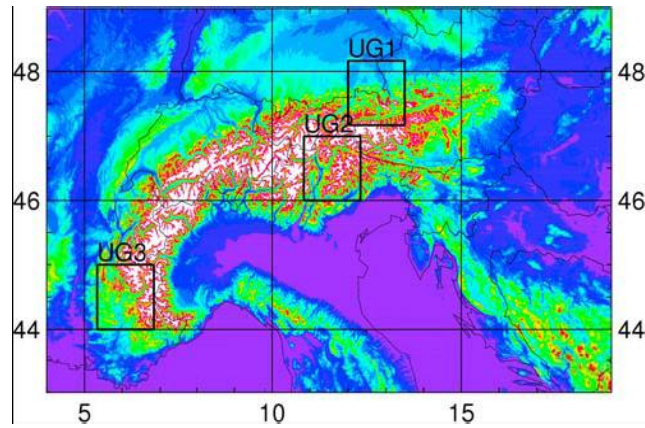


Abbildung 2-38: Statistik des Niederschlags im Alpenraum (links: nördlich des Alpenhauptkammes, rechts: südlich des Alpenhauptkammes) in der Periode 1961-90 aus verschiedenen Regionalmodellen im Vergleich zu Beobachtungen (ETHZ). a) und b) Niederschlagstage > 1mm; c) und d) Niederschlagsintensität für Niederschlagstage > 1mm; e) und f) Intensität von Tagesniederschläge für 5-jährliche Ereignisse; für alle Daten ist ein 90% Bootstrap-Konfidenzintervall gezeigt (aus Frei et al., 2006).



Acronym	Definition	Unit
MEA-P	Mean climatological precipitation	mm/d
MEA-T	Mean climatological temperature	K
FRE-1	Frequency (ratio) of days with precipitation >1 mm	fraction
FRE-15	Frequency (ratio) of days with precipitation >15 mm	fraction
Q90	90% quantile of distribution function on wet days	mm/d
XCCD	Maximum number of consecutive dry days	d

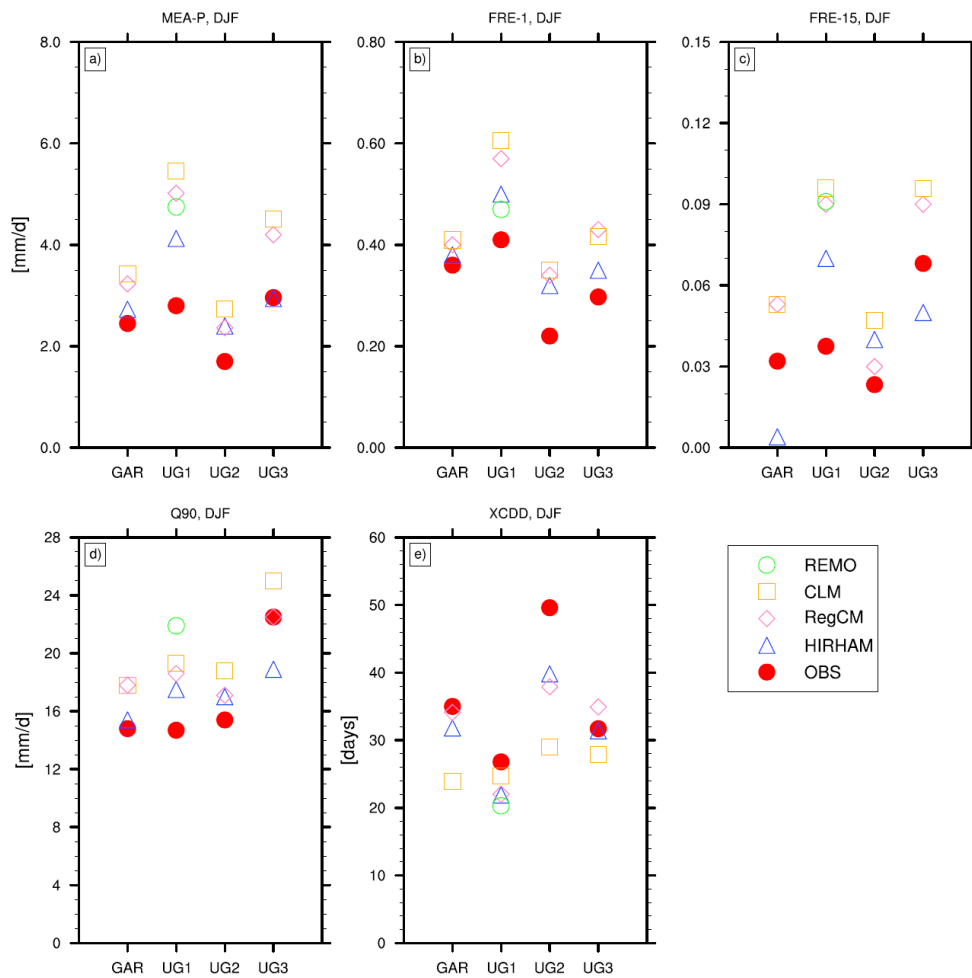


Abbildung 2-39: Statistische Beschreibung der Simulationen des Niederschlags im Alpenraum mit den Modellen REMO, CLM, RecCM, HIRHAM im Vergleich zu Beobachtungsdaten (HISTALP, ECA, CRU) für den Winter (DJF, oben) und den Sommer (JJA, unten) für 1961-90 (aus Smiatek et al., 2009).

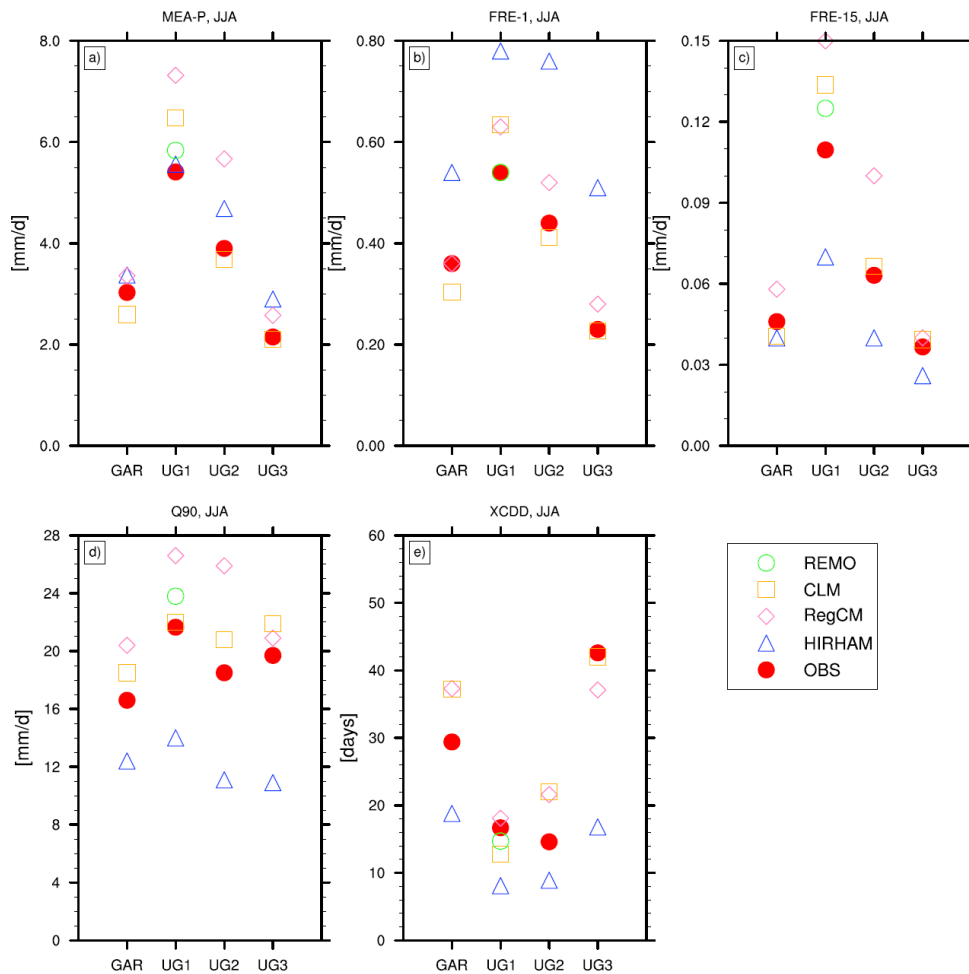


Abbildung 2-40: Statistische Beschreibung der Simulation des Niederschlags im Alpenraum mit den Modellen REMO, CLM, RegCM, HIRHAM im Vergleich zu Beobachtungsdaten (HISTALP, ECA, CRU) für den Winter (DJF, oben) und den Sommer (JJA, unten) für 1961-90 (aus Smiatek et al., 2009).

Auch die Ergebnisse von Smiatek et al. (2009) zeigen die generelle Eigenschaft der Regionalmodelle den Niederschlag zu überschätzen, wobei sowohl Intensitäten als auch Häufigkeiten überschätzt werden (Abbildung 2-39 und Abbildung 2-40). Die Überschätzung ist deutlicher im Winter als im Sommer, obwohl die Regionalmodelle kleinräumige Niederschlagsereignisse (konvektiver Niederschläge, Gewitter), die insbesondere im Sommer eine Rolle spielen, nicht abbilden können, da diese Prozesse nicht im Modell enthalten sind. Ein Vergleich der Modellperformance mit der zugrunde liegenden räumlichen Auflösung zeigt, dass die Modelle mit besserer räumlicher Auflösung (REMO, HIRHAM) bessere Ergebnisse liefern. Zukünftige Modellsimulationen mit verfeinerter räumlicher Auflösung sollten daher zu einer weiteren Verbesserung der Simulationsergebnisse führen.

Die Abbildungen 75 bis 79 im Anhang zeigen noch eine weitere Eigenschaft der Klimamodelle die in den Beobachtungen nicht zu sehen ist, nämlich eine Seehöhenabhängigkeit des Änderungssignals für die Lufttemperatur. Wie schon in Kapitel 2.3.3 gezeigt wurde, weisen die Beobachtungen jedoch keine signifikanten räumlichen und vertikalen Unterschiede des Lufttemperaturtrends auf.

Aus der Validierung können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Die aus dem regionalen Klimamodell CLM für Österreich abgeleiteten zeitlichen Trends der Lufttemperatur stimmen recht gut mit den Ergebnissen aus Messdaten überein. Aus diesen Ergebnissen sind für die Veränderung der mittleren Lufttemperatur robuste Ergebnisse (harte Aussagen) zu erwarten.
- Für den Niederschlag werden zeitliche Änderungen der saisonalen Summen teilweise deutlich schlechter simuliert (besonders Winter). Aussagen über zukünftige Änderungen des Niederschlages weisen daher eine wesentlich größere Unsicherheit auf und sind daher als weich bis mittelhart einzustufen.
- Für Extremwerte des Niederschlags sind große Abweichungen in den Häufigkeitsverteilungen der Modellsimulationen im Vergleich zu den Messdaten zu finden. Die Aussagen verschiedener Klimamodelle betreffend Extremwerte sind homogener für den Winter als für den Sommer. Weiters ist zu beachten, dass für den Sommer wichtige Prozesse der Niederschlagsbildung durch die Klimamodelle nicht erfasst werden. Aussagen über Änderungen der Extremwerte bleiben daher spekulativ.

2.4.4 *Klimaszenarien für den Alpenraum und Österreich bis 2050 aus Simulationen Regionaler Klimamodelle*

Die Zukunftsszenarien der regionalen Klimamodellläufe REMO (Jakob, 2001) und CLM (Hollweg et al., 2008) werden im nun folgenden Kapitel mit besonderem Fokus auf Österreich und die Hydrologie/Wasserwirtschaft näher beschrieben. Da es sich bei diesen Modellsimulationen um singuläre Zeitreihen handelt, können keine Unsicherheiten, wie sie für Ensemblesläufe vorliegen angegeben werden. Es muss jedoch betont werden, dass es sich bei der Unsicherheit die aus Ensemblesläufen abgeleitet werden kann, nur um eine Teilunsicherheit handelt (jene die aus der Modellphysik selbst und aus der Unsicherheit der Emissionsszenarien folgt), andere Bereiche der Unsicherheit (z.B. natürliche Klimaschwankungen und interne Variabilität des Klimas) jedoch nicht erfasst werden.

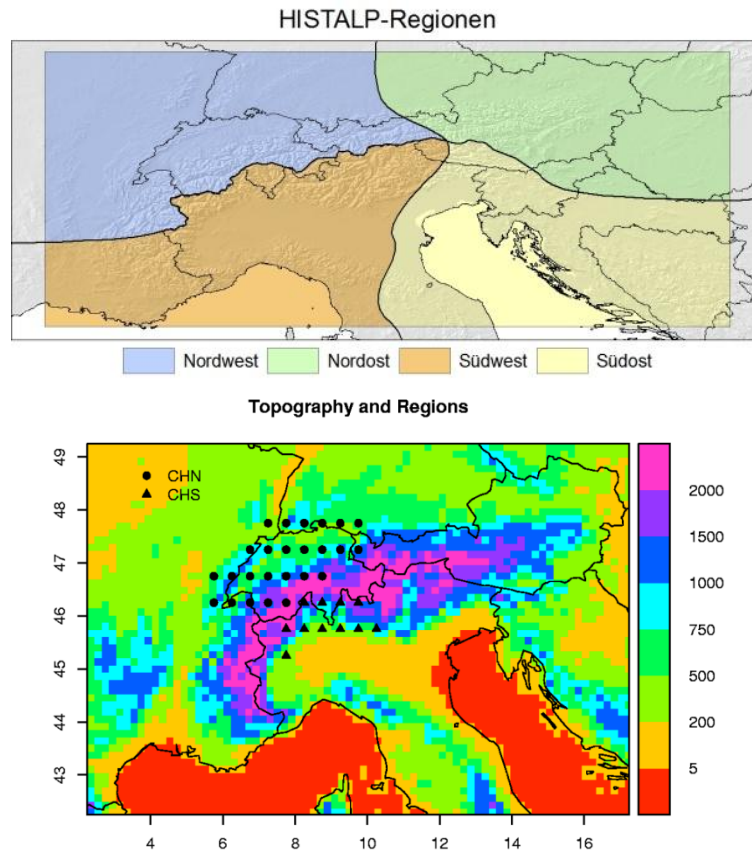


Abbildung 2-41: oben: Darstellung der HISTALP Regionen unten: Darstellung der im Rahmen der Studie Schweiz2050 verwendeten Gitterpunkte zur Unterscheidung der Regionen Nord (CHN, Gitterpunkte mit Kreissignatur) und Süd (CHS, Gitterpunkte mit Dreiecksignatur).

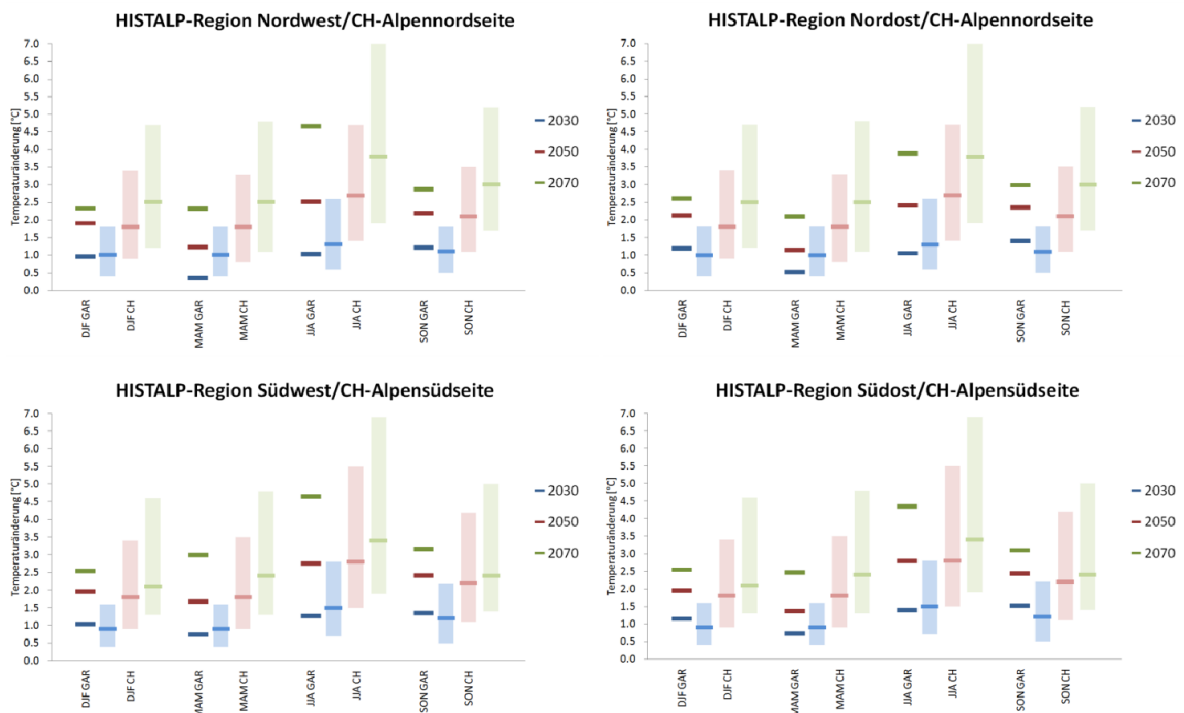


Abbildung 2-42: Änderungen der saisonalen Mitteltemperaturen in den 4 GAR-Regionen aus CLM (Szenario A1B), dargestellt als horizontale Balken, und aus Ensemble Analysen der Studie „Klimaänderungen und die Schweiz 2050“ (Szenarien A2 und B2), dargestellt werden die Quantilsbereiche im 95% Konfidenzintervall sowie der Median als horizontaler Balken, gemittelt jeweils 30-jährig um die Zeitpunkte 2030, 2050 und 2070 (Datenquelle: Prudence Daten: Frei et al., 2007 und CLM: Hollweg et al., 2008).

Um die Unsicherheit die sich aus Ensemblesläufen ergibt in dieser Studie berücksichtigen zu können, wurden die Ergebnisse des CLM Laufs in den Kontext der PRUDENCE Ensemblesläufe gestellt. Abbildung 2-42 und Abbildung 2-43 zeigen das für die CLM Lufttemperatur und den CLM Niederschlag, wobei zwischen den Regionen südlich und nördlich der Alpen unterschieden wurde und für jede Region und alle vier Jahreszeiten die Spannweite der Modellrealisationen der PRUDENCE-Ensemblesmitglieder dargestellt wird. Die PRUDENCE Daten für den Alpenraum wurden aus Frei et al. (2007) übernommen. Da sich die HISTALP-GAR Regionen nicht mit den Frei et al. (2007) Regionen decken werden in den Abbildung 2-42 und Abbildung 2-43 jeweils beide HISTALP Regionen mit der entsprechenden Region der Schweiz verglichen. Der Vergleich zeigt, dass CLM im Allgemeinen einen mittleren Zustand der Modellrealisationen beschreibt, also eine hohe Plausibilität im Hinblick auf die Modellierung besitzt.

Aus den Abbildungen ist zu entnehmen, dass die stärkste Änderung des Klimas für die Zukunft sowohl für die Temperatur als auch für den Niederschlag für den Sommer simuliert wird. Für die Lufttemperatur zeigt sich bis 2030 kaum eine signifikante Änderungen, bis 2050 ist bereits deutliche Änderungen zu finden, die stärksten Änderungen sind aber erst nach 2050 zu erwarten. Für den Niederschlag ist die zeitliche Entwicklung des Trends im Sommer ähnlich wie für die Temperatur (kaum Änderung bis 2030, stärkste Änderung erst nach 2050), im Winter zeigt das CLM Modell aber schon bis 2030 eine deutliche Niederschlagszunahme, die sich danach dann abschwächt.

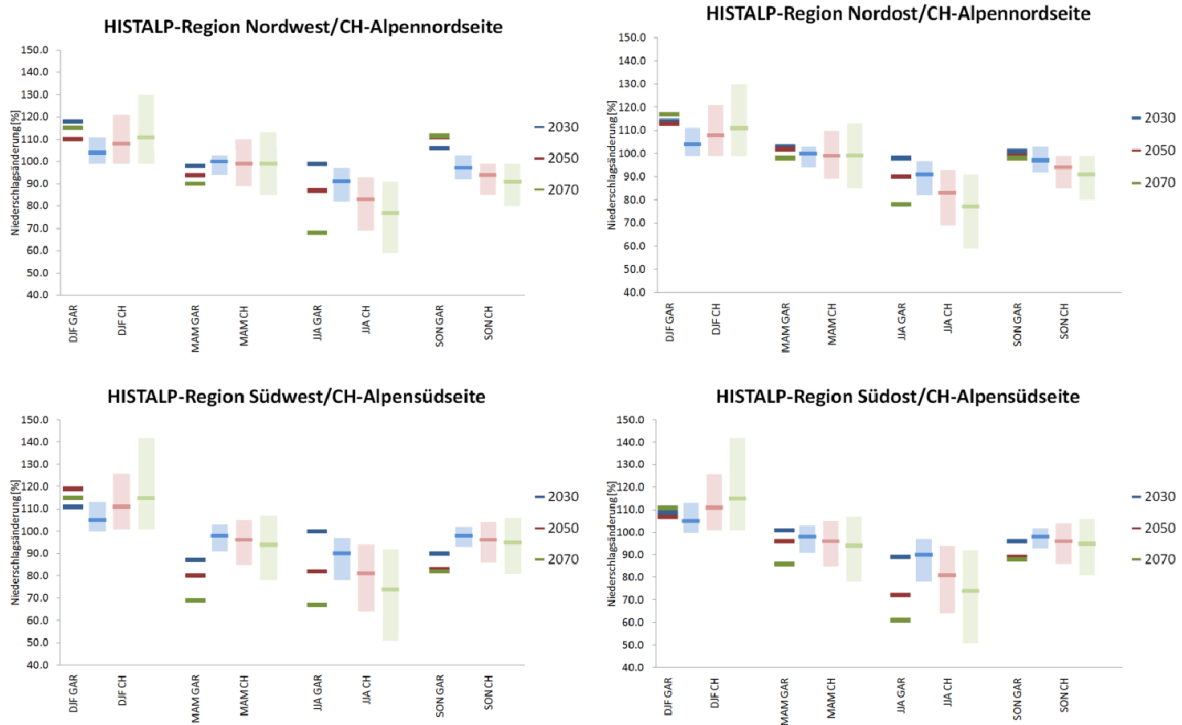


Abbildung 2-43: Änderungen der saisonalen Niederschlagssummen in den 4 GAR-Regionen aus CLM (Szenario A1B), dargestellt als horizontale Balken, und aus Ensemble Analysen der Studie „Klimaänderungen und die Schweiz 2050“ (Szenarien A2 und B2), dargestellt werden die Quantilsbereiche im 95% Konfidenzintervall sowie der Median als horizontaler Balken, gemittelt jeweils 30-jährig um die Zeitpunkte 2030, 2050 und 2070 (Datenquelle: Prudence Daten: Frei et al., 2007 und CLM: Hollweg et al., 2008).

Die räumlichen Muster des Änderungssignals für Niederschlagssumme, Niederschlagstage > 20 mm, Niederschlagsintensität, Verdunstung, Lufttemperatur und Tage mit Schneebedeckung werden in der Abbildung 2-44 für die Periode 2021-2050 gegenüber 1976-2007 gezeigt. Für den Winter (DJF) zeigt das CLM Modell eine Zunahme des Niederschlags nördlich der Alpen und eine Abnahme südlich davon. Diese Muster zeigen sich im groben auch in der Niederschlagsintensität (jedoch keine Abnahme südlich) und in der Häufigkeit der Niederschlagstage. Die Zunahme des Niederschlags kann also durch eine Zunahme der Intensität und der Häufigkeit erklärt werden. Für den Sommer zeigt sich eine ähnliche Übereinstimmung zwischen Niederschlagssumme, Intensität und Häufigkeit, jedoch sind die räumlichen Muster der Zunahme nördlich und südlich der Alpen und die deutliche Abnahme über den Alpen selbst klimatologisch nicht nachvollziehbar („Austrocknen über den Alpen“). Dehnt man jedoch den Betrachtungszeitraum in die Zukunft weiter aus (Abbildung 53 im Anhang für 2041-2070) ändert sich der Niederschlagstrend für den Sommer in eine generelle Abnahme über Österreich. Die räumlichen Muster der Niederschlagsänderung bis 2050 müssen daher mit einer großen Modellunsicherheit interpretiert werden.

Abbildung 2-44 zeigt auch die von CLM simulierte Änderung der aktuellen Verdunstung. Für den Sommer ist das Muster der Verdunstungsänderung stark von der Niederschlagsänderung und natürlich der Temperaturzunahme gesteuert, für den Winter ist das Bild etwas komplexer und nicht aus der Niederschlagsänderung zu verstehen (z.B. Abnahme der Verdunstung über den Alpen trotz Zunahme der Lufttemperatur und Zunahme des Niederschlags). Allgemein ist festzustellen, dass eine Zunahme der Verdunstung auf Grund erhöhter Lufttemperaturen aus der Energiebilanz an der Erdoberfläche gut zu verstehen ist und auch durch Messungen bestätigt wird (siehe Kapitel 4).

DJF

JJA

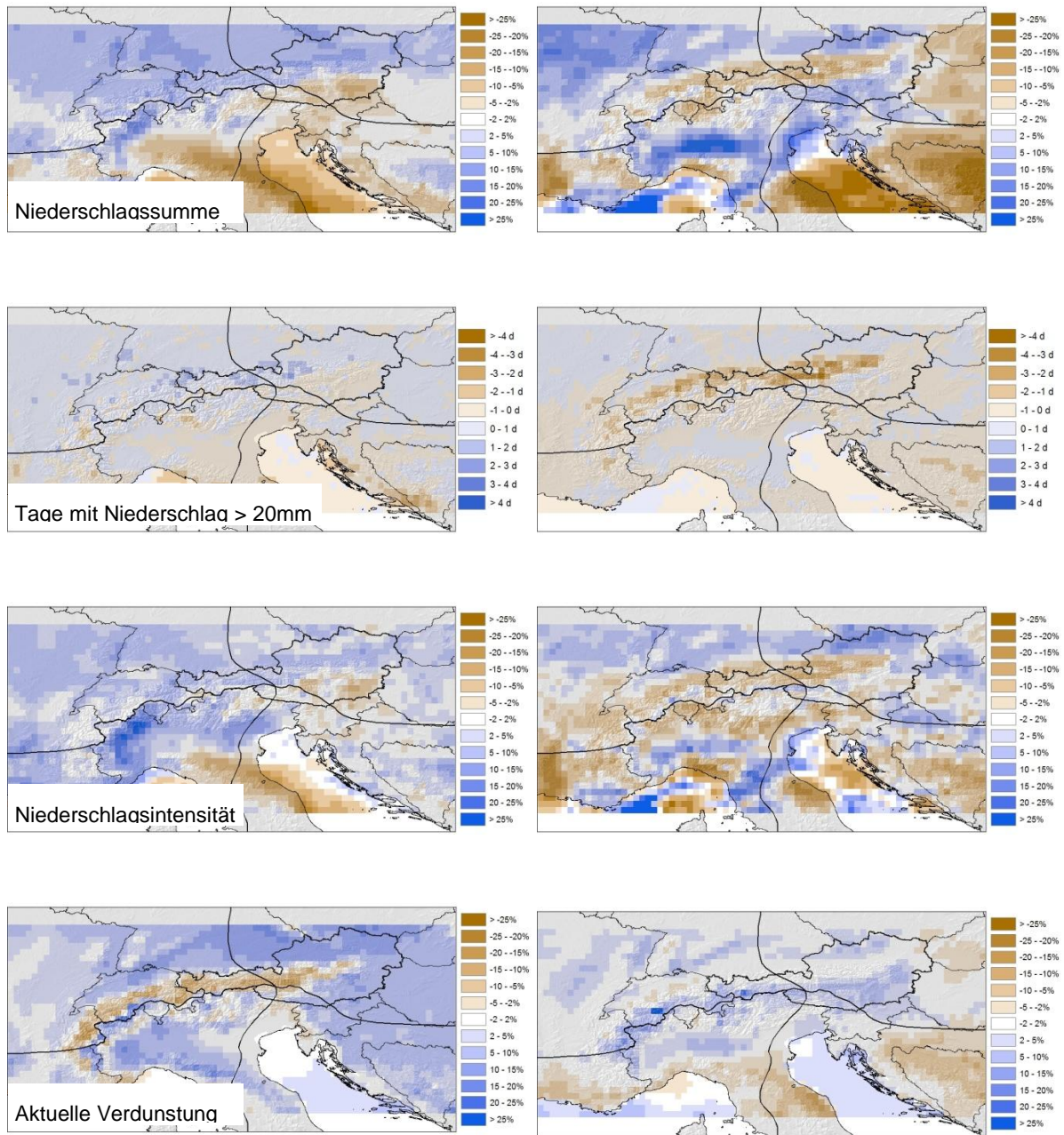


Abbildung 2-44: Änderungen des Winterniederschlags (links oben, DJF) und des Sommerniederschlags (rechts oben, JJA), der Zahl der Tage mit Niederschlag größer 20mm (links DJF und rechts JJA), der mittleren Niederschlagsintensität (links DJF und rechts JJA berechnet aus Niederschlagssumme durch Anzahl der Tage mit Niederschlag > 1mm) sowie der Verdunstung im Winter (links unten) und im Sommer (rechts unten) für die Greater Alpine Region (GAR) aus CLM (Szenario A1B) 2021-2050 gegenüber 1976-2007 (Datenquelle CLM: Hollweg et al., 2008).

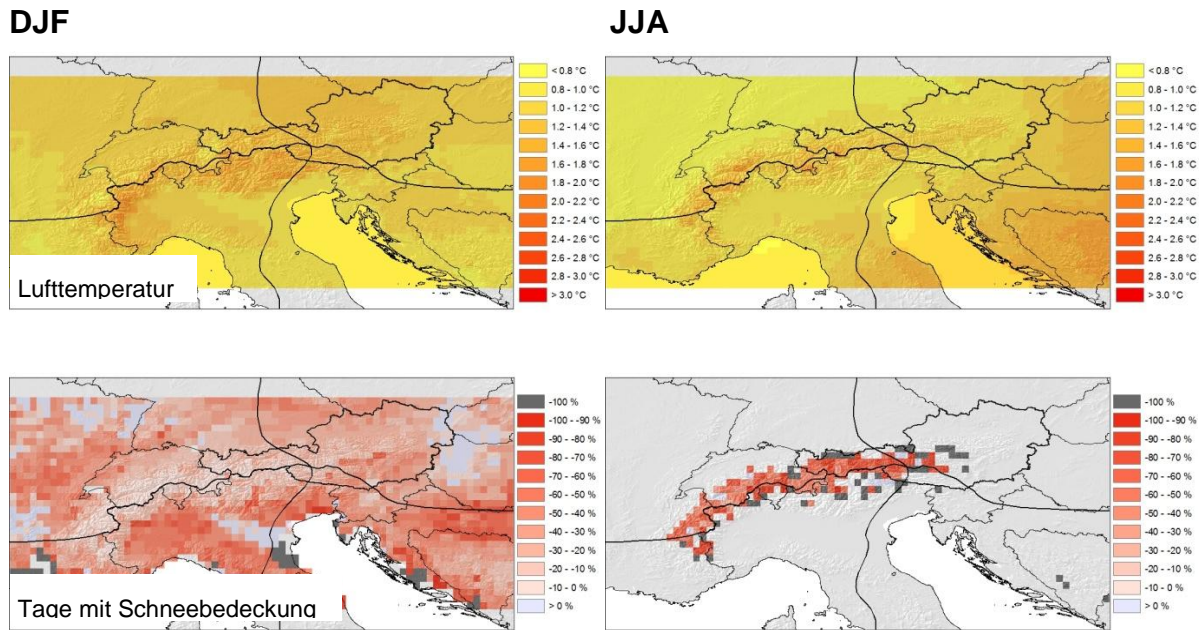


Abbildung 2-45: Änderungen der Wintertemperaturen (links oben, DJF) und Sommertemperaturen (rechts oben, JJA) sowie der Tage mit Schneebedeckung im Winter (links unten, DJF) und Sommer (rechts unten, JJA) für die Greater Alpine Region (GAR) aus CLM (Szenario A1B) 2021-2050 gegenüber 1976-2007. (Datenquelle CLM: Hollweg et al., 2008).

In Abbildung 2-45 ist noch die Änderung der Lufttemperatur und die Änderung der Tage mit Schneedecke zu ersehen. Auch aus dieser Abbildung ist die stärkere Temperaturzunahme über den Alpen im Vergleich zu den Umlandregionen zu sehen, ein räumliches Muster, das, wie oben beschrieben, ebenfalls nicht glaubwürdig erscheint. Deutlich spiegelt sich die Temperaturzunahme auch in der Abnahme der Schneedeckendauer wider. Mit der Zunahme der Lufttemperatur sinkt nicht nur die Schneedeckendauer, sondern es nimmt auch der Anteil des Schneesiederschlags am Gesamtniederschlag ab (siehe dazu Schöner et al., 2007).

Ähnlich Ergebnisse wie die in dieser Studie durchgeführten Auswertungen des Klimaänderungssignals für Österreich zeigen auch die Arbeiten von Frei et al. (2006) und Smiatek et al. (2009) für den Alpenraum. Beide Arbeiten untersuchen das Klimaänderungssignal für die Periode 2071-2100 bezogen auf 1961-90, wodurch die Änderungssignale wesentlich deutlicher werden (als für den in dieser Studie gewählten Zeitraum 2021-2050) und auch die Signal-to-Noise Ratio günstiger wird. Sehr schön kommt in der Arbeit von Frei et al. (2006) die Zunahme des Winterniederschlags als Folge der Zunahme der Intensität als auch der Häufigkeit des Niederschlags zum Ausdruck. Für den Sommer ist die deutliche Abnahme der Niederschlagssumme eine Folge einer ebenso deutlichen Abnahme der Häufigkeit der Niederschlagsereignisse, während die Intensität eher unverändert bleibt. Wie bereits im Validierungskapitel beschrieben, müssen jedoch die Ergebnisse für den Sommer mit wesentlich größerer Vorsicht interpretiert werden.

Während die Studie von Frei et al. (2006) auf die älteren Modellläufe von PRUDENCE basiert, verwenden Smiatek et al. (2009) einige neueren Modellläufe (Abbildung 2-46). Die Ergebnisse sind jedoch analog zur Arbeit von Frei et al. (2006).

Aussagen über Klimaveränderung mit hydrologischer Relevanz bis 2050:

Die **Lufttemperatur** wird in Österreich gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 um **ca. 1° C steigen**, wobei die Zunahme im Sommer stärker sein wird als im Winter (harte Aussage).

Der **Anteil des Schneesiederschlags und die Schneedeckendauer** werden gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 weiter **abnehmen**. Die Veränderung von Schneesiederschlag und Schneedeckendauer ist stark von der Seehöhe abhängig und nicht-linear. Es bestehen beim Schnee große regionale Unterschiede, die sich einer komprimierten Beschreibung entziehen (harte Aussage).

Gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 werden die **Winterniederschläge** insbesondere nördlich des Alpenhauptkammes eher **zunehmen**, die **Sommerniederschläge werden eher abnehmen**. Eine stärkere Veränderung des Niederschlags ist erst nach 2050 zu erwarten (mittelharte Aussage).

Die **potentielle und auch die aktuelle Verdunstung** werden gemittelt über den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber 1976-2007 **zunehmen** (mittelharte Aussage). Die Größenordnung der Änderung ist jedoch unsicher.

Kleinräumige Änderung des Niederschlags sind ebenfalls zu erwarten (weiche Aussage). Die derzeitigen Modellergebnisse sind jedoch unzuverlässiger und widersprüchlich.

Die Aussage, dass **Extremwerte des Niederschlags** auf Grund der höheren Niederschlagssummen im Winter und des auf Grund physikalischer Zusammenhänge mit dem zu erwartenden Temperaturanstieg einhergehenden höheren Feuchtegehaltes der Atmosphäre im Sommer (konvektive Ereignisse) zunehmen ist derzeit spekulativ, da die bisherigen Niederschlagsdaten in Österreich mit ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung und Genauigkeit keine Hinweise auf eine Zunahme von Extremniederschlägen ergeben.

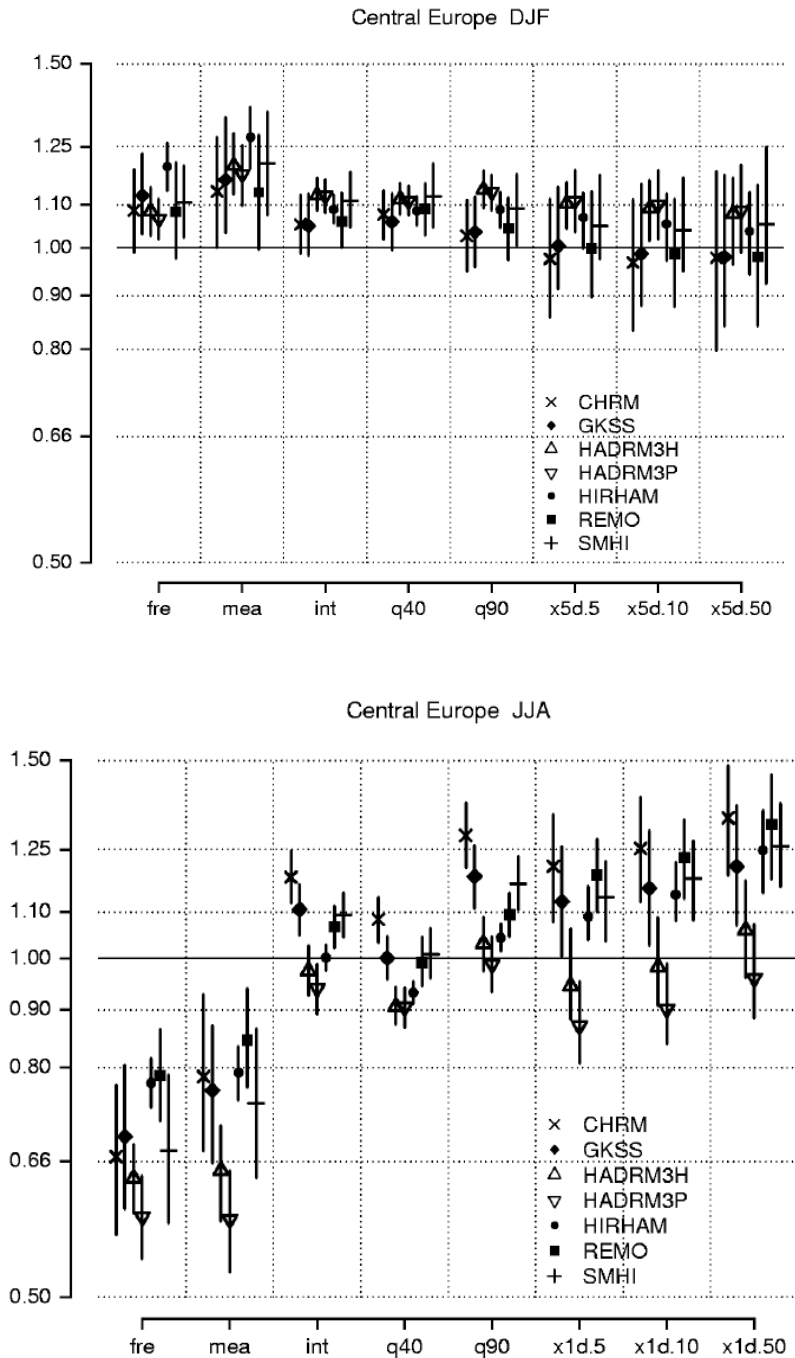


Abbildung 2-46: Klimaänderungssignal des Niederschlags im Alpenraum für 2071-2100 gegenüber 1961-90 aus verschiedenen Regionalen Klimamodellen des PRUDENCE Projektes für den Winter (oben DJF) und den Sommer (unten, JJA) (fre= Niederschlagstage>1mm, mea=Niederschlagssumme, int= Niederschlagsintensität für Niederschlagstage>1mm, q40=40% Perzentil, q90=90% Perzentil, x1d5= Intensität von Tagesniederschläge für 5-jährliche Ereignisse, x1d10= Intensität von Tagesniederschläge für 10-jährliche Ereignisse, x1d50= Intensität von Tagesniederschläge für 50-jährliche Ereignisse; für alle Daten ist ein 90% Bootstrap-Konfidenzinterfall gezeigt (aus Frei et al., 2006).

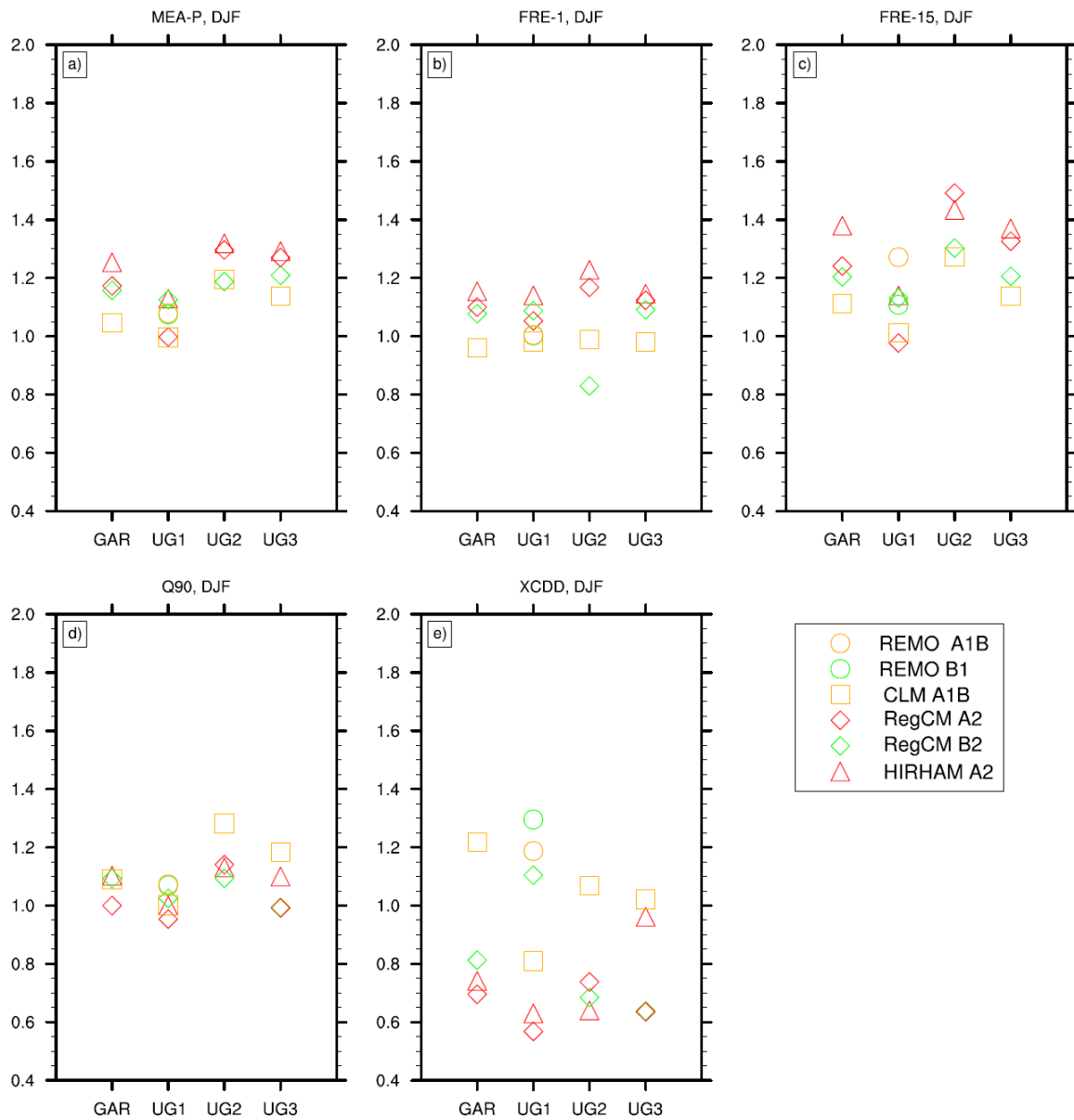


Abbildung 2-47: Statistische Beschreibung des Klimaänderungssignals 2071-2100 gegenüber 1961-90 für den Alpenraum im Winter (DJF). Die Beschreibung der Untersuchungsgebiete (GAR, UG1, UG2, UG3) sowie die Erklärung der statistischen Maßzahlen ist aus Abbildung 2-39 zu ersehen. (aus Smiatek et al., 2009).

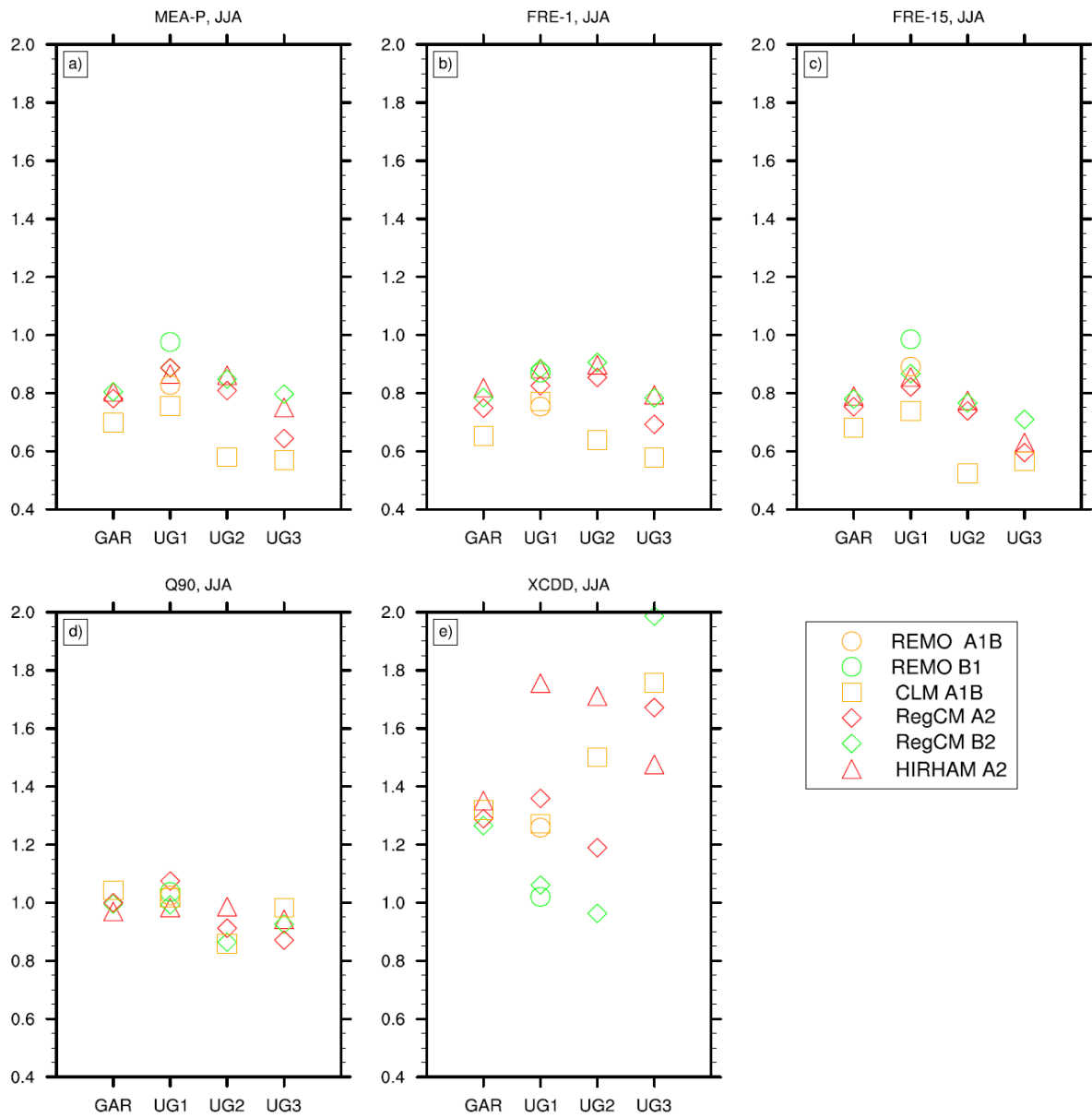


Abbildung 2-48: Statistische Beschreibung des Klimaänderungssignals 2071-2100 gegenüber 1961-90 für den Alpenraum im Sommer (JJA). Die Beschreibung der Untersuchungsgebiete (GAR, UG1, UG2, UG3) sowie die Erklärung der statistischen Maßzahlen ist aus Abbildung 2-39 zu ersehen. (aus Smiatek et al., 2009).

3. Hochwasser

3.1 Kurzfassung

Hochwasserauslösende Prozesse (allgemeine Grundlagen)

- Die hochwasserauslösenden Prozesse in Österreich unterscheiden sich je nach der Region. Die Größe der Hochwässer wird durch das Wechselspiel der Saisonalität von Niederschlag, Schnee und Abflussbereitschaft bestimmt (*harte Aussage*).
- Die Saisonalität der Hochwässer und deren Verschiebung bei Zunahme der Ereignisgröße sollten von Modellen klimainduzierter Änderungen der Hochwässer wiedergegeben werden können (*harte Aussage*).
- Auch zukünftig werden sich Hochwasserdekaden mit Dekaden, in denen kleinere Hochwasser auftreten, abwechseln und damit eine sehr große natürliche Variabilität bewirken. Dadurch werden die Interpretation von Trends und die Bestimmung von Bemessungswerten erschwert (*harte Aussage*).

Situation in der Vergangenheit

- Ergebnisse aus der Schweiz zeigen, dass die Häufung von Hochwässern in den letzten Jahren im Rahmen von Hochwasserdekaden früherer Jahrhunderte liegt (*mittelharte Aussage*).
- In den letzten 30 Jahren haben in etwa 20% der Einzugsgebiete in Österreich die Hochwässer zugenommen, besonders in kleinen Gebieten nördlich des Alpenhauptkammes (*harte Aussage*).
- Österreichweit haben die Winterhochwässer deutlich stärker zugenommen als die Sommerhochwässer. In nahezu keinen Gebieten haben in diesem Zeitraum die Hochwässer abgenommen. Diese Einschätzung stimmt mit Untersuchungen in Bayern und der Schweiz überein (*mittelharte Aussage*).
- Die Trends über die letzten 50 Jahre sind weniger deutlich (*mittelharte Aussage*).
- Die Trends über die letzten 100-150 Jahre zeigen, dass in manchen großen Einzugsgebieten (z.B. die Donau) die kleinen Hochwässer zugenommen haben, jedoch nicht die großen Hochwässer (*mittelharte Aussage*).

Situation in der Zukunft

- Prognosen über Hochwasseränderungen sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da die zukünftige Entwicklung der Extremwerte des Klimas nicht ausreichend zuverlässig berechnet werden kann (*harte Aussage*).
- Szenarienrechnungen aus der Literatur über zukünftige Änderungen der Hochwässer an Österreichischen Flüssen unterscheiden sich erheblich (*harte Aussage*).
- Da Klimamodelle keine Aussagen über zukünftige Extremniederschläge machen können, sind die Unsicherheiten groß, besonders in kleinen Gebieten.
- Hier durchgeführte Wenn-Dann Szenarien, die die unterschiedlichen Mechanismen der Hochwasserentstehung und ihre Saisonalität abbilden (Änderung der Winter/Sommerniederschläge, Erhöhung der Schneefallgrenze, Erhöhung des Anteiles konvektiver Niederschläge, frühere Schneeschmelze und Erhöhung der Verdunstung) zeigen Änderungen der hundertjährigen Hochwässer in einem Bereich von -4 bis +10% und eine Verschiebung des jahreszeitlichen Auftretens der Hochwasser (frühere Frühjahrshochwässer, mehr Winterhochwässer) für einen Zeithorizont 2021-2050 im Vergleich zu 1997-2007 (*weiche Aussage*).
- Auf Basis der hier durchgeführten Wenn-Dann Szenarien (Zeithorizont 2021-2050 im Vergleich zu 1997-2007) ergeben die Mechanismen die folgenden Auswirkungen auf

das hundertjährige Hochwasser (HQ_{100}) (mögliche Änderungen des HQ_{100} in % wenn jeder Mechanismus einzeln auftritt):

- Schneefallgrenze steigt: 0 bis +4% (*mittelharte Aussage*).
- Verschiebung des Zeitpunktes der Hochwässer (frühere Frühjahrshochwässer, mehr Winterhochwässer) (*harte Aussage*).
- frühere Schneeschmelze, höhere Verdunstung: -5 bis +2% (*weiche Aussage*).
- Änderung der Winter/Sommerniederschläge: -3 bis +2% (*weiche Aussage*).
- Erhöhung der Konvektion: +2 bis +10% (*weiche Aussage*).
- Kompensation der Einflüsse unterschiedlicher Mechanismen, sodass die gesamte Änderung nicht gleich der Summe der Einzeleinflüsse ist (*mittelharte Aussage*).

Anpassungsmaßnahmen

- Wenn Klimaimpactanalysen durchgeführt werden sollten sie verstärkt untersuchen, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen bewirkt werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen (*harte Aussage*).
- Die Befunde aus der Literatur sowie die für Österreich ausgewerteten Daten und Modellszenarien deuten darauf hin, dass die in der Vergangenheit eminent große Variabilität der Hochwässer auch in der Zukunft bei der Ermittlung von Bemessungswerten im Vordergrund stehen wird. Besonders in kleinen Gebieten ist die Unsicherheit von Bemessungswerten im derzeitigen Klima basierend auf traditionellen Bemessungsverfahren wesentlich größer als die hier diskutierten Änderungen zufolge Klimawandel. Bei der Bestimmung von Bemessungswerten des Hochwassers ist deshalb das Auftreten von Hochwasserdekaden zu berücksichtigen, und die Unsicherheit womöglich durch Verwendung einer möglichst weitreichenden Datenbasis zu reduzieren.
- Die Häufung der Hochwässer in den letzten Jahrzehnten liegt im Rahmen der natürlichen Variabilität von Hochwasserdekaden (kleinere Hochwässer in der erste Hälfte des 20. Jh., größere in der 2. Hälfte), aber auch ein Einfluss einer Klimaänderung ist nicht auszuschließen. Nach dem derzeitigen Wissensstand erscheint deshalb ein bundesweiter Zuschlag zu Bemessungswerten nicht notwendig.
- Die räumlichen Unterschiede der Hochwassertrends sind auf dem derzeitigen Wissensstand nur teilweise mit den Ergebnissen der Szenarienanalysen konsistent. Im Innviertel und Mühlviertel zeigen sowohl die beobachteten Trends der letzten 30 Jahre als auch die Szenarien eine Zunahme der Hochwasserdurchflüsse. Eine gewisse Verschiebung der Hochwässer vom Sommer in den Winter in diesen Regionen kann mit steigenden Lufttemperaturen zufolge Klimaänderung in Zusammenhang gebracht werden. Die Ergebnisse der Studie weisen darauf hin, dass eine Überprüfung der Bemessungswerte im Innviertel und Mühlviertel notwendig ist.
- In den anderen Regionen Österreichs können mögliche Änderungen der Hochwässer durch die bestehenden Abläufe bei der Aktualisierung von Bemessungswerten abgedeckt werden, sofern die Bemessung mit möglichst umfangreicher Information durchgeführt wird, die je nach Datenlage und Gebietsgröße aus einer Kombination von Hochwasserstatistik, regionaler Information, historischer Information und Niederschlag-Abflussmodellierung bestehen soll.

3.2 Vorgangsweise

Methodisch erfolgt die Beurteilung von Klimaauswirkungen auf Hochwässer auf Basis von drei Arten existierender Untersuchungen in Österreich.

Die erste Art der Untersuchung sind Trendanalysen beobachteter Daten. Die bestehenden Trenduntersuchungen werden beurteilt in Hinblick auf die Signifikanz von Trends und deren regionale Unterschiede. Trendanalysen hydrologisch-wasserwirtschaftlicher Kenngrößen werden dann argumentativ in Beziehung gesetzt mit Trends meteorologischer Größen wie Niederschlag und Lufttemperatur. Daraus lassen sich Schlüsse ziehen über weiche bis harte Fakten von Auswirkungen des Klimawandels aus wasserwirtschaftlicher Perspektive.

Die zweite Art der Beurteilung von Klimaauswirkungen beruht auf Szenarienrechnungen. Es existieren zahlreiche Studien, bei denen die Ergebnisse von Klimamodellen mit hydrologischen Modellen gekoppelt werden, um dadurch die möglichen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft zu erschließen. Der Vorteil solcher Untersuchungen besteht darin, die Effekte einzelner Komponenten des Systems analysieren zu können, allerdings sind die Ergebnisse nur so zuverlässig, wie es die verwendeten Modelle und Eingangsgrößen erlauben.

Bei der dritten Art von existierenden Einschätzungen werden keine Berechnungen durchgeführt, sondern Schlüsse auf Basis allgemeiner Überlegungen gezogen. Dabei werden die wichtigsten Prozesse sehr vereinfacht gedanklich abgebildet. Der Vorteil dieser Vorgangsweise besteht darin, nachvollziehbare Zusammenhänge aufzuzeigen, die für die Entscheidungsfindung sehr wichtig sind, allerdings ist die Quantifizierung der Größenordnung von Einflüssen nicht leicht.

Die Sichtung der Literatur erfolgt hier auf Basis dieser methodischen Zugänge. Besonderes Augenmerk wird darauf gerichtet, dass etwaige Änderungen hydrologisch interpretierbar sind. Dies ist essentiell, um zu vermeiden, dass sich Änderungen rechnermäßig auf Grund von Artefakten in den Daten, der Datenanalyse oder Modellrechnungen ergeben. Das Verstehen der Wirkungsmechanismen, die Plausibilität und hydrologische Nachvollziehbarkeit stehen deshalb im Vordergrund. Damit lassen sich Aussagen zuverlässiger ableiten, als es die reine Übernahme von Modellergebnissen als "Black box" erlaubt.

3.3 Prozesse der Hochwasserentstehung in Österreich auf regionaler Ebene

3.3.1 Saisonalität

Fazit:

- Die hochwasserauslösenden Prozesse in Österreich unterscheiden sich je nach der Region. Die Größe der Hochwässer wird durch das Wechselspiel der Saisonalität von Niederschlag, Schnee und Abflussbereitschaft bestimmt (*harte Aussage*).
- Die Saisonalität der Hochwässer und deren Verschiebung bei Zunahme der Ereignisgröße sollten von Modellen klimainduzierter Änderungen der Hochwässer wiedergegeben werden können (*harte Aussage*).
- Auch zukünftig werden sich Hochwasserdekaden mit Dekaden in denen kleinere Hochwasser auftreten abwechseln und damit eine sehr große natürliche Variabilität bewirken. Dadurch werden die Interpretation von Trends und die Bestimmung von Bemessungswerten erschwert (*harte Aussage*).

Die Analyse der Saisonalität, also der Verteilung innerhalb eines Jahres, hydrologischer Größen erlaubt wertvolle Aufschlüsse über die wirksamen hydrologischen Prozesse. Eine Häufung der Niederschlagssummen im Sommer bzw. Herbst lässt auf unterschiedliche klimatologische Situationen schließen. Ebenso erlaubt die Saisonalität des mittleren Abflusses, also das Abflussregime, einen Rückschluss auf das hydrologische Verhalten von Gebieten in Hinblick auf den Beitrag von Regen, Schnee und Verdunstung, besonders wenn ein Vergleich mit der Saisonalität des Niederschlags angestellt wird. Ähnliches gilt für

Extremwerte. Heftige Sommerniederschläge sind oft konvektiven Ursprungs. Sommerhochwässer sind meist ausschließlich auf Niederschlag unterschiedlicher Dauer zurückzuführen, Winterhochwässer treten oft zufolge von Regen auf eine vorhandene Schneedecke auf, und auch Schneeschmelzhochwässer können mit Hilfe von Saisonalitätsanalysen eingeordnet werden. Ein Vergleich der Saisonalität von Hochwässern mit der Saisonalität anderer hydrologischer Größen ermöglicht zusätzliche Prozessaussagen, etwa über die mittlere Abflussbereitschaft während Hochwässern. Derartige Prozessüberlegungen erleichtern es, zuverlässige hydrologische Aussagen auf regionaler Ebene zu treffen, insbesondere für Gebiete ohne oder mit kurzen Abflussbeobachtungen, sowie bei Extrapolation von Hochwässern für seltene Ereignisse.

Abbildung 3-1 zeigt die Saisonalität der Jahreshochwässer der Pegel Einzugsgebiete in Österreich basierend auf den Index von Burn (1997). Intensive Farben bedeuten ausgeprägte Saisonalität, schwache Farben bedeuten geringe Saisonalität. Die Farbe gibt das mittlere Auftretensdatum des Maximalwertes innerhalb des Jahres an.

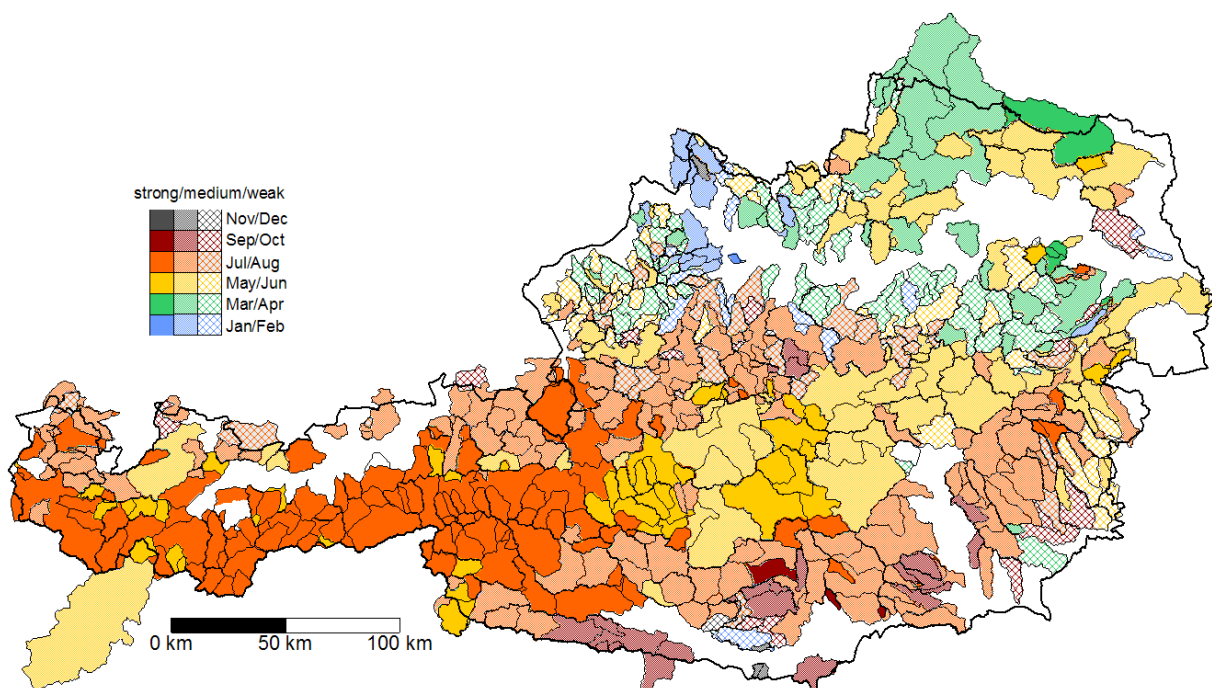


Abbildung 3-1: Saisonalität der Hochwässer in Österreich. Die Farbe gibt das mittlere Auftretensdatum an (z.B. gelb für Mai, blau für Jänner). Die Farbintensität gibt die Intensität der Saisonalität an. Aus Merz und Blöschl (2003).

In den hochalpinen Gebieten Tirols und Vorarlbergs treten Hochwässer vor allem im Juli auf. Die Saisonalität ist stark. Dies dürfte auf die erhöhte Abflussbereitschaft im Sommer infolge Schneeschmelze zurückzuführen sein. Diese Interpretation wird durch die Ähnlichkeit der räumlichen Muster der Saisonalität der Hochwässer mit den räumlichen Mustern der Saisonalität der Monatsabflüsse belegt, denn Monatsabflüsse sind ein Indikator für die Abflussbereitschaft von Einzugsgebieten. Die räumlichen Muster der Saisonalität der Extremwerte des Niederschlages weisen hingegen ein ziemlich unterschiedliches Erscheinungsbild auf. Die Interpretation wird auch durch die Simulationsrechnungen von Merz (2002) belegt. In den restlichen Teilen Österreichs tritt vor allem mittlere Saisonalität auf, mit Ausnahme des niederösterreichischen und oberösterreichischen Alpenvorlandes, in dem niedrige Saisonalität anzutreffen ist. Neben wenigen Hochwasserereignissen während der Schneeschmelzperiode im Winter und Frühjahr führen in diesen Gebieten langanhaltende großräumige Niederschläge im Sommer zu den maximalen Abflüssen (Merz, 2002). Dies bewirkt eine insgesamt schwache Saisonalität der Hochwässer mit einem

Maximum im Frühjahr. In den höheren Gebieten des Mühlviertels tritt eine mittlere Saisonalität mit einem Maximum im Februar auf. Eine genauere Analyse der Hochwässer (Merz, 2002) zeigt, dass sich dieses Verhalten aus einer Kombination von Winterhochwässern mit einigen Sommerhochwässern ergibt. Die Winterhochwässer dürften hier durch Tauwetter und durch Regenereignisse auf eine Schneedecke bzw. auf einen gesättigten Boden verursacht werden. Im Waldviertel und Weinviertel ist die Saisonalität mittel mit Maxima der Hochwässer von April bis Juni. Die sommerlichen Maxima im Osten (Marchfeld) dürften auf eine rege Gewittertätigkeit zurückzuführen sein (Merz und Blöschl, 2003).

Im Süden Kärntens und in der Weststeiermark zeigt die Karte mittlere Saisonalität mit Maxima im August bis September. Eine monatliche Analyse der Starkniederschläge und der Hochwässer zeigt, dass beide Größen bimodal verteilt sind mit Maxima im Juni und im Oktober. Der Parameter nach Burn gibt als Mittelwert der bimodalen Verteilung August bis September an. Die Hochwässer im Frühsommer und im Herbst sind auf unterschiedliche Mechanismen zurückzuführen, im Frühsommer auf Schneeschmelze bzw. Niederschläge auf abflussbereite Böden, im Herbst jedoch auf Starkniederschläge, die zumeist von atmosphärischer Feuchtezufuhr aus dem Süden ausgelöst werden.

Die großen Vorfluter Österreichs (> 5000 km²) weisen die folgende Saisonalität der Hochwässer auf: Salzach, Tiroler Inn, Rhein: starke Saisonalität mit Maxima im Juli; Österreichische Donau, Enns; Drau: mittlere Saisonalität mit Maxima im Juli; Mur: mittlere Saisonalität mit Maxima im Juni; March: mittlere Saisonalität mit Maxima im April. Diese Saisonalität spiegelt das Verhalten der Entstehungsgebiete der Hochwässer wider.

Die Saisonalität der Hochwasser sowie der maximalen täglichen Niederschläge sind in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 in Pfeilform eingetragen. Es ist zu erkennen, dass die maximalen Niederschläge vor allem in Sommer auftreten, im Süden Österreichs auch im Herbst. Betrachtet man nur die drei größten Ereignisse, so verschiebt sich die Saisonalität meist in Richtung Spätsommer. In ähnlicher Weise verschiebt sich die Saisonalität der Hochwässer Richtung Spätsommer, wobei die Saisonalität meist ausgeprägter ist (längere Pfeile in Abbildung 3-3), d.h. extreme Hochwässer treten meist nur in einer bestimmten Jahreszeit auf.

Beispiele für die Verschiebung der Saisonalität mit der Größe des Ereignisses sind Abbildung 3-4 zu entnehmen. Am Pegel Teufelmühle an der Großen Mühl (T) treten kleine Hochwässer im ganzen Jahr auf, große Hochwässer vor allem im Winter. Am Pegel Wienerbruck am Ötscherbach (W) treten kleine Hochwässer im ganzen Jahr auf, große Hochwässer vor allem im Sommer. Am Pegel Anger an der Feistritz (A) treten Hochwässer durchwegs im Sommer und Herbst auf. Am Pegel Rattendorf an der Gail (R) treten kleine Hochwässer im Frühjahr bis Herbst auf, mittlere Hochwässer im Sommer und extreme Hochwässer im Herbst.

Die Saisonalität der Hochwässer und deren Verschiebung bei Zunahme der Ereignisgröße sollten von Modellen klimainduzierter Änderungen der Hochwässer wiedergegeben werden können.

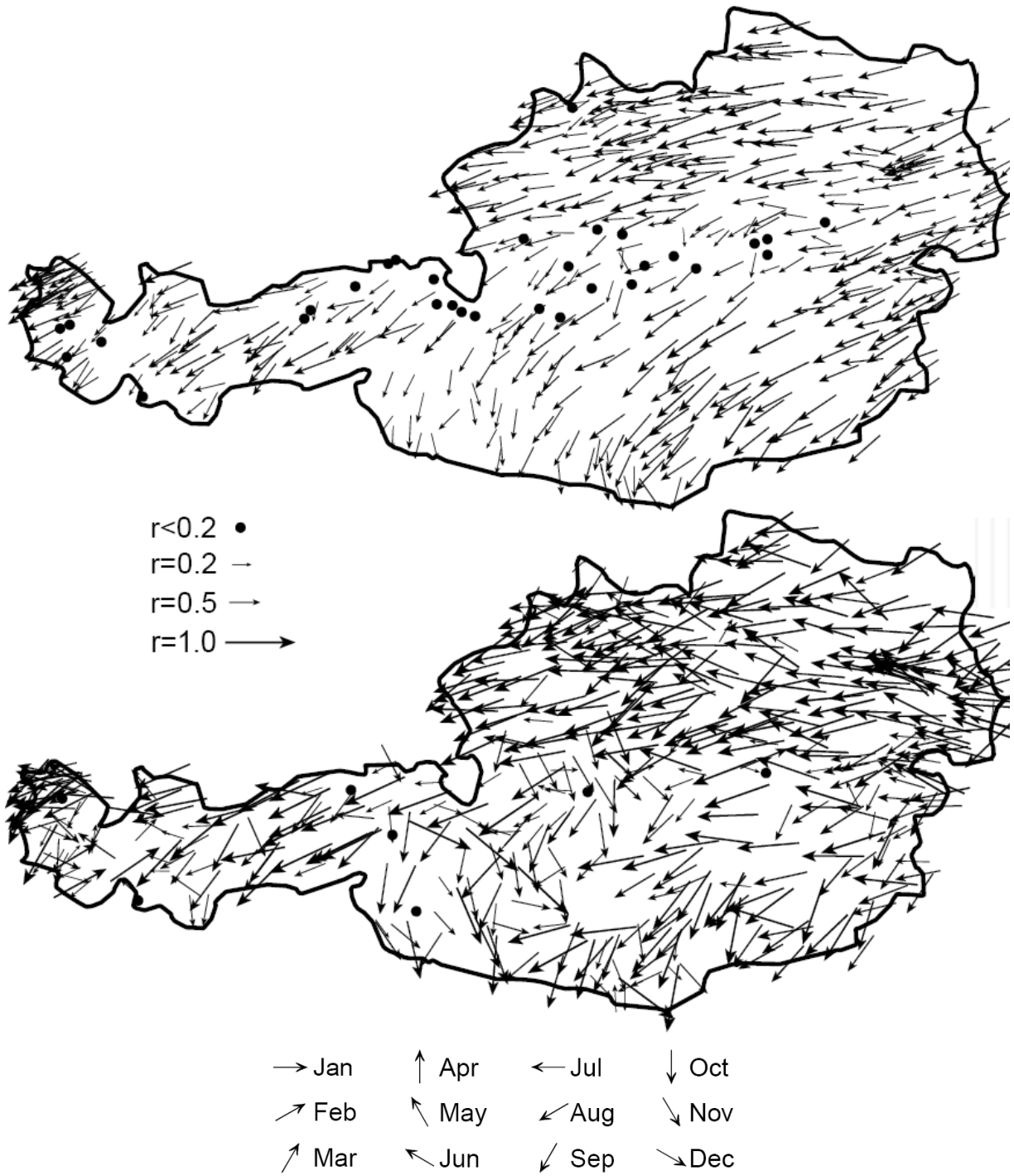


Abbildung 3-2: Saisonalität der maximalen täglichen Niederschläge. Die Richtung der Pfeile gibt das mittlere Auftretensdatum an (z.B. nach links für Juli, nach rechts für Jänner). Die Länge der Pfeile gibt die Intensität der Saisonalität an. Oben: Gesamte Reihe; Unten: nur die drei größten Ereignisse. Aus Parajka et al. (2009).

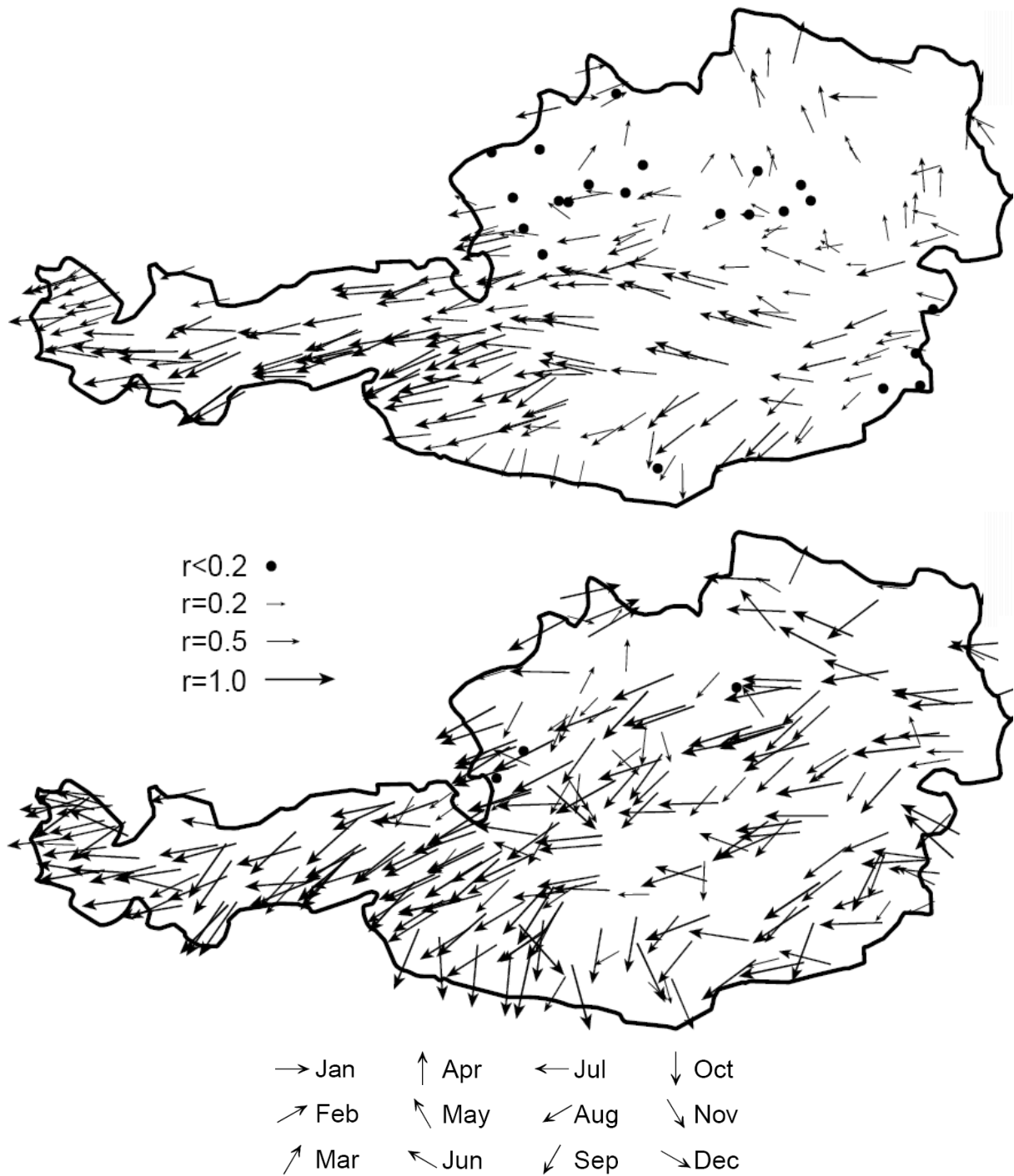


Abbildung 3-3: Saisonalität der maximalen jährlichen Hochwässer. Die Richtung der Pfeile gibt das mittlere Auftretensdatum an (z.B. nach links für Juli, nach rechts für Jänner). Die Länge der Pfeile gibt die Intensität der Saisonalität an. Oben: Gesamte Reihe; Unten: nur die drei größten Ereignisse. Aus Parajka et al. (2009).

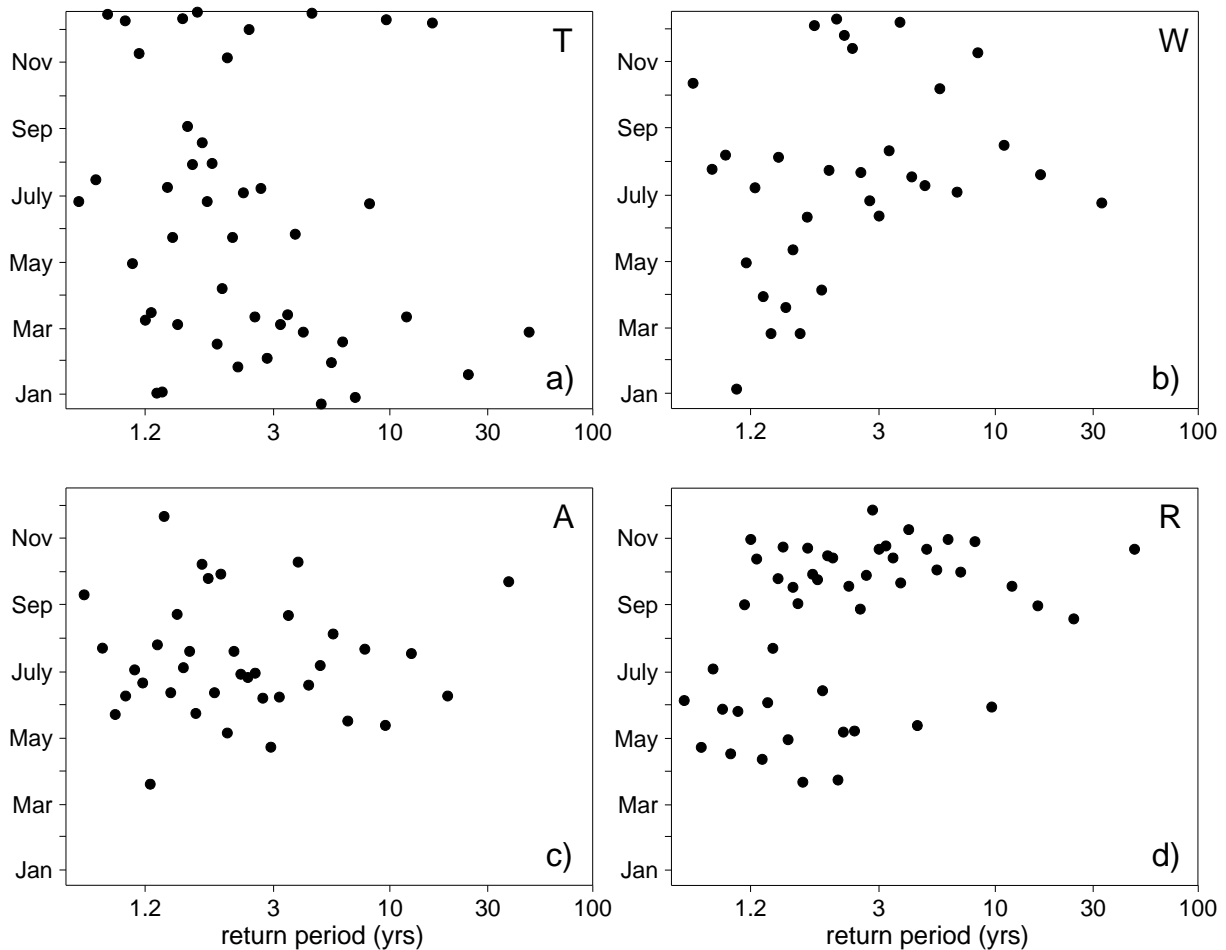


Abbildung 3-4: Saisonalität der Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Datum gegen Jährlichkeit) (a) Teufelmühle, (b) Wienerbruck, (c) Anger, (d) Rattendorf. Die mittlere Gebietshöhe und Einzugsgebietsflächen sind: Teufelmühle: 751 m, 452 km²; Wienerbruck: 1013 m, 36 km²; Anger: 994 m, 408 km²; Rattendorf: 1380 m, 595 km². Aus Sivapalan et al. (2005)

Die Aussagekraft der Saisonalität kann auch für Trenduntersuchungen nutzbar gemacht werden. Als Beispiel zeigt Abbildung 3-5 den mittleren monatlichen Niederschlag, den mittleren monatlichen Abfluss, den jährlichen maximalen Abfluss und den jährlichen maximalen täglichen Niederschlag im Zeitraum 1951-2005. Der Abfluss wurde gemessen in Rattendorf / Gail (595 km²) und der Niederschlag in Maria Luggau (1140 m a.s.l.). Es ist auffallend, dass die Hochwasserverteilung in den Jahren 1951-1969 unimodal war (Hochwässer nur im Herbst). Ab 1970 ist offensichtlich ein Regimewechsel in den Hochwässern aufgetreten, wobei nun sowohl Frühjahrs als auch Herbsthochwässer auftraten. Der Regimewechsel ist im letzten Jahrzehnt wieder weniger ausgeprägt. Dieses Muster tritt auch in den extremen Niederschlägen auf. Eine ähnliche Darstellung zeigt Abbildung 3-7 für einen Längsschnitt durch Österreich.

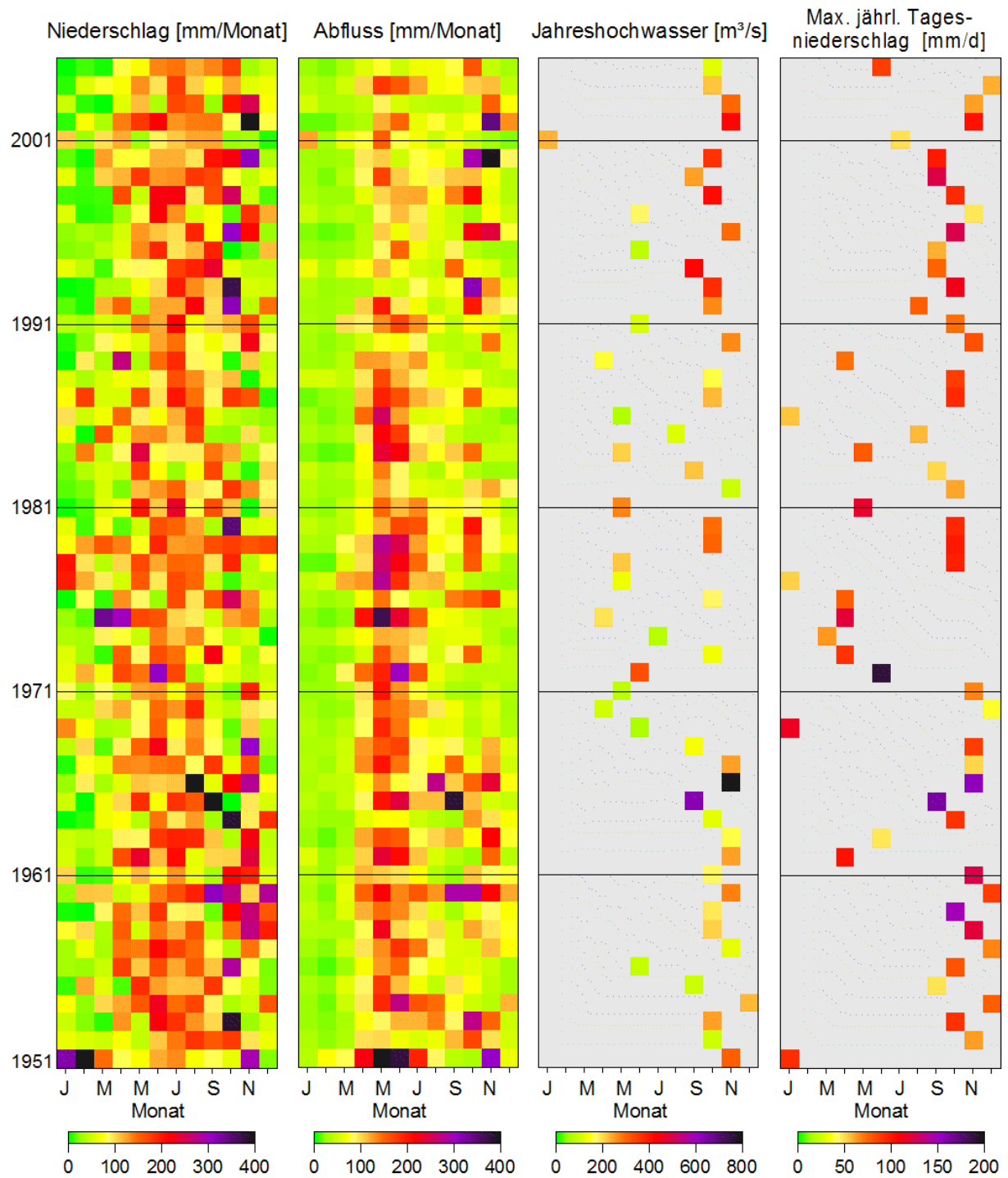


Abbildung 3-5: Mittlerer monatlicher Niederschlag, mittlerer monatlicher Abfluss, jährlicher maximaler Abfluss und jährlicher maximaler täglicher Niederschlag im Zeitraum 1951-2005. Abfluss gemessen in Rattendorf / Gail (595 km²) und Niederschlag in Maria Luggau (1140 m a.s.l.). Aus Blöschl et al. (2009).

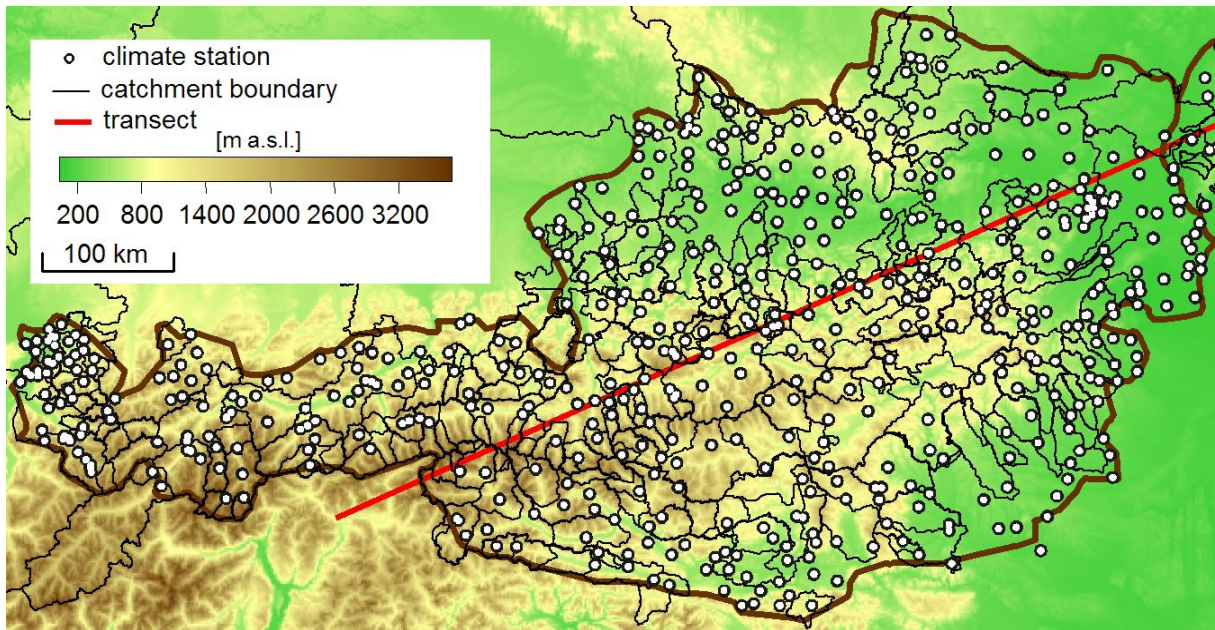


Abbildung 3-6: Längsschnitt zu Abbildung 3-7.

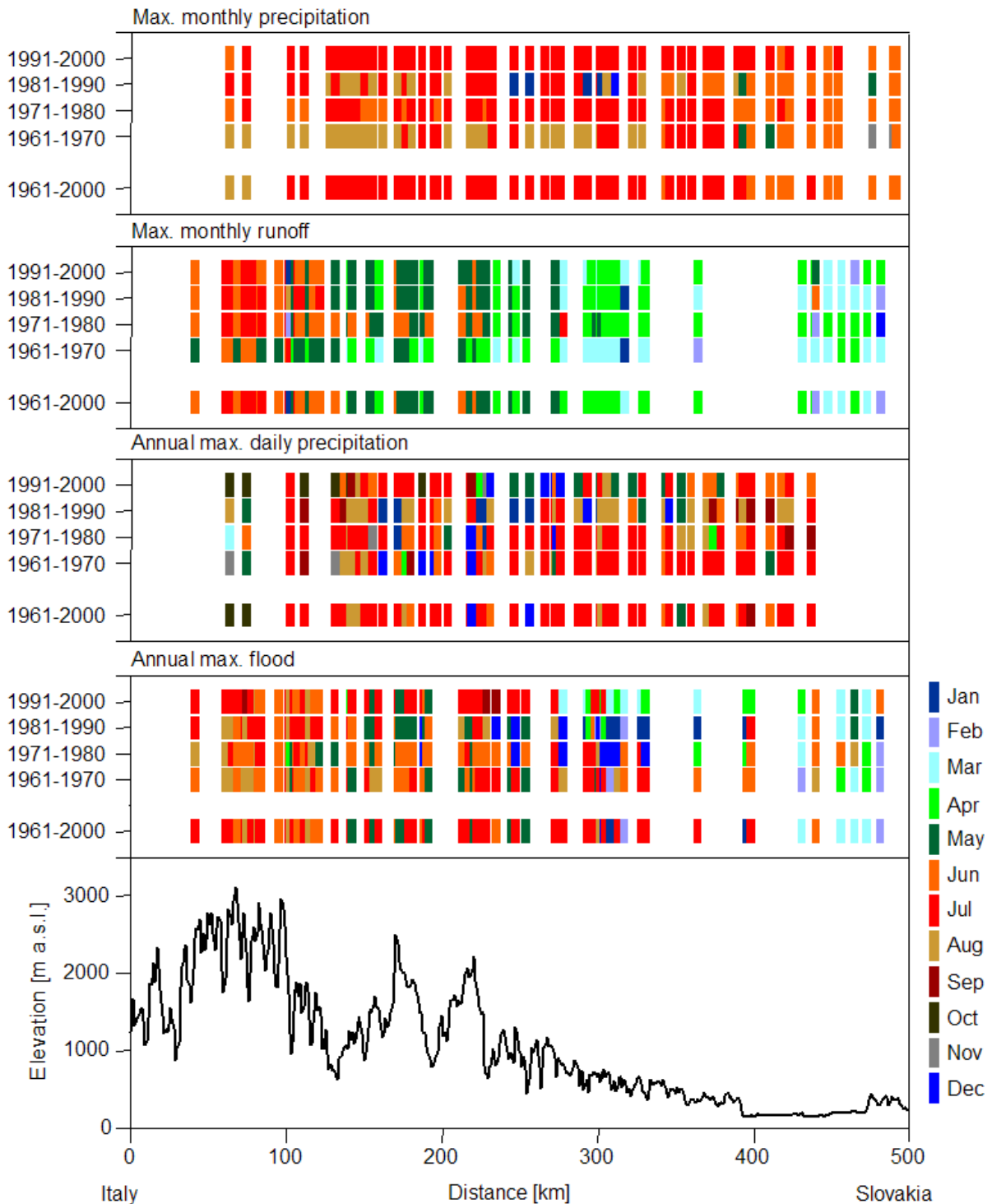


Abbildung 3-7: Saisonalität hydrologischer Größen entlang des Längsschnitts in Abbildung 3-6. Die Farbe zeigt die Jahreszeit unterschieden nach Dekaden. Niederschlagsstationen und Pegel in einem Bereich von 10 km bzw. 25 km vom Längsschnitt. Aus Parajka et al. (2009).

3.3.2 Hochwassertypen und andere Einflussfaktoren

Die Beurteilung der Hochwasserprozesse mittels Saisonalität wurde von Merz und Blöschl (2003) weitergeführt, indem eine große Zahl von Hochwässern in Österreich in Hinblick auf ihre Entstehungsmechanismen untersucht und in fünf Typen klassifiziert wurde: Hochwässer zufolge langer Niederschläge, Hochwässer zufolge kurzer Niederschläge, Hochwässer

aufgrund von Gewittern, Regen-auf-Schnee Ereignisse und Schneeschmelzhochwässer. 43% aller untersuchten Jahreshöchsthochwässer waren Hochwässer zufolge langer Niederschläge, nur 3% waren Schneeschmelzhochwässer. Es zeigten sich deutliche regionale Unterschiede in der Häufigkeit der Prozessstypen (Abbildung 3-8). Ereignisse zufolge langer Niederschläge treten gehäuft am Alpennordrand auf, zufolge kurzer Niederschläge südlich des Alpenhauptkamms, Gewitter gehäuft in der Steiermark und im südlichen Burgenland, Regen-auf-Schnee Ereignisse vor allem nördlich der Donau und Schneeschmelze in den höheren Gebieten Österreichs. Die statistischen Eigenschaften der Hochwasserkollektive, aufgegliedert nach Prozessstypen, zeigen deutliche Unterschiede, was die Bedeutung des Einbeziehens der Prozesstypologisierung in Hochwasserschätzungen belegt. In der im Rahmen dieser Arbeiten entstandenen Dissertation von Merz (2002) sind für alle untersuchten 11518 Hochwasserereignisse die Prozessstypen angegeben.

Die Hochwässer lassen sich auch mit unterschiedlichen Gebiets- und Klimakenngrößen korrelieren. Mit solchen Korrelationen kann man z.B. empirisch von einem veränderten Jahresniederschlag auf veränderte Hochwässer schließen, oder in ähnlicher Weise empirisch von veränderten Abflussbeiwerten auf veränderte Hochwässer. Eine derartige Auswertung ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

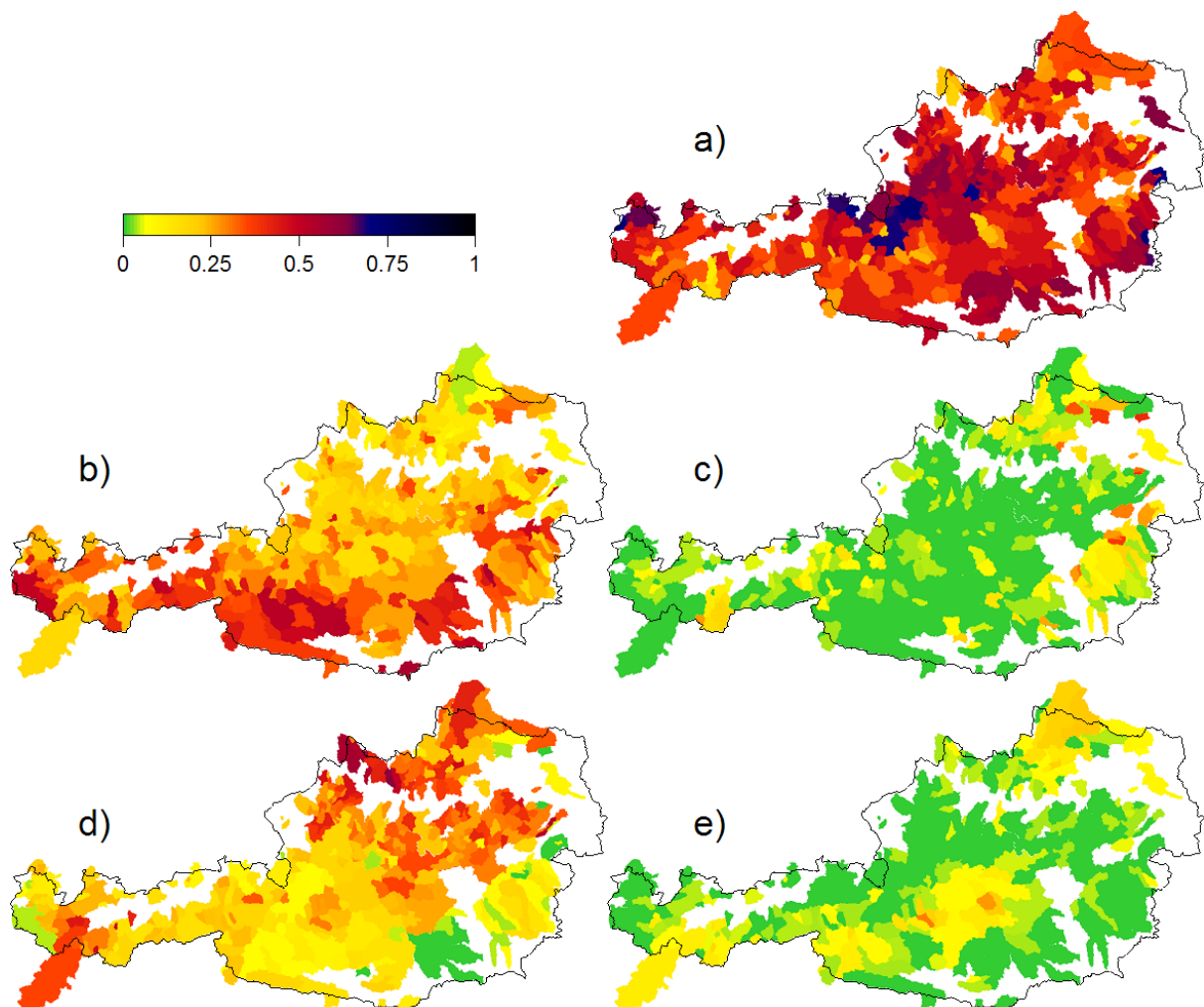


Abbildung 3-8: Relative Häufigkeit von Prozessstypen von 11518 Hochwasserereignissen der Jahre 1971-1997. Die Prozessstypen sind (a) Hochwässer zufolge langer Niederschläge, (b) Hochwässer zufolge kurzer Niederschläge, (c) Hochwässer aufgrund von Gewittern, (d) Regen-auf-Schnee Ereignisse und (e) Schneeschmelzhochwässer. Ein großer Wert der Häufigkeit besagt, dass das Jahreshochwasser oft auf diesen Typ zurückzuführen ist. Aus Merz and Blöschl (2003a).

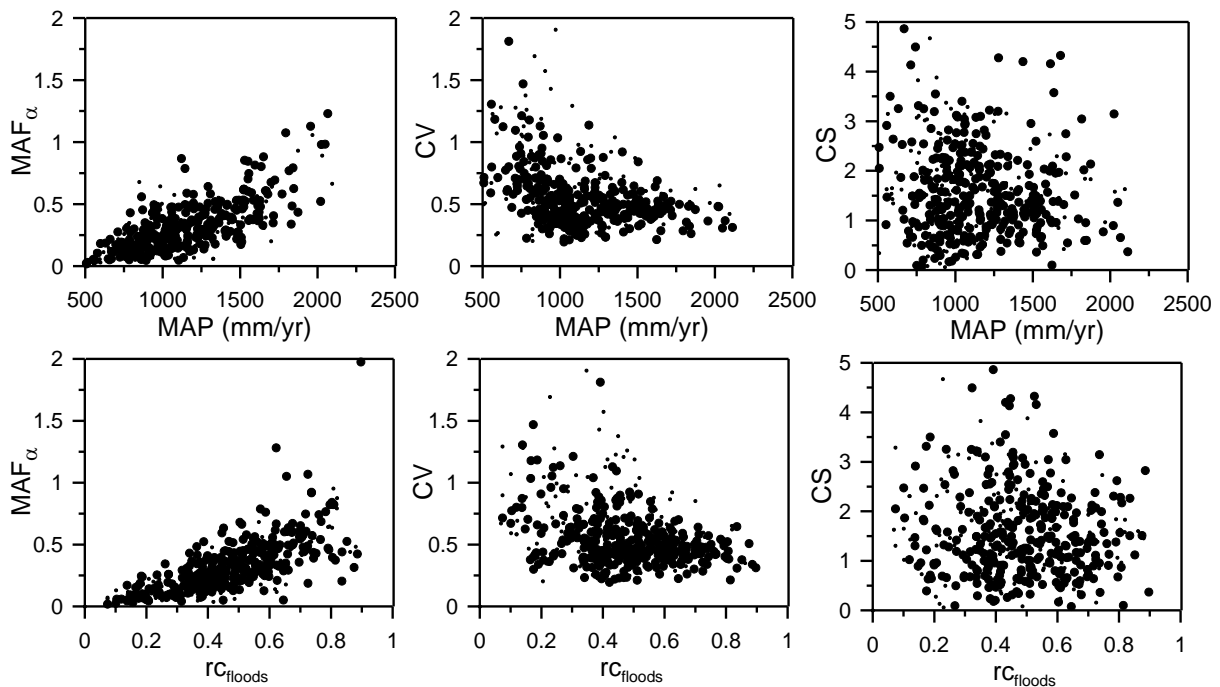


Abbildung 3-9: Statistische Hochwassermomente aufgetragen gegen den langfristigen mittleren Niederschlag (MAP) (oben) und den mittleren Ereignisabflussbeiwert der jährlichen Hochwässer (rc_{floods}) (unten). Einzugsgebiete mit Reihenlängen größer 25 Jahre sind als große Punkte dargestellt, solche mit kürzeren Reihen als kleine Punkte (aus Merz and Blöschl, 2008c).

3.4 Situation in der Vergangenheit

3.4.1 Interpretation von Trends und Hochwasserdekaden

Fazit:

- Hochwasserreiche und hochwasserarme Dekaden existieren überall
- Die Wahl des betrachteten Zeitfensters, für das der Trend angegeben wird, ist entscheidend.

Trendanalysen geben Aufschlüsse über das beobachtete Verhalten der Hochwässer und die davon abgeleiteten Prozesse, die möglicherweise am Trendverhalten beteiligt sind. Die Vorteile der Trendanalysen bestehen darin, dass sie auf tatsächlich beobachteten Daten (Vergangenheit) aufbauen. Solche Beobachtungsdaten enthalten alle Veränderungen an einer Messstation (eines Gebietes) summarisch, d.h. verschiedene möglicherweise entgegengesetzte Prozesswirkungen werden in Bezug auf die Veränderung einer bestimmten Größe betrachtet. Das heißt, dass beispielsweise geänderte Landnutzung, wasserbauliche Maßnahmen und auch die Klimavariabilität (natürlich und/oder anthropogen) in diesen Daten enthalten sind. Während sich der Einfluss wasserbaulicher Maßnahmen relativ leicht beurteilen lässt, sind Änderungen in der Landnutzung und im Klima nur schwer nach Anteilen aufzuspalten (Blöschl et al., 2007). Trendanalysen besitzen den Nachteil, dass sie den Trend für ein bestimmtes Zeitfenster angeben und dieser stark von der Zusammensetzung der Reihe abhängig ist. Das Auftreten von Hochwasserjahrzehnten kann, je nach Lage in der Beobachtungsreihe, den Trend entscheidend beeinflussen, wodurch die Aussagekraft solcher Trends eingeschränkt sein kann (Blöschl und Merz, 2008). Hochwasserdekaden mit überdurchschnittlichen vielen bzw. großen Hochwässern abgewechselt von hochwasserarmen Dekaden sind in nahezu allen Regionen der Welt festzustellen (Blöschl und Montanari, 2009). Großes Gewicht ist deshalb auf möglichst lange Datenreihen, das Studium der Veränderungen im Einzugsgebiet und den Vergleich mit

benachbarten Einzugsgebieten zu legen, besonders dann wenn ein Trend über den Beobachtungszeitraum hinaus extrapoliert werden soll.

Wegen des Auftretens von Hochwasserjahrzehnten ergeben Trendanalysen oft widersprüchliche Befunde (Kundzewicz, 2004). Als Beispiel sind in Abbildung 3-10a die Jahreshochwässer der Donau bei Wien für einen Zeitraum von 73 Jahren eingetragen. Wenn man nur dieses Bild betrachtet, suggeriert es, dass die großen Hochwässer einen zunehmenden Trend aufweisen, da fünf der sechs größten Hochwässer am Ende der Reihe aufgetreten sind. Ein Vergleich mit Abbildung 3-10b zeigt jedoch, dass dieser Trend nicht in die Zukunft extrapoliert werden darf. In der Abbildung 3-10a handelt es sich nämlich um die Reihe 1828-1900, in der Abbildung 3-10b um die Reihe 1828-2008. Die lange Reihe zeigt auch, dass die kleinen Hochwässer einen zunehmenden Trend aufweisen, der sich (zumindest teilweise) durch wasserbauliche Maßnahmen (vor allem die geringere Ausuferung) an der Donau interpretieren lässt.

Die Bedeutung der Wahl des Zeitfensters für die Bestimmung von Hochwässern einer bestimmten Jährlichkeit wird in Abbildung 3-10 verdeutlicht. Aufgetragen ist die betragsmäßige Differenz der hundertjährigen Hochwasser berechnet aus einer Reihe von 25 Jahren im Vergleich zur Gesamtreihe. Die Unterschiede betragen im Extremfall bis zu 100%. Das bedeutet, dass aus kurzen Reihen berechnete hundertjährige Hochwässer sehr unsicher sind. Diese Unsicherheit ist zum Teil auf die Zufälligkeit des Hochwasserprozesses zurückzuführen und zum Teil auf das Auftreten von Hochwasserdekaden. Weitergehende Analysen des Einflusses von Hochwasserdekaden auf Bemessungswerte des Hochwassers finden sich in Blöschl et al. (2008).

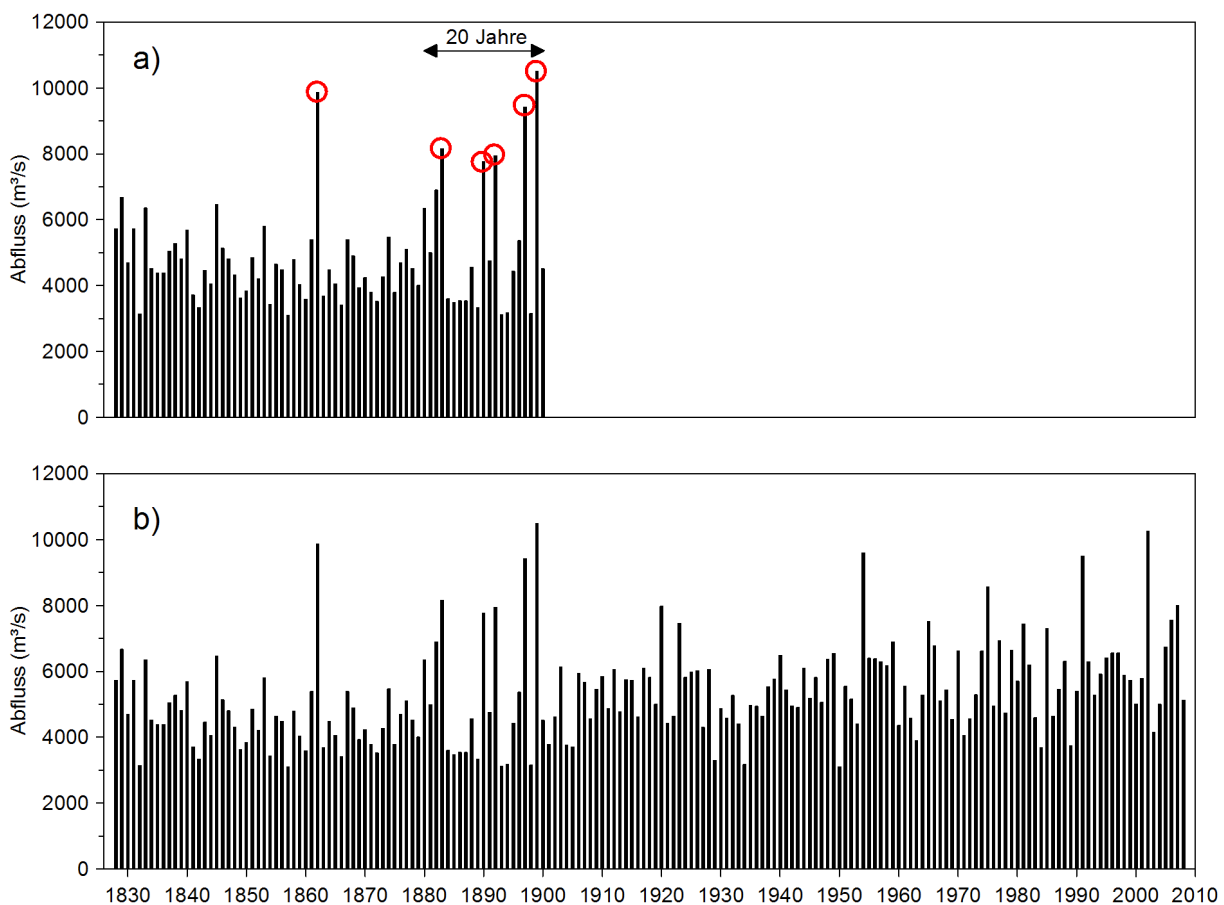


Abbildung 3-10: Jahreshochwässer der Donau bei Wien für 73 Jahre. Fünf der sechs größten Hochwässer sind in den letzten 20 Jahren aufgetreten. (b) Gesamte Reihe 1828-2008.

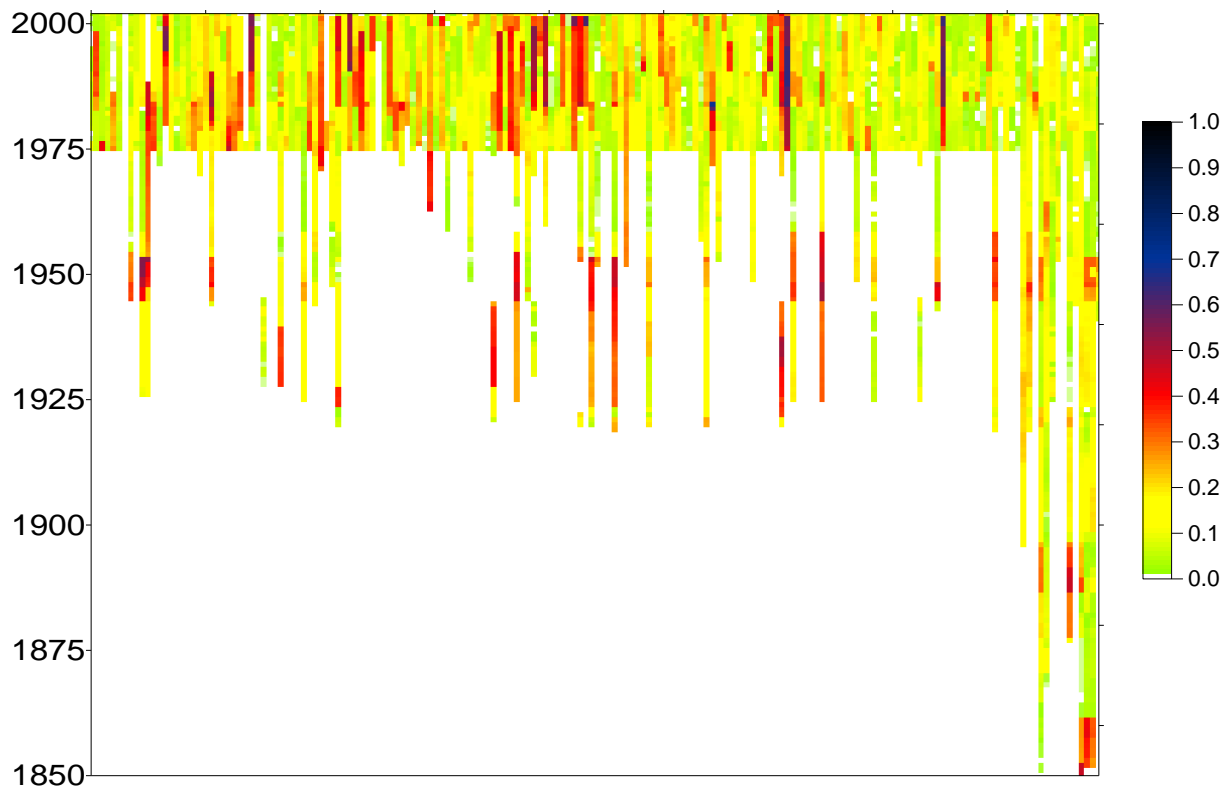


Abbildung 3-11: Betragmäßige Differenz der hundertjährigen Hochwässer berechnet aus einer Reihe von 25 Jahren im Vergleich zur Gesamtreihe. 0 bedeutet keine Differenz, 1 bedeutet eine Differenz von 100%. Jeder vertikale Balken ist ein Einzugsgebiet. Die Gebiete sind nach aufsteigender Einzugsgebietsfläche sortiert (links befinden sich die großen Gebiete).

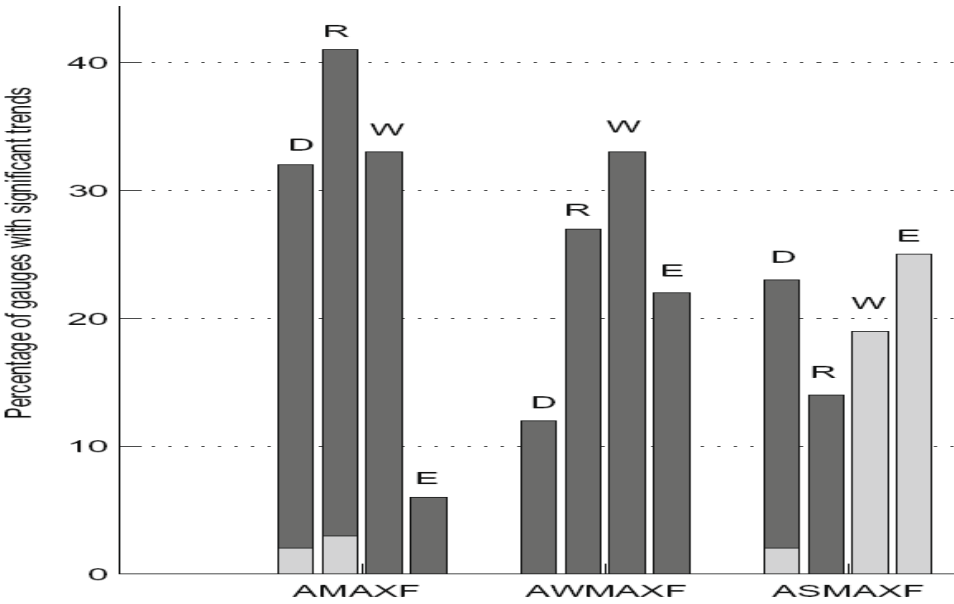
3.4.2 Ergebnisse von Trenduntersuchungen in der Literatur

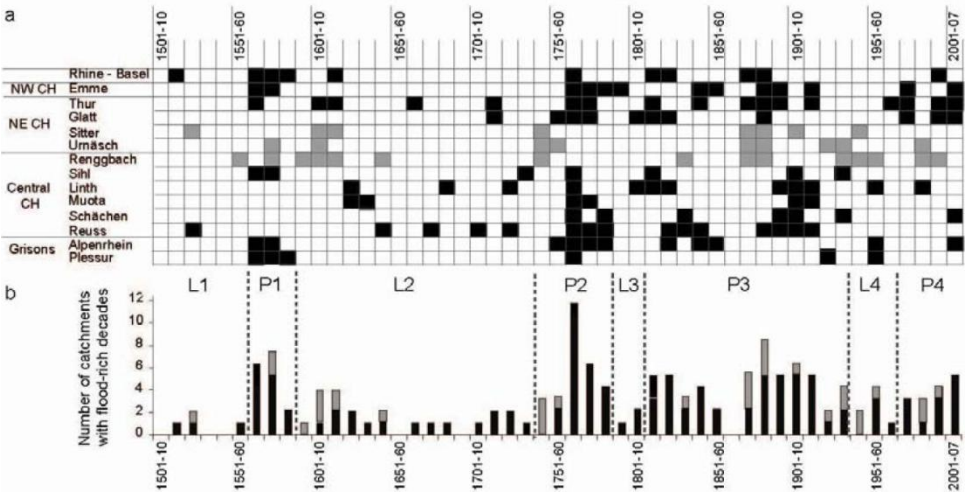
Fazit:

- Viele Untersuchungen in Europa zeigen keine konsistenten bzw. interpretierbaren Trends.
- Winterhochwässer nahmen in den letzten 50 Jahren in Süddeutschland zu.
- Ergebnisse aus der Schweiz zeigen, dass die Häufung von Hochwässern in den letzten Jahren im Rahmen von Hochwasserdekaden früherer Jahrhunderte liegt.
- Die Saisonalität der Hochwässer gibt sehr gute Aufschlüsse über sich verschiebende Mechanismen.

Tabelle 3-1: Trenduntersuchungen in der Literatur

Geografische und zeitliche Abgrenzung; Veröffentlichung	Aussagen
Weltweit Kundzewicz et al. (2005)	Statistische Trendanalyse mittels Mann-Kendall Test von Hochwasserdaten des Global Runoff Data Centre (GRDC) in Koblenz Aussagen: Zunahme der Hochwässer an 27 Pegeln, Abnahme an 31 Pegeln, kein Trend an 195 Pegeln. Vorsicht bei der Interpretation von Trendtests, da lokale Prozesse dominieren können und die natürliche Variabilität und natürliche Persistenz groß sind.
Europa Barredo (2009)	Mittlere Hochwasserschäden von 31 Europäischen Ländern, die in Hinblick auf Bevölkerungsdynamik und ökonomischer Aspekte normiert wurden, nehmen nicht zu.
Tschechische Republik, Moldau und Elbe 1825-2006 Yiou et al. (2006)	Hochwasserdaten seit 1825 in Böhmen zeigen abnehmende Trends obwohl der Niederschlag zunimmt. Die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts zeigte die größten Hochwässer, die auch durch die letzten Dekaden nicht übertroffen wurden. Das Ereignis im Jahr 2002 war außergewöhnlich.
Deutschland/ Elbe, Oder 1850-2002 Mudelsee et al. (2003)	Aus Beobachtungen für Europa in den letzten Jahrzehnten ist kein eindeutiger Anstieg der Häufigkeit von Hochwasserereignissen festzustellen. Für Elbe und Oder ergibt sich für die letzten 80-150 Jahre ein Rückgang der Winterhochwässer und kein Trend in den Sommerhochwässern. Signifikante langfristige Veränderungen in der Häufigkeit von Hochwasserereignissen konnten zwischen dem 16.- und 19. Jahrhundert festgestellt werden.
Deutschland/ Bayern -2100 Spektrum Wasser1 (2004)	Untersuchungen der Jahreshöchstwerte der Abflüsse aus Beobachtungen der letzten 70-150 Jahre an 107 untersuchten Pegeln in Bayern zeigen am überwiegenden Teil der Pegel keine Veränderungen.
Deutschland 1901-2000 Schönwiese et al. (2005)	Vor allem im Winter zeigt sich ein extremeres Verhalten der Niederschläge. Verbunden mit einer meist steigenden Varianz nehmen die Häufigkeiten sowohl extrem hoher- als auch extrem niedriger Niederschläge auf Kosten Mittlerer zu. Im Sommer ist in Deutschland weitgehendst das Gegenteil zu beobachten, v.a. in der Nordhälfte Deutschlands – ausgenommen Bayern und Teilregionen des Main und Mittelrheins. Die Ergebnisse inklusive der regionalen Strukturen sind sehr heterogen.
Sachsen/ Deutschland KLIWA in Sachsen (2005)	Trends: Bei Starkniederschlag (Tagessumme>20mm) wird in den Monaten Juli und August eine signifikante Zunahme der Häufigkeiten beobachtet
Deutschland/ Elbe (1501-) 1851-2004 Grünwald (2006)	Analysen langjähriger Hochwasserscheiteldurchflüsse und die Ergänzung historischer Hochwasserscheitel am Elbepegel Dresden belegen, dass es in der Vergangenheit weit größere Hochwässer gegeben hat als jenes z.B. vom August 2002. Ständiger Wandel des Klimas ist verknüpft mit dem ständigen Wandel im Auftreten, der Ausbildung und der Ausprägung hydrometeorologischer Extremereignisse.

<p>Deutschland 1951 – 2002 Petrow et al. (2008)</p>	<p>Hochwasserzeitreihen zwischen 1951 und 2002 wurden an 145 Pegeln in Deutschland analysiert. An einer erheblichen Anzahl von Pegeln wurden signifikante Trends detektiert. Räumliche und saisonale Muster treten hervor und sind in West-, Süd- und Mitteldeutschland besonders ausgeprägt. Im Winter treten größere Veränderungen als im Sommer auf. Die raum-zeitliche Kohärenz der Ergebnisse lässt auf klimabezogene Veränderungen im Hochwasserabfluss schließen. Der Vergleich zwischen stationärem und instationärem Extremwertmodell zeigt eine deutliche Verschiebung zu höheren Abflüssen.</p> <p>Anteil der Pegel [%] mit signifikanten Trends (Mann-Kendall Test)</p> <table border="1" data-bbox="453 533 1398 761"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">Anteil der Pegel [%] mit</th> </tr> <tr> <th>steigendem Trend</th> <th>fallendem Trend</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Jahreshochwasser</td> <td>28</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Sommerhochwasser</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Winterhochwasser</td> <td>23</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>		Anteil der Pegel [%] mit		steigendem Trend	fallendem Trend	Jahreshochwasser	28	1	Sommerhochwasser	10	10	Winterhochwasser	23	0
	Anteil der Pegel [%] mit														
	steigendem Trend	fallendem Trend													
Jahreshochwasser	28	1													
Sommerhochwasser	10	10													
Winterhochwasser	23	0													
<p>Deutschland (Donau, Rhein, Elbe Weser, Elbe) Petrow and Merz (2009)</p>	<p>Hochwasserzeitreihen zwischen 1951 und 2002 wurden an 145 Pegeln in Deutschland analysiert. Jahreshochwässer nehmen an den meisten Pegeln zu, die Winterhochwässer nehmen an allen untersuchten Pegeln signifikant zu.</p>  <p>Abbildung 3-12: Prozent der Pegel mit signifikanten Trends. Dunkelgraue Balken zeigen ansteigenden Trend, hellgraue Balken fallenden Trend. D= Donau. R= Rhein, W= Weser, E= Elbe. AMAXF= Jahreshochwässer, AWMAXF= Winterhochwässer, ASMAXF= Sommerhochwässer</p>														
<p>Deutschland Petrow (2009)</p>	<p>Trendanalysen in Deutschland zeigen, dass Hochwässer für einzelne Regionen im Winterhalbjahr signifikant steigen. Davon sind insbesondere Gebiete in Mitteldeutschland betroffen. Die Verschärfung der Hochwassergefahr durch eine längere Persistenz ausgewählter Großwetterlagen konnte ebenfalls für das Winterhalbjahr nachgewiesen werden. Sommerhochwässer zeigen zwar ebenfalls steigende, aber auch fallende Trends, die räumlich geclustert sind. Im Elbe- und Weser-Einzugsgebiet sinken die Abflüsse signifikant, im Donau- und Rheineinzugsgebiet steigen sie nachweisbar. Darüber hinaus ist eine signifikante Abnahme der Anzahl verschiedener Großwetterlagen sowohl im Sommer als auch im Winter zu verzeichnen. Bzgl. der Studie zum Mulde-Einzugsgebiet konnte ein zweigeteiltes Hochwasserregime nachgewiesen werden. In den Wintermonaten treten häufig kleine Hochwässer auf, die auch die Mehrheit der jährlichen</p>														

	<p>Maximalwerte bilden. Sommerhochwässer sind seltener, können aber extreme Ausmaße annehmen. Ein Vergleich der geschätzten Jährlichkeiten mit verschiedenen Zeitreihen zeigt die Notwendigkeit der Berücksichtigung saisonaler Aspekte für die Bemessung von Hochwässern.</p>
<p>Schweiz/Global -2100 OcCC/Extrema (2003)</p>	<p>Trends: Seit 1950 sind extrem tiefe Temperaturen seltener und extrem hohe Temperaturen etwas häufiger geworden. In mittleren und hohen nördlichen Breiten haben die Niederschläge im 20. Jahrhundert um ca. 0,5-1% pro Jahrzehnt zugenommen. Starke Niederschlagsereignisse sind in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts etwa um 2-4% häufiger geworden. Keine systematischen Änderungen konnten hingegen in der Häufigkeit von Tornados, Gewittertagen oder Hagelereignissen gefunden werden. Im 20. Jh. kann eine Zunahme intensiver Tagesniederschläge im Mittelland und am nördlichen Alpenrand beobachtet werden. Aussagen zur Veränderung von extremen Starkniederschlägen sind z.Z. nicht möglich. Die Trendanalysen der Hochwasserspitzen im 20.Jh. in der Schweiz zeigen keine signifikanten Veränderungen. In Gebieten des Mittellandes, in denen bereits heute Winterhochwässer auftreten, wird eine Zunahme der Hochwässer als wahrscheinlich angesehen.</p> <p>Aus den Trenduntersuchungen des 20. Jahrhunderts in der Schweiz sind keine einheitlichen Zu- oder Abnahmen in den Hochwasserspitzen abzuleiten.</p>
<p>Schweiz Bezzola, Hegg (2007)</p>	<p>Trends: Es wird darauf Bezug genommen, dass es aufgrund der Seltenheit extremer Starkniederschläge kaum möglich ist zu erfassen ob die Häufigkeit dieser Ereignisse (Bezug: August, 2005) zugenommen hat. Das Wissen über Trends im Verhalten von Starkniederschlägen stammt von kleineren Starkniederschlägen, die statistisch auswertbar sind. Das sind nicht unbedingt Ereignisse, welche Schäden hervorrufen.</p>
<p>Schweiz 1500-2007 Schmocker-Fackel and Naef (2010)</p>	<p>Hochwasseruntersuchungen für 14 Schweizer Gebiete seit dem Jahr 1500.</p> <p>Aussage: In allen Gebieten gibt es massive Schwankungen des Hochwasserregimes. In vier Perioden (P1-P4) mit 30-100 Jahren Länge waren die Hochwasser besonders intensiv. Die aktuelle Periode großer Hochwässer liegt im Rahmen der früher aufgetretenen Hochwasserperioden.</p>  <p>Abbildung 3-13: Hochwasserdekaden in 14 schweizerischen Einzugsgebieten: Schwarz Hochwasserdekaden in großen Gebieten zufolge langandauernder Niederschläge; grau: Hochwasserdekaden in kleinen Gebieten zufolge konvektiver Niederschläge</p>
<p>Österreich Godina (2005) Böhm et al. (2008)</p>	<p>Trenduntersuchungen maximaler jährlicher Hochwässer</p> <p>Aussagen: steigender Trend an der Salzach, fallender Trend an der Enns und kein bis leicht fallender Trend am Inn. Donau (1828-2005) leicht steigender Trend bei</p>

	kleinen Hochwässern, kein Trend bei großen Hochwässern. Zunahme der Winterhochwässer auf Kosten der Sommerhochwässer. Aus all den genannten Untersuchungen lassen sich insgesamt keine konsistenten klimainduzierten Veränderungen in den Abflussspitzen erkennen.
Österreich Böhm (2008a)	Die Untersuchungen von Klimazeitreihen zeigen keine Zunahme der Klimavariabilität im südlichen Mitteleuropa, bzw. sogar leichte Abnahmen. Die Zunahme von Trockenperioden und Starkniederschlägen findet am gleichen Ort nicht statt.
Österreich Godina (2009)	Bei Hochwässern ist kein eindeutiges Signal erkennbar.

3.4.3 Auswertungen in Österreich

Für die Trendanalysen wurden Reihen der maximalen Jährlichen Hochwässer sowie Reihen der maximalen Sommerhochwässer (Mai – Oktober) und Winterhochwässer (September – April) ausgewertet. Alle Hochwasserreihen wurden im Rahmen des HORA Projektes (Blöschl et al., 2006) qualitätsgeprüft. Die Plausibilitätsprüfung erfolgte manuell durch Vergleich mit den Nachbarstationen. Dafür erwies sich die Diskussion mit den Sachbearbeitern der jeweiligen Landesdienste als besonders wertvoll. Die Datenqualität wurde für jede Station in einheitlicher Weise eingeschätzt und eine Beschreibung in den Datensatz aufgenommen. Ein kleiner Teil der Werte wurde korrigiert, und einige Stationen wurden aus der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen. Etwaige Beeinflussungen durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen wurden in die Beschreibung aufgenommen. Außerdem wurden auffällige Größtwerte auf ihre hydrologische Entstehung hin untersucht. Einige der größten Durchflüsse waren Dammbrechwellen oder eine Folge von Verklausungen und deshalb gesondert zu behandeln. Bei einigen Stationen war es zu Verlegungen gekommen, die dazu führten, dass zwei Datenreihen in unmittelbarer Nachbarschaft vorlagen. Solche Reihen wurden kombiniert. Das Ergebnis dieser Analyse war ein nach einer einheitlichen Vorgangsweise kontrollierter und möglichst umfangreicher Datensatz der Jahreshöchstabflüsse in Österreich einschließlich einer Beschreibung der Datenqualität in Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Durchflusswerte. Die entsprechende Vorgangsweise und das Prüfprotokoll sind in Blöschl et al (2006) enthalten. Die Daten des HORA Projektes wurden sodann bis zum Jahr 2007 ergänzt. Insgesamt standen Hochwasserreihen von 950 Pegeln in Österreich zur Verfügung. Ein Teil davon wurde jedoch aus Qualitätsgründen ausgeschieden.

Für die Trendanalysen wurde der Mann-Kendall-Test (MK) herangezogen (Burn und Hag Elnur, 2002). Der Mann-Kendall -Test dürfte der am häufigsten verwendete Trendtest in der hydro-meteorologischen Literatur der letzten Jahre sein. Es handelt sich um einen robusten nicht-parametrischen Test, der auch bei nicht-normalverteilten Daten angewendet werden kann. Es wurde die zweiseitige Option mit einem Signifikanzniveau von 10 % gewählt (d.h. jeweils 5% an den beiden Enden der Verteilung). Der Mann-Kendall-Test erfordert seriell unabhängige Daten. Von Storch und Cannon (1995) zeigten, dass er bei einer positiven Autokorrelation der Zeitreihe die Signifikanz eines Trends überschätzt. Deshalb wurde das Verfahren des „Trend free pre-whitening“ angewendet (Yue et al., 2003). Als erstes wird der Trend einer Zeitreihe durch den nicht-parametrischen Schätzer nach Sen (1968) geschätzt. Diese Schätzung des Anstiegs β ist robuster als eine normale lineare Regression, wobei β der Median aller paarweisen Anstiege in der Zeitreihe ist:

$$\beta = \text{median} \left[\frac{x_j - x_i}{j - i} \right] \quad (1)$$

für alle $i < j$; x_i, x_j = Abflüsse in den Jahren i, j . Danach wird der berechnete Trend von der Originalreihe abgezogen:

$$Y_t = X_t - \beta * t \quad (2)$$

$$X_t \quad \text{Originalzeitreihe}$$

$$t \quad \text{Zeit}$$

Im dritten Schritt wird die Lag1-Autokorrelation berechnet. Falls keine signifikante Korrelation ermittelt wird, wird der Mann-Kendall-Test direkt auf die Originalzeitreihe angewendet. Andernfalls wird die Autokorrelation von der Zeitreihe entfernt:

$$Y_t' = Y_t - acf * Y_{t-1} \quad (3)$$

Die Zeitreihe Y_t' sollte nun frei von einem Trend und serieller Korrelation sein. Zuletzt wird der am Anfang abgezogene Trend eingefügt:

$$Y_t'' = Y_t' + \beta * t \quad (4)$$

Die resultierende Zeitreihe Y_t'' enthält nun den Original-Trend, ist jedoch ohne Autokorrelation. Zu beachten ist, dass in den Mann-Kendall-Test die Größe der Hochwässer nur in ihrem relativen Wert zu den anderen Hochwässern einfließt, er ist also nicht auf Ausreißer sensitiv.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Trendanalysen für Österreich. Blau zeigt steigende Trends, rot zeigt fallende Trends und die schwarzen Kreise zeigen keinen signifikanten Trend. Die Zahlen bedeuten den Anstieg der Trendgeraden pro Jahr. Ein Wert von 0.005 bedeutet etwa einen Anstieg der Hochwässer von 5% in 10 Jahren. Mit den Abbildungen und Tabellen ergibt sich die folgende Interpretation. Für den Zeitraum 1976-2007 zeigt sich, dass 20% der Stationen einen signifikant steigenden Trend aufweisen, jedoch nur 5% der Stationen einen fallenden Trend (Tabelle 3-2). Eine Unterscheidung nach der Gebietsgröße (Tabelle 3-3 und

Tabelle 3-4 sowie Abbildungen) zeigt, dass es sich bei den steigenden Trends vor allem um Gebiete mit Flächen kleiner 500 km² handelt. Diese liegen vor allem (aber nicht ausschließlich) nördlich des Alpenhauptkammes. Wird wiederum unterschieden nach Sommer und Winterereignissen, so sind bei den Winterereignissen durchwegs steigende Trends festzustellen. Bei den Sommerereignissen gibt es wesentlich weniger steigende Trends und einige fallende Trends.

Erweitert man die Trendanalyse auf den Zeitraum 1955-2007, so fallen die Trends weit weniger signifikant aus. Das bedeutet, dass im Zeitraum 1955-1975 große Hochwässer aufgetreten sind wie etwa die Ereignisse 1965 und 1966 in Südösterreich. Diese Jahre führen auch vereinzelt zu fallenden Trends.

Für die gesamte Reihe bis 2007 (beginnend, je nach Station ab 1820) mit mindestens 80 Jahren liegen unterschiedliche Trends vor, wobei wiederum die steigenden Trends dominieren, insbesondere an der Donau und in Oberösterreich.

Die Interpretation der Trends erfolgt zielführend an Hand ausgewählter Zeitreihen in den Regionen:

- Rheingebiet: Das Hochwasserereignis 2005 dominiert die Zeitreihen (z.B. Mellau), im Süden Vorarlbergs liegen jedoch negative Trends vor (z.B. Hoher Steg)
- Tiroler Inn und Zubringer: In Westtirol dominiert wieder das Ereignis 2005, im Süden und Osten liegen jedoch andere große Ereignisse vor, sodass kein Trend abzulesen ist.
- Salzach, Traun, Enns und Zubringer: Hier sind besonders in den letzten zwei Jahrzehnten vermehrt Hochwasser (große und kleine) festzustellen. An der Steyr und Traun waren jedoch die Ereignisse 1897, 1899 größer als die im 20. Jahrhundert.

- Innviertel, Mühlviertel: Keine auffälligen Trends. Im Mühl- und Waldviertel sticht das Ereignis 2002 heraus (z.B. Zwettl).
- Osten Österreichs: Wiederum starke steigende Trends in den letzten drei Jahrzehnten (z.B. Hirtenberg), die sich bei Betrachtung einer längeren Reihe (z.B. Deutsch Brodersdorf) relativieren.
- Donau: Es sind steigende Trends seit 1850 in den kleinen Hochwässern, keine Trends in den großen Hochwässern abzulesen.
- Mur und Zubringer: Keine offensichtlichen Trends in den Hochwasserzeitreihen.
- Drau und Zubringer: Die Hochwässer 1965 und 1966 dominieren in allen langen Reihen. Die Gail weist steigende Trends kleiner Hochwässer auf.

HQ Jahreswerte

Periode: bis 2007 (mind. 80 Jahre)

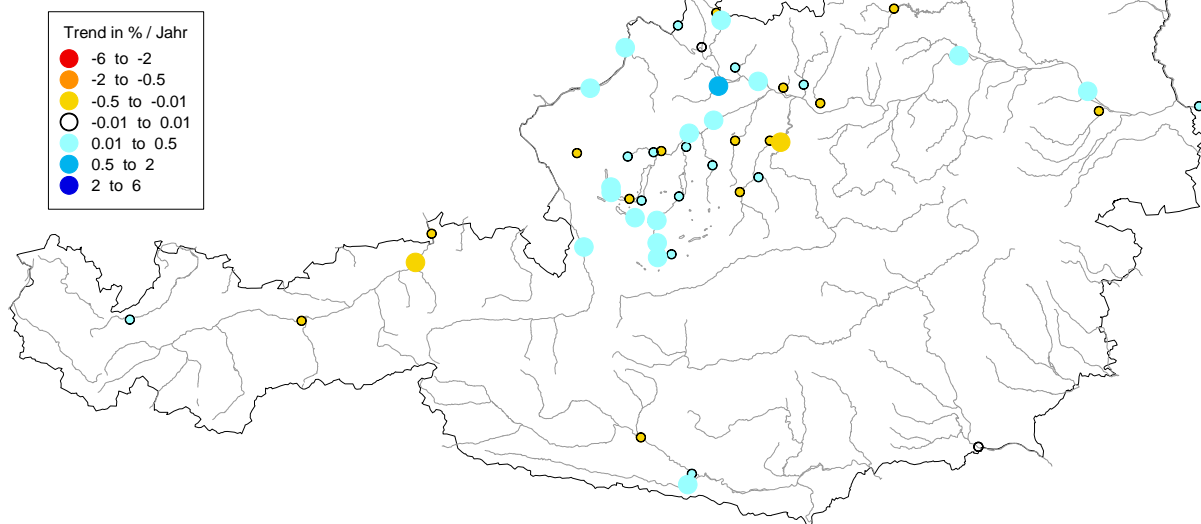
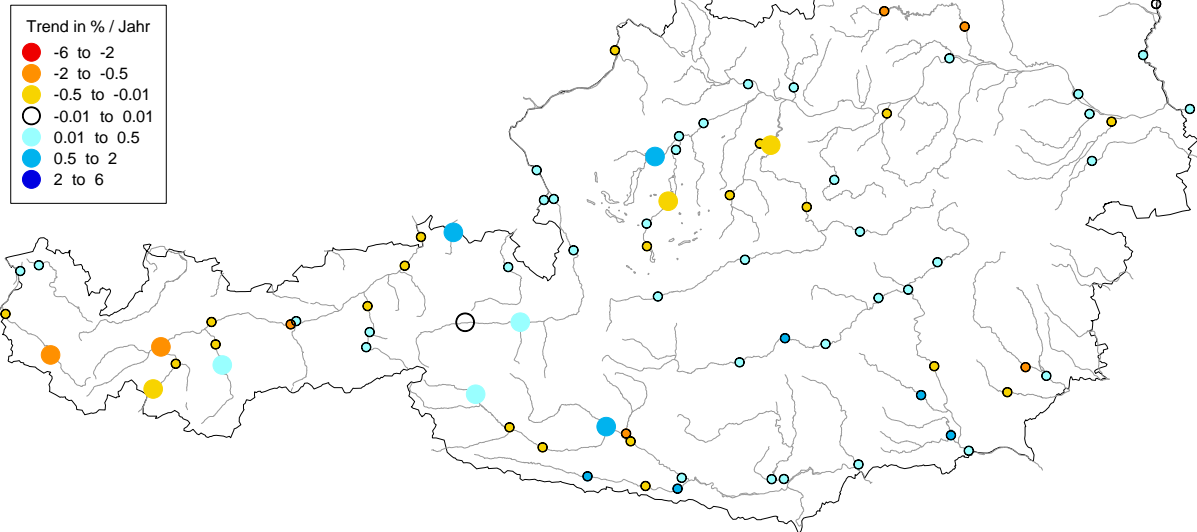


Abbildung 3-14: Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die gesamte Reihe bis 2007 mit mindestens 80 Jahren. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.

HQ Jahreswerte
 Periode 1955 - 2007 (mind. 40 Jahre)
 Gebietsfläche $A > 500 \text{ km}^2$



HQ Jahreswerte
 Periode 1955 - 2007 (mind. 40 Jahre)
 Gebietsfläche $A < 500 \text{ km}^2$

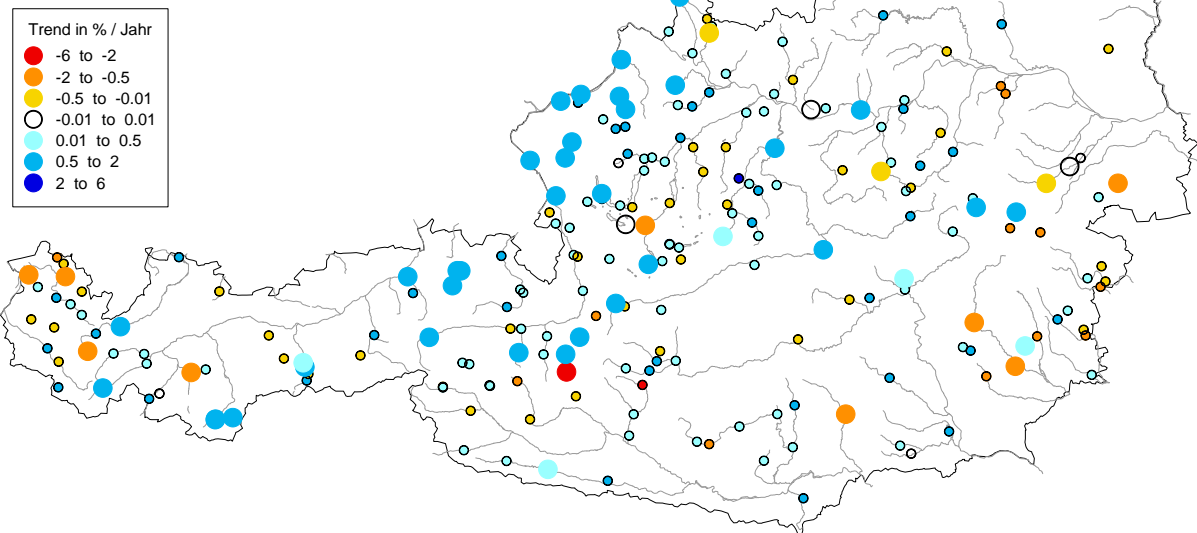
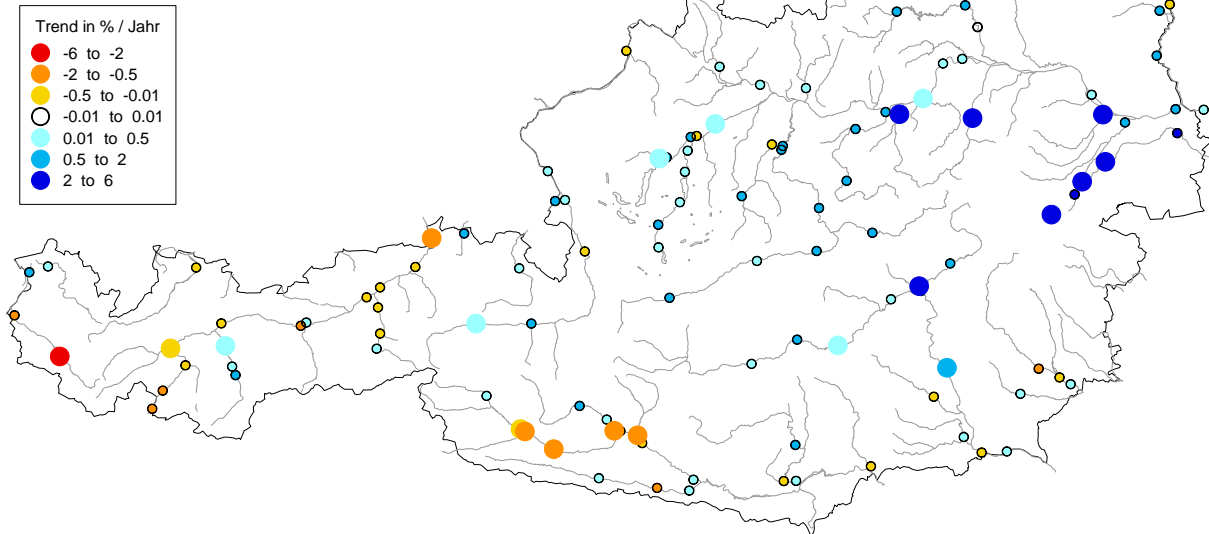


Abbildung 3-15: Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1955-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Oben: Gebiete größer 500 km^2 , unten: Gebiete kleiner 500 km^2 .

HQ Jahreswerte
 Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)
 Gebietsfläche $A > 500 \text{ km}^2$



HQ Jahreswerte
 Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)
 Gebietsfläche $A < 500 \text{ km}^2$

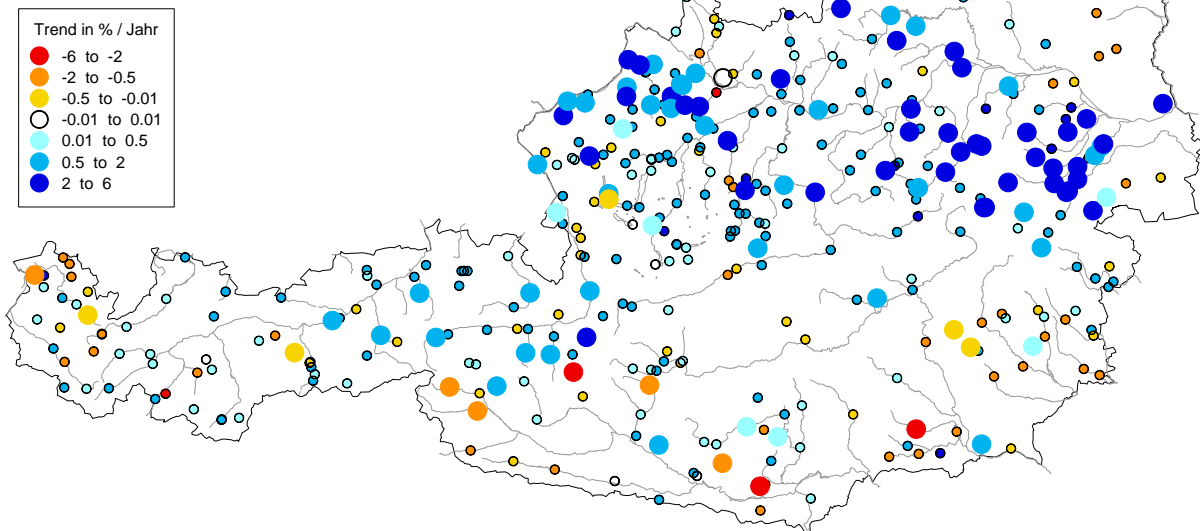
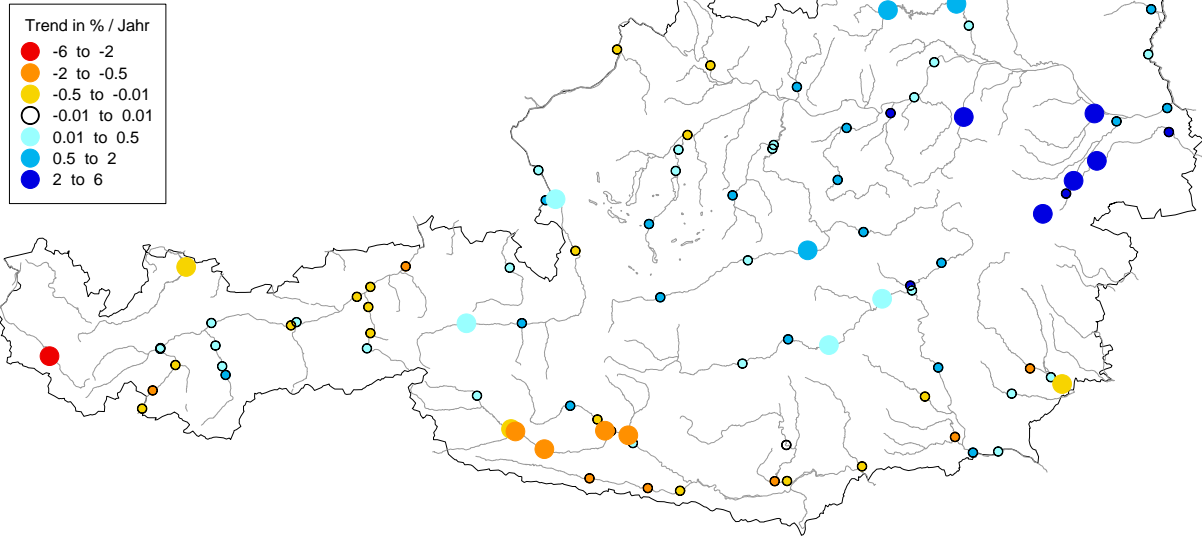


Abbildung 3-16: Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Oben: Gebiete größer 500 km^2 , unten: Gebiete kleiner 500 km^2 .

Sommer HQ
 Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)
 Gebietsfläche $A > 500 \text{ km}^2$



Sommer HQ
 Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)
 Gebietsfläche $A < 500 \text{ km}^2$

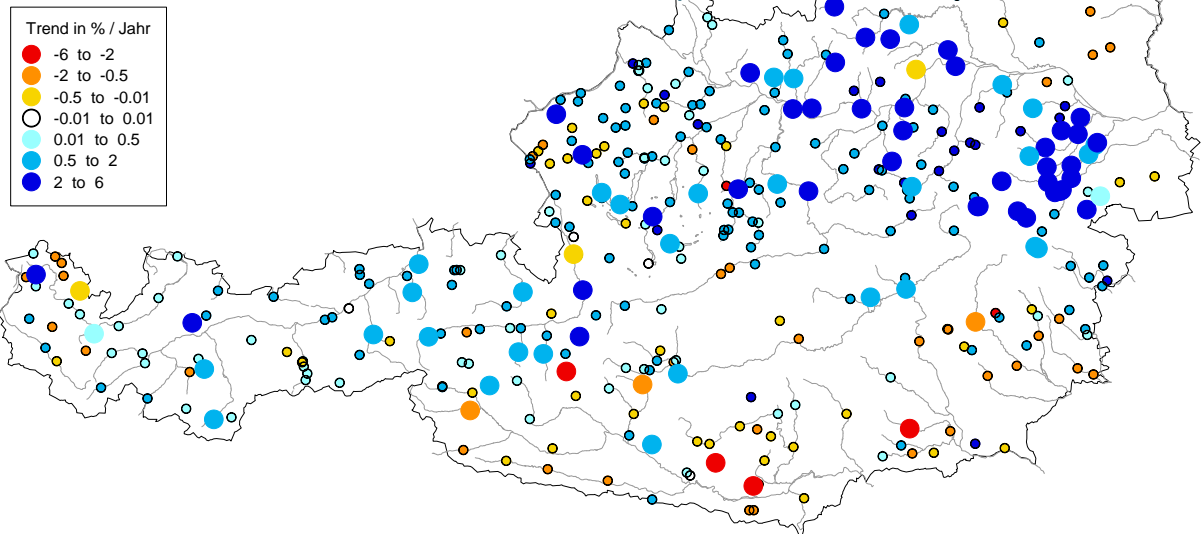
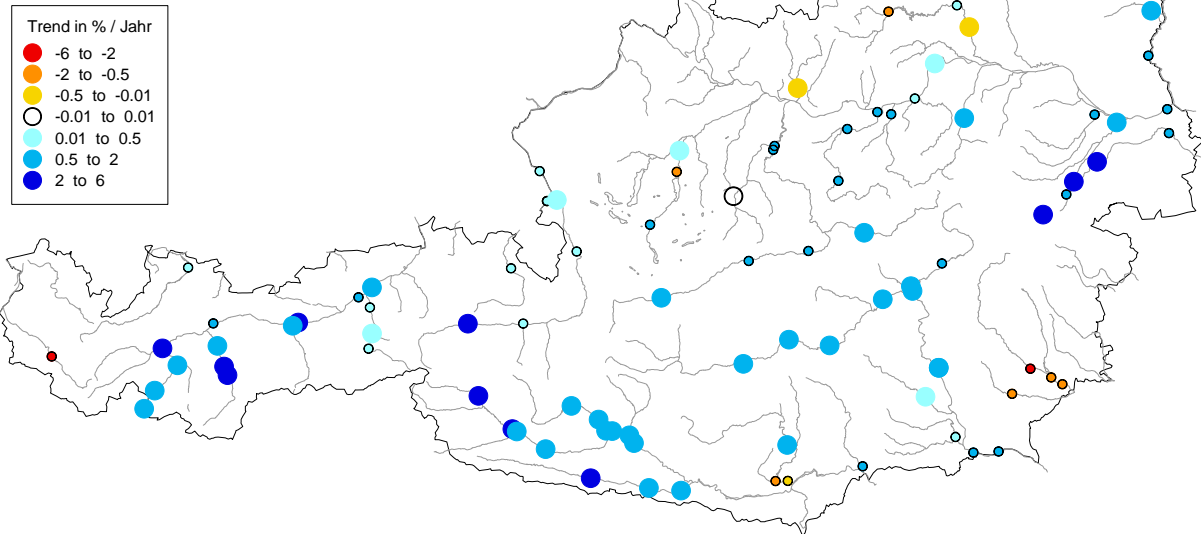


Abbildung 3-17: Trends der Sommermaxima der Hochwässer für die Reihe 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Oben: Gebiete größer 500 km^2 , unten: Gebiete kleiner 500 km^2 .

Winter HQ
 Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)
 Gebietsfläche $A > 500 \text{ km}^2$



Winter HQ
 Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)
 Gebietsfläche $A < 500 \text{ km}^2$

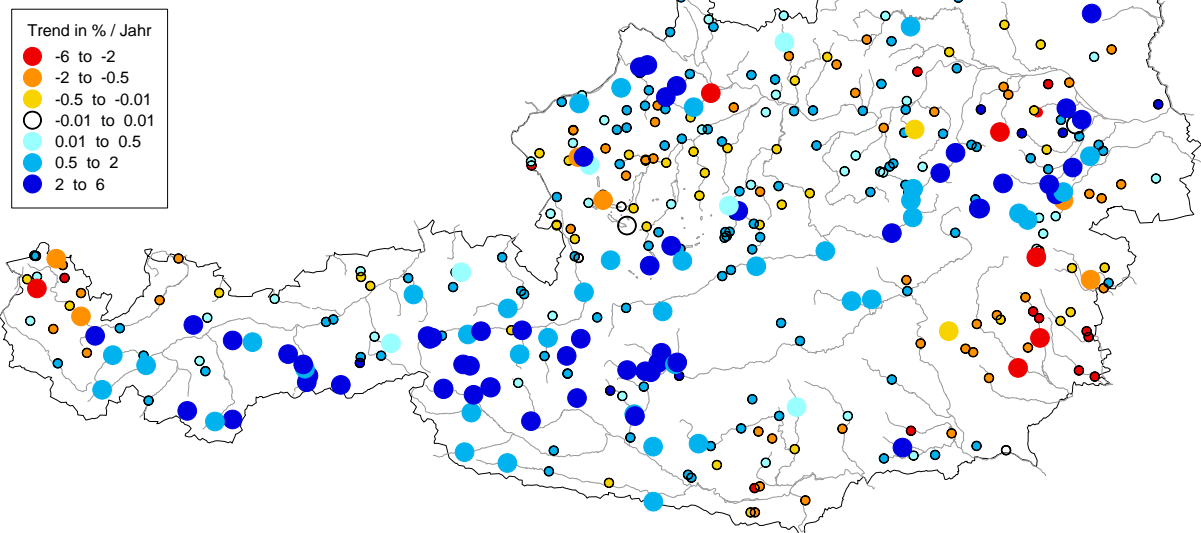
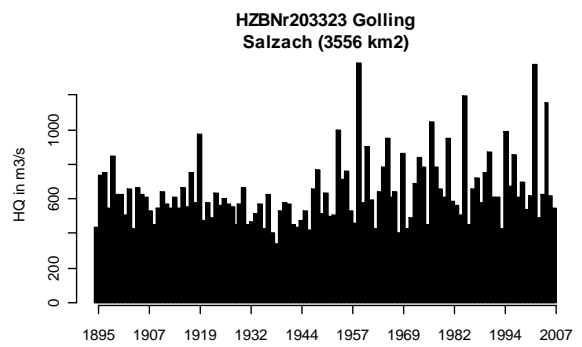
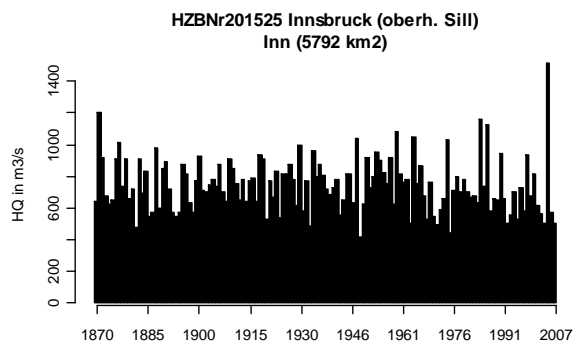
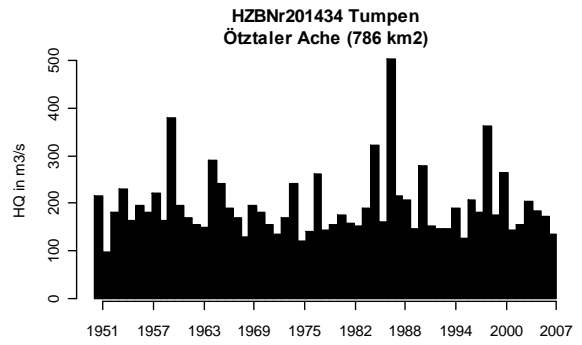
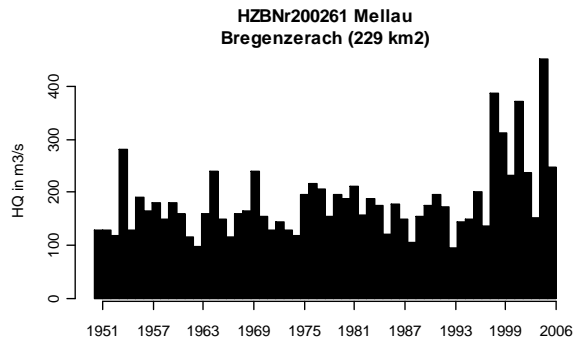
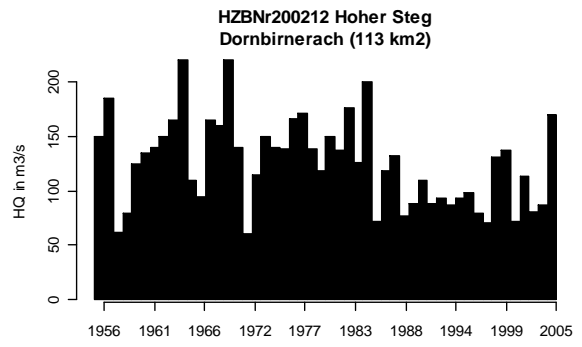
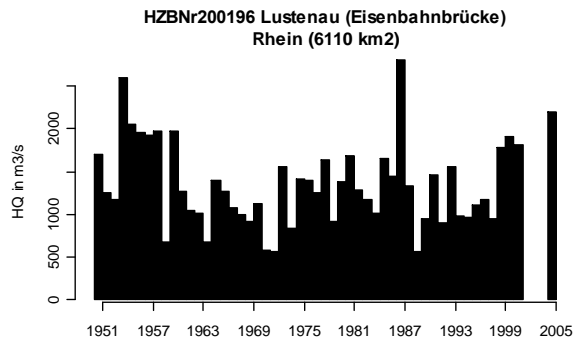
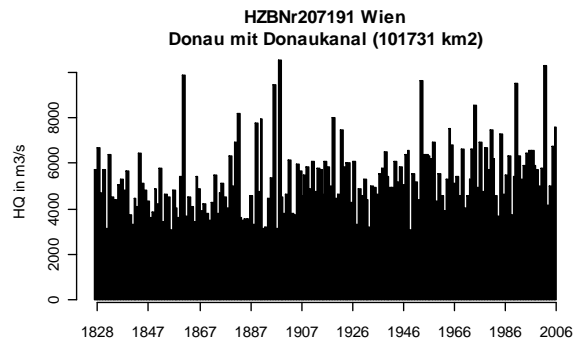
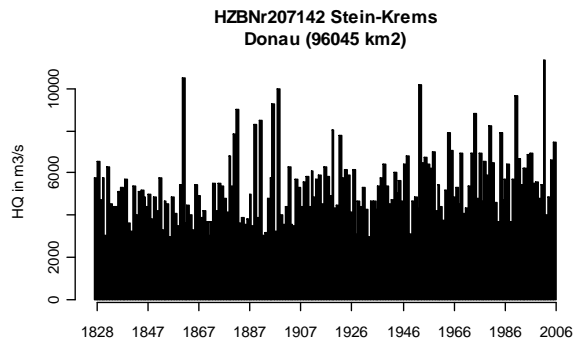
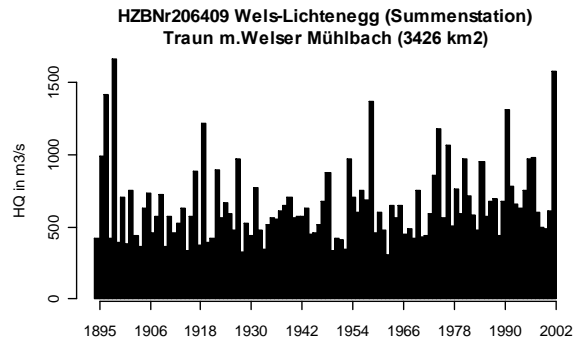
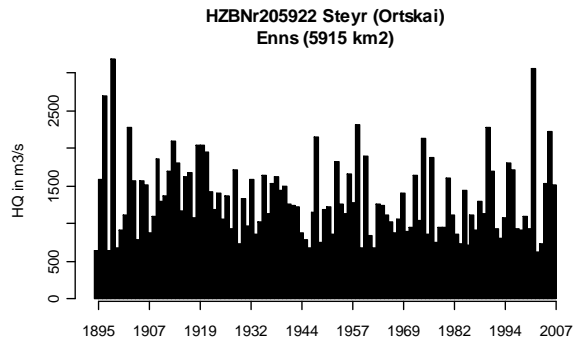
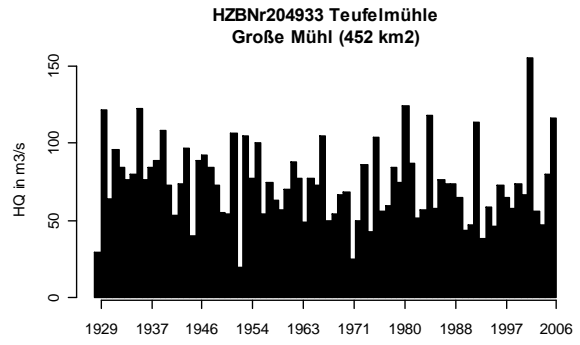
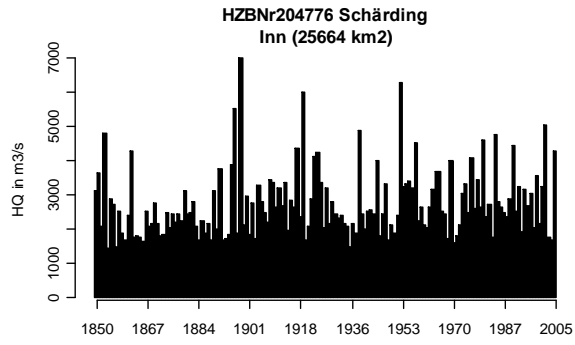
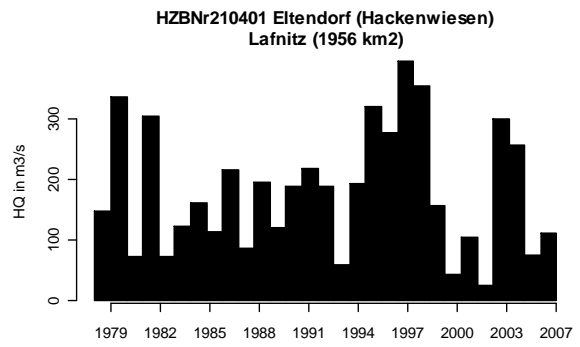
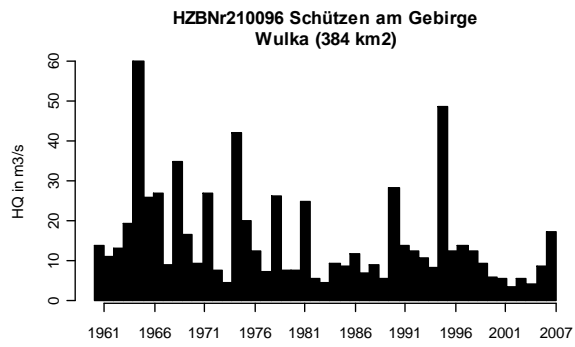
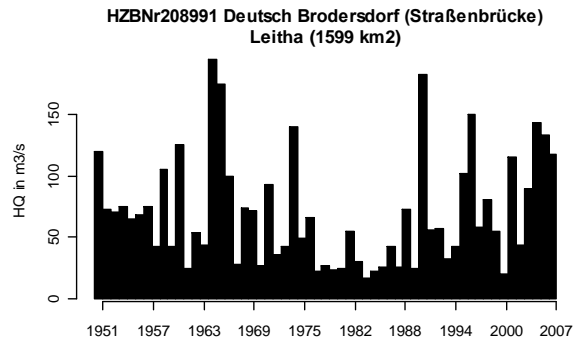
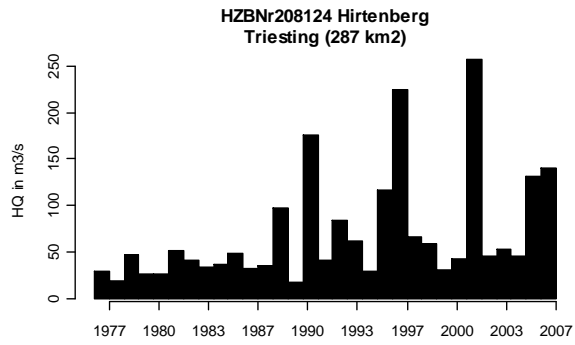
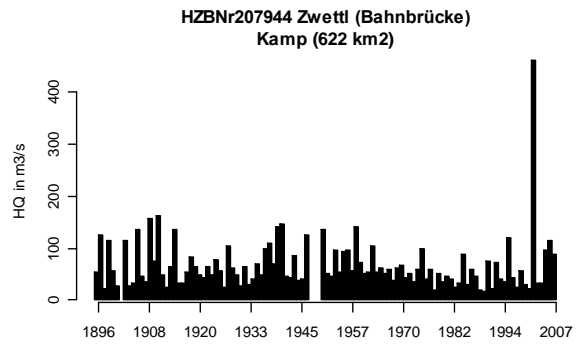
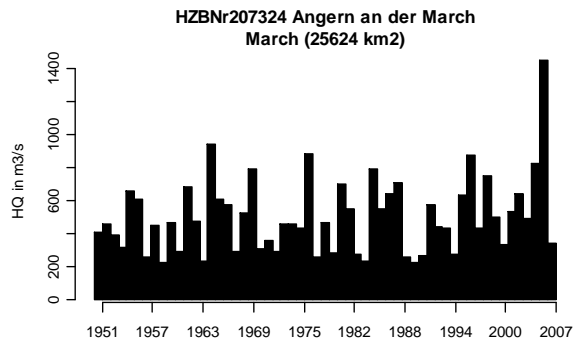
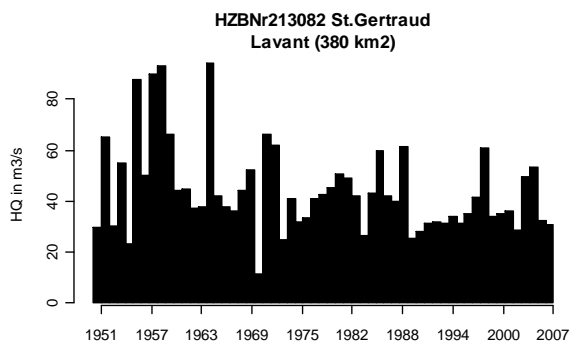
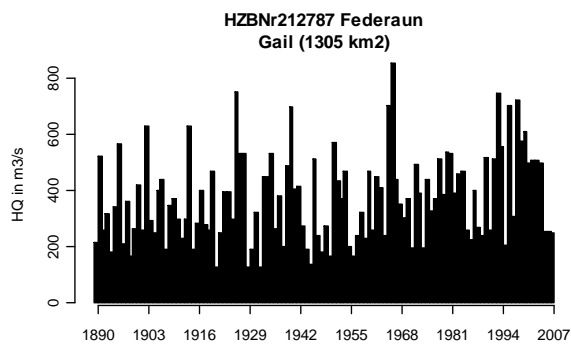
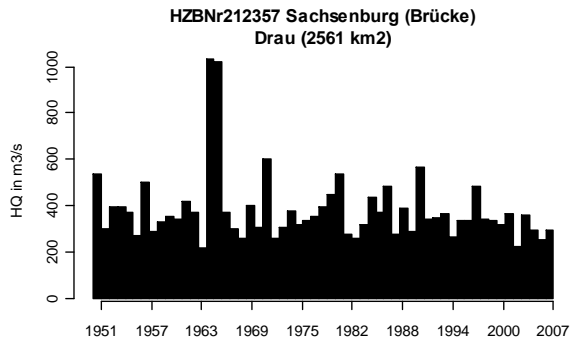
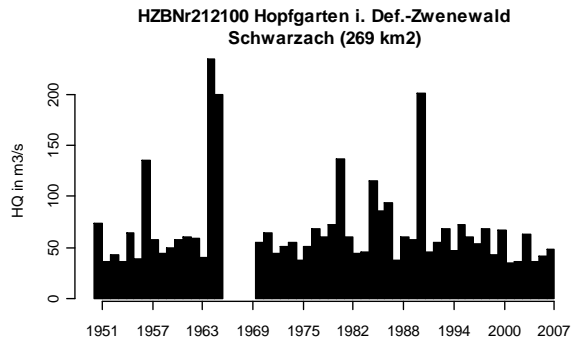
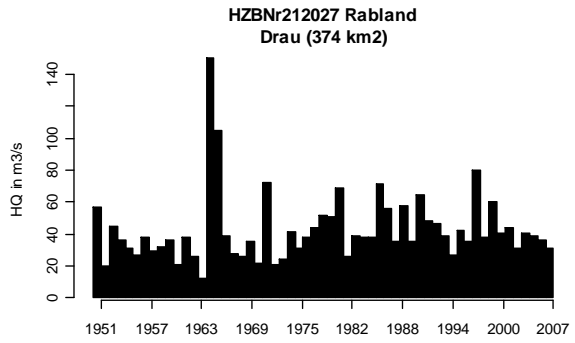
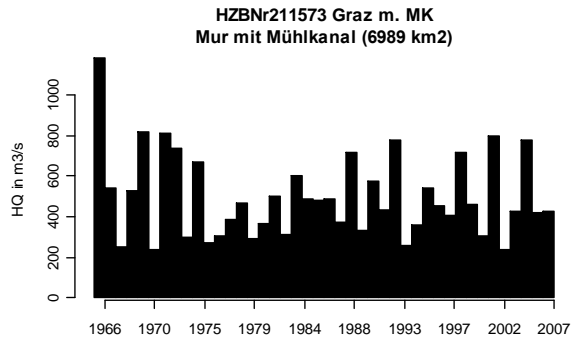


Abbildung 3-18: Trends der Wintermaxima der Hochwässer für die Reihe 1976-2007. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Oben: Gebiete größer 500 km^2 , unten: Gebiete kleiner 500 km^2 .









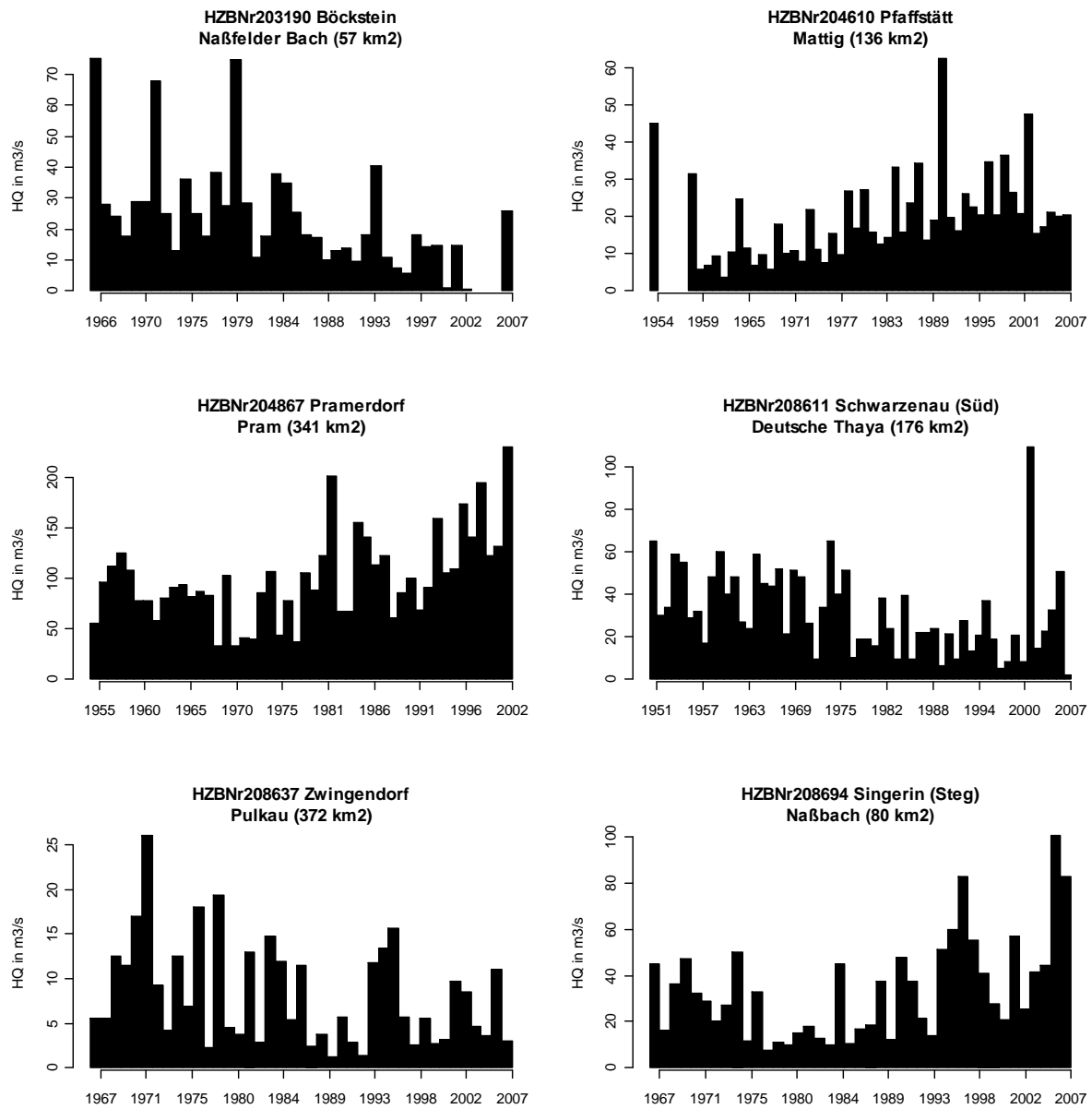
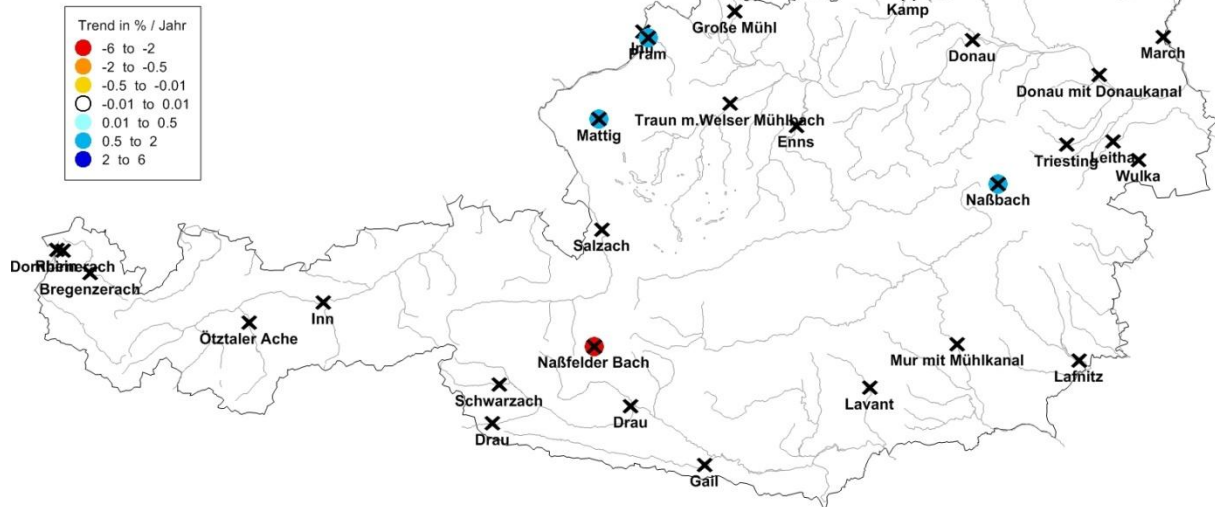


Abbildung 3-19: Zeitreihen der Hochwässer in ausgewählten Einzugsgebieten. Gezeigt ist der maximale jährliche Hochwasserdurchfluss in m³/s.

Ausgewählte Pegel



Ausgewählte Pegel

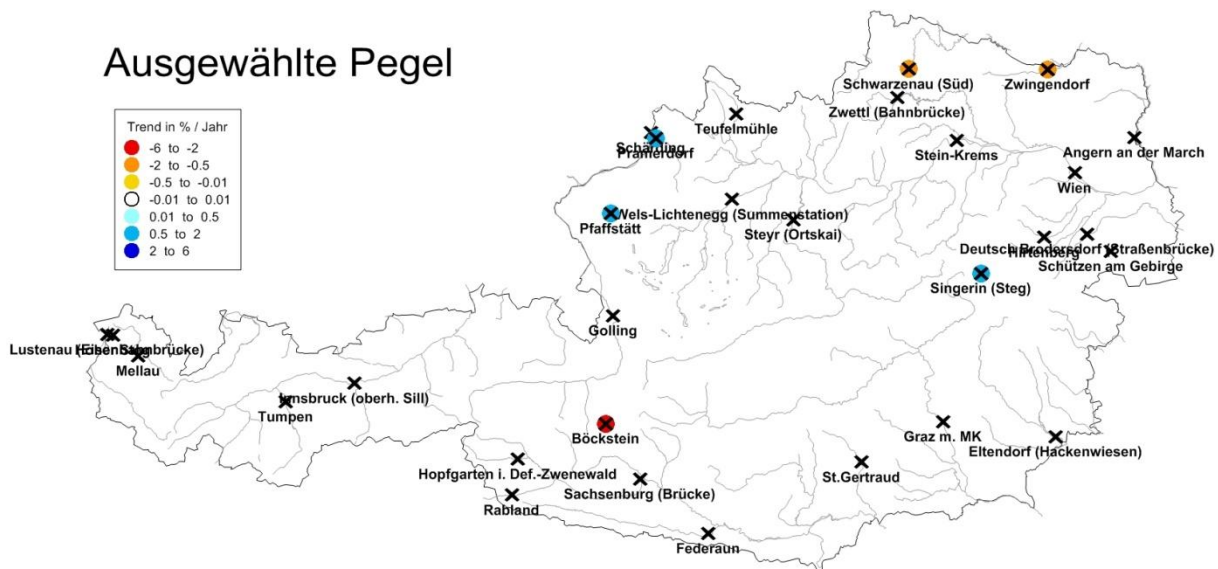


Abbildung 3-20: Lage der ausgewählten Pegel. Oben: Gerinnenname. Unten: Pegelname.

Tabelle 3-2: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Hochwässer in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%.)

	1976-2007		1955-2007		Gesamte Reihe - 2007 (>80Jahre)	
	Anteil d. Pegel [%] mit		Anteil d. Pegel [%] mit		Anteil d. Pegel [%] mit	
	steigendem Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	fallendem Trend
Jahreshochwasser	20	5	14	8	31	5
Sommerhochwasser	18	4	-	-	-	-
Winterhochwasser	30	4	-	-	-	-

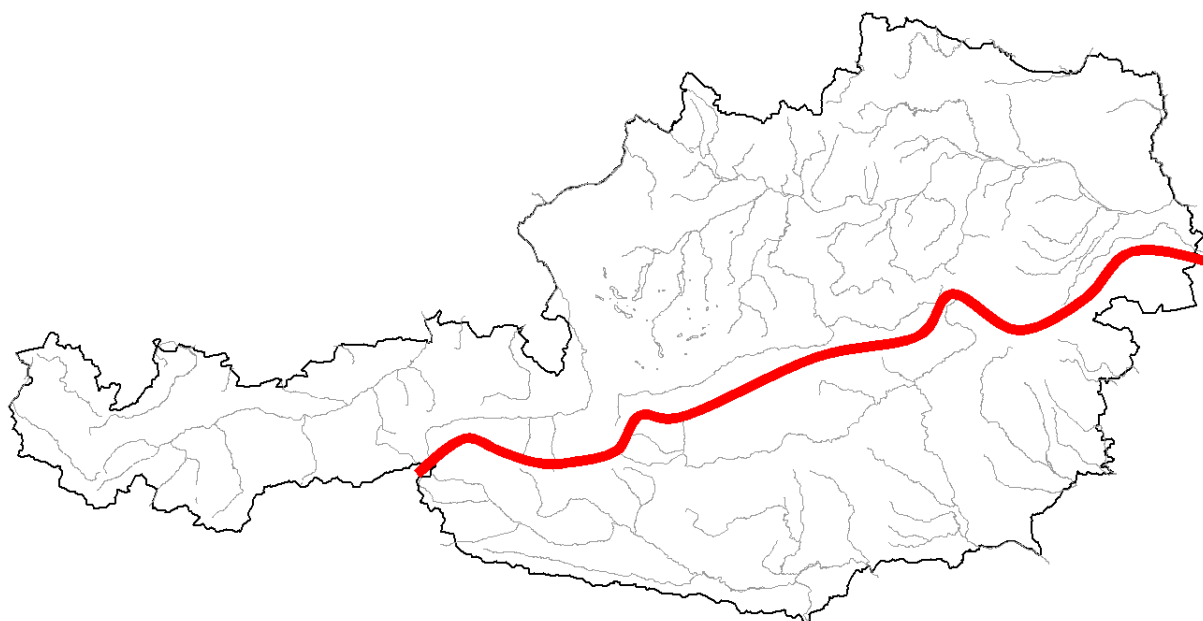


Abbildung 3-21: Unterscheidung der Trendauswertungen nach nördlichen und südlichen Flussgebieten.

Tabelle 3-3: Anzahl der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Hochwässer in Österreich (Oben) sowie nördlich (Mitte) und südlich (Unten) des Alpenhauptkammes. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Österreich	Trend	1976-2007		1955-2007		Gesamte Reihe - 2007 (>80Jahre)	
		>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²
Jahreshochwasser	steigend	14	86	6	38	10	7
	nicht signif.	94	293	71	174	14	21
	fallend	8	17	6	18	2	1
Sommerhochwasser	steigend	13	74	-	-	-	-
	nicht signif.	74	294	-	-	-	-
	fallend	8	10	-	-	-	-
Winterhochwasser	steigend	47	100	-	-	-	-
	nicht signif.	45	275	-	-	-	-
	fallend	2	15	-	-	-	-

Rhein, Donau und Elbegebiete in Österreich	Trend	1976-2007		1955-2007		Gesamte Reihe - 2007 (>80Jahre)	
		>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²
Jahreshochwasser	steigend	11	77	4	35	9	7
	nicht signif.	67	220	46	122	11	21
	fallend	3	9	6	14	2	1
Sommerhochwasser	steigend	11	67	-	-	-	-
	nicht signif.	48	212	-	-	-	-

	fallend	2	4	-	-	-	-
Winterhochwasser	steigend	25	72	-	-	-	-
	nicht signif.	33	209	-	-	-	-
	fallend	2	11	-	-	-	-

Drau, Mur und Raabgebiete in Österreich	Trend	1976-2007		1955-2007		Gesamte Reihe - 2007 (>80Jahre)	
		>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²
Jahreshochwasser	steigend	3	9	2	3	1	0
	nicht signif.	27	73	25	52	3	0
	fallend	5	8	0	4	0	0
Sommerhochwasser	steigend	2	7	-	-	-	-
	nicht signif.	26	82	-	-	-	-
	fallend	6	6	-	-	-	-
Winterhochwasser	steigend	22	28	-	-	-	-
	nicht signif.	12	66	-	-	-	-
	fallend	0	4	-	-	-	-

Tabelle 3-4: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Hochwässer in Österreich (Oben) sowie nördlich (Mitte) und südlich (Unten) des Alpenhauptkammes. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Österreich	Trend	1976-2007		1955-2007		Gesamte Reihe - 2007 (>80Jahre)	
		>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²
Jahreshochwasser	steigend	12	22	7	17	38	24
	nicht signif.	81	74	86	75	54	73
	fallend	7	4	7	8	8	3
Sommerhochwasser	steigend	14	20	-	-	-	-
	nicht signif.	78	78	-	-	-	-
	fallend	8	2	-	-	-	-
Winterhochwasser	steigend	50	26	-	-	-	-
	nicht signif.	48	70	-	-	-	-
	fallend	8	4	-	-	-	-

Rhein, Donau und Elbegebiete in Österreich	Trend	1976-2007		1955-2007		Gesamte Reihe - 2007 (>80Jahre)	
		>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²
Jahreshochwasser	steigend	14	25	7	21	41	24
	nicht signif.	82	72	82	71	50	73

	fallend	4	3	11	8	9	3
Sommerhochwasser	steigend	18	24	-	-	-	-
	nicht signif.	79	75	-	-	-	-
	fallend	3	1	-	-	-	-
Winterhochwasser	steigend	42	25	-	-	-	-
	nicht signif.	55	71	-	-	-	-
	fallend	3	4	-	-	-	-

Drau, Mur und Raabgebiete in Österreich	Trend	1976-2007		1955-2007		Gesamte Reihe - 2007 (>80Jahre)	
		>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²	>500km ²	<500km ²
Jahreshochwasser	steigend	9	10	7	5	25	0
	nicht signif.	77	81	93	88	75	0
	fallend	14	9	0	7	0	0
Sommerhochwasser	steigend	6	7	-	-	-	-
	nicht signif.	76	86	-	-	-	-
	fallend	18	6	-	-	-	-
Winterhochwasser	steigend	65	29	-	-	-	-
	nicht signif.	35	67	-	-	-	-
	fallend	0	4	-	-	-	-

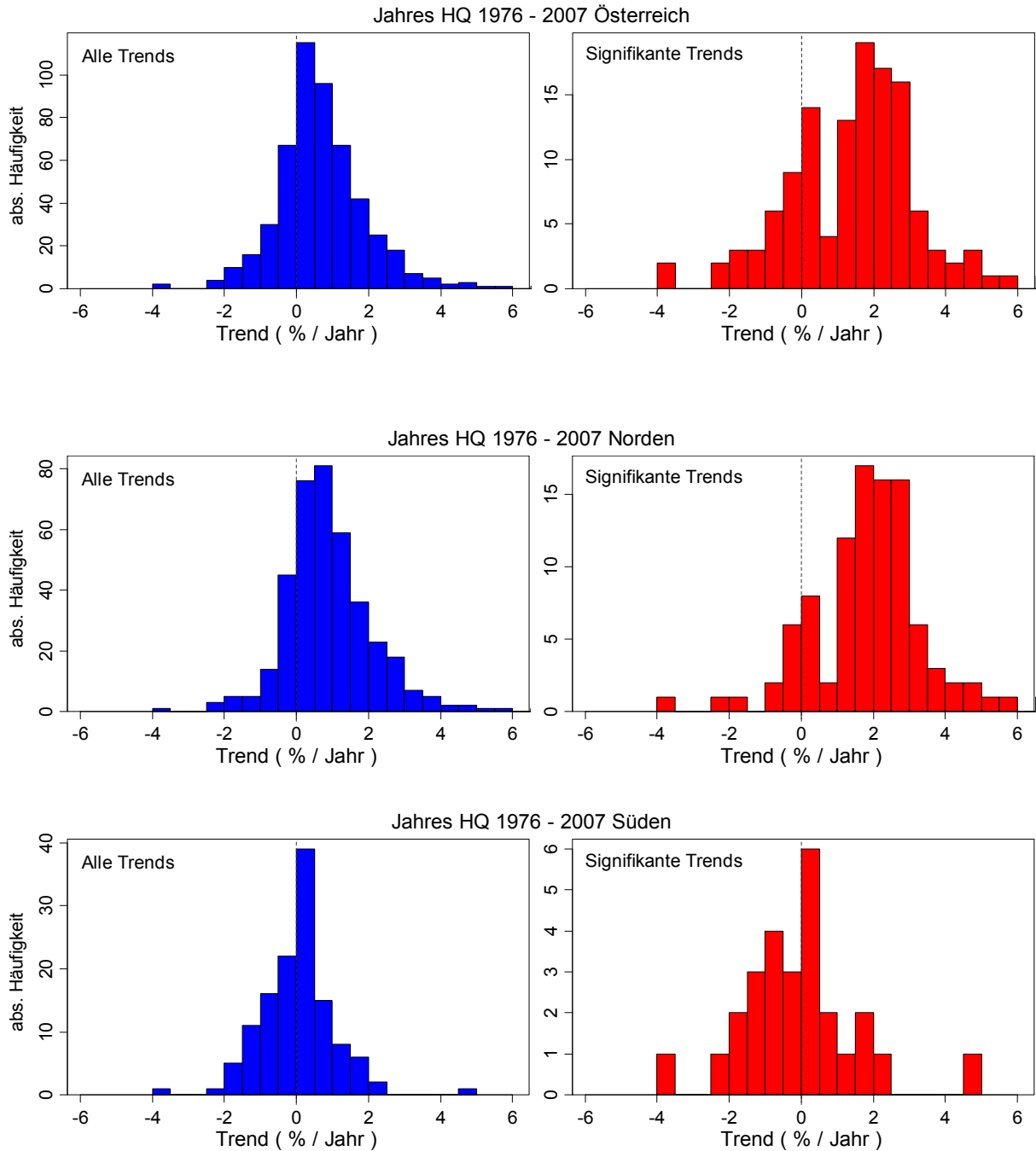


Abbildung 3-22: Histogramme der Trends in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Flussgebiete. Unten: südliche Flussgebiete lt. Abbildung 3-21 und Tabelle 3-3.

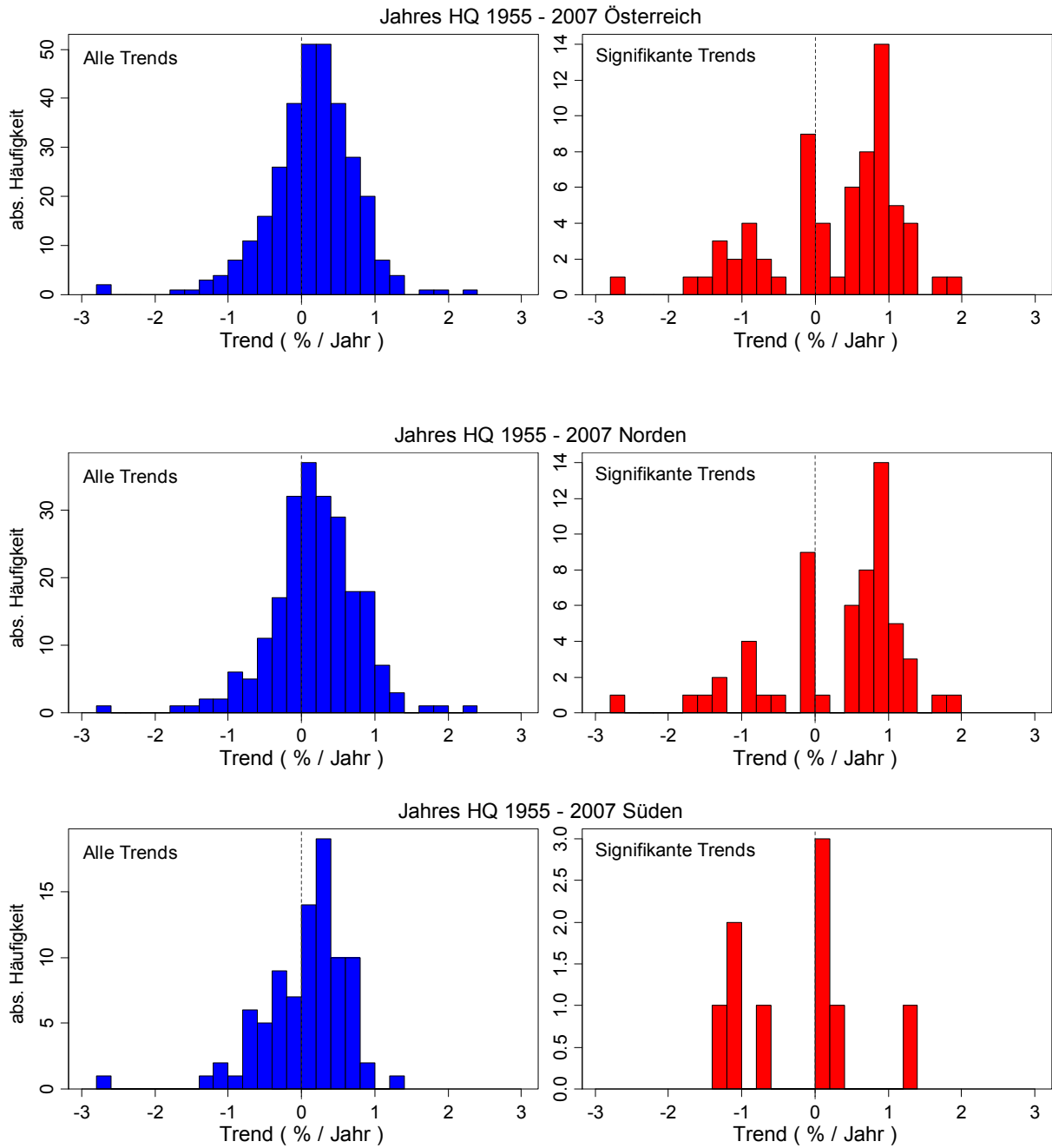


Abbildung 3-23: Histogramme der Trends in der Periode 1955 – 2007, mit mindestens 40 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Flussgebiete. Unten: südliche Flussgebiete lt. Abbildung 3-21 und Tabelle 3-3.

Tabelle 3-5: Anzahl der Pegel mit steigenden (steig) und fallenden (fall) Trends der Hochwässer in den HQ – Regionen (siehe Abbildung 3-29).

	Jahres HQ 1955 – 2007			Jahres HQ 1976 – 2007			Sommer HQ 1976 – 2007			Winter HQ 1976 – 2007		
	steig	nicht sign.	fall	steig	nicht sign.	fall	steig	nicht sign.	fall	steig	nicht sign.	fall
1. Vorarlb. Süd, südl. Innzubringer in Tirol	7	26	5	3	47	3	3	44	1	26	22	3
2. Vorarlb. Nord, Lech	1	11	2	0	17	2	2	12	2	1	14	3
3. Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach	9	24	0	5	38	1	6	36	1	7	33	0
4. Traun, Enns, Erlauf, Traisen und Zubringer	5	37	3	15	59	1	13	56	0	19	48	3
5. Innviertel, Mühlviertel	10	35	3	25	66	0	8	62	0	11	56	3
6. Waldviertel	1	14	1	10	23	2	12	20	1	2	29	1
7. Osten Österreichs	2	22	3	24	42	0	29	36	0	18	49	4
8. Mur, Mürz und Zubringer, Gurk, Raab	3	44	3	10	58	5	7	61	5	24	49	2
9. Obere Salzach, Isel, Möll	8	24	1	7	28	9	7	31	8	34	15	0
10. Gail u. Zubringer	1	6	0	0	9	0	0	10	0	6	4	0

Tabelle 3-6: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Hochwässer in den HQ – Regionen (siehe Abbildung 3-29).

	Jahres HQ 1955 – 2007			Jahres HQ 1976 – 2007			Sommer HQ 1976 – 2007			Winter HQ 1976 – 2007		
	steig	nicht sign.	fall	steig	nicht sign.	fall	steig	nicht sign.	fall	steig	nicht sign.	fall
1. Voralb. Süd, südl. Innzubringer in Tirol	18	68	14	6	88	6	6	92	2	51	43	6
2. Voralb. Nord, Lech	7	79	14	0	89	11	13	74	13	6	77	17
3. Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach	27	73	0	12	86	2	14	84	2	18	82	0
4. Traun, Enns, Erlauf, Traisen und Zubringer	11	82	7	20	79	1	19	81	0	27	69	4
5. Innviertel, Mühlviertel	21	73	6	27	73	0	11	89	0	16	80	4
6. Waldviertel	6	88	6	29	65	6	36	61	3	6	91	3
7. Osten Österreichs	7	82	11	36	64	0	45	55	0	25	69	6
8. Mur, Mürz und Zubringer, Gurk, Raab	6	88	6	14	79	7	10	83	7	32	65	3
9. Obere Salzach, Isel, Möll	24	73	3	16	64	20	15	68	17	69	31	0
10. Gail u. Zubringer	14	86	0	0	100	0	0	100	0	60	40	0

3.5 Situation in der Zukunft

3.5.1 Interpretation von Szenarien und Unsicherheiten

Fazit:

- Klimaimpaktanalysen sollten verstärkt untersuchen, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen simuliert werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen.

Als erste Abschätzung ist zu erwarten, dass die Reihung von harten bis weichen Fakten der entsprechenden Reihung der Aussageschärfe der wesentlichsten Einflussfaktoren bzw. Prozessen entspricht. Für solche Prozesse, bei denen die Lufttemperatur ein wichtiger Einflussfaktor ist (z.B. Schneeschmelze, Schneerückhalt), ist zu erwarten, dass die Durchsicht der Literatur harte Fakten ergeben wird. Für solche Prozesse, bei denen der Niederschlag ein wichtiger Einflussfaktor ist, ist zu erwarten, dass die Durchsicht der Literatur mittelharte bis weiche Fakten ergeben wird. Für solche Prozesse, bei denen

meteorologische Extrema wichtige Einflussfaktoren sind, ist zu erwarten, dass die Durchsicht der Literatur weiche bis spekulative Fakten ergeben wird.

Klimaimpaktanalysen bestehen in der Regel aus drei Schritten: (a) Simulationen mit einem oder mehreren Globalen Zirkulationsmodellen (GCMs) unter Definition bestimmter Szenarien (meist IPCC Szenarien); (b) Downscaling der Lufttemperatur, Niederschlag und anderer Ergebnisse des GCM von der Rasterweite des Klimamodells (ca. 200km) auf eine Rasterweite, die für die hydrologische Modellierung geeignet ist (wenige km). Dabei muss die Varianz der Klimavariablen vergrößert werden und der systematische Fehler reduziert werden. (c) Modellierung mit einem Niederschlag-Abflussmodell unter Verwendung der Ergebnisse des Downscalings (Niederschlag, Lufttemperatur, ...). Bei jedem dieser Schritte treten große Unsicherheiten auf, die die Szenarienanalysen erheblich verfälschen können. Es ist dann leicht möglich, dass Szenarienstudien Veränderungen angeben, die weder interpretiert noch auf Plausibilität geprüft werden können. Das ist eine unbefriedigende Situation. Blöschl and Montanari (2009) schlagen deshalb vor, dass Klimaimpaktanalysen verstärkt untersuchen sollten, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen hervorgerufen werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen. Dies ist auch der Ansatz, der in dieser Studie verfolgt wird. Unter diesem Gesichtspunkt sind auch die Ergebnisse der Szenarien der Literatur (folgender Abschnitt) zu interpretieren.

3.5.2 Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur

Fazit

- Prognosen über Hochwasseränderungen sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da die zukünftige Entwicklung der Extremwerte des Klimas nicht ausreichend zuverlässig berechnet werden kann.
- Szenarienrechnungen aus der Literatur über zukünftige Änderungen der Hochwasser in Österreichischen Flüssen unterscheiden sich erheblich.
- Klimaimpaktanalysen sollten verstärkt untersuchen, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen simuliert werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen.

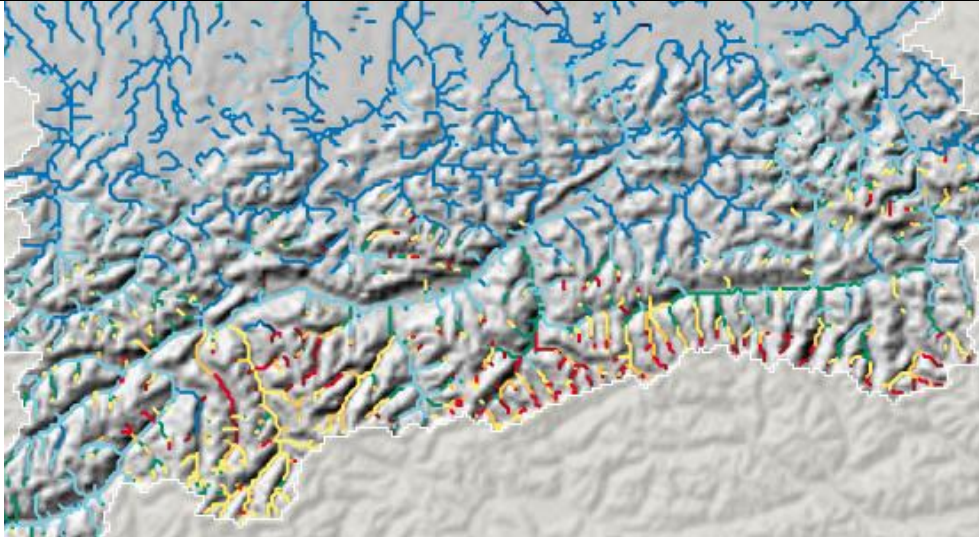
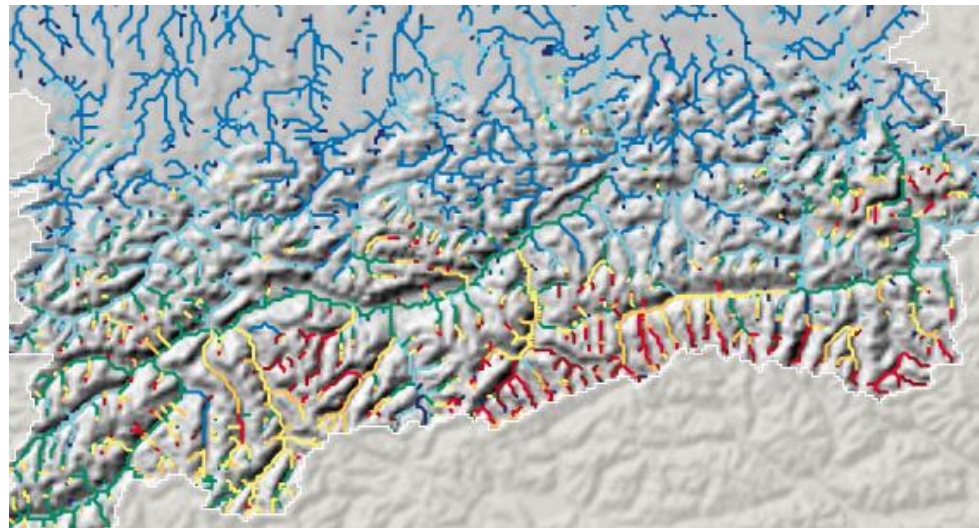
Mechanismen möglicher Veränderungen von Hochwässern in Österreich:

- Zunahme des Winterniederschlags, Abnahme des Sommerniederschlags (z.B. durch Verschiebung der Zirkulationsmuster)
- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung des Anteiles konvektiven Niederschlags und dadurch höhere Niederschlagsintensitäten
- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung der Schneefallgrenze, dadurch größerer Anteil flüssigen Niederschlags von Ereignissen
- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Verschiebung der Schneeschmelze in das Frühjahr, dadurch Verschiebung des Jahresverlaufes des Abflussbeiwertes; Erhöhung der Verdunstung, dadurch Verringerung des Abflussbeiwertes

Tabelle 3-7: Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur

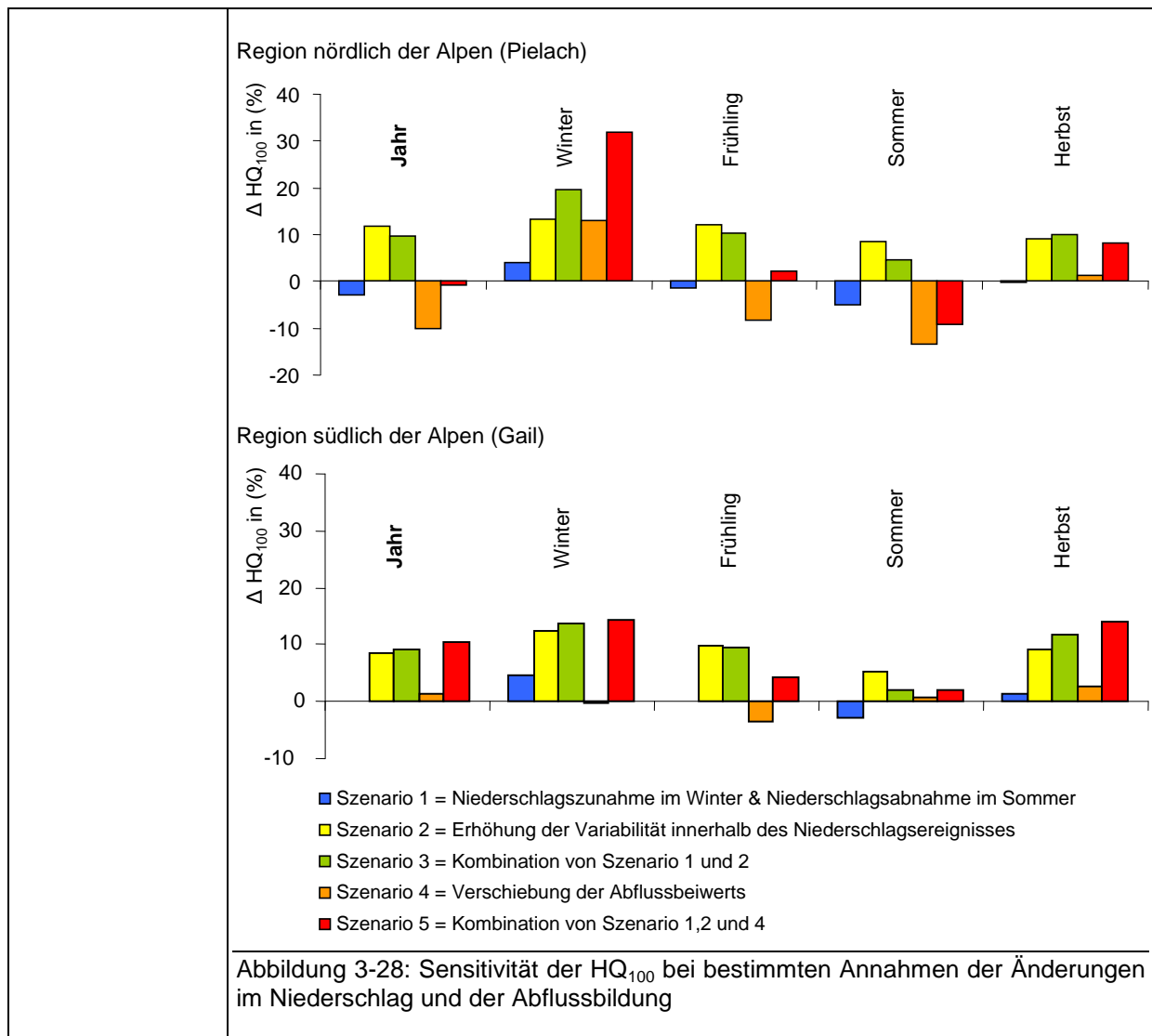
Geografische und zeitliche Abgrenzung; Veröffentlichung	Aussagen
<p>Europa 1980-1999 bis 2090-2099 IPCC (2007)</p>	<p>Extreme Tagesniederschläge nehmen in Nordeuropa sehr wahrscheinlich zu. Im Winter nehmen extreme Niederschläge in Nordeuropa und Mitteleuropa sehr wahrscheinlich in Größe und Häufigkeit zu (konform mit dem Anstieg der mittleren Niederschläge).</p> <p>Im Sommer im Mittelmeerraum und Mitteleuropa (abnehmende mittlere Niederschläge werden erwartet) können extreme konvektive (kurze) Niederschläge zu- (Annahme der erhöhten Speicherfähigkeit der Atmosphäre bei erhöhter Temperatur) oder abnehmen (prognostizierte Abnahme der Niederschlagstage) Bedeutsamer als die Änderungen in der Größe der Extremniederschläge werden jene im Wiederkehrintervall der Extreme erwartet. In Nordeuropa starke Zunahme extremer Winterniederschläge.</p> <p>Die multi model data sets Simulationen zeigen für Südeuropa und den Mittelmeerraum sowohl eine Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlägen im Winter als auch eine Zunahmen der Häufigkeiten geringer Sommerniederschläge.</p>
<p>Europa 2071-2100 Grünbuch (2007)</p>	<p>Methode: Simulationen des Abflusses unter Verwendung von Klimaszenarien und eines kontinuierlichen Niederschlag-Abflussmodells. Basierend auf IPCC SRES Szenario A2, die Ergebnisse des DMI/PRUDENCE (http://prudence.dmi.dk) und des PESETA http://peseta.jrc.es) Projekts, Ensemble von Klimamodellen. Auswertung des HQ₁₀₀ aus diesen simulierten Abflussreihen.</p> <p>Aussage: Erhöhung von 5-20% am Tiroler Inn und Alpenrhein, und 5-10% an der Niederösterreichischen Donau und Zubringer; Abnahme von 10% an der Salzach, 20% an der Mur.</p> <div data-bbox="427 1137 1407 1653" style="text-align: right;"> <p>[%] <-60 -40 -20 -10 -5 +5 +10 +20 +40 >+60</p> </div> <p>Abbildung 3-24: Änderungen des HQ₁₀₀ für die Periode 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990.</p>
<p>Europa 2071-2100 Dankers and Feyen (2008, 2009)</p>	<p>Methode: Simulationen des Abfluss unter Verwendung von Klimaszenarien und eines kontinuierlichen Niederschlag-Abflussmodells. Basierend auf IPCC SRES Szenario A2. Ensemble von Klimamodellen.</p> <p>Aussage: Erhöhung von 5-10% an der Oberrösterreichische Donau und Zubringer; Abnahme von 20% an der Salzach, 30% an der Mur.</p>

	<p>Abbildung 3-25: Änderungen des HQ₁₀₀ für die Periode 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990.</p>
<p>Europa Blöschl and Montanari (2009)</p>	<p>Klimaimpaktanalysen sollten verstärkt untersuchen, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen simuliert werden anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen.</p>
<p>Deutschland/ Sachsen KLIWA in Sachsen (2005)</p>	<p>Prognose (WEREX): Es wird erwartet, dass das Sommerhalbjahr trockener wird, und die Tage mit extremen Niederschlägen zunehmen (Zunahme lokaler Schauer und Gewitter), im Winter hingegen trotz der Zunahme der Niederschlagssummen keine Zunahme der Niederschlagsextrema stattfindet. Lokal begrenzte Starkniederschläge werden häufiger werden, wodurch auch lokale Hochwasserereignisse künftig mehr an Bedeutung gewinnen.</p>
<p>Deutschland 1961-1990 bis 2071-2100 Schönwiese (2007)</p>	<p>REMO (1961-1990) gegenüber (2071-2100) Beim Wind sind keine markanten Trends feststellbar, eventuell sogar leichte Abnahmen in den winterlich-herbstlichen Sturmweatherlagen (durch die Neigung zur Verlagerung der Sturmbahnen Richtung Norden) Häufigere teils intensivere Extremereignisse wie Hitze-/Trockensommer und winterlich-/herbstliche Starkniederschläge mit Hochwassergefahr teilweise auch im Sommer.</p>
<p>Deutschland 1961-1990 bis 2071-2100 Jakob (2006)</p>	<p>Zunahme der Niederschläge v.a. im Westen, auch der extrem starken Niederschläge in den vergangenen 100 Jahren, welche auch häufiger auftraten. Im Osten hingegen wurden die Starkniederschläge seltener, v.a. im Sommer [Schönwiese, 2005].</p>
<p>Deutschland Obere Donau 2036-2060 2011-2035 GCA(2009)</p>	<p>Methode: Ergebnisse der Klimamodelle REMO und MM5 herangezogen für einen statistischen Klimaantriebsgenerator und kontinuierliche Niederschlag-Abflussmodellierung von Zukunftsszenarien. Aussagen: Am Pegel Achleiten kann in den nächsten 50 Jahren mit einer Veränderung des HQ₁₀₀ zwischen +4% und -28% gerechnet werden. Allerdings widersprechen die simulierten Abflüsse den bisherigen Messwerten. Im Alpenraum ist eher mit einer Zunahme der Hochwässer zu rechnen, im Alpenvorland eher mit einer Abnahme.</p>

	
	<p>Abbildung 3-26: Verhältnis HQ_{100} für die Periode 2036-2060 und HQ_{100} für die Periode 1971-2000</p>
	
	<p>Abbildung 3-27: Verhältnis HQ_{100} für die Periode 2011-2035 und HQ_{100} für die Periode 1971-2000</p>
<p>Schweiz/Global -2100 OcCC/Extrema (2003)</p>	<p>Es wird angeführt, dass die Mehrheit der Modellrechnungen für das 21. Jh. auf eine Zunahme der mittleren Intensität und der Häufigkeit von intensiven Tagesniederschlägen hinweist. Für die Entwicklung des Klimas im 21. Jh. aus Modellrechnungen gilt der Anstieg der mittleren Wasserdampfkonzentration in der Atmosphäre als wahrscheinlich. Durch die Intensivierung des Wasserkreislaufes könnten v.a. in den Alpen die Starkniederschläge langer Dauer zunehmen.</p> <p>In Gebieten, in denen bereits Winterhochwässer beobachtet werden, ist eine Zunahme der Hochwassergefahr wahrscheinlich, in Hochalpinen Gebieten ist die Einschätzung aufgrund von abzuwiegenden Wechselwirkungen Hochwasser auslösender und abmindernder Faktoren schwierig.</p> <p>In der Schweiz lassen sich die meisten Extremereignisse auf ein Auftreten bei charakteristischen Wetterlagen zurückführen.</p>
<p>Schweiz -2050 OcCC/ProClim (2007)</p>	<p>Speziell im Winter ist durch die Zunahme im Niederschlag mit einer steigenden Hochwassergefahr zu rechnen, auch durch den erhöhten Anteil an flüssigem Niederschlag. Möglicher Weise steigt die Hochwassergefahr auch im Sommer trotz abnehmender Gesamtniederschläge (These).</p>

	<p>Es wird von einem ansteigenden Schadensrisiko durch ansteigende Häufigkeiten und Intensitäten von Starkniederschlägen ausgegangen.</p> <p>Neue Analysen in Mitteleuropa zeigen eine Zunahme extremer 1-5 Tagesniederschläge im Winterhalbjahr, die [Prudence] Modelle sagen Starkniederschläge mit einer heutigen Jährlichkeit von 8-20 Jahren am Ende des Jahrhunderts mit einer Jährlichkeit von nur mehr 5 Jahren voraus.</p>
<p>Schweiz 1990 bis 2050 KOHS/Schädler et al. (2007)</p>	<p>Die Beschreibungen basieren auf den Szenarien der Klimaforschungsprojekte [Prudence und Stardex].</p> <p>Für Starkniederschläge ist nur eine grobe Quantifizierung für Jährlichkeiten zwischen 5-50 Jahren möglich. Es zeigen sich geringe Unterschiede der Extremwerte, und zwar für Herbst, Winter, Frühling eine Zunahme um bis zu 10% an der Alpennordseite und 20% an der Alpensüdseite. Im Frühling und Winter liegt die Zunahme beiderseits der Alpen bei 0-20%. Nach [Frei et al. 2006] kann im ungünstigsten Fall ein heute 100-jährliches Ereignis in Zukunft zu einem 20-jährlichen Ereignis werden. Für den Sommer werden keine Aussagen gemacht, da die Variabilität der Ergebnisse zu groß und das Vertrauen in die Güte der Simulationen eingeschränkt ist.</p> <p>Aussagen zur Veränderung der Hochwassersituation werden nach Region, Saison und Einzugsgebietsgröße unterschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gebiete unter 1500m ü.A.: Im Winter werden durch stärker gesättigte Böden, aufgrund der Niederschlagszunahme und durch höhere Niederschlagsintensitäten größere Hochwasserspitzen erwartet. Die Kombination von Regen-/Schneeereignissen ist auch weiterhin möglich. Der Einfluss von Schmelzereignissen nimmt mit der Höhenlage der Einzugsgebiete zu. In den höher gelegenen Gebieten treten bereits heute die Jahreshochwässer im Winter bzw. Frühling auf, wodurch in weiterer Folge die Spitzen vermutlich größer werden. Für den Sommer werden besonders in tiefen Lagen geringere Hochwasserspitzen erwartet (verringerte Abflussbereitschaft, weniger Niederschlag, höhere Verdunstung). Möglich sind jedoch v.a. im Sommer lokale (konvektive) Gewitter (Starkniederschläge), die zu Hochwässern führen können. - Gebiete in den Nordalpen und inneralpin über 1500m ü.A.: Es wird ein Anstieg der Abflüsse durch vermehrten gelegentlichen Niederschlag als Regen statt Schnee erwartet. Das Jahreshochwasser wird weiter im Sommer auftreten und wahrscheinlich nicht größer werden, auch im Herbst sind kaum Veränderungen zu erwarten. Bei übergreifenden Niederschlägen inneralpin von Süden her ist das Verhalten analog zur Alpensüdseite zu sehen. - Gebiete auf der Alpensüdseite: Im Winter und Frühjahr werden aufgrund der Niederschlagszunahme und durch höhere Niederschlagsintensitäten größere Hochwasserspitzen erwartet, im Sommer hingegen geringere Hochwasserspitzen. Die maßgebenden Jahreshochwasser treten im Herbst auf und werden wahrscheinlich etwas größer werden.
<p>Schweiz Sensitivitäts- analysen Allamano et al. (2009)</p>	<p>Analytisches Modell zur Simulation des Einflusses der Schneefallgrenze auf Hochwässer. Erhöhung der Schneefallgrenze in Verbindung mit einer Erhöhung des Winterniederschlages kann die Hochwassertrends in der Schweiz erklären. 2°C und +10% Winterniederschlag führen zu den folgenden Änderungen:</p> <p>Nördliche Schweiz: HQ₁₀₀ wird zu HQ₂₀ (entspricht einer Erhöhung des Durchflusses um ca. 30%)</p> <p>Südliche Schweiz: HQ₁₀₀ wird zu HQ₅₀ (entspricht einer Erhöhung des Durchflusses um ca. 10%)</p>
<p>Ennstal/ Österreich Hebenstreit (2000)</p>	<p>Hinsichtlich der Extremwerte zeigt sich eine Abnahme in hohen Abflusswerten und der Auftretswahrscheinlichkeit von Hochwässern im betrachteten Teileinzugsgebiet.</p>
<p>Österreich / Gail, Traisen Nachtnebel, Fuchs</p>	<p>Szenarien zeigen keine Vergrößerung der Hochwässer.</p>

(2004)	
Österreich -2100 Formayer und Kromp-Kolb (2006)	Bei den Starkniederschlägen im Winter, die mehrere Tage andauern, werden die Simulationen von [Frei et al., 2005] angeführt, die eine deutliche Zunahme zeigen und auch für den Sommer eine Zunahme der Wahrscheinlichkeit für Einzeltage mit hohen Niederschlagsmengen, trotz abnehmender Monatsniederschlagssummen, was auch im Sommer eine Zunahme der Intensitäten erwarten lässt. Eine direkte Ableitung der Entwicklung der Gewittertätigkeit aus den Klimaszenarien ist nicht möglich, allerdings geht die Studie aufgrund von physikalischen Überlegungen (höhere Temperatur, höhere Wasserspeicherkapazität der Atmosphäre) davon aus, dass die Niederschlagsintensität bei Gewittern ansteigt. Die europäischen Klimamodelle für die Alpen [Frei et al., 2005] scheinen diese These zu stützen.
Österreich -2100 Kirnbauer et al. (2007)	Bezug genommen wird auf den europaweiten Vergleich von 7 Regionalmodellen [Frei et al., 2006] wo im Winter eine Zunahme der Extremwerte nördlich von 45° nördlicher Breite festgestellt wird, während sich südlich davon die Werte nicht signifikant verändern. Im Winter zeigen die unterschiedlichen Regionalmodelle eine relativ gute Übereinstimmung, im Sommer hingegen differieren die Ergebnisse stark mit zunehmender Jährlichkeit. Aussage: Große Urteilsschärfe bei der Einschätzung von Auswirkungen der Klimaänderung auf Bemessungsereignisse des Abflusses (insbesondere bei kleinen Gewässern) sollte nicht erwartet werden.
Alpen/ Österreich 1981-1990 bis 2041-2050 Reclip:more (2007)	Globalmodell ECHAM5 Szenario IS92a – Regionalmodelle MM5 und ALADIN Die Anzahl der Starkniederschläge wird um einige Ereignisse pro Jahr ansteigen, in Staulagen entlang des Alpenbogens um 2-3 Ereignisse, in Vorarlberg mehr. Da sich außer in Vorarlberg die Jahresniederschlagssumme gleichzeitig verringert, wird erwartet, dass es über längere Zeiträume seltener, dafür dann aber ausgiebiger regnet.
Österreich Ausgewählte Einzugsgebiete Holzmann et al. (2008)	Methode: REMO und Niederschlag-Abflussmodellierung Aussagen: <ul style="list-style-type: none"> • Bregenzer Ache: beide Klimaänderungsszenarien (A1B, B1) zeigen eine Verringerung der Jahreshochwässer. • Lavant: Unterschiede zwischen dem Referenzzustand und Szenario A1B hinsichtlich der Jahreshochwässer gering. Szenario B1 zeigt eine tendenzielle Erhöhung der extremeren Jahreshochwässer. Der dominante Ereignistyp ist Starkregen. • Traisen: Beide Szenarien zeigen einen Anstieg. Die größte Anzahl der Jahreshochwässer wird von Starkregenereignissen gebildet, die Änderungen im Ereignistyp aufgrund der Szenarien sind nicht gravierend. • Obere Salzach: Die Größe der Jahreshochwässer nimmt für das Szenario A1B ab, für B1 geringfügig zu. Der bislang dominierende Ereignistyp Regen auf Schnee nimmt bei beiden Szenarien ab. Dafür erhöhen sich die Klassenhäufigkeiten für Starkregen sowie mehrtägige Starkregen.
Österreich nördlich/südlich der Alpen Sensitivitäts- analysen Blöschl et al. (2008)	Methode: Sensitivitätsanalysen unter der Annahme erhöhter Winterniederschläge, größerer Anteil konvektiver Niederschlagsereignisse und Verschiebung der Abflussbeiwerte in das Frühjahr wegen früherer Schneeschmelze. Aussagen: Die Wenn-Dann Szenarien des HQ ₁₀₀ zeigen für die Region nördlich der Alpen nahezu keine Änderungen in den Jahreshochwässern, da sich einzelne Effekte aufheben, für die Region südlich der Alpen eine leichte Zunahme wegen verstärkter konvektive Ereignisse. Die in der Vergangenheit eminent große Variabilität der Hochwässer wird auch in der Zukunft im Vordergrund stehen, die berechneten Unterschiede der Wenn-Dann Szenarien sind demgegenüber klein.



3.5.3 Auswertungen in Österreich

Zur Einschätzung möglicher Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf das Hochwasserregime wurden Monte Carlo Simulationen für Wenn-Dann Szenarien durchgeführt. Die folgenden Regionen wurden getrennt betrachtet:

- Vorarlb. Süd, Südl. Innzubringer in Tirol
- Vorarlb. Nord, Lech
- Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach
- Traun, Enns, Erlauf, Traisen und Zubringer
- Innviertel, Mühlviertel
- Waldviertel
- Osten Österreichs
- Mur, Mürz und Zubringer, Gurk, Raab
- Obere Salzach, Isel, Möll
- Gail u. Zubringer

Für jede Region wurde ein hypothetisches aber typisches Gebiet modellmäßig beschrieben. Diese Vorgangsweise wurde gewählt, um die möglichen Einflüsse einer Klimaänderung zu verstehen, anstatt ein willkürliches Gebiet zu beschreiben. Es wurde dabei jeweils an ein Einzugsgebiet mit einer Fläche von ca. 500km² gedacht. Jedes Gebiet beschreibt also repräsentativ die Region. Abbildung 3-29 zeigt die gewählten Regionen.

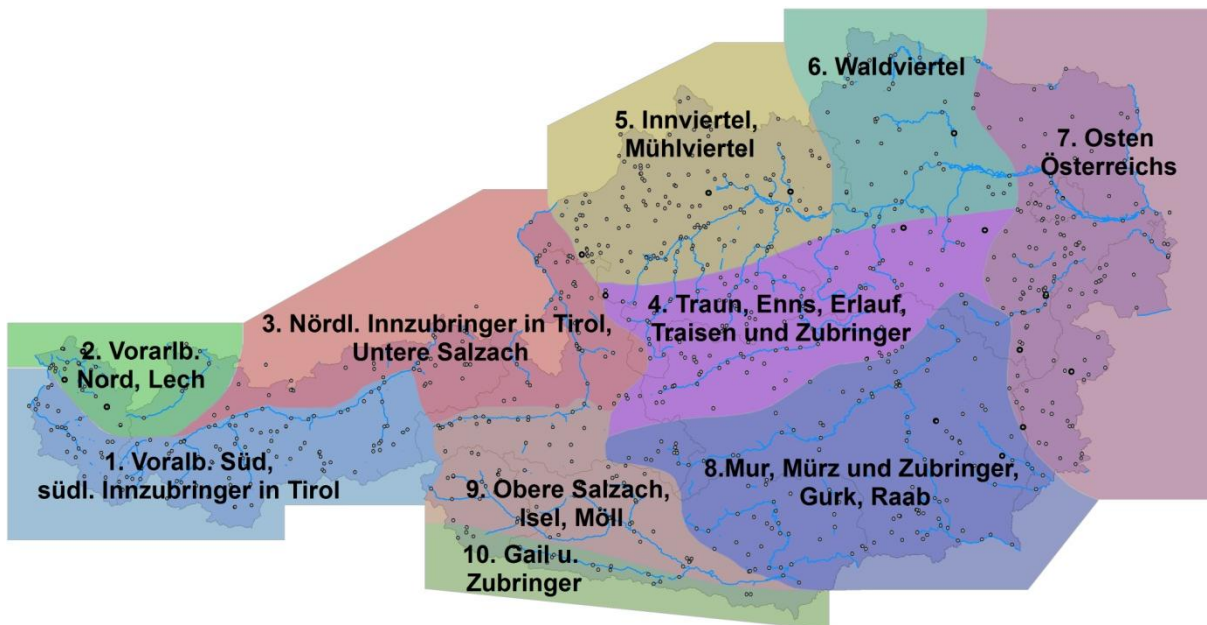


Abbildung 3-29: Regionen für die Berechnung der Wenn-Dann Szenarien.

Die Monte Carlo Simulationen bestehen aus drei Schritten: (a) Erzeugen einer Niederschlagszeitreihe; (b) Umsetzen dieser Zeitreihe in eine Abflusszeitreihe mittels eines Niederschlag-Abflussmodells; (c) Analyse der Eigenschaften der Niederschlags- und Abflussereignisse. Für die Simulation von Niederschlagszeitreihen wird das von Sivapalan et al. (2005) entwickelte Modell herangezogen. Es ist ein Punktmodell, das eine Abfolge von Niederschlagsereignissen erzeugt. Da es in dieser Arbeit um kleine bis mittlere Einzugsgebiete geht, wird die räumliche Verteilung der Niederschläge vernachlässigt. Für die Dauer der Ereignisse und die Pausen wird angenommen, dass sie einer Weibull-Verteilung gehorchen und jahreszeitlich schwanken. Die mittleren Niederschlagsintensitäten jedes Ereignisses werden gammaverteilt angenommen, wobei die Parameter von der Niederschlagsdauer abhängen und ebenfalls jahreszeitlich schwanken. Der zeitliche Verlauf des Niederschlags innerhalb des Ereignisses wird durch eine multiplikative Kaskade beschrieben, die Niederschlagsblöcke unterschiedlicher Intensitäten erzeugt. Das Niederschlagsmodell wird mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Stunde betrieben und besitzt insgesamt 16 Parameter, die an Niederschlagsdaten jeweils einer typischen Niederschlagsstation in jeder Region geeicht wurden. Das Abflussmodell ist ein Ereignismodell, das Basisabfluss, Abflussbildung und Abflusskonzentration berücksichtigt. Die Abflussbildung wird durch einen Ereignisabflussbeiwert beschrieben, der als Zufallszahl angesehen wird und über die Ereignisdauer konstant ist. Es wird angenommen, dass er einer Beta-Verteilung folgt (siehe Merz et al., 2006). Der Mittelwert des Abflussbeiwertes wurde als jahreszeitlich variabel angenommen. Die Abflusskonzentration wird durch einen Linearspeicher beschrieben mit einer Verzögerungszeit, die konstant zu 12 Stunden angesetzt wurde. Die Parameter des Abflussmodells wurden an beobachtete Abflüsse an Pegeln in Österreich angelehnt. Mit diesem Modell wurden Simulationsläufe zu je 10000 Jahren durchgeführt. Die Hochwässer mit den größten Scheitelabflüssen in jedem Jahr wurden dann weitergehend analysiert.

Entsprechend der Leitlinie, dass Klimaimpaktanalysen verstärkt untersuchen sollen, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen simuliert werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzuzielen (Blöschl and Montanari, 2009), wurden die folgenden Mechanismen möglicher Veränderungen von Hochwässern in Österreich definiert:

- Zunahme des Winterniederschlags, Abnahme des Sommerniederschlags (z.B. durch Verschiebung der Zirkulationsmuster)
- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung des Anteiles konvektiven Niederschlags und dadurch höhere Niederschlagsintensitäten
- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung der Schneefallgrenze, dadurch größerer Anteil flüssigen Niederschlags von Ereignissen
- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Verschiebung der Schneeschmelze in das Frühjahr, dadurch Verschiebung des Jahresverlaufes des Abflussbeiwertes; Erhöhung der Verdunstung, dadurch Verringerung des Abflussbeiwertes

Jeder Mechanismus wurde als Szenario behandelt. Zusätzlich zur Jetztsituation wurde das Auftreten jedes Mechanismus einzeln untersucht, sowie in einem kombinierten Fall das Auftreten aller Mechanismen gemeinsam. Gedanklich wurden die Szenarien für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007 angesiedelt, obwohl es sich um keine Prognosen, sondern Wenn-Dann Szenarien handelt. Die Szenarien wurden wie folgt festgelegt:

Die Verschiebung des Winter/Sommerniederschlag war geleitet durch die Ergebnisse des CLM Klimamodells (Änderungen 2021-2050 bezogen auf den Kontrolllauf 1961-1990, Abbildung 3-30; die Periode 1961-1990 wurde statt 1976-2007 gewählt, um eine Abschätzung nach oben zu erhalten). Dabei wurde die Anzahl der Ereignisse (und nicht die Niederschlagsintensität) variiert (Tabelle 3-8). Die Erhöhung des Anteiles konvektiven Niederschlags wurde durch eine stärkere Variabilität der Intensitäten innerhalb eines Ereignisses beschrieben. Dies hat keinen Einfluss auf die Monatsniederschläge, jedoch einen Einfluss auf die Regenspendenlinien. Diese wurden auf Plausibilität geprüft. Die Erhöhung der Schneefallgrenze wurde durch die Erhöhung des flüssigen Anteils des Niederschlages beschrieben, der aus Beobachtungsdaten verschiedener Regionen in Österreich abgeleitet wurde. Dabei wurde angenommen, dass die Schneefallgrenze um 250m steigen wird. Die Verschiebung der Schneeschmelze in das Frühjahr wurde durch eine Verschiebung des Jahresverlaufes des Abflussbeiwertes, und die Erhöhung der Verdunstung wurde durch eine Verringerung des Abflussbeiwertes im Sommer beschrieben (Tabelle 3-8).

Die Simulationen wurden getestet in Hinblick auf die plausible Wiedergabe aller hochwasserrelevanten Parameter, insbesondere der Saisonalität der Hochwässer (Tabelle 3-9 und Abbildung 3-31 bis Abbildung 3-39).

Tabelle 3-8:: Parameter der Monte Carlo Sensitivitätsanalysen.

	Winter/Sommerniederschlag entsprechend CLM Modell				Abflussbeiwert	Repräs. N- Station	Typische mittlere Seehöhe (m)	Anteil flüssiger N im Jahr
	Winter (DJF)	Frühj. (MAM)	Sommer (JJA)	Herbst (SON)				
1. Vorarlb. Süd, Südl. Innzubringer in Tirol	+8%	+2%	-4%	+2%	1 Monat früher, im Sommer kleiner	Nassereith (102954)	1900	0,55
2. Vorarlb. Nord, Lech	+11%	+1%	-7%	+7%	-"	Andelsbuch (100636)	1400	0,68
3. Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach	+8%	+5%	-7%	0%	2 Wochen früher	Golling a. d. Salzach (103820)	1300	0,72
4. Traun, Enns, Erlauf, Traisen u. Zubringer	+10%	+6%	-4%	+1%	-"	Pechgraben (106583)	1300	0,72
5. Innviertel, Mühlviertel	+12%	+5%	+5%	-4%	-"	Karlstift (106823)	600	0,90
6. Waldviertel	+13%	-2%	+3%	-8%	-"	Karlstift (106823)	600	0,90
7. Osten Österreichs	+15%	-4%	-2%	-2%	geringf. kleiner wegen Verdunst.	Gänsersdorf (109561)	400	0,95
8. Mur, Mürz u. Zubringer, Gurk, Raab	+6%	+1%	+5%	-3%	1 Monat früher, im Sommer kleiner	Wies (112557)	900	0,82
9. Obere Salzach, Isel, Möll	+8%	+4%	+4%	-6%	2 Wochen früher, Okt gleich	Hopfgarten in Def. (114926)	1700	0,60
10. Gail u. Zubringer	+9%	0%	+5%	-7%	-"	Arnoldstein (113746)	1700	0,60

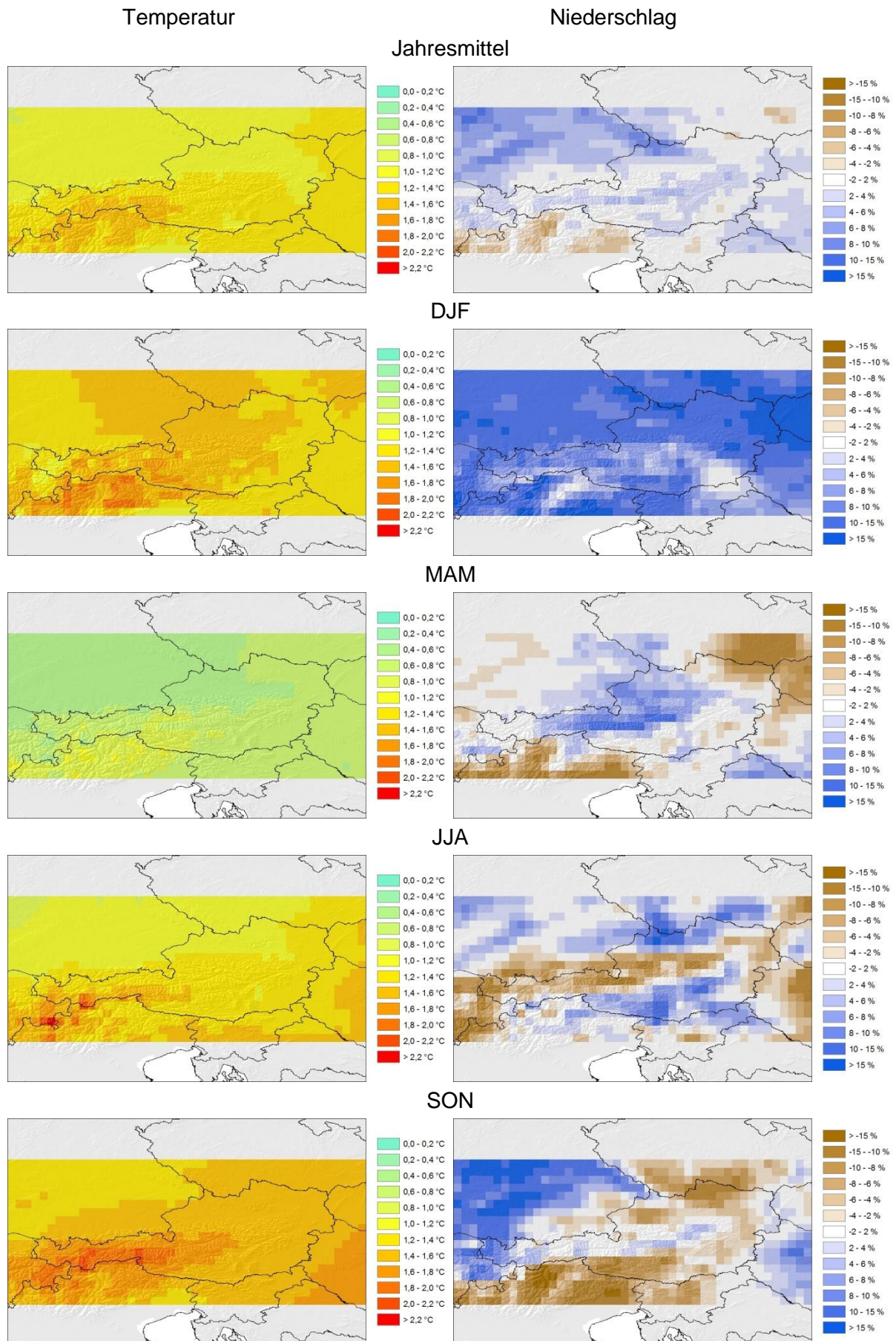


Abbildung 3-30: Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags 2021-2050 bezogen auf den Kontrolllauf 1961-1990. Modell: CLM (siehe Kapitel 2)

Abbildung 3-31 bis Abbildung 3-40 zeigen die Saisonalität der simulierten Hochwässer, getrennt für alle Jahreshochwässer sowie für die größten 5% der Hochwässer. In Vorarlberg und Tirol treten die Hochwässer im Sommer auf. Im kombinierten Szenario (alle Mechanismen) ist das Auftreten der Hochwässer geringfügig in das Frühjahr und in den Herbst verschoben. Die Saisonalität der Hochwässer in der Traun und Erlaufregion ist ähnlich. Im Innviertel und Mühlviertel treten die Hochwässer vor allem im Frühjahr und Winter auf. Die Häufigkeit der Winterhochwässer wird durch die Szenarien signifikant erhöht. Interessant ist dabei, dass diese Verschiebung in den Winter besonders für die größten 5% der Hochwässer gilt. Im Osten Österreichs treten die Hochwässer vor allem im Sommer auf, und durch die Szenarien werden sie etwas in den Winter verschoben. An der Mur und Zubringer treten die Hochwässer ebenfalls im Sommer auf, durch die Szenarien wird das Auftreten geringfügig in das Frühjahr und den Herbst verschoben. An der Drau und Zubringer treten Hochwässer sowohl im Frühsommer als auch im Herbst auf. Die Sommerhochwässer werden durch die Szenarien etwas reduziert, die Herbsthochwässer etwas erhöht. Da auch jeder der vier Einzelmechanismen als Szenario simuliert wurde, lässt sich genau bestimmen, welcher Mechanismus in welchem Ausmaß für eine Verschiebung der Saisonalität und für die Änderungen der jährlichen Hochwasserdurchflüsse verantwortlich ist.

Abbildung 3-41 bis Abbildung 3-50 zeigen den simulierten Monatsniederschlag, den mittleren Ereignisabflussbeiwert je Monat und das monatliche HQ_{100} in einem typischen Einzugsgebiet für jede der Regionen. Durch die getrennte Darstellung der Komponenten ist genauer abzulesen, welcher Mechanismus für eine bestimmte Veränderung verantwortlich ist.

Tabelle 3-9 zeigt schließlich das Ergebnis der Monte Carlo Sensitivitätsanalysen in Hinblick auf den Einfluss einzelner Mechanismen auf das HQ_{100} in einem typischen Gebiet in jeder Region. Für Vorarlberg Süd und die südlichen Innzubringer ergeben sich beispielsweise die folgenden Änderungen: Wenn nur der Mechanismus veränderte Sommer- und Winterniederschläge betrachtet wird, reduziert sich das hundertjährige Hochwasser um 3%. Das ist vor allem auf die geringeren Sommerniederschläge in dieser Region zurückzuführen. Wird der Anteil des konvektiven Niederschlags erhöht (unter Beibehaltung aller anderer Annahmen der Ist-Situation) erhöht sich das HQ_{100} um 6%. Die erhöhte Schneefallgrenze hat einen sehr kleinen Einfluss. Wird der Einfluss früherer Schneeschmelze und damit geringerer Abflussbeiwerte im Sommer betrachtet, vermindert sich das HQ_{100} um 4%. Bei gemeinsamer Betrachtung aller vier Mechanismen ist das kombinierte Ergebnis eine Reduktion des HQ_{100} um 1%. Die einzelnen Komponenten überlagern sich nicht additiv, da sie zu unterschiedlichen Jahreszeiten wirksam sind. Die größten einzelnen Mechanismen für jede Region sind wie folgt: Im Osten Österreich bewirkt die Erhöhung der Konvektivität eine Erhöhung der HQ_{100} um 10% und im Murgebiet um 7%. Für das Inn- und Mühlviertel bewirkt die Erhöhung der Schneefallgrenze eine Erhöhung der HQ_{100} um 4%. Für die nördlichen Innzubringer sowie für die Region von der Traun bis zur Traisen bewirkt eine frühere Schneeschmelze eine Abnahme des HQ_{100} um 5%. Die größten gesamten Änderungen treten im Inn- und Mühlviertel mit 10% Erhöhung des HQ_{100} auf, gefolgt vom Murgebiet mit 7%. Die verhältnismäßig große Erhöhung im Inn- und Mühlviertel liegt daran, dass in dieser Region alle Mechanismen positiv zu einer Erhöhung des HQ_{100} beitragen, während in den anderen Regionen manche Mechanismen zu einer Reduktion der HQ_{100} führen, wodurch der Gesamteffekt reduziert wird.

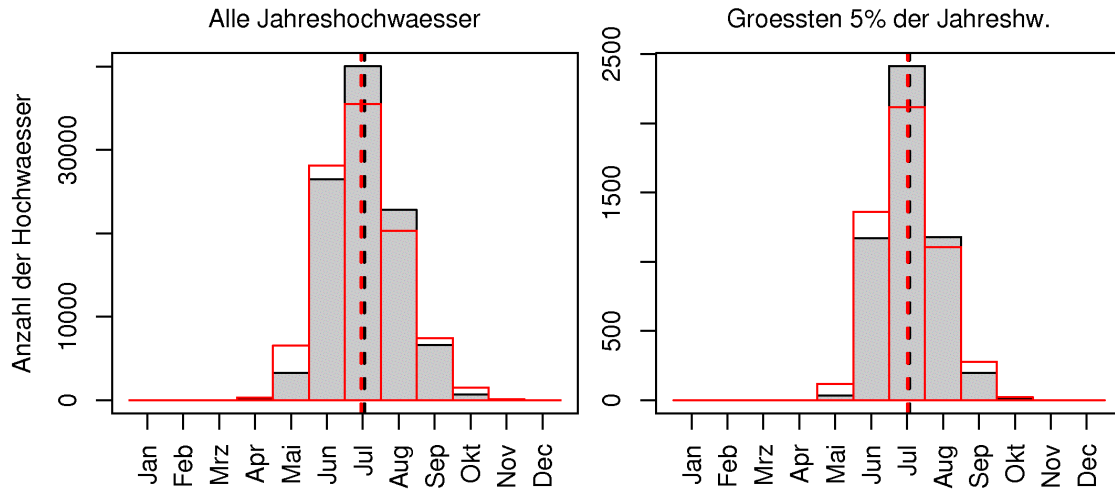


Abbildung 3-31: Vorarlb. Süd, Südl. Innzubringer in Tirol (1): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

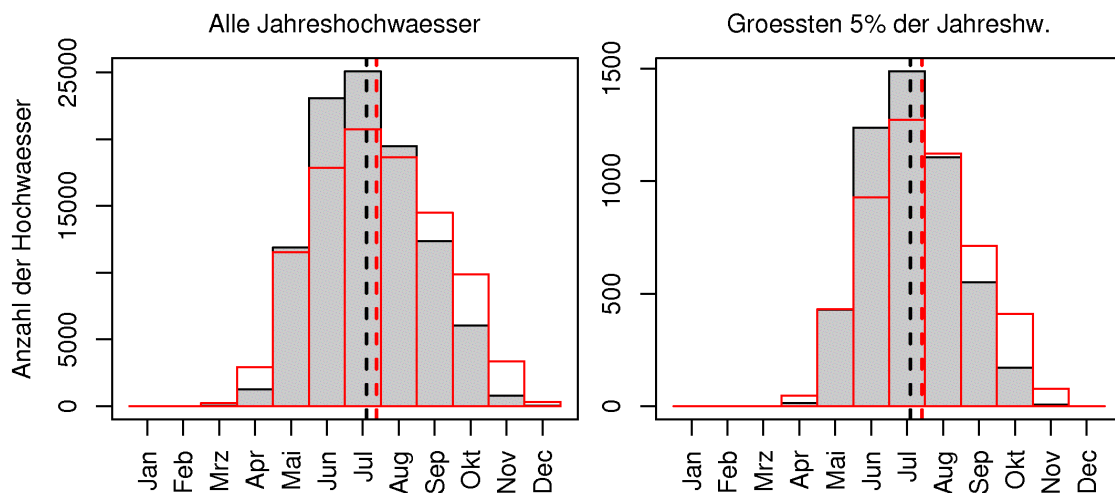


Abbildung 3-32: Vorarlb. Nord, Lech (2): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

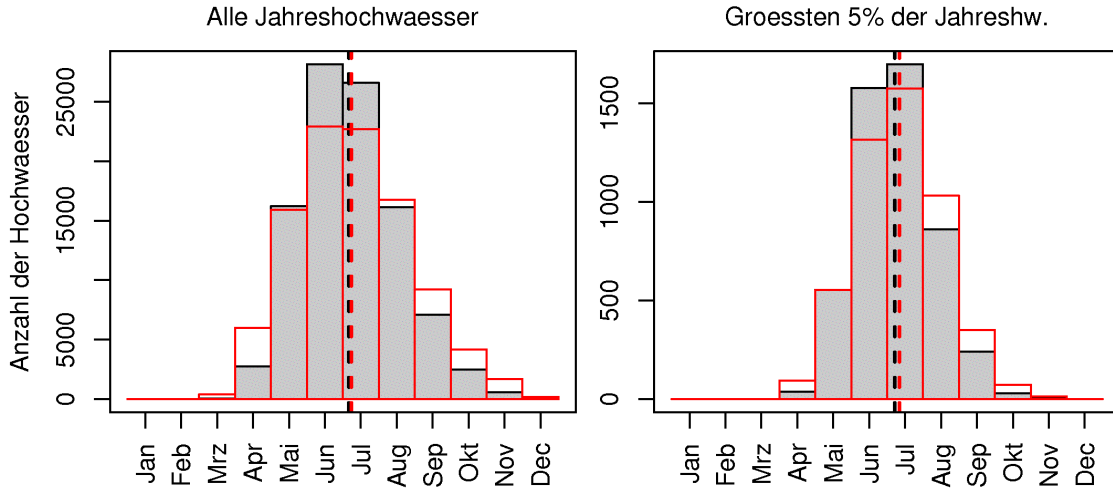


Abbildung 3-33: Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach (3): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

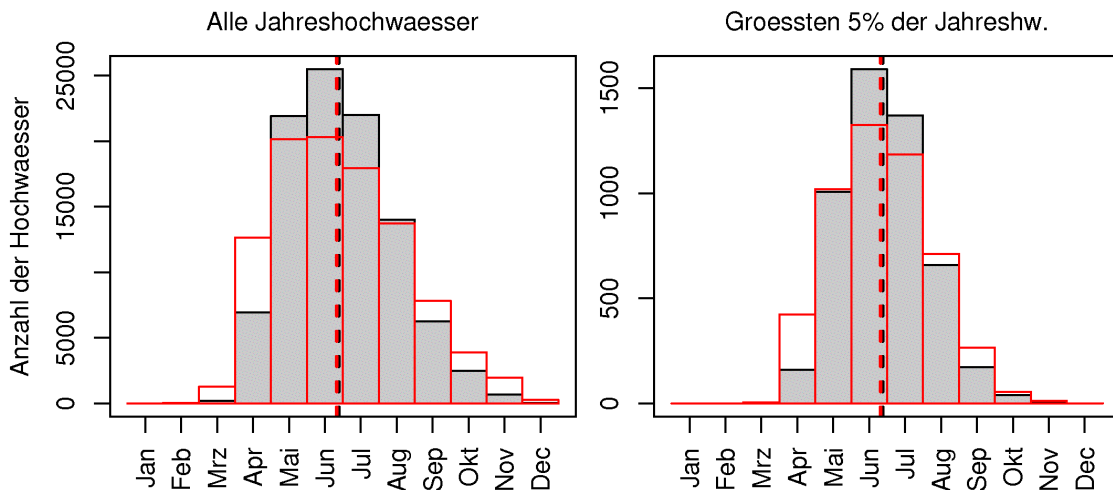


Abbildung 3-34: Traun, Enns, Erlauf, Traisen und Zubringer (4): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

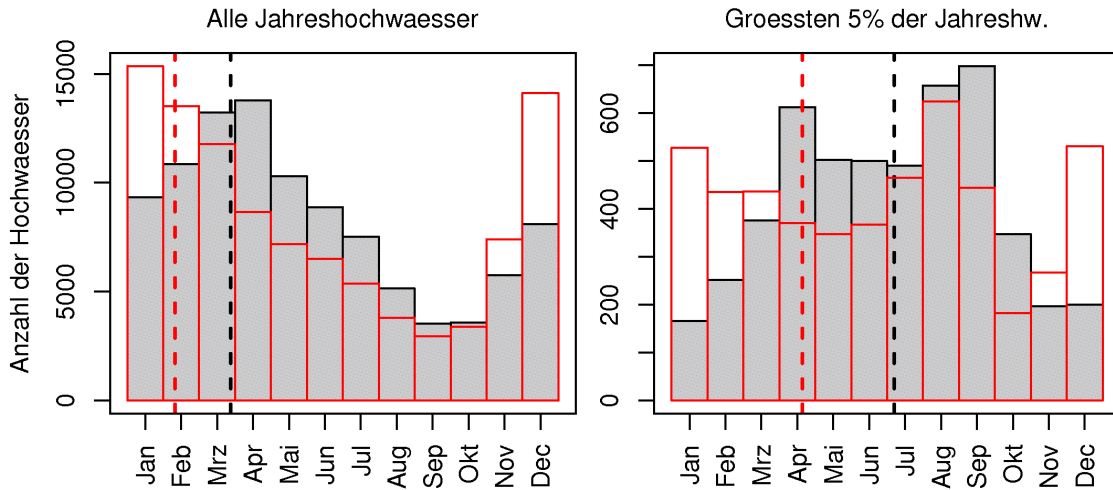


Abbildung 3-35: Innviertel, Muehlviertel (5): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwaesser in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

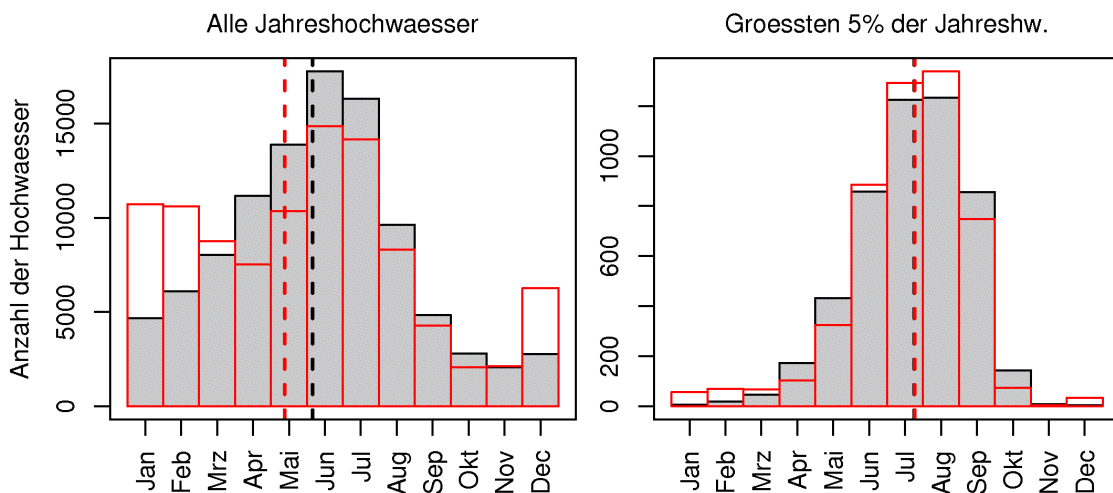


Abbildung 3-36: Waldviertel (6): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwaesser in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

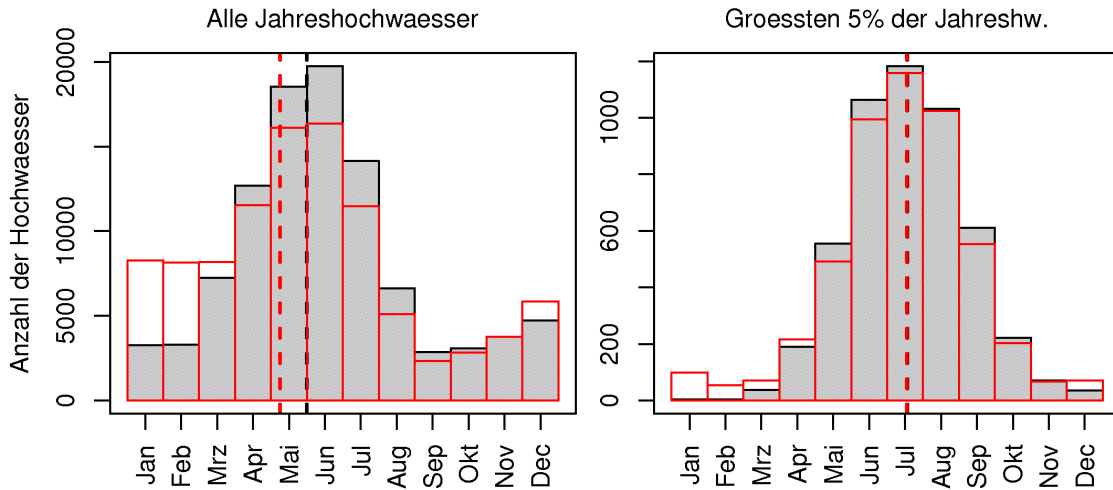


Abbildung 3-37: Osten Österreichs (7): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

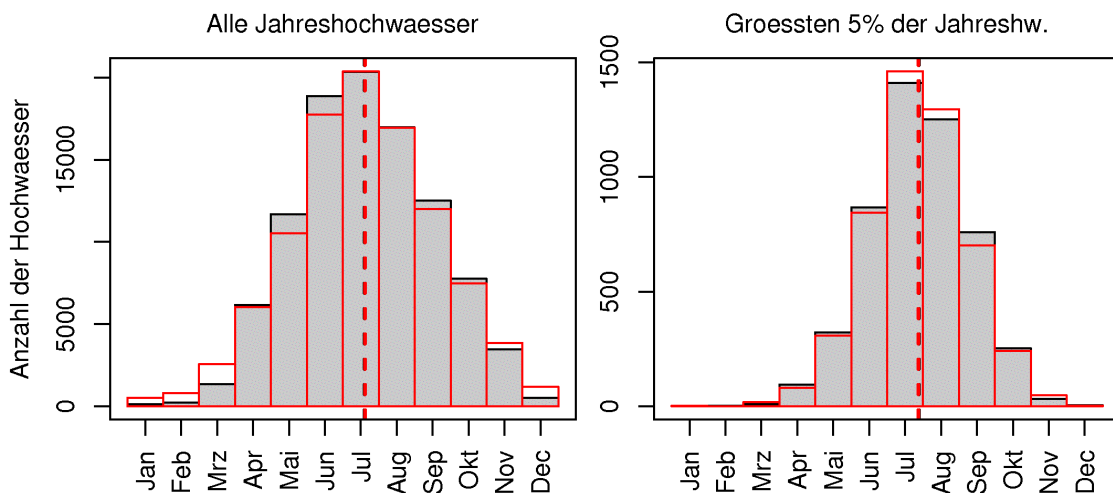


Abbildung 3-38: Mur, Mürz und Zubringer, Gurk, Raab (8): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

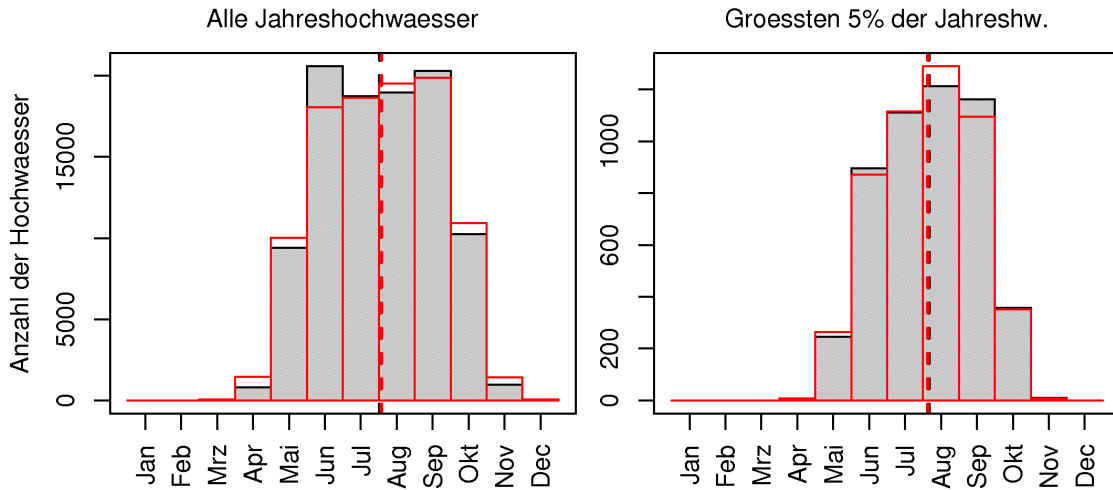


Abbildung 3-39: Obere Salzach, Isel, Möll (9): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

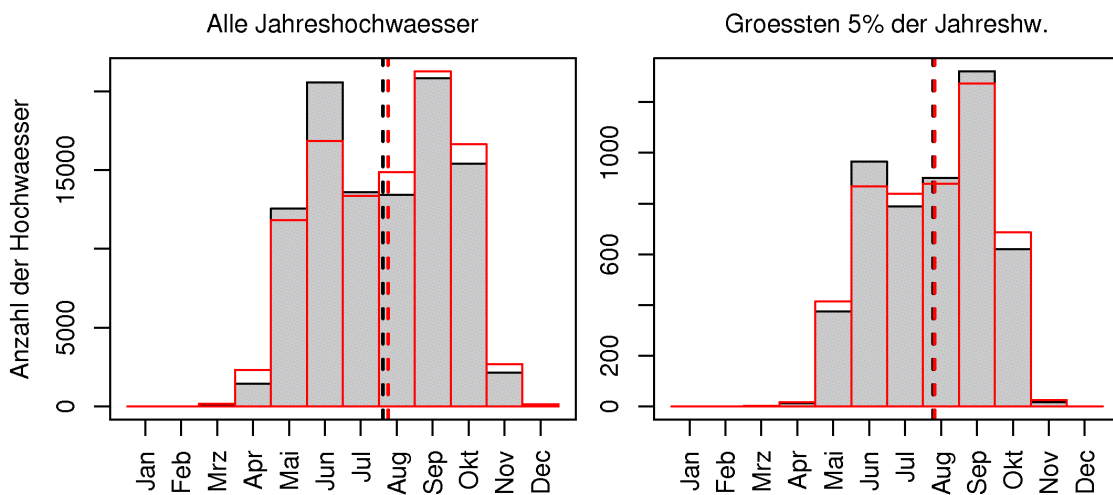


Abbildung 3-40: Gail u. Zubringer (10): simulierte Verteilung des Auftretens der Jahreshochwässer in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

Tabelle 3-9:: Ergebnis der Monte Carlo Sensitivitätsanalysen. Mittlerer Monat in dem die Jahreshochwässer auftreten (Mittl. Monat HQ) sowie mittlere Monat für die größten 5% der Hochwässer (Mittl. Monat HQmax). Monat: 0 = 1.Jän., 12 = 31.Dez). Möglicher % Einfluss einzelner Mechanismen auf das HQ₁₀₀ in einem typischen Gebiet in der Region (2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007).

	Änderung der Saisonalität der Hochwässer		Möglicher % Einfluss einzelner Mechanismen auf die HQ ₁₀₀ in einem typischen Gebiet in der Region				
	Mittl. Monat HQ	Mittl. Monat HQ _{max}	1. Mechanism. Sommer/ Winter Niederschlag	2. Mechanism. Anteil konvektiver Niederschlag	3. Mechanism. Schneefallgrenze	4. Mechanism. Schneeschmelze Verdunst. → Abflussbeiw.	Alle Mechanismen (ca.)
Für typische Gebiete ca. 10 ² -10 ³ km ²							
1. Vorarlb.Süd, Südl. Innzubringer in Tirol	6,5 - 6,5	6,6 - 6,5	-3%	+6%	0%	-4%	-1%
2. Vorarlb. Nord, Lech	6,6 - 6,9	6,6 - 6,9	-3%	+2%	0%	-3%	-4%
3. Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach	6,2 - 6,2	6,2 - 6,4	-3%	+4%	0%	-5%	-4%
4. Traun, Enns, Erlauf, Traisen und Zubringer	5,9 - 5,8	5,9 - 5,8	-1%	+3%	+1%	-5%	-4%
5. Innviertel, Mühlviertel	5,2 - 4,3	6,8 - 6,7	+2%	+3%	+4%	0%	+10%
6. Waldviertel	5,2 - 4,4	6,7 - 6,8	0%	+3%	0%	+2%	+5%
7. Osten Österreichs	5,0 - 4,2	6,5 - 6,3	-2%	+10%	0%	-2%	+6%
8. Mur, Mürz und Zubringer, Gurk, Raab	6,6 - 6,6	6,9 - 6,9	+2%	+7%	0%	0%	+7%
9. Obere Salzach, Isel, Möll	7,0 - 7,1	7,2 - 7,1	0%	+5%	+1%	-1%	+3%
10. Gail u. Zubringer	7,1 - 7,3	7,3 - 7,3	0%	+6%	+1%	-2%	+3%

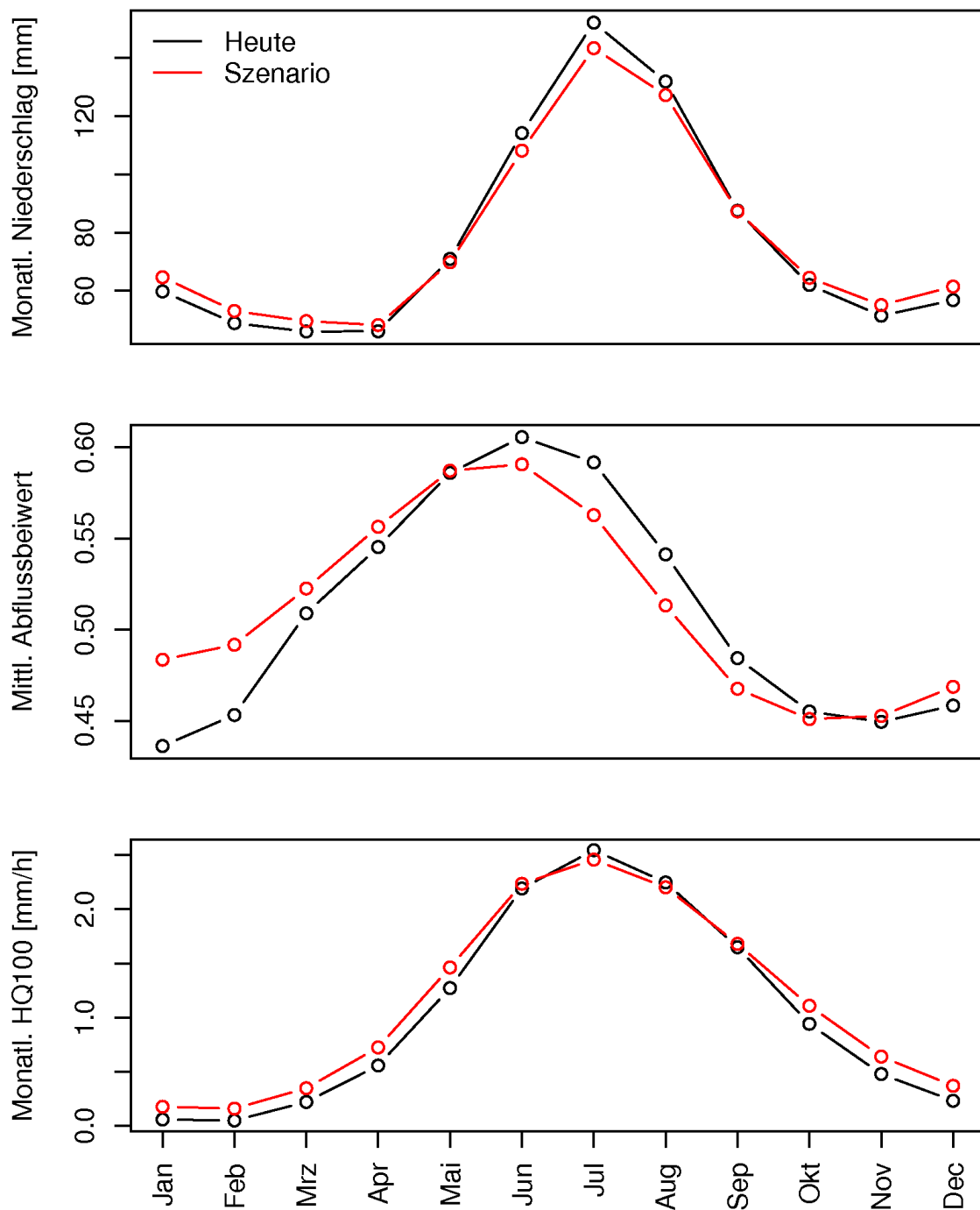


Abbildung 3-41: Vorarlb. Süd, Südl. Innzubringer in Tirol (1): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

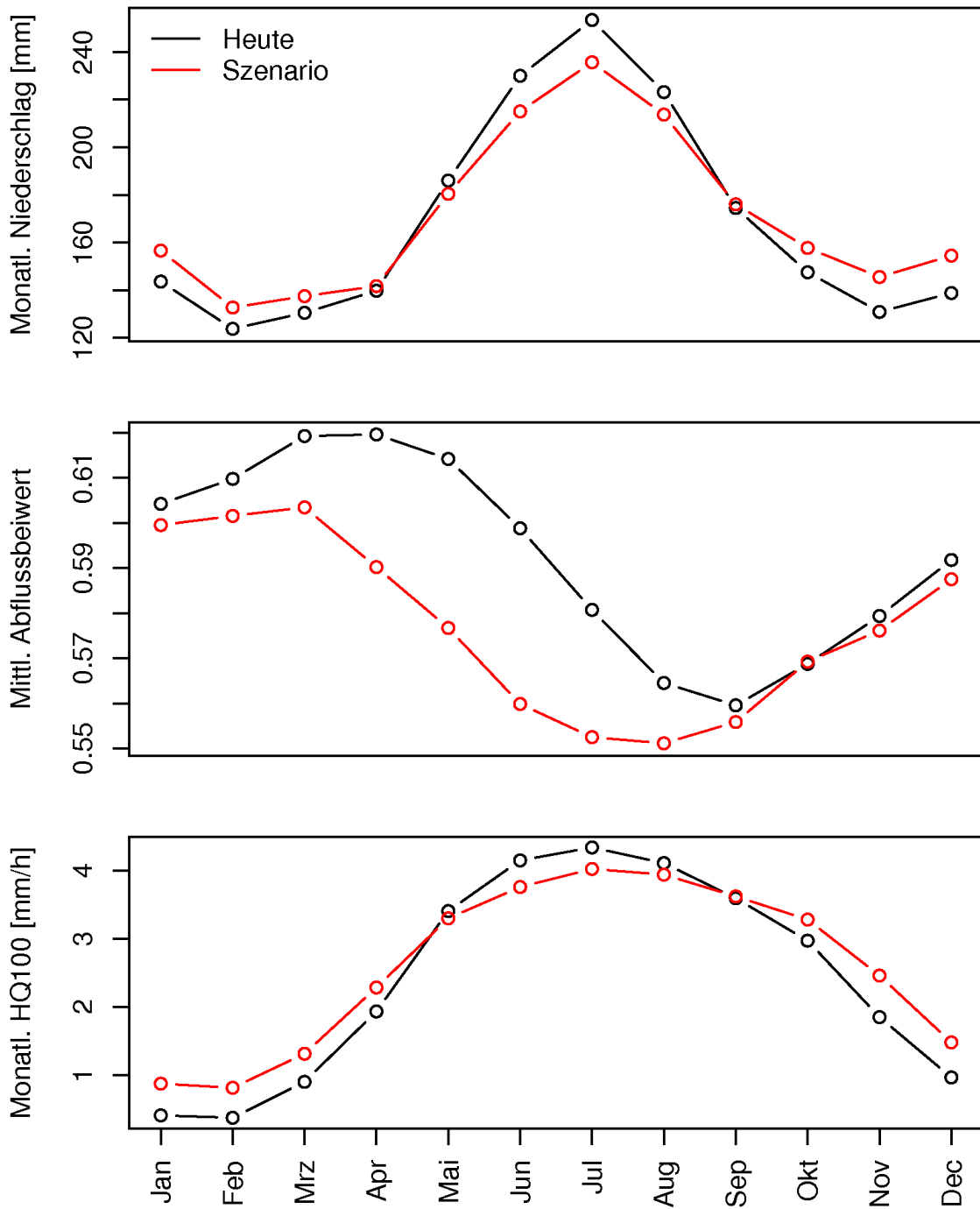


Abbildung 3-42: Vorarlb. Nord, Lech (2): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

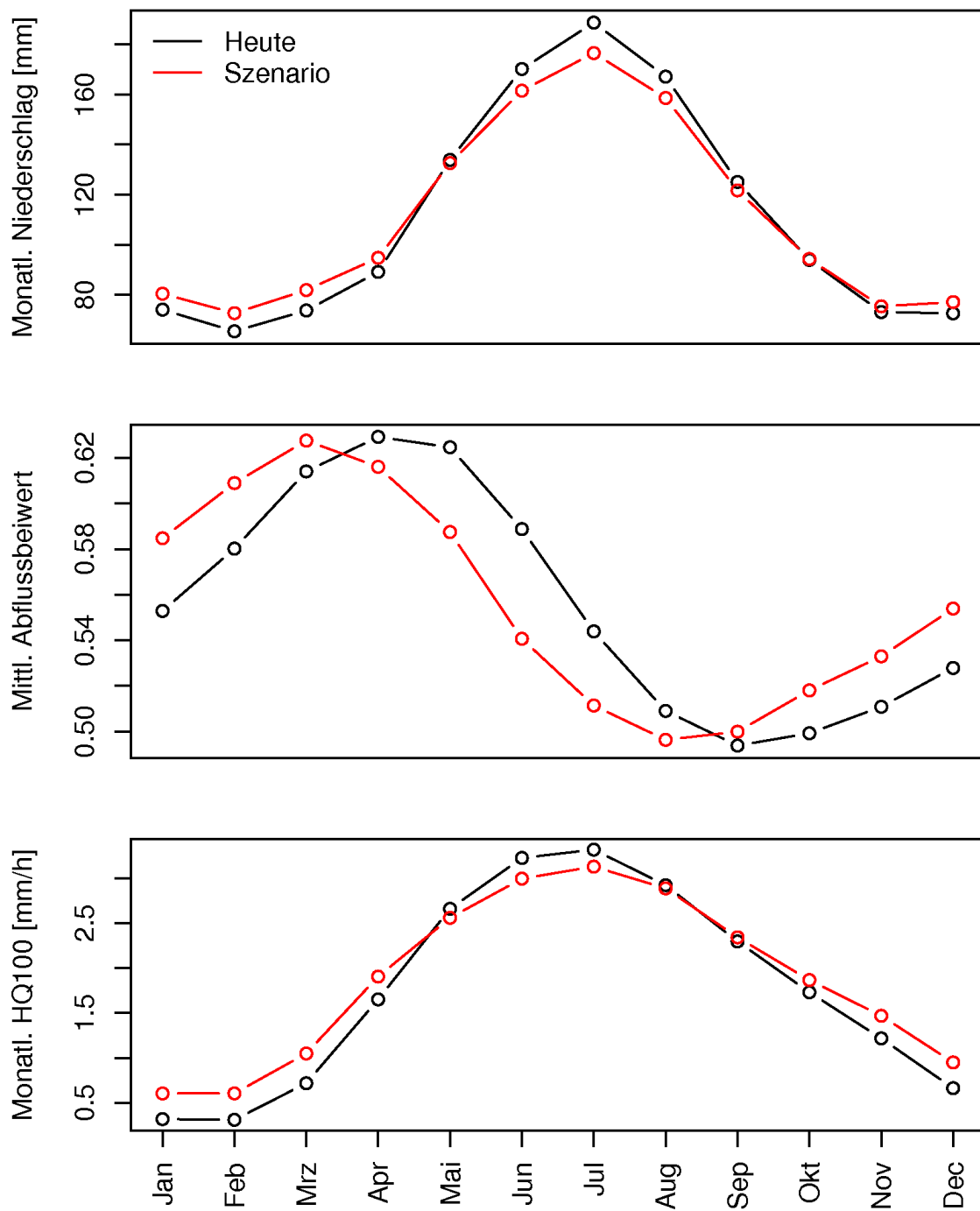


Abbildung 3-43: Nördl. Innzubringer in Tirol, Untere Salzach (3): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ_{100} in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

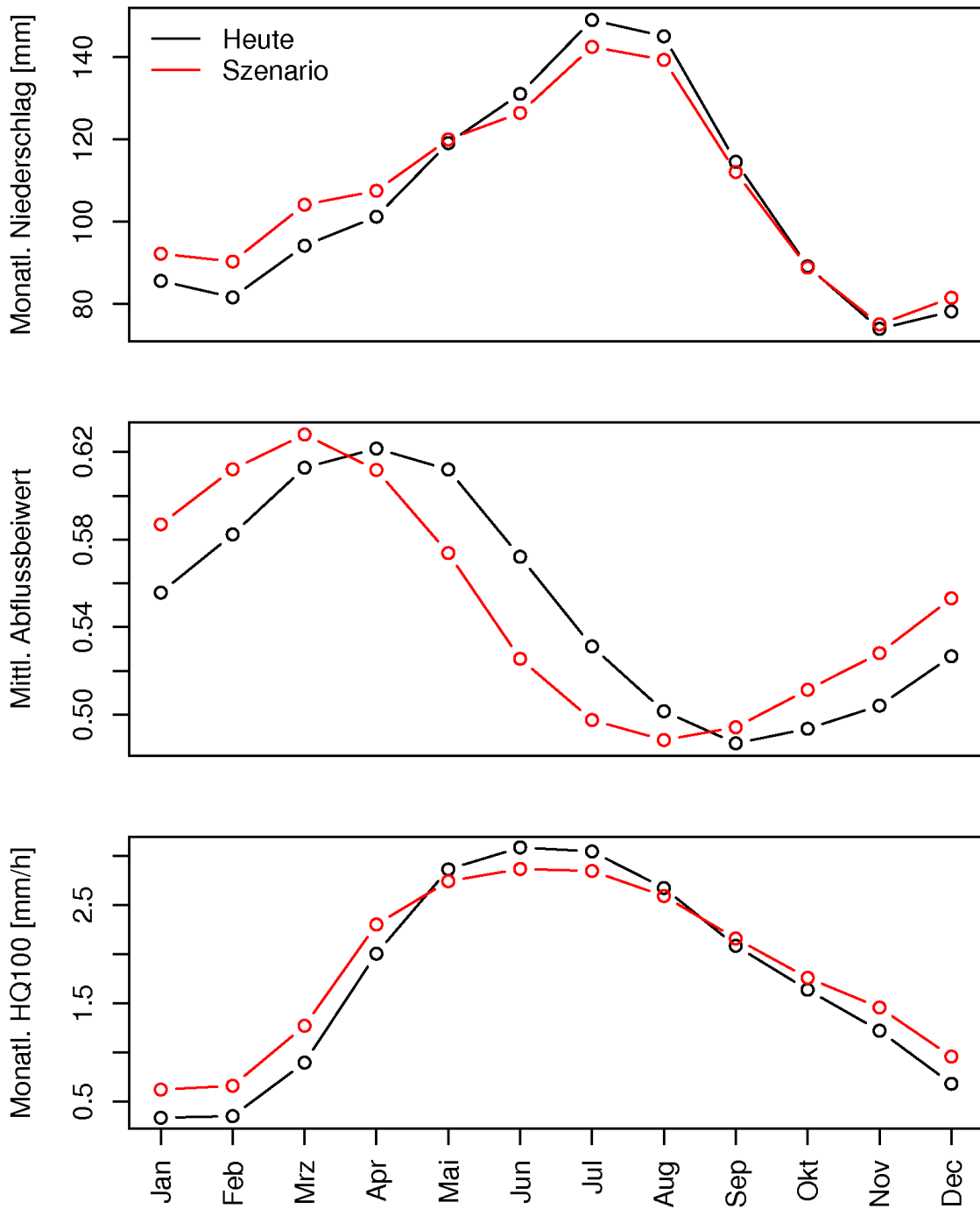


Abbildung 3-44: Traun, Enns, Erlauf, Traisen und Zubringer (4): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

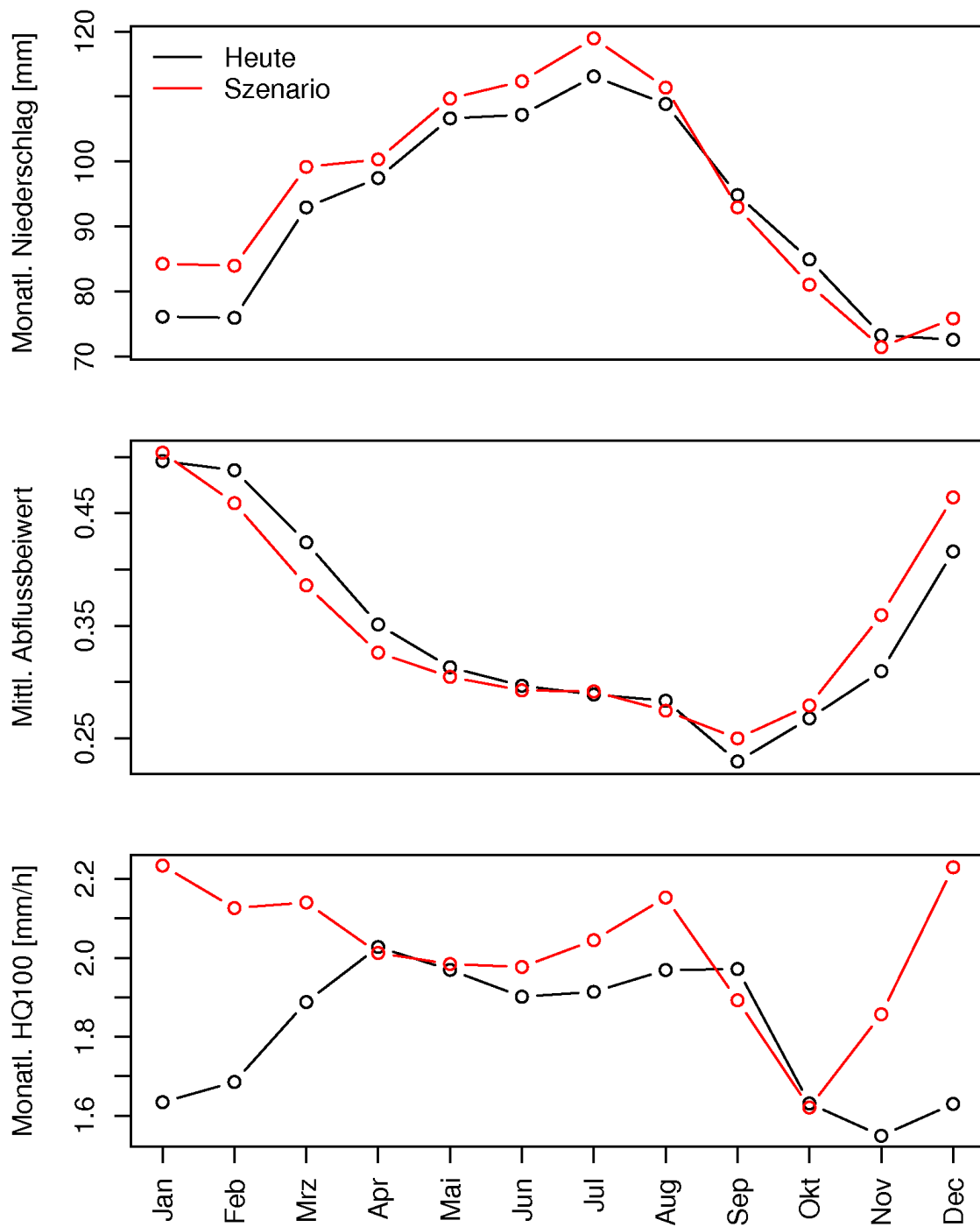


Abbildung 3-45: Innviertel, Mühlviertel (5): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

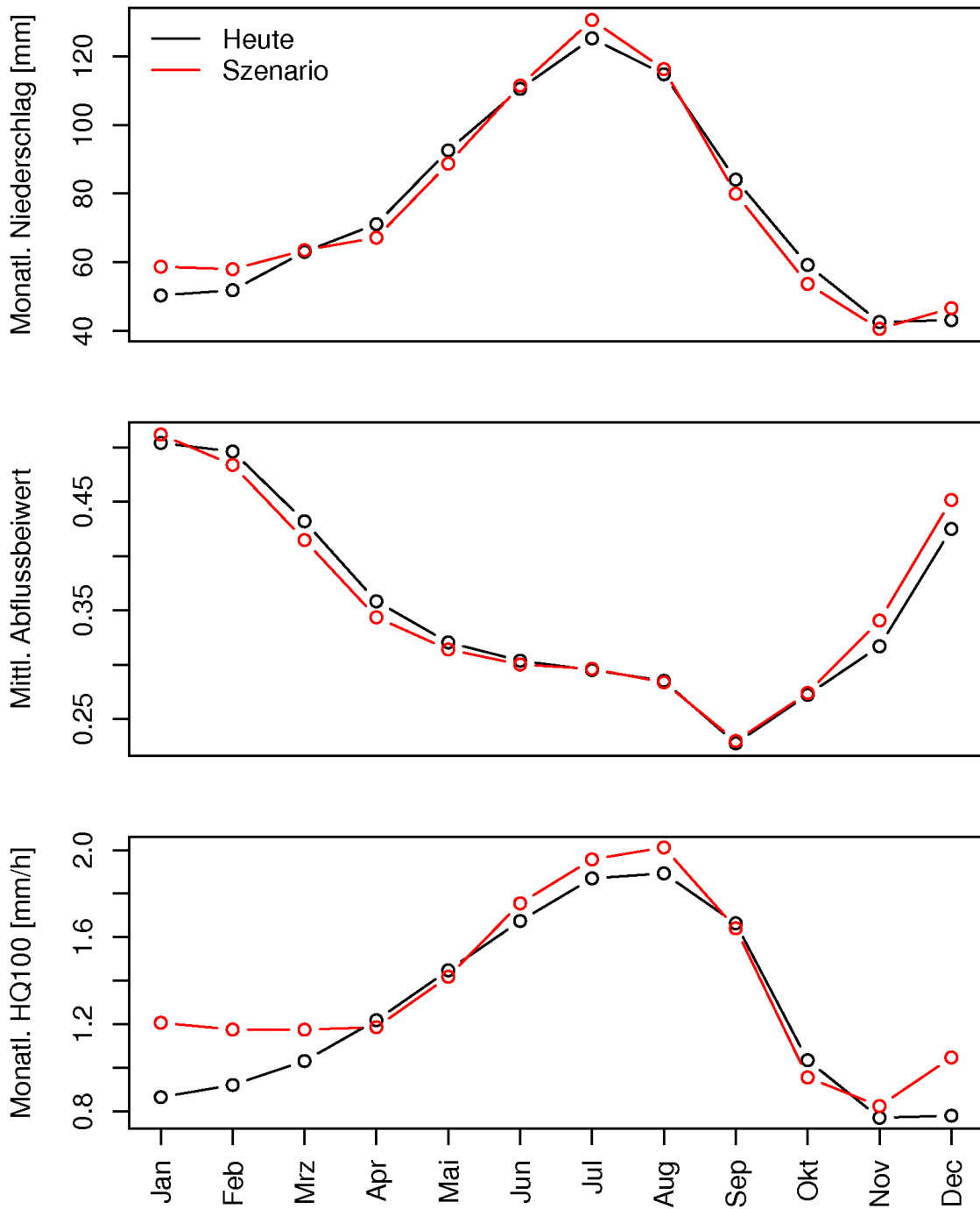


Abbildung 3-46: Waldviertel (6): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

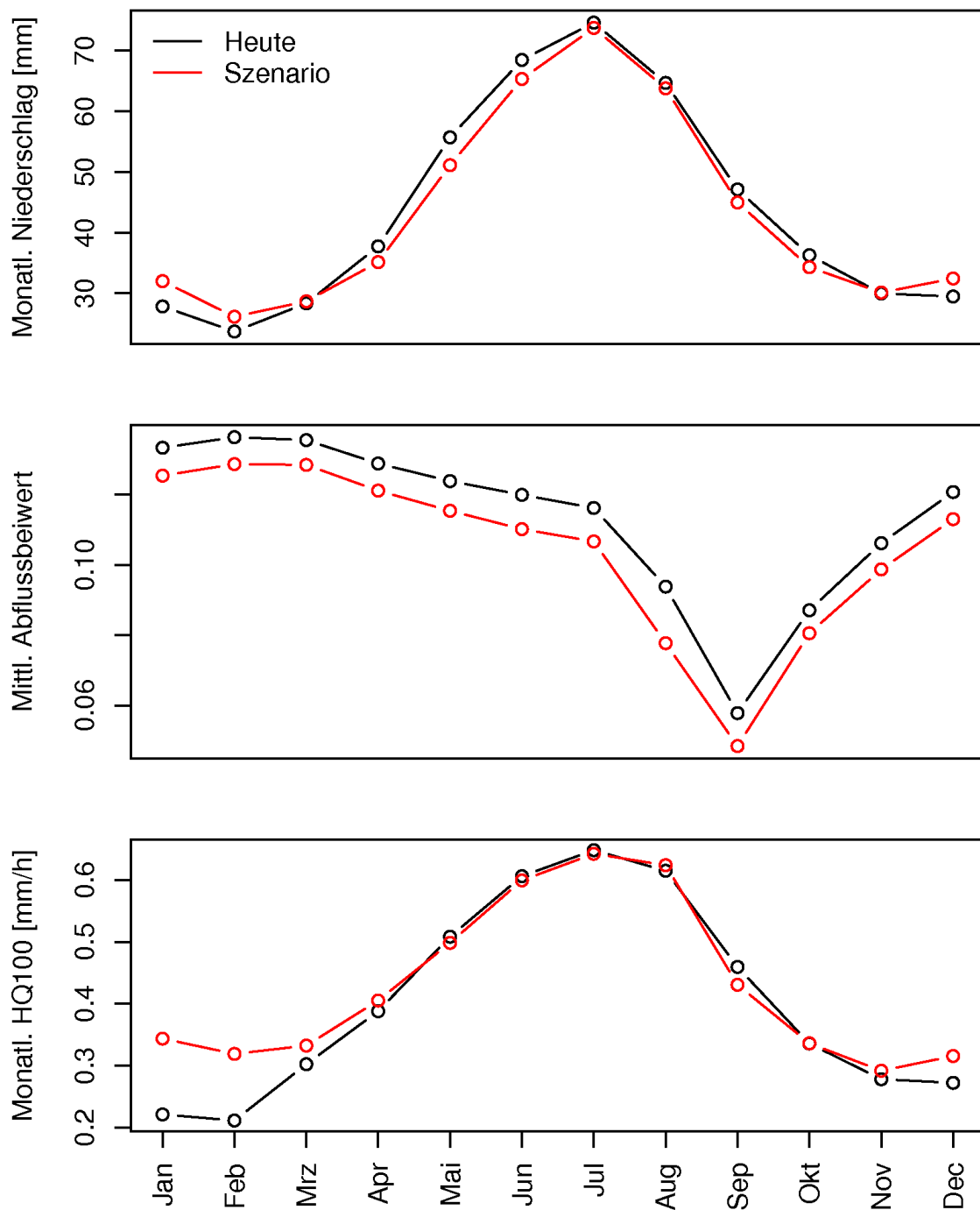


Abbildung 3-47: Osten Österreichs (7): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

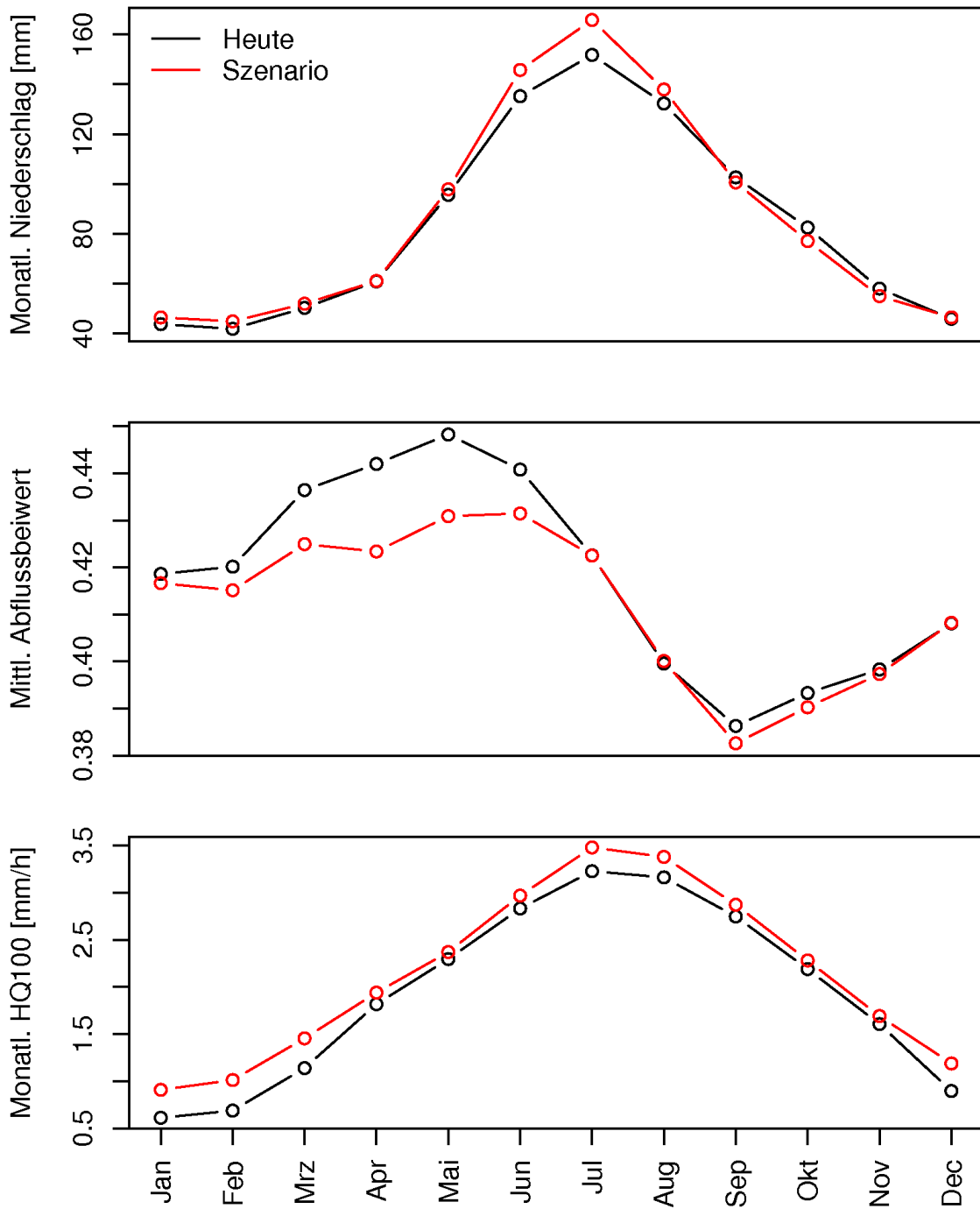


Abbildung 3-48: Mur, Mürz und Zubringer, Gurk, Raab (8): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

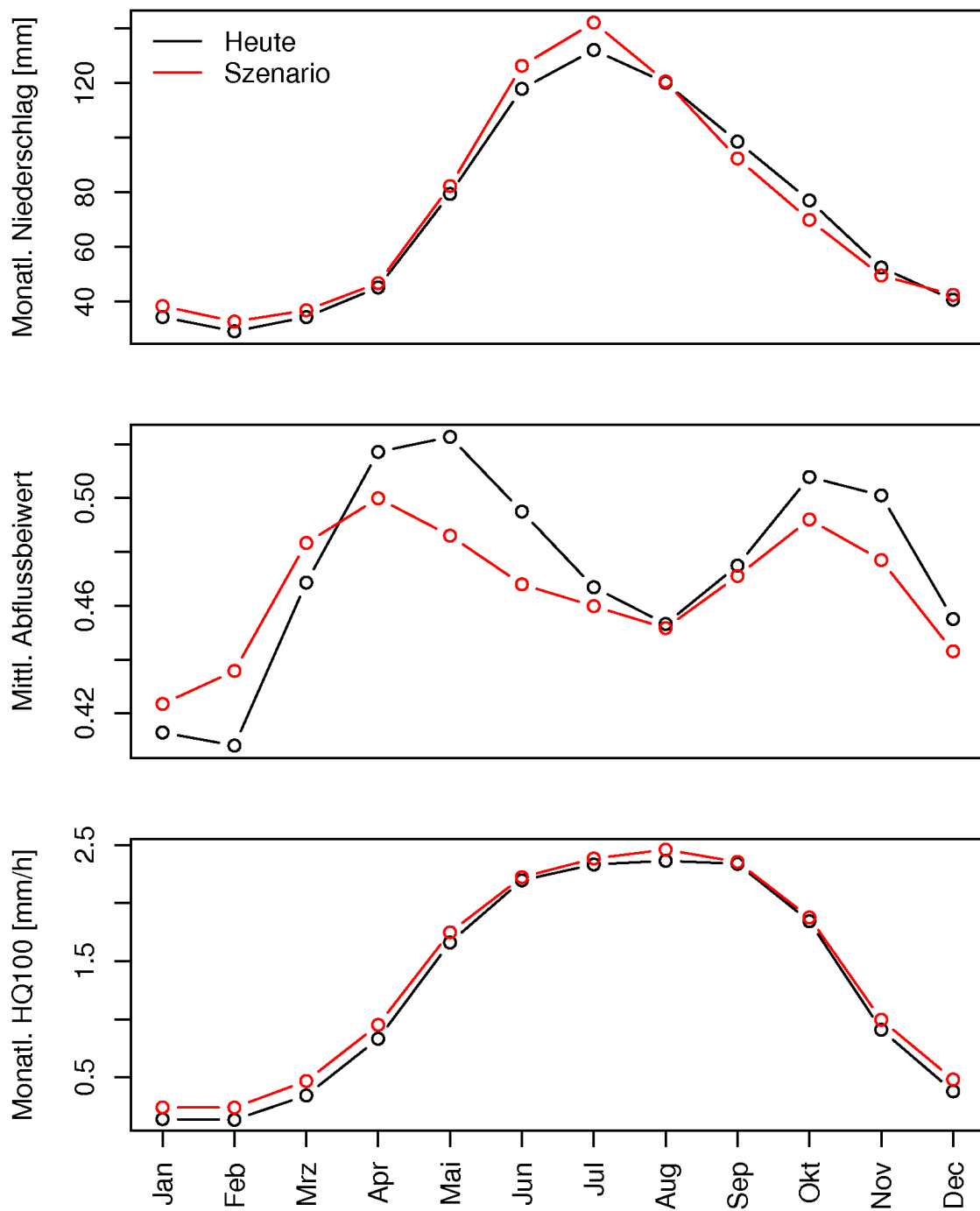


Abbildung 3-49: Obere Salzach, Isel, Möll (9): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ_{100} in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

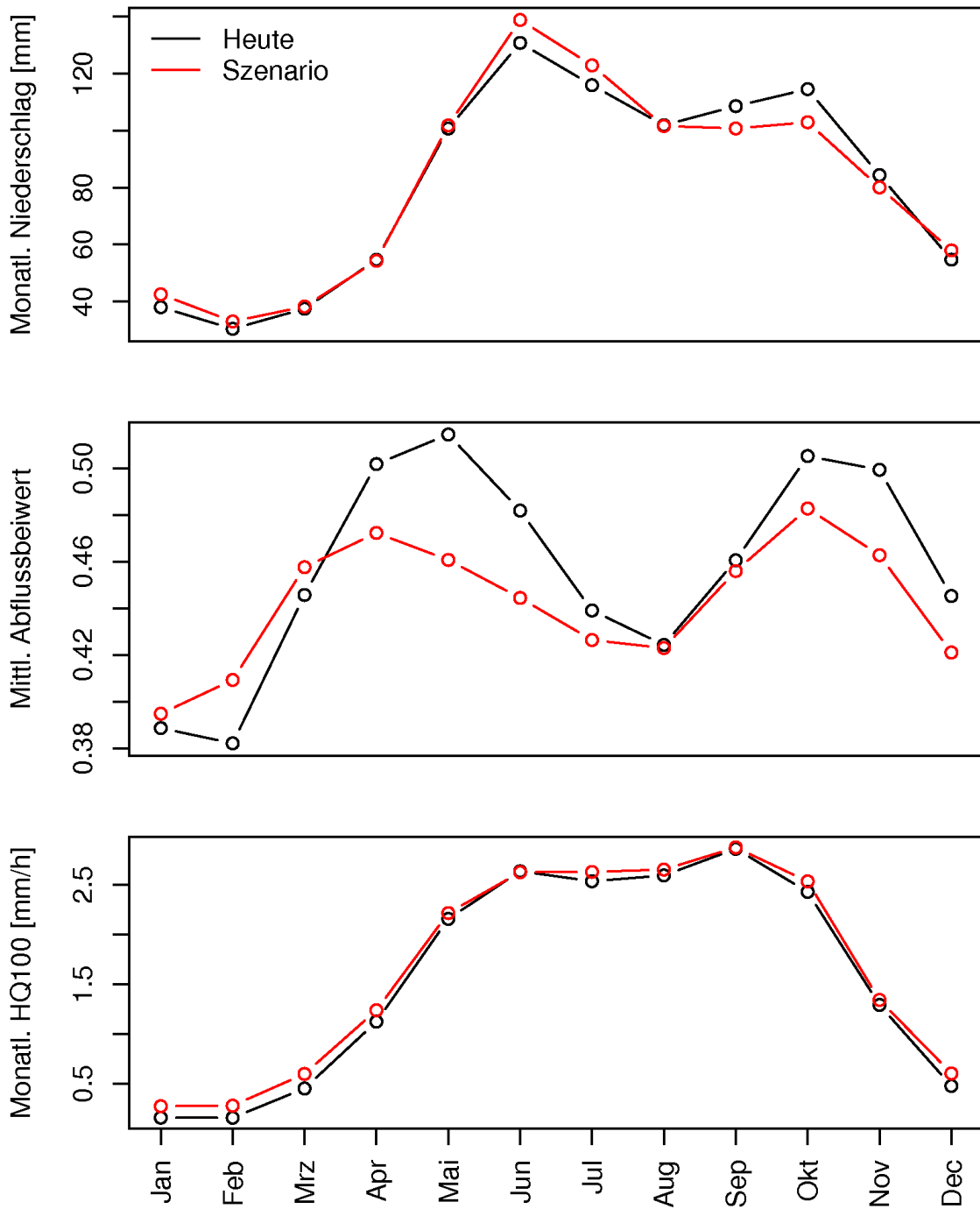


Abbildung 3-50: Gail u. Zubringer (10): simulierter Monatsniederschlag, mittlerer Ereignisabflussbeiwert und monatliches HQ₁₀₀ in einem typischen Einzugsgebiet. Heutige Bedingungen (schwarz) und Szenario mit allen vier Mechanismen (rot).

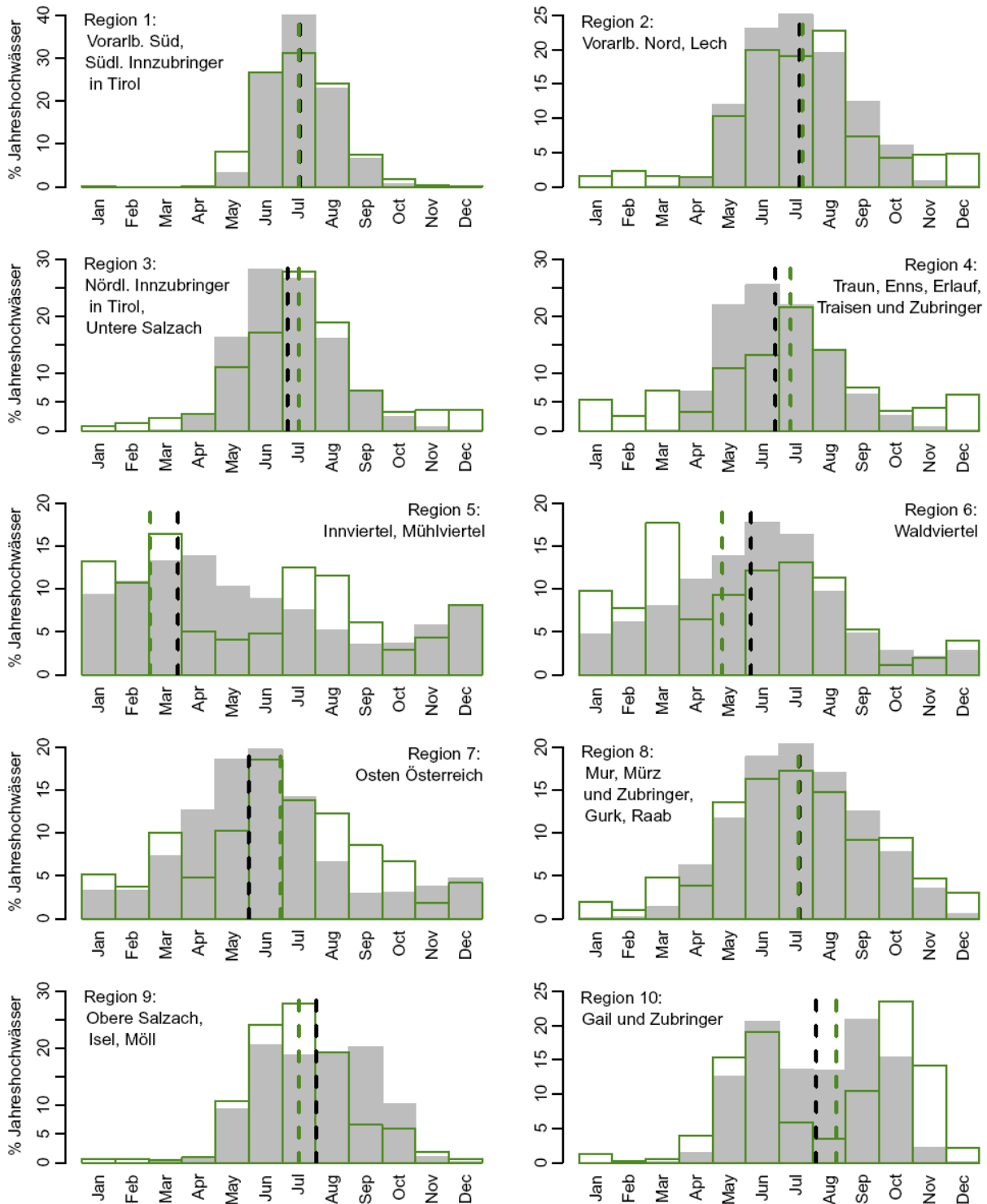


Abbildung 3-51: Saisonalität der Jahreshochwässer in den Regionen nach Abbildung 3-29 Grau: beobachtete Saisonalität aller Datenreihen in jeder Region bis 1997 (Gebiete kleiner 1000 km²). Grün: Simulationen für den gleichen Zeitraum. Strichlierte vertikale Linien zeigen den Mittelwert.

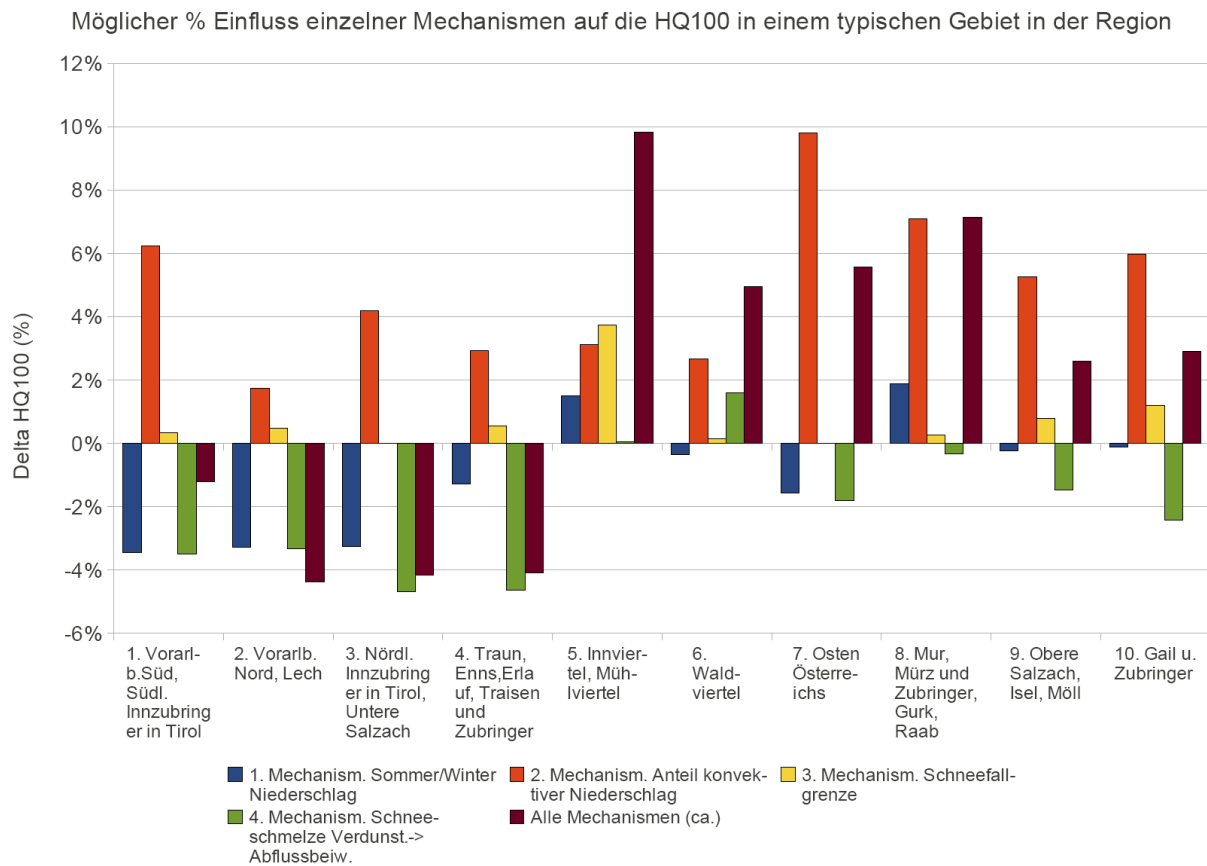


Abbildung 3-52: Sensitivität der HQ₁₀₀ bei bestimmten Annahmen der Änderungen im Niederschlag und der Abflussbildung (Wenn-Dann Szenarien 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007).

3.6 Zusammenschau der Auswertungen für Österreich

Die Zusammenschau der Szenarienanalysen für die verschiedenen Mechanismen (Abbildung 3-53) zeigt für den Einfluss der saisonalen Niederschläge ein unklares Bild. Eine Zunahme des konvektiven Anteils der Niederschläge wirkt sich überall in einer Zunahme der Hochwässer aus, allerdings handelt es sich dabei um eine weiche Aussage und die prozentmäßigen Änderungen sind klein (Tabelle 3-9). Eine Erhöhung der Schneefallgrenze wirkt sich nahezu nicht auf die Hochwässer aus. Wird der Einfluss früherer Schneeschmelze und damit geringerer Abflussbeiwerte im Sommer betrachtet, vermindern sich die Hochwässer, insbesondere in den Alpen. Eine gemeinsame Analyse aller Mechanismen (Abbildung 3-54) ergibt im Bereich des nördlichen Alpenhaupttrandes geringe Abnahmen des Hochwassers. Allerdings handelt es sich dabei um eine weiche Aussage. Im übrigen Österreich zeigen die Szenarien kleine Zunahmen, die durchwegs weich sind, im Innviertel und Mühlviertel hingegen als mittelhart angesehen werden, da die Änderungen etwas größer sind.

Ein Vergleich der Szenarien (Abbildung 3-54) mit den Trendanalysen (Abbildung 3-55 und Abbildung 3-56) zeigt folgendes Bild: Im Innviertel und Mühlviertel ergeben sowohl die Trendanalysen als auch die Szenarien Anstiege. Am nördlichen Alpenrand zeigen die Trendanalysen Anstiege (möglicherweise wegen veränderter atmosphärischer Zirkulationsmuster), die Szenarien zeigen jedoch eine Reduktion der Hochwässer wegen der geringeren projizierten Monatsniederschläge und der früheren Schneeschmelze. Im übrigen Österreich hängt die Konsistenz der Trendanalysen und Szenarien von der Wahl des Beobachtungszeitraumes ab. Dies weist darauf hin, dass die natürliche Variabilität der Hochwässer wesentlich größer ist, als die Änderung zufolge des Klimawandels. Es ist

deshalb zu erwarten, dass die in der Vergangenheit eminent große Variabilität der Hochwässer auch in der Zukunft bei der Ermittlung von Bemessungswerten im Vordergrund stehen wird.

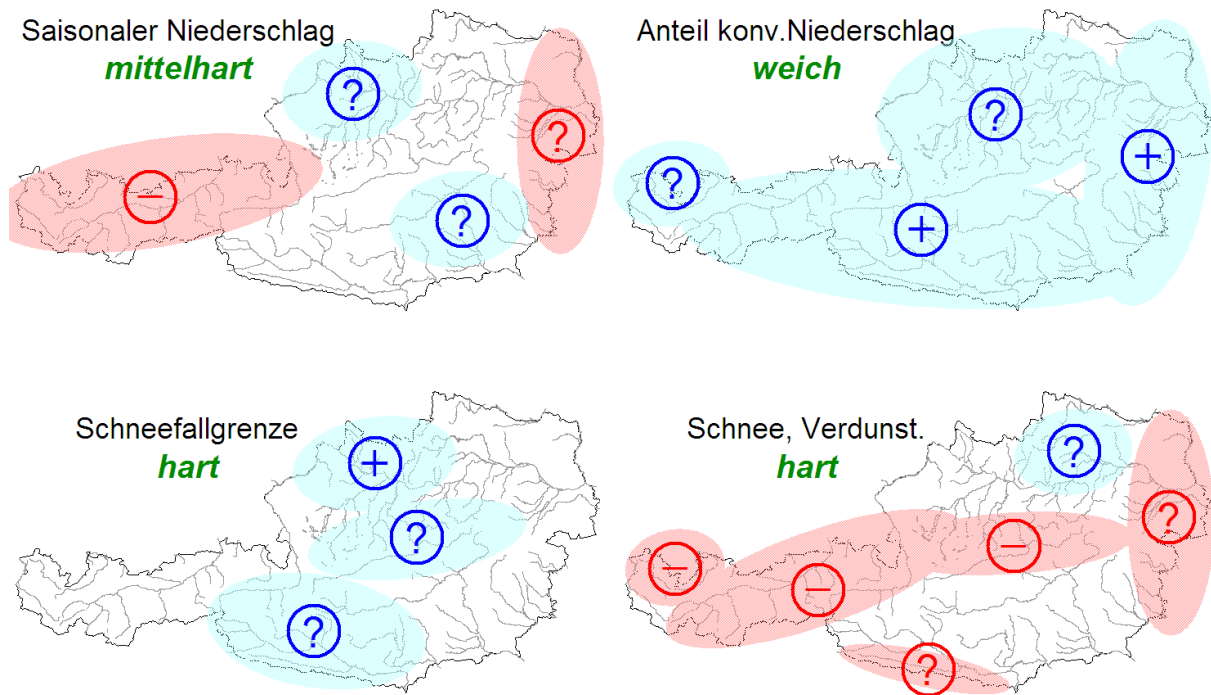


Abbildung 3-53: Generalisierte Änderungen des HQ_{100} aus den Szenarienanalysen (Delta-Change) für die einzelnen Mechanismen. 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006.

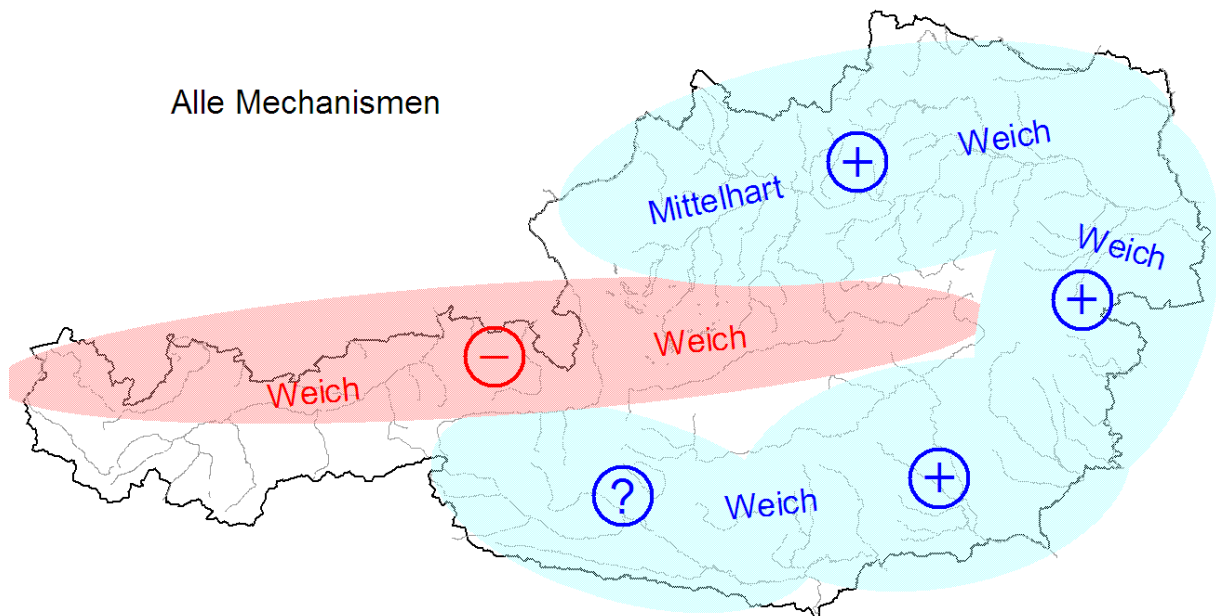


Abbildung 3-54: Generalisierte Änderungen des HQ_{100} aus den Szenarienanalysen (Delta-Change) für alle Mechanismen gemeinsam. 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006.

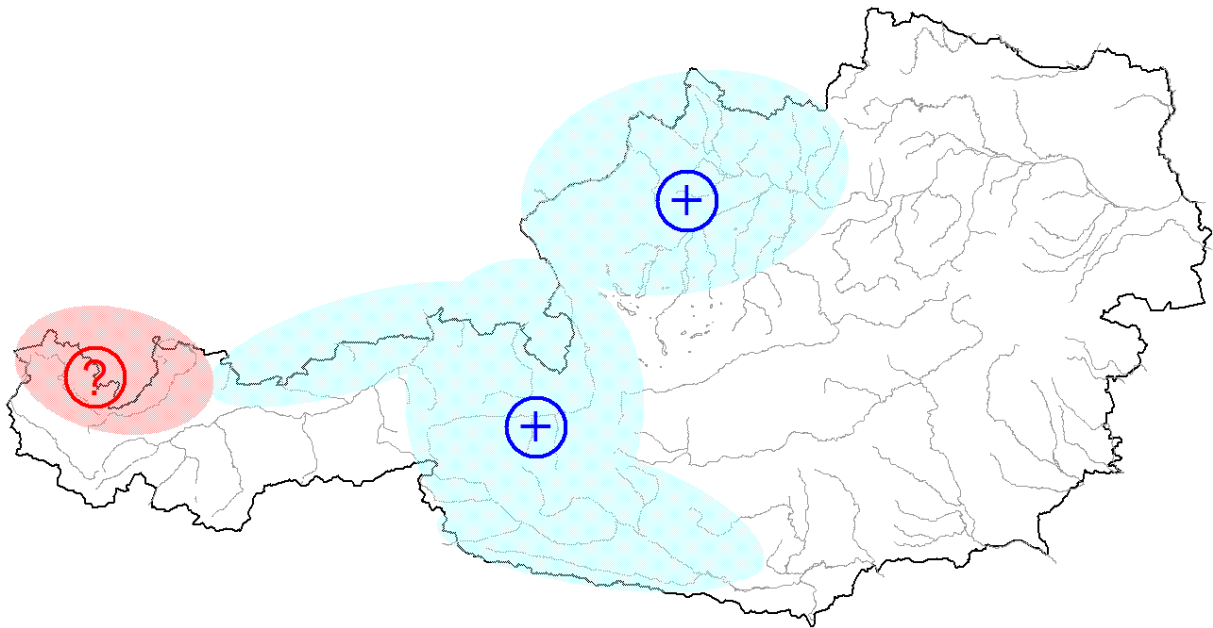


Abbildung 3-55: Generalisierte Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1955-2007 (mindestens 40 Jahre). Markiert wurden die Regionen nach Abbildung 3-29, in denen mehr als die Hälfte der Stationen signifikante Trends in dieser Periode aufwies (nach Tabelle 3-6).

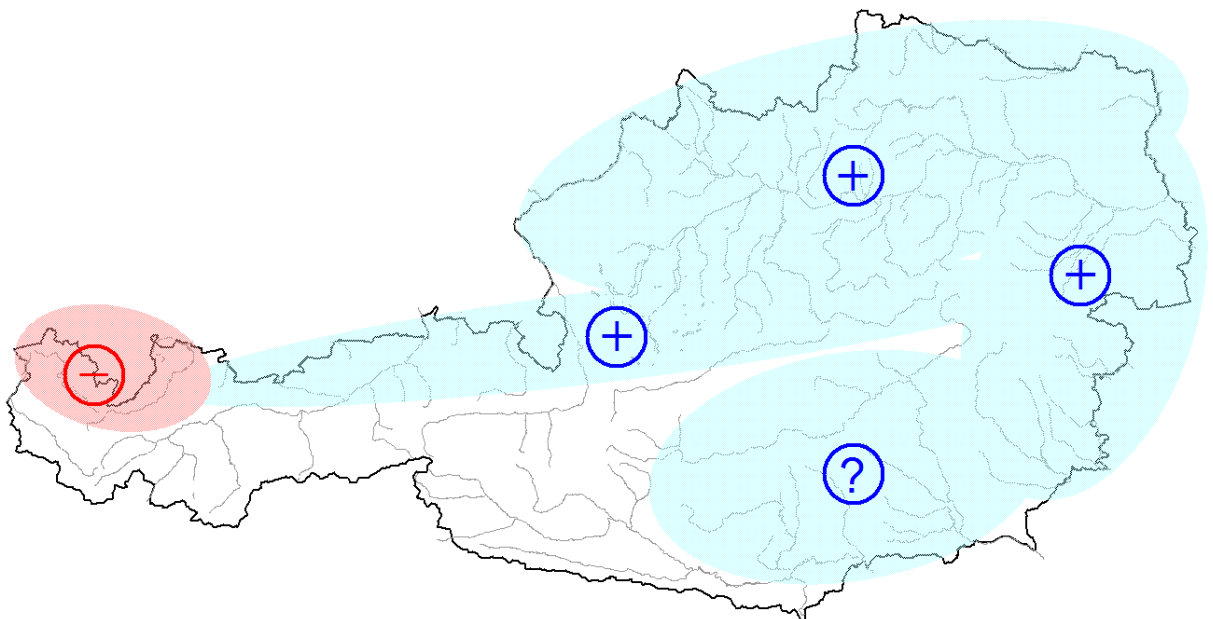


Abbildung 3-56: Generalisierte Trends von Jahresmaxima der Hochwässer für die Reihe 1976-2007 (mindestens 25 Jahre). Markiert wurden die Regionen nach Abbildung 3-29, in denen mehr als die Hälfte der Stationen signifikante Trends in dieser Periode aufwies (nach Tabelle 3-6).

4. Wasserdargebot Oberflächenwasser

4.1 Kurzfassung

Situation in der Vergangenheit

- Der Jahresabfluss im Zeitraum 1976-2007 zeigt für die meisten Pegel (81%) keine signifikanten Trends. Für einen Teil der Gebiete sind jedoch Trends abzulesen: im Süden fallende Trends, im östlichen Alpenraum steigende Trends und in Vorarlberg fallende Trends. Im Mittel für Österreich heben sich diese Trends ungefähr auf (9% der Pegel steigend, 10% fallend). Das grobe räumliche Muster von Jahresabfluss und Niederschlag ist zwar konsistent, aber generell gibt es beim Niederschlag eine wesentlich stärker Tendenz zu Zunahmen als beim Abfluss (*harte Aussage*).
- Jahreszeitlich sind generell sinkende Sommerabflüsse zu verzeichnen, mit Ausnahme des Ostens Österreichs, wo die Abflüsse steigen. Im Frühjahr nehmen die Abflüsse in Kärnten ab. Im Herbst ist in den östlichen Teilen der Alpen eine Zunahme der Abflüsse festzustellen. Generell sind keine steigenden Winterabflüsse festzustellen (*harte Aussage*).
- Betrachtet man den längeren Zeitraum 1950-2007 ist ebenfalls die Anzahl der Pegel mit nicht signifikanten Trends der Jahresabflüsse groß. Die Pegel mit fallenden Trends überwiegen aber gegenüber den Pegeln mit steigenden Trends. Die fallenden Trends treten vor allem im Süden und Südosten Österreichs auf und finden sich in allen Jahreszeiten wieder, besonders im Frühjahr und Winter. Die räumlichen Unterschiede im Jahresabfluss stimmen gut mit dem Niederschlag überein (*harte Aussage*).
- Sensitivität: Im Flachland (besonders im Osten und Südosten) reagiert der mittlere jährliche Abfluss sensitiver auf Änderungen des Niederschlags und der Lufttemperatur als im Alpenraum (*harte Aussage*).

Situation in der Zukunft

Mittlerer Jahresabfluss:

- Die natürliche Variabilität des mittleren jährlichen Abflusses zwischen den Jahren ist größer als die zufolge Klimaänderung im Zeitraum 2021-2050 zu erwartenden Änderungen (*mittelharte Aussage*).
- Die Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 sind vermutlich kleiner als +/-5% (*mittelharte Aussage*).
- Im Südosten ist möglicherweise eine Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 zu erwarten (<5%) (*weiche Aussage*).

Saisonalität des Abflusses:

- In ganz Österreich mit Ausnahme des Südens ist eine Erhöhung der Winterabflüsse um ca. 20% zu erwarten (*mittelharte Aussage*).
- Im Osten (Flachland) ist eine Abnahme des Frühjahrsabflusses und im Westen (Alpen) eine Abnahme des Sommerabflusses um jeweils ca. 10-20% zu erwarten (*weiche Aussage*).
- Im Westen (Alpen) sind möglicherweise etwas frühere Abflussmaxima zu erwarten (Verschiebung von Mitte auf Anfang Juni). Im Süden sind möglicherweise spätere Abflussmaxima zu erwarten (Verschiebung vom Sommer in den Herbst). Im nördlichen Alpenvorland verschieben sich die Abflussminima möglicherweise vom Winter in den Sommer (*weiche Aussage*).

Gletschereinfluss:

- Insgesamt ist in Österreich mit einem Rückgang der Gletscher bis 2050 zu rechnen. Dadurch steigt die Gletscherschmelze weiterhin an (*harte Aussage*).
- Das Maximum der Gletscherschmelze dürfte um die Jahre 2040-2050 erreicht werden, wobei sich der Zeitpunkt des Maximums je nach Gletscher unterscheidet (*mittelharte Aussage*).
- Lokal betrachtet bewirkt die verstärkte Gletscherschmelze im unmittelbaren Gletscherbereich eine deutliche Zunahme der Abflüsse in den Sommermonaten bis zum Zeitpunkt des Maximums (*harte Aussage*).
- Regional betrachtet ist der Beitrag der Gletscherschmelze zum Wasserdargebot in durchschnittlichen Jahren vernachlässigbar. Deshalb sind die Änderungen zufolge Klimawandel sehr klein (*harte Aussage*).
- In Extremjahren kann der Beitrag der Gletscherschmelze zum Wasserdargebot und damit der Einfluss der Klimaänderung deutlich sein. Am Pegel Mittersill an der Salzach (552 km²) beispielsweise betrug er im Jahr 2003 ca. 15% (*mittelharte Aussage*).

Anpassungsmaßnahmen

- Wenn Klimaimpactanalysen durchgeführt werden, sollten sie verstärkt untersuchen, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen bewirkt werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen (*harte Aussage*).
- Es ist sinnvoll, Änderungen im Wasserdargebot der Oberflächenwasser mit mehreren Methoden zu untersuchen, die sich in Hinblick auf Daten und Annahmen unterscheiden, um die Zuverlässigkeit der Aussage zu erhöhen (*harte Aussage*). Trendanalysen, Szenarienanalysen, Elastizität (zeitlich) und „Trading space for time“ (räumlich) ergänzen sich.
- Die für 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 zu erwartenden Änderungen im mittleren jährlichen Wasserdargebot der Oberflächenwasser sind vermutlich klein. Aus Sicht einer österreichweiten Bilanz ist zu erwarten, dass die erhöhte Verdunstung im Wesentlichen durch erhöhten Niederschlag ausgeglichen wird. Da die natürliche Variabilität des mittleren jährlichen Abflusses zwischen den Jahren größer als die zufolge Klimaänderung für 2021-2050 zu erwartenden Änderungen ist, erscheinen aus österreichweiter Sicht nicht grundsätzlich andere Bewirtschaftungsmaßnahmen in Hinblick auf das Wasserdargebot der Oberflächenwasser notwendig.
- Regional kann es aber durchaus zu Unterschieden kommen. Ebenso kann es jahreszeitlich zu deutlichen Verschiebungen kommen. Die Sensitivität des mittleren jährlichen Abflusses auf Änderungen des Niederschlags und der Lufttemperatur ist im Flachland (besonders im Osten und Südosten) wesentlich größer als im Alpenraum. Es wird deshalb empfohlen, diesen Regionen besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Das sind auch die Regionen Österreichs, die schon jetzt relativ geringe Abflussspenden aufweisen (<10 l/s/km²) und in den letzten Jahren teilweise abnehmende Tendenzen des Abflusses zeigten. Welche wasserwirtschaftlichen Auswirkungen Engpässe beim Wasserdargebot haben könnten, lässt sich am Jahr 2003 ablesen. Daher eignet sich dieses Jahr für Untersuchungen etwaiger Wasserknappheit.
- Da die derzeitige Kenntnis der aktuellen Verdunstung bei der Bestimmung des Wasserdargebots nicht ausreichend ist, sollten Messstellen eingerichtet werden, die die aktuelle Verdunstung direkt messen (Eddy Correlation).

4.2 Vorgangsweise

Die Abschätzung möglicher Änderungen des Wasserdargebots der Oberflächenwasser zufolge Klimaänderung ist methodisch herausfordernd, da eine Vielzahl von Unsicherheiten die Aussage erschwert. Deswegen ist es notwendig, die Untersuchungen auf eine möglichst solide methodische Basis zu stellen. Dem grundsätzlichen Ansatz der Wissenschaft folgend, wird es hier als notwendig erachtet, die Fragestellung mit mehreren Methoden zu untersuchen, die sich in Hinblick auf Daten und Annahmen unterscheiden. Dadurch ist zu erwarten, dass die Zuverlässigkeit der Aussage erhöht wird. Die zwei üblichen Ansätze, Trendanalysen und Szenarienanalysen, unterscheiden sich wesentlich in Hinblick auf Daten und Modellannahmen. Während die Trendanalysen vor allem datenbasiert sind, liegt der Schwerpunkt bei Szenarienanalysen auf der Modellierung. Bei letzteren gibt es Unsicherheiten einerseits bei den Klimaszenarien, andererseits bei der Übertragung dieser Szenarien in den Abfluss. Bei den Trendanalysen ist die Übertragbarkeit auf die Zukunft fraglich und das Beobachtungsfenster hat meist einen entscheidenden Einfluss auf die Aussage. Wegen dieser Unsicherheiten werden hier zwei zusätzliche, neue Methoden angewandt: die Elastizitätsmethode, die auf einer Analyse der zeitlichen Variabilität der Daten basiert und die „Trading space for time“ Methode, die auf einer Analyse der räumlichen Variabilität der Daten basiert. In Hinblick auf Modellannahmen und Datenbasiertheit liegen die beiden neuen Methoden zwischen Trendanalyse und Szenarienansatz. Es ist deshalb eine wertvolle Ergänzung zu erwarten (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Die vier hier verwendeten Ansätze zur Beurteilung der Änderungen im Wasserdargebot der Oberflächenwasser

Ansatz	datenbasiert	modellbasiert	prognostisch	Kapitel
Trendanalysen (Niederschlag, Abfluss)	sehr stark	sehr gering	nein	4.4
Trading space for time (räumlich)	stark	gering	ja	4.7
Elastizität (zeitlich)	stark	mittel	ja	4.6
Szenarienanalysen (Delta-Change)	gering	stark	ja	4.5

4.3 Prozesse der Abflussentstehung in Österreich auf regionaler Ebene

4.3.1 Abflussregime und Saisonalität

Fazit:

- Die Abflussprozesse in Österreich unterscheiden sich je nach der Region. Das Abflussregime wird durch das Wechselspiel der Saisonalität von Niederschlag, Schnee und Verdunstung bestimmt.
- Die Saisonalität des Abflusses und seiner Einflussgrößen sind Schlüsselgrößen bei der Analyse klimainduzierter Änderungen des Abflusses.

Die Verteilung des Abflusses und anderer hydrologischer Größen innerhalb des Jahres erlaubt es, wertvolle Aufschlüsse über die wirksamen hydrologischen Prozesse zu erhalten. Die Jahreszeitliche Verteilung und das damit verbundene Abflussregime ist die Grundlage für jede hydrologische Beurteilung, insbesondere wenn es um Veränderungen des Abflusses geht. Dabei ist eine Zusammenschau der Beiträge von Regen, Schnee und Verdunstung von besonderem Interesse (Weingartner, 1999; Laaha und Blöschl, 2003).

Das Abflussregime in Österreich wird unterteilt in Hinblick auf den Schneeanteil im Abfluss, den Beitrag des Regens und dessen zeitlichen Verteilung und dem Einfluss der Verdunstung (Kresser, Merz, Parajka). Abbildung 4-1 zeigt Beispiele für die Abflussregimes in Österreich. Das Regen Regime mit einem durch die Stochastizität des Niederschlags geprägten Abfluss sowie möglicher Sommerniederwässer tritt im Flachland im Norden und Osten Österreichs auf. Das voralpine Schnee Regime mit Schneeschmelze im Frühjahr tritt im Alpenvorland bzw. niedrigen Teilen der Alpen auf. Das alpine Schnee Regime mit Schneeschmelze im Frühsommer tritt in den Alpen auf. Das Herbstniederschlags Regime mit einer bimodalen Abflussverteilung (Schneeschmelze im Frühjahr, Hochwässer im Herbst) tritt im Süden Österreichs auf, insbesondere an der Gail. Die Komponenten der Wasserbilanz für diese Regimes sind in Abbildung 4-3 dargestellt. Die Balken zeigen die Variabilität innerhalb des Monats und zwischen den Jahren, die je nach Regime unterschiedlich ist. Beim Regenregime kann sie ein Mehrfaches des Mittelwertes sein, mit zunehmendem Schneeanteil nimmt die Variabilität ab.

Räumliche Darstellungen der Saisonalität zeigt Abbildung 4-4. Eingetragen ist der Monat in dem im Mittel das Maximum auftritt (Farbe) sowie die Ausprägung der Saisonalität (starke Saisonalität dunkel, schwache Saisonalität hell). Die Monatssummen der Niederschläge in Österreich sind generell im Sommer am höchsten (Abbildung 4-4 oben). Die räumliche Verteilung der Saisonalität ist ziemlich homogen. Im größten Teil Österreichs treten die Maxima der Monatsniederschläge im Mittel im Juli auf. Im Osten (Waldviertel, Weinviertel sowie Burgenland und Oststeiermark) treten die Maxima jedoch etwas früher auf (im Juni), im Süden Österreichs etwas später (im August). Im Großteil Österreichs ist mittlere Intensität der Saisonalität anzutreffen, im Süden Österreichs (Karawanken) jedoch schwache Intensität. Hier treten zusätzlich zu den sommerbetonten Niederschlägen ausgiebige Niederschläge im Herbst auf, die insgesamt ein ausgeglicheneres Niederschlagsregime (geringe Intensität der Saisonalität) bewirken. Die Saisonalität der Monatsabflüsse in Österreich ist generell stark durch die Schneespeicherung im Winter und die Schneeschmelze im Frühjahr geprägt (Abbildung 4-4 unten). Unterschiede ergeben sich vor allem durch die Höhenlage. Im Hochgebirge ist ein Maximum im Juli mit starker Intensität der Saisonalität anzutreffen. Schnee- und Gletscherschmelze treten vor allem im Juni und Juli auf und führen zu maximalen Abflüssen im Juli. In den etwas niedrigeren alpinen Lagen treten die maximalen Monatsabflüsse im Juni und im Mai auf. Die Intensität der Saisonalität ist ebenfalls stark. Hier ist die Schneeschmelze die wichtigste Einflussgröße auf die Saisonalität des Abflusses. Die Saisonalität der Niederschläge hat demgegenüber einen geringeren Einfluss auf das Abflussregime, denn die größeren Niederschläge im Sommer werden größtenteils durch die größere Verdunstung im Sommer ausgeglichen. Unter Verwendung von Wasserbilanzrechnungen zeigte Merz (2002), dass in diesen Gebieten die aktuelle Gebietsverdunstung im Sommer typischerweise um etwa 50 mm/Monat größer ist als im Winter. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie die Differenz zwischen den mittleren Monatsniederschlägen im Juli und im Jänner in dieser Region.

In den restlichen Gebieten Österreichs zeigt sich eine mittlere Saisonalität der Monatsabflüsse, d.h. ein zeitlich stärker ausgeglichenes Abflussregime, wobei die Maxima des Abflusses in unterschiedlichen Monaten anzutreffen sind. Im Innviertel treten maximale Monatsabflüsse im Februar auf. Die Schneedecke wirkt hier in erster Linie nicht direkt als Abflussbeitrag der Schneeschmelze, sondern indirekt durch Anheben der Bodenfeuchte. Die geringsten Bodenfeuchtedefizite treten im Februar auf (Merz, 2002). Ähnliches gilt für das Mühlviertel, wobei allerdings die Maxima etwas später (im März) auftreten. Im Bereich des Alpenvorlandes sind die Maxima des Monatsabflusses im April anzutreffen. Dies ist vor allem auf den Einfluss der Schneeschmelze zurückzuführen. Die größeren Monatsniederschläge im Sommer werden wieder größtenteils durch die Verdunstung kompensiert. In Ostösterreich (Burgenland, Oststeiermark) ist der Einfluss der Schneeschmelze untergeordnet. Hier ergeben sich zwar Maxima der Monatsabflüsse im April bis Mai mit mittlerer bis schwacher Intensität. Dies dürfte jedoch darauf zurückzuführen sein, dass die größere Verdunstung im Sommer den größeren Niederschlag im Sommer kompensiert oder übertrifft. Merz (2002) zeigte, dass die aktuelle Verdunstung im Sommer typischerweise 60 mm/Monat größer ist

als im Winter, während die Niederschläge im Sommer typischerweise nur 40 mm/Monat größer sind als im Winter. Dies führt zu einem ausgeglichenen Abflussregime mit einer Tendenz zu geringeren Werten im Sommer und Herbst.

Die großen Vorfluter Österreichs (> 5000 km²) weisen die folgende Saisonalität der Monatsabflüsse auf: Tiroler Inn, Rhein: starke Saisonalität mit Maxima im Juni; Oberösterreichischer Inn, Salzach: mittlere Saisonalität mit Maxima im Juni; Österreichische Donau: mittlere (bis schwache) Saisonalität mit Maxima im Juni; Enns, Mur: mittlere Saisonalität mit Maxima im Mai; Drau: mittlere Saisonalität mit Maxima im Juni; March: mittlere Saisonalität mit Maxima im April. Diese Saisonalität spiegelt das Verhalten der Entstehungsgebiete des Abflusses wider.

Die Aussagekraft der Saisonalität kann auch für Trenduntersuchungen nutzbar gemacht werden. Als Beispiel zeigt Abbildung 4-5 den mittleren monatlichen Niederschlag und den mittleren monatlichen Abfluss im Zeitraum 1951-2005. Der Abfluss wurde gemessen in Rattendorf / Gail (595 km²) und der Niederschlag in Maria Luggau (1140 m a.s.l.). Es ist auffallend, dass die Abflussverteilung in den zwei Dekaden 1970-1990 unimodal war, mit den größten Abflüssen im Frühjahr in den Dekaden 1950-1970. Ab 1990 tritt hingegen ein zweites Maximum im Herbst auf. Es handelt sich also um Regimewechsel zwischen den Dekaden.

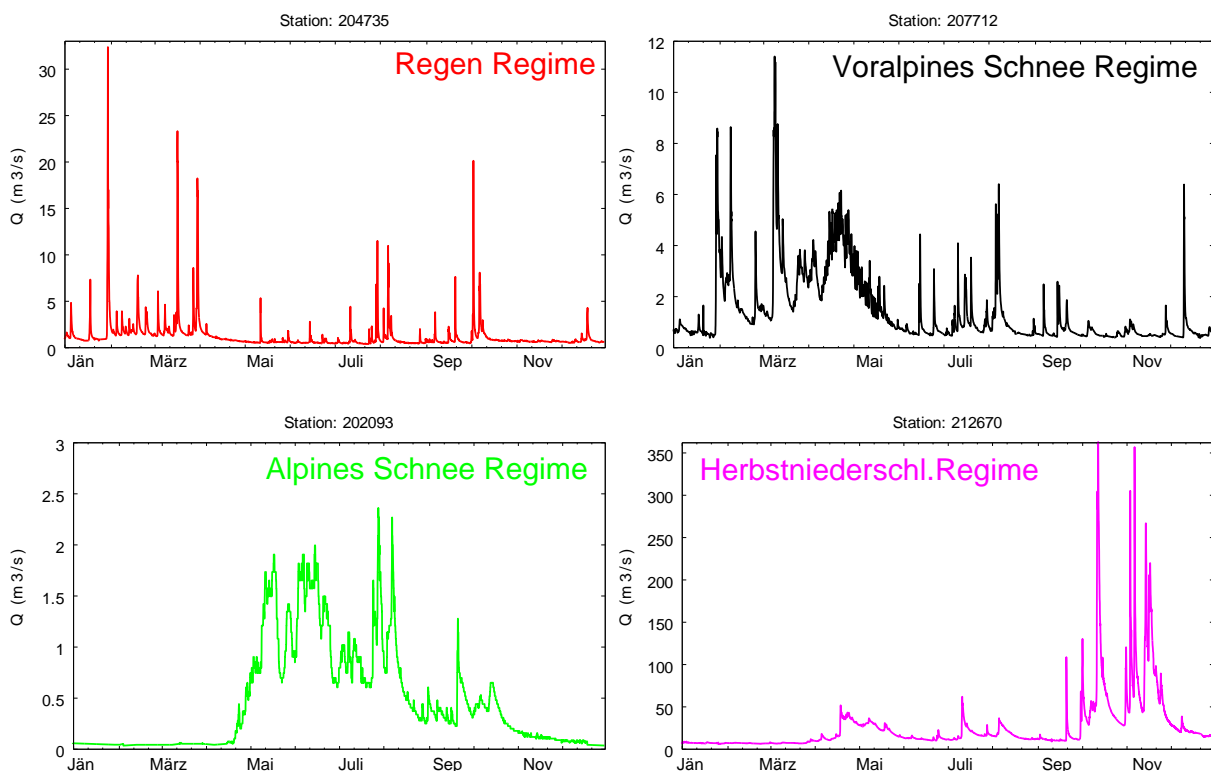


Abbildung 4-1: Beispiele für unterschiedliche Abflussregimes in Österreich: Regen Regime (Ried im Innkreis), Voralpines Schnee Regime (Wienerbruck), Alpines Schnee Regime (Kühtai) und Herbstniederschlags Regime (Rattendorf). Gezeichnet ist der beobachtete Abfluss im Jahr 2000 als Beispiel Lage der Pegel siehe Abbildung 4-2.

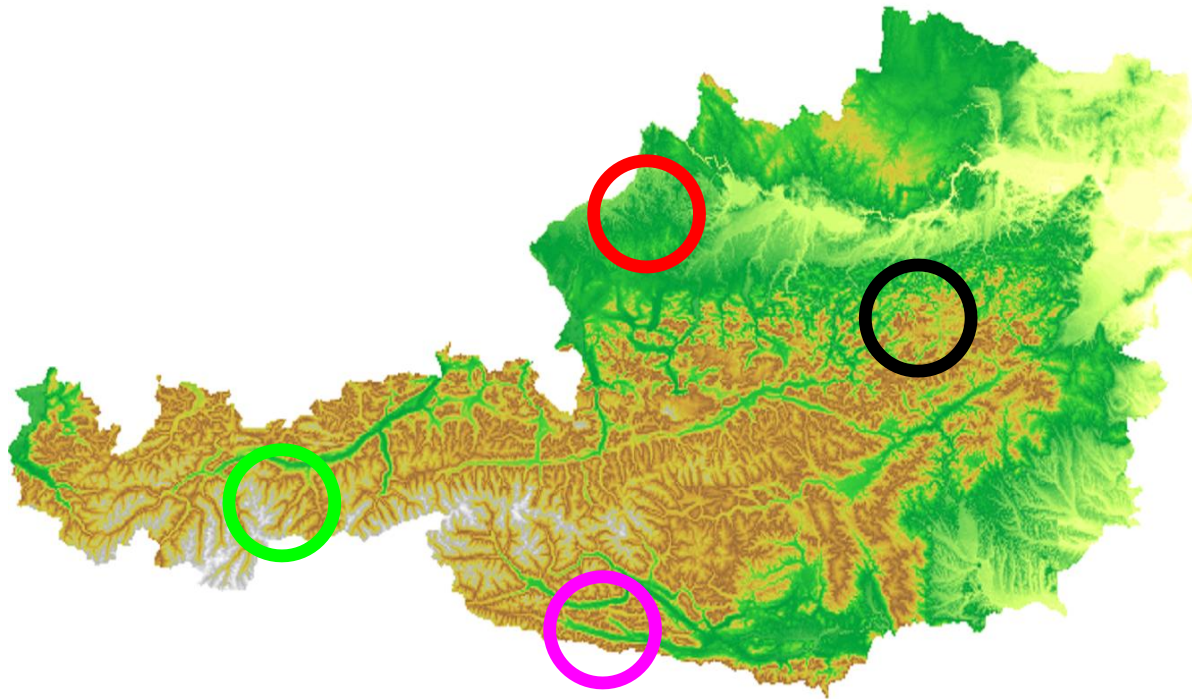


Abbildung 4-2. Lage der in Abbildung 4-1 verwendeten Pegel (Rot: Ried im Innkreis; Schwarz: Wienerbruck, Grün: Kühltai; Magenta: Rattendorf)

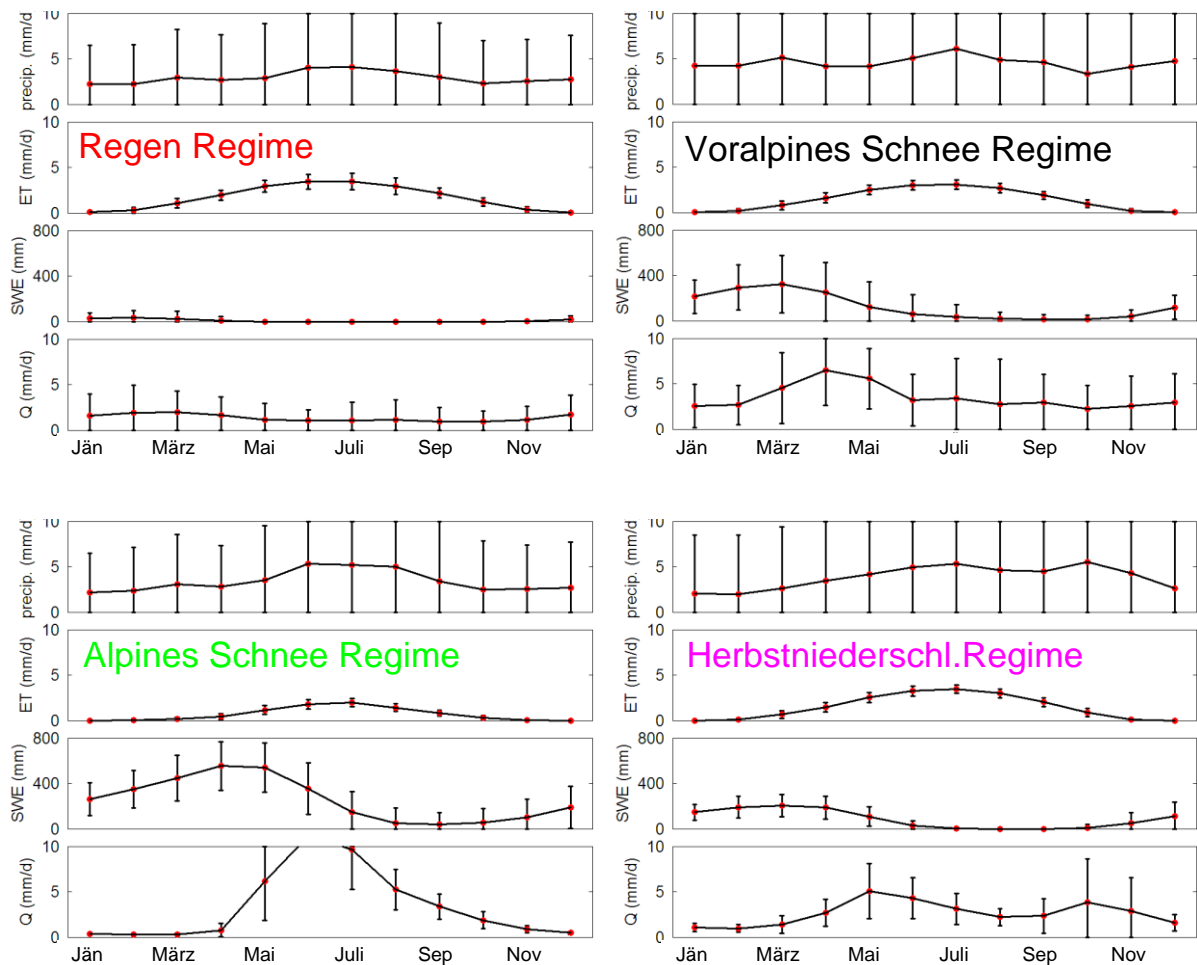


Abbildung 4-3: Komponenten der Wasserbilanz für vier Einzugsgebiete mit unterschiedlichem Abflussregime: Regen Regime (Ried im Innkreis), Voralpines Schnee Regime (Wienerbruck), Alpines Schnee Regime (Kühtai), Herbstniederschlags Regime (Rattendorf). Niederschlag und Abfluss ist beobachtet, Verdunstung (ET) und Schneewasserwert (SWE) sind mittels Wasserbilanzmodellierung berechnet. Mittelwerte 1976-2001. Die Balken zeigen die Variabilität innerhalb des Monats und zwischen den Jahren. Lage der Pegel siehe Abbildung 4-2.

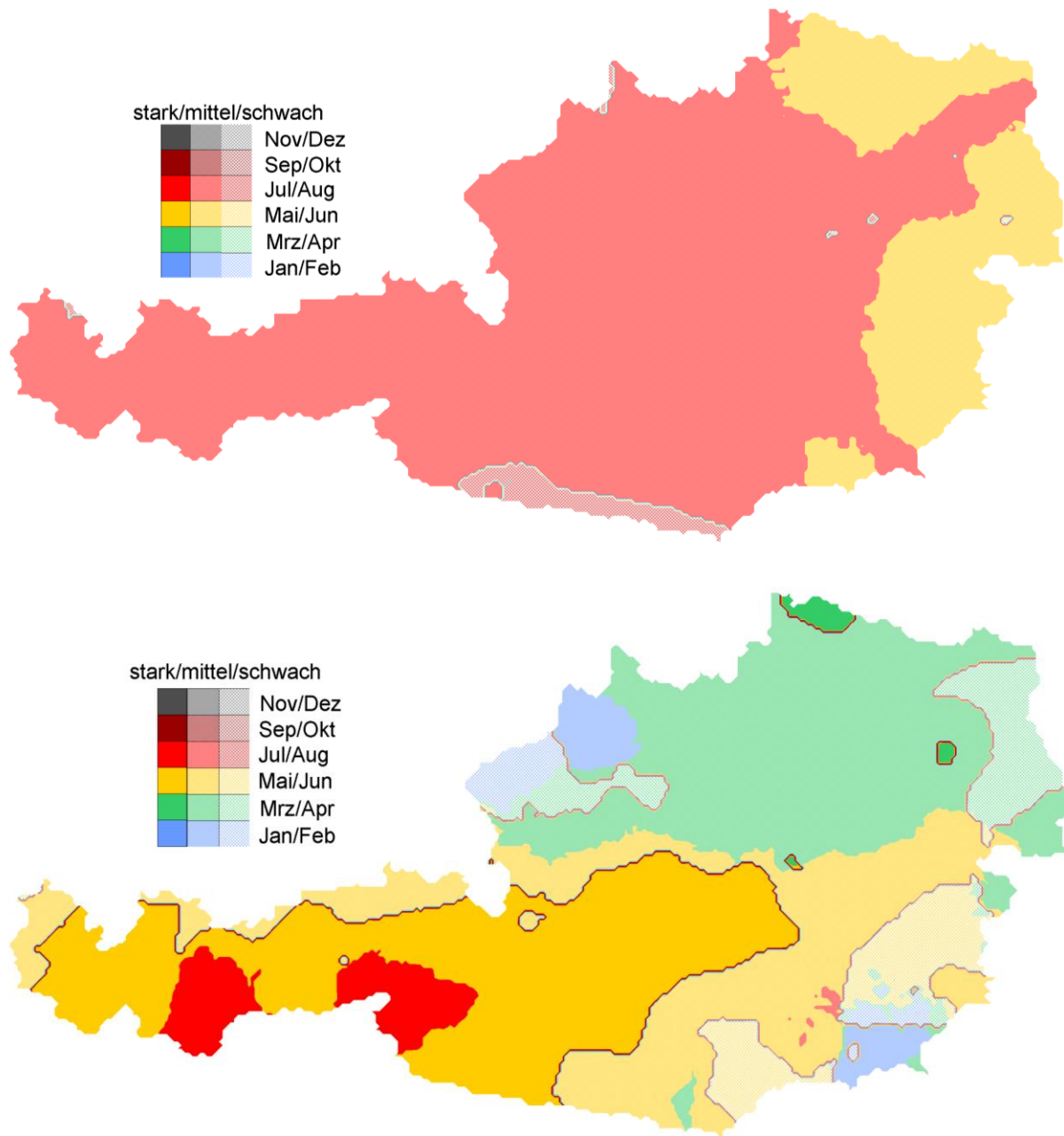


Abbildung 4-4: Saisonalität der Monatsniederschläge (oben) und Saisonalität der Monatsabflüsse (unten) für die Jahre 1951-1997. Eingetragen ist der Monat in dem im Mittel das Maximum auftritt (Farbe) sowie die Intensität der Saisonalität (starke Saisonalität dunkel, schwache Saisonalität hell). Aus Merz und Blöschl (2005).

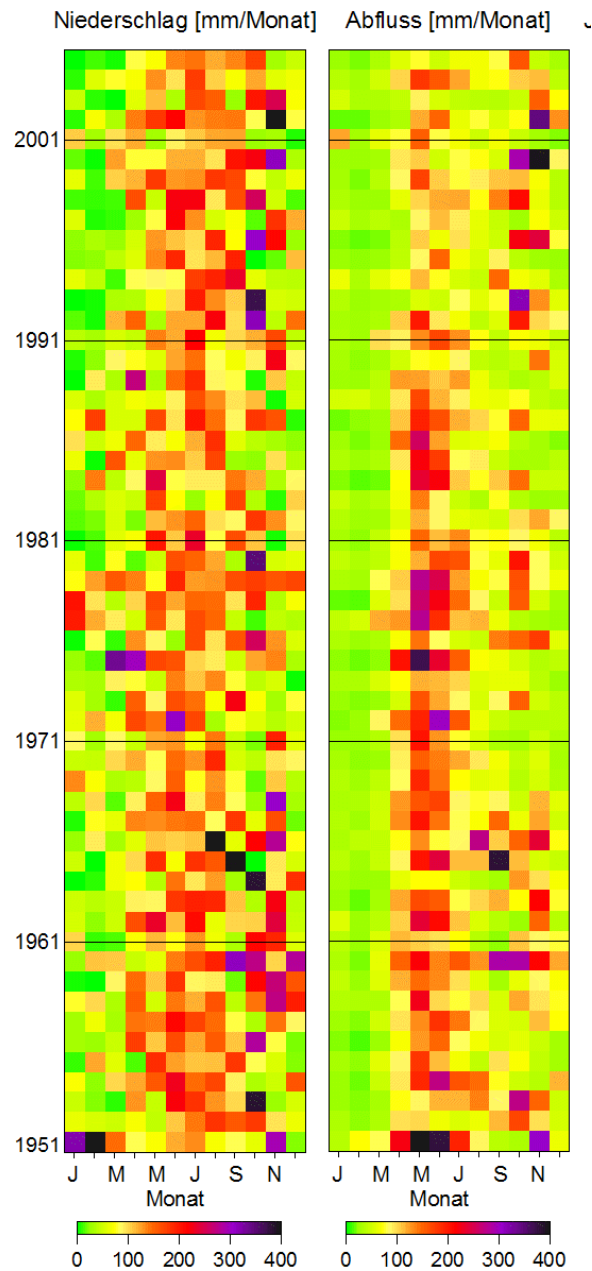


Abbildung 4-5: Mittlerer monatlicher Niederschlag, mittlerer monatlicher Abfluss, jährlicher maximaler Abfluss und jährlicher maximaler täglicher Niederschlag im Zeitraum 1951-2005. Abfluss gemessen in Rattendorf / Gail (595 km²) und Niederschlag in Maria Luggau (1140 m a.s.l.). Aus Blöschl et al. (2009).

Abbildung 4-6 zeigt die mittleren monatlichen Abflüsse der Donau am Pegel Krems für die Zeiträume 1893-1975 und 1976-2008. Es ist eine deutliche Verschiebung der saisonalen Verteilung der Abflüsse vom Sommer in das Frühjahr zu erkennen. Es ist nun von Interesse, ob diese Verschiebung vor allem auf hydrologische Ursachen zurückzuführen ist (frühere Schneeschmelze wegen wärmerer Lufttemperaturen, verändertes Niederschlagsregime) oder mit den wasserwirtschaftlichen Speichern im Einzugsgebiet der Donau zu tun hat. Eine Abschätzung der wasserwirtschaftlichen Speichern mit Kronenhöhe > 15m ergibt einen Nutzinhalt von etwa 0,8 Mrd. m³. Die Zunahme des mittleren Nutzinhaltes der Speicher für den Zeitraum 1976-2008 im Vergleich zu 1893-1975 liegt unter diesem Wert, da während der ersten Periode bereits Speicher errichtet wurden. Nach Abbildung 4-6 beträgt die Erhöhung des Abflusses im Winter bzw. Frühjahr 3,38 Mrd. m³ und die Verminderung im Sommer 1,60 Mrd. m³. Das bedeutet, dass die wasserwirtschaftlichen Speicher im Einzugsgebiet zwar einen signifikanten Beitrag zu der Verschiebung des Abflussregimes der Donau geleistet haben, aber alleine diese Verschiebung nicht erklären. Es müssen deshalb hydrologische Ursachen wesentlich zur Verschiebung beigetragen haben.

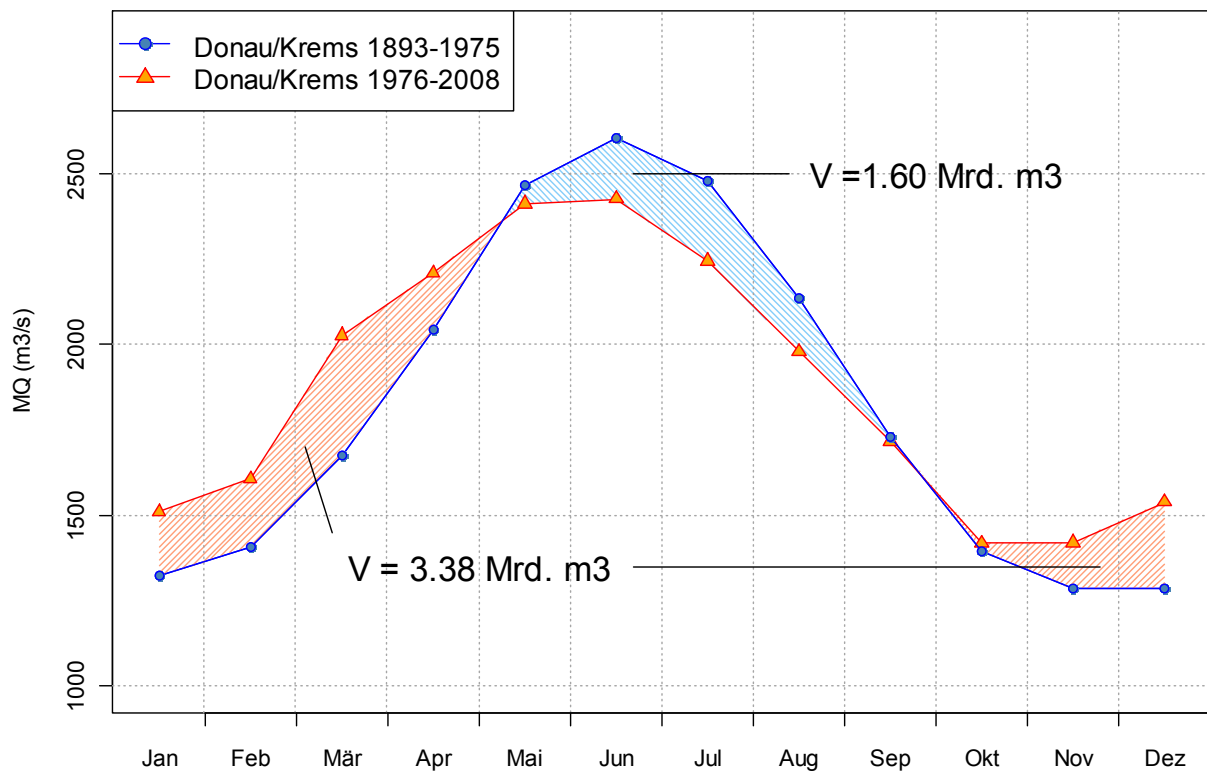


Abbildung 4-6: Mittlerer monatlicher Abfluss am Pegel Donau/Krems für die Zeiträume 1893-1975 und 1976-2008.

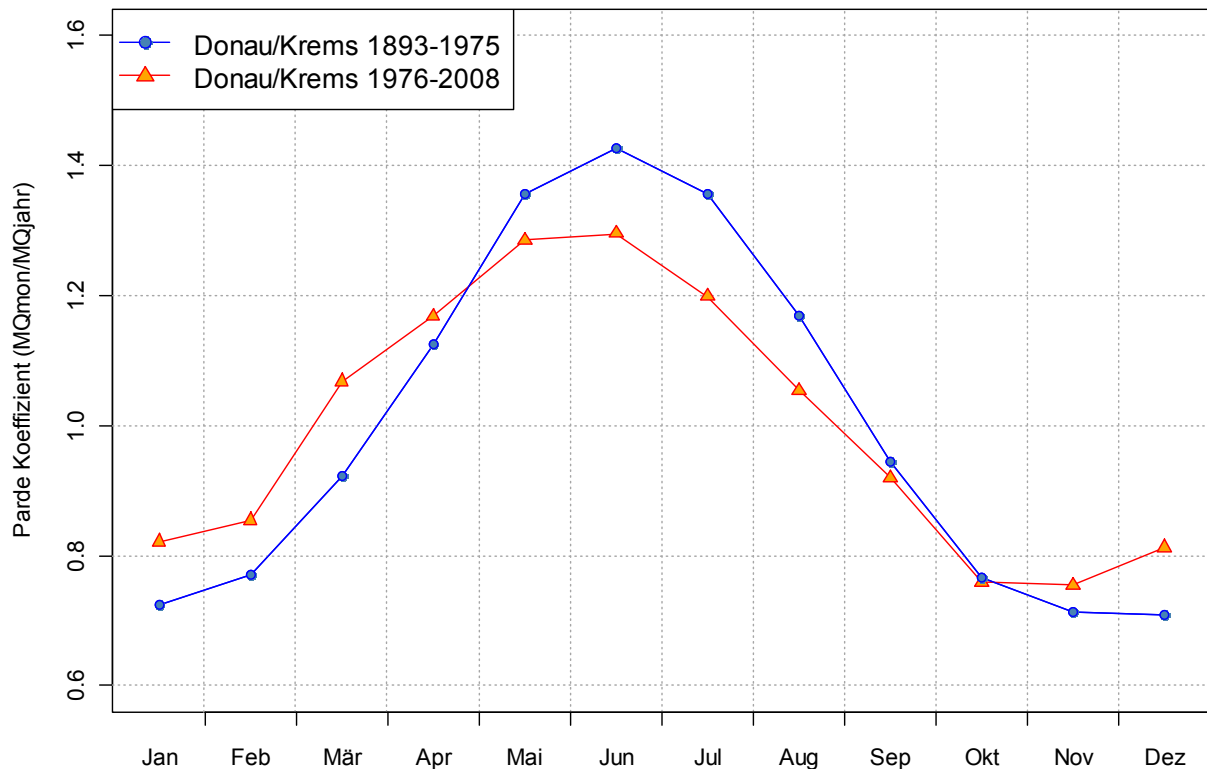
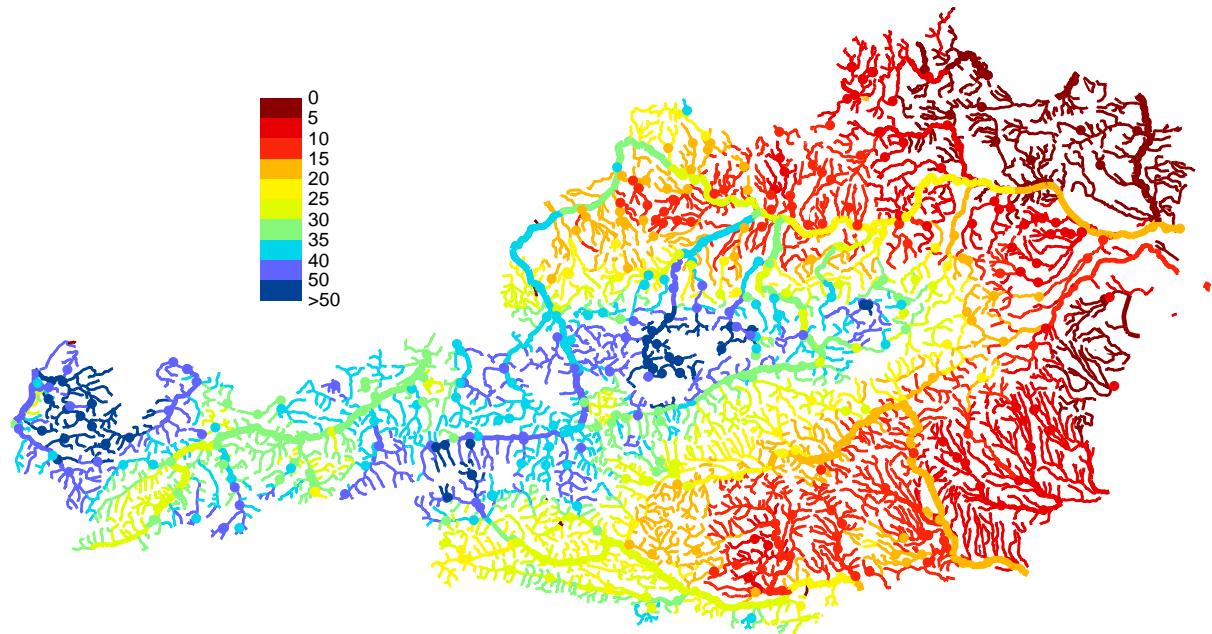


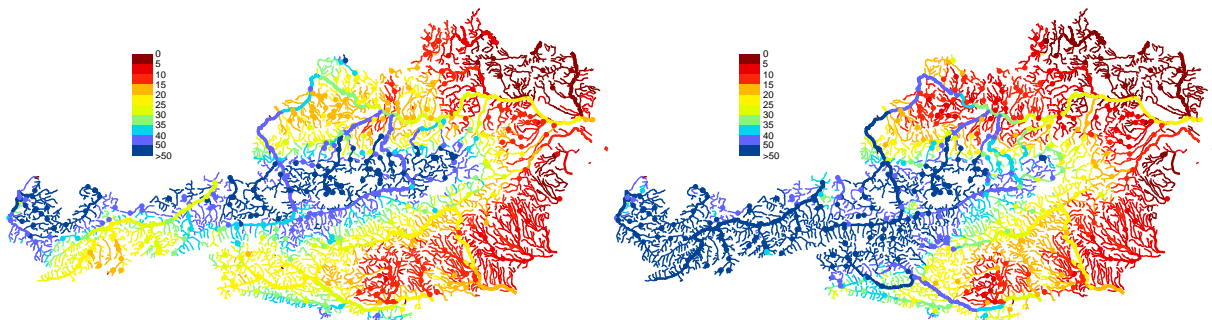
Abbildung 4-7: Mittlerer monatlicher Padé-Koeffizient ($MQ_{\text{mon}}/MQ_{\text{jahr}}$) am Pegel Donau/Krems für die Zeiträume 1893-1975 und 1976-2008.

4.3.2 Räumliche Verteilung des Abflusses

Abbildung 4-8 oben zeigt die räumliche Verteilung der beobachteten mittleren Abflussspenden für den Zeitraum 1976-2006. Zusätzlich sind die Vierteljahresabflüsse dargestellt. Vierteljahre sind wie folgt definiert: Frühjahr: März, April, Mai; Sommer: Juni, Juli, August; Herbst: September, Oktober, November; Winter; Dezember, Januar, Februar. Die Pegelwerte(Punkte) wurden durch Regionalisierung auf das gesamte Gewässernetz (Linien) übertragen. Abflussdaten, die stark durch anthropogene Maßnahmen beeinflusst sind, wurden von den Untersuchungen ausgeschlossen. Beeinflussungen der Abflussmessstellen sind im Kapitel 1 näher besprochen.

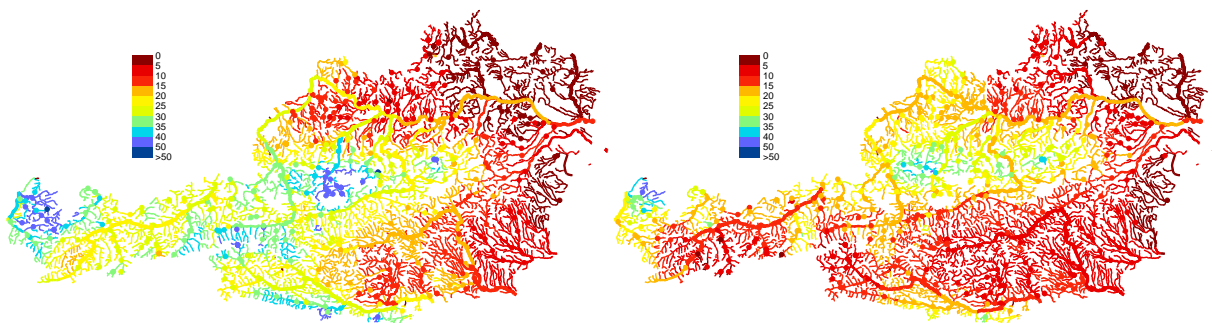


Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Jahr



Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Frühjahr (MAM)

Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Sommer (JJA)



Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Herbst (SON)

Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Winter (DJF)

Abbildung 4-8: Räumliche Verteilung der beobachteten mittleren Abflussspenden in l/s/km² für den Zeitraum 1976-2006 sowie Vierteljahresabflüsse.

4.4 Situation in der Vergangenheit

4.4.1 Trends von Niederschlag und Abfluss in Österreich

Für die Trendanalysen wurden Reihen der Jahresabflüsse und der Vierteljahresabflüsse ausgewertet. Vierteljahre waren wie folgt definiert: Frühjahr: März, April, Mai; Sommer: Juni,

Juli, August; Herbst: September, Oktober, November; Winter; Dezember, Januar, Februar). Stationen, die stark durch wasserbauliche Eingriffe verändert sind, wurden nicht in die Auswertung einbezogen. Insgesamt standen Abflussreihen von etwa 500 Pegeln in Österreich zur Verfügung. Zusätzlich wurden Reihen der Jahresniederschläge und der Vierteljahresniederschläge ausgewertet, um eine Interpretation der Abflusstrends zu ermöglichen.

Als statistischer Test wurde der Mann-Kendall-Test (MK) herangezogen (Burn und Hag Elnur, 2002), der im Kapitel 3.4.3 dieses Berichtes beschrieben ist. Die folgenden Abbildungen (Abbildung 4-9 bis Abbildung 4-12) zeigen die Ergebnisse der Trendanalysen für Österreich. Große blaue Kreise zeigen steigende Trends, große rote Kreise zeigen fallende Trends, die jeweils signifikant sind. Die kleinen Kreise mit schwarzer Umrandung zeigen die Stationen, in denen kein signifikanter Trend festzustellen war. Die Zahlen bedeuten den Anstieg der Trendgeraden in Prozent pro Jahr. Ein Wert von 0,5 bedeutet etwa einen Anstieg des Abflusses von 5% in 10 Jahren. Mit den Abbildungen und Tabellen ergibt sich die folgende Interpretation.

Der Jahresabfluss im Zeitraum 1976-2007 zeigt für die meisten Pegel (81%) keine signifikanten Trends. Für einen Teil der Gebiete sind jedoch Trends abzulesen: im Süden fallende Trends, im östlichen Alpenraum steigende Trends und in Vorarlberg fallende Trends. Im Mittel für Österreich heben sich diese Trends ungefähr auf (40 Pegel steigend, 48 fallend). Demgegenüber zeigen die Niederschläge vor allem in Nordosten Österreichs stark steigende Trends. 25% der Niederschlagsstationen in Österreich zeigen steigende Trends, nur 3% fallende Trends. Das grobe räumliche Muster von Jahresabfluss und Niederschlag ist zwar konsistent, aber generell gibt es beim Niederschlag eine wesentlich stärker Tendenz zu Zunahmen als beim Abfluss. Jahreszeitlich sind generell sinkende Sommerabflüsse zu verzeichnen, mit Ausnahme des Ostens Österreichs, wo die Abflüsse steigen. Im Frühjahr nehmen die Abflüsse in Kärnten ab. Im Herbst ist in den östlichen Teilen der Alpen eine Zunahme der Abflüsse festzustellen. Generell sind keine steigenden Winterabflüsse festzustellen.

Betrachtet man den längeren Zeitraum 1950-2007, ist ebenfalls die Anzahl der Pegel mit nicht signifikanten Trends der Jahresabflüsse groß. Die Pegel mit fallenden Trends überwiegen aber gegenüber den Pegeln mit steigenden Trends. Die fallenden Trends treten vor allem im Süden und Südosten Österreichs auf und finden sich in allen Jahreszeiten wieder, besonders im Winter und Frühjahr. Die räumlichen Unterschiede im Jahresabfluss stimmen gut mit dem Niederschlag überein.

Die Interpretation der Trends erfolgt zielführend an Hand ausgewählter Zeitreihen in den Regionen. Insgesamt ist aber bei der Beurteilung der Abflusstrends Vorsicht geboten, da es auf die Auswahl des Zeitfensters ankommt, ob im Einzelfall Trends festzustellen sind oder nicht.

- Rheingebiet: fallende Abflusstrends in der Periode 1976-2007, besonders im Sommer, denen jedoch keine Niederschlagstrends entsprechen. Kaum signifikante Trends für die längeren Reihen.
- Tiroler Inn und Zubringer: Durchwegs keine signifikanten Trends im Jahresabfluss. Tendenz zu fallenden Sommerabflüssen in der Periode 1976-2007, die nur teilweise durch die Niederschläge erklärbar sind.
- Salzach, Traun, Enns und Zubringer: Eher steigende Abflusstrends in der Periode 1976-2007, die auf den Niederschlag zurückzuführen sind. Kaum signifikante Trends für die längeren Reihen. Keine großen Jahreszeitlichen Unterschiede.
- Innviertel, Mühlviertel: Eher sinkende Trends im Jahresabfluss, aber meist nicht signifikant. Der Niederschlag nimmt dabei eher zu.
- Osten Österreichs: Leicht steigende aber nicht signifikante Trends, bei der längeren Reihe aber eher leicht sinkende Trends.

- Donau: leicht steigende Trends, aber nicht signifikant. Leichte Anstiege sind auf das Frühjahr zurück zu führen.
- Südosten Österreichs (Südliches Burgenland, Südliche Steiermark). Sinkende Trends in beiden Perioden, die auch im Niederschlag zu finden sind. Die Trends treten zu allen Jahreszeiten aber nur teilweise signifikant auf.
- Kärnten: Sinkende Trends in beiden Perioden, die auch im Niederschlag zu finden sind. Die sinkenden Trends sind vor allem im Frühjahr und Sommer markant.

Zum Vergleich wurden in Abbildung 4-13 die durch das Klimamodell CLM simulierten Jahres- und Vierteljahresniederschläge der Periode 1976-2007 einer Trendanalyse unterzogen. Der Vergleich mit den Trends der beobachteten Niederschläge für den gleichen Zeitraum (Abbildung 4-10) gibt Auskunft darüber, als wie zuverlässig die mit dem Klimamodell simulierten Trends eingestuft werden können. Die Übereinstimmung der Muster ist in mancher Hinsicht gegeben (zunehmende Trends im Zentrum Österreichs, abnehmende Trends im Südosten). Allerdings gibt es auch abnehmende Trends im Norden und zunehmende im Süden, die mit den Niederschlagsdaten nicht übereinstimmen.

Qm Jahresmittelwerte
 Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)

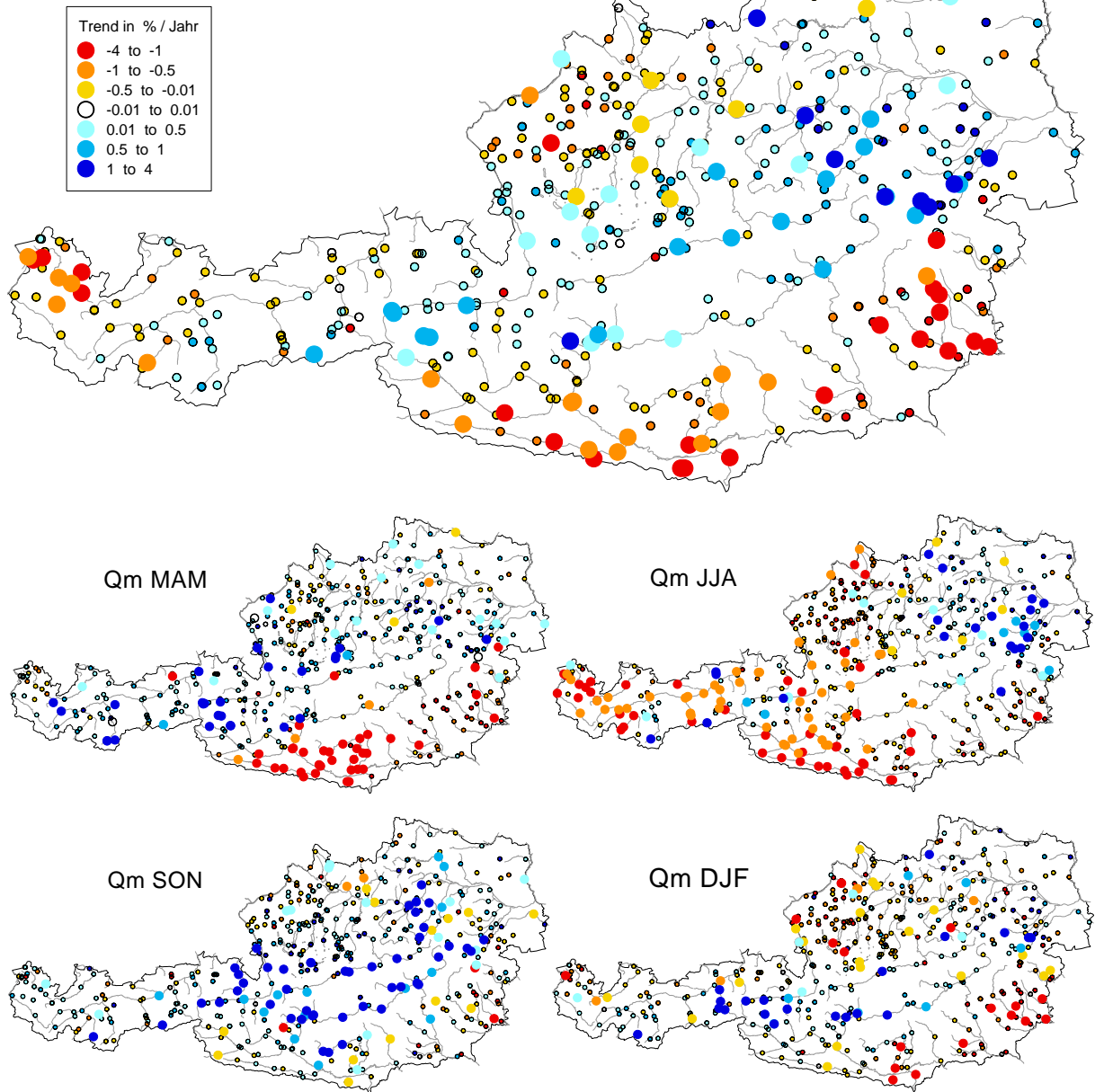


Abbildung 4-9: Trends der Jahres- und Vierteljahresabflüsse für die Periode 1976-2007. Pegel mit mindestens 25 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.

Niederschlag Jahreswerte Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)

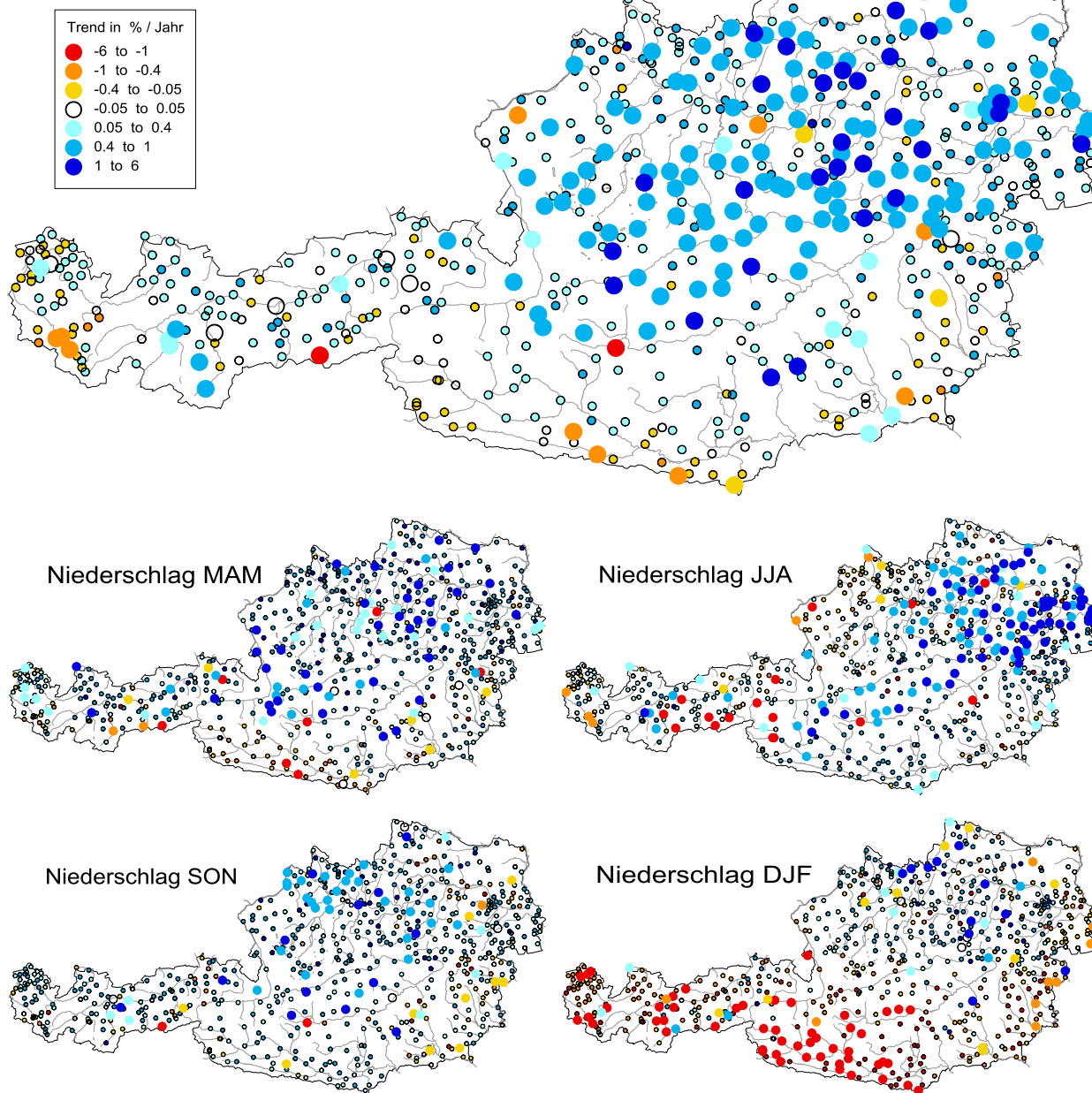


Abbildung 4-10: Trends der Jahres- und Vierteljahresniederschläge für die Periode 1976-2007. Pegel mit mindestens 25 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.

Qm Jahresmittelwerte
 Periode 1950 - 2007 (mind. 45 Jahre)

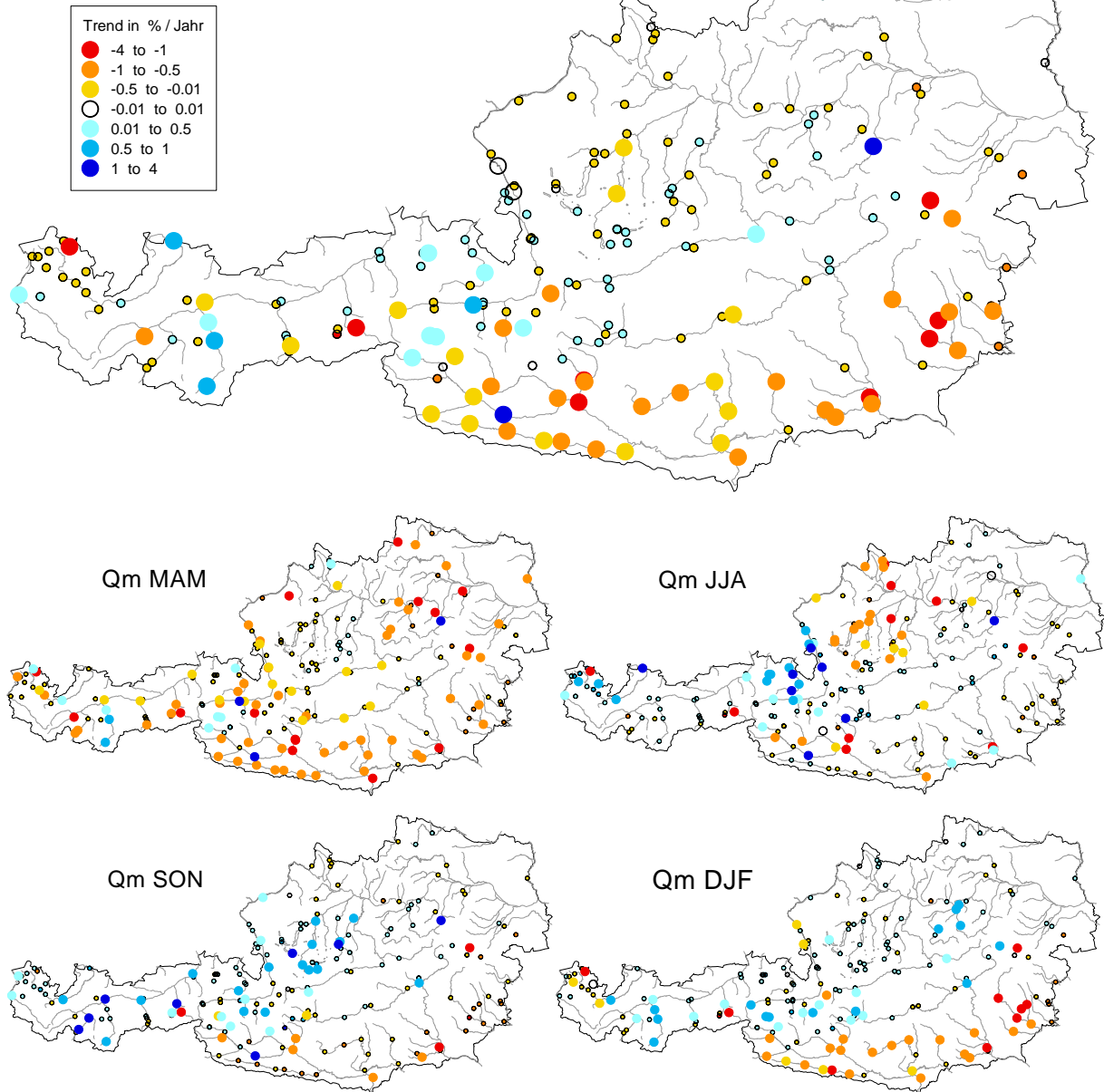


Abbildung 4-11: Trends der Jahres- und Vierteljahresabflüsse für die Periode 1950-2007. Pegel mit mindestens 45 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.

Niederschlag Jahreswerte Periode 1950 - 2007 (mind. 45 Jahre)

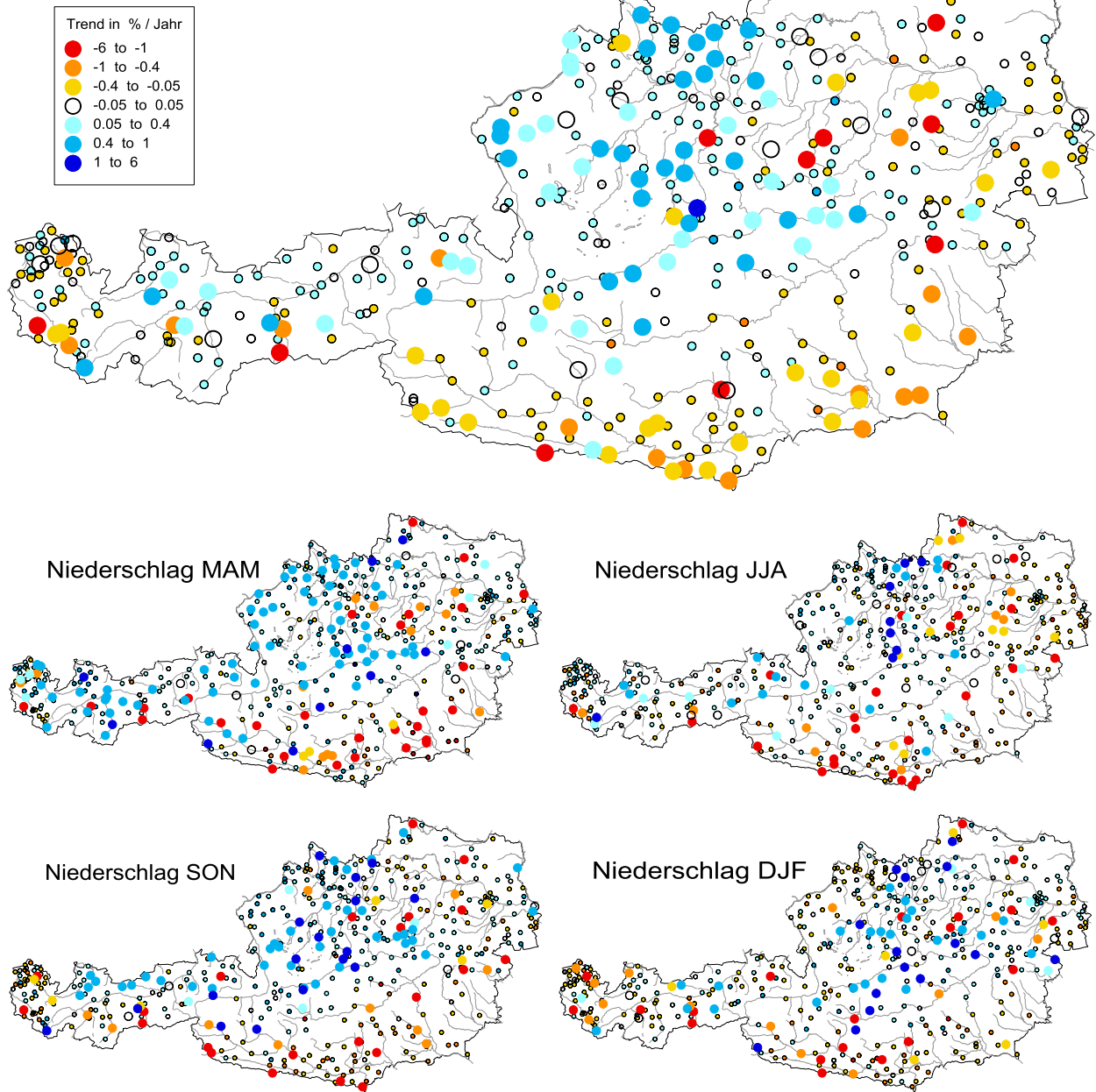


Abbildung 4-12: Trends der Jahres- und Vierteljahresniederschläge für die Periode 1950-2007. Pegel mit mindestens 45 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.

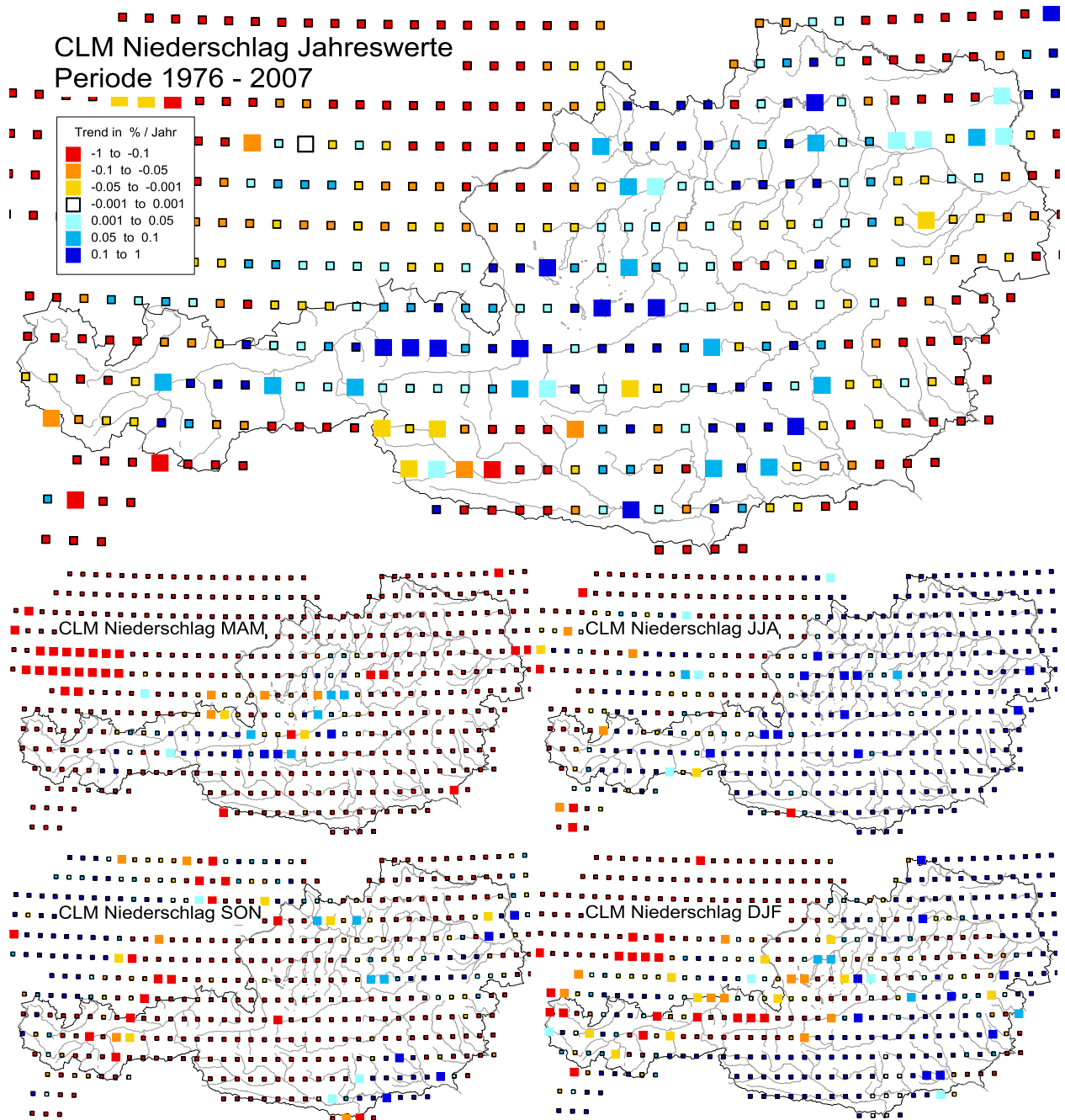
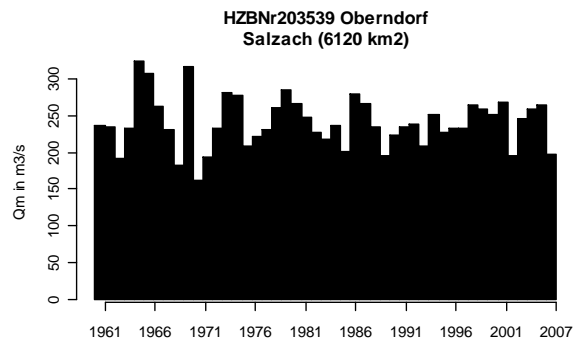
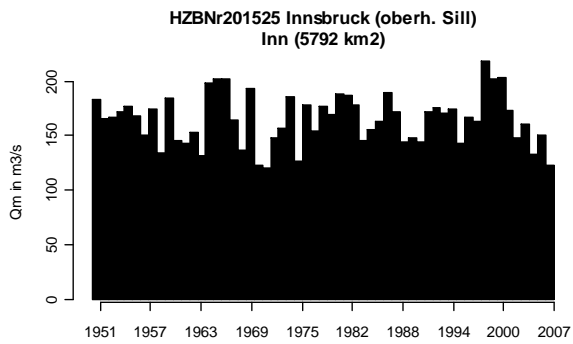
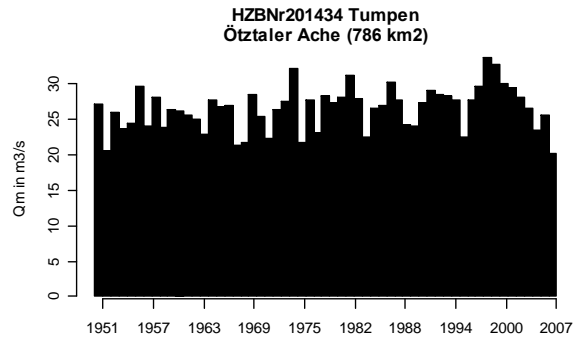
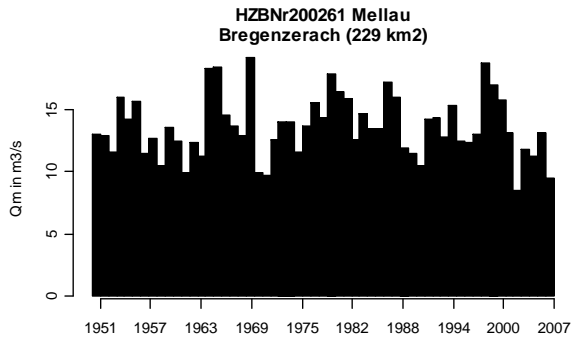
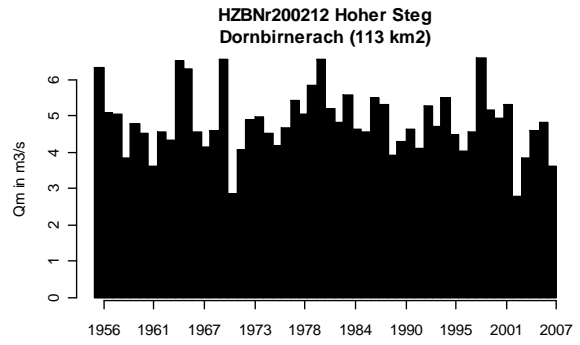
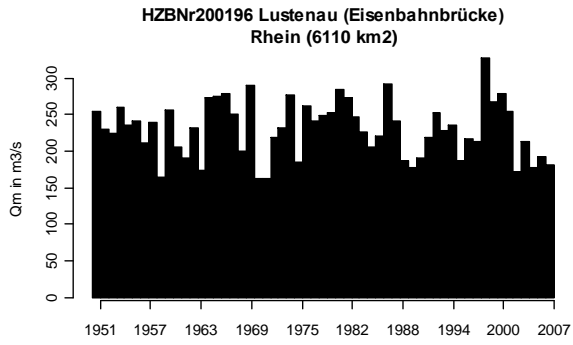
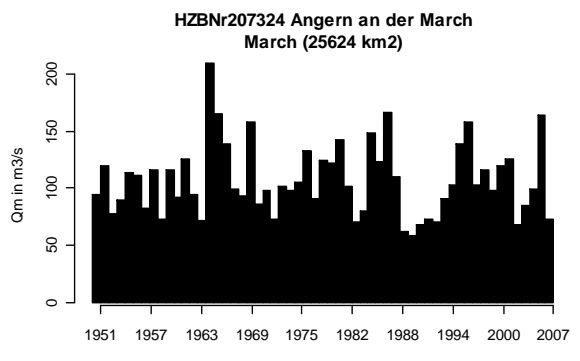
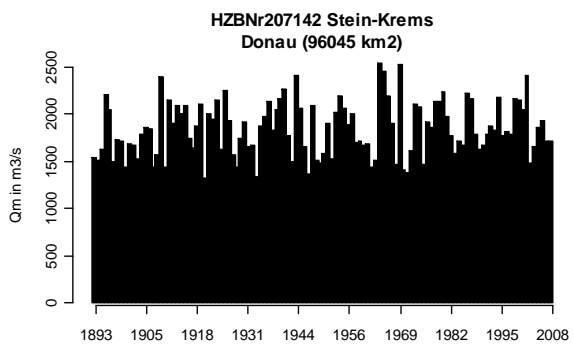
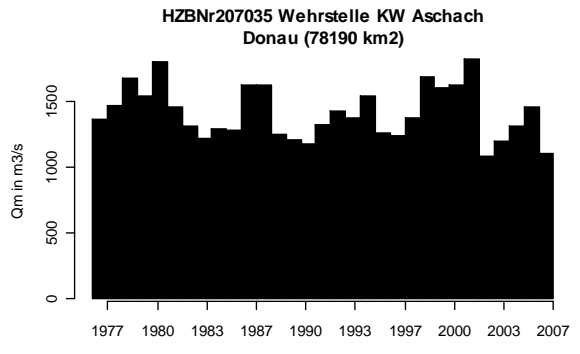
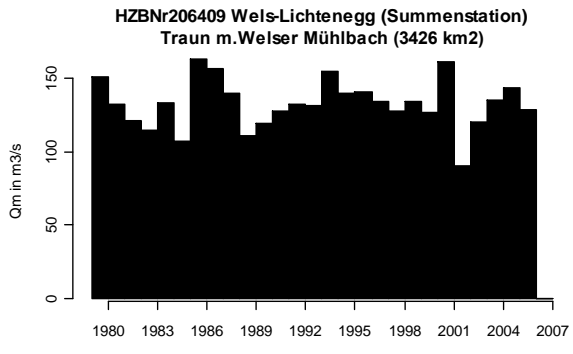
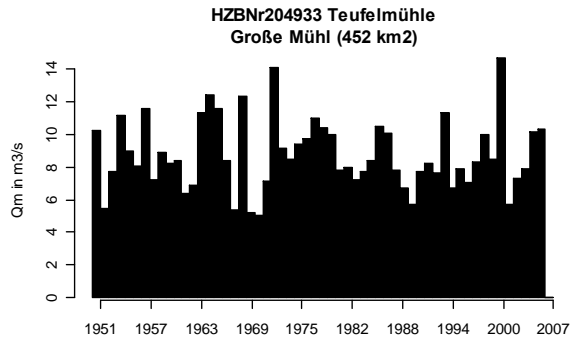
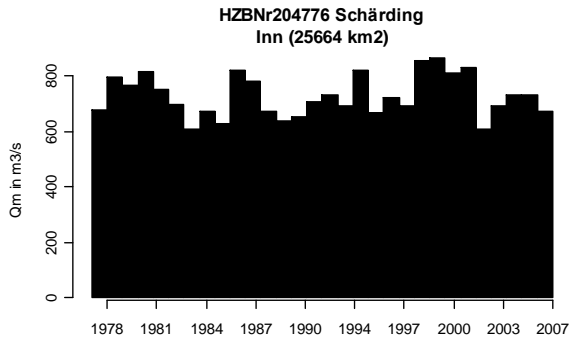
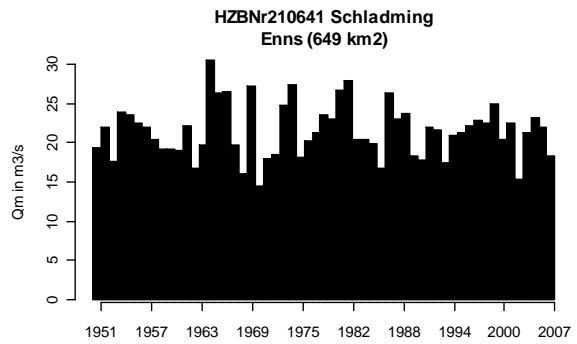
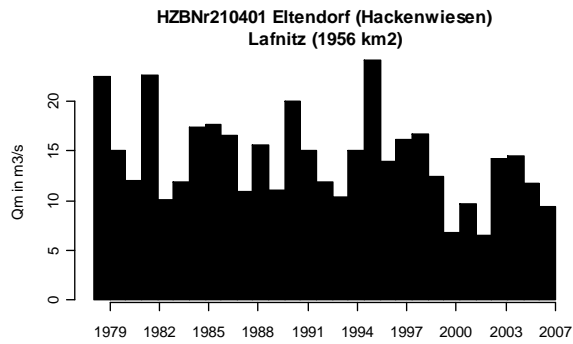
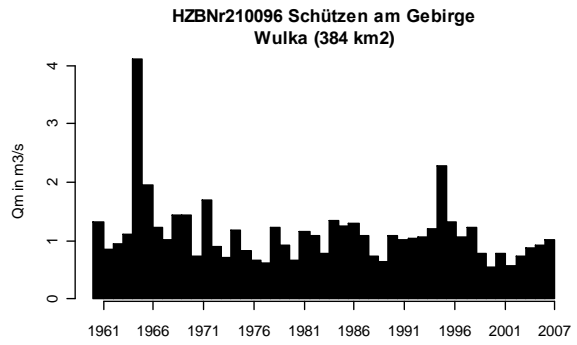
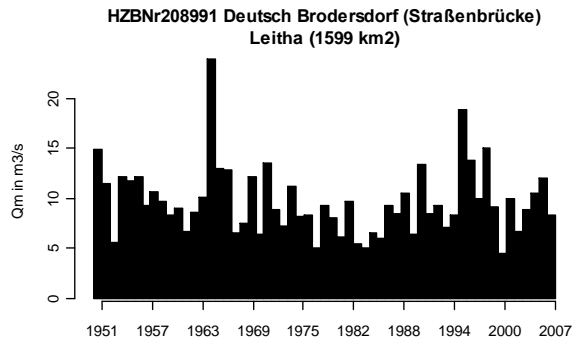
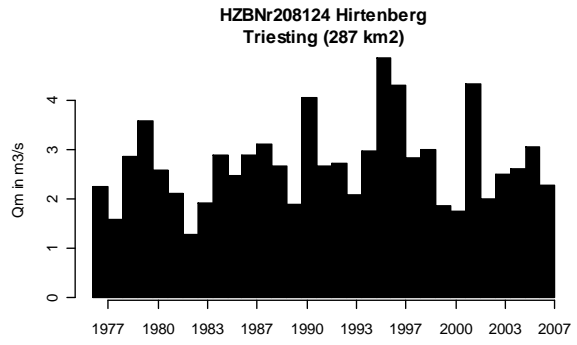
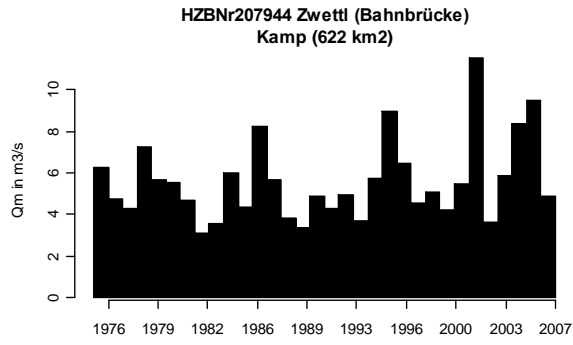
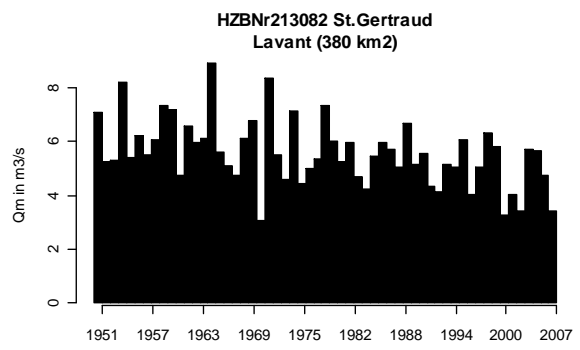
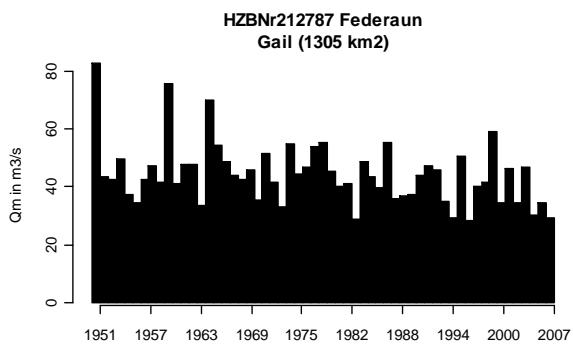
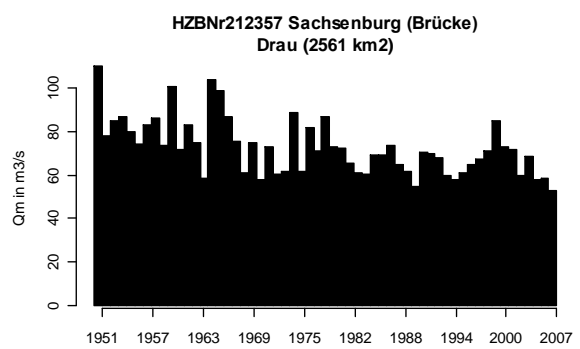
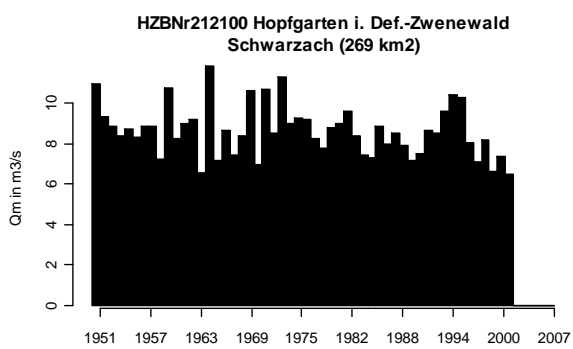
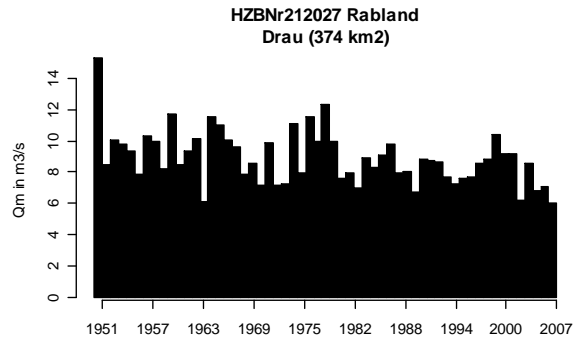
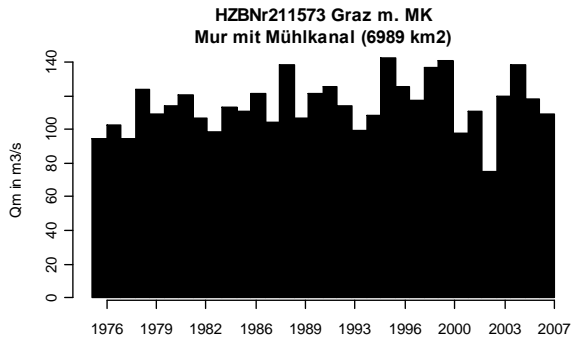


Abbildung 4-13: Trends der durch das Klimamodell CLM simulierten Jahres- und Vierteljahresniederschläge für die Periode 1976-2007. Große Quadrate blau: steigende Trends, Große Quadrate rot: fallende Trends









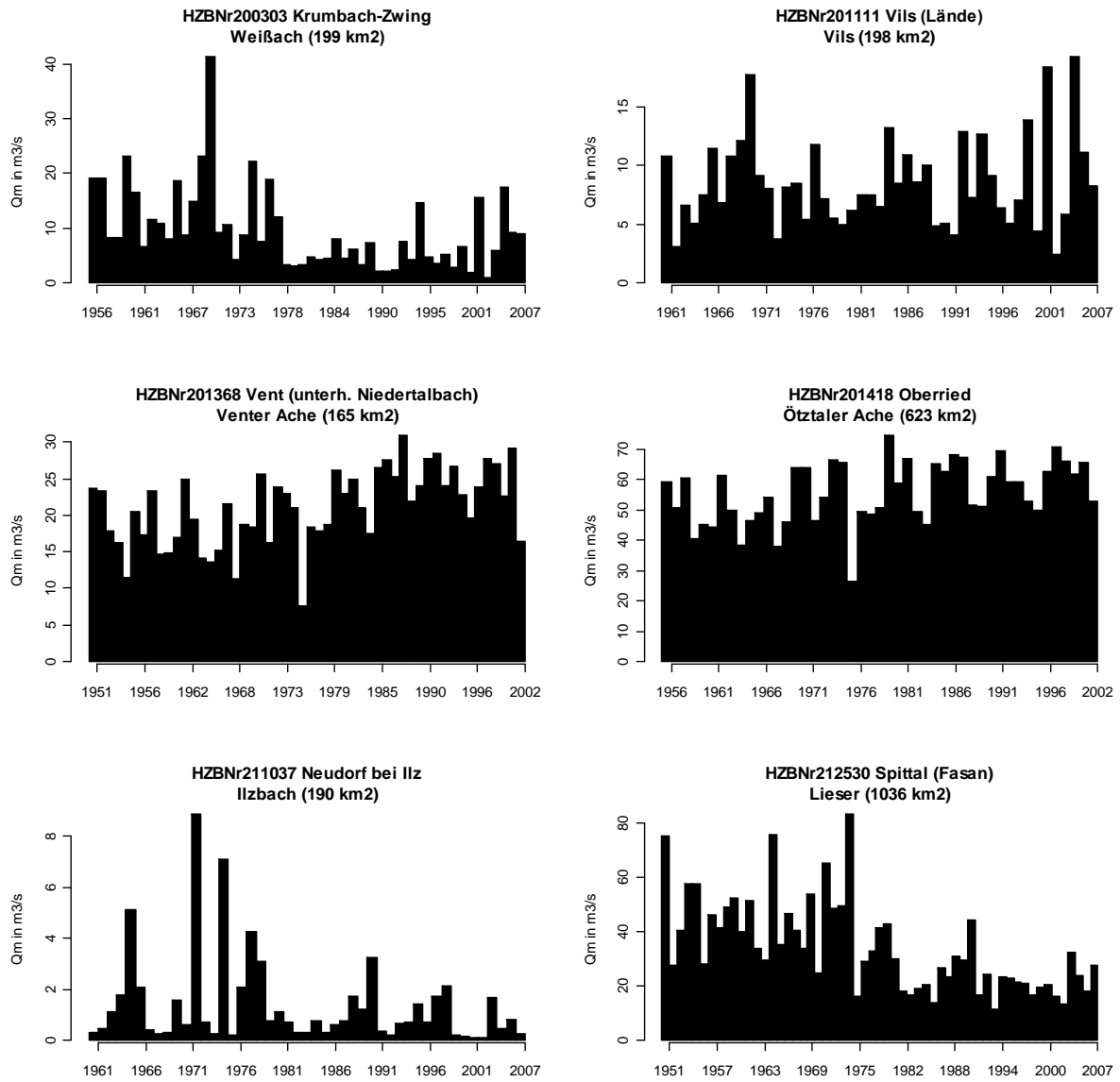
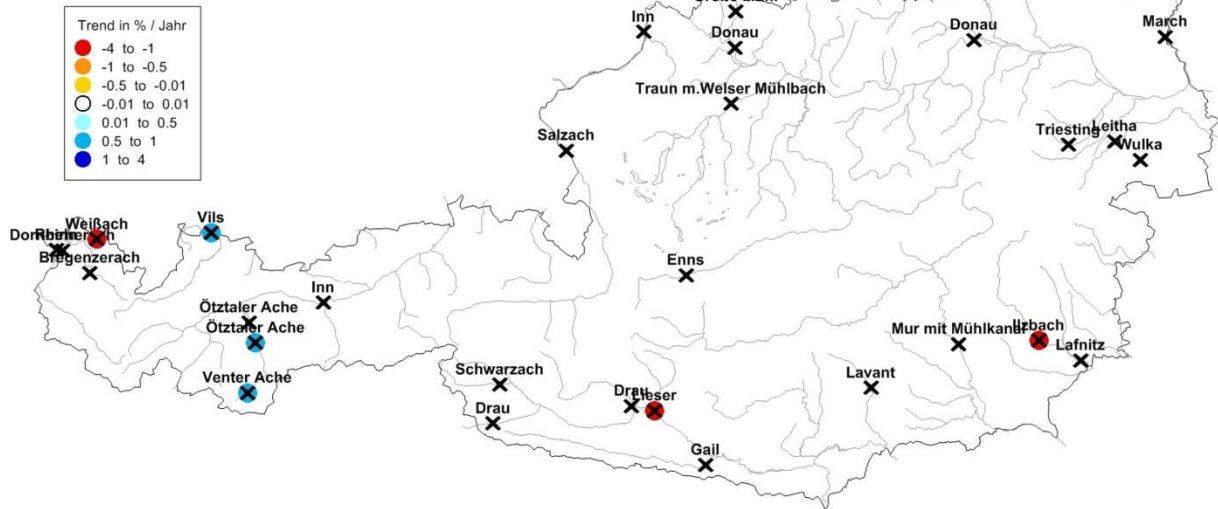


Abbildung 4-14: Zeitreihen der Niederwässer in ausgewählten Einzugsgebieten. Gezeigt ist der Wert MQ in m³/s.

Ausgewählte Pegel



Ausgewählte Pegel



Abbildung 4-15: Lage der ausgewählten Pegel. Oben: Gerinnenname. Unten: Pegelname.

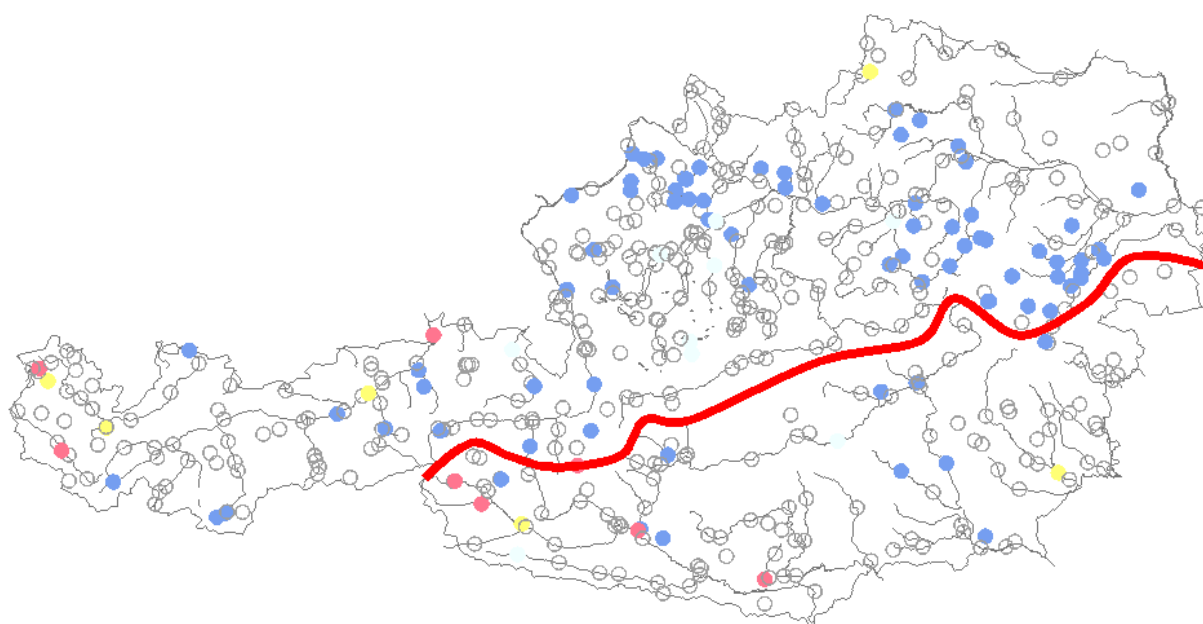


Abbildung 4-16: Unterscheidung der Trendauswertungen nach nördlichen und südlichen Flussgebieten.

Tabelle 4-2: Anzahl der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Abflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Österreich	Trend in % / Jahr	1976 - 2007 (min. 25 Jahre)			1950 - 2007 (min. 45 Jahre)		
		Nord	Süd	Alle	Nord	Süd	Alle
Jahres - Qm	steigend	31	9	40	14	4	18
	nicht signif.	291	87	378	106	25	131
	fallend	20	28	48	13	32	45
Winter (DJF) - Qm	steigend	23	9	32	22	8	30
	nicht signif.	292	99	391	103	27	130
	fallend	27	16	43	8	26	34
Frühjahr (MAM) - Qm	steigend	38	9	47	9	4	13
	nicht signif.	296	79	375	76	27	103
	fallend	8	36	44	48	30	78
Sommer (JJA) - Qm	steigend	32	5	37	25	6	30
	nicht signif.	245	86	331	84	47	131
	fallend	65	33	98	25	8	33
Herbst (SON) - Qm	steigend	50	24	74	29	5	34
	nicht signif.	283	91	374	102	48	150
	fallend	9	9	18	2	8	10

Tabelle 4-3: Anzahl der Stationen mit steigenden und fallenden Trends des Niederschlags in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Österreich	Trend	1976 - 2007 (min. 25 Jahre)	1950 - 2007 (min. 45 Jahre)
Jahres-N	steigend	166	77
	nicht signif.	470	328
	fallend	19	55
Winter-N (DJF)	steigend	24	46
	nicht signif.	555	372
	fallend	76	42
Frühjahrs-N (MAM)	steigend	73	88
	nicht signif.	562	326
	fallend	20	46
Sommer-N (JJA)	steigend	122	38
	nicht signif.	506	374
	fallend	27	48
Herbst-N (SON)	steigend	49	63
	nicht signif.	588	358
	fallend	18	39

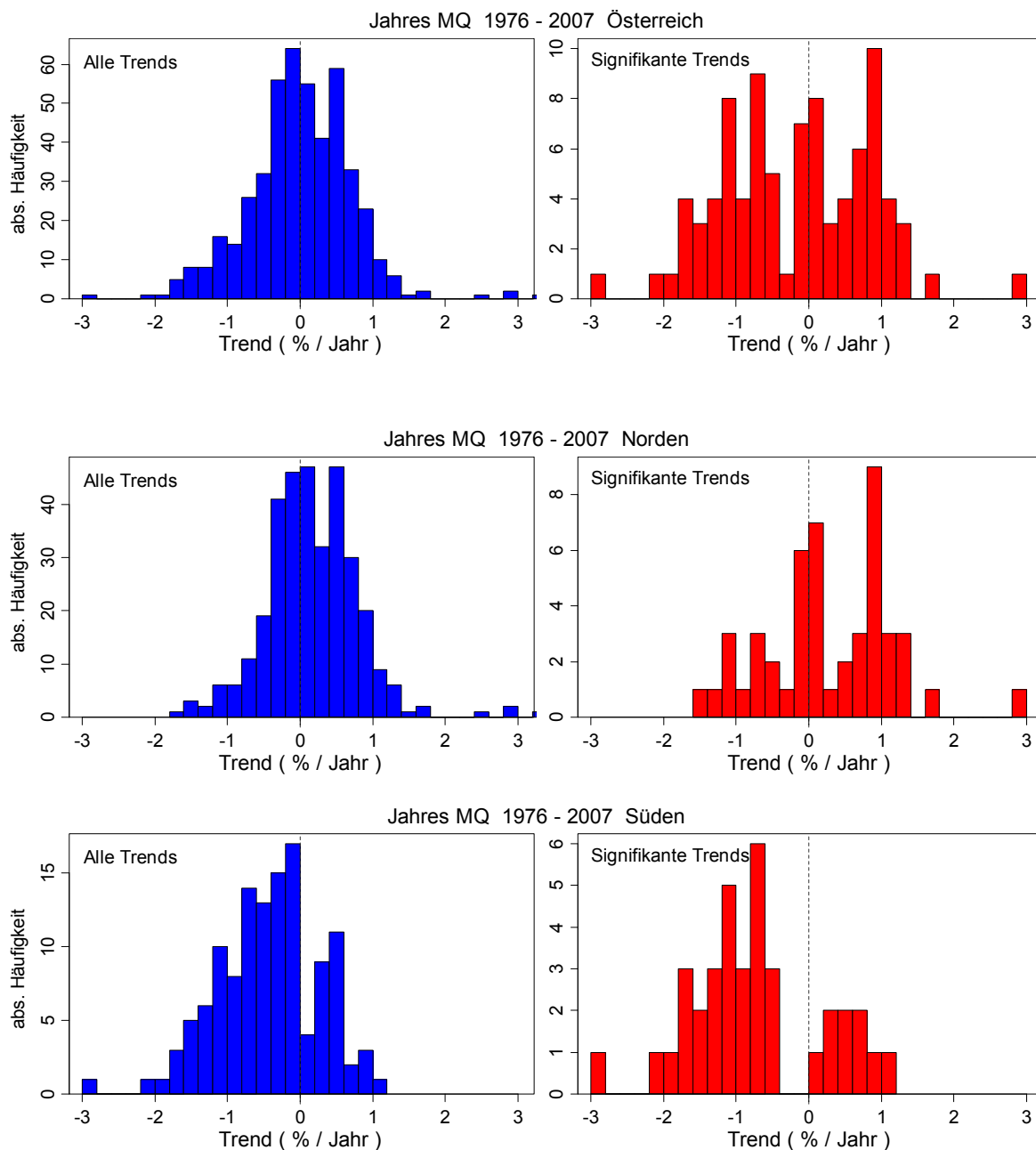


Abbildung 4-17: Histogramme der Trends in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Flussgebiete. Unten: südliche Flussgebiete.

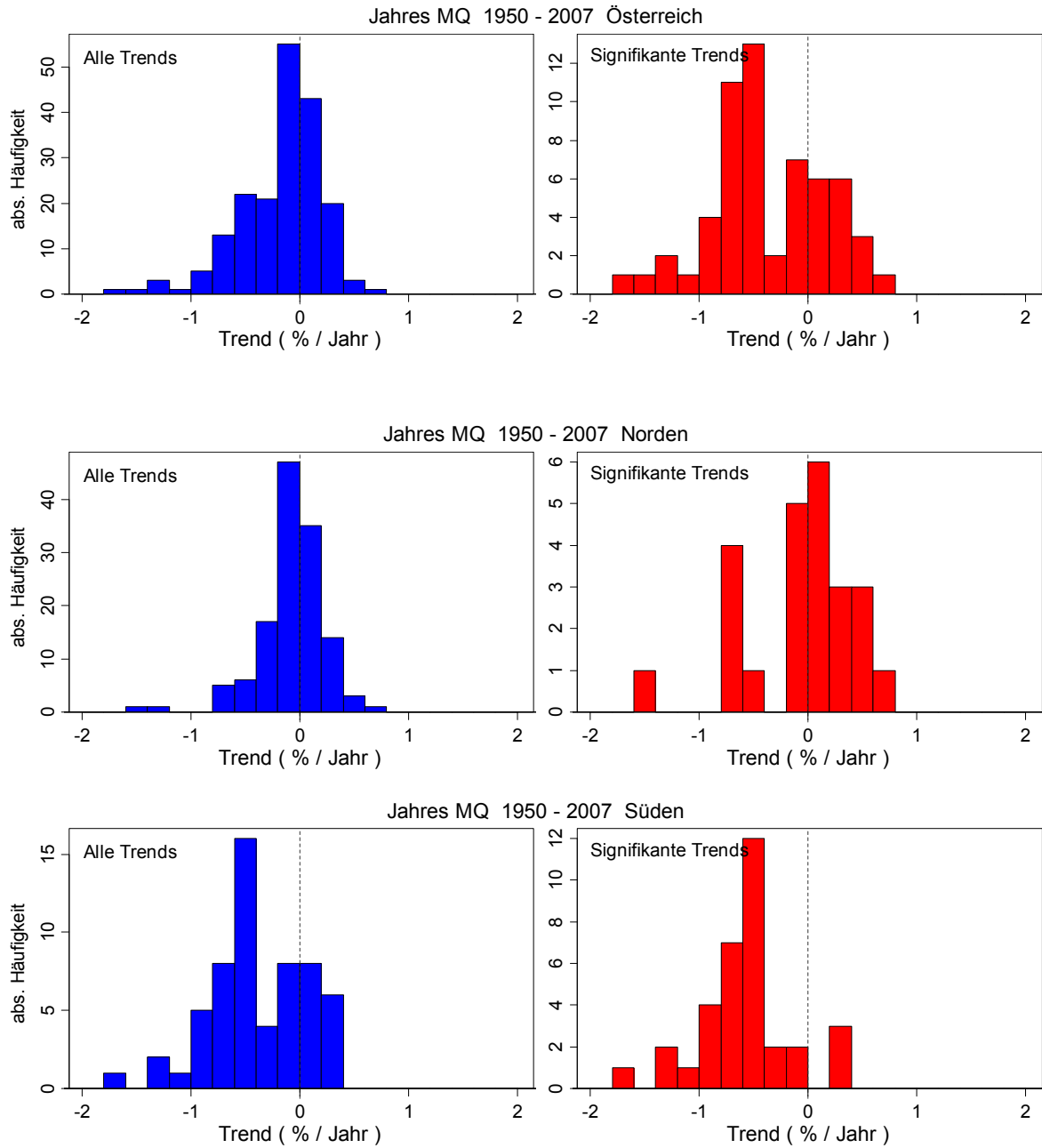


Abbildung 4-18: Histogramme der Trends in der Periode 1950 – 2007, mit mindestens 45 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Flussgebiete. Unten: südliche Flussgebiete.

Tabelle 4-4: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Abflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Österreich	Trend in % / Jahr	1976 - 2007 (min. 25 Jahre)			1950 - 2007 (min. 45 Jahre)		
		Nord	Süd	Alle	Nord	Süd	Alle
Jahres - Qm	steigend	9	7	9	11	7	9
	nicht signif.	85	70	81	79	41	68
	fallend	6	23	10	10	52	23
Winter (DJF) - Qm	steigend	7	7	7	17	13	15
	nicht signif.	85	80	84	77	44	67
	fallend	8	13	9	6	43	18
Frühjahr (MAM) - Qm	steigend	11	7	10	7	7	7
	nicht signif.	87	64	81	57	44	53
	fallend	2	29	9	36	49	40
Sommer (JJA) - Qm	steigend	9	4	8	19	10	15
	nicht signif.	72	69	71	62	77	68
	fallend	19	27	21	19	13	17
Herbst (SON) - Qm	steigend	15	19	16	22	8	18
	nicht signif.	82	74	80	76	79	77
	fallend	3	7	4	2	13	5

Tabelle 4-5: Prozent der Stationen mit steigenden und fallenden Trends der Niederschläge in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Österreich	1976 - 2007 (min. 25 Jahre)		1950 - 2007 (min. 45 Jahre)	
	Anteil d. Stationen [%] mit		Anteil d. Stationen [%] mit	
	steigendem Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	fallendem Trend
Jahres-N	25	3	17	12
Winter-N (DJF)	4	12	10	9
Frühjahrs-N (MAM)	11	3	19	10
Sommer-N (JJA)	19	4	8	10
Herbst-N (SON)	7	3	14	8

4.4.2 Trends der Wasserbilanz in Österreich

Vorerst wurden die Änderungen verschiedener hydrologischer Variablen in den vergangenen Jahrzehnten analysiert. Als Beispiel hierfür sind in Abbildung 4-19 für sechs 5-Jahres

Perioden von 1976 bis 2006 die mittleren jährlichen Werte des Niederschlages, der Lufttemperatur, der potentiellen Verdunstung, des Abflusses, des Verhältnisses von Abfluss zu Niederschlag und der Schneebedeckung in 270 österreichischen Gebieten dargestellt (schwarze Linie). Das hydro-klimatische Regime hat einen großen Einfluss darauf, welche Größen sich in welchem Ausmaß ändern. Daher wurden in Abbildung 4-19 trockenere und feuchtere Gebiete zusätzlich unterschieden. Die rote Linie zeigt trockenere Gebiete, d.h. Gebiete mit einem langfristigen Verhältnis von potentieller Verdunstung und Niederschlag größer als 0,6. Die blaue Linie beschreibt feuchtere Gebiete, also alle jene Gebiete, in denen das langfristige Verhältnis von potentieller Verdunstung zu Niederschlag kleiner als 0,35 ist. Nach dieser Unterteilung liegen die feuchteren Gebiete hauptsächlich im Westen Österreichs, während die trockeneren Gebiete im Osten liegen. Die Abbildung zeigt eine deutliche Zunahme in Niederschlag und Temperatur seit 1976. Aufgrund der höheren Temperatur steigt auch die potentielle Verdunstung. Kein Trend ist im Abfluss zu erkennen. Aufgrund der höheren Verdunstung ist das Verhältnis von Abfluss zu Niederschlag gesunken. Eine leichte Abnahme ist in der mittleren Schneebedeckung zu erkennen. Durch den Temperaturanstieg und der damit verbundenen höheren Verdunstung in den letzten Jahren wurden die Gebiete in der Regel trockener. Dies spiegelt sich in kleineren Ereignisabflussbeiwerten (Abbildung 4-20) wider. Grundlage der Änderungen der mittleren Ereignisabflussbeiwerte sind die Analysen von Merz et al. (2005) und Merz und Blöschl (2009).

Geht man davon aus, dass auch in Zukunft die Temperatur in gleicher Weise ansteigen wird, so ist damit zu rechnen, dass die Gebiete trockener werden. Dies dürfte eine Verschärfung der Niederwasserproblematik zur Folge haben. In trockeneren Gebieten sollte der Hochwasserabfluss erwartungsgemäß abnehmen. Jedoch reagieren trockenere Gebiete nicht-linearer, was einen gegenteiligen Effekt haben kann. Eine Modellierung der Wasserbilanzen der Periode 1976 bis 2006 mit Hilfe eines hydrologischen Modells kann darüber Aufschluss geben, welche hydrologischen Mechanismen Änderungen im Abfluss bewirken, um eine Abschätzung über zukünftige Änderungen geben zu können.

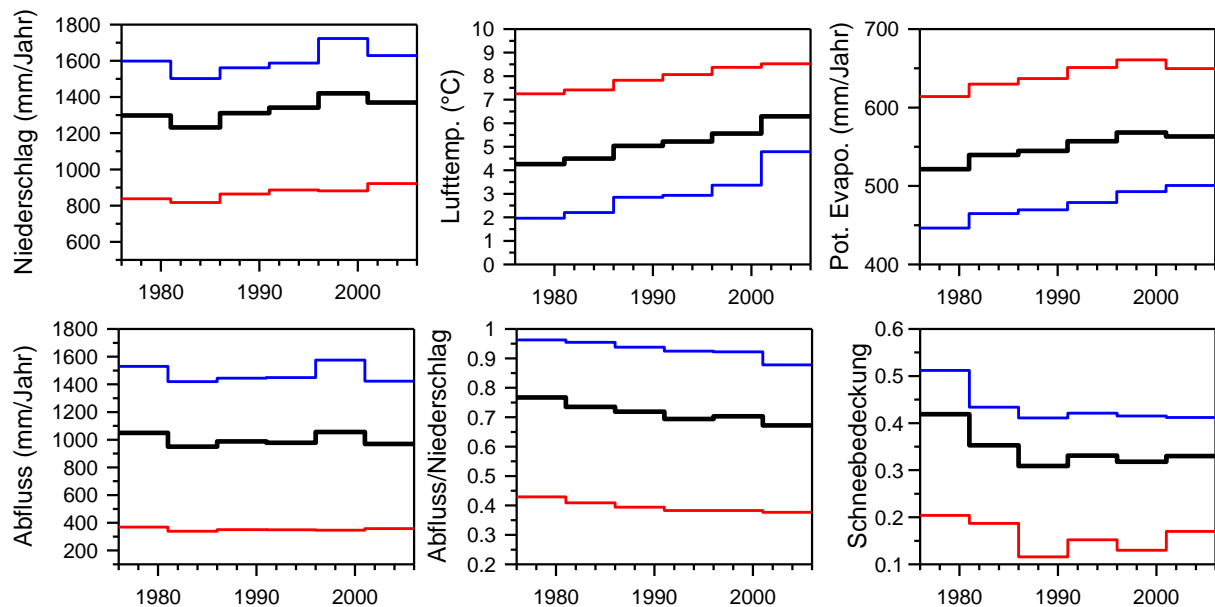


Abbildung 4-19: Mittlere Werte des Niederschlages, der Lufttemperatur, der potentiellen Verdunstung, des Abflusses, des Verhältnisses von Abfluss zu Niederschlag (Q/P) und der Schneebedeckung für sechs 5-Jahresperioden im Zeitraum 1976-2006. Schwarze Linie: alle Gebiete, blaue Linie: feuchtere Gebiete mit langfristigem Verhältnis von potentielle Verdunstung zu Niederschlag kleiner als 0,35; rote Linie: trockenere Gebiete mit langfristigem Verhältnis von potentieller Verdunstung zu Niederschlag größer als 0,6 (siehe Abbildung 4-21).

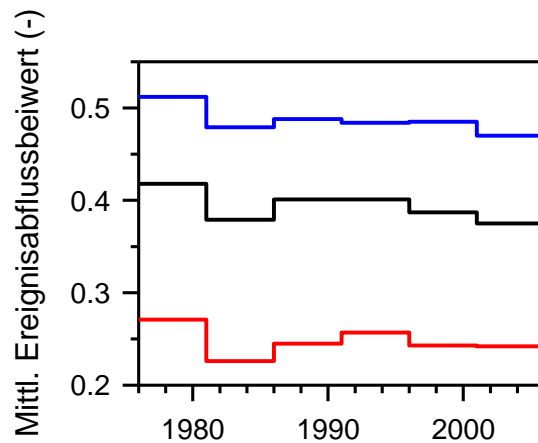


Abbildung 4-20: Mittlerer Ereignisabflussbeiwert für sechs 5-Jahresperioden im Zeitraum 1976-2006. (Farbcodierung siehe Abbildung 4-19)

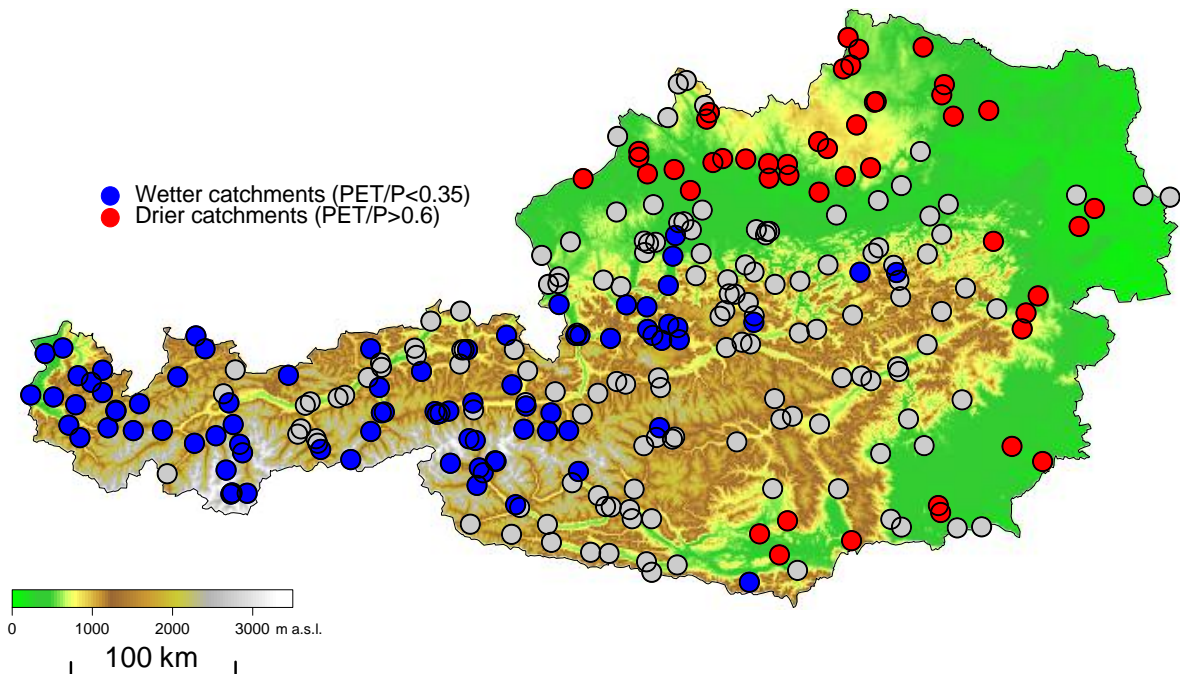


Abbildung 4-21: Lage der Pegel mit Ariditätsindex (potentielle Verdunstung / Niederschlag) < 0,35 (dunkelblau) und Ariditätsindex > 0,6 (rot).

4.5 Situation in der Zukunft

4.5.1 Interpretation von Szenarien und Unsicherheiten

Klimaimpaktanalysen mittels des Szenarioansatzes bestehen in der Regel aus drei Schritten: (a) Simulationen mit einem oder mehreren Globalen Zirkulationsmodellen (GCMs) unter Definition bestimmter Szenarien (meist IPCC Szenarien); (b) Downscaling der Lufttemperatur, Niederschlag und anderer Ergebnisse des GCM von der Rasterweite des Klimamodells (ca. 200 km) auf eine Rasterweite, die für die hydrologische Modellierung geeignet ist (wenige km). Dabei muss die Varianz der Klimavariablen vergrößert werden und der systematische Fehler reduziert werden. (c) Modellierung mit einem Niederschlag-Abflussmodell unter Verwendung der Ergebnisse des Downscalings (Niederschlag,

Lufttemperatur, ...). Bei jedem dieser Schritte treten große Unsicherheiten auf, die die Szenarienanalysen erheblich verfälschen können. Es ist dann leicht möglich, dass Szenarienstudien Veränderungen angeben, die weder interpretiert noch auf Plausibilität geprüft werden können. Das ist eine unbefriedigende Situation. Blöschl and Montanari (2009) schlagen deshalb vor, dass Klimaimpaktanalysen verstärkt untersuchen sollten, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen hervorgerufen werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen. Die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse kann dann verbessert werden, wenn verschiedene Methoden mit unterschiedlicher Datenbasis und unterschiedlichen Annahmen angewendet werden. Aus der Zusammenschau der Ergebnisse der verschiedenen Methoden gibt sich ein zuverlässigeres Bild als durch die Anwendung einer einzelnen Methode. Dies ist auch der Ansatz, der in dieser Studie verfolgt wird. Unter diesem Gesichtspunkt sind auch die Ergebnisse der Szenarienanalysen im Zusammenhang mit den Ergebnissen der anderen Methoden (Trendanalysen von Niederschlag und Abfluss - Kapitel 4.4, Elastizität (zeitlich) - Kapitel 4.6, „Trading space for time“ (räumlich) - Kapitel 4.7) zu interpretieren.

4.5.2 Methode der Szenarienrechnungen

Zur Einschätzung möglicher Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf das Abflussregime wurden Niederschlag-Abflusssimulationen mit dem Delta-Change Ansatz durchgeführt. Die Vorgangsweise bestand aus den folgenden Schritten:

(a) Datenaufbereitung: Abflussdaten (Tageswerte) an ca. 500 Pegel wurden auf Plausibilität geprüft. Solche Pegel, die starken anthropogenen Veränderungen unterworfen waren, wurden ausgeschieden. Tageniederschläge wurden auf Gebietsniederschläge interpoliert. Ebenso wurden die Lufttemperaturen auf Gebietswerte interpoliert. Alle Daten basieren auf Tageswerten und erstrecken sich über den Zeitraum 1976-2006. Die Niederschlags- und Lufttemperaturdaten schließen auch die außerhalb Österreichs liegenden Einzugsgebietsteile (Bayern, Schweiz, Tschechische Republik) ein. Die Vorgangsweise der Datenaufbereitung ist in Parajka et al. (2005, 2006, 2007) dargestellt.

(b) Niederschlag-Abflussmodell: Für die Pegel wurde ein höhenzoniertes Niederschlag-Abfluss Modell aufgestellt. Es handelt sich um ein kontinuierliches konzeptionelles Modell, dass die Verdunstung als Funktion der Bodenfeuchte, den Bodenwasserhaushalt und andere Abflussprozesse sowie Schneeprozesse simuliert. Die Parameter des Modells wurden an den Abflussdaten der Pegel geeicht. Das Modell wurde in Hinblick auf die Größe und die saisonale Verteilung des Abflusses ausführlich getestet. Das Modell und die Vorgangsweise bei der Eichung und Modellvalidierung sind im Detail in Parajka et al. (2005, 2006, 2007) dargestellt. Beispiele der Modellrechnungen zeigen Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23.

(c) Delta-Change Ansatz: Die folgende Vorgangsweise wurde gewählt: Die Klimasimulationen für den Zeitraum 2021-2050 wurden verglichen mit den Klimasimulationen 1976-2006. Die Differenzen der mittleren monatlichen Lufttemperaturen zwischen den beiden Zeiträumen wurden ausgewertet (Abbildung 4-25). Die Differenzen unterscheiden sich nach Monat und räumlich. In analoger Weise wurden die prozentuellen Veränderungen der mittleren monatlichen Niederschläge zwischen den beiden Zeiträumen ausgewertet (Abbildung 4-25). Nun wurden zwei Simulationen mit dem Niederschlag-Abflussmodell durchgeführt:

- Referenzsimulationen mit den beobachteten Niederschlags- und Lufttemperaturdaten für den Zeitraum 1976-2006.
- Szenariosimulationen mit den beobachteten Niederschlags- und Lufttemperaturdaten für den Zeitraum 1976-2006, die um die in Abbildung 4-25 dargestellten Differenzen geändert wurden. Diese Änderung war je nach Gebiet und Monat unterschiedlich, es wurde aber für den gesamten Zeitraum 1976-2006 die gleiche Änderung angebracht. Die beobachteten Lufttemperaturen wurden durchwegs erhöht (um 0.2 bis 2°C, je

nach Monat und Einzugsgebiet). Die beobachteten Niederschläge wurden mit einem Prozentsatz multipliziert, der in den Wintermonaten im Norden Österreichs meist positiv war (etwa 5-20%), in den anderen Monaten bzw. Gebieten Österreichs entweder positiv oder negativ war. Die Szenariosimulationen wurden mit den Referenzsimulationen verglichen um die Änderung im Abfluss zufolge Änderungen in der Lufttemperatur und im Niederschlag auszuwerten.

(d) Regionalisierung: In einem letzten Schritt wurden die Referenzsimulationen und Szenariosimulationen an den Pegeln auf das gesamte Gewässernetz Österreichs übertragen. Dafür wurde die Top-Kriging Methode angewandt (Skøien et al., 2006). Es wurden Vergleiche mit anderen Regionalisierungsmethoden durchgeführt (siehe Merz and Blöschl, 2004; Parajka et al. 2005, 2006, 2007), wobei sich die Top-Kriging Methode als am geeignetsten erwies.

Da es sich hier um regionale Simulationen handelt, wurden wasserwirtschaftliche Beeinflussungen des Abflusses nur in dem Maße berücksichtigt, dass Pegeln mit starken Beeinflussungen nicht in die Auswertung einbezogen wurden. Eine lokale Simulation müsste solche Beeinflussungen zusätzlich berücksichtigen.

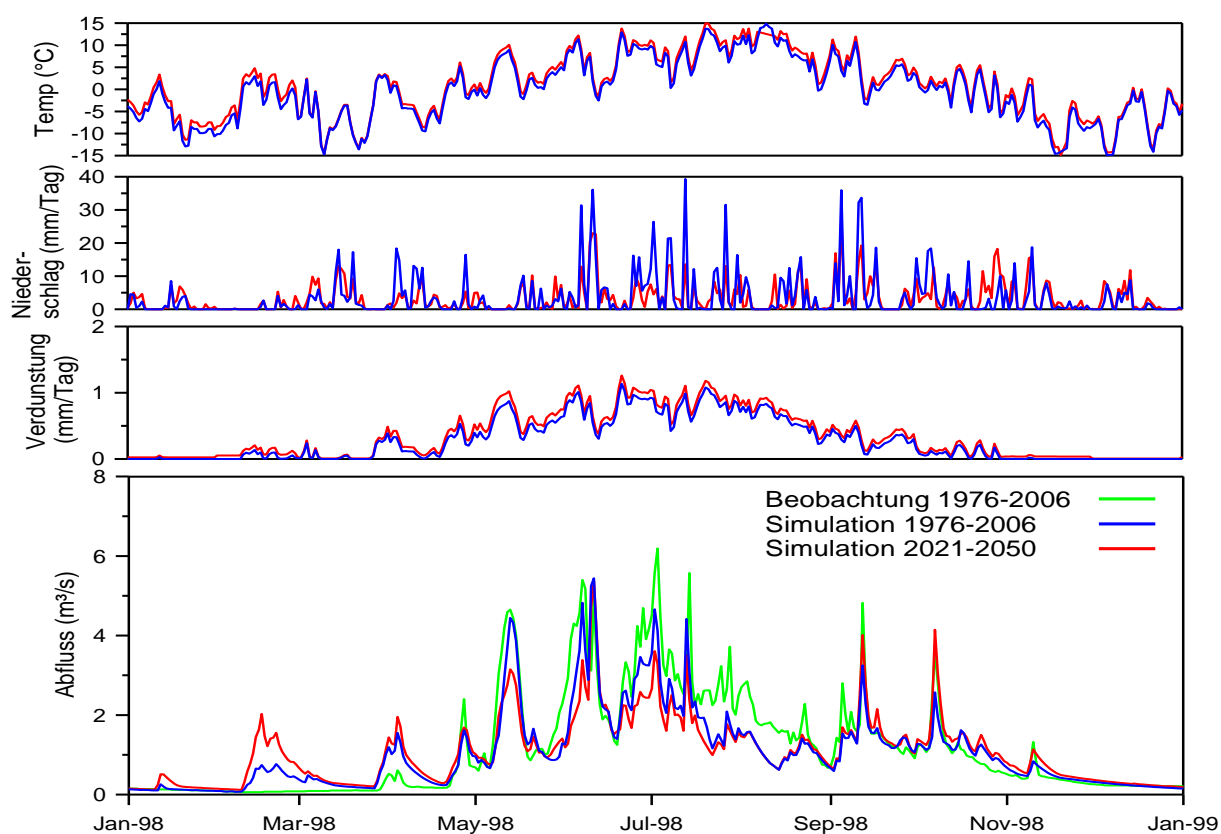


Abbildung 4-22: Abflusssimulationen für den Neukaser Zamserbach (24 km²)

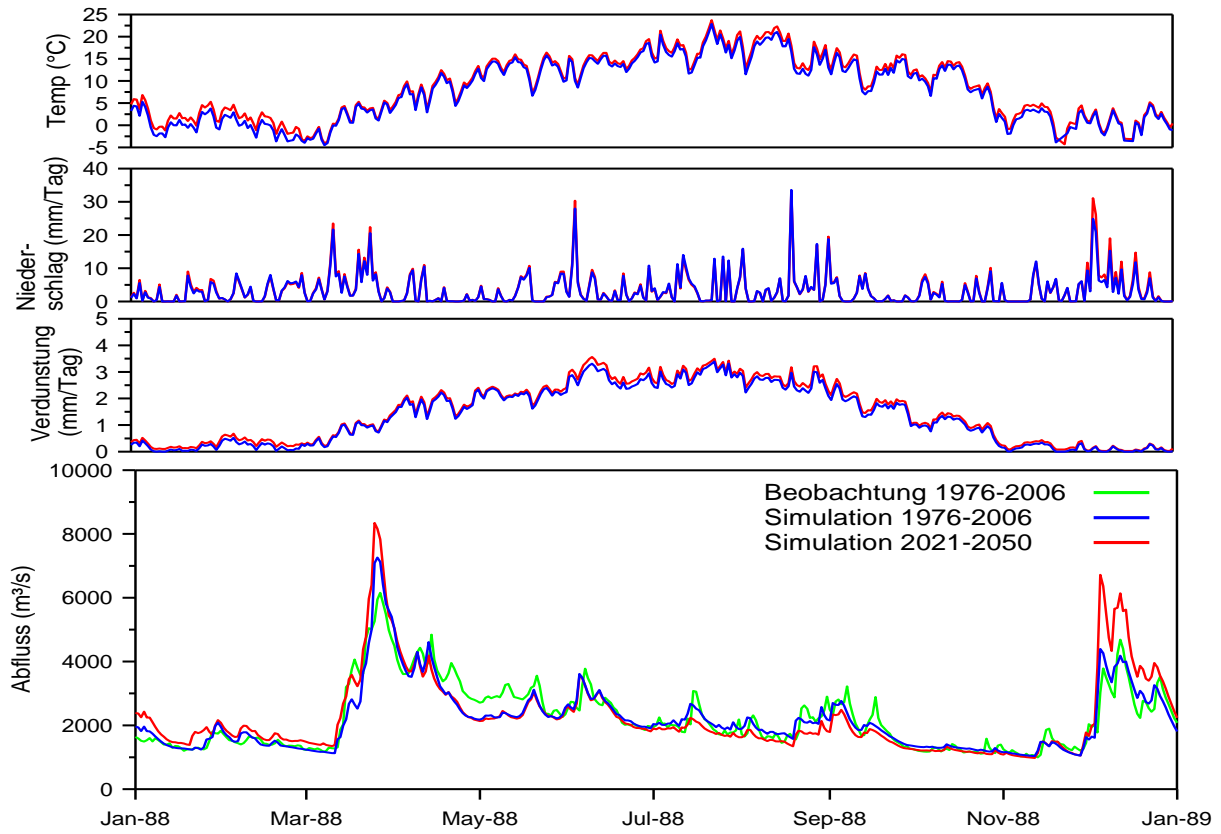


Abbildung 4-23: Abflusssimulationen für die Donau bei Wien

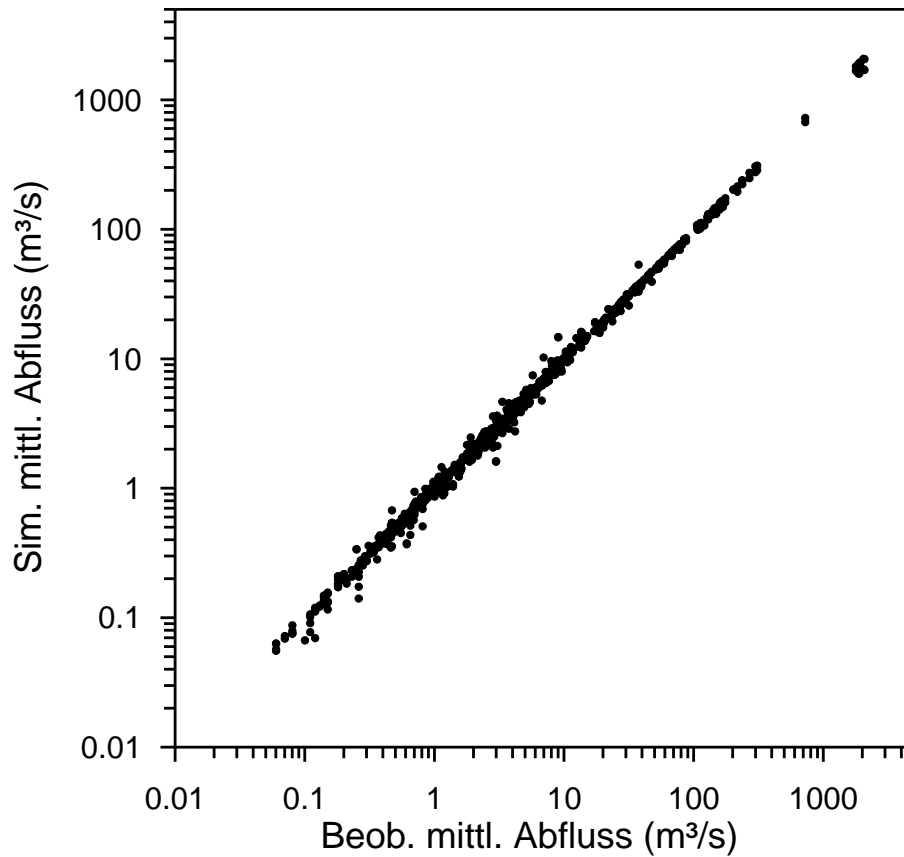


Abbildung 4-24: Vergleich der Mittelwerte der simulierten und beobachteten Abflüsse

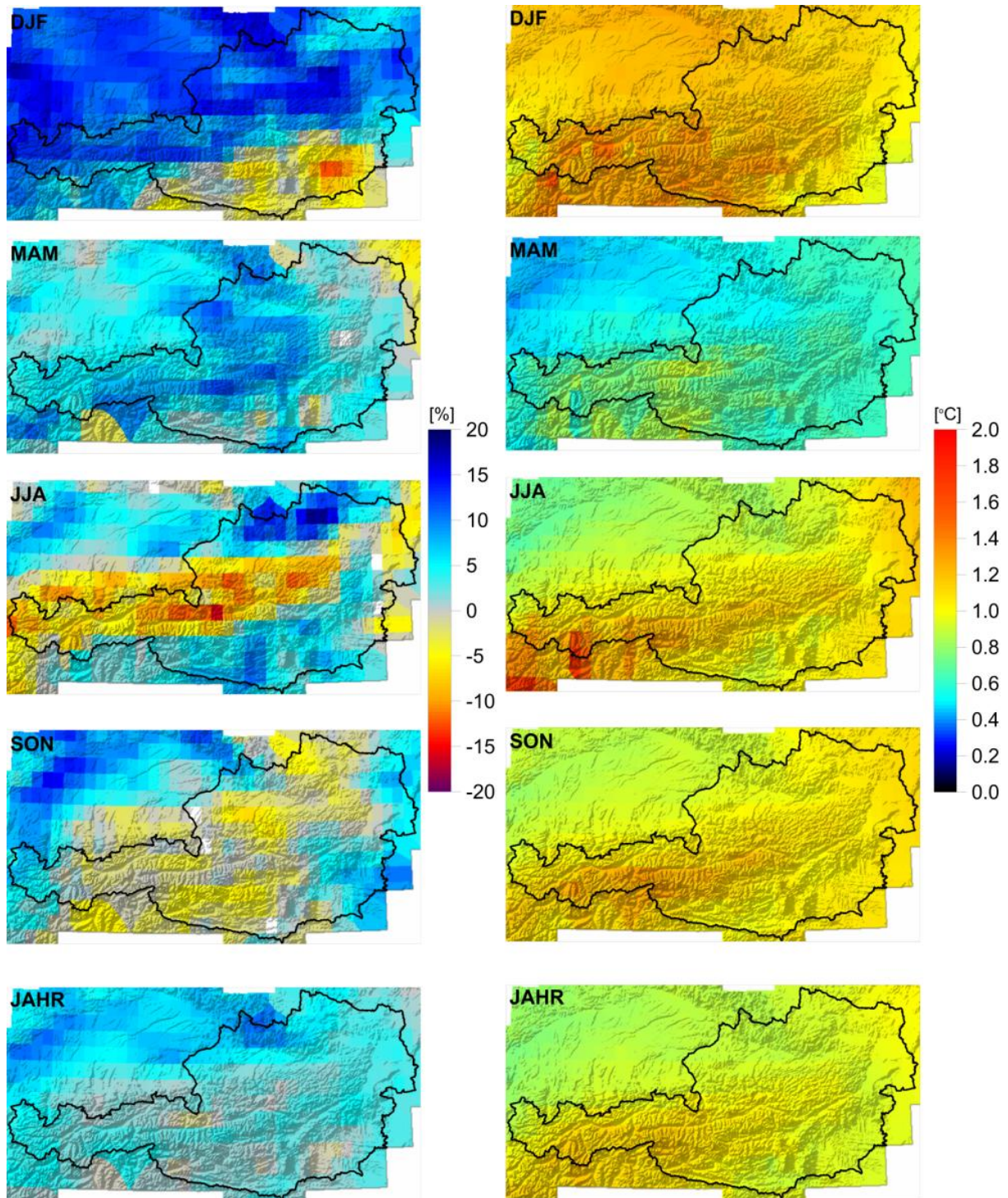


Abbildung 4-25: Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags 2021-2050 bezogen auf den Kontrolllauf 1976-2006. Modell: CLM (siehe Berichtsteil 2 – Klima, Schöner et al.). Diese Änderungen bilden die Grundlage für den hier verwendeten Delta-Change Ansatz der Szenarienanalyse.

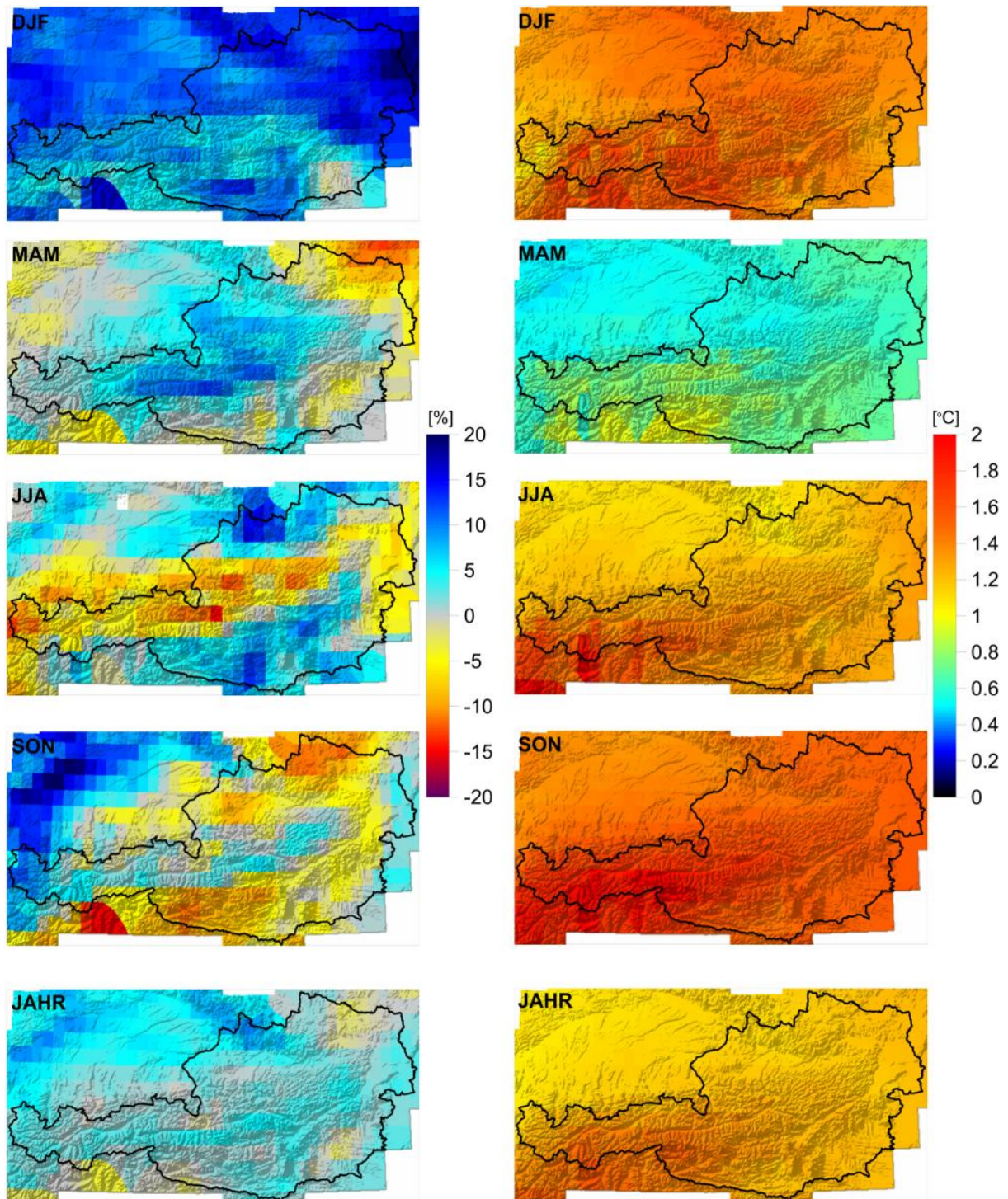


Abbildung 4-26: Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags 2021-2050 bezogen auf den Kontrolllauf 1961-1990. Modell: CLM (siehe Berichtsteil 2 – Klima, Schöner et al.). Diese Änderungen dienen zum Vergleich und wurden in der Szenarienanalyse nicht verwendet.

4.5.3 Auswertungen in Österreich

Abbildung 4-27 zeigt die Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Insgesamt sind die berechneten Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses klein. Im Mühlviertel wird eine Zunahme von bis zu 10% berechnet. Diese ist auf die durch das Klimamodell simulierten größeren Niederschläge im Mühlviertel

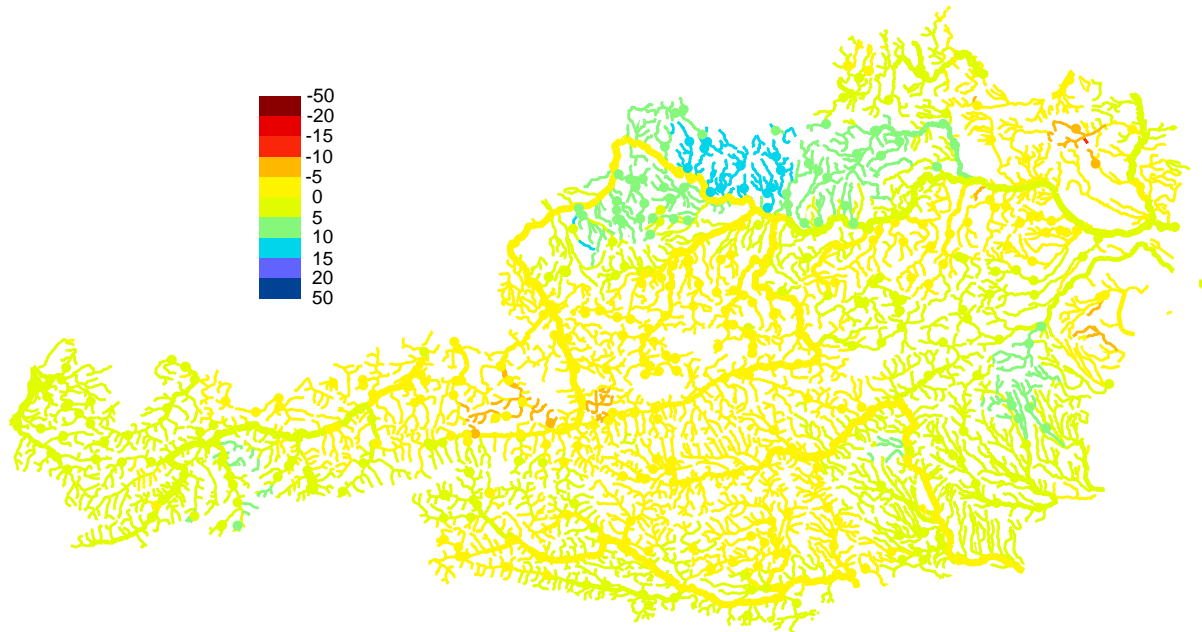
zurückzuführen (Abbildung 4-25 links unten). Im Südosten Österreichs berechnet das Verfahren einen kleinen Bereich mit einer Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses von bis zu 6%. Im Weinviertel wird eine etwas größere Abnahme von bis zu 8% berechnet. Im restlichen Bundesgebiet sind die berechneten Änderungen kleiner als 5%.

Die saisonalen Änderungen sind größer. Eine Erhöhung der Winterabflüsse um ca. 20% in ganz Österreich mit Ausnahme des Südens wird berechnet. Weiters berechnet das Modell eine Abnahme des Frühjahrsabflusses im Osten (Flachland), und eine Abnahme des Sommerabflusses im Westen (Alpen) um ca. 10-20%.

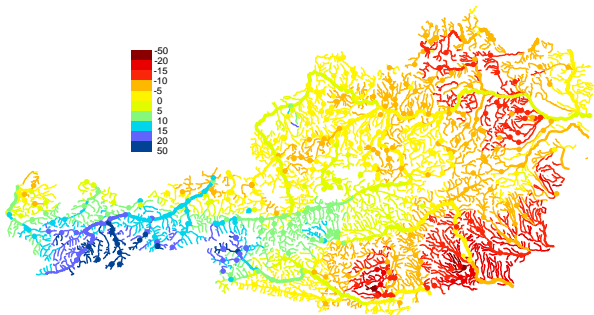
Bei der Szenarienanalysen wird aber angenommen, dass die im Referenzzeitraum aufgetretenen Abflussprozesse auch in der Zukunft gelten. Die durch das Niederschlag-Abflussmodell beschriebenen Prozesse (Verdunstung, Schneeprozesse, Abflussbildung und Konzentration) sind aber – wie alle hydrologischen Vorgänge – zeitlich variabel und können sich über die Dekaden verschieben. Grund dafür können z.B. Änderungen in der Vegetation (Zunahme des Waldanteils, Zunahme der Transpiration) sein. Deswegen sind die Modellparameter mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Um diese abzuschätzen wurden die Simulationen mit geringfügig verschobenen Parameterwerten wiederholt. Dabei wurde der Parameter für die Abflussbildung gegenüber dem in den Szenarien in Abbildung 4-27 verwendeten Wert um ca. 10% erhöht bzw. erniedrigt. Durch die Parametervariation verschiebt sich der simulierte Abfluss. Das gibt einen Hinweis auf die Zuverlässigkeit des Abflussmodells unter der Annahme, dass die Szenarien des Niederschlags und der Lufttemperatur vollständig zutreffen. Die Unsicherheit der Klimaszenarien kommt noch hinzu. Aus Abbildung 4-28 erkennt man, dass sich das Vorzeichen der Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 in weiten Teilen Österreichs verschiebt. Allerdings trifft die Aussage, dass die Änderungen des Jahresabflusses verhältnismäßig klein sind, auch hier zu.

In einem nächsten Schritt wurden in Abbildung 4-29 und Abbildung 4-30 die Zeitpunkte des Maximums bzw. des Minimums der wöchentlichen Abflüsse dargestellt. Abbildung 4-31 zeigt die Verschiebung der Zeitpunkte für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 in Wochen. Festzustellen sind etwas frühere Abflussmaxima im Westen (Alpen) (Verschiebung von Mitte auf Anfang Juni), spätere Abflussmaxima im Süden (Verschiebung vom Sommer in den Herbst), und eine Verschiebung der Abflussminima im nördlichen Alpenvorland vom Winter in den Sommer.

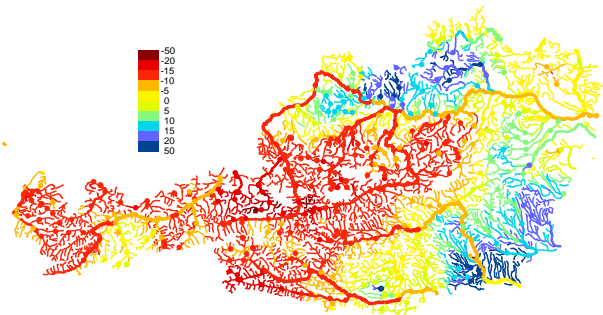
Abbildung 4-32 zeigt schließlich verschiedene Beispiele der Verschiebung des Abflussregimes für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006. Es ist zu erkennen, dass die Sommerabflüsse leicht abnehmen, die Winterabflüsse hingegen deutlich zunehmen.



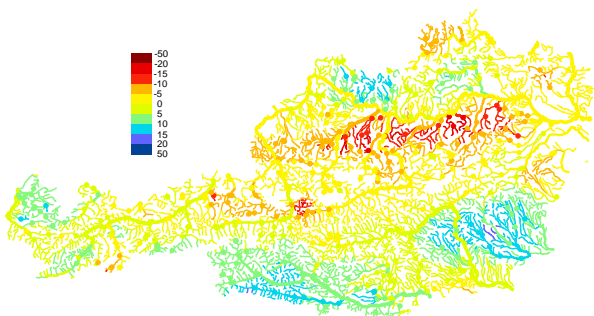
Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Jahr



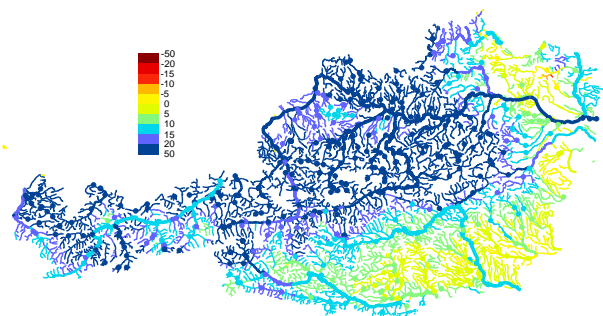
Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Frühjahr (MAM)



Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Sommer (JJA)

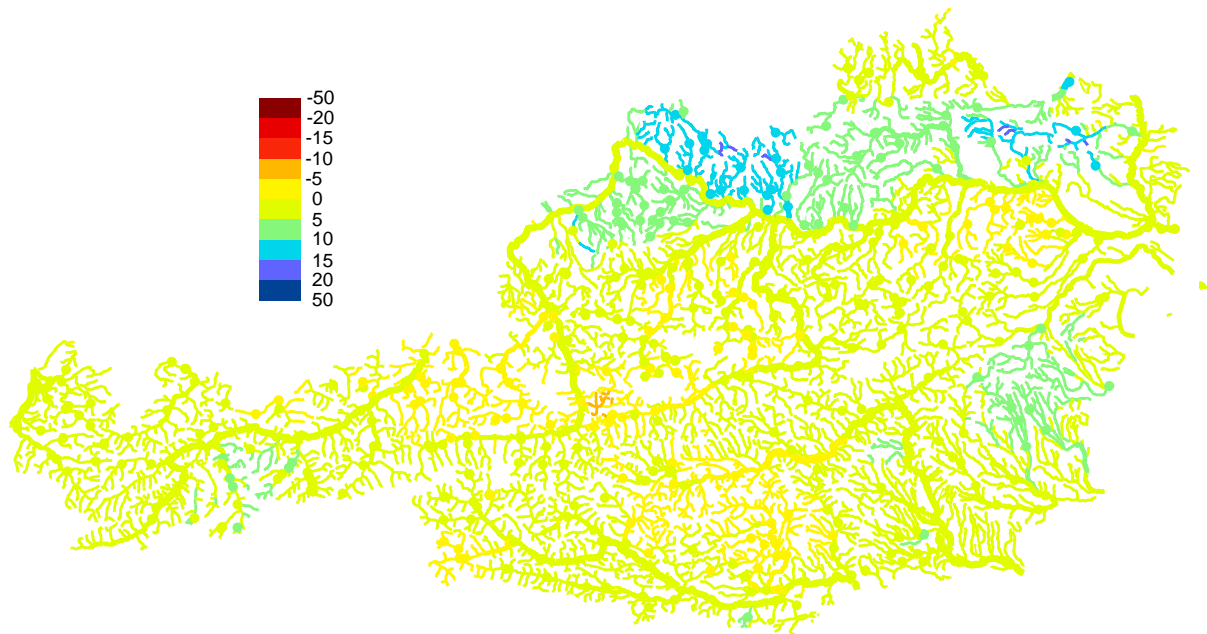


Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Herbst (SON)

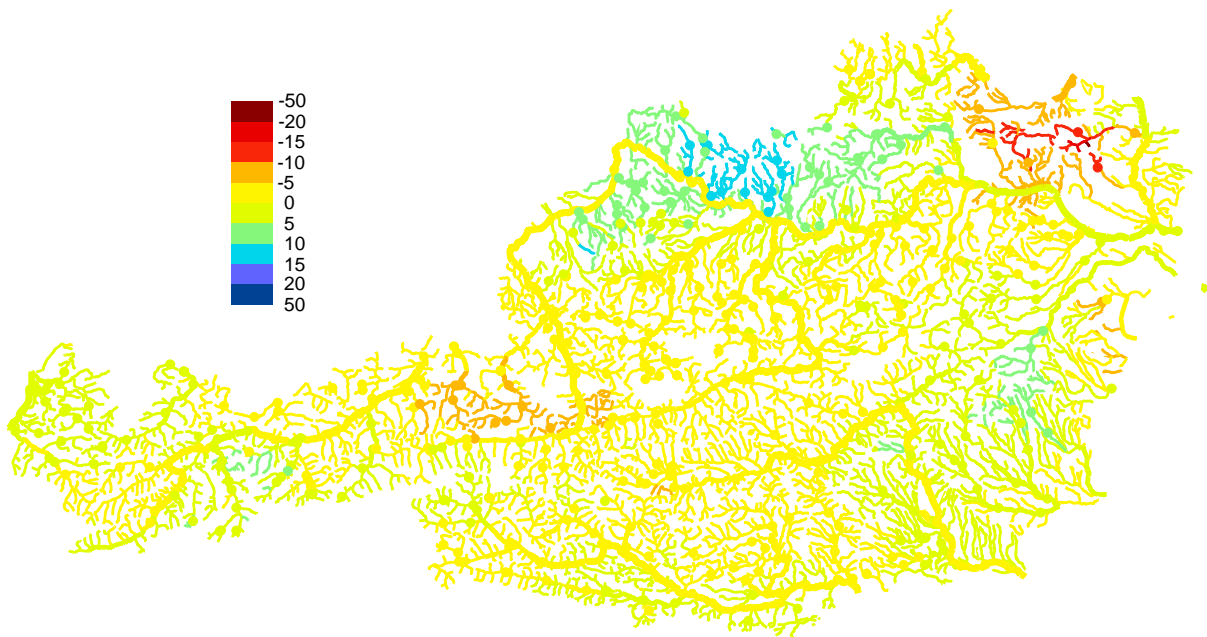


Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Winter (DJF)

Abbildung 4-27: Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses in % für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.



Delta QM 1976-2006 Jahr Parameter=1.0



Delta QM 1976-2006 Jahr Parameter=1.15 bis 1.45

Abbildung 4-28: Unsicherheiten des simulierten Abflusses: Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit unterschiedlichen plausiblen Parametern des Niederschlag-Abflussmodells. Angenommen wird hier, dass die Szenarien des Niederschlags und der Lufttemperatur vollständig zutreffen.

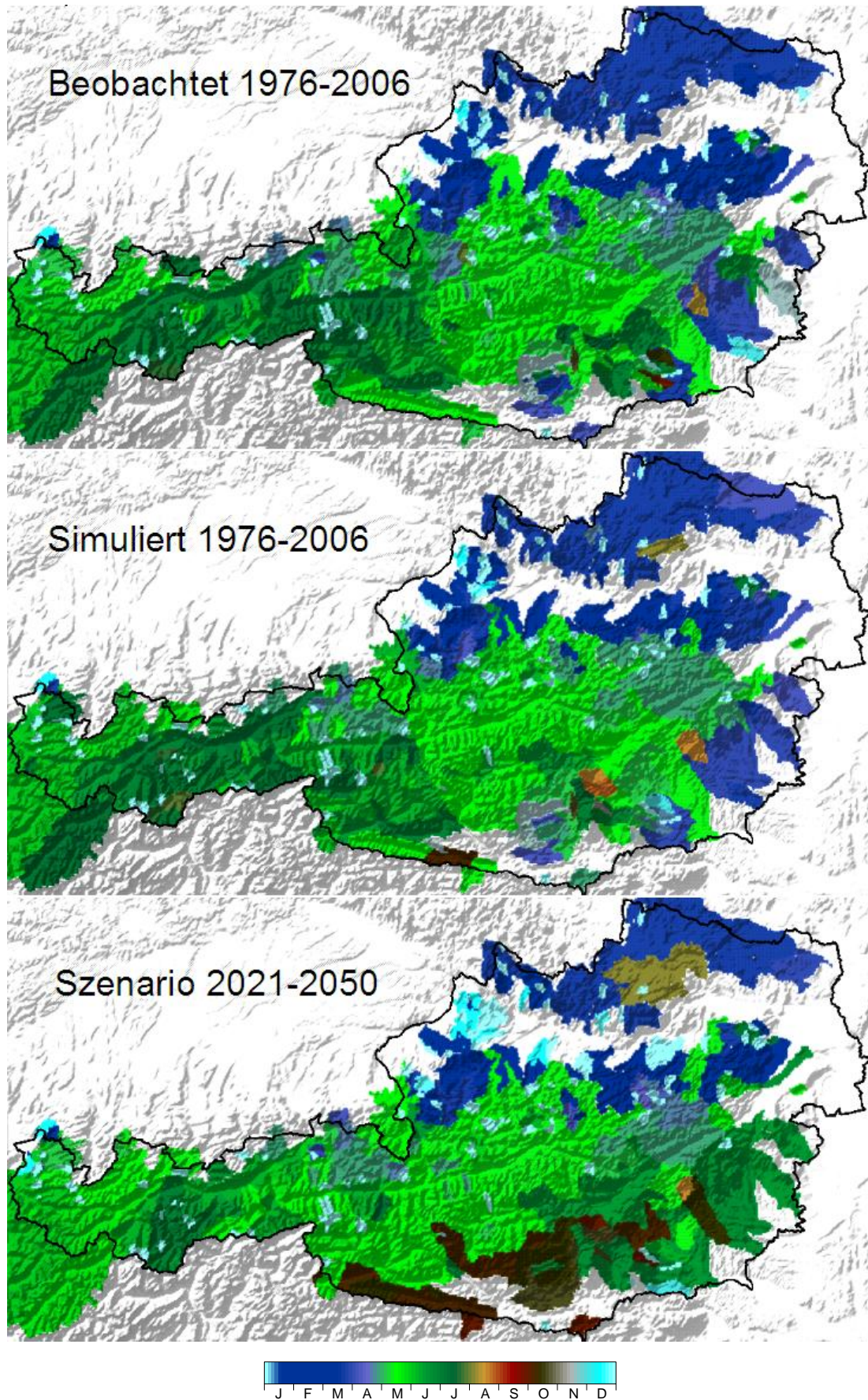


Abbildung 4-29: Zeitpunkt des Maximums der wöchentlichen Abflüsse

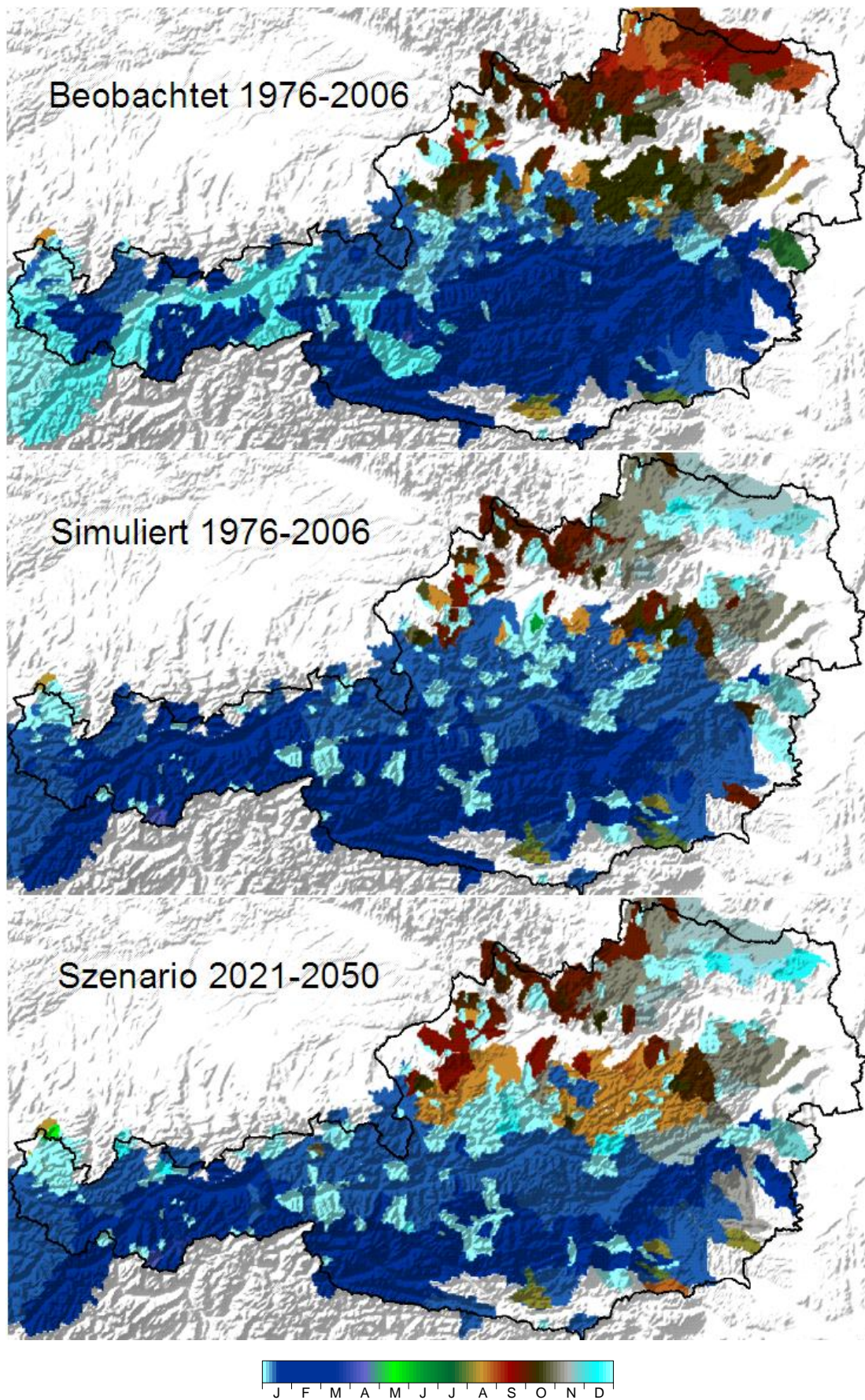


Abbildung 4-30: Zeitpunkt des Minimums wöchentlichen Abflüsse

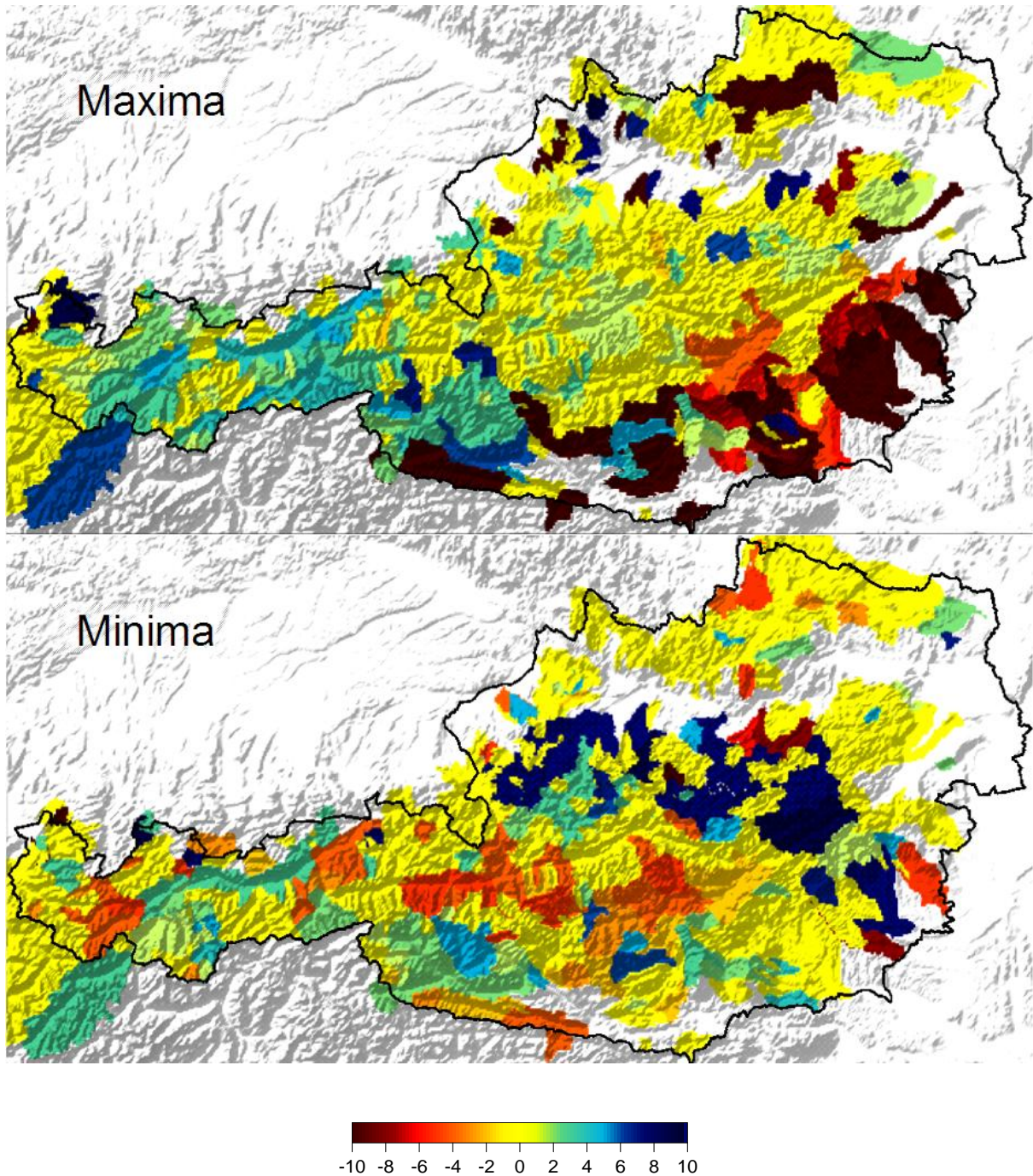
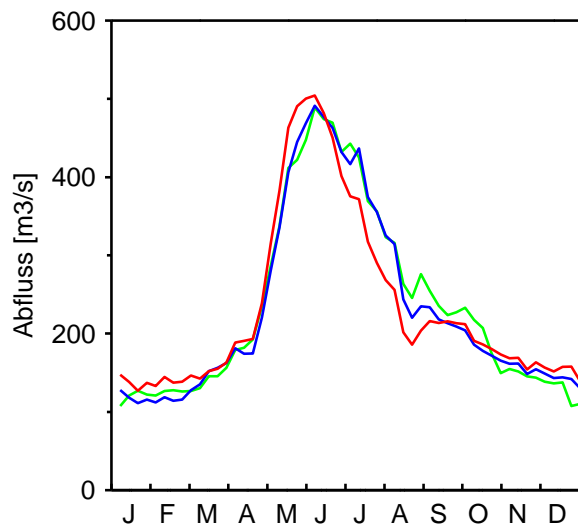
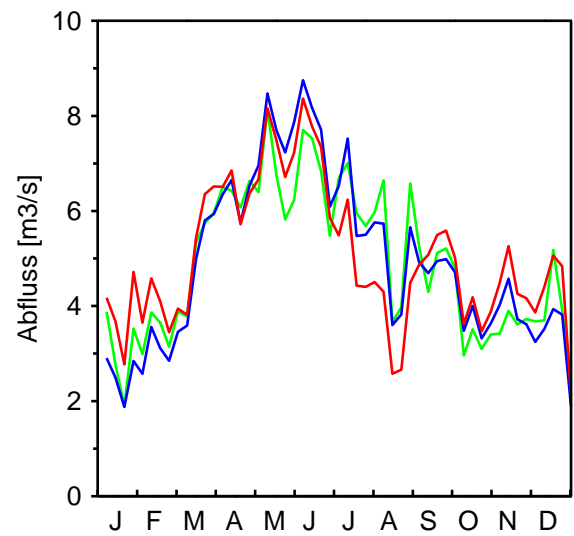


Abbildung 4-31: Änderung des Zeitpunktes des Maximums und des Minimums des wöchentlichen Abflüsse für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Einheit sind Wochen. Rot bedeutet, dass der Abfluss im Zeitraum 2021-2050 früher auftreten wird.

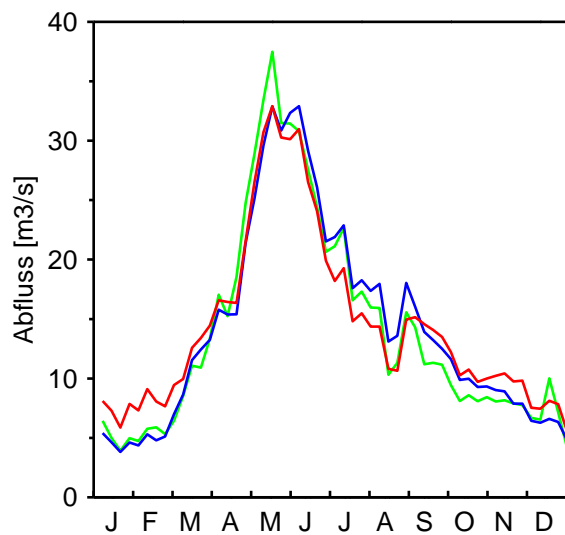
HZBNr 200196 Lustenau Rhein (6110 km²)



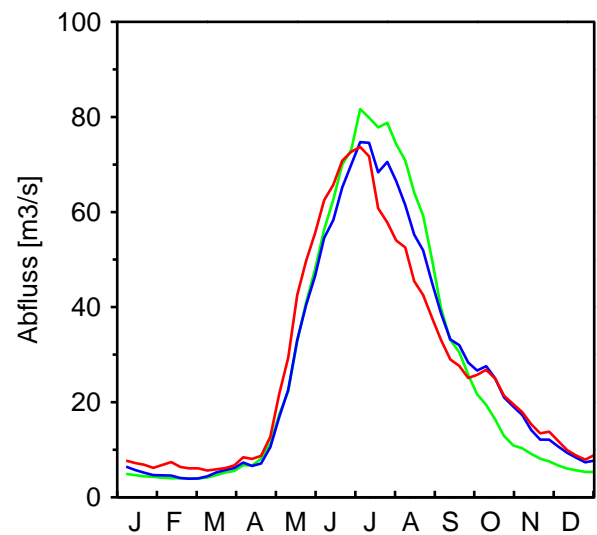
HZBNr 200212 Hoher Steg Dornbirnerach (113 km²)



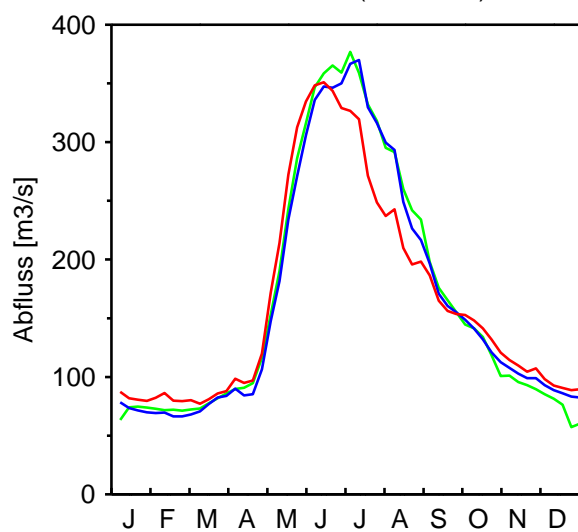
HZBNr 200261 Mellau Bregenzerach (229 km²)



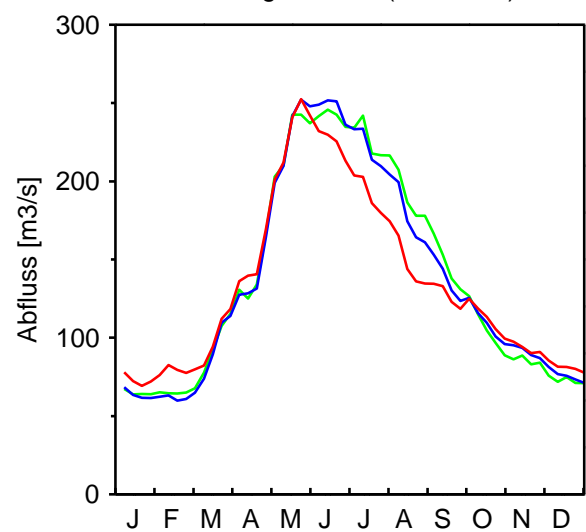
HZBNr 201434 Tumpen Öztaler Ache (786 km²)



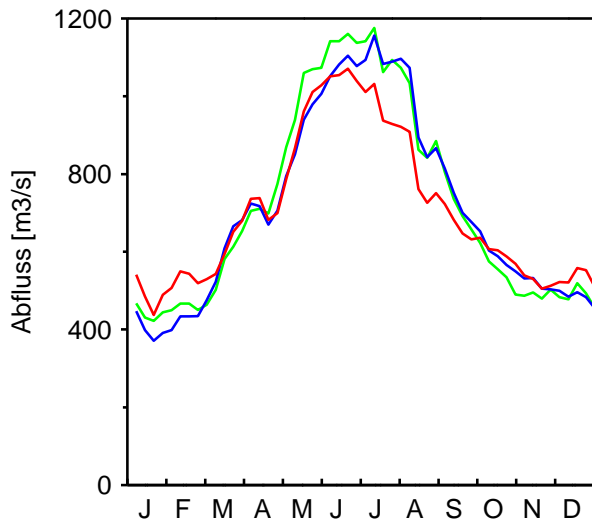
HZBNr 201525 Innsbruck Inn (5792 km²)



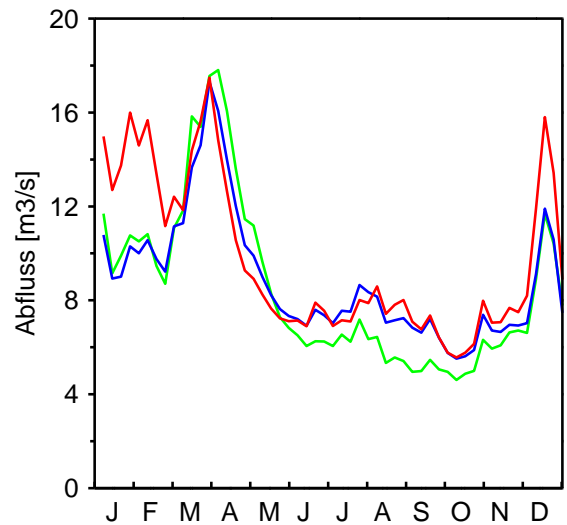
HZBNr 203323 Golling Salzach (3556 km²)



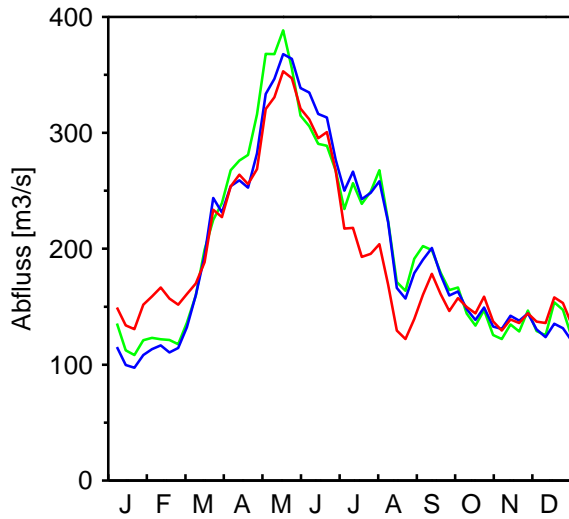
HZBNr 204776 Schärding Inn (25664 km²)



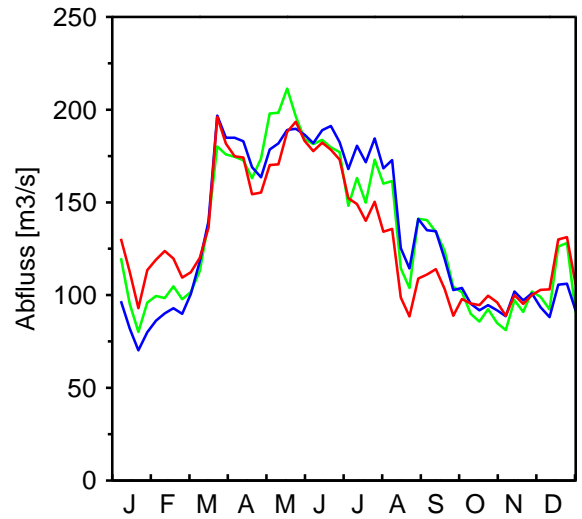
HZBNr 204933 Teufelmühle Gr. Mühl (452 km²)



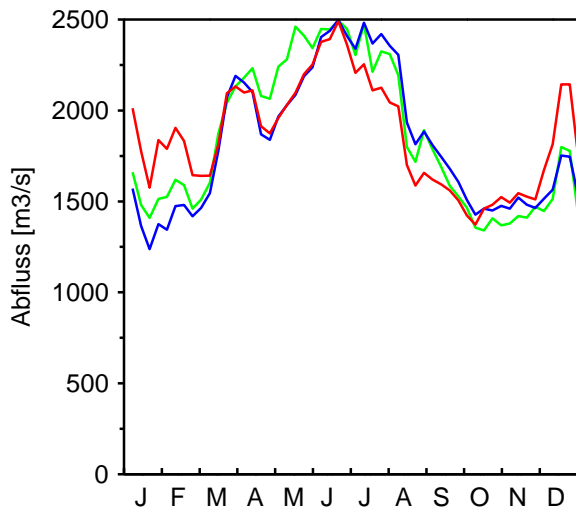
HZBNr 205922 Steyr Enns (5915 km²)



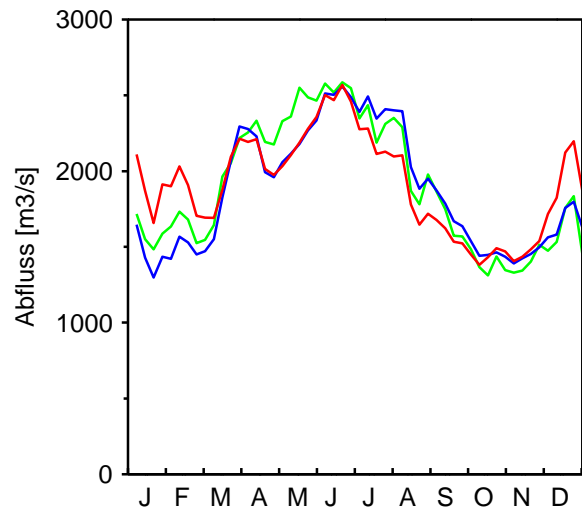
HZBNr 206409 Wels-Lichtenegg Traun (3426 km²)



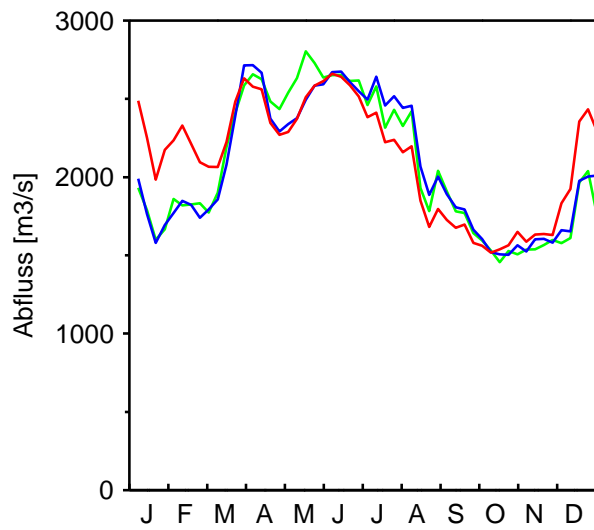
HZBNr 207134 Melk Donau (94813 km²)



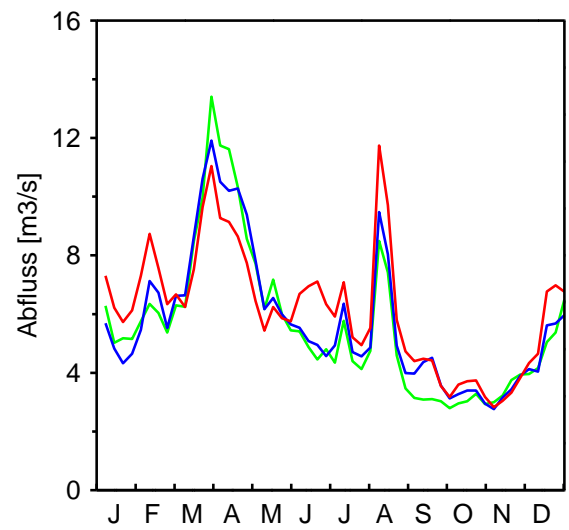
HZBNr 207191 Wien Donau (101731 km²)



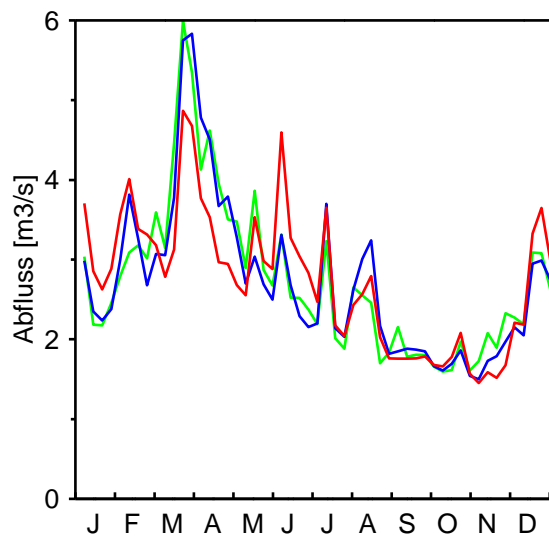
HZBNr 207399 Bratislava Donau (131244 km²)



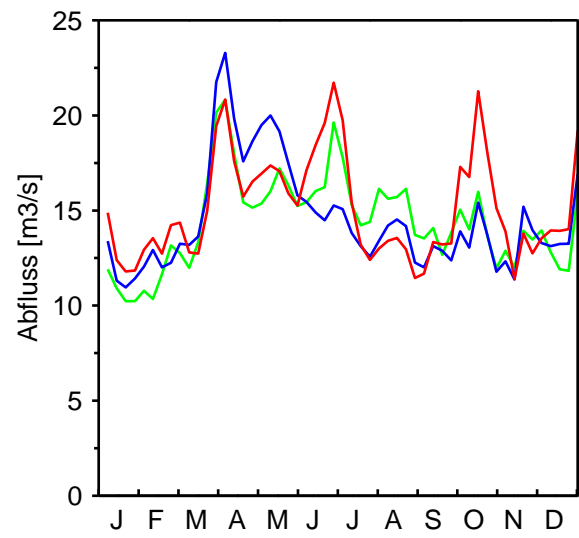
HZBNr 207944 Zwettl Kamp (622 km²)



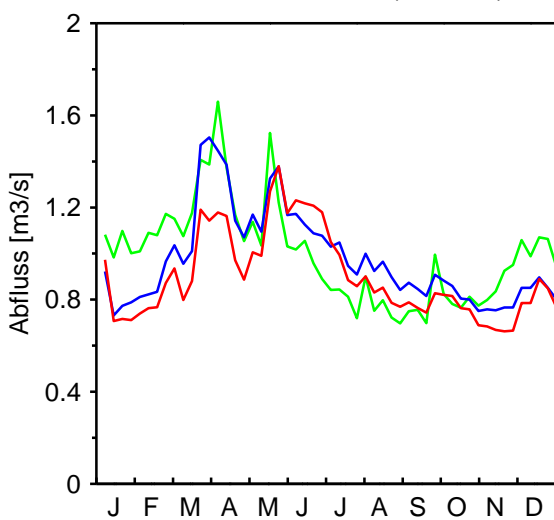
HZBNr 208124 Hirtenberg Triesting (287 km²)



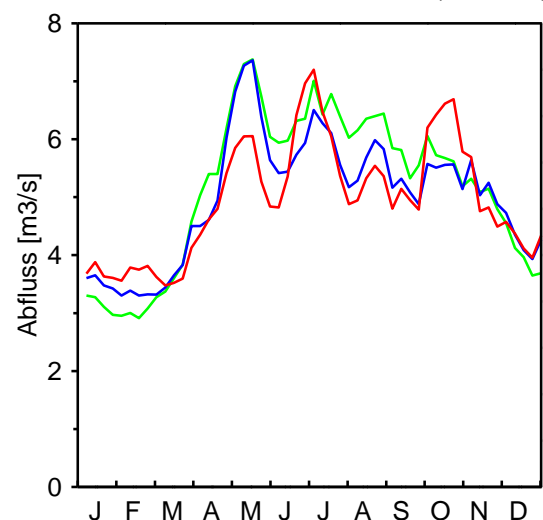
HZBNr 210401 Eltendorf Lafnitz (1956 km²)



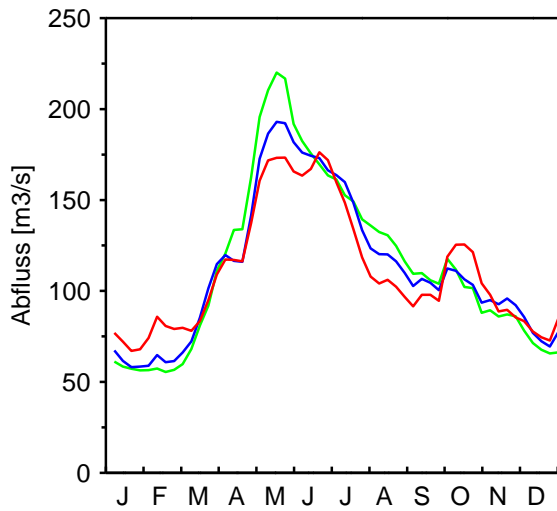
HZBNr 210096 Schützen Wulka (384 km²)



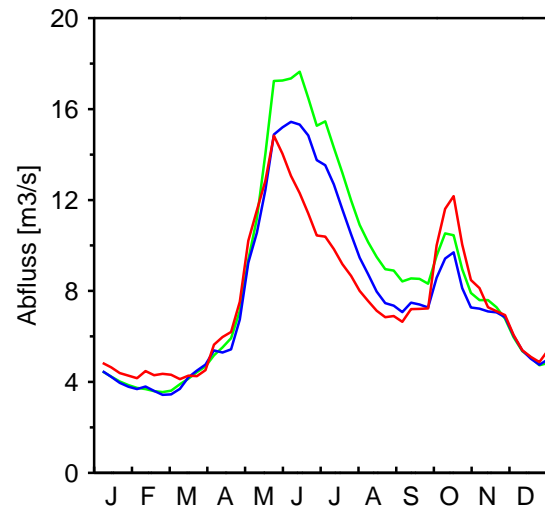
HZBNr 213082 St. Gertraud Lavant (380 km²)



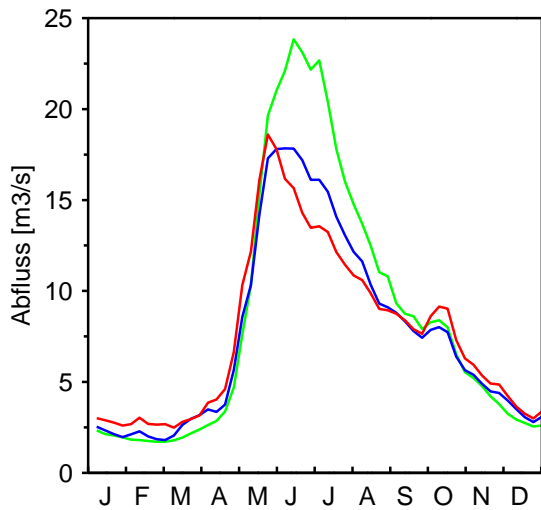
HZBNr 211573 Graz Mur (6989 km²)



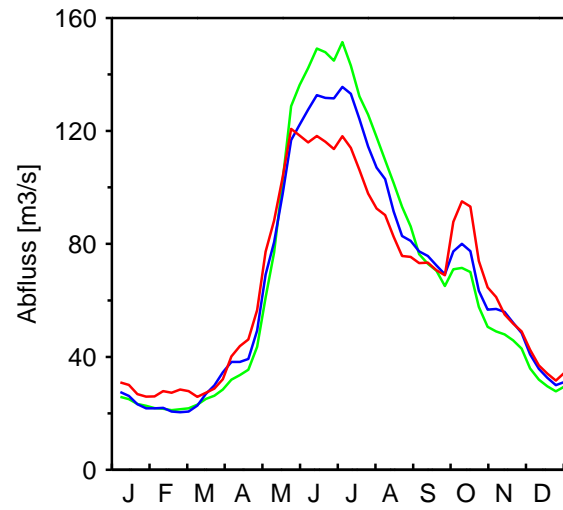
HZBNr 212027 Rabland Drau (374 km²)



HZBNr 212100 Hopfgarten Schwarzach (269 km²)



HZBNr 212357 Sachsenburg Drau (2561 km²)



HZBNr 212787 Federaun Gail (1305 km²)

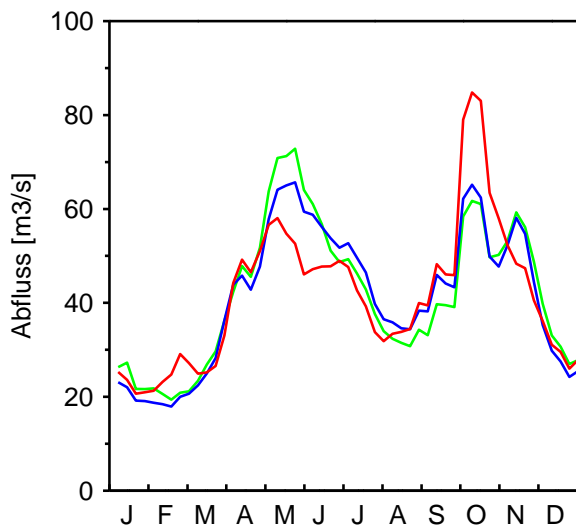


Abbildung 4-32: Verschiebung des Abflussregimes für den Zeitraum 2021-50 (Szenario - rot) im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 (simuliert - blau und beobachtet - grün)

4.6 Elastizität (zeitlich)

Die Elastizität setzt die prozentuale Änderung in einer Variablen mit der prozentualen Änderung einer anderen Variablen in einen Zusammenhang. Hier werden die Änderungen der jährlichen Mittelwerte des Abflusses in Zusammenhang mit dem Niederschlag und der Lufttemperatur gesetzt. Der nicht-parametrische Elastizitätsindex ε^{PQ} des Abflusses auf den Niederschlag wird nach Sankarasubramanian et al. (2001) als Median des Verhältnisses der proportionalen Änderungen des Abflusses und den proportionalen Änderungen des Niederschlages berechnet:

$$\varepsilon^{PQ} = \text{median} \left(\frac{Q - \bar{Q}}{P - \bar{P}} \cdot \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right) \quad (5.1)$$

wobei Q der mittlere jährliche Abfluss, \bar{Q} der langfristige Mittelwert des Abflusses und P und \bar{P} die entsprechenden Werte für den Niederschlag sind. Zur Erhöhung der Robustheit des Index wurde der Median nur von solchen Verhältnisse berechnet, für die die Differenz zwischen P und \bar{P} größer als 5% war. In analoger Weise ist der Elastizitätsindex ε^{TQ} des Abflusses auf die Lufttemperatur definiert:

$$\varepsilon^{TQ} = \text{median} \left(\frac{Q - \bar{Q}}{T - \bar{T}} \cdot \frac{\bar{T}}{\bar{Q}} \right) \quad (5.2)$$

wobei T die mittlere jährliche Lufttemperatur und \bar{T} der langfristige Mittelwert der Lufttemperatur ist.

Folgende Datenbasis wurde verwendet. Mittlerer jährlicher Abfluss, mittlerer jährlicher Niederschlag und mittlere jährliche Lufttemperatur für den Zeitraum 1976-2006. Die Jahresmittel wurden für das hydrologische Jahr (Oktober bis September) berechnet. Insgesamt wurden 506 Einzugsgebiete mit Flächen <10000 km² herangezogen. Der Niederschlag und die Lufttemperatur wurden auf Einzugsgebietswerte interpoliert. Abbildung 4-33 zeigt die räumliche Verteilung der langfristigen Mittelwerte.

Das Ergebnis der Elastizitätsanalyse ist in Abbildung 4-34 dargestellt. Die obere Abbildung zeigt die Elastizität ε^{PQ} des Abflusses auf den Niederschlag. Die Elastizität liegt zwischen 0,5 und 2. Am größten ist der Elastizitätsindex im Norden und im Südosten Österreichs mit Werten von bis zu 2. Das bedeutet, dass eine Änderung des Jahresniederschlags von 1% eine Änderung des Jahresabflusses von 2% bewirkt. Im Zentrum Österreichs ist der Elastizitätsindex kleiner mit Werten um 1. Das bedeutet, dass eine Änderung des Jahresniederschlags von 1% eine Änderung des Jahresabflusses von 1% bewirkt. Diese räumlichen Unterschiede unterstreichen, dass der Abfluss in den abflussärmeren Teilen Österreichs (Norden und Südosten) empfindlicher auf Änderungen des Niederschlags reagiert als die abflussreicheren Teile Österreichs. Abbildung 4-34 unten zeigt die Elastizität ε^{TQ} des Abflusses auf die Lufttemperatur. Die Lufttemperatur ist dabei in der Einheit Kelvin verwendet. Im Norden und im Südosten Österreichs ist der Index negativ mit Werten um -50. Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1% (d.h. 2,7°C) zu einer Verringerung des Abflusses um 50% führt. Im Rest Österreichs ist der Elastizitätsindex betragsmäßig wesentlich kleiner: In Vorarlberg ist der Index etwa -20. Im Zentrums Österreich ist der Index positiv mit Werten von 10 bis 20. Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1% (d.h. 2,7°C) zu einer Verringerung des Abflusses um 10% bis 20% führt. Die Unterschiede im Vorzeichen spiegeln den Einfluss von Verdunstung und Niederschlag auf den Abfluss wider. Im Norden und im Südosten Österreichs ist eine Verringerung des Abflusses bei erhöhter Lufttemperatur auf die Zunahme der Verdunstung zurückzuführen. Im Zentrums Österreich ist der höhere Abfluss in wärmeren Jahren darauf zurückzuführen, dass die Jahre im Durchschnitt auch niederschlagsreicher waren. Der Einfluss des Niederschlags ist in diesen Gebieten größer als der der Verdunstung, wodurch sich insgesamt eine Erhöhung des Abflusses ergibt.

Zur Verallgemeinerung dieser Elastizitätsergebnisse wurde in Abbildung 4-35 die Änderung des Abflusses als Funktion der Änderungen des Niederschlags und der Lufttemperatur aufgetragen. Dabei wurde der Median der Abflussänderungen für jede Kombination aus Niederschlag und Lufttemperatur im Niederschlags-Lufttemperaturraum interpoliert. Das Diagramm ist folgendermaßen zu lesen. Nach dieser Auswertung gibt eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1°C und keine Änderung des Niederschlags eine Verminderung des mittleren jährlichen Abflusses um 5% (im Mittel für Österreich). Eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1°C und eine Erhöhung des Niederschlags um 20% gibt eine Erhöhung des mittleren jährlichen Abflusses um 15% (im Mittel für Österreich).

Diese Elastizität wurde nun herangezogen, um die Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für die Szenarien des Klimamodells (CLM) zu berechnen. Verwendet wurden die Szenarien 2021-50 im Vergleich zu 1976-2006 (Abbildung 4-36). Das Ergebnis ist in Abbildung 4-37 dargestellt, wobei kleine Gebiete über große Gebiete gezeichnet wurden. Abnahmen des mittleren jährlichen Abflusses von etwa 5% sind im Wald- und Weinviertel, Burgenland, generell im Süden Österreichs sowie in Vorarlberg und in einem kleinen Teil Salzburgs zu sehen. Die generelle Abnahme ist auf die erhöhte Verdunstung bei den wärmeren Temperaturen zurückzuführen, ist aber betragsmäßig klein. Im Mühlviertel zeigt sich eine Erhöhung des mittleren jährlichen Abflusses um bis zu 5%, die auf die größeren Niederschläge zurückzuführen ist.

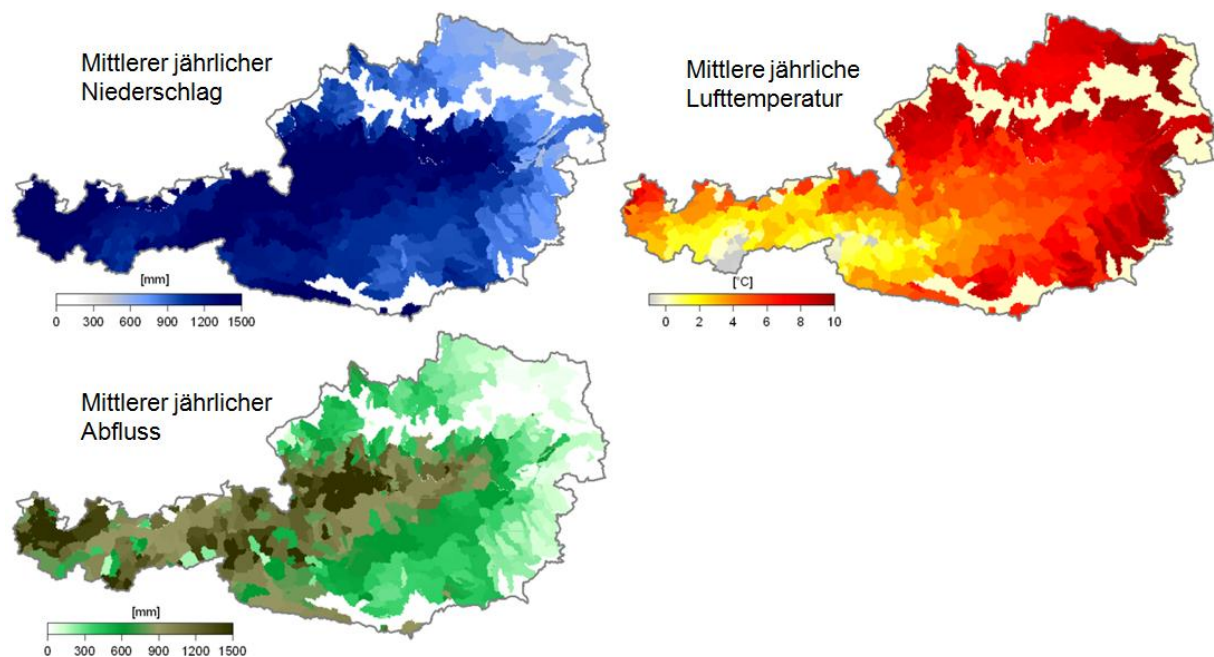


Abbildung 4-33: Mittlerer jährlicher Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur für den Zeitraum 1976-2006.

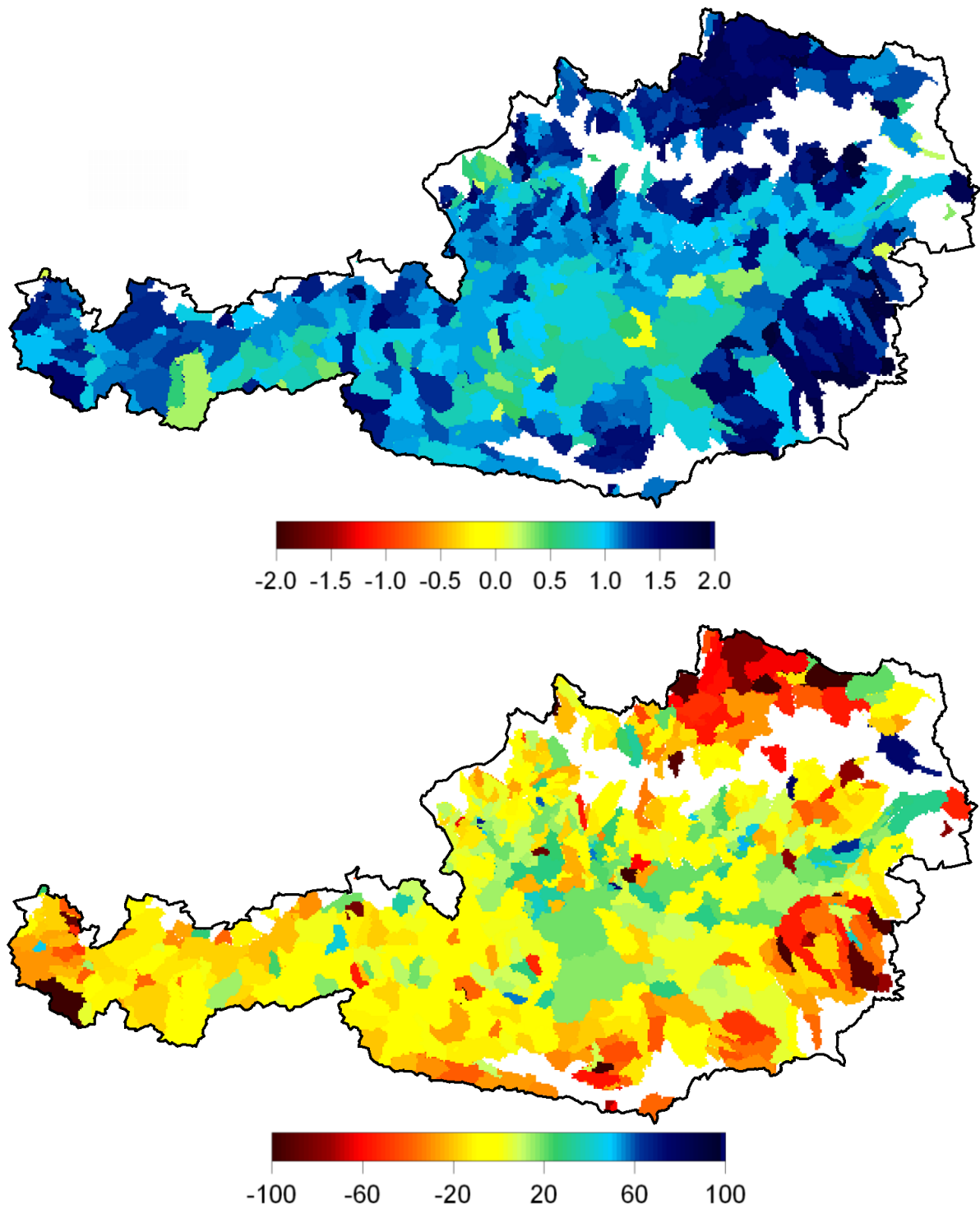


Abbildung 4-34: Elastizität des Abflusses auf eine Änderung des Niederschlages (oben) bzw. auf eine Änderung der Lufttemperatur (unten).

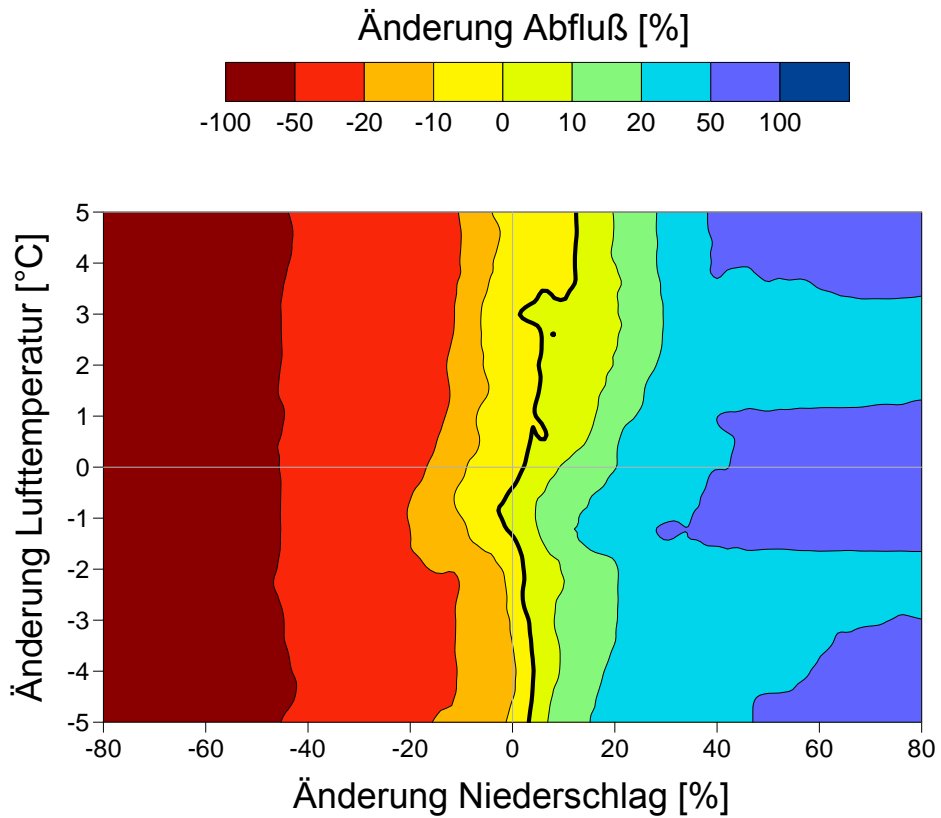


Abbildung 4-35: Prozentuelle Änderung des jährlichen Abflusses als Funktion der Änderungen des jährlichen Niederschlags und der Lufttemperatur. Median der jährlichen Werte 1976-2006, jeweils Oktober-September für 506 Einzugsgebiete mittels der Elastizitätsmethode.

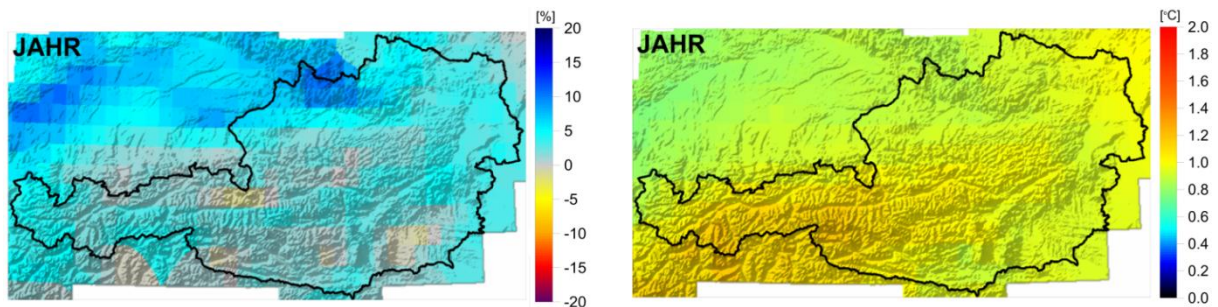


Abbildung 4-36: Änderungen des mittleren jährlichen Niederschlages und der mittleren jährlichen Lufttemperatur nach dem CLM Modell für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006. Diese Änderungen wurde als Basis für die Ergebnisse in Abbildung 4-37 verwendet.

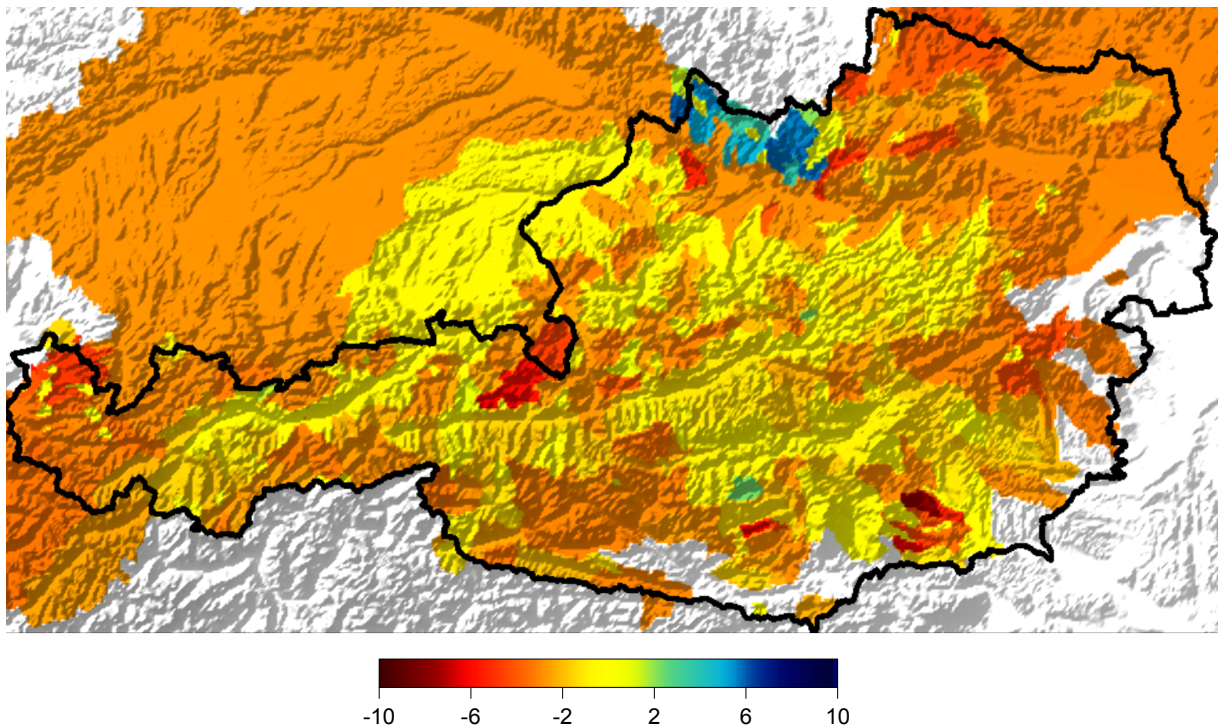


Abbildung 4-37: Änderungen (%) des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit der Elastizitätsmethode unter Verwendung der CLM Simulationen in Abbildung 4-36. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.

4.7 Trading space for time (räumlich)

Das Modell nach Turc (1954, 1961) setzt den langfristigen mittleren jährlichen Abfluss R [mm] in Beziehung mit dem langfristigen mittleren jährlichen Niederschlag P [mm] und einem Index der potentiellen Verdunstung EPI , entsprechend der folgenden Gleichung:

$$R = P \cdot \left[1 - \frac{EPI}{(c \cdot EPI^n + P^n)^{1/n}} \right] \quad (6.1)$$

wobei c und n Modellparameter sind. Die Formel ist gültig für $P > EPI(1-c)^{(1/n)}$. Der Index für die potentiellen Verdunstung EPI wird nach einer empirischen Beziehung als Funktion der langfristigen mittleren jährlichen Lufttemperatur berechnet. In der ursprünglichen Formel nach Turc wird EPI durch die folgende Gleichung ausgedrückt:

$$EPI = a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^3 \quad (6.2)$$

wobei T die langfristige mittlere jährliche Lufttemperatur und a_1 , a_2 , a_3 regionale Parameter sind. Für den Fall beschränkter Datenverfügbarkeit empfahl Turc die Verwendung folgender Parameterwerte: $c = 0,9$, $n = 2$, $a_1 = 300$, $a_2 = 25$ und $a_3 = 0,05$.

Das Turc-Modell wurde für Österreich in folgender Weise angepasst:

(a) Für 291 Einzugsgebiete wurde die langfristige mittlere jährliche Lufttemperatur berechnet. Sodann wurde für die gleichen Gebiete die potentielle Verdunstung EPI nach der Blaney-Criddele Methode bestimmt. Schließlich wurden die Parameter der Gleichung aus diesen Daten bestimmt, die sich zu $a_1 = 376,3$, $a_2 = 30,95$ und $a_3 = 0,05$ ergaben. Die Anpassung besitzt einen RMS der Residuen von 15,3 mm und einen asymptotischen Standard Fehler von 3,75%). Abbildung 4-39 zeigt die Anpassung.

(b) Die Parameter c und n wurden in einem zweiten Schritt für die gleichen Einzugsgebiete berechnet. Der Parameter c wurde entsprechend der Empfehlung von Turc belassen und der Parameter n wurde durch eine Anpassung an den langfristigen beobachteten Jahresabfluss bestimmt, wobei die nicht-lineare kleinste Quadrate Methode nach Marquardt-Levenberg verwendet wurde. Die Parameter ergaben sich damit zu $c=0,9$, $n=1,732$. Mit dem angepassten Modell wurde nun der mittlere jährliche Abfluss für die 291 Einzugsgebiete berechnet und mit den beobachteten Abflüssen verglichen (Abbildung 4-40). Kleine Abflüsse werden zwar etwas überschätzt und große Abflüsse unterschätzt, aber insgesamt ist die Genauigkeit dieses sehr einfachen Modells gut. Abbildung 4-41 zeigt die Anwendung des Modells für ganz Österreich auf Rasterbasis.

Das Modell wurde nun herangezogen, um die Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für die Szenarien des Klimamodells (CLM) zu berechnen. Verwendet wurde das Szenarium 2021-50 im Vergleich zu 1976-2006 (Abbildung 4-42). Das Ergebnis ist in Abbildung 4-43 auf Rasterbasis dargestellt und gilt für kleine bis mittlere Einzugsgebiete. Es zeigt sich im Norden eine Erhöhung des mittleren jährlichen Abflusses um bis zu 10%, die auf die größeren Niederschläge zurückzuführen ist. Im Südosten Österreichs berechnet das Verfahren einen kleinen Bereich mit einer Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses von bis zu 6%. Im Restlichen Bundesgebiet sind die berechneten Änderungen kleiner als 5%.

Für die Änderungen in Abbildung 4-43 wurden zwar die beobachteten räumlichen Unterschiede im Abfluss verwendet, um auf die Zukunft zu schließen, sie basieren aber auch auf den Klimaszenarien. Diese enthalten erhebliche Unsicherheiten. Es wurde deshalb mit dem gleichen Ansatz eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die von den Klimaszenarien unabhängig ist und nur die Information aus den Abfluss-, Niederschlags- und Lufttemperaturdaten enthält. Diese Sensitivität ist in Abbildung 4-44 dargestellt. Eine Erhöhung der Lufttemperatur alleine von 1°C ($T=+1$, $N=0$) bewirkt danach eine Reduktion des mittleren jährlichen Abflusses um 3% in den Alpen und um 10% im Flachland im Osten Österreichs. Tritt gleichzeitig eine Zunahme des Niederschlags um 5% auf ($T=+1$, $N=+5$), erhöht sich der Abfluss um 5% in den Alpen und um ca. 3% im Flachland. Dieser Fall entspricht den mittleren durch das Klimamodell CLM für 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 berechneten Werten und stimmt damit naturgemäß mit Abbildung 4-43 überein. Für die Klimaszenarien sind also die Änderungen sehr klein. Treten allerdings größere Änderungen in der Lufttemperatur und im Niederschlag auf, könnte sich das wesentlich stärker auf den mittleren Jahresabfluss auswirken. Für den Fall einer Zunahme der Lufttemperatur um 2°C und einer gleichzeitigen Abnahme des Niederschlags um 10% ($T=+2$, $N=-10$, rechts oben in Abbildung 4-44) nimmt der Jahresabfluss in den Alpen um 20% und im Flachland um bis zu 40% ab. Für den Fall keiner Änderung der Lufttemperatur und einer Zunahme des Niederschlags um 10% ($T=0$, $N=+10$, links unten in Abbildung 4-44) nimmt der Jahresabfluss in den Alpen um 10% und im Flachland um bis zu 30% zu. Es lässt sich klar erkennen, dass der Abfluss im Flachland (Osten und Südosten Österreichs) wesentlich sensitiver auf Änderungen des Niederschlags und der Lufttemperaturen reagiert als die Alpenregion.

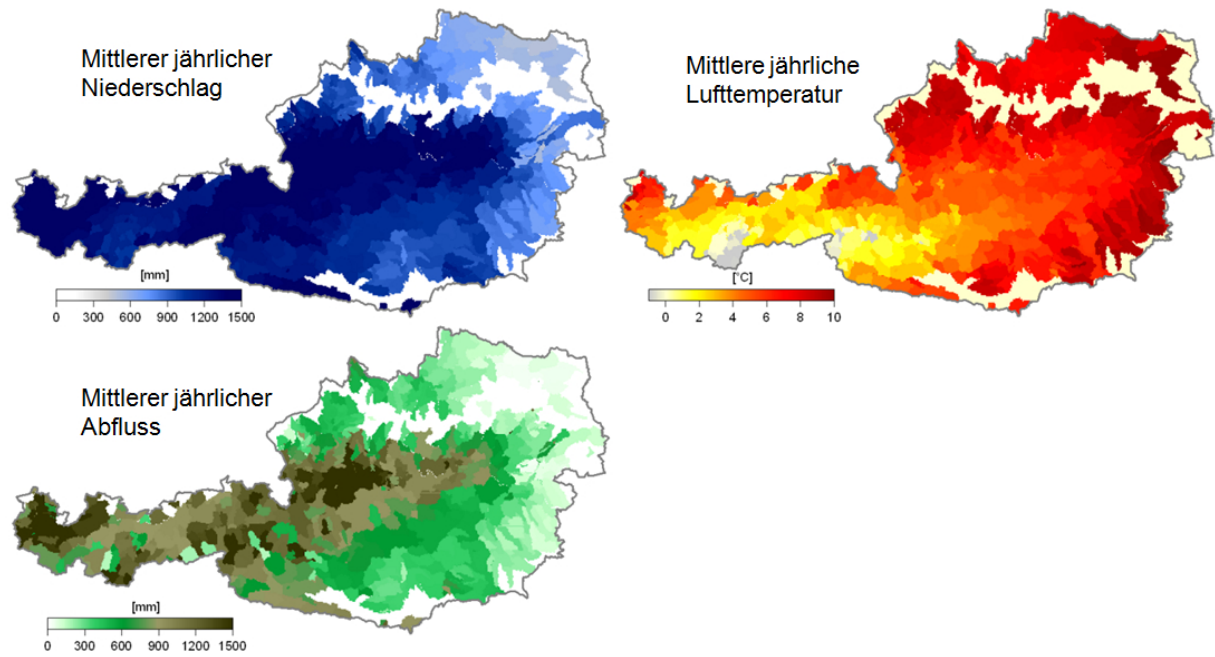


Abbildung 4-38: Mittlerer jährlicher Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur für den Zeitraum 1976-2006.

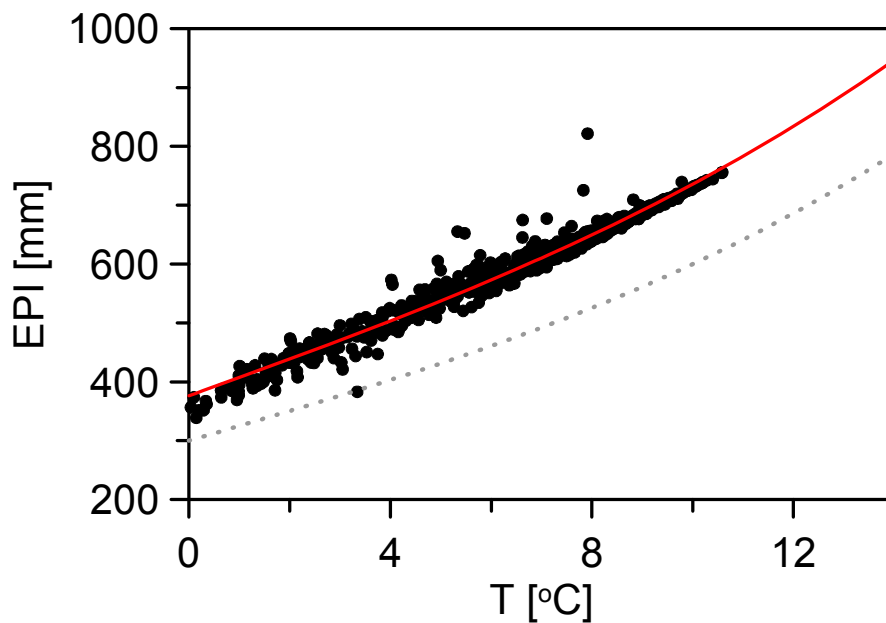


Abbildung 4-39: Beziehung zwischen Index für die langfristige jährliche potentielle Verdunstung EPI und der langfristigen mittleren jährlichen Lufttemperatur für 291 Einzugsgebiete in Österreich (Punkte). Die rote Linie ist die für Österreich angepasste Beziehung, die strichlierte Linie ist die originale Beziehung nach Turc.

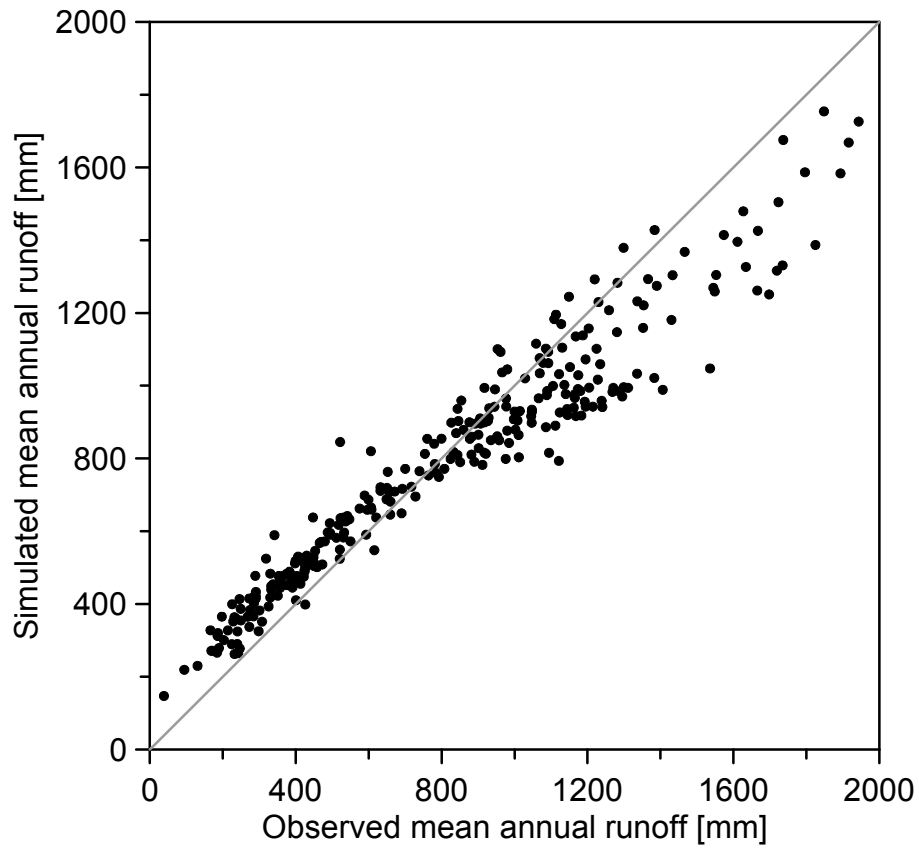


Abbildung 4-40: Vergleich der mittels des Turc Modelles berechneten mittleren jährlichen Abflüsse mit den beobachteten mittleren jährlichen Abflüssen für 291 Einzugsgebiete (jeweils Mittelwerte für den Zeitraum 1976-2006).

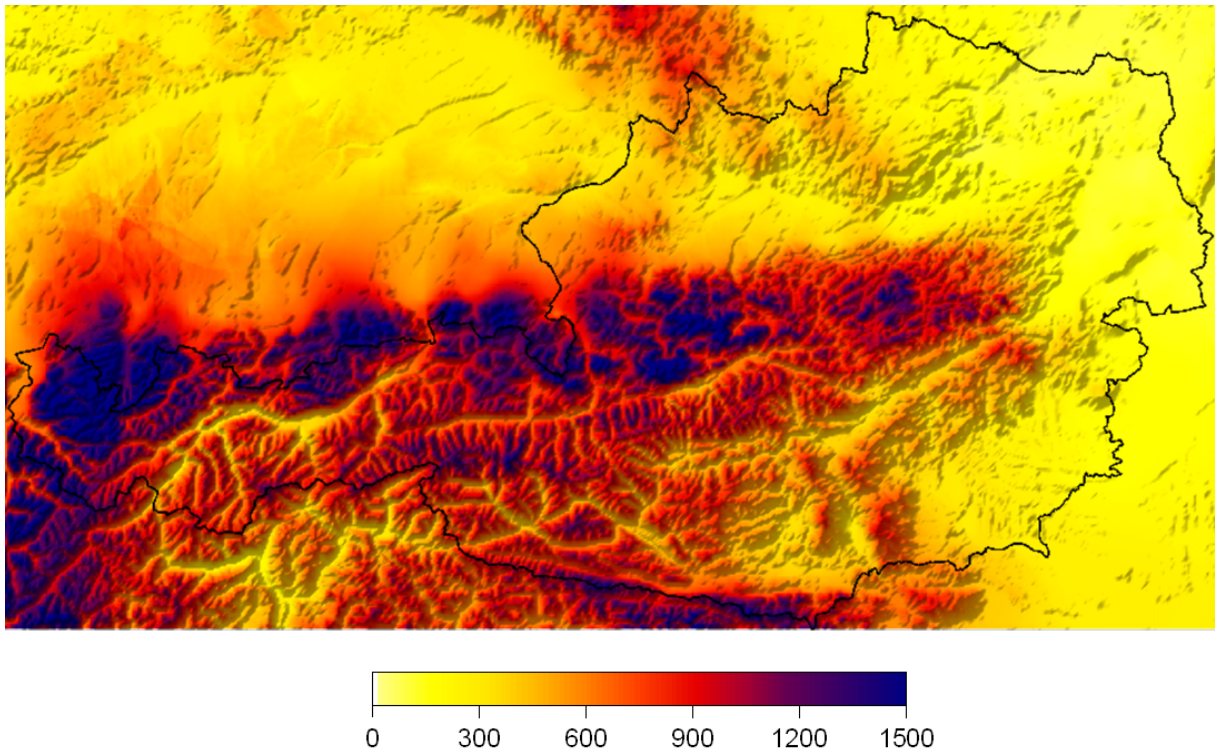


Abbildung 4-41: Mittlerer jährlicher Abfluss (mm) für den Zeitraum 1976-2006 berechnet mittels des Turc Modells.

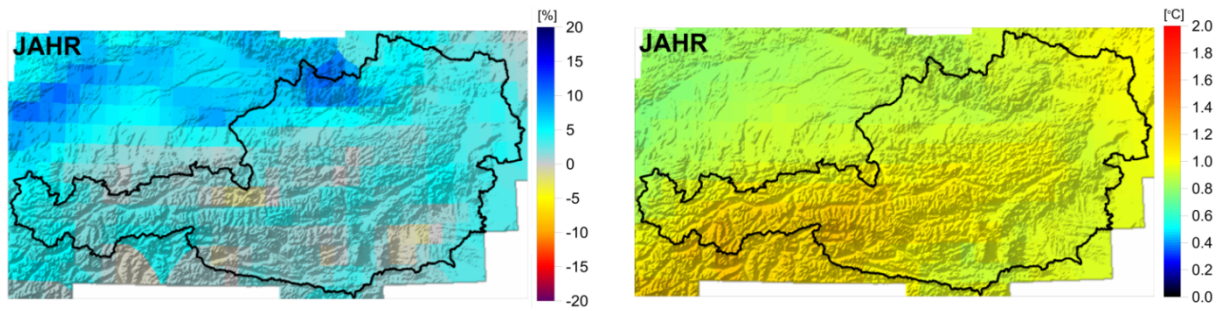


Abbildung 4-42: Änderungen des mittleren jährlichen Niederschlags und der mittleren jährlichen Lufttemperatur nach dem CLM Modell für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006. Diese Änderungen wurde als Basis für die Ergebnisse in Abbildung 4-43 verwendet.

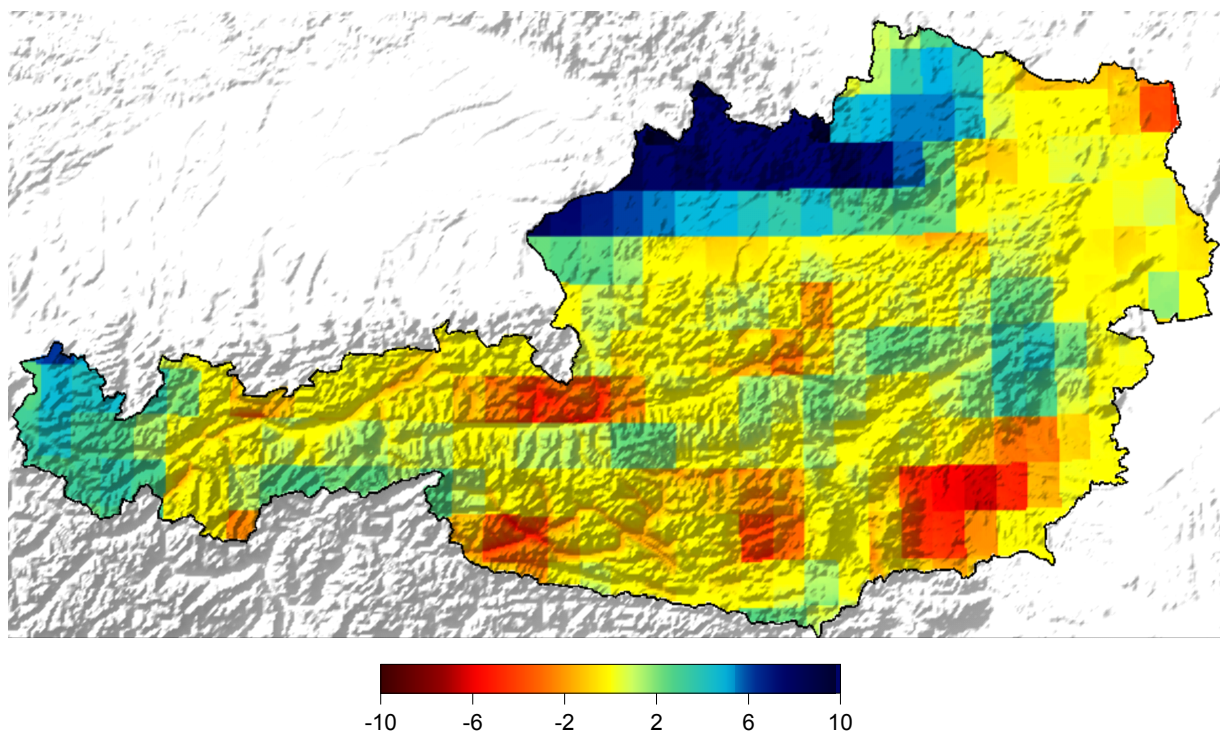


Abbildung 4-43: Änderungen (%) des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Turc Modell (Trading space for time) unter Verwendung der CLM Simulationen in Abbildung 4-42. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.

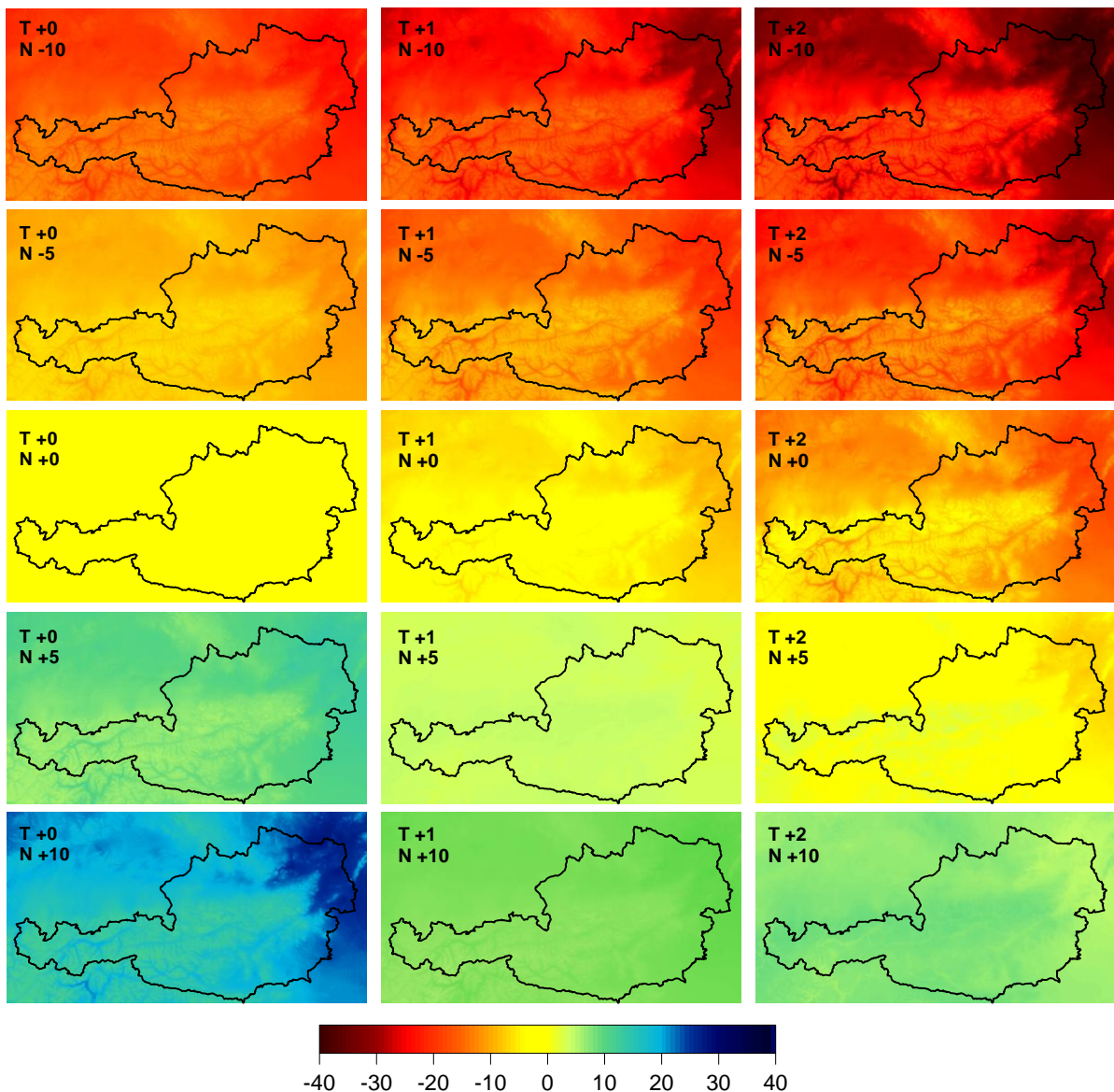


Abbildung 4-44: Sensitivität (%) des langfristigen mittleren jährlichen Abflusses auf Änderungen des mittleren jährlichen Niederschlages (N in %) und der mittleren jährlichen Lufttemperatur (T in °C) auf Basis des Turc Modells (Trading space for time).

4.8 Zusammenschau Wasserdargebot Oberflächenwasser

Fazit:

(a) Sensitivität des Jahresabflusses:

- Im Flachland (besonders der Osten und Südosten) reagiert der mittlere jährliche Abfluss sensitiver auf Änderungen des Niederschlages und der Lufttemperatur als im Alpenraum (*harte Aussage*)
- Die natürliche Variabilität der mittleren jährlichen Abflüsse zwischen den Jahren ist größer als die zufolge Klimaänderung erwarteten Änderungen (*mittelharte Aussage*)

(b) Änderungen des Jahresabflusses (Abbildung 4-45):

- Die Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 sind vermutlich kleiner als +/-5% (*mittelharte Aussage*)

- Möglicherweise Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 (<5%) im Südosten (*weiche Aussage*)
- (c) Saisonalität des Abflusses:
- Erhöhung der Winterabflüsse um ca. 20% in ganz Österreich mit Ausnahme des Südens (*mittelharte Aussage*)
- Abnahme des Frühjahrsabflusses im Osten (Flachland), Abnahme des Sommerabflusses im Westen (Alpen) um ca. 10-20% (*weiche Aussage*)
- Etwas frühere Abflussmaxima im Westen (Alpen) (Verschiebung von Mitte auf Anfang Juni). Spätere Abflussmaxima im Süden (Verschiebung vom Sommer in den Herbst); Verschiebung der Abflussminima im nördlichen Alpenvorland vom Winter in den Sommer (*weiche Aussagen*)

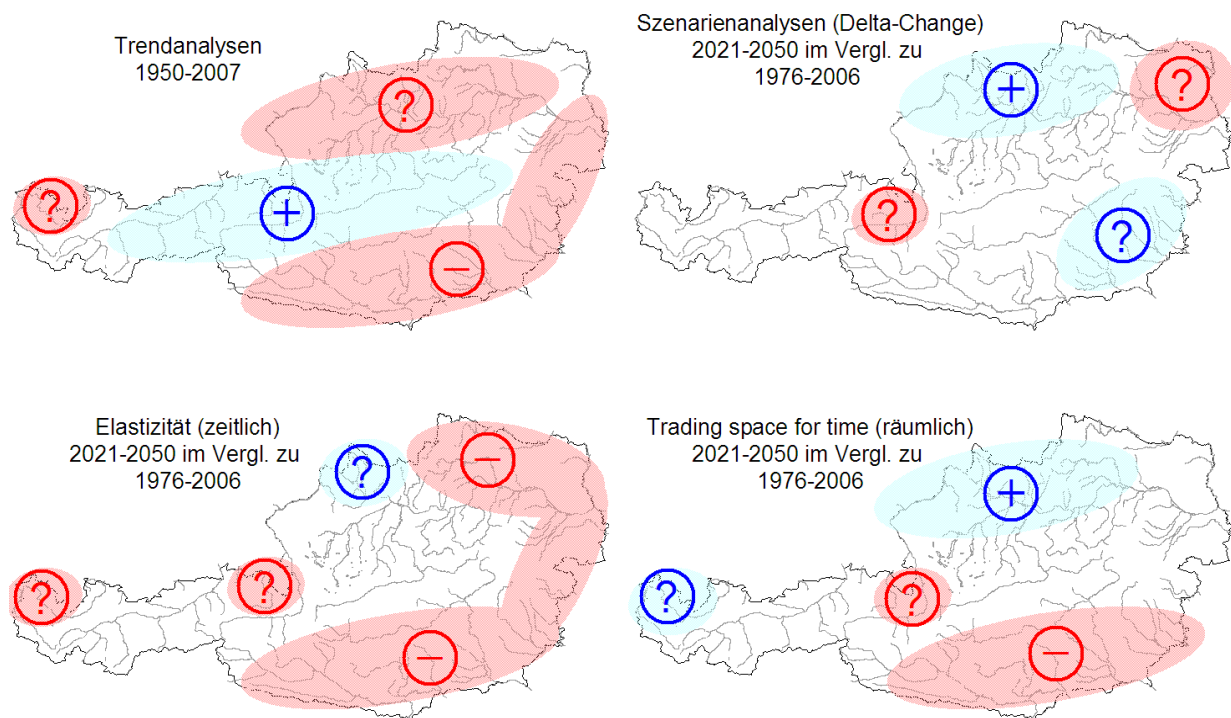


Abbildung 4-45: Zusammenschau der Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 nach den vier Methoden.

4.9 Gletscher

4.9.1 Die Rolle der Gletscher für Wasserkreislauf und Hydrologie

Gletscher sind Teil des Wasserkreislaufs und stellen eine zeitlich variable Speichergröße dar. Aus Sicht der Hydrologie und Wasserwirtschaft ist insbesondere der Abflussbeitrag der Gletscher von Interesse. Daneben ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht ihr möglicher Einfluss auf sommerliche Niederwässer, Hochwässer, Geschiebeführung und Wassertemperatur zu beachten. Die Speicherwirkung der Gletscher ist in Abbildung 4-46 schematisch dargestellt, wobei die verschiedenen Speichermedien und ihre Zeitskalen unterschieden werden. In dieser Studie wird insbesondere die Wirkung des Eis- und Firnkörpers der Gletscher beschrieben, während die Wirkung der Schneedecke auf dem Gletscher als ident zu der Schneedecke der unvergletscherten Gebiete angenommen wird und daher aus den Kapiteln in denen die Schneedecke behandelt wird (Kapitel 4.3 – 4.8) zu ersehen ist. Die Komplexität

des hydrologischen Systems „Gletscher“ wird durch Abbildung 4-47 verdeutlicht. Neben den sehr unterschiedlichen Speicherzeiten von Firn und Eis ist auch der Aufstau größerer bis sehr großer Wassermassen durch das Gletschereis von Bedeutung. Diese Wassermassen (Wassertaschen, von Eis oder Moränen gestaute Seen, Thermokarstseen) können durch plötzliche Ausbrüche (Glacier Outburst Floods kurz GLOFs) zu extremen Hochwasserereignissen führen. Da jedoch derartige Ausbrüche für Österreich derzeit nicht absehbar sind (und auch keine entsprechenden Untersuchungen über ein zukünftiges Gefahrenpotential vorhanden sind), wird auf diese Ereignisse nicht näher eingegangen. Punktuelle Ausbruchereignisse könnten in nächster Zeit durch Thermokarstseen zu erwarten sein. Es ist jedoch anzumerken dass Gletscherausbrüche aus historischer Zeit für das Ötztal dokumentiert sind und derartige Seeausbrüche ein markantes Gefahrenpotential für verschiedene Gletscher in der Schweiz, Frankreich und Italien darstellen, denen mit teuren technischen Maßnahmen begegnet wird beziehungsweise wurde.

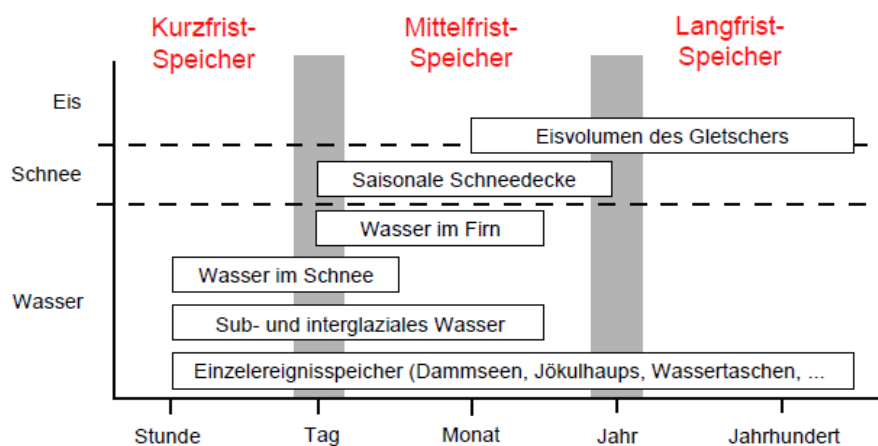


Abbildung 4-46: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Speicher von Gletschern und deren zugehörige Zeitskala (aus Koboltschnig, 2007 modifiziert nach Jansson et al., 2003)

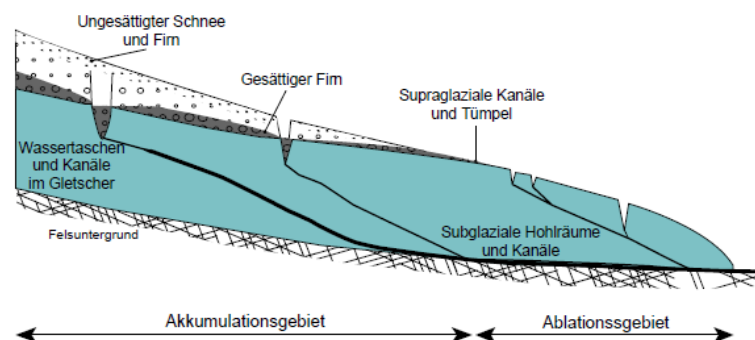


Abbildung 4-47: Das hydrologische System und die Lage von Wasserspeichern in einem temperierten Gletscher (modifiziert nach Röthlisberger & Lang, 1997)

In Österreich wird die Veränderung der Gletscher durch mehrere Meßprogramme erfasst. Diese umfassen die Messung von jährlichen Längenänderungen (durch den österreichischen Alpenverein), die Messung der jährlichen Massenbilanz an ca. 15 ausgewählten Gletschern sowie die Aufnahme der Gletschertopographie einer Vielzahl von Gletschern im Rahmen des

Gletscherinventars in unregelmäßigen Zeitintervallen (in Österreich für alle Gletscher für 1969 und ca. 1998). Aus dem letzten Inventar ca. 1998 können folgende Daten abgeleitet werden (Lambrecht und Kuhn, 2007):

Tabelle 4-6: Fläche und Volumen der Gletscher in Österreich.

Gesamtfläche	470 km ²
geschätztes Volumen	17.4 km ³
Flächenänderung 1998-1969	-17.1 %
Volumenänderung 1998-1969	-4.9 km ³
WW bezogen auf die Fläche von Österreich	ca. 58 mm
Mittlerer Abflussbeitrag pro Jahr	ca 2 mm/Jahr
Verhältnis des Abflussbeitrages zum Niederschlag	0.2% von mittl. Jahresniederschlag

Aus der Tabelle oben ist klar ersichtlich, dass die Bedeutung der Gletscher nicht in ihrer Gesamtmasse an gespeichertem Wasser oder dem mittleren Abflussbeitrag liegt, sondern ihre Speicherwirkung und der verzögerte Abflussbeitrag auf lokaler bis regionaler Skala zu klären ist.

Im Zusammenhang mit den Auswirkungen einer Klimaänderung auf das Gletscherverhalten ist die Massenbilanz der Gletscher die wichtigste Maßzahl (Kuhn, 2004), die normalerweise die Nettomassenänderung innerhalb eines hydrologischen Haushaltsjahres beschreibt. Ein Überblick über verfügbare Massenbilanzmessungen die eine längere Zeitspanne abdecken ist in Schöner et al (1998) zu finden. Abbildung 4-48 gibt einen Überblick über die zeitliche Entwicklung der Massenbilanz für verschiedene Gebirgsregionen in Österreich. Als wesentliches Ergebnis kann aus dieser Abbildung abgeleitet werden, dass die Massenbilanz der Gletscher einerseits eine hohe räumliche Korrelation aufweisen und andererseits dass einzelne Regionen eine verschieden hohe zeitliche Variabilität aufweisen (diese ist höher in den Hohen Tauern verglichen zu den Ötztaler Alpen).

Der Zusammenhang zwischen Gletscheränderung und Klima wird heute recht gut verstanden und ist durch eine Vielzahl von Untersuchungen belegt (Kuhn, 1979, Oerlemans, 2001, Weber, 2004). Aus diesen Untersuchungen ist abzuleiten dass:

- die kurzweilige Strahlungsbilanz die wesentliche Größe der Energiebilanz in der Ablationsperiode ist (Kuhn 1979)
- die Energiebilanz sehr gut durch die Lufttemperatur parametrisiert werden kann (Ohmura, 2001)
- der Abflussbeitrag der Gletscher sehr robust mit einem einfachen Gradtagsansatz modelliert werden kann (siehe z.B. Koboltschnig, 2007)
- für die Nettomassenbilanz über ein Haushaltsjahr die Schnee- und Eisschmelze im Sommer von wesentlich größerer Bedeutung ist als die Akkumulation an Schnee im Winter (Schöner et al., 1998)

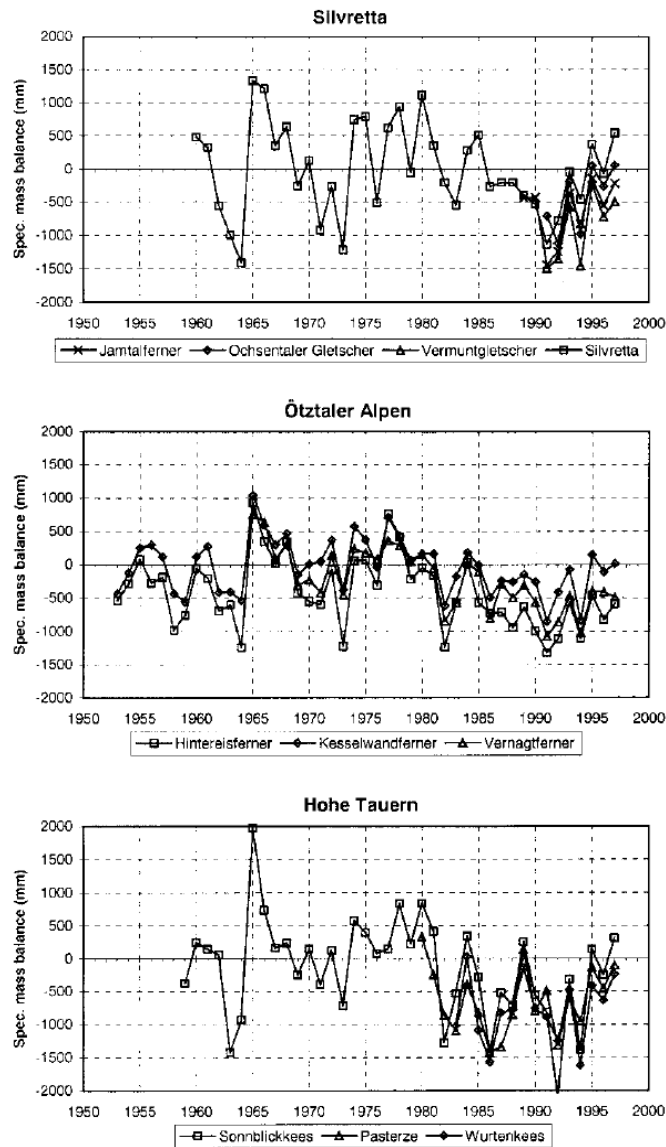


Abbildung 4-48: Zeitreihen der Massenbilanz für verschiedene Gebirgsgruppen in Österreich (aus Schöner et al., 1998)

4.9.2 Ergebnisse aus Studien über den Abflussbeitrag der Gletscher in Österreich

Umfangreichere Untersuchungen über den Beitrag der Gletscher zum Abfluss liegen aus jüngster Zeit vor. Zu den Studien die größere Regionen oder eine größere Anzahl von Gletscher behandeln und daher für diese Studie von Interesse sind gehören:

- das GLOWA-DANUBE Projekt (Weber et al., 2009)
- das SNOWTRANS Projekt (Koboltschnig et al., 2008, 2009, Koboltschnig 2007)
- das Projekt StartClim2006 (Kuhn et al., 2007 und Kuhn et al., 2009)

In ähnlicher Weise liegen auch Untersuchungen aus der Schweiz vor (Huss et al., 2008, oder Schaefli, 2005)

In den Tabelle 4-7 bis Tabelle 4-9 werden die Ergebnisse der Studien von Weber et al. (2009) und Koboltschnig (2007) und Kuhn et al. (2007) gegenübergestellt. Alle drei Untersuchungen stützen sich auf die Verwendung von hydrologischen Modellen die die Gletscherschmelze berücksichtigen. wodurch aus allen Untersuchungen der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss in Abhängigkeit vom Anteil der vergletscherten Fläche entnommen werden kann (wobei jedoch unterschiedliche Zeitperiode behandelt werden). Es ist auffällig, dass von Weber et al. (2009) die berechneten Gletscherspenden (Abflussbeitrag der Gletscher) für das Gebiet des Inntales wesentlich größer sind als die von Kuhn et al. (2007) berechneten Beiträge der Gletscher sowie die berechneten Gletscherspenden im Bereich der Salzach durch Koboltschnig (2007). Bei gleicher Vergletscherung geben Weber et al. (2009) mehr als das dreifache der Werte von Kuhn et al. (2007) und Koboltschnig (2007) an. Der Unterschied kann nur teilweise durch die unterschiedlichen Gebietsniederschläge begründet werden. Abbildung 4-49 zeigt, dass die hochalpinen Niederschlagssummen in selber Seehöhe in den Hohen Tauern doppelt so hoch sind wie in den Öztaler Alpen. Dadurch sind für das Gebiet des Ötztales bei gleicher Einzugsgebietsgröße wie in den Hohen Tauern die Abflüsse geringer. Dieser systematische Unterschied im Gebietsniederschlag kann jedoch die deutlich unterschiedlichen Abflussbeiträge der Gletscher nicht erklären.

Wie in Abbildung 4-48 gezeigt wurde ist die Massenbilanz der Gletscher der Region Öztaler Alpen sicherlich nicht negativer als in den Hohen Tauern, sondern eher umgekehrt. Ein stärkeres Schmelzen der Gletscher im Bereich des Oberen Inns ist daher ebenfalls auszuschließen. Alle drei Modellierungsstudien haben das verwendete Modell an gemessenen Massenbilanzen beziehungsweise Abflüssen validiert und kalibriert. Es kann jedoch angenommen werden dass die Ergebnisse aus Weber et al. (2009) eine Überschätzung der Gletscherspende darstellen.

Die Gletscherspende kann aus den verschiedenen Maßzahlen der Massenhaushaltmessungen für ein einzelnes Jahr am besten mit der spezifischen Ablation (meist mit b_a bezeichnet ist die Nettoablation pro Flächeneinheit in kg/m^2) verglichen werden, für einen längeren Zeitraum jedoch mit der spezifische Nettomassenbilanz. Die spezifische Ablation ist geringfügig kleiner oder höchstens gleich groß (im Falle einer totalen Ausaperung der Gletscher) wie die spezifische Nettomassenbilanz. Aus den Daten von Weber et al. (2009) in Tabelle 4-7 kann die Massenbilanz ausgerechnet werden als

$$b = \text{Eisschmelze} * \text{Einzugsgebietsgröße} / \text{Gletscherfläche} \quad (\text{mm oder } \text{kg}/\text{m}^2)$$

Es können folgende Werte für die spezifische Massenbilanz als Mittel über die Periode 1991-2000 errechnet werden (nach Konvention der Glaziologie als negative Werte):

Vent	-1443mm
Huben	-1794mm
Innsbruck	-1975mm

Vergleicht man diese Werte mit den Ergebnissen der Massenbilanzmessungen aus Abbildung 4-49 erkennt man, dass die Werte die sich aus den Daten von Weber et al. (2009) errechnen deutlich negativer sind als die Messwerte. Auch dieser Vergleich legt nahe, dass die Angaben von Weber et al. (2009) eine Überschätzung der Gletscherspende darstellen. Jedoch bedarf es weiterer detaillierter Untersuchungen um diese regionalen Unterschiede im Detail abzuklären.

Lambrecht und Mayer (2009) haben den Abflussbeitrag der Gletscher für zwei Teileinzugsgebiete des Inns aus dem Vergleich der Gletscherinventare von 1969 und 1998, jährlichen Massenbilanzdaten und einem Gradtagsansatz berechnet. Sie finden für die

Periode 1969 bis 1998 Beiträge der Gletscher zwischen 1.5 und 9% am Gesamtabfluss für Einzugsgebiete mit einer Vergletscherung zwischen 4 und 40%.

Als Schlussfolgerungen können festgehalten werden:

- der Beitrag der Gletscher zum Jahresabfluss ist unter derzeitigen Klimabedingungen auf regionaler Ebene klein
- in trockenen heißen Sommern kann die Gletscherspende hohe Werte erreichen, die dann lokal einen Großteil des Gesamtabflusses ausmacht.

Diese Schlussfolgerungen werden durch die Studien aus der Schweiz (z.B. Huss et al. (2008)) bestätigt. Collins (2008) hat für stark vergletscherte Einzugsgebiete im Gebiet der oberen Rhone in der Schweiz gezeigt, dass für eine lange Abflusszeitreihe das Maximum der Gletscherspende bereits in den 1940er bis 1950er Jahren erreicht wurde und nicht zu erwarten ist, dass diese Abflussbeiträge in Zukunft überschritten werden. Das Maximum der Gletscherspende in den 1940er bis 1950er Jahren lässt sich aus der größeren Gletscherausdehnung und dem hohen Eintrag an Globalstrahlung (siehe auch Huss et al. 2009) gut erklären.

Tabelle 4-7: Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss für das Einzugsgebiete des Inns für Teileinzugsgebiete mit verschieden starker Vergletscherung (aus Weber et al., (2009))

Einzugsgebiet	Fläche (km ²)	davon Gletscher (%)	Mittlerer hydrolog. Gebietsabfluss (mm)	Gebietsabfluss 1991-2000 modelliert (mm)	Modellierte Eisschmelze (mm)	Anteil (%) am Abfluss
Vent/Rofenache	98	35	1438	1367	505	36.9
Huben/Öztaler Ache	517	17	1220	1149	305	26.5
Innsbruck/Inn	5792	4	893	939	79	8.4
Oberaudorf/Inn	9715	3	993	1026	67	6.5
Wasserburg/Inn	11980	2.4	942	998	54	5.4
Archleiten/Donau	76660	0.5	584	639	10	1.6

Tabelle 4-8: Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss für verschiedene Einzugsgebiete in den Hohen Tauern N=Niederschlag, A=Abfluss, E=Eisschmelze (nach Daten aus Koboltschnig (2007))

Gebiet	Komponenten d. Wasserkreislaufs	Hydrologisches Jahr						Mittel
		1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	ohne 2003
Goldbergkees 52% Vergletsch.	N				2800		2991	
	A				3490		2956	
	E				970		277	
	Beitrag				0.28		0.09	0.09
Kleinfleißkees 42% Vergletsch.	N				2238		2497	
	A				2665		2356	
	E				630		184	
	Beitrag				0.24		0.08	0.08
Obersulzbach 18.2% Vergletsch.	N	1995	2097	1856	1727	1939	1897	
	A	1871	1854	1838	1853	1711	1744	
	E	189	144	285	513	111	258	
	Beitrag	0.10	0.08	0.16	0.28	0.06	0.15	0.11
Ob. Pinzgau Mittersill 5% Vergletsch.	N	1699	1764	1593	1318	1600	1593	
	A	1462	1413	1305	1112	1274	1316	
	E	16	21	44	148	19	44	
	Beitrag	0.01	0.01	0.03	0.13	0.01	0.03	0.02

Tabelle 4-9: Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss für verschiedene Einzugsgebiete in den Hohen Tauern (nach Daten aus Kuhn et al. (2007) und Kuhn et al. (2009))

Gebiet	Komponenten d. Wasserkreislaufs	Mittel 1983-2003					
		Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	MJJAS
Gepatsch 1586 mm 40% Vergletsch.	Abfluss (mm)	115	276	477	435	152	1303
	Regen (%)	25	28	27	26	39	27
	Schneesmelze (%)	75	62	58	54	47	59
	Eisschmelze (%)	0	10	15	20	14	14
Radruschl 1032 mm 1.5% Vergletsch.	Abfluss (mm)	133	263	257	149	81	802
	Regen (%)	25	33	38	66	56	39
	Schneesmelze (%)	75	67	61	32	43	60
	Eisschmelze (%)	0	0	1	2	1	1
Gebiet	Komponenten d. Wasserkreislaufs	Mittel 1983-2003					
						Jahr(mm)	Jahr (%)
Tumpen 1172 mm 15% Vergletsch.	Abfluss					1172	
	Eisschmelze					95	8
Obergugl 1543 mm 32% Vergletsch	Abfluss					1543	
	Eisschmelze					158	10
Vent-Rofenache 1718 mm 39% Vergletsch	Abfluss					1718	
	Eisschmelze					108	6

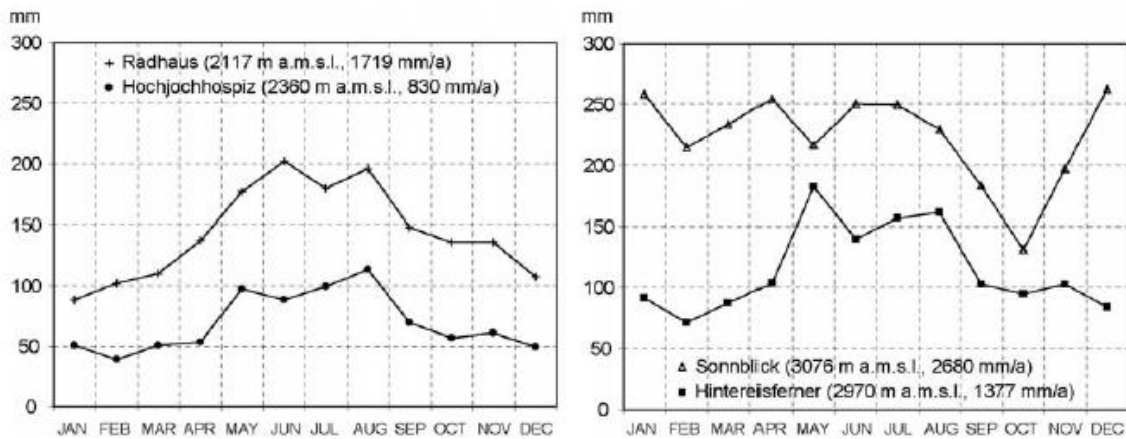


Abbildung 4-49: Vergleich langjähriger Mittel (1961-90) monatlicher Niederschlagssummen von Stationen im Gebiet des Hintereisferners (Ötztaler Alpen) und der Goldberggruppe, die sich etwa auf gleicher Seehöhe befinden (aus Kobltschnig 2007).

4.9.3 Zukünftige Entwicklung der Gletscher und Folgen für die Wasserwirtschaft

Der weitere Rückgang der Gletscher in Zukunft lässt sich auf Grund der engen Koppelung der Massenbilanz an die Sommertemperatur sehr gut abschätzen und stellt ein hartes Faktum dar (siehe z.B. Huss et al. (2008), Zemp et al. (2006)). Für einzelne Gletscher bestehen jedoch Unsicherheiten für den zu erwartenden Rückzug da Faktoren wie die Schuttbedeckung, Anpassungszeiten der Gletscher, Eisdickenverteilung, Gletscherbewegung und anderes nicht hinreichend bekannt sind.

Modellierungen der Gletscherspende unter Klimaszenarien liegen für Österreich aus den Studien von Weber et al. (2009) und Kuhn et al. (2007) vor. Für die Simulationen von Weber et al. (2009) wurden die Klimaszenarien aus dem REMO-UBA Lauf als Antriebsgrößen bis 2100 verwendet, Kuhn et al. (2007) bezogen ihre Szenarienrechnungen auf einen „Delta-Change Ansatz“ der das IPCC-A1B Szenario für Temperatur und Niederschlag beschreibt. Abbildung 4-50 und Abbildung 4-51 zeigen die Ergebnisse dieser Modellierungen für verschiedene Pegel entlang des Inns bis zur Donauemündung. Die wesentlichen Ergebnisse aus der Modellierung von Weber et al. (2009) sind:

- die Gletscherspende wird durch die Temperaturzunahme noch bis ca. 2015 zunehmen
- nach 2015 ist die Wirkung des Flächenverlusten größer als die zunehmende Schmelze durch die weiter ansteigenden Temperaturen und es kommt zu einer deutlichen Abnahme der Gletscherspende
- um ca. 2050 sind die Gletscher zum Großteil verschwunden und die Gletscherspende geht gegen Null.

Kuhn et al. (2007) kommt zu einer etwas anderen Abschätzung der Gletscherspende für die Zukunft. Für das Einzugsgebiet des Pegels Gepatsch finden sie ein Maximum der Gletscherspende um ca. 2040/2050, erst danach kommt es zu einem Abklingen der Gletscherspende. Aus den oben gezeigten Vergleich zwischen den Arbeiten von Weber et al. (2009), Kuhn et al. (2007) und Kobltschnig (2007) ist abzuleiten, dass auch die Zukunftsszenarien aus der Arbeit von Weber et al., (2009) eine Überschätzung darstellen und die Gletscher und die Gletscherspende länger wirksam sein werden.

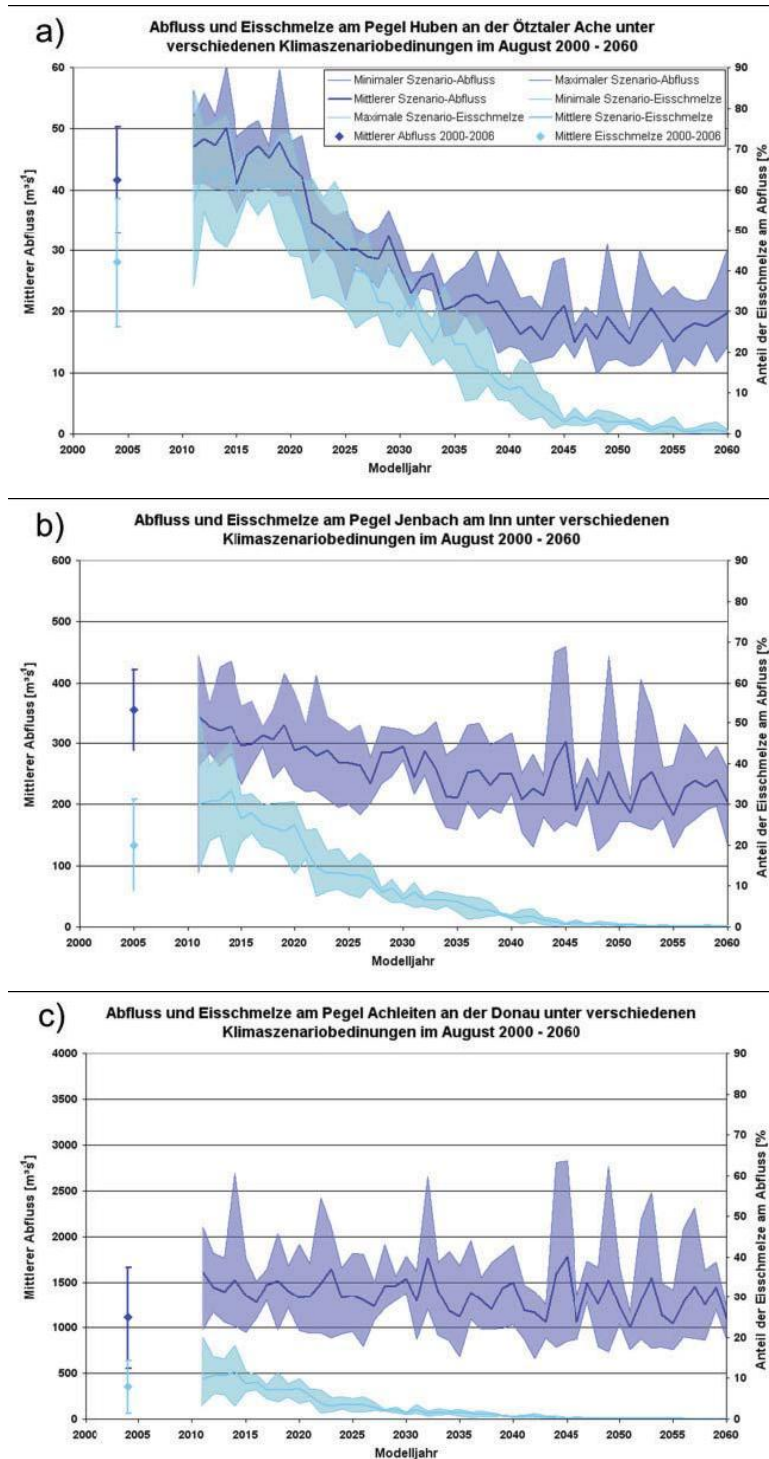


Abbildung 4-50: Zukunftsszenarien des Abflusses und des Anteils der Eisschmelze für das Flussgebiet des Inns für ausgewählte Pegel mit stark unterschiedlichem Anteil der Vergletscherung (aus Weber et al. (2009))

Gletscher sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf Niederwässer zu beachten. Allgemein ist jedoch anzumerken, dass in alpinen Gebieten (wo der Einfluss der Gletscher merkbar ist) von Winterniederwässer geprägt sind (siehe Kapitel 2). Die anzunehmende Entschärfung der Winterniederwässer durch den zukünftigen Klimawandel wurde ebenfalls im Kapitel Niederwasser gezeigt. Holzmann und Kobltschnig (2010) geben eine Zunahme der

Niederwässer für den Oberen Pinzgau (Pegel Mittersill) für die Periode August bis November unter Annahme des A1B Szenarios 2071-2100 gegenüber 1961-90 an, wobei jedoch die Häufigkeit geringer bleibt als für die Winterniederwässer der Gegenwart. Für den Betrachtungszeitraum dieser Studie (2021-2050) ist auf Grund der wesentlich geringeren Änderungen von Niederschlag und Lufttemperatur im Vergleich zu 2071-2100 anzunehmen, dass keine signifikante Veränderung der Niederwässer im Sommer auftritt, da die Gletscher bis 2050 im Falle eines heißen und trockenen Sommers noch einen deutlichen Schmelzbeitrag leisten können. Diese Wirkung kann sehr deutlich durch Vergleich mit dem Jahr 2003 für den oberen Pinzgau (Pegel Mittersill, Kobltschnig et al. (2008) gezeigt werden (Abbildung 4-52).

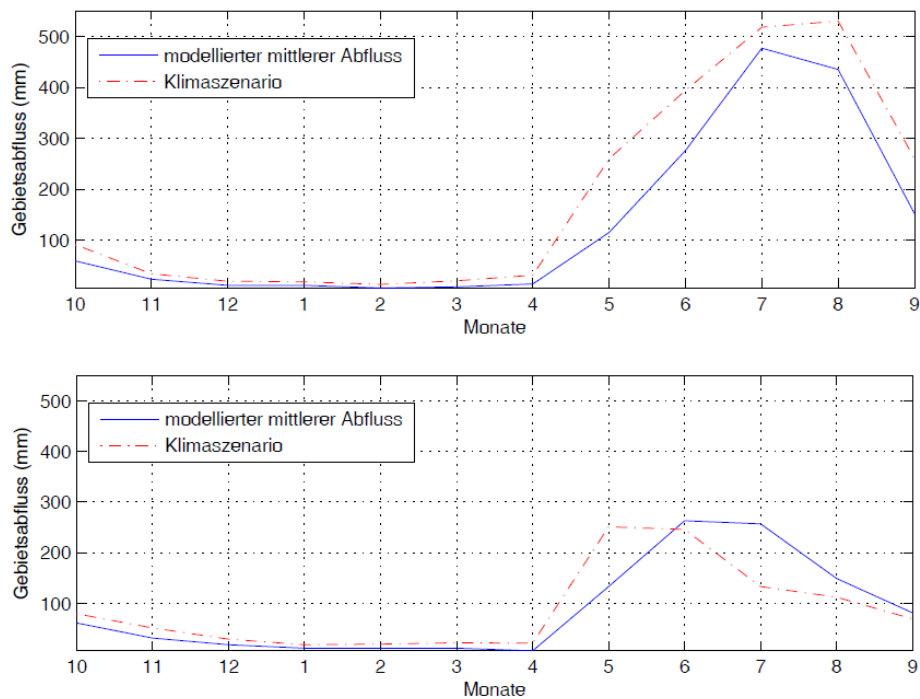


Abbildung 4-51: Zukunftsszenarien (IPCC A1B Zeitpunkt nicht angegeben) des Abflusses für 2 Teileinzugsgebiete des Flussgebietes des Inns (Pegel Gepatsch und Pegel Radurschl) mit stark unterschiedlichem Anteil der Vergletscherung (aus Kuhn et al. (2007))

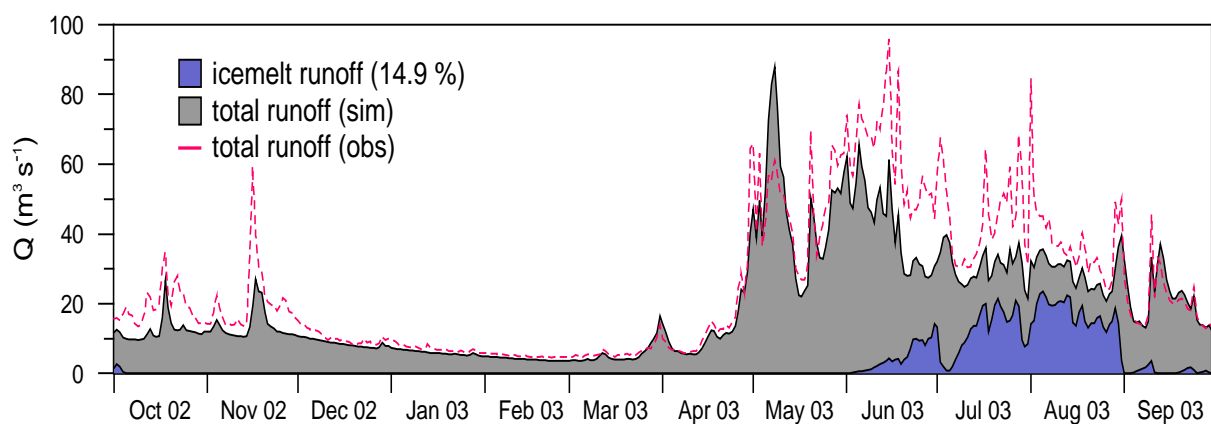


Abbildung 4-52: Modellierter und gemessener Abfluss (Gesamt und Eisschmelze) für den Pegel Mittersill im Einzugsgebiet Oberer Pinzgau für das Jahr 2003 (aus Kobltschnig et al. (2008))

Vielfach wird in der Klimafolgenforschung auch der Einfluss der Gletscher auf das Wasserkraftpotential von Speicherkraftwerken in den Alpen diskutiert. Dazu haben Schaeffli et al. (2007) für die Schweiz eine umfangreichere Studie durchgeführt. Kuhn et al. (2007) haben das im Rahmen eines StartClim-Projektes für Teileinzugsgebiete des Inns untersucht, wobei aber keine Angaben zum Wasserkraftpotential selbst gemacht werden sondern die Veränderungen des Abflussbeitrages der Gletscher diskutiert werden (siehe Beschreibung oben). Schaeffli et al. (2007) geben für die Periode 2070-2099 eine Reduktion um 35% für ein vergletschertes Einzugsgebiet in der Schweiz gegenüber heute für das jährliche Wasserkraftpotential an, wobei diese Reduktion aus der Abnahme des Niederschlags und der Eisschmelze sowie der Zunahme der Evaporation berechnet wird. Für Österreich ist bis 2021-2050 keine signifikante Veränderung des Wasserkraftpotentials durch die Abnahme der Gletscherausdehnung zu erwarten, da die Gletscher gegenüber dem Niederschlag (Schnee und Regen) meist nur eine untergeordnete Rolle spielen und die Gletscherschmelze (die insbesondere in trocken-heißen Sommern von Bedeutung ist) bis 2040/2050 eher noch zunehmen kann (Kuhn et al., 2009).

4.9.4 Einfluss der Gletscher auf Hochwässer

Mehrfach wird in der Öffentlichkeit auch die Wirkung der Gletscher auf die Hochwasserbildung diskutiert. Aus der Literatur sind dazu nur wenige Untersuchungen und Hinweise zu finden. Für Österreich gehen Braun und Weber (2006) auf dieses Thema ein und beschreiben den Einfluss der Gletscher im Einzugsgebiet des Inns für drei sommerliche Hochwasserereignisse (23. - 25. August 1987, 4. August 1998 und 21. – 23. August 2005 im Hinteren Ötztal siehe Beispiel in Abbildung 4-52). Allgemein ist festzustellen, dass die Gletscher die Hochwassersituation nicht auslösen sondern verschärfen können.

Folgende Eigenschaften der Gletscher können die Hochwassersituation verschärfen:

- eine Schneedecke auf dem Gletscher die durch weit hinauf reichenden Niederschlag in Form von Regen mobilisiert und in kurzer Zeit erodiert und geschmolzen wird und so einen wesentlichen zusätzlichen Beitrag zum Abfluss liefert.
- ein sommerliches Gewitter das bis in Gipfelregionen in Form von Regen fällt und auf einen nahezu schneefreien Gletscher fällt und dadurch sehr rasch in den Abfluss gelangt
- ein gut entwickeltes Kanalsystem im Gletscher (verursacht durch starke Schmelze)
- die starke Reduktion oder das völlige Fehlen von Firnauflagen
- niedrige Albedowerte der Gletscheroberfläche und intensivierete Schmelze

Auf Grund der Unsicherheiten der Aussagen über zukünftige Hochwässer unter Klimaszenarien (siehe Kapitel Hochwasser) und der nicht quantitativ bekannten Zusammenhänge zwischen Hochwasserbildung und den Gletschern können keine quantitativen Aussagen betreffend der zukünftigen Wirkung Gletscher auf die Hochwasserbildung gemacht werden. Es ist aber anzunehmen dass durch das Kleiner werden der Gletscherflächen die Gefahr abnehmen wird.

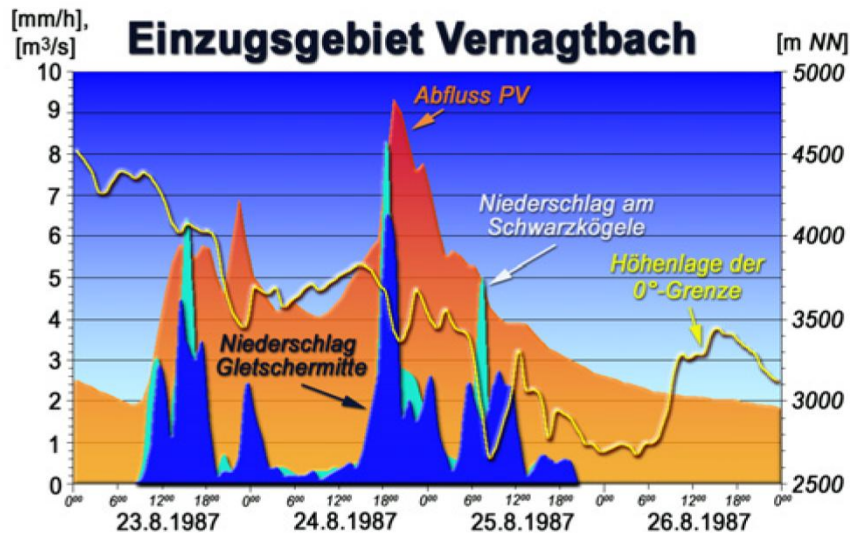


Abbildung 4-53: Stundenmittel des Abflusses und der Niederschlagsintensität an der Pegelstation Vernagtbach (2640m). Die Höhenlage der Nullgradgrenze im Einzugsgebiet wurde anhand der Temperatur- und Feuchtemessungen an den Klimastationen Vernagtbach, Schwarzkögele (3074m) und Gletschermittle (3075m) abgeleitet (aus Braun und Weber, 2006).

4.9.5 Gletscherabfluss und Geschiebeführung

Als letzter Einflussbereich der Gletscher wird noch auf die Geschiebeführung eingegangen. Die Problematik der verstärkten Geschiebeführung der hochalpinen Fließgewässer durch den starken Gletscherrückzug ist bereits gegenwärtig bekannt und wird versucht durch gezielte Maßnahmen in Griff zu bekommen (Margaritzenstausee unterhalb der Pasterze). Es gibt zwar eine Vielzahl an Studien zur Verlandungsproblematik von Stauseen aber nur wenige die versuchen den Einfluss der Gletscher auf die Sedimentfracht der Fließgewässer zu quantifizieren. Eine empirische Studie die den Einfluss der Gletscher auf die Sedimentführung der Fließgewässer berücksichtigt wurde von Boillat und Pougatsch (2000) für die Schweiz durchgeführt. Sie entwickelten eine empirische Formel für ein Erosionsmodell in der Form:

$$V_A = 566.045 \cdot 10^{-9} \cdot H_{\text{Summer}}^{0.607} \cdot SE^{-0.091} \cdot SV^{6.042} \cdot \Delta L_G^{0.154} - 267$$

wobei der jährliche Sedimentbetrag V_A ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{a}$) von folgenden Einflussgrößen bestimmt wird:

- Niederschlagssumme im Sommer (Juni bis September), H_{summer} [mm] ;
- Anteil des Einzugsgebietes der mit leicht erodierbaren Boden bedeckt ist, SE [%] ;
- Anteil des Einzugsgebietes ohne Vegetationsbedeckung, SV [%] ;
- relative Längenänderung der Gletscher im Einzugsgebiet bezogen auf die Gesamtlänge der Gletscher, LG [%].

Dieses Modell wurde an gemessenen Sedimentfrachten geeicht und ermöglicht eine recht gute Abschätzung des jährlichen Sedimentbetrages. Eine vergleichbare Studie liegt für Österreich nicht vor. Aus der Formel ist ableitbar dass bei verstärktem Gletscherrückzug der Sedimentbeitrag der Gletscherrückzugsflächen zunehmen wird. Die Formel zeigt jedoch auch, dass die Wirkung des Sommerniederschlags und der Anteil der Fläche ohne Vegetationsbedeckung von wesentlich größerem Einfluss sind. Der Gletscherrückzug findet aber wesentlich rascher statt als die Vegetationszunahme oder eine Niederschlagsänderung.

Das Modell berücksichtigt weitere Einflussfaktoren der Gletscher wie etwa Wasserwegigkeit des en- und subglazialen Abflusssystem, Gletscherbewegung, Gletscherabfluss nicht sondern parametrisiert sie (grob vereinfachend) über die Längenänderung.

Empfehlungen:

- Erheben des Potentials gefährlicher Gletscherseen in Österreich (Thermokarstseen, Gletscherstauseen) insbesondere im Hinblick auf Seeausbrüche und mögliche Hochwasserereignisse sowie Etablieren eines Monitorings.
- Fortführung und Erweiterung des Gletschermonitorings in Österreich nach hydrologischen/wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten (Abfluss, Wassertemperatur, Sedimentführung)
- Prozessstudien zum Einfluss der Gletscher auf die Sedimentfracht der proglazialen Fließgewässer

5. Niederwasser

5.1 Kurzfassung

Niederwasserauslösende Prozesse (allgemeine Grundlagen)

- Die niederwasserauslösenden Prozesse in Österreich unterscheiden sich im Wesentlichen nach der Höhenlage: Sommerniederwässer im Flachland des Ostens und Winterniederwässer in den Alpen im Westen (*harte Aussage*).
- Diese Saisonalität ist bei der Interpretation des Einflusses der Klimaänderung auf Niederwässer zu berücksichtigen (*harte Aussage*).
- Das Niederwasserjahr 2003 eignet sich aus hydrologischer Sicht sehr gut für die Beurteilung von Niederwassersituationen bei Klimaänderung im Sommer, da dies ein extremes Jahr war, wie es auch in Zukunft auftreten kann (*harte Aussage*).

Situation in der Vergangenheit

- Unter 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in etwa 10% der Einzugsgebiete in Österreich die Niederwasserabflüsse (Q_{95}) abgenommen, in den letzten 60 Jahren waren es 15%. Dem gegenüber haben nur in 5 bzw. 6% der Gebiete die Niederwasserabflüsse zugenommen. Eine Abnahme ist insbesondere im Süden und Südosten Österreichs festzustellen, sowie im Innviertel und zum Teil in Vorarlberg. (*mittelharte Aussage*).
- Über 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in etwa 14% der Einzugsgebiete in Österreich die Niederwasserabflüsse zugenommen, in den letzten 60 Jahren waren es 35%. Dem gegenüber haben nur in 3 bzw. 9% der Gebiete die Niederwasserabflüsse abgenommen. Eine Zunahme ist insbesondere in den Zentralalpen festzustellen (*harte Aussage*). Dies gilt auch für Gebiete ohne maßgebenden Einfluss von wasserwirtschaftlichen Speichern.
- Generell nahmen die Niederwasserabflüsse eher im Sommer ab und stiegen im Herbst (*mittelharte Aussage*).
- Die räumlichen Muster der Niederwassertrends sind mit denen der Mittelwassertrends korreliert (*mittelharte Aussage*).

Situation in der Zukunft

- In den Alpen Österreichs (hochgelegene Gebiete, Winterniederwasserregime) zeigen die Szenarienrechnungen eine deutliche Zunahme der Niederwasserabflüsse für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006. Die Zunahme beträgt etwa 10-25% (*harte Aussage*).
- In den niedrigen Gebieten Österreichs sowie im Alpenvorland geben die Szenarienrechnungen differenzierte Ergebnisse. In manchen Einzugsgebieten wird eine leichte Zunahme berechnet (z.B. Mühlviertel). In anderen Gebieten wird eine Abnahme der Niederwasserabflüsse von etwa 10-15% berechnet (z.B. Weinviertel, Nördliches Burgenland, Teile der Südsteiermark, Teile des niederösterreichischen Alpenvorlands). In Ausnahmefällen ist die Abnahme auch etwas größer. (*mittelharte Aussage*).
- Die Abnahme der Niederwasserabflüsse im Osten betrifft alle Jahreszeiten (*mittelharte Aussage*), die Zunahme im Westen hingegen den Winter und das Frühjahr (*harte Aussage*).

Anpassungsmaßnahmen

- Die Befunde aus der Literatur sowie die für Österreich ausgewerteten Trendanalysen und Szenarienrechnungen zeigen, dass eine Zunahme der Niederwasserabflüsse in den Regionen zu erwarten ist, die durch ein Winterniederwasserregime geprägt sind (*harte Aussage*). Das sind vor allem die alpinen Gebiete. Aus wasserwirtschaftlicher Perspektive sind hier eher positive Effekte zu erwarten (z.B. Wasserkraft) und deswegen erscheinen keine Anpassungsmaßnahmen notwendig.
- In den restlichen Regionen (niedrigere Gebiete, Sommerniederwasserregime) deuten die Trendanalysen und die Szenarienrechnungen darauf hin, dass eine Abnahme der Niederwasserabflüsse zu erwarten ist (*mittelharte Aussage*). Diese Abnahme kann sich von Gebiet zu Gebiet unterscheiden und könnte in der Größenordnung von 10-15% liegen, in einzelnen Gebieten auch bis zu 25% (*weiche Aussage*). Da die natürliche Variabilität des Abflusses zwischen den Jahren größer als die zufolge Klimaänderung für 2021-2050 zu erwarteten Änderungen ist, erscheinen aus österreichweiter Sicht nicht grundsätzlich andere Bewirtschaftungsmaßnahmen der Oberflächenwasser notwendig. Eine Möglichkeit wäre, bereits geplante Maßnahmen betreffend Niederwasser in diesen Gebieten höhere Priorität zu geben und zeitlich vorzuziehen.
- Eine Orientierung über die wasserwirtschaftlichen Konsequenzen der Niederwassersituationen bei Klimaänderung im Sommer kann das Niederwasserjahr 2003 geben.
- In den Regionen Österreichs mit Sommerniederwasserregime soll bei neuen Bewilligungsverfahren auf das möglicherweise geringere Wasserdargebot Rücksicht genommen werden, und eventuell bestehende Bewilligungen angepasst werden.
- Geringere Abflüsse in Kombination mit höheren Wassertemperaturen können zu Wasserqualitätsproblemen bei Uferfiltrat und bei Oberflächengewässern führen. Hier sind im Einzelfall möglicherweise Aufbereitung des Uferfiltrats bzw. alternative Maßnahmen notwendig.
- Allenfalls sollen wasserwirtschaftliche Maßnahmen gesetzt werden, wie z.B. Speicherbewirtschaftung zur Aufhöhung der Niederwassersituation und die Einrichtung von Niederwasserprognosen (Frühwarnung).

5.2 Vorgangsweise

Methodisch erfolgt die Beurteilung von Klimaauswirkungen auf Niederwässer auf Basis von drei Arten existierender Untersuchungen in Österreich.

Die erste Art der Untersuchung sind Trendanalysen beobachteter Daten. Die bestehenden Trenduntersuchungen werden beurteilt in Hinblick auf die Signifikanz von Trends und deren regionale Unterschiede. Trendanalysen hydrologisch-wasserwirtschaftlicher Kenngrößen werden dann argumentativ in Beziehung gesetzt mit Trends meteorologischer Größen wie Niederschlag und Lufttemperatur. Daraus lassen sich Schlüsse ziehen über weiche bis harte Fakten von Auswirkungen des Klimawandels aus wasserwirtschaftlicher Perspektive.

Die zweite Art der Beurteilung von Klimaauswirkungen beruht auf Szenarienrechnungen. Es existieren zahlreiche Studien, bei denen die Ergebnisse von Klimamodellen mit hydrologischen Modellen gekoppelt werden, um dadurch die möglichen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft zu erschließen. Der Vorteil solcher Untersuchungen besteht darin, die Effekte einzelner Komponenten des Systems analysieren zu können, allerdings sind die Ergebnisse nur so zuverlässig, wie es die verwendeten Modelle und Eingangsgrößen erlauben.

Bei der dritten Art von existierenden Einschätzungen werden keine Berechnungen durchgeführt, sondern Schlüsse auf Basis allgemeiner Überlegungen gezogen. Dabei

werden die wichtigsten Prozesse sehr vereinfacht gedanklich abgebildet. Der Vorteil dieser Vorgangsweise besteht darin, nachvollziehbare Zusammenhänge aufzuzeigen, die für die Entscheidungsfindung sehr wichtig sind, allerdings ist die Quantifizierung der Größenordnung von Einflüssen nicht leicht.

Die Sichtung der Literatur erfolgt hier auf Basis dieser methodischen Zugänge. Besonderes Augenmerk wird darauf gerichtet, dass etwaige Änderungen hydrologisch interpretierbar sind. Dies ist essentiell, um zu vermeiden, dass sich Änderungen rechnermäßig auf Grund von Artefakten in den Daten, der Datenanalyse oder Modellrechnungen ergeben. Das Verstehen der Wirkungsmechanismen, die Plausibilität und hydrologische Nachvollziehbarkeit stehen deshalb im Vordergrund. Damit lassen sich Aussagen zuverlässiger ableiten, als es die reine Übernahme von Modellergebnissen als "Black-box" erlaubt.

5.3 Prozesse der Niederwasserentstehung in Österreich auf regionaler Ebene

5.3.1 Saisonalität

Fazit:

- Die niederwasserauslösenden Prozesse in Österreich unterscheiden sich im Wesentlichen nach der Höhenlage: Sommerniederwässer im Flachland des Ostens und Winterniederwässer in den Alpen im Westen.
- Diese Saisonalität ist zentral für den Einfluss der Klimaänderung auf Niederwässer.

Niederwasserabflüsse sind primär von der Gebietsgröße abhängig und eignen sich wenig für regionale Betrachtungen. Normierte Niederwasserabflüsse Q_{95}/MQ lassen hingegen ein klares Muster aus trockenen Regionen mit relativ strengen Niederwasserereignissen und feuchteren Regionen mit moderaten Niederwasserereignissen erkennen. Trockene Regionen umfassen hochalpine Gebiete in Vorarlberg, Tirol, Osttirol und Salzburg, sowie Nördliche Kalkalpen, Flyschzone und Böhmisches Masse. Der starke Rückgang der Abflüsse in Trockenperioden steht mit der Einzugsgebietsgröße sowie mit den Speichereigenschaften des Untergrundes im Zusammenhang. Relativ hohe Niederwasserabflüsse treten in Gebieten mit geringerer bis mittlerer Höhenlage (oberösterreichische Molassezone, Unterkärnten, Niedere Tauern, Ostrand der Alpen) sowie in großen Flusstälern (Inn, Enns, Salzach, Drau, Mur) auf. Neben der Niederschlagsneigung in Trockenperioden erscheinen die guten Speichereigenschaften der Aquifere als Ursachen für den moderateren Rückgang der Abflüsse.

Die räumlichen Muster des Saisonalitätsindex lassen einen signifikanten Einfluss der Höhenlage des Einzugsgebiets auf die Saisonalität von Niederwasserabflüssen erkennen. Österreichische Einzugsgebiete zeigen eine deutliche Gliederung in zwei Zonen mit vorherrschender Sommer- bzw. Wintersaisonalität und eine Region mit gemischter Saisonalität. Unter Einbeziehung weiterer Saisonalitätsindizes (Laaha und Blöschl, 2003) ist eine feinere Untergliederung in Regionen mit ähnlichem Saisonalitätstyp möglich.

Wintersaisonalität: Die Zone mit ausgeprägter Wintersaisonalität umfasst den alpinen Bereich von Vorarlberg bis zum Wechselgebiet mit einer Nord-Süd Erstreckung von den nördlichen Kalkalpen bis Oberkärnten. Die Intensität der Saisonalität und der mittlere Auftrittszeitpunkt variieren mit der Höhenlage der Einzugsgebiete, wobei hochalpine Gebiete die stärkste Saisonalität aufweisen. Niederwässer treten generell in den Monaten Dezember bis April auf. Der mittlere Auftrittszeitpunkt liegt in den Nördlichen Kalkalpen im Jänner (Typ A), in den Zentralalpen und Karawanken generell im Februar (Typ B), in vergletscherten Einzugsgebieten der Ötztaler Alpen und der Hohen Tauern in der ersten Märzhälfte (Typ C). Geringere Intensitäten und einen früheren mittleren Auftrittszeitpunkt zeigen die östlichen

Ausläufer der Alpen (Typ D) sowie der Bregenzerwald (Typ E). Hier fallen Einzugsgebiete häufig auch im Spätsommer und Herbst trocken, wenngleich Winterniederwässer vorherrschen.

Sommersaisonalität: Einzugsgebiete der Zone nördlich und östlich der Alpen sind primär durch den Sommerniederwasserprozess geprägt. Die mittlere Seehöhe des Einzugsgebietes, niederschlagswirksame Staueffekte der Alpen und das gegen Osten zunehmend kontinentale Klima bestimmen die jahreszeitliche Verteilung der Niederwasserereignisse. Innerhalb dieser Zone können vier Regionen mit annähernd homogener Saisonalität unterschieden werden:

(Typ 1): Einzugsgebiete im Nordosten und Osten Österreichs zeigen eine stark ausgeprägte Sommersaisonalität. Niederwässer treten generell zwischen Juli und Oktober auf (mittlerer Auftrittszeitpunkt im August), nur vereinzelt sind Herbst- oder Winterniederwässer zu beobachten. Eine Ursache für die ausgeprägte Sommersaisonalität dieser Region liegt im kontinentalen, teilweise pannonisch geprägten Klima mit ausgeprägt trockenen und heißen Sommern und eher kurzen, durch regelmäßige Tauwetter unterbrochenen, winterlichen Frostperioden.

(Typ 2): Einzugsgebiete der Böhmisches Masse weisen eine zeitlich verzögerte Saisonalität auf. Niederwässer treten zumeist zwischen August und November auf, der mittlere Auftrittszeitpunkt liegt im September. Winterniederwässer sind generell zwar von untergeordneter Bedeutung, können lokal aber als durchaus wiederkehrend bezeichnet werden.

(Typ 3): Das von Donau, Inn und Ager begrenzte Innviertel zeigt eine deutlich breitere saisonale Verteilung als die zuvor beschriebenen Regionen. Niederwässer treten hier zwischen Mai und Dezember, vereinzelt auch im Winter und Frühjahr auf, wobei der mittlere Auftrittszeitpunkt im Zeitraum von Ende August bis Anfang September liegt. Als mögliche Ursachen für die abgeschwächte Saisonalität können sowohl die aufgrund der Nordstaulage erhöhte Niederschlagsneigung in den Sommermonaten, welche die Abschwächung meteorologischer Dürreereignisse bewirkt, sowie schlechte Speichereigenschaften der tertiären Aquifere, die mit einem raschen Trockenfallen der Einzugsgebiete zusammenhängen könnten, genannt werden.

(Typ 4): Die Flyschzone zwischen Salzburg und Wien bildet den Übergang von Sommer- zu Wintersaisonalität. Zwar treten Niederwässer primär zwischen August und November auf, vielerorts sind aber auch Winterniederwässer zu beobachten. Die Saisonalität variiert lokal stärker als in den übrigen Teilregionen, der mittlere Auftrittszeitpunkt liegt in Gebieten ohne Winterbeeinflussung im September, bei Winterbeeinflussung im Oktober. Die Ursache dieser lokalen Unterschiede dürfte in der hohen Variabilität physiografischer Einzugsgebietseigenschaften, wie geologischer Aufbau, Relief und Klima, an dieser Übergangszone zwischen Flachland und Alpen liegen.

Gemischte Saisonalität: Unterkärnten mit Ausnahme der Karawanken bildet eine sehr heterogene Region mit schwacher Saisonalität. Niederwässer treten hier während des ganzen Jahres auf, wobei die jahreszeitliche Verteilung ein Maximum im August und ein Minimum in den Monaten März und April aufweist. Die schwache Saisonalität scheint durch das besondere regionale Klima (inneralpine Beckenlage mit seltenen, heftigen, aber saisonal wenig ausgeprägten Niederschlägen aus Genuatiefs) begründet zu sein.

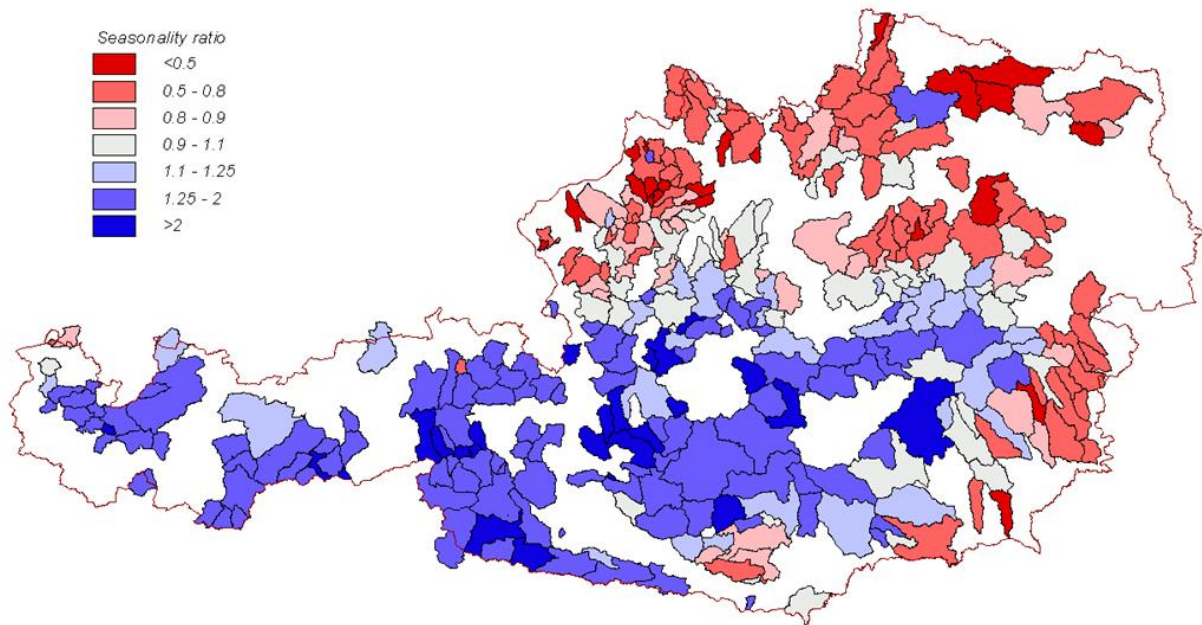


Abbildung 5-1: Saisonalitätsverhältnis $Q_{95\text{som}}/Q_{95\text{win}}$ (325 Zwischen-EG, 1977-1996). Rot zeigt Sommerniederwässer, blau zeigt Winterniederwässer. Aus: Laaha and Blöschl (2006)

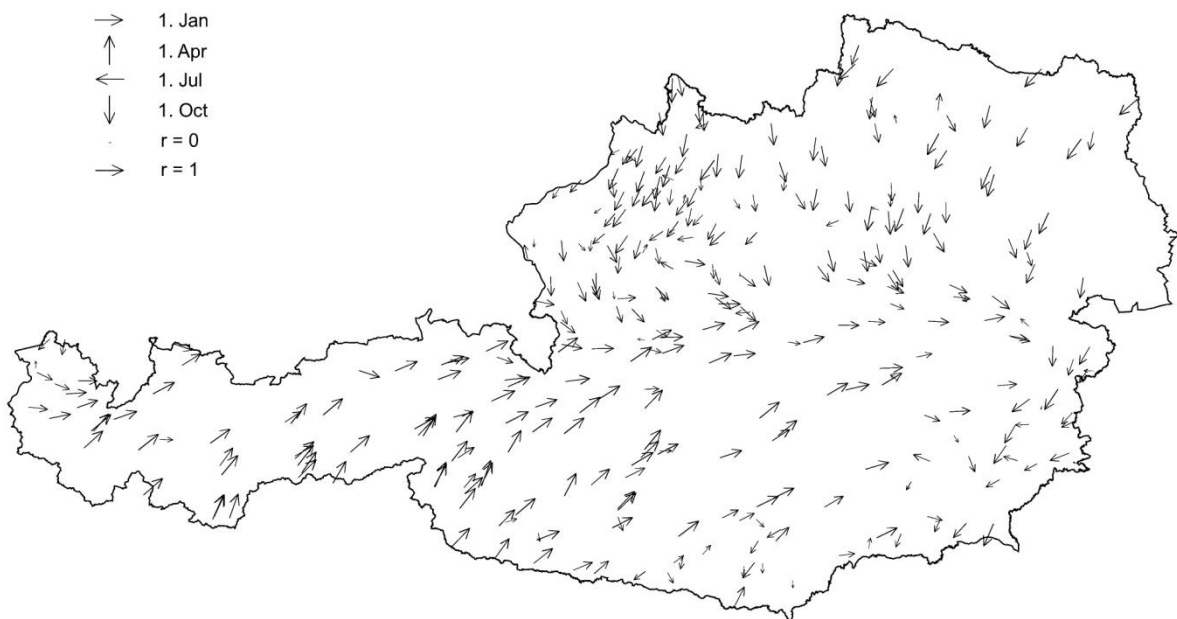


Abbildung 5-2: Saisonalität der Niederwässer. Die Richtung der Pfeile gibt das mittlere Auftretensdatum an (z.B. nach links für Juli, nach rechts für Jänner). Die Länge der Pfeile gibt die Intensität der Saisonalität an. Saisonalitätsindex (325 Zwischen-EG, 1977-1996) Aus: Laaha and Blöschl (2006)

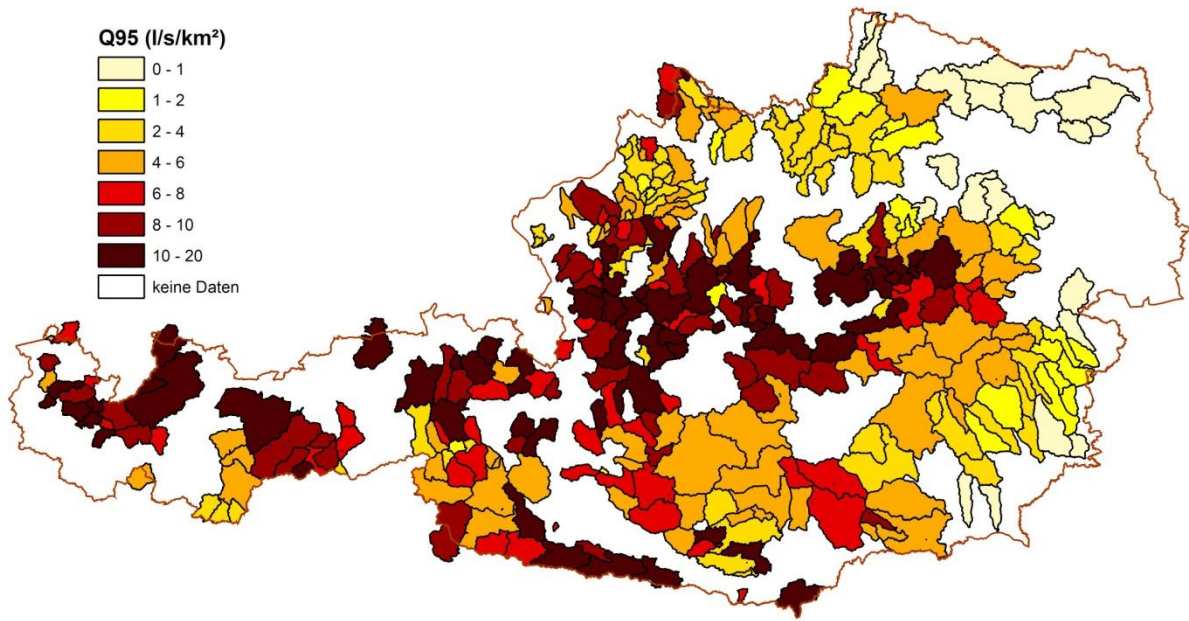
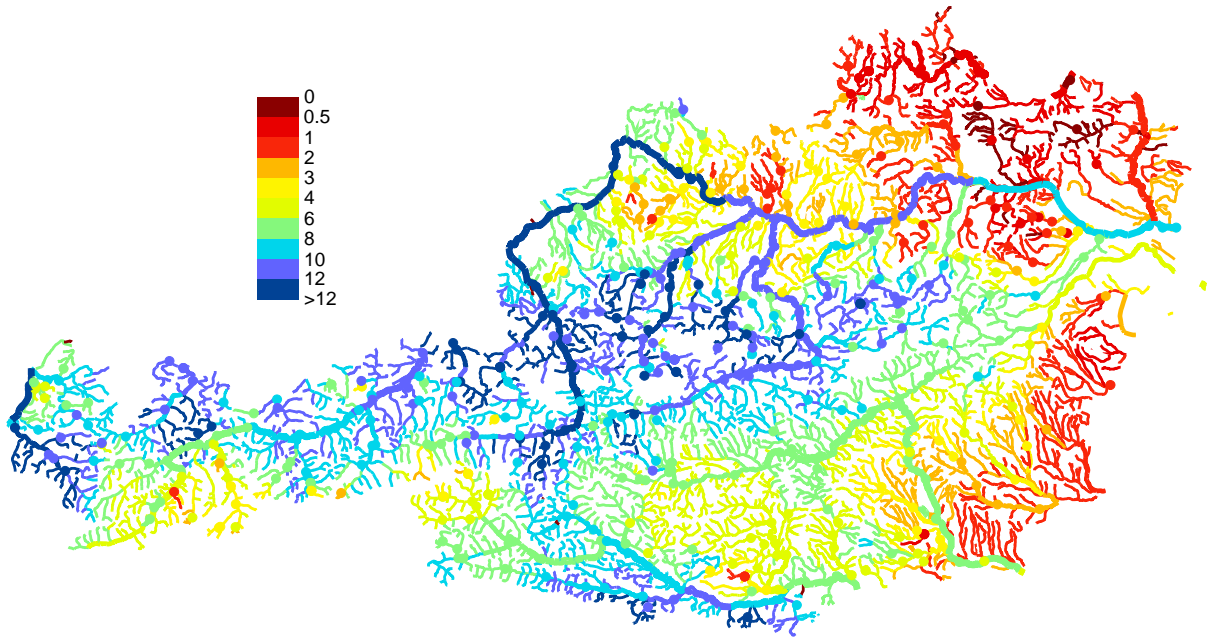
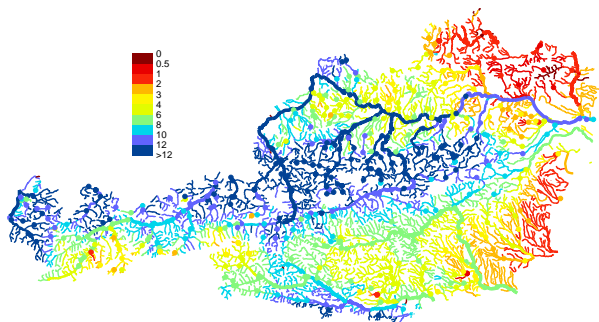


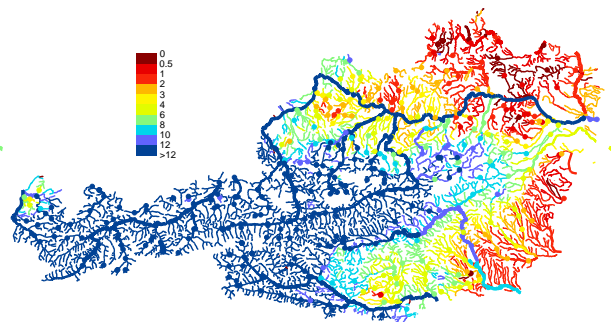
Abbildung 5-3: Mittlere Niederwasserspense Q_{95} (325 Zwischen-EG, 1977-1996). Aus: Laaha and Blöschl (2006)



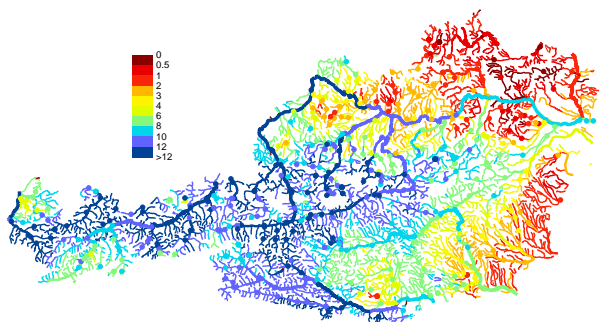
Q₉₅ 1976-2006 – Jahr



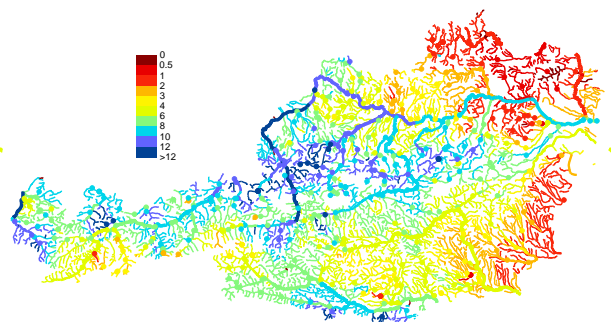
Q₉₅ 1976-2006 – Frühjahr (MAM)



Q₉₅ 1976-2006 – Sommer (JJA)



Q₉₅ 1976-2006 – Herbst (SON)



Q₉₅ 1976-2006 – Winter (DJF)

Abbildung 5-4: Räumliche Verteilung der Q₉₅ Niederwasserdurchflüsse in l/s/km² für den Zeitraum 1976-2006 sowie Vierteljahresniederwässer.

Beeinflussungen

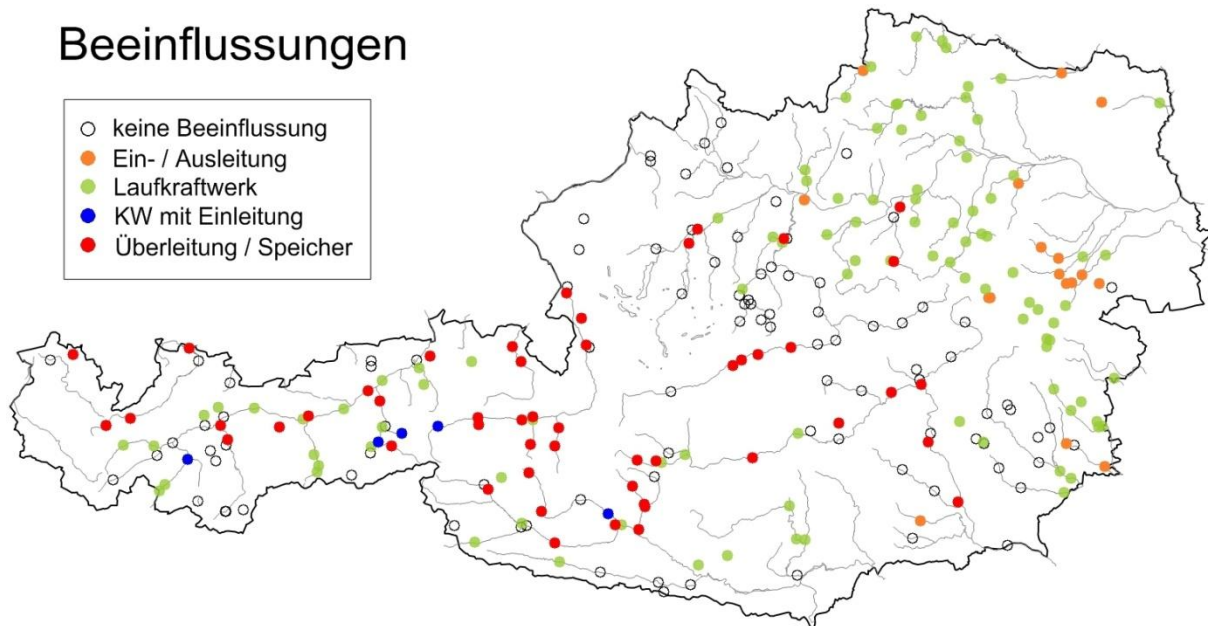


Abbildung 5-5: Beeinflussungen der Abflussmessstellen. Datengrundlage: Stationsdaten und Pegelfußnoten des Hydrografischen Jahrbuchs.

5.3.2 Niederwasser des Jahres 2003

Die kleinste mittlere Tagesabflusspende im Jahr 2003, $NQt(2003)$ ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Um eine Einschätzung des Ausmaßes dieses Niederwasserereignisses zu erhalten, wurde in Abbildung 5-7 das Verhältnis des Niederwasserdurchflusses 2003 und dem Q_{95} gebildet. Dieses Verhältnis ist ein Indikator für die Niederwassersituation im extremen Niederwasserjahr 2003 im Vergleich zu einem durchschnittlichen Jahr. Der Q_{95} Wert ist in Österreich nämlich sehr ähnlich dem mittleren Jahresniederwasser. Kleine Werte der Verhältniszahl weisen die Gebiete aus, in denen die Niederwassersituation im Jahr 2003 besonders extrem war, Werte größer eins weisen hingegen auf überdurchschnittlich feuchte Verhältnisse im Jahr 2003 hin. (Abbildung 5-7)

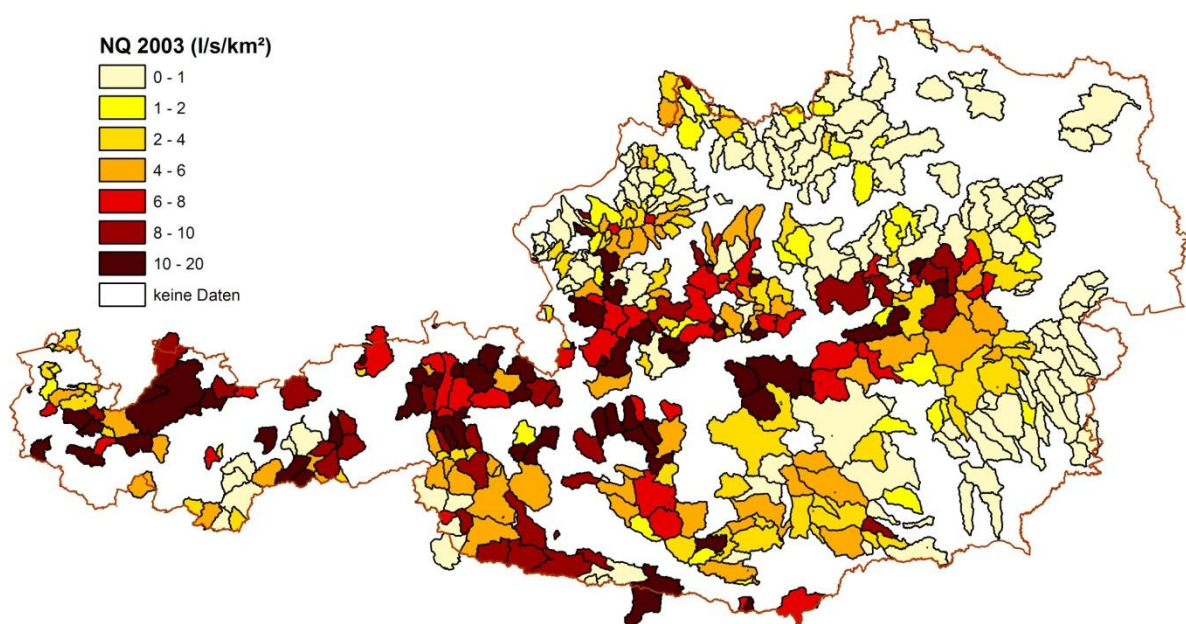


Abbildung 5-6: Niederwasserdurchfluss des Jahres 2003 (NQ_t). Aus (Laaha und Blöschl, 2007c).

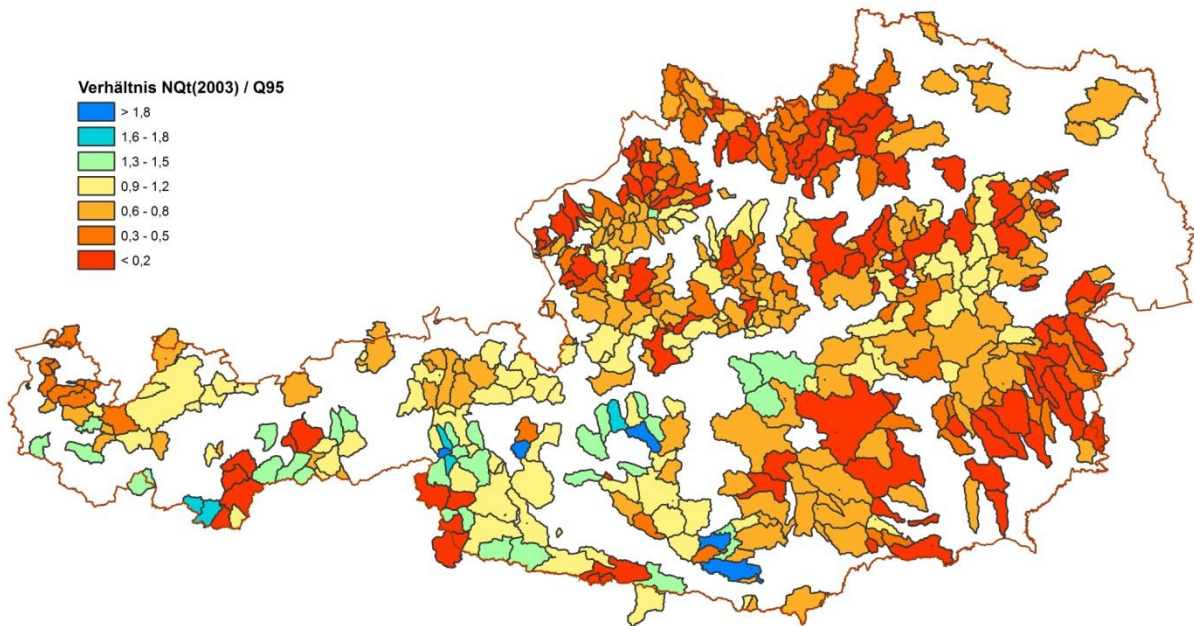


Abbildung 5-7: Niederwasserdurchfluss des Jahres 2003 (NQ_t) in Bezug zu Q_{95} (325 Zwischen-EG, 1977-1996). Aus Laaha und Blöschl (2007c)

5.4 Situation in der Vergangenheit

5.4.1 Ergebnisse von Trenduntersuchungen in der Literatur

Tabelle 5-1: Ergebnisse von Trenduntersuchungen in der Literatur

Geografische und zeitliche Abgrenzung; Veröffentlichung	Aussagen
Europa 1962-1990 Hisdal et al. (2001)	Methode: Mann-Kendall und Resampling Test von Unterschreitungsdauer und Defizitvolumen. Aussagen: In den meisten Stationen treten keine signifikanten Trends auf, es wurden jedoch regionale Trends beobachtet. In Spanien, Osteuropa und Großbritannien Zunahme der Defizitvolumina (trockener), in Mitteleuropa hingegen Abnahme der Defizitvolumina (feuchter).
Deutschland / große Ströme 1944-2003 Belz (2005)	Methode: Parametrischer und Mann-Kendall Trendtest von Niederwasserabflüssen NMQ_7 und NMQ_{21} am Rhein und an acht Pegeln der Hauptströme in Deutschland. Aussagen: Ohne Ausnahme ist über den Untersuchungszeitraum Anstiegstendenz für extreme Niedrigwasserabflüsse nachweisbar, vielfach ist diese auch statistisch als signifikanter Trend abzusichern. D.h.: im Verlauf des 20. Jh. haben sich die extremen Niedrigwassersituationen nicht nur im Rheingebiet, sondern deutschlandweit abgemildert.
Deutschland 1961–2002 Koehler (2008)	Methode: Klassische parametrische Trendanalyse der NMQ_7 Niederwasserabflüsse von 159 Pegeln (große Ströme ausgeklammert). Periode 1961–2002 unter Einbeziehung längerer Reihen bis 1901. Aussagen: Man erkennt eine Süd-Nord Gliederung mit großen positiven Trends im Süden (+0,66% pro Jahr) und ähnlich großen negativen Trends im Nordosten (-0,59% pro Jahr). Ein klarer Zusammenhang zwischen den Trendänderungen bei NMQ_7 und den MQ-Reihen besteht nicht. Auch sind Zusammenhänge zwischen Trendänderungen der Abflüsse und denen von Niederschlägen hinsichtlich regionaler Muster kaum erkennbar.
Deutschland / Rhein 1900-2000 KLIWAS (2009)	Methode: Mann-Kendall-Signifikanztest parallel mit Abflussregimeanalyse, der Analyse übergreifender und dekadischer Mittel, der Sprunganalyse und verschiedenen weiteren Homogenitätstests. Aussage: Im südlichen Rheingebiet treten Niederwässer im Sommer auf - hier markante Zunahme der Niederwasserabflüsse. Nördlich der Mainlinie dagegen treten Niederwässer im Spätsommer und Herbst auf – hier besteht eine ungerichtete, teils auch leicht absinkende Tendenz bei den Niedrigwasserextremen. Von Süden her zeigen sich im Niedrigwasserbereich seit den 1970er Jahren, wenngleich auf hohem Abflussniveau, undeutliche Signale einer gegenteiligen Entwicklung (d.h. schwache Niedrigwasserverschärfung), allerdings mit bislang fehlender statistischer Signifikanz. Die Ergebnisse der statistischen Analysen sind stark von den zugrunde liegenden Rahmenbedingungen, z.B. der Datengrundlage, des untersuchten Zeitfensters, der verwendeten Methodik, abhängig.

5.4.2 Auswertungen in Österreich

Für die Trendanalysen wurden Reihen der Q_{95} Niederwässer ausgewertet. Wie im Kapitel 3.4.3 wurde der Mann-Kendall-Test (MK) herangezogen (Burn und Hag Elnur, 2002). In den

Mann-Kendall-Test fließt die Größe des Niederwassers nur in ihrem relativen Wert zu den anderen Niederwässern ein, er ist also nicht auf Ausreißer sensitiv.

Die Trendanalysen (Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9; Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3) zeigen das folgende Ergebnis:

Unter 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in etwa 10% der Einzugsgebiete in Österreich die Niederwässer abgenommen, in den letzten 60 Jahren waren es 14%. Dem gegenüber haben nur in 5% bzw. 7% der Gebiete die Niederwässer zugenommen. Eine Abnahme ist insbesondere im Süden und Südosten Österreichs festzustellen, sowie im Innviertel und zum Teil in Vorarlberg. (*Mittelharte Aussage*)

Über 900 m Seehöhe haben in den letzten 30 Jahren in etwa 12% der Einzugsgebiete in Österreich die Niederwässer zugenommen, in den letzten 60 Jahren waren es 29%. Dem gegenüber haben nur in 6% bzw. 10% der Gebiete die Niederwässer abgenommen. Eine Zunahme ist insbesondere in den Zentralalpen festzustellen, (*Harte Aussage*)

Generell nahmen die Niederwässer eher im Sommer ab und stiegen im Herbst. (*Mittelharte Aussage*)

Die räumlichen Muster der Niederwassertrends sind mit denen der Mittelwassertrends korreliert. (*Mittelharte Aussage*)

Q95 Jahreswerte
 Periode 1950 - 2007 (mind. 45 Jahre)

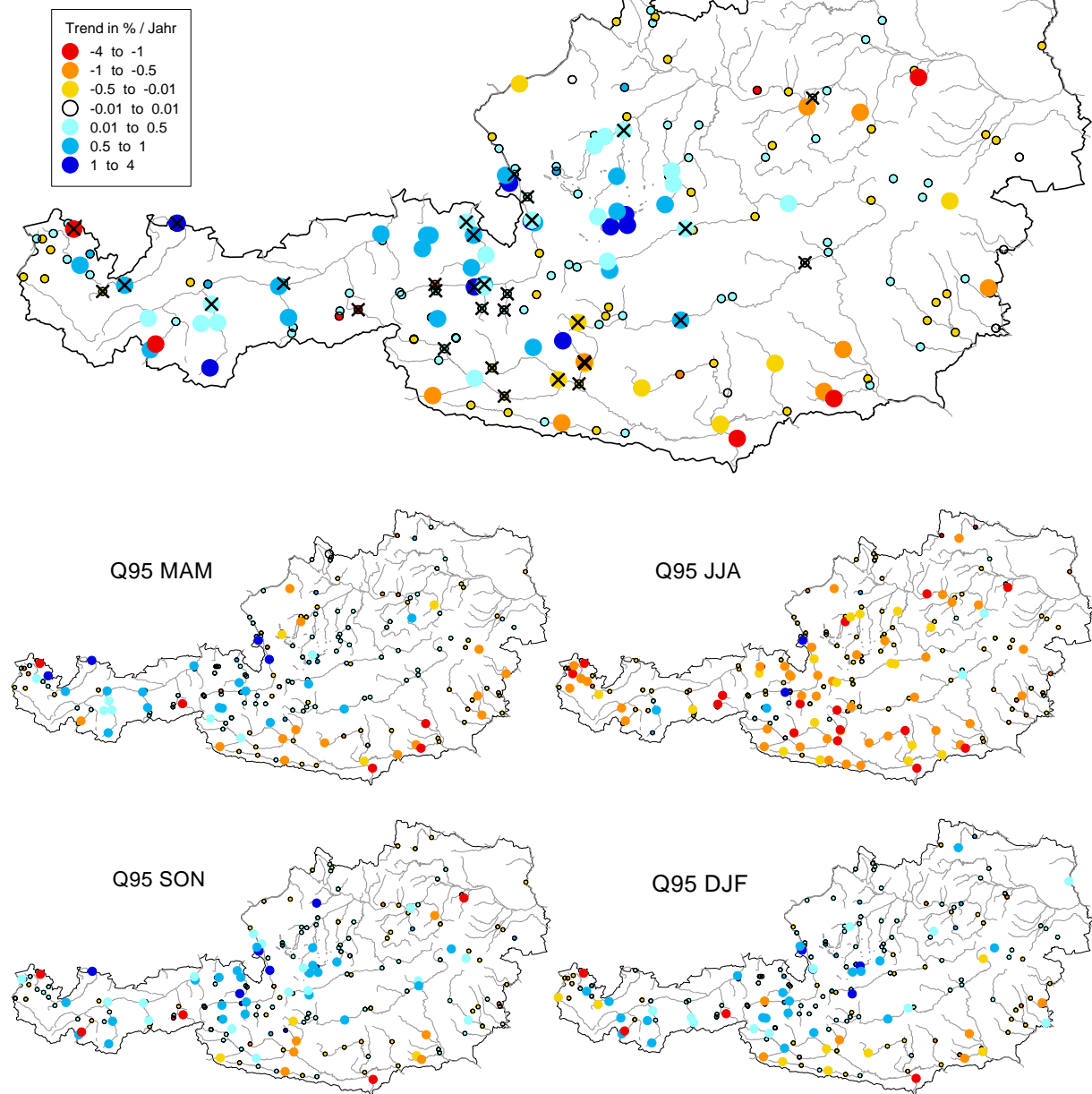


Abbildung 5-8: Trends der Jahres- und Vierteljahresniederwasserdurchflüsse Q_{95} für die Periode 1950-2007. Pegel mit mindestens 45 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Kreuze zeigen Pegel, die durch Überleitung/Speicher beeinflusst sind lt. Abbildung 5-5.

Q95 Jahreswerte Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)

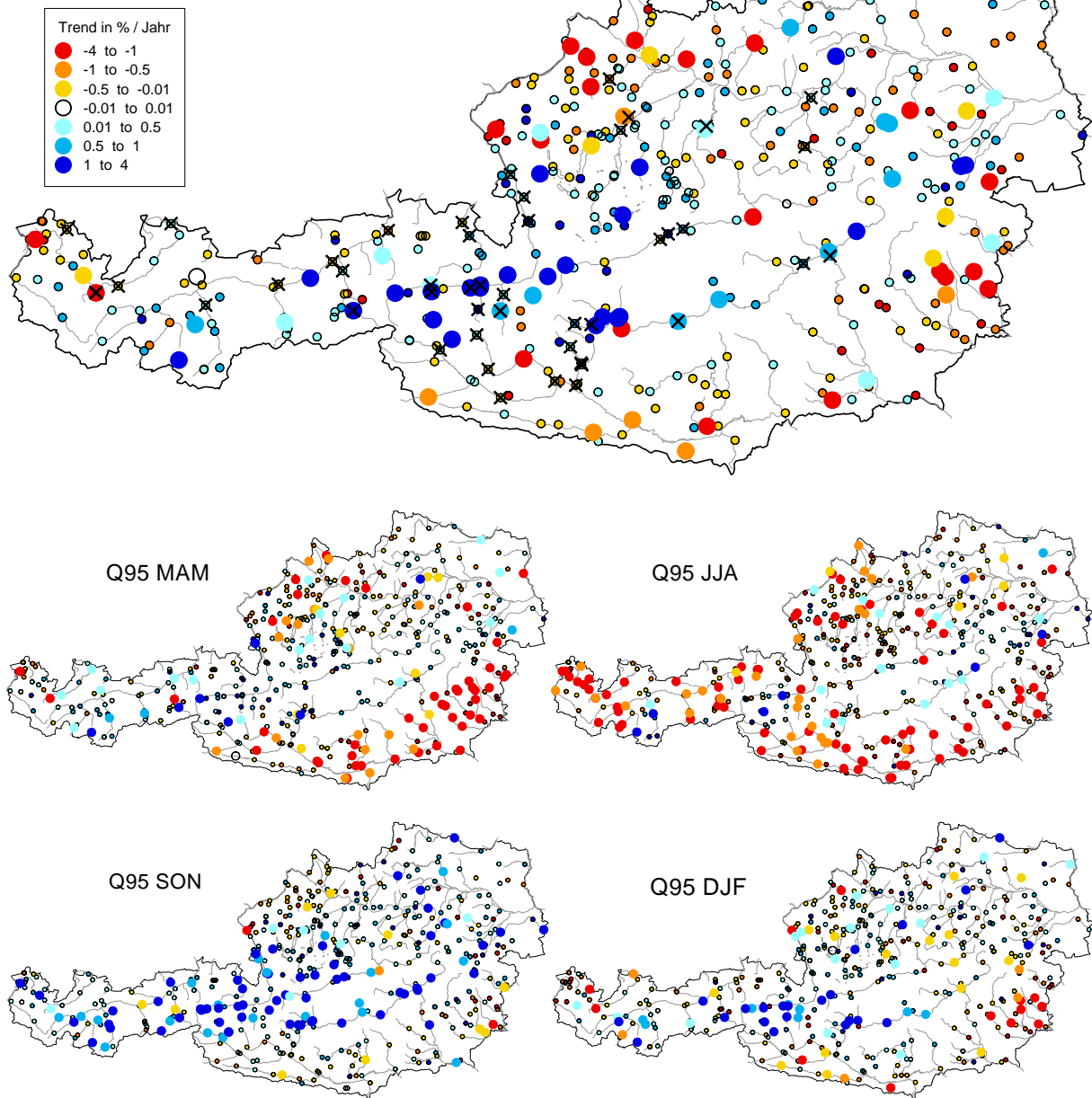
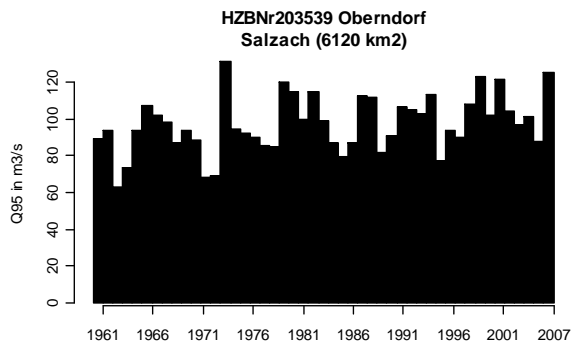
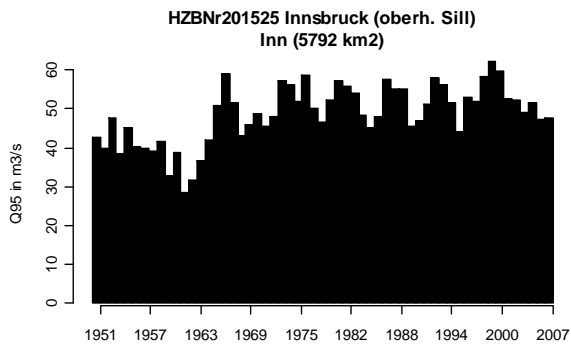
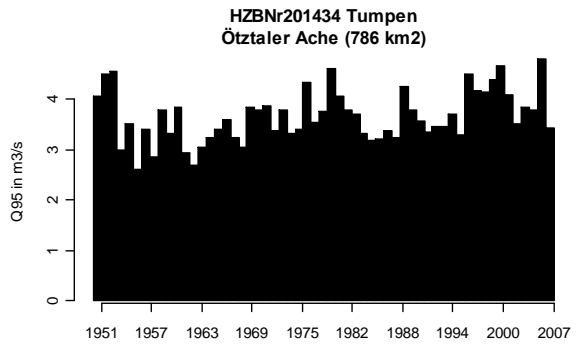
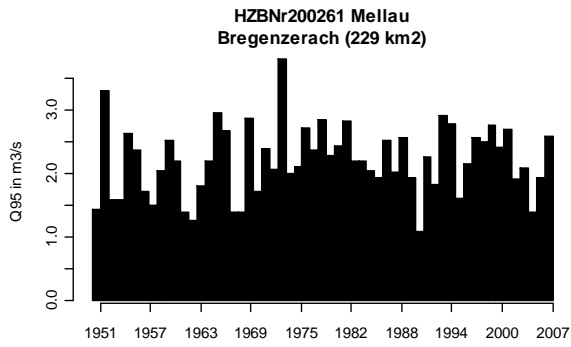
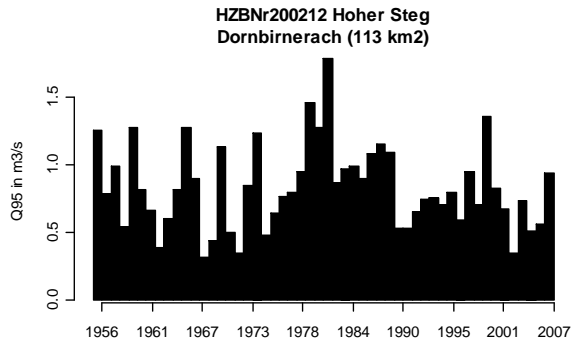
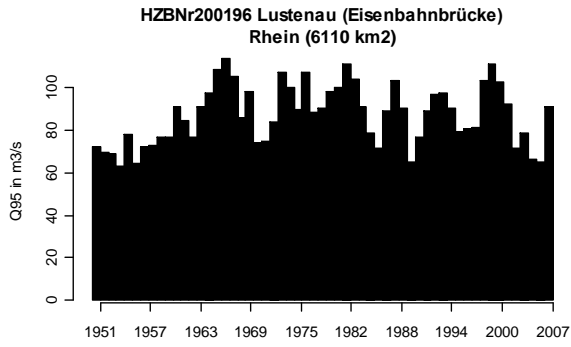
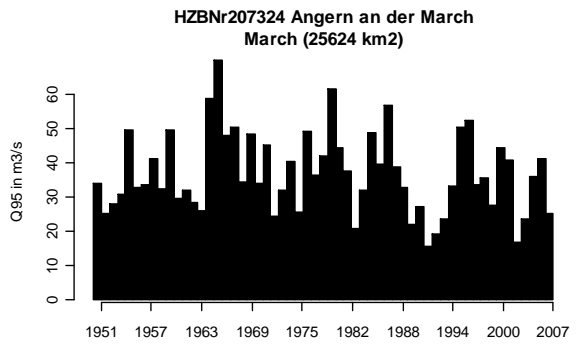
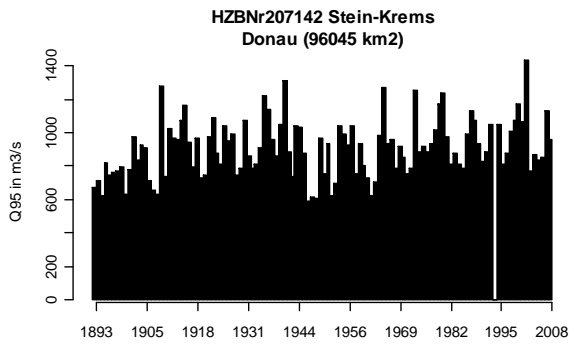
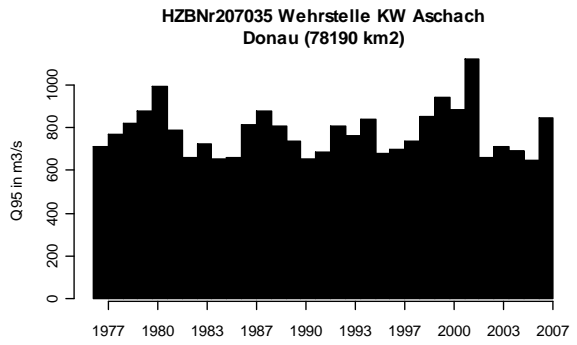
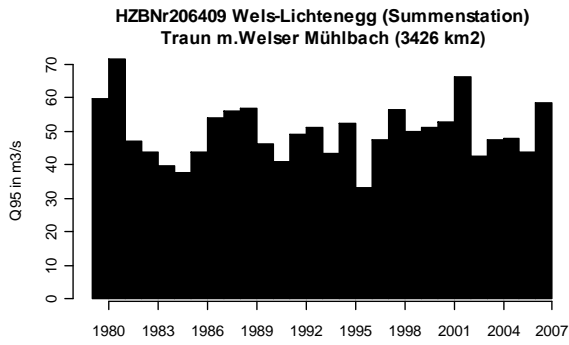
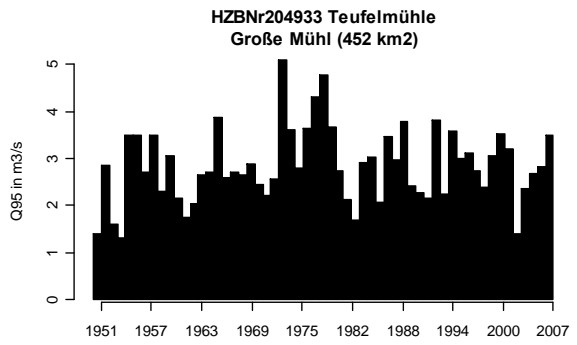
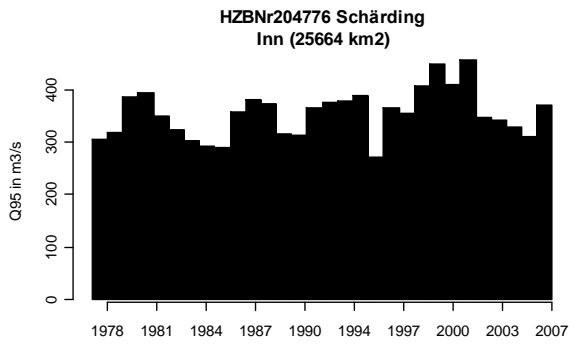
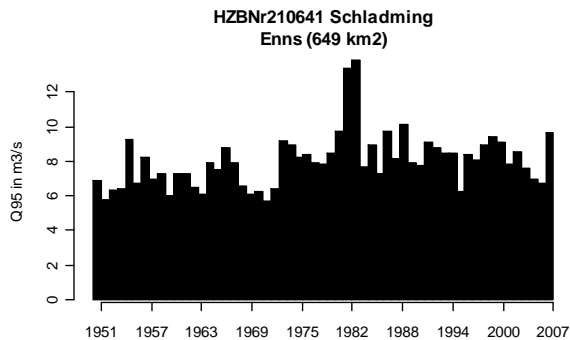
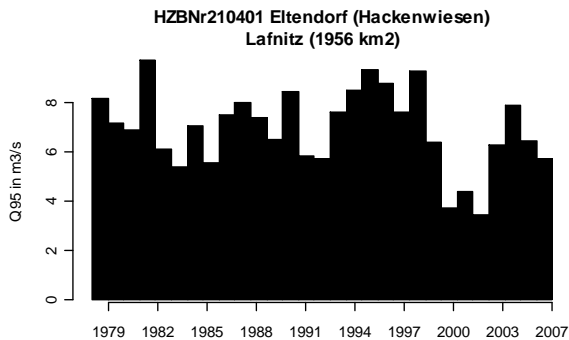
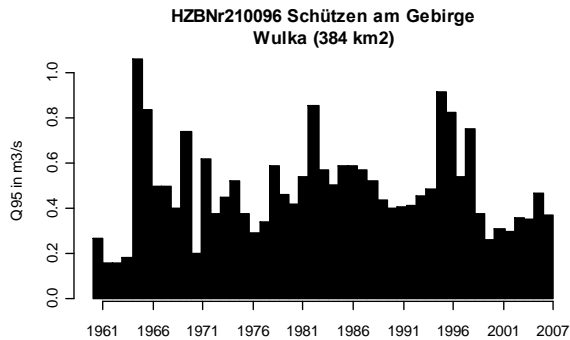
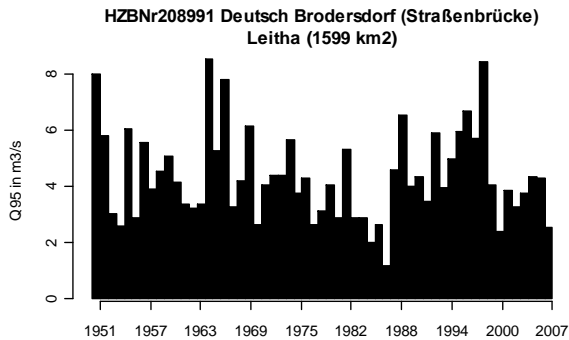
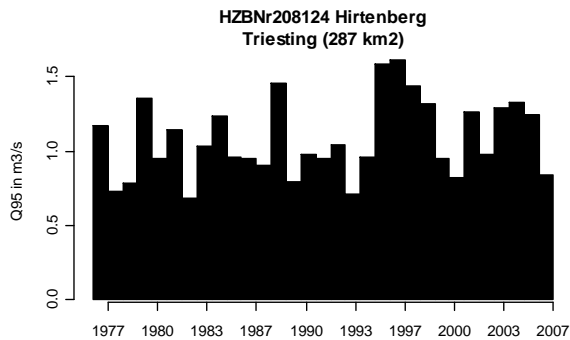
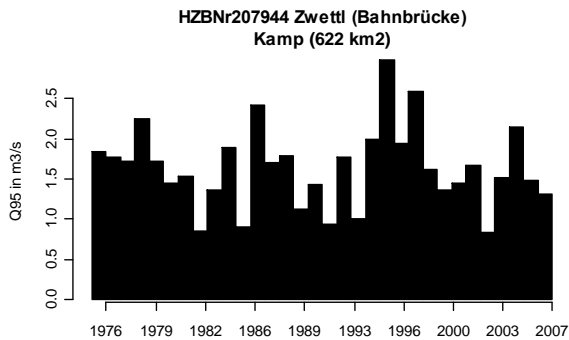
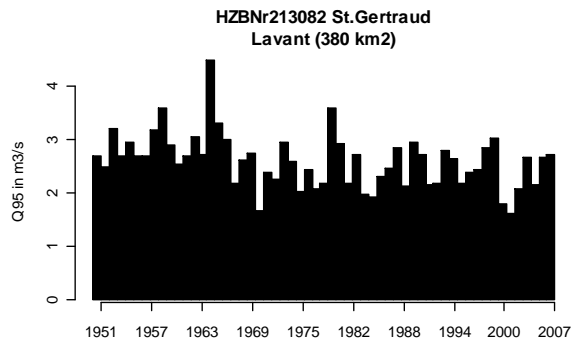
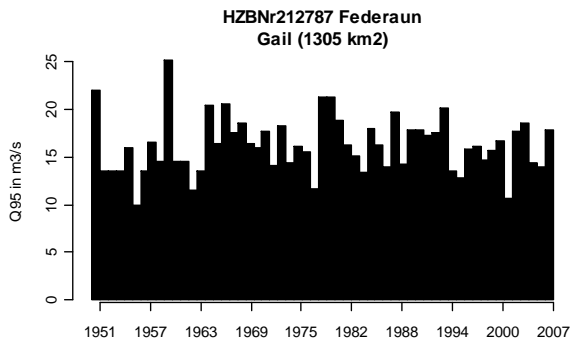
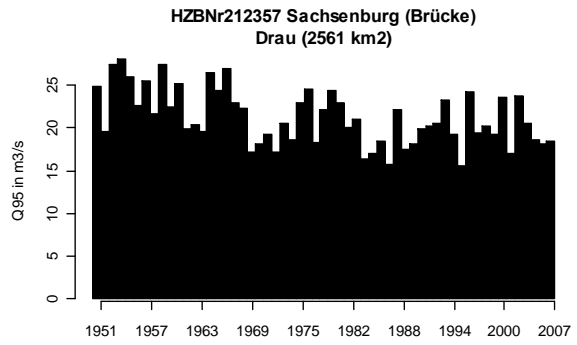
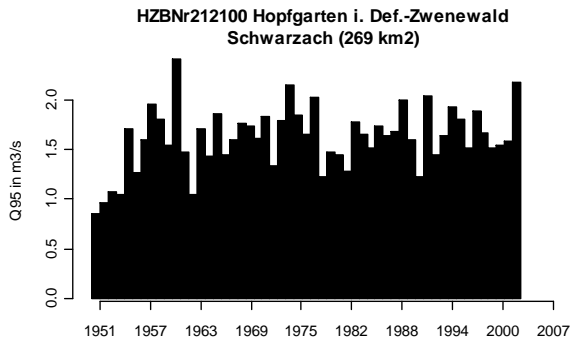
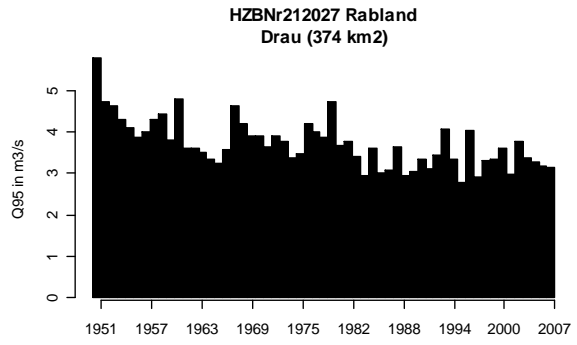
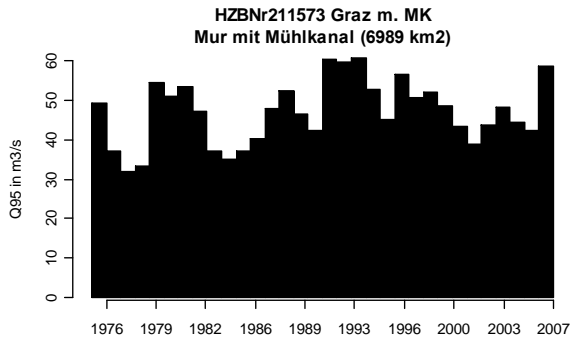


Abbildung 5-9: Trends der Jahres- und Vierteljahresniederwasserdurchflüsse Q_{95} für die Periode 1976-2007. Pegel mit mindestens 25 Jahren Beobachtung. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Kreuze zeigen Pegel, die durch Überleitung/Speicher beeinflusst sind lt. Abbildung 5-5.









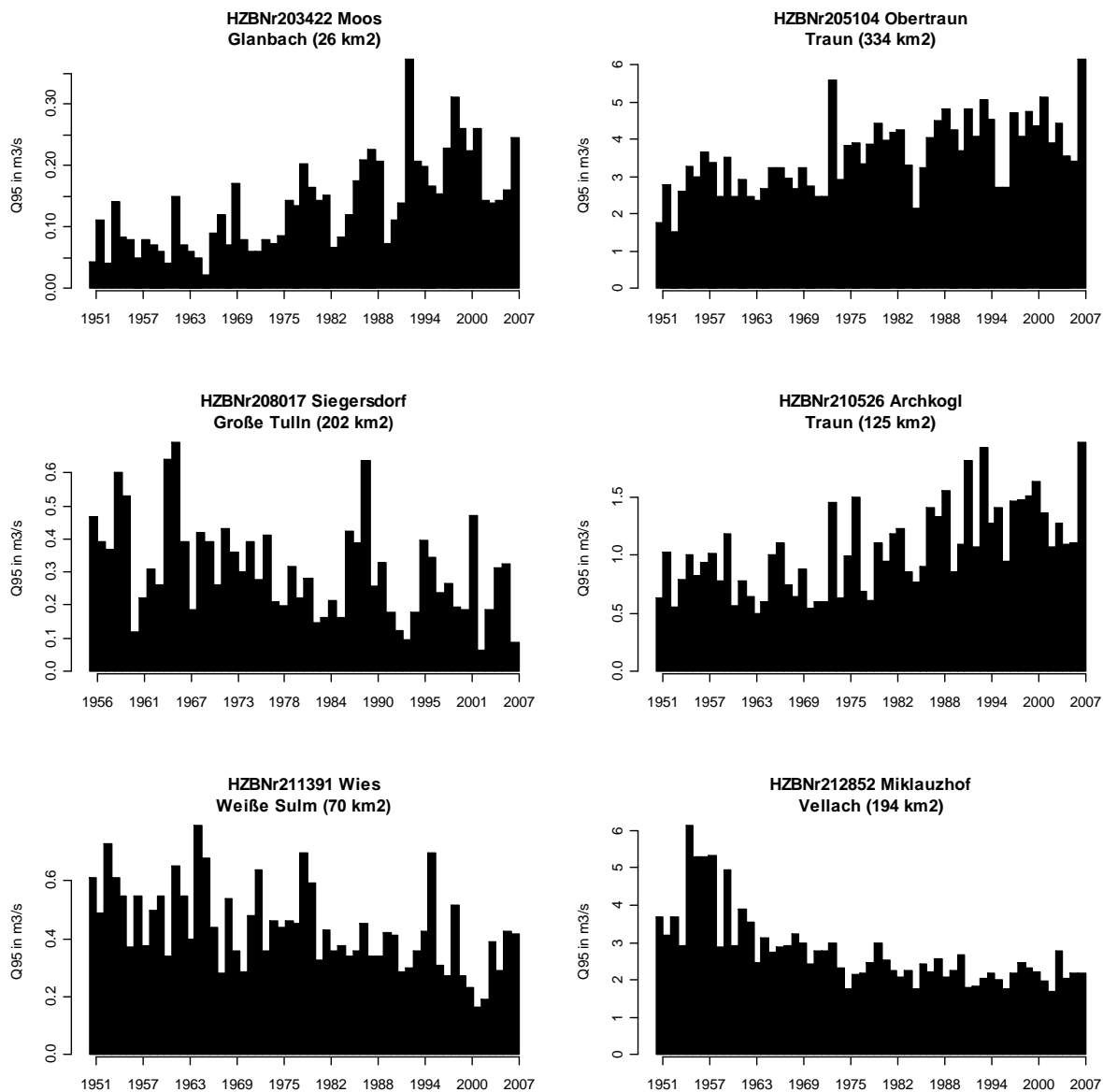
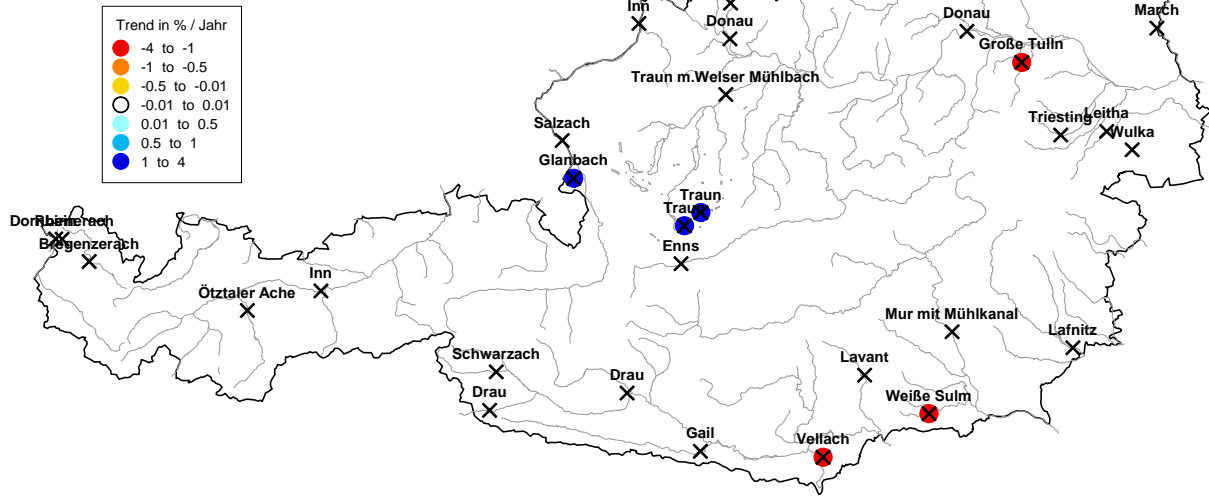


Abbildung 5-10: Zeitreihen der Niederwasserdurchflüsse in ausgewählten Einzugsgebieten. Gezeigt ist der Wert Q_{95} in m^3/s .

Ausgewählte Pegel



Ausgewählte Pegel

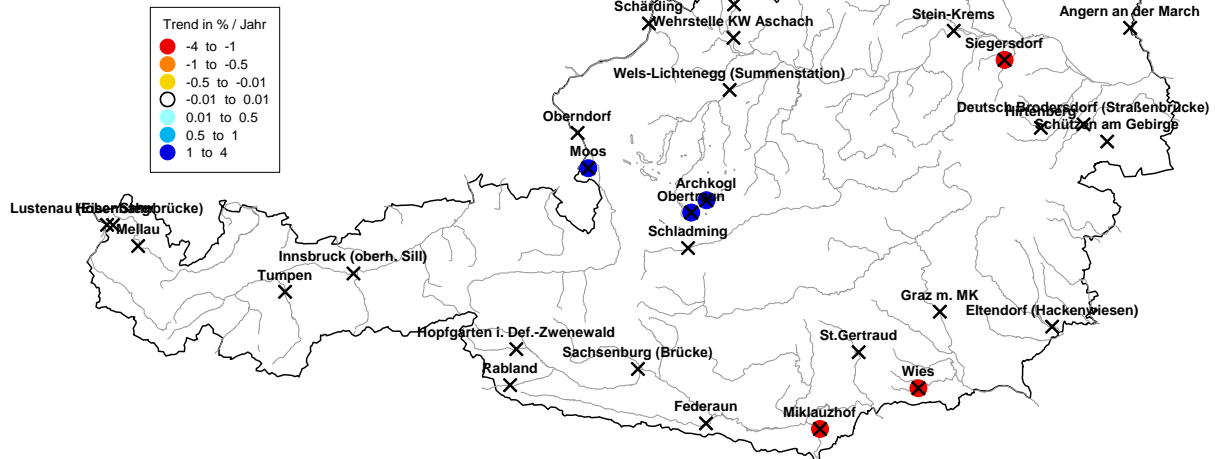


Abbildung 5-11: Lage der ausgewählten Pegel. Oben: Gerinnenname. Unten: Pegelname.

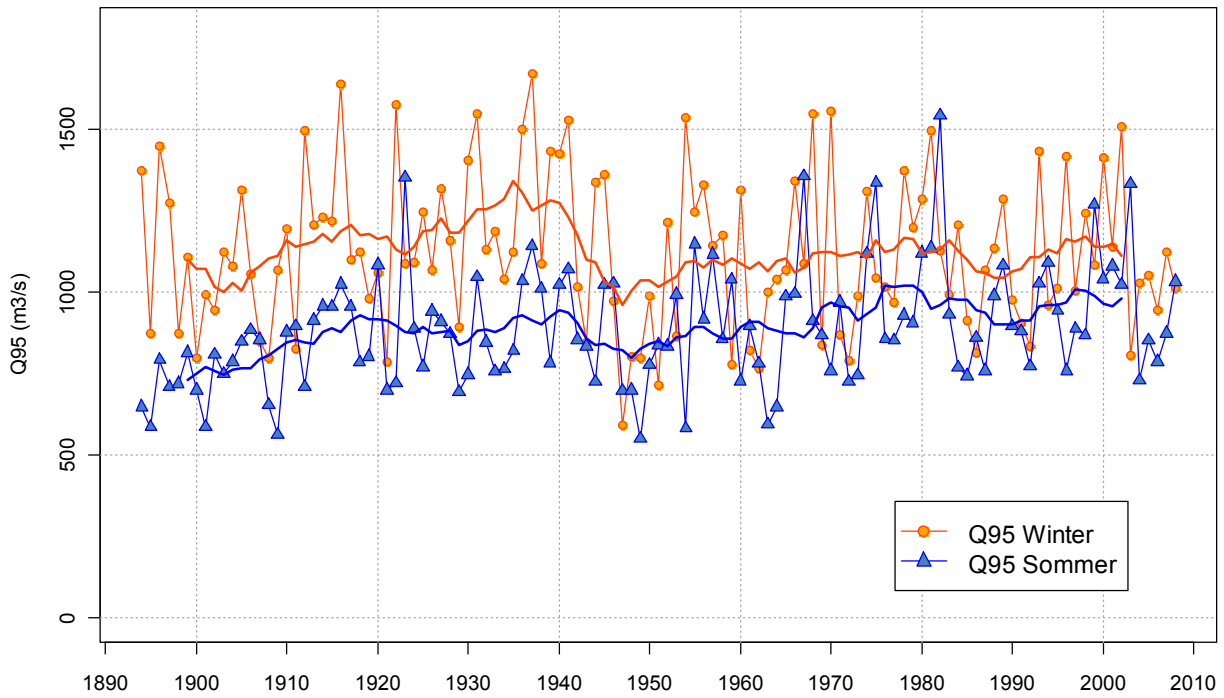


Abbildung 5-12: Zeitreihe der saisonalen Niederwasserdurchflüsse (Winter Q_{95} u. Sommer Q_{95}) am Pegel Donau/Krems für die Periode 1893-2008.

Tabelle 5-2: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%). h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Alle Pegel sind ausgezählt, beeinflusste und unbeeinflusste.

	1976 - 2007 (min. 25 Jahre)		1950 - 2007 (min. 45 Jahre)	
	Anteil d. Pegel [%] mit		Anteil d. Pegel [%] mit	
	steigendem Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	fallendem Trend
Q_{95}	10	7	25	11
$Q_{95} h < 900\text{m}$	5	11	6	15
$Q_{95} h > 900\text{m}$	14	3	35	9

Tabelle 5-3: Anzahl der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%). h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Alle Pegel sind ausgezählt, beeinflusste und unbeeinflusste.

Österreich	Trend in % / Jahr	1976 - 2007 (min. 25 Jahre)			1950 - 2007 (min. 45 Jahre)		
		h<900m	h>900m	Alle	h<900m	h>900m	Alle
Jahres - Q ₉₅	steigend	13	31	44	4	44	48
	nicht signif.	205	180	385	54	71	125
	fallend	27	7	34	10	11	21
Winter (DJF) - Q ₉₅	steigend	15	30	45	6	30	36
	nicht signif.	208	176	384	56	84	140
	fallend	22	12	34	6	12	18
Frühjahr (MAM) - Q ₉₅	steigend	11	18	29	2	23	26
	nicht signif.	184	182	366	53	93	146
	fallend	50	18	68	13	10	22
Sommer (JJA) - Q ₉₅	steigend	10	13	23	4	54	6
	nicht signif.	193	142	335	45	70	115
	fallend	42	63	105	19	2	73
Herbst (SON) - Q ₉₅	steigend	22	67	89	7	36	43
	nicht signif.	215	146	361	55	82	137
	fallend	8	5	13	6	8	14

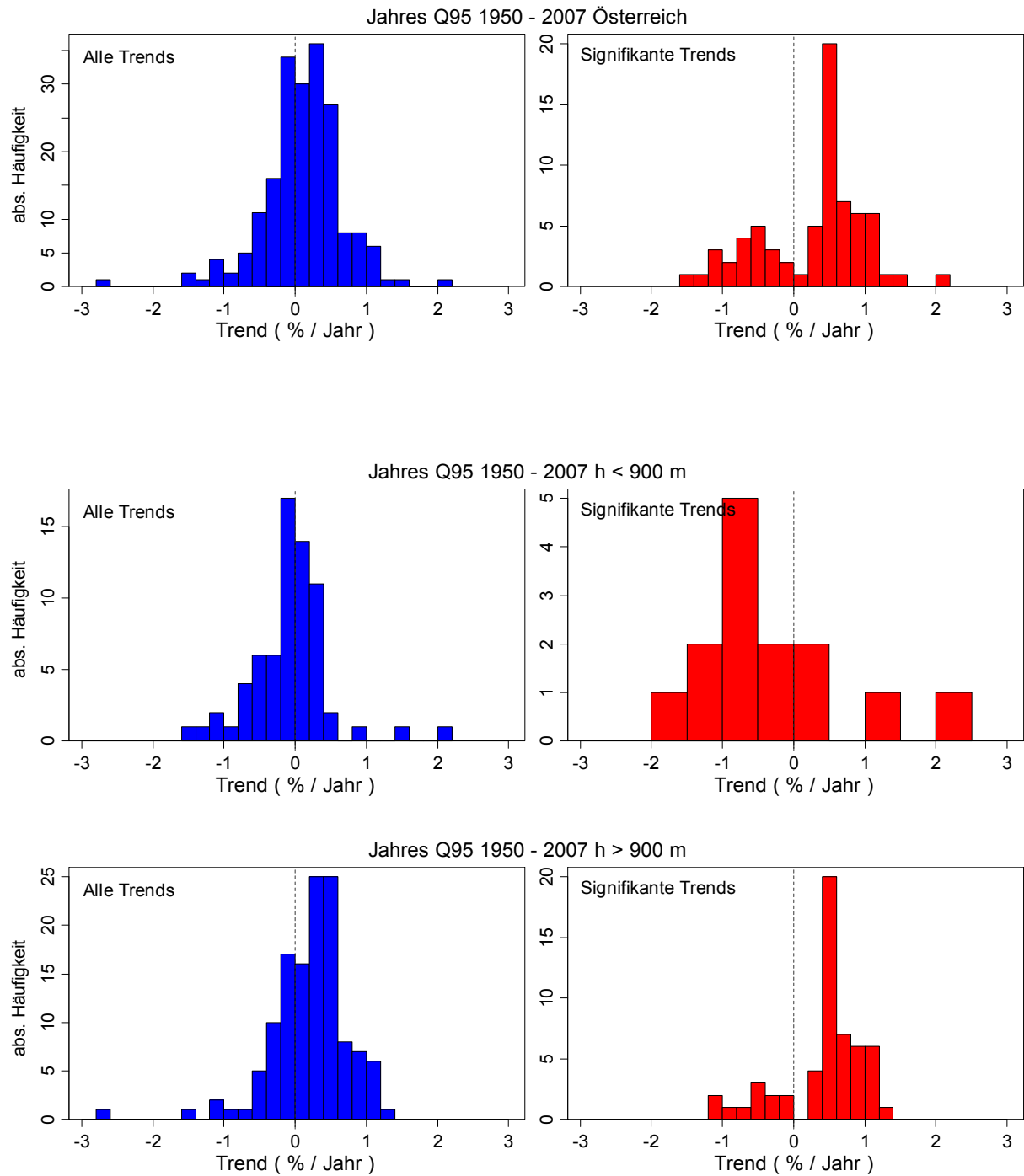


Abbildung 5-13: Histogramme der Trends der Niederwasserdurchflüsse in der Periode 1950 – 2007, mit mindestens 45 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: mittlere Einzugsgebietshöhe unter 900 m. Unten: mittlere Einzugsgebietshöhe über 900 m. Alle Pegel sind ausgezählt, beeinflusste und unbeeinflusste.

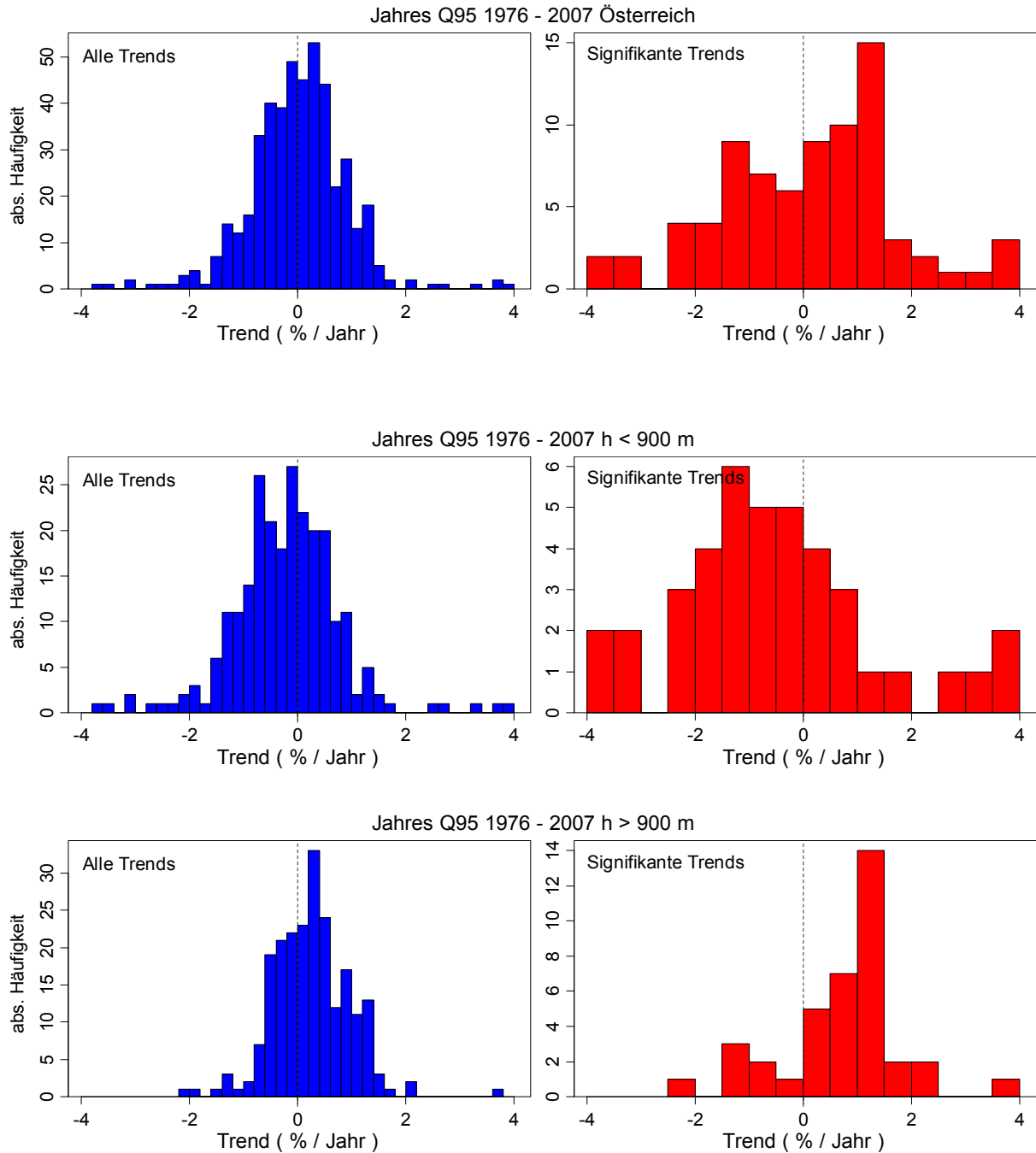


Abbildung 5-14: Histogramme der Trends der Niederwasserdurchflüsse in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: mittlere Einzugsgebietshöhe unter 900 m. Unten: mittlere Einzugsgebietshöhe über 900 m. Alle Pegel sind ausgezählt, beeinflusste und unbeeinflusste.

Tabelle 5-4: Prozent der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%). h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Nur die unbeeinflussten Pegel sind ausgezählt.

	1976 - 2007 (min. 25 Jahre)		1950 - 2007 (min. 45 Jahre)	
	Anteil d. Pegel [%] mit		Anteil d. Pegel [%] mit	
	steigendem Trend	fallendem Trend	steigendem Trend	fallendem Trend
Q ₉₅	8	7	19	8
Q ₉₅ h<900m	5	11	5	13
Q ₉₅ h>900m	14	3	34	8

Tabelle 5-5: Anzahl der Pegel mit steigenden und fallenden Trends der Niederwasserdurchflüsse in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%). h ist die mittlere Einzugsgebietshöhe. Nur die unbeeinflussten Pegel sind ausgezählt.

Österreich	Trend in % / Jahr	1976 - 2007 (min. 25 Jahre)			1950 - 2007 (min. 45 Jahre)		
		h<900m	h>900m	Alle	h<900m	h>900m	Alle
Jahres - Q ₉₅	steigend	12	25	37	3	34	37
	nicht signif.	198	150	348	52	57	109
	fallend	27	6	33	8	8	16
Winter (DJF) - Q ₉₅	steigend	14	23	37	6	23	29
	nicht signif.	201	150	351	53	68	121
	fallend	22	8	30	4	8	12
Frühjahr (MAM) - Q ₉₅	steigend	11	15	26	2	18	20
	nicht signif.	177	150	327	50	73	123
	fallend	49	16	65	11	8	19
Sommer (JJA) - Q ₉₅	steigend	9	8	17	3	2	5
	nicht signif.	189	122	311	44	57	101
	fallend	39	51	90	16	40	56
Herbst (SON) - Q ₉₅	steigend	21	50	71	6	27	33
	nicht signif.	208	127	335	53	67	120
	fallend	8	4	12	4	5	9

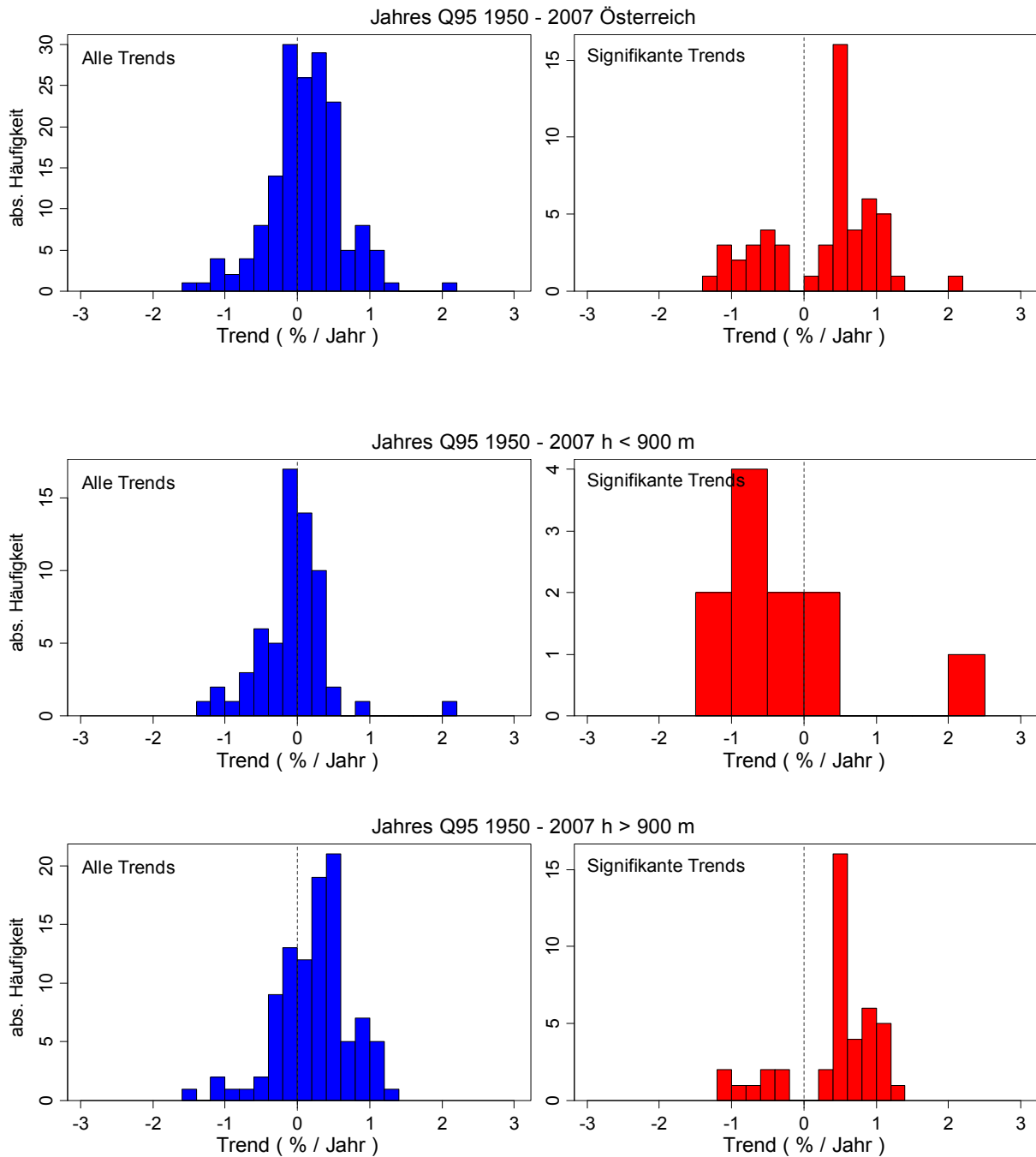


Abbildung 5-15: Histogramme der Trends der Niederwasserdurchflüsse in der Periode 1950 – 2007, mit mindestens 45 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: mittlere Einzugsgebietshöhe unter 900 m. Unten: mittlere Einzugsgebietshöhe über 900 m. Nur die unbeeinflussten Pegel sind ausgezählt.

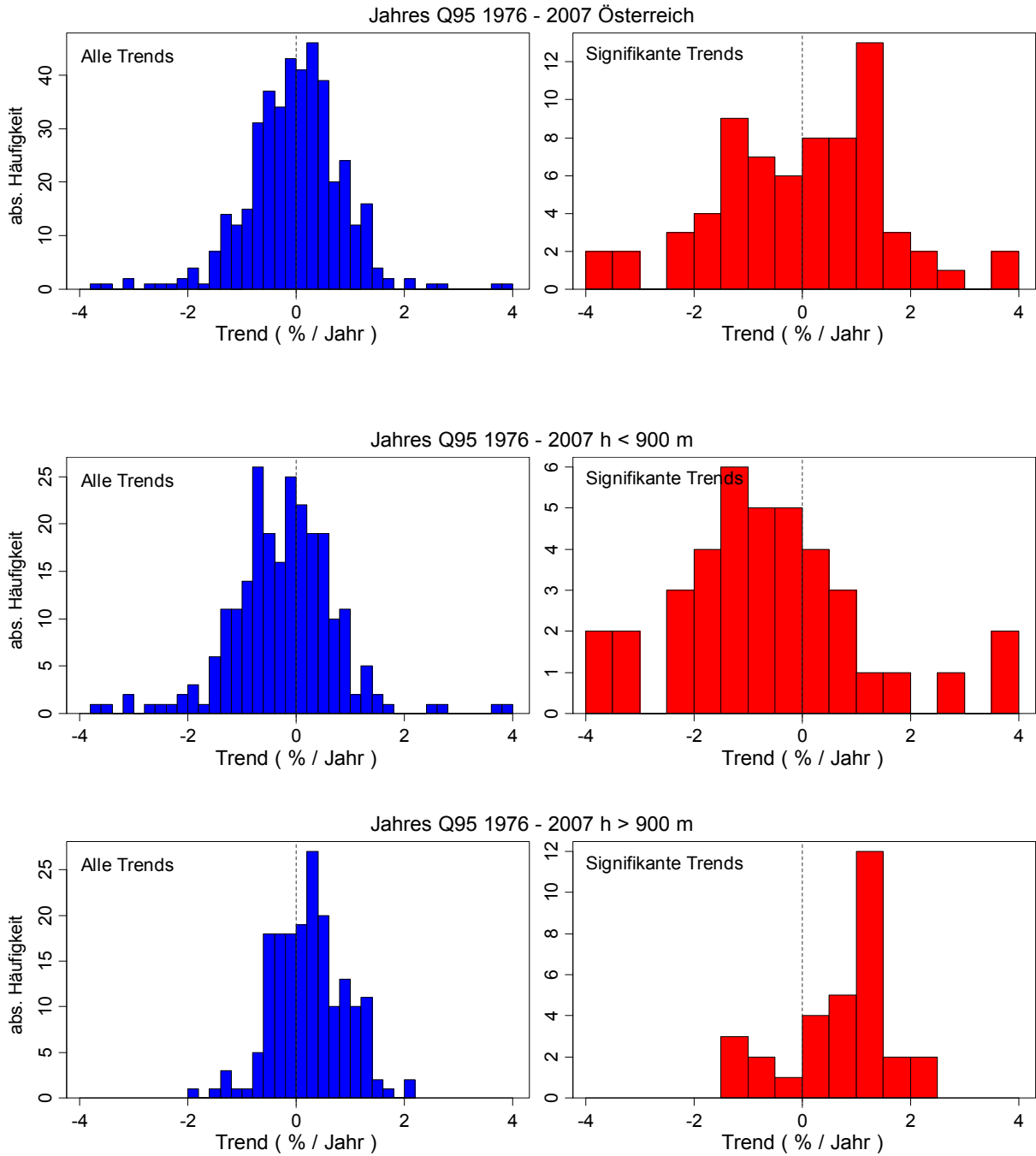


Abbildung 5-16: Histogramme der Trends der Niederwasserdurchflüsse in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahren in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: mittlere Einzugsgebietshöhe unter 900 m. Unten: mittlere Einzugsgebietshöhe über 900 m. Nur die unbeeinflussten Pegel sind ausgezählt.

5.5 Situation in der Zukunft

5.5.1 Interpretation von Szenarien und Unsicherheiten

Fazit:

- Klimaimpaktanalysen sollten verstärkt untersuchen, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen simuliert werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen.

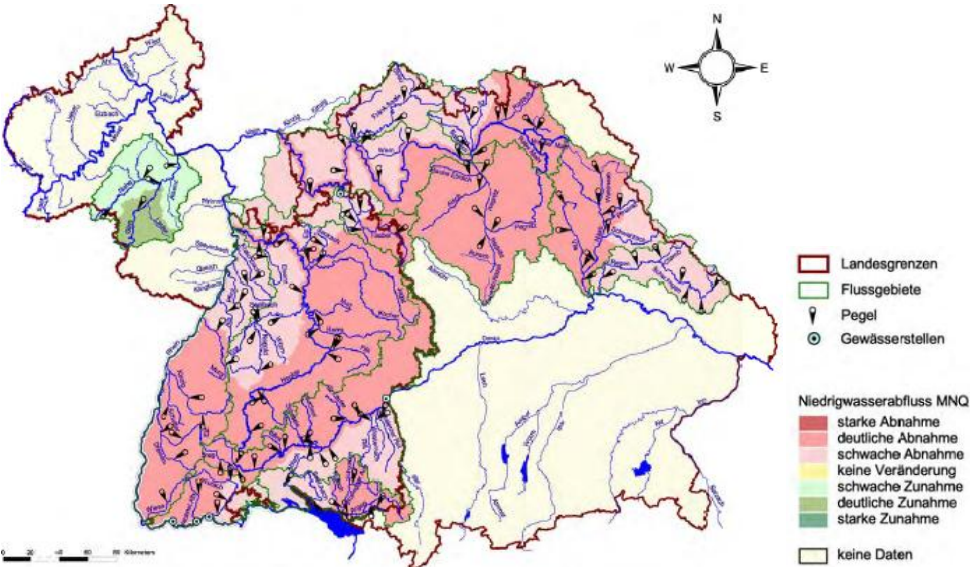
Als erste Abschätzung ist zu erwarten, dass die Reihung von harten bis weichen Fakten der entsprechenden Reihung der wesentlichsten Einflussfaktoren bzw. Prozesse entspricht. Für solche Prozesse, bei denen die Lufttemperatur ein wichtiger Einflussfaktor ist (z.B. Schneeschmelze, Schneerückhalt), ist zu erwarten, dass die Durchsicht der Literatur harte Fakten ergeben wird. Für solche Prozesse, bei denen der Niederschlag ein wichtiger Einflussfaktor ist, ist zu erwarten, dass die Durchsicht der Literatur mittelharte bis weiche Fakten ergeben wird. Für solche Prozesse, bei denen klimatologische Extrema wichtige Einflussfaktoren sind, ist zu erwarten, dass die Durchsicht der Literatur weiche bis spekulative Fakten ergeben wird.

Klimaimpaktanalysen bestehen in der Regel aus drei Schritten: (a) Simulationen mit einem oder mehreren Globalen Zirkulationsmodellen (GCMs) unter Definition bestimmter Szenarien (meist IPCC Szenarien); (b) Downscaling der Lufttemperatur, Niederschlag und anderer Ergebnisse des GCM von der Rasterweite des Klimamodells (ca. 200km) auf eine Rasterweite, die für die hydrologische Modellierung geeignet ist (wenige km). Dabei muss die Varianz der Klimavariablen vergrößert werden und der systematische Fehler reduziert werden. (c) Modellierung mit einem Niederschlag-Abflussmodell unter Verwendung der Ergebnisse des Downscalings (Niederschlag, Lufttemperatur, ...). Bei jedem dieser Schritte treten große Unsicherheiten auf, die die Szenarienanalysen erheblich verfälschen können. Es ist dann leicht möglich, dass Szenarienstudien Veränderungen angeben, die weder interpretiert noch auf Plausibilität geprüft werden können. Das ist eine unbefriedigende Situation. Blöschl and Montanari (2009) schlagen deshalb vor, dass Klimaimpaktanalysen verstärkt untersuchen sollten, durch welche Mechanismen bestimmte Änderungen hervorgerufen werden, anstatt nur auf die Größe der Änderungen abzielen. Dies ist auch der Ansatz, der in dieser Studie verfolgt wird. Unter diesem Gesichtspunkt sind auch die Ergebnisse der Szenarien der Literatur (folgender Abschnitt) zu interpretieren.

5.5.2 Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur

Tabelle 5-6: Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur

Geografische und zeitliche Abgrenzung; Veröffentlichung	Aussagen
Europa 1980-1999 bis 2090-2099 IPCC (2007), Bates et al. (2008)	Die jährliche Niederschlagsmenge wird wahrscheinlich in Nordeuropa zunehmen und in Südeuropa abnehmen. Im Sommer werden Niederschläge in Zentral- und Osteuropa und dem Mittelmeerraum wahrscheinlich abnehmen. In allen Regionen wird eine Zunahme der Niederschlagsmenge an Regentagen erwartet. Grundwasserneubildung wird in Zentral- und Osteuropa wahrscheinlich abnehmen, insbesondere in Tälern und Ebenen. Für Abflüsse wird eine Zunahme der saisonalen Unterschiede erwartet. Für Zentral- und Osteuropa werden im Winter zunehmende Abflüsse und im Sommer abnehmende Abflüsse erwartet. In Folge von höherer Temperatur und abnehmendem Sommerniederschlag wird

	<p>eine Zunahme von Hitzewellen und Dürre erwartet. Auch wird mit einer stärkeren Variabilität des Sommerklimas gerechnet, was zu extremeren Hitzewellen und Dürren führen kann.</p>
<p>Europa 2001-2050 und 2051-2100 Warren et al. (2009)</p>	<p>Methode: Verschiedene GCM und Szenarios, Vorhersage der Meteorologischen Dürre (Standardized Precipitation Index SPI) Aussage: Deutliche Zunahme des SPI in Südeuropa, besonders am Mittelmeer und am Schwarzen Meer. ECHAM4 eher Spanien, CSIRO2 eher Schwarzes Meer. Nordwesteuropa stark trockener.</p>
<p>Deutschland/ Baden- Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz 2021-2050 KLIWA (2009)</p>	<p>Projekt KLIWA: Methode: Simulationen des Abflusses unter Verwendung von Klimaszenarien und kontinuierlicher Niederschlag-Abflussmodelle (LARSIM in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, ASGi/WaSiM-ETH in Bayern). Regionales Klimamodell ECHAM5-WETTREG und statistisches Downscaling, Emissionsszenarien IPCC-B2 und A1B. Bei den Niederschlägen wird von einer Verschiebung vom Sommer (bis zu 10 Prozent weniger) in den Winter (bis zu 35 Prozent mehr) ausgegangen. Aussage: Das Jahresniederwasser zeigen schwache bis starke Abnahmen (bis 20%) im gesamten Untersuchungsgebiet. Mit zunehmender Jährlichkeit gehen die Abnahmen allmählich zurück. Die mittlere jährliche Dauer von Niederwasserperioden (Zunahme 25-50%) verhält sich analog. In Baden-Württemberg und Bayern ist mit einer Abnahme der monatlichen Niederwasserabflüsse im Sommerhalbjahr von 10-20% zu rechnen (größte Abnahmen im September (13-44%, im Mittel 21%, sowie Oktober bis November), für Alpenflüsse (Iller, Lech, Isar) keine Auswertungen.</p> 
	<p>Abbildung 5-17: Verhältnis Sommer-MNQ für die Periode 2021-2050 und Sommer-MNQ für die Periode 1971-2000.</p>

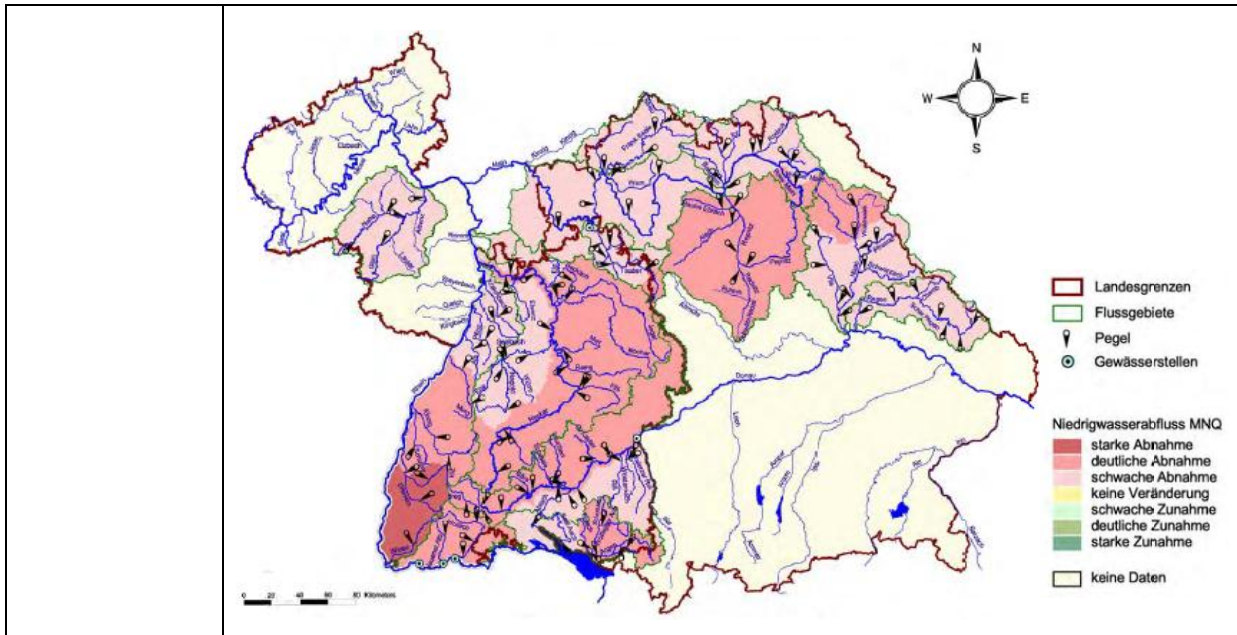


Abbildung 5-18: Verhältnis MNQ für die Periode 2021-2050 und MNQ für die Periode 1971-2000.

Deutschland / Obere Donau
2011-2035 und 2036-2060
GCA(2009)
Mauser et al. (2008)

Projekt GLOWA-Danube

Methode: statistischer Klimaantriebs-Generator sowie Klimamodelle REMO und MM5 (skaliert und biaskorrigiert) und Niederschlags-Abfluss Modellierung
Szenario: IPCC-A1B * 1,7 Temperaturanstieg (entspricht + 3°C bis 2060)

Aussagen: Achleiten / Donau: Reduzierung des Niedrigwasserabflusses je nach gewähltem Klimaszenario von 15% bis 50%.

In den Alpen werden sich Niedrigwasserabflüsse wahrscheinlich bis 2060 im Mittel etwa verdoppeln, während es im Alpenvorland und nördlich der Donau zu starken Reduzierungen auf bis zu 30% der heutigen Werte kommen kann.

Ursache für die Zweiteilung: In Alpenflüssen (Winterniederrwässer) werden erhöhter Regenanteil und Schneeschmelze den Niedrigwasserabfluss erhöhen. Im Alpenvorland und nördlich der Donau (Sommerniederrwässer) führen sinkende Niederschlagssummen und steigende Verdunstung zu einer Verschärfung der Niedrigwassersituation.

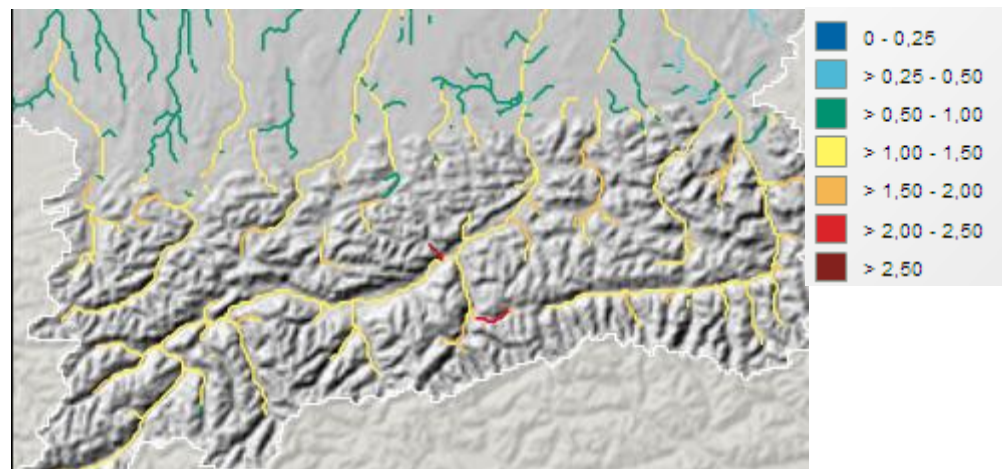
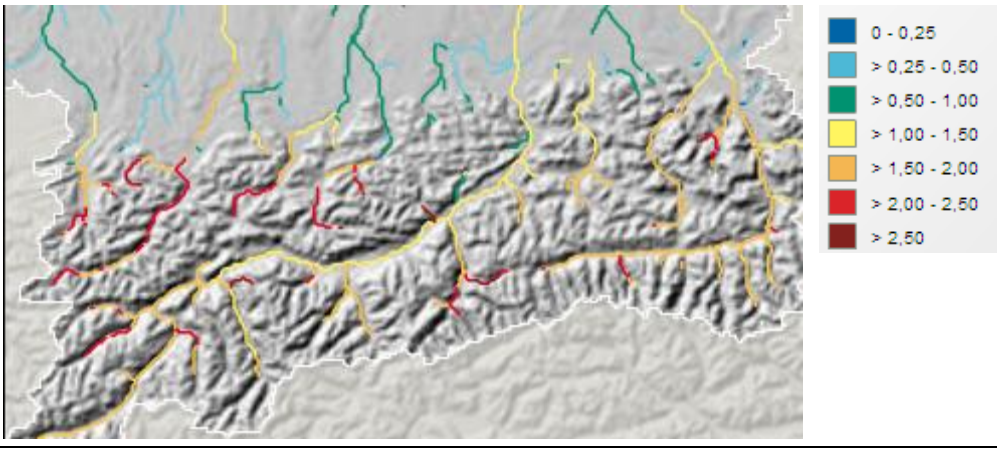


Abbildung 5-19: Verhältnis NJ7Q50 für Periode 2011-2035 und NJ7Q50 für die Periode 1971-2000.

	 <p>Abbildung 5-20: Verhältnis NJ7Q50 für Periode 2036-2060 und NJ7Q50 für die Periode 1971-2000.</p>
<p>Rheingebiet 2021–2050 und 2071–2100 KLIWAS (2009)</p>	<p>Projekt KLIWAS Methode: 24 Klimaprojektionen (basierend auf drei Emissionsszenarien, vier globalen Klimamodellen und sechs Regionalisierungen), biaskorrigiert und Abflusssimulationen. Aussagen (Zwischenergebnisse): Auswertungen für die „Nahe Zukunft“ (2021–2050) zeigen gegenüber dem Kontrollzeitraum keine deutliche Änderung der Unterschreitungsdauer der Abflüsse des Rheins. Für die „Ferne Zukunft“ (2071–2100) könnte die Häufigkeit der Niedrigwasserereignisse zunehmen. Jedoch ergibt die Gegenüberstellung der Ensemble-Mean-Werte der Periode 2071–2100 und analoger Auswertungen basierend auf beobachteten Abflussdaten (Zeiträume 1911–1940, 1941–1970), dass die für die „Ferne Zukunft“ ermittelten Häufigkeiten in den meisten Klassen bereits in der Vergangenheit einmal in ähnlicher Größenordnung vorlagen.</p>
<p>Schweiz 2050 OcCC/ProClim (2007)</p>	<p>Basierend auf IPCC SRES Szenario A2 und B2, Ergebnisse des PRUDENCE Projekts. Bei den Niederschlägen wird von einer Zunahme um rund 10% im Winter und einer Abnahme von rund 20% im Sommer ausgegangen. Aussagen: Gemäß Szenario werden die Niederschläge im Sommer abnehmen und die Wahrscheinlichkeit von Trockenperioden wird zunehmen. Auch extreme Trockenperioden werden gemäß Modellrechnungen zunehmen. Als Folge der Klimaänderung wird im Sommer und Herbst das Wasserdargebot abnehmen. Insbesondere in den öfter auftretenden Hitzesommern können selbst mittlere und größere Mittellandflüsse ähnlich niedrige Wasserstände wie im Winter aufweisen. Grundwasserstände in Talschottern werden entsprechend im Spätsommer und Herbst stärker sinken. In Abflussregimen der Hochalpen, die durch die winterliche Schneedecke und die Schneeschmelze geprägt sind, dürften bei winterlichen Niedrigwassern infolge des Temperaturanstiegs und des höheren Winterniederschlags höhere Wasserstände erreicht werden.</p>
<p>Österreich 2071–2100 Holzmann et al. (2010)</p>	<p>Modell: REMO-UBA des deutschen Max Planck Instituts Hamburg, stochastischer Wettergenerator und Niederschlags-Abfluss Modellierung Aussagen: Generell wurden eine Niederschlagszunahme in den Wintermonaten und eine Reduktion in den Sommermonaten festgestellt. Gemeinsam mit zunehmenden Winterniederschlägen werden die Abflüsse im Winter erhöht, die Sommerabflüsse werden tendenziell geringer.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bregenzer Ache: Auftrittszeitpunkt (derzeit fallweise Jänner bis März,)

	<p>verschiebt sich in den Herbst.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lavant: Es dominieren Herbstniederwässer, beide Szenarien zeigen eine Verstärkung der Tendenz. • Traisen. Die Herbstniederwasserphasen nehmen bei A1B deutlich zu. • Obere Salzach: Niederwasserphasen treten derzeit zwischen Jänner und März auf. Bei A1B fallweise Auftreten von Herbstniederwässern.
--	--

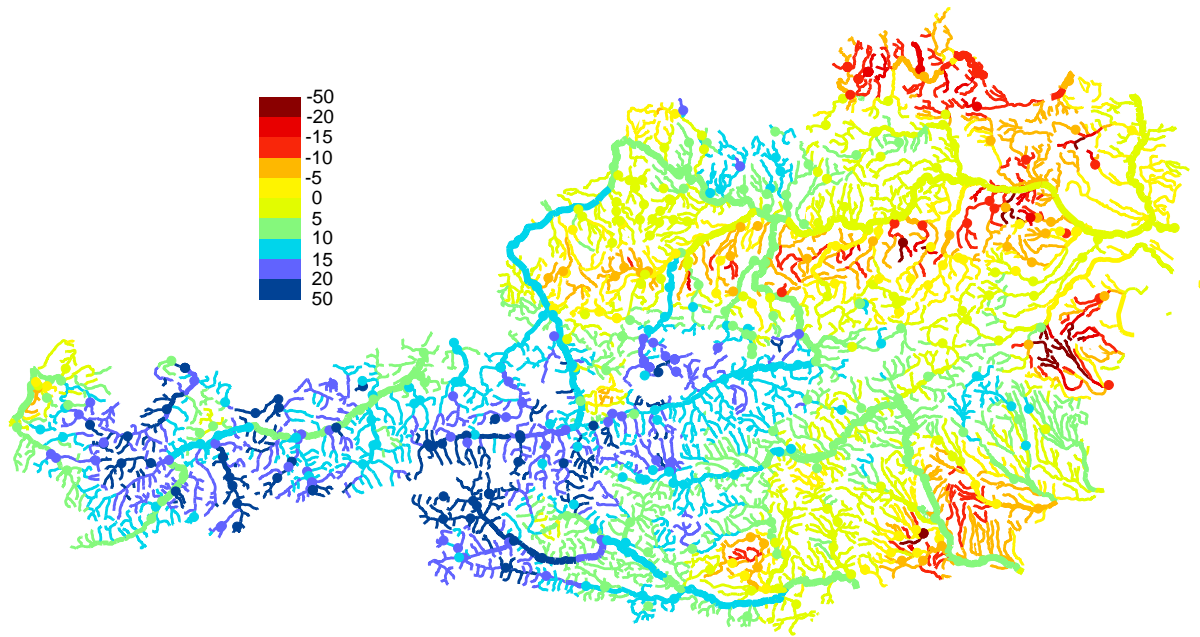
5.5.3 Auswertungen in Österreich

Zur Einschätzung möglicher Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf die Niederwässer wurden Niederschlag-Abflusssimulationen mit dem Delta-Change Ansatz durchgeführt. Die Vorgangsweise ist im Kapitel 4 des Berichtes beschrieben.

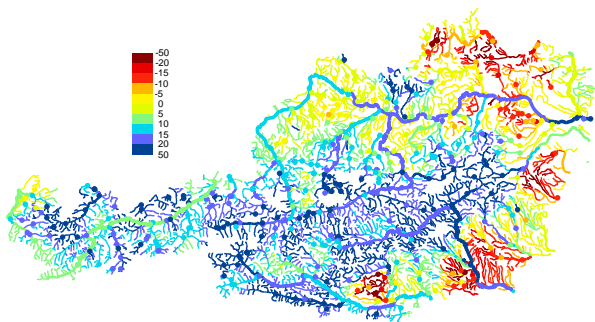
Die Szenarienrechnungen (Abbildung 5-21) zeigen das folgende Ergebnis:

- In den Alpen Österreichs (hochgelegene Gebiete, Winterniederwasserregime) zeigen die Szenarienrechnungen eine deutliche Zunahme der Abflüsse bei Niederwasser für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006. Die Zunahme beträgt etwa 10-25%. (*Harte Aussage*)
- In den niedrigen Gebieten Österreichs sowie im Alpenvorland geben die Szenarienrechnungen differenzierte Ergebnisse. In manchen Einzugsgebieten wird eine leichte Zunahme des Abflusses berechnet (z.B. Mühlviertel). In anderen Gebieten wird eine Abnahme des Abflusses bei Niederwasser von etwa 10-15% berechnet (z.B. Weinviertel, Nördliches Burgenland, Teile der Südsteiermark, Teile des niederösterreichischen Alpenvorlands). In Ausnahmefällen ist die Abnahme auch etwas größer. (*Mittelharte Aussage*)
- Die Abnahme der Abflüsse bei Niederwasser im Osten betrifft alle Jahreszeiten (*mittelharte Aussage*), die Zunahme der Abflüsse bei Niederwasser im Westen hingegen den Winter und das Frühjahr. (*Harte Aussage*)

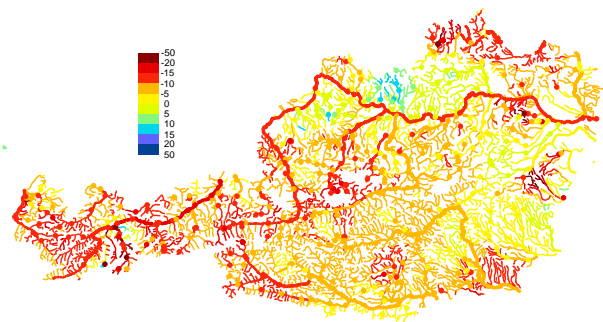
Zur Einschätzung der Unsicherheit der Szenarienrechnungen wurde der Parameter für die Abflussbildung gegenüber dem in den Szenarien in Abbildung 5-21 verwendeten Wert um ca. 10% erhöht. Durch die Parametervariation reduziert sich der simulierte Niederwasserabfluss. Das gibt einen Hinweis auf die Zuverlässigkeit des Abflussmodells unter der Annahme, dass die Szenarien des Niederschlags und der Lufttemperatur vollständig zutreffen. Die Unsicherheit der Klimaszenarien kommt noch hinzu. Aus Abbildung 5-22 erkennt man, dass das Vorzeichen der Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 im Wesentlichen gleich bleibt. Allerdings reduzieren sich die Niederwasserabflüsse im Osten stärker (um bis zu 30%).



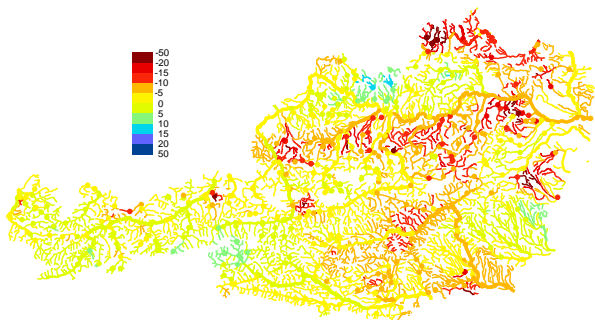
Delta Q_{95} 1976-2006 – Jahr



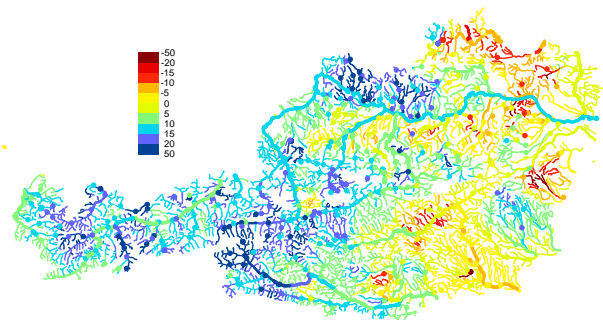
Delta Q_{95} 1976-2006 – Frühjahr (MAM)



Delta Q_{95} 1976-2006 – Sommer (JJA)

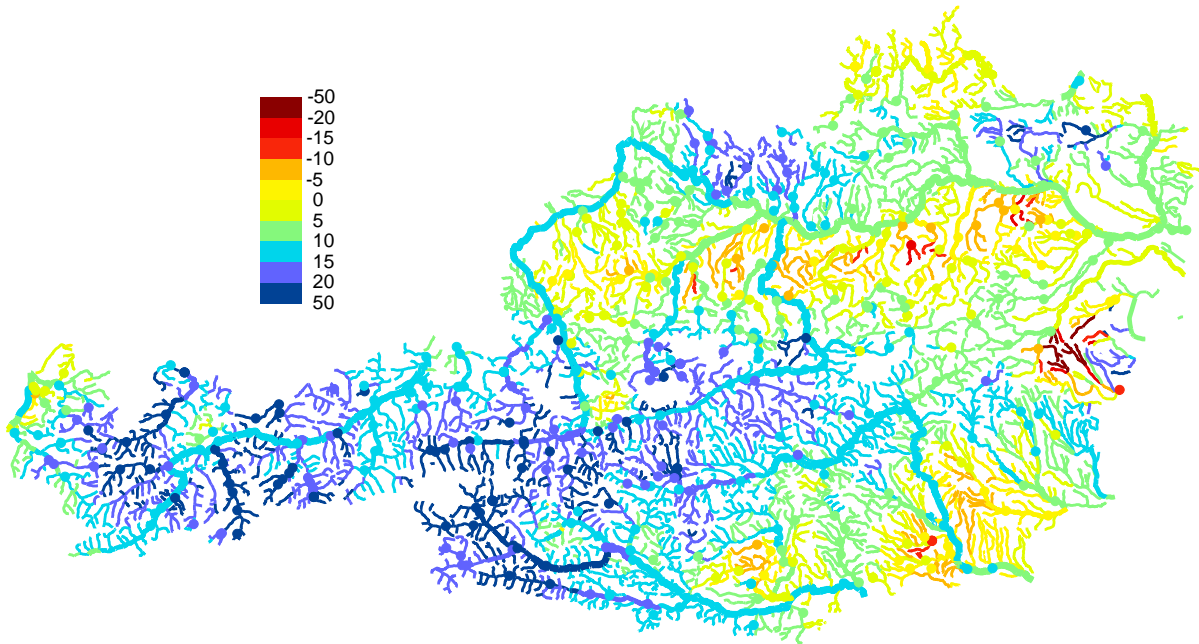


Delta Q_{95} 1976-2006 – Herbst (SON)

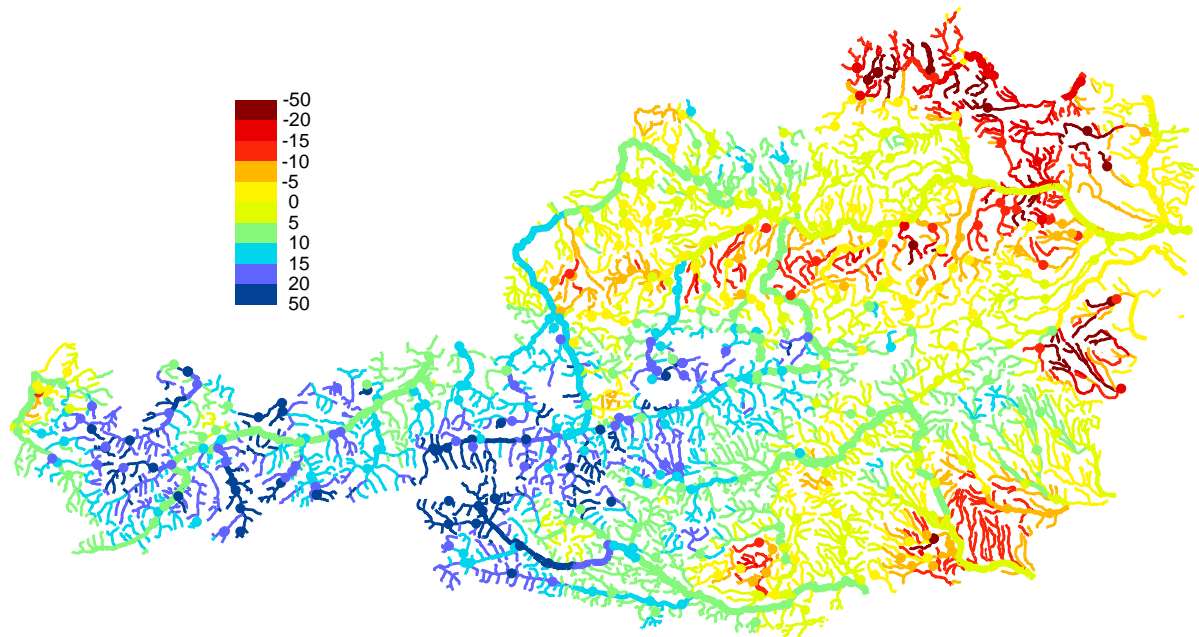


Delta Q_{95} 1976-2006 – Winter (DJF)

Abbildung 5-21: Änderungen in % des Q_{95} Niederwasserdurchflusses für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.



Delta Q_{95} 1976-2006 Jahr Parameter Beta = 1.00



Delta Q_{95} 1976-2006 Jahr Parameter Beta = 1,15 – 1,45

Abbildung 5-22: Unsicherheiten des simulierten Abflusses: Änderungen in % des Q_{95} Niederwasserdurchflusses für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit unterschiedlichen plausiblen Parametern des Niederschlag-Abflussmodells. Angenommen wird hier, dass die Szenarien des Niederschlags und der Lufttemperatur vollständig zutreffen.

5.6 Zusammenschau der Auswertungen für Österreich

Die Zusammenschau der Szenarienanalysen mit den Trendanalysen zeigt, dass die in den vergangenen Jahrzehnten beobachteten Trends in den Niederwasserdurchflüssen sich vermutlich fortsetzen werden. Die in der Vergangenheit beobachtete Zunahme der Niederwasserdurchflüsse in den alpinen Teilen Österreichs wird auch für die nächsten Jahrzehnte erwartet. Da diese Zunahme mit der Änderung der Lufttemperatur zusammenhängt, kann dies als harte Aussage angesehen werden. Im Flachland im Osten bzw. Südosten Österreich dürften sich die beobachteten Abnahmen ebenfalls fortsetzen, jedoch in geringem Ausmaß und räumlich differenziert. Diese Änderungen sind auch stark vom Niederschlagsregime abhängig. Es handelt sich deshalb um eine mittelharte Aussage.

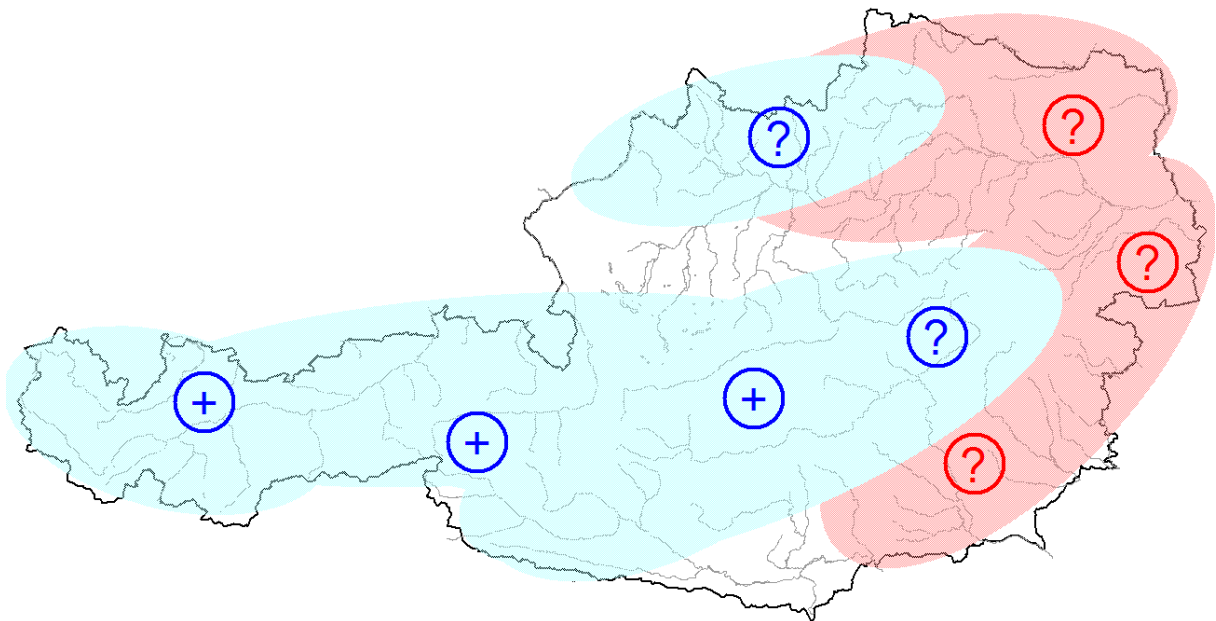


Abbildung 5-23: Generalisierte Änderungen der Q_{95} Niederwasserdurchflüsse aus den Szenarienanalysen (Delta-Change) entsprechend Abbildung 5-21. 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006.

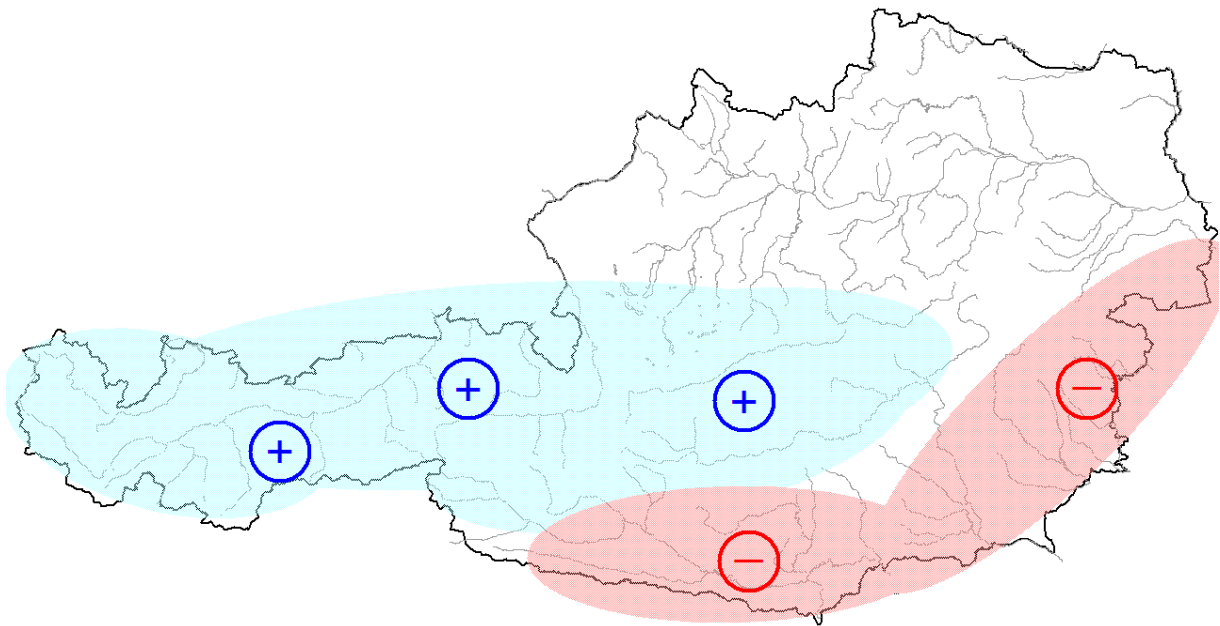


Abbildung 5-24: Generalisierte Trends von Jahresmaxima der Q_{95} Niederwasserdurchflüsse für die Reihe 1950-2007 (mindestens 40 Jahre) entsprechend Abbildung 5-8.

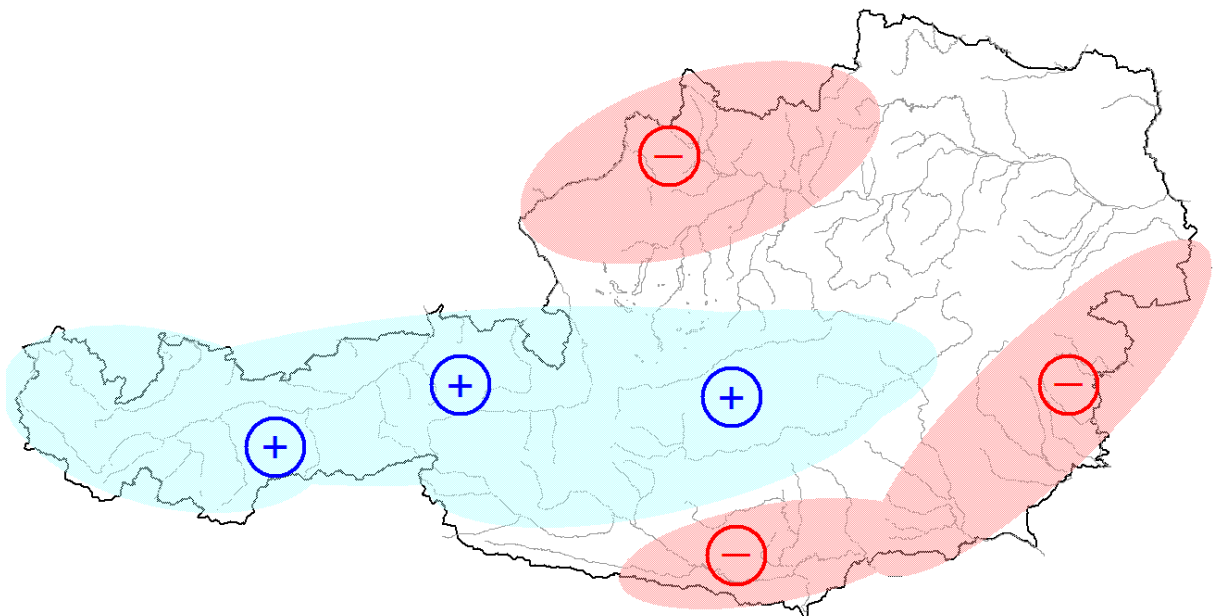


Abbildung 5-25: Generalisierte Trends von Jahresmaxima der Q_{95} Niederwasserdurchflüsse für die Reihe 1976-2007 (mindestens 25 Jahre) entsprechend Abbildung 5-9.

6. Wassertemperaturen in Flüssen

6.1 Kurzfassung

Situation in der Vergangenheit

- Die Trendanalysen zeigen an allen Messstellen steigende Wassertemperaturen (*harte Aussage*).
- Im Sommer nehmen die Wassertemperaturen wesentlich stärker zu als im Winter (*harte Aussage*).
- Im Flachland nehmen die Wassertemperaturen etwas stärker zu als im Gebirge (*weiche Aussage*).
- Die Trendanalysen ergeben eine etwas stärkere Zunahme der Wassertemperaturen im Vergleich zu den Szenarienrechnungen. Die Trendanalysen ergeben für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zur Periode 1976-2007 eine Zunahme von etwa 1°C (*mittelharte Aussage*).

Situation in der Zukunft

- Es wird eine generelle Zunahme der Wassertemperaturen erwartet (*harte Aussage*).
- Bei einer Zunahme der Lufttemperatur um 1°C nimmt die Wassertemperatur im Mittel um ca. 0.8 °C zu (räumliche Auswertungen) (*mittelharte Aussage*).
- Es ist zu erwarten, dass in Österreich die Wassertemperaturen von 1976-2007 zu 2021-2050 im Mittel zwischen 0.6 und 0.9°C zunehmen (*mittelharte Aussage*).
- Im Sommer ist die Zunahme wesentlich stärker als im Winter. Das ist konsistent mit den Trendanalysen. Im Sommer liegt die Zunahme bei etwa 0.7 bis 1.1°C, im Winter bei etwa 0.4 bis 0.5°C (*mittelharte Aussage*).
- Im alpinen Bereich ergeben die Simulationen etwas größere Zunahmen, wobei die Gletscherschmelze die Zunahmen reduzieren könnten (*weiche Aussage*).
- Eine Änderung der Wassertemperatur um 0.8°C entspricht einer Seehöhendifferenz von etwa 100 m (räumliche Auswertungen) (*mittelharte Aussage*).

Anpassungsmaßnahmen

- Die zukünftig zu erwartenden höheren Oberflächenwassertemperaturen sind bei bestehenden und zukünftigen Wärmeeinleitungen zu berücksichtigen.

6.2 Vorgangsweise

Methodisch erfolgt die Beurteilung von Klimaauswirkungen auf die Temperaturen österreichischer Fließgewässer auf Basis von drei Arten existierender Untersuchungen in Österreich.

In einem ersten Schritt erfolgt die Analyse der Gewässertemperaturen für den Ist-Zustand, d.h. die flächenhafte Ermittlung mittlerer Wassertemperaturen im Zeitraum 1976-2007. Dies ist notwendig, um Klimaauswirkungen auf die Temperaturen österreichischer Fließgewässer räumlich differenziert beurteilen zu können.

Die erste Art der Untersuchung von Klimaauswirkungen sind Trendanalysen beobachteter Daten. Die bestehenden Trenduntersuchungen werden beurteilt in Hinblick auf die Signifikanz von Trends und deren regionale Unterschiede. Trendanalysen hydrologisch-wasserwirtschaftlicher Kenngrößen werden dann argumentativ in Beziehung gesetzt mit Trends meteorologischer Größen wie Niederschlag und Lufttemperatur. Daraus lassen sich

Schlüsse ziehen über weiche bis harte Fakten von Auswirkungen des Klimawandels aus wasserwirtschaftlicher Perspektive.

Die zweite Art der Beurteilung von Klimaauswirkungen beruht auf Szenarienrechnungen. Mit einem statischen Modell werden beobachtete Gewässertemperaturen mit der Änderung der Lufttemperatur von Klimamodellen in Beziehung gesetzt, um so die zukünftigen Änderungen der Wassertemperatur vorherzusagen. Der Vorteil solcher Untersuchungen besteht gegenüber Trendanalysen darin, weiter in die Zukunft hinaus extrapolieren zu können, allerdings sind die Ergebnisse nur so zuverlässig, wie es die verwendeten Modelle und Eingangsgrößen erlauben.

Bei der dritten Art von existierenden Einschätzungen werden keine Berechnungen durchgeführt, sondern Schlüsse auf Basis allgemeiner Überlegungen gezogen. Dabei werden die wichtigsten Prozesse sehr vereinfacht gedanklich abgebildet. Der Vorteil dieser Vorgangsweise besteht darin, nachvollziehbare Zusammenhänge aufzuzeigen, die für die Entscheidungsfindung sehr wichtig sind, allerdings ist die Quantifizierung der Größenordnung von Einflüssen nicht leicht.

6.3 Situation in der Vergangenheit

6.3.1 Bestimmung des Ist-Zustandes

Grundlage für die Ermittlung des Ist-Zustandes waren die beobachteten Wassertemperaturen von 230 Stationen des Hydrographischen Zentralbüros. Für diese Stationen wurden mittlere Gewässertemperaturen für jeden Monat mit der maximalen Beobachtungsperiode von 1976 bis 2007 herangezogen. Im Hydrographischen Jahrbuch von Österreich wird die Wassertemperatur in Form von Monatsmittelwerten mit der Angabe der Minima und Maxima dargestellt. Aufgrund der Nachfrage nach zeitlich höher aufgelösten Informationen wurde mit dem Update der Jahrbuchdaten 2007 das Internetangebot des Hydrographischen Zentralbüros auf Tagesmittelwerte umgestellt. Werden nun diese Daten als Basis für die Analyse von Veränderungen im Zusammenhang mit dem Anstieg der Lufttemperatur verwendet, so wäre die unterschiedliche Art der Entstehung der Daten zu berücksichtigen. Generell wurde und wird die Wassertemperatur auf folgende Arten beobachtet:

- mit dem Schöpfthermometer zu einem – im optimalen Fall – immer gleichen Zeitpunkt (ZP),
- analoge Aufzeichnung mit einem Schreibgerät; da diese Schreibstreifen ursprünglich erst mit der Einführung von HyDaMS digitalisiert werden konnten, wurden die Daten als Tagesmittelwerte gespeichert,
- digitale Aufzeichnung mit einem Datensammler, diese Daten wurden als zeitlich hochaufgelöste Datenreihe gespeichert.

Sowohl der Ablesezeitpunkt als auch die Entstehungsart hat sich im Verlauf der Messstellengeschichte verändert. Im hydrographischen Jahrbuch ist die Beobachtungsart mit einem für das jeweilige Jahr gültigen Hinweis – Angabe der Beobachtungszeit bzw. Ablesezeitpunkt und Tagesmittelwert TM bei Schreibgeräten – angegeben. Ändert sich die Erfassungsart an einer Messstelle, so ist dies nur durch den Vergleich in den entsprechenden Jahrbüchern festzustellen. Die digital zum Download verfügbaren Zeitreihen enthalten noch keinen Hinweis auf die von Messstelle zu Messstelle unterschiedliche Messstellenhistorie.

Wie Abbildung 6-1 zeigt, wurden ab Mitte der 1990-iger Jahre viele Messstellen von der Uhrzeit-Ablesung (ZP) auf die kontinuierliche Erfassung mit Datensammler umgestellt. Wenn nun ein Beobachter seine Messung in der Vergangenheit am frühen Vormittag (z.B. 08:00

Uhr) durchgeführt hatte und die Messstelle auf Datensammlerbetrieb umgestellt wurde, so wären für eine Trendanalyse die aus dem Internet erhältlichen Eingangsdaten zu korrigieren.

Auf Grund der zeitlichen Vorgaben des vorliegenden Projektes konnten die Eingangsdaten für die Trendanalyse der Wassertemperaturen nicht homogenisiert bzw. korrigiert werden. Um trotzdem Trends der Wassertemperaturen bewerten zu können, wurde vom Hydrographischen Zentralbüro für ca. 20 Messstellen an denen eine Umstellung von einer Methode zur Erfassung mit Datensammler vorgenommen wurde, ein Vergleich der Ergebnisse mit korrigierten Daten vorgenommen. Der Vergleich ergab, dass sich die wesentlichen Aussagen der Trendanalysen nicht ändern. Die in Kapitel 6.3.2 ermittelten Trends (Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10) waren bei den verglichenen Wassertemperaturzeitreihen sowohl mit als auch ohne Korrektur signifikant. Allerdings reduzierte sich die Neigung des Trends bei den korrigierten Werten etwas (z.B. von 0,03 auf 0,02 °C/Jahr im Zeitraum 1976 – 2007). Wegen der räumlichen Konsistenz wurden die folgenden Auswertungen mit unkorrigierten Daten durchgeführt.

In Abbildung 6-2 sind die mittleren jährlichen Temperaturen der Stationen dargestellt. In Oberösterreich wurden mittlere Jahreswerte von 7 bis 10 °C beobachtet. Im Osten Österreichs treten Jahresmittelwerte von bis zu 11°C auf. Am Alpennordrand wurden Jahreswerte um 7-8°C beobachtet, während im alpinen Bereich Mittelwerte um 3-6°C auftreten

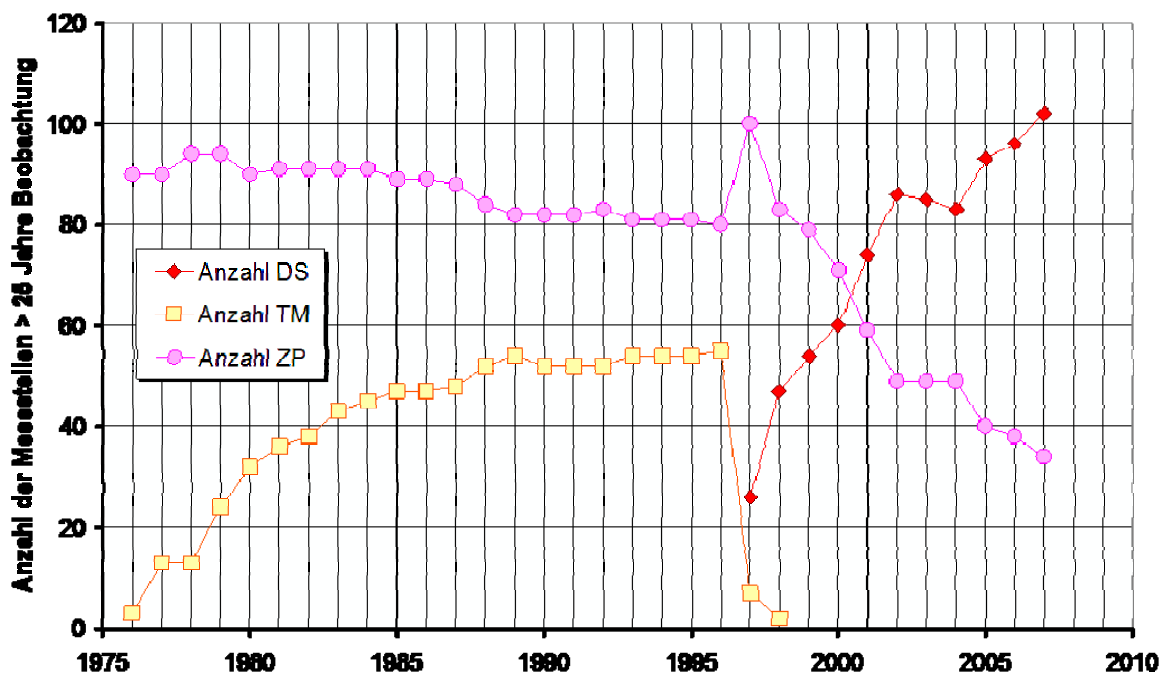


Abbildung 6-1: Entwicklung der Methode zur Messung der Wassertemperatur an Oberflächengewässern in Österreich (ZP ... Schöpfthermometer zum Zeitpunkt, TM ... Tagesmittelwert der analogen Aufzeichnung, DS ... Datensammler)

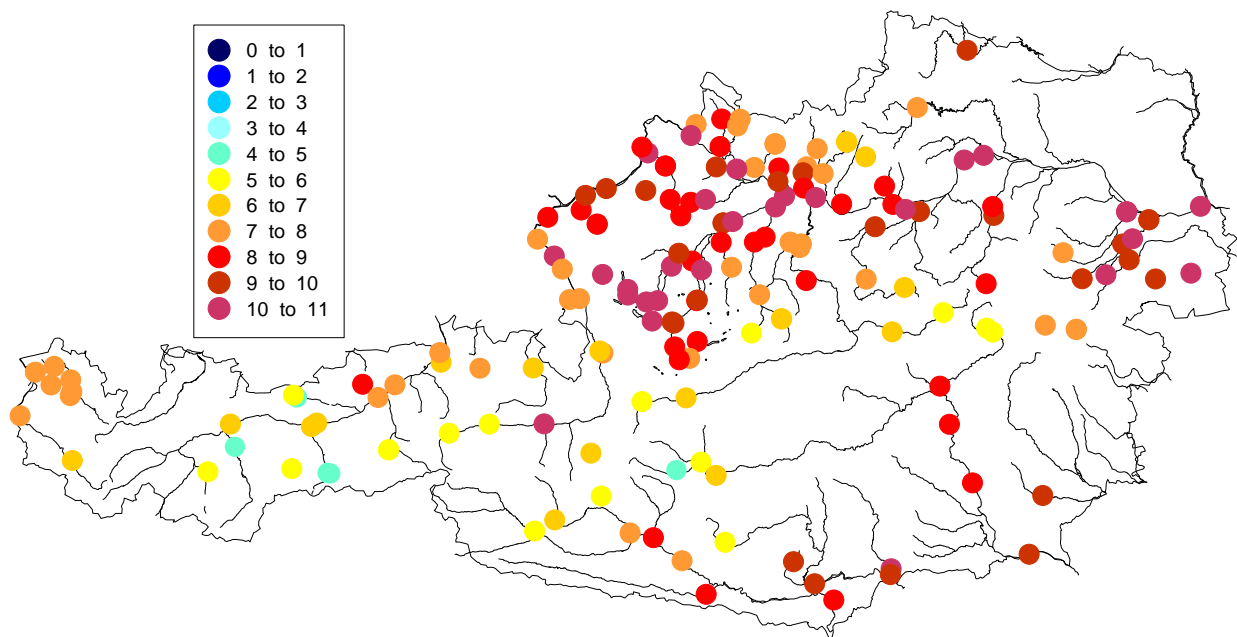


Abbildung 6-2: Beobachtete mittlere jährliche Wassertemperatur (°C) der Periode 1976-2007.

Um die Stationswerte räumlich auf das Gewässernetz Österreichs zu übertragen, wurde das External Drift Top-Kriging Verfahren benutzt. Top-Kriging (Skoien et al., 2006) ist ein geostatistisches Verfahren, welches die Relationen von Ober- und Unterliegern topologisch korrekt berücksichtigt. Stellen am gleichen Flusslauf werden dabei als ähnlicher angesehen, als Stellen die nicht am gleichen Flusslauf liegen, auch wenn sie die gleiche Distanz h aufweisen. Die mittleren Wassertemperaturen besitzen in Österreich eine starke Abhängigkeit von der Seehöhe (Abbildung 6-3). Um diese Abhängigkeit in der räumlichen Übertragung der Wassertemperaturen korrekt zu berücksichtigen, wurde in einem ersten Schritt eine exponentielle Regressionsbeziehung (Laaha, 2007) mit der Seehöhe der Form

$$T^* = 11.487 * e^{-0.0008 * H} \quad (1)$$

angenommen, wobei T^* die Wassertemperatur (°C) und H die Seehöhe der Pegelstelle (m a.s.l.) ist. In einem zweiten Schritt wurden die Residuen mittels Top-Kriging räumlich übertragen. Untersuchungen von Laaha (2007) zeigen, dass bei der räumlichen Interpolation von Gewässertemperaturen die gewählte Methode gegenüber anderen Regionalisierungsverfahren deutlich bessere Ergebnisse liefert.

In Abbildung 6-4 ist das Ergebnis der räumlichen Übertragung der mittleren jährlichen Wassertemperaturen dargestellt. Die höchsten mittleren jährlichen Wassertemperaturen sind im Weinviertel und im Burgenland zu erkennen. Das Jahresmittel beträgt hier etwa 10-11°C. Mit zunehmender Seehöhe sinkt die mittlere Wassertemperatur ab. In den höher gelegenen Flüssen Tirols beträgt die mittlere Jahrestemperatur nur etwa 1-3°C.

In den Abbildung 6-5 bis Abbildung 6-8 sind die mittleren Wassertemperaturen für die vier Jahreszeiten getrennt dargestellt. Die räumlichen Muster sind ähnlich der räumlichen Verteilung der Jahreswerte mit wärmeren Temperaturen im Osten und niederen Temperaturen in den alpinen Flüssen im Westen. Im Winter betragen die Wassertemperatur (mit Ausnahme der warmen Fische) zwischen 0 und 4°C, während im Sommer im Osten Wassertemperaturen bis über 20°C geschätzt werden.

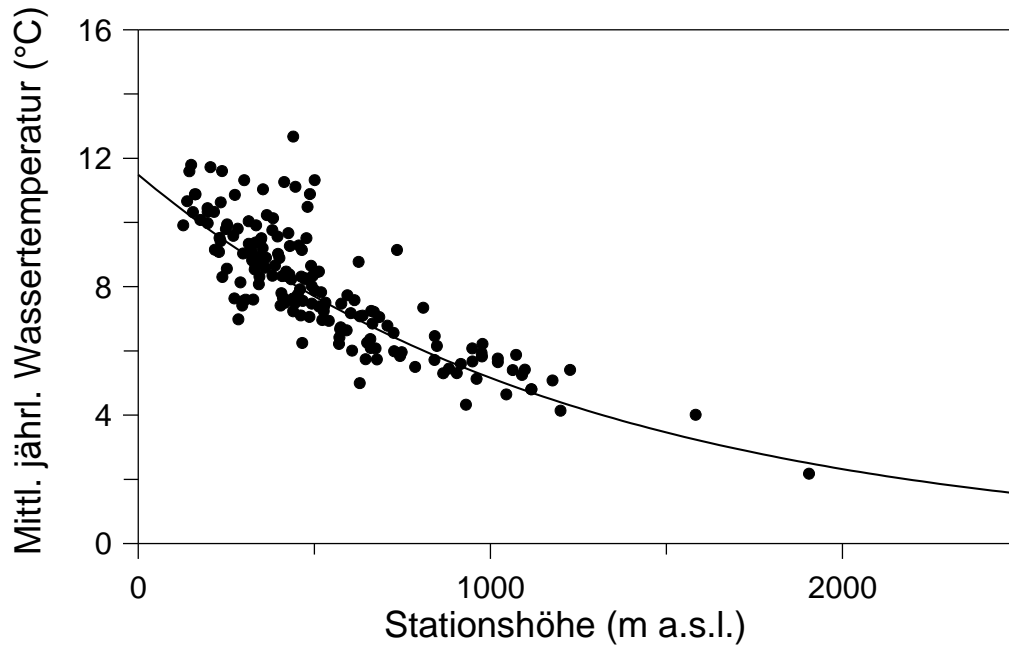


Abbildung 6-3: Abhängigkeit der mittleren jährlichen Wassertemperatur von der Stationshöhe

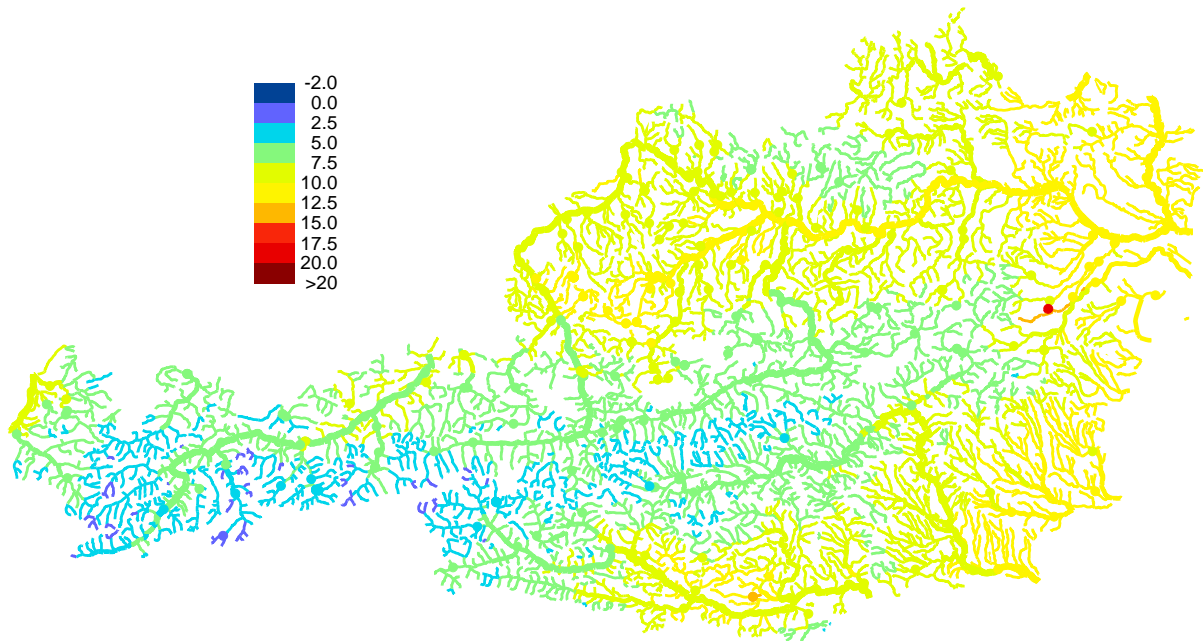


Abbildung 6-4: Mittlere jährliche Wassertemperatur (°C) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).

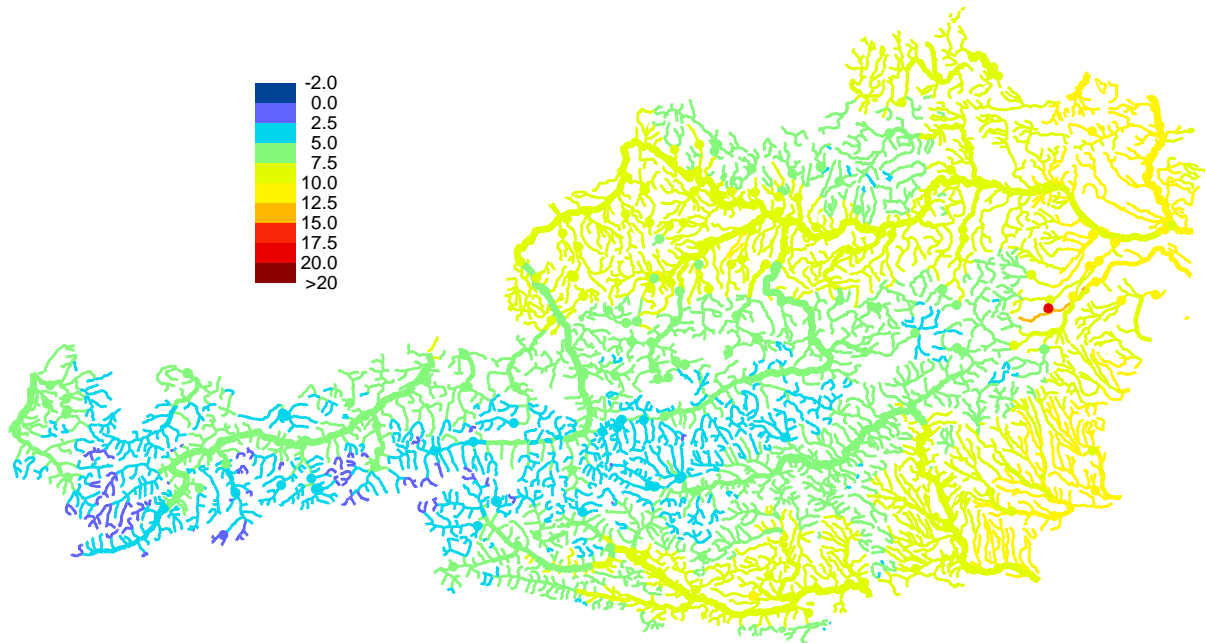


Abbildung 6-5: Mittlere Wassertemperatur (°C) im Frühling (März-Mai) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).

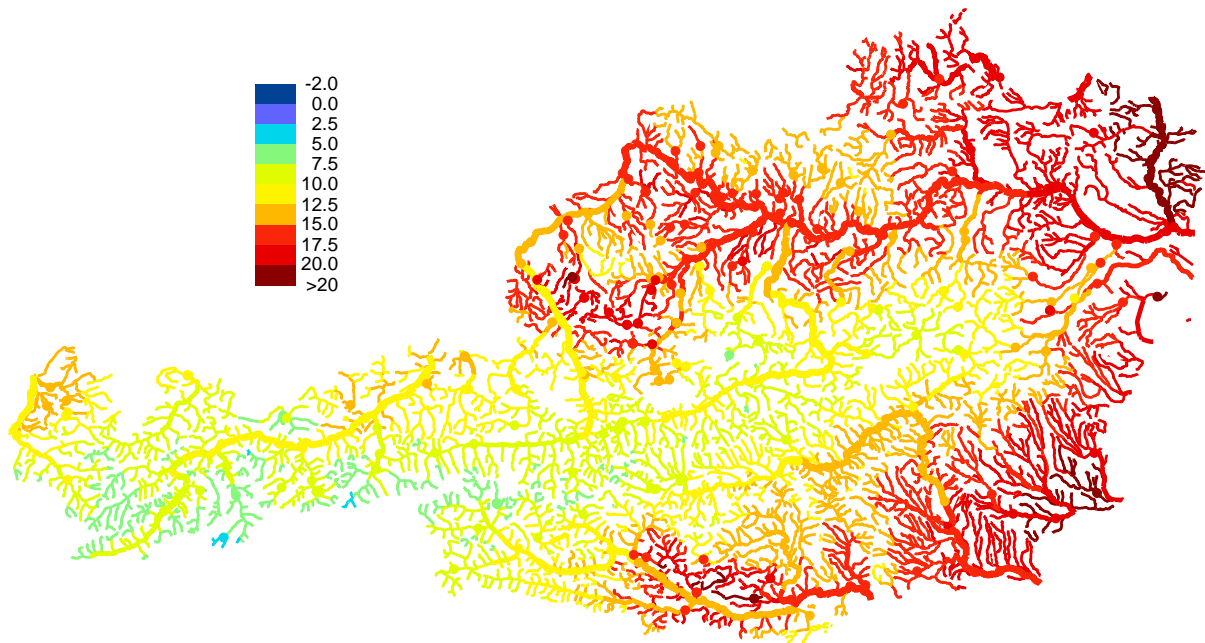


Abbildung 6-6: Mittlere Wassertemperatur (°C) im Sommer (Juni-Aug.) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).

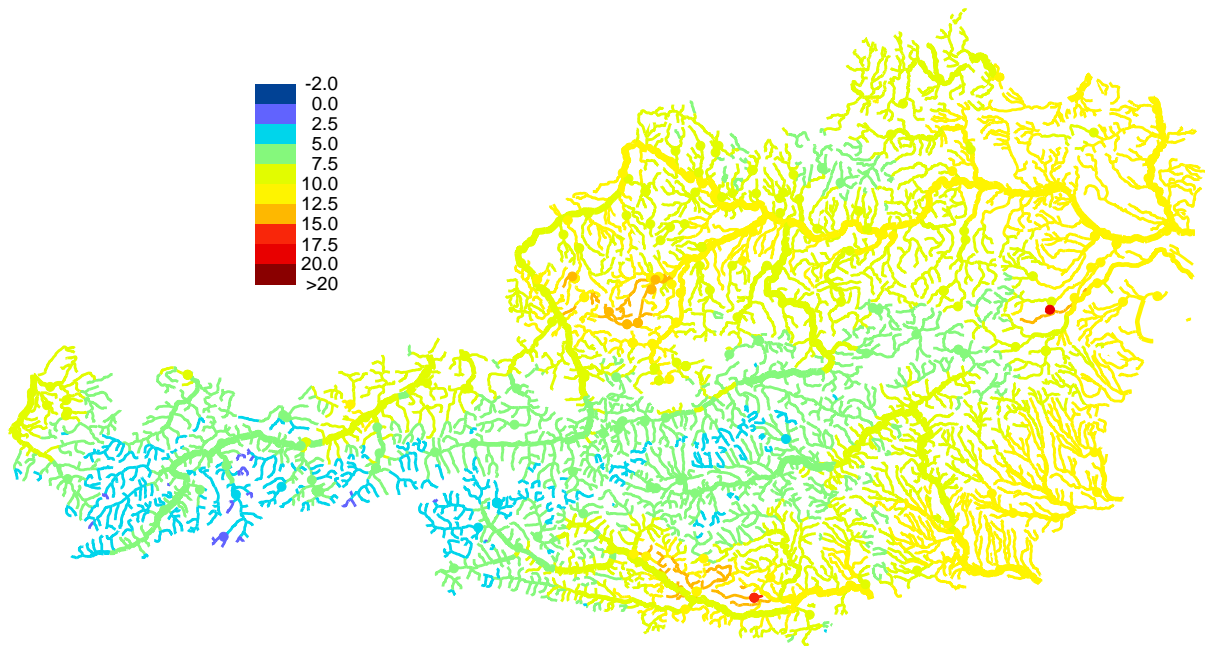


Abbildung 6-7: Mittlere Wassertemperatur (°C) im Herbst (Sept.-Nov.) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).

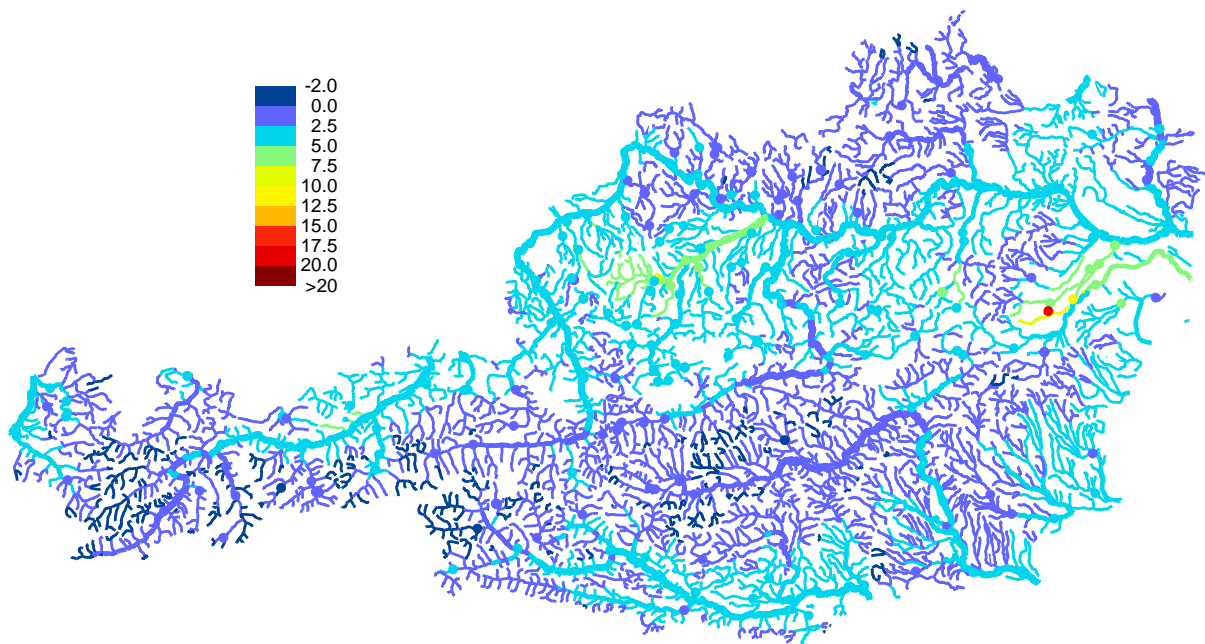


Abbildung 6-8: Mittlere Wassertemperatur (°C) im Winter (Dez.-Feb.) der Periode 1976-2007. (Beob. Wassertemperaturen wurden mittels External Drift Top-Kriging räumlich übertragen).

6.3.2 Trendanalysen

Für die Trendanalysen wurden Reihen der Wassertemperaturen ausgewertet. Wie im Kapitel 3.4.3 wurde der Mann-Kendall-Test (MK) herangezogen (Burn und Hag Elnur, 2002). In den Mann-Kendall-Test geht die Größe des Niederwassers nur in ihrem relativen Wert zu den anderen Niederwässern einfließt, er ist also nicht auf Ausreißer sensitiv.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Trendanalysen für Österreich. Blau und grün zeigen fallende Trends, orange und rot zeigen steigende Trends und die grauen Kreise zeigen keinen signifikanten Trend. Die Zahlen bedeuten den Anstieg der Trendgeraden pro Jahr. Ein Wert von 0.05 bedeutet etwa einen Anstieg der Wassertemperatur von 0.5°C in 10 Jahren. In Abbildung 6-9 sind die Trends der Periode 1976-2007, in Abbildung 6-10 die Trends der Periode 1986-2007 dargestellt.

Die Trendanalysen der Periode 1976-2007 generell steigende Trends. Die signifikanten Trends haben im Mittel eine Steigung von etwa 0.03, das entspricht einer Steigung von 3°C in 100 Jahren. Damit zeigen die Trendanalysen eine etwas stärkere Zunahme der Wassertemperaturen im Vergleich zu den Szenarienrechnungen (Kapitel 6.4), die eine Zunahme von 0.3-0.6°C von der Periode 1976-2007 zu 2021-2050 prognostizieren. Die Trendanalysen würden für diesen Zeitraum eine Zunahme von etwa 1°C ergeben. Die statistischen Trends sind im Sommer größer als im Winter, und tendenziell sind die Zunahmen der Wassertemperaturen ermittelt durch die Trendanalysen in den flacheren Gebieten etwas größer als in den höher gelegenen Gebieten.

Eine ähnliche räumliche Verteilung ist in den Trends der Periode 1986-2007 (Abbildung 6-10) zu erkennen, wobei hier einzelne negative Trends auftreten. Diese Abnahme scheint jedoch ein Artefakt der kurzen Beobachtungsdauer zu sein. In Abbildung 6-11 sind die Zeitreihen der jährlichen Mittelwerte und der jahreszeitlichen Mittelwerte für ausgewählte Stationen dargestellt.

Wassertemperatur Jahresmittelwerte
 Periode 1976 - 2007 (mind. 30 Jahre)

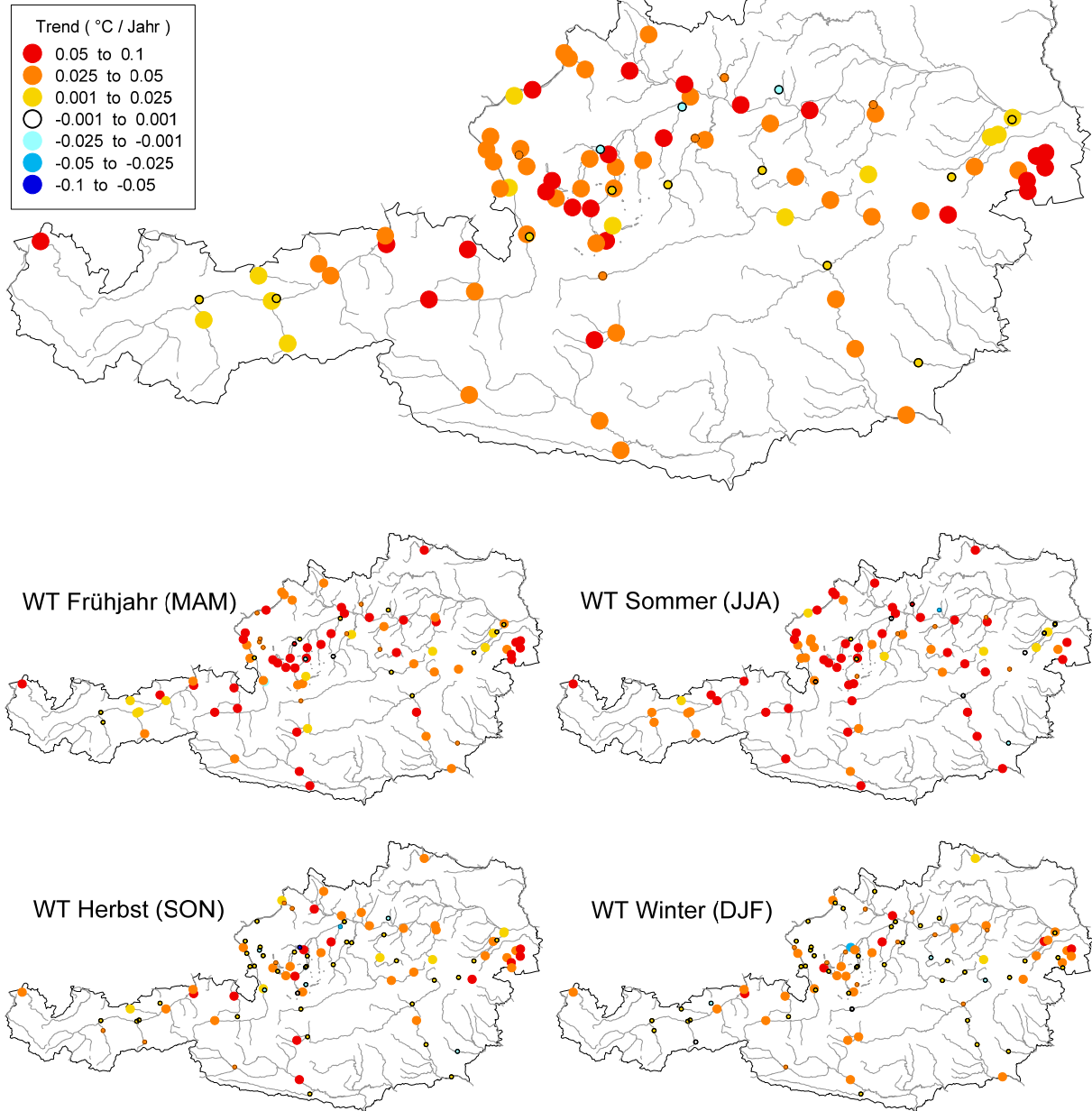


Abbildung 6-9: Trends in mittl. Gewässertemperaturen für die Reihe 1976-2007: Große Kreise rot: steigende Trends, Große Kreise blau: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.

Wassertemperatur Jahresmittelwerte Periode 1986 - 2007 (mind. 20 Jahre)

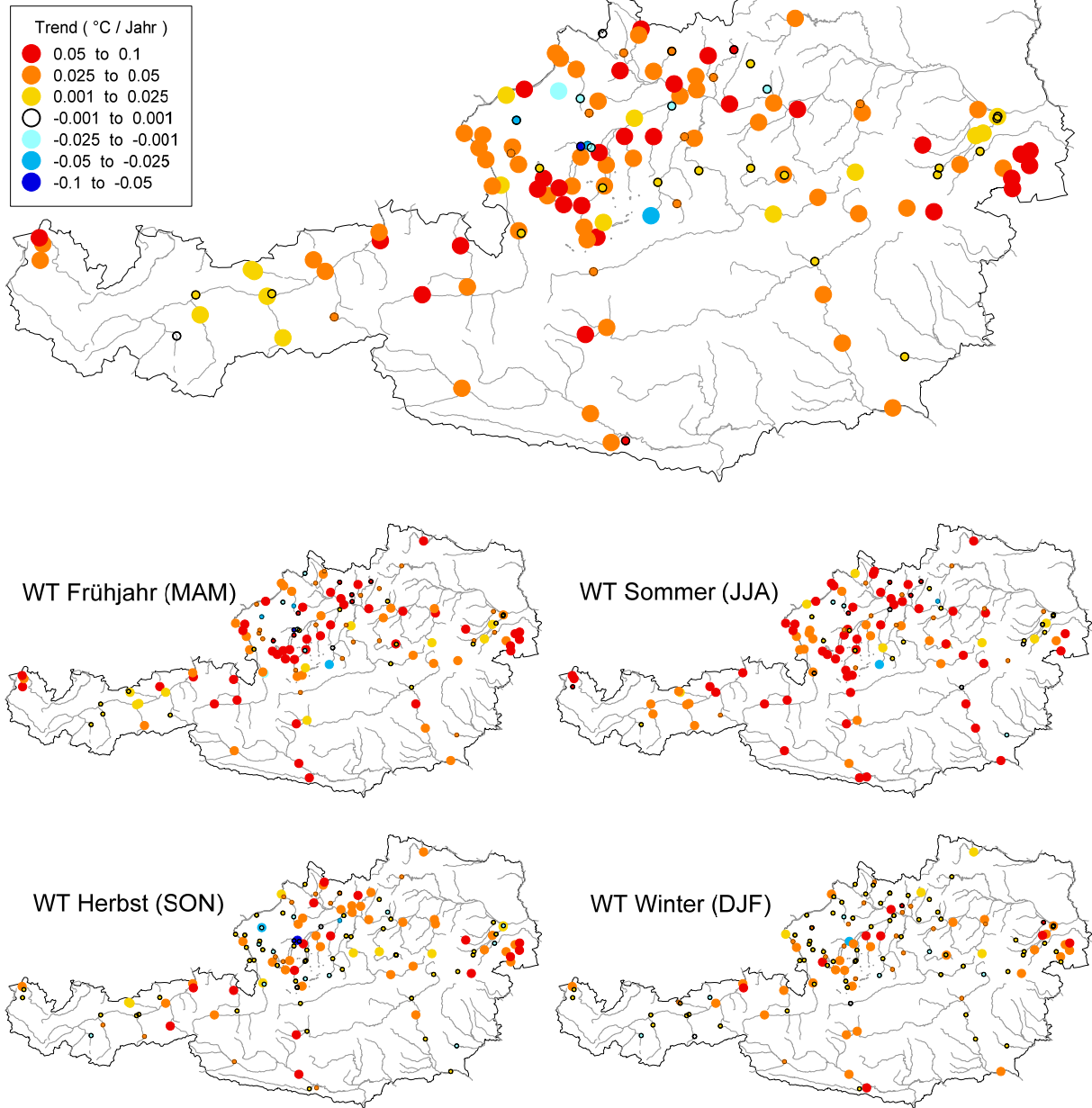
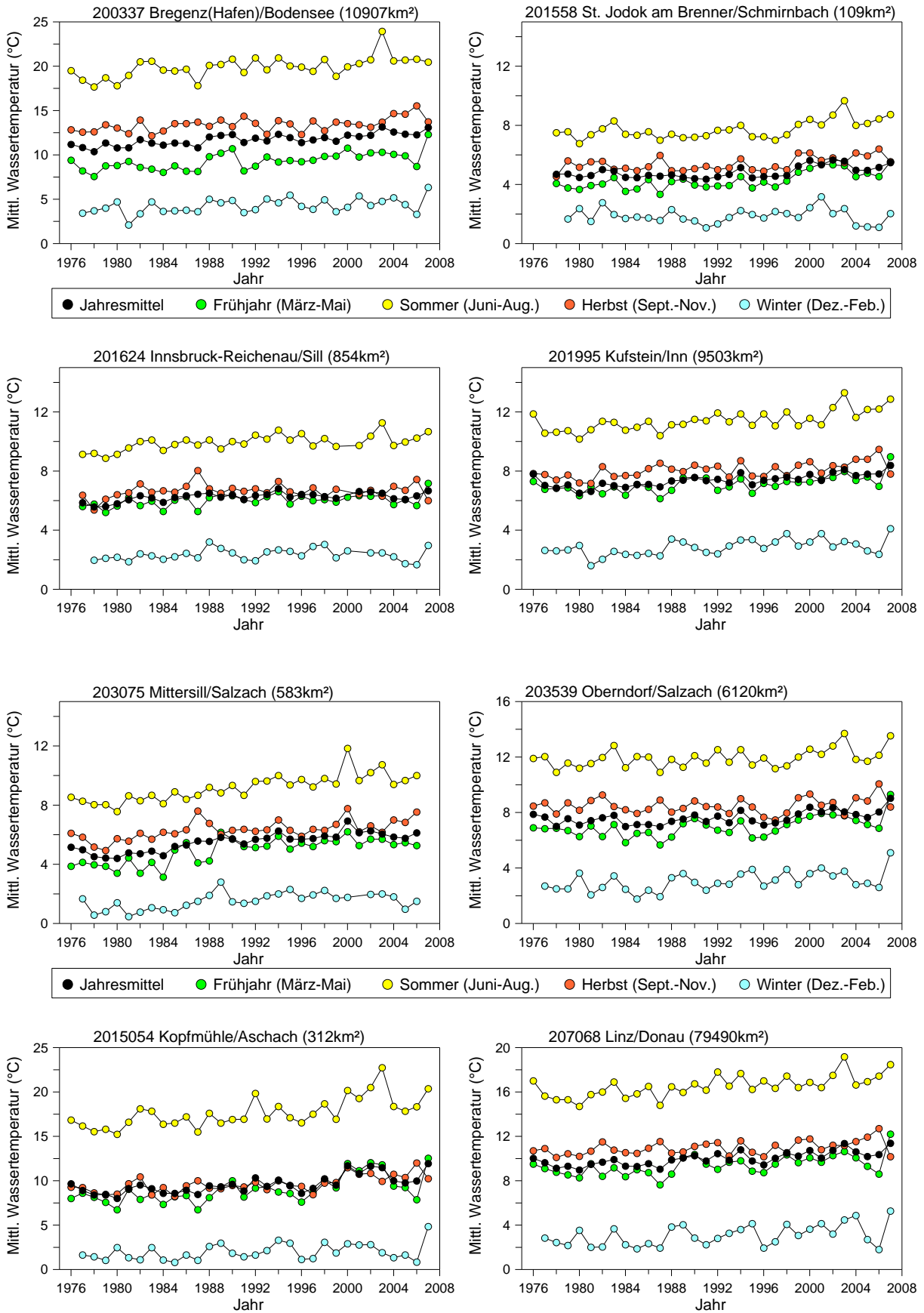


Abbildung 6-10: Trends in mittl. Gewässertemperaturen für die Reihe 1986-2007: Große Kreise rot: steigende Trends, Große Kreise blau: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant.



Wassertemperaturen in Flüssen

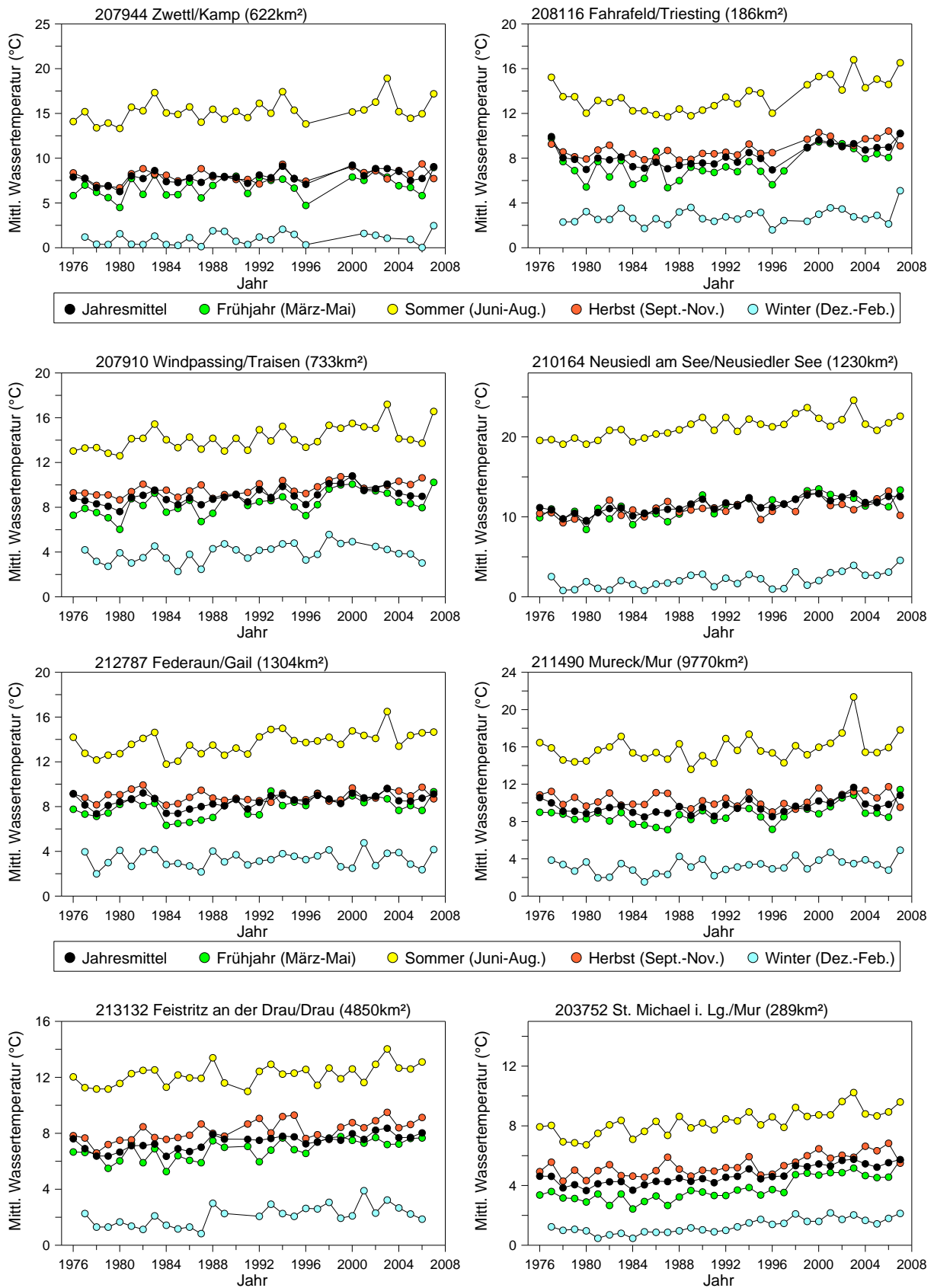


Abbildung 6-11: Zeitreihen der mittleren Wassertemperaturen in ausgewählten Fließgewässern. Schwarz: Jahresmittel, Grün: Frühjahr, Gelb: Sommer. Rot: Herbst, Blau: Winter.

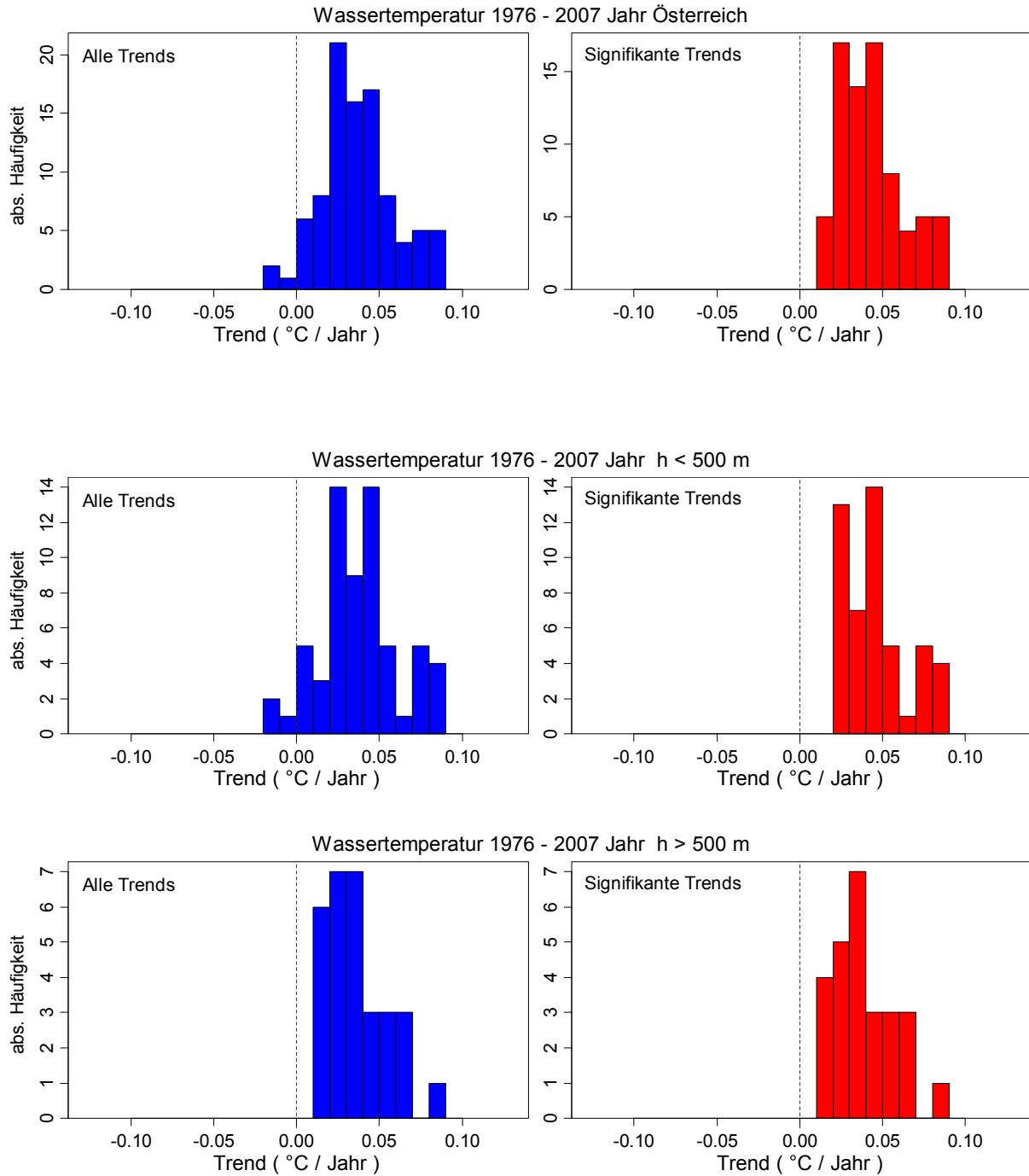


Abbildung 6-12: Histogramme der jährlichen Trends in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: Pegelhöhe unter 500 m. Unten: Pegelhöhe über 900 m.

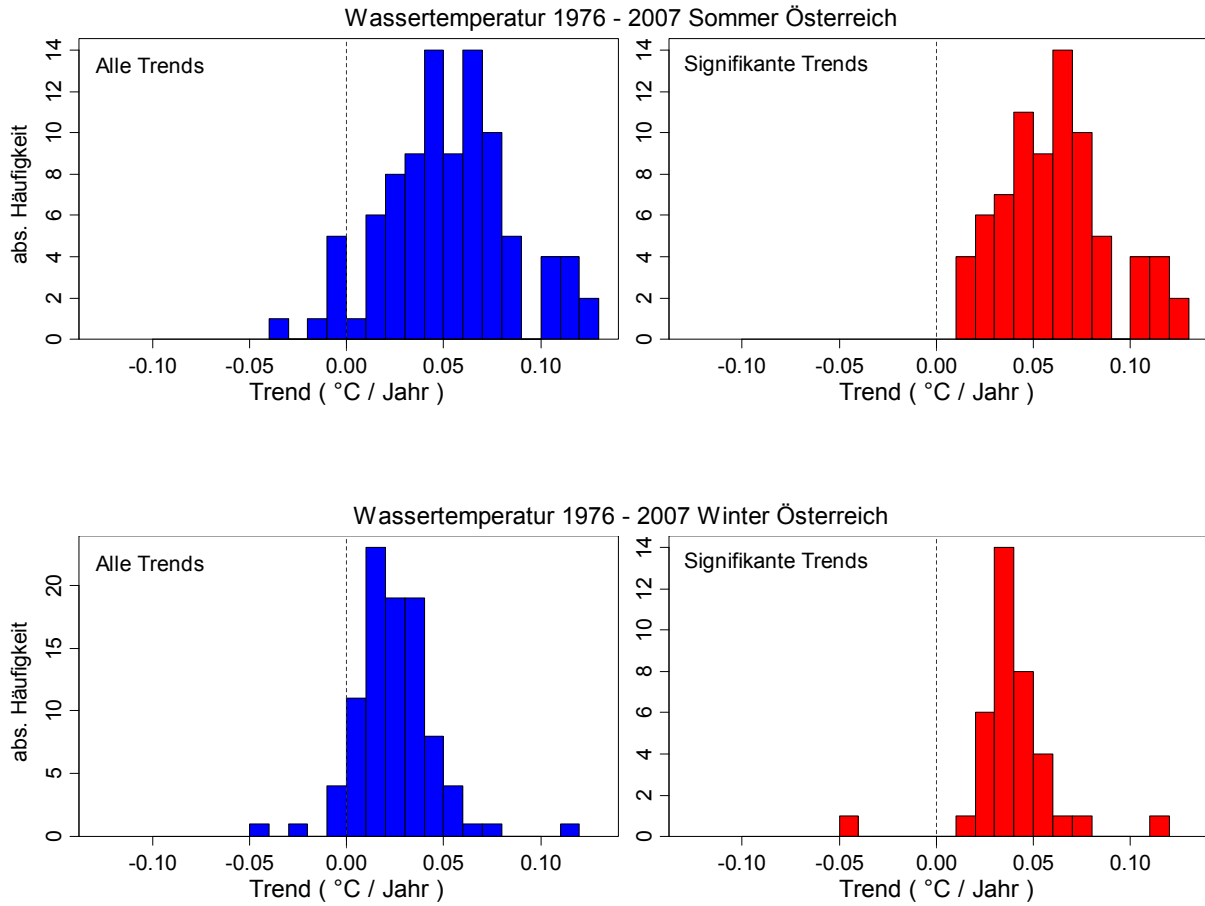


Abbildung 6-13: Histogramme der saisonalen Trends in der Periode 1976 – 2007, mit mindestens 25 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich Sommer. Unten: ganz Österreich Winter.

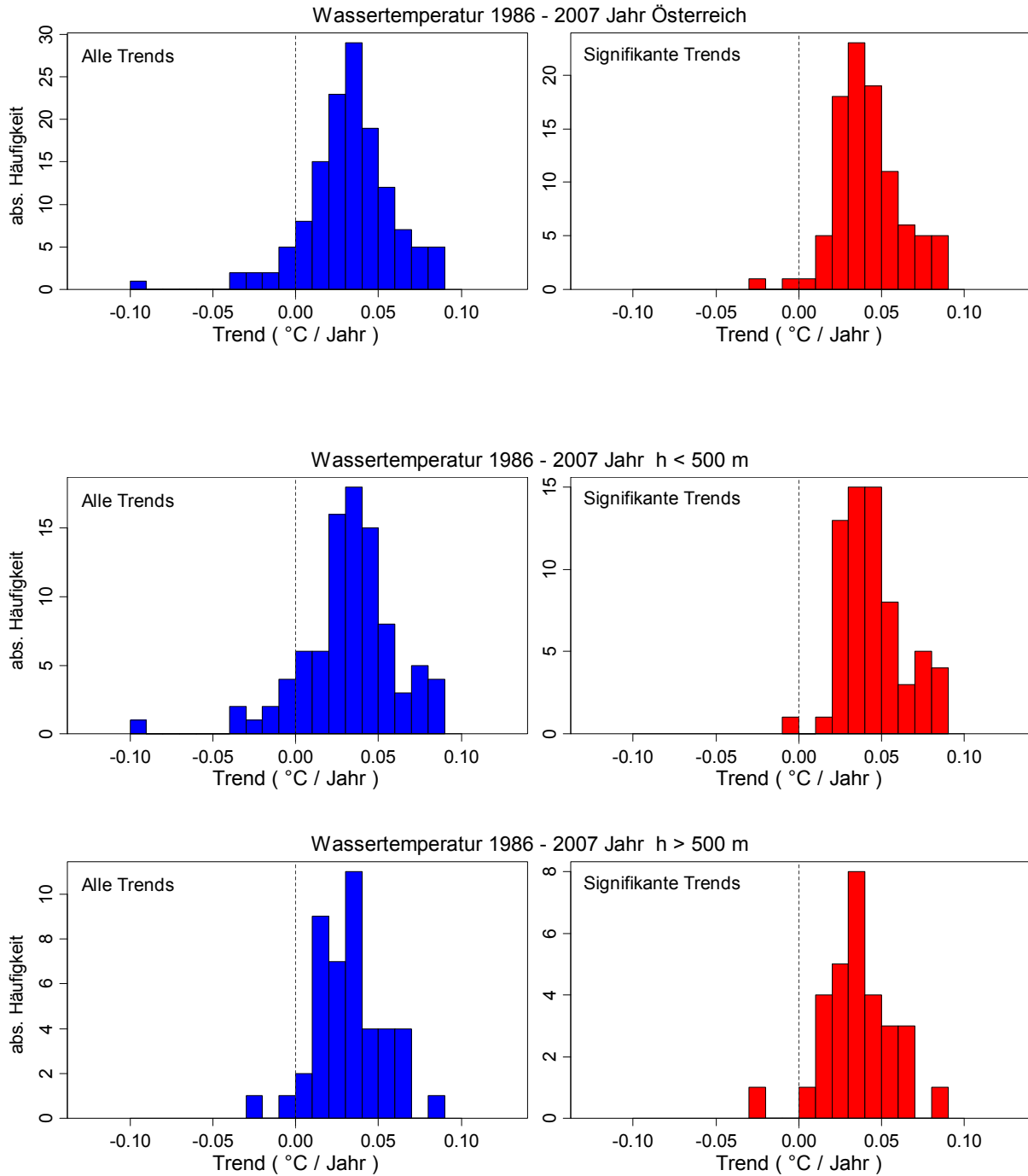


Abbildung 6-14: Histogramme der jährlichen Trends in der Periode 1986 – 2007, mit mindestens 15 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich. Mitte: Pegelhöhe unter 500 m. Unten: Pegelhöhe über 900 m.

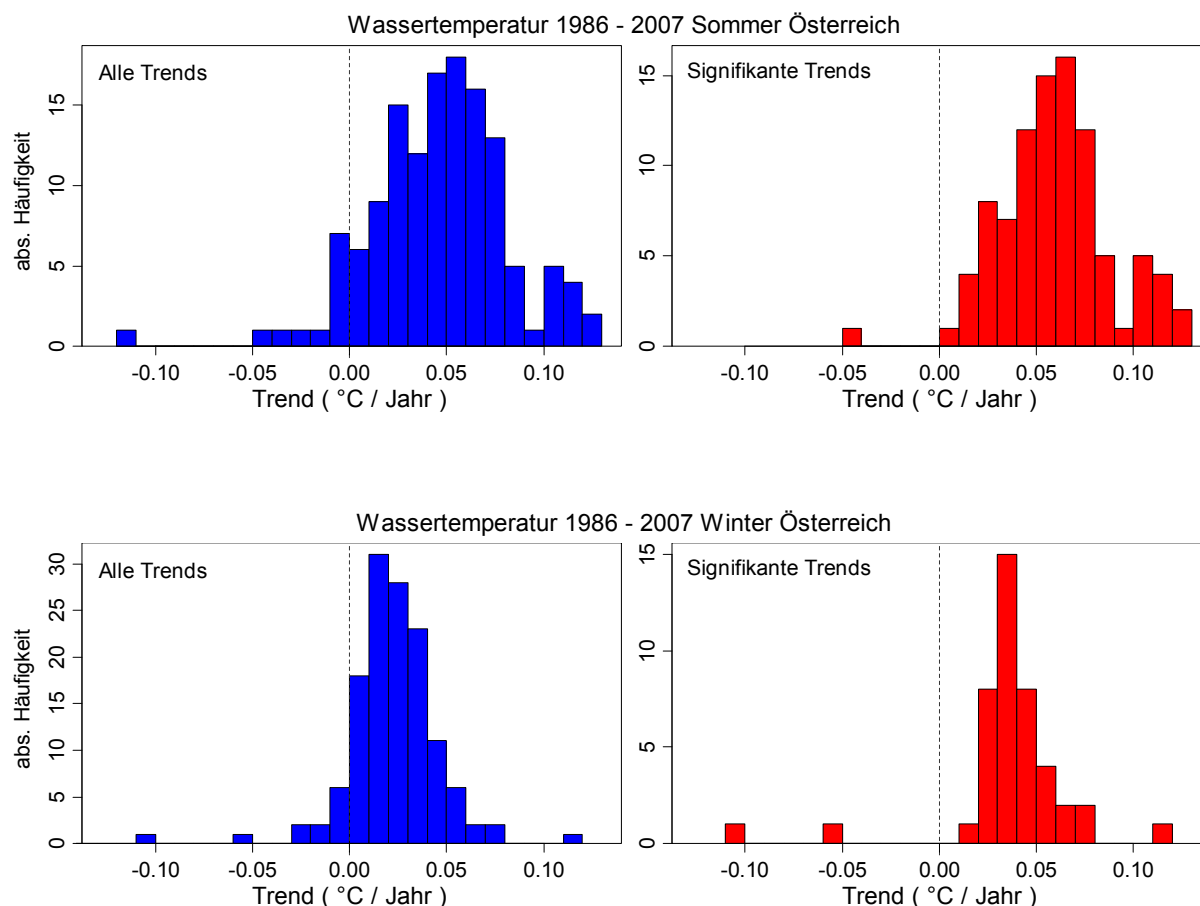


Abbildung 6-15: Histogramme der saisonalen Trends in der Periode 1986 – 2007, mit mindestens 15 Jahre in der Trendberechnung. Oben: ganz Österreich Sommer. Unten: ganz Österreich Winter.

6.4 Situation in der Zukunft

Wassertemperaturen sind i.d.R. stark abhängig von den umgebenden Lufttemperaturen. Diese Abhängigkeit wurde im Folgenden benutzt um die Veränderungen der Wassertemperaturen im Österreich zu analysieren. Abbildung 6-16 zeigt die zu erwartende Veränderung der Lufttemperatur in Österreich berechnet mit dem regionalen Klimamodell CLM für die Periode 2021-2050 zu dem Referenzzeitraum 1961-90 und zu der Periode 1976-2007, für beobachtete Gewässertemperaturen vorliegen. Details zu dem Klimamodell (CLM) sind dem Kapitel 2 zu entnehmen.

Zur Untersuchung des Einflusses von Klimaänderungen auf die Gewässertemperatur wurde angenommen, dass mit Hilfe der räumlichen Abhängigkeit der Wassertemperaturen österreichischer Fließgewässer zu den Lufttemperaturen in der Vergangenheit auch die zukünftigen zeitlichen Änderungen beschrieben werden können, d.h. wurde in der Vergangenheit bei einer räumlichen Änderung der Lufttemperatur um beispielsweise 1°C eine gewisse Änderung der Wassertemperatur beobachtet, so ist anzunehmen, dass sich an einem Ort bei einer zukünftigen Änderung der Lufttemperatur um 1°C auch die Wassertemperaturen um dem entsprechenden Wert ändern werden. Es wurde also fehlende Information über die Änderung der Wassertemperaturen in der Zeit durch Informationen über die Änderungen der Wassertemperaturen im Raum ersetzt.

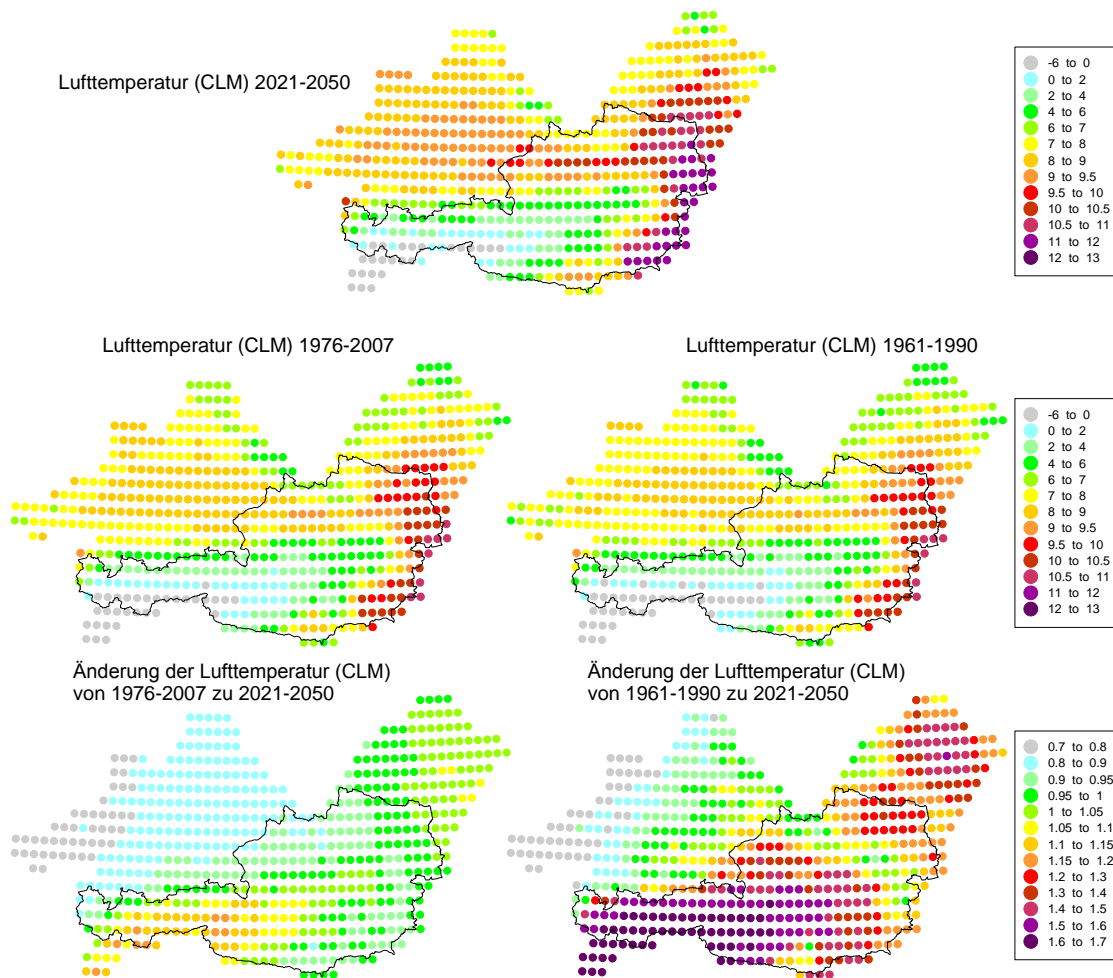


Abbildung 6-16: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Veränderung der Lufttemperatur

In einem ersten Schritt wurde daher die Änderung der Wassertemperaturen in der Vergangenheit im Raum in Abhängigkeit von den Lufttemperaturen untersucht. In Abbildung 6-17(oben) wurden die mittlere jährl. Wassertemperaturen gegen die mittleren Lufttemperaturen des regionalen Klimamodells (CLM) in der Periode 1976-2007 aufgetragen. Jeder Punkt entspricht einem Pegel. Es zeigt sich hier eine deutliche Abhängigkeit mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.77. Eine Regressionsgeraden der Form

$$WT = 5.22 + 0.49 * LT \quad (2)$$

wurde angepasst, wobei WT die mittl. jährliche Wassertemperatur ($^{\circ}\text{C}$) und LT die mittl. jährliche Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) aus dem CLM Klimamodell sind. Die Auswertungen im Raum zeigen, dass bei einer Zunahme der Lufttemperatur um 1°C die Wassertemperaturen um 0.5°C zunehmen. Diese Regressionsbeziehung wurde nun verwendet um zukünftige Änderungen der Wassertemperaturen abzuschätzen. Prognostiziert z.B. das Klimamodell für Gebiete in Tirol eine Zunahme der Lufttemperatur um etwa 1.5°C von der Referenzperiode 1961-90 zum Zeitraum 2012-2050 so ist entsprechen obiger Regressionsbeziehung mit einer Zunahme der Wassertemperaturen von 0.75°C zu rechnen. In Abbildung 6-17 Mitte sind die Abhängigkeiten der Wassertemperaturen von den Lufttemperaturen für die einzelnen Jahreszeiten dargestellt.

In Abbildung 6-17 unten ist die räumliche Abhängigkeit der Wassertemperaturen von den beobachteten Lufttemperaturen im Zeitraum 1976-2007 dargestellt. Es zeigt sich hier eine etwas steilere Zunahme der Wassertemperaturen. Abbildung 6-17 unten deutet darauf hin, dass bei einer Zunahme von 1°C Lufttemperatur mit einer Zunahme der Wassertemperatur von ebenfalls 1°C zu rechnen ist. Ein Problem heutiger Klimamodelle ist, dass das Klima vergangener Jahre nicht korrekt wiedergegeben werden kann. Zur Analyse des Einflusses

zukünftiger Klimaänderungen wird daher im Allgemeinen eine Korrektur, die so genannte bias Korrektur, solchen Analysen vorangestellt. Um möglichst konsistente Aussagen über die zukünftigen Änderungen der Wassertemperaturen geben zu können, wurde daher für diese Untersuchung die räumliche Abhängigkeit in der Periode 1976-2007 zwischen den beobachteten Wassertemperaturen und den Lufttemperaturen des Klimamodells für zukünftige Prognosen verwendet.

Um die Plausibilität der so ermittelten Regressionsgeraden zu überprüfen wurden für die einzelnen Stationen die zeitlichen Regressionen zwischen den mittleren jährlichen Wassertemperaturen und den mittleren jährlichen Lufttemperaturen der einzelnen Jahre zwischen 1976 und 2007 aus dem Klimamodell ermittelt und die Steigung der Regressionsgeraden in Abbildung 6-18 dargestellt. Es zeigt sich hier im Mittel eine etwas leicht flachere Steigung von 0.3 bis 0.5, d.h. wurden in den einzelnen Stationen eine Zunahme der Jahrswerte von 1976 bis 2007 von 1°C ermittelt, so änderte sich die Wassertemperatur nur um 0.3 bis 0.5°C in diesem Zeitraum. Die Steigungen zeigen räumlich sehr unterschiedliche Werte, was auf die große Unsicherheit aufgrund der relativ kurzen Beobachtungsdauer zurückzuführen ist. In einigen Gebieten in Kärnten und in Tirol wurden negative Steigungen ermittelt, d.h. hier nimmt die Wassertemperatur mit zunehmender Lufttemperatur ab. Dies kann einerseits auf die Unsicherheit aufgrund kurzer Beobachtungsdauern zurückzuführen sein. Andererseits könnte dies physikalisch durch den Einfluss der Gletscherschmelze interpretiert werden. Durch ansteigende Temperaturen schmelzen die Gletscher schneller ab und mehr kaltes Schmelzwasser gelangt in die alpinen Flüsse, was zu einer Abnahme der Wassertemperaturen führt.

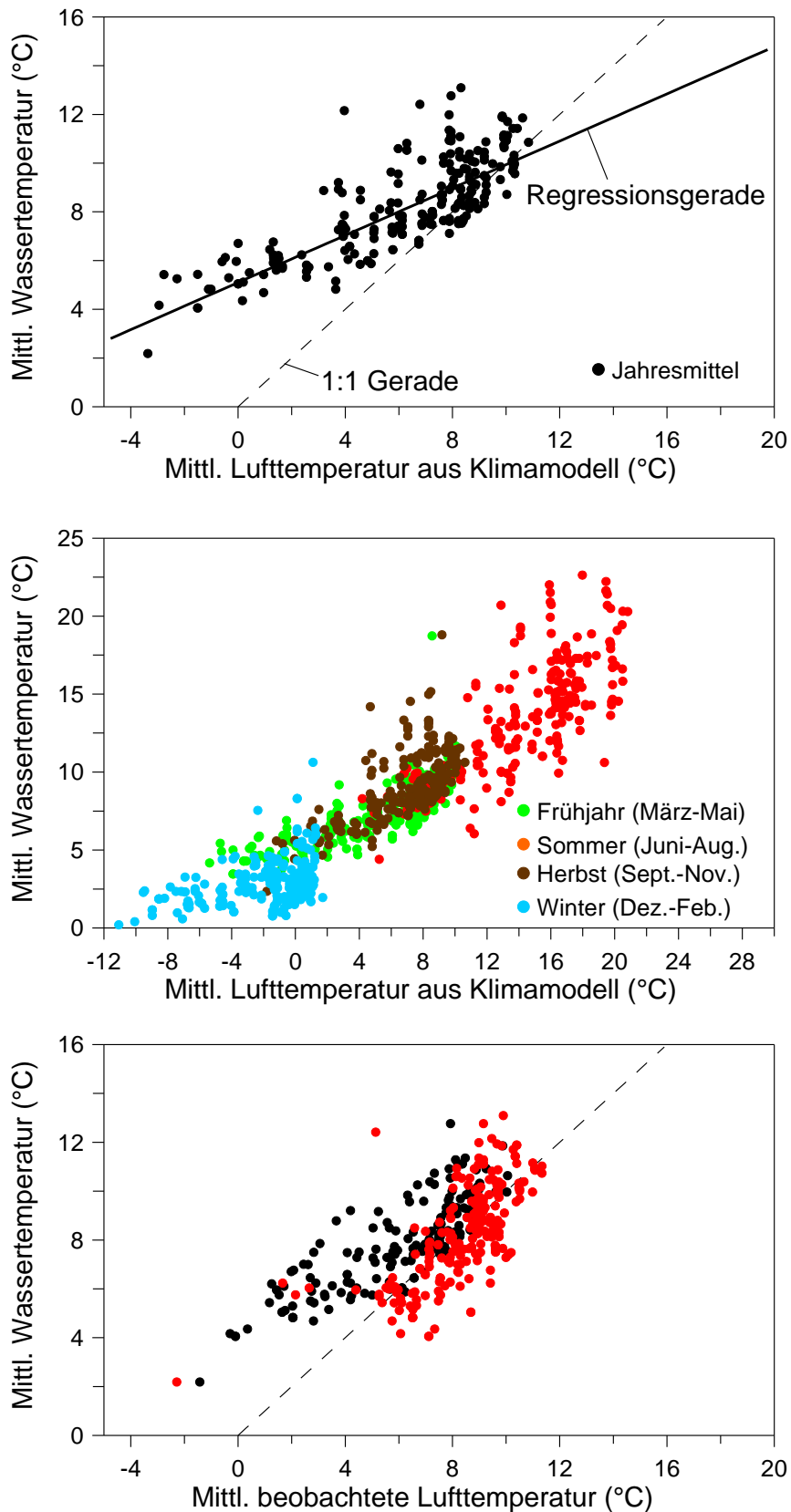


Abbildung 6-17: Mittlere jährl. Wassertemperaturen aufgetragen gegen die mittleren Lufttemperaturen des Klimamodells (CLM) in der Periode 1976-2007. (Jeder Punkt entspricht einem Pegel). Mitte: Mittl. Wassertemperaturen aufgetragen gegen die mittleren Lufttemperaturen des Klimamodells für die einzelnen Jahreszeiten. Unten: Mittl. Wassertemperaturen aufgetragen gegen die mittleren beobachteten Lufttemperaturen (schwarz: Gebietsmitteltemperaturen, rot: Stationstemperaturen).

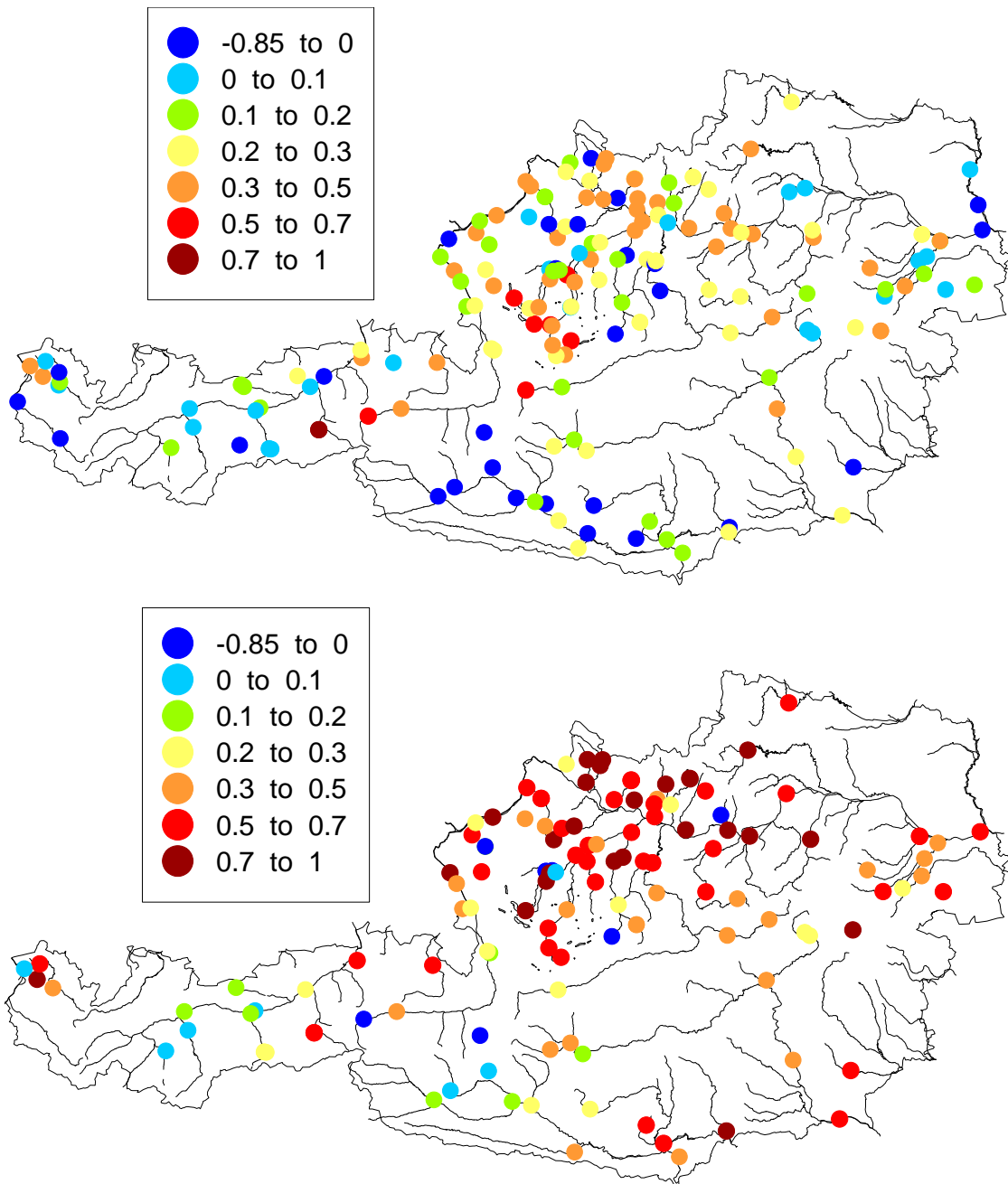


Abbildung 6-18: Oben: Steigung der zeitl. Regressionsgeraden zwischen Jahresmittelwerten der CLM Lufttemperatur und der Wassertemperatur. Unten: Steigung der zeitl. Regressionsgeraden zwischen Jahresmittelwerten der beobachteten Lufttemperatur und der Wassertemperatur. 1976-2007.

In Abbildung 6-19 ist die Zunahme der mittleren jährlichen Wassertemperaturen in °C von der Periode 1976-2007 zu der Periode 2021-2050 dargestellt. In den Abbildung 6-20 bis Abbildung 6-23 sind die entsprechenden Zunahmen der einzelnen Jahreszeiten dargestellt. In den Abbildung 6-24 bis Abbildung 6-28 sind die Zunahmen der mittl. jährlichen Temperaturen bzw. der einzelnen Jahreszeiten von der Referenzperiode 1961-1990 zu 2021-2050 dargestellt.

Im Mittel nehmen in Österreich die Wassertemperaturen von 1976-2007 zu 2021-2050 zwischen 0.3 und 0.7°C zu. Die größten Zunahmen sind im alpinen Bereich zu verzeichnen. Dies dürfte auf die Berechnungsweise zurückzuführen sein. Im alpinen Bereich ist die stärkste Zunahme der Lufttemperatur in Klimamodell zu verzeichnen. Durch die Annahme der Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur wird diese starke Zunahme auf die Wassertemperaturen übertragen. Die starke zukünftige Erwärmung könnte jedoch im gerade alpinen Bereich durch den oben beschriebenen Einfluss der Gletscherschmelze abgeschwächt werden. Im Sommer entspricht die Zunahme im Mittel etwa 0.6°C, während in wenigen Gebieten eine Erwärmung bis zu 1°C berechnet wird. Im Winter wird eine Zunahme von etwa 0.2 bis 0.3°C ermittelt. Die Zunahme der Wassertemperaturen 2021-2050 zum Referenzzeitraum 1961-1990 ist entsprechend höher. Grundsätzlich sind jedoch die räumlichen Unterschiede in den Wassertemperaturen in Österreich größer als die ermittelten zukünftigen Änderungen aufgrund des Klimas.

Über Gleichung 1 lässt sich die zukünftige Veränderung der Wassertemperatur in eine Änderung der Seehöhe abschätzen. Aus Gleichung 1 und Abbildung 6-3 folgt, dass eine Änderung in der Seehöhe um 100m eine Änderung Wassertemperatur um 0.8°C beinhaltet. Dies bedeutet dass eine zukünftige Änderungen der Wassertemperatur um z.B. 0.8°C im Sommer eine Höhenänderung der äquatischen Flora und Fauna von etwa 100 Höhenmetern hervorruft.

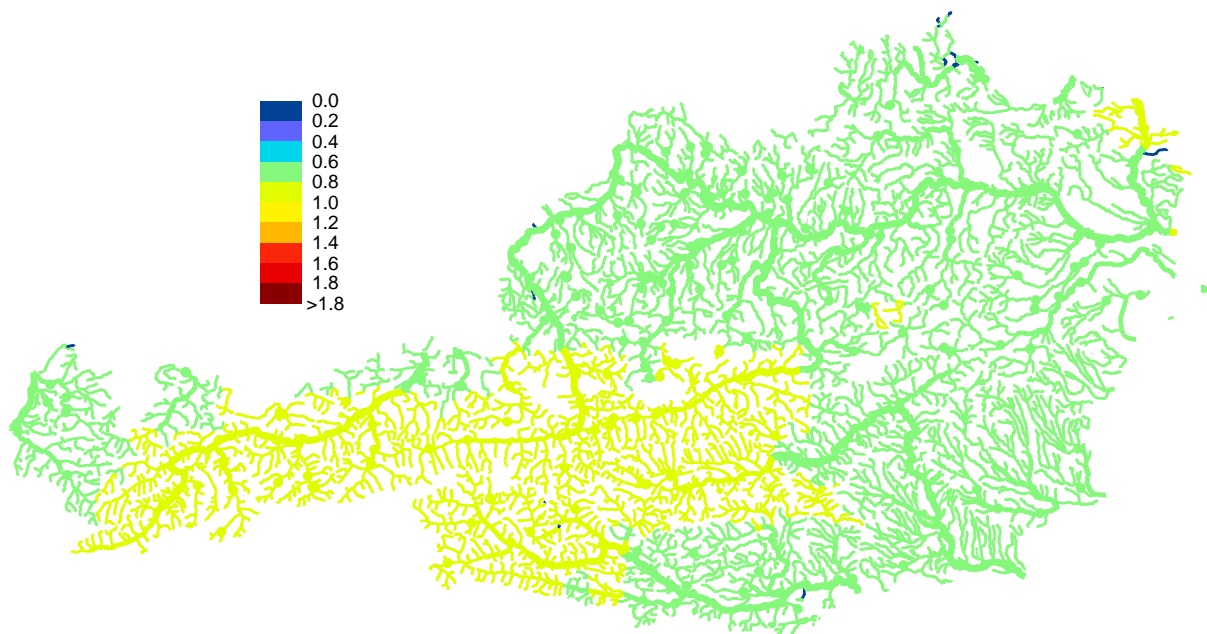


Abbildung 6-19: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren jährlichen Wassertemperatur (°C) von 1976-2007 zu 2021-2050.

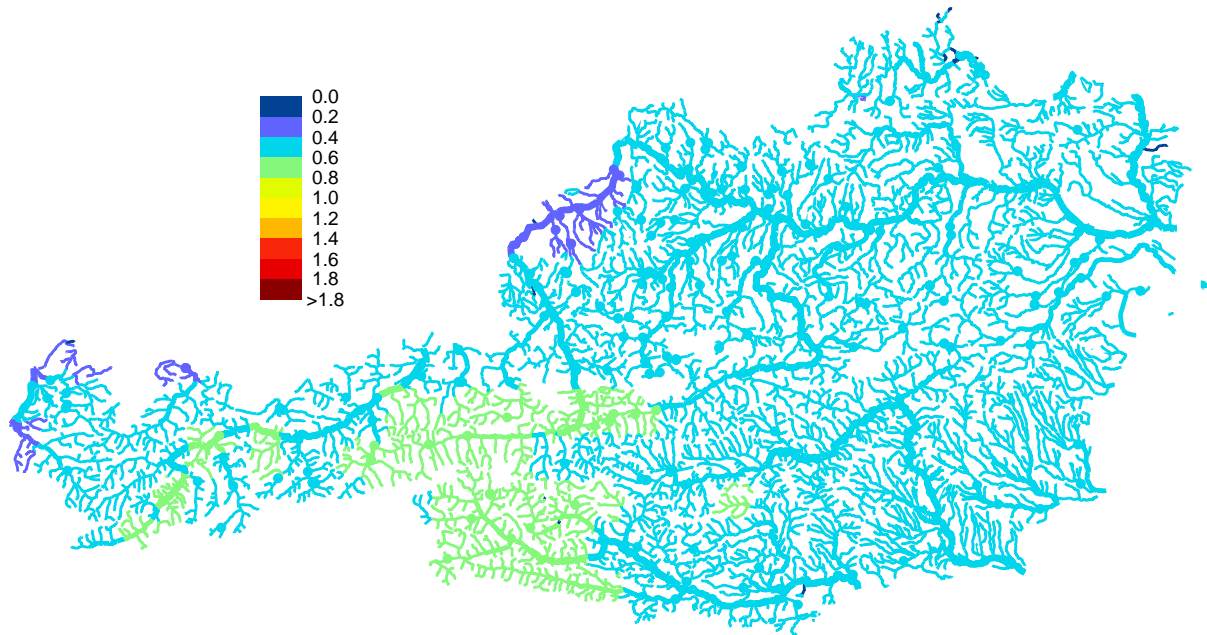


Abbildung 6-20: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Frühling (März-Mai) von 1976-2007 zu 2021-2050.

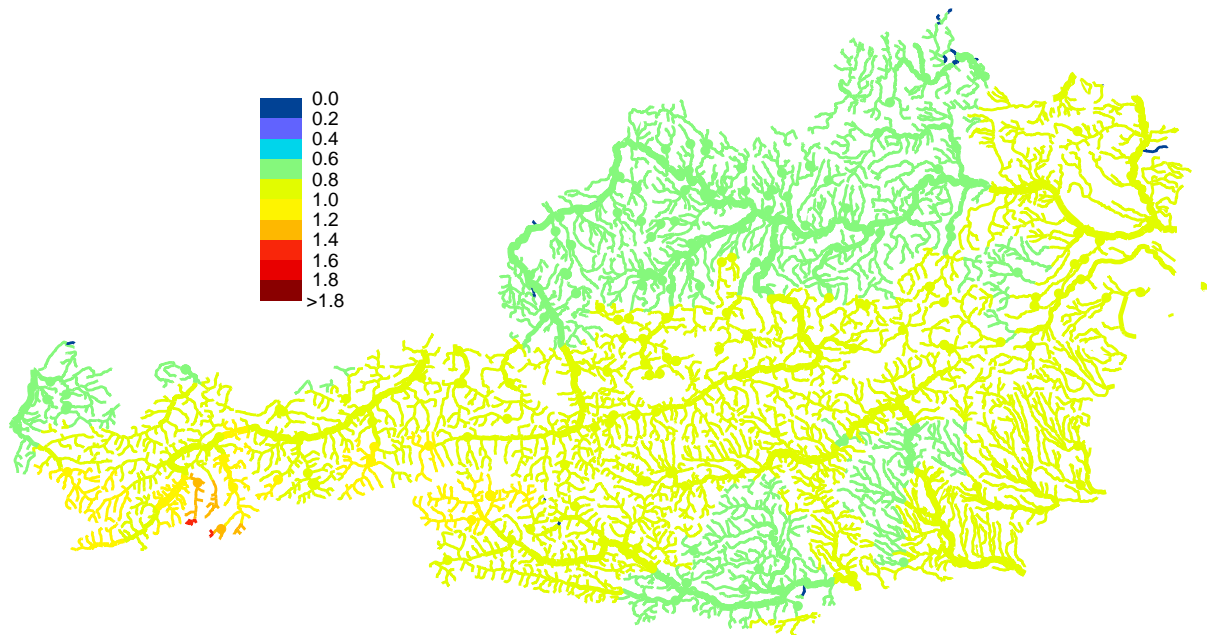


Abbildung 6-21: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Sommer (Juni-Aug.) von 1976-2007 zu 2021-2050.

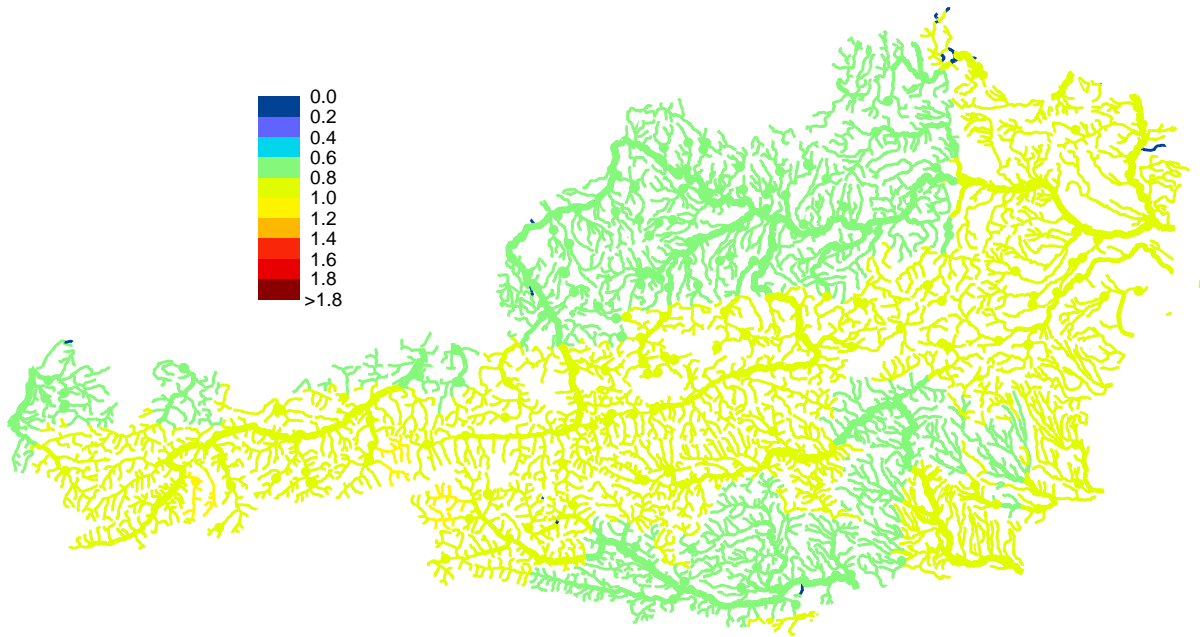


Abbildung 6-22: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Herbst (Sep.-Nov.) von 1976-2007 zu 2021-2050.

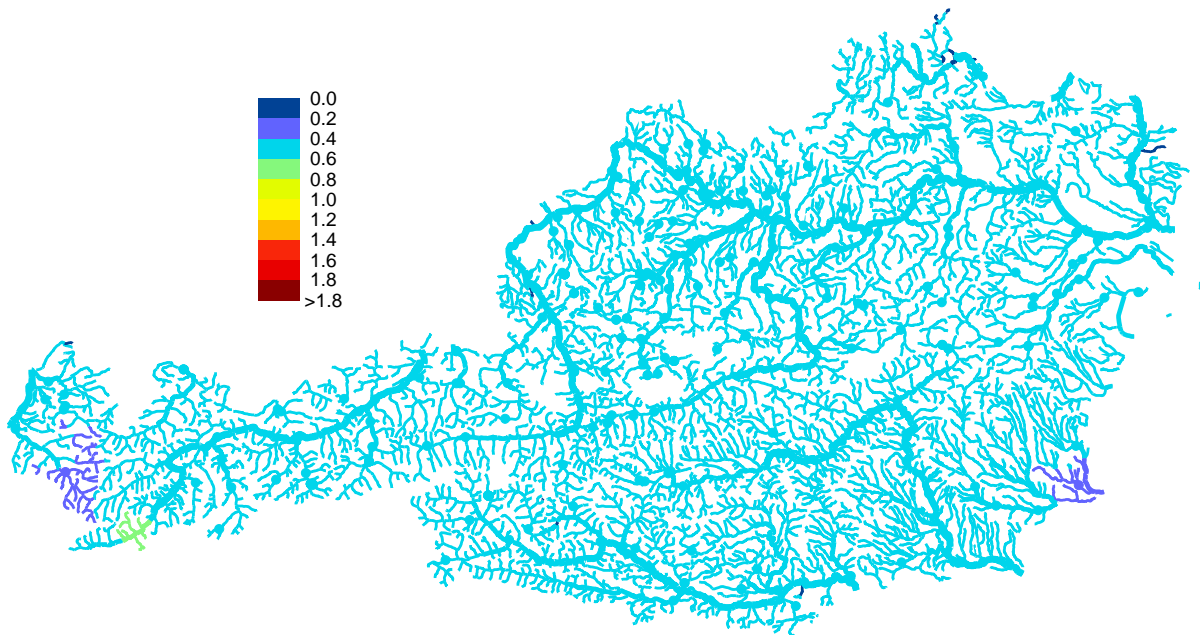


Abbildung 6-23: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Winter (Dez.-Feb.) von 1976-2007 zu 2021-2050.

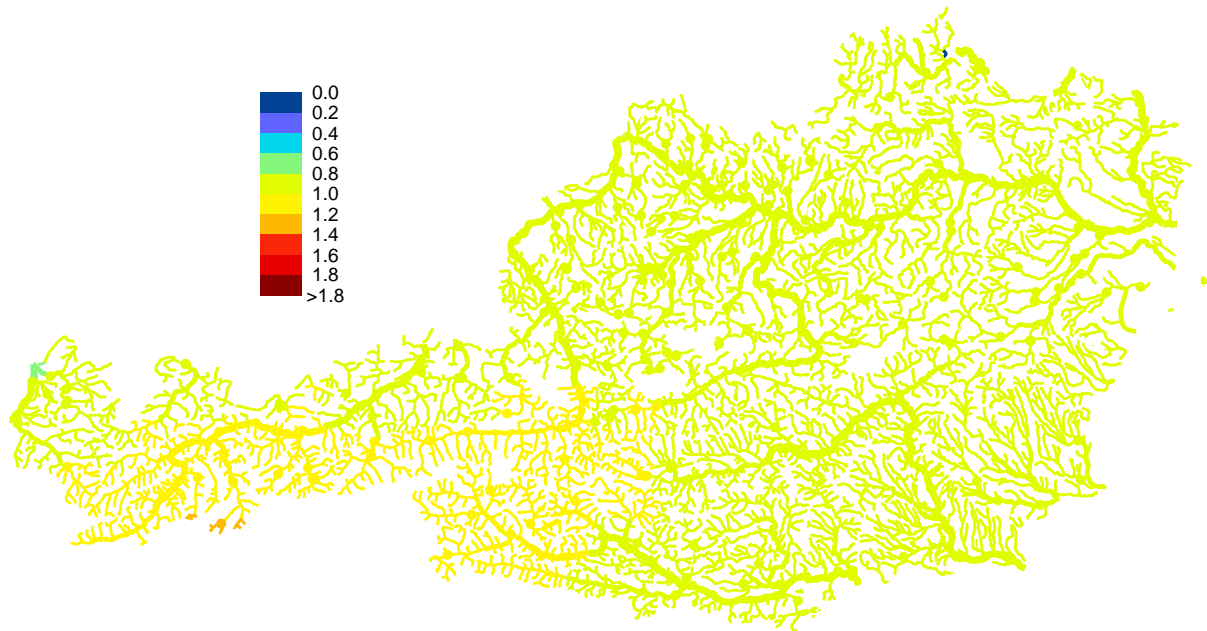


Abbildung 6-24: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren jährlichen Wassertemperatur (°C) von 1961-1990 zu 2021-2050.

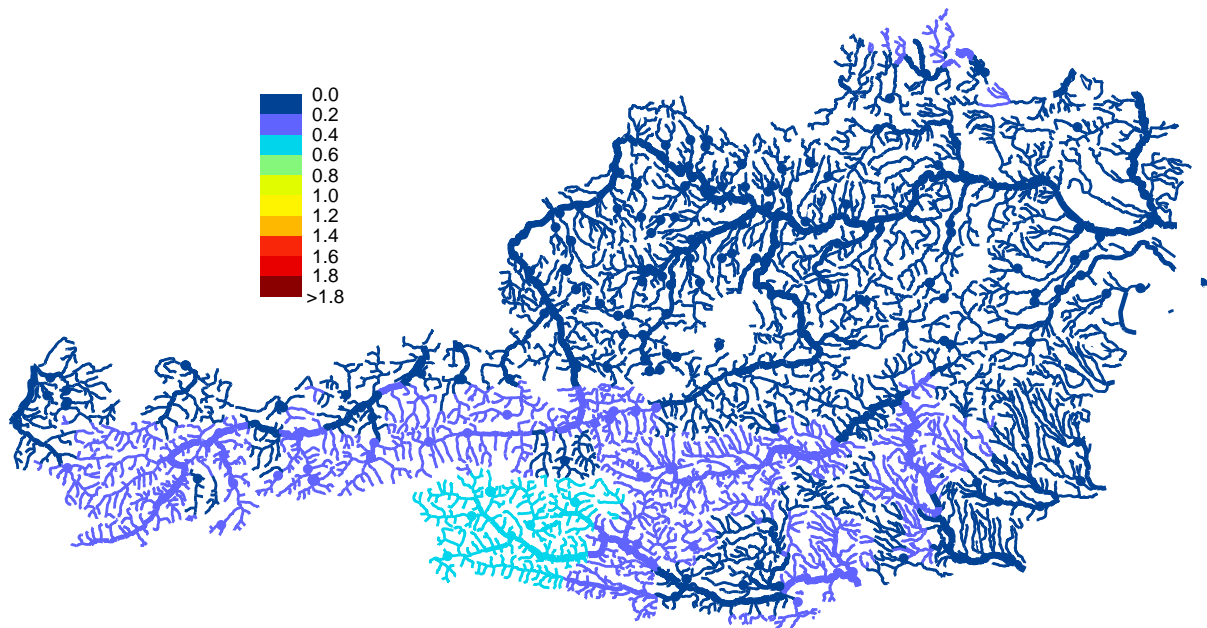


Abbildung 6-25: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Frühling (März-Mai) von 1961-1990 zu 2021-2050.

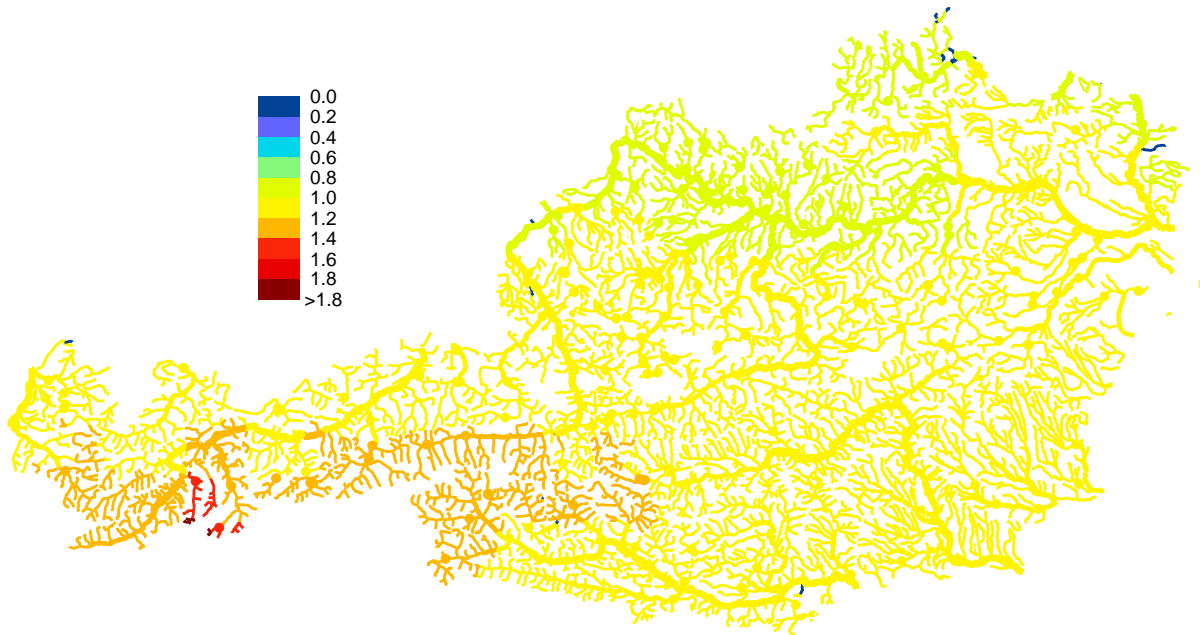


Abbildung 6-26: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Sommer (Juni-Aug.) von 1961-1990 zu 2021-2050.

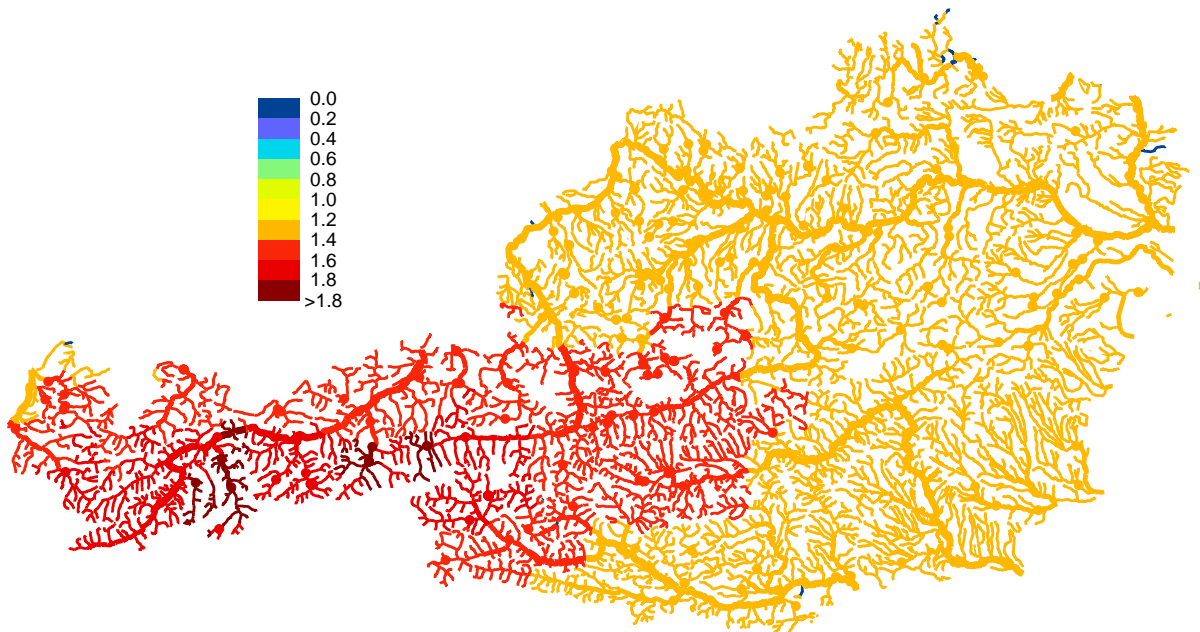


Abbildung 6-27: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Herbst (Sep.Nov.) von 1961-1990 zu 2021-2050.

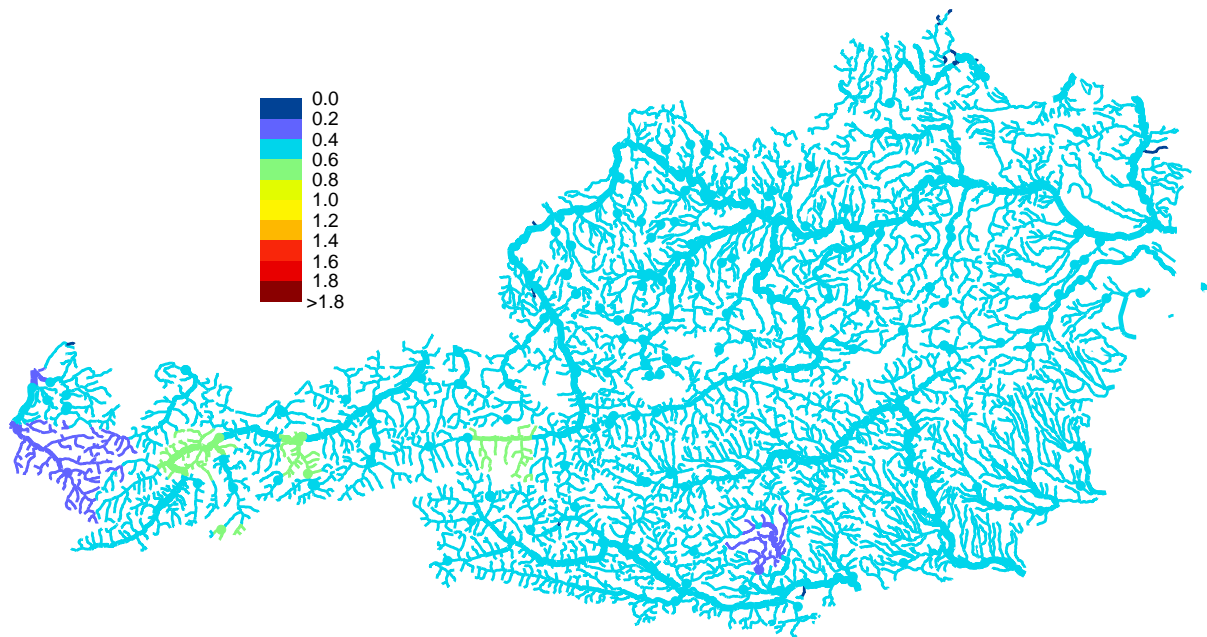


Abbildung 6-28: Aus dem Klimamodell (CLM) rückgerechnete Zunahme der mittleren Wassertemperatur (°C) im Winter (Dez.-Feb.) von 1961-1990 zu 2021-2050.

7. Geschiebepotential von alpinen Gewässern und Permafrost

7.1 Kurzfassung

Geschiebeauslösende Prozesse (allgemeine Grundlagen)

- Für das Geschiebepotential sind vor allem zwei klimarelevante Faktoren zu betrachten: die Lage der Permafrostgrenze sowie das Auftreten von Starkniederschlägen (*harte Aussage*).
- Die Änderung des Geschiebepotenzials zufolge Erhöhung der Permafrostgrenze ist stark von den morphologischen Verhältnissen und den geotechnischen Eigenschaften der Gesteine abhängig (*harte Aussage*).

Situation in der Zukunft

- Mit einer Erhöhung der Permafrostgrenze zufolge Klimawandel ist zu rechnen (*harte Aussage*).
- Die Erhöhung der Permafrostgrenze könnte parallel mit der Erhöhung der Lufttemperatur laufen. Eine Erhöhung von 1°C für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 würde einer Erhöhung der Permafrostgrenze von etwa 150 m entsprechen (*weiche Aussage*).
- Die Änderung des Geschiebepotentials zufolge Erhöhung der Permafrostgrenze lässt sich derzeit nur sehr grob auf Basis von Flächenvergleichen abschätzen und dürfte – regional betrachtet – in der Größenordnung von 1% bis 3% liegen (*weiche Aussage*).
- Die vorliegenden Niederschlagsdaten in Österreich mit ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung und Genauigkeit geben keine Hinweise auf eine Erhöhung von Starkniederschlägen. Allerdings sind diese messtechnisch äußerst schwierig zu erfassen. Deswegen ist keine Auswirkung auf das Geschiebepotential ableitbar (*harte Aussage*).

Anpassungsmaßnahmen

- Lokal betrachtet könnte das Geschiebepotential im Bereich der Permafrostgrenze deutlich zunehmen. Deswegen sollte das erhöhte Geschiebepotential in kleinen Einzugsgebieten im Bereich der Permafrostgrenze berücksichtigt werden.
- Bei einer regionalen Betrachtung größerer Vorfluter dürfte hingegen die Zunahme des Geschiebepotentials zufolge Klimawandel klein sein. Gegen den Hintergrund der sehr großen natürlichen Variabilität des Geschiebetransportes wird deshalb kein Handlungsbedarf zufolge Klimaänderung gesehen.

7.2 Einleitung

Beim Geschiebepotential sind vor allem zwei klimarelevante Faktoren zu betrachten. Der erste Faktor ist im Zusammenhang zu sehen mit einer möglichen Zunahme von Starkniederschlägen und damit verbundener erhöhter Erosion und Materialanfall in Einzugsgebieten. Wie in den vorhergehenden Berichtsteilen diskutiert (Kapitel 1), geben die vorliegenden Niederschlagsdaten in Österreich keine Hinweise auf eine Erhöhung von Starkniederschlägen. Allerdings sind diese messtechnisch äußerst schwierig zu erfassen. Da dieser Aspekt höchst unsicher ist, wird er hier nicht weiter betrachtet.

Der zweite Faktor hängt mit einer Verkleinerung der Permafrostregion zusammen, wodurch vermehrt Geschiebe in die Wildbäche und größeren Vorfluter gelangen kann. Dieser Aspekt wird im Folgenden diskutiert.

7.3 Bedeutung des Permafrostes für die Geschiebeführung

Die Auswirkungen auf den Permafrost zählen zu den häufigsten genannten Klimafolgen in der Klimadiskussion. Insbesondere wird von einem „Auftauen des Permafrostes“ gesprochen wodurch es zu einer erhöhten Freisetzung von Lockergestein kommen wird. Auch der Einfluss auf die Bildung von Muren wird vielfach diskutiert. Unter Permafrost, als Teil der Kryosphäre, wird Untergrund verstanden, der über mindestens 2 Jahre unter 0°C bleibt (Permafrost Subkomitee NRC Canada, 1998 zitiert in Harris et al., 2009). Eine umfangreiche Darstellung des Permafrostes und der Beziehung zum Klima in Europa erfolgte in Harris et al. (2009). Neben Permafrost in Lockergestein und Festgestein (mit und ohne Wassergehalt) zählen auch die Blockgletscher zu den Erscheinungsformen des Permafrostes. Blockgletscher sind das am besten untersuchte und verstandene Permafrostphänomen.

Die Permafrostforschung ist insbesondere in Österreich sehr jung und wurde in den letzten Jahren intensiviert. Aus diesen Untersuchungen (z.B. Lieb 1996, Krainer, 2007) lässt sich ableiten, dass:

- die räumliche Verbreitung des Permafrostes in Österreich nur sehr ungenau bekannt ist;
- der Zusammenhang zum Klima sehr komplex ist und derzeit aus einer Klimaänderung nicht in quantitativer Weise auf Veränderungen des Permafrostes geschlossen werden kann.

Wenn auch die quantitative Bestimmung von Veränderungen des Permafrostes derzeit schwierig ist, sind doch die wesentlichen atmosphärischen Einflussgrößen bekannt (Harris et al., 2009), die sich aus der Energiebilanz der Geländeoberfläche ergeben:

- die kurzweilige Strahlungsbilanz als primäre Energiequelle;
- die Schneedecke mit ihrer Eigenschaft der Albedoerhöhung (und damit Veränderung der Strahlungsbilanz) sowie auch ihrer Isolationswirkung des Bodens (Ermöglichen des Auskühlens im Winter, Verhindern des Erwärmens im Sommer);
- die Lufttemperatur über den fühlbaren Wärmestrom.

Eine erste grobe Abschätzung zur Erfassung der Permafrostverbreitung in den Alpen erfolgt derzeit im Rahmen des Projektes Permanet (<http://www.permanet-alpinespace.eu>). Jedoch basiert auch diese Abschätzung auf sehr unscharfen empirischen Zusammenhängen zwischen Klimakenngrößen und Permafrostkenngrößen.

Detaillierte Messungen des Permafrostes und deren hydrologische Auswirkungen werden derzeit im Krummgampental (Kaunertal) im Rahmen des Projektes „Permafrost in Austria“ durchgeführt (<http://info.tuwien.ac.at/geophysik/research/cryosphere/permafrost.htm>). Siehe Abbildung 7-1 bis Abbildung 7-3.



Abbildung 7-1: Steinschlag im Krummgampental (Kauental) Foto: Krainer

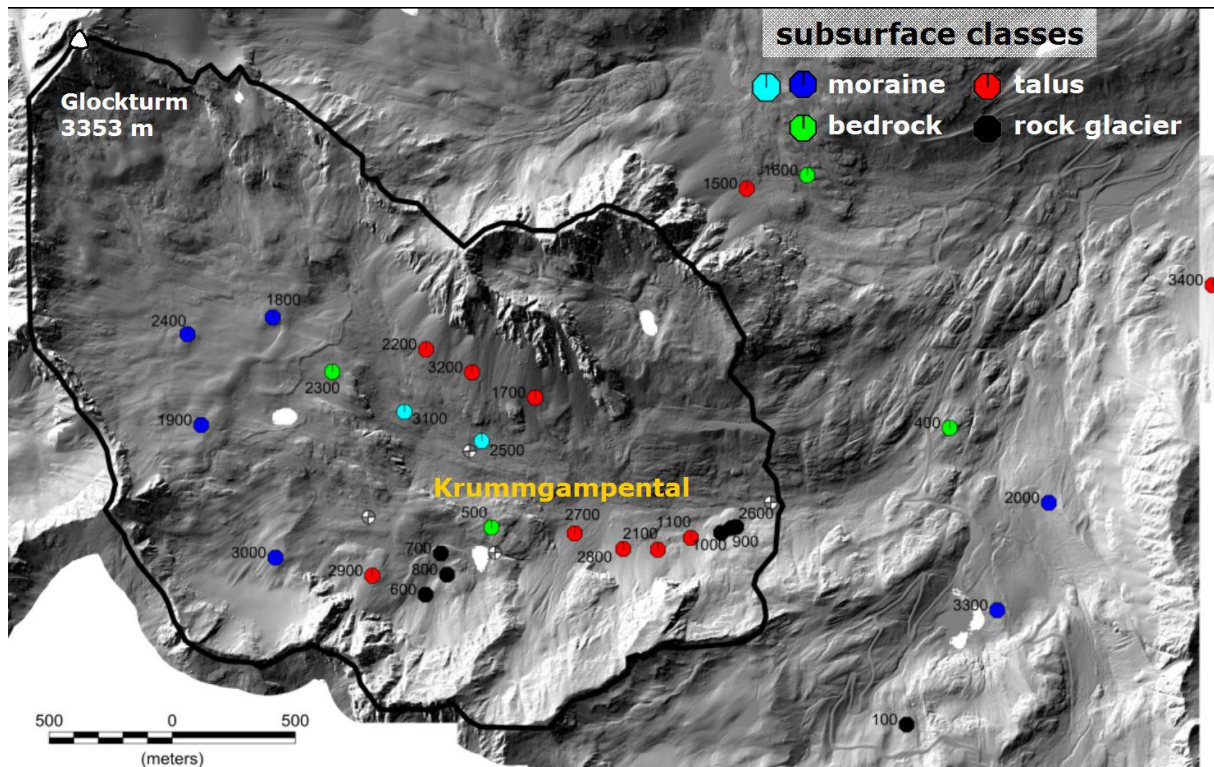


Abbildung 7-2: Übersicht der Permafrostkartierung Krummgampental (Kauental). Krainer pers. Mitt.

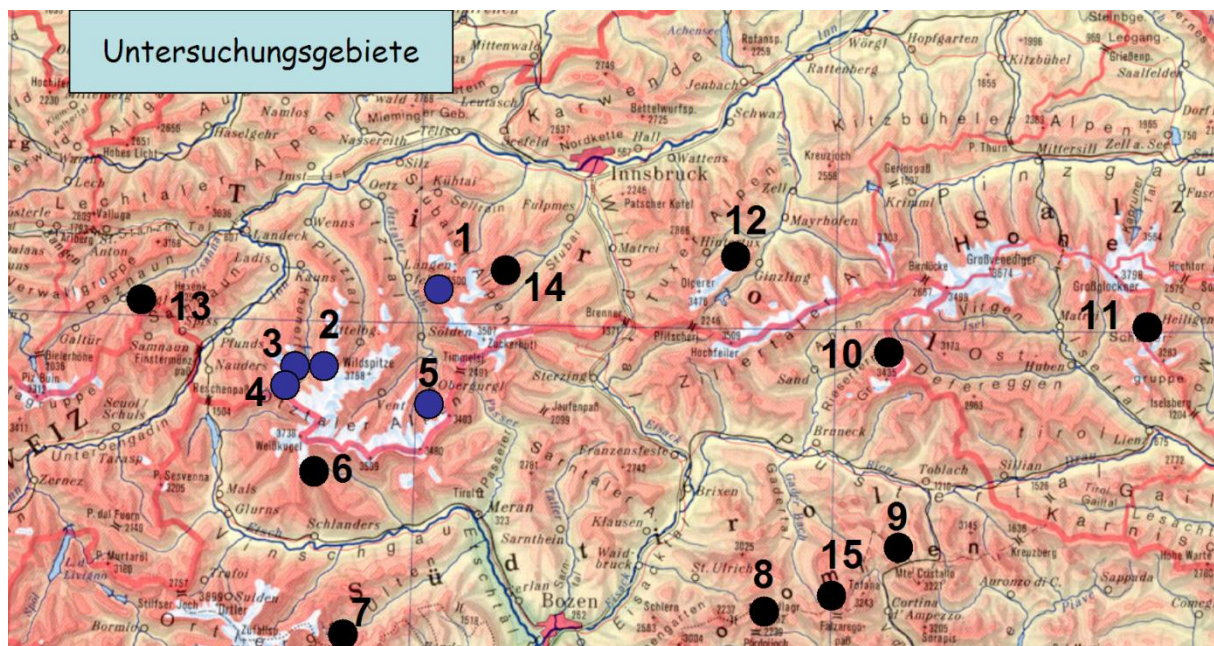


Abbildung 7-3: Untersuchungsgebiete Permafrost. Krainer pers. Mitt.

Wenn auch eine quantitative Abschätzung der Veränderung des Permafrostes bei einem veränderten Klima derzeit nicht möglich ist, kann jedoch das Vorzeichen der Veränderung für manche Fragestellungen recht gut angegeben werden (siehe z.B. Krainer 2007 für Österreich). Durch das Fortschreiten des Permafrostrückganges kommt es zu einer vermehrten Freisetzung von Lockersedimenten, die über gravitative und fluviatile Prozesse in die Fließgewässer gelangen und zu einer erhöhten Geschiebeführung führen. Insbesondere wird auch in vielen Studien mit einer verstärkten Entwicklung von Murgängen durch die Permafrostdegradation gerechnet. Schädler (2006) hält allerdings für die Schweiz fest, dass diese neuen permafrostfreien Gebiete – verglichen mit den Murganggebieten in den randalpinen Zonen – eher klein und deshalb, insbesondere auch für die besiedelten Gebiete, von weniger großer Bedeutung sind.

Stoffel und Beniston (2006) haben aus einer Baumring-Rekonstruktion einen Rückgang der Häufigkeit von Murgängen in der Schweiz gezeigt (Abbildung 7-4). In ihren Schlussfolgerungen halten sie fest, dass zwar die Häufigkeit der Murgänge auch in Zukunft abnehmen wird (durch die Verlagerung der Starkniederschläge in das Frühjahr und in den Herbst), sich jedoch die Intensitäten der Ereignisse erhöhen könnten.

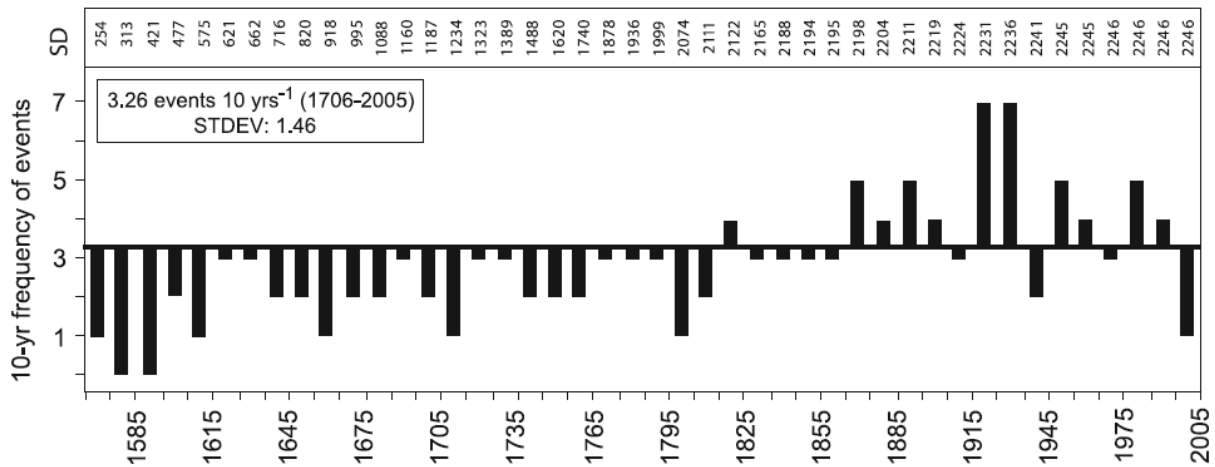


Abbildung 7-4: Zeitreihe rekonstruierter Murganghäufigkeiten für den Ritigraben in der Schweiz (Stoffel und Beniston, 2006)

Tabelle 7-1: Zusammenfassung wesentlicher Literaturstudien

Krainer (2007):

Die in den letzten Jahren beobachtete Zunahme der Steinschlag- und Felssturzaktivität sowie Setzungserscheinungen an Bauwerken im Hochgebirge sind vielfach auf die Erwärmung der Permafrostböden und auf das verstärkte Abschmelzen des Permafrosteises als Folge der globalen Klimaerwärmung zurückzuführen. Davon betroffen sind vor allem steile Felsflanken, die durch das Abschmelzen des Spaltenfrostes zunehmend instabil werden. Von aktiven Blockgletschern und Permafrost in Lockersedimenten sind aus bisherigen Erfahrungen keine größeren Naturgefahren zu erwarten, allerdings können durch das Abschmelzen des Eises in den Lockersedimenten durchaus Murgänge ausgelöst werden. Das Abschmelzen des Eises führt auch zu einer Erhöhung der Abflussmengen. Die Abschätzung von Naturgefahren in Zusammenhang mit Permafrost ist aber in den Österreichischen Alpen nach wie vor sehr schwierig, weil es über die Verbreitung, die Mächtigkeit, das Eisvolumen und auch über die Reaktion des Permafrostes auf Klimaänderungen, insbesondere auf die gegenwärtige Erwärmung, in Österreich kaum Daten gibt.

Schädler (2000):

Mit der Klimaänderung erwarteten zunehmend häufigeren und intensiveren flüssigen Niederschläge sind zwar ein Potential für Murgänge, jedoch muss auch das entsprechende Geschiebepotential vorhanden sein. Zusätzliches Geschiebe kann dort mobilisiert werden, wo bisher der Niederschlag (in größerer Höhe) eher in fester Form gefallen ist oder dort, wo das Geschiebe durch Permafrostboden stabilisiert oder von Gletschern zugedeckt war. Mit der Erwärmung muss damit gerechnet werden, dass sich die Permafrostgebiete langsam in größere Höhen zurückziehen. Diese neu permafrostfreien Gebiete sind allerdings – verglichen mit den Murganggebieten in den randalpinen Zonen – eher klein und deshalb, insbesondere auch für die besiedelten Gebiete, von weniger großer Bedeutung.

Grasso et al. (2010):

Die erhobenen Daten weisen darauf hin, dass in hochgelegenen Gebieten mit Schnee, Eis und Permafrost die maximalen spezifischen Feststofffrachten wesentlich kleiner als in tiefer gelegenen Einzugsgebieten sind. Neben dem bei kalter Witterung zurückgehaltenen Starkniederschlag durch die Speicherung als Schnee dürfte dies auf die Stabilisierung des Bodens durch Permafrost, dem höheren Felsanteil und die Gletscherbedeckung zurückzuführen sein.

7.4 Situation in der Vergangenheit von Geschiebe und Schwebstoffen

In Österreich existieren keine langzeitigen Messungen von Geschiebefrachten an Flüssen. Trendanalysen sind deshalb nicht möglich. Eine Reihe von 11 Jahren liegt jedoch für den Pegel Vent an der Rofenache vor und wird hier zur Darstellung der grundsätzlichen Variabilität des Geschiebes gezeigt. Der Pegel liegt auf 1900 m Seehöhe. Das Einzugsgebiet der Rofenache hat bis zum Pegel Vent eine Fläche von 96,2 km². Die Vergletscherung betrug 1969 noch 44%, derzeit sind es 38%. Das Abflussregime ist durch die Schnee- und Gletscherschmelze geprägt und bisher nicht durch Wasserkraftnutzung beeinflusst. Wie Abbildung 7-5 zeigt, gibt es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Lufttemperatur und dem beobachteten Abfluss in Vent für den Zeitraum 1967-2008. Deutlich wird die mit der Temperaturerhöhung einhergehende Erhöhung des Abflusses, die ihre Ursache in erster Linie in der erhöhten Gletscherschmelze und nicht in einer Zunahme der Niederschläge hat. Vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung und deren Auswirkung auf den Wasserhaushalt im gesamten Alpenraum sind solche Messstellen wichtige Stützstellen für das Studium von Veränderungen durch den Klimawandel (Müller et al., 2009).

Abbildung 7-6 zeigt die Reihe der Geschiebefracht im Zeitraum 1999-2009 für den Pegel Vent an der Rofenache. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Geschiebefracht sowohl mit dem Hochwasserscheitel als auch mit dem mittleren Jahresdurchfluss zusammenhängt. Die Maxima der Geschiebefracht traten im Jahr 2003 (größter mittlerer Jahresdurchfluss der Reihe) und im Jahr 2005 (größtes Hochwasser der Reihe) auf. Eine Zunahme der Abflüsse in den nächsten Jahren lässt deshalb auch eine Zunahme in der Geschiebefracht erwarten.

Obwohl der Schwerpunkt dieses Abschnittes auf Geschiebe liegt, sind zum Vergleich Zeitreihen der Schwebstoffe an drei Gewässerprofilen dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass die Schwebstofffracht sowohl mit dem Hochwasserscheitel als auch mit dem mittleren Jahresdurchfluss zusammenhängt.

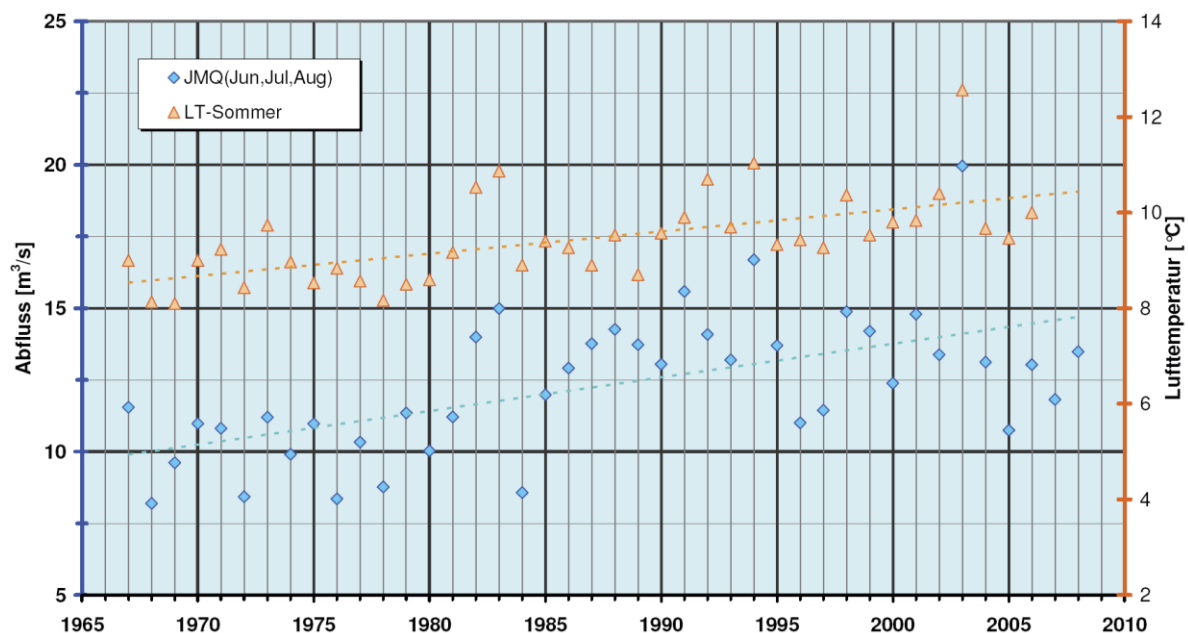


Abbildung 7-5: Lufttemperatur (Dreiecke) und Abflüsse (Karas) in den Sommermonaten Juni, Juli und August von 1967 bis 2008 für den Pegel Vent an der Rofenache (96,2 km²). Aus Müller et al. (2009).

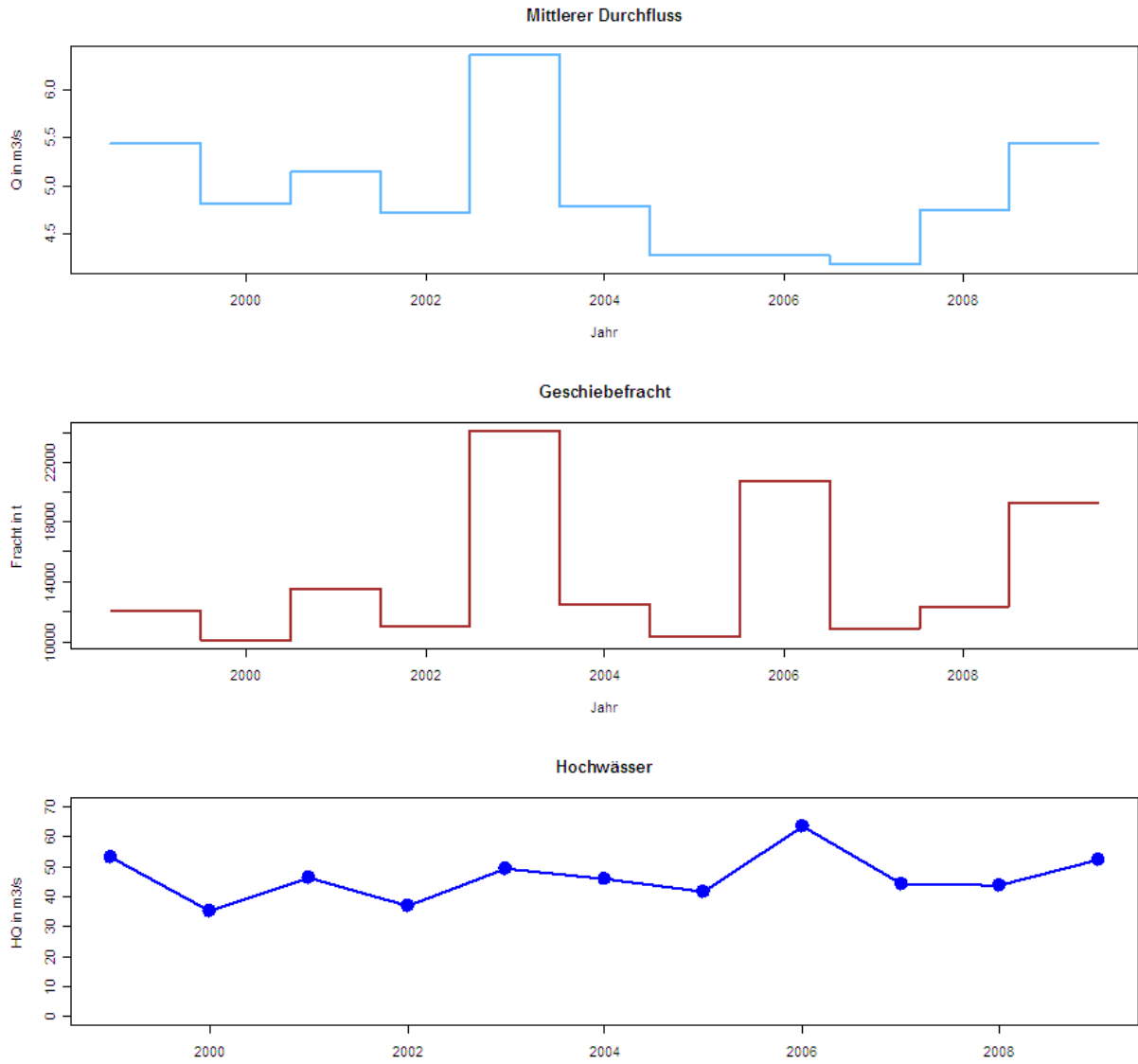


Abbildung 7-6: Zeitreihe des Geschiebes bei Vent an der Rofenache (96,2 km²).

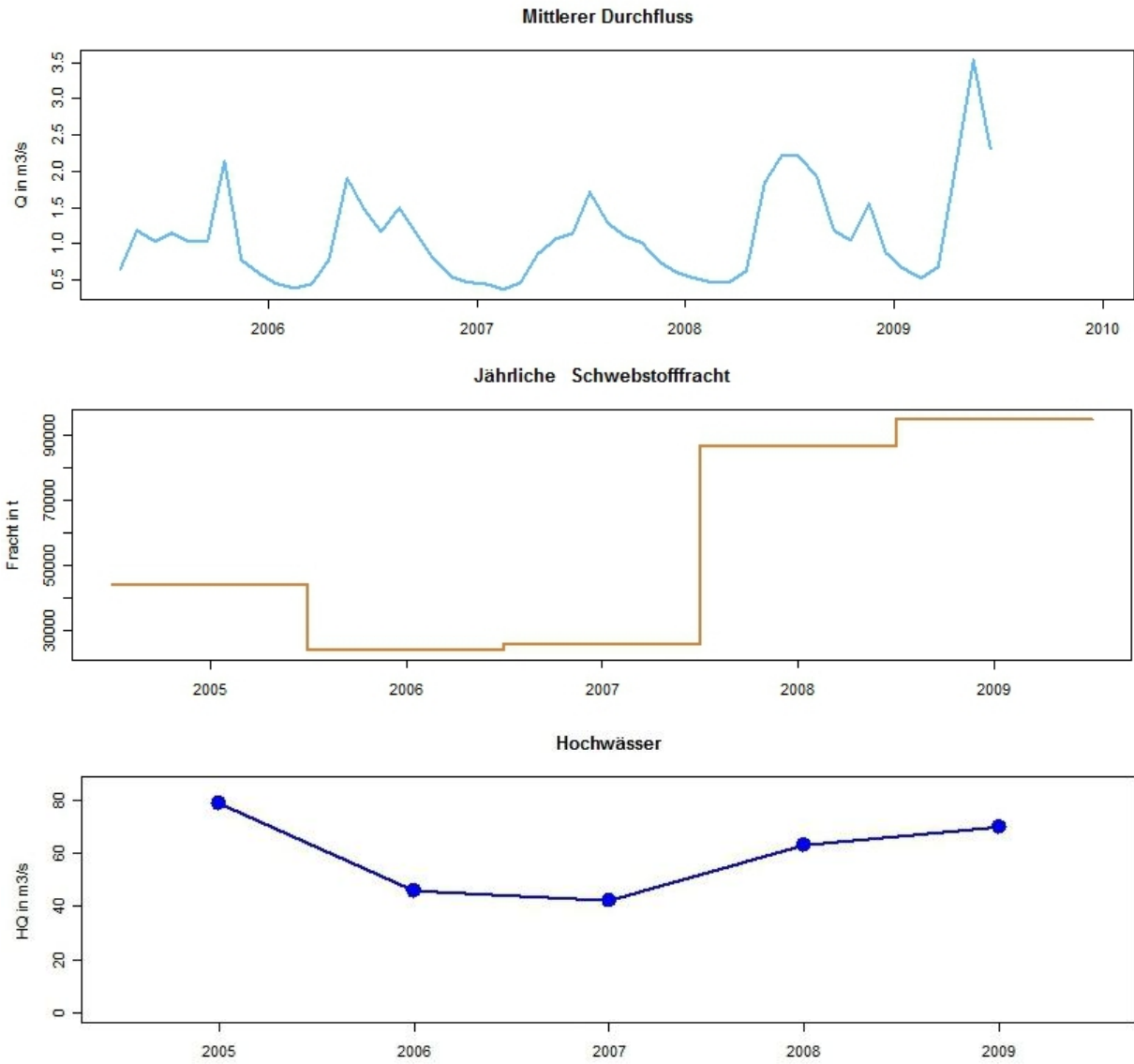


Abbildung 7-7: Schwebstoffe: Lienz-Falkensteinsteig/Drau (668 km²)

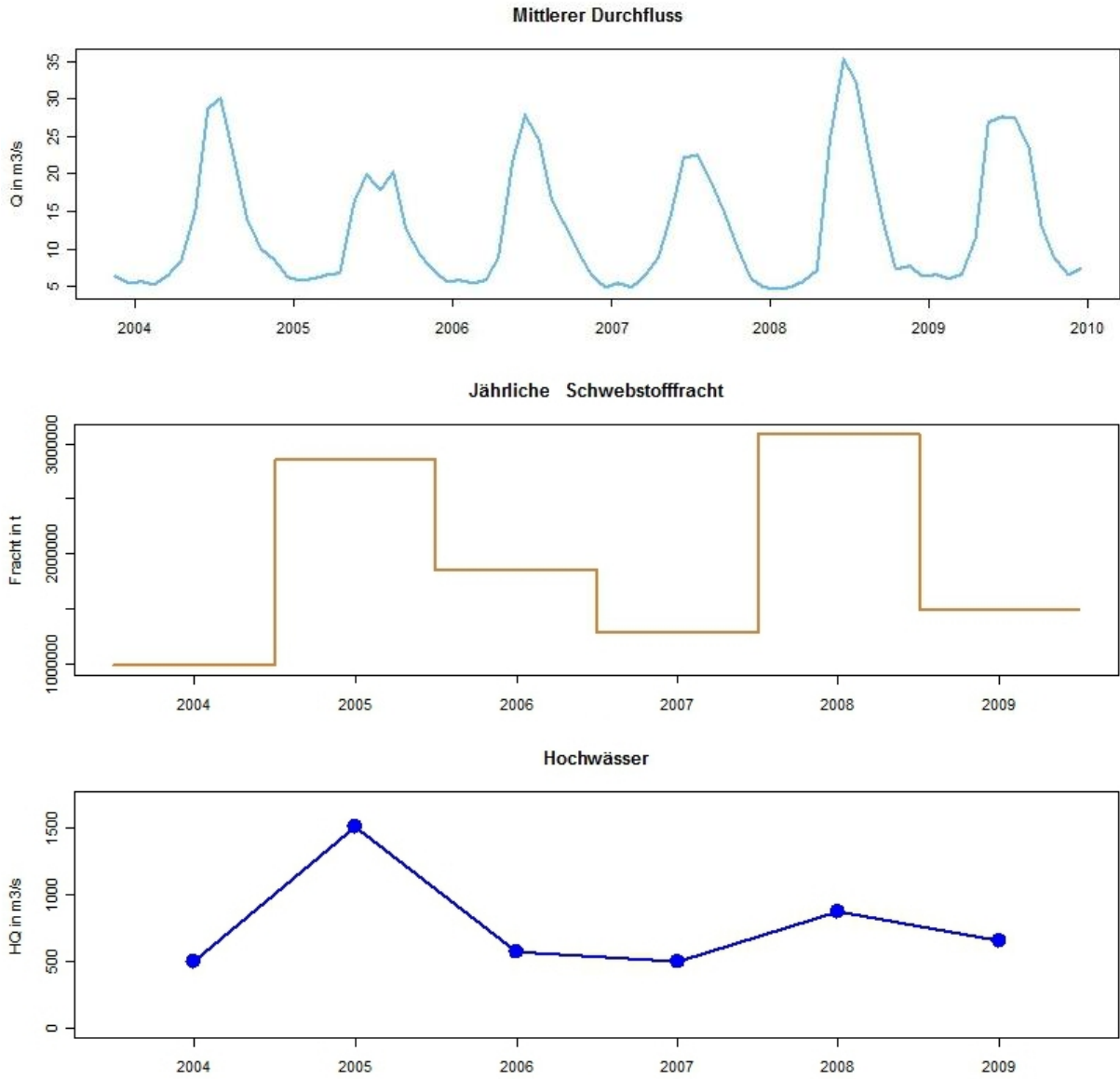


Abbildung 7-8: Schwebstoffe: Innsbruck/Inn (5792 km²)

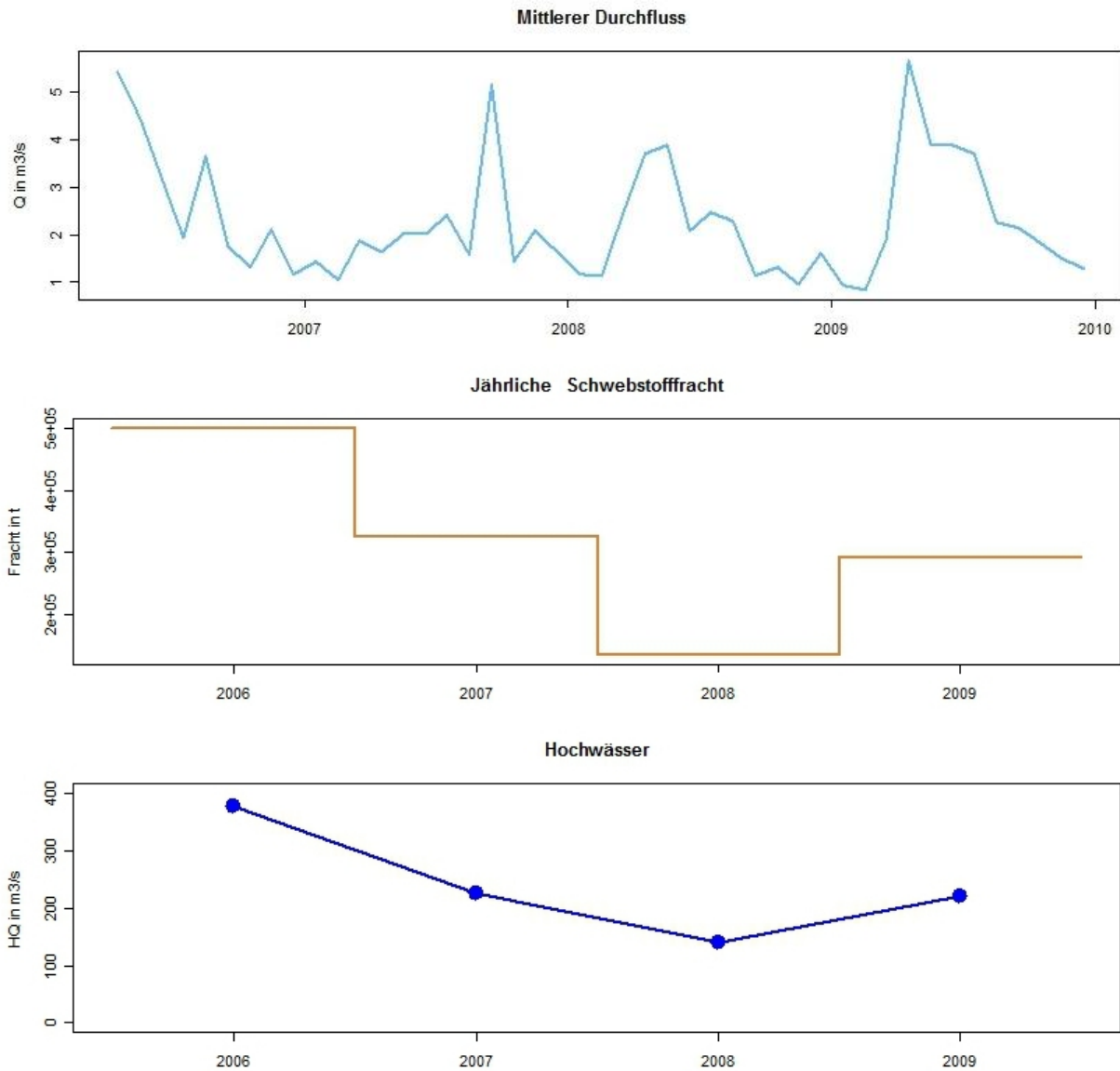


Abbildung 7-9: Schwebstoffe: Kössen-Hütte/Grossache (701,4 km²)

7.5 Situation in der Zukunft

Die Abschätzung der Änderung des Geschiebepotentials in Zusammenhang mit einer Verschiebung der Permafrostgrenze ist schwierig, da es in den Österreichischen Alpen über die Verbreitung, die Mächtigkeit, das Eisvolumen und auch über die Reaktion des Permafrostes auf Klimaänderungen kaum Daten gibt. Modellrechnungen der Permafrostverteilung in Österreich wurden von Ebohon und Schrott (2008) durchgeführt. Abbildung 7-10 zeigt die räumliche Verteilung des wahrscheinlichen und möglichen Permafrostes. In Tabelle 7-2 sind die berechneten Flächen des Permafrostes für die einzelnen Bundesländer dargestellt. Zum Vergleich zeigt Abbildung 7-11 die potentielle Permafrostverteilung in der Schweiz.

Folgende Überlegungen ergeben gewisse Randbedingungen zu möglichen Änderungen des Geschiebepotentials. Aus Klimamodellen ist mit einer Erhöhung der Lufttemperatur für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 von etwa 1°C zu rechnen. Die Erhöhung der

Permafrostgrenze könnte parallel mit der Erhöhung der Lufttemperatur laufen. Das würde einer Anhebung der Permafrostgrenze für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 von etwa 150 m entsprechen. (*weiche Aussage*)

Nach Ebohon und Schrott (2008) liegt die mittlere Untergrenze des wahrscheinlichen Permafrostes derzeit bei etwa 2600 m. Eine Erhöhung der Lufttemperatur würde demnach einer Anhebung der Permafrostgrenze von 2600 m auf 2750 m entsprechen. In Österreich liegen 800 km² Fläche zwischen 2600 und 2750 m (siehe Tabelle 7-3 und Abbildung 7-12). Das wäre der zusätzliche Flächenanteil, der für Geschiebeproduktion grundsätzlich zur Verfügung steht. Jedoch trägt nur ein kleiner Teil dieser Flächen tatsächlich zu einer zusätzlichen Geschiebeproduktion bei, in Abhängigkeit von der derzeitigen räumlichen Verteilung des Permafrosts und den lokalen geologischen Verhältnissen. 1800 km² liegen in Österreich über 2600 m. Davon sind jedoch laut Ebohon und Schrott (2008) nur 873 km² wahrscheinlicher Permafrost, also rund die Hälfte. Das Höhenband von 800 km², das zusätzlich permafrostfrei werden könnte, entspricht somit einer Permafrostfläche von 400 km², die zum Geschiebepotential beitragen könnte. Um zu überlegen, welchem prozentuellen Zuwachs an Geschiebepotential das entspricht, kann man diese Fläche in Bezug setzen zu den gesamten Einzugsgebietsflächen. Wenn man etwa annimmt, dass Geschiebe aus einem Seehöhenbereich von 1500 m bis 2600 m stammt, so würden die zusätzlichen permafrostfreien Flächen $400/15000 = 2,7\%$ ausmachen. Wenn man annimmt, dass Geschiebe aus einem Seehöhenbereich von 1000 bis 2600 m stammt, so würden die zusätzlichen permafrostfreien Flächen $400/30000 = 1,3\%$ ausmachen. Bei der weiteren Annahme, dass das Geschiebepotential nicht von der Seehöhe abhängt, ergibt sich somit eine grobe Abschätzung der Zunahme des Geschiebepotentials von 1,3% bis 2,7%, also rund 1% bis 3%. Dieser relativ kleine Prozentsatz stimmt mit der Aussage von Schädler (2000) überein, dass die neuen permafrostfreien Gebiete, verglichen mit den Murganggebieten in den randalpinen Zonen, eher klein sind.

Für die vorliegende Studie bedeutet dies, dass zwar lokal betrachtet im Bereich der Permafrostgrenze das Geschiebepotential deutlich zunehmen könnte. Bei einer regionalen Betrachtung größerer Vorfluter dürfte hingegen die Zunahme des Geschiebepotentials zufolge Klimawandel klein sein.

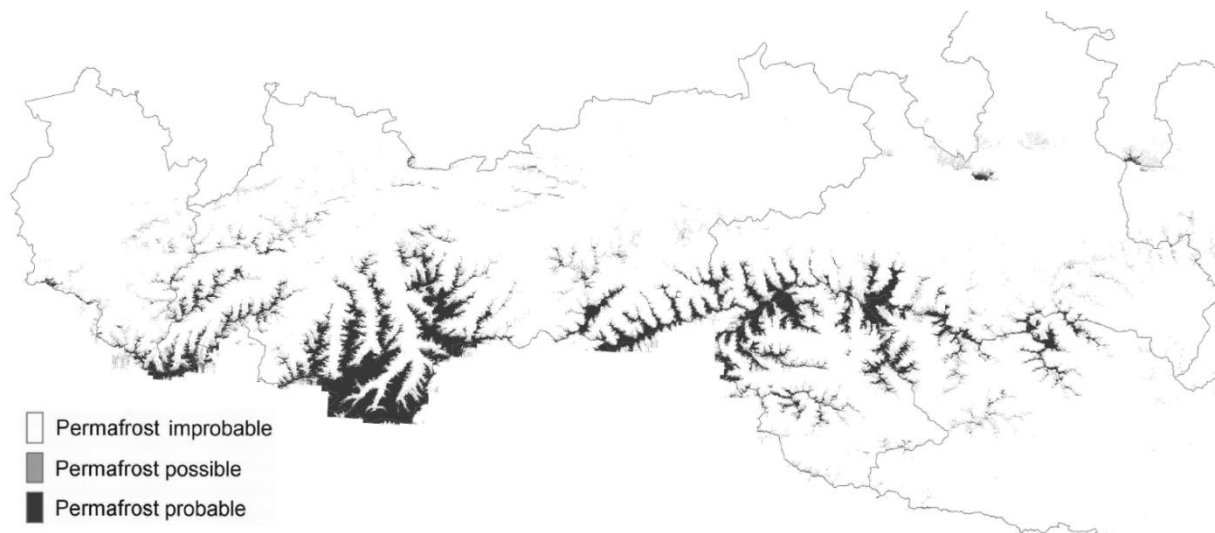


Abbildung 7-10: Permafrostverteilung in Österreich. Aus Ebohon und Schrott (2008).

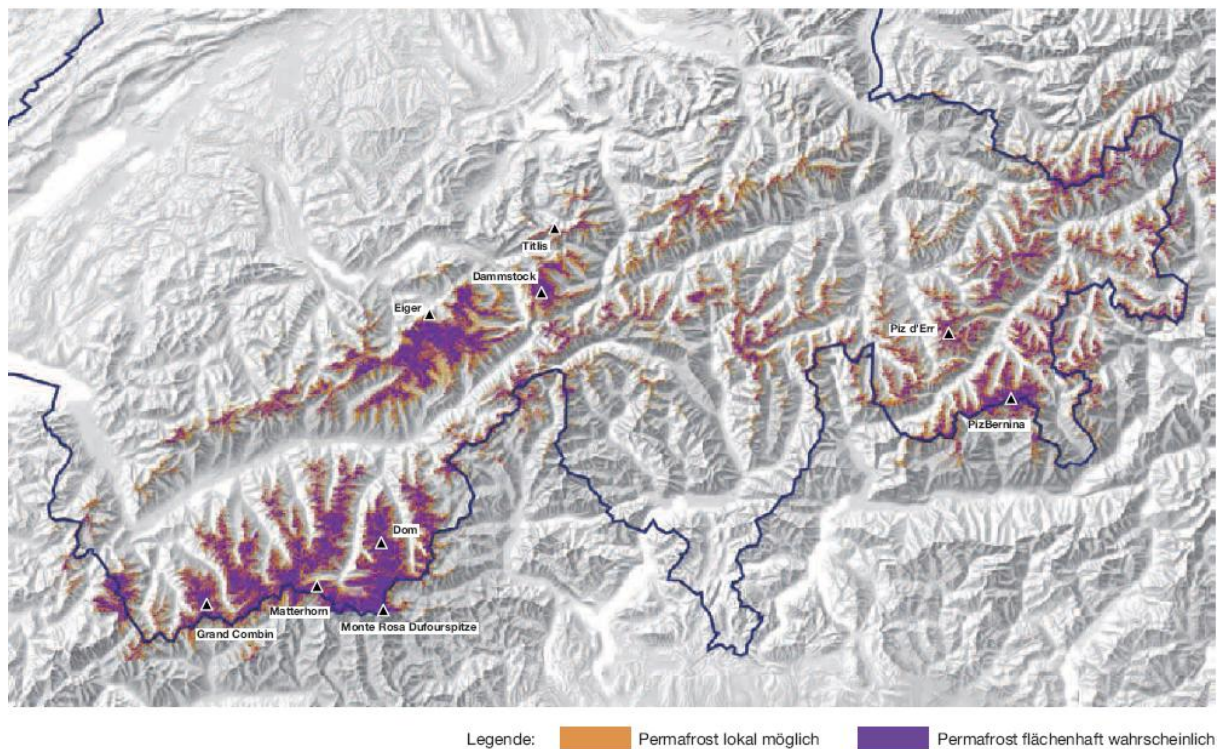


Abbildung 7-11: Potentielle Permafrostverteilung in der Schweiz. Aus Bommer et al. (2009).

Tabelle 7-2: Flächen mit wahrscheinlichem Permafrost in Österreich nach den Modellrechnungen von Ebohon und Schrott (2008).

Bundesland	Fläche (km ²)
Burgenland	0
Kärnten	74
Oberösterreich	0
Niederösterreich	1
Salzburg	92
Steiermark	1
Vorarlberg	16
Tirol	689
Wien	0
Österreich	873

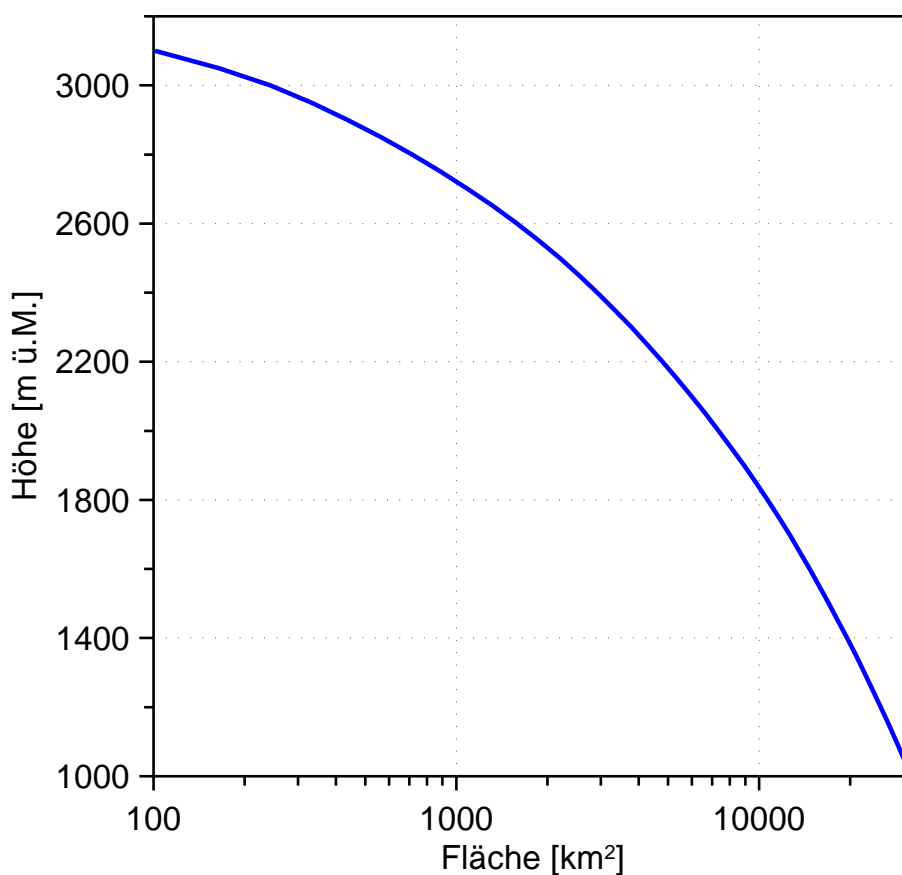


Abbildung 7-12: Hypsometrische Kurve Österreichs (Höhen über 1000 m).

Tabelle 7-3: Grobe Abschätzung der Veränderung der Permafrostflächen in Österreich und Vergleich mit tieferliegenden Flächen.

Seehöhenbereich	2600–2750 m	1500–2600 m	1000–2600 m
Fläche	800 km ²	15 000 km ²	30 000 km ²
Wahrscheinliche Permafrostfläche	400 km ²		
Permafrostfläche bezogen auf Fläche 1500–2600 m	2,7%		
Permafrostfläche bezogen auf Fläche 1000–2600 m	1,3%		

8. Wasserdargebot Grundwasser

8.1 Kurzfassung

Prozesse der Grundwasserneubildung

- In den folgenden Überlegungen werden die Porengrundwasservorkommen aus regionaler Sicht betrachtet.
- Die Grundwasserneubildung kann entweder durch Versickerung von Niederschlägen oder über die Versickerung von Oberflächenwasser erfolgen. Der Anteil an der Neubildung dieser beiden Prozesse ist in den einzelnen Grundwassergebieten sehr unterschiedlich. Die Größe der Grundwasserneubildung wird durch die Höhe des Niederschlags, das Klima, die Hydrogeologie, die Beschaffenheit der Gewässersohle und die Wassertemperatur bestimmt (*harte Aussage*).
- Vorwiegend kommt es im Frühjahr zur Grundwasserneubildung, welche auch in den Ganglinien des Grundwasserstandes deutlich zum Ausdruck kommt. Diese Saisonalität ist entsprechend auch bei den klimainduzierten Änderungen in den Eingangsgrößen (Niederschlag, Temperatur/Verdunstung, Abflüsse) zu berücksichtigen (*harte Aussage*).

Situation in der Vergangenheit

- Auswertungen der Langzeitentwicklung des Grundwasserstandes zeigen, dass das Trendverhalten in aufeinanderfolgenden Dekaden (1961-70, 1971-80, 1981-90, 1991-00, 2001-2006) häufig entgegengesetzt ist (*harte Aussage*). Deswegen sind Trends stark von den jeweils gewählten Zeitfenstern abhängig.
- Die Auswertungen der Zeitreihen 1976 bis 2006 zeigen, dass bei 24% der 2376 betrachteten Grundwassermessstellen die Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes einen fallenden Trend und 10% einen steigenden Trend aufweisen (*harte Aussage*).
- Die Trends über die letzten 50 Jahre (656 Messstellen) zeigen einen größeren Prozentsatz (42%) an Messstellen mit fallendem Trend (*harte Aussage*).
- Die Abnahme der Winter und Frühjahrsniederschläge von Vorarlberg über Kärnten, Südsteiermark, Burgenland bis zur Donau spiegelt sich auch in einer Abnahme der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände in vielen Messstellen dieser Regionen wieder. Der in den Sommer- und Herbstniederschlägen teilweise vorhandene positive Trend kann den fallenden Trend in den Grundwasserständen nicht kompensieren (*harte Aussage*).
- Die Abnahme der Abflüsse im Süden und Südosten zeigen sich auch in einer Abnahme des Grundwasserstandes in den gewässernahen Grundwasservorkommen. Inwieweit hier eine Überlagerung der Ursachen durch die errichteten Flusskraftwerke gegeben ist, müsste in Detailuntersuchungen analysiert werden (*weiche Aussage*).
- Im Grundwasservorkommen Parndorfer Platte und Seewinkel können die fallenden Trends im Grundwasserstand auch mit dem Einfluss von Grundwasserentnahmen (z.B. für landwirtschaftliche Bewässerung) zusammenhängen (*mittelharte Aussage*).
- Auffallend ist die starke Zunahme der Grundwasserstände im Süden des Südlichen Wiener Beckens im Zeitraum 1976 – 2006, welche auf eine Erhöhung der Abflüsse im alpinen Bereich zurückgeführt wird (*harte Aussage*).
- Erhöhte Abflüsse und Niederschläge in den Zentralalpen im Zeitraum 1976 – 2006 lassen auch eine Zunahme des Grundwasserdargebotes in den Karst- und

Kluftgrundwasservorkommen erwarten (diese wurden hier aufgrund unzureichender Datenlage nicht untersucht) (weiche Aussage).

- Die Grundwassertemperaturen nahmen im Zeitraum 1976 – 2006 mit ganz wenigen Ausnahmen in den beobachteten Messstellen zum Teil deutlich zu (zwischen 0,3 bis 1,2 °C) (harte Aussage).
- Zwischen Lufttemperatur und Grundwassertemperatur lässt sich aus den Daten der Zeitreihe 1976 bis 2006 ein regionaler Zusammenhang von einem Anstieg von 0,5 bis 1,0 °C pro 1,0 °C Lufttemperaturzunahme ableiten, der jedoch von der lokalen Grundwassersituation stark beeinflusst wird (mittelharte Aussage).

Situation in der Zukunft

- Die Szenarienrechnungen mit dem Klimamodell CCM lassen für den Zeitraum 2021 – 2050 gegenüber 1976 – 2006 folgende regionale Auswirkungen auf die Grundwasservorkommen erwarten:
 - Für den Süden Österreichs (Kärnten, Steiermark), wo auch eine Abnahme der Winterschläge erwartet wird, ist mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung zu rechnen (mittelharte Aussage).
 - Aufgrund der erhöhten Winter- und Frühjahrsniederschläge im Norden und Westen ist in diesen Regionen eher eine Zunahme der Grundwasserneubildung zu erwarten (weiche Aussage).
 - Durch die vermutlich geringe Zunahme der Niederschläge und der erwartenden Temperaturerhöhung sind in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs eher sinkende Grundwasserstände zu erwarten (weiche Aussage).
- Prognosen über eine Änderung in den Grundwasserständen einzelner Messstellen sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da diese von den sehr lokalen Verhältnissen geprägt werden (harte Aussage).
- Mit einer Zunahme der Grundwassertemperatur zwischen 0,2 und 1 °C ist zu rechnen, wobei der genaue Wert wieder von den lokalen Verhältnissen abhängt (harte Aussage).

Anpassungsmaßnahmen

- Eine Fortsetzung bzw. Intensivierung der Wasserwirtschaftlichen Planung der Grundwasservorkommen erscheint speziell in den niederschlagsarmen Regionen des Ostens und Südens Österreichs sinnvoll. Wegen der Klimaänderung könnte der Nutzungsdruck auf die Grundwasservorkommen erhöht werden. Deshalb können regional Strategien hinsichtlich der Deckung eines zu erwartenden vermehrten Wasserbedarfes notwendig werden.
- Wegen der zukünftig zu erwartenden höheren Grundwassertemperaturen wird eine Überprüfung von Einflussnahmen auf den Wärmehaushalt des Grundwassers bei zukünftigen Konsensen empfohlen.
- Das Messstellennetz zur Grundwasserstandsmessung sollte zumindest in diesem Umfang erhalten werden, um für die wasserwirtschaftlichen Planungsaufgaben die notwendigen Informationen zu erhalten bzw. zu verdichten. Das Messstellennetz zur Grundwassertemperaturmessung sollte in intensiv genutzten Gebieten verdichtet werden, um die Grundwassertemperatur und den zu erwartenden Anstieg besser dokumentieren und damit bessere Aussagen treffen zu können.
- Durch steigende Grundwasserstände könnten in Gebieten mit derzeit schon bestehenden Problemen bei Kellervernässungen diese zunehmen. Eine Überprüfung der Bauvorschriften könnte in diesen Fällen notwendig werden. Eine Berücksichtigung bei der regionalen Raumplanung wird angeraten.

8.2 Vorgangsweise

Methodisch erfolgt die Beurteilung von Klimaauswirkungen auf die quantitativen Grundwasserverhältnisse auf Basis von drei Arten vorhandener bzw. für diese Studie gemachter Untersuchungen.

Der erste Schritt besteht in einer generellen Prozessbeschreibung und einer Darstellung von Einflussgrößen auf den Grundwasserhaushalt. Es werden keine Berechnungen durchgeführt, sondern Schlüsse auf Basis allgemeiner Überlegungen gezogen. Der Vorteil dieser Vorgangsweise besteht darin, nachvollziehbare Zusammenhänge aufzuzeigen, die für die Entscheidungsfindung sehr wichtig sind, allerdings ist die Quantifizierung der Größenordnung von Einflüssen kaum möglich.

Die zweite Art der Untersuchung sind Trendanalysen beobachteter Daten. Die bestehenden Trenduntersuchungen werden in Hinblick auf die Signifikanz von Trends und deren regionale Unterschiede beurteilt. Trendanalysen hydrologisch-wasserwirtschaftlicher Kenngrößen werden dann argumentativ mit Trends meteorologischer Größen wie Niederschlag und Lufttemperatur in Beziehung gesetzt. Daraus lassen sich Schlüsse aus wasserwirtschaftlicher Perspektive über weiche bis harte Fakten von Auswirkungen des Klimawandels ziehen.

Die dritte Art der Beurteilung von Klimaauswirkungen beruht auf Ergebnissen von Szenarienrechnungen aus dem Klimamodell CCM und den anderen Teilbereichen dieser Studie (zB. Abflüsse). Ähnlich wie zuvor werden die Modellergebnisse ebenfalls argumentativ hinsichtlich der Veränderungen in den Grundwasserstandsverhältnissen diskutiert.

Die Sichtung der Literatur erfolgt hier auf Basis dieser methodischen Zugänge. Das Verstehen der Wirkungsmechanismen, die Plausibilität und hydrologische Nachvollziehbarkeit stehen im Vordergrund.

8.3 Prozesse der Grundwasserneubildung in Österreich

8.3.1 Grundwasserneubildung aus Niederschlägen

Die Größe der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen wird durch das Zusammenwirken von Niederschlag (Regen bzw. Schnee), dem Klima (Verdunstung), der Vegetation und den hydrogeologischen Verhältnissen (Bodenverhältnisse, Flurabstand) bestimmt.

Eine Analyse der einzelnen Eingangsgrößen erlaubt in weiterer Folge wertvolle Aufschlüsse über klima-indizierte Veränderungen hinsichtlich der Grundwasserneubildung und damit auch hinsichtlich der quantitativen Grundwasserverhältnisse in Form der Grundwasserstände. So lässt beispielsweise eine Erhöhung der Niederschlagssummen im Herbst und Winter auf eine erhöhte Grundwasserneubildung im Frühjahr schließen, wodurch meist auch von einem erhöhten quantitativen Grundwasserdargebot ausgegangen werden kann.

Die Abbildung 8-1 zeigt die Trends der Jahresniederschlagssummen für Österreich basierend auf eigenen Auswertungen der Jahresreihen 1976-2007, wobei jene Stationen berücksichtigt wurden, bei welchen mindestens 25 Jahreswerte vorhanden sind. Die Auswertungen zeigen für die Zentralalpen, Salzburg, Oberösterreich, Niederösterreich und das nördliche Burgenland eine Zunahme der Jahresniederschläge. Eine Abnahmetendenz ist im südlichen Kärnten und teilweise in Vorarlberg erkennbar.

Niederschlag Jahreswerte
 Periode 1976 - 2007 (mind. 25 Jahre)

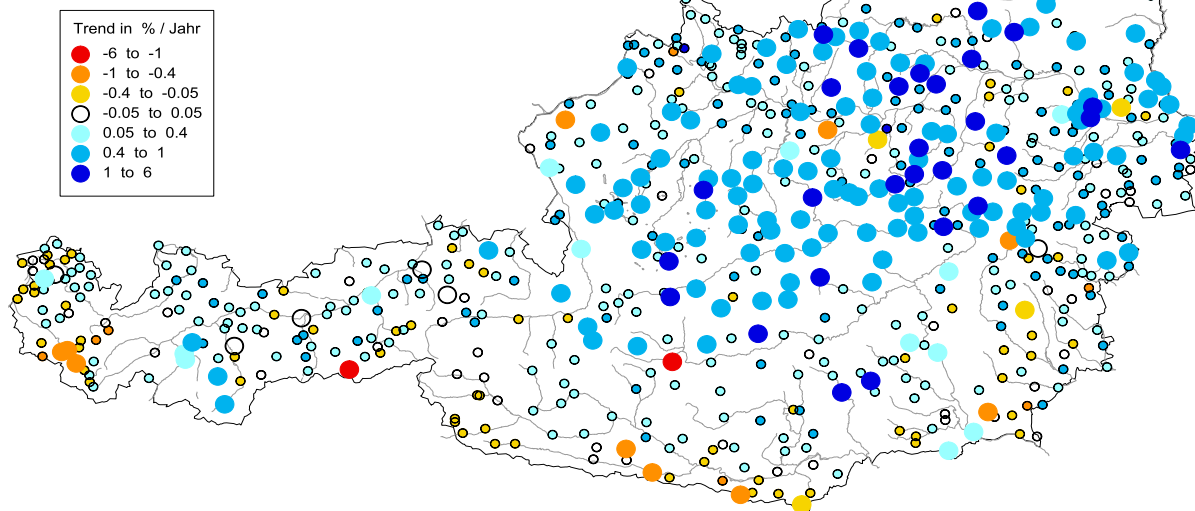


Abbildung 8-1: Trends der Jahresniederschläge für die Periode 1976-2007 (siehe Kapitel 4)

In der Abbildung 8-2 sind der Trend der Niederschlagssummen für die Winter und Frühjahrsperiode für Österreich der Jahresreihe 1976 bis 2007 dargestellt. Diese für die Grundwasserneubildung maßgebenden Abschnitte im Jahresverlauf verhielten sich zum Teil deutlich anders als der Jahrestrend. Es sind speziell die Monate Dezember bis Februar, welche vorwiegend eine Abnahme der Niederschläge zeigten. Das Muster dieser geringeren Winter- und teilweise auch Frühjahrsniederschläge findet sich in den Trends der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände (Abbildung 8-3) der Porengrundwasservorkommen wieder. Ausnahmen finden sich entlang der Flüsse, wo es zu einer Überlagerung von Grundwasserneubildungseffekten durch die Versickerung von Flusswasser kommen dürfte.

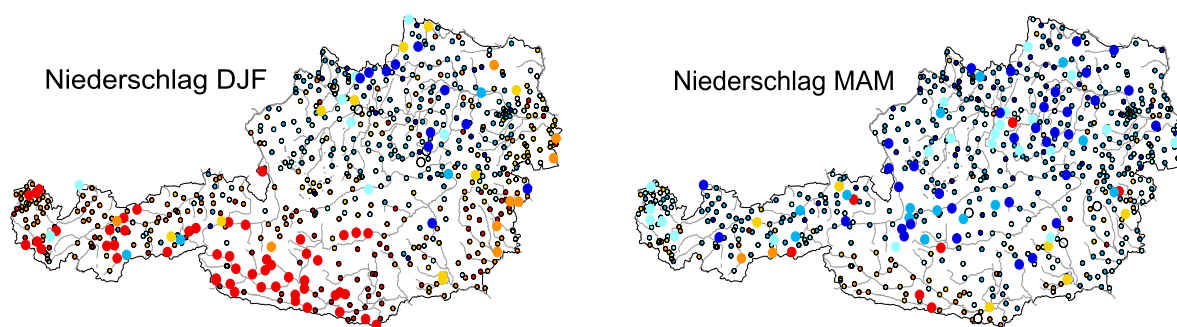


Abbildung 8-2: Trends der Niederschlagssummen für Winter und Frühjahr für die Jahresreihe 1976 bis 2007 (Kapitel 4).

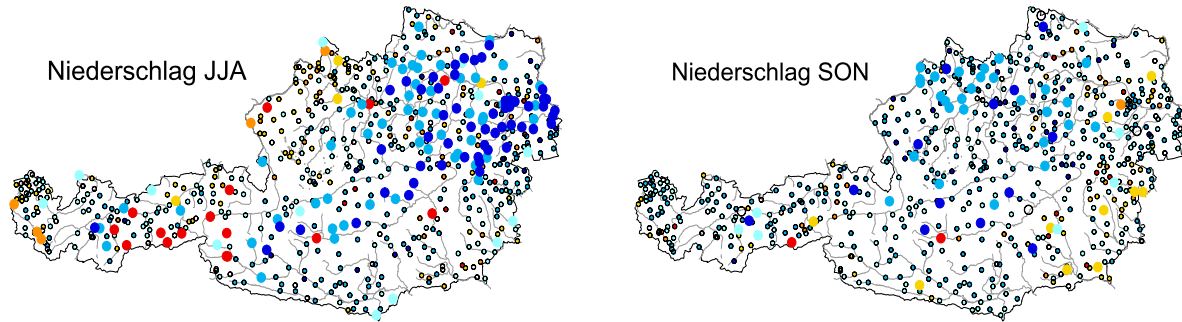


Abbildung 8-3: Niederschlagssummen für die Sommer- und Herbstperiode für Österreich der Jahresreihe 1976 bis 2007 (Kapitel 4).

8.3.2 Grundwasserneubildung durch Versickerung aus Oberflächengewässern

Die Größe der Grundwasserneubildung aus der Versickerung aus Oberflächengewässern wird durch den vorhandenen Potentialunterschied zwischen Oberflächengewässerspiegel und Grundwasserspiegel, der Durchlässigkeit der Gewässersohle, dem hydrogeologischen Verhältnissen im Aquifer und der Wassertemperatur bestimmt.

Die Abbildung 8-4 zeigt den Trend der mittleren Jahresabflüsse und die Abbildung 8-5 den Trend für die Niederwasserabflüsse (Q95) für Österreich basierend auf den Jahresreihen 1976 bis 2007 unter Verwendung von Stationen mit mindestens 25 Jahreswerten in dieser Periode.

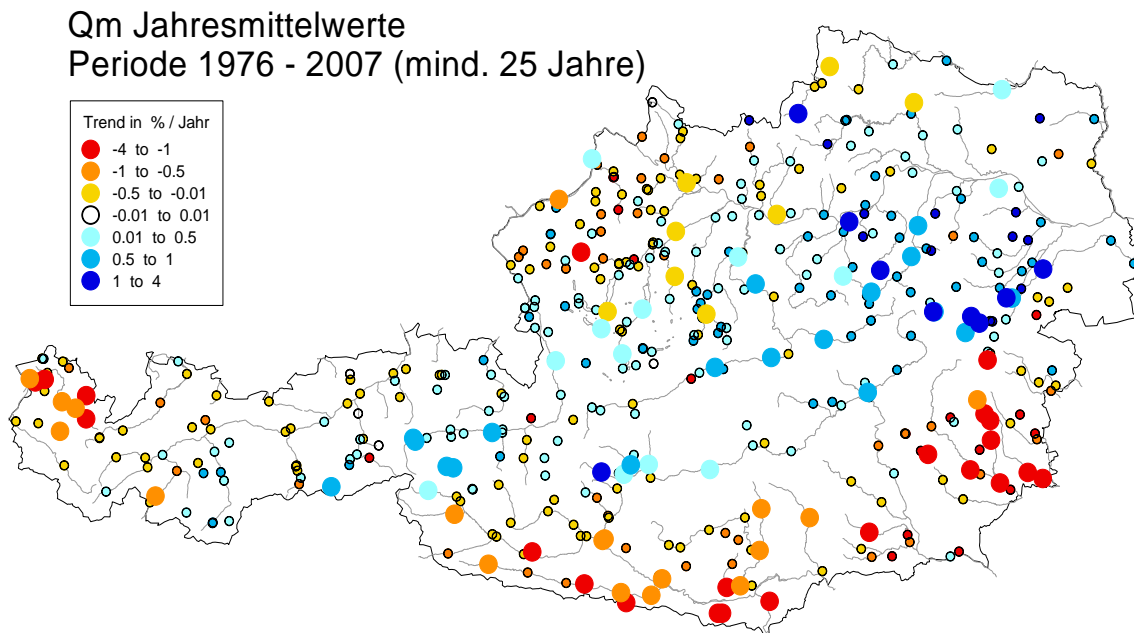


Abbildung 8-4: Mittlere Jahresabflüsse für Österreich für die Periode 1976 bis 2007 (Kapitel 4).

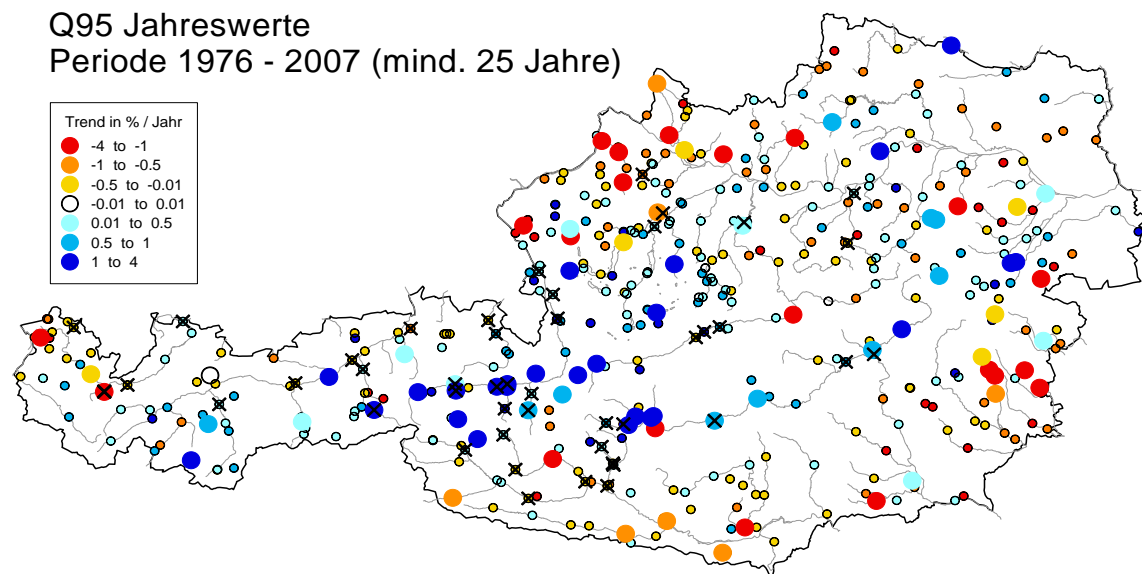


Abbildung 8-5: Niederwasserabflüsse (Q95) für Österreich für die Periode 1976 bis 2007 (Kapitel 5)

Eine Analyse der Trendauswertungen der letzten Jahrzehnte zeigt eine Abnahme der mittleren Abflüsse in Vorarlberg, Kärnten, Südsteiermark, Südburgenland und Zunahmen in den Zentralalpen. Ähnlich verhalten sich auch die Niederwasserabflüsse, wobei im oberösterreichischen nördlichen Innviertel eine deutlichere Abnahme erkennbar ist. Diese Muster in den Abflüssen sind auch in den Grundwasserständen erkennbar, wobei im Gewässernahbereich überlagernde Effekte durch Stauhaltungen bzw. Grundwasserneubildung aus Niederschlägen möglich sind.

8.4 Grundwassertemperatur

Veränderungen der Lufttemperatur können speziell in den oberflächennahen Grundwasserkörpern zu Veränderungen der Grundwassertemperatur führen. Bei Grundwasserneubildung über die Versickerung von Oberflächenwasser kann dies durch eine veränderte Wassertemperatur in den Fließgewässern erfolgen. Lokal kann die Grundwassertemperatur stark von den örtlichen Verhältnissen beeinflusst sein.

In der Abbildung 8-6 ist die Auswertung der Lufttemperatur für den Zeitraum 1961 – 1990 dargestellt. Ergänzend ist in der Abbildung 8-7 die mittlere jährliche Wassertemperatur (°C) der Periode 1976-2007 in den Oberflächengewässern dargestellt.

Die Abbildungen zeigen höhere Temperaturen sowohl der Luft als auch in den Oberflächengewässern in einem Bogen von Oberösterreich über Niederösterreich, Burgenland, Oststeiermark bis nach Kärnten.

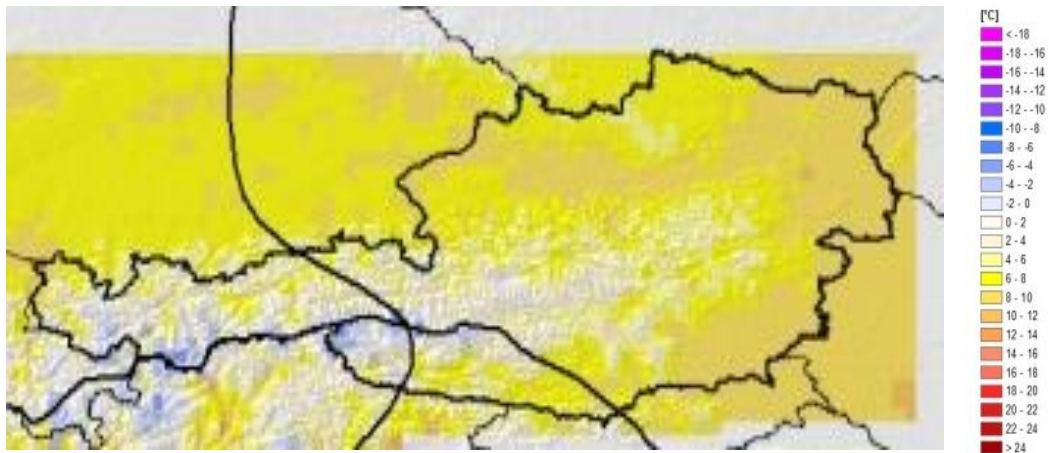


Abbildung 8-6: Jahresmitteltemperaturen aus HISTALP-Stationsdaten für die Normalperiode 1961-1990 (ZAMG)

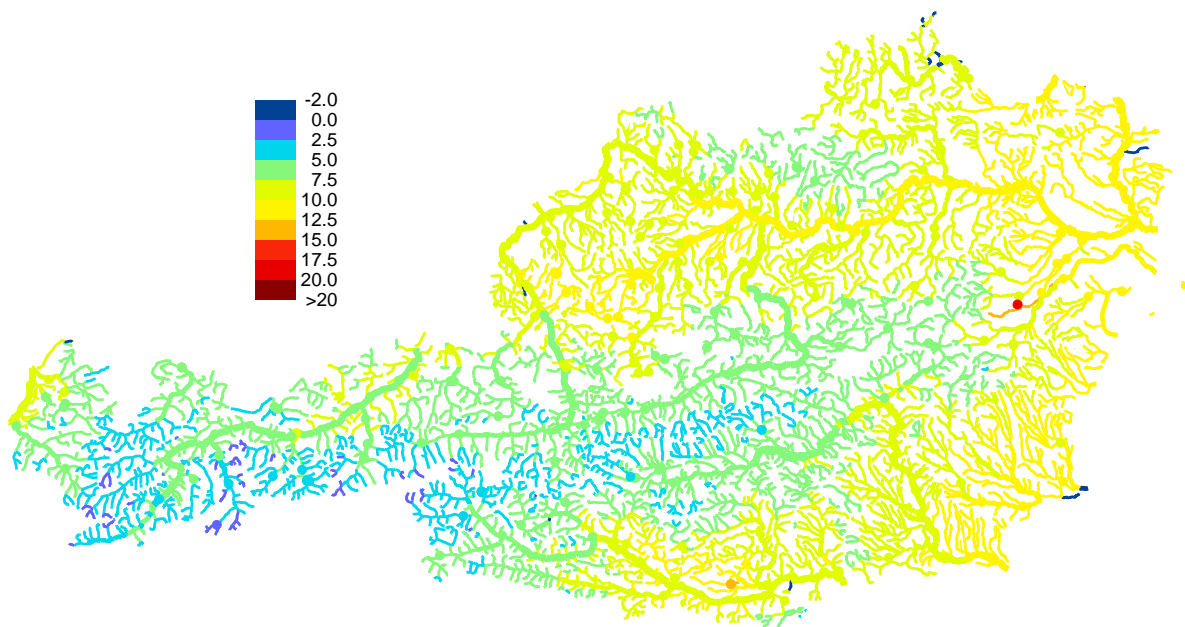


Abbildung 8-7: Mittlere jährliche Wassertemperatur (°C) der Periode 1976-2007 (Kapitel 6)

8.5 Situation in der Vergangenheit

8.5.1 Interpretation von Trends

Trendanalysen geben Aufschlüsse über das beobachtete Verhalten der Grundwasserstände und die damit in Verbindung stehenden Prozesse, die möglicherweise am Trendverhalten beteiligt sind. Die Vorteile der Trendanalysen bestehen darin, dass sie auf die tatsächlich beobachteten Daten (Vergangenheit) aufbauen. Solche Beobachtungsdaten enthalten alle Veränderungen an einer Messstation summarisch d.h. verschiedene möglicherweise entgegengesetzte Prozesswirkungen werden in Bezug auf die Veränderung einer bestimmten Größe betrachtet. So kann beispielsweise eine geänderte Grundwassernutzung, Änderungen in der Landnutzung, wasserbauliche Maßnahmen und auch die Klimavariabilität (natürlich und/oder anthropogen) in diesen Daten enthalten sein. Eine Trennung der Einflüsse hinsichtlich geänderter Grundwasserentnahmen oder wasserbaulicher

Maßnahmen ist meist möglich, wohingegen Änderungen in der Landnutzung und im Klima nur schwer ableitbar sind. Trendanalysen haben den Nachteil, dass sie den Trend für ein bestimmtes Zeitfenster angeben und dieser stark von der Zusammensetzung der Reihe abhängig ist. Das Auftreten von Jahrzehnten mit hohen Grundwasserständen kann, je nach Lage in der Beobachtungsreihe, den Trend entscheidend beeinflussen, wodurch die Aussagekraft solcher Trends eingeschränkt sein kann (Blaschke, 2007).

8.5.2 Ergebnisse von Trenduntersuchungen in der Literatur

Fazit:

- Kaum Untersuchungen zum Grundwasser vorhanden.
- Ein Anstieg der Grundwassertemperatur ist auch in der Schweiz und Deutschland festzustellen.

Tabelle 8-1: Trenduntersuchungen in der Literatur

Geografische und zeitliche Abgrenzung; Veröffentlichung	Aussagen
SCHWEIZ Kipfer, R.; Livingstone, D.M. EAWAG News 65d, 09.2008	In einigen Grundwasservorkommen ist ein Anstieg der Grundwassertemperatur zu verzeichnen. Damit einhergehend findet eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration statt.
WILLEMS, W. (2008): Endbericht im Auftrag von KLIWA	der Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten. Hier wurde das Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen anhand von Messreihen von 127 Stationen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz statistisch untersucht. Außerdem wurden deren Beziehungen zu den Klimakenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Wasserdargebot aus Schnee, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer sowie den weiteren Variablen NAO-Index und Sonnenfleckenanzahl untersucht. Die Veränderungen der betrachteten Klimavariablen korrelieren in der Regel signifikant mit den Veränderungen der Grundwasserstands und Quellschüttungen.
BRD Somon (2009), 39. Internat. Wasserbau Symposium Aachen	An Beispielauswertungen in der Region des Erftverbandes (Nordrhein-Westfalen), werden folgende Ergebnisse gezeigt: ansteigender Trend der Winterniederschlägen (Zunahme 1950-2000 von 11%) Lufttemperaturzunahme von 1,5 Grad C 1950 – 2000 einen Anstieg der Grundwassertemperatur von 0,7 C in 34 Jahren kein signifikanter Trend im Grundwasserstand Es wird auch auf den Einfluss der Auswahl des Zeitfensters hingewiesen.

8.5.3 Auswertungen in Österreich

Für die Trendanalysen wurden Reihen (1955 bis 2006) der jährlichen mittleren, maximalen und minimalen Grundwasserstände sowie Reihen der mittleren Grundwassertemperatur ausgewertet. Insgesamt standen Grundwasserstandsreihen von 2516 Messstellen und Grundwassertemperaturreihen von 255 Messstellen in Österreich für die Auswertungen zur Verfügung.

Für die Trendanalysen wurde der Mann-Kendall-Test (MK) herangezogen (siehe Kapitel 3.4.3). Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Trendberechnungen der Grundwasserstands- und -temperaturdaten für Österreich. Bei den Auswertungen der Grundwasserstände zeigt Blau steigende Trends, Rot fallende und die schwarzen Kreise keinen signifikanten Trend. Bei den Grundwassertempuratauswertungen ist die Farbskala umgedreht. Die Zahlen bedeuten den Anstieg der Trendgeraden pro Jahr. Ein Wert von 0.05 bedeutet etwa einen Anstieg des Grundwasserstandes von 5 cm pro Jahr.

Die Abbildung 8-8 bis Abbildung 8-23 zeigen den Trend der Jahresmittelwerte, Jahresmaxima und Jahresminima der Grundwasserstände basierend auf eigenen Auswertungen der Jahresreihen 1976 bis 2006. Es wurden jene Messstellen herangezogen, welche in der Zeitreihe 1956 bis 2006 mindestens 40 Werte und in der Zeitreihe 1976 bis 2006 mindestens 20 Werte vorhanden waren..

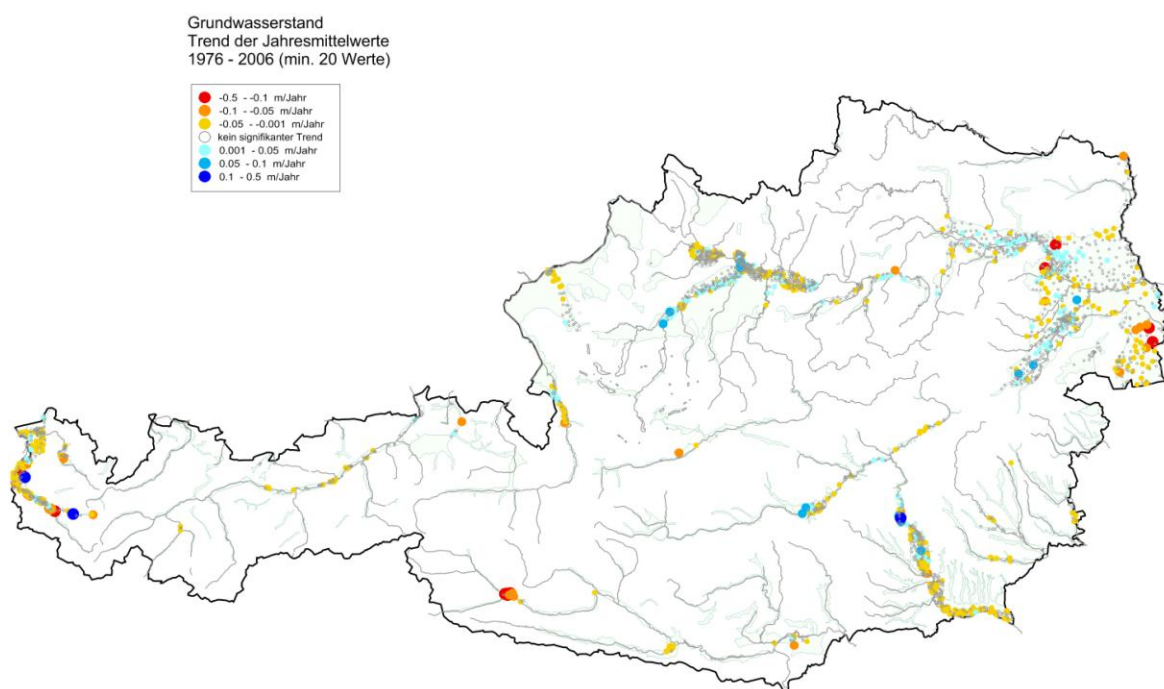


Abbildung 8-8: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

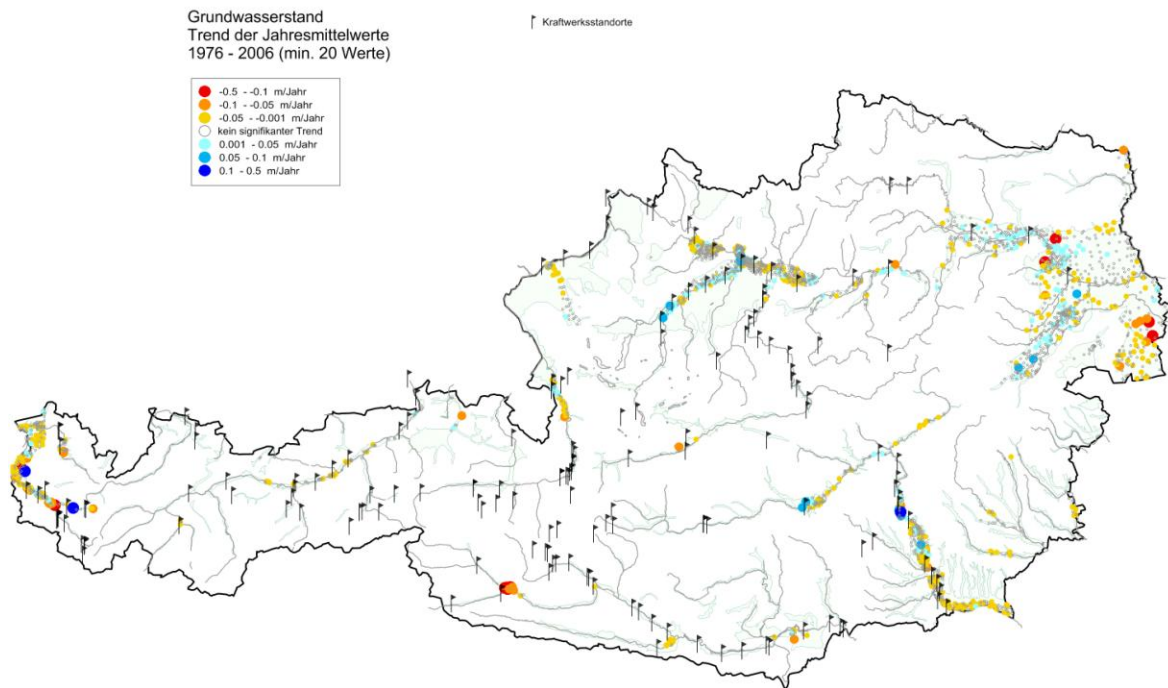


Abbildung 8-9: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006 mit den Standorten der Wasserkraftwerke.

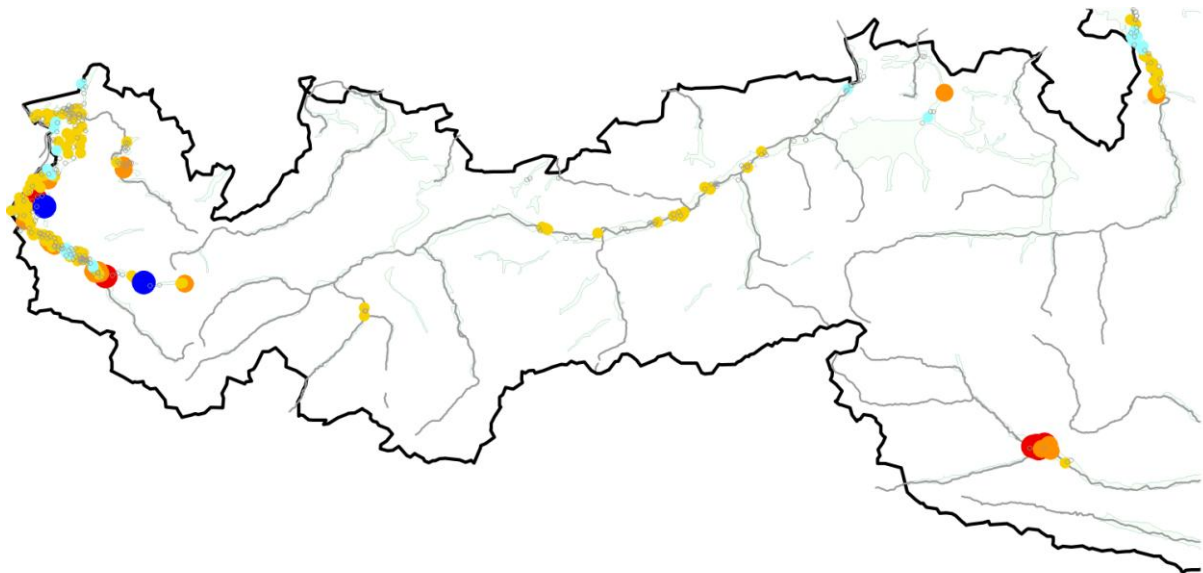


Abbildung 8-10: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Westen Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

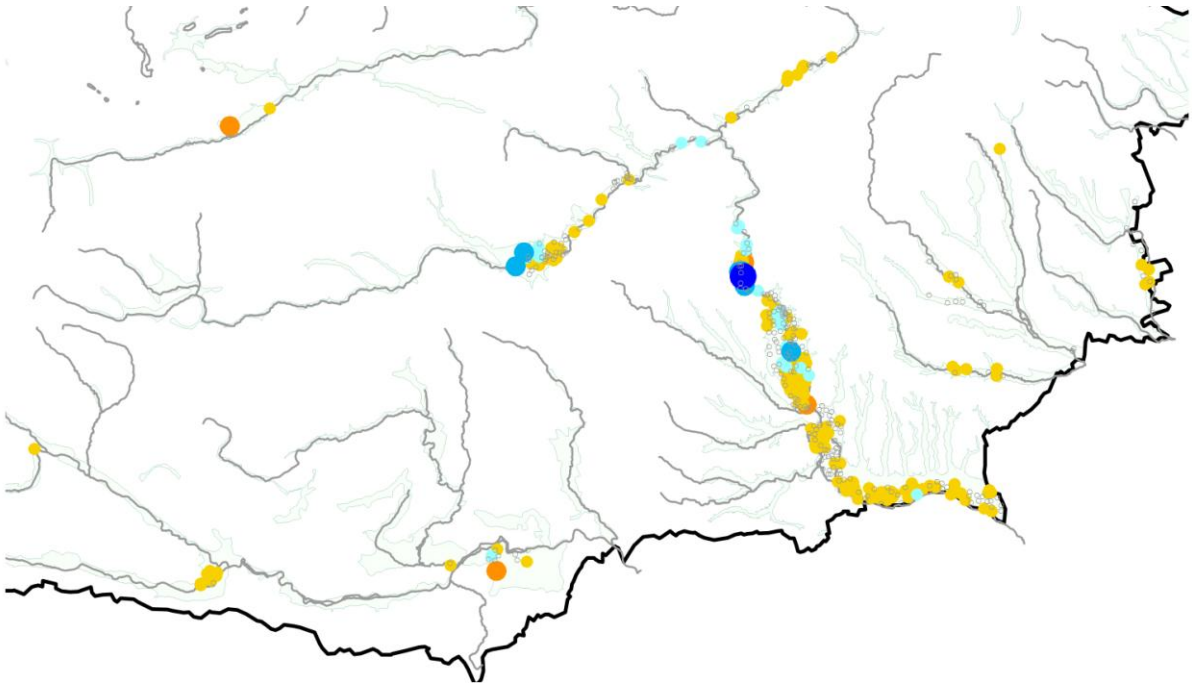


Abbildung 8-11: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Süden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

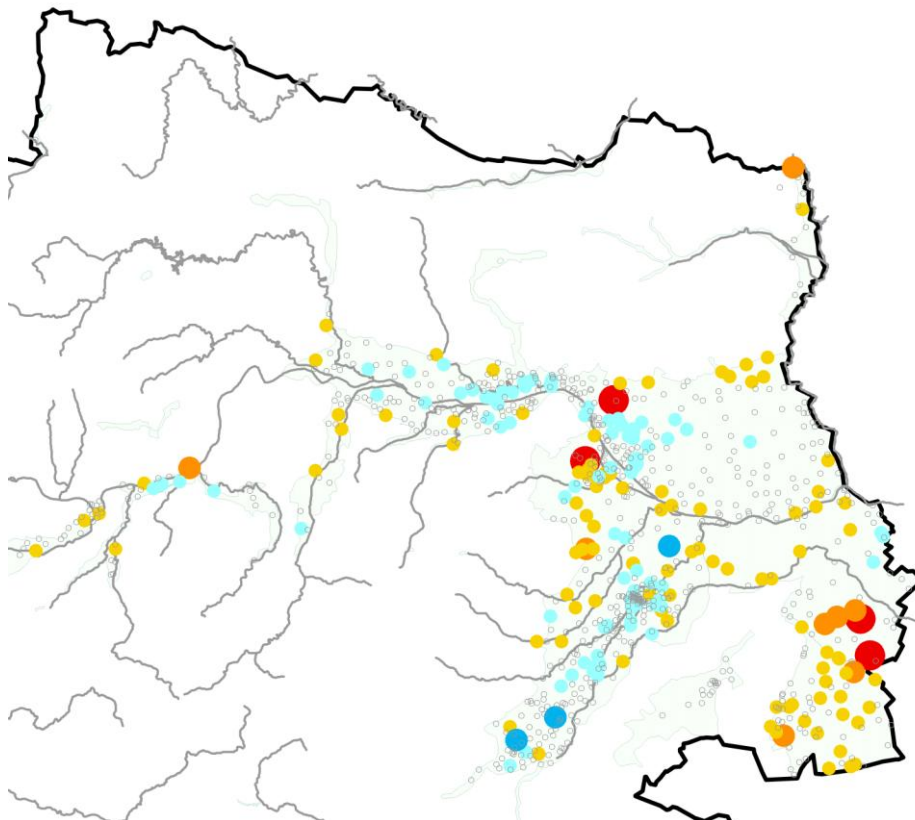


Abbildung 8-12: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

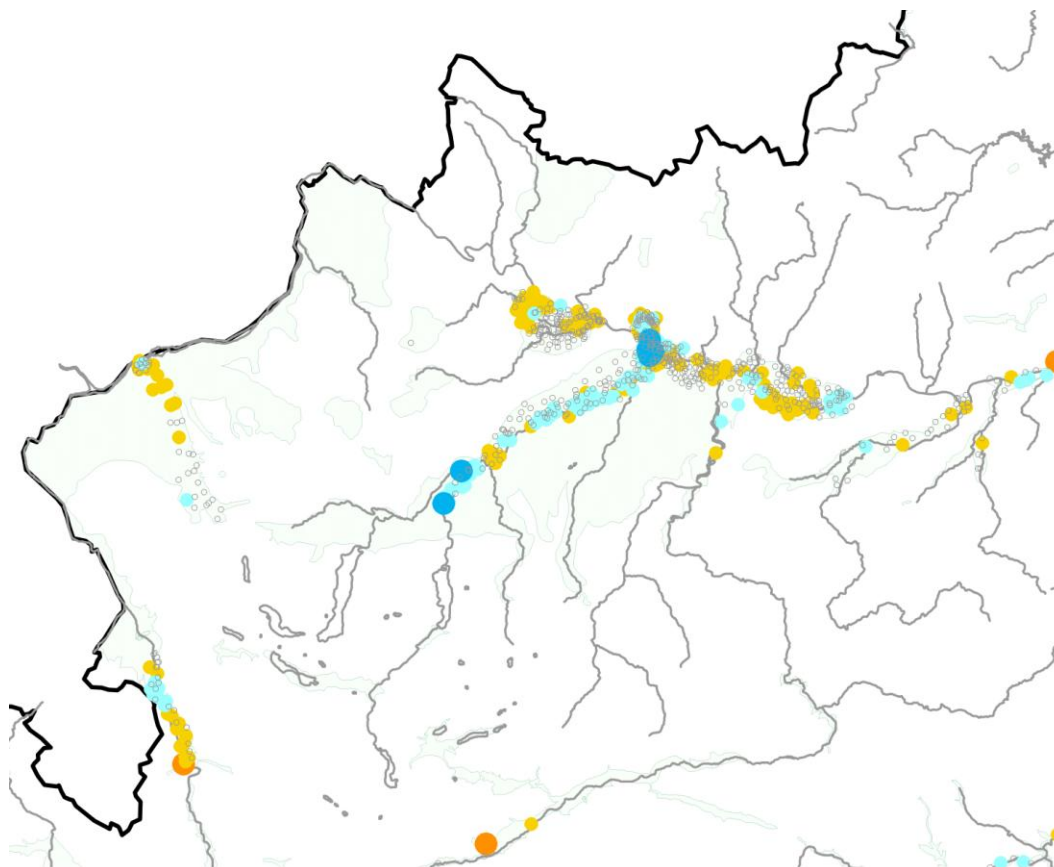


Abbildung 8-13: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände für den Norden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

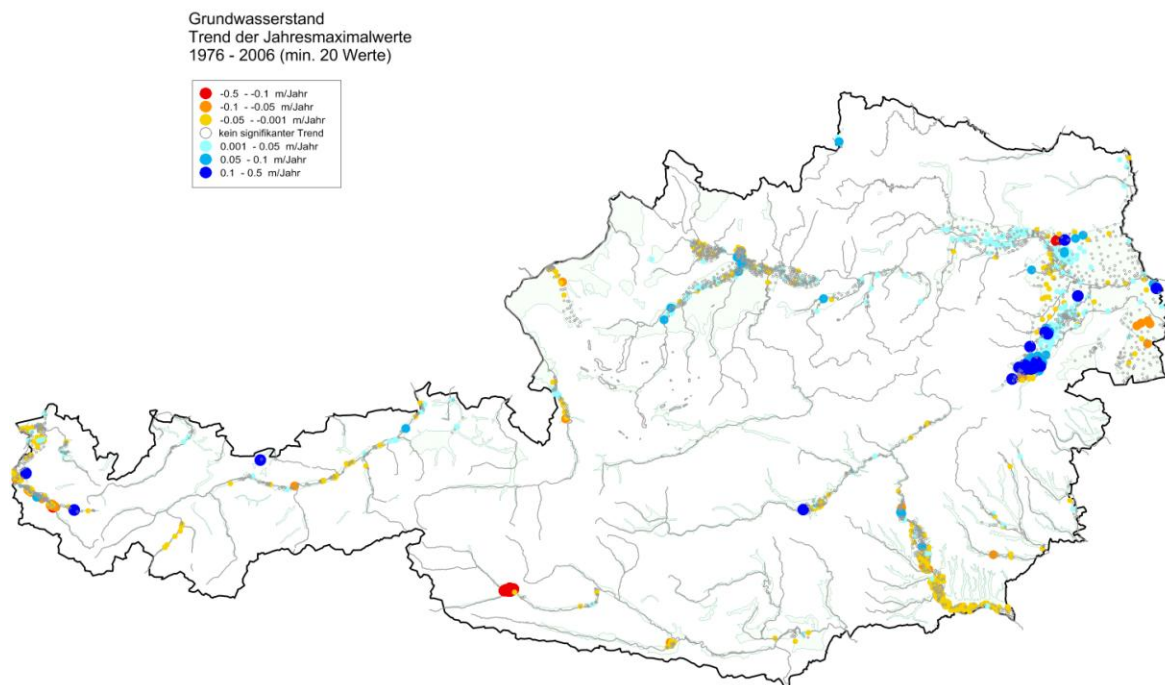


Abbildung 8-14: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

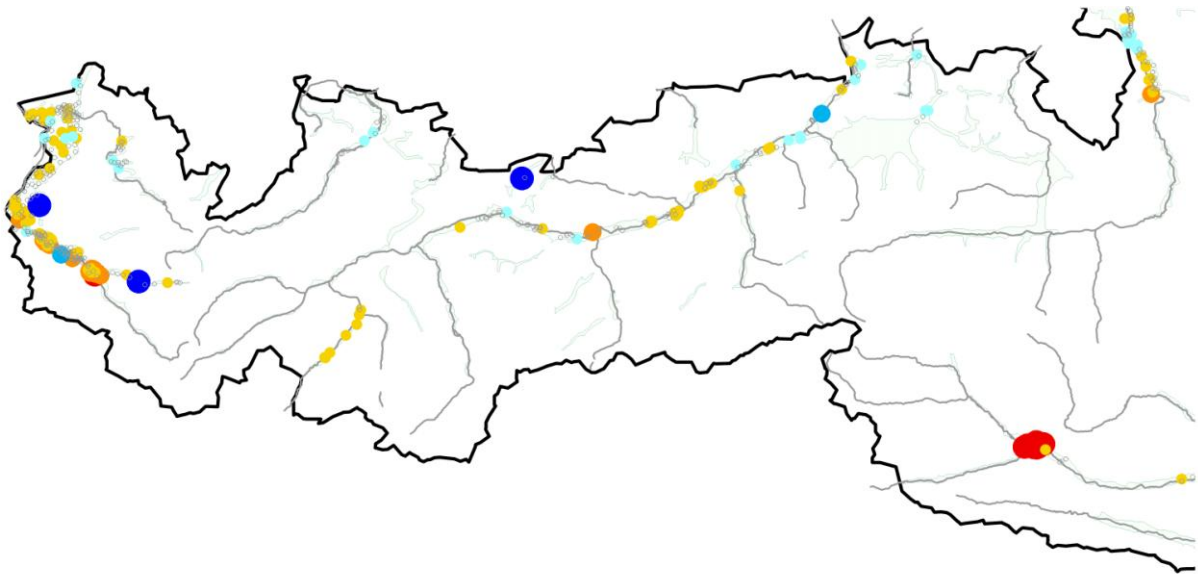


Abbildung 8-15: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für den Westen Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

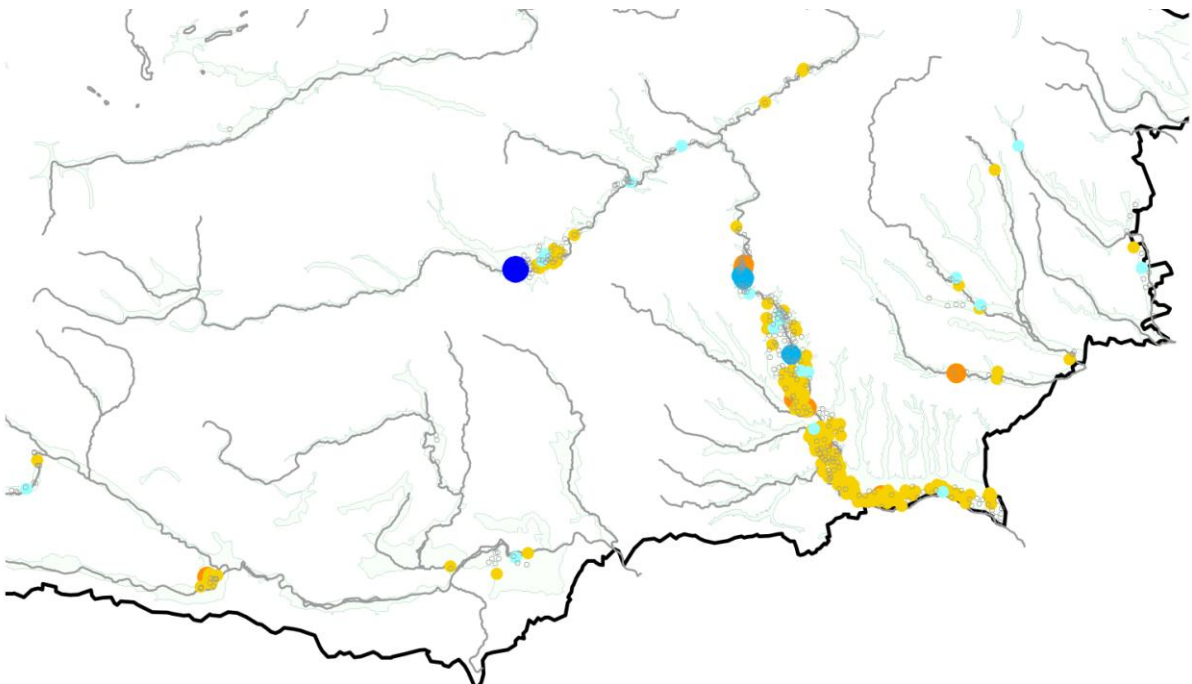


Abbildung 8-16: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für den Süden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

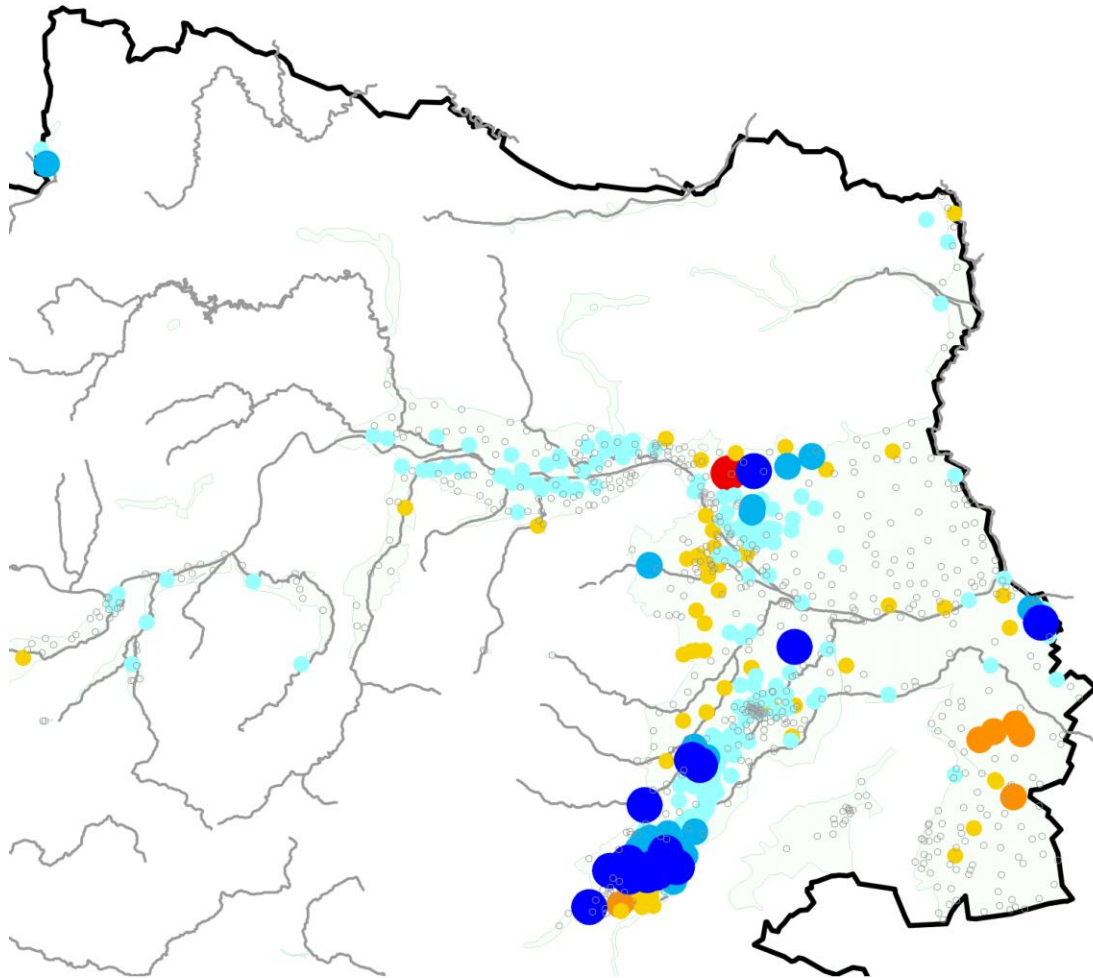


Abbildung 8-17: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

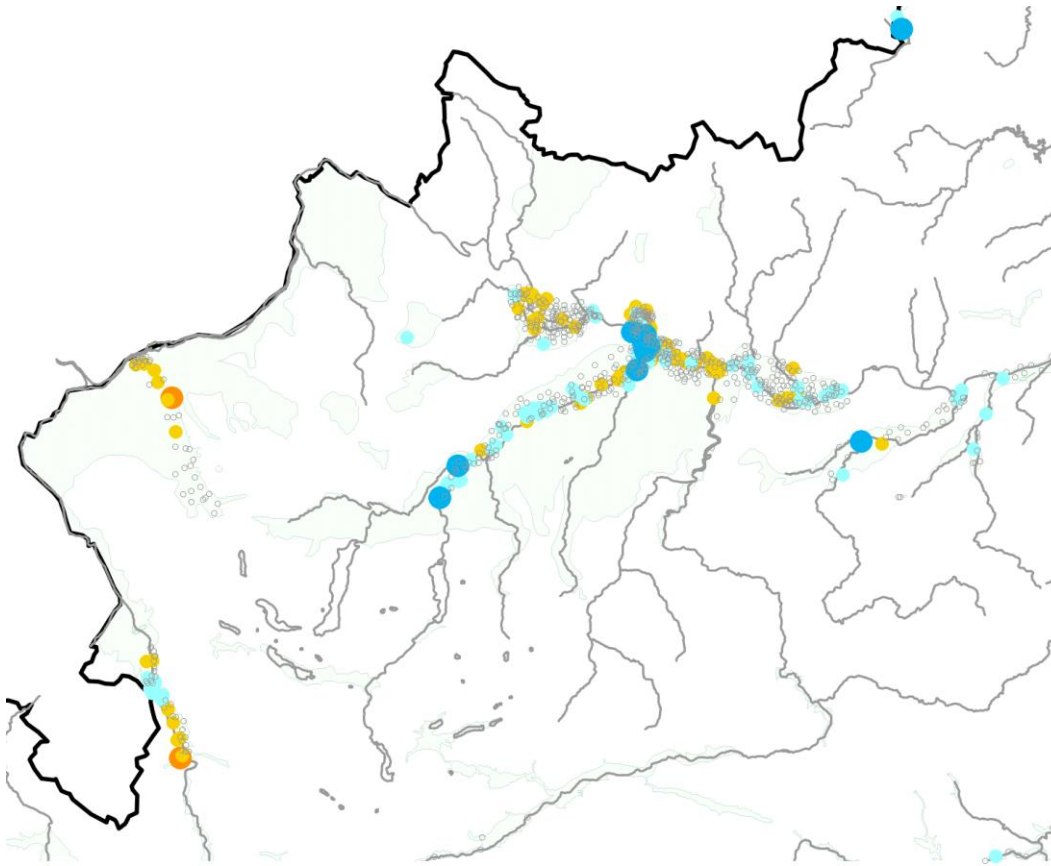


Abbildung 8-18: Trend der Jahresmaximalwerte der Grundwasserstände für den Norden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

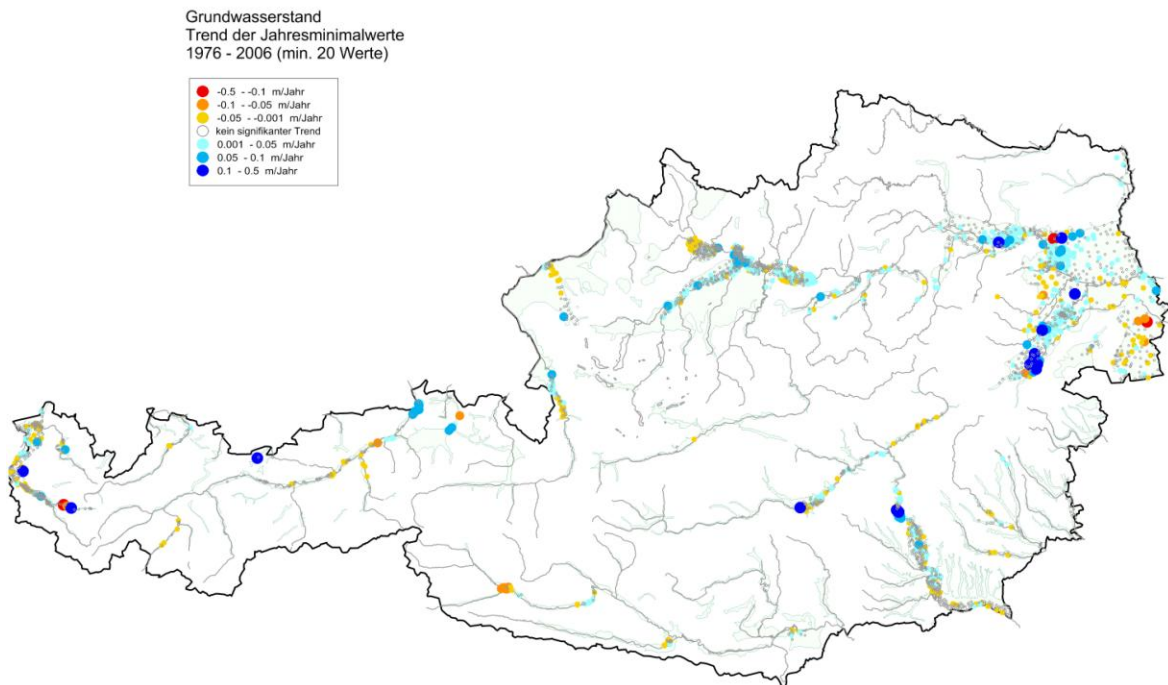


Abbildung 8-19: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

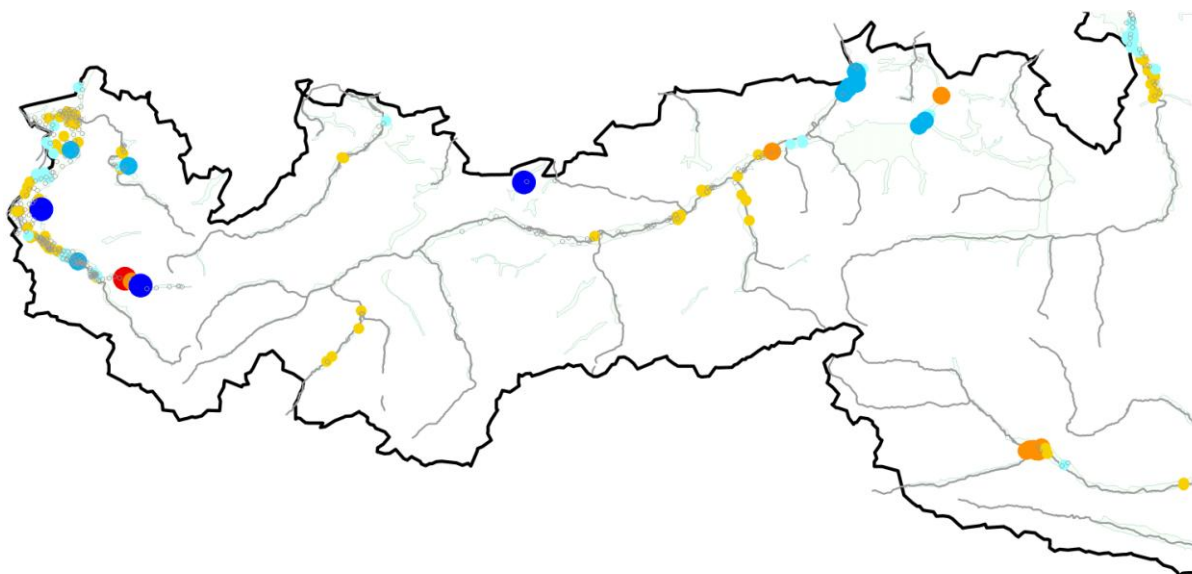


Abbildung 8-20: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für den Westen Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

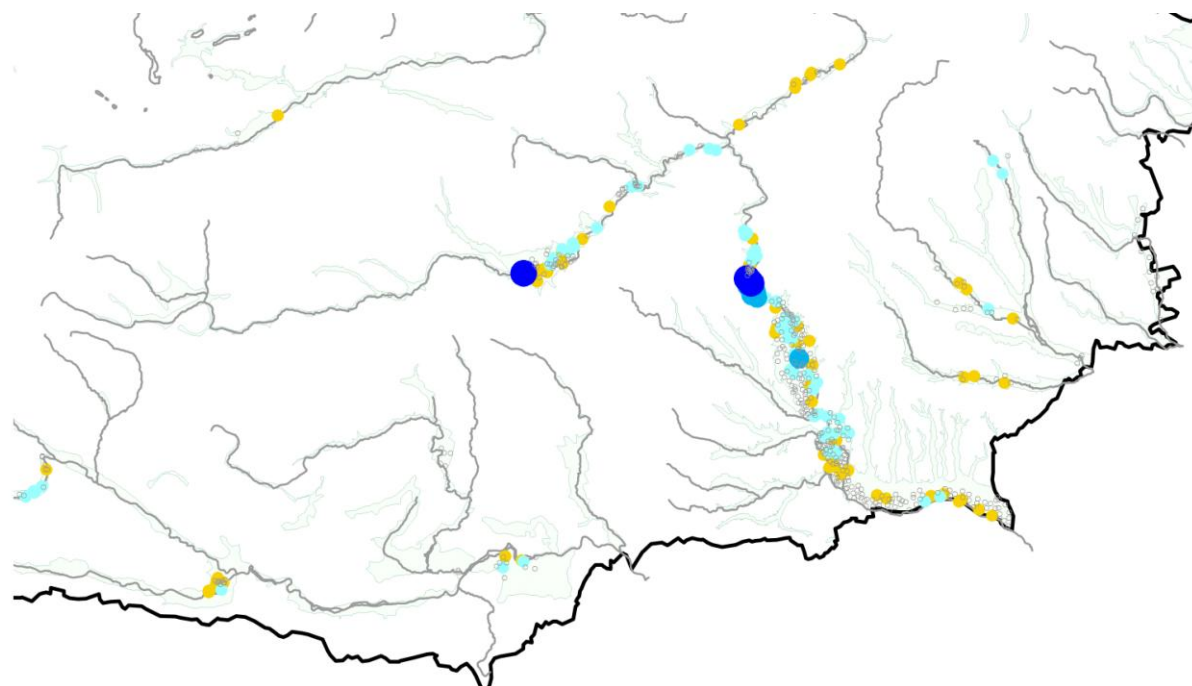


Abbildung 8-21: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für den Süden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

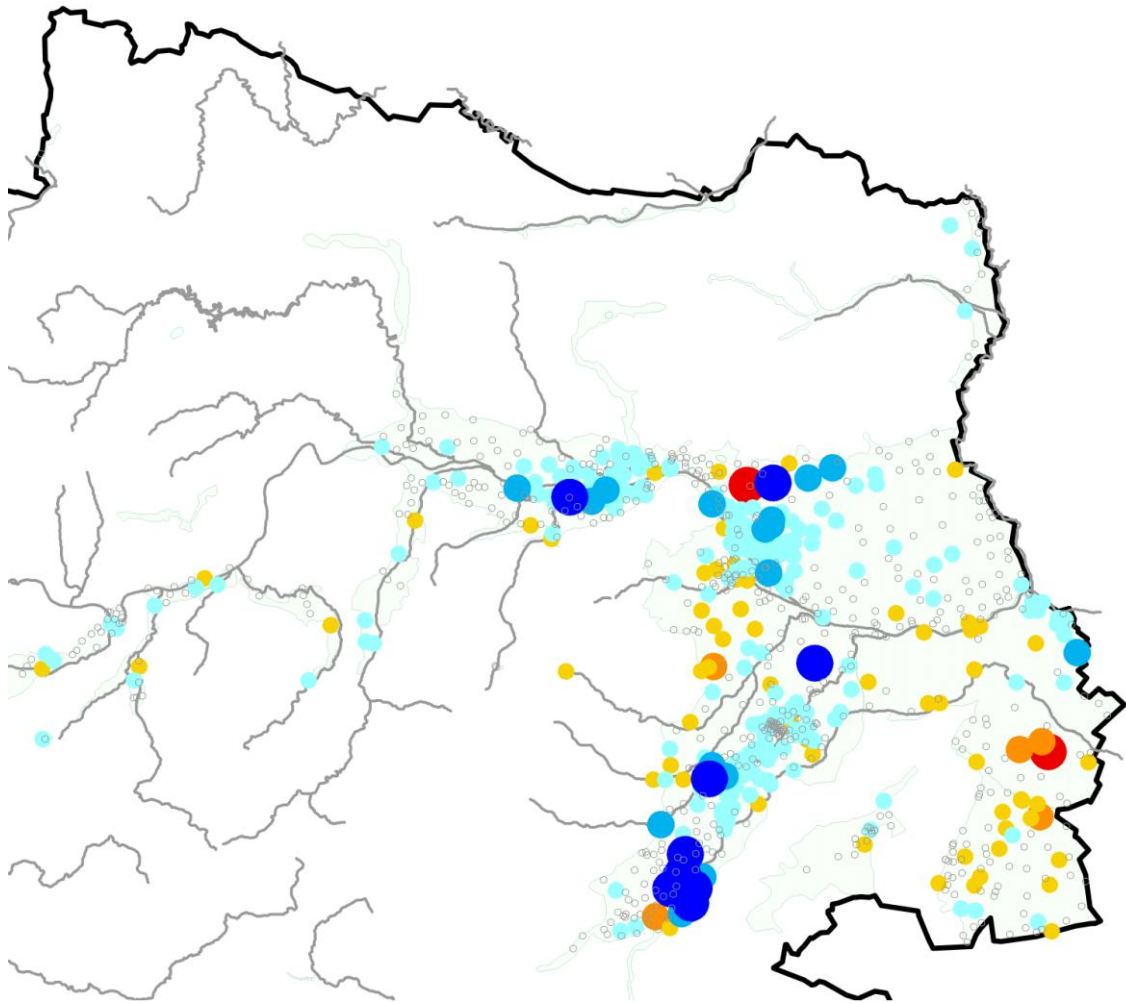


Abbildung 8-22: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

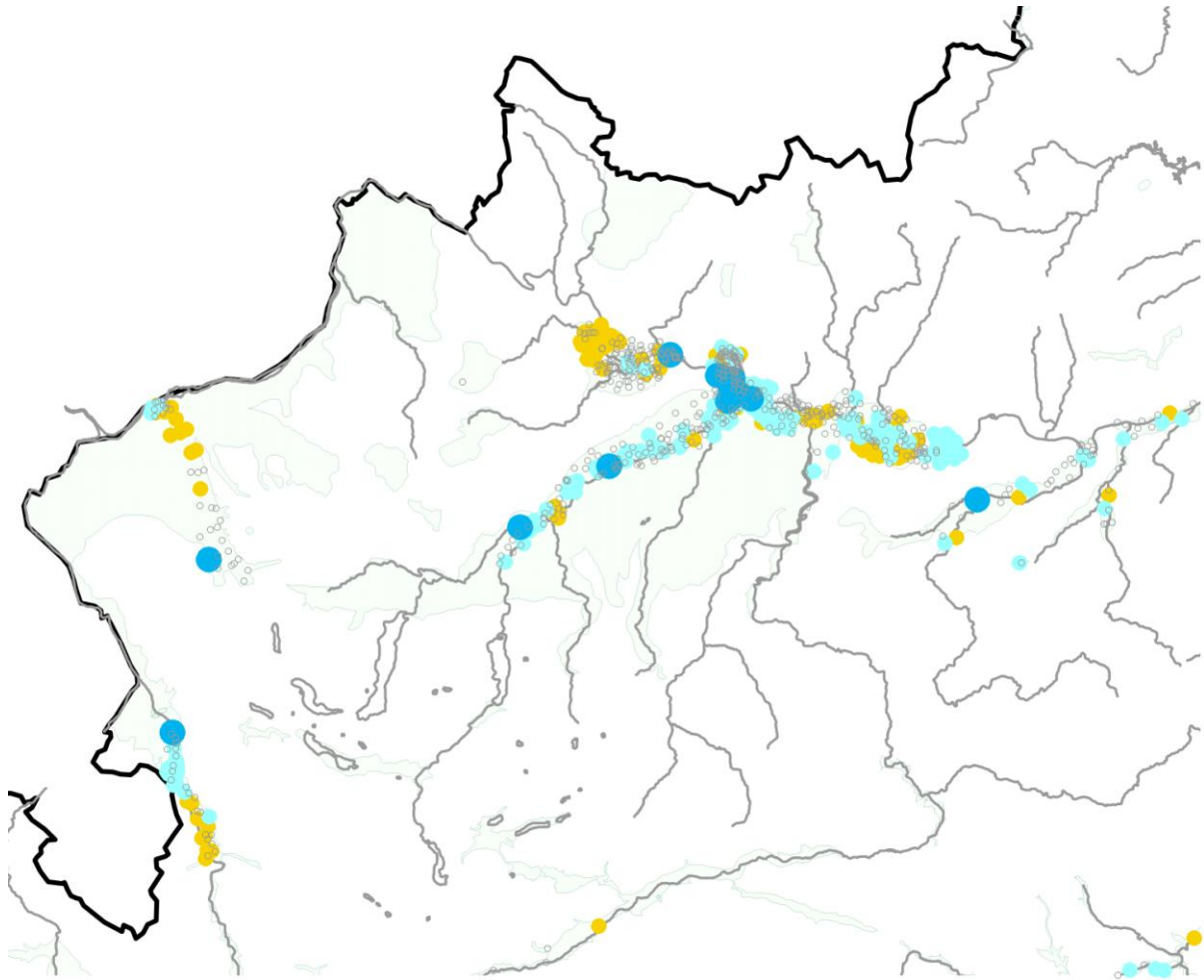


Abbildung 8-23: Trend der Jahresminimalwerte der Grundwasserstände für den Norden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

In den folgenden Abbildungen sind exemplarisch Ganglinien für ausgewählte Messstellen dargestellt. In der Abbildung 8-24 zeigt sich der für das Untere Murtal typische fallende Grundwasserspiegel. Im Süden des Südlichen Wiener Beckens konnte ein Anstieg im Grundwasserstand beobachtet werden (Abbildung 8-25) und im Nördlichen Tullnerfeld ist dieser weniger ausgeprägt (Abbildung 8-26). Hier zeigt sich auch sehr gut die Problematik der Wahl des Zeitfensters eine Trendauswertung. Betrachtet man lediglich die letzten 10 Jahre, so fand kein weiterer Anstieg statt.

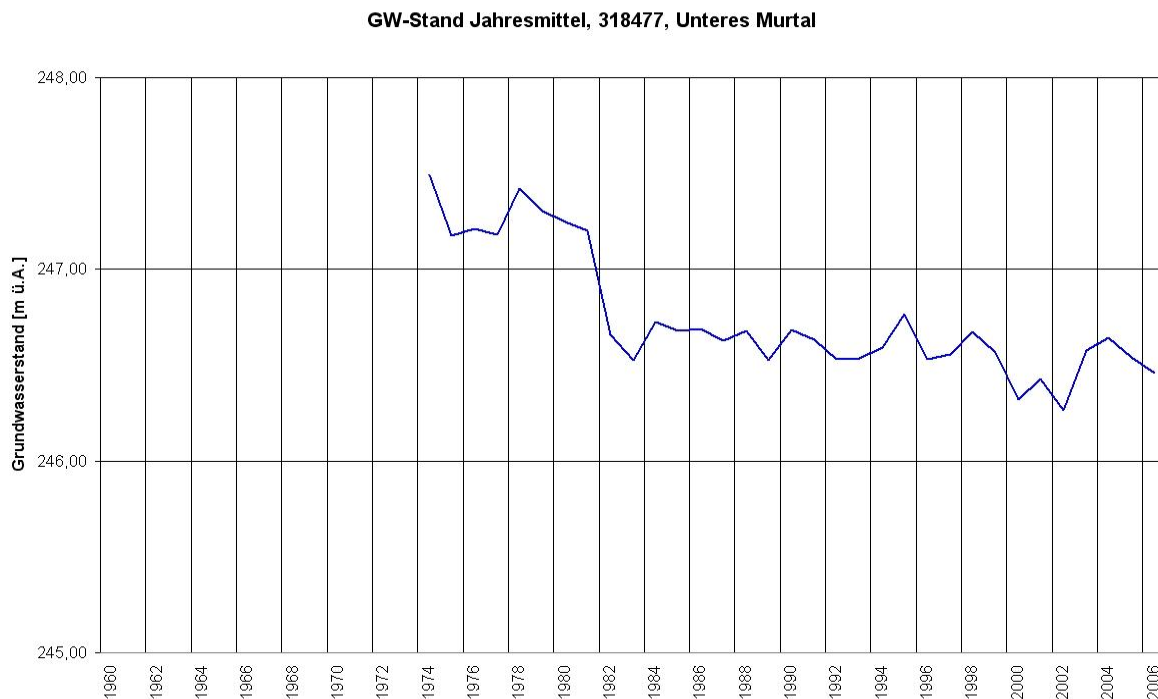


Abbildung 8-24: Ganglinie der Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes der Messstelle 318477 im Unteren Murtal – im Ufernabebereich der Mur.

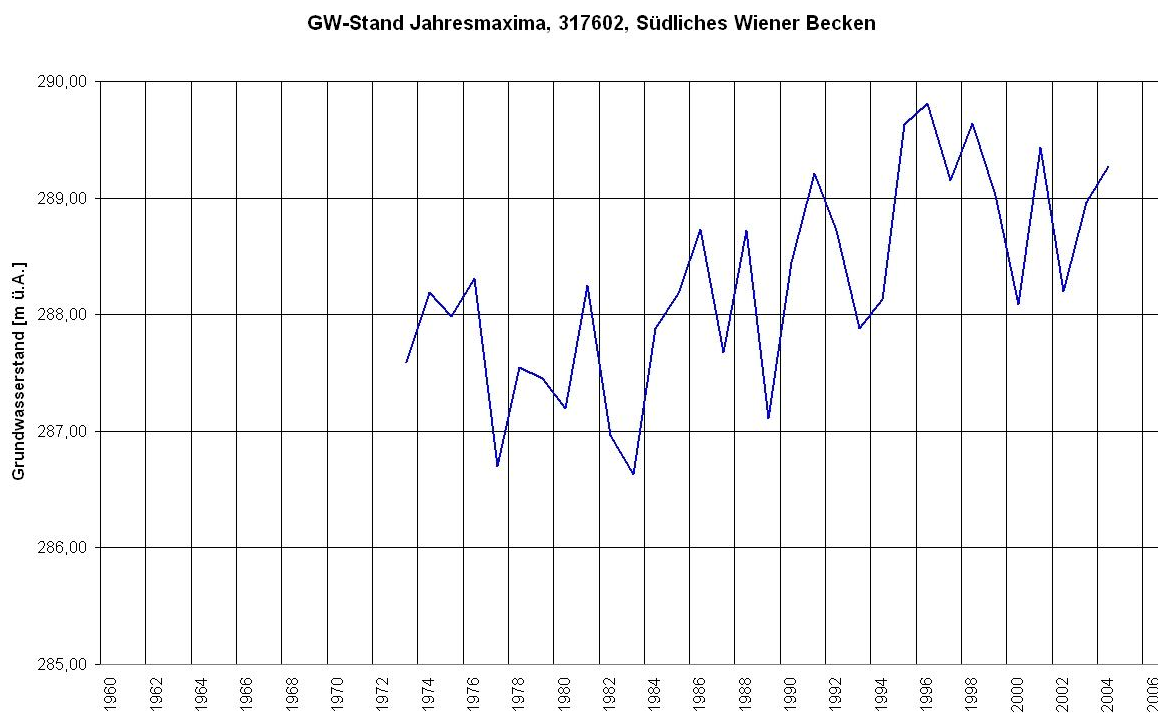


Abbildung 8-25: Ganglinie der Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes der Messstelle 317602 im Süden des Südlichen Wiener Beckens.

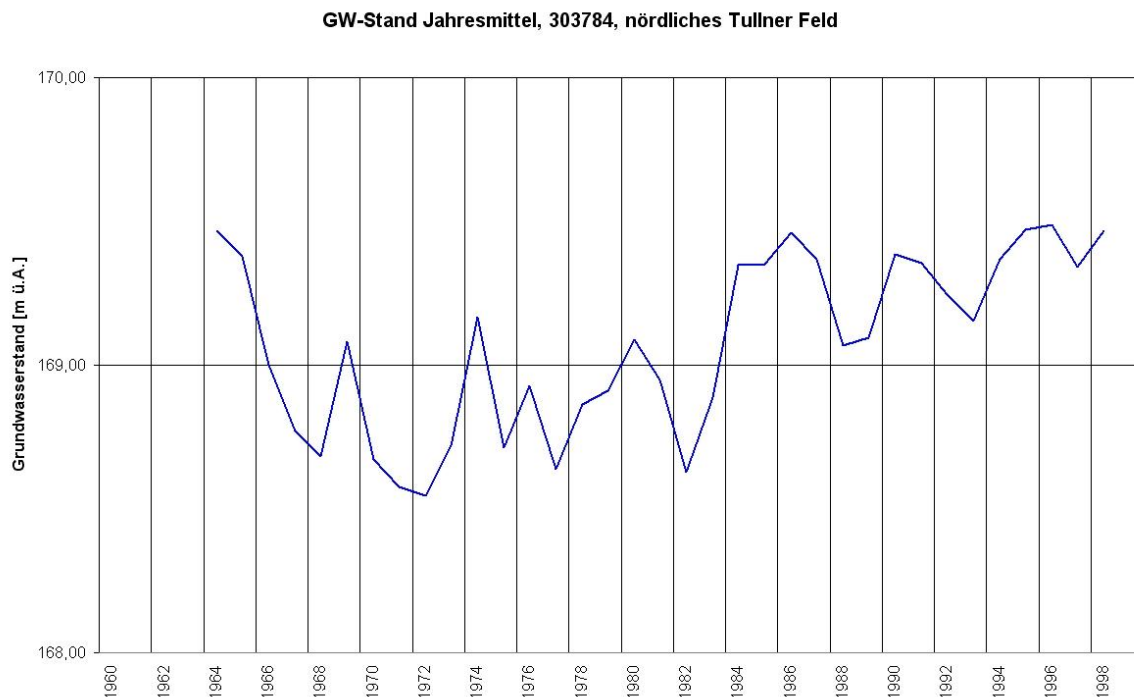


Abbildung 8-26: Ganglinie der Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes der Messstelle 303784 im Nördlichen Tullner Feld – im Ufernabereich der Donau.

Die Abbildung 8-27 bis Abbildung 8-31 zeigen den Trend Jahresmittelwerte der Grundwasser-temperatur und die Abbildung 8-32 den Zusammenhang zwischen Grundwassertemperatur und Lufttemperatur für Österreich basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

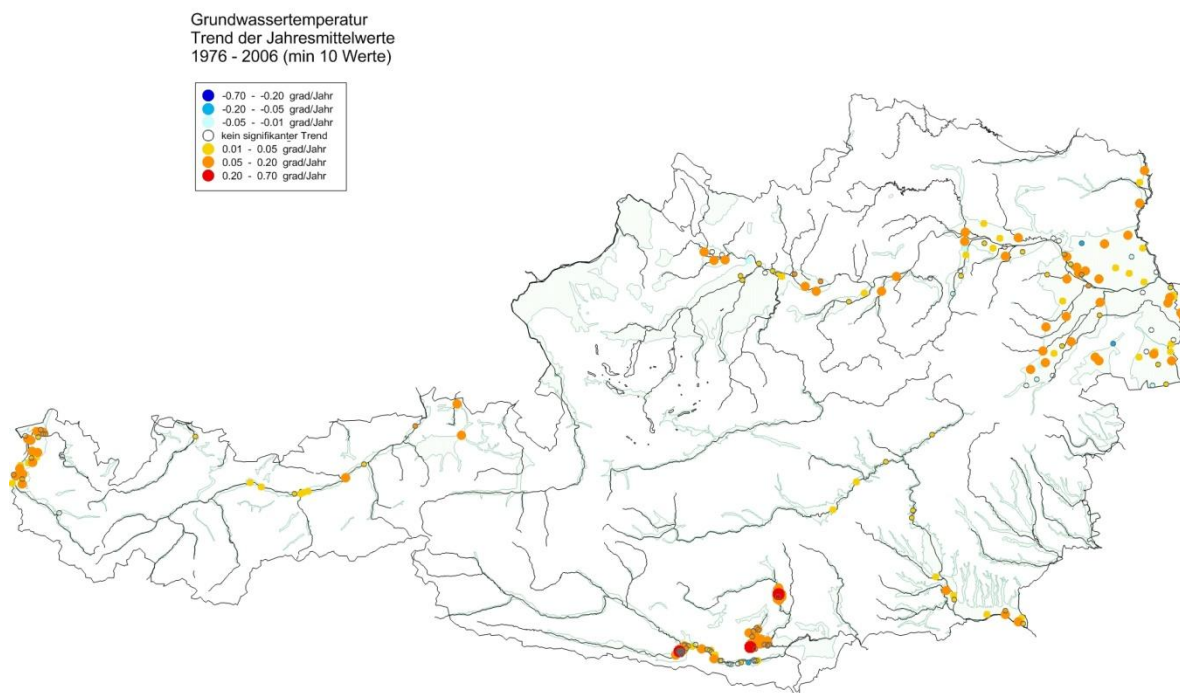


Abbildung 8-27: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für Österreich, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

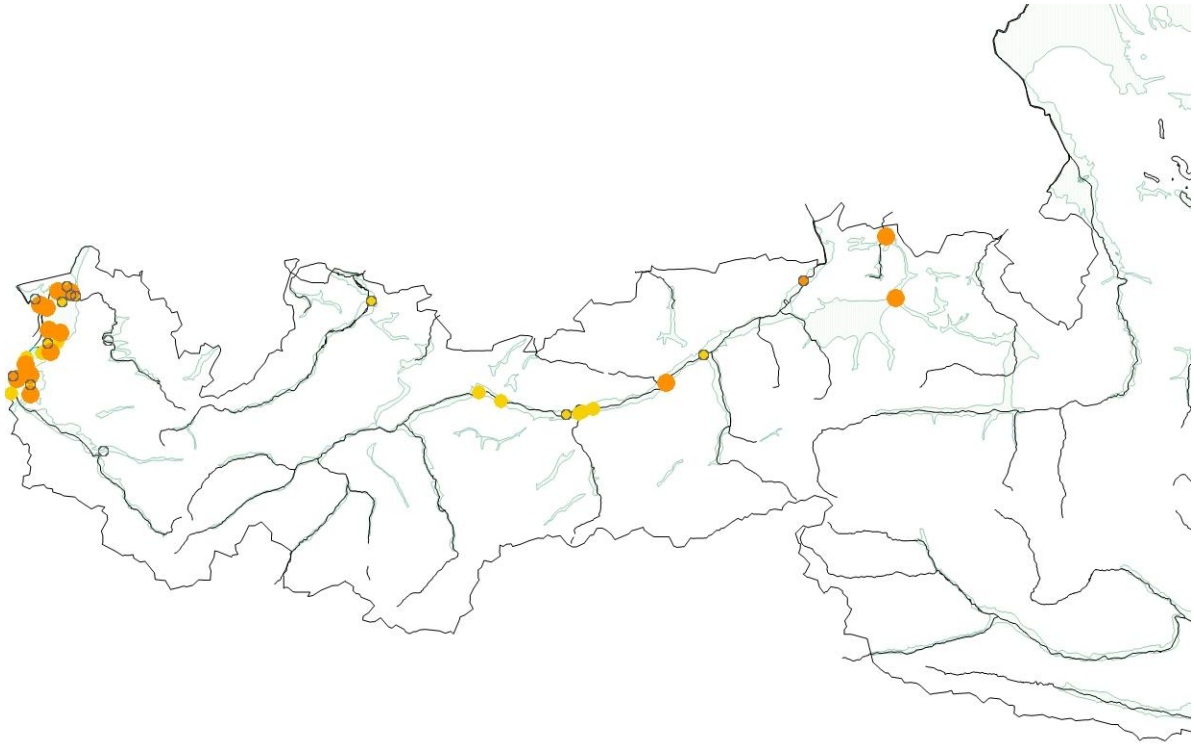


Abbildung 8-28: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für den Westen Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

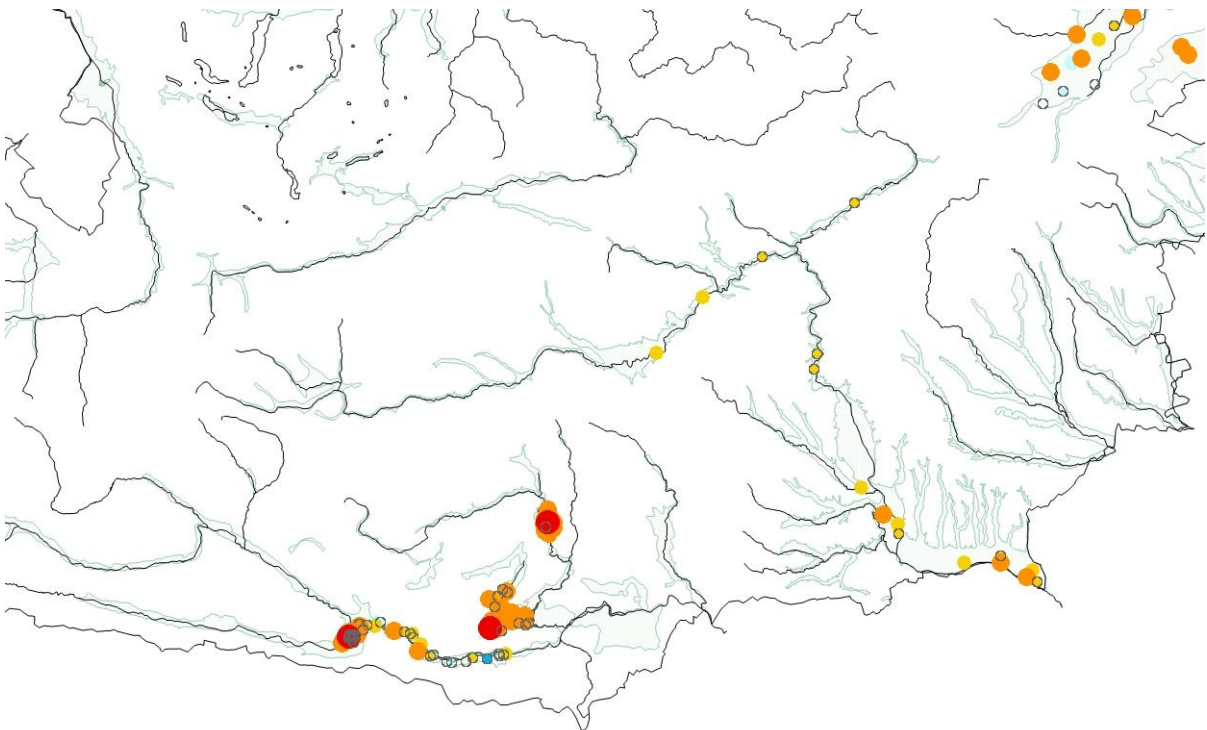


Abbildung 8-29: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für den Süden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

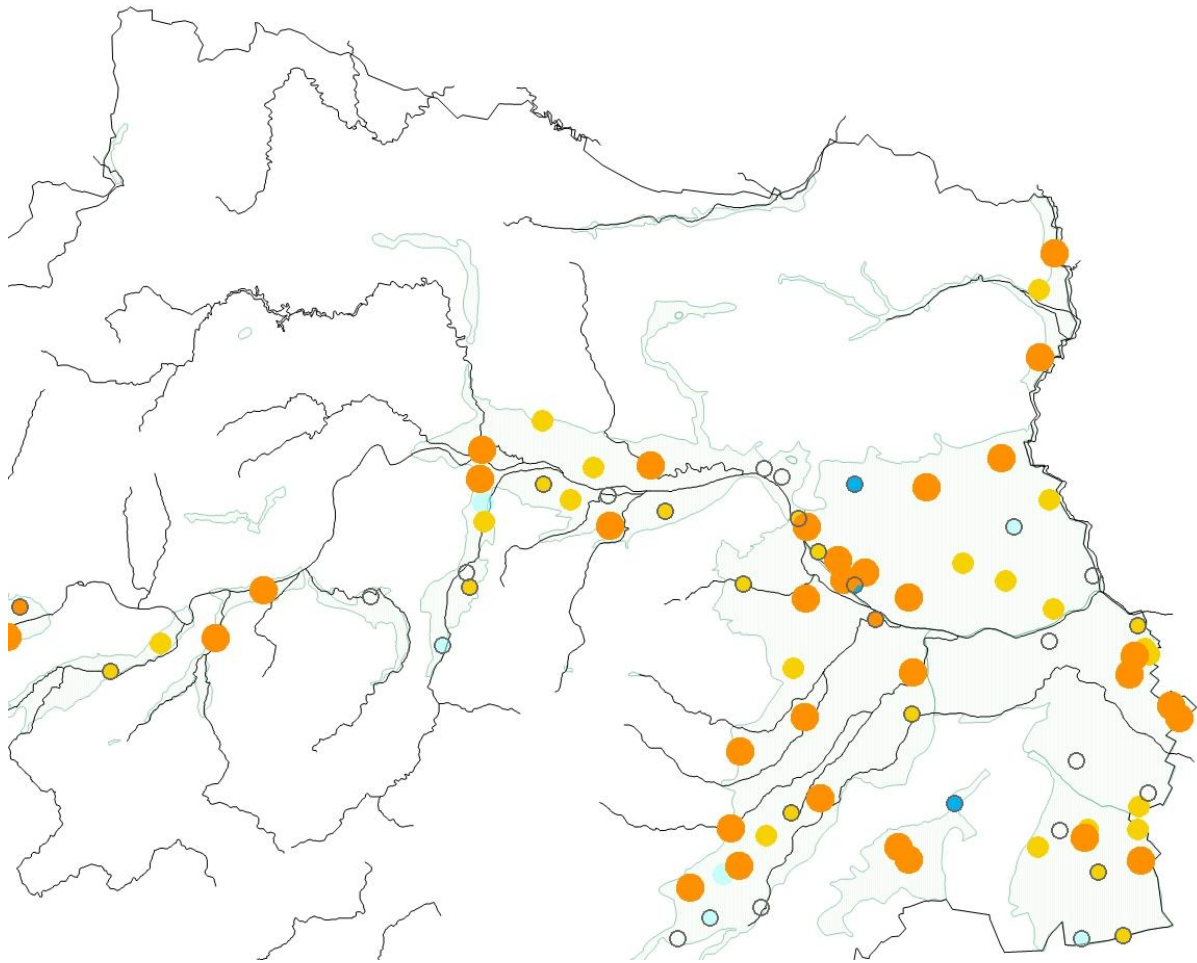


Abbildung 8-30: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für den Osten Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.



Abbildung 8-31: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur für den Norden Österreichs, basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

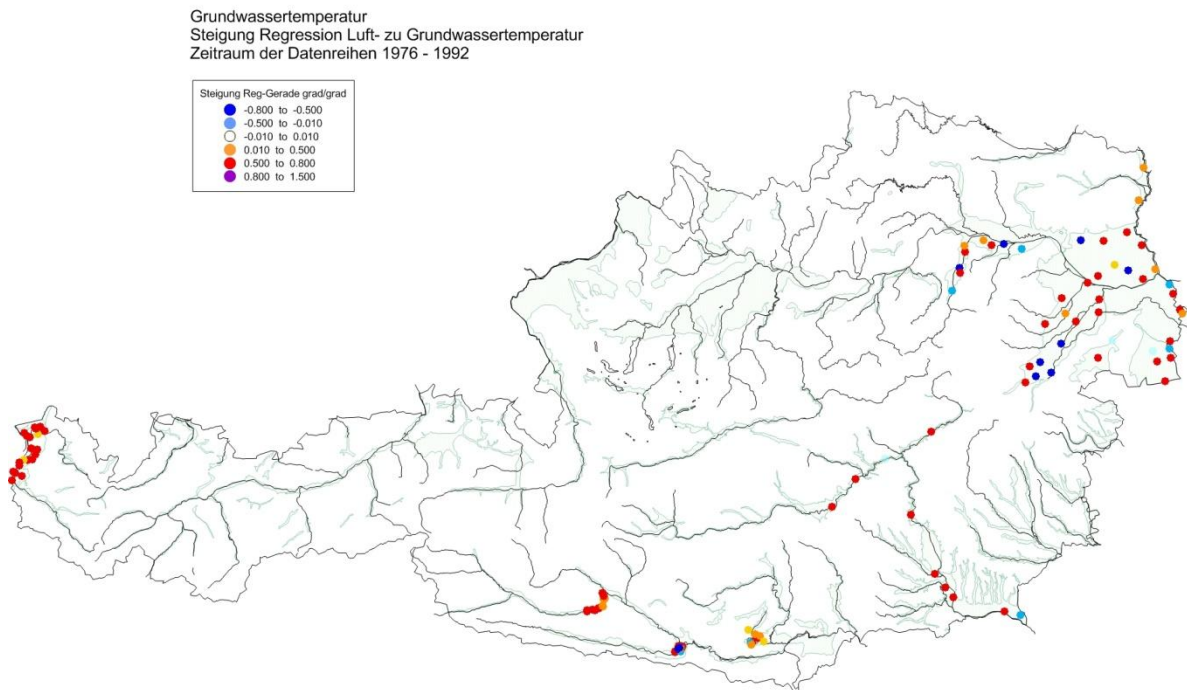


Abbildung 8-32: Zusammenhang der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur mit der Lufttemperatur für Österreich basierend auf Auswertungen der Jahresreihe 1976 bis 2006.

Die Abbildung 8-33 zeigt beispielhaft eine Grundwasser- und Lufttemperaturganglinie aus dem Leibnitzer Feld, wo wie in fast allen Messstellen ein Anstieg der Grundwassertemperatur zu erkennen ist.

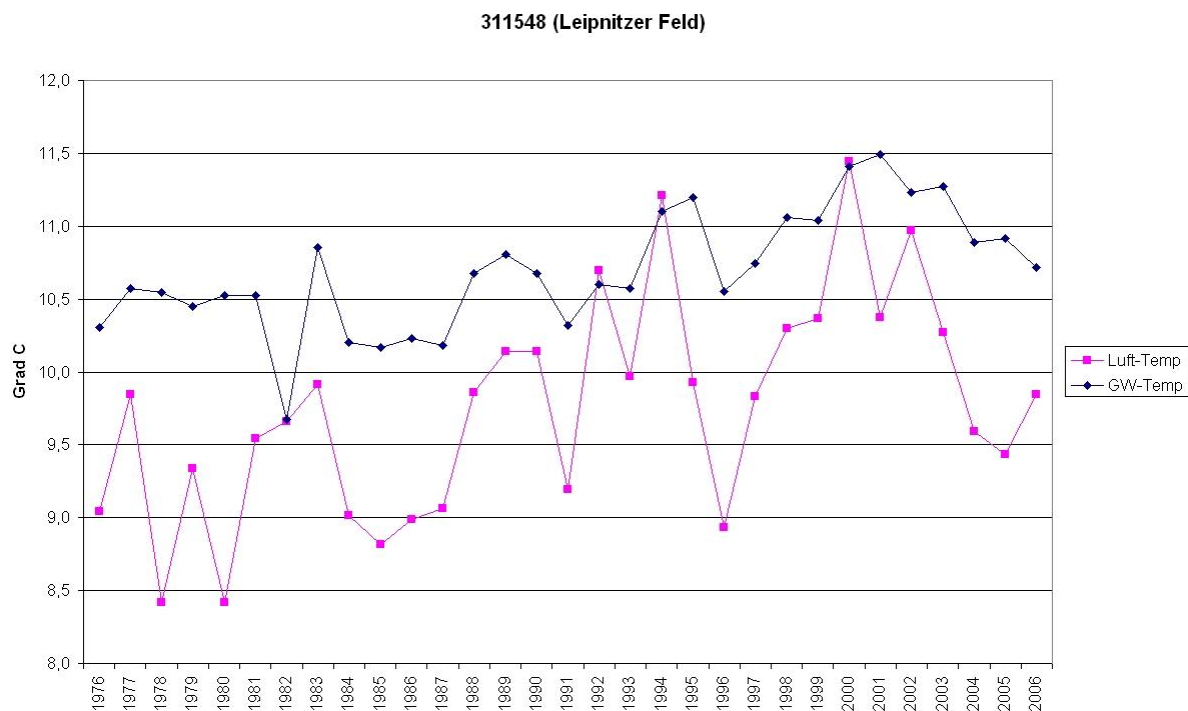


Abbildung 8-33: Ganglinie der Jahresmittelwerte der Grundwasser- und Lufttemperatur der Messstelle 311548 im Leibnitzer Feld.

8.5.4 Aussagen aus den Trendanalysen für Grundwassergebiete

Fazit:

- Auswertungen der Langzeitentwicklung des Grundwasserstandes zeigen, dass das Trendverhalten in aufeinanderfolgenden Dekaden (1961-70, 1971-80, 1981-90, 1991-00, 2001-2006) häufig entgegengesetzt ist (*harte Aussage*). Deswegen sind Trends stark von den jeweils gewählten Zeitfenstern abhängig.
- Die Auswertungen der Zeitreihen 1976 bis 2006 zeigen, dass bei 24% der 2376 betrachteten Grundwassermessstellen die Jahresmittelwerte des Grundwasserstandes einen fallenden Trend und 10% einen steigenden Trend aufweisen (*harte Aussage*).
- Die Trends über die letzten 50 Jahre (656 Messstellen) zeigen einen größeren Prozentsatz (42%) an Messstellen mit fallendem Trend (*harte Aussage*).
- Die Abnahme der Winter und Frühjahrsniederschläge von Vorarlberg über Kärnten, Südsteiermark, Burgenland bis zur Donau spiegelt sich auch in einer Abnahme der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände in vielen Messstellen dieser Regionen wieder. Der in den Sommer- und Herbstniederschlägen teilweise vorhandene positive Trend kann den fallenden Trend in den Grundwasserständen nicht kompensieren (*harte Aussage*).
- Die Abnahme der Abflüsse im Süden und Südosten zeigen sich auch in einer Abnahme des Grundwasserstandes in den gewässernahen Grundwasservorkommen. Inwieweit hier eine Überlagerung der Ursachen durch die

errichteten Flusskraftwerke gegeben ist, müsste in Detailuntersuchungen analysiert werden (*weiche Aussage*).

- Im Grundwasservorkommen Parndorfer Platte und Seewinkel können die fallenden Trends im Grundwasserstand auch mit dem Einfluss von Grundwasserentnahmen (z.B. für landwirtschaftliche Bewässerung) zusammenhängen (*mittelharte Aussage*).
- Auffallend ist die starke Zunahme der Grundwasserstände im Süden des Südlichen Wiener Beckens im Zeitraum 1976 – 2006, welche auf eine Erhöhung der Abflüsse im alpinen Bereich zurückgeführt wird (*harte Aussage*).
- Erhöhte Abflüsse und Niederschläge in den Zentralalpen im Zeitraum 1976 – 2006 lassen auch eine Zunahme des Grundwasserdargebotes in den Karst- und Kluffgrundwasservorkommen erwarten (diese wurden hier aufgrund unzureichender Datenlage nicht untersucht) (*weiche Aussage*).
- Die Grundwassertemperaturen nahmen im Zeitraum 1976 – 2006 mit ganz wenigen Ausnahmen in den beobachteten Messstellen zum Teil deutlich zu (zwischen 0,3 bis 1,2 °C) (*harte Aussage*).
- Zwischen Lufttemperatur und Grundwassertemperatur lässt sich aus den Daten der Zeitreihe 1976 bis 2006 ein regionaler Zusammenhang von einem Anstieg von 0,5 bis 1,0 °C pro 1,0 °C Lufttemperaturzunahme ableiten, der jedoch von der lokalen Grundwassersituation stark beeinflusst wird (*mittelharte Aussage*).

Tabelle 8-2 bis Tabelle 8-5 zeigen Anzahl und Prozent der Messstellen mit steigenden bzw. fallenden Trends des Grundwasserstandes und der Grundwassertemperatur. In den Abbildung 8-34 bis Abbildung 8-37 sind die Häufigkeitsverteilungen zu den jeweiligen Auswertungen ergänzend dargestellt.

Tabelle 8-2: Anzahl der Grundwassermessstellen mit steigendem bzw. fallendem Trend im Grundwasserstand in Österreich. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Grundwasserstand	1976 - 2006				1955 - 2006			
	Anzahl Messstellen	Anzahl der Messstellen			Anzahl Messstellen	Anzahl der Messstellen		
		steigendem Trend	fallendem Trend	kein Trend		steigendem Trend	fallendem Trend	kein Trend
Jahresmittel	2376	229	579	1568	656	64	277	315
Jahresminima	2516	574	316	1626	711	142	189	382
Jahresmaxima	2516	375	417	1724	711	62	232	417

Tabelle 8-3: Prozent der Grundwassermessstellen in Österreich mit steigendem bzw. fallendem Trend im Grundwasserstand. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Grundwasser-stand	1976 - 2006				1955 - 2006			
	Anzahl Messstellen	% der Messstellen			Anzahl Messstellen	% der Messstellen		
		steigendem Trend	fallendem Trend	kein Trend		steigendem Trend	fallendem Trend	kein Trend
Jahresmittel	2376	9,6	24,4	66,0	656	9,8	42,2	48,0
Jahresminima	2516	22,8	12,6	64,6	711	20,0	26,6	53,4
Jahresmaxima	2616	14,9	16,6	68,5	711	8,7	32,6	58,6

Tabelle 8-4: Anzahl der Grundwassermessstellen in Österreich mit steigenden bzw. fallenden Trend der Grundwassertemperatur. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Grundwasser-stand	1976 - 2006				1955 - 2006			
	Anzahl Messstellen	Anzahl der Messstellen			Anzahl Messstellen	Anzahl der Messstellen		
		steigendem Trend	fallendem Trend	kein Trend		steigendem Trend	fallendem Trend	kein Trend
Jahresmittel	255	152	5	98	112	76	1	35

Tabelle 8-5: Prozent der Grundwassermessstellen in Österreich mit steigenden bzw. fallenden Trend der Grundwassertemperatur. (Mann-Kendall Test, Signifikanzniveau 5%).

Grundwasser-stand	1976 - 2006				1955 - 2006			
	Anzahl Messstellen	% der Messstellen			Anzahl Messstellen	% der Messstellen		
		steigendem Trend	fallendem Trend	kein Trend		steigendem Trend	fallendem Trend	kein Trend
Jahresmittel	255	59,6	2,0	38,4	112	67,9	0,8	31,3

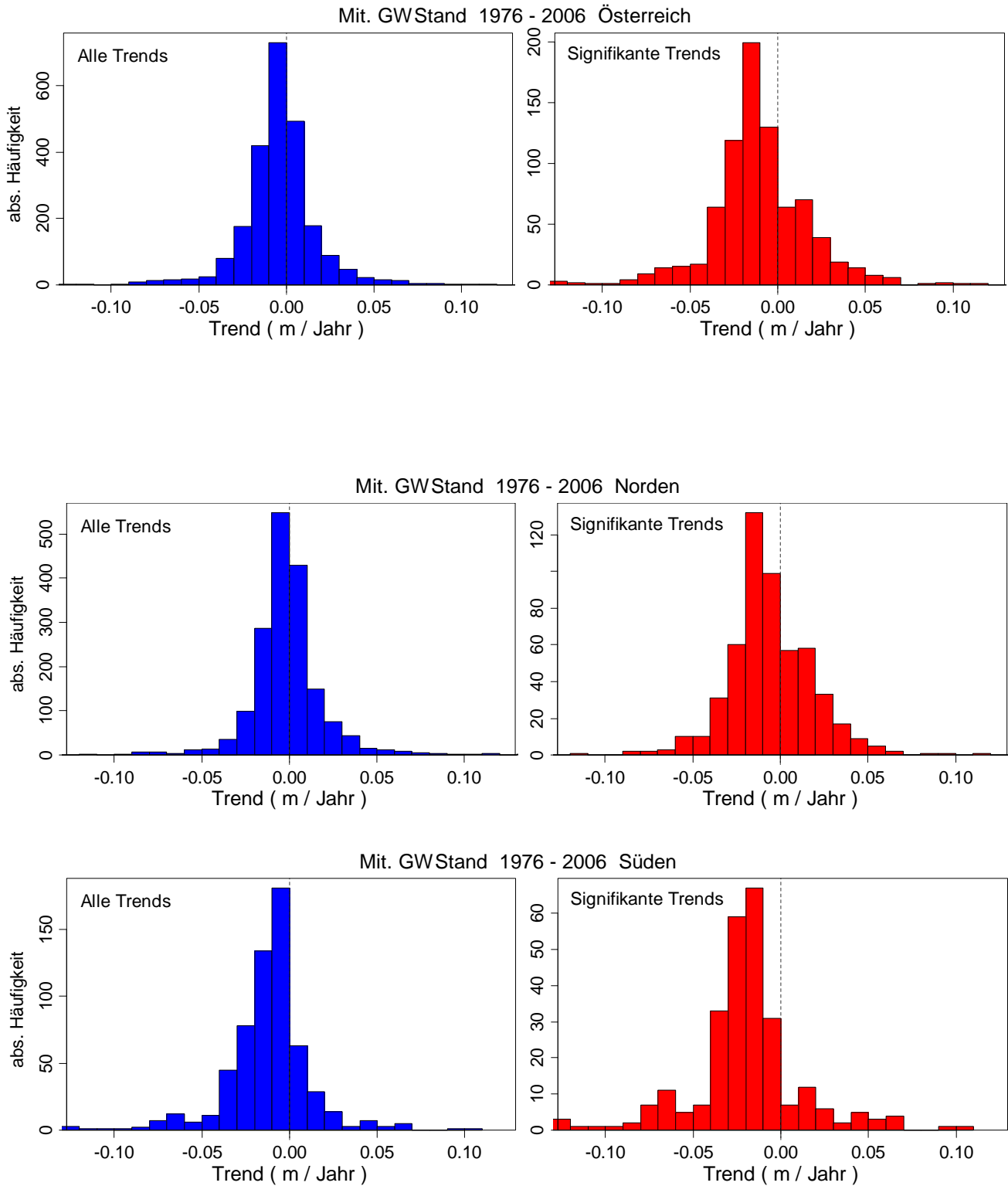


Abbildung 8-34: Verteilung der Häufigkeit des Trends für die mittleren Jahresgrundwasserstände getrennt für alle und nur die signifikanten Trends. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Messstellen. Unten: südliche Messstellen.

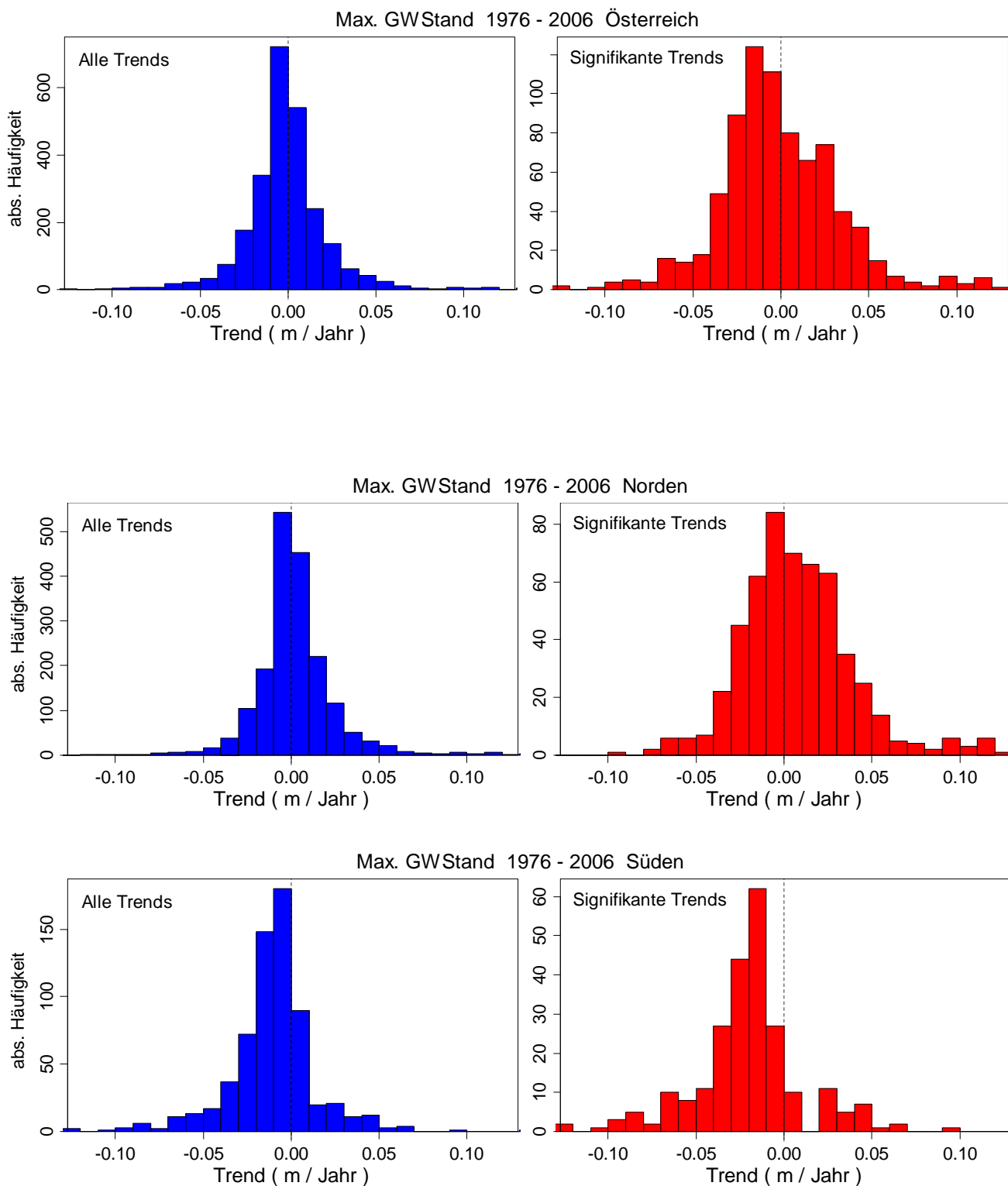


Abbildung 8-35: Verteilung der Häufigkeit des Trends für die maximalen Jahresgrundwasserstände getrennt für alle und nur die signifikanten Trends. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Messstellen. Unten: südliche Messstellen.

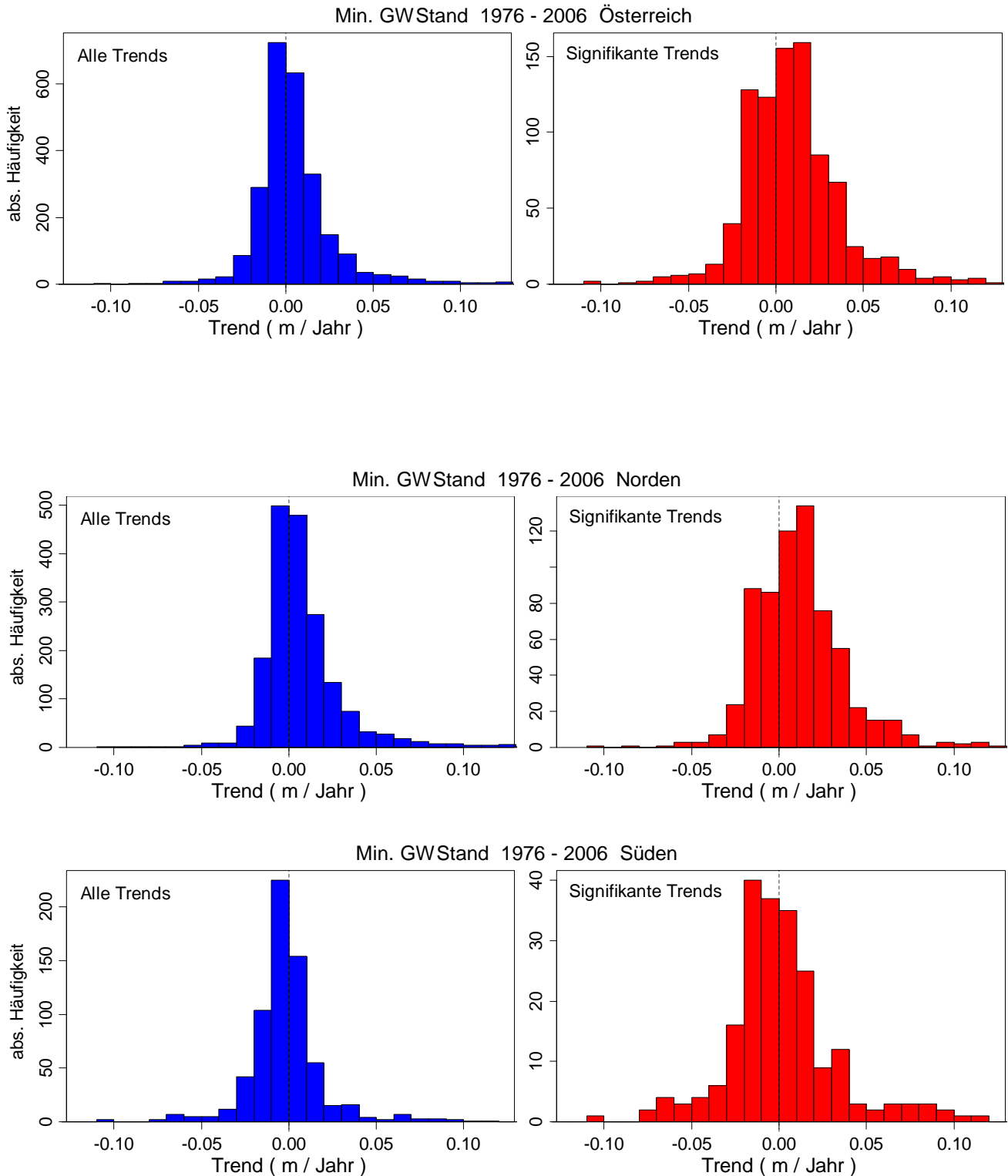


Abbildung 8-36: Verteilung der Häufigkeit des Trends für die minimalen Jahresgrundwasserstände getrennt für alle und nur die signifikanten Trends. Oben: ganz Österreich. Mitte: nördliche Messstellen. Unten: südliche Messstellen.

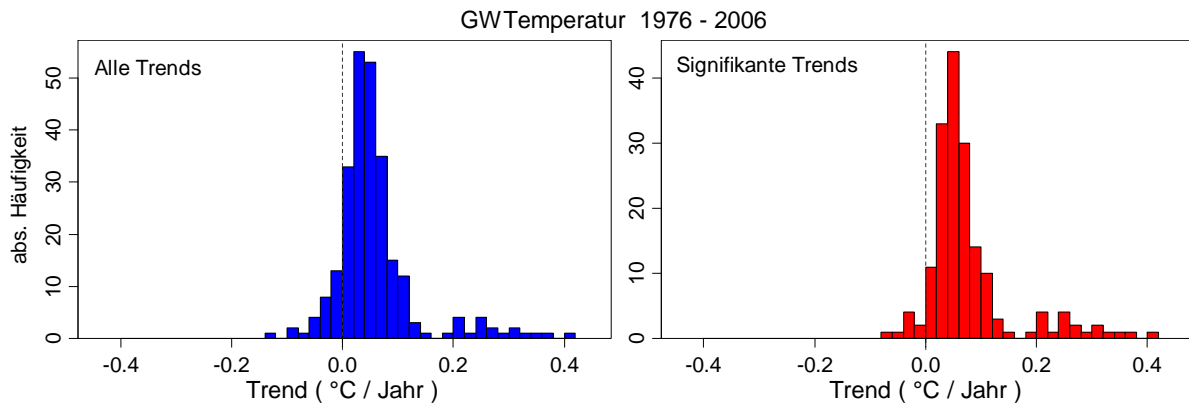


Abbildung 8-37: Verteilung der Häufigkeit des Trends für die mittleren Jahresgrundwassertemperaturen getrennt für alle und nur die signifikanten Trends.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Trendanalyse der untersuchten Grundwassergebiete stichwortartig zusammengefasst.

Marchfeld (224)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

westlicher Bereich leicht steigend, Nordrand und Donaunahbereich gering fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

westlicher Bereich leicht steigend, Zentralbereich und Osten leicht steigend (nicht signifikant), am Nordrand leicht fallend (nicht signifikant)

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

westlicher Bereich leicht steigend, Zentralbereich leicht steigend (nicht signifikant), am Nordrand leicht fallend (nicht signifikant)

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

leicht steigend, Wiener Bereich etwas stärker steigend

Hainburger Pforte, Heideboden (264, 288)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

vereinzelt leicht steigend, vereinzelt leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

leicht steigend (teilweise nicht signifikant)

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

leicht steigend (teilweise nicht signifikant)

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

leicht steigend, vereinzelt etwas stärker steigend

Parndorfer Platte (309)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

Zentralbereich stark fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

Zentralbereich stark fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

Zentralbereich stark fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

kein Trend

Wulkatal (313)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

kein Trend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

kein Trend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

kein Trend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

stark steigend

Seewinkel (318)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

vorwiegend kein Trend, vereinzelt fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

vorwiegend fallender Trend (teilweise nicht signifikant)

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

vorwiegend fallender Trend (teilweise nicht signifikant)

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

leicht steigend, vereinzelt stark steigend

Südliches Wiener Becken (250)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

im Süden stark steigend, Mitte leicht steigend bis leicht fallend, im Nordosten kein Trend, im östlichen und Wiener Bereich leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

im Süden stark steigend, Mitte leicht steigend, im Nordosten kein Trend, im östlichen und Wiener Bereich leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

im Süden steigend, Mitte leicht steigend, im Nordosten kein Trend, im östlichen und Wiener Bereich leicht fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
stark steigend, im Süden auch vereinzelt leicht fallend

Raabtal, Pinkatal, Lafnitztal, Feistritztal, Ilztal (331, 332, 335, 340, 341)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
vorwiegend kein Trend, vereinzelt leicht steigend bzw. leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
vorwiegend kein Trend, vereinzelt leicht steigend bzw. leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
vorwiegend kein Trend, vereinzelt leicht fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
--- (keine Messungen)

Aichfeld Murboden, Mittleres Murtal, Mürztal (360, 364, 375)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
vorwiegend leicht fallend, vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
vorwiegend leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
vereinzelt leicht fallend, vereinzelt leicht steigend (Mürztal)

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
vereinzelt leicht steigend

Murdurchbruchstal (378)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
leicht bis stark steigend, vereinzelt fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

Grazer Feld (380)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend, vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend, vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
vereinzelt leicht steigend, vereinzelt leicht fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend (wenige Messstellen)

Leibnitzer Feld, Unteres Murtal (390, 400)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
vereinzelt leicht fallend, Unteres Murtal leicht steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
vereinzelt leicht bis stark steigend

Klagenfurter Becken, Jauntal (442, 445)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
kein Trend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
kein Trend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
kein Trend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
im Klagenfurter Becken stark steigend

Unteres Gailtal (425)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten leicht fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
leicht steigend bis stark steigend, vereinzelt leicht fallend (nicht signifikant)

Oberes Drautal (410)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten leicht fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten stark steigend

Lienzer Becken (405)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten stark fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten stark fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

Klostertal, Walgau (2, 3)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
vereinzelt stark steigend und vereinzelt fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend, vereinzelt stark fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten leicht steigend (nicht signifikant), im Westen leicht fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

Rheintal Untere Bregenzer Ach, Bregenzer Wald (4, 6)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend und vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
leicht fallend und vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
steigend (Rheintal_Untere Bregenzer Ach)

Unterinntal, Zillertal, Großachengebiet (20, 22, 25)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

vereinzelt leicht fallend (nicht signifikant)

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

öfter leicht fallend, im Nordosten leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

vereinzelt leicht fallend (nicht signifikant), im Norden leicht steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

vereinzelt leicht steigend

Unteres Salzachtal (40)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

im Süden leicht fallend, in der Mitte leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

im Süden leicht fallend, in der Mitte leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

im Süden leicht fallend, in der Mitte leicht steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

Innviertel-Hausruckviertel (55)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

im Norden leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

leicht fallend (nicht signifikant)

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

im Norden leicht fallend, im Süden leicht fallend (nicht signifikant)

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

Nördliches u. südliches Eferdinger Becken (95, 96)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

im Westen und Osten öfter leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

kein Trend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

im Westen und Osten vereinzelt leicht fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

Steigend (Südl. Eferdinger Becken)

Almtal, Welser Heide (121, 122)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

öfter leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

öfter leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

öfter leicht steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

Nördliches u. südliches Linzer Feld (143, 154)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

im Osten leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

öfter leicht steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

im Osten leicht steigend (nicht signifikant)

Nördliches u. südliches Machland (177, 178)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

im Westen und Osten vereinzelt leicht steigend, in der Mitte vereinzelt leicht fallend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

in der Westen und Mitte vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:

im Westen und Osten vereinzelt leicht steigend, in der Mitte vereinzelt leicht fallend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

vereinzelt steigend

Ybbstal-Urftal, Ybbser Scheibe, Erlauftal, Pöchlaner Feld, Pielachtal (185, 186, 187, 188, 190)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:

kein Trend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:

vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
kein Trend

Traisental, Nördliches u. südliches Tullnerfeld (195, 200, 205)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
im Donaunahbereich leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
im Donaunahbereich und Nordosten leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
im Osten leicht steigend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
leicht steigend bis steigend

Marchtal (276)

Trend Grundwasserstand – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
kein Trend

Trend Grundwasserstand – Jahresmaximalwerte der letzten 30 Jahre:
vereinzelt leicht steigend

Trend Grundwasserstand – Jahresminimalwerte der letzten 30 Jahre:
kein Trend

Trend Grundwassertemperatur – Jahresmittelwerte der letzten 30 Jahre:
leicht steigend bis steigend

8.6 Situation in der Zukunft

8.6.1 Ergebnisse von Szenarienrechnungen in der Literatur

Tabelle 8-6: Szenarienrechnungen in der Literatur.

Geografische und zeitliche Abgrenzung; Veröffentlichung	Aussagen
BRD Jacob et al., 2008; DWD 2009	Die regionalen Klimaprojektionen in der BRD zeigen einen deutlichen Rückgang der Sommerniederschläge und eine Erhöhung der potenziellen Verdunstung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Dadurch kann es bei kleinen Flurabstand zu verstärkten Zehrungsprozessen und damit zu fallenden Grundwasserständen kommen. Es ist eine Zunahme des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs

	<p>(Nutzungsumstellungen in der Landwirtschaft, höhere Qualitätsansprüche bei Anbaufrüchten und damit verbunden ein erhöhter Wasserstresse der Pflanzen) ist zu erwarten.</p> <p>Verstärkte Nutzungskonflikte sowie die Gefahr einer Übernutzung der Grundwasservorräte können die Folge sein.</p>
<p>BRD</p> <p>Ergebnisse der Klimamodelle REMO, CLM, WETTREG, STAR</p> <p>Jacob et al., 2008; DWD 2009</p>	<p>Diese Modelle zeigen in vielen Regionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine deutliche Zunahme der Winterniederschläge.</p> <p>Damit ist mit einer Erhöhung der Grundwasserneubildung und der winterlichen Grundwasserstände zu rechnen. In Regionen mit geringem Flurabstand kann dies zu Vernässungen führen und auch auf die Raumordnung (Bebaungpläne) rückwirken.</p>
<p>BRD</p> <p>Kropp et al., 2009; Kersebaum et al., 2009</p>	<p>In den Regionen mit einer erhöhten Verdunstung aufgrund der Temperaturzunahme kann der klimabedingte winterliche Grundwasseranstieg ausbleiben und es sogar zu fallenden Grundwasserspiegel kommen. Dies weisen einige Studien für Ostdeutschland aus („KliWES“, „Wasserhaushalt Ucker“).</p>
<p>BRD</p> <p>Studie KLIWA</p>	<p>Modellrechnungen zeigen in dieser Studie für Rheinland-Pfalz eine leichte Zunahme der Grundwasserneubildung (2021-2050). Für Teile Baden-Württemberg und Bayern sind keine deutlichen Veränderungen erkennbar.</p>
<p>BRD</p> <p>Projekte „AnKliG“, „ZALF“, „KlimReG“</p>	<p>Diese Projekte gehen von einer erheblichen Steigerung des Bewässerungsbedarfes aus und weisen auf die Notwendigkeit einer Praxisänderung hin.</p>
<p>Schweiz</p> <p>BAFU 2007</p>	<p>Abnahme der Sommerniederschläge führen zu einer Abnahme der Bodenwasserreserven.</p> <p>Durch höhere Temperaturen kommt es zu einer höheren Evaporation und damit zu einem größeren Wasserbedarf der Pflanzen (Transpiration).</p>
<p>Österreich</p> <p>Auswirkungen des Klimawandels in Niederösterreich</p> <p>Joanneum Research, Graz, et al. 2007</p>	<p>Zunahme der Temperaturen, der Trockenheit und des Wassermangels im Weinviertel:</p> <p>Das Marchfeld und das Weinviertel zählen zu den trockensten landwirtschaftlichen Produktionsgebieten Österreichs, wobei neben der mittleren Temperaturerhöhung um mind. 2° bis zu den 2050ern vor allem eine zunehmende Trockenheit (z.T. auch durch einen leichten Niederschlagsrückgang) unter den Klimaszenarien der 2025er und 2050er Jahre ertragslimitierend wirkt, mit einem zunehmenden Gradienten von West nach Ost. Der Nutzwassermangel (z.B. für Bewässerung) wird in Regionen mit wenig Grundwasserreserven bzw. ohne Zugang zu externer Versorgung (wie beim Marchfeldkanal) zunehmen.</p>
<p>Österreich</p> <p>Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische</p>	<p>Die Auswirkungen auf das Grundwasserregime sind deutlich ausgeprägt. Die Grundwasserneubildung geht deutlich zurück und verschärft die wasserwirtschaftliche Nutzung in den Beckenlagen, insbesondere in niederschlagsarmen Gebieten.</p> <p>Für niederschlagsarme Gebiete, wie das Marchfeld, ist ein Rückgang der Grundwasserneubildung um mehr als 60 % zu erwarten. Für die Oststeiermark wird in der Arbeit mit einem zukünftigen Rückgang in der Grundwasserneubildung</p>

Wasserwirtschaft BMFLFUW, 2008	von ca. 40 % gerechnet. Ebenso verlängern sich die Trockenphasen deutlich, gekennzeichnet durch niedrige Bodenfeuchten. Diese Auswirkungen müssten durch vermehrte Beregnung kompensiert werden, was die Grundwasservorkommen zusätzlich unter erhöhten Nutzungsdruck stellt.
Identifikation von Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich: Phase, 2008 AustroClim	„Im Hinblick auf die Sicherstellung der Wasserversorgung in Österreich übersteigt derzeit im Allgemeinen die Grundwasserneubildungsrate die Entnahmemenge. Die verallgemeinerte Beurteilung von Klimaszenarien im Hinblick auf Klimawandelfolgen für die Grundwasserbestände ist prinzipiell schwierig, weil weder die Temperaturzunahme noch veränderte Niederschlagsregime in einem linearen Zusammenhang mit Grundwasserneubildung und Grundwasserständen stehen. Zudem hängt der Grundwasserhaushalt stark von regional unterschiedlichen hydrogeologischen Faktoren und den Bodeneigenschaften ab. Einerseits ist davon auszugehen, dass abnehmende Niederschlagssummen im Sommer, reduzierte Wassernachlieferung infolge geringerer Schneeschmelze, höhere Niederschlagsintensitäten im Zuge häufigerer Starkniederschlagsereignisse mit erhöhtem Oberflächenabfluss und geringerer Infiltration sowie die erhöhte Evapotranspiration zu geringeren Grundwasserneubildungsraten führen werden. Als gegenläufiger Effekt könnten höhere Winterniederschlagsmengen und ein geringerer Schneeanteil am Winterniederschlag zu stärkerer Grundwassererneuerung im Winter führen, sofern Winterniederschläge nicht auf gefrorenen Boden treffen. Die erwartete stärkere interannuale Niederschlagsvariabilität kann zukünftig zu stärkeren Schwankungen der Grundwasserstände führen. ²⁶ Zeitlich und räumlich begrenzte Engpässe in der quantitativen Wasserversorgung können insbesondere in trockenen und heißen Sommerperioden durch Zusammenwirken reduzierter Grundwasserneubildung und höherer Wasserverbrauchsmengen (Haushalte, Tourismus, landwirtschaftliche Bewässerung etc.) entstehen.“

8.6.2 Prozesse der Klimaauswirkungen auf das Grundwasser in Österreich

Bei einer klimabedingten Veränderung von Temperatur, Niederschlag und Verdunstung sind sowohl quantitative als auch qualitative Auswirkungen auf das Grundwasser zu erwarten. Die folgenden Aufzählungen beschreiben prinzipiell denkbare Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Grundwasser.

Erhöhung der Lufttemperatur

- höheren Evaporation und damit Abnahme der Bodenfeuchtigkeit
- erhöhte Verdunstung aus Grundwasserkörpern mit geringem Flurabstand
- erhöhter Wasserbedarf der Pflanzen über Transpiration
- Steigerung des Bewässerungsbedarfes in der Landwirtschaft
- geringere Grundwasserneubildung aus Niederschlägen
- Erhöhung der Grundwassertemperatur
- Veränderungen der Grundwasserqualität aufgrund erhöhter Grundwassertemperatur (zB. Sauerstoffzehrung bei Uferfiltrat)

Änderung in den Niederschlägen

- Sowohl eine Veränderung der Jahresniederschlagssummen als auch insbesondere die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge haben einen wesentlichen Einfluss auf die Größenordnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen, wobei sich auch eine Veränderung in der Verdunstung zu erwarten ist.

- Veränderungen in den Abflüssen der Oberflächengewässer und deren saisonale Verschiebungen verändern die Grundwasserneubildung (erhöhte Abflüsse in den Winter- und Frühjahrsperioden führen zu erhöhter Grundwasserneubildung, niederschlagsarme Sommermonate zehren an den Grundwasserreserven).
- Eine Veränderung der Abflussverhältnisse führt zu anderen Wasserspiegeln in den Oberflächengewässern und damit zu anderen Strömungssituation speziell im gewässernahen Grundwasserkörper. Bei Entnahmen kann als Folge das Grundwasser aus anderen Bereichen eingezogen werden, sich die Fließzeiten verändern und durch die veränderten Grundwasserstände andere Bodenschichten (zB. Altlasten) betroffen sein. Veränderungen der Grundwasserqualität können daraus resultieren.
- Längere Trockenzeiten führen zu Bodenaustrocknung, Verringerung der Wasseraufnahmefähigkeit, Bodenverkrustung, geringere Humusbildung.

8.6.3 Auswertungen in Österreich

Die klimainduzierten Änderungen der für die Grundwasserneubildung bestimmenden Eingangsgrößen sollten direkt durch Klimamodelle bzw. indirekt durch hydrologische Modelle wiedergegeben werden können, wobei die Aussagequalität von hart (Zunahme der Lufttemperatur) bis weich (Verdunstung) reicht.

Für Aussagen über die Entwicklungen im Grundwasser wurden keine eigenen Grundwassermodellierungen von Szenarien durchgeführt. Aus den Szenarienuntersuchungen für die zu erwartenden Entwicklungen von Lufttemperatur (Klimamodell), Niederschlag (Klimamodell), mittlerer Abfluss (N-A Modell), Niederwasserabfluss (N-A Modell) lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen. Die Abbildung 8-38 bis Abbildung 8-40. zeigen die Ergebnisse aus den Szenarienberechnungen (siehe auch Kapitel 4 und 5).

- geringe Zunahme der Jahresniederschläge
- die Winterniederschläge in den Alpen und nördlich der Alpen nehmen stark zu, im Süden ist eine Abnahme erkennbar
- die Frühjahresniederschläge nehmen leicht zu
- im Sommer ist eine leichte Zunahme der Niederschläge im Süden und Norden der Alpen und eine Abnahme in den Alpen erkennbar
- die mittlere Lufttemperatur nimmt um ca. 1 °C bis 2050 zu
- die Lufttemperatur zeigt eine deutliche Zunahme im Winter
- die Niederwasserabflüsse nehmen in den Alpen zu und im Osten leicht ab
- bei den mittleren Jahresabflüssen kommt es kaum zu Änderungen; saisonal gibt es jedoch größere Unterschiede – es zeigt sich eine Zunahme im Winter und im restlichen Jahr eher eine Abnahme

Weiters ist bei einer Zunahme der Niederschläge und der Temperatur auch mit einer Zunahme der Verdunstung zu rechnen.

Anhand dieser Ergebnisse der Szenarienberechnungen können folgende zu erwartenden Veränderungen in den Grundwasservorkommen qualitativ abgeleitet werden.

Fazit:

- Die Szenarienrechnungen mit dem Klimamodell CCM lassen für den Zeitraum 2021 – 2050 gegenüber 1976 – 2006 folgende regionale Auswirkungen auf die Grundwasservorkommen erwarten:
 - Für den Süden Österreichs (Kärnten, Steiermark), wo auch eine Abnahme der Winterschläge erwartet wird, ist mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung zu rechnen (*mittelharte Aussage*).
 - Aufgrund der erhöhten Winter- und Frühjahrsniederschläge im Norden und Westen ist in diesen Regionen eher eine Zunahme der Grundwasserneubildung zu erwarten (*weiche Aussage*).
 - Durch die vermutlich geringe Zunahme der Niederschläge und der erwartenden Temperaturerhöhung sind in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs eher sinkende Grundwasserstände zu erwarten (*weiche Aussage*).
- Prognosen über eine Änderung in den Grundwasserständen einzelner Messstellen sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da diese von den sehr lokalen Verhältnissen geprägt werden (*harte Aussage*).
- Mit einer Zunahme der Grundwassertemperatur zwischen 0,2 und 1 °C ist zu rechnen, wobei der genaue Wert wieder von den lokalen Verhältnissen abhängt (*harte Aussage*).

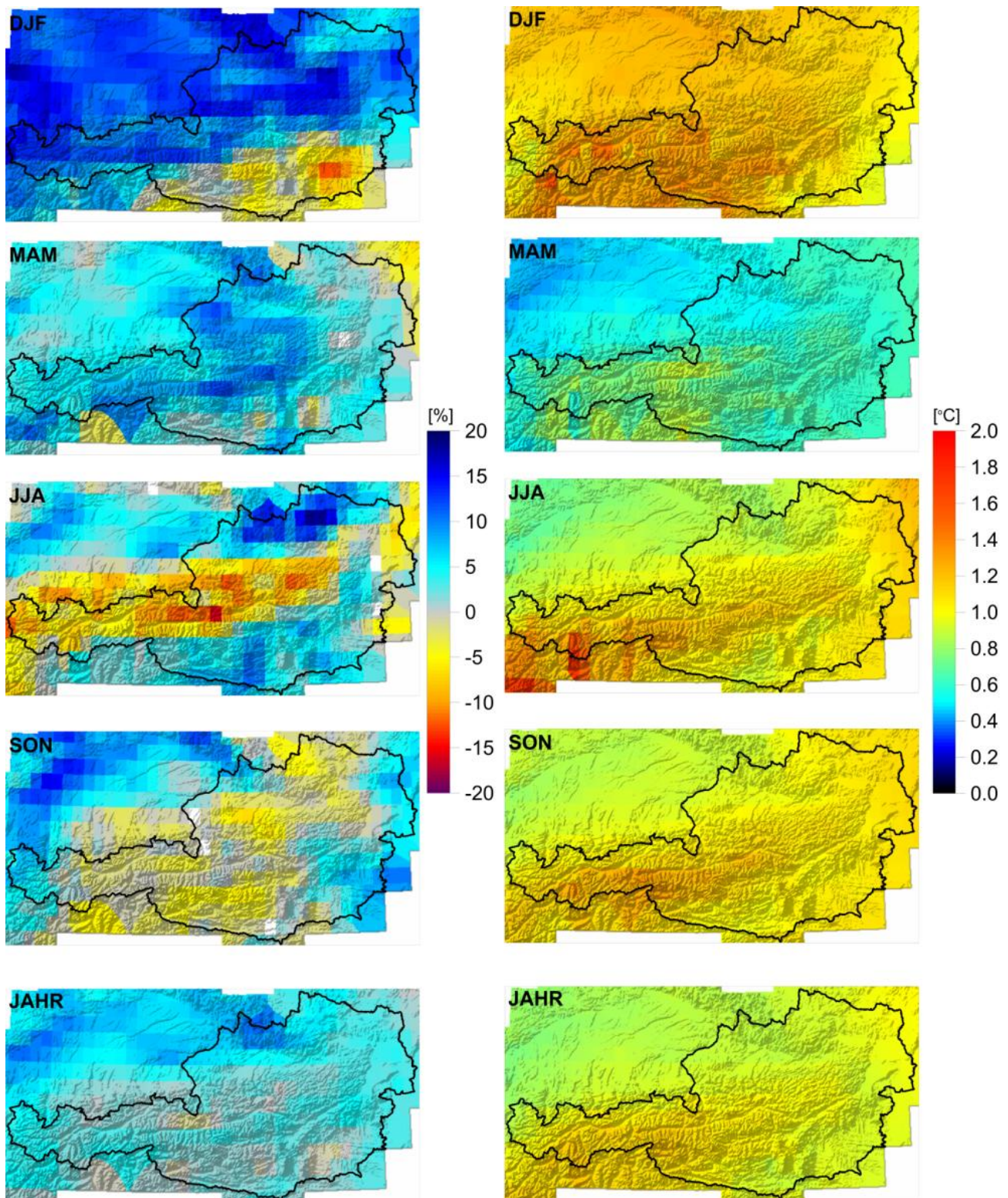


Abbildung 8-38: Änderungen im Niederschlag und der Temperatur auf Basis des gewählten Klimaszenarios B1 (Kapitel 4).

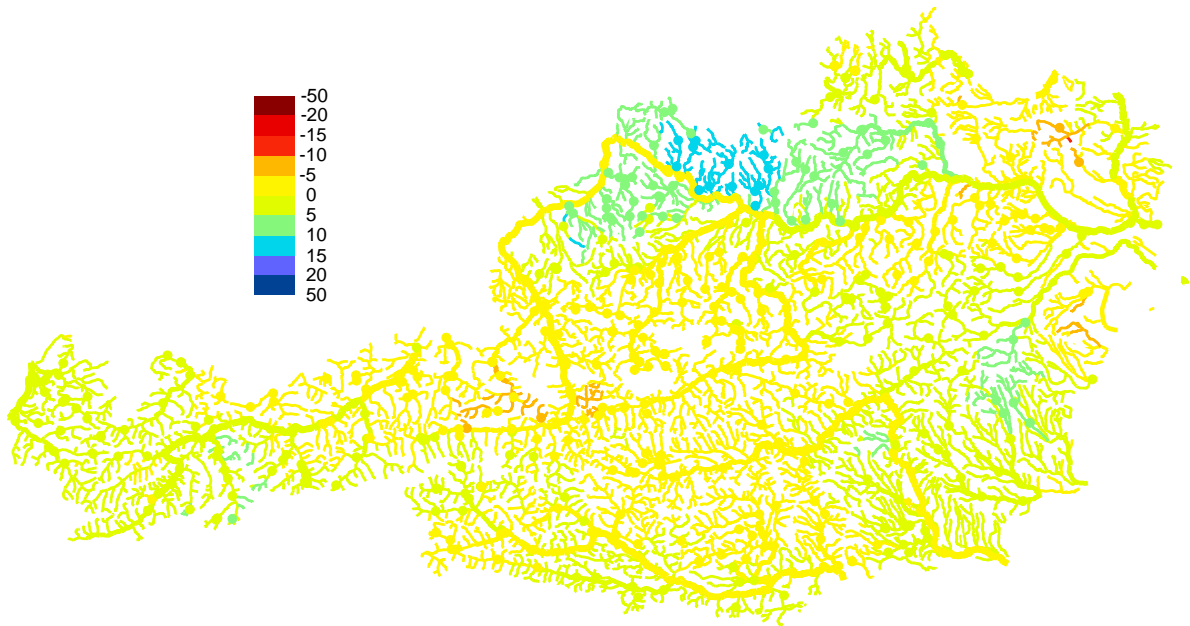


Abbildung 8-39: Änderungen der mittleren Abflüsse (Kapitel 4).

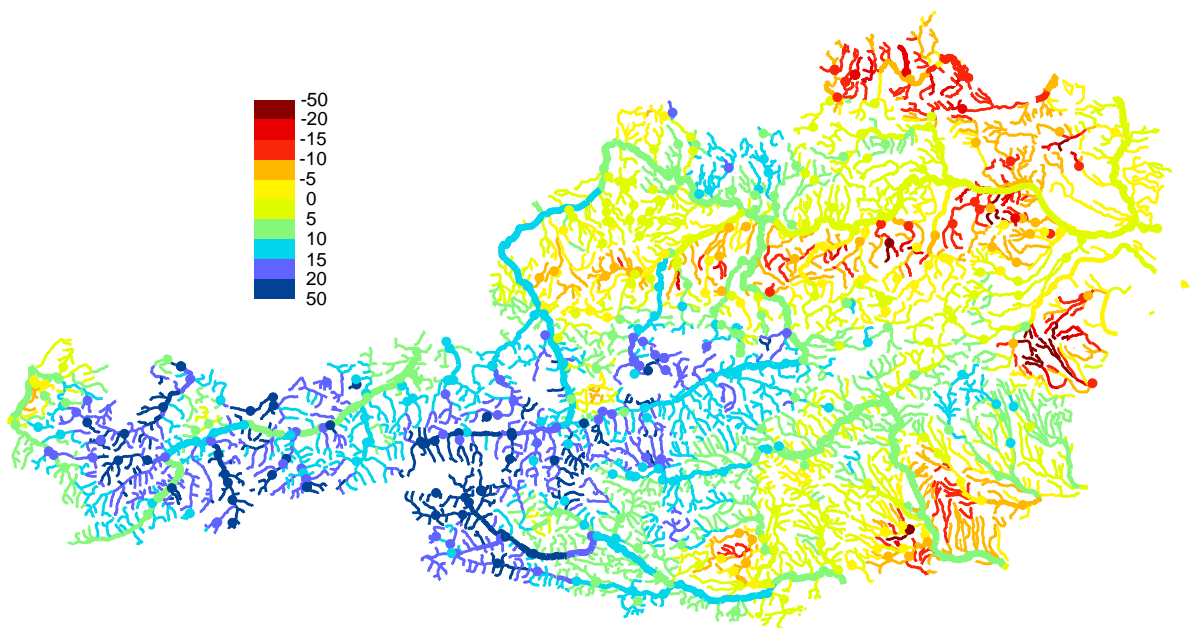


Abbildung 8-40: Änderungen in % des Niederschlags für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot : Abnahme (Kapitel 5).

8.7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Aus den Analysen können folgende Schlussfolgerungen bzw. Empfehlungen getroffen werden:

- Eine Fortsetzung bzw. Intensivierung der Wasserwirtschaftlichen Planung der Grundwasservorkommen erscheint speziell in den niederschlagsarmen Regionen des Ostens und Südens Österreichs sinnvoll. Wegen der Klimaänderung könnte der Nutzungsdruck auf die Grundwasservorkommen erhöht werden. Deshalb können regional Strategien hinsichtlich der Deckung eines zu erwartenden vermehrten Wasserbedarfes notwendig werden.
- Wegen der zukünftig zu erwartenden höheren Grundwassertemperaturen wird eine Überprüfung von Einflussnahmen auf den Wärmehaushalt des Grundwassers bei zukünftigen Konsensen empfohlen.
- Das Messstellennetz zur Grundwasserstandsmessung sollte zumindest in diesem Umfang erhalten werden, um für die wasserwirtschaftlichen Planungsaufgaben die notwendigen Informationen zu erhalten bzw. zu verdichten. Das Messstellennetz zur Grundwassertemperaturmessung sollte in intensiv genutzten Gebieten verdichtet werden, um die Grundwassertemperatur und den zu erwartenden Anstieg besser dokumentieren und damit bessere Aussagen treffen zu können.
- Durch steigende Grundwasserstände könnten in Gebieten mit derzeit schon bestehenden Problemen bei Kellervernässungen diese zunehmen. Eine Überprüfung der Bebauungsvorschriften könnte in diesen Fällen notwendig werden. Eine Berücksichtigung bei der regionalen Raumplanung wird angeraten.

Klimaänderungen finden in der Regel nicht abrupt statt und deshalb erscheint auch eine langfristig ausgerichtete Anpassungsstrategie als sinnvoll. Dabei ist eine Berücksichtigung nicht klimabedingter Einflüsse wie Bevölkerungsentwicklung, Energieverbrauchsentwicklung, etc. in die Überlegungen mit einzubeziehen, da diese gesellschaftspolitischen Vorgaben sehr leicht größere Effekte als Klimaänderungen nach sich ziehen können.

Schon heute eingesetzte Instrumente der wasserwirtschaftlichen Planung erscheinen dafür geeignet bzw. können an die Erfordernisse angepasst werden.

Herausforderungen werden auf die Trinkwasserwirtschaft insbesondere in den Porengrundwasservorkommen durch zunehmende Ansprüche anderer Nutzer (Stichwort Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft) und einen durch die Temperaturerhöhung zu erwartenden Anstiege beim Spitzenbedarf zukommen. Durch den zu erwartenden Temperaturanstieg in den Oberflächengewässern und im Grundwasser ist bei Uferfiltratanlagen zur Trinkwassergewinnung mit einer Zunahme von Qualitätsproblemen zu rechnen. Bei der voraussichtlichen Zunahme an Nutzungskonflikten wird die Deckung des Trinkwasserbedarfes im Sinne eines öffentlichen Interesses verstärkt einzufordern sein.

9. Seen

9.1 Kurzfassung

Prozesse im See (allgemeine Grundlagen)

- Der Haupteinfluss des Klimawandels auf die Seen liegt in der Veränderung der Energiebilanz des geschichteten Oberwassers und in einer zeitlichen Ausdehnung der produktiven Phasen infolge höherer Temperaturen (*harte Aussage*).
- Flache Seen mit Tiefen < 10 m weisen ein geringes Puffervermögen für die Auswirkungen einer Veränderung klimatischer Rahmenbedingungen auf. Tiefe Seen besitzen in der Regel ein hohes Puffervermögen gegenüber Einflüssen und zeigen eine höhere interne Stabilität (*harte Aussage*).
- Bei tiefen Seen > 10 m spielt die Durchmischung im Herbst und Frühjahr eine zentrale Rolle für den Stoffkreislauf. Nicht voll durchmischte Seen fungieren als Nährstofffallen, die erhebliche Mengen an Nährstoffen (N und P) in den tiefen undurchmischten Bereichen ablagern und somit dem Kreislauf entziehen. Sauerstoff gelangt im Gegenzug nicht in diese Bereiche. Bei voll durchmischten Seen wiederum gelangen die sedimentierten Nährstoffe in Folge der Durchmischung in die Wassersäule und damit wieder in den Kreislauf. Auch das Tiefenwasser wird mit Sauerstoff versorgt.
- Die Durchmischungscharakteristik wird von den Temperaturen des geschichteten Oberwassers und den Windbedingungen dominiert.
- Ein anfangs voll durchmischter See, der zu einem teildurchmischten See mit Nährstoffanreicherung im Tiefenwasser wird und zu einem späteren Zeitpunkt wieder voll durchmischt wird, wird als Konsequenz massive Nährstoffkonzentrationen im Oberwasser und Algenblüten aufweisen.
- Dem Erhalt seiner typischen Mischungscharakteristik kommt in Hinblick auf die Reaktion des Sees auf die Veränderung klimatischer Rahmenbedingungen eine zentrale Bedeutung zu (*harte Aussage*).

Situation in der Vergangenheit

- Die oberflächennahen Wassertemperaturen in den Seen Österreichs haben in den letzten Jahrzehnten generell zugenommen (*harte Aussage*).
- Der Bodensee (Obersee) kann in Hinblick auf Temperaturen und Durchmischung als Beispiel für tiefe, volldurchmischte Seen herangezogen werden.
 - In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich der mittlere jährliche Wasserstand des Bodensees gegenüber den vorhergehenden Dekaden nicht verändert. Der Wasserstand im Sommer ist jedoch deutlich zurückgegangen, im Winter ist er angestiegen (*harte Aussage*).
 - Der am Bodensee deutlich erkennbare Anstieg der Lufttemperatur führte zu einer geringfügigen Änderung der Durchmischungsvorgänge im See (Zeitraum der Durchmischung) (*mittelharte Aussage*).
- Neusiedler See
 - In den Jahren 1991 – 2004 wurde eine Zunahme der Lufttemperatur von 0,7°C und eine Abnahme des Niederschlags von 6% gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961 – 1990 registriert. In den letzten Jahren stieg der Niederschlag an (*harte Aussage*).
 - Durch diese Temperaturzunahme erhöhte sich die Verdunstung. Bei gleichzeitiger Niederschlagsabnahme stieg die Wahrscheinlichkeit der Unterschreitung markanter Seepegel (*harte Aussage*).

Situation in der Zukunft

- Numerische Modelle können bisher keine gesicherte Aussage darüber treffen, ob es zu Änderungen in der Mischungscharakteristik der Seen kommt. Deshalb können für den Betrachtungszeitraum 2021-2050 keine gesicherten Aussagen über zu erwartende Beeinträchtigungen getroffen werden (*harte Aussage*).
- Je nährstoffärmer der See, desto weniger Nährstoffe und infolge der Kohlenstofffixierung auch weniger organischer Kohlenstoff stehen für den Kreislauf in Seen zur Verfügung und umso geringere Auswirkungen veränderter klimatischer Rahmenbedingungen auf die Qualität sind zu erwarten (*mittelharte Aussage*).
- Bodensee
 - Die sommerlichen Wasserstände könnten sich in Zukunft reduzieren (*weiche Aussage*).
 - Die Szenarienanalysen zeigen, dass wärmere Winter zu stabileren Schichtungen und einer Reduktion des vertikalen Stoffaustausches führen könnten. Die Durchmischung dürfte aber weiterhin gegeben sein (*mittelharte Aussage*).
 - Winterliche Starkwinde wirken erst bei extrem häufigem Auftreten auf die Vertikalzirkulation, wobei ihr Einfluss von der Temperaturverteilung im See und von den übrigen hydrometeorologischen Größen abhängt (*mittelharte Aussage*).
- Neusiedler See
 - Da die Wasserbilanz die Differenz zweier etwa gleich großer Zahlen (Niederschlag und Verdunstung) ist, sind die Prognosen der Wasserbilanz des Sees sehr unsicher (*harte Aussage*).
 - Das Szenario mit dem CLM Klimamodell (2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007) ergibt eine Erhöhung der Lufttemperatur um ca. 1°C und eine Zunahme des Niederschlags um ca. 5%. Unter diesen Voraussetzungen bleibt der Seepegel annähernd gleich dem derzeitigen Zustand (*weiche Aussage*).

Anpassungsmaßnahmen

- Zur Beobachtung potentieller Klimaeinflüsse auf die Durchmischung von Seen wird - wenn nicht schon bisher umgesetzt (wie zB im Bodensee) - eine entsprechende Anpassung der Monitoringstrategie empfohlen (regelmäßige Tiefenprofile mit zumindest Temperatur und Sauerstoffmessungen).
- Wenn sich Einflüsse auf das Mischungsverhalten vollaufmischter Seen ergeben, erlangt die Nährstoffsituation der Seen eine zusätzliche Bedeutung. Dies sollte auch bei der Gewässerschutzstrategie für die Seen berücksichtigt werden.
- Der Neusiedler See ist als Steppensee stark von einer Erhöhung der Temperaturen betroffen, da sich die Verdunstung erhöht und so der Wasserhaushalt des Sees beeinflusst wird. Es wird empfohlen, die Änderungen in den hydroklimatischen Verhältnissen in der Betriebsordnung zu berücksichtigen.

9.2 Vorgangsweise

Methodisch erfolgt die Beurteilung der Auswirkung des Klimawandels auf österreichische Seen anhand zweier exemplarischer Seen, für die bereits detaillierte Studien verfügbar sind. Der Bodensee ist ein Vertreter der Gletscherrandseen, zu denen fast alle Österreichischen Seen zählen. Der Neusiedlersee ist ein Steppensee. Aufgrund der völlig unterschiedlichen Charakteristik der beiden Seen sind auch andere Prozesse vom Klimawandel betroffen. Am Neusiedler See ist der Wasserhaushalt und damit direkt verbunden der Wasserstand im maximal 2 m tiefen See der maßgebliche Prozess. Am Bodensee, der an seiner tiefsten Stelle 254 m tief ist, spielen die Prozesse des Wasserhaushaltes eine untergeordnete Rolle. Hier sind der vertikale Wasseraustausch und der Stoffhaushalt von großer Bedeutung.

Dementsprechend sind die Untersuchungen am Neusiedler See auf die Veränderung des Wasserhaushaltes unter veränderten klimatischen Bedingungen fokussiert. Am Bodensee wird hingegen der vertikale Wasseraustausch beurteilt. Auch das Zooplankton und Phytoplankton, sowie der Bestand der Blaufelchen werden anhand beobachteter Daten diskutiert. In einem zweiten Schritt werden Ergebnisse aus der Literatur von hydrodynamischen Simulationen zusammengefasst.

Die Informationen in diesem Berichtsteil sind im Wesentlichen den folgenden Arbeiten entnommen: KLIWA (2007), KLIWA (2009), Eitzinger et al. (2005), Glen (2010), Kubu (2006). Zusätzlich wurden Wassertemperaturdaten ausgewertet.

9.3 Prozesse im See

Die Reaktion von Seen auf die Veränderung klimatischer Rahmenbedingungen hängt stark von der Charakteristik des Sees ab. Flache Seen mit Tiefen < 10 m weisen ein geringes Puffervermögen für die Veränderung klimatischer Rahmenbedingungen auf. Tiefe Seen besitzen in der Regel ein hohes Puffervermögen gegenüber Einflüssen und zeigen eine höhere interne Stabilität. Dabei spielt die Mixis ebenfalls eine entscheidende Rolle. Meromiktische Seen fungieren als Nährstofffallen, die erhebliche Nährstoffe (N und P) in den tiefen undurchmischten Bereichen ablagern und somit dem Kreislauf entziehen. Bei holomiktischen Seen wiederum gelangen die sedimentierten Nährstoffe in Folge der Durchmischung in die Wassersäule und damit wieder in den Kreislauf. Ebenso wichtig wie der Nährstoffaustausch ist auch die Sauerstoffversorgung des Hypolimnions durch die zweimalige Mischung unserer Seen.

Der Haupteinfluss des Klimawandels auf die Seen liegt einerseits in der Veränderung der Energiebilanz des Epilimnions und andererseits in einer Erhöhung der produktiven Zeiten infolge höherer Temperaturen. Die Erhöhung der Temperaturen im Epilimnion (siehe zB Oberflächentemperaturen in Abbildung 9-1 und Abbildung 9-3) erhöht entsprechend der spezifischen Wärmekapazität von Wasser den Energiegehalt im Epilimnion. Zum Zeitpunkt der herbstlichen Mixis ist daher mehr (Wind-) Energie für eine Durchmischung der stratifizierten Bereiche nötig als bei niedrigeren Temperaturen. Zudem erschweren die Dichteunterschiede auf Grund der Temperaturunterschiede zusätzlich die Durchmischung. Als Folge kommt es zu einer nicht mehr vollständigen Durchmischung der stratifizierten Schichten. Nur unter isothermen Bedingungen im Epi- und Hypolimnion und ausreichendem Energieeintrag durch den Wind kann eine Volldurchmischung erfolgen, die wiederum für den Konzentrationsausgleich bei Sauerstoff (vom Epi- ins Hypolimnion) sowie Nährstoffen (vom Hypo- ins Epilimnion) notwendig ist. Unterbleibt die vollständige Mixis, kann es in den undurchmischten Tiefenbereichen im Extremfall zu einer völligen Sauerstoffzehrung und anoxischen oder gar anaeroben Bedingungen kommen, was wiederum Auswirkungen auf die Nährstoffkreisläufe hat. Entscheidend für die Auswirkungen des Klimawandels auf die Seen ist, ob trotz des höheren Energiegehalts im Epilimnion infolge höherer Temperaturen eine vollständige Durchmischung erreicht wird. Wegen ihrer Wassermassen weisen große und tiefe Seen eine hohe Kapazität für die Abpufferung der höheren Epilimniontemperaturen auf.

Eine größenordnungsmäßige Abschätzung einer Temperaturerhöhung im Epilimnion für den Attersee (Annahme: Fläche 47 km²; mittlere Tiefe 85m; Epilimnion 10m; Hypolimniontemperatur 4°C) ergibt bei einer Zunahme der Epilimniontemperatur um 2 °C zum Zeitpunkt der Herbstmixis (= 6°C Epilimniontemperatur) eine Erhöhung des Gesamtenergiegehaltes des Sees um etwa 6 %, was einer Wärmemenge bzw. einem zusätzlichen Energiegehalt von etwa 4×10^{12} kJ oder 4×10^3 TJ entspricht. Eine Volldurchmischung würde die mittlere Temperatur von 4°C rechnerisch auf 4,24°C erhöhen. Diese Temperaturerhöhung bewirkt eine Verminderung der 100% Sauerstoffsättigungskonzentration von 12,9 mg O₂/l auf 12,8 mg O₂/l und wäre demnach zu vernachlässigen.

Neben dem Einfluss auf die Mixis ist auch die Verlängerung der produktiven Zeiten sowie die potentielle Erhöhung der biologischen Aktivitäten als Folge erhöhter Temperaturen im See ein zentraler Punkt. Speziell dieser Punkt steht im engen Zusammenhang mit der trophischen Situation des Sees, die sich im klimatischen Bezugszeitraum 1976-2006 stark verbessert hat und für sich betrachtet die Biozöosen in den Seen stark verändert hat. Und wieder sind es die kleineren flachen Seen, die hier einen stärkeren Einfluss erfahren als große, tiefe Seen. Die höheren Temperaturen führen zu einer Intensivierung der biologischen Aktivitäten, die auch von der Nährstoffsituation angetrieben werden. Je höher die verfügbaren Nährstoffe und je höher die Temperaturen, desto intensiver die biologischen Aktivitäten und Verkürzung der Turnover Zeiten. Eine Verkürzung der Turnover Zyklen für Nährstoffe bedeutet jedoch eine Zunahme der Kohlenstofffixierung im selben Zeitraum und somit eine Intensivierung der Primärproduktion. Die vermehrte Fixierung von Kohlenstoff stellt nun ein erhöhtes Hydrolysepotential dar, das weiter zu vermehrten bakteriellen Abbauprozessen führt. Dadurch, dass hier flache Seen < 10m Tiefe besonders betroffen sind, die ihrerseits jedoch keine wesentliche Stratifizierung aufweisen und als polymikrisch angesehen werden können, kommt es im Sedimentbereich auch zu keinen anoxischen / anaeroben Zuständen, da die auftretenden Winde häufig zu einer Durchmischung und somit einem Sauerstoffausgleich im sedimentnahen Wasser führen.

9.4 Situation in der Vergangenheit

9.4.1 Ergebnisse in der Literatur

Lange Zeitreihen belegen, dass die Temperaturen in Schweizer Seen ansteigen (Kipfer und Livingstone, 2008), wodurch die Wachstumsphase der Organismen verlängert wird. Unter anderem fördern höhere Temperaturen das Wachstum von Cyanobakterien, sodass es zur Bildung von dichten Zellteppichen kommen kann. Neben der Beeinträchtigung durch Geschmacks- und Geruchsstoffe kann es auch zur Bildung von Toxinen kommen. Ein weiterer Effekt, der durch die Erwärmung der Seen zu beobachten ist, ist eine stabilere Schichtung (Eawag, 2009). Durch die Erwärmung der oberen Schichten verlängert sich die Sommerstagnation - Häufigkeit und Intensität der Mischungsereignisse nehmen ab, was wiederum zu niedrigen Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser führen kann. Glen (2010) untersucht anhand von Messdaten ausgewählter Europäischer Seen die Intensivierung der Nährstoffzyklen sowie die Bedeutung der Mixis und des Energieinhaltes der Seen.

9.4.2 Trends der Temperaturentwicklung in österreichischen Seen

Für 10 österreichische Seen wurden hier monatliche Temperaturdaten ausgewertet. Der Zeitraum beträgt für sieben der Seen 1976 – 2006, und für die drei Kärntner Seen Millstättersee, Ossiachersee und Wörthersee 1991 – 2006. Abbildung 9-1 zeigt die Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur aller Seen. Der Trend der Erwärmung des Neusiedler See ist am auffälligsten. Die größten Schwankungen weist der Altausseer See auf.

Für eine differenziertere Betrachtung sind die Wassertemperaturen in Abbildung 9-2 getrennt nach Jahreszeiten dargestellt. Es wurde der Neusiedler See (deutlichster ansteigender Trend) und der Hallstätter See (deutlichster gleich bleibender Trend) ausgewählt. Man sieht, dass der Beitrag der höheren Jahresmittelwerte am Neusiedler See aus den Sommermonaten stammt, wo die Seetemperaturen einen steigenden Trend zeigen, wohingegen die Wintermonate zumindest zwischen 1976 – 2000 keinen Trend aufweisen und erst in den letzten sechs Beobachtungsjahren ein leichter Anstieg zu beobachten ist. Am Hallstätter See sind keine eindeutigen Trends abzulesen. Einzig das letzte dargestellte

Beobachtungsjahr 2007 zeigt in den Sommermonaten deutlich höhere Temperaturen, im Herbst allerdings dann im Gegenzug einen nach unten zeigenden Trend.

Abbildung 9-3 zeigt die Temperaturen für zwei Oberflächenmessstellen am Attersee. Die getrennte Betrachtung der Jahreszeiten erlaubt eine ansatzweise Abschätzung der Wärmepufferkapazität des Sees. Der Temperaturtrend der Wintermonate (DJF) und Herbstmonate (SON) zeigt an der Station Weißenbach einen Anstieg von jeweils etwa 1 °C für den Zeitraum 1976 bis 2006, wogegen sich die Sommertemperaturen im selben Zeitraum um etwa 2 °C erhöht haben. Dies zeigt, dass sich die erhöhten Sommertemperaturen nicht direkt in den Herbsttemperaturen widerspiegeln. Für eine detaillierte Auswertung des Klimaeinflusses müssen seenspezifisch langjährig verfügbare Tiefenprofile betrachtet werden um Aussagen über eine Veränderung der Mixis zu erhalten, wie dies auch am Bodensee erfolgt ist.

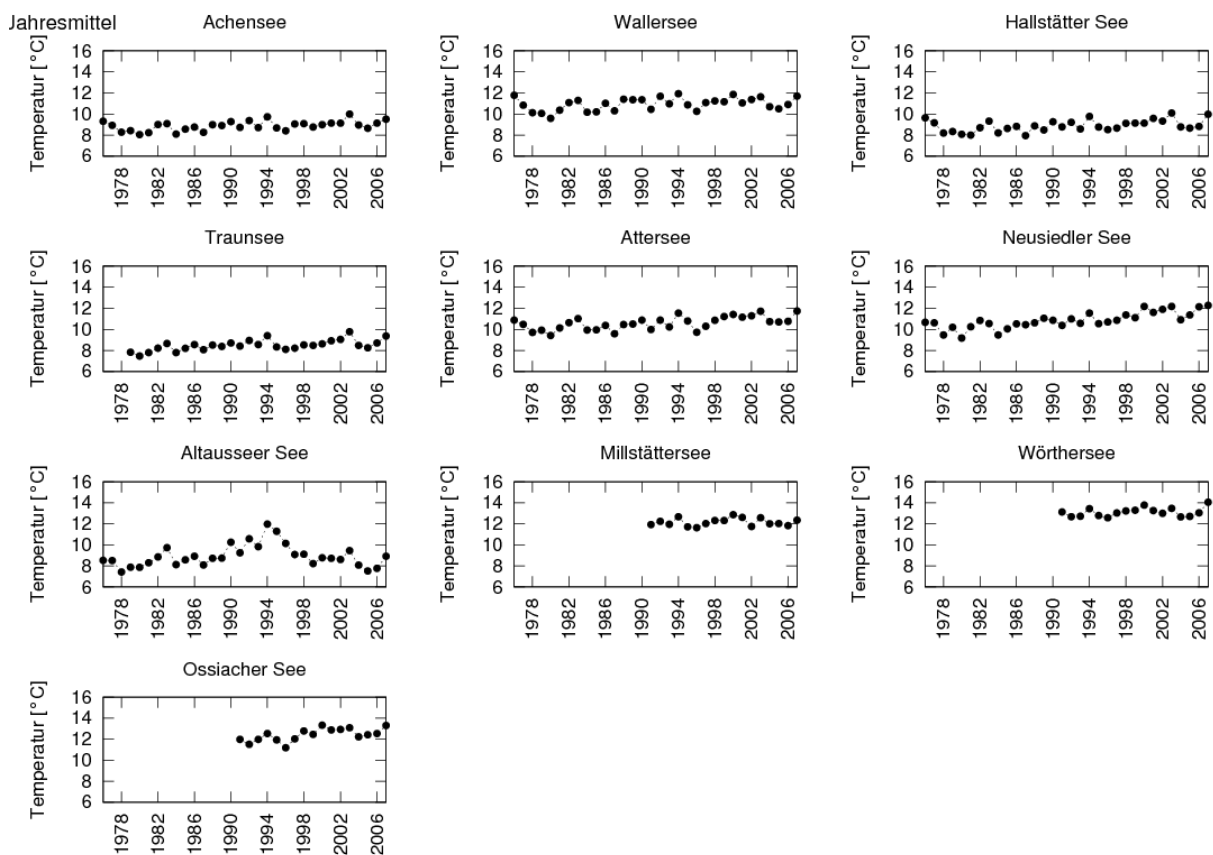


Abbildung 9-1: Mittlere Jahrestemperaturen einzelner österreichischer Seen

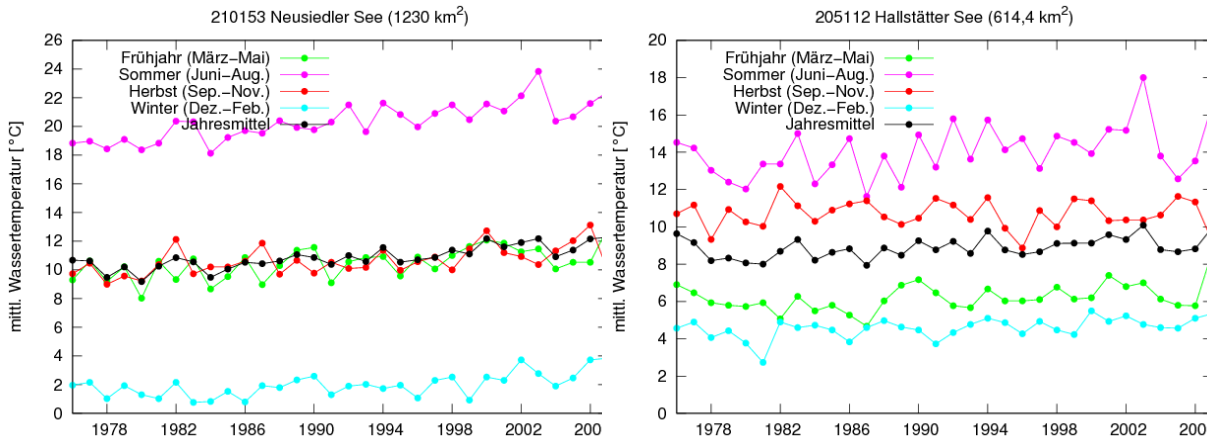


Abbildung 9-2: Zeitliche Entwicklung der mittleren Quartalstemperaturen am Neusiedler See (links) und am Hallstätter See (rechts).

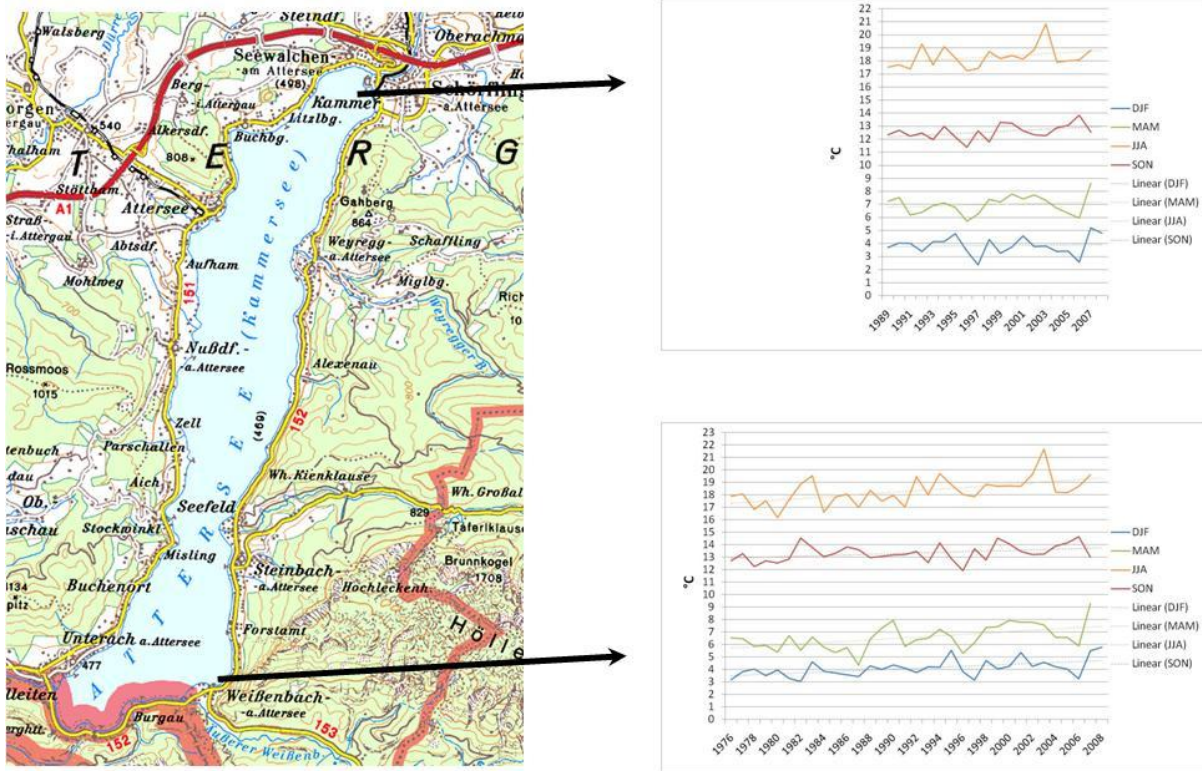


Abbildung 9-3: Trend der Temperaturdaten seit 1976 nach Jahreszeiten an zwei Messstellen im Attersee

9.4.3 Bodensee

9.4.3.1 Änderungen im hydrologischen Regime

Fazit: Veränderungen des hydrologischen Regimes, insbesondere im Jahresverlauf von Pegelstand und Zuflusscharakteristik, sind in den letzten Jahrzehnten aufgetreten und haben Einfluss auf Fauna und Flora der ufernahen Feuchtgebiete.

Die Charakteristik der Zuflüsse zum Bodensee hat sich sowohl durch anthropogene Einflüsse (Speicherhaltung) als auch durch die Folgen der Erwärmung (Schneeakkumulation und Schmelze) verändert, wobei sich die mittleren täglichen Winterabflüsse erhöht und die Sommerabflüsse im Gegenzug verringert haben. Die Erhöhung winterlicher Niederschlags- und Abflussmengen kann mit der Nordatlantischen Zirkulation zusammenhängen, welche in jüngerer Zeit vermehrt westliche und somit wärmere und feuchtere Luftströmungen nach Mitteleuropa leitet (Hurrell, 1995, Straile et al. 2003).

Die Differenz des Wasserstandes am Pegel Konstanz/Bodensee im Vergleich zum Pegel Konstanz/Seerhein ist einem signifikanten, aber sehr kleinen sinkenden Trend von 1mm/Jahr unterworfen, wobei die Ursachen dafür nicht erklärt werden können. Vermutet werden anthropogene Einflüsse wie Ausbaggerung von Schifffahrtsrinnen oder Kiesentnahmen, weil die Veränderungen durch natürliche allmähliche Erosion des Flussbettes kaum erklärbar sind. Diese Tatsache muss aber bei Betrachtung der Verläufe des Pegels Konstanz im Auge behalten werden.

Während der Jahresmittelwert keinen Hinweis auf klimabedingte Änderungen liefert, deutet die Analyse der Jahresverläufe selbst auf einen Einfluss der Klimaänderung hin: Es wurden in den letzten Jahren deutlich geringere Pegelwerte von etwa Juli bis Mitte September aufgezeichnet, während die Werte von November bis Mitte Januar erhöht sind (Abbildung 9-4).

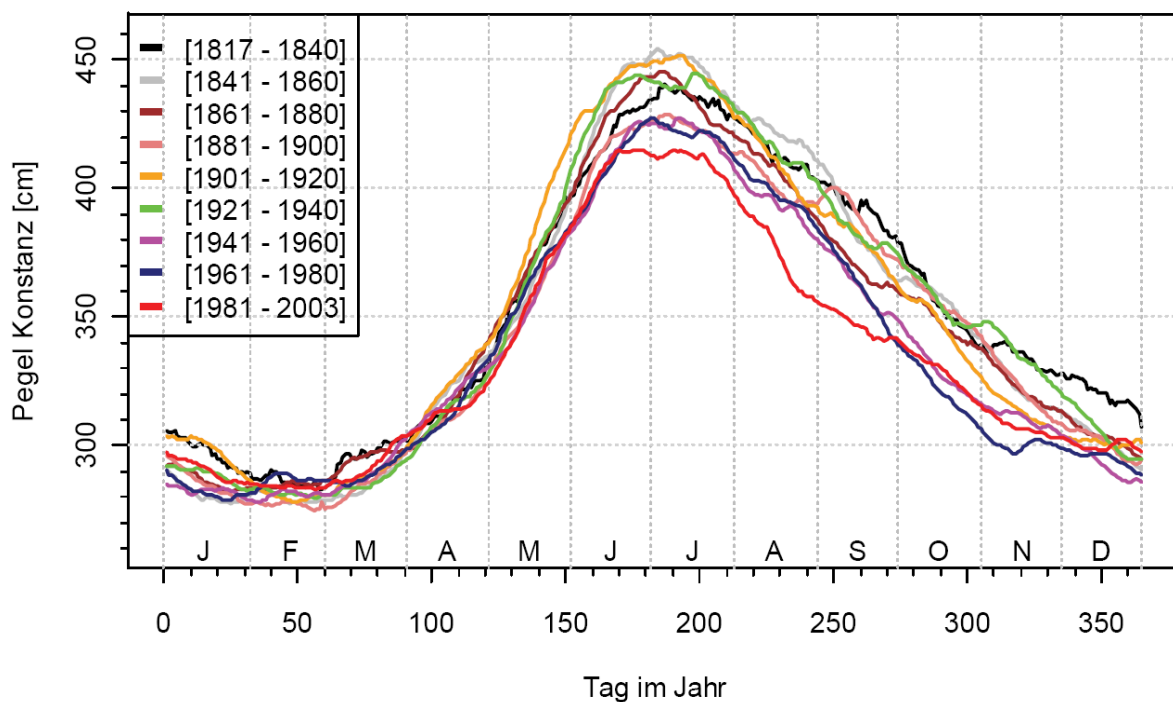


Abbildung 9-4: Mittlere Jahresgänge des Bodenseepegels Konstanz für verschiedene Zeiträume ab 1817. Aus KLIWA (2007)

Dieses Verhalten verläuft also parallel zu jenem der Bodensee-Zuflüsse, von denen der Alpenrhein ca. 62% beiträgt (siehe dazu Abbildung 9-5). Flusswasser kann am ehesten im Winter, wenn seine Temperatur mit etwa 4°C nahe dem Dichtemaximum liegt, in die tieferen Seeschichten eindringen, begünstigt wird dieser Vorgang durch enthaltene Schwebstoffe (seitlicher Dichtestrom). Allerdings ist der Eintrag von Flusswasser in den See nicht relevant für die Anreicherung tiefer Schichten mit Sauerstoff.

Der veränderte jahreszeitliche Verlauf der Wasserstände im See, insbesondere der im Mittel sinkende Wasserstand im Sommerhalbjahr, hat allerdings Einfluss auf ufernahe

Feuchtgebiete und deren Fauna und Flora. Durch das Trockenfallen von einzelnen Regionen ist die Artenvielfalt dort einer drohenden Änderung unterworfen.

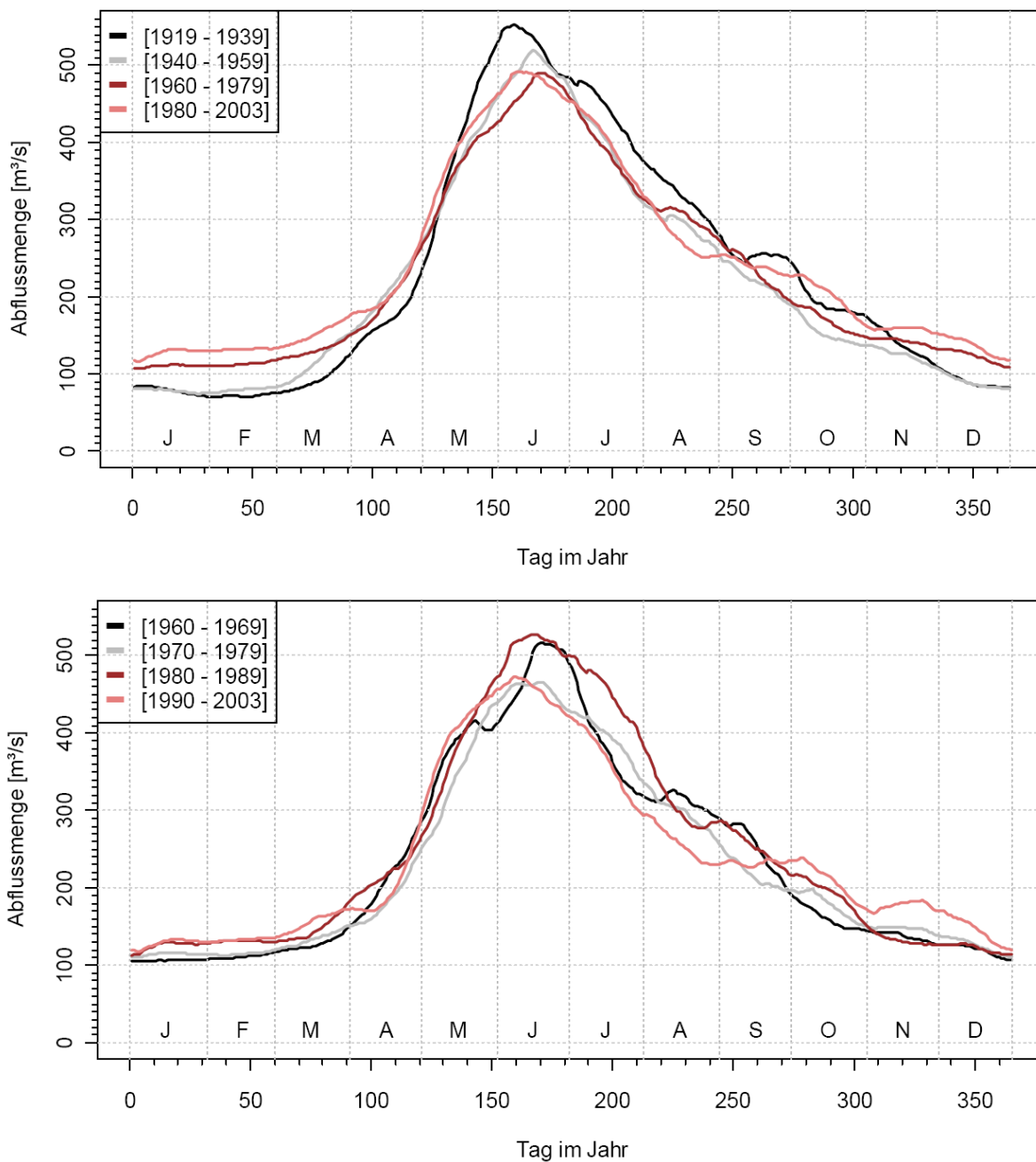


Abbildung 9-5: Mittlere geglättete Jahresverläufe der Alpenrheinzuflussmengen für verschiedene Zeiträume. Oben: ab 1919, unten ab 1960. Zeitfenster der Glättung: +/- 10 Tage. Aus KLIWA (2007).

9.4.3.2 Vertikale Austauschvorgänge im See

Fazit: Die Erwärmung des Klimas hat einen deutlichen Einfluss auf den vertikalen Wasseraustausch in tiefen Seen, wo der Dichteunterschied durch die Abkühlung der oberen Schichten im Winter den Stoffausgleich einleitet. Der Einfluss des Windes ist messbar, wobei sein Einfluss geringer ist als jener der Lufttemperatur.

Grundlage für Veränderungen im See waren und sind die meteorologischen Bedingungen. Seit den 1960er-Jahren kann eine Zunahme der Luft- und Wassertemperaturen beobachtet werden. 1963 war das einzige Jahr des Beobachtungszeitraumes, in dem der gesamte See zugefroren war (= Seegfrörne). Eine Analyse der Lufttemperaturen auf Tagesmaxima und -minima zeigt, dass bei den Minima die Trends in allen Monaten signifikant ansteigen und ausgeprägter ausfallen als die der Tagesmittel oder der Tagesmaxima.

Speziell die Auskühlung des Sees im Winter hat jedoch eine hohe Bedeutung für die vertikale Durchmischung und Tiefenwassererneuerung, d.h. die Anreicherung der tiefen Wasserschichten mit Sauerstoff. Seit Ende der 1980er-Jahre findet man bei im Mittel merklich höheren Luft- und Wassertemperaturen eine Änderung in der Charakteristik der Durchmischung, ausgeprägt schlechte Durchmischungsverhältnisse treten häufiger ein als davor.

Die vertikale Durchmischung des Sees entsteht durch Dichteunterschiede im Jahresverlauf. Wasser aus den oberen Schichten muss im Winter soweit ausgekühlt werden, dass es durch den so entstehenden Dichteunterschied zu den dann wärmeren Tiefenwässern absinkt. Es zeigt sich eine signifikante Korrelation zwischen dem Durchmischungsindex, der eine unabhängige Variable der aktuellen Durchmischung im vertikalen Profil des Sees darstellt, und der mittleren Lufttemperatur des Winterquartals Dezember-Januar-Februar.

Der Durchmischungsindex Z zeigt den Variationskoeffizienten des Indexstoffes über das vertikale Seeprofil. Ein Index nahe 0 bedeutet, dass über die gesamte Tiefe des Sees dieselbe Dichte/Konzentration herrscht und ein Austausch stattgefunden hat. Je größer der Index, desto schlechter bis gar nicht hat sich das Wasser vertikal ausgetauscht.

Um generalisierte Aussagen über die vertikalen Stoffaustauschvorgänge treffen zu können, wurden 45 Jahre beobachteter vertikaler Durchmischungen untersucht, wobei Messwerte von zwei Messpunkten in Seemitte vorlagen und als meteorologische Station jene in Konstanz gewählt wurde. Generell lässt sich sagen, dass in kalten Wintern mit einer mittleren Lufttemperatur unter $2,47^{\circ}\text{C}$ eine vertikale Durchmischung stattfindet, wobei Durchmischungsindizes $< 0,2$ auftreten. Bei mittleren Temperaturen über $2,47^{\circ}\text{C}$ reicht die stoffliche Durchmischung des Sees von kaum erkennbar (Durchmischungsindex $> 0,6$) bis zu einem praktisch vollständigen vertikalen Konzentrationsausgleich. Das bedeutet, dass kalte Winter einen Austausch fördern, in wärmeren Wintern aber keine generelle Aussage über den Austausch getätigt werden kann. Es gibt aber auch Ausnahmen in kalten Wintern: Inverse Schichtungen (oben kalt, unten wärmer) ohne vertikalen Stoffaustausch wurden regelmäßig dann beobachtet, wenn das tiefe Hypolimnion bereits zu Beginn des Winters Temperaturen nahe $4,0^{\circ}\text{C}$ aufwies, so dass sich kein ausreichender Dichteunterschied einstellen konnte, um einen Austausch des Wassers einzuleiten. Das kann auftreten, wenn mehrere kalte Winter aufeinander folgen und sich die tiefen Seeschichten im Sommerhalbjahr nicht ausreichend erwärmen können.

In warmen Wintern findet keine ausreichende Auskühlung der Seeoberfläche statt, so dass der vertikale Stoffaustausch nur sehr schwach stattfinden kann.

Eine weitere meteorologische Größe ist der Wind, wobei Windrichtung und Windstärke gemessen werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die Winde keiner Veränderung aufgrund der klimatischen Bedingungen unterworfen sind. Der Einfluss von Winden kann anhand zweier Jahre, wo ähnliche Temperaturverhältnisse im See und in der Luft herrschten, erläutert werden. In einem windreichen Jahr kam es im Gegensatz zu einem windärmeren Jahr zu einer Durchmischung aufgrund der Stürme bis in die größten Seetiefen. Stürme mit Windgeschwindigkeiten über 6 m/s wirken erst in extremer Häufung

auf die Vertikalzirkulation. Kalte oberflächennahe Wassermassen können in Randbereiche des Sees gedrängt werden, wo die Wassertiefe geringer ist und diese Wassermassen so leicht auf den Grund sinken und von dort entlang des Grundes in Seemitte rutschen können (seitliche Dichteströmungen). Der Effekt der Stürme steht aber nicht alleine, sondern ist vor allem abhängig von den aktuellen Wassertemperaturen und ihrer zeitlichen Einbindung in den zeitlichen Ablauf. Das Auftreten starker Winde ist kein Garant für eine gute vertikale Durchmischung, was Messreihen aus anderen Jahren zeigen.

9.4.3.3 Veränderungen hydrochemischer Parameter und Wechselwirkung mit dem Phyto- und Zooplankton und den Blaufelchen

Fazit: Die Erwärmung des Klimas hat insofern Einfluss auf die Lebewelt im See, als die Sauerstoffversorgung insbesondere in den tiefen Schichten abhängig vom vertikalen Stoffaustausch im Winter ist. Diese ist von zu warmen Wintern negativ beeinflusst, wodurch sich auch die Sauerstoffversorgung im Wasserkörper verschlechtert.

Für zahlreiche Organismen und chemische Prozesse ist die Sauerstoffkonzentration im Wasser ein wichtiger Parameter, daher wurde der Zusammenhang mit der Trophierung untersucht. Im Herbst tritt üblicherweise im Metalimnion (mittlere Wassertiefen) ein Bereich erniedrigter Sauerstoffkonzentration auf, der im Spätherbst mit der tiefergreifenden konvektiven Durchmischung wieder verschwindet. Im Hypolimnion (große Wassertiefen) nimmt der Sauerstoff ebenfalls im Jahresverlauf ab, wobei sich die Werte ab etwa Dezember bis April wieder erholen. In den Jahren der hohen Trophie im Bodensee (1976 – 1985) konnten die höchsten Werte der Sauerstoffzehrung in tieferen Wasserschichten beobachtet werden.

Durch die unterschiedlichen Bedingungen kam es zu einer deutlichen Verschiebung im Artenspektrum, wobei sich die Änderungen je Art oder Gattung sehr unterscheiden. Die Konsistenz der Daten ist schwierig zu beurteilen und es muss daher von einer großen Unsicherheit in den Daten bzw. den Ergebnissen ausgegangen werden.

Der Bestand an Blaufelchen hat sich in den 1990er-Jahren aufgrund der Verbesserung der Trophie des Sees deutlich erhöht. Die geringen Bestände der 1960er-Jahre lassen sich einerseits auf die schlechte Versorgung mit Sauerstoff und andererseits auf geänderte Fangmethoden zurückführen, da damals die Maschenweite der Fangnetze deutlich verringert wurde und so Jungfische entnommen wurden, die für die Reproduktion im See verbleiben hätten sollen. Blaufelchen laichen nur an wenigen Tagen im Jahr in der ersten Dezemberhälfte, wobei junge Felchen eher später laichen. Der Zeitpunkt ist für die Fischindustrie interessant, da der Laich für die künstliche Bebrütung benötigt wird. Die Entnahme junger Felchen in den 1960er-Jahren hat dazu geführt, dass es zu einer Verjüngung des Felchenbestandes bis in die 1980er-Jahre kam. In jüngerer Zeit hat der Felchenbestand wieder ein deutlich höheres mittleres Alter erreicht, so dass die Beeinflussung des Laichzeitpunktes durch die Jungfische zurückgeht.

9.4.4 Neusiedler See

Die Wasserbilanz des Neusiedler Sees reagiert sehr stark auf die klimatischen Verhältnisse und besitzt kaum Zuflüsse aus dem Grundwasser (Reitinger und Schmalfuß, 1993). Deswegen trocknete er in der Vergangenheit öfters aus (z.B. 1811) und es gab zahlreiche Höchststände mit Überflutungen (z.B. 1941) (ÖUGK, 1996). In den Jahren 1991 – 2004 wurde eine Zunahme der Lufttemperatur von 0,7°C und eine Abnahme des Niederschlags von 6% gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961 – 1990 registriert. Durch diese Temperaturzunahme erhöhte sich die Verdunstung. Bei gleichzeitiger Niederschlagsabnahme stieg die Wahrscheinlichkeit der Unterschreitung markanter

Seepegel. In den letzten Jahren stieg der Niederschlag an. Im Jahre 2010 verzeichnete der See sehr hohe Wasserstände.

Die Wassertemperaturen zeigten in den letzten Jahrzehnten einen stark steigenden Trend. Im Zeitraum 1976-2007 stiegen die mittleren jährlichen Wassertemperaturen um ca. 2°C. Dieser Anstieg war vor allem auf die Sommermonate zurückzuführen. Die Wassertemperaturen im Sommer stiegen im gleichen Zeitraum um 3°C an (Abbildung 9-2).

9.5 Situation in der Zukunft

9.5.1 Ergebnisse in der Literatur

Die themenmäßig umfangreichste Arbeit über den Einfluss des Klimawandels auf Seen und zugleich die umfassendste Literaturzusammenstellung findet sich in Glen (2010). In diesem Buch werden die Ergebnisse des EU-FP 5 Projekts "CLIME - Climate and Lake Impacts in Europe" zusammenfassend publiziert. Das primäre Ziel des Projekts war die Entwicklung von Modellen zur Simulation der Reaktion von Seen auf Klimaveränderungen. Dazu wurden intensive Literatur- und Datenrecherchen zu den Themenkomplexen Wärmehaushalt, Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorkreislauf, und der saisonalen Dynamik von Phytoplankton durchgeführt, sowie die Einflüsse des Klimas auf die Seen verschiedener Europäischer Seen durchgeführt. Wegen des Umfangs dieser Publikation wird hier nur näher auf das Kapitel 20 "The Impact of Climate Changes on Lakes in Central Europe" eingegangen, da hier auch auf Österreichische Seen Bezug genommen wird. Neben der Darstellung des generellen Temperaturtrends für die Bezugsperiode 1961-1990 wird auf die Bedeutung des Temperaturregimes für die Stabilität der Wasserschichtung und den Zeitpunkt des Eintreffens typischer Ereignisse (Eisbedeckung, Frühjahrsalgenblüte, Mixis) und deren Dauer sowie den Zusammenhang mit Wetterlagen besprochen. Nach einer Beschreibung allgemeiner Zusammenhänge zwischen chemischen und biologischen Effekten wird in der zusammenfassenden Diskussion auf Basis der IPCC Szenarien auf die zu erwartenden Situationen in den Seen eingegangen. Dabei wird die Verkürzung der Eisbedeckungszeiten sowie eine Zunahme der Wassertemperaturen um 4°C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwartet. Die Zunahme der Tiefenwassertemperaturen wird mit 0,1-0,2°C pro Jahrzehnt angegeben und auf die Bedeutung für den Nährstoff-turnover und die Sauerstoffsättigung hingewiesen.

9.5.2 Bodensee

Neben der Analyse von Messdaten wurde in KLIWA (2009) zur genaueren Untersuchung der Wassertemperaturentwicklung, der thermischen Schichtung und der winterlichen vertikalen Durchmischung des Bodensees unter veränderten klimatischen Bedingungen ein dreidimensionales hydrodynamisches Modell mit der Modellierungssoftware Delft3D Flow erstellt. Mit der Anpassung des Modells konnten die gemessenen langjährigen Wassertemperaturverläufe in guter Übereinstimmung abgebildet werden. Allerdings müssen die Vereinfachungen des Modells (feine Auflösung in höheren Schichten, gröbere Auflösung in den mittleren Schichten, Verfeinerung in den größten Tiefen, in Summe maximal 50 Schichten) bei der Interpretation beachtet werden: Durch die relativ grobe Rasterung des Modells können z.B. keine kleinskaligen Prozesse wie die Ausbreitung von Flusswasserfahnen dargestellt werden. Inputdaten in das Modell sind Windstärke und Windrichtung, Lufttemperaturen, relative Luftfeuchte, Wolkenbedeckung, Zuflussmengen und Temperatur der Zuflüsse. Wichtigster Parameter für die Modellanpassung war die Wassertemperatur.

Das Szenario „Lufttemperaturänderung um einen festen Betrag“ bestätigt die Erkenntnisse, die aus der Analyse der Messdaten gefunden wurden: relativ kleine Temperaturänderungen

wirken sich merklich auf die Tiefenwassererneuerung aus. Ein Abkühlungsszenario von -4°C liefert einige zusätzliche Zacken in der Temperaturkurve der Tiefenwässer, was auf zusätzliche vertikale Austauschvorgänge hinweist, wohingegen eine Erhöhung von $+1^{\circ}\text{C}$ die Austauschvorgänge reduziert (Abbildung 9-6).

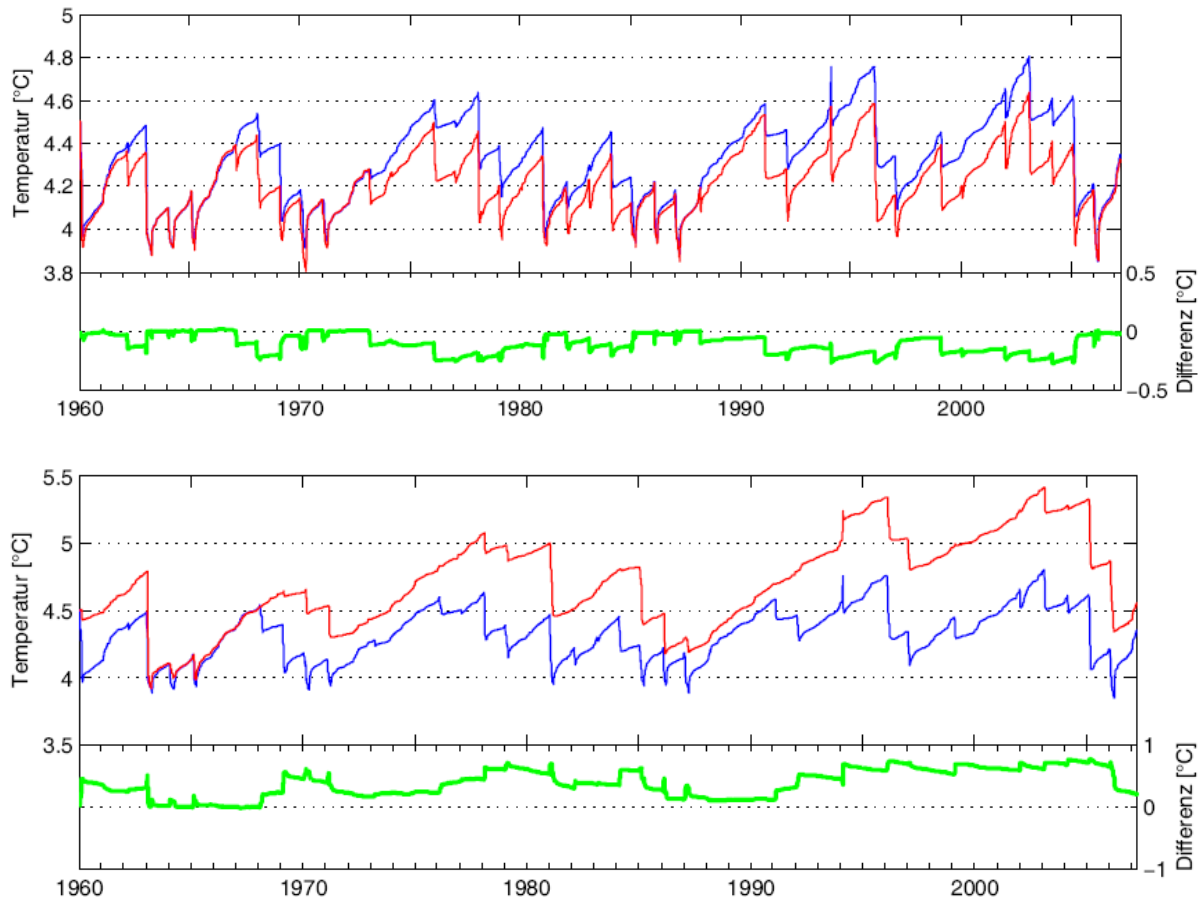


Abbildung 9-6: Oben: Abkühlungsszenario um -4°C . Unten: Erhöhungsszenario um $+1^{\circ}\text{C}$. Blau: Referenztemperatur, rot: Szenariotemperatur, grün: Differenz der Tiefentemperatur. Zacken in der Tiefentemperatur weisen auf einen vertikalen Austauschvorgang hin, im Erhöhungsszenario treten weniger dieser Zacken auf. Aus KLIWA (2009)

Im Szenario „Saisonale Änderung der Lufttemperaturen um einen festen Betrag“ werden jeweils die Temperaturen einer Saison, die jeweils drei Monate umfasst (DJF, MAM, JJA, SON), verändert. Es bestätigt sich wieder, dass sich ausschließlich Temperaturerhöhungsszenarien in der Wintersaison DJF auf die Temperaturverteilung und damit die vertikalen Austauschvorgänge im See auswirken. Die „Veränderung der Variabilität innerhalb der Temperaturzeitreihen“ zeigt hingegen keinen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im See.

Im Szenario „Windstärkeänderung um einen konstanten Faktor“ wird der Einfluss der Winde auf die vertikale Zirkulation untersucht. Stärkere Winde haben in dreifacher Weise Wirkung auf die winterliche Durchmischung des Sees: (a) Es findet eine stärkere Durchmischung der oberen Schichten im Sommerhalbjahr statt, wodurch sich auch die Tiefenwässer stärker erwärmen. Das fördert die winterliche Durchmischung. (b) Der See gibt bei stärkerem Wind im Winter mehr Wärme ab, was zu besseren Bedingungen für die winterliche Durchmischung führt. (c) Im Winter finden durch verstärkten Wind ein direkter Impulseintrag und damit eine stärkere Auskühlung statt. Verringerte Windstärken haben den gegenteiligen Effekt, sie reduzieren die winterlichen vertikalen Durchmischungsvorgänge.

Das Szenario „Saisonal variierende Windstärkeänderung“ hat, anders als die saisonalen Temperaturszenarien, eine größere Bandbreite an Auswirkungen. Stärkerer Wind im Quartal DJF hat dieselben Folgen wie zuvor beschrieben: Auskühlung der Oberfläche und Begünstigung der winterlichen vertikalen Durchmischung. Eine Erhöhung im Quartal MAM führt zu einer stärkeren Durchmischung, die durch die zu dieser Jahreszeit schwachen Schichtung begünstigt ist. Nachdem sich die obersten Schichten des Sees bereits erwärmen, wird ein erhöhter Wärmeeintrag in tiefe Schichten erreicht. In den Quartalen JJA und SON beschränkt sich die Wirkung stärkerer Winde nur auf die oberen Schichten.

Die „Änderung der Windrichtung“ in Richtung der Längsachse des Sees führt zu einer ganzjährig wirkenden erhöhten vertikalen Durchmischung und somit zu wärmeren Temperaturen im Tiefenwasser.

Die „Veränderung der relativen Luftfeuchte“ hat aufgrund des hohen Einflusses der Luftfeuchte auf die Verdunstung der Seeoberfläche insofern Wirkung, als geringere Feuchtwerte die Verdunstungsauskühlung erhöhen und gleichzeitig zu einer stärkeren effektiven langwelligen Rückstrahlung führen. Ähnliche Wirkung hat die „Veränderung der Wolkenbedeckung“, wobei eine Verminderung durch die zusätzliche Sonneneinstrahlung zu einer Erwärmung des Sees und im Gegenzug eine Erhöhung zu einer Abkühlung des Sees führen. Die Auswirkungen sind im Sommer stärker als im Winter und betreffen vorwiegend die oberen Wasserschichten.

9.5.3 Neusiedler See

Fazit: Szenarienrechnungen des Wasserhaushalts des Neusiedler Sees zeigen, dass erhöhte Lufttemperaturen und geringere mittlere Niederschläge zu deutlich geringeren Seewasserständen führen werden und die Wahrscheinlichkeit der Austrocknung erhöhen.

In der Studie (Eitzinger et al., 2005) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt des Neusiedler Sees untersucht. Für die Beurteilung der Auswirkung von Klimaänderungen wurden zwei Szenarien ausgewählt. Für die 2020er-Periode (Mittel 2010 – 2030) beträgt die Temperaturänderung 1,9°C, für die 2040er-Periode (Mittel 2030 – 2050) 2,5°C (Abbildung 9-7). Für den Niederschlag wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, indem die jährliche Niederschlagssumme um 5, 10 und 20 Prozent erhöht und verringert wurde. Hydrologische Randbedingungen wie Grundwasser, Zu- und Abfluss beeinflussen die Wasserbilanz des Sees zu nur 10 – 20%, sie werden klimaunabhängig angenommen und in der Sensitivitätsanalyse variiert. Durch den in den letzten 30 Jahren beobachteten Temperaturanstieg hat sich auch die Wassertemperatur des Sees kontinuierlich erhöht.

Die Szenarienrechnungen zum Wasserhaushalt unter veränderten meteorologischen Bedingungen zielen darauf ab, Randbedingungen zu finden, unter denen der See austrocknet. Mit Hilfe eines Wettergenerators wurden aus regionalisierten klimatischen Basisdaten Jahresreihen berechnet. Für jedes einzelne Klimaszenario wurden 500 Jahresreihen berechnet. Beispielhafte Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Bereits die Erwärmung der Lufttemperatur in der Periode 1991 – 2004 als Input in den Wettergenerator liefert für die Modellrechnungen verringerte Pegelstände im Vergleich mit der Periode 1961 – 1990, wie Abbildung 9-8 zeigt. Es treten gehäuft Jahre mit geringerem Wasserspiegel auf als im Vergleichsszenario 1961 – 1990.

Eine Sensitivitätsanalyse mit verändertem Niederschlag und den Temperaturen für die 2020er-Jahre zeigt deutliche Auswirkungen auf den Pegelstand des Neusiedler Sees. In Abbildung 9-9 sind die 2020er-Szenarien für veränderten Niederschlag dargestellt. Mit einer gleichzeitigen Zunahme des Niederschlags um ca. 5% kann der Seepegel am selben Niveau gehalten werden, wie er unter derzeitigen Bedingungen simuliert wird.

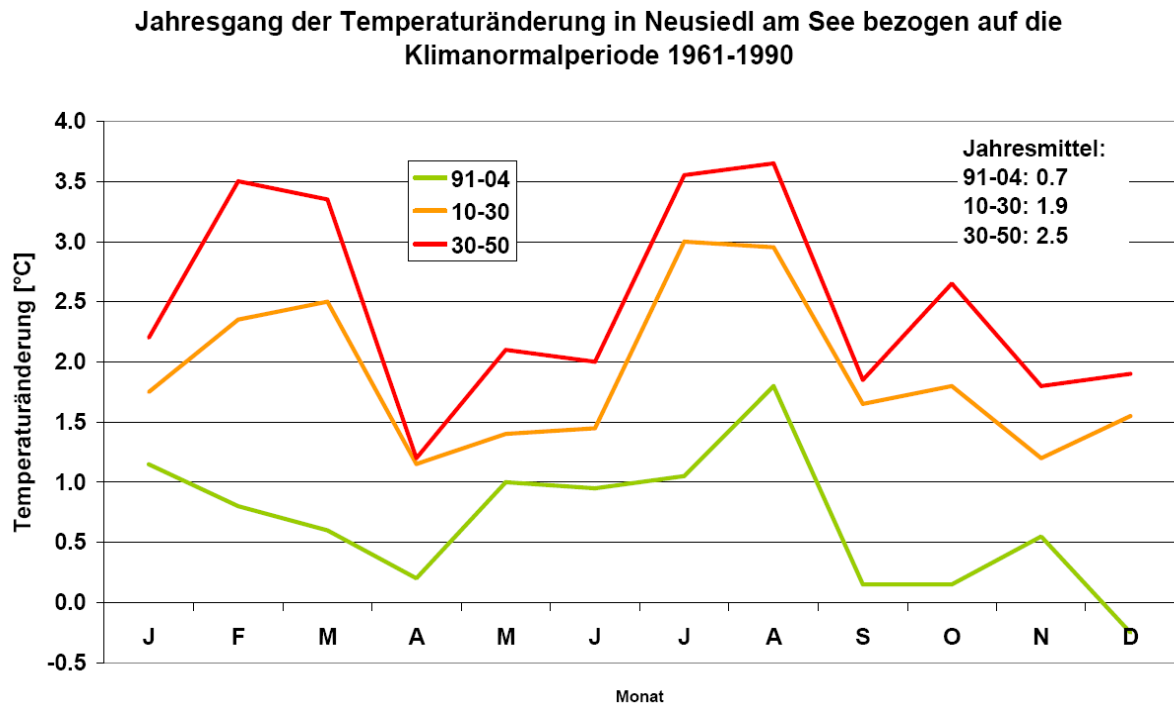


Abbildung 9-7: Änderungen der Monatsmitteltemperaturen in den Szenarien 2020er-Jahre und 2040er-Jahre.

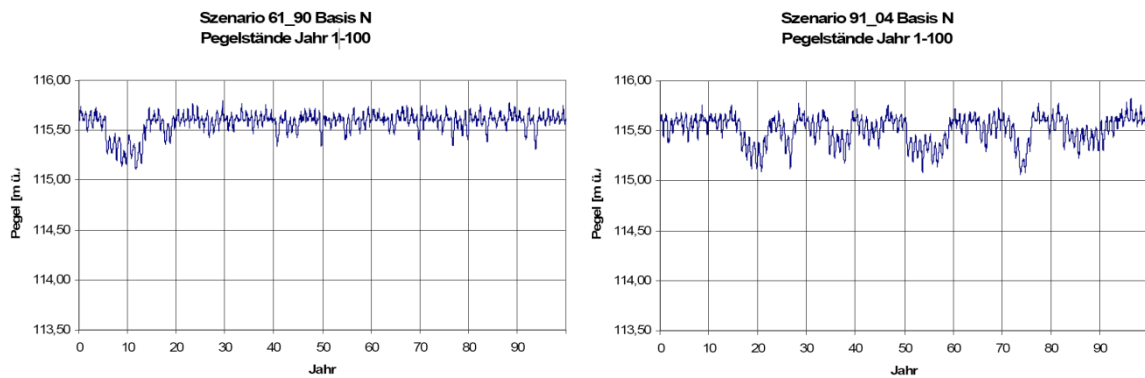


Abbildung 9-8: Szenario 1961 – 1990 (links) und Szenario 1991 – 2004 (rechts).

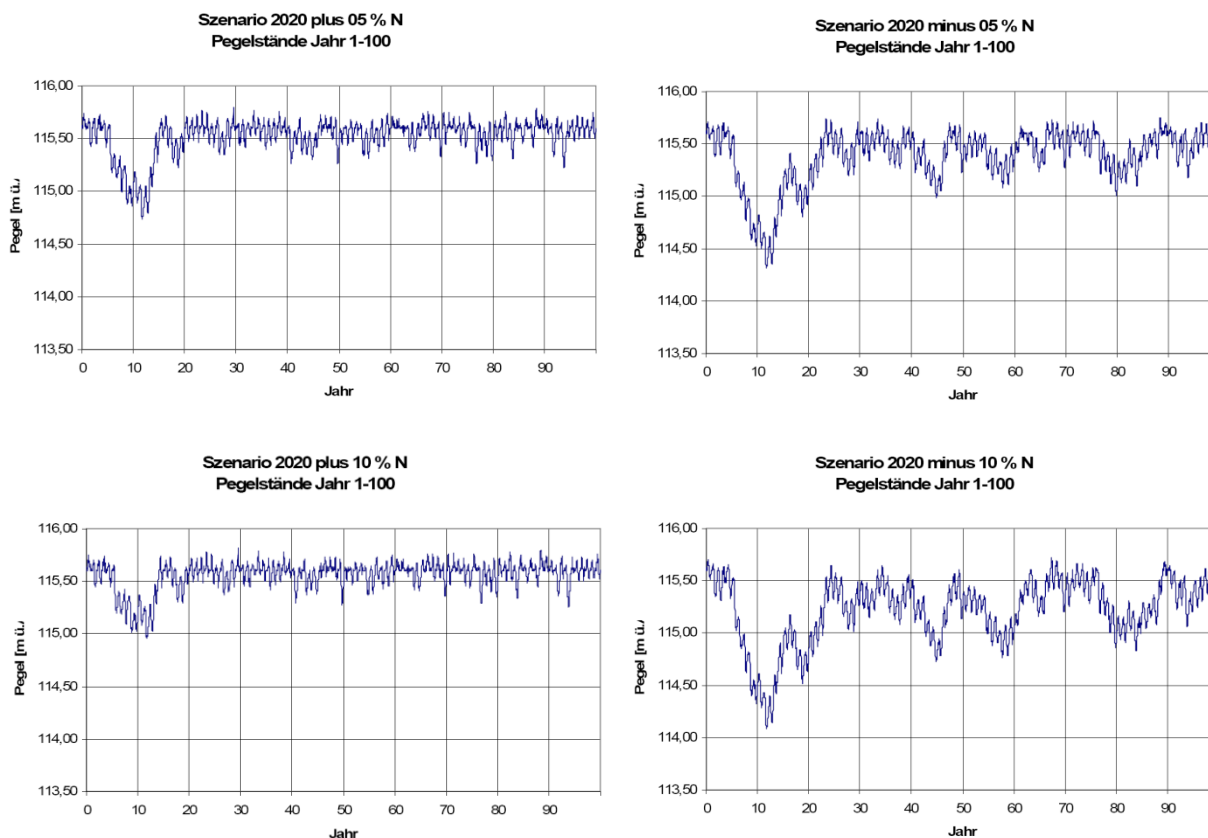


Abbildung 9-9: Szenario 2020er-Jahre mit Variation des Niederschlags und Auswirkung auf die Pegelstände.

Tabelle 9-1: Veränderungen einzelner Parameter unter veränderten Temperaturbedingungen in Bezug auf die Periode 1961 – 1990 bei gleich bleibenden Niederschlagsverhältnissen.

	1991 – 2004	2020er-Szenario	2040er-Szenario
Erhöhung der mittleren Temperatur	0,7°C	1,9°C	2,5°C
Erhöhung der Verdunstung	9,6%	18,3%	23,3%
Häufigkeit der Unterschreitung des Pegelstandes 115m	1,4%	5,8%	11,4%
Häufigkeit der Unterschreitung des Pegelstandes 114,5m	0%	0,6%	1,2%

Da unter den Klimaszenarien der 2020er und 2040er Periode eine Temperaturerhöhung zu verzeichnen ist, wird in den verwendeten Klimaszenarien ein höheres Verdunstungspotential wirksam, was zu einer noch größeren Sensibilität des Wasserstandes des Neusiedler Sees hinsichtlich künftiger Niederschlagsschwankungen führt. Schon in der Periode 1991-2004 gab es eine Jahresmitteltemperaturerhöhung von 0,7 °C und eine Abnahme des mittleren Jahresniederschlages von 6 % (ca. 40mm) im Vergleich zu 1961-1990. Unter diesen derzeitigen Klimabedingungen wird die kritische Wassermarke von 115,20 m über Adria im statistischen Mittel alle 12 Jahre unterschritten. Wie in Tabelle 9-1 gezeigt ist, steigt die Häufigkeit der Unterschreitung markanter Seepiegel mit der erwarteten Klimaerwärmung deutlich an. Auch eine geringe Abnahme des mittleren Niederschlages der Region von z.B. 5% hat eine signifikante Häufung von Niedrigwasserständen zur Folge die im seltener

auftretenden Extremfall bis zur Austrocknung führen würde. Ein Pegelstand von 114.5 m, was einer Fast-Austrocknung entspricht, würde beim derzeit herrschenden Klima (1991-2004) statistisch gesehen nicht auftreten, in der wärmeren 2020er Periode - bei gleich bleibendem Niederschlag wie in der Basisperiode 1961-1990 - alle 166 Jahre (0,6% Wahrscheinlichkeit) und in der 2040er Periode alle 83 Jahre (1,2% Wahrscheinlichkeit). Eine Verringerung des Niederschlages um 5% in den Klimaszenarien erhöht diese Wiederkehrwahrscheinlichkeit der Austrocknung auf 71 (2020er Periode) bzw. 25 (2040er Periode) Jahre.

Die Studie von Kubu (2006) befasst sich mit der für den See notwendigen Dotation, um die Austrocknung zu verhindern. Eine kontinuierliche Dotation von 1 m³/s kann demnach den See wirksam vor einer Austrocknung bewahren. Der Einfluss der Dotierungsmenge auf die Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Seepegeln ist in Abbildung 9-10 dargestellt.

Der Wasserhaushalt des Neusiedler Sees ist stark von steigenden Lufttemperaturen betroffen. Dadurch ist zu erwarten, dass die Verdunstung steigt. Falls der Niederschlag um 5% zunimmt, würde er die erhöhte Verdunstung ausgleichen. In Kapitel 4 dieses Berichtes ergibt das Szenario mit dem CLM Klimamodell (2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007) eine Erhöhung der Lufttemperatur um ca. 1°C und eine Zunahme des Niederschlages um ca. 5%. Unter diesen Voraussetzungen ist zu erwarten, dass der Seepegel annähernd gleich dem derzeitigen Zustand bleibt.

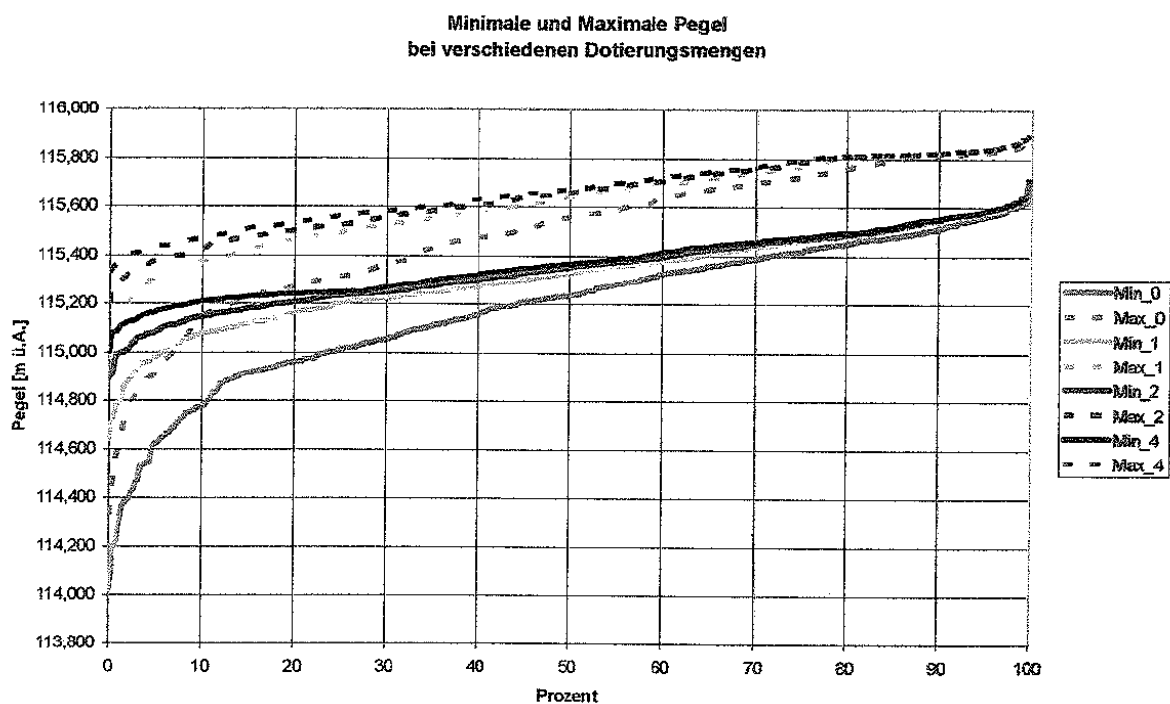


Abbildung 9-10: Einfluss der Dotierungsmenge (0, 1, 2, 4 m³/s) auf minimale und maximale Jahrespegel, Szenario 2040. Aus Kubu (2006)

10. Wasserkraft

10.1 Kurzfassung

Situation in der Vergangenheit

- Derzeit ist der Erzeugungsschwerpunkt der Wasserkraft für Gesamtösterreich in den Sommermonaten, der Verbrauchsschwerpunkt der elektrischen Energie in den Wintermonaten (*harte Aussage*).
- In den letzten Jahrzehnten hat sich die saisonale Wasserführung der Donau (und damit das Wasserkraftpotential) etwas verschoben mit einer leichten Aufhöhung in den Wintermonaten und einer leichten Reduktion in den Sommermonaten, wodurch die Differenz zwischen Sommer und Winter etwas geringer geworden ist.

Situation in der Zukunft

- Die Änderungen des mittleren jährlichen theoretischen Wasserkraftpotenzials 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 sind vermutlich kleiner als +/-5% (*mittelharte Aussage*).
- In ganz Österreich mit Ausnahme des Südens ist eine Erhöhung des Wasserkraftpotenzials im Winter um ca. 20% zu erwarten (*mittelharte Aussage*).
- Im Osten (Flachland) ist möglicherweise eine Abnahme des Wasserkraftpotenzials im Frühjahr und im Westen (Alpen) eine Abnahme des Wasserkraftpotenzials im Sommer um jeweils ca. 10-20% zu erwarten (*weiche Aussage*).
- Werden die Kennlinien der Erzeugung elektrischer Energie in Abhängigkeit vom Durchfluss ausgewählter Donaukraftwerke als repräsentativ für Österreich angesehen, so wird für das gesamte Jahr eine Zunahme der Leistung um 0,5% bis 2,5% abgeschätzt (2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006) (*weiche Aussage*).
- Die Leistung der Laufkraftwerke dürfte im Winter zunehmen und sich im Sommer wenig verändern. Dadurch ergibt sich eine bessere Anpassung an den Verbrauch (*mittelharte Aussage*).

Anpassungsmaßnahmen

- Wegen der zu erwartenden eher günstigen Effekte des Klimawandels auf das Wasserkraftpotential wird kein Handlungsbedarf zufolge Klimaänderung gesehen.

10.2 Vorgangsweise

Ziel dieser Untersuchung ist die Beurteilung von Klimaauswirkungen auf das Wasserkraftpotential österreichischer Fließgewässer. Hierbei liegt die Bestimmung des theoretischen Potenzials in österreichischen Fließgewässern, bestimmt durch die verfügbare Durchflussmenge und die Höhendifferenz entlang der Gewässerstrecke, im Mittelpunkt der Auswertungen. Unterschiede zum tatsächlich verfügbaren Potenzial, welches weiterhin durch den Wirkungsgrad der Kraftwerke und technische, ökologische, wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen limitiert ist, werden diskutiert.

Methodisch erfolgt die Beurteilung von Klimaauswirkungen auf das Wasserkraftpotential österreichischer Fließgewässer auf Basis von Szenarienanalysen der Durchflussentwicklung. Eine detaillierte Analyse der Klimaauswirkungen auf die Durchflussentwicklung ist im Berichtsteil zu Kapitel 4 „Wasserdargebot Oberflächenwasser“ dargestellt.

Neben Auswertung der Literatur gliedert sich die Untersuchung in zwei Schritte. In einem ersten Schritt erfolgt die Ermittlung der räumlichen Verteilung des Wasserkraftpotenzials für

den Ist-Zustand, d.h. die räumliche Verteilung des Wasserkraftpotenzials für die Periode 1976-2006. Dies ist notwendig, um Klimaauswirkungen auf die Entwicklung des Wasserkraftpotenzials österreichischer Fließgewässer räumlich differenziert beurteilen zu können. In einem zweiten Schritt wurde aufbauend auf den Analysen der Klimaauswirkungen auf die Durchflussentwicklung (Kapitel 4) die Entwicklung des Wasserkraftpotenzials für die Periode 2021-2050 analysiert. Abschließend werden anhand ausgewählter Kraftwerke die Änderungen in der erzeugbaren Energie in Abhängigkeit vom Ausbaugrad der Kraftwerke diskutiert.

10.3 Situation in der Vergangenheit

10.3.1 Ergebnisse aus der Literatur

Die Studie Pöyry (2008) wurde im Auftrag von VEÖ, BMWA, E-Control, Kleinwasserkraftwerk Österreich und VÖEW durchgeführt. Ziel dieser Studie ist a) die Aktualisierung des Abflusslinienpotenzials nach Schiller (1982) unter Verwendung eines aktualisierten Datensatzes von Abflussdaten der Periode 1961-2000, b) die Erhebung und Analyse des Kraftwerkbestandes für Anlagen mit einer Engpassleistung ≥ 10 MW und c) die Ermittlung des technisch-wirtschaftlichen Gesamt- und Restpotenzials, d.h. des Potenzials, das bei Betrachtung ausschließlich technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen in Österreich realisierbar wäre.

Die Pöyry Studie ermittelt ein Abflusslinienpotenzial für Österreich von 75000 GWh/a. Dies entspricht 99% des in der Studie von Schiller (1982) ermittelten Potenzials. Hierbei wurde von einem pauschalen Kraftwerkswirkungsgrad von 0,87 ausgegangen. Ebenso wurden in dieser Studie alle Seitenbäche mit einem Mittelwasserdurchfluss von weniger als $1\text{ m}^3/\text{s}$ bei der Mündung in den Hauptfluss vernachlässigt.

10.3.2 Bestimmung des Ist-Zustandes für Österreich

In dieser Studie werden die Auswirkungen der Klimaentwicklung auf das Wasserkraftpotenzial in österreichischen Gewässern untersucht, d.h. die Entwicklung der potenziellen Energie des Abflusses im Gewässerlauf. Das tatsächlich verfügbare Potenzial, bzw. das tatsächlich nutzbare Potenzial ist weiterhin durch den Wirkungsgrad der Kraftwerke und technische, ökologische, wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen limitiert.

Das Wasserkraftpotenzial errechnet sich somit aus

$$P = Q \cdot g \cdot \rho \cdot \Delta h$$

wobei P das Potenzial, Q der Durchfluss, g die Erdbeschleunigung, ρ die Dichte des Wassers und Δh die Höhendifferenz entlang der Flussstrecke ist.

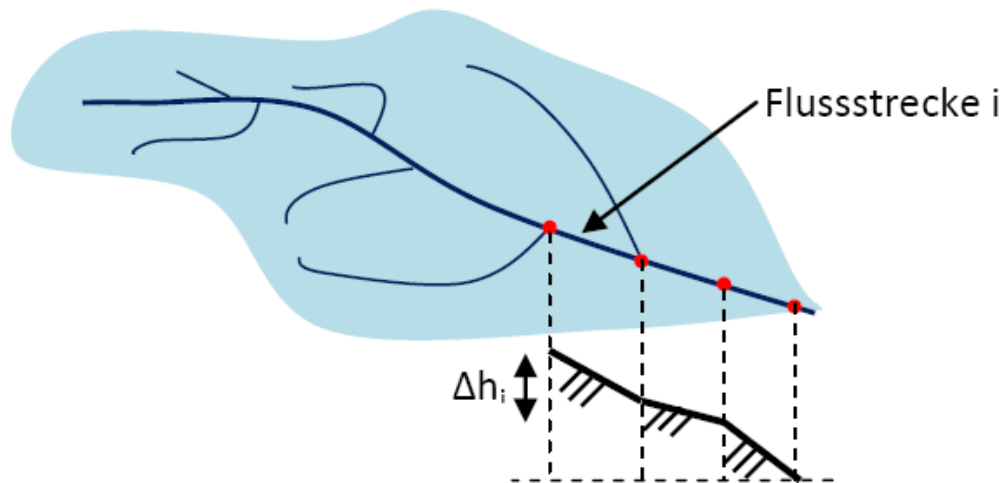
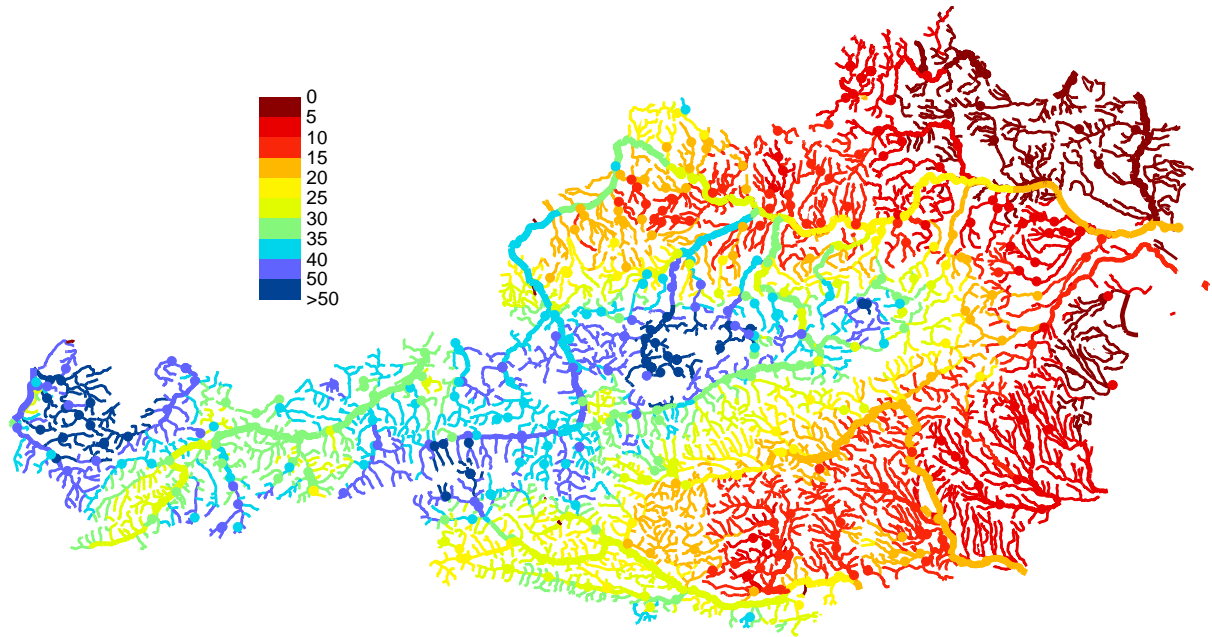
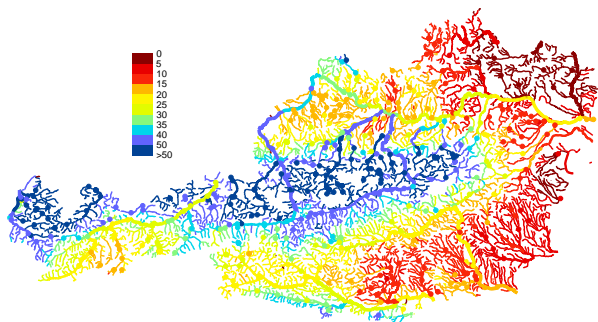


Abbildung 10-1: Abflusslinienpotenzial (nach Weiss & Faeh, 1990)

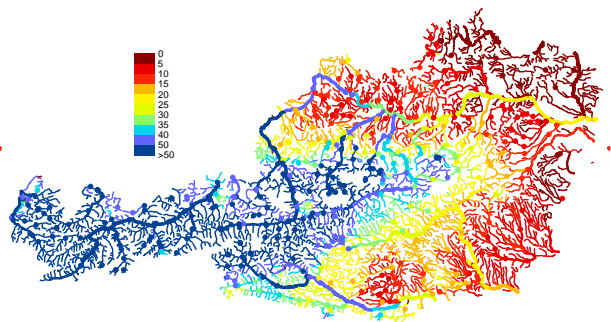
Die Ermittlung der räumlichen Verteilung des Wasserkraftpotenzials erfolgte auf Basis der täglich beobachteten Abflüsse in der Periode 1976-2006 an etwa 500 Pegeln in Österreich. Für die Pegelreihen wurden mittlere Abflüsse ermittelt und räumlich interpoliert. Dafür wurde die Top-Kriging Methode angewandt (Skøien et al., 2006), die sich im Vergleich mit anderen Regionalisierungsmethoden für Österreich am geeignetsten erwies. Abbildung 10-2 oben zeigt die räumliche Verteilung der beobachteten mittleren Abflussspenden für den Zeitraum 1976-2006. Zusätzlich sind die Vierteljahresabflüsse dargestellt. Vierteljahre sind wie folgt definiert: Frühjahr: März, April, Mai; Sommer: Juni, Juli, August; Herbst: September, Oktober, November; Winter: Dezember, Januar, Februar. Die Pegelwerte (Punkte) wurden durch Regionalisierung auf das gesamte Gewässernetz (Linien) übertragen. Abflussdaten, die stark durch anthropogene Maßnahmen beeinflusst sind, wurden von den Untersuchungen ausgeschlossen. Beeinflussungen der Abflussmessstellen sind im Kapitel 5 - „Niederwasser – Menge“ näher besprochen.



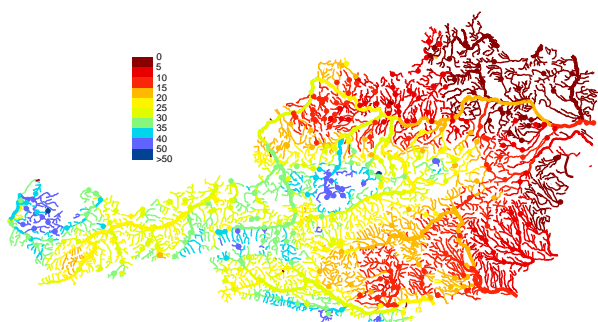
Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Jahr



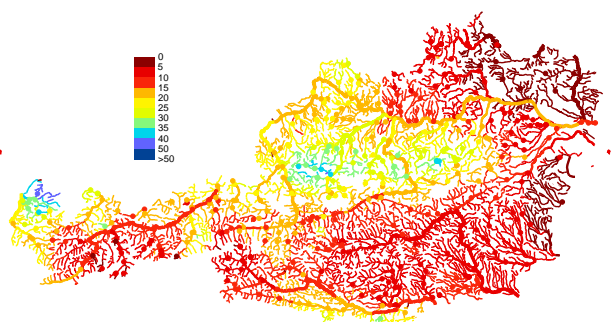
Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Frühjahr



Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Sommer



Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Herbst



Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Winter

Abbildung 10-2: Räumliche Verteilung der beobachteten mittleren Abflussspenden in l/s/km² für den Zeitraum 1976-2006 sowie Vierteljahresabflüsse.

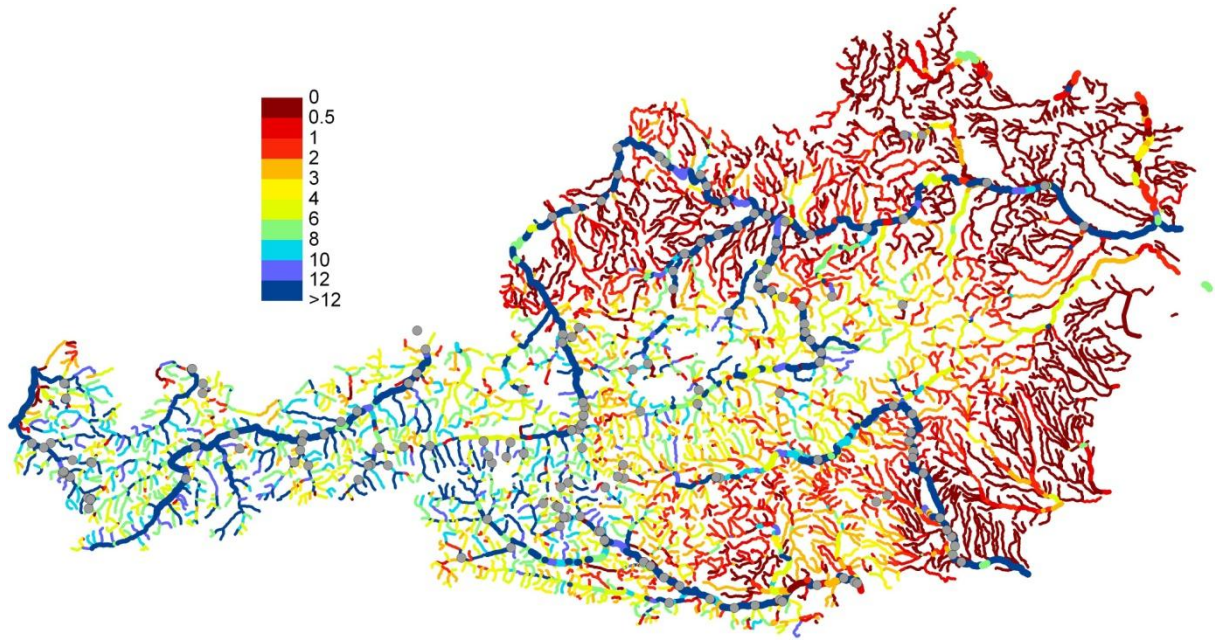
Für jeden Gewässerabschnitt wurde die Höhendifferenz zwischen Beginn und Ende des Gewässerabschnittes aus einem digitalen Geländemodell mit einer Rasterweite von 10m ermittelt und auf Basis der interpolierten Abflüsse das Wasserkraftpotenzial ermittelt. Abbildung 10-3 zeigt die räumliche Verteilung des Wasserkraftpotenzials für die Periode 1976-2006. Es zeigen sich deutliche räumliche Unterschiede mit einem großen

Wasserkraftpotenzial im alpinen Bereich und entlang der Donau. In den flacheren Gebietsteilen Österreichs ist aufgrund der geringeren Höhendifferenz entlang des Gewässerlaufes das Wasserkraftpotenzial kleiner. Zur einer ersten Einschätzung der räumlichen Verteilung des nutzbaren Wasserkraftpotenzials wurde bestehen Wasserkraftanlagen nach HAÖ Karte 9.1 als graue Punkte eingezeichnet. Eine Aufteilung des Wasserkraftpotenzials nach Flussgebieten ist in Abbildung 10-4 zu sehen.

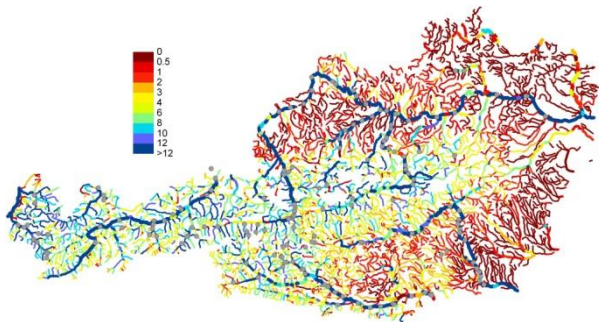
Für Österreich ergibt sich aus dieser Analyse ein Wasserkraftpotenzial von etwa 166000GWh/a. Berücksichtigt man einen pauschalen Kraftwerkwirkungsgrad von 0,87 so reduziert sich das Wasserkraftpotenzial zu 144000 GWh/a. Werden in dieser Analyse ähnlich der Pöyry Studie alle Seitenbäche, deren Durchflussmenge bei der Mündung in einen Hauptfluss kleiner als $1\text{m}^3/\text{s}$ ist, vernachlässigt, so ergibt sich ein Potenzial von 136000GWh/a und unter Berücksichtigung eines Kraftwerkwirkungsgrad von 0,87 ein Potenzial von 118000 GWh/a. Im Vergleich zur Pöyry Studie (2008) ist das hier ermittelte Potenzial größer. In der Pöyry Studie wird für Österreich ein Wasserkraftpotenzial von 86000 GWh/a ausgewiesen.

Die Unterschiede dürften auf folgende Gründe zurückzuführen sein:

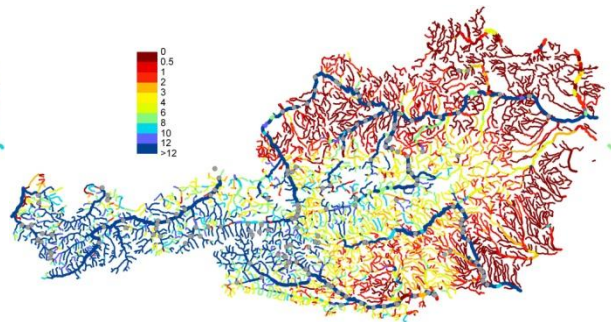
- Die Studie von Pöyry errechnet das Wasserkraftpotenzial für die Periode 1961-2000, während in dieser Studie das Potenzial für den Zeitraum 1976-2006 ermittelt wurde.
- Seitenbäche, deren Durchflussmenge bei der Mündung in einen Hauptfluss kleiner als $1\text{m}^3/\text{s}$ ist, werden in der Pöyry Studie nicht zur Berechnung des Wasserkraftpotenzials herangezogen. Auch werden in der Pöyry Studie das Wasserkraftpotenzial der Flussgebiete von Raab und Rabnitz nicht berücksichtigt
- In der Studie von Pöyry wurde das Potential von Zuflüssen zu den acht Hauptflüssen Österreichs durch eine einfache Dreiecksformel berechnet, d.h. das Potential wurde nur aus Durchfluss an der Mündung und der Fallhöhendifferenz zwischen Gerinneanfang und Mündung berechnet. Dies entspricht der Annahme, dass der Durchfluss im Gerinne linear mit der Höhendifferenz zunimmt. Es wurde in der Pöyry Studie darauf hingewiesen, dass sich in manchen Seitentälern, bei exakter Berücksichtigung des hydrologischen und topographischen Längenschnittes, wie es in dieser Studie ausgeführt wurde, signifikante Abweichungen von diesen Schätzwerten ergeben können.
- Die hier vorliegende Studie berechnet das Wasserkraftpotenzial für das im HAÖ vorliegende Gewässernetz. In der Pöyry Studie wurde als Gewässeranfang, jener Gewässerabschnitt definiert, der einen Mittelwasserdurchfluss größer $0,05\text{ m}^3/\text{s}$ aufweist. Hierdurch ergeben sich Unterschiede zu dem in dieser Studie verwendeten Gewässernetz.



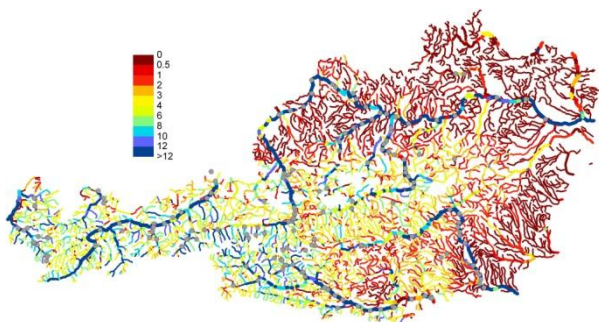
Mittleres Wasserkraftpotenzial 1976-2006 – Jahr



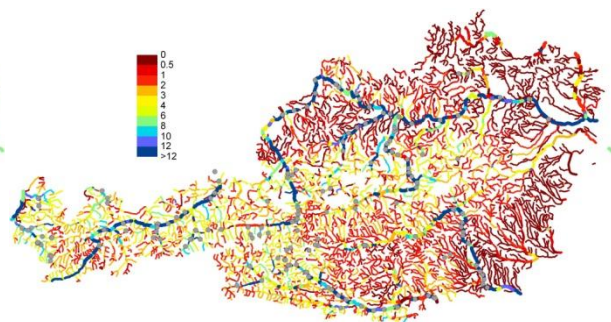
Mit. Wasserkraftpot. 1976-2006 – Frühjahr



Mit. Wasserkraftpot. 1976-2006 – Sommer



Mit. Wasserkraftpot. 1976-2006 – Herbst



Mit. Wasserkraftpot. 1976-2006 – Winter

Abbildung 10-3: Räumliche Verteilung des mittleren jährlichen Wasserkraftpotenzials in GWh/a/km für die Periode 1976-2006 sowie Vierteljahrespotenziale.

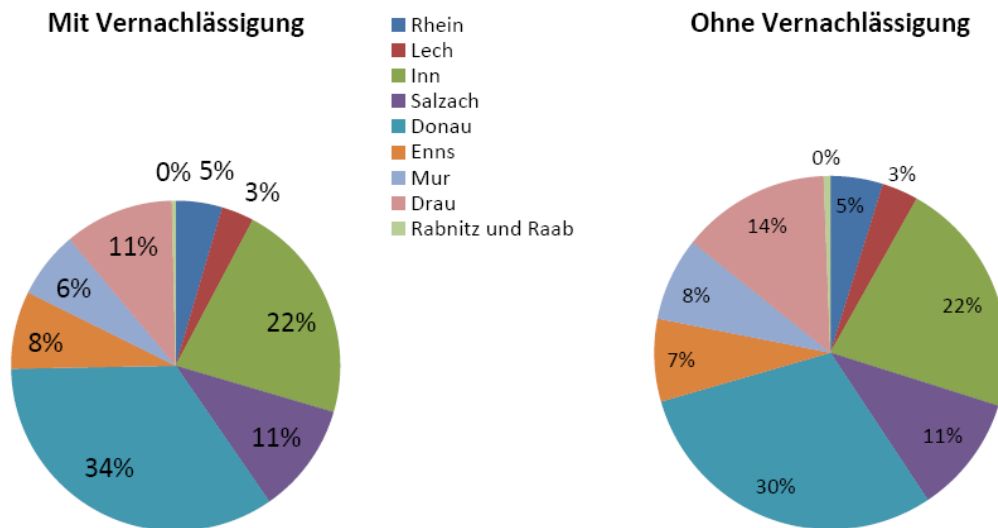


Abbildung 10-4: Räumliche Verteilung des Wasserkraftpotenzials mit und ohne Vernachlässigung kleiner Seitenbäche ($Q < 1 \text{ m}^3/\text{s}$)

Die Verteilung des mittleren Potenzials im Laufe des Jahres ist in Abbildung 10-5 dargestellt. Etwa 38% des Wasserkraftpotenzials ist im Sommer verfügbar, im Winter hingegen nur etwa 14%. In Abbildung 10-6 ist die monatliche Verteilung des Wasserkraftpotenzials in Österreich dargestellt. Der höchste Wert tritt im Juni auf (ca. 22 500 GWh). Das Minimum tritt im Jänner auf und ist ungefähr drei Mal kleiner, (ca. 7 000 GWh). Es gibt zwar regionale Unterschiede in der saisonalen Verteilung. Alle für Wasserkraftnutzung wichtigen Gewässer in Österreich sind jedoch durch den Abfluss aus den alpinen Bereichen dominiert, mit einem deutlichen saisonalen Regime von niederen Abflüssen im Winter und hohen Abflüssen im Sommer. Dem entgegengesetzt steht die saisonale Verteilung des Inlandstromverbrauchs 2009 ermittelt durch E-Control (Abbildung 10-7). Aufgrund des Heizaufwandes erreicht der Stromverbrauch seinen Höhepunkt im Winter.

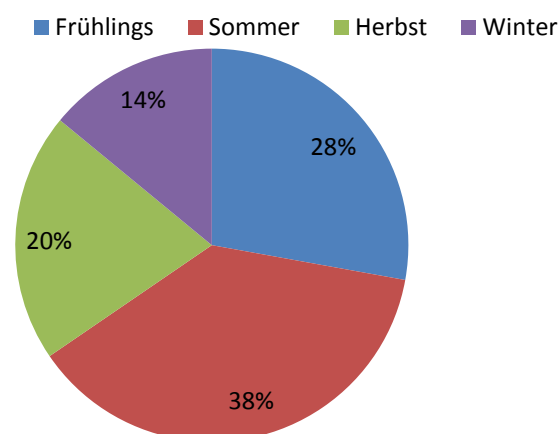


Abbildung 10-5: Saisonale Verteilung des Wasserkraftpotenzials in Österreich.

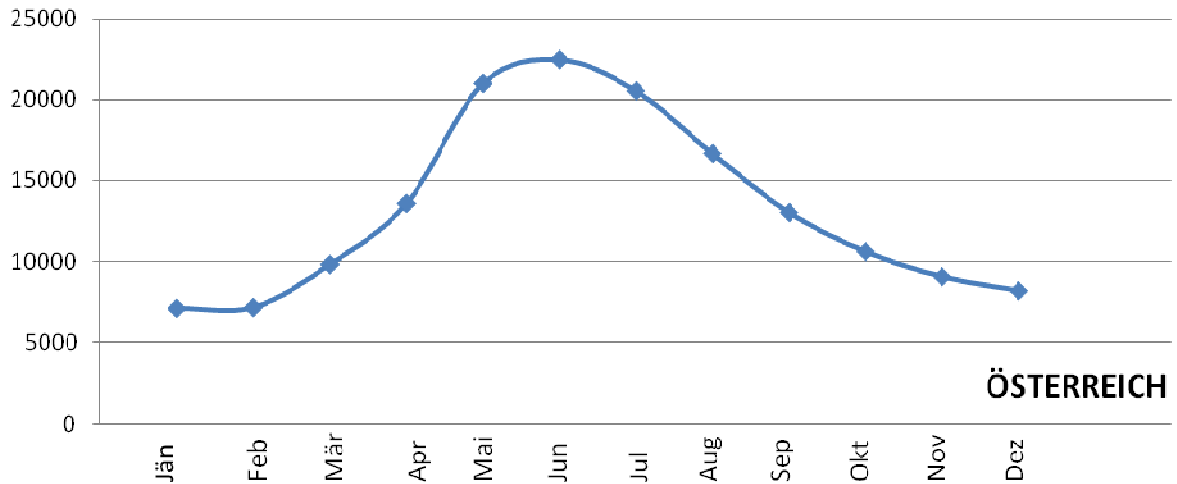


Abbildung 10-6: Monatliche Verteilung des Potenzials in Österreich (GWh)

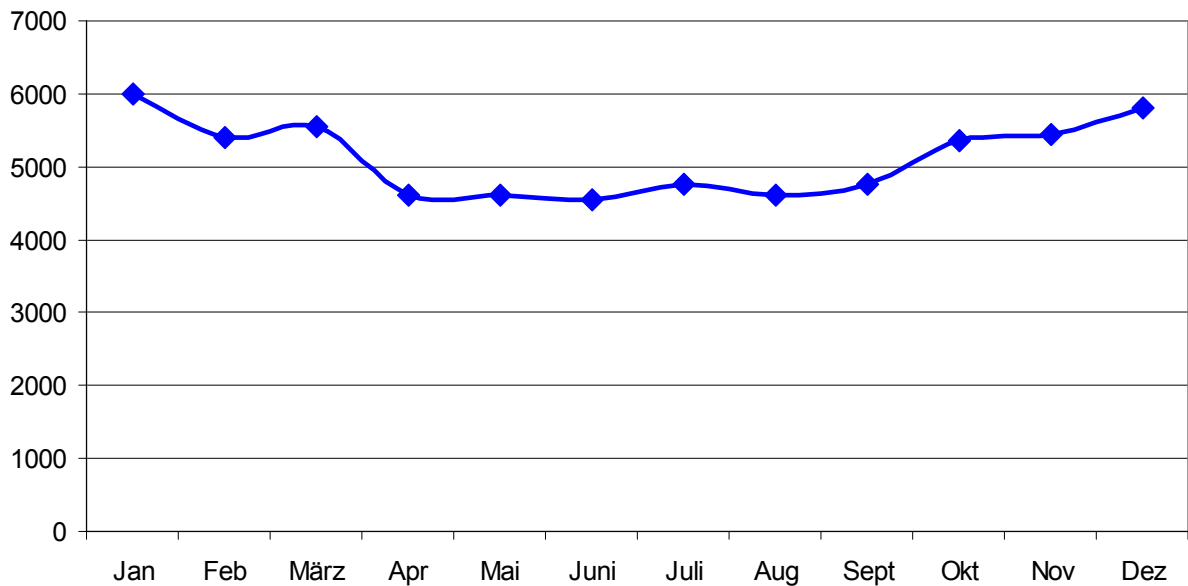


Abbildung 10-7: Inlandstromverbrauch für das Jahr 2009 (nach E-Control) (GWh)

10.3.3 Trendauswertungen in Österreich

Derzeit ist der Erzeugungsschwerpunkt der Wasserkraft für Gesamtösterreich in den Sommermonaten, der Verbrauchsschwerpunkt der elektrischen Energie in den Wintermonaten. In den letzten Jahrzehnten hat sich die saisonale Wasserführung der Donau (und damit das Wasserkraftpotential) etwas verschoben mit einer leichten Aufhöhung in den Wintermonaten und einer leichten Reduktion in den Sommermonaten, wodurch die Differenz zwischen Sommer und Winter etwas geringer geworden ist (siehe Kapitel 4).

10.4 Situation in der Zukunft

10.4.1 Ergebnisse aus der Literatur

Das Ziel der Studie *Klimaänderung und Wasserkraftnutzung, Schweiz* (NWB, 2009) war es, eine umfassende Übersicht über den aktuellen Wissensstand zum Zusammenhang zwischen der Klimaänderung und der Wasserkraftnutzung in der Schweiz zu erarbeiten. Die inhaltliche Auswertung der Literatur zeigt, dass man im Jahr 2000 – in der damals gängigen Erwartung einer generellen Zunahme des Niederschlags in der Schweiz – als Folge der Klimaänderung noch von einer Zunahme des hydroelektrischen Potenzials ausging. Wenige Jahre später wurde auf der Basis einer neueren Generation von globalen und regionalen Klimamodellen für die Schweiz erstmals eine Niederschlagsabnahme ermittelt und darauf aufbauend ein reduziertes hydraulisches Potenzial von etwa 7% errechnet.

Inzwischen kommen mehrere Studien übereinstimmend zum Schluss, dass die Wasserkraftwerke mit einem veränderten und reduzierten Wasserdargebot rechnen müssen. Die stärksten Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse werden in der Schweiz für alpine Einzugsgebiete in mittleren bis höheren Lagen vorausgesagt. Dabei handelt es sich um Einzugsgebiete, in denen die Schnee- und Gletscherschmelze heute einen hohen Anteil am gesamten Abfluss ausmacht. Weil sich durch die Klimaänderung sowohl die Form (tendenziell mehr Regen und weniger Schnee) als auch die Saisonalität und Menge des Niederschlags (tendenzielle Zunahme im Winter, tendenzielle Abnahme im Sommer) maßgeblich verändern dürfte, wird von einem jahreszeitlichen Ausgleich des Abflussregimes ausgegangen. Obwohl damit auch mehr Flexibilität für die Kraftwerksbetreiber prognostiziert wird, muss sowohl bei Speicher- als auch bei Laufkraftwerken langfristig mit Produktionseinbußen gerechnet werden.

10.4.2 Szenarienrechnung

Zur Einschätzung möglicher Auswirkungen geänderter klimatischer Bedingungen auf das Abflussregime wurden Niederschlag-Abflusssimulationen mit dem Delta-Change Ansatz durchgeführt. Die Vorgangsweise bestand aus den folgenden Schritten (eine detaillierte Beschreibung der Methode ist im Berichtsteil 4 - „Wasserdargebot Oberflächenwasser“ zu finden):

(a) Datenaufbereitung: Aufbereitung von Abflussdaten, Gebietsniederschlägen und Lufttemperaturen der Periode 1976-2006 für etwa 500 Gebiete in Österreich.

(b) Niederschlag-Abflussmodell: Für die Gebiete wurde ein höhenzontiertes Niederschlag-Abfluss Modell aufgestellt. Es handelt sich um ein kontinuierliches konzeptionelles Modell, dass die Verdunstung als Funktion der Bodenfeuchte, den Bodenwasserhaushalt und andere Abflussprozesse sowie Schneeprozesse simuliert. Die Parameter des Modells wurden an den Abflussdaten der Pegel geeicht. Das Modell wurde in Hinblick auf die Größe und die saisonale Verteilung des Abflusses ausführlich getestet. Das Modell und die Vorgangsweise bei der Eichung und Modellvalidierung sind im Detail in Parajka et al. (2005, 2006, 2007) dargestellt.

(c) Delta-Change Ansatz: Die folgende Vorgangsweise wurde gewählt. Die Klimasimulationen für den Zeitraum 2021-2050 wurden verglichen mit den Klimasimulationen 1976-2006. Die Differenzen der mittleren monatlichen Lufttemperaturen zwischen den beiden Zeiträumen wurden ausgewertet (Abbildung 4-25). Die Differenzen unterscheiden sich nach Monat und räumlich. In analoger Weise wurden die prozentuellen Veränderungen der mittleren monatlichen Niederschläge zwischen den beiden Zeiträumen ausgewertet. Nun wurden zwei Simulationen mit dem Niederschlag-Abflussmodell durchgeführt:

- Referenzsimulationen mit den beobachteten Niederschlags- und Lufttemperaturdaten für den Zeitraum 1976-2006.

- Szenariosimulationen mit den beobachteten Niederschlags- und Lufttemperaturdaten für den Zeitraum 1976-2006, die um die in Abbildung 4-25 dargestellten Differenzen geändert wurden. Diese Änderung war je nach Gebiet und Monat unterschiedlich, es wurde aber für den gesamten Zeitraum 1976-2006 die gleiche Änderung angebracht. Die beobachteten Lufttemperaturen wurden durchwegs erhöht (um 0,2°C bis 2°C, je nach Monat und Einzugsgebiet). Die beobachteten Niederschläge wurden mit einem Prozentsatz multipliziert, der in den Wintermonaten im Norden Österreichs meist positiv war (etwa 5-20%), und in den anderen Monaten bzw. Gebieten Österreichs entweder positiv oder negativ war. Die Szenariosimulationen wurden mit den Referenzsimulationen verglichen, um die Änderung im Abfluss zufolge Änderungen in der Lufttemperatur und im Niederschlag auszuwerten.

(d) Regionalisierung: In einem letzten Schritt wurden die Referenzsimulationen und Szenariosimulationen an den Pegeln auf das gesamte Gewässernetz Österreichs übertragen. Dafür wurde die Top-Kriging Methode angewandt (Skøien et al., 2006).

(e) Umrechnung der ermittelten Abflüsse in Wasserkraftpotenziale: Auf Basis der ermittelten Abflüsse und Höhendifferenzen wurde für jeden Gewässerabschnitt das Wasserkraftpotenzial ermittelt.

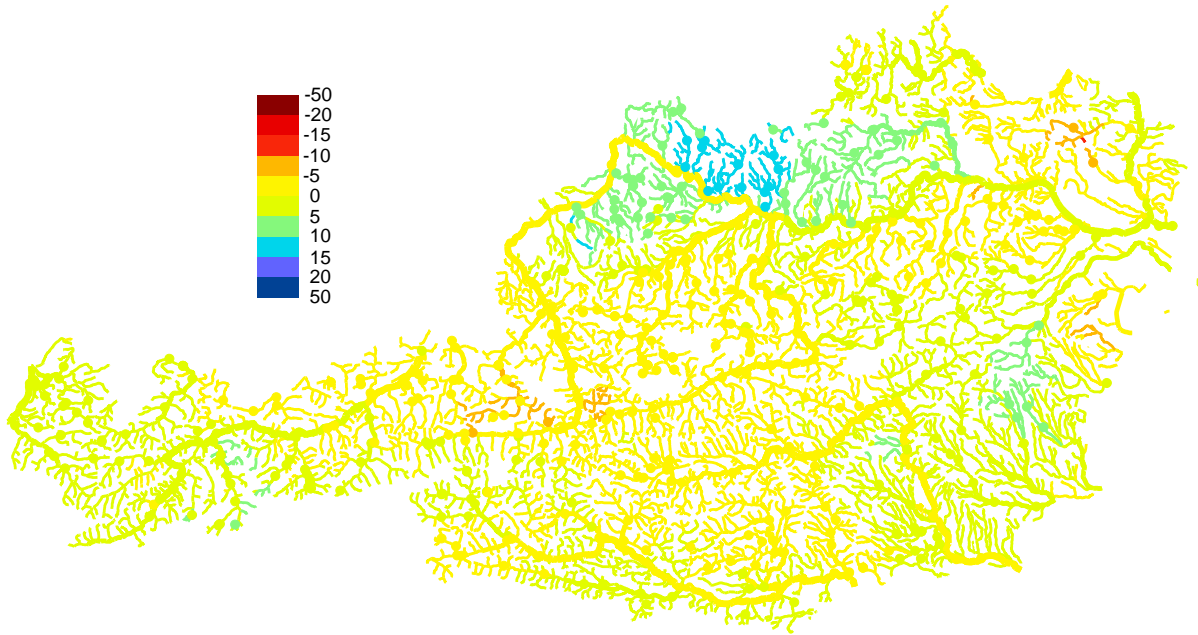
10.4.3 Auswertungen in Österreich

Abbildung 10-8 zeigt die Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Insgesamt sind die berechneten Änderungen des mittleren jährlichen Abflusses klein. Im Mühlviertel wird eine Zunahme von bis zu 10% berechnet. Diese ist auf die durch das Klimamodell simulierten größeren Niederschläge im Mühlviertel zurückzuführen (Abbildung 4-25 links unten). Im Südosten Österreichs berechnet das Verfahren einen kleinen Bereich mit einer Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses von bis zu 6%. Im Weinviertel wird eine etwas größere Abnahme von bis zu 8% berechnet. Im restlichen Bundesgebiet sind die berechneten Änderungen kleiner als 5%.

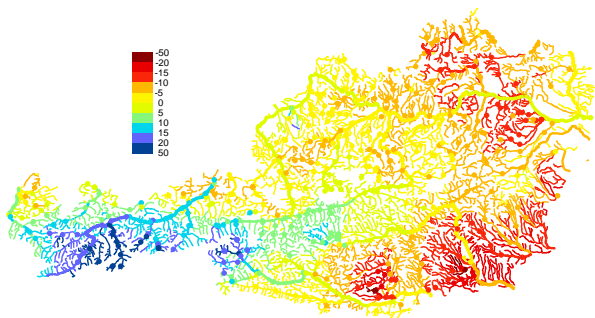
Die saisonalen Änderungen sind größer. Eine Erhöhung der Winterabflüsse um ca. 20% in ganz Österreich wird berechnet, mit Ausnahme des Südens. Weiters berechnet das Modell eine Abnahme des Frühjahrsabflusses im Osten (Flachland), und eine Abnahme des Sommerabflusses im Westen (Alpen) um ca. 10-20%.

In Abbildung 10-9 sind die Änderungen des Wasserkraftpotenzials für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 dargestellt. Aufgrund der geringen Änderung der Abflüsse zwischen den beiden Perioden sind auch die berechneten Änderungen im Wasserkraftpotenzial klein. Da die raum-zeitliche Verteilung des Wasserkraftpotenzials nur von der Variabilität des Abflusses und der entsprechenden Höhendifferenz der Gewässerabschnitte abhängt, sind die räumlichen Muster von Abflussänderung und Änderung im Wasserkraftpotenzial gleich, mit einer Zunahme im Wasserkraftpotenzial im Mühlviertel von etwa 10%. Für die meisten Gewässerabschnitte wurden Änderungen im Wasserkraftpotenzial kleiner als 5% ausgewiesen. Insgesamt wurde für Österreich eine Zunahme des Wasserkraftpotenzials kleiner 1% ermittelt.

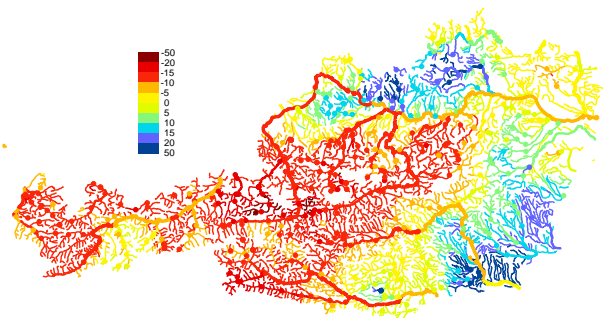
Entsprechend dem Abfluss sind die saisonalen Änderungen größer. Im Sommer ist im Westen eine Abnahme des Potenzials um mehr als 10% zu erwarten, während im Winter eine Potenzialerhöhung um etwa 15-20% berechnet wird. Die Änderungen der jahreszeitlichen Verteilung des Wasserkraftpotenzials sind in Abbildung 10-10 dargestellt.



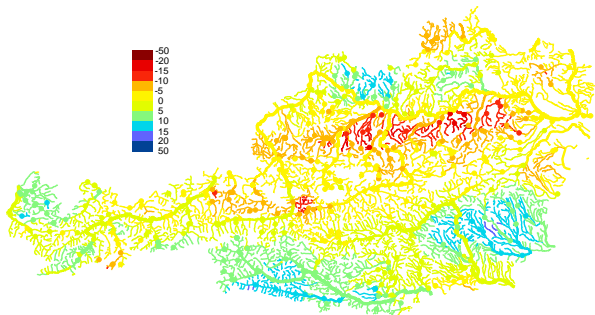
Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Jahr



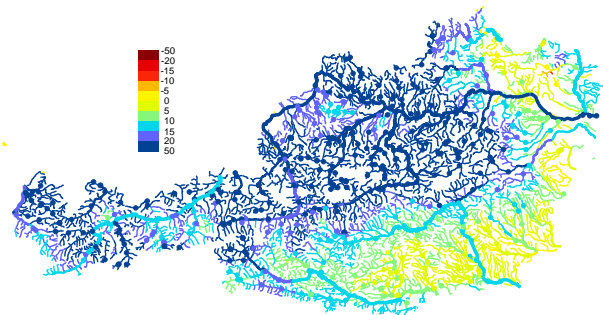
Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Frühjahr



Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Sommer

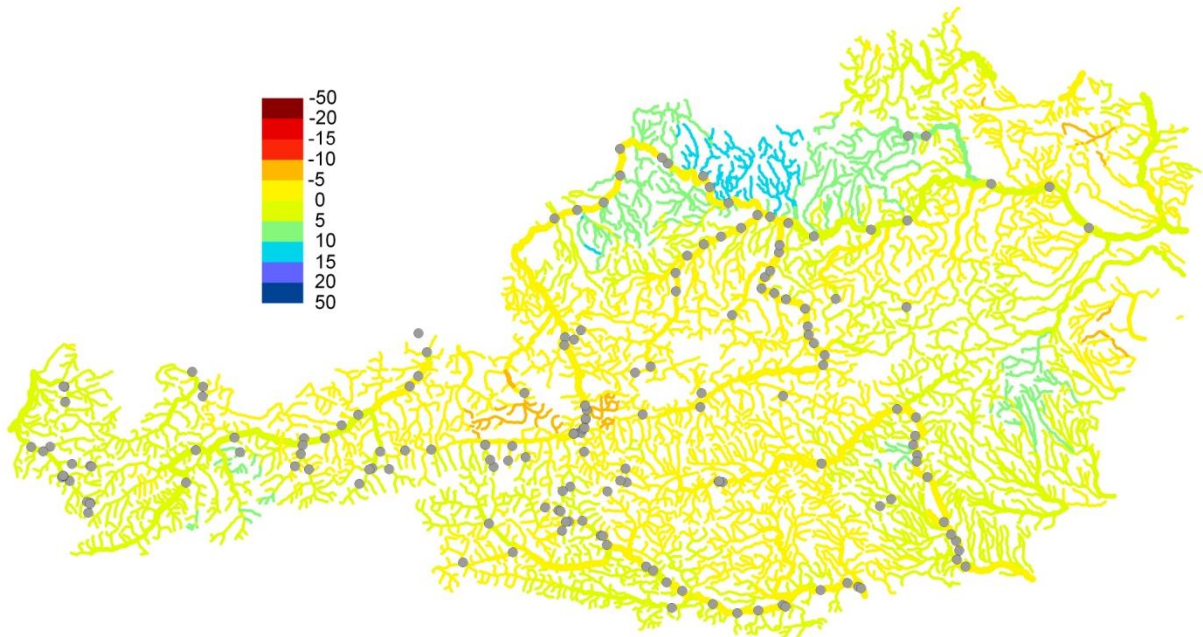


Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Herbst

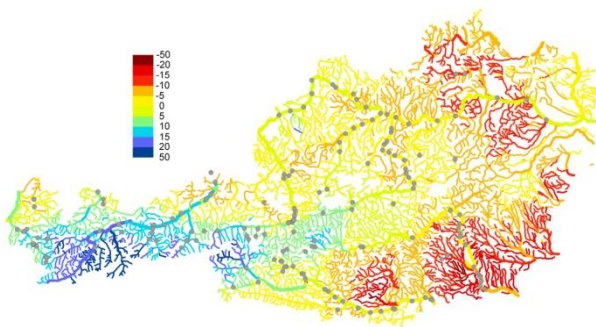


Delta Mittlerer Abfluss 1976-2006 – Winter

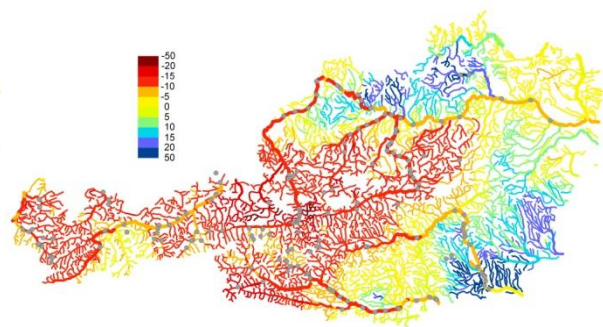
Abbildung 10-8: Änderungen in % des mittleren jährlichen Abflusses für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell. Blau: Zunahme, rot: Abnahme.



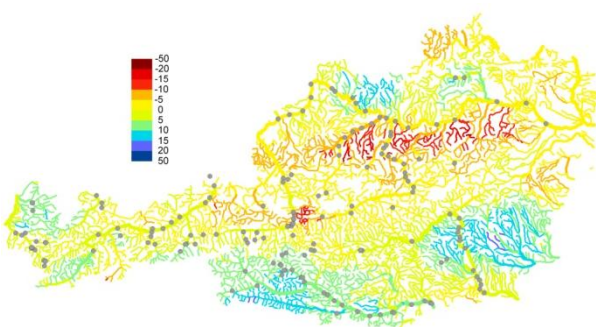
Delta Mittleres Wasserkraftpotenzial 1976-2006 – Jahr



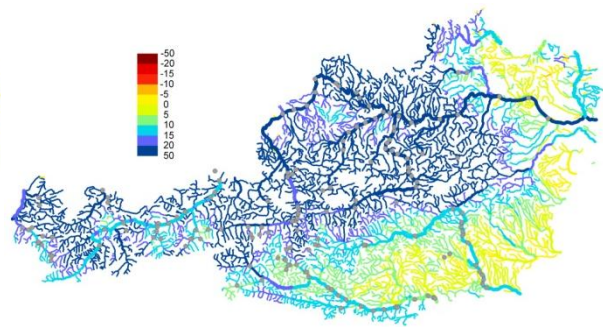
Delta Wasserkraftpot. 1976-2006 – Frühjahr



Delta Wasserkraftpot. 1976-2006 – Sommer



Delta Wasserkraftpot. 1976-2006 – Herbst



Delta Wasserkraftpot. 1976-2006 – Winter

Abbildung 10-9: Änderungen des mittleren jährlichen Wasserkraftpotenzial für den Zeitraum 2021-50 im Vergleich zum Zeitraum 1976-2006 berechnet mit dem Niederschlag-Abflussmodell (in %). Blau: Zunahme, rot: Abnahme. Graue Punkte zeigen Lage der Wasserkraftanlagen nach HAÖ Karte 9.1.

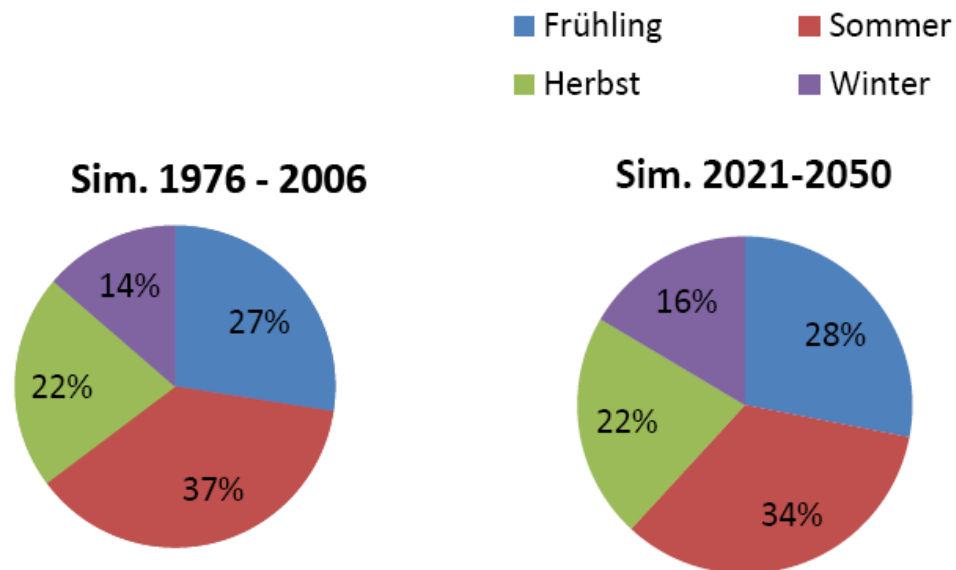


Abbildung 10-10: Änderungen der jahreszeitlichen Verteilung des Wasserkraftpotenzials

10.4.4 Änderung der Erzeugungsleistung am Beispiel ausgewählter Donaukraftwerke

Das in den obigen Auswertungen ermittelte Wasserkraftpotenzial kann nicht vollständig genutzt werden. Einerseits ist das Wasserkraftpotenzial durch technische, ökologische, wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen limitiert. Andererseits können Kraftwerke nur ein Teil des Durchflusses in Energie umsetzen. Abbildung 10-11 zeigt für verschiedene Kraftwerke entlang der Donau die Leistung in Abhängigkeit von der Durchflussmenge. Bis zu einem Durchfluss von etwa 3000 m³/s steigt das umzusetzende Potential für einen Großteil der Kraftwerke. Danach sinkt die Leistung ab.

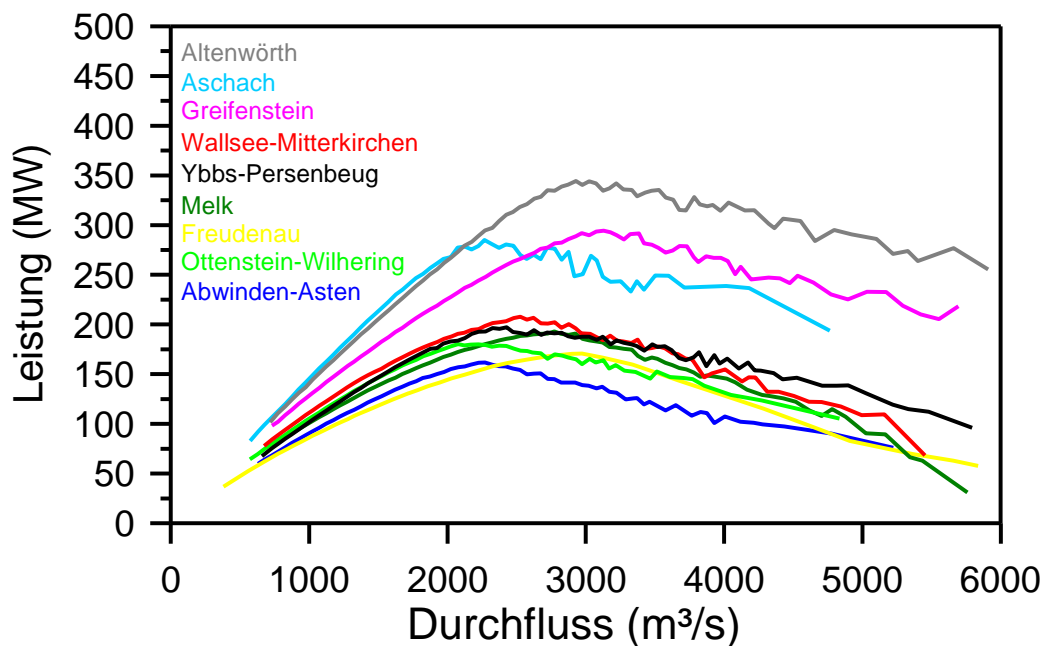


Abbildung 10-11: Leistung in Abhängigkeit vom Durchfluss für ausgewählte Donaukraftwerke

Anhand ausgewählter Kraftwerke entlang der Donau wird im Folgenden der Einfluss der Klimaänderungen auf das Wasserkraftpotenzial unter Berücksichtigung der Ausbauleistung untersucht. Abbildung 10-12 bis Abbildung 10-14 (links) zeigen die Änderungen in den monatlichen Abflüssen ausgewählter Donaukraftwerke für die Periode 1976-2006 (blau) und für die Periode 2021-2050 (rot). Auf der rechten Seite sind die Änderungen im Wasserkraftpotenzial unter Berücksichtigung der Durchfluss-Leistungsbeziehungen dargestellt.

Tabelle 10-1 beinhaltet die saisonalen Änderungen in Abfluss und Potenzial. Für die Donaukraftwerke zeigt sich eine Änderung im Abfluss von -0,85% – 1,6%. Aufgrund des Ausbaugrades der Kraftwerke ändert sich das Potential zwischen 0,5% und 2,3%. Deutlichere Unterschiede sind für die einzelnen Jahreszeiten zu erkennen. So nimmt das Potenzial im Winter für die Donaukraftwerke um 6-16% zu, während im Sommer Änderungen im Potenzial zwischen -6% – 1,75% zu erwarten sind.

Werden die ausgewählten Donaukraftwerke als repräsentativ für die Energieerzeugung österreichischer Kraftwerke angesehen, so kann gefolgert werden, dass sich in einer gesamtjährlichen Betrachtung das Wasserkraftpotenzial der Periode 2021-2050 gegenüber der Periode 1976-2006 kaum ändern wird. Es ist mit einer Zunahme von etwa 1% zu rechnen. Jahreszeitlich zeigen sich jedoch wesentlich größere Unterschiede. So ist im Winter mit einer Zunahme in der erzeugten Wasserkraft zwischen 6% und 15% zu rechnen, während im Sommer tendenziell mit einer Abnahme zu rechnen ist.

Stellt man den jahreszeitlichen Verbrauch an Energie gegenüber (siehe z.B. Abbildung 10-7), dürfte aufgrund der Steigerung des Potenzials im Winter die zu erwartende Änderungen im Wasserkraftpotenzial als eher günstig zu bezeichnen sein.

Tabelle 10-1: Änderungen in % im Abfluss (DQ) und im erzeugten Potenzial (DP) für die Periode 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2006 für ausgewählte Donaukraftwerke.

Kraftwerk	Jahr		Frühjahr		Sommer		Herbst		Winter	
	DQ	DP	DQ	DP	DQ	DP	DQ	DP	DQ	DP
Abwinden-Asten	-0.5	1.3	-0.7	0.7	-10.1	1.1	-3.8	-2.3	22.3	6.3
Aschach	-0.9	2.3	0.2	0.9	-10.7	0.2	-2.6	-1.7	21.6	11.9
Altenwörth	1.2	0.7	0.1	-0.1	-8.5	-6.1	-2.7	-3.2	23.3	15.8
Freudenau	1.6	0.5	0.2	0.4	-7.9	-3.1	-2.4	-3.0	23.2	8.9
Greifenstein	1.4	0.7	0.1	0.0	-8.3	-5.5	-2.6	-2.9	23.3	14.4
Melk	0.5	0.5	-0.1	0.0	-9.4	-2.6	-3.2	-3.1	23.3	9.0
Ottensheim-Wilhering	-0.9	2.4	0.2	0.8	-10.7	1.7	-2.6	-1.3	21.6	9.3
Wallsee-Mitterkirchen	0.1	0.8	-0.2	0.4	-10.0	-1.0	-3.4	-2.8	23.5	7.6
Ybbs-Persenbeug	0.5	0.7	-0.1	0.3	-9.5	-2.5	-3.3	-3.3	23.4	10.0

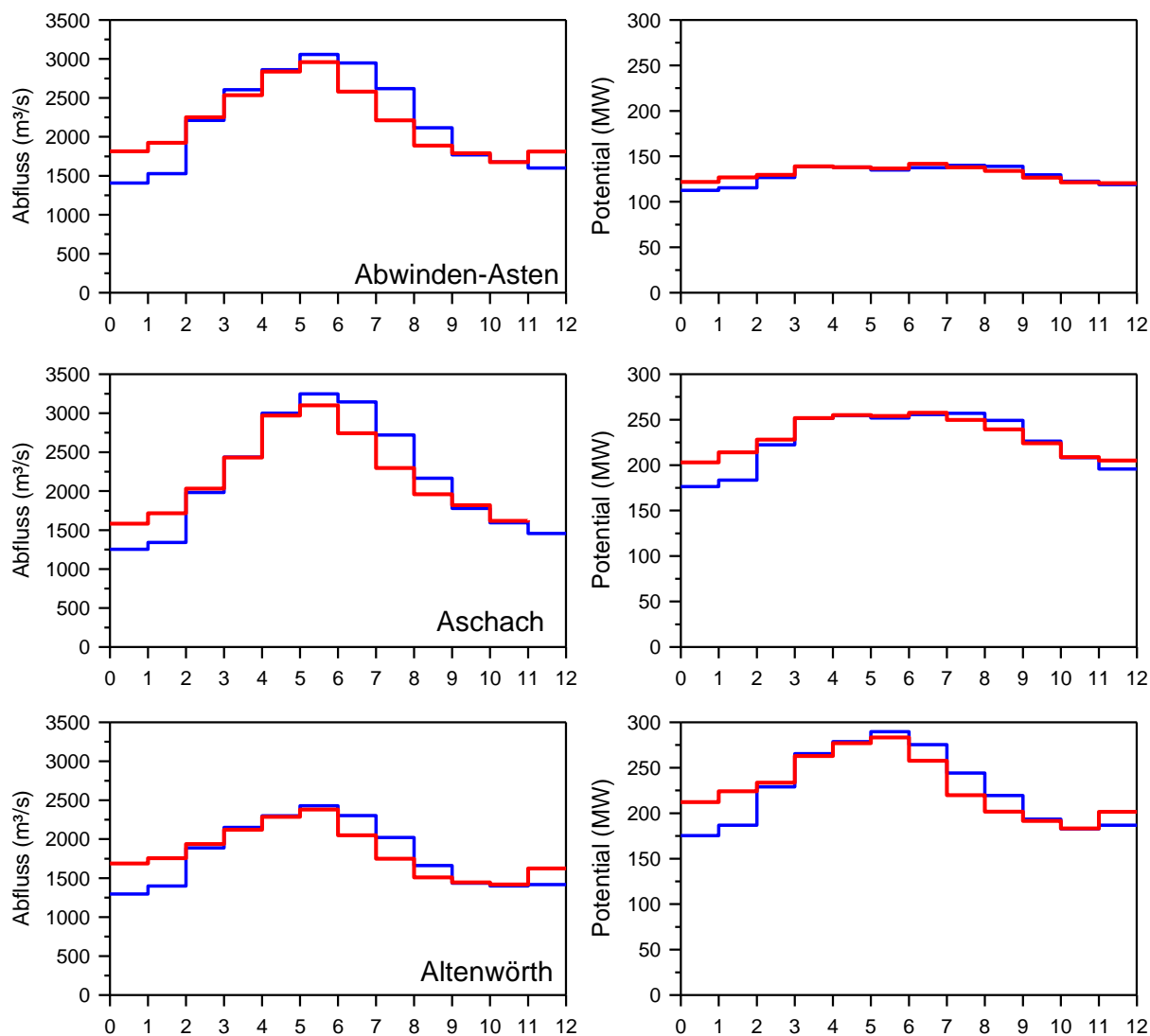


Abbildung 10-12: Jährlicher Verlauf des Abflusses (links) und des ausgebauten Potentials (rechts) für die Periode 1976-2006 (blau) und die Periode 2021-2050 (rot) für ausgewählte Donaukraftwerke.

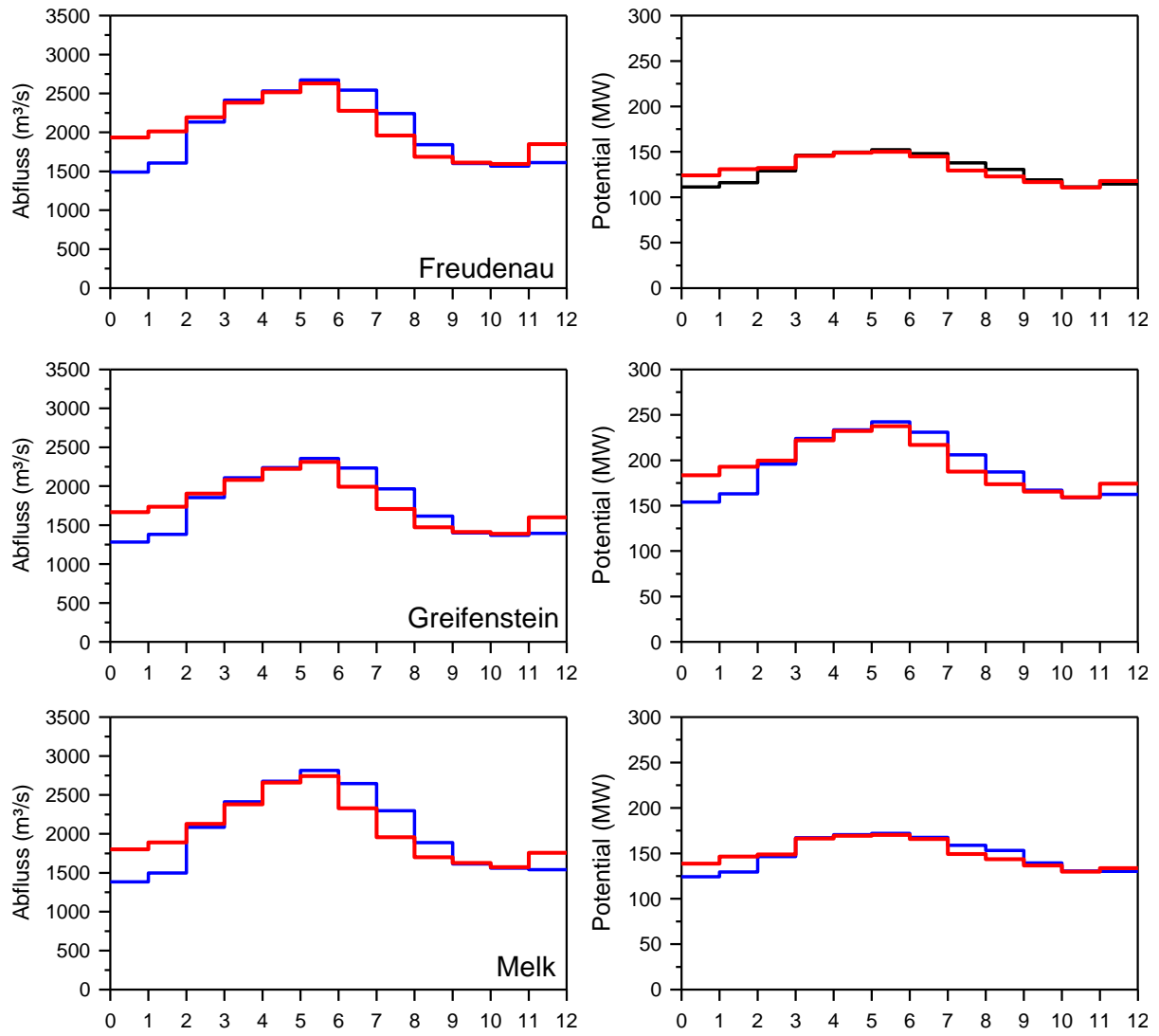


Abbildung 10-13: Jährlicher Verlauf des Abflusses (links) und des ausgebauten Potentials (rechts) für die Periode 1976-2006 (blau) und die Periode 2021-2050 (rot) für ausgewählte Donaukraftwerke.

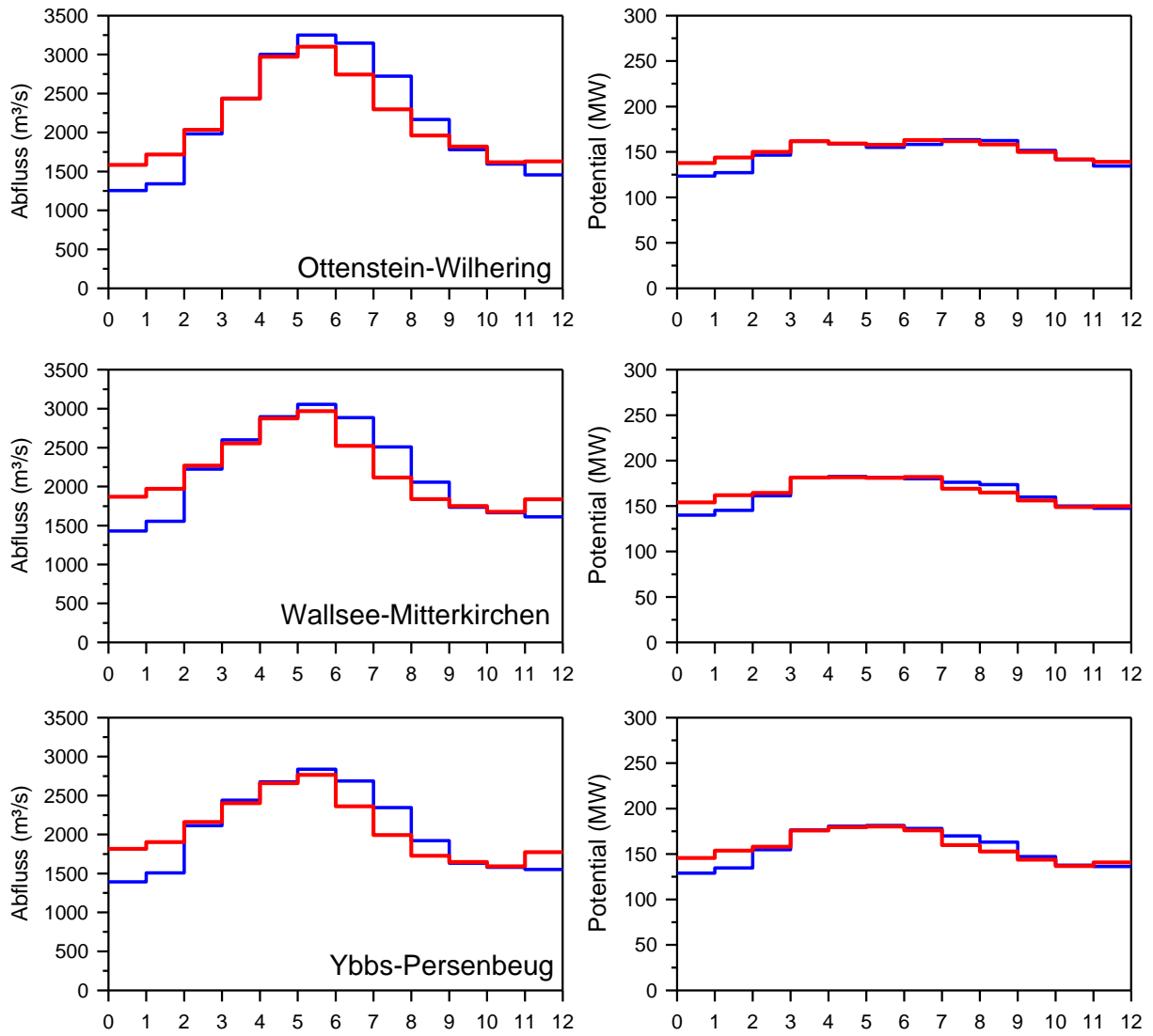


Abbildung 10-14: Jährlicher Verlauf des Abflusses (links) und des ausgebauten Potentials (rechts) für die Periode 1976-2006 (blau) und die Periode 2021-2050 (rot) für ausgewählte Donaukraftwerke.

11. Qualität von Wasserkörpern

11.1 Kurzfassung

Prozesse (allgemeine Grundlagen)

- Die Einflüsse einer Veränderung der klimatischen Rahmenbedingungen beruhen im Wesentlichen auf den Wassertemperaturen sowie den Niederwassermengen bei Oberflächengewässern und dem Wasserdargebot beim Grundwasser. Beide Aspekte führen als Abfolge einer Kausalkette zu sekundären Erscheinungen, welche direkt die Qualität der Wasserkörper beeinflussen.
- Löslichkeiten (zB Sauerstoff, Kohlendioxid-Löslichkeit), chemische Gleichgewichte (zB Ammoniak-Ammonium-Gleichgewicht, Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht) und die Geschwindigkeit chemischer, biochemischer und biologischer Prozesse (zB Wachstumsgeschwindigkeiten) werden wesentlich von der Temperatur mitbestimmt. Eine Zunahme der Gewässertemperaturen bewirkt somit eine relevante Veränderung bei diesen Prozessen und den daraus resultierenden quantitativen und qualitativen Ausprägungen. Dies führt zu einer Veränderung in den abiotischen Rahmenbedingungen für die biologischen Komponenten im Gewässer.
- Eine Verminderung des Abflusses insbesondere bei langen Trockenperioden führt nicht nur zu niedrigeren Wasserständen, sondern auch zu längeren hydraulischen Verweilzeiten. Dies spielt besonders dort eine entscheidende Rolle, wo die Fließgeschwindigkeiten schon bei normalem Abfluss gering sind (Stau, Restwasser, Seen, Gewässersohle, Sediment, Grundwasser). Es verlängert sich damit an jedem Punkt im Wasserkörper die Zeit für biologische und chemische Prozesse, sodass die Prozesse vollständiger ablaufen können.
- Eine Reduktion des Wasserdargebots in Oberflächengewässern und im Grundwasser vermindert das Verdünnungspotenzial für punktuell oder diffus eingetragene Stofffrachten, was bei unveränderten Frachten eine Erhöhung der Konzentrationen bewirkt.
- Für den Gewässerzustand spielen nicht nur die als Wassergüte definierten Immissionskriterien, sondern auch strukturell morphologische Elemente eine zentrale Rolle. Barrierefreiheit für Fischentwicklung und –migrationen, Beschattung und Niederwasserabfluss sind hier ebenso entscheidend wie die Konzentrationen an Immissionsparametern.
- Für die aquatischen Biozönosen sind sowohl die mittleren Temperaturen wie die Höchsttemperaturen relevant, weil sie sich an veränderte Temperaturbedingungen anpassen. Die Erhöhung der mittleren Temperaturen zufolge des Klimawandels alleine wird daher zu einer Anpassung führen, die für die Wassergütewirtschaft als „natürlich“ verursacht zu behandeln ist. Das ufernahe Grundwasser folgt der Temperaturganglinie im dotierenden Gewässer und ist von der Gewässerimmission sowie den biologischen und biochemischen Prozessen im Übergangsbereich zwischen Wassersäule und Grundwasser geprägt, die zufolge der Temperaturerhöhung rascher und vollständiger ablaufen werden.
- Die Betrachtungen der Auswirkung von Kläranlagen auf Gewässer erfolgt bereits heute nach dem kombinierten Emissions-Immissionsansatz. Wenn sich die Wirkung der Immission ändert, werden bei besonders empfindlichen Gewässern auch die Emissionsanforderungen angepasst werden müssen.

Situation in der Vergangenheit

- Für den Referenzzeitraum 1976-2007 kann eine deutliche Verbesserung der Wasserqualitäten in den Oberflächenwasserkörpern sowie im Grundwasser beobachtet werden, die vorrangig auf die legislativen und technischen Maßnahmen zum Gewässerschutz zurückzuführen sind. Die Wirkung der gleichzeitigen Zunahme der Luft- und Wassertemperaturen um ca. 0,5 bis 1 °C auf Grund des Klimawandels ist daher nicht bewertbar (*harte Aussage*).
- Die anthropogenen Einflüsse auf die Qualität von Wasserkörpern (in beide Richtungen: Verschmutzung und Sanierung) erfolgten in der Vergangenheit wesentlich rascher als sich klimatische Rahmenbedingungen verändert haben (*harte Aussage*).

Situation in der Zukunft

- Je geringer die organische und trophische Belastung eines Wasserkörpers (Oberflächenwasser, Grundwasser) und je geringer die morphologischen Beeinträchtigungen der Oberflächenwasserkörper sind, desto geringer werden die Auswirkungen eines zu erwartenden Temperaturanstiegs auf die Wasser- und Gewässergüte sein (*harte Aussage*).
- Die zu erwartende Temperaturerhöhung in den Gewässern wird zu einer Anpassung der aquatischen Biozönosen führen, die Bioregionen werden sich daher verschieben (*harte Aussage*).
- In den Regionen Österreichs in denen Niederschlag und Verdunstung (Evapotranspiration) etwa gleich groß sind, ist eine Prognose der Grundwasserneubildung mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Vulnerabilität der davon betroffenen Grundwasserkörper bezüglich der Qualität (insbesondere Nitrat) bleibt deshalb hoch (*harte Aussage*).
- Für Gewässer, die heute im Grenzbereich zwischen Zielzustand und „mäßigem Zustand“ liegen, besteht ein erhöhtes Risiko, infolge der bis 2050 erwarteten Auswirkungen des Klimawandels den „guten Zustand“ zu verfehlen. Für Wasserkörper, die nach heutigen Kriterien den „guten Zustand“ aufweisen, ist nicht zu erwarten, dass der Klimawandel einen zusätzlichen Handlungsbedarf auslösen wird (*mittelharte Aussage*).
- Es ist zu erwarten, dass sich auch in Zukunft die anthropogenen Einflüsse auf die Gewässerqualität rascher verändern als die prognostizierbaren Auswirkungen der Klimaänderung (*harte Aussage*).

Anpassungsmaßnahmen

- Dem Einfluss der Klimaänderung auf den Zustand von Oberflächen- und Grundwasser sollte bei zukünftigen Monitoringprogrammen in Form von langfristigen konsistenten Datenreihen verstärkt nachgegangen werden.
- Der Einfluss des Klimawandels bei der Nachführung der Bewirtschaftungspläne der Wasserrahmenrichtlinie ist zu berücksichtigen (im 6-Jahresrhythmus durchzuführende Evaluierung von Bewertungsansätzen, Zuständen und Maßnahmen).
- Die Anpassung der Natur an den Klimawandel (natürlicher Zustand) muss in den Leitbildern der Qualitätszielverordnung abgebildet werden. Wegen der Langsamkeit des Anpassungsprozesses stellt dies eine mittel- bis langfristige Perspektive dar.
- Zur Verminderung der Auswirkung der Klimaänderung auf Ammoniaktoxizität und Eutrophierung sollten die Emissionswerte der Parameter Ammonium und Gesamtposphor für die diesbezüglich sensiblen Flussgebiete Österreichs überprüft.

11.2 Einleitung

Der Klimawandel wird in der Wasserwirtschaft als eine außerhalb des Fachgebiets verursachte Veränderung der natürlichen Umweltbedingungen betrachtet, welche die Rahmenbedingungen und Zielvorgaben, wie etwa den „natürlichen Zustand“ der Gewässer nach EU WRRL, prägt, jedoch nicht ein von der Wasserwirtschaft verursachtes Phänomen. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass die Anpassung der Biozöosen (Natur) an geänderte Temperaturen und Durchflüsse in den Gewässern als Folge der Klimaänderung nicht durch Maßnahmen bekämpft werden müssen, die sich an einem einmal (also historisch) festgelegten natürlichen Referenzzustand orientieren. Der „natürliche Zustand“ eines Wasserkörpers nach EU WRRL ist somit natürlichen Änderungen (etwa klimabedingt) unterworfen, was damit auch für die Referenzzustände gilt.

Für die folgenden Überlegungen wird vorerst davon ausgegangen, dass die Anforderungen der Stakeholder an die Wasserwirtschaft bezüglich Menge und Qualität sich nicht in relevanter Weise ändern (siehe auch Kapitel 1), wogegen sich die Auswirkungen des genutzten Wassers auf die aquatischen Ökosysteme sehr wohl verändert hat. Zumindest während der letzten, durch entsprechende Monitoringdaten bestens abgesicherten 30 Jahre waren die Veränderungen der Wassergüte zufolge anthropogener Ursachen zeitlich und räumlich sehr deutlich.

Projektionen über zukünftige Veränderungen klimatischer Rahmenbedingungen und deren direkte Auswirkungen auf die Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütwirtschaft gestalten sich schwierig. Die Komplexität der Thematik wird deutlich in LAWA (2009) ausgeführt (siehe Abbildung 11-1). Während Aussagen über die mittlere Lufttemperaturentwicklung auf großräumiger Skala als gesichert angesehen werden, liegen Aussagen zur „Wasserqualität und Ökosystemfunktion“ am spekulativen Ende der Aussagenkette. Die Ursache dafür liegt darin begründet, dass die Komplexität ökologischer Zusammenhänge im Sinne von wechselwirkenden biotischen und abiotischen Ökofaktoren mit der Integrationsebene zunimmt. Dadurch übertragen sich Unsicherheiten einer niedrigen Integrationsebene auf höhere. Außerdem sind zentrale Zusammenhänge, die für das Verständnis von Ausprägungen und Prognosen notwendig wären, zurzeit nicht quantifizierbar und können bestenfalls anhand lokaler Fallbeispiele dokumentiert werden. Die Aussagen in diesem Beitrag können sich deshalb vorwiegend nur qualitativ und mit größerer Unschärfe (verglichen mit den anderen dargestellten Bereichen der Wasserwirtschaft) abgeleitet werden.

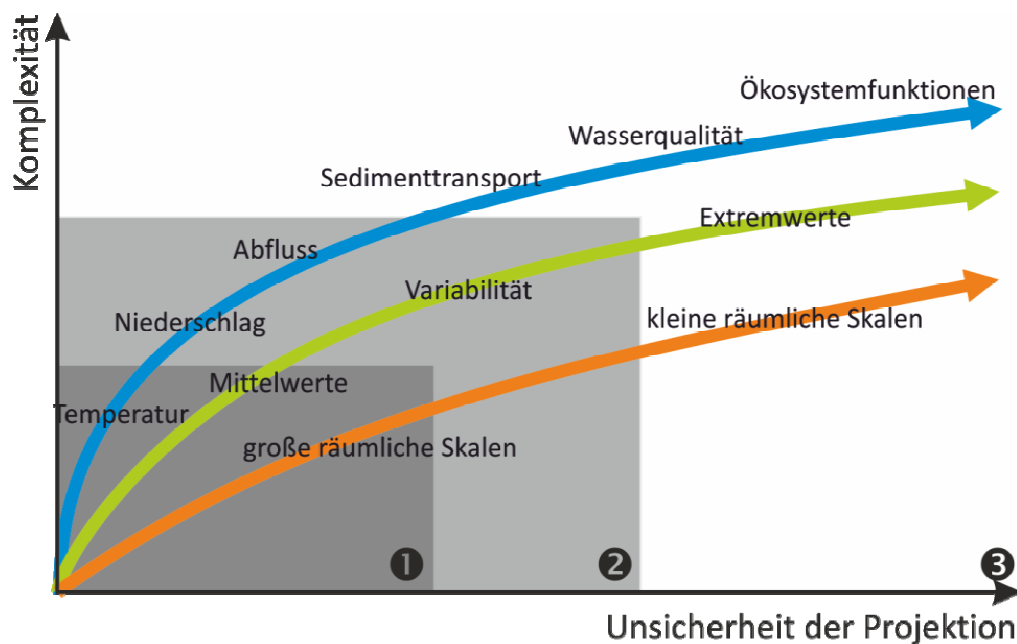


Abbildung 11-1: Zusammenhang zwischen Komplexität und Unsicherheit von Projektionen für unterschiedliche thematische, räumliche und zeitliche Integrationsebenen (verändert nach LAWA 2009). Bereiche, die nach dem heutigen Stand des Wissens (1) weitgehend gesicherte harte, (2) weiche oder (3) nur spekulative Aussagen zulassen

Ein weiterer grundlegender Aspekt, der als Grundlage für zu diskutierende Anpassungsmaßnahmen nicht außer Acht gelassen werden darf, ist die Tatsache, dass Temperaturänderungen in den Gewässern nicht nur eine rezente oder zukünftige Entwicklung darstellen, sondern sich bereits über die in der Wasserwirtschaft üblichen Planungszeiträume in der Vergangenheit nachweisen lassen und somit bereits in den Planungsinstrumentarien indirekt mit berücksichtigt wurden und werden. Der Zusammenhang zwischen wassergütewirtschaftlicher Planung, ihre Auswirkung auf die Gewässergüte und die klimatischen Rahmenbedingungen ist in Abbildung 11-2 skizziert. Eine Betrachtung der historischen Situation (0) zeigt, dass Veränderungen des Klimas in der Planung bis dato weitgehend unberücksichtigt blieben, die anthropogen verursachten Gewässerbelastungen jedoch durch technische und organisatorische Maßnahmen beseitigt werden konnten. Die flächendeckende Umsetzung in Österreich macht sich am deutlichsten in der markanten Verbesserung der verschiedensten Güteindizes seit Mitte der 1980er Jahre bemerkbar. Eine Weiterführung der derzeitigen Strategie würde deshalb in Szenario (1) resultieren, das durch die konsequente Umsetzung gesetzlicher Rahmenbedingungen (Stichwort Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan - NGP) bereits auf Schiene ist. Eine weitere Verbesserung der Situation verläuft jedoch auf Grund der bereits guten Ist-Situation nicht so deutlich, wie dies Ende des vorigen Jahrhunderts der Fall war. Die Diskussion der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassergüte thematisiert nun die Veränderungen der klimatischen Rahmenbedingungen mit potentiellen negativen Auswirkungen auf die Güteparameter (Szenario (2) in Abbildung 11-2). Tatsächlich sind Veränderungen der klimatischen Rahmenbedingungen auch historisch nachweisbar seit es Aufzeichnungen etwa der Gewässertemperatur gibt (siehe zB Abbildung 11-3). Dies bedeutet, dass die bis heute erreichten Güteparameter als Ergebnis einer Überlagerung anthropogener (positiver und negativer) Einflüsse und Maßnahmen sowie bereits erfolgter klimatischer Veränderungen anzusehen sind (siehe Szenario (3) in Abbildung 11-2). Die gesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässergüte, die ja auch den Ausgangspunkt für die anthropogene Wassernutzung darstellt, konnten somit bereits potentielle negative Güteauswirkungen der Veränderung klimatischer Rahmenbedingungen (Szenario (2)) mit kompensieren. Die zentrale Frage lautet nun, ob das derzeitige Instrumentarium auch zukünftig ausreicht,

Anpassungen an den Klimawandel sicherzustellen, oder neue Strategien und Mechanismen eingesetzt werden müssen, um dies zu bewerkstelligen.

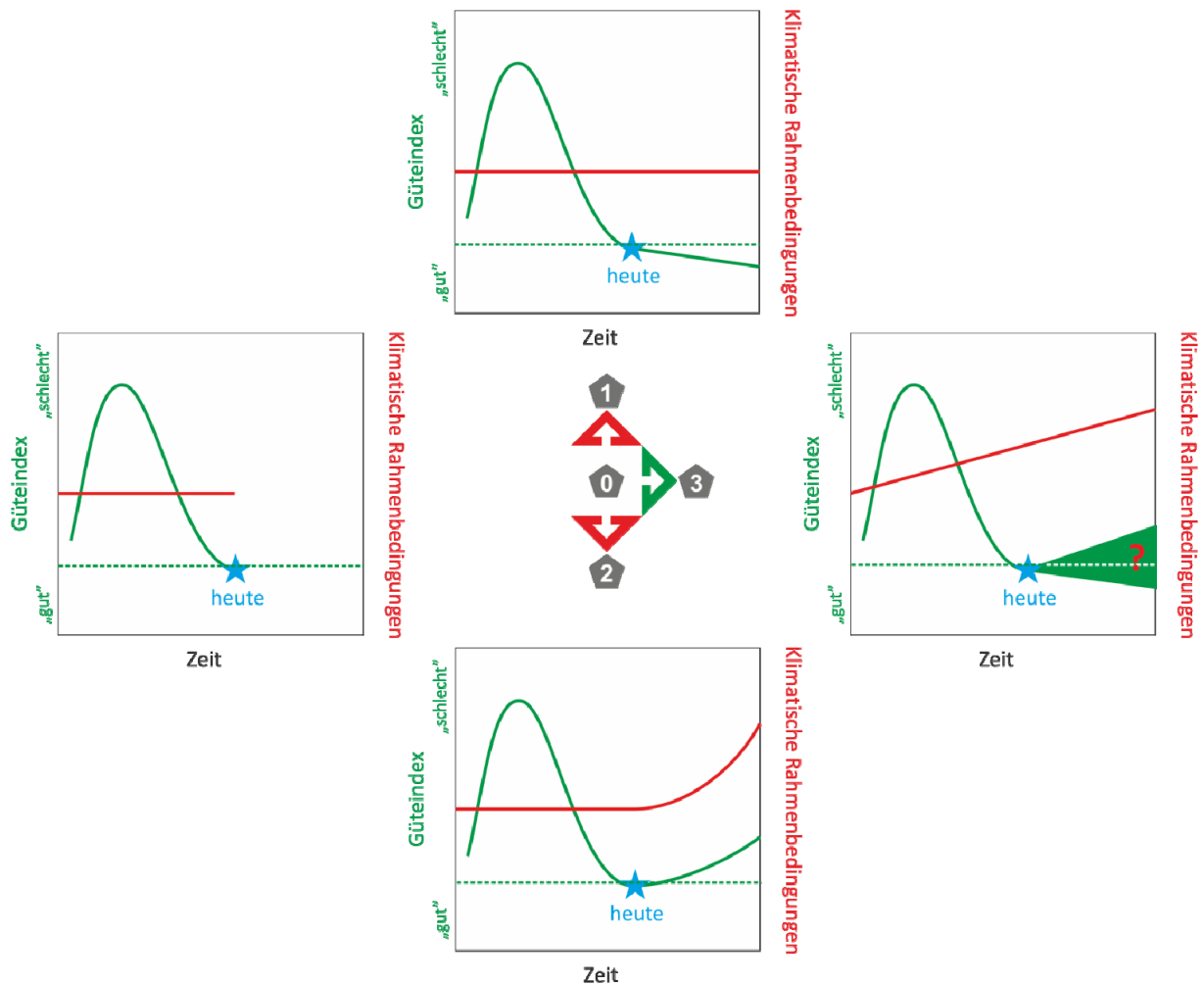


Abbildung 11-2: Skizzenhafte Darstellung von Planung, Ausprägung und Veränderungen der klimatischen Rahmenbedingungen (verändert nach Glen et.al. 2010)

Die methodische Herangehensweise zur Abschätzung potentieller Auswirkungen des Klimawandels gestaltet sich nicht nur auf Grund der Komplexität und Integrationsebene der betrachteten Materie als schwierig, sondern auch weil Änderungen anthropogener Auswirkungen und Maßnahmen rascher erfolgen als die Veränderungen der klimatischen Rahmenbedingungen. Zudem sind die Zusammenhänge zwischen Wasser- / Gewässergüte und den klimatischen Rahmenbedingungen von anthropogenen Einwirkungen überlagert. In Abbildung 11-3 ist diese Situation für die Donau oberhalb Wiens exemplarisch dargestellt.

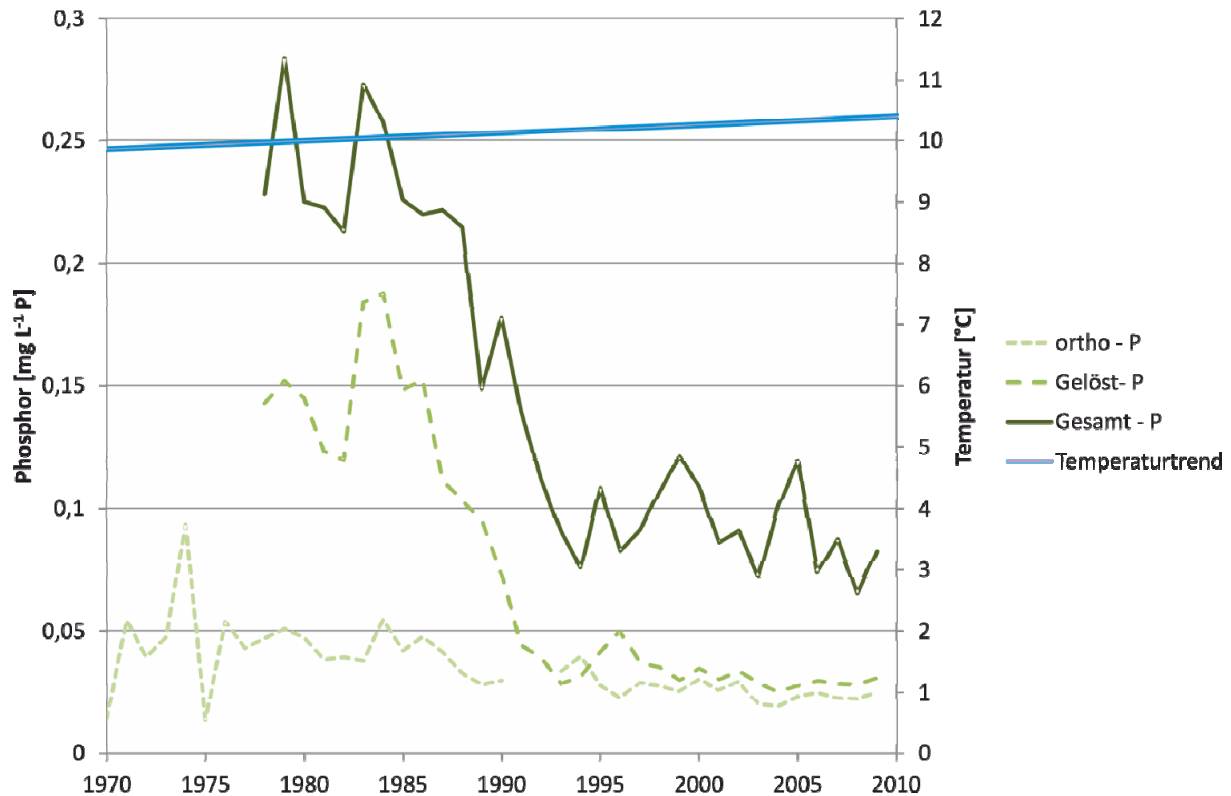


Abbildung 11-3: Zeitliche Entwicklung der Phosphorimmissionen und Wassertemperaturtrend für die Donau oberhalb Wiens.

Aus Abbildung 11-3 könnte ein statistisch hochsignifikanter Zusammenhang zwischen abnehmender Phosphorkonzentrationen und steigender Temperatur abgeleitet werden, wenn die anthropogenen Maßnahmen nicht berücksichtigt werden. Eine kausale Interpretation dieses Zusammenhangs ist jedoch keineswegs zulässig, da die Abnahme der Phosphorkonzentrationen nicht auf die Temperatur, sondern auf technisch-organisatorische Maßnahmen im Einzugsgebiet zurückzuführen sind. Eine sinnvolle Korrelation könnte nur für Gebiete ohne signifikante anthropogene Einflüsse (Referenzstellen nach WRRL) durchgeführt werden. Da das System der Referenzstellen jedoch aus der nationalen Umsetzung der EU-WRRL erst vergleichsweise jung ist und die notwendigen Datenreihen (mindestens 30 Jahre) für diese Stellen nicht und schon gar nicht über die unterschiedlichen Bioregionen des Bundesgebiets existieren, sind Trendanalysen für eine Bewertung der Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Gewässergüte und die Nutzung nicht möglich. Für eine qualitative Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Aspekte der Wasserwirtschaft (qualitative Aspekte und Nutzung) werden deshalb aus der Hydrologie entlehnte Methoden („Delta Change“ Ansatz; „Trading Time for Space“) verwendet (siehe Kapitel 4).

11.3 Zusammenhänge Klima und Wassergüte aus der Literatur

Im Allgemeinen ist in Fließgewässern mit einer tendenziellen Erwärmung zu rechnen. Über die Auswirkungen insbesondere auf geochemische Aspekte ist derzeit allerdings noch wenig bekannt (Kipfer und Livingstone, 2008). In einer Studie über die Mosel wird über die Auswirkungen von Trockenperioden auf die Wasserqualität berichtet (van Vliet und Zwolsman, 2008). Bei der Mosel handelt es sich um einen hauptsächlich regengespeisten Fluss, der besonders anfällig für Hochwässer ist. Zwei Trockenperioden, die erste 1976, die zweite 2003 (jeweils ca. Juni bis November), wurden an zwei Messstellen näher untersucht. Auch wenn es sich hierbei um ein Fallbeispiel handelt, werden allgemein gültige Zusammenhänge (Trockenperioden, damit verbundenen niedrigen Wasserständen und erhöhten Wassertemperaturen, etc.), die auch in Zukunft und in vergleichbaren Fließgewässern auftreten können, dargestellt. Es wurden Auswirkungen auf insgesamt 24 Parameter untersucht, darunter allgemeine Wasserqualitätsparameter, Nährstoffe und Schwermetalle. Diese Auswirkungen werden im Folgenden kurz erläutert. Im Fall der Mosel war die Wassertemperatur in den Trockenperioden im Vergleich zur Referenzperiode um 2°C höher. Es zeigte sich eine starke positive Korrelation mit der Lufttemperatur und eine negative Korrelation mit dem Durchfluss, was eine stärkere Erwärmung bei niedrigen Wasserständen widerspiegelt.

Infolge höherer Wassertemperaturen und eines geringeren Durchflusses, was wiederum längere Aufenthaltszeiten bedingt, wurden höhere Chlorophyll-a Konzentrationen gemessen. Das deutet wiederum auf vermehrtes Algenwachstum hin, das durch höhere Nährstoffkonzentrationen favorisiert wird. Als Folge wurden höhere pH-Werte und geringer CO₂-Konzentrationen im Wasser gemessen.

Die Konzentrationen von gelöstem Sauerstoff (O₂) waren, infolge der geringeren Löslichkeit bei höheren Temperaturen im Wasser, insgesamt geringer. Dort, wo hohe Chlorophyll-a Konzentrationen gemessen wurden, wurden unter Tags erhöhte O₂-Konzentrationen gemessen. Bedingt durch den geringeren Stofftransport bei niedrigerem Durchfluss, wurde eine geringere Konzentration an suspendierten Stoffen gemessen. Erhöhte Ammonium - Konzentrationen wurden auf die geringere Verdünnung der Einleitung aus Kläranlagen und auf die Rücklösung von Ammonium aus dem nährstoffreichen Sediment bei niedrigen Wasserständen zurückgeführt.

Auch die Erhöhung von Nitrit-Konzentrationen wurde auf eine geringere Verdünnung der Kläranlagenabläufe zurückgeführt. Der gleiche Effekt wird für Orthophosphat vermutet.. Im Gegensatz dazu wurden niedrigere Nitrat-Konzentrationen beobachtet. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass Nitrat nicht nur von Kläranlagen emittiert wird, sondern auch aus diffusen Einträgen herrührt. Durch weniger Niederschlag gelangen weniger Diffuse Nitrat-Einträge ins Gewässer. Als andere Erklärungen für eine geringe Nitrat-Konzentration werden die zusätzliche Aufnahme von Nitrat durch vermehrtes Algenwachstum und eine vermehrte Denitrifikation genannt. (Die Erklärungsansätze werden von den Autoren hier jedoch bezweifelt. Eine Grobanalyse der publizierten Daten legen eine Erklärung durch gewässerassoziierte Prozesse näher)

Der Anstieg konservativer Stoffe (Chlorid, Fluorid, Sulfat) während der Trockenperioden wurde dem verringerten Verdünnungspotential zugeordnet.

Höhere Konzentrationen wurden bei jenen Metallen gefunden, die einen geringen Verteilungskoeffizienten aufweisen (Selen, Barium, Nickel). Auch hier wird diese Tatsache auf das geringere Verdünnungspotential zurückgeführt. Bei Metallen mit einem hohen Verteilungskoeffizienten dominiert die Adsorption an Feststoffen. Nachdem die Konzentration suspendierter Stoffe bei geringerem Durchfluss (Fließgeschwindigkeiten) abnimmt, war auch die Konzentration dieser Metalle (Blei, Chrom, Quecksilber, Cadmium) geringer. Generell kann mit einer temporären Verschlechterung der Wasserqualität während Trockenperioden gerechnet werden. Durch erhöhte Wassertemperaturen wird der Kühlwasserausstoß limitiert.

Die Verfügbarkeit von Wasser in ausreichender Qualität und Quantität für Landwirtschaft und kommunalen Gebrauch kann signifikant sinken. Durch das geringere Verdünnungspotential können möglicherweise relevante Güteparameter öfter und für längere Perioden nicht mehr eingehalten werden, was besonders für die Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächengewässern negative Folgen haben kann. Eine Reduktion der Emissionen aus Punktquellen wird besonders während Niederwasserperioden notwendig werden.

11.4 Einflüsse des Klimawandels auf die Gewässergüte in Österreich

Als Folge des Klimawandels können folgende Veränderungen erwartet werden:

- Erhöhung der mittleren Jahreslufttemperatur (harte Aussage), die sich auch in einer Erhöhung der mittleren Jahreswassertemperaturen in allen Oberflächenwasserkörpern, wenn auch unterschiedlich gedämpft, niederschlagen wird (harte Aussage).
- Die Niedrigwasserführung der Oberflächengewässer verändert sich regional unterschiedlich (harte Aussage). Ihre Häufigkeit und absolute Höhe werden neben der Niederschlagsverteilung übers Jahr auch durch die Temperatur und die Länge von Trockenperioden beeinflusst. Die Modelle erlauben Aussagen über die regionale und jahreszeitliche Verteilung der Niederschlagshöhe und der Temperatur, aber nicht der Veränderung von Dauer und Häufigkeit von Trockenperioden. Die Ergebnisse der Niedrigwasserprojektionen sind daher regional deutlich unterschiedlich (harte Aussage). Die Aussagen über die quantitativen Veränderungen der Durchflüsse und deren Auftrittswahrscheinlichkeit sind bestenfalls als mittelharte bis weiche Aussagen zu werten. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Wasserbedarf bei langen Trockenperioden insbesondere in der Landwirtschaft (Bewässerung) ansteigt und daher die Auswirkungen auf die Wasserkörper sowohl bezüglich der Wassermenge als auch der Qualität der Wasserkörper besonders kritisch werden können. Auch für die Verringerung der Auswirkung solcher Extremereignisse auf die Nutzer von Wasser und die aquatischen Biozönosen sind möglicherweise Versicherungsmodelle sinnvoller als umfangreiche Vorsorgemaßnahmen auf technischer und organisatorischer Ebene. Alle organisatorischen Maßnahmen (Notfallverordnungen, Nutzungsverbote oder –einschränkungen) sind jedenfalls vorsorglich zu planen und mit den Betroffenen abzusprechen, damit sie rasch einsetzbar und wirkungsvoll sind.
- Die Grundwasserneubildung wird sich regional unterschiedlich ändern. Je kleiner die absolute Neubildungsrate eines Grundwasserkörpers ist, desto größer wird der Einfluss von Veränderungen auf die Wassergüte (Stofftransport, Konzentration). Die Aussagen aus den Modellen bezüglich der Veränderung der Grundwasserneubildung sind je nach Region unterschiedlich hart und bezüglich ihrer absoluten Größe mit relativ großen Unsicherheiten behaftet.
- Eine Veränderung der Hochwasserführung der Fließgewässer hat kaum Einfluss auf die Gewässergüte (harte Aussage). Eine Gefährdung ist nur in jenen Fällen gegeben, wo durch Hochwasserereignisse die Trinkwasserversorgung gefährdet ist (Überflutung von Brunnen, hochwasserbedingter Austritt von Mineralölprodukten aus Tankanlagen). Dabei handelt es sich aber praktisch ausschließlich um lokale Bedrohungen. Diese sind nicht Gegenstand dieser Studie.
- Jedwede Veränderung der Niederschlagshöhe und der zeitlichen Verteilung der Niederschläge über das Jahr hat auch eine Veränderung der Belastung der Gewässer durch Regenentlastung von Mischkanalnetzen sowie von Regenwasserabflüssen aus den Regenwasserkanälen von Trennsystemen zur Folge (harte Aussage). Die Quantifizierung des Einflusses solcher Veränderungen zufolge

eines Klimawandels auf die Gewässergüte bleibt in jedem Falle mit großen Unsicherheiten behaftet und lässt daher bestenfalls weiche Aussagen zu. Die Szenarienmodelle erlauben keine gesicherten Aussagen über Veränderungen der Intensität von Regenereignissen und der zeitlichen Verteilung von Niederschlägen, die für die Abschätzung von Veränderungen bei den entlasteten Frachten an Verunreinigungen für die Fließgewässer notwendig sind. Diese Unsicherheit betrifft auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Entlastungsereignissen bei Niedrigwasserführungen der betroffenen Gewässer, die eine Abschätzung der Häufigkeit akuter Schadwirkung von Regenüberlaufereignissen auf die empfangenden Gewässer erlauben. Die Aussagen über eine Veränderung regionaler Gefährdungen von Gewässern durch Punkteinleitungen bei Regenereignissen sind daher als weich zu klassifizieren. Dies gilt leider auch für jene Fließgewässer und Regentlastungen, die in stehende Gewässer münden.

- Die Wasser und Gewässergüte werden von allen Veränderungen des menschlichen Verhaltens und den Veränderungen der Umweltbedingungen (Klima ist eine davon) beeinflusst (harte Aussage). Veränderungen bewirken Anpassungsvorgänge, die prinzipiell nur begrenzt vorhersagbar sind, weil sich das Gesamtsystem der Erde (inklusive Menschen) durch Anpassung verändert (harte Aussage). Dies muss insbesondere bei der Interpretation von Veränderungen von Messwerten in den Gewässern beachtet werden, wenn aus ihnen eine eindeutige (gesicherte) Zuordnung von Klimaänderungen zu einem Trend der Veränderung der Gewässergüte abgeleitet werden soll. Daraus kann man ableiten, dass für die Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel sowohl die Projektionen als auch die laufende Beobachtung und Interpretation der Überwachungsdaten (WISA, Länderdatenbanken) herangezogen werden müssen.

Folgen des Klimawandels

Für die Wassergütwirtschaft sind vor allem lange Trockenzeiten mit einem stark reduzierten Wasserdargebot von Bedeutung, weil diese für die Konzentration aller Stoffe und auch für die Temperaturerhöhung die ungünstigsten Verhältnisse für die Güte der Gewässer und die Qualität des Wassers bewirken. Die Gleichzeitigkeit von langen Trockenperioden mit einer hohen Temperatur und einer geringen Dotierung der Fließgewässer aus dem Grundwasser (bedingt durch die geringe Grundwasserneubildung) stellen den ungünstigsten Fall für die Gewässergüte dar.

Nachdem die Szenarienberechnungen dafür keine statistisch abgesicherte Aussagen machen können, erscheint es sinnvoll, die Erfahrungen von solchen Extremsituationen aus der Vergangenheit heranzuziehen.

Erfahrungen aus historischen Extremsituationen

In West- und Zentraleuropa war der Sommer 2003 durch eine außergewöhnlich lange Trockenperiode mit extrem hohen Temperaturen geprägt. Die detaillierte Untersuchung der Folgen dieser Extremsituation in der Schweiz stellt eine sehr gute empirische Grundlage für die Folgen des zu erwartenden Klimawandels bezüglich Wassergütwirtschaft dar. In dieser Studie werden aus der Analyse dieses Extremereignisses die folgenden Schlüsse gezogen:

- Aus der Sicht der Wassergütwirtschaft sind Probleme nur dort aufgetreten, wo die Redundanz der technischen Einrichtungen bzw. die Resilienz der Gewässerbiozöten gegenüber solchen Situationen schon bisher relativ gering war.
- Bei der Wasserversorgung sind nur bei kleinen nicht vernetzten Versorgungseinheiten Probleme aufgetreten, wo die Redundanz schon vorher gering war. Daraus wird der Schluss gezogen, dass die Sicherheit der Wasserversorgung überall dort auf einen höheren Standard gebracht werden soll, wo schon heute

Probleme bei langen Trockenperioden aufgetreten sind oder zu befürchten waren. Ihre Begründung aus der zu erwartenden Klimaveränderung alleine ist problematisch.

- In einigen kleinen Fließgewässern sind zufolge Wassermangels auch Fischsterben aufgetreten. Eine weitgehende Herstellung der Durchgängigkeit der Fließgewässer für die Fische vermindert sicherlich deren Intensität und Häufigkeit. In der Schweizer Studie wird angeführt, dass Fischsterben auch natürliche Vorgänge sein können (Trockenfallen von Altarmen nach Überschwemmungen, Schilfzonen flacher Seen, etc.). Es konnte auch gezeigt werden, dass Regenüberlaufereignisse keine Fischsterben verursacht haben, weil sie in diesen Perioden mit niedrigen Abflüssen nicht aufgetreten sind.
- Bezüglich der Kühlwasserproblematik sind lokale, zeitlich beschränkte Einschränkungen für die Nutzer aufgetreten, die aber insgesamt zu keinen regionalen Problemen - etwa der Energieversorgung - geführt haben.
- Aus der Analyse des Sommers 2003 können keine technischen Anpassungsmaßnahmen begründet werden, die nur aus dem Kapitel Klimaänderung abzuleiten sind.

In Frankreich sind im Sommer 2003 Sondergenehmigungen für die Kühlwassereinleitung von (Atom-)Kraftwerken (Überschreitung der zulässigen Temperaturen in den Vorflutern) erteilt worden, weil die Sicherung der Energieversorgung (z.B. auch für die Kühlung in Krankenhäusern) als vorrangig gegenüber dem Gewässerschutz eingestuft wurde.

Wenn die Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher seltenen Extremereignisse zufolge des Klimawandels höher werden sollte (weiche Aussage), ist abzuwägen, ob nicht durch die Schaffung der Voraussetzung für rasche, allerdings zeitlich stark begrenzte Eingriffsmöglichkeiten in bestehende Rechte und Schutzinteressen eine wirtschaftlichere Problemlösung erreicht werden kann, als durch aufwendige technische Maßnahmen, die nur sehr selten zum Einsatz kommen.

Folgen der erwarteten Temperaturerhöhung

Generell ist zu erwarten, dass die Erhöhung der Lufttemperatur zu einer (weiteren) Erhöhung der Gewässertemperatur führt. Die Wassertemperatur wird durch Energiezufuhr (insbesondere fühlbare Wärme, Sonneneinstrahlung) und Energieverlust durch Verdunstung gesteuert. Wie auch die Daten zeigen (siehe Kapitel 6), wirkt sich ein Temperaturanstieg der Luft daher nur gedämpft auf die Wassertemperatur aus. Der Faktor für die Dämpfung liegt zwischen 0,5 und 0,9°C Δ Wassertemperatur pro °C Lufttemperatur. Bis 2050 ist mit einer Erhöhung der mittleren Jahreslufttemperatur gegenüber heute um ca. 1 °C (bis maximal 1,5 °C) zu rechnen, die zu einer Erhöhung der Wassertemperatur im Sommer um etwa 0,7 bis 1,1°C und im Winter um etwa 0,4 bis 0,5°C führen dürfte (siehe Kapitel 6). In jedem Fall ist damit zu rechnen, dass die Jahr zu Jahr Variabilität der mittleren Jahrestemperatur und der maximalen Temperaturen deutlich größer sind als etwa dekadische Trends (siehe Abbildung 11-4).

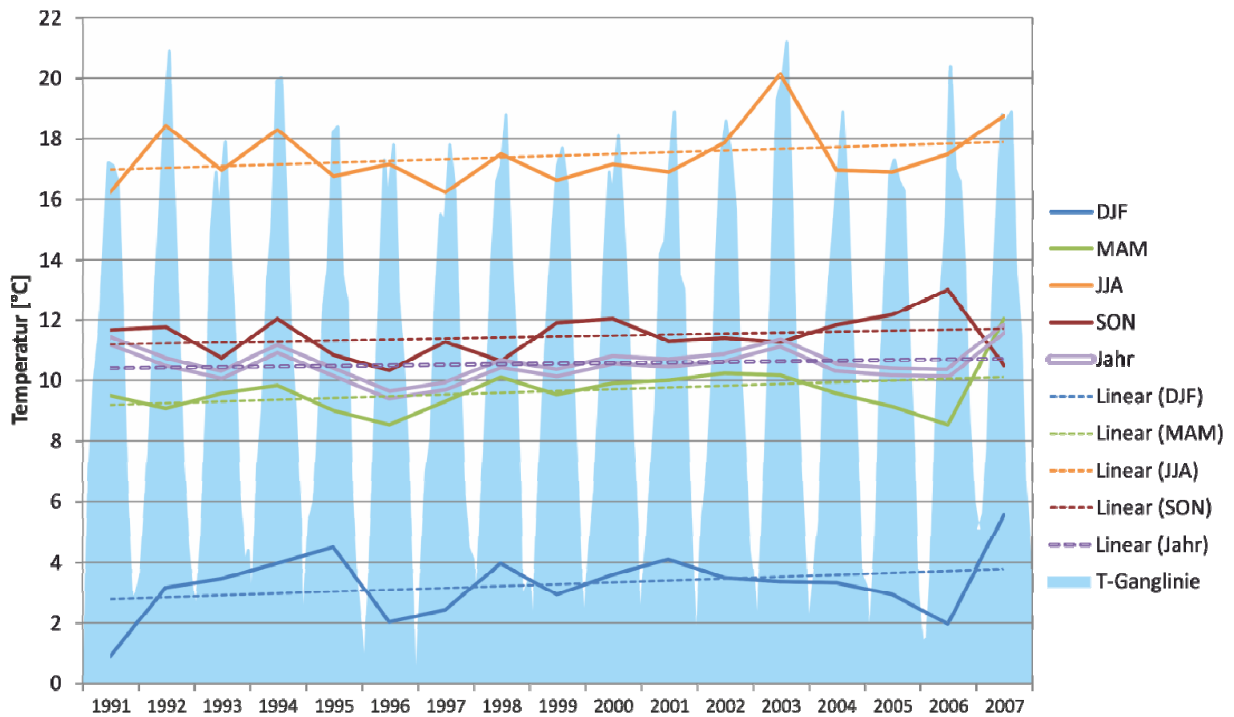


Abbildung 11-4: Entwicklung der Wassertemperatur der Donau bei Spitz. Tagesmittelwerte als Temperaturganglinie, Quartalsmittelwerte für Winter (DJF), Frühjahr (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) sowie Trendentwicklung für den Zeitraum 1991 bis 2007

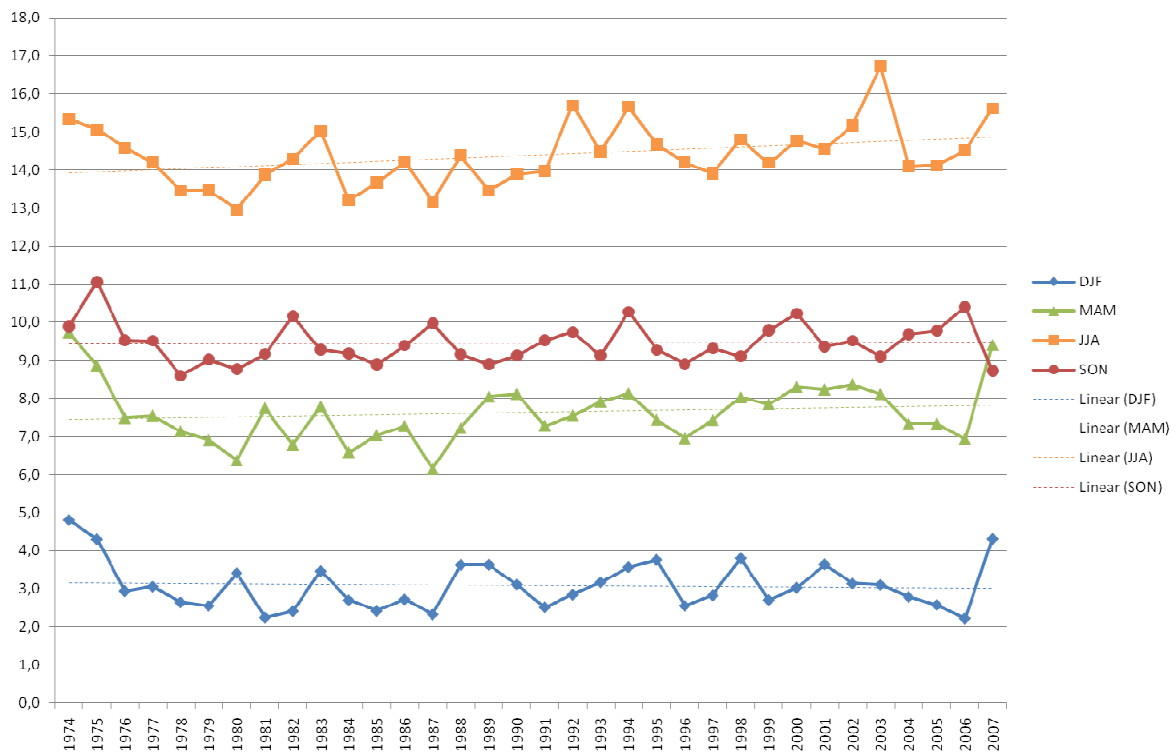


Abbildung 11-5: Saisonale Mittelwerte über aller HZB Daten 1974-2007 (Winter (DJF), Frühjahr (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON)) sowie Darstellung eines linearen Trends. Deutlicher Trend im Sommer (+1°C), geringer Trend im Frühjahr (+0,5°C), kein Trend im Herbst/Winter

Als weiteres Beispiel werden in Abbildung 11-5 die saisonalen Mittelwerte aller HZB Messwerte für den Zeitraum 1974-2007 dargestellt. Ein Vergleich der beiden Abbildungen (Abbildung 11-4 und Abbildung 11-5) zeigt zudem die Bedeutung der Datenbasis sowie Datenintegration für die Berechnung und Darstellung von Trends. Als Beispiel sei ein Vergleich der Trends der Wintermonate (DJF) in Abbildung 11-4 und Abbildung 11-5 genannt. Das generelle Bild der in Abbildung 11-4 für eine Messstelle dargestellten Jahresmittelwerte über die Wintermonate in der Zeitspanne 1991-2007 findet sich auch in den über alle HZB Stellen integrierten Daten in Abbildung 11-5. Während für die Einzelstelle und den kürzeren Betrachtungszeitraum jedoch ein eindeutig zunehmender Trend berechnet wird ($\sim + 0,6^\circ\text{C}$ pro Dekade), weisen die Daten der Langzeitreihe über alle Stellen im Winter keinen zunehmenden Trend aus.

Einfluss auf Löslichkeit von Gasen

Generell sinkt mit zunehmender Wassertemperatur die Löslichkeit von Gasen. Dies trifft sowohl auf Sauerstoff als auch auf Kohlendioxid zu. In Wasserkörpern kommt beiden Gasen eine wesentliche Bedeutung zu. Das Kohlendioxid ist wesentlich für die Ausprägung des Kalk-Kohlensäureverhältnisses sowie für die Primärproduktion und nimmt somit eine zentrale Bedeutung in der Lage des pH Wertes ein. Für Sauerstoff liegt sie vor Allem in seiner Bedeutung für aerobe Prozesse (Kohlenstoffatmung, Nitrifikation) und chemische Gleichgewichte (Rücklösung von immobilisierten Substanzen in Folge niedriger Redoxbedingungen – z.B. Mangan, Eisen) im Wasserkörper selbst sowie im assoziierten Interstitial und Sediment. Eine Anhebung der Wassertemperatur um 1°C (Szenario bis 2050) bewirkt eine Reduktion der 100% Sauerstoffsättigungskonzentration um etwa $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ Sauerstoff, was in Oberflächenwässern im „Guten Zustand“ nicht als wesentliche Veränderung anzusehen ist.

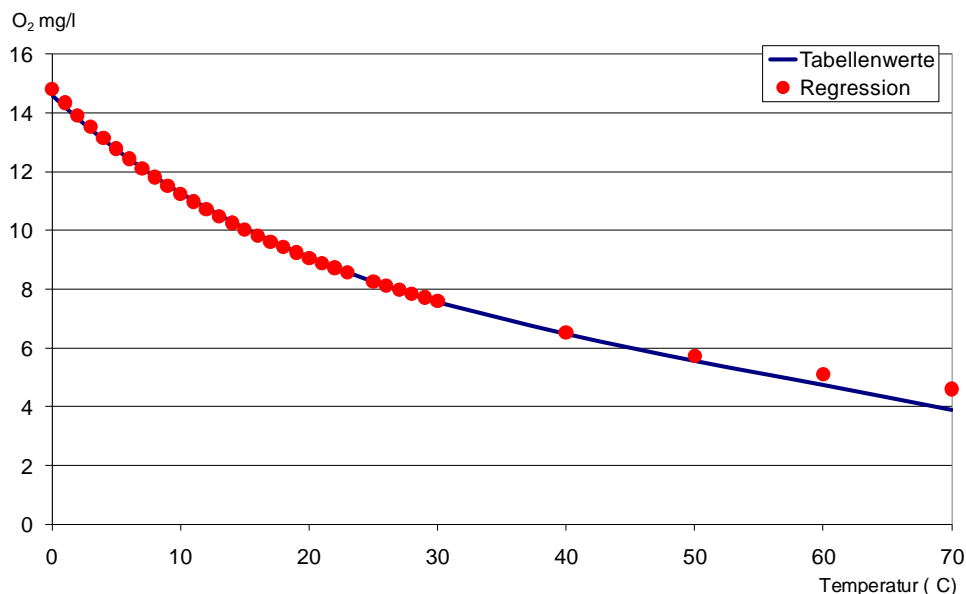


Abbildung 11-6: Zusammenhang Temperatur und Sauerstofflöslichkeit (100% Sättigungskonzentration) in wässrigen Lösungen

Biologische Prozesse

Für die Fließgewässer ist bis 2050 mit einer Erhöhung der mittleren Jahreslufttemperatur gegenüber heute von ca. 1°C (bis maximal 2°C) zu rechnen, die sich im ungünstigen Falle in einer Erhöhung der Wassertemperatur von etwas über 1°C in den Wasserkörpern

niederschlagen wird. Eine solche Temperaturerhöhung verursacht eine Erhöhung der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit aller Organismen um etwa 7 %, was für die Gewässergüte dann relevant sein kann, wenn die Gewässer durch organische abbaubare Verunreinigungen oder durch Eutrophierung belastet sind. Die Produktion von Algenmasse kann sich dort, wo sie nicht durch Phosphor limitiert ist, bei steigender Temperatur ebenfalls um 7 % bis maximal 20 % erhöhen.

Die Erhöhung der Wachstumsrate infolge einer Temperatur Erhöhung stellt einen der zentralen Mechanismen dar, der sowohl die Immissionen selbst als auch die Bewertungen der biologischen Qualitätselemente beeinflusst. Aus diesem Grund wird in einem Delta –Change Ansatz basierend auf realen Messwerten der Temperatureinfluss auf die Primärproduktion eines eutrophierten Fließgewässers modelliert, um eine Abschätzung der Bedeutung einer Temperaturerhöhung von +1,5°C auf biologische Prozesse zu ermöglichen:

Folgende Ausgangssituation (reale Messwerte) seien gegeben:

Wassertemperatur:	22,2 °C
Orthophosphat am Beginn der Modellstrecke:	0,073 mg L ⁻¹ PO ₄ -P
Orthophosphat am Ende der Modellstrecke:	0,012 mg L ⁻¹ PO ₄ -P

(dies entspricht einer Abnahme von 0,002 mmol P L⁻¹)

Unter Anwendung der „Redfield-Stöchiometrie“ für Algenbiomasse (C:N:P = 106:16:1) ergibt sich daraus eine Biomasseproduktion von 6,28 mg L⁻¹ mit einer Wachstumsrate $\mu = 0,64$. Somit werden in 2,8 h Fließzeit (Messwert), einem Abfluss von 5 m³/s (Messwert) und der Annahme von 50% Primärproduktion (Sonnenscheindauer) pro Tag etwa 2 t CO₂ fixiert und etwa 1,5 t O₂ freigesetzt, was auch die beobachtete Übersättigung von etwa 200 % Sauerstoffsättigung erklärt.

Wird nun im Model die Wassertemperatur um 1,5 °C erhöht, ändert sich die Wachstumsrate (unter Annahme einer Verdoppelung bei einer Differenz von +10°C) auf $\mu = 0,71$. Die Orthophosphatkonzentration würde von real 0,012 auf rechnerisch 0,010 mg L⁻¹ PO₄-P sinken, die Sauerstoffsättigung auf etwa 210% steigen. Die CO₂ Fixierung (Biomasseproduktion) und O₂ Freisetzung steigen um etwa 4% an, der pH Wert dagegen nur sehr gering. Wird zusätzlich auf Grund einer niedrigeren Wasserführung (auf z.B. 96% siehe Kapitel 5) die Fließzeit erhöht, so erhöht sich die Biomasseproduktion im betrachteten Abschnitt um 8% gegenüber den Messwerten (= Jetztzustand). Unter diesen Bedingungen tritt bereits trotz der eingangs hohen P-Konzentrationen ein P Mangel auf (errechnete P-Werte < 0).

Dies bedeutet, dass die Erhöhung der Wassertemperatur um 1,5°C sowie die Reduktion des Abflusses um 4% jeweils etwa eine ähnliche Auswirkung auf die Eutrophierung im Fließgewässer aufweisen und sich bei gleichzeitigem Auftreten summieren (harte Aussage). Regionen mit vermindertem Abfluss und höheren Sommertemperaturen sind somit von der Thematik stärker betroffen. Erwähnt werden muss in diesem Zusammenhang auch, dass die Primärproduktion in erster Linie von der Strahlungsintensität der Sonne (Stichwort Beschattung) und nicht von der Temperatur abhängig ist. Die Temperatur ist nur für die Reaktionsgeschwindigkeit unter Annahme unlimitierter Prozessbedingungen ein Kernfaktor.

Die zusätzlich gebildete Algenmasse stellt für das Gewässer eine zusätzliche Belastung mit organischen Kohlenstoffverbindungen dar, was den

Sauerstoffbedarf der Bakterien im Gewässer (speziell bei kleinen Gewässern in der Nacht relevant) erhöht. Die organischen Verunreinigungen werden bei steigender Temperatur ebenfalls mit höherer Geschwindigkeit, also auf kürzerer Fließstrecke unter erhöhtem Sauerstoffverbrauch abgebaut. Zuzufolge der geringeren Sättigungskonzentration für Sauerstoff (Abbildung 11-6) stellt sich das Gleichgewicht zwischen Sauerstoffverbrauch und Sauerstoffzufuhr bei einem niedrigeren Sauerstoffgehalt ein. Überall dort, wo schon heute die Gewässergüte durch Sauerstoffmangel (meist im Sediment) oder Eutrophierung beeinflusst wird, ist zuzufolge des projizierten Temperaturanstieges mit einer Verstärkung dieses Effekts zu rechnen.

Alle diese Phänomene führen zu einer Verringerung des minimalen Sauerstoffgehaltes im Gewässer und im Sediment / Interstitial. Der Sauerstoffgehalt im Sediment, insbesondere wenn er gegen Null geht, hat dominanten Einfluss auf die biologische Gewässergüte und auf die Qualität des vom Fließgewässer beeinflussten Grundwassers. Dies ist insbesondere bei der Entnahme von Uferfiltrat für Nutzungszwecke von Bedeutung und kann zur Notwendigkeit von zusätzlichen Aufbereitungsschritten führen. Wenn solche Uferfiltratentnahmen schon über die letzten 30 Jahre einen sinkenden Trend des Sauerstoffgehaltes aufweisen, muss damit gerechnet werden, dass sich dieser Trend fortsetzt und verstärkt.

Die projizierte Temperaturerhöhung hat daher Einfluss auf den Trophie- und den Saprobienindex (harte Aussage) und erhöht die Gefahr einer Verschlechterung des Zustandes von Wasserkörpern, wenn sie schon heute an der Grenze einer Güteklasse liegen. Daraus kann abgeleitet werden, dass für so bedrohte Gewässer verstärkt Maßnahmen zur Reduktion des Eintrages von abbaubaren Kohlenstoffverbindungen und Nährstoffen und zur Beschattung, eventuell auch Restrukturierungsmaßnahmen (Nährstoffretention in Uferstreifen) getroffen werden sollten. Diese Maßnahmen sind jedoch in den betroffenen Fällen jedenfalls zur gesicherten Erreichung des guten ökologischen Zustandes unabhängig von der Klimaentwicklung notwendig.

Chemische Gleichgewichte

Die Gefahr von Ammoniaktoxizität wird bei Temperaturerhöhung größer. Das Gleichgewicht Ammonium - Ammoniak verschiebt sich bei höherer Temperatur und bei höherem pH-Wert (zuzufolge erhöhten Algenwachstums bei Sonneneinstrahlung) in Richtung Ammoniak. Dort wo schon heute Ammoniakkonzentrationen nahe beim oder über dem Grenzwert auftreten, wird bei sonst gleichbleibenden Bedingungen die Gefahr der Ammoniaktoxizität mit steigender Temperatur und verstärktem Algenwachstum (steigender pH-Wert) größer.

Wegen der direkten Bedeutung und Relevanz der Ammoniak-Toxizität wurden die Ammoniumdaten des FW-Monitoringnetzes 1991-2009 in Hinblick auf die Überschreitung der aus pH und Temperatur abgeleiteten Grenzwerte der QZV-Chemie ausgewertet. Unter Zugrundelegung einer Erhöhung der Wassertemperatur von +1,5°C erfolgte eine Extrapolation der Situation 1991-2009 auf 2050, um eine Abschätzung der Auswirkung der Temperaturerhöhung auf die Überschreitungshäufigkeiten sowie den Überschreitungsbereich treffen zu können (Abbildung 11-7).

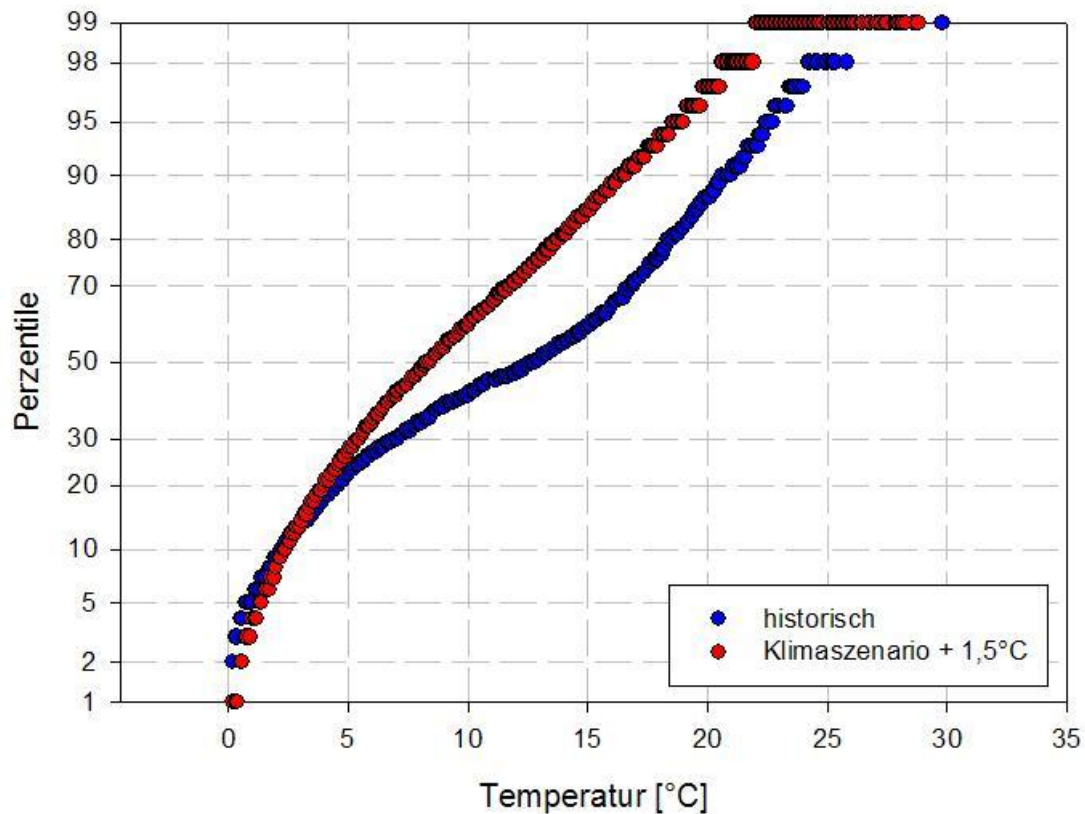


Abbildung 11-7: Überschreitungen des Ammoniumgrenzwertes der QZV-Chemie als Summenlinie in Abhängigkeit von der Immissionstemperatur. Datensatz: 44550 Datensätze des Immissionsmonitorings 1991-2009

Aus dem Datensatz von 44.500 Messwerten (FW Messnetz) wurden historisch 1.241 Überschreitungen des abgeleiteten Ammoniumgrenzwertes festgestellt. Die Überschreitungen betreffen nicht ausschließlich hohe Ammoniumimmissionen, sondern treten bei höheren Temperaturen auch bei niedrigeren Konzentrationen auf. Wird die Ausgangstemperatur nun um 1,5°C erhöht, werden basierend auf denselben Ammoniummesswerten nunmehr 1.375 (+10%) Überschreitungen modelliert.

Es ist erkennbar, dass die zusätzlichen Überschreitungen nicht zwangsläufig ausschließlich bei höheren Temperaturen auftreten, sondern tendenziell im mittleren und unteren Temperaturbereich unter 15°C Wassertemperatur liegen (Bereich unterschiedlichen Anstiegs der beiden Kurven). Dies bedeutet, dass in jenen Gewässerbereichen, die bereits jetzt im Bereich, aber unter dem Grenzwert, liegen die Thematik der Ammoniak Toxizität schlagend wird und nicht zu erwarten ist, dass in „guten“ Wasserkörpern die Thematik in Folge des Klimawandels akut neu auftreten wird (harte Aussage). Eine Regionalisierung der Überschreitungen nach Bioregionen (Tabelle 11-1) zeigt, dass allen Bioregionen von diesen zusätzlich auftretenden Überschreitungen betroffen sind und es hier zu keiner Akkumulation in den tieferliegenden Bioregionen (z.B. FH - Östliche Flach und Hügelländer) kommt.

Tabelle 11-1: Regionalisierung der Ammonium Überschreitungen nach Bioregionen
erste Spalte: Messwerte; zweite Spalte: Klimaszenario Wassertemperatur + 1,5°C

Zeilenbeschriftungen	Werte Summe von ÜS	Summe von ÜS 1,5
SA	0	0
AM	0	0
AV	28	35
BR	7	8
FH	596	658
FL	13	14
GF	68	80
GG	28	32
HV	1	1
IB	13	16
KH	13	17
KV	16	20
UZA	36	46
VAV	198	209
VZA	53	55
Gesamtergebnis	1241	1375

Wenn zusätzlich auch die Niedrigwasserabflüsse sinken (weiche Aussage) und die Verdünnungsverhältnisse für Ammoniumbelastungen schlechter werden, werden die Probleme weiter verschärft. Im Sommer 2003 sind in der Schweiz allerdings keine Fischsterben auf Grund von Ammoniumtoxizität berichtet worden weil die Immissionsqualität entsprechend gut ist und in dieser extrem heißen Periode auch keine durch Regenereignisse verursachte Abwasserentlastungen über Regenüberläufe aufgetreten sind. Die gute Nitrifikationsleistung Österreichischer Kläranlagen lässt dies auch für Österreich erwarten. Generell ist damit zu rechnen, dass es bei Starkregenereignissen nach länger anhaltenden Trockenperioden im Einflussbereich von Regenüberläufen dennoch zu Fischsterben kommen kann, weil der Abfluss im Kanal schneller erfolgt als im Gewässer und somit das Regenwasser über die Kanalisation schneller ins Gewässer transportiert werden kann, als der natürliche Abfluss anspringt. Dies ist ein spezielles Problem lokaler Regenereignisse im Kanaleinzugsgebiet und steht nicht im Zusammenhang mit dem Klimawandel. Die Schweiz ist aber dennoch dabei, die Grenzwerte für Ammonium im Ablauf der Kläranlagen bei geringen Verdünnungsverhältnissen im Vorfluter deutlich herabzusetzen (Entwurf der Schweizerischen Emissionsverordnung 2010). Eine vergleichbare Maßnahme könnte, zumindest bei kritischen Vorflutverhältnissen (z.B. auch beschränkt auf die Sommerzeit) in Österreich umgesetzt werden, weil sie fast kostenneutral ist. Bei den (hohen) Temperaturen im Sommer können alle Kläranlagen nach dem Stand der Technik auch so betrieben werden, dass die Ammoniumkonzentration im Ablauf z.B. 1 mg/l nicht übersteigt, was die Betriebsergebnisse vieler Kläranlagen in Österreich zeigen.

Verdünnung

Auch bei den Mikroverunreinigungen (z. B. prioritäre und sonstige in Österreich geregelte Stoffe) kann es im Falle sinkender Abflüsse auch bei gleichbleibendem Jahressabfluss, jedoch verändertem Abflussregime (längere Niederwasserperioden mit sinkenden Abflussminima) bei gleichbleibender Emissionssituation rechnerisch zu erhöhten Konzentrationen im Gewässer kommen. In Fällen wo Grenzwerte nur knapp unterschritten

oder schon heute überschritten werden, kann dies zu einer Verschärfung der Situation führen, die Maßnahmen bei den Emittenten erforderlich machen (vgl. Ammoniak Thematik).

Ufernahes Grundwasser

In oberflächennahen Grundwasserkörpern ist zufolge der erwarteten Erwärmung der mittleren Lufttemperatur mit einer Temperaturerhöhung von 0,5 °C bis maximal 1 °C zu rechnen, die jedoch zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich sein kann (harte Aussage). Alle biologischen Abbaugeschwindigkeiten werden dadurch erhöht. Dies führt zu einer verstärkten Zehrung von Sauerstoff. Zusätzlich verringert sich die Sauerstoffsättigungskonzentration des Wassers, das zur Grundwasserneubildung beiträgt (Abbildung 11-6). Beide Phänomene werden eine Verringerung des Sauerstoffgehaltes im Grundwasser verursachen. Wenn auf Grund dieser Zusammenhänge im Grundwasser anaerobe Bedingungen auftreten, kann es zu deutlichen Qualitätsveränderungen des Wassers kommen, die insbesondere für die Trinkwasserversorgung von Bedeutung sind:

- Rücklösung von Eisen und Mangan
- Verringerung der Entkeimungswirkung im Untergrund
- Auftreten von Geruchs- und Geschmacksproblemen
- Erhöhung von Ammonium- und Nitritkonzentrationen
- Reduktion von Nitrat
- Anstieg Huminstoffgehalt

Bei Grundwasserkörpern mit einem Trend zu sinkenden Sauerstoffgehalten oder Nitratgehalten, die nicht eindeutig auf verringerte Einträge aus der Landwirtschaft zurück zu führen sind, und für die bei Extrapolation des Trends mit Konzentrationen unter 2 mg/l Nitrat bzw. O₂ zu rechnen ist, wird angeregt, Untersuchungen für die Ursachen dieses Trends durchzuführen. Bei Trinkwasserversorgungen aus solchen Grundwasserkörpern kann dann die Errichtung oder eine Erweiterung von bestehenden Aufbereitungsanlagen erforderlich werden.

Für die Trinkwasserversorgungsunternehmen bedeutet der Temperaturanstieg, dass die Überlebenschancen vieler pathogener Keime im Leitungsnetz durch Zunahme der Biofilmproduktion an den Oberflächen der Trinkwasserleitungen sowie durch die erhöhte Wachstumsrate der Keime günstiger werden. Die Quantifizierung der Erhöhung des Infektionsrisikos wird sehr stark von der chemischen und hygienischen Beschaffenheit des Trinkwassers abhängen.

Neben der direkten, in den warmen Sommermonaten anzutreffenden oben beschriebenen Auswirkung der Temperatur auf die Qualität von Grundwasser bzw. Uferfiltrat soll hier auch auf einen möglichen Zusammenhang zwischen warmen Wintertemperaturen und dem resultierenden Grundwasserchemismus hingewiesen werden.

Im Sommer 2007 wurden im Uferfiltrat eines großen Gewässers weiträumig deutlich erhöhte Phosphorkonzentrationen (Abbildung 11-9) sowie unüblich hohe Ammonium und niedrige Sauerstoffkonzentrationen beobachtet. Die Analyse von möglichen Ursachen führte zu der Beobachtung, dass in den vorangegangenen Monaten infolge eines milden Winters 2006/2007 untypisch hohe Wassertemperaturen aufgetreten sind (Jänner, Februar, April bis zu + 2,5°C gegenüber Langzeitmittel - siehe Abbildung 11-8), die erst mit den Sommermonaten wieder dem langjährigen Trend folgten. Basierend auf diese Beobachtungen und unterstützt vom Wasserchemismus im Gewässer sowie Grundwasser wurde eine Arbeitshypothese zur Erklärung des Grundwasserchemismus im Sommer erstellt, der im Frühjahr 2007 möglicher Weise auch bei anderen Gewässern aufgetreten ist und bei warmen Wintern nicht untypisch sein könnte:

Neben den erhöhten Frühjahrstemperaturen 2007 waren im Gewässer auch die niedrigen Phosphor- (Abbildung 11-9a) und Silikatkonzentrationen (Abbildung

11-9b) im April / Mai auffällig. Infolge der ersten Algenentwicklung im Frühjahr, die üblicher Weise von Kieselalgen ausgeht, treten in Normaljahren im Mai deutlich reduzierte Orthophosphat und Silikatwerte auf (Abbildung 11-9). Im Frühjahr 2007 war diese Entwicklung deutlich ausgeprägter und bereits ein Monat vorher im April zu beobachten. Orthophosphat sank unter die Bestimmungsgrenze und auch das Silikat wies im April nur etwa 25% des langjährigen Mittels auf. Daraus kann geschlossen werden, dass infolge der milderen Temperaturen die Algenentwicklung bereits früher und mit einer höheren Wachstumsrate und Intensität erfolgte. Da die niedrigen Gewässerkonzentrationen an Phosphor keine Erklärung für die langfristig höheren Phosphorwerte im Grundwasser liefern können und nur die Freisetzung eines „Phosphorpoools“ ein derartiges Potential besitzen kann, kommen entweder eine Freisetzung aus einer Senke im Grundwasser (Altlast) oder die Hydrolyse der im Frühjahr gebildeten Algenbiomasse als Erklärung infrage. Ersteres kann auf Grund der lokalen Situation und dem Auftretensmuster der Phosphorerhöhungen ausgeschlossen werden. Die Hydrolyse der zuvor gebildeten Kieselalgenbiomasse ist infolge der jährlichen biozönotischen Algensukzession durchaus plausibel und kann auch innerhalb kurzer Zeit erfolgen (Überschreitung der internen Systemstabilität), was auch durch den Kurvenverlauf der Orthophosphatkonzentrationen im Uferfiltrat unterstützt wird, der einer typischen Abklingkurve mit Auswaschung eines Initialpeaks entspricht (Abbildung 11-9a).

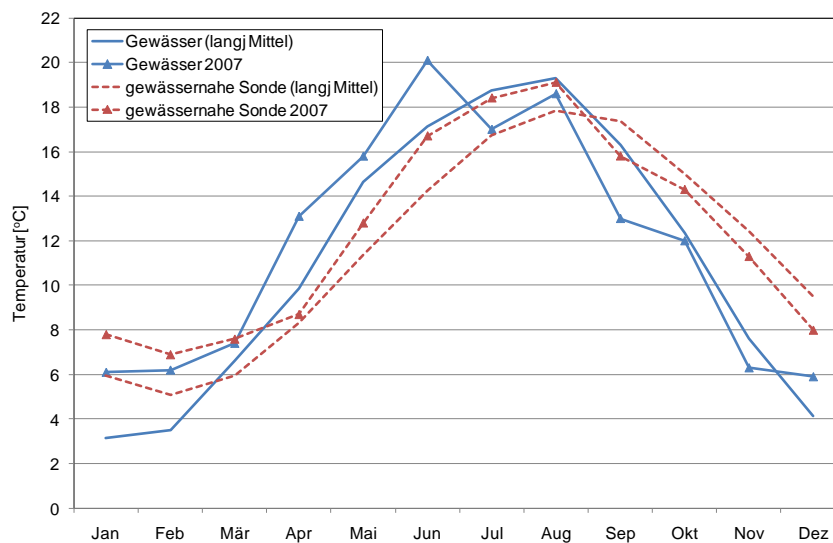


Abbildung 11-8: Vergleich der Wassertemperaturen als langjähriger Trend (1998-2008) sowie die Situation 2007 im Gewässer sowie im Uferfiltrat

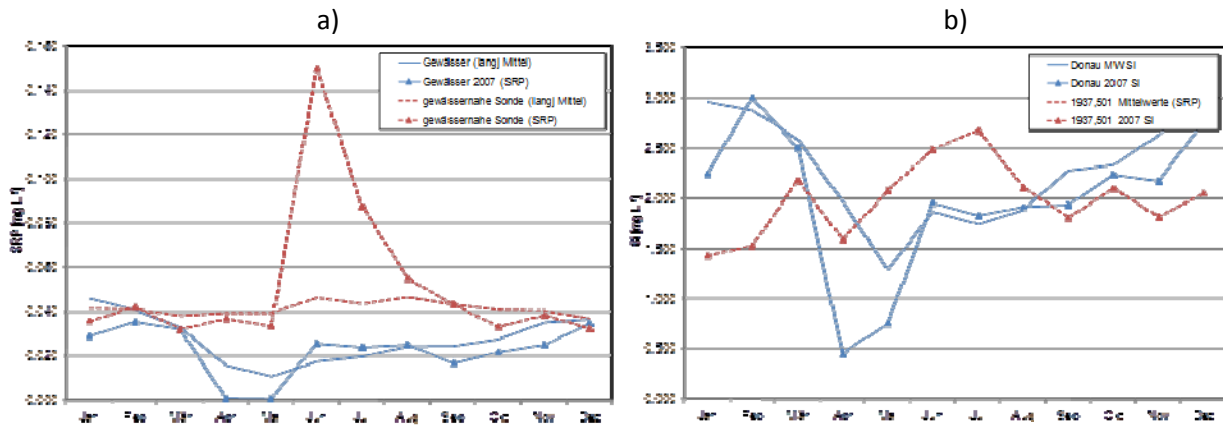


Abbildung 11-9:a) Vergleich der Orthophosphatkonzentrationen (SRP) sowie b) Silikatkonzentrationen (Si) als langjähriger Trend (1998-2008) sowie die Situation 2007 im Gewässer sowie im Uferfiltrat

Als weitere Konsequenz der Hypothese ergeben sich durch die vermehrte Hydrolyse der Algenbiomasse nicht nur höhere Phosphorkonzentrationen im Grundwasser, sondern auch höhere Stickstoffwerte und niedriger Sauerstoffwerte infolge des aeroben Abbaus der organischen Bestandteile. Daraus resultiert wiederum eine vermehrte Aufhärtung des Wassers durch Einstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts bei der Grundwasserpassage. Anaerobe Bedingungen die zur Rücklösung von Eisen und Mangan geführt hätten wurden in dieser Situation nicht gefunden, sind aber in anderen Fällen bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen nicht auszuschließen.

Obwohl es sich im dargestellten Fall um eine (jedoch konkrete) Einzelfallbeobachtung handelt, kann die Initiation der Kausalkette infolge milder Winter (= höhere Wassertemperaturen im Frühjahr) zukünftig nicht ausgeschlossen werden.

Einfluss der Klimaänderung auf Stoffeinträge in die Gewässer

Grundsätzlich kann ein verändertes Klima auch die Einträge von Stoffen in die Gewässer beeinflussen (diffuse Einträge aus landwirtschaftlichen Flächen oder über Mischwasserentlastungen).

Der wesentliche klimatische Einfluss auf Stoffeinträge (z.B. Phosphor) über Erosion ist das Auftreten von Starkniederschlägen. Da es derzeit keine gesicherten Aussagen über eine Zunahme von Starkregenereignissen gibt, können bezüglich einer allfälligen Zunahme von Emissionen durch die Erosion auch keine Aussage gemacht werden. Dasselbe gilt für Emissionen über Mischwasserentlastungen.

Der Stickstoffeintrag aus der Fläche in die Gewässer ist durch Klimaveränderungen gegensätzlichen Einflüssen ausgesetzt. Eine Erhöhung der Grundwasserneubildung kann zwar tendenziell zu geringeren Nitratkonzentrationen im Grundwasser führen. Die Frachten, die über das Grundwasser oder den Oberflächenabfluss in die Fließgewässer transportiert werden, können jedoch leicht steigen. Bei sinkender Grundwasserneubildung ist mit einem gegenteiligen Effekt zu rechnen. Steigende Temperaturen begünstigen Sauerstoffmangel in Grund- und Fließgewässern und können daher zu einem verstärkten Nitratabbau (Denitrifikation) entlang des Fließweges führen. Dies würde eine abnehmende Tendenz der Nitratkonzentrationen in Grund- und Fließgewässern, sowie der über das Grundwasser in die Fließgewässer eingetragenen Stickstofffrachten bewirken. Insgesamt sind die zu erwartenden Einflüsse des Klimawandels auf die Stickstoffeinträge in die Gewässer gering.

Die Beeinflussung durch das Stickstoffmanagement in der Landwirtschaft ist jedenfalls dominant.

Einfluss von Niedrigwasserabflüssen

Insgesamt sind die Aussagen über die Veränderungen von Niedrigwasserabflüssen auf Grund der zu erwartenden Klimaänderung bezüglich der Minima, ihrer Häufigkeit und Dauer bestenfalls mittelhart, bezüglich der absoluten Minima des Durchflusses und ihre Häufigkeit nur weich. Bei solchen Extremereignissen sind in kleinen Fließgewässern Fischsterben durch Trockenfallen von Fließgewässern zu befürchten, die aber offensichtlich durch Unterbrechung der Kontinua stärker beeinflusst werden als durch Veränderungen des Klimas, weil die Fluchtwege für die Fische unterbunden werden (Schweiz 2003).

Für allfällige Anpassungsmaßnahmen bedeutet dies, dass die Herstellung von guten morphologischen Zuständen im Gewässer, wie sie das WRG fordert, auch gleichzeitig die Gefährdung des Fischbestandes bei Verminderung der Niedrigwasserabflüsse durch Klimawandel deutlich verringert. Die Herstellung der Durchgängigkeit der Fließgewässer ist dort zeitlich prioritär,

- wo die Gefahr des Trockenfallens schon in der Vergangenheit erkannt worden ist,
- der mittelfristige Trend eine laufende Zunahme kritischer Zustände für den Fischbestand ergibt,
- und wo auf Grund der Ergebnisse der Klima- sowie der Niederschlags-Abflussmodelle ein Absinken der Niedrigwasserabflüsse erwartet wird.

Ob solche Probleme z. B. durch die Errichtung von Speichern zur Aufhöhung der Niedrigwasserabflüsse in Trockenperioden bekämpft werden sollen, kann nur über eine regionale Detailanalyse geklärt werden, in der auch ein allfälliger (erhöhter) Wasserbedarf der Landwirtschaft für Bewässerung in diesen Perioden berücksichtigt werden muss. Wie schon erwähnt, gibt es auch natürliche Ursachen für Fischsterben, die keine Anpassungsmaßnahmen erfordern.

12. Nutzungs- und Bedarfsaspekte

12.1 Kurzfassung

Vorüberlegungen (allgemeine Grundlagen)

- In Österreich werden zurzeit etwa 3% der erneuerbaren Wassermengen direkt entnommen und genutzt. Dies sind etwa 2,6 Milliarden m³ pro Jahr. Davon entfallen etwa 60% auf die Industrie (inklusive Kühlwasser), 35% werden für die Trinkwasserversorgung genutzt und etwa 5% in der Landwirtschaft.
- Durch eine Förderung des Bewusstseins der Bevölkerung zum schonenden Umgang mit der Ressource Wasser und der Installation von wassersparenden Geräten im Haushalt konnte der durchschnittliche Wasserverbrauch der Haushalte gesenkt werden.
- Regionale Unterschiede im Wasserverbrauch resultieren aus demographischen Entwicklungen wie etwa einer Zu- und Abnahme der Bevölkerungszahlen, dem Auspendeln der Einwohner oder der Nutzung von Liegenschaften als Zweitwohnsitz.
- Für Bemessungen von Einrichtungen der Siedlungswasserwirtschaft sind anthropogene Veränderungen bedeutsamer und rascher als klimatisch bedingte. Dimensionierung und Funktion technischer Anlagen werden durch Minima der Temperaturen und hydraulische Maxima bestimmt, für die die Klimamodelle derzeit keine gesicherten Aussagen treffen können.
- Die Entwicklung der Bemessungsansätze für den Umgang mit Wasserdargebot und Bedarf, die technische Infrastruktur sowie die legislativen Rahmenbedingungen haben in Österreich die Versorgungssicherheit für alle Nutzungsaspekte und die Durchsetzung eines strengen Vorsorgeprinzips auf ein sehr hohes Niveau geführt, sodass aus den Klimaszenarien kein gesicherter Bedarf für Änderungen abgeleitet werden kann.
- Dort wo Änderungen des Niederschlagverhaltens zufolge des Klimawandels auf die Bemessung siedlungswasserwirtschaftlicher Infrastruktur Einfluss haben könnten (z.B. Kanalbemessung) sind sie indirekt berücksichtigt, da die Bemessungsregeln statistisch aus den vorhandenen Datenreihen abgeleitet werden. Nachdem die Klimamodelle derzeit keine Aussagen über die statistische Verteilung von Starkregen erlauben, sind daraus auch keine Änderungen ableitbar.

Situation in der Vergangenheit

- Trotz des generell sehr hohen Wasserdargebots in Österreich kommt es regional und lokal zu quantitativen und vereinzelt qualitativen Engpässen in der Bedienung von Nutzungswünschen und bei der Bedarfsabdeckung. Die Ursachen dafür liegen vor allem in der unterschiedlichen Verteilung der Niederschläge und geologischen Gegebenheiten im Bundesgebiet (*harte Aussage*).
- Im Haushaltsbereich wird heute von einem Wasserbedarf von 130 Liter pro Einwohner und Tag ausgegangen. Damit hat sich der durchschnittliche Bedarf von 150 Liter pro Einwohner und Tag in den letzten 20 Jahren um 20 Liter verringert (*harte Aussage*).
- Die Kosten für Brauch- und Prozesswasser im Zusammenhang mit einem modernen Wärme- und Stoffstrommanagement stellen bereits heute einen wesentlichen Kostenfaktor für die Industrie dar, sodass in diesem Sektor eine starke Tendenz zur Kreislaufführung und damit zur Verringerung des Wasserbedarfes beobachtet werden kann (*harte Aussage*).
- Die Veränderungen der Ansprüche der Gesellschaft an die Wasserversorgung und -nutzung dominieren die Bemessungsansätze der Siedlungswasserwirtschaft und

bedingen laufend raschere Anpassungsmaßnahmen, als dies durch die Veränderung der klimatischen Bedingungen erwartet werden kann (*harte Aussage*).

- Die Versorgungssituation im heißen und durch eine besonders lange Trockenperiode charakterisierten Sommer 2003 kann für alle Aspekte des Wasserbedarfs sowie der Nutzungsaspekte als Kriterium für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit herangezogen werden (*harte Aussage*).

Situation in der Zukunft

- Aufgrund der hohen Wasserverfügbarkeit in Österreich ist von keinem durch Klimaszenarien abgesicherten großräumigen Mangel an Rohwasser für die Wasserversorgung auszugehen (*harte Aussage*).
- In den Regionen, die bezüglich des Wasserdargebotes ungünstige Rahmenbedingungen für die Versorgung und Nutzung aufweisen, wird allerdings die Vulnerabilität steigen oder bestenfalls gleich bleiben (*harte Aussage*).
- Auf lokaler Ebene ist besonders für kleine Versorgungseinheiten mit ungünstigen Rahmenbedingungen (z.B. keine ausreichenden Rohwasservorkommen infolge geologischer Verhältnisse, keine Pufferung des Spitzenwasserbedarfs durch kurze Leitungslängen, keine Redundanz durch Vernetzung) eine Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit zu befürchten (*mittelharte Aussage*).
- Durch die weitere Verbreitung wassersparender Technologien ist mit einem weiteren Sinken des durchschnittlichen Wasserbedarfs in den Haushalten zu rechnen, wenn die in anderen Regionen Europas bereits beobachteten Trends auch in Österreich wirksam werden (*mittelharte Aussage*).
- Eine regional unterschiedliche Zunahme des Wasserbedarfs für Gartenbewässerung ist zu erwarten (*mittelharte Aussage*).
- Qualitative Beeinträchtigungen in der Wasserversorgung sind als Folge vermehrten Bakterienwachstums durch höhere Temperaturen in den Versorgungsleitungen sowie vermehrter Verwertung von AOC (assimilierbarem organischen Kohlenstoff aus Rohwasser) nicht auszuschließen. Beide erhöhen die Gefahr der Wiederverkeimung von Trinkwasser (*weiche Aussage*).
- Durch die Erhöhung der Lufttemperaturen kommt es zu einer Erhöhung der Evapotranspiration und damit auch des Pflanzenwasserbedarfs landwirtschaftlicher Kulturen (*harte Aussage*). Der dadurch bewirkte zusätzliche Wasserbedarf wird möglicherweise durch zunehmende Niederschläge kompensiert (*weiche Aussage*). Anderenfalls entsteht ein erhöhter Bewässerungsbedarf, der durch Änderung der Bewirtschaftungsform kompensiert werden könnte (*weiche Aussage*).
- Bedingt durch die höheren Gewässertemperaturen wird es bei der Nutzung von Oberflächenwasser als Kühlwasser dort zu Einschränkungen im Kraftwerksbetrieb bzw. in der Industrie kommen, wo schon heute die zulässige Aufwärmung der Gewässer weitgehend oder zur Gänze ausgeschöpft ist. Schon heute auftretende Beschränkungen werden vermehrt auftreten (*harte Aussage*).
- Die Veränderungen der Niederschlagshöhe und der zeitlichen Verteilung der Niederschläge über das Jahr hat eine Veränderung der Belastung der Gewässer durch Regenentlastung von Mischkanalnetzen sowie von Regenwasserabflüssen aus den Regenwasserkanälen von Trennsystemen zur Folge (*weiche Aussage*). Die Quantifizierung der klimabedingten Veränderungen ist mit den derzeitigen Klimamodellen jedoch nicht möglich.

Anpassungsmaßnahmen

- Es wird empfohlen, die Erfahrungen aus dem Sommer des Jahres 2003 in Hinblick auf Nutzungs- und Versorgungsengpässe auszuwerten um daraus Schlüsse für Maßnahmen zur Erhöhungen der Redundanz abzuleiten
- Für die Dokumentation der Auswirkungen klimatischer Veränderungen und für zukünftige wasserwirtschaftliche Entscheidungen ist eine solide Datenbasis erforderlich. Das wasserwirtschaftliche Monitoring ist in Hinblick auf die Beantwortung quantitativer und qualitativer Fragestellungen zu überprüfen und gegebenenfalls zu adaptieren. Auch die Nutzer sollen zur besseren Dokumentation ihrer Verbräuche angehalten werden.
- Die zukünftig zu erwartenden höheren Oberflächen- und Grundwassertemperaturen sind bei bestehenden und zukünftigen Wärmeeinleitungen zu berücksichtigen. Die Überlegungen sollen alternative Verfahren für die Kühlung, Variantenuntersuchungen und Ausnahmegewilligungen für Extremsituationen umfassen.
- Wasserversorgungsanlagen in Regionen die bezüglich des Wasserdargebotes ungünstig sind, sollten sich um ein zweites Standbein oder Vernetzung bemühen. Für Einheiten, deren Anschluss an zentrale Anlagen wirtschaftlich nicht realisierbar ist, sollen Engpasswasserversorgungsmöglichkeiten und entsprechende Managementpläne konkretisiert werden.
- Für den Fall von Nutzungskonflikten in Zeiten von Engpässen sind bereits vorsorglich Priorisierungen der Wassernutzung zu überlegen.

12.2 Einleitung

Die Sicherstellung der Wasserversorgung mit ausreichendem Wasser in ausreichender Qualität zählt zu den Kernaufgaben der Siedlungswasserwirtschaft. Für Österreich wird ein jährlicher Wasserverbrauch von $2,6 \times 10^9$ m³/Jahr angegeben, was etwa 3% der auf Bundesgebiet erneuerbarer Wassermengen ausmacht. Etwa 60% der Wasserressourcen werden von Industrie und Gewerbe (inkl. Kühlwasserbedarf) verwendet, etwa 35% für die Trinkwasserversorgung und 5% für die Landwirtschaft. Es sind dies über das gesamte Bundesgebiet gemittelte Werte, die regional je nach Siedlungsstruktur, Art der Industrie, Kühlwasserbedarf und eventuellem Bewässerungsbedarf für die Landwirtschaft schwanken. Neben dem Bedarf selbst muss die Erfüllung der Erfordernisse desselben durch die Versorgungsunternehmen einerseits und eine direkte Nutzung lokaler Wasserverfügbarkeiten andererseits lokal differenziert werden, um Auswirkungen von Ressourcenknappheit in Folge von potentiellen Klimaauswirkungen abschätzen zu können.

Bei den Auswirkungen muss zwischen quantitativen Aspekten und qualitativen Aspekten unterschieden werden. Die qualitativen Aspekte werden im entsprechenden Kapitel dieser Studie ausgeführt, die quantitativen Aspekte eines durch klimatische Effekte veränderten Bedarfs werden spartenspezifisch hier abgehandelt. Für eine Abschätzung eines veränderten quantitativen Wasserbedarfs können grundsätzliche Überlegungen zur Entwicklung des Wasserbedarfs infolge Klimaänderungen angestellt werden. Auf Grund der Verfügbarkeit von Wasser in Österreich und der prozentuellen Nutzung der erneuerbaren Wassermengen ist jedoch auch zukünftig nicht von einem generellen Mangel an Rohwasser für die Wasserversorgung auszugehen. Infrastrukturelle Aspekte werden jedoch zukünftig lokal sehr wohl zum Tragen kommen. Zu deren Evaluierung kann eine Auswertung des trockenen Sommers 2003 herangezogen werden, welche etwa in der Schweiz systematisch durchgeführt wurde (BAFU 2004). Hier sollte jedoch beachtet werden, dass die Situation im Sommer 2003 keineswegs die Regel für den hier betrachteten Zeitraum darstellt, dass derartige Situationen jedoch durchaus öfter auftreten können.

Bei der Diskussion über die Verwendung von Wasserressourcen ist es wichtig zu unterscheiden und zu berücksichtigen, ob es sich dabei um den „Gebrauch“ des Wassers

handelt, bei dem die Beschaffenheit (Güteindikatoren) aber nicht die Menge verändert wird (z.B. Kühlwasser, Prozesswasser, Trinkwasser) oder auf den „Verbrauch“ von Wasser, bei dem das Wasser etwa durch Verdunstung dem System entzogen wird (z.B. landwirtschaftliche Bewässerung, Gartenbewässerung). Dies ist insbesondere für die Auswirkungen auf ökologische Parameter in Oberflächenwasserkörpern sowie eine weitere anthropogene Nutzung dort relevant wo quantitative Aspekte eine Rolle spielen (z.B. Restwasser – Fische; Kühlwasser – Kraftwerke).

12.3 Haushalte

Die Trinkwasserversorgung der Haushalte erfolgt zu etwa 50% aus Porengrundwasser und zu etwa 50% aus Karst- und Kluftgrundwasser (Quellwasser). Die Versorgung erfolgt dabei mehrheitlich über zentrale Versorgungsanlagen, nur 13% der Bevölkerung werden über Hausbrunnen oder kleinere Wassergenossenschaften beliefert. Die 14 größten Wasserversorgungsunternehmen (mehr als 50.000 Einwohner) versorgen 4 Millionen Einwohner. Der durchschnittliche tägliche Verbrauch wird mit 130 l/Tag angegeben und ist in den letzten 30 Jahren um etwa 20 l/Tag gesunken. Die Gründe für diesen sinkenden Trend sind hauptsächlich im Einsatz moderner wassersparender Weißware wie Geschirrspülern und Waschmaschinen, im Einbau wassersparender Spüleinrichtungen auf Toiletten aber auch in einer Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung im schonenden Umgang mit Wasser zu suchen. Auch hier müssen regionale und demografische Unterschiede mit berücksichtigt werden, die zu lokalen Unterschieden im tatsächlichen Wasserverbrauch führen. Einen weiteren Aspekt in der Wasserversorgung stellt die Bereitstellung und Bevorratung von Löschwasser dar.

Während bei einzelnen Nutzungsbereichen wie Trinken, Kochen, Wäschewasch, Körperpflege oder Toilettenspülungen von einem bundesweit ähnlich hohem Bedarf auszugehen ist, kann es beim Outdoorbedarf wie Gartenbewässerung oder Autowaschen zu regionalen Unterschieden kommen. Die Zunahme der Verbreitung von privaten Pools im ländlichen und periurbanen Bereich kann speziell zum Zeitpunkt der Befüllung (üblicher Weise im Mai/Juni) einen kurzfristigen wesentlichen Anstieg im Wasserbedarf verursachen. Der erwähnte Outdoorverbrauch stellt auch jenen Anteil am Wasserverbrauch dar, der am deutlichsten mit der Temperatur gekoppelt ist und somit erwartet werden kann, dass dieser klimabedingt außerhalb der Ballungszentren zukünftig ansteigen wird. Ein Ausmaß des Anstieges kann zwar nicht prognostiziert werden, da die menschlichen Handlungs- und Verhaltensweisen nicht prognostizierbar sind, durch Veränderung der zugeordneten Nutzungsmengen in Relation zur Gesamtmenge kann jedoch mittels einer Sensitivitätsanalyse die Bedeutung einer hypothetischen Veränderung abgeschätzt werden. Unter der Annahme, dass der Anteil an Gartenbewässerung, Poolbefüllung und Autowäsche derzeit bei etwa 10% (13 Liter) des Gesamtbedarfs liegt, würde eine Verdoppelung in diesem Bereich zu einer Erhöhung des Gesamtbedarfs um denselben Betrag führen und somit dennoch unter jenen 150 l/Tag liegen, die zum Zeitpunkt der Bemessung der Versorgung als durchschnittlicher Verbrauchswert herangezogen worden sind. Durch die Bemessung der Wasserversorgung auf einen statistisch definierten Spitzenwasserbedarf und den gleichzeitigen fallenden Trend im Wasserbedarf der Bevölkerung könnte dieser potenzielle Anstieg kompensiert werden. Aus der Zunahme des Wasserbedarfs sowie der Art und Weise der Bemessung der Wasserversorgung kann daher kein genereller klimabedingter Engpass bei der Versorgung abgeleitet werden. Abermals wird an dieser Stelle auf die Notwendigkeit regionaler Betrachtungen auf Versorgungsebene hingewiesen, da eine Betrachtung auf Bundesebene naturgemäß nicht alle kleinräumigen Rahmenbedingungen betrachten kann.

Wesentlicher als die Zunahme des Wasserverbrauchs würde sich eine kleinräumige klimabedingte Verminderung von Niederschlägen sowie Grundwasserneubildungsraten und Quellschüttungen im Sommer auf die Rohwasserverfügbarkeit für die Trinkwasserversorgung auswirken. Ein generelles Absinken auf Bundesebene ist für den

gegenständlichen Zeitraum nicht zu erwarten (siehe Kapitel 8). Je kleinräumiger die Versorgungseinheiten strukturiert sind und somit die Abhängigkeit von lokalen auch kleinräumigen Auswirkungen, je geringer die Redundanzen für Rohwasserentnahme und je weniger Infrastruktur in Form von überregionalen Verbundleitungen zur Verfügung stehen, um lokale und regionale Defizite zu kompensieren, desto höhere Auswirkungen wären zu erwarten. Speziell in Gebieten mit schwach ausgeprägten nicht zusammenhängenden Grundwasserkörpern wie im Kristallin oder Flysch ist dies zu berücksichtigen. Dies betrifft nicht nur die quantitativen Aspekte, sondern kann möglicher Weise auch in Hinblick auf qualitative Defizite zutreffen, wenn Extremereignisse die Rohwasserquellen negativ beeinflusst (zB. hygienische Beeinflussungen durch Starkregeneinflüsse oder Überflutung von Brunnen; Redoxbedingungen). Diese Überlegungen werden durch die Auswertungen des Extremjahres 2003 in der Schweiz (BAFU 2004) unterstützt.

Die Vernetzung der vor allem kleinen ländlichen Versorgungseinheiten untereinander und mit größeren Versorgern stellt hier einen wesentlichen Beitrag zur Gewährleistung einer zukünftigen Versorgungssicherheit dar. Es besteht kein quantitatives Problem auf der Rohwasserseite, sondern ein Bedarf, eine Sensitivitätsanalyse der vorhandenen Infrastruktur in Hinblick auf die Versorgungssicherheit durchzuführen und gegebenenfalls hier anzusetzen. Zudem kann bei Wässern, deren Nutzung eine im Vergleich zu Trinkwasser geringere Qualität erfordert und für die signifikanten Mengen verwendet werden (zB Golfplätze, öffentliche Grünanlagen, Straßenwasch) eine Wiederverwendung von entsprechend gereinigten Abwässern dort überlegt werden, wo sie wesentlich zur Steigerung der Versorgungssicherheit der Haushalte beitragen kann.

Auf Grund der Verfügbarkeit von Wasser in Österreich und der prozentuellen Nutzung der erneuerbaren Wassermengen ist auch zukünftig nicht von einem generellen Mangel an Rohwasser für die Wasserversorgung auszugehen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Aussage des ÖVGW (siehe Homepage Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach) in Hinblick auf die Nutzung von alternativen Rohwässern im Haushaltsbereich (Stichwort Regenwassernutzung für Indoor Verwendung) weiterhin seine Gültigkeit haben wird, wenngleich ein schonender und verantwortungsvoller Umgang mit der Ressource Wasser immer Bedeutung hat und eine weitere Verbreitung wassersparender Installationen im Sanitär- und Haushaltswaschbereich zu einer weiteren Reduktion des Gesamtwasserbedarfs führen wird.: „Fälschlicherweise wird oftmals die Nutzung von Dachablaufwasser (Regenwasser) mit "Wassersparen" in Verbindung gebracht. Dabei wird aber lediglich Trinkwasser durch Wasser wesentlich minderer Qualität ersetzt und deshalb in Summe gesehen nicht weniger Wasser gebraucht. Die Gefahren, die durch das in den meisten Fällen bakteriologisch nicht einwandfreie Wasser bestehen, sind beträchtlich.“ Die Zweckmäßigkeit einer weitläufigen Substituierung relevanter Wassermengen durch alternative Rohwässer für die Nutzung im Haushalt als strategische Maßnahme im Zusammenhang mit dem Klimawandel hätte abgesehen von den hygienischen und technischen Aspekten zudem wohl kaum einen positiven Effekt auf die Planung einer Wasserversorgung. Wenn sich etwa infolge ausbleibender Niederschläge die bevorrateten Wassermengen im privaten Bereich (z.B. in Zisternen) rasch verbrauchen, würde erst recht die öffentliche Versorgung in Anspruch genommen werden, sodass die Versorgungsplanung eventuelle private Kurzzeitspeicher nicht mit einbeziehen darf, sich die Planungsgrundlagen und der potentielle Wasserbedarf im Versorgungsgebiet somit nicht verändern und als Konsequenz die Nutzung alternativer Rohwässer keine Alternative für die Versorger sowie keine nachhaltige Strategie darstellt.

In Hinblick auf die Trinkwasserqualität sind temperaturbedingte Auswirkungen auf der Rohwasserseite und bei der Verteilung grundsätzlich denkbar, jedoch nicht abschätzbar. Hygienische Beeinflussungen können durch mit derzeitigem Wissensstand nicht abschätzbaren Starkregeneinflüsse oder Überflutung von Brunnen auftreten. Höhere Grundwassertemperaturen können Hydrolyseprozesse und chemische sowie biologische Prozesse im Aquifer beschleunigen, die sich auf die Redoxsituation, den Gehalt an Wasserinhaltsstoffen allgemein oder auch die Rücklösung von Eisen und Mangan auswirken. Hierbei muss jedoch festgehalten werden, dass die 2020-2050 auf den

Klimawandel zurückzuführenden Temperaturszenarien auch im Grundwasser weit unter den natürlicher Weise auftretenden jahreszeitlichen Schwankungen und auch geringer als die jährlichen Variationen ausfallen und deshalb von untergeordneter Bedeutung sein werden, wenn auch hier Extremsituationen - wie auch derzeit schon - nicht auszuschließen sind. Höhere Temperaturen bei gleichzeitiger längerer Aufenthaltszeit des Wassers in den Versorgungsleitungen (etwa in Folge eines niedrigen Wasserverbrauchs) haben das Potential, eine Biofilmbildung in den Rohrleitungen zu begünstigen, was sich auf die hygienische Qualität des Wassers auswirken könnte. Generell ist aber nicht von kritischen Auswirkungen auf die Trinkwasserqualität und damit einem höheren Aufbereitungsaufwand auszugehen, die sich mit den Auswirkungen eines Klimawandels in Zusammenhang bringen lassen.

12.4 Industrie

Der mit 60% angegebene Anteil der Industrie am Gesamtwasserbedarf in Österreich rührt hauptsächlich aus der Kühlwasserthematik her, die in diese Zahlen eingerechnet ist. Neben dem Kühlwasser sind die Prozesswässer der wesentlichste Faktor des industriellen Wasserbedarfs. Zudem erfolgen Wasserentnahmen in signifikanten Mengen (jedoch nur kleinräumig relevant) etwa auch für die Benässung von Holzlagern oder für die Waschung von Gütern (zB. Kies).

Die Kühlwasserthematik wird im Anschluss besprochen, da es sich hierbei um eine bedeutsame Nutzung in Hinblick auf die Versorgungssicherheit handelt. Die Einschränkungen in der Kühlwasserthematik ergeben sich primär auf Grund der Einleitungsbestimmungen für die Temperaturfrachten und sind somit über potentielle Veränderungen in der Immissionstemperatur als auch der Wasserführung direkt mit den Klimaszenarien verknüpft.

Die Thematik Prozesswässer wurde in den letzten Jahren zunehmend durch eine Kreislaufführung in der Industrie behandelt. Technische Systeme zur Aufreinigung verschmutzter Wässer und Kreislaufführung sind hier bereits oftmals im Einsatz um die benötigten Frischwassermengen auf ein Minimum zu reduzieren. Autowaschanlagen seien hier nur als ein dezentrales aber effizientes Beispiel genannt. Prozesswässer stellen in erster Linie ein quantitatives Thema dar, das ausschließlich von regionaler Bedeutung ist und somit nur kleinräumig beurteilt werden kann. Zudem ist nicht zu erwarten, dass es in Folge des Klimawandels zu einer Zunahme der Wasserentnahmen für Prozesswässer kommt. Wirtschaftliche Aspekte sind hier die treibenden Faktoren.

Als ein weiterer Aspekt im Zusammenhang mit dem industriellen Wasserbedarf kann der Betrieb von Kleinkraftwerken sowie anderer Betriebe mit direkter Wassernutzung und der Notwendigkeit einer Restwasserdotierung angesehen werden. In Regionen, in denen eine Abnahme der Niederwasserabflüsse zu erwarten ist (siehe Kapitel 1), ist mit zukünftigen Auswirkungen auf die Nutzung zu rechnen, wenn der natürliche Abfluss im Bereich oder unterhalb der geforderten Restwasserdotierung liegt (siehe Kapitel 1). Aussagen über konkrete Auswirkungen können nur im Einzelfall abgeschätzt werden, eine quantitative Aussage über das Bundesgebiet ist nicht möglich.

12.5 Kühlwasser für thermische Kraftwerke und Industrie

Die Funktion und auch der mechanische Wirkungsgrad von Kraftwerken und Industrieanlagen sind von der Effizienz des Abtransportes von Niedertemperaturwärme abhängig. Energetisch ist dieser Abtransport über Kühlwasser der günstigste, solange damit keine unzulässige Erwärmung der Gewässer zu befürchten ist. Die Bewilligung für die Ableitung einer Wärme fracht in Fließgewässer orientiert sich an der Biozönose, die dem

angestrebten Zustand des betroffenen Wasserkörpers entspricht. In die Berechnung dieser Wärmefracht geht sowohl der Durchfluss des Gewässers als auch seine Temperatur ein. Die zulässige Maximaltemperatur im Fließgewässer hängt aber auch von der Einstufung des Gewässers nach Bioregionen ab. Wenn der Klimawandel eine Erhöhung der Temperatur verursacht (harte Aussage), dann kann das einerseits bewirken, dass einige Wasserkörper in eine andere Bioregion einzustufen sind (Potamalisierung) und andererseits die Ableitung von Wärmefrachten aus Gewerbe, Industrie und Kraftwerken zumindest in kritischen Zeiträumen (lange sommerliche Trockenperioden) so weit reduziert werden muss, dass die zulässige maximale Temperatur im Gewässer nicht überschritten wird.

Das Ausmaß der Beeinträchtigung wird anhand eines „delta change“ Ansatzes exemplarisch abgeschätzt, wofür eine durchschnittliche Gewässererwärmung von + 1,5°C bis 2050 angenommen wird, was über den erwarteten mittleren Temperaturzunahmen liegt.

Ein konkretes Beispiel zur Abschätzung der Bedeutung der Gewässererwärmung von etwa + 1,5°C bis 2050 basiert auf Überlegungen zur Einleitung von Kühlwässern eines kalorischen Kraftwerks an einem größeren Gewässer unter Zugrundelegung realer Rahmenbedingungen des Zeitraums 1991 bis 2003. Für die Einleitung wurde folgende Annahme getroffen: „Die Temperatur des Abwassers darf an der Einleitstelle + 30 °C nicht überschreiten. Der Vorfluter darf um nicht mehr als 3 °C und nicht über + 25 °C erwärmt werden.“ Das Kraftwerk selbst weist 4 typische Wärmelastszenarien auf, von denen die Wärmeemissionen des mittleren „ungünstigsten“ Szenarios (im konkreten Fall ohne Wärmeauskopplung und Vollastbetrieb) für die Modellierung herangezogen wurde. Die Kraftwerksleistung wurde im Modell soweit angepasst bzw. ausgeschöpft, dass die Einleitkriterien an den Tagen der Periode 1991-2003 eingehalten werden (Temperaturwert: 12 Uhr mittags; Summe 4.470 Datensätze). In einem zweiten Schritt wurden die Wassertemperaturen dieser Periode entsprechend der Klimaszenarien 2050 um 1,5°C erhöht und die Berechnungen wiederholt.

Das Ergebnis für die Realperiode 1991-2003 sowie den Szenarienzeitraum 2038-2050 ist als Summenlinie in Abbildung 12-1 dargestellt. Beim Realszenario ist an 80,3% der Tage (entspricht durchschnittlich 293 Tage pro Jahr) ein Betrieb unter Vollast möglich, ohne die Einleitkriterien zu überschreiten. In 0,5% der Fälle muss die Kraftwerksleistung auf unter 50% gedrosselt werden. Im Szenarienzeitraum ist der Vollastfall in 77,5% der Fälle (entspricht durchschnittlich 283 Tage im Jahr) möglich, in 0,6% der Fälle (entspricht durchschnittlich 2 Tage im Jahr) muss der Betrieb unter 50% gedrosselt werden.

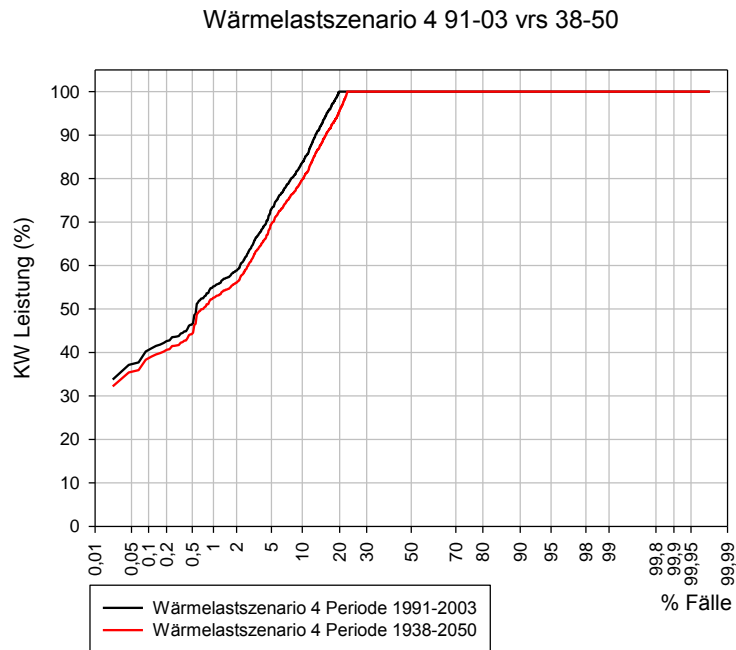


Abbildung 12-1: modellierte Reduktion einer Kraftwerksleistung (kalorisches KW) infolge geltender thermischer Einleitkriterien für die Realjahre 1991-2003 sowie extrapoliert auf den Zeitraum 2038-2050

Da es sich hier um statistische Summenlinien handelt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein reduzierter Betrieb über einen längeren Zeitraum hinweg notwendig ist. Die durchschnittlich 82 Tage pro Jahr mit reduziertem Betrieb könnten theoretisch auch am Stück auftreten, was versorgungstechnisch eine „Herausforderung“ darstellt, auf die es sich einzustellen gilt. Weiters wird angemerkt, dass es sich bei obiger Berechnung um die Annahme einer vollständigen Durchmischung der Wärmeemission im empfangenden Gewässer handelt, was in der Praxis auch angestrebt wird. Ob eine Volldurchmischung (speziell bei größeren Gewässern) jedoch immer die beste Lösung darstellt, sollte im Rahmen der Klimadiskussion überdacht werden. Die Umsetzung rasch volldurchmischter Einleitungen gewährleistet zwar niedrigere absolute Temperaturen, jedoch wird eine thermische Barriere über den gesamten Gewässerquerschnitt (den durchmischten Bereich) aufgebaut. Bei anderen Einleitungen, die zu einer Stratifizierung führen, werden zwar höhere Absoluttemperaturen an der Oberfläche beobachtet, jedoch fänden zB Fische durchgehendere unbeeinflusste Bereiche an der Sohle für die Migration vor. Auch die benthischen Lebewesen dürften von einer derartigen Situation mit niedrigeren Sohltemperaturen profitieren und das Grundwasser im Uferfiltrat weniger thermisch belastet sein. Die höheren Oberflächentemperaturen der Stratifizierung führen weiters zu einem besseren thermischen Ausgleich mit der Atmosphäre.

Von der Kühlwasserproblematik werden vor allem die Regionen nördliches und östliches Weinviertel, Burgenland, südliche und östliche Steiermark, Kärnten und Osttirol betroffen sein. Dort sollten für kritische Gewässer detaillierte Wärmelastpläne erstellt werden, um die Lenkung der Wärmeströme vorsorglich so zu regeln, dass für vorhersehbare Krisensituationen (Extremereignisse) klare Handlungsweisen für alle Betroffenen vorliegen. Es erscheint demnach sinnvoll, im WRG das BMLFUW für außergewöhnliche Extremsituationen zu ermächtigen, bei Konflikten zwischen Energieversorgung und Gewässerschutz (Beispiel Frankreich 2003) durch Erlässe zeitlich eng befristet die Begrenzung der maximalen Temperatur in Fließgewässern zu erhöhen, wenn dies durch

eine Güterabwägung (gelindestes Mittel) begründet werden kann (z.B: Gefährdung der Gesundheit von Menschen, Zusammenbruch der Energieversorgung). Industrie und Gewerbe muss in die Anpassungsmaßnahmen eingebunden werden, sodass sie in der Lage sind, über die eigenen Anpassungsmaßnahmen rechtzeitig Vorsorge zu treffen.

12.6 Landwirtschaft

Es soll hier nicht die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft erörtert werden, sondern der Zusammenhang zwischen landwirtschaftlicher Wassernutzung und Wasserwirtschaft hergestellt werden. In diesem Zusammenhang ist der Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung der zentrale Berührungspunkt in diesem Kapitel. Weitere Berührungspunkte liegen im qualitativen Bereich (Eintrag von Nährstoffen und Agrarchemikalien) und werden somit im Kapitel „qualitative Aspekte“ behandelt.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bewässerungsbedarf werden beispielsweise in EC (2009c) behandelt. Hier wird davon ausgegangen, dass die Bewässerung nicht der einzig relevante Faktor für den Ertrag in der Landwirtschaft ist. Falls Bewässerung notwendig wird, sollen einerseits effiziente Bewässerungssysteme und –verfahren eingesetzt werden und des Weiteren Bewässerungspläne entwickelt werden. Durch eine Steigerung der Bewässerung zur Kompensation des Niederschlags ist nicht unbedingt mit konstanten Ernteerträgen zu rechnen, weil eventuell auch mit mehr Extremereignissen und vermehrtem Schädlingsbefall zu rechnen ist. Ebenfalls wird die Anpassung bis hin zum Ausweichen auf andere Branchen wie z.B. Tourismus angedacht. In Oberforster (2009a) wird eine Anpassung der Sorten der Kulturpflanzen als notwendig erachtet, die komplette Änderung der Arten wird aufgrund des hohen Entwicklungsaufwandes der bereits angebauten Arten eher ausgeschlossen. In Eitzenberger et.al (2009) erfolgt wohl die umfangreichste Zusammenfassung und Darstellung des Themenkomplexes Landwirtschaft und Klimawandel, die zudem direkten Bezug auf Österreich nimmt. Neben grundsätzlichen Ausführungen zur Reaktion von Pflanzen und Tieren auf Klimafaktoren sowie Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft wird auch direkt auf die Bedeutung der Ressource Wasser eingegangen. Unter anderem wird die Adaptierung der Bodenpflege (zB Bestandverdunstung offener und begrünter Weingärten – Fläche zwischen Rebenzeilen), Optimierte Bewässerungssteuerung zB über den Bodenwassergehalt sowie die Optimierung des Wasserhaushaltes durch produktionstechnische Maßnahmen generell behandelt. Hier werden etwa humusaufbauende Maßnahmen sowie die Reduktion von Oberflächenerosion und Bodenbearbeitungssysteme thematisiert. Es wird festgestellt, dass die unproduktive Verdunstung unter ungünstigen Umständen mehr Wasser verbrauchen kann, als die Pflanzenverdunstung alleine. Wenn wassersparende Produktionsmaßnahmen nicht ausreichen, um den Wasserbedarf ohne starke Ertragseinbußen zu decken, wird als letzte Maßnahme die Installation von Bewässerungsanlagen dargestellt, wobei betont wird, dass insbesondere berechnete Sommerkulturen (als Beispiel wird Körnermais angeführt) beachtliche Summen an Wasserzufuhr pro Hektar benötigen und somit quantitative Einflüsse auf die zur Verfügung stehenden Wasserressourcen haben können.

In Österreich wird aus zwei Gründen bewässert: In Hinblick auf die Bedeutung des Einflusses des Klimawandels vernachlässigbar ist die Beregnung bei Frost zum Schutz von Blüten im Obstbau. Der zweite Grund liegt natürlich in der Bewässerung bei Trockenheit zur Ertragssicherung und/oder Ertragserhöhung. Das Wasser wird entweder aus lokalen Brunnen, Oberflächengewässern oder Teichen entnommen und die Bewässerung je nach Kulturpflanze unterschiedlich durchgeführt, wobei die Beregnung die wassermengenmäßig höchste Bedeutung hat.

Die Hauptbereiche einer landwirtschaftlichen Bewässerung liegen in Niederösterreich, Burgenland und in der Steiermark, die hauptsächlich bewässerten Kulturen sind Zuckerrübe, Kartoffel, Körnermais, Obst, Gemüse und Wein, die Bewässerung startet je nach Wetterbedingungen ab Mai/Juni.

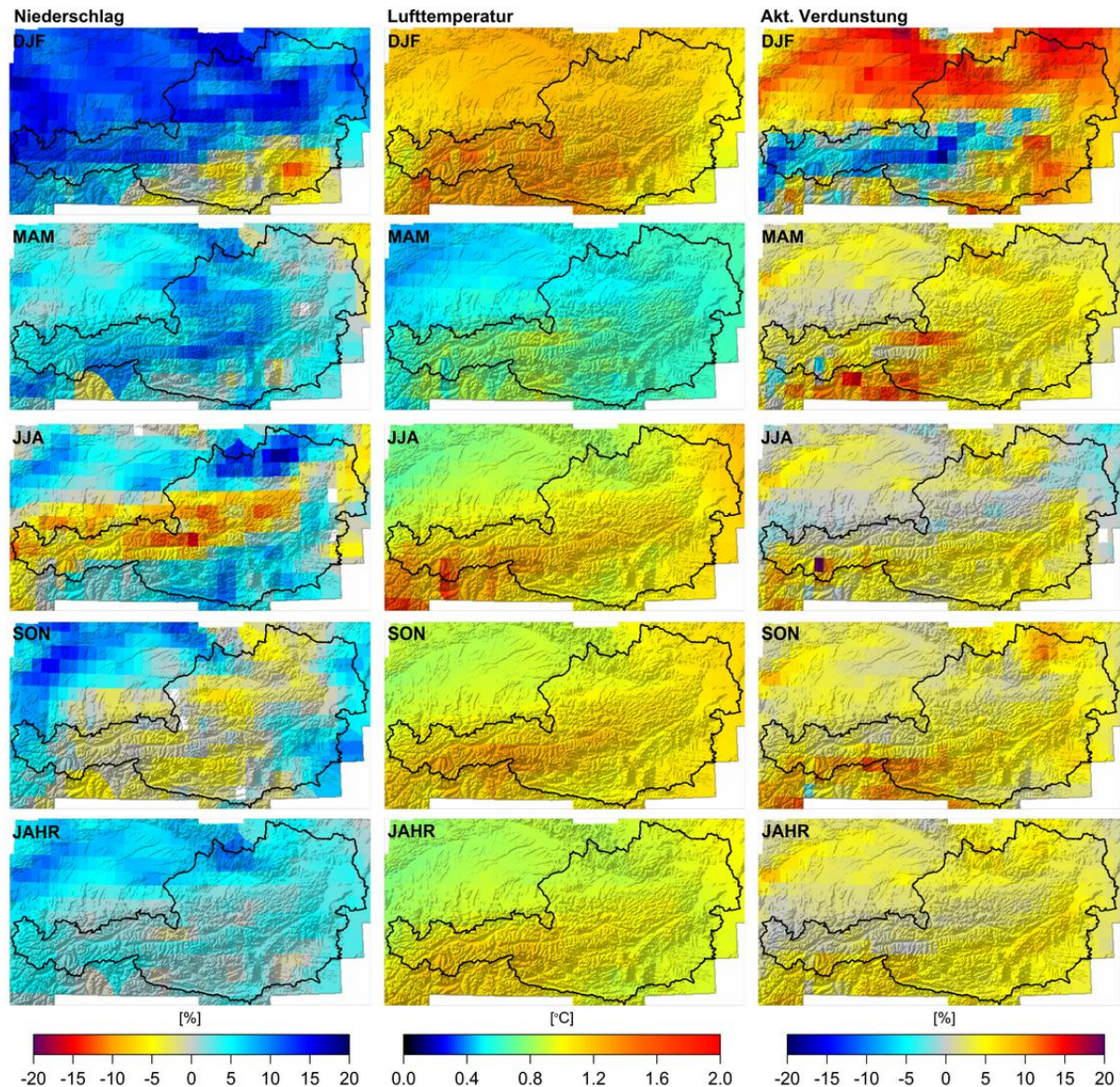


Abbildung 12-2: Basisdaten aus dem CLM Modellauf Zeitraum 2020-2050 als Eingangsgröße für die Abschätzung des zukünftigen Bewässerungsbedarfs in % bzw °C Zunahme gegenüber Referenzzeitraum 1976-2006. Daten integriert nach Jahreszeiten sowie als Jahresmittel

Aufgrund der abgesicherten Zunahme der Lufttemperaturen (CLM Modell ZAMG für Zeitraum 2020-2050) ist eine Zunahme der Verdunstung zu erwarten (Abbildung 12-2). Durch die Evapotranspiration geht das Wasser für weitere Nutzungen regional verloren, während alle anderen Nutzungen das Wasser zwar in seiner Qualität verändern, es aber in der Region verbleibt und zum Abfluss in den Fließgewässern beiträgt. Die Zunahme der Verdunstung ist in absoluten Zahlen gesehen regional unterschiedlich, bewegt sich im Mittel über das Bundesgebiet aber im Bereich von wenigen Prozenten. Für die Landwirtschaft speziell von Bedeutung sind die Niederschläge im Frühjahr (MMA) und in den Sommermonaten Juni, Juli, August (JJA) sowie die Verdunstung in diesem Zeitraum. In den Gebieten mit landwirtschaftlicher Bedeutung nehmen im Frühjahr die Niederschläge leicht zu, im Sommer zeigt sich ein etwas differenzierteres Bild. Im nördlichen Tullner Feld zeigen die Modellrechnungen kaum Änderungen, im Marchfeld sowie im Bereich der Parndorfer Platte etwas geringere Werte und im Pulkautal sowie in der Steiermark etwas größere Werte als die Referenzperiode 1976-2006. Für die Verdunstung wird im Frühjahr eine leichte

Zunahme modelliert, wogegen im Sommer die Werte im Osten Österreichs annähernd unverändert bleiben und ansonsten wie schon im Frühjahr leicht zunehmen.

Zur Abschätzung der Zunahme der Verdunstung wurden zudem die Ergebnisse des Klimamodells CLM mit der hydrologische Modellierung aus dem Kapitel 4 verglichen (Abbildung 12-3). Das Muster der Zunahme der Verdunstung nach diesen beiden Verfahren ist ähnlich, mit den größten Werten im Süden Österreichs. Allerdings ist das Niveau insgesamt unterschiedlich. Die mit dem Klimamodell CLM bestimmte Zunahme der Verdunstung liegt bei 5 bis 35 mm. Die mit dem hydrologischen Modell bestimmte Zunahme der Verdunstung liegt bei 5 bis 45 mm.

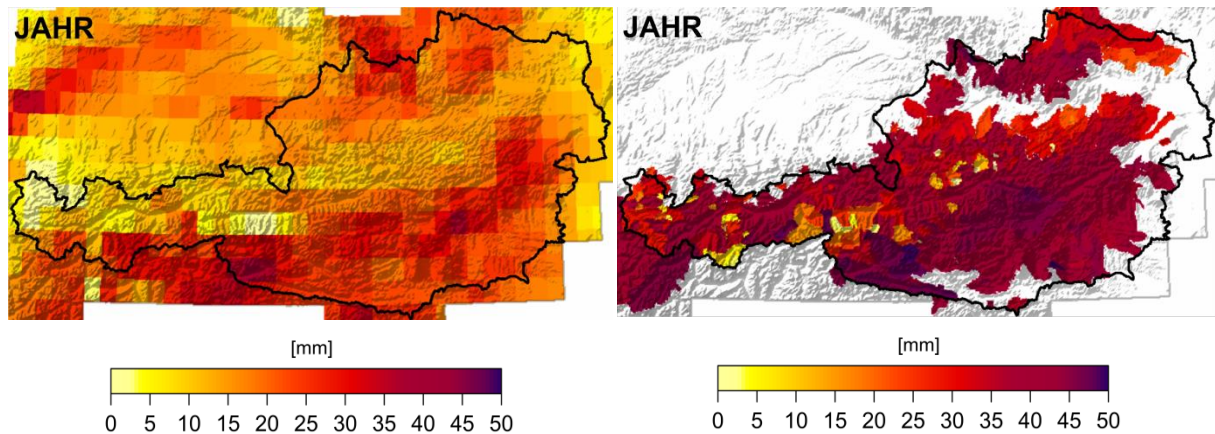


Abbildung 12-3: Zunahme der Jahresverdunstung (Aktuelle Evapotranspiration) für den Zeitraum 2020-2050 gegenüber Referenzzeitraum 1976-2006. Links: Werte aus dem CLM Modellauf. Rechts: Werte aus der hydrologischen Simulation (siehe Kapitel 4).

Zusätzlich wurden zur Beurteilung dieser Verdunstungswerte Messungen von 10 Verdunstungswannen in Tirol ausgewertet, um den aus den Modellen abgeleiteten Trend mit Messwerten zu unterstützen. Abbildung 12-4 zeigt die Verdunstungssumme für die Monate Mai bis Oktober der 10 Stationen. Die dicke rote Linie zeigt die Mittelwerte aus den 10 Stationen. Auffallend sind die hohen Verdunstungswerte im Jahr 2003. Eine Regressionsgerade (strichlierte Linie) ergibt einen Anstieg von 1,8 mm pro Jahr. 1,8% bedeuten in 30 Jahren eine Zunahme der Verdunstung um 54 mm. Das sind 15% der mittleren Verdunstung von 350 mm. Diese Auswertungen zeigen, dass durchaus mit einer bedeutenden Zunahme der Verdunstung zu rechnen ist.

In Abbildung 12-5 ist der Unterschied der potentiellen Evapotranspiration einer Standardgrasfläche für die Szenarienperiode 2020-2050 zur Referenzperiode 1976-2006 visualisiert. Die potentielle Verdunstung wurde nach der Blaney-Criddle Methode unter Verwendung der mit dem CLM Klimamodell simulierten Lufttemperatur bestimmt. Die Darstellung in Abbildung 12-5 beruht auf der Differenz der Mittelwerte für die einzelnen Monate im jeweiligen Betrachtungszeitraum. Die durchschnittlichen Monatsmittelwerte dienen als Eingangsgröße für die weiter unten angestellten Berechnungen mit dem Programm Cropwat, das den Pflanzenwasserbedarf sowie die effektiven = nutzbaren Niederschläge für unterschiedliche Kulturen modelliert. In den relevanten landwirtschaftlich genutzten Gebieten Österreichs vom Weinviertel über das Burgenland in die Ost-Steiermark wird eine Zunahme der mittleren potentiellen Evapotranspiration im Bereich von 30-40 mm erwartet. In Oberösterreich liegt die Zunahme mit einem Wert von 20-30 mm etwas niedriger.

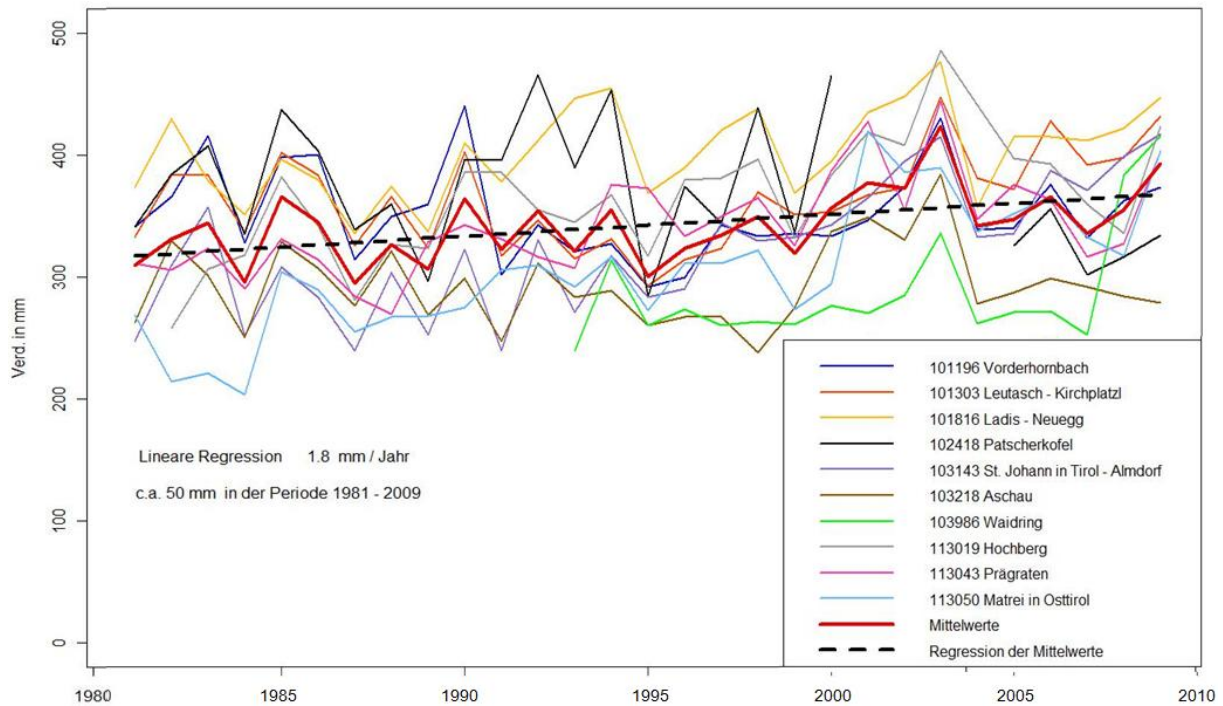


Abbildung 12-4: Messungen der Verdunstung für 10 Verdunstungswannen in Tirol. Verdunstungssumme für die Monate Mai bis Oktober. Die dicke rote Linie zeigt die Mittelwerte aus den 10 Stationen. Die Regressionsgerade (strichlierte Linie) ergibt einen Anstieg von 1,8 mm pro Jahr.

Zunahme der potentiellen Evapotranspiration

Deltawerte
von 1976-2006 und Klimaszenario (2020-2050)
Jahresmittelwerte

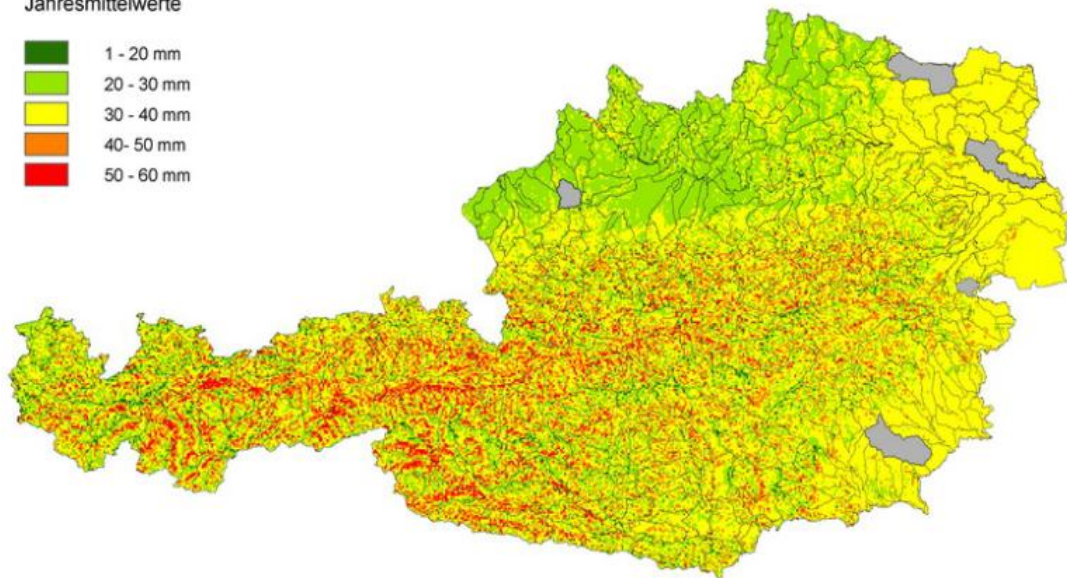


Abbildung 12-5: Zunahme der potentiellen Evapotranspiration (mittlere Jahreswerte der Unterschiede im „delta change“ Ansatz Zeitreihe 1976-2006 gegenüber 2020-2050) in Österreich. Grau: in weiterer Folge näher betrachtete Einzugsgebiete

Die Zunahme der Verdunstung muss für einen konstanten Ertrag über

- zusätzlichen Niederschlag
- künstliche Bewässerung
- oder verbesserte Nutzung des dargebotenen Niederschlages (z.B. Änderung der Anbaufrüchte)

kompensiert werden. Dabei spielen Boden- und Untergrundbeschaffenheit (Speicherung des Niederschlages als Bodenfeuchte), Feldlage (Hang oder Tallage) sowie Wind und Niederschlagsverteilung (der modellierte Niederschlag fällt gleichmäßig verteilt oder als Starkregen an) gleichsam eine zusätzlich wichtige Rolle, sodass ein Hinblick auf einen zusätzlichen Bewässerungsbedarf nur qualitative Betrachtungen angestellt werden können, welche ausschließlich auf den Veränderungen der im meteorologische CLM Modell direkt modellierten Faktoren Niederschlagsmenge, Temperatur und Verdunstung abgeleitet werden und Niederschlagsverteilung, Extremwerte oder andere relevante Einflussfaktoren nicht berücksichtigen.

Die Bearbeitung einer Abschätzung des zukünftigen Bewässerungsbedarfs als Einflussfaktor für die Wasserwirtschaft beruht deshalb auf zwei Ansätzen:

„Trading space for time“

In diesem Ansatz wird eine typische Feldfrucht (Zuckerrübe), für die sehr gute Daten über die vorgenommene Bewässerung vorliegen behandelt. Mittels der Software Cropwat (Version 8.0 der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)) wird der Pflanzenwasserbedarf mit entsprechenden Klimadaten auf Basis einer täglichen Bodenwasserbilanz modelliert.

Die Berechnung erfolgte als Mittelwert für die Kampagne 2008 in Österreich und weist für den Rübenanbau unter Berücksichtigung des Ertrags einen Wasserbedarf von etwa 270 m³/t Rübe aus. Der überwiegende Anteil von etwa 260 m³/t stammt aus Niederschlägen, etwa 10 m³/t wurden über Bewässerung zugeführt (Abbildung 12-6).

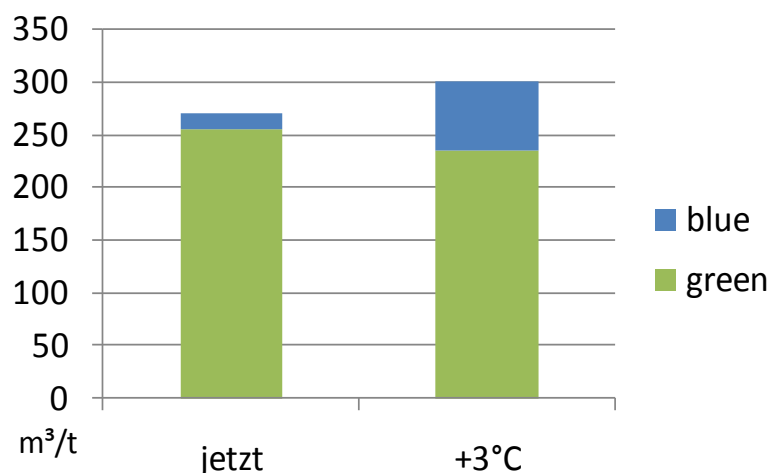


Abbildung 12-6: Wasserbedarf von 1 t Zuckerrübe in der Kampagne 2008 („jetzt“) gegenüber einem Klimaszenario von +3°C im „trading space vor time“ Ansatz. „green“: Niederschlagswasser; „blue“: Bewässerungswasser

Für denselben Zeitraum (Kampagne 2008) liegen auch die notwendigen Eingangsdaten für eine Berechnung des Pflanzenwasserbedarfs in einer Region vor, die gegenüber der Situation in Österreich eine etwa um 3°C höhere Lufttemperatur aufweist, wobei der

Hektarertrag sowie der Zuckergehalt mit jenem in Österreich vergleichbar ist. Diese um 3°C höhere Lufttemperatur liegt jedoch über den Ergebnissen des CLM-Szenario, die im Mittel über 2020-2050 in Österreich bezogen auf die Gegenwart zu erwarten sind, und wird deshalb als „worst case“ Szenario angesehen. Im „trading space for time“ Ansatz werden nun die heute in der Referenzlage +3°C beobachteten Werte als 2050 in Österreich zu erwartende Werte betrachtet.

Der Pflanzenwasserbedarf würde sich diesem Ansatz folgend für die Zuckerrübe auf etwa 300 m³/t erhöhen, was einem zusätzlichen Bedarf von etwa 10% bedeutet. Diese Zunahme ergibt sich aus der Zunahme der Evapotranspiration infolge der höheren Lufttemperaturen und muss nun kompensiert werden. Im gegenständlichen Modellfall in Abbildung 12-6 ist die höhere Temperatur zudem mit niedrigeren Niederschlägen gekoppelt, sodass neben dem zusätzlichen Pflanzenwasserbedarf infolge der vermehrten Verdunstung auch der fehlende Niederschlag durch Bewässerung kompensiert werden muss, der Bewässerungsbedarf steigt somit von 10 auf etwa 60 m³/t. Bleiben die verfügbaren Niederschläge (sowie die Pflanzenverfügbarkeit) gleich, muss nur die vermehrte Verdunstung von etwa 30 m³/t kompensiert werden. Beide Fälle (Verminderung der Niederschläge und Gleichbleiben der Niederschläge) führen somit zu einer Zunahme des Bewässerungsbedarfs, der aus Oberflächen- oder Grundwasser gedeckt werden muss. Da die Bewässerung in den Sommermonaten (JJA) erfolgt, fällt die Bewässerungsperiode mit den Perioden projizierter Verminderung der Abflüsse (siehe Kapitel 4) zusammen und verschärft somit die Abflusssituation in den Gewässern bzw. die Grundwasserneubildungsrate.

In Regionen wo erhöhte Evapotranspiration und sinkende Niederschläge durch Bewässerung kompensiert werden sollen, wird eine rigide Wasserbewirtschaftung und enge Zusammenarbeit zwischen Landwirtschaft und Wasserwirtschaft erforderlich, um kritische Reduktionen der Abflüsse bzw. der Grundwasserneubildung und Verschlechterungen der Gewässergüte zu vermeiden. Zudem kann eine Effizienzsteigerung in der Bewässerung selbst (Beregnung vrs. Untergrundbewässerung oder Berieselung) die Problematik entschärfen.

„Delta Change“ Ansatz

In dieser Projektion werden die Klimadaten der Referenzjahre 1976-2006 um die 2020-2050 erwarteten Klimaausprägungen verändert. Dies betrifft im gegenständlichen Ansatz die Lufttemperatur, Niederschlag und potentielle Evapotranspiration entsprechend Abbildung 12-3. Der demmaßen veränderte Datensatz wird abermals mittels Cropwat verarbeitet, wobei weitere Modelleingangsgrößen unverändert bleiben (zB. Bodentyp, Wind). Als Kulturfrucht wurde diesmal Sommergerste ausgewählt, die Kulturansprüche sind der FAO Datenbank entnommen. Das Ergebnis der Cropwat Modellierung ergibt den Pflanzenwasserbedarf, den effektiven Niederschlag sowie das Defizit in der Bodenfeuchte (Feldkapazität) zum Zeitpunkt der Ernte und einen eventuellen Bewässerungsbedarf. Die Ergebnisse der Modellierung sind in Tabelle 12-1 zusammengefasst.

Die Ergebnisse in Tabelle 12-1 sind für 5 Einzugsgebiete (Raab, Wulka, Rußbach, Pulkau, Antiesen) modelliert, indem die mittlere monatliche Verdunstung der Periode 1976-2006 und der Periode 2020-2050 im Einzugsgebiet berechnet wurde und in das Modell eingegeben wurden. Die Berechnungsergebnisse für die beiden Zeiträume sind jeweils angegeben.

Tabelle 12-1: Vergleich des Pflanzenwasserbedarfs für Sommergerste während der Vegetationsperiode in der Referenzperiode 1976-2006 im Vergleich zum Klimaszenario 2020-2050 sowie Ausweisung des effektiven Niederschlags und des Bodenwassergehalts (Feldkapazität) zum Zeitpunkt der Ernte. Werte in mm Niederschlag

Sommergerste	Wasserbedarf Pflanze	Effektiver Niederschlag	Feldkapazität Defizit zur Ernte	Bewässerung Bedarf
Raab (1976-2006)	334	266	68	68
Raab (MW 2020-2050)	342	318	24	24
Pulkau (1976-2006)	340	184	156	156
Pulkau (MW 2020-2050)	350	190	160	160
Rußbach (1976-2006)	350	177	173	173
Rußbach (MW 2020-2050)	359	188	171	171
Wulka	334	242	91	91
Wulka (MW 2020-2050)	347	282	65	65
Antiesen	313	293	20	20
Antiesen (MW 2020-2050)	325	315	10	10

Ein Vergleich des Wasserbedarfs für die beiden Zeiträume zeigt den zusätzlichen Pflanzenwasserbedarf infolge der gestiegenen Evapotranspiration. Weiters weist die Projektion für 2020-2050 bei den effektiven Niederschlägen im Klimaszenario Zunahmen aus, was bedeutet, dass der zusätzliche Wasserbedarf durch zusätzliche Niederschläge nicht nur kompensiert wird, sondern dass auch das Defizit in der Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Ernte (Feldkapazität) sinkt. Einzig im Einzugsgebiet der Pulkau steigt das Defizit gegenüber der Referenzperiode 1976-2006 leicht an. In allen Fällen hätte sich jedoch bei Projektion der zukünftigen Klimarahmenbedingungen auf den Zeitraum 1976-2006 kein zusätzlicher Bewässerungsbedarf ergeben. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt unter einer Reihe von Annahmen wie etwa einer gleichmäßigen Verteilung der zu erwartenden höheren Niederschläge und somit Pflanzenverfügbarkeit derselben. Würde dieselbe Niederschlagsmenge als Extremereignis in kurzer Zeit niedergehen, würden zwar dieselben Zahlenwerte in die Modellierung eingehen, die Pflanzenverfügbarkeit wäre jedoch in Abhängigkeit vom Bodentyp und Untergrund wesentlich geringer und tatsächlich ergäbe sich ein Bewässerungsbedarf. Da die zugrundeliegenden Modelle der Wasserbilanz keine veränderten Niederschlagsverteilungen ausgeben, ist auch keine Berücksichtigung in der Cropwat Modellierung möglich und die Ergebnisse der Berechnungen sind weich.

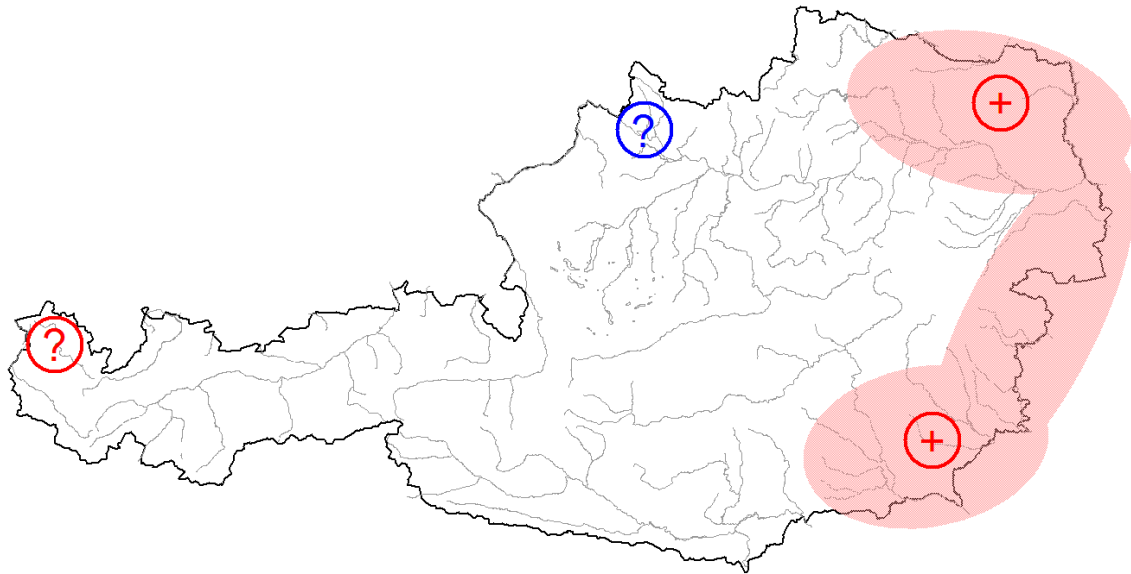


Abbildung 12-7: Regionalisierung des potential höheren Bewässerungsbedarfs (rot: Zunahme; „?“)

Zusammenfassend ist in der Landwirtschaft prinzipiell mit einem Anstieg des Bewässerungswasserbedarfs auf Grund des Klimawandels dort zu rechnen, wo schon heute die Wasserbilanz ausgeglichen oder negativ ist und schon heute Bewässerung betrieben wird. In der Abschätzung auf Basis der Modelle sind von diesem Problem in erster Linie der Osten und Südosten Österreichs betroffen. Ein zusätzlicher Bedarf an Bewässerungswasser wird entweder der Grundwasserneubildung oder dem Oberflächenabfluss der Fließgewässer entzogen. Die Beurteilung der Auswirkungen eines zusätzlichen Wasserbedarfs für die Bewässerung muss in jedem Falle auf Flusseinzugsgebietsebene bzw. für Grundwasserkörper erfolgen. Dies muss bei der Bewilligung von neuen Wasserrechten für Bewässerungszwecke jedenfalls berücksichtigt werden und könnte technisch über die Speicherung von Wasser zumindest lokal teilweise ausgeglichen oder kompensiert werden. Dies gilt auch für die Bewilligung von Wasserentnahmen für Fischteiche, die insbesondere bei langen Trockenzeiten zu relevanten Wassernutzern werden können und in der Wasserbilanz berücksichtigt werden müssen.

Die Bedeutung des kommunalen Abwassers als Bewässerungswasser (für touristische Zwecke z.B. Golfplätze und ev. landwirtschaftliche Zwecke) kann regional von Interesse sein. Entsprechende Technologien zu einem derartigen sicheren Einsatz sind heute verfügbar. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass der Abwasseranfall in sommerlichen Trockenperioden lediglich 100 bis 200 l/E/d beträgt, während der Wasserbedarf der Landwirtschaft in dieser Zeit insgesamt in der Größenordnung von 30 m³/ha/d (dies entspricht umgerechnet 10 m³/E/d) liegt.

13. Danksagung

Wir danken dem Umweltbundesamt Deutschland für die Bereitstellung des regionalen Klimalaufs mit dem Modell REMO (GCM Antrieb ECHAM5) für den Modellzeitraum 1950-2100, IPCC für die Bereitstellung der Szenariodaten aus dem CMIP3 Experiment (Ensemblesläufe mit 15 gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodellen mit natürlichem und anthropogenem Antrieb und dem Max-Planck Institut für Meteorologie (Hamburg, via der CERA Datenbank des Deutschen Klima Rechenzentrums) für die Bereitstellung des regionalen Klimalaufes mit dem Modell COSMO-CLM (GCM Antrieb ECHAM5) für den Modellzeitraum 1960-2100.

Die Autoren der Studie danken auch allen Institutionen, die hydrologische Daten zur Verfügung gestellt haben, insbesondere den Hydrographischen Diensten und dem Hydrographischen Zentralbüro im Lebensministerium. Die Messdaten für Abbildung 7-6 wurden von der Universität für Bodenkultur erhoben, die hydrologischen Messdaten der anderen Abbildungen von den Hydrographischen Diensten Österreichs. Herrn DI Godina wird speziell für die Daten der Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 gedankt.

Dem Umweltbundesamt danken wir für die Zurverfügungstellung von Wassergütedaten.

14. Literatur

- Acompanying the Green Paper From The Commission To The Council, The European Parliament, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions (2007) Adapting to climate change in Europe - options for EU action, {COM(2007)354}
http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/sec/sec_2007_849.pdf
- Aguilar E, Auer I, Brunet M, Peterson TC, Wieringa J. (2003) Guidelines on Climate Metadata and Homogenization. Climate Programme Data and Monitoring WCDMP-No.53. WMOTD No. 1186. WMO: Geneva.
- Alexander, L.V., et al. (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109
- Allamano, P., P. Claps, and F. Laio (2009), Global warming increases flood risk in mountainous areas, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L24404.
- Arbeitskreis KLIWA (2010) Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4. Dezember 2009 in Mainz. KLIWA-Berichte. Heft 15. www.kliwa.de
- Auer I, et al. (2010). ÖKLIM 1971–2000, Aktualisierung des digitalen Klimaatlas Österreichs 1961–1990
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones PD, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E. (2007a) HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology* 27: 17-46
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Mestre O, Moisselin JM, Begert M, Brazdil R, Bochnicek O, Cegnar T, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Szalai S, Szentimrey T. (2005) A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800-2002. *International Journal of Climatology* 25: 139-166
- Auer I, Böhm R, Prettenthaler F, Proske H (Hrsg) (2010) Zwei Alpentäler im Klimawandel. alpine space – man & environment 11, 196 pages, Innsbruck university press
- Auer I., Böhm R, Jurkovic A, Schöner W und W. Lipa. (2008) Erweiterung und Vervollständigung des StartClim Datensatzes für das Element tägliche Schneehöhe - Aktualisierung des existierenden StartClim Datensatzes (Luftdruck, Niederschlag und Dampfdruck) bis 2007 04. StartClim- Startprojekt Klimaschutz StartClim-2007-A, Endbericht, 1-40.
- Auer I., Jurkovic A., Orlik A., Böhm R., Korus E., Sulis A., Marchetti A., Dolinar M., Nadbath M., Vertacnik G., Vicar Z., Pavcic B., Geier G., Rossi G., Leichtfried A., Schellander H., Gabl K., Zardi D. (2008) High quality climate data for the assessment of Alpine climate, its variability and change on regional scale – Collection and analysis of historical climatological data and metadata. Technical Report of WP5, Interreg-IIIb- Alpine Space Project Foralps, I/III/ 3.1/21, 67 pages plus 7 annexes
- Bachner, S., Kapala, A., Simmer, C. (2008) Evaluation of daily precipitation characteristics in the CLM and their sensitivity to parametrisations. *Meteorologische Zeitschrift* 17, No.4, 407-419
- BAFU - Bundesamt für Umwelt (2007) Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen. Bern.

- BAFU (2010) CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz – Zusammenfassung. Bundesamt für Umwelt, Bern. www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html
- Bard E, Raisbeck G, Yiou F, Jouzel J (2000) Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *TELLUS B* 52: 985-992
- Barredo J. I. (2009) Normalised flood losses in Europe: 1970-2006. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 97-104, 2009
- Bartl, S., Grünwald, U., Schümborg, S. (2008) Zur Rekonstruktion langjähriger Wasserstands- und Durchflusszeitreihen am Elbepegel Dresden. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 52, 2008, H. 14, S. 162-167. ISSN1439-1783
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds. (2008) *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Belz, J.U. (2005) Niedrigwasser-Abflüsse im Rheingebiet im 20. Jahrhundert – Veränderungen und Ursachen In: *Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung*, Kolloquium am 14./15. September 2005 in Herne. BFG, 5/2005.
- Benestad, R. E. (2009) Downscaling precipitation extremes – Correction of analog models through PDF predictions. *Theor. Appl. Climatology*
- Berger A., Loutre M. F. (1991) Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews* 10: 297–317
- Bezzola, G.R., Hegg, Ch. (2007) Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 Prozesse, Schäden und erste Einordnung, Schweizerische Eidgenossenschaft BAFU, WSL
- Blaschke, A.P. (2003) Langzeitentwicklung der Grundwasserstände. Karte 6.3, Hydrologischer Atlas Österreich. Österreichischer Kunst und Kulturverlag und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN: 3-85437-250-7, 6.3 - 6.3. Wien.
- Blöschl G. and A. Montanari (2010) Climate change impacts – throwing the dice? *Hydrological Processes*, 24, (3) 374-381
- Blöschl G., Merz R. (2008) Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit - Aspekte einer zeitgemäßen Strategie, *Wasserwirtschaft* 11/2008
- Blöschl, G. (2005a) On the fundamentals of hydrological sciences. Article 1 in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley and Sons, Chichester, pp. 3-12.
- Blöschl, G. (2005b) Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. Article 133 in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley and Sons, Chichester, pp. 2061-2080.
- Blöschl, G. (2005c) Statistical upscaling and downscaling in hydrology. Article 9 in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley and Sons, Chichester, pp. 135-154.
- Blöschl, G. and R. Merz (2009) Landform - hydrology feedbacks. In: Otto, J.-C and Dikau, R. (Eds.) *Landform - Structure, Evolution, Process Control*. Proceedings of the International Symposium on Landform organised by the Research Training Group 437. *Lecture Notes in Earth Sciences*, Vol. 115, Springer Wien New York, 310 pp.
- Blöschl, G. Merz, R., Humer, G., Hofer, M. Hochhold, A., Wührer, W. (2006) HORA - Hochwasserrisikoflächen Österreich, *Hydrologische Arbeiten*. Endbericht an das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technischen Universität Wien.

- Blöschl, G. und R. Merz (2008) Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit - Aspekte einer zeitgemäßen Strategie (Estimating design floods of a given return period - facets of a contemporary strategy). *Wasserwirtschaft*, 98, 11, 12-18.
- Blöschl, G., A. Viglione and H. Heindl (2008a) Dynamik von Hochwasserbemessungsgrößen und Konsequenzen - Klimawandel. *FloodRisk II. Bericht an das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. Technische Universität Wien*
- Blöschl, G., C. Reszler and J. Komma (2008b) A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environmental Modelling and Software*, 23 (4), pp. 464-478.
- Blöschl, G., Merz, R., Parajka, J., Viglione, A. Komma, J. (2009) Predictability of runoff in a changing environment, Final report to the Hydrology of Austria Programme of the Austrian Academy of Sciences. *Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien*
- Blöschl, G., R. Merz, G. Laaha, J. Parajka, J. Skøien (2005) Regionale hydrologische Untersuchungen in Österreich (Regional hydrological analyses in Austria). *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, Nr. 83, pp. 83-98.
- Blöschl, G., S. Ardoin-Bardin, M. Bonell, M. Dorninger, D. Goodrich, D. Gutknecht, D. Matamoros, B. Merz, P. Shand and J. Szolgay (2007) At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? *Hydrological Processes*, 21, 1241-1247.
- BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft – ÖWAV (2008) Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft.
- BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2008) Identifikation von Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich: 1. Phase, 2008, *AustroClim*.
- BMLFUW (2008) Auf dem Weg zu einer nationalen Anpassungsstrategie.
- BMLFUW (2009) (Hrsg) *FloodRisk II Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwassermanagement Synthesebericht*, Wien.
- BMVBS (2009) *KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. 1. Statuskonferenz am 18. und 19. März 2009, BMVBS, Bonn. Tagungsband. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn. www.kliwas.de*
- Böhm R (coord.) and 36 co-authors (2006) Final Report for RTD-project ALP-IMP (Multi-centennial climate variability in the Alps based on Instrumental data, Model simulations and Proxy data), EVK-CT-2002-00148. <http://www.zamg.ac.at/ALP-IMP>
- Böhm R (2006) Reconstructing the climate of the 250 years of instrumental records at the northern border of the Mediterranean (the Alps). *Il Nuovo Cimento* 29C: N1 13-20
- Böhm R, Auer I, Schöner W, Ganekind M, Gruber C, Jurkovic A, Orlik A, Ungersböck M (2009) Eine neue Website mit instrumentellen Qualitäts-Klimadaten für den Großraum Alpen zurück bis 1760. *Wiener Mitteilungen* 216: 7-20
- Böhm R, Schöner W, Auer I, Hynek B, Kroisleitner C, Weyss G (2007) Gletscher im Klimawandel – Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. *ZAMG-Morava*, 112 Seiten
- Böhm R., Godina, R. Nachtnebel, H.P. und Pirker O. (2008) Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich. In: *Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft Herausgeber/Verlag: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt u. Wasserwirtschaft und Österreichischer Wasser- u. Abfallwirtschaftsverband, Wien.*

- Böhm, R. (2007) Klimarekonstruktion und Klimaszenarien: Vortrag am 27.03.2007. Innsbruck; ZAMG- Regionalstelle für Tirol und Vorarlberg
- Böhm, R. (2008a) Was heißt da "noch nie"? Die Presse (Spektrum), 3.5.2008.
- Böhm, R. (2008b) Heiße Luft: Reizwort Klimawandel - Fakten, Ängste, Geschäfte. Edition Va Bene, Wien, 262 pp.
- Böhm, R., Auer, I. (2007) 250 Jahre Klimavariabilität in den Alpen. Wr. Mitteilungen Band 206: Extreme Abflussereignisse
- Boillat J.L. und H. Pougatsch (2000) State of the art of sediment management in Switzerland. Proc. Int. Workshop and Symp. on Reservoir Sedimentation Management, Toyama (Japan), pp. 143–153.
- Bommer, C. Phillips, M., Keusen, H.R., Teyssere, P. (2009) Bauen im Permafrost. WSL, Birmensdorf.
- Borga, M., E.N. Anagnostou, G. Blöschl and J.-D. Creutin (2010) Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls, Preface. Journal of Hydrology, 394 (1–2), 1-3.
- Bundesregierung, D. (2008) Deutsche Anpassungsstrategien an den Klimawandel, edited.
- Burn, D. H.; Hag Elnur, M. A. (2002) Detection of hydrologic trends and variability. In: Journal of Hydrology 255, S. 107-122.
- Burn, D.H. (1997) Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. J. Hydrol. 202: 212-230.
- Christensen Hesselberg J., Christensen Bøssing O. (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. Climatic Change. 81:7-30
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ClimChAlp Strategic Interreg III B Alpine Space Project (2008) Climate Change, Impacts and Adaption Strategies in the Alpine Space, Common Strategic Paper. http://www.climchalp.org/index.php?option=com_docman&task=cat_view&id=106&Itemid=125
- Collins, D. N. (2008) Climatic warming, glacier recession and runoff from Alpine basins after the Little Ice Age maximum, Ann. Glaciol., 48, 119–124
- Crowley TJ (2000) Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. Science 289: 270-277
- Dankers R. and Feyen L. (2008) Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. Journal Of Geophysical Research-Atmospheres 113 (D19) D19105
- Dankers R. and Feyen L. (2009) Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. Journal of Geophysical Research-Atmospheres: 114 D16108
- de Marsily, Gh., F. Delay, J. Goncalves, Ph. Renard, V. Teles, S. Violette (2005) Dealing with spatial heterogeneity. Hydrogeol. J. 13,161-183.
- Deutscher Wetterdienst (2009) Der KLIMA-Report 2008; Offenbach.

- DVWK (1999a) Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft H 251, Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser, Bonn.
- Eawag, H. (2009). Wasserversorgung 2025 - Vorprojekt.
- Ebohon, B. und L. Schrott (2008) Modeling Mountain Permafrost Distribution. A New Permafrost Map of Austria. In: Kane, D. and K. Hinkel (Eds.): Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 397-402.
- EC (2009) River basin management in a changing climate. Guidance Document No. 24. Common Implementation Strategy (CIS) for the Water Framework Directive (2000/60/EC) European Communities, Technical Report - 2009 – 040, Brussels.
- EC (2009a) Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive - River Basin Management in a Changing Climate - a Guidance Document, edited, EC.
- EC (2009b) Climate Change and Water, Coasts and Marine Issues.
- EC (2009c) Adapting to Climate Change: the Challenge for European Agriculture and Rural Areas.
- ECE (2009a) Guidance on Water and Adaption to Climate Change, United Nations Publications.
- ECE (2009b) Transboundary Flood Risk Management, United Nations Publication.
- Efthymiadis D, Jones PD, Briffa K, Böhm R, Maugerl M, 2007. Influence of large-scale atmospheric circulation on climate variability in the Greater Alpine Region of Europe. *Journal of Geophysical Research* 112: D12104
- Eitzinger, J., Kersebaum, Kurt Christian, Formayer, Herbert (2009) *Landwirtschaft im Klimawandel*, AgriMedia Verlag, ISBN 978-3-86037-378-1
- Eitzinger, J., Kubu, G., Formayer, H., Haas, P., Gerersdorfer, T., Kromp-Kolb, H. (2005) Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedlersees (Endbericht im Auftrag der Burgenländischen Landesregierung vom 15. Juli 2005). BOKU-Met Report 1 ISSN 1994-4179. ISSN 1994-4187 (on-line) - <http://www.boku.ac.at/met/report/>
- Evtimova, L. (2008) Untersuchung der Unsicherheiten in Hochwasserwahrscheinlichkeitsberechnungen. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien.
- Faggian, P., Giorgi, F. (2009) An analysis of global model projections over Italy, with particular attention to the Italian Greater Alpine Region (GAR). *Climatic Change* 96: 239-258
- Feldmann, H., Früh, B., Schädler, G., Panitz, H-J., Keuler, K., Jacob, D., und Lorenz, P. (2008) Evaluation of the precipitation for South-western Germany from high resolution simulations with regional climate models. *Meteorologische Zeitschrift*, 17, No. 4, 455-465
- Formayer H. (Koordinator), et. al (2007) *Auswirkungen des Klimawandels in Niederösterreich. i. A. des Amtes der NÖ Landesregierung, St. Pölten.*
- Formayer H., Kromp-Kolb, H. (2006) *Klimawandel und Hochwasser. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Österreich, im Auftrag des WWF.* http://www.boku.ac.at/imp/klima/Literatur/Hochwasser_WWF.pdf
- Fowler, H. J., Ekström, S., Blenkinsop, S., Smith, A. P. (2007) Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *Journal of Geophysical Research* 112: D18104
- Francés, F., E. Ortiz, S. Salazar, J.L. Miralles, F. Eximenis, G. Blöschl, J. Komma, C. Haberer, A. Bronstert and T. Blume (2008) Efficiency of non-structural flood mitigation

- measures: "room for the river" and "retaining water in the landscape". CRUE Research Report No I-6. Technical University of Valencia.
- Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., Vidale, P. L. (2006) Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research* 111: D06105
- GCA (2009) Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. GLOWA-Danube Projekt, Universität München.
- Georgakakos, K. P. (2006) Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 317, 81-103.
- Glen, G. (ed.) (2010) *The Impact of Climate Change on European Lakes*, Springer Verlag, ISBN 978-90-481-2944-7
- Godina, R. (2005) Hochwassertrends der vergangenen 120 Jahre. Persönliche Mitteilungen.
- Godina, R. (2009) Vortrag www.oewav.at/upload/medialibrary/Godina.pdf
- Görgen, K., Beersma, J., Buiteveld, H., Brahmer, G., Carambia, M., Keizer, O. de, Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C., Volken, D. (2010) Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the River Rhine Basin. Results of the RheinBlick2050 project. Report no 1-23 of the international commission for the hydrology of the Rhine Basin, Lelystad, the Netherlands, 210pp.
- Grasso A., Jakob A., Spreafico, D. Bérod (2010) Monitoring von Feststofffrachten in schweizerischen Wildbächen. *Wasser Energie Luft* – 102. Jahrgang, 2010, Heft 1, CH-5401 Baden, 41-45.
- Grünbuch der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen (2007) Anpassungen an den Klimawandel in Europa - Optionen und Maßnahmen der EU, {SEK(2007)849}. http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/index_en.htm
http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/sec/sec_2007_849.pdf
- Grünewald, U. (2006) Extreme hydro(meteoro-)logische Ereignisse im Elbegebiet. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 58, H. 3/4, S. 27-34, ISSN 0945-358X.
- Gutknecht, D., Ch. Reszler und G. Blöschl (2002) Das Katastrophenhochwasser vom 7. August 2002 am Kamp - eine erste Einschätzung (The August 7, 2002 - flood of the Kamp - a first assessment) *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 119 (12), pp. 411-413.
- Gutknecht, D., G. Blöschl, Ch. Reszler und H. Heindl (2006) Ein "Mehr-Standbeine"-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 58, H 3/4, pp. 44-50.
- Gutknecht, D.; Watzinger, A. (1995) Untersuchung zu Erfassung und quantitativen Abschätzung von abflussrelevanten Faktoren bei der Ermittlung von Katastrophen-Hochwasserereignissen in kleinen Einzugsgebieten. Arbeitsbericht f. d. erste Halbjahr, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde and Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien
- Haiden, T., Pistotnik, G. (2009) Intensity-dependent parameterization of elevation effects in precipitation analysis. *Advances in Geoscience* 20, 33-38,
- Hänggi, P.; Plattner, Ch. (2007) Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung, Schlussbericht Vorstudie, Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet, Bern und Davos 1.9.2007.
- Harris C., Arenson L. U., Christiansen H. H., Etzelmüller B., Frauenfelder R., Gruber S., Haeberli W., Hauck C., Hölzle M., Humlum O, Isaksen K, Käab A., Kern-Lütschg M.A., Lehning M., Matsuoka N., Murton J.B., Nötzli J., Phillips M., Ross N., Seppälä M., Springman S.M. and D. Vonder Mühl (2009) Permafrost and climate in Europe: Monitoring

- and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews* 92 (2009) 117–171.
- Hebenstreit K. (2000) Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete (2000), Wiener Mitteilungen; Band 160
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M. & Demuth, S. (2001) Have droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology* 21, 317-333.
- Holzmann, H., Lehmann, Th., Formayer, H., Haas, P. (2007) Klimafolgen für die Abflussbildung am Beispiel Lainsitz, i.A. des Amtes der Niederösterreichischen Landesregierung, St. Pölten.
- Holzmann, H., Lehmann, Th., Formayer, H., Haas, P. (2010): Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 56.JG, 1-2/10, 7-14.
- Holzmann, H., Lehmann, Th., Formayer, H., Haas, P. (2008) Auswirkung möglicher Änderungen der Schnee- Regenanteile in Hinblick auf die Abflussbildung infolge der Klimaänderung. Forschungsbericht FloodriskII, WP1-TP1.2. BMLFUW, BMVIT, 114
- Horton, P., Schaefli, B., Mezghani, A., Hingray, B., Musy, A. (2006) Assessment of climate-changeimpacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. *Hydrological Processes* 20, 2091-2109
- Hurst, H. E. (1951) Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 116, 770-808.
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A. and Funk, M. (2008) Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes*, 22: 3888–3902.
- Huss, M., M. Funk, and A. Ohmura (2009) Strong Alpine glacier melt in the 1940s due to enhanced solar radiation, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L23501
- Hydrotec (2004) Hochwasser-Aktionsplan Emscher www.eglv.de/hochwasser/pdf_e_anlagen/an_1_7_niederschlag/starkregen.pdf.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.. Working Group II Contribution to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 976 Seiten
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; FAQs [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacob D., Göttel H., Kotlarski S., Lorenz P. und K. Sieck. (2008) *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. Umweltbundesamt, Forschungsbericht 204 41 138, Climate Change, 11/08 ISSN 1862-4359
- Jacob, D. (2006) *Künftige Klimaänderungen in Deutschland-Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert*. Umweltbundesamt, MPI-M, Hintergrundpapier aktualisiert September 2006.
- Jacob, D. (2006) *Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Niederschlagsereignisse aus?* LWF Wissen 55.
- Jacob, D. (2001) A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.77, Issue 1-4, 61-73.

- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski S., Lorenz, P., Sieck, K. (2008) Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Forschungsbericht 204 41 138, UBA-FB 000969.
- Jaeger, E. B., Anders, I., Lüthi, D., Rockel, B., Schär, C., Seneviratne, S. (2008) Analysis of ERA40-driven CLM simulations for Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 17, No.4, 349-367
- Jasper, K., Calanca, P., Gyalistras, D., Fuhrer, J. (2004) Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Research* 26, 113-129
- Jones PD, New M, Parker DE, Martin S and Rigor IG (1999) Surface air temperature and its variations over the last 150 years. *Reviews of Geophysics* 37: 173-199
- Kersebaum, K. C. und Eitzinger, J. (2009) Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft In: Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H.: *Landwirtschaft im Klimawandel*. Agrimedia-Verlag.
- Kipfer, R.; Livingstone, D.M. (2008) Wasserressourcen und Klimawandel. *EAWAG News* 65d, September 2008.
- Kipfer, R., und D. M. Livingstone (2008) Wasserressourcen und Klimawandel. *EAWAG News*, 65d.
- Kirnbauer R., Drabek U., Gutknecht D., Nester Th. (2007) *BESIHO Teilbericht: Climate Change und seine potentiellen Auswirkungen auf Bemessungshochwässer*, im Auftrag der Österreichischen Bundesbahnen ÖBB, TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, 5.Juni 2007
- Kirnbauer R., Kohl B. (2007) Grundlagen zur Beurteilung der Eignung hydrologischer Modelle für die Berechnung des Einflusses von Klimaszenarien auf die Bemessung von Wildbacheinzugsgebieten; im Rahmen des Interreg IIIb Projekts ClimCHAlp, WP5, i.A. des Forsttechnischen Dienstes f. Wildbach- und Lawinenverbauung, BMLFUW.
- KLIWA (2009) Klimawandel und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft: KLIWA-Heft Nr.14. www.kliwa.de
- KLIWA (2007) Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. KLIWA-Heft 11. KLIWA-Projekt A 2.2.1, 99 Seiten; Karlsruhe, München, Oppenheim, Offenbach (ISBN 978-3-88251-326-4)
- KLIWA (2009) Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. KLIWA-Heft 13. KLIWA-Projekt A 2.2.1, 124 Seiten; Karlsruhe 2009 (978-3-88251-345-5)
- KLIWAS (2009) Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Tagungsband 1. Statuskonferenz - März 2009 - Bonn
- Koboltschnig G.R. (2007) Mehrfachvalidierung hydrologischer Eis und Schneeschmelzmodelle in hochalpinen, vergletscherten Einzugsgebieten. Dissertation an der Universität für Bodenkultur Wien: 164pp
- Koboltschnig G.R., Schöner W., Zappa M., Kroisleitner C., Holzmann H. (2008) Runoff modelling of the glacierized alpine Upper Salzach basin (Austria): Multi-criteria result validation. *Hydrological Processes* 22: 3950–3964
- Koboltschnig G.R., Schöner W., Zappa M., Holzmann H. (2009) Glaciermelt of a small basin contributing to runoff under the extreme climate conditions in the summer of 2003. *Hydrological Processes* 23: 1010-1018.
- Koehler, G. (2008) Deutschlandweite Trendanalyse von Abflüssen im Niedrigwasserbereich. In: *Wasserbewirtschaftung und Niedrigwasser*, Kolloquium am 26./27. Mai 2008 in Koblenz. BFG 6/2008
- KOHS (2007) Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz, Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS), *Wasser Energie Luft* 99. Jahrg., S55-57, Heft1.

- KOM (2009) Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen. Weißbuch, 147. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Brüssel.
- Krainer K. (2007) Permafrost und Naturgefahren in Österreich. Ländlicher Raum -Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Jahrgang 2007, 1-18.
- Kromp-Kolb, H., J. Eitzinger, G. Kubu, H. Formayer, P. Haas, und T. Gerersdorfer (2005) Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedler Sees, Universität für Bodenkultur, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt - im Auftrag des Amtes der Burgenländischen Landesregierung Landeswasserbaubezirksamt Schützen am Gebirgt.
- Kropp, J.; Holsten, A.; Lissner, T. ; Roithmeier, O. ; Hattermann, F. ; Huang, S. ; Rock, J. ; Wechsung, F. ; Lüttger, A. ; Pompe, S. ; Kühn, I. ; Costa, L. ; Steinhäuser, M. ; Walther, C. ; Klaus, M. ; Ritchie, S. ; Metzger, M. (2009) Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV).
- Kubu, G. (2006) Ökodynamische Rehabilitierung des Neusiedler See - Dotation Neusiedler See unter Berücksichtigung von Klimaänderungen, Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie - im Auftrag des Amtes der Burgenländischen Landesregierung Landeswasserbaubezirksamt Schützen am Gebirge.
- Küchler W.(Red.), Sommer W.(Red.) (2005) Klimawandel in Sachsen, Freistaat Sachsen, Sachstand und Ausblick, Geschäftsbereich des Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft/ Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie http://www.ufz.de/data/Klimawandel_Sachsen9261.pdf
- Kuhn M. (1979) Climate and glaciers. Sea Level, Ice, and Climatic Change (Proceedings of the Canberra Symposium, December 1979). IAHS Publ. no. 131, 1-20.
- Kuhn M. (2004) Die Reaktion der österreichischen Gletscher und ihres Abflusses auf Änderungen von Temperatur und Niederschlag. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 56, Heft 1-2, 1-7
- Kuhn, M., Olefs, M., Fischer, A. (2008) Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten von vergletscherten Einzugsgebieten im Hinblick auf Speicher-kraftwerke,StartClim2007.E, <http://www.austroclim.at/index.php?id=startclim2007>
- Kundzewicz Z, Graczyk D, Maurer T, Pinskiwar I, Radziejewski M, Svensson C, Szwed M. (2005) Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. Hydrological Sciences Journal 50: 797.
- Kundzewicz, Z. W. (2004) Editorial-Searching for changes in hydrological data. Hydrol. Sci. J. 49(1), 3-6.
- Kundzewicz, Z. W. (2005) Intense Precipitation and high River Flows in Europe - Observations and Projections. Acta Geophysica Polonica, Vol. 53, no. 4, pp. 385-400.
- Kundzewicz, Z.W., U. Ulbrich, T. Brücher, D. Graczyk, G. Leckebusch, L. Menzel, I. Przymusińska, M. Radziejewski and M. Szwed (2005) "Summer floods in Central Europe - climate change track?" Natural Hazards 36: 165-189.
- Laaha G. and G. Blöschl (2007) A national low flow estimation procedure for Austria. Hydrological Sciences Journal, 52 (4), pp. 625-644.
- Laaha, G. (2007) Aspekte der statistischen Modellierung raumbezogener Umweltdaten am Beispiel von Abflussdaten, Habilitationsschrift, Universität für Bodenkultur

- Laaha, G. and G. Blöschl (2005) Low flow estimates from short stream flow records-a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, 306 (1-4), pp. 264-286.
- Laaha, G. and G. Blöschl (2006) A comparison of low flow regionalisation methods - catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323, pp. 193-214.
- Laaha, G. and G. Blöschl (2006) Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, 20, pp. 3851-3878.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2007c) Niederwasserspense (Specific low flow). In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), *Hydrologischer Atlas Österreichs*, 3. Lieferung Karte 5.8; Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien; ISBN 3-85437-250-7.
- Laaha, G., G. Blöschl and J. Parajka (2005) Dem Spendenmuster auf der Spur - Bestimmung von Niederwasserkenngößen für Wasserkraftwerke und Wasserfassungen in Österreich (Tracing low flow patterns - estimation of low flow characteristics for hydropower sites and intakes in Austria). *VEÖ Journal*, DEZ 05, pp. 37-39.
- Lambrecht, A. and Mayer, Ch (2009) Temporal variability of the non-steady contribution from glaciers to water discharge in western Austria, *J. Hydrol.*, 376, 353–361.
- Lambrecht, A. und Kuhn, M. (2007) Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory, *Annals of Glaciology*, 46, 177-184.
- Latenser M. and M. Schneebeli. (2003) Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99). *Int. J. Climatol.* 23, 733-750.
- Lautenschlager, M.; Keuler, K.; Wunram, C.; Keup-Thiel, E.; Schubert, M.; Will, A.; Rockel, B. and Boehm, U. (2008) Climate simulation with CLM, climate of the 20th century, data stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate.
- Lean J (2000) Evolution of the Sun's Spectral Irradiance since the Maunder Minimum. *Geophysical Research Letters* 27: 2425-2428
- Lean JL, Rind DH (2008) How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1989 to 2006. *Geophysical Research Letters* 35 L18701
- Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., Kaspar, F. (2006) Estimating the impact of global change on flood and drought risk in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change* 75: 273-299
- Leibundgut, Ch. (2010) Nachhaltige Sicherung von Wasserressourcen – das NFP 61 im Spiegel globaler und nationaler Herausforderungen *Wasser Energie Luft* – 102. Jahrgang, 2010, Heft 3, 222-228.
- Leuschner, Ch., Schipka, F. (2004) Klimawandel und Naturschutz in Deutschland (Vorstudie), i.A. d. Bundesamtes für Naturschutz, BfN-Skripten 115.
- LFU (2007) Klimaanpassung - Bayern 2020. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 42 pp. bvb1.bib-bvb.de/dtl_publish/26/173475.html
- Lieb, G.K. (1996) Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. – *Arb. Inst. Geogr. Univ. Graz* 33: 9-125.
- Loibl W., Beck A., Dorninger M., Formayer H., Gobiet A. und W. Schöner (Hrsg) (2007) Kwiss-Programm reclip:more: research for climate protection – model run evaluation. Final report, Arc-Sys-0123, Austrian Research Centers – System Research, Wien, Österreich (<http://systemresearch.arcs.ac.at/SE/projects/reclip/>)
- Loibl, W., Beck, A., Dorninger, M., Formayer, H., Gobiet, A. Schöner, W. (2007) Research for climate protection: model run evaluation 2004-2006, Generation of climate change scenarios for the Alps with the meso-scale models MM5 and ALADIN, ARC systems research GesmbH, June 12th 2007.

- Lorenz, E. N. (1969) The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, 21, 289-307.
- Matulla C, Schöner W, Alexandersson H, von Storch H, Wang XL (2007) European storminess: late nineteenth century to present. *Climate Dynamics* 29
- Matulla C., Formayer H., Haas P., Kromp-Kolb, H. (2004) Mögliche Klimatrends in Österreich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. Heft 1-2, 56. Jahrgang 2004
- Matulla, C., N. Groll, H. Kromp-Kolb, H. Scheifinger, M.J. Lexer and M. Widmann (2002) Climate change scenarios at Austrian National Forest Inventory sites. *Climate Research*, 22, 161-173.
- Matulla, C., P. Haas, S. Wagner, E. Zorita, H. Formayer, H. Kromp-Kolb (2004) Anwendung der Analog-Methode in komplexem Terrain: Klimaänderungsszenarien auf Tagesbasis für Österreich. GKSS Report, 2004/11, pp 70.
- Mausser, W., Marke, T., Stoeber, S. (2008) Climate change and water resources: Scenarios of low flow conditions in the upper Danube river basin. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 4 012027
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor (2007) The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383-1394. OcCC, 2007: Klimaänderung und die Schweiz 2050 - Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft.. OcCC – Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern, 168 pp. ISBN: 978-3-907630-26-6
- Menzel, L Thieken, AH Schwandt, D Burger, G (2006) Impact of climate change on the regional hydrology - Scenario-based modelling studies in the German Rhine catchment, *Natural Hazards* 38:1-2 45-61
- Merz R. and G. Blöschl (2008a) Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research*, 44 (8), article number W08432.
- Merz R. and G. Blöschl (2008b) Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence. *Water Resources Research*, 44 (8), article number W08433.
- Merz, R. (2002) Understanding and estimating flood probabilities at the regional scale. Dissertation, *Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer* 181, TU Wien.
- Merz, R. and G. Blöschl (2009) A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria, *Water Resour. Res.*, 45, W01405
- Merz, R. and G. Blöschl, G. (2008c) Process controls on the statistical flood moments - a data based analyses, *Hydrological Processes*
- Merz, R. und Blöschl, G. (2008) Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52.
- Merz, R. und G. Blöschl (2003) Saisonalität von Niederschlag und Abfluss (Seasonality of precipitation and runoff). Karte 5.3, *Hydrologischer Atlas Österreich*. Österreichischer Kunst und Kulturverlag und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Merz, R., G. Blöschl and J. Parajka (2006) Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. *Journal of Hydrology*, 331, pp. 591-604
- Merz, R., J. Parajka and G. Blöschl (2011) Time stability of catchment model parameters - implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*, Vol. 47, W02531, 17 PP
- Moberg A, Jones PD, Lister D, Walther A, Brunet M, Jacobeit J, Alexander LV, Della-Marta PM, Luterbacher J, Yiou P, Deliang C, Klein Tank AMG, Saladie O, Sigro J, Aguilar E,

- Alexandersson H, Almarza C, Auer I, Barriendos M, Begert M, Bergström H, Böhm R, Butler CJ, Caesar J, Drebs A, Founda D, Gerstengarbe FW, Micela G, Maugeri M, Österle H, Pandic K, Petrakis M, Srnec, Tolasz R, Tueomenvirta H, Werner PC, Liderholm H, Philipp A, Wanner H, Xoplaki E. (2006) Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analysed for the period 1901-2000. *Journal of Geophysical Research*, 111: D22106
- Montanari, A., G. Blöschl, M. Sivapalan, H. Savenije (2010) Getting on target. *Public Service Review: Science and Technology*, Issue 7, pp. 167-169.
- Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G., Grünewald, U. (2003) No upward trend in the occurrence of extreme floods in central Europe. *Nature* 425
- Müller, G., R. Godina, W. Gattermayr (2009) Der Pegel Vent/Rofenache – Herausforderungen für eine hydrographische Messstelle in einem vergletscherten Einzugsgebiet. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich* NR. 86, pp. 131-135
- Nachtnebel H.P., Fuchs M. (2004) Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderungen. *Assessment of climate induced hydrological changes in Austria*, ÖWAW Heft7-8, S. 79-92, 56 Jahrgang 2004.
- Nakicenović N and Swart (eds.), (2000) Special report on emission scenarios. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK, 599 Seiten
- NWB (Netzwerk Wasser im Berggebiet) (2009) Vorstudie Klimaänderung und Wasserkraftnutzung, Schweiz.
http://www.netzwerkwasser.ch/fileadmin/user_upload/PDF/klima/02_Schlussbericht_Vorstudie_2009.pdf
- Oberforster, M. (2009) Herausforderung für die pflanzliche Produktion im Ackerbau. paper presented at Anpassungserfordernisse an der Klimawandel, Leibnitz, Schloss Seggau.
- OcCC (2003) *Extremereignisse und Klimawandel*, Bern, September 2003, ISBN-Nr.: 3-907630-23-8
- OcCC (2008) *Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz*. OcCC - Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern, 47 pp. ISBN: 978-3-907630-33-4
- OcCC/ProClim (2007) *Klimaänderung und die Schweiz 2050, Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft*, Bern.
- Oerlemans J. (2001) *Glaciers and climate change*. ISBN 90265 1813 7, Swets&Zeitlinger BV, Netherlands, 151 Seiten.
- Ohmura A. (2001) Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method. *Journal of Applied Meteorology* 40/4: 753-761. : PBFTTB>2.0.CO;2
- ÖUGK (Österreichisch-Ungarische Gewässerkommission) (1996) *40 Jahre Österreichisch-Ungarische Gewässerkommission (1956-1996)*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien.
- ÖWAV (2007). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Österreichische Wasserwirtschaft*.
- Parajka J. and G. Blöschl (2008) Spatio-temporal combination of MODIS images - potential for snow cover mapping. *Water Resources Research*, 44, article number W03406.
- Parajka J., R. Merz and G. Blöschl (2005) A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 9, pp. 157-171.
- Parajka, J., R. Merz and G. Blöschl (2007) Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modeling - Case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, 21, pp. 435-446.

- Parajka, J., S. Kohnova, R. Merz, J. Szolgay, K. Hlavkova and G. Blöschl (2009) Comparative analysis of the seasonality of hydrological characteristics in Slovakia and Austria. *Hydrological Sciences Journal*, Volume 54, Issue 3 - 2009, Pages 456 - 473.
- Parajka, J., V. Naeimi, G. Blöschl, W. Wagner, R. Merz, K. Scipal (2006) Assimilating scatterometer soil moisture data into conceptual hydrologic models at the regional scale. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 10, pp. 353-368.
- Peterson, T.C., Easterling, D.R., Karl, T.R., Groisman, P., Auer, I., Böhm, R., Plummer, N., Nicholis, N., Torok, S., Vincent, L., Tuomenvirta, H., Salinger, J., Förland, E.J., Hanssen-Bauer, I., Alexandersson, H., Jones, P., Parker, D. (1998): Homogeneity Adjustments of In Situ Climate Data: A Review. *International Journal of Climatology*, 18: 1493-1517
- Petrow, T. (2009) Floods in Germany - Analyses of Trends, Seasonality and Circulation Patterns. Dissertation at the Faculty of Mathematics and Natural Sciences at the University of Potsdam, Germany.
- Petrow, T. and Merz, B. (2009) Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951 - 2002. - *Journal of Hydrology*, 371, 1-4, 129-141
- Petrow, T. J. M. M. Delgado, B. Merz (2008) Trends der Hochwassergefährdung in Deutschland (1951 bis 2002) und Konsequenzen für die Bemessung. *Wasserwirtschaft* 98 (11), 24-28.
- Pfeiffer, A., Zängl, G. (2009) Validation of climate-mode MM5-simulations for the European Alpine Region. *Theor. Appl. Climatology*
- Pielke RA Jr, Gratz J, Landsea CW, Collins D, Saunders MA, Musulin R (2008) Normalized Hurricane Damage in the United States: 1900-2005. *Natural Hazards Review* 9/1: 29-42.
- Pocorny, J., M. Kravcik, J. Kohutiar, und M. Kovac (2009) The Substantial Role of Water in the Climate System of the Earth. paper presented at UN Climate Change Conference, Copenhagen, Denmark.
- Pöyry (2008) Wasserkraftpotentialstudie Österreich. www.veoe.at/fileadmin/allgemein/Elektrizitaet_u_Energie/E-Wirtschaft_in_OE/050508_P_yry_Wasserkraftpotentialstudie_Kurzfassung.pdf
- Pretenthaler, F., Dalla-Via, A. (Hrsg.) (2007) Wasser und Wirtschaft im Klimawandel: Konkrete Ergebnisse am Beispiel der sensiblen Region Oststeiermark. Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Judenburg.
- Prudence (2004) Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Contract No. EVK2-2001-00156 A Side event at the Tenth Session of the Conference of Parties (COP 10) 6 - 17 December 2004, Buenos Aires, Argentina. <http://prudence.dmi.dk>
- Reitinger J. und R. Schmalfuß (1993) Ergebnisse des Forschungsprojektes Wasserhaushaltsstudie Neusiedlersee. *Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A.* 14, S.133-137
- Robertson A, Overpeck J, Rind D, Mosley-Thompson, Zielinski G, Lean J, Koh D, Penner J, Tegen I, Healy R (2001) Hypothesized climate forcing time series for the last 500 years. *Journal of Geophysical Research – Atmosphere* 106: D14 p14783 (2000JD900469)
- Rockel, B., Geyer, B. (2008) The performance of the regional climate model CLM in different climate regions, based on the example of precipitation. *Meteorologische Zeitschrift* 17, No.4, 487-498
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese U., Schulzweida, U., and Tompkins, A. (2003) The Atmospheric general circulation model ECHAM-5, Part I: Model description, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report 349

- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, S., Hagemann, S. und Kornblueh, L. (2006) Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model. *Journal of Climate* 19, 3771-3791
- Roesch, A., Jaeger, E. B., Lüthi, D., Seneviratne, S. I. (2008) Analysis of CCLM model biases in relation to intra-ensemble model variability. *Meteorologische Zeitschrift* 17, Nr.4: 369-382
- Rohner K., Berger I., Steiger H., Moser J., Pichler F., Sereinig N. (2005) Hochwasserchronik Kärnten 1992-2003, Amt der Kärntner Landesregierung Abteilung 18 - Wasserwirtschaft. http://www.verwaltung.ktn.gv.at/12157_DE-Organisation-Schutzwasserwirtschaft.htm
- Röthlisberger H., Lang H. (1987) Glacial hydrology. In: Gurnell A.M., Clark M.J. (Eds.), *Glacio-fluvial Sediment Transfer*, Wiley, New York, 207-284.
- Rudolf, B., Grieser, J., Schneider, U. (2001) Verteilung der mittleren Niederschlagshöhen in Europa im letzten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts im Vergleich zur Normalperiode 1961-1990, *Klimastatusbericht 2001*, DWD S.86-93
- Rybski, Diego (2006) Untersuchung von Korrelationen, Trends und synchronem Verhalten in Klimazeitreihen; Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Physik; Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Schädler B. (2000) Klimaveränderung und Naturkatastrophen in der Schweiz. KLIWA-Symposium 2000, KLIWA-Bericht 1, 204-211
- Schädler B., Frei, Ch., Grebner D., Willi H.P. (2007) Grundlagen zum Klima, Wasser Energie Luft 99. Jahrg., S.58-60, Heft1
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., and Musy, A. (2005) A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 95–109, 2005, <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/9/95/2005/>.
- Schaefli, B., Hingray, B., and Musy, A. (2007) Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1191–1205, 2007, <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1191/2007/>.
- Scherrer S.C., C. Appenzeller and M. Laternser (2004) Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13215
- Schiller, G. (1982) Die Wasserkraftnutzung in Österreich – Wasserkraftpotential Stand 1982. Verbundgesellschaft, Wien.
- Schmidli J., Frei C. (2005) Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, 25, 753-771.
- Schmidli, J., Schmutz, C., Frei, C., Wanner, H., Schär, C. (2002) Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century. *Int. Journal of Climatology* 22: 1049-1074
- Schmitt, T. G. (2009) Neue Entwicklungen und Bewertungen zum Umgang mit Regenwasser. KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall, 56, 124-130.
- Schmitt, T. G., M. Illgen, und I. Kaufmann (2006) DWA-Expertengespräch "Klimawandel - Konsequenzen für die Siedlungsentwässerung?" am 22. Februar 2006 in Hennef. KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall.
- Schmocker-Fackel P. and F. Naef (2010) Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. Submitted to HESS
- Schöner W, Auer I, Böhm R, Thaler S. (2003) Qualitätskontrolle und statistische Eigenschaften ausgewählter Klimaparameter auf Tageswertbasis im Hinblick auf

- Extremwertanalysen. StartClim- Startprojekt Klimaschutz: Erste Analysen extremer Wetterereignisse und ihrer Auswirkungen in Österreich., Endbericht Projekt 1, 1-39.
- Schöner W. (1995) Schadstoffdepositionen in einer hochalpinen winterlichen Schneedecke am Beispiel von Wurtenkees und Goldbergkees (Hohe Tauern). Dissertation, Universität Salzburg, 130 Seiten plus Karten- und Tabellenanhänge
- Schöner W., Auer I. and Böhm R. (2000) Climate variability and glacier reaction in the Austrian eastern Alps. *Annals of Glaciology*, Vol. 31, 31-38.
- Schöner W., Böhm R. (2007) A statistical mass-balance model for reconstruction of LIA ice mass for glaciers in the European Alps. *Annals of Glaciology*, Vol. 46, 161-169.
- Schönwiese, Ch.D. (2007) Klimawandel global und in Deutschland-Fakten der Vergangenheit und Szenarien der Zukunft. Institut für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main
- Schönwiese, Ch.D., Staeger, T., Trömel, S. (2005) Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland. Klimastatusbericht 2005, DWD.
- Schulla, J. (1997) Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung von Folgen der Klimaänderung, *Zürcher Geographische Schriften*, 69.
- SEC (2009) Climate Change and Water, Coasts and Marine Issues. commission staff working document 386 accompanying the white paper Adapting to climate change: Towards a European framework for action. Commission of the European Communities. Brussels.
- SEK (2009) Anpassung an den Klimawandel: Eine Herausforderung für die Landwirtschaft und ländliche Gebiete in Europa. Arbeitsdokument der Kommissionsdienststellen 417 zum Weißbuch Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Brüssel.
- Sen, P. K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. In: *Journal of the American Statistical Association* 63, S. 1379-1389.
- Simon S. (2009). Wasserwirtschaft und klimawandel – Fakten, Folgen, Aufgaben, 39. Internat. Wasserbau Symposium Aachen. Aachen
- Sivapalan, M. (2003) Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: is there a connection? *Hydrol. Process.* 17, 1037-1041.
- Sivapalan, M., G. Blöschl, R. Merz and D. Gutknecht (2005) Linking flood frequency to long-term water balance: incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research*, 41, W06012.
- Skøien, J., Merz, R. & Blöschl, G. (2006) Top-Kriging - geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences (HESS)*, 10. 277-287.
- Slupetzky H. und Slupetzky N. (1995) „Betref des Wachstums der Kletscher und Kälterwerdung des Klimas. *Salzburger Geographische Materialien* 23: 1-42
- Smiatek, G., Kunstmann, H., Knoche, R., Marx, A. (2009) Precipitation and temperature statistics in high-resolution regional climate models: Evaluation for the European Alps. *Journal of Geophysical Research* 114: D19107
- SNF (2008) Nachhaltige Wassernutzung. Ausführungsplan des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61. Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Bern, www.nfp61.ch
- Snorasson, Á., H. P. Finnsdóttir and M. E. Moss (eds) (2002) *The Extremes of the Extremes: Extraordinary Floods*, IAHS Publication no. 271, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, UK.

- Solanki SK, Usoskin IG, Kromer B, Schüsler M, Beer J (2004) Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11.000 years. *Nature* 431: 1084-1087
- Spektrum Wasser 1 (2004) Naturereignis und Gefahr, Bayerisches Landesamt f. Wasserwirtschaft
- Stoffel M. and M. Beniston (2006) On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: A case study from the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters*, vol 33, L16404
- Stull, R. B. (1985) Predictability and scales of motion. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 66, 432-436.
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai (2007) Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S. et al. (eds.))*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York.
- UBA-D (2007) Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. Hintergrundpapier i.A. des Umweltbundesamts (UBA)
- Uhlenbrook, S., Steinbrich, A., Tetzlaff, D., Leibundgut Ch. (2000) Zusammenhang zwischen extremen Hochwassern und ihren Einflussgrößen; Klimaveränderung und Naturkatastrophen in der Schweiz, Universität Freiburg, KLIWA-Symposium 2000, S.187-203.
- United Nations Economic Commission for Europe (2009) Guidance on Water and Adaptation to Climate Change. Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes. United Nations Publications Ece/Mp.Wat/30, Sales No. 09.II.E.14
- Van Vliet, M. T. H., und J. J. G. Zwolsman (2008) Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. *Journal of Hydrology*, 353, 1.
- Viglione A. and G. Blöschl (2008) On the role of storm duration in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 5, 3419-3447.
- Viglione, A., R. Merz and G. Blöschl (2009) On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6, 627-665.
- Von Storch H, Güss S, Heimann M (1999) Das Klimasystem und seine Modellierung – eine Einführung. Springer Verlag, 256 Seiten, ISBN 978-3-540-65830-6
- Von Storch, H.; Cannon, A. J. (1995) *Analysis of Climate Variability - Applications of Statistical Techniques*. New York, Springer Verlag.
- Wanner, H. (2006) *Klimaeinfluss der Gebirge: Grundlagen*, Bern. <http://www.qiub.unibe.ch/klimet/teaching/SkriptAlpen.pdf>
- Warren, R., Yu, R., Osborn, T, de la Nava Santos, S (2009) Future European drought regimes under mitigated and un-mitigated climate change. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 6 292012.
- Washington WM, Parkinson CL (2005) *An introduction to three-dimensional climate modeling*. Universit Science Books, Saualito, CAL, 353 Seiten,
- Weber M. (2004) *Mikrometeorologische Prozesse bei der Ablation eines Alpengletschers*. Dissertation Universität Innsbruck.
- Wetherland, R. T. (2009) Changes of Variability in Response to Increasing Greenhouse Gases, Part II: Hydrology. *Journal of Climate* 22: 6089-6103
- Willems, W. (2008) *Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und*

- grundwasserbürtigen Abflüssen in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Endbericht im Auftrag von KLIWA, Ottobrunn.
- Woods, R. (2002) Seeing catchments with new eyes. *Hydrological Processes* 16, 1111-1113.
- Yiou P, Ribereau P, Naveau P, et al. (2006) Statistical analysis of floods in Bohemia (Czech Republic) since 1825. *Hydrological Sciences Journal*, 51, 930-945
- Yue, S.; Pilon, P.; Phinney, B. (2003) Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation. In: *Hydrological Sciences Journal* 48, Heft 1, S. 51 - 63.
- Zehe, E., and G. Blöschl (2004) Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: Role of initial conditions, *Water Resources Research*, 40, article number W10202, 21pp.
- Zehe, E., H. Elsenbeer, F. Lindenmaier, K. Schulz and G. Blöschl (2007) Patterns of predictability in hydrological threshold systems. *Water Resources Research*, 43, article number W07434.
- Zemp M (2006) *Glaciers and Climate Change. Spatio-temporal Analysis of Glacier Fluctuations in the European Alps after 1850. Schriftenreihe Physische Geographie, Glaziologie und Geomorphodynamik* 49: 67 Seiten plus 5 Publikationen und Programme im Anhang. Universität Zürich
- Zorita E, von Storch H, Gonzalez-Rouco FJ, Cubasch U, Luterbacher J, Legutke S, Fischer-Bruns I, Schlese U (2004) Climate evolution in the last five centuries simulated by an atmosphere-ocean model: global temperatures, the North Atlantic Oscillation and the Late Maunder Minimum. *Meteorologische Zeitschrift* 13: 271 – 289

