

Klimawandel und Wasserhaushalt:

Untersuchung zum Einfluss des Klimawandels auf Wasserbilanzen und Abflüsse für das Inneinzugsgebiet mittels verschiedener Klimaszenarien

Stand 08.11.2011

AdaptAlp Technical Report

Der vorliegende Bericht basiert auf einem Bericht von Willems & Stricker, 2011, der im Rahmen von AdaptAlp im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) erstellt wurde. Er beschreibt die in den Untersuchungen angewandte Methodik sowie die dafür verwendeten Daten und stellt die Ergebnisse zusammenfassend dar. Am Ende jedes Themenblocks befindet sich eine kurze inhaltliche Zusammenfassung des Auftraggebers.

Der ausführliche Bericht kann aus urheberrechtlichen Gründen nicht im Internet veröffentlicht werden. Für weitere Informationen kontaktieren Sie bitte:

Jane Korck, Jane.Korck@lfu.bayern.de, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof

Inhalt

1	Einleitung	4
1.1	Hintergrund	4
1.2	Zielstellung und Vorgehen	5
1.3	Gebietsübersicht	7
2	Referenzklima	9
2.1	Übersicht über betrachtete Referenzdatensätze	9
2.1.1	Beschreibung von Gridding-Methoden für meteorologische Daten	11
2.1.2	Weitergehende Aspekte bei der Interpolation von meteorologischen Daten	15
2.1.3	Beschreibung der verglichenen Referenzdatensätze	18
2.2	Durchführung der Vergleiche	31
2.3	Ergebnisse der Vergleiche	31
2.3.1	Mittlere Jahressumme des Niederschlags	31
2.3.2	Jahresmittel der Lufttemperatur	32
2.3.3	Übergangswahrscheinlichkeiten des Niederschlag	33
2.3.4	Extremwertparameter, maximale Tagesniederschläge	35
2.3.5	Wahl des Referenzdatensatzes	39
	Zusammenfassung des AdaptAlp Projektpartners LfU: 1. Referenzklima	42
3	Klimaprojektionen	43
3.1	Übersicht über betrachtete Datensätze	43
3.2	Beschreibung der Klimaprojektionen	46
3.3	Biaskorrektur	50
3.4	Durchführung der Vergleiche	52
3.5	Ergebnisse der Plausibilitätsbetrachtungen	55
3.5.1	Jahreswerte	55
3.5.2	Langjährige Quartals- und Monatswerte	57
3.5.3	Weitere Kennwerte in den Gebieten Alz und Ötztaler Ache	63
3.6	Auswirkung der Biaskorrektur	65
3.7	Klimasignale in Klimaprojektionen	68
3.7.1	Langjährige Jahres-, Quartals- und Monatsmittelwerte	68
3.7.2	Gleitende Mittelwerte über den Gesamtzeitraum	70
3.7.3	Weitere Kennwerte in den Gebieten Alz und Ötztaler Ache	72
3.8	Auswahl der Klimaprojektionen für die Wasserhaushaltsmodellierung	73
4	Wasserhaushaltssimulationen	75
4.1	Durchführung der Vergleiche	75
4.2	Ergebnisse der Plausibilitätsbetrachtungen	76
4.2.1	Wasserbilanz und langjährige Mittelwerte der Wasserbilanzglieder	76
4.2.2	Abfluss aus Schneespeichern und Gletschern	79
4.2.3	Monatliche Abflusskennwerte: MoMQ, MoMNO, MoMHQ	80
4.2.4	Hoch- und Niedrigwasserabflussquantile	85
4.3	Veränderungen des Wasserhaushalts und der Abflüsse	89
4.3.1	Wasserbilanz und langjährige Mittelwerte der Wasserbilanzglieder	89
4.3.2	Monatliche Abflusskennwerte: MoMQ, MoMNO, MoMHQ	93
4.3.3	Niedrigwasserabflussquantile	99
5	Zusammenfassung	103
6	Daten und Literatur	107

Danksagung

Die hier präsentierten Auswertungen konnten nur mit der Unterstützung zahlreicher Institutionen und Projektgruppen realisiert werden.

Dies gilt zunächst für die folgenden AdaptAlp Partner aus Deutschland, Österreich, Italien und der Schweiz:

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Referat M2 - Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen)

Amt der Tiroler Landesregierung (Abteilung Wasserwirtschaft)

Österreichisches Lebensministerium (Abteilung IV/5 Wildbach und Lawinenverbauung)

Italienisches Ministerium für Umwelt, Land und Meer (MATTM)

Schweizer Bundesamt für Umwelt (Abteilung Hydrologie)

Darüber hinaus wurden die Daten von weiteren Stellen für die vorliegenden Untersuchungen genutzt:

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC Potsdam)

Deutscher Wetterdienst (DWD)

ENSEMBLES (EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES)

Global Precipitation Runoff Center (GPCC)

GLOWA-Danube Projekt

Gruppe Modelle & Daten (M&D) am Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

KLIWA (Klimaveränderung und Wasserwirtschaft)

KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt)

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg (MPI Hamburg)

Umweltbundesamt (UBA)

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)

Bei allen möchten wir uns recht herzlich bedanken!

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Das Inngebiet umfasst von der Quelle in der Schweiz bis zur Mündung in die Donau in Bayern rd. 25.700 km² und liegt größtenteils in Österreich. Der Inn ist ein bedeutender südlicher Donauzufluss und damit entscheidend für den Wasserhaushalt der gesamten Region, insbesondere während der Abflussspitzen im Sommer. Zahlreiche Wasserkraftanlagen befinden sich in den alpinen Oberläufen. Gleichzeitig ist der Alpenraum besonders sensitiv gegenüber den Einflüssen der globalen Erwärmung. Die mittlere Temperaturerhöhung seit der Industrialisierung war hier mit +2 °C mehr als doppelt so hoch wie im globalen Durchschnitt (Auer et al., 2007). Die Ausgangsfrage für die hier vorgestellten Untersuchungen war: Wie wirken sich die klimatischen Veränderungen auf den Wasserhaushalt im Inngebiet aus?

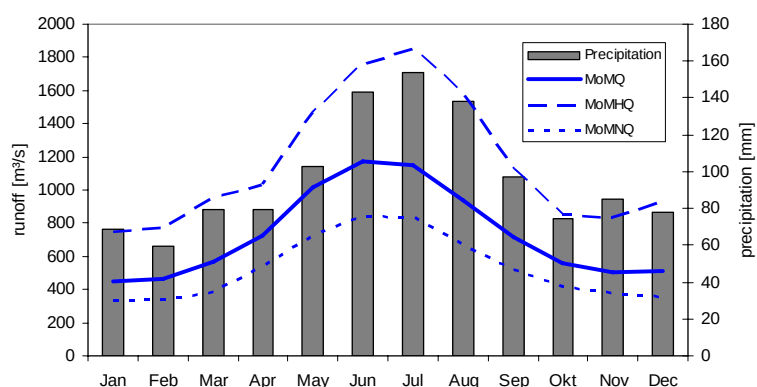


Abb. 1: links: Abfluss am Pegel Passau-Ingling (aus Pegelmessungen 1920-2006) und Niederschlag (Mittelwert der Niederschlagsmessstationen, nicht korrigiert 1971-2000) im Inn Einzugsgebiet; rechts: der Inn fließt von links und die Ilz von links in die Donau in Passau (Foto: StMUGV)

Das Interreg-IVb Projekt AdaptAlp (Adaptation to Climate Change in the Alps, 2008 – 2011) befasste sich mit dem Management von Naturgefahren sowie Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel im alpinen Raum (www.adaptalp.org). Im Rahmen des Work Package 4 („Water Regime“) wurden im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) umfangreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen des regionalen Klimawandels im Einzugsgebiet des Inn durchgeführt. Hierzu wurden Szenariensimulationen für den Wasserhaushalt der Zukunft für das gesamte Gebiet durchgeführt.

Die Arbeiten wurden durch die Firma IAWG (Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik) im Zeitraum von April 2010 bis Mai 2011 übernommen.

1.2 Zielstellung und Vorgehen

Die Ziele der Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die möglichen Klimaänderungen im Untersuchungsgebiet sollen in der Bandbreite der verfügbaren Klimaprojektionen abgeschätzt werden. Die damit einhergehenden Veränderungen der Abflussverhältnisse im Innegebiet, und die gleichzeitige Betrachtung von Modellläufen mit unterschiedlichen Eigenschaften, sollen der Entwicklung von Anpassungsstrategien dienen. Hierfür sollen, soweit möglich, ausgewählte Modellläufe qualitativ beschrieben werden und die in den Modelldaten enthaltenen Informationen in Hinblick auf die Entwicklung von Anpassungsstrategien übersichtlich aufbereitet werden. Abschließend sollen Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich der Ziele des EU-Projektes AdaptAlp formuliert werden.

Hierbei wird wie folgt vorgegangen:

Für die Abschätzung von Klimaveränderungen und deren Einfluss auf den Wasserhaushalt wird eine sogenannte Modellkette verwendet (Abb. 2). Der Ausgangspunkt hierfür ist ein Treibhausgas Emissionsszenario, mit dem globale Klimamodelle (GCMs) angetrieben werden können. Über verschiedene Verfahren werden die Ergebnisse auf die regionale Skala herunterskaliert. Dieser Schritt des Downscaling ist unerlässlich, gerade in einem räumlich heterogenen Gebiet wie dem Inneinzugsgebiet. So haben die meisten GCMs räumliche Auflösungen von mehr als $150 \times 150 \text{ km}^2$, so dass eine Rasterzelle fast das ganze Untersuchungsgebiet umfassen würde.

Das Downscaling erfolgt durch die Anwendung von regionalen Klimamodellen (RCMs). Hierbei werden sowohl statistische als auch dynamische Verfahren verwendet um regionale Klimaprojektionen zu erstellen. Die meisten dynamischen Modelle weisen hierbei einen systematischen Modellfehler auf, den sogenannten Bias, der sich in Abweichungen des modellierten Klimas der Jetztzeit von gemessenen Klimagrößen niederschlägt. Dieser Fehler kann über die sogenannte Bias-Korrektur korrigiert werden (Fowler et al., 2007; Graham et al., 2007; Krahe et al., 2009; Mudelsee et al., 2010).

Im letzten Schritt der Modellkette werden die klimatischen Datensätze der RCMs als Inputdaten für ein Wasserhaushaltsmodell im Untersuchungsgebiet verwendet.

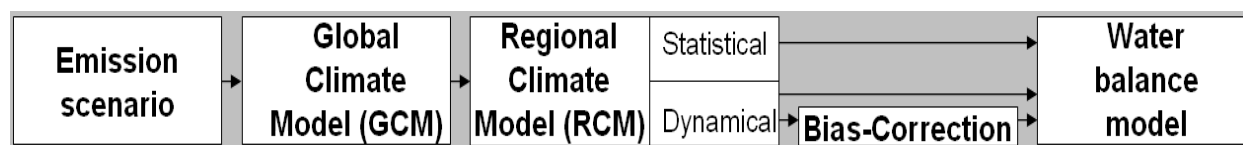


Abb. 2: Die Elemente der Modellkette zur Abschätzung von Klimaänderungen im Wasserhaushalt

In den hier vorgestellten Untersuchungen werden verschiedene regionale Klimaprojektionen betrachtet. Die ausgewählten Regionalmodellläufe basieren auf unterschiedlichen

Downscalingansätzen und verschiedenen Globalmodellläufen. Dadurch können verschiedene plausible Projektionen für die zukünftige Klimaentwicklung im Untersuchungsgebiet und damit verbundene mögliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt einbezogen, sowie die mögliche Bandbreite der zukünftigen Veränderungen aufgezeigt werden.

Ein Wasserhaushaltsmodell (WHM) für das gesamte Innggebiet (bestehend aus drei Teilmodellen: Oberer Inn, Unterer Inn und Salzach), mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und einer räumlichen Auflösung von 1x1km, steht hierfür zur Verfügung.

Der Vergleich zwischen dem modellierten Ist-Zustand der Wasserhaushaltsgrößen und definierten Szenario-Zukunfts-Zuständen dient der Abschätzung möglicher Auswirkungen des Klimawandels und stellt damit eine wichtige Grundlage für die Entwicklung wasserwirtschaftlicher Anpassungsstrategien für den Alpenraum dar. Die Zeithorizonte für den Vergleich mit dem Szenario-Ist-Zustand (1971-2000) sind die sogenannte „nahe Zukunft“ (2021 bis 2050) und die „ferne Zukunft“ (2071 bis 2100).

Bevor Wasserhaushaltsmodellierungen unter Verwendung von Klimamodelldaten durchgeführt werden, werden die ausgewählten Modellläufe speziell für das Inneinzugsgebiet nach verschiedenen Kriterien untersucht. Ziel dieser Untersuchungen ist eine bessere Einordnung der Eigenschaften der einzelnen Projektionen sowie die Bewertung der Plausibilität der einzelnen Läufe für dieses Gebiet.

Der Vergleich des Szenario-Ist-Zustands (1971-2000) mit beobachteten Daten für diesen Zeitraum gilt dabei als Maß für die Plausibilität der für die Zukunft mit der gleichen Modelkombination aus Globalmodell und Regionalmodell gerechneten Projektionen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass ein möglichst guter Referenzdatensatz für diesen Vergleich verwendet wird. Eine Gegenüberstellung und Bewertung von verschiedenen Referenzdatensätzen für das Innggebiet wird daher ebenfalls durchgeführt.

Im vorliegenden Bericht werden, basierend auf dem Abschlussbericht „AdaptAlp - Untersuchung zum Einfluss des Klimawandels auf Wasserbilanzen und Abflüsse für das Inneinzugsgebiet mittels verschiedener Klimaszenarien“, die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten und die dabei erzielten Ergebnisse zusammenfassend beschrieben.

Der Bericht gliedert sich in drei Teile:

Zunächst werden verschiedene, für das Innggebiet verfügbare Referenzdatensätze hinsichtlich der zugrundeliegenden Erstellungsmethoden sowie im Hinblick auf die daraus sich ergebenden Klimatologien bezüglich Niederschlag und Lufttemperatur miteinander verglichen (Abschnitt 2).

Im zweiten Teil erfolgen Bewertungen der verschiedenen, für den Referenzzeitraum (1971-2000) und die Zukunftszeiträume „nahe Zukunft“ (2021-2050) und „ferne Zukunft“ (2071-2100) vorliegenden Klimaprojektionen im Hinblick auf Plausibilität und Klimasignal

(Abschnitt 3).

Im dritten Teil werden schließlich Ergebnisse von Wasserhaushaltssimulationen für das Inn Einzugsgebiet ausgewertet (Abschnitt 4).

1.3 Gebietsübersicht

Das Klima im Inngebiet ist räumlich differenziert und stark durch den Einfluss der Alpen geprägt (siehe auch Tab. 1). Die gletscherbedeckten Gipfelregionen im Süden erreichen Höhen bis über 4000 m. Im oberen Teil des Einzugsgebietes ist es daher mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 5,2 °C deutlich kälter als im nördlichen Alpenvorland mit 7,3 °C. Entsprechend unterschiedlich fallen auch die Jahresniederschläge aus. In den Bergen können bis über 3000 mm pro Jahr fallen, während im Flachland etwa 800 mm fallen. Die höchsten Niederschlagssummen werden in den Sommermonaten erreicht. Das Wasserregime des Inn am Pegel Passau-Ingling, dem Auslasspegel des hier betrachteten Untersuchungsgebietes, ist stark geprägt durch die räumliche und saisonale Verteilung des Niederschlags. Die Hälfte des jährlichen Abflusses erfolgt in den Sommermonaten, wenn Schneeschmelze aus den Bergen sowie hohe Niederschläge zur Abflussbildung beitragen (Abb. 1). Die großen Hochwasser der Vergangenheit wurden im Inngebiet zumeist durch Vb-Wetterlagen in den Monaten Mai bis August ausgelöst, bei denen warme und feuchte mediterrane Luftmassen über die Alpen transportiert werden, und lang anhaltende ergiebige Niederschläge zur Folge haben (Gattermayr & Steck, 2006; Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2002; Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007).

Tab. 1: Einige Daten und Fakten zum Einzugsgebiet des Inn

Geographie:		Klima:		Hydrologie:	
Staaten	CH, A, D, I	Temperatur [°C]*	6,3	Länge [km]	517
Fläche [km²]	Ca. 26.000	Niederschlag [mm] **	1400	Auslasspegel	Passau-Ingling (D)
Höhe [m]	290–ca. 4000	Verdunstung [mm]**	500	MQ [m³/s] ***	739

* Mittelwert Klimastationen ** Langzeitsimulation des Wasserhaushalts mit WaSiM-ETH *** Pegel, 1920-2006

Eine Übersicht über das gesamte Untersuchungsgebiet, die im Rahmen des Projekts untersuchten Teileinzugsgebiete, sowie die betrachteten Pegel bietet Abb. 3. Das gesamte Inn Einzugsgebiet ist demnach in 3 Teileinzugsgebiete unterteilt: Oberer Inn, Salzach und Unterer Inn. Innerhalb des Gebiets Oberer Inn wird das kleinere Einzugsgebiet der Öztaler Ache (790 km²) zusätzlich betrachtet, sowie im Unteren Inn das Einzugsgebiet der Alz (2222 km²).

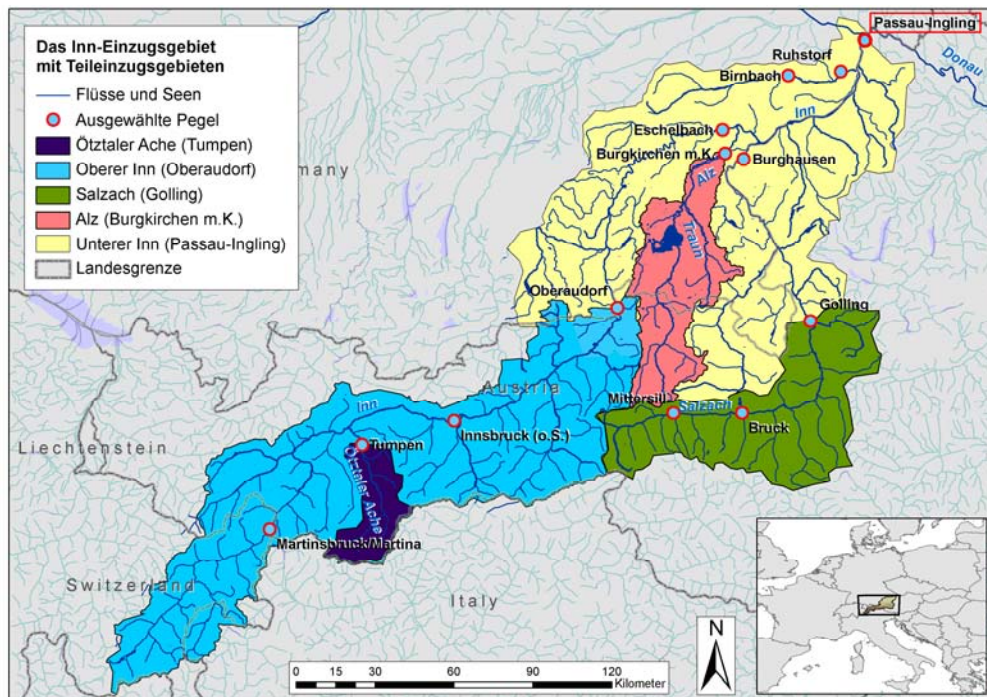


Abb. 3: Das Einzugsgebiet des Inn, sowie relevante Teileinzugsgebiete und Pegel

In den folgenden Auswertungen werden zum Einen Ergebnisse für die Teilgebiete gezeigt:

- Gesamteinzugsgebiet Inn (Kürzel „Inn“)
- Einzugsgebiet Oberer Inn („O. Inn“)
- Einzugsgebiet Unterer Inn („U. Inn“)
- Einzugsgebiet Salzach („Salz“)
- Einzugsgebiet Alz („Alz“)
- Einzugsgebiet Ötztaler Ache („Ötz“)

Des Weiteren werden pegelspezifische Ergebnisse, insbesondere zum Auslasspegel des Gesamtgebietes, Passau-Ingling / Inn, aber auch zu den Auslasspegeln der beiden Teilgebiete, Golling / Salzach und Oberaudorf / Inn, sowie teilweise auch zu anderen Pegeln dargestellt und diskutiert.

2 Referenzklima

Für den Alpenraum liegen verschiedene klimatische Messdatensätze vor. Der Vergleich zwischen ihnen soll durchgeführt werden, um Unsicherheiten bezüglich des verwendeten Referenzdatensatzes zu untersuchen. Der Referenzdatensatz ist von großer Bedeutung für die folgenden Auswertungen. So werden für die Interpretation der Ergebnisse von Regionalmodellläufen Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt, bei denen die Klimaprojektionen mit einem Referenzdatensatz verglichen werden (Abschnitt 3.5). Auch für die durchzuführende Bias-Korrektur von dynamischen Regionalmodellen wird ein Referenzdatensatz benötigt (Abschnitt 3.3). Gerade in dem heterogenen Relief der Alpen kommen regionalisierte Klimadatensätze zu unterschiedlichen Ergebnissen. Dies gilt insbesondere für den Niederschlag, dessen räumliche und zeitliche Verteilung jedoch für Wasserhaushaltsmodellierungen von entscheidender Bedeutung ist.

2.1 Übersicht über betrachtete Referenzdatensätze

Im Einzelnen werden im Rahmen der Studie folgende Referenzdatensätze (zu den Datenquellen und dem Datenbezug: siehe Abschnitt 6 Daten und Literatur) miteinander verglichen:

- **Frei:** Niederschlagsklimatologie von Frei & Schär (Frei & Schär, 1998)
- **HISTALP:** „HISTALP-10-min-grid“-Datensatz für die „Greater Alpine Region“ (GAR) (Efthymiadis et al., 2006)
- **E-OBS:** Ensembles-Datensatz, erstellt im „European Union Framework 6 ENSEMBLES“-Projekt“ (Haylock et al., 2008; Hofstra et al., 2009)
- **HYRAS:** Datensatz des Deutschen Wetterdienstes; Version 0.1 hinsichtlich der Temperatur (wurde zwischenzeitlich weiterentwickelt; Quelle: DWD 2010, unveröffentlicht) und 1.0 hinsichtlich des Niederschlags. Für den vorliegenden Bericht sind zwei valide HYRAS-Datensätze vorhanden:
 - o **HYR_ori:** Datensatz in einem 1x1 km Raster, der aber im Rahmen der Arbeiten in AdaptAlp stets in einem 5x5 km Raster verwendet wird
 - o **HYR_dis:** Datensatz, bei dem in einem für die Biaskorrektur entwickelten Verfahren Niederschlags- und Lufttemperaturdaten von 5 auf 50 Kilometer Rasterauflösung aggregiert und dann wieder auf 5 Kilometer disaggregiert wurden (zur Methodik siehe Krahe et al. (2011, Technical Report AdaptAlp))
- **HADES:** Hydrologische Atlas der Schweiz (Bundesamt für Umwelt, Hydrologischer Atlas der Schweiz, Texttafel 2.6, Texttafel 2.7)
- **HAÖ:** Hydrologischer Atlas von Österreich (Skoda & Lorenz, 2003)
- **GPCC:** Datensatz des Global Precipitation Climatology Centre (Schneider et al., 2008;

Rudolf et al. 2010)

- **Obs_was:** Regionalisierte WaSiM-Eingangsdaten (Die Methodik wird beschrieben in Pöhler et al. (2011, Technical Report AdaptAlp)). Zusätzlich liegt ein weiterer Datensatz vor:
 - o **Obs_was5:** die bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde mittels WaSiM-Gridding-Algorithmen auf ein 5x5 km-Gitter aggregierten „Obs_was“-Daten

Als einheitliche Vergleichsbasis wird der Stationsdatensatz verwendet:

- **Station:** Originäre Stationsdaten (unkorrigierte Niederschläge) (Quellen: DWD, MeteoSchweiz, BAFU, ZAMG, BMLFUF)

Die wichtigsten Charakteristika der Datensätze liefert die Tab. 2. In der Tab. 3 wird eine Übersicht über die Zahl von Stützstellen für alle Referenzdatensätze gezeigt.

Tab. 2: Charakteristika betrachteter Referenzdatensätze

Allgemeines								
Kürzel	FREI	HISTALP	E-OBS	Obs_was	HYRAS (HYR_ori, HYR_dis)	HADES	HAÖ	GPCC
Variablen ¹	P	P	P,T	P,T u.a.	P (Version 1.0), T (Version 0.1)	P	P	P
Format	ASCII	ASCII	NetCDF	WaSiM-TAB	WaSiM-TAB	Excel	ASCII	NetCDF
Datengrundlagen								
Max. Anzahl Stationen	6600	192	2300	T: 104 P: 415	T: 1000 P: 6000	6080	192	50000
Niederschlagskorrektur	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Gridding								
Räumliche Auflösung	24 Km	10' 12,3 km	0,24° / 0,5° 18,5 / 50 km	1 km	1 km, aggregiert auf 5 km	24 Km	6,3 km	0,24° / 0,5°
Zeitliche Auflösung	Tag/ Monat	Tag/ Monat	Tag	Tag /Stunde	Tag			
verfügbarer Zeitraum	1971-1995	1800-2003	1950-2009	1961-2003	1951-2006	1971-1990	1961-1990	1950-2009
Methode ²	P:SYMAP	P:SYMAP	T: ETK P:IK + UK	T:IDW+REG P: IDW+REG	T:OK P:IDW	PRISM	IDW+ONM	SYMAP

Fortsetzung Tab. 2

Hintergrundfeld							
Methode ²	-	P: PRISM / TPS	T:3D-TPS P:3D-TPS	-	T:MLR+IDW P:MLR+IDW		

¹: P: Niederschlag; T: Lufttemperatur

²: ETK: External-Drift-Kriging; IK: Indikator-Kriging; UK: Universal Kriging; TPS: Thin Plate Splines; 3D-TPS: dreidimensionale Thin Plate Splines; IDW: Inverse-Distance-Interpolation; IDW+REG: Kombination aus Höhenregression und Inverse Distance-Interpolation; OK: Ordinary-Kriging-ähnlich; MLR: Multiple Lineare Regression

Tab. 3: Anzahl von Stützstellen nach Zielgebieten für die betrachteten Referenzdatensätze

Referenz	Oberer Inn	Unterer Inn	Salzach	Inn, Gesamt	Alz	Öztaler Ache	Auflösung [Km]
HISTALP	42	55	16	113	9	3	12.3
HYR_ori / HYR_dis	362	473	134	969	80	28	5
FREI	18	22	6	46	4	2	22.2
E-OBS	18	25	6	49	5	2	18.5
HADES	278	373	103	754	65	23	6.2
GPCC	4	7	3	14	1	0	37.1
HAÖ*	(243)	(162)	100	(505)	(25)	29	6.3
Obs_was	9774	13647	3566	26987	2164	769	1
Stationen (P/T)	145/31	231/51	39/22	415/104	49/14	6/1	-

*Der HAÖ-Datensatz deckt nur die Gebiete Salzach und Öztaler Ache vollständig ab

2.1.1 Beschreibung von Gridding-Methoden für meteorologische Daten

Bei den betrachteten Referenzdatensätzen liegen verschiedene mathematisch-statistische Regionalisierungsprinzipien zugrunde, die nachfolgend kurz beschrieben werden. Dabei wird hier eine Unterscheidung in regressionsbasierte, vermaschungsbasierte, interpolationsbasierte und geostatistische Ansätze sowie kombinierte Methoden vorgenommen (vgl. z.B. Sluiter, 2009).

Regressionsbasierte Ansätze

Bei Regressionsansätzen werden in der Regel Abhängigkeiten der an den Stützstellen bekannten, zu interpolierenden Größe z zu einem an beliebigen Stellen bekannten Geofaktor x genutzt. In der Regel wird die Abhängigkeit als linear oder abschnittsweise linear betrachtet, so dass für die Abschnitte die Gleichung

$$z(x) = a + b x + \varepsilon$$

gilt und die Parameter a und b zum Beispiel durch Fehlerquadratsummenminimierung geschätzt werden. Die Regressionsgleichungen liefern an den Stützstellen in der Regel Werte, die sich durch die Abweichung (Residuen) ε_i von den gemessenen Werten unterscheiden. Dies unterscheidet den Ansatz von Interpolationsansätzen, bei denen die Stützstellenwerte exakt oder zumindest nahezu exakt abgebildet werden. Die Berücksichtigung von abschnittsweise linearem Verhalten basiert auf der Vorstellung, dass zum Beispiel Inversionslagen zu unterschiedlichen Steigungskoeffizienten in verschiedenen Höhenlagenbereichen führen können (Schulla, 2009).

In die Gruppe der regressionsbasierten Ansätze lässt sich auch der PRISM-Ansatz (Daly et al., 1993; Daly et al., 2002; Schwarb, 2001; Frei & Schmidli, 2006) einordnen, wenngleich dabei auch das Prinzip der Nutzung von Expertenwissen eine zentrale Rolle spielt. Das Kürzel PRISM steht für "parameter elevation regressions on independent slopes model". Bei dem Verfahren wird die Abhängigkeit der betrachteten Klimavariablen von lokalen Eigenschaften der Topographie zur Interpolation genutzt, wobei neben der Geländehöhe auch Neigung, Exposition und die Entfernung zu Ozeanen und größeren Seen mit einfließen. Das Verfahren berücksichtigt, dass die Abhängigkeiten regional stark variieren können.

Nächstnachbarbasierte Ansätze

Beim Nächstnachbaransatz erfolgt die Zuweisung eines Wertes zu einem beliebigen Punkt anhand des Stationswertes der nächstgelegenen Station. Der in der Hydrologie bekannteste Nächstnachbaransatz ist die Thiessen-Methode. Erweiterungen basieren auf der Anwendung von Vermaschungsprinzipien wie zum Beispiel der Dreiecksvermaschung (TIN).

Inverse-Distanz-Verfahren und SYMAP

Die distanzgewichteten Methoden basieren auf den Arbeiten von Shepard (1968). Grundannahme ist, dass sich die Werte $z(x,y)$ an einem beliebigen, durch die Koordinaten (x,y) beschriebenen Punkt als gewichtete Summe von den an den Stützstellen w_i bekannten Werten ergeben, wobei die Gewichtung invers zur Distanz erfolgt.

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^n p_i(x, y) w_i$$

Die Gewichtsfunktion p_i ist dabei proportional zum inversen euklidischen Punktabstand r mit $r^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$ und hat beim ursprünglichen IDW-Ansatz die Form

$$p_i(x, y) = \frac{\sigma_i(x, y)}{\sum_{j=1}^n \sigma_j(x, y)}, \sigma = 1/r^\mu, \mu > 0$$

Ist n identisch mit der Gesamtmenge der vorhandenen Messpunkte, dann handelt es sich um einen globalen Ansatz, im anderen Fall um einen lokalen. Die Potenz μ bestimmt, wie schnell sich das Gewicht eines Wertes am Messpunkt mit zunehmender Distanz verringert. Es sind verschiedene Varianten der Methode entstanden. In der Klimatologie besonders verbreitet ist das unter der Bezeichnung SYMAP bekannte Verfahren (Shepard, 1984). Der Hauptunterschied zum Standardverfahren besteht darin, dass die Gewichte richtungsabhängig korrigiert werden, um Übergewichtungen aufgrund inhomogener Stationsverteilungen zu verhindern.

Spline-Interpolationen

Bei einem 1D-Spline werden Stützstellen über eine stückweise aus Polynomen mit gegebenem Polynomgrad gebildete Funktion miteinander verbunden, wobei Anforderungen an die Differenzierbarkeit der Funktion an den Stützstellen gestellt werden. Bei Polynomgraden von 1 bis 3 handelt es sich um lineare, quadratische oder kubische Splines. Dadurch, dass sie stückweise zusammengesetzt sind, sind sie flexibler als Polynome und dennoch relativ einfach und glatt und neigen auch am Rand nicht zu Oszillationen. Die physikalische Vorlage kubischer Splines ist das biegsame Lineal der Schiffbauer (engl. „Spline“), das vorgegebene Stützstellen durch eine harmonische Biegelinie mit minimaler Biegeenergie und kleinsten Krümmungen verbindet. Durch nachgeschaltete Anwendung von 1D-Spline-Interpolation zunächst in Nord-Süd und dann in West-Ost-Richtung lassen sich in vereinfachter Weise (bei regulär verteilten Stützstellen) auch 2D-Strukturen in Form von bilinearen und bikubische Splines beschreiben (Schulla, 2009). Das unmittelbare mathematische 2D-Analogon der kubischen 1D-Splines sind allerdings 2D-Thin-Plate-Splines. Die Bezeichnung rührt daher, dass man sich das Ergebnis als eine dünne elastische Platte vorstellen kann, die bei minimaler Biegeenergie an irregulär verteilten Stützstellen befestigt ist. Mathematisch erfolgt der Aufbau auf der Grundlage sogenannter radialer Basisfunktionen. Eine sehr kompakte Beschreibung liefert z.B. Borkowski (2004). Thin-Plate-Splines lassen sich auch auf 3D-Thin-Plate-Splines erweitern, bei denen die Interpolation innerhalb des durch Längen-, Breiten- und Höhenkoordinaten aufgespannten dreidimensionalen Raumes erfolgt (siehe z.B. Hutchinson, 1995).

Geostatistische Ansätze

Ähnlich wie bei den Inverse-Distanz-Ansätzen ergeben sich auch bei geostatistischen Kriging-Ansätzen die Werte an beliebigen Punkten im Raum durch gewichtete Summe der Werte an benachbarten Stützstellen. Die Ermittlung der Gewichte erfolgt dabei nicht invers zur Distanz, sondern so, dass die Schätzvarianz minimiert wird, der Schätzer im Mittel den wahren Wert schätzt und keinen systematischen Fehler aufweist. In diesem Sinn wird der Ansatz auch als optimale Filterung bezeichnet (z.B. Borkowski, 2004). Dabei wird angenommen, dass die für beliebige Punkte des Raumes zu schätzende Zufallsvariable $z(x,y)$ aus einer deterministischen (großskaligen) Komponente $m(x,y)$ und einer stochastischen (kleinskaligen) Komponente $R(x,y)$ zusammengesetzt ist.

$$z(x,y)=m(x,y) + R(x,y)$$

Für die Modellierung der stochastischen Komponente $R(x,y)$ wird räumliche Erhaltungsneigung zugelassen. Der Grad der räumlichen Erhaltungsneigung lässt sich am Verlauf des empirischen Semi-Variogramms erkennen, das die Abhängigkeit von Werteunterschieden vom Abstand quantifiziert. Das empirische Variogramm wird im Zuge der Modellparametrisierung durch ein geeignetes, theoretisches Variogramm abgebildet, wobei die Parameter des theoretischen Variogramms zu optimieren sind. Bekannte theoretische Variogramm-Modelle sind zum Beispiel die Modelle „Exponential“, „Spherical“, „Matern“, „Powered Exponential“ oder „Nugget“.

Verschiedene Kriging-Varianten werden durch die unterschiedliche Definition des großskaligen Anteils $m(x,y)$ festgelegt. Ist der Erwartungswert $m(x,y)$ konstant, aber nicht a priori bekannt, dann handelt es sich um sogenanntes Ordinary Kriging. Ist $m(x,y)$ nicht konstant, ist also der Prozess (räumlich) nicht stationär, können spezielle Kriging-Verfahren, wie z.B. das Kriging mit lokalen Mittelwerten oder das External Drift Kriging, eingesetzt werden. Beim External Drift Kriging wird der deterministische Anteil $m(x,y)$ durch eine Linearkombination von Variablen modelliert, die die Mittelwertverschiebung erklären können. Beim Niederschlag kann dies also beispielsweise die Geländehöhe und – sofern Daten verfügbar – die Exposition sein. Werden der Rechts- und Hochwert als externe Driftvariablen eingesetzt, dann spricht man mitunter auch von Universal Kriging. Eine spezielle Form von Kriging liegt auch vor, wenn die zu interpolierende Zielgröße binär ist, also nur die Werte Null oder Eins annehmen kann. Ein für deren Interpolation geeigneter Ansatz ist unter der Bezeichnung Indikator-Kriging bekannt. Eine Anwendung des Verfahrens im klimatologischen Kontext besteht in der Interpolation des Auftretens von Niederschlag als binäre Größe.

Mathematische Beschreibungen zu allen dargestellten Kriging-Varianten enthält z. B. Goovaerts (1997).

Kombinierte Methoden und Nutzung von Hintergrundfeldern

Eine häufig vorgenommene Methodenkombination besteht darin, die Residuen von Regressionsansätzen auf der Grundlage von Interpolationsverfahren zu regionalisieren. Die gesuchte Größe an beliebiger Stelle ergibt sich dann als Summe aus Regressionswert und interpoliertem Residuum. Als Interpolationsverfahren wird dabei zum Beispiel das IDW-Verfahren (s. Schulla, 2009) oder Ordinary Kriging angewandt. Letzteres wird dann als Residual-Kriging oder Detrended Kriging bezeichnet.

Eine andere Form der Kombination verschiedener Griddingverfahren resultiert häufig bei Ansätzen, bei denen Hintergrundfelder genutzt werden. Dabei werden in der Regel Hintergrundfelder wie etwa langjährige monatliche Lufttemperatur- oder Niederschlagsklimatologien auf der Grundlage eines dichteren Messnetzes und unter Berücksichtigung maßgeblicher Geofaktoren wie insbesondere der Geländehöhe berechnet und die Interpolation von zeitlich höher aufgelösten Werten (z.B. Tageswerte) erfolgt dann in Form von Anomalie-Interpolationen, in dem die Differenz oder der Quotient zum Hintergrundfeld interpoliert wird. Der Absolutwert ergibt sich dann, indem der interpolierte Anomaliewert mit dem Wert der Klimatologie multiplikativ bzw. additiv verknüpft wird.

Räumlicher Bezug der Gridding-Werte

Interpolationen irregulär verteilter, punktbezogener Messwerte liefern in der Regel punktbezogene interpolierte Werte für das zugrunde liegende Gitter. Häufig werden jedoch Mittelwerte für Gitter der vorgegebenen Gitterweite benötigt. Um dies auf der Grundlage der dargestellten Verfahren zu erhalten, kann zum Beispiel eine Aggregation benachbarter Punktwerte durch Mittelwertbildung durchgeführt werden. Beim Kriging lassen sich verfahrensinhärent interpolierte Werte mit Flächen- statt Punktbezug auch durch Übergang vom Punktkriging zum sogenannten Blockkriging ermitteln.

2.1.2 Weitergehende Aspekte bei der Interpolation von meteorologischen Daten

Neben den Gridding-Methoden spielen weitere methodische Aspekte im Blick auf die Güte des Gridding-Ergebnisses eine große Rolle. Dies sind insbesondere

- Messnetzdicke und zeitliche Variabilität der Messnetzdicke
- Fehlwertbehandlung
- Messstellenrepräsentanz Datenhomogenität und Datenhomogenisierung
- Korrektur systematischer Fehler

Messnetzdichte und Behandlung fehlender Werte

Die räumliche Auflösung des Grids sollte idealerweise von der Messnetzdichte abhängig sein. Dies lässt sich praktisch nicht immer einhalten, weil in Abhängigkeit von der Fragestellung andere Gegebenheiten die Griddichte bestimmen. In der Regel treten bei Langfristbetrachtungen Messnetzverdichtungen im Lauf der Zeit auf. Dies führt dazu, dass die interpolierten Werte in Abhängigkeit vom betrachteten Zeitpunkt unterschiedliche Unschärfe haben. Mitunter wird diesem Aspekt Rechnung getragen, in dem die fehlenden Informationen durch statistische Methoden wie EOF-Ansätze (empirische orthogonale Funktionen) ersetzt werden. Die EOFs stellt dabei eine spezielle Form der Hauptkomponentenanalyse dar, bei der die an verschiedenen Stationen gemessenen, untereinander korrelierten Zeitreihen als Variablen einfließen und über orthogonale Faktoren nachgebildet werden (Wackernagel, 1998).

Messnetzrepräsentanz

Die räumliche Verteilung von meteorologischen Stationen ist nicht zwingend repräsentativ für den Raum, dessen klimatologische Charakteristik gesucht wird. Typisch ist etwa das Fehlen von Messstationen in den Hochlagen von Gebirgen. Betrachtet man dann Klimavariablen mit starker Höhenabhängigkeit, kann dies bezogen auf die regionalisierte Größe zu systematischen Abweichungen von den realen Verhältnissen führen. Das Einzugsgebiet des Inn reicht im Süden bis auf Höhen über 3000 m (Abb. 5).

Um die Höhenrepräsentanz zu untersuchen, werden in Abb. 4 die Höhenverteilungen der Zielgebiete und diejenigen der vorhandenen Messstationen in Form von Boxplots gegenübergestellt. Die Gebietshöhenverteilungen werden dabei den Höhenwerten aus dem HYRAS-Datensatz entnommen. Die Breite der Boxplots ist proportional zum jeweiligen Stichprobenumfang. Der Median wird durch die dickere Linie innerhalb der Box dargestellt, die 25 %- und 75 %-Quantile durch die untere und obere Boxbegrenzung und die extremeren Werte durch die jeweiligen, sogenannten Whiskers oberhalb und unterhalb der Box. Als extremere Werte werden dabei hier diejenigen Werte betrachtet, deren Abstand von der Box das 1,5fache des Interquartilabstandes (Differenz zwischen 75 %- und 25 %-Quantil) überschreitet.

Man erkennt in den Boxplots, dass - mit Ausnahme vom Gebiet „Unterer Inn“ - Höhenverteilungen innerhalb der Gebiete vorliegen, die erheblich von den jeweiligen Stationshöhenverteilungen abweichen, so dass eine Repräsentanz der dargestellten Messstellen in Bezug auf die Höhenverteilung nicht generell gegeben ist. Räumliche Interpolationen, die auf diesem oder einem vergleichbaren Messstellendatensatz aufsetzen, sollten demnach dann Höheninformationen berücksichtigen, wenn die zu interpolierende Größe eine klare Höhenabhängigkeit aufweist, also insbesondere bei der Lufttemperatur und

dem Niederschlag.

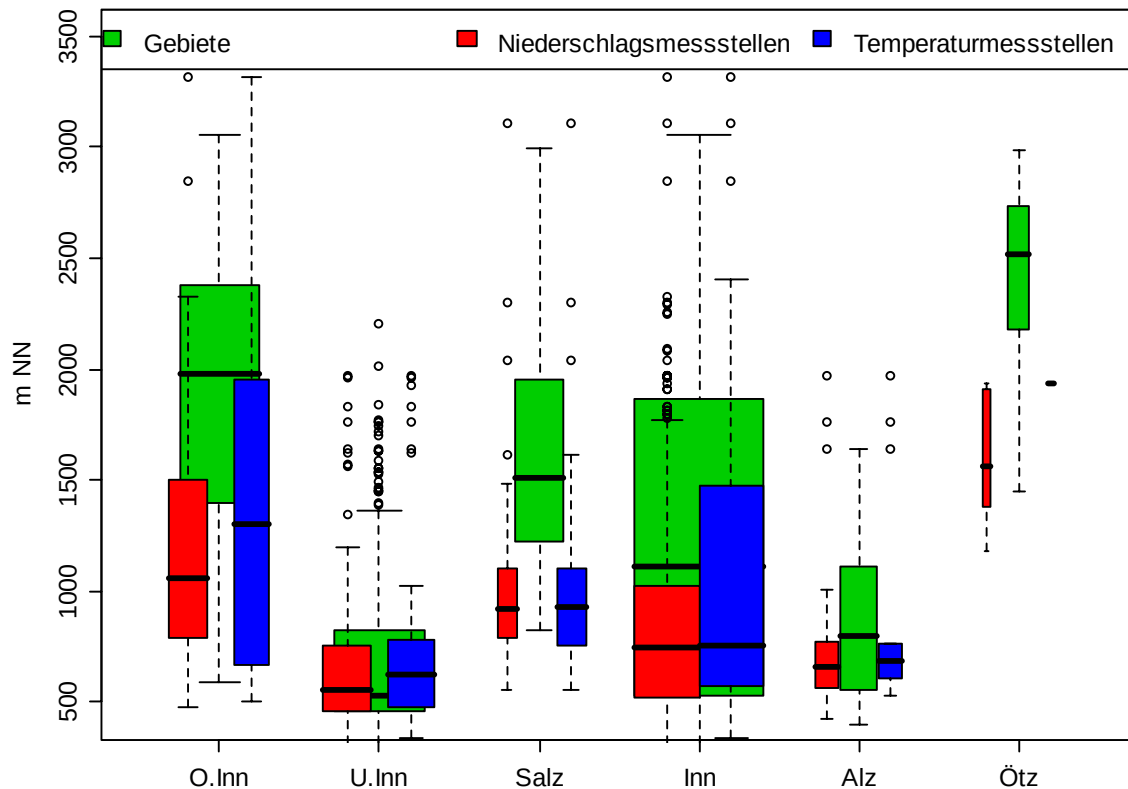


Abb. 4 Höhenverteilung der vorhandenen Messstellen innerhalb der Teilgebiete des Inneinzugsgebiets (Daten Höhenverteilung: HYRAS; Daten Messstellen: DWD, MeteoSchweiz, BAFU, ZAMG, BMLFUF)

Den betrachteten Datensätzen liegen zum Teil unterschiedliche Stationsdaten zugrunde (siehe Abschnitt 2.1.3). Die in Abb. 4 erkennbare mangelnde Höhenrepräsentanz der Stützstellen gilt jedoch für alle Datensätze.

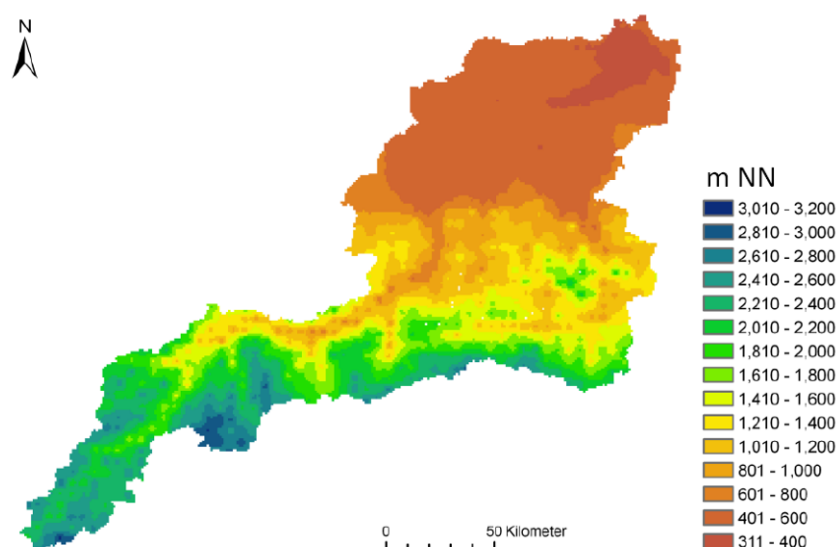


Abb. 5: Geländehöhen im Inn-Einzugsgebiet (1km-WaSiM-ETH-Raster abgeleitet aus Geodaten des Bayerischen Landesamts für Umwelt, des Landes Tirol und des Geoinformationszentrums der Schweiz, Swisstopo)

Datenhomogenität und Homogenisierung

In der Verarbeitungskette von Erfassung, digitaler Speicherung und Weitergabe von Klimavariablenausprägungen können diverse Fehler auftreten, die sich als Inhomogenitäten in den Datensätzen wiederfinden können. Unter Inhomogenität ist dabei sowohl das Auftreten von fehlerbehafteten Werten zu verstehen (z.B. aufgrund falscher Ablesung) als auch die Existenz nichtklimatisch bedingter Trends und Sprünge. Letzteres tritt beispielsweise auf, wenn die Lage der Messstelle örtlich verschoben wird oder wenn sich sprung- oder trendartige Veränderungen im Nahbereich der Messstelle einstellen, etwa in Form von Landnutzungsveränderungen. Datenhomogenität lässt sich statistisch prüfen, wobei die Verfahren in absolute und relative Ansätze eingeteilt werden. Bei relativen Ansätzen erfolgt die Prüfung durch Vergleich mit einem als homogen bekannten Referenzdatensatz. Bei absoluten Verfahren wird in der Regel nach Ausreißern oder Sprüngen gesucht. Einen Überblick über verschiedene absolute Verfahren zur Prüfung der Homogenität von meteorologischen Daten liefert Wijngaard et al. (2003). Behandelt werden dort die Verfahren von Alexanderson, Buishand, Pettitt und von Neuman.

Korrektur systematischer Fehler

Speziell bei Niederschlagsmessungen treten neben zufälligen auch deutliche systematische Messfehler auf. Sie werden im Wesentlichen verursacht durch den von der Art des Messgerätes abhängigen Benetzungs- und Verdunstungsfehler und durch den Windfehler, der aus der Verdriftung der Niederschläge resultiert. Systematische Messfehler sind stark abhängig von der Niederschlagsart (Regen oder Schnee) und der Niederschlagsmenge und führen generell zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Niederschlagsmenge. Der systematische Fehler kann mittels Korrekturverfahren verringert werden (z.B. Richter, 1995), wobei je nach Ansatz neben messstellenbezogenen Stammdaten auch Zeitreihendaten z.B. zur Windgeschwindigkeit benötigt werden, die allerdings auch fehlerbehaftet sein können.

2.1.3 Beschreibung der verglichenen Referenzdatensätze

Für den Vergleich liegen acht klimatische Datensätze für den Alpenraum vor, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Niederschlagsklimatologie von Frei & Schär (1998)

Frei & Schär (1998) beschreiben eine an der ETH Zürich entwickelte, gridbasierte Niederschlagsklimatologie für den gesamten Alpenraum im Bereich zwischen 2°-17° Ost und 43°-49° Nord. Das Gebiet hat eine West-Ost-Erstreckung von 1200 km und eine Nord-Süd-

Ausdehnung von 700 km. Die Daten sind zugänglich über das Datenzentrum des Mesocale Alpine Programme (MAP).

Bezogen auf eine horizontale Grid-Auflösung von 24 Kilometern liegen monatliche Niederschlagssummen für den Zeitraum von 1971 bis 1990 und tägliche Niederschlagssummen für den Zeitraum 1971 bis 1995 vor. Die zugrunde liegenden Stationsdaten wurden von 9 Datengebern der 8 Anrainerstaaten zusammengetragen (Österreich A, Schweiz CH, Deutschland D, Frankreich F, Italien I, Kroatien K, Slovenien S, Bosnien B). Insgesamt handelt es sich um mehr als 6600 Niederschlagsstationen (Abb. 6). Die Datendichte im Westen, Norden und Osten des Gebietes ist relativ gleichförmig, wobei den Stationen dort ein mittlerer Abstand von ca. 10 Kilometern zugeordnet werden kann.

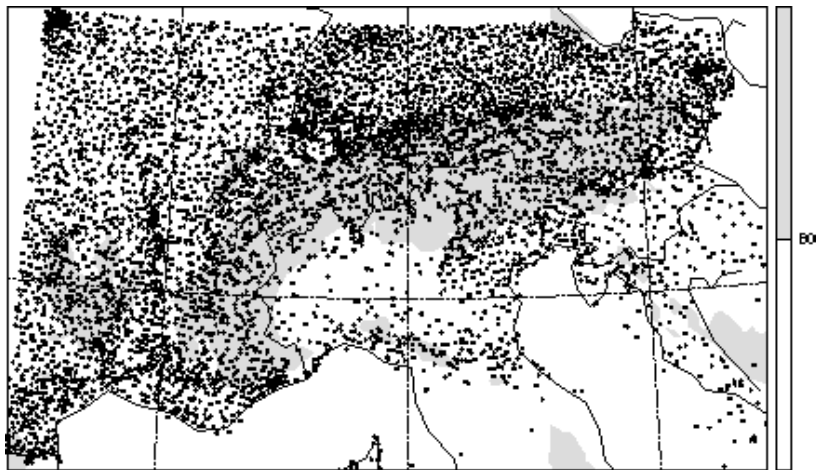


Abb. 6: Frei & Schär Niederschlagsklimatologie: Untersuchungsraum und Stationenverteilung (aus Internetpräsenz zum Datensatz, www.map.meteoswiss.ch)

Probleme sowohl im Hinblick auf die Dichte als auch hinsichtlich der Homogenität liegen im südlichen Bereich vor. So enden die Datenreihen des „Italian National Hydrological Service“ im Jahr 1986 bezogen auf die meisten Messstellen, so dass danach andere Stationen von anderen Datengebern verwendet werden. Probleme im Hinblick auf die Homogenität bestehen auch aufgrund der Unterschiede in der Beobachtungspraxis der verschiedenen Länder. So werden nicht nur unterschiedliche Messgeräte eingesetzt (z.B. HELLMANN in A, CH und D, SPIEA in F), sondern die täglichen Ablesung erfolgt auch zu unterschiedlichen Uhrzeiten (7:00h in D, A, K, F, S und B, 7:30h in CH, 9:00 in I).

Die Datenplausibilität wird in Form von Spannbreite-Prüfungen sowie mittels eines räumlichen Konsistenztests durchgeführt, sofern nicht bereits bei den Datengebern Qualitätskontrollen erfolgten. In Version 4.0 sind alle Tagesbeobachtungen durch eine gleichartige Qualitätskontrolle gelaufen und inhomogen erscheinende Stationen aussortiert worden.

Als Interpolationsmethode wird ein etwas angepasstes SYMAP-Verfahren mit einem an die lokalen Verhältnisse angepassten Suchradius angewandt, wobei sichergestellt wird, dass zumindest 3 Stützstellen bei der Interpolation berücksichtigt werden. In der Regel erfolgt die Interpolation mit 5 bis 25 Stationswerten. Eine Niederschlagskorrektur erfolgt nicht, wobei laut Autoren davon ausgegangen werden kann, dass mit systematischen Unterschätzungen bis hin zu „several 10 %“ gerechnet werden muss. Bezogen auf Jahressummen wird mit einer Unterschätzung von 7 % in Tieflagen bis hin zu 25 % in Hochlagen und windexponierten Bereichen gerechnet. Dabei hat der Fehler einen ausgeprägten Jahresgang mit Maximalwerten im Winter (8-30 %) und kleineren Werten im Sommer (5-10 %).

Die Niederschlagsstationen sind nur bedingt repräsentativ für den betrachteten Gesamttraum. Dies belegt Abb. 7, in der die Höhenverteilung der Stationen der Höhenverteilung des Gesamtgebietes gegenübergestellt wird. Eine Korrektur aufgrund der nur bedingt repräsentativen Stationenverteilung erfolgt nicht.

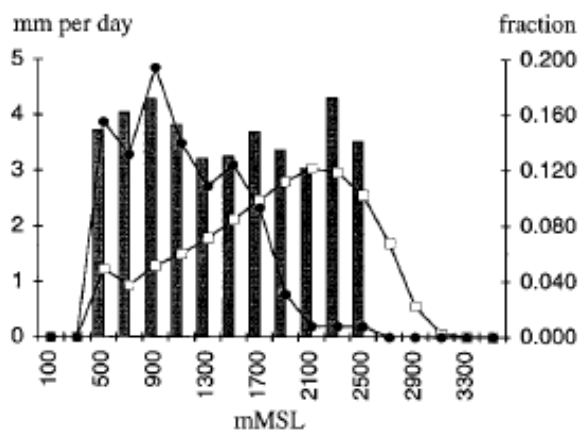


Abb. 7: Frei & Schär Niederschlagsklimatologie: Höhenverteilung der Stationen (Polygon mit ausgefüllten Kreisen, rechte Ordinate) und Höhenverteilung des Gesamtgebietes (Polygon mit offenen Rechtecken, linke Ordinate), Balken zeigen stationsbezogene Jahresniederschlagssummen im jeweiligen Höhenintervall (aus Frei & Schär, 1998)

Insgesamt muss davon ausgegangen werden, dass die Daten wegen des nicht korrigierten Niederschlagsfehlers zu niedrig sind und dass darüber hinaus Inhomogenitäten aufgrund der ab 1986 im Bereich Norditaliens veränderten Stationenverteilung auftreten.

Inwieweit die unterrepräsentierten Hochlagen auf den Gesamttraum hin betrachtet zu systematisch zu niedrigen Niederschlägen führen, ist von der Frage der Abhängigkeit des Niederschlags von der Höhenlage im betrachteten Raum abhängig. Frei & Schär (1998) warnen vor der Anwendung einfacher Abhängigkeitsbeziehungen zur Höhe und verweisen darauf, dass dies durch die in unterschiedlichen Höhenintervallen auftretenden Stationsniederschlagshöhen nicht gestützt wird (z.B. Balkendarstellungen in Abb. 7 oder auch ein entsprechender Alpen-Nord-Süd-Schnitt in der Originalarbeit).

HISTALP

Bei dem „HISTALP-10-min-grid“-Datensatz (Efthymiadis et al., 2006) handelt es sich um gridbezogene, monatliche Niederschlagssummen über den Zeitraum von 1800 bis 2003. Das Grid hat eine Kantenlänge von 10 Minuten und liegt für ein mit „Greater Alpine Region“ (GAR) bezeichnetes Gebiet vor, das anhand des Bereiches zwischen 4°-19° Ost und 43°-49° Nord definiert ist. Die Erzeugung des HISTALP-10-min-grid-Datensatz basiert auf Zeitreihen von 192 Niederschlagsstationen („HISTALP-station mode“), die unter Nutzung eines klimatologischen Hintergrundfeld interpoliert werden.

Das Hintergrundfeld entspricht innerhalb der Schweizer Grenzen der sogenannten „ETH-Klimatologie 1971-1990“ und außerhalb wird es im Rahmen des Projektes auf die GAR-Grenzen erweitert. Die ETH-Klimatologie wird in Rahmen der Doktorarbeit von Schwarb (2001) auf der Grundlage der PRISM-Methodik (Daly et al., 2002) erzeugt. Datengrundlagen sind dabei 6090 qualitätskontrollierte Zeitreihen, interpoliert auf ein 1,25 Minuten Grid. Die Erweiterung auf den Bereich außerhalb der Schweizer Grenzen erfolgt mittels Thin-Spline-Interpolation.

Für die Anomalie-Interpolation über den Zeitraum von 1800 bis 1927 steigt die Stationsanzahl von zunächst 5 auf 192 Stationen. Bei dieser Anzahl bleibt es dann bis zum Jahr 2003 (s. Abb. 8).

Bei der Auswahl der Stationen ist es erforderlich, dass die Messstellen eine große Beobachtungslänge aufweisen, so dass die Messungen vor größeren anthropogenen Beeinflussungen beginnen, und dass nach Möglichkeit nicht nur Niederschlag sondern auch weitere Variablen wie Lufttemperatur und Luftdruck erfasst werden. Im HISTALP-Projekt werden hohe Anforderungen an die Qualität der Zeitreihendaten gestellt. Die folgenden Kriterien werden dabei angewandt:

- Daten mit nichtklimatisch bedingtem Sprung werden entfernt,
- Daten mit nichtklimatisch bedingten Trends werden markiert,
- Ausreißer werden detektiert und eliminiert.

Bei der Homogenitätsprüfung werden bezogen auf die 192 Stationen insgesamt mehr als 900 Sprünge und über 500 fehlerhafte Ausreißer gefunden und eliminiert.

Im Zeitraum bis 1870 treten im Mittel über alle verfügbaren Daten etwa 10 % Fehlwerte auf, danach (mit Ausnahme der Zeit während der beiden Weltkriege) etwa 5 %. Um zu einem homogenen, fehlerfreien Datensatz zu kommen, werden die fehlenden Daten ersetzt. Dazu wird eine EOF-Rekonstruktion angewandt, bei der die Fehlzeiten an einer gegebenen Station als Linearkombination von korrelierenden Nachbarstationen mit validen Daten nachgebildet werden. Es werden dazu mindestens drei und im Mittel sechs bis sieben benachbarte Stationen verwendet. Die Parameter der EOF-Rekonstruktion werden anhand

des Zeitraums 1931-2000 und für die zwölf Monate des Jahres separat ermittelt. Es wird also angenommen, dass die in diesem Zeitraum auftretenden, linearen Abhängigkeiten zwischen den Stationen auch in den anderen betrachteten Zeiträumen gültig sind und dass die Abhängigkeiten saisonale Unterschiede aufweisen.

Insgesamt erfolgt die Interpolation anhand der folgenden Schritte:

- a) EOF-Rekonstruktion unvollständiger Reihen
- b) Ermittlung des Anomaliefeldes bezogen auf die ETH-Klimatologie 1971-1990 mittels Quotientenbildung
- c) Interpolation der Anomalien auf das 10-min Grid mittels des SYMAP-Verfahrens
- d) Multiplikative Zusammenführung mit der ETH-Klimatologie

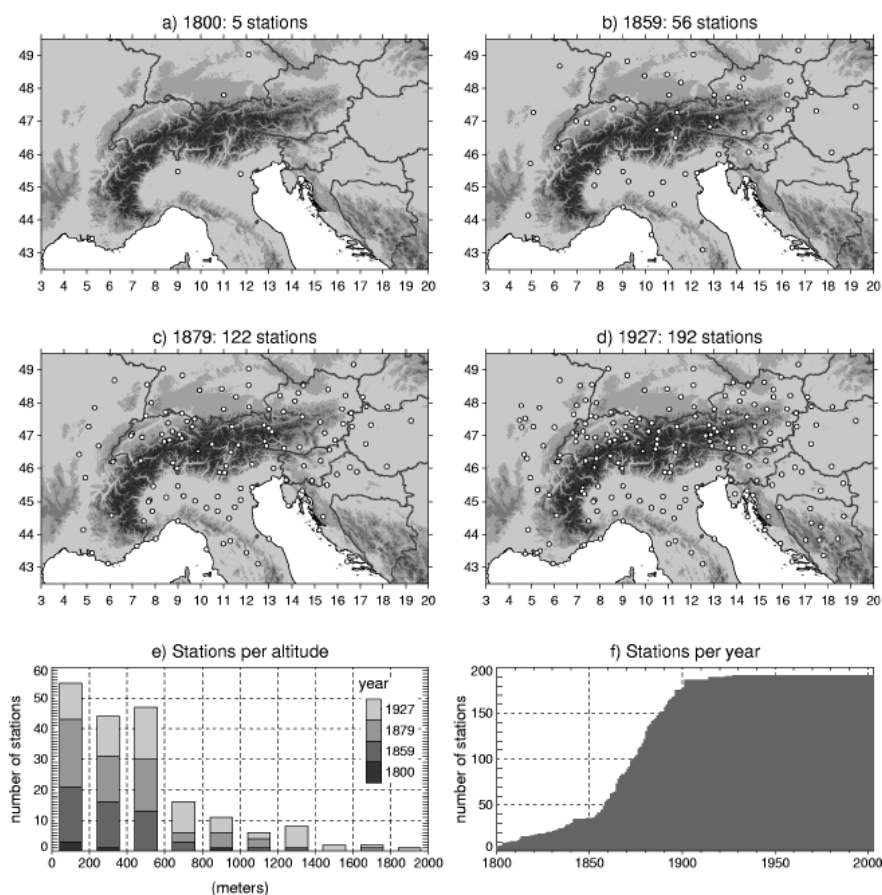


Abb. 8: HISTALP: Verteilung der Niederschlagsstationen zu verschiedenen Zeitpunkten (aus Efthymiadis et al., 2006)

Der Vergleich des „HISTALP-10-min-Grid“-Datensatzes mit „HISTALP station-mode“ zeigt sehr hohe Korrelationen und vergleichbare Muster. Beim Vergleich mit verschiedenen anderen Klimatologien zeigen sich zum Teil niedrigere Korrelationen speziell im Sommer und Diskrepanzen in den Hochlagen. Insgesamt ist laut Erstellern speziell im Sommer mit verminderten Genauigkeiten zu rechnen, was auf die verringerte räumliche Erhaltungsneigung sommerlicher Niederschlagsereignisse zurückgeführt wird. Ein auf

Österreich beschränkter Vergleich mit dem digitalen Klimaatlas Österreichs, ÖKLIM, 1961-1990 zeigt allerdings auch im Zeitraum Oktober bis März größere Unterschiede, vor allem über den gebirgigeren Landesteilen, wobei die ÖKLIM-Werte tendenziell höher sind (Efthymiadis et al., 2006; s. Abb. 9). Im Unterschied zur HISTALP-Klimatologie wird bei der ÖKLIM-Klimatologie der systematische Niederschlagsmessfehler korrigiert.

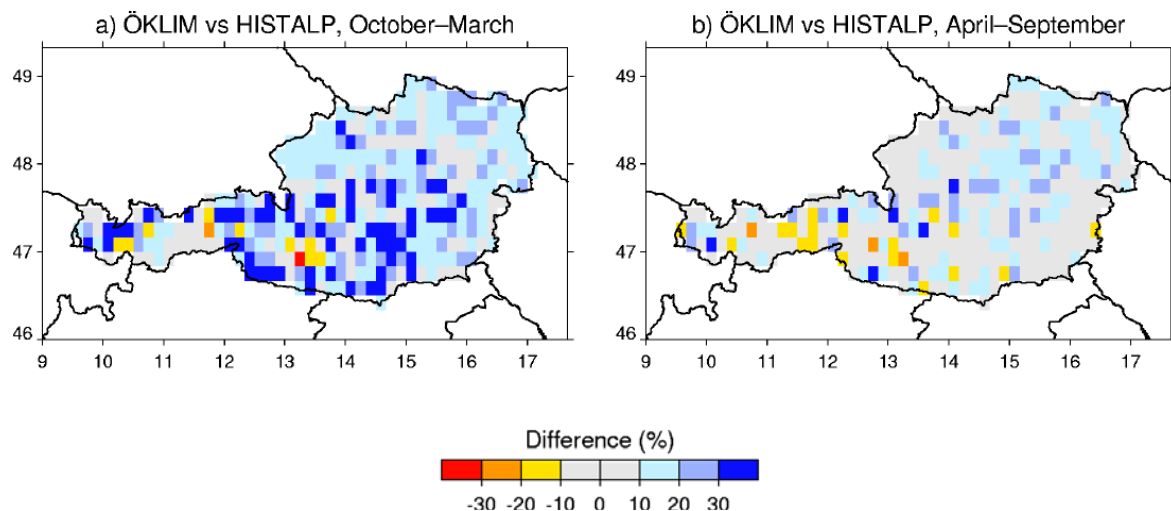


Abb. 9: Vergleich zwischen ÖKLIM und HISTALP in Österreich im Winter (links) und Sommer (rechts), aus Efthymiadis et al. (2006)

Ensembles E-OBS

Der Ensembles-Datensatz E-OBS (Haylock et al., 2008, Hofstra et al., 2009) ist der erste, pan-europäische gridbezogene Datensatz zu täglichen Klimawerten. Verfügbar sind Mittelwert, Minimum und Maximum der täglichen Lufttemperatur sowie tägliche Niederschlagssummen, ermittelt auf der Grundlage des bisher umfangreichsten europaweiten Stationsnetzes. Der Datensatz wird als Teil des „European Union Framework 6 ENSEMBLES“-Projekt erstellt. Die Daten liegen über den Zeitraum von 1950 bis 2009 (Version 3.0) für zwei verschiedene Gridauflösungen vor: Das höher aufgelöste Grid hat eine Kantenlänge von 0,24° und das geringer aufgelöste eine Kantenlänge von 0,5°.

Insgesamt liegen den Interpolationen die Daten von 2316 Stationen zugrunde, wobei die höchste Stationsdichte im Zeitraum 1961 bis 1990 und räumlich in den Ländern Irland, den Niederlanden und der Schweiz auftritt. Geringe Datendichten liegen in Spanien, Nordafrika, dem Balkan und Nordskandinavien vor (Abb. 10).

Die Stationsdaten werden verschiedenen Qualitätsprüfungen unterworfen. Dies betrifft Plausibilitätsprüfungen im Hinblick auf die Höchst- und Niedrigstwerte der Temperatur, die Höchstwerte beim Niederschlag und die Länge von Trockenphasen beim Niederschlag. Bei der Temperatur werden Ausreißerwerte (oberhalb des Fünffachen der Standardabweichung am jeweiligen julianischen Tag des Jahres) eliminiert. Wegen nicht hinreichender

Informationen über die Frage, ob ein Wert mit gegebener Datums- und Zeitangabe dem Tag selbst, dem Vortag oder dem Folgetag zuzuordnen ist, wird die zeitliche Zuordnung für jede Station anhand einer Korrelationsrechnung zu einem Referenzdatensatz und möglichen Verschiebungen von +1, 0 und -1 Tagen vorgenommen.

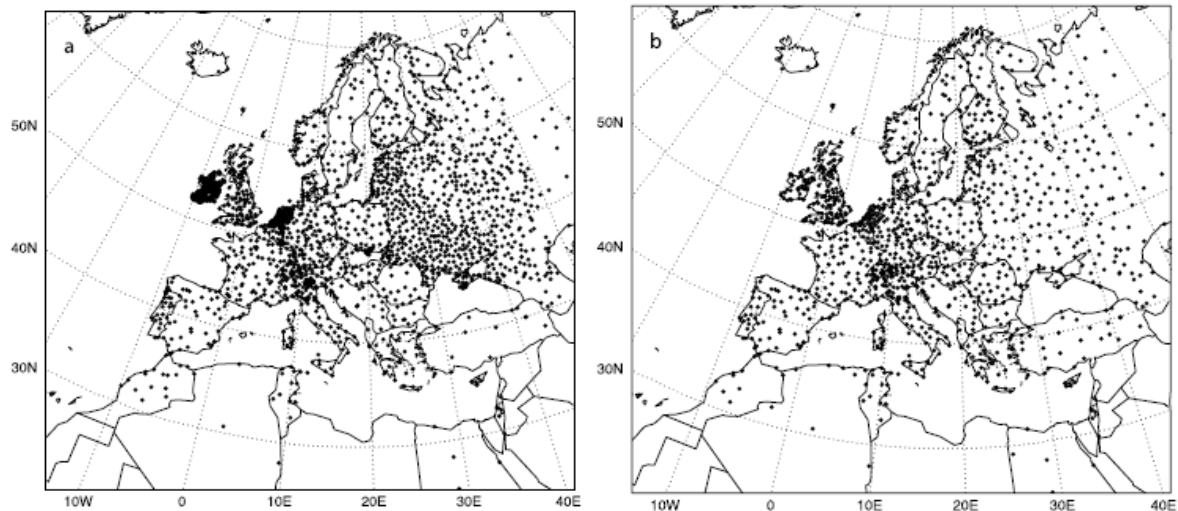


Abb. 10: Stationsnetz des E-OBS-Datensatzes, links: Niederschlag, rechts: Lufttemperatur (Haylock et al., 2008)

Die E-OBS-Interpolation erfolgt in einem dreistufigen Prozess und basiert auf dem Prinzip von Anomalie-Interpolationen mit Bezug zu monatsweise abgeleiteten Hintergrundfeldern:

- Die Interpolationen von langjährigen Monatswerten von Lufttemperatur und Niederschlag auf ein 0.1° -Gitter erfolgen mittels 3D Thin Plate Splines.
- Es werden tägliche Anomalien in Form von Differenzen bei der Lufttemperatur und Quotienten beim Niederschlag gebildet und auf das gleiche Grid interpoliert, wobei in Abhängigkeit von der Variable folgende Methoden angewandt werden:
 - o bei der Lufttemperatur:
 - External-Drift-Kriging mit Geländehöhe als Driftvariable
 - o beim Niederschlag:
 - Indikator Kriging zur Festlegung, ob am entsprechenden Grid und Tag Niederschlag fällt oder nicht
 - Universal-Kriging zur Ermittlung der Niederschlagsmenge an Grids, an denen Niederschlag fällt.
- Im letzten Schritt erfolgt eine Aggregation der Werte auf ein Grid mit der Kantenlänge von 0.25° . Die Aggregation erfolgt durch arithmetische Mittelung. Bei den interpolierten Werten handelt es sich somit nicht mehr um punktbezogene Werte sondern um gebietsbezogene Mittelwerte für Raster der Kantenlänge von 0.25° .

Hofstra et al. (2009) untersuchen den E-OBS-Datensatz und die zugrundeliegenden Stationsdaten intensiv auf der Grundlage unterschiedlicher statistischer Verfahren. Unter

anderem werden die vier in Wijngaard (2003) behandelten, absoluten Homogenitätstests angewandt und zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst. Im Ergebnis wird jeder Station sowie jedem Raster des E-OBS-Grids eine zusammenfassende Maßzahl zugeordnet, die die Homogenität bewertet. Diese Gesamtbewertung ist in Abb. 11 bezogen auf Niederschlag (links) und Lufttemperatur (rechts) sowohl bezüglich der Stationen (oben) als auch bezüglich der Grids (unten) dargestellt. Es lässt sich feststellen, dass bezogen auf den Niederschlag insbesondere in Nordnorwegen, Schottland, Italien, dem Balkan und Teilen von Zentraleuropa und Nordrussland Inhomogenitäten zu verzeichnen sind. Bei der Lufttemperatur werden Inhomogenitäten über weite Teile des Gesamtgebietes ausgewiesen.

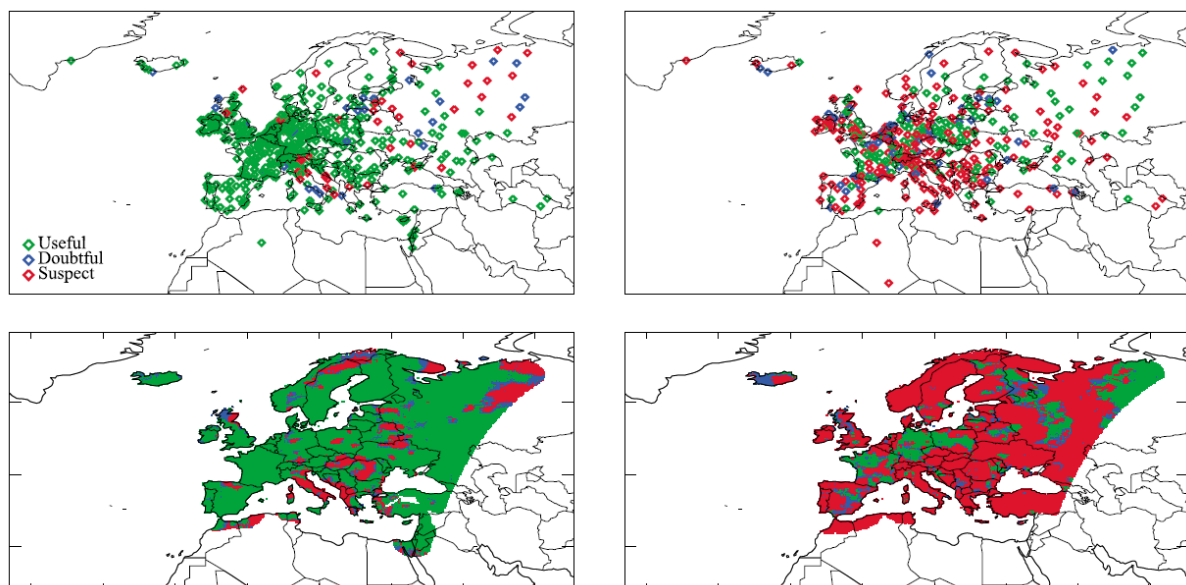


Abb. 11: E-OBS: Verteilung statistisch ermittelter Inhomogenitäten bezogen auf Niederschlag (links) und Lufttemperatur (rechts) bezüglich der Stationen (oben) und bezüglich der Grids (unten), aus Hofstra et al. (2009)

Obs_was Daten aus WaSiM-Interpolation

WaSiM-ETH verfügt über insgesamt 11 Interpolationsmethoden, die sich durch Kombination von fünf Grundansätzen ergeben (Schulla, 2009). Die grundlegenden Methoden sind Thiessen, IDW und Höhenregression für irregulär verteilte Stützstellen und darüber hinaus bilineare und bikubische Interpolation für regulär verteilte Stützstellen (also zum Einsatz im Rahmen von Aggregations- und Disaggregationsfragen). Eine hohe Flexibilität speziell im Hinblick auf die Niederschlagsinterpolation wird durch Einführung eines Regionenkonzeptes erreicht, das genutzt werden kann, um regional variierende Abhängigkeiten zwischen der zu interpolierenden Variable und der Geländehöhe zu berücksichtigen. Dies ähnelt zumindest hinsichtlich der Zielvorstellung dem PRISM-Konzept.

Bei dem weiter unter der Bezeichnung „Obs_was“ behandelten Datensatz handelt es sich um die anhand von Beobachtungswerten auf das 1x1-Kilometer-Gitter regionalisierten WaSiM-Eingangsdaten, die sowohl bezüglich der Lufttemperatur als auch bezüglich des Niederschlags aus der Kombination von Höhenregression und IDW erzeugt wurden. Beim Niederschlag wurde dabei zusätzlich das Regionenkonzept berücksichtigt (Pöhler et al., 2011, Technical Report AdaptAlp).

In späteren Abschnitten wird auch auf „Obs_was5“ und „Obs_was1“ Bezug genommen. „Obs_was5“ sind dabei die bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde mittels WaSiM-Gridding-Algorithmen auf ein 5x5 km-Gitter aggregierten „Obs_was“-Daten. „Obs_was1“ sind in Stundenschrittweite aufgelöste „Obs_was“-Daten.

HYRAS Version 0.1 zur Lufttemperatur und Version 1.0 zum Niederschlag

Für die nachfolgenden Erläuterungen zur Interpolation der HYRAS-Daten zu Lufttemperatur und Niederschlag konnte auf einen Zwischenbericht des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen werden (DWD, 2010), der freundlicherweise durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde zur Verfügung gestellt wurde.

Im Rahmen des Projektes HYRAS („Erstellung von hydrologisch relevanten Raster- und Gitterpunktsdatensätze“) werden durch den DWD tägliche Rasterdatensätze im Zeitraum 1951 bis 2006 für das Bundesgebiet inklusive der angrenzenden Flusseinzugsgebiete von Rhein, Elbe und Donau (bis Achleiten) erstellt. Neben meteorologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes werden dabei auch Daten von MeteoSchweiz, METEO-FRANCE, ZAMG, dem Hydrographischen Dienst Österreichs, dem Tschechischen Wetterdienst, dem Königlich Niederländischen Wetterdienst, dem Luxemburger Wetterdienst sowie dem CRP Gabriel Lippmann verwendet. Betrachtet werden die Variablen Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer.

Die Zahl der hinsichtlich Niederschlag und Lufttemperatur verfügbaren Stationen zeigen Abb. 12 und Abb. 13. Wie zu erkennen, kann hinsichtlich des Niederschlags auf bis zu etwa 6000 und bzgl. der Lufttemperatur auf bis zu etwa 1000 Stationen zurückgegriffen werden.

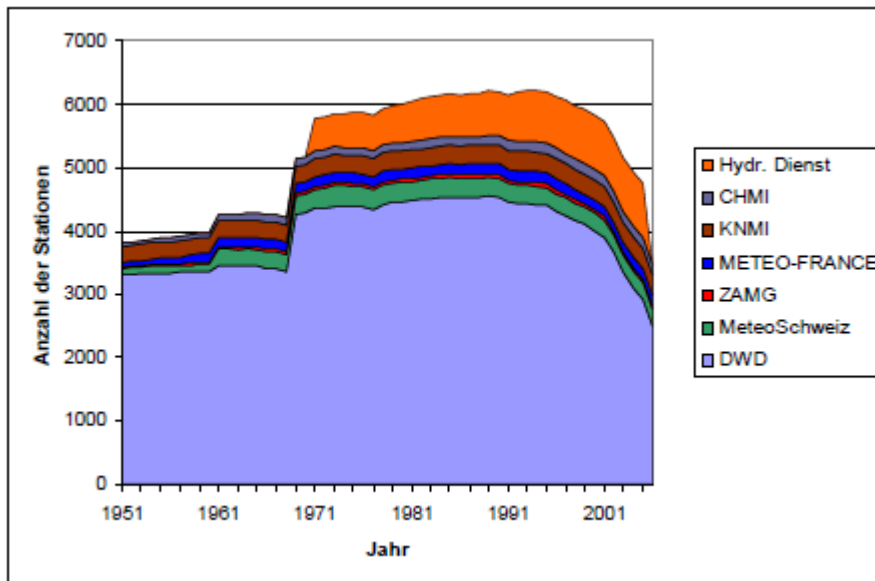


Abb. 12: HYRAS: Anzahl der verwendeten Niederschlagsstationen, aus DWD (2010)

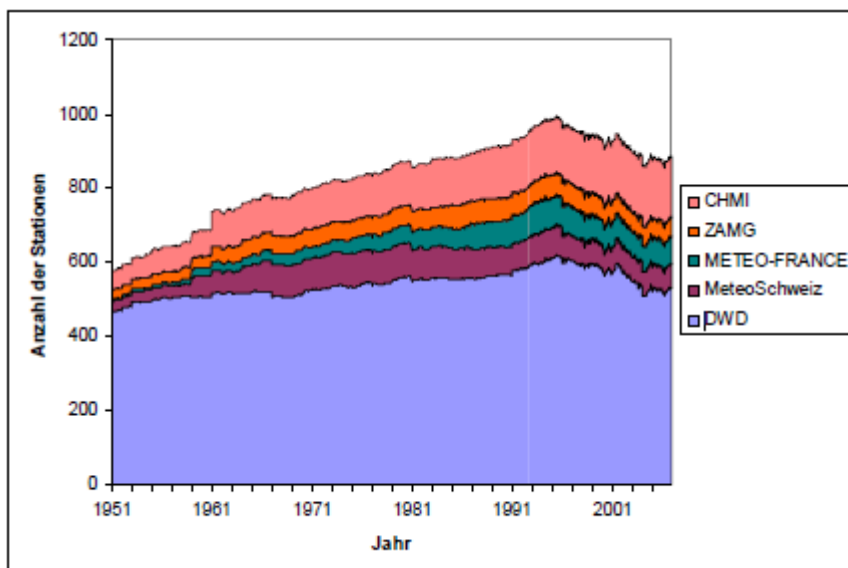


Abb. 13: HYRAS: Anzahl der verwendeten Lufttemperaturstationen, aus DWD (2010)

Bei den Niederschlagsdaten erfolgt keine Korrektur des systematischen Niederschlagsmessfehlers und bei den Temperaturdaten keine Berücksichtigung von Inkonsistenzen, die aufgrund unterschiedlicher Vorgehensweisen bei der Ermittlung mittlerer täglicher Werte auftreten können (je nach Wetterdienst gewichtete Mittelung der Messwerte zu Mannheimer Stunden oder Mittelwert aus Minimum- und Maximum-Temperatur). Die Daten werden jedoch umfangreichen Datenqualitätsprüfungen unterzogen (Ausreißertests, absolute Homogenitätstests, letztere angewendet auf Jahresreihen von Messreihen mit 30 Jahren Mindestlänge, Tests wie bei Wijngaard, 2003). Ziel ist es dabei, Inhomogenitäten zu detektieren, also Wertevariationen, die weder wetter- noch klimabedingt sind. Datenhomogenisierungen werden nicht vorgenommen. Die

Homogenitätstests führen speziell bei der Lufttemperatur zur Detektion von Inhomogenitäten (Reihen „zweifelhaft“ oder „verdächtig“) an einer großen Zahl von Messstellen. So werden zum Beispiel für den Raum Deutschland bei alleiniger Betrachtung der statistischen Tests nur 26 % der Temperaturreihen als „nützlich“ eingestuft. Beim Niederschlag sind es demgegenüber auf der Grundlage des automatischen Verfahrens (ohne visuelle Prüfung) 67 % bezogen auf Deutschland. Bezüglich der Lufttemperaturen wird die Vermutung geäußert, dass die Tests einen realen Klimatrend möglicherweise als Inhomogenität detektieren.

Sowohl der Niederschlag als auch die Lufttemperatur werden in einer zweistufigen Prozedur unter Nutzung von Hintergrundfeldern regionalisiert.

Beim Niederschlag werden Hintergrundfelder langjähriger monatlicher Niederschlagssummen (Betrachtungszeitraum 1961 bis 1990) durch multiple Regression, kombiniert mit Inverse-Distanz-Interpolation der Residuen erzeugt. Bei der Multiplen Regression werden folgenden erklärenden Variablen berücksichtigt:

- geografische Länge,
- geografische Breite,
- Geländehöhe,
- Richtung der Exposition sowie
- Betrag der Exposition,

wobei die beiden letztgenannten Variablen auf der Grundlage sogenannter Sobeloperatoren für Datenfenster der Ausdehnung von 5x5 Gitterelementen berechnet werden und die Bedeutung der Anströmrichtung auf die Niederschlagshöhe erfassen sollen. Das Hintergrundfeld für ein beliebiges Rasterelement ergibt sich als Summe aus Regressionswert und interpoliertem Residuum.

Zur Ermittlung der täglichen Niederschlagsfelder unter Zuhilfenahme der beschriebenen monatlichen Hintergrundfelder werden die Stationswerte den jeweils nächsten Rastermittelpunkten zugeordnet, die Quotienten aus Niederschlagswert und Hintergrundfeldwert gebildet und die Quotienten schließlich mittels Invers-Distanz-Interpolation auf alle Rastermittelpunkte übertragen, wobei nur die vier nächstgelegenen Stützstellen berücksichtigt werden. Durch Multiplikation des Hintergrundfeldes mit den interpolierten Quotienten erhält man dann den gesuchten täglichen Niederschlagswert für alle Raster.

Auch bei der Lufttemperatur wird der Wert aus der Kombination von Hintergrundfeld und Anomaliewert ermittelt. Anders als beim Niederschlag erfolgt die Verknüpfung zwischen Hintergrundfeld und Anomalie hier nicht multiplikativ sondern additiv.

Die Ermittlung des Lufttemperatur-Hintergrundfeldes erfolgt getrennt für sogenannte

Analyseboxen der Ausdehnung von 5x5 Gitterelementen mit jeweils bis zu 30 Stationen auf der Grundlage einer multiplen Regression auf folgende erklärende Variablen:

- Rechswert,
- Hochwert sowie
- Geländehöhe.

Die Anomaliewerte werden als gewichtete Summe stationsbezogener Anomalien ermittelt. Dabei werden die Gewichte durch Lösung eines Gleichungssystems ermittelt, bei dem von einer von der quadrierten Distanz und einem Ähnlichkeitsmaß CM abhängigen Anomalie-Kovarianzfunktion ausgegangen wird. Für Einzelheiten des Verfahrens, das dem Ordinary Kriging-Ansatz ähnlich ist, sei auf DWD (2010) verwiesen. Ebenso wie die Hintergrundfelder werden auch die Anomalien separat innerhalb der Analysenboxen ermittelt.

Es sind hier zwei valide HYRAS-Datensätze vorhanden: 1) der am 16.7.2010 übergebene Datensatz, der in einem 1x1 km Raster erstellt wurde, aber im Rahmen der Arbeiten in AdaptAlp stets in einem 5x5 km Raster verwendet wird (kurz „HYR_ori“), sowie 2) ein am 2.8.2010 übergebener Datensatz, bei dem in einem für die Biaskorrektur entwickelten Verfahren Niederschlags- und Lufttemperaturdaten von 5 auf 50 Kilometer Rasterauflösung aggregiert und dann wieder auf 5 Kilometer disaggregiert wurden (kurz „HYR_dis“) (zur Methodik siehe Krahe et al. (2011, Technical Report AdaptAlp)). Beide Datensätze enthalten tägliche Niederschlags- und Lufttemperaturdaten über den Zeitraum von Januar 1951 bis Dezember 2006. Bei der Lufttemperatur handelt es sich um die Version 0.1 und beim Niederschlag um die Version 1.0.

Bei dem Temperaturdatensatz handelt es sich um einen ersten, vorläufigen „HYRAS“-Datensatz, der freundlicherweise 2010 im Rahmen von AdaptAlp zu Vergleichszwecken durch den AdaptAlp Partner BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) bereitgestellt wurde. Zwischenzeitlich wurde der HYRAS-Datensatz für Temperatur weiterentwickelt, da die hier verwendete Version Schwächen aufwies. Aus diesem Grund wird auf eine Darstellung der HYRAS-Temperaturen in den folgenden Auswertungen verzichtet.

HADES

Im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) sind zwei Blätter zur Niederschlagsklimatologie im Zeitraum 1971-1990 enthalten. Es handelt sich um mittlere jährliche Niederschläge (Blatt 2.6) und mittlere saisonale Niederschläge (Blatt 2.7), wobei jeweils der gesamte europäische Alpenraum (2°-17° Ost, 43°-49° Nord) betrachtet wird. Bezogen auf das Gebiet der Schweiz ist der Datensatz laut Efthymiadis et al. (2006) identisch mit dem von Schwarb (2001) auf der Grundlage von PRISM erzeugten, im Rahmen von HISTALP verwendeten Hintergrundfeld (s. Erläuterungen zu HISTALP).

Laut Beschreibungen zu den beiden Kartenblätter (Bundesamt für Umwelt, HADES Texttafel 2.6, HADES Texttafel 2.7) basiert die HADES-Niederschlagsklimatologie auf 5821 konventionellen Niederschlagsstationen und 259 Totalisatoren, wobei letztere speziell im Bereich der Hochlagen mit in die Stichprobe aufgenommen wurden. Eine Korrektur des systematischen Messfehlers erfolgt wegen Nichtverfügbarkeit von Daten zu Wind und Stationsexposition nicht. Die Interpolation sowohl der Jahres- als auch der saisonalen Werte erfolgt mittels des PRISM-Verfahrens (Daly et al., 1993) auf ein 1,25 Minutengitter. Der Kreuzvalidierungsfehler beträgt in der Höhenzone zwischen 500 bis 1500 Meter etwa 20 % und in der Zone zwischen 1500 und 2500 Meter etwa 25 %. Laut Kartenblattautoren kann die Auswirkung des systematischen Messfehlers auf mittlere Jahressummen mit 5-10 % in tiefen Lagen und 15-30 % oberhalb 1500 Meter angenommen werden.

HAÖ

Der Hydrologische Atlas von Österreich (Skoda & Lorenz, 2003) stellt eine Karte der mittleren jährlichen Niederschlagshöhen im Land mit Bezug auf den Zeitraum 1961 bis 1990 zur Verfügung. Bei den HAÖ-Daten handelt sich um unkorrigierte Niederschläge. Die Rasterauflösung beträgt 6,3 Kilometer. Datengrundlage sind Zeitreihen beobachteter täglicher Niederschlagssummen an zunächst 674 Stationen, von denen 40 Reihen aufgrund unplausibel erscheinender Daten ausgeschlossen werden. Zusätzlich werden bei diesem Ansatz auch Ergebnisse eines mesoskaligen orographischen Niederschlagsmodells genutzt. Die Ermittlung der Gitterwerte erfolgt, indem in einem ersten Schritt Monatssummen des Niederschlags mittels des IDW-Ansatzes interpoliert werden. Die Ergebnisse werden dann in mehrfacher Hinsicht korrigiert. Die wichtigste Korrektur besteht in der Berücksichtigung der regionalen Höhenabhängigkeit des Niederschlags, in dem die Ergebnisse des orographischen Niederschlagsmodells ONM in statistischer Weise einbezogen werden. Auf diese Weise wird es möglich, Effekte wie Stau- und Aufgleitniederschläge zu berücksichtigen.

GPCC

Beim GPCC-Datensatz (Global Precipitation Climatology Centre, Rudolf & Schneider, 2005; Schneider et al., 2008; Rudolf et al., 2010) handelt es sich um monatliche Niederschlagssummen, die die globale Landoberfläche (0° Ost bis 360° Ost, 90 Nord bis 90° Süd) mit einer Gitterauflösung von 1° und 0,5° umfassen. Grundlage sind automatisiert qualitätskontrollierte Datenreihen von mehr als 50000 Messstellen. Systematische Messfehler werden nicht korrigiert. Die Interpolation erfolgt auf der Grundlage einer als SPHEREMAP bezeichneten Variante des SYMAP-Verfahrens. Die Daten liegen im NetCDF-Format vor.

2.2 Durchführung der Vergleiche

Es werden zunächst Niederschlag und - soweit vorhanden - Lufttemperatur hinsichtlich der mittleren Jahreswerte miteinander verglichen (Abschnitte 2.3.1, 2.3.2). Darüber hinaus werden weitere Kennwerte des Niederschlags betrachtet, die in den Abschnitten 2.3.3, 2.3.4 beschrieben werden.

Als Bezugszeitraum wird die Periode von 1971 bis 1990 zugrunde gelegt, um eine möglichst hohe zeitliche Überdeckung der verschiedenen Datensätze zu erreichen.

2.3 Ergebnisse der Vergleiche

2.3.1 Mittlere Jahressumme des Niederschlags

Der Vergleich der genannten klimatischen Datensätze wird zunächst für den mittleren Jahresniederschlag durchgeführt. Abb. 14 zeigt die über den Zeitraum 1971 bis 1990 berechneten mittleren Jahressummen des Niederschlags in den Teilgebieten des Inngbiets.

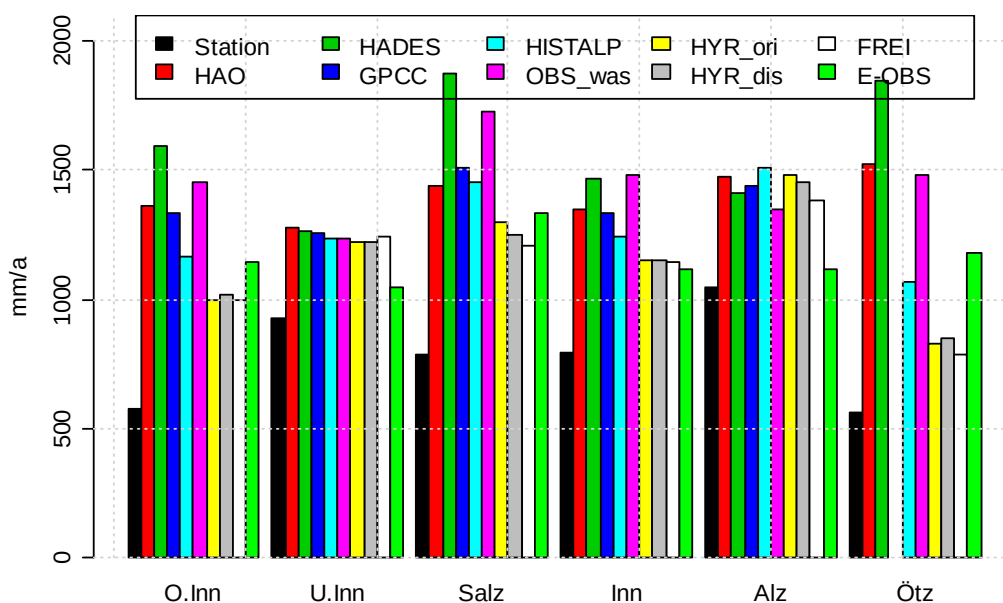


Abb. 14: Mittlere Jahressummen des Niederschlags, Zeitraum 1971-1990, bei verschiedenen Referenzdatensätzen in 6 Zielgebieten

Insgesamt lässt sich feststellen (Abb. 14):

- Die Verteilung der an den Messstellen erfassten Niederschläge ist deutlich in Richtung niedrigerer Werte verschoben. Dies ist vor dem Hintergrund der fehlenden Höhenrepräsentanz der Messstellen (Abb. 4) plausibel.
- Allerdings ist die Verteilung der Niederschlagssummen an den Stationen nicht kohärent zu den Höhenverteilungen der Stationen: Während die Stationshöhen in

den Gebieten Oberer Inn, Öztaler Ache und Salzach die höchsten Werte erreichen (Abb. 4), sind die an den Stationen ermittelten Jahreshöchstwerte in den Gebieten Unterer Inn und Alz die höchsten. Offensichtlich wird die erwartete Höhenabhängigkeit der Niederschläge durch andere Effekte überprägt.

- Nur im Gebiet „Unterer Inn“ liefern die betrachteten Referenzdatensätze (mit Ausnahme von „E-OBS“) ähnliche Niederschlagssummen. Weniger große Abweichungen stellt man auch im Alzgebiet fest. Dies sind die beiden Gebiete, bei denen die Höhenrepräsentanz der Messstellen näherungsweise gegeben ist (Abb. 4). In den anderen Fällen weichen die Jahreswerte der betrachteten Referenzdatensätze zum Teil erheblich voneinander ab.
- Große Unterschiede bestehen in den Gebieten Oberer Inn, Salzach und Öztaler Ache: während hier insbesondere HYR_ori und FREI Niederschläge liefern, die bzgl. Oberer Inn und Öztaler Ache kleiner und bzgl. Salzach zumindest nicht größer sind als diejenigen im Gebiet des Unteren Inn, zeigen sich bei HADES und Obs_was Niederschläge in den drei Gebieten, die diejenigen im Gebiet Unterer Inn deutlich überschreiten.
- In den drei genannten Gebieten mit stärker abweichenden Jahressummen sind damit drei Referenzdatensatzgruppen unterscheidbar: während „HADES“ und „Obs_was“ klar die höchsten Werte liefern, treten bei „HYR_ori“, „HYR_dis“ und „FREI“ die niedrigsten Werte auf. „HISTALP“ und „E-OBS“ liegen zwischen diesen beiden Gruppen. Es liegt die Schlussfolgerung nahe, dass sich „FREI“ und die HYRAS-Datensätze am stärksten an den stationsbezogenen Informationen orientieren. Bei „FREI“ ist dies aufgrund des verwendeten Interpolationsverfahrens (SYMAP, keine Berücksichtigung von Höhendaten) unmittelbar plausibel.

2.3.2 Jahresmittel der Lufttemperatur

Die mittleren jährlichen Lufttemperaturen zeigen Strukturen, die sich wie folgt zusammenfassen lassen (Abb. 15):

- Die bei den Niederschlägen „vermisste“ Kohärenz zwischen Stationshöhen- und Stationsniederschlagshöhenverteilungen ist bei den stationsbezogenen Temperaturen eindeutig gegeben: hier sind die an den Stationen im Gebiet Oberer Inn und Salzach gemessenen Temperaturen deutlich niedriger als im Gebiet Unterer Inn und Alz, so dass die erwartete Höhenabhängigkeit der Variable unmittelbar zum Ausdruck kommt.
- Im Gebiet Unterer Inn und Alz liegen gute Übereinstimmungen zwischen den verfügbaren Referenzdatensätzen vor.
- Der „Obs_was“-Datensatz lässt die stärker abgebildete Höhenabhängigkeit speziell in

den Gebieten Oberer Inn, Salzach und Öztaler Ache erkennen.

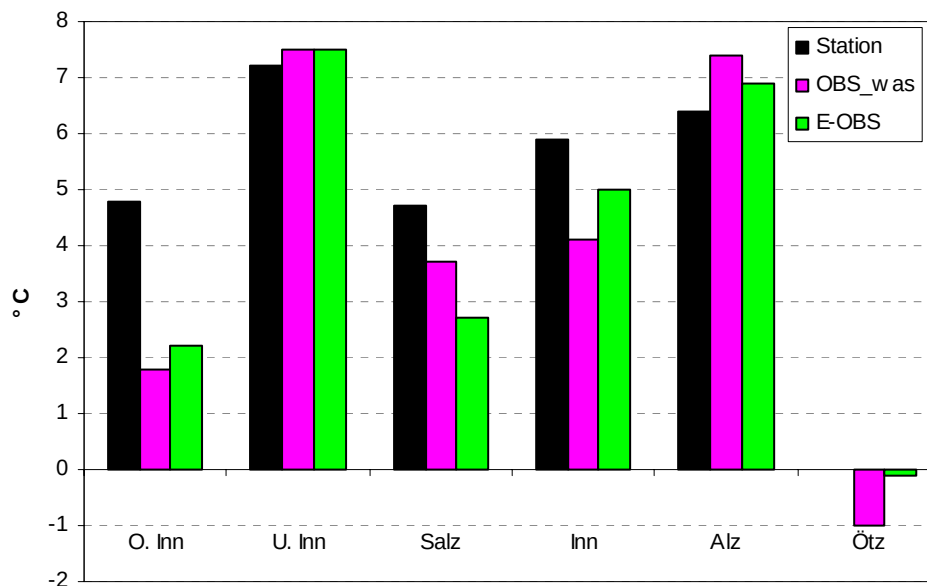


Abb. 15: Mittlere jährliche Lufttemperaturen im Zeitraum 1971-1990 bei verschiedenen Referenzdatensätzen in 6 Zielgebieten

2.3.3 Übergangswahrscheinlichkeiten des Niederschlag

Niederschlagszeitreihen haben, soweit das zugrunde liegende Zeitinkrement nicht zu groß ist, intermittierenden Charakter. Dies bedeutet, dass anders als bei anderen hydrometeorologischen Größen Nullwerte (Trockentage) auftreten können. Die Abfolge von Trocken- und Regentagen stellt daher in eine wichtige Eigenschaft bei der stochastischen Analyse von Niederschlägen dar. Eine Möglichkeit zu ihrer statistischen Erfassung besteht in der Anwendung sogenannter Übergangswahrscheinlichkeiten (Dyck, 1980; Willems, 1993), bei deren empirischer Ermittlung ausgezählt wird, wie häufig vorgegebene Aufeinanderfolgen von Trocken- und Regentagen auftreten. Im einfachsten Fall ermittelt man die Wahrscheinlichkeit p_1 für das Auftreten eines Regentages mit $p_1 = n_1 / (n_1 + n_0)$, wobei n_1 die Anzahl von Regentagen und n_0 die Anzahl von Trockentagen ist. Liegt ein autokorrelatives Verhalten zugrunde (was in der Regel bei Niederschlägen der Fall ist), dann interessieren auch Übergangswahrscheinlichkeiten höherer Ordnung. So ermittelt man die Wahrscheinlichkeit p_{11} für das Auftreten eines Regentages, wenn der Vortag bereits ein Regentag war, mit $p_{11} = n_{11} / (n_{11} + n_{10})$. Dabei ist n_{11} die Anzahl von Fällen, in denen zwei aufeinanderfolgende Regentage auftreten und n_{10} die Anzahl von Kombinationen, bei denen auf einen Regentag ein Trockentag folgt.

Bei den Untersuchungen zu Übergangswahrscheinlichkeiten soll detektiert werden, ob die für Niederschläge typischen intermittierenden und autokorrelierten stochastischen

Charakteristika durch die betrachteten Referenzdatensätze abgebildet werden.

Die Auswertungen für die Wahrscheinlichkeit p_1 , dass ein beliebiger Tag in Jahr ein Regentag ist, erfolgt in Form von Boxplots. Zur Erstellung der Boxplots wird zunächst für jedes Grid bzw. jede Station innerhalb des jeweiligen Gebietes ausgezählt, wie viele Tage im Zeitraum zwischen 1971 bis 1990 Niederschlagstage waren (Schwellenwert 0 mm) und dieser Wert dann durch die Gesamttagesanzahl dividiert. Bezogen auf Obs_was erhält man auf diese Weise innerhalb des Gebietes Oberer Inn beispielsweise 9774 p_1 -Wahrscheinlichkeiten (s. Tab. 3). Die Boxplots zeigen die Verteilung dieser Wahrscheinlichkeiten innerhalb der Gebiete, die nur für diejenigen Referenzdatensätze berechnet werden können, für die Zeitreihen in täglicher Zeitschrittweite vorliegen (Stationsbezogene Daten, Obs_was, HYR_ori und HYR_dis sowie EOBS) (Abb. 16).

Dabei repräsentiert die Breite der Boxplots die jeweilige Gebietsausdehnung. Der Median wird durch die dickere Linie innerhalb der Box dargestellt, die 25 %- und 75 %-Quantile durch die untere und obere Boxbegrenzung und die extremeren Werte durch die jeweiligen, sogenannten Whiskers und Kreise oberhalb und unterhalb der Box. Extreme Werte werden dabei dann als Kreise jenseits der Whiskers dargestellt, wenn sie die Boxbegrenzungen um mehr als den 1,5 fachen Interquartilabstand überschreiten.

Man erkennt folgendes:

- Wie anhand der Stationsdaten erkennbar, ist die Wahrscheinlichkeit p_1 kaum von der Geländehöhe abhängig und liegt meist (Median) etwas unterhalb von 0,5.
- Nur „E-OBS“ liefert p_1 -Wahrscheinlichkeiten in einem zu den Stationsdaten ähnlichen Wertebereich. Bei allen anderen Referenzdatensätzen wird die Anzahl von Regentagen offensichtlich mehr oder weniger deutlich überschätzt. Die gilt besonders für Obs_was und die disaggregierten HYR_dis-Daten. Hierdurch zeigt sich ein möglicher Nachteil der zwischenzeitlichen räumlichen Aggregation der HYRAS-Daten auf ein 50-km Raster, die im Zuge der Untersuchungen durchgeführt wurde, denn die originären HYR_ori-Daten liegen näher an den Stationswerten.

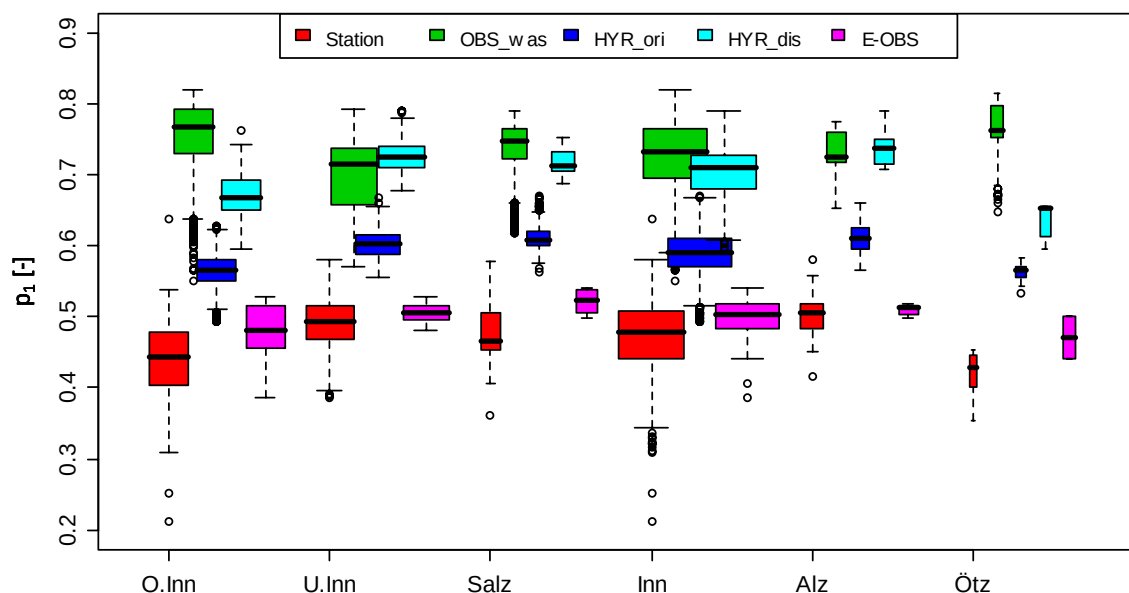


Abb. 16: Verteilung der Übergangswahrscheinlichkeit p_1 (Wahrscheinlichkeit, dass ein Tag ein Regentag ist) für den Zeitraum 1971-1990, bei verschiedenen Referenzdatensätzen in 6 Zielgebieten

Mit Blick auf die Gridding-Methoden ist die gute Abbildungsgüte durch „E-OBS“ leicht erklärbar: Nur bei diesem Ansatz wird dem intermittierenden Niederschlagscharakter Rechnung getragen, in dem der Interpolation von Niederschlagssummen eine binäre Interpolation des Auftretens von Niederschlagsimpulsen mittels Indikator-Kriging vorgeschaltet wird. Alle anderen Methoden führen zu einer Verschmierung dieses Verhaltens. Denkbar ist, dass dies im Zuge der Wasserhaushaltsmodellierung – speziell bei stark durchlässigen Böden – zu einer verminderten Häufigkeit von Stresssituationen durch Trockenheit führen könnte.

2.3.4 Extremwertparameter, maximale Tagesniederschläge

Die jährlichen Höchstwerte von Klimavariablen lassen sich in der Regel mittels der Verallgemeinerten Extremwertverteilung GEV beschreiben. Die Verteilungsfunktion lautet (Notation nach Hosking & Wallis, 1997):

$$P(X \leq x) = \exp \left(- \left(1 - \gamma \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{1/\gamma} \right)$$

mit μ Lokationsparameter
 σ Skalenparameter
 γ Formparameter

Ist der Formparameter γ positiv, so spricht man von der Weibull-Verteilung, ist er negativ, dann liegt eine Frechet-Verteilung vor und ist er Null, dann handelt es sich um die

zweiparametrische Gumbelverteilung.

Die Unterscheidung zwischen diesen drei Verteilungen ist daher wichtig, weil die Wertebereiche der Quantile im Bereich hoher Jährlichkeiten wesentlich von Vorzeichen und Betrag des Formparameters geprägt ist. So spricht man bei negativem Formparameter γ von endlastigen Verteilungen („heavy tailed“), weil sehr viel Masse am oberen Ende der Verteilung konzentriert ist. Demgegenüber hat eine GEV-verteilte Größe mit positivem Formparameter γ einen festen oberen Grenzwert. Speziell der Formparameter ist damit ein vergleichsweise einfach zu ermittelnder Kennwert, mit Hilfe dessen das Extremwertverhalten einer betrachteten Größe sehr komprimiert beschrieben werden kann. Da er invariant gegenüber linearen Transformationen der Extremwertserie ist, lassen sich Formparameter von Extremwertserien unterschiedlicher Messstellen ohne weitere Normierung vergleichen, auch wenn diese sich im Hinblick auf Mittelwerte oder Standardabweichungen deutlich voneinander unterscheiden. So verändert sich zum Beispiel der Formparameter nicht, wenn die Extremwertserie durch ihren Mittelwert dividiert wird.

Als Parameterschätzverfahren wird nachfolgend das L-Momenteverfahren angewandt, das bei Anwendungen im Rahmen stationärer Extremwertanalysen in der Regel robuster ist als beispielsweise die Maximum-Likelihood-Methode (s. Hosking & Wallis, 1997).

Bei allen nachfolgend vorgenommenen Anpassungen werden nur Datenreihen berücksichtigt, die zumindest 15 valide Einzelwerte aufweisen.

Die Anpassung der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV) an die maximalen jährlichen Tagesniederschläge führt bezogen auf die sechs Zielgebiete zu den nachfolgend dargestellten Verteilungen der GEV-Parameter. Berücksichtigt sind dabei wiederum die Referenzdatensätze, die in Form von Zeitreihen in Tagesschrittweite vorliegen. Ähnlich wie bei den Übergangswahrscheinlichkeiten wird hier die GEV an die Jahreshöchstwerte der Tagesniederschläge separat für jedes Grid bzw. jede Station innerhalb der jeweiligen Gebiete angepasst und dann die Verteilung der GEV-Parameter in Form von Boxplots visualisiert. Abb. 17 zeigt dies bezogen auf den GEV-Lokationsparameter. Darüber hinaus ist die Verteilung der GEV-Skalenparameter in Abb. 18 und die Verteilung der GEV-Formparameter in Abb. 19 dargestellt.

Die Interpretation der drei GEV-Parameter lässt Rückschlüsse auf Besonderheiten, Stärken und Schwächen der einzelnen Datensätze bei der Nachbildung maximaler jährlicher Niederschläge zu. Der Lokationsparameter beschreibt die mittlere Tendenz der maximalen Tagesniederschläge im Zeitraum 1971-1990 im jeweiligen Zielgebiet, der Skalenparameter beschreibt die Streuung und der Formparameter kennzeichnet die Schiefe der Daten. Stark negative Formparameter (in den Abbildungen in Richtung nach oben aufgetragen) kennzeichnen Daten mit häufigem Auftreten von sehr großen Extremwerten.

Man erkennt:

- Die Verteilungen der Lokationsparameter (Abb. 17) innerhalb der Stationsdaten überraschen, denn die höheren Werte treten nicht in den höher gelegenen Gebieten sondern eher in den tiefer gelegenen auf. So sind die Lokationsparameter der Messstellen in den Gebieten Oberer Inn, Salzach und Ötztaler Ache tendenziell kleiner als diejenigen in den Gebieten Unterer Inn und Alz. Bezogen auf die Gebiete Unterer Inn und Alz zeigen die Stationsdaten darüber hinaus interessanterweise Wertebereiche des Lokationsparameters, die in der Tendenz höher sind als bei allen betrachteten Referenzdatensätzen.
- Bei den E-OBS- und Obs_was-Datensätzen sind die Verhältnisse tendenziell umgekehrt. So treten bei Obs_was in den höher gelegenen Gebieten (Oberer Inn, Salzach, Ötztaler Ache) in der Regel die höchsten Lokationsparameter auf und bei E-OBS bei den niedrig gelegenen Gebieten (Unterer Inn, Alz) die niedrigsten. Die größte Ähnlichkeit zur Verteilung der Lokationsparameter der Stationsdaten zeigen die HYR_ori-Daten.

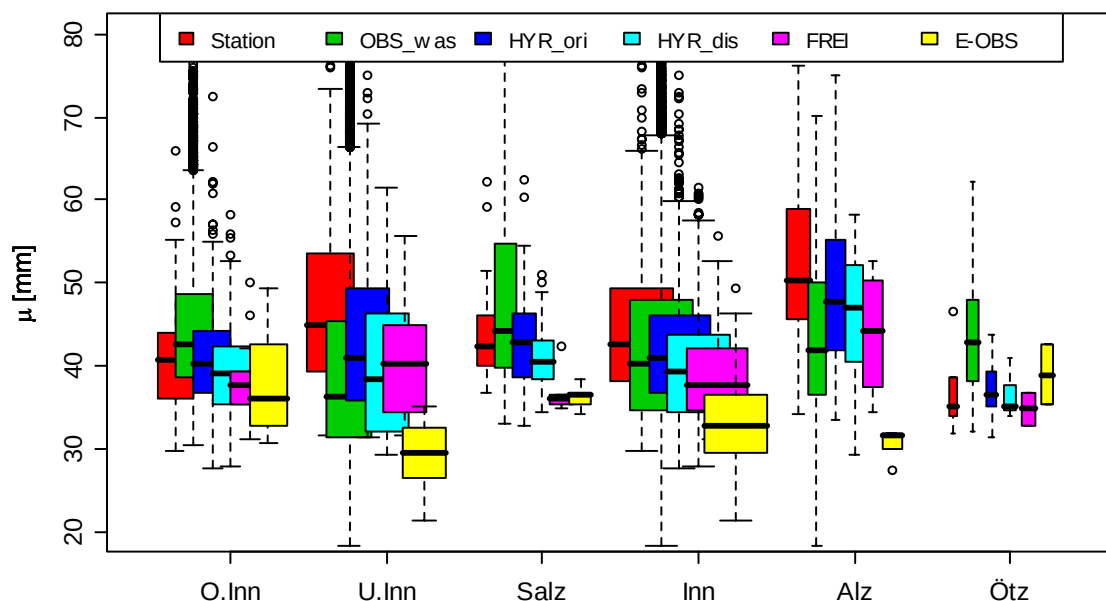


Abb. 17: Maximaler jährlicher Tagesniederschlag, Verteilung des Lokationsparameters μ , eingeschränkter Ordinatenbereich, bei verschiedenen Referenzdatensätzen in 6 Zielgebieten

- Bei den Skalenparametern (Abb. 18), die die Variabilität von Extremwerten quantifizieren, treten hinsichtlich der Verteilungsmuster gleiche Strukturen auf wie bei den Lokationsparametern. Die höchsten Werte in Bezug auf Mediane, 25- und 75- %-Quartile und zum Teil auch Whiskers finden sich oft bei den Stationsdaten.

Dies gilt für die Gebiete Unterer Inn, Inn und Alz.

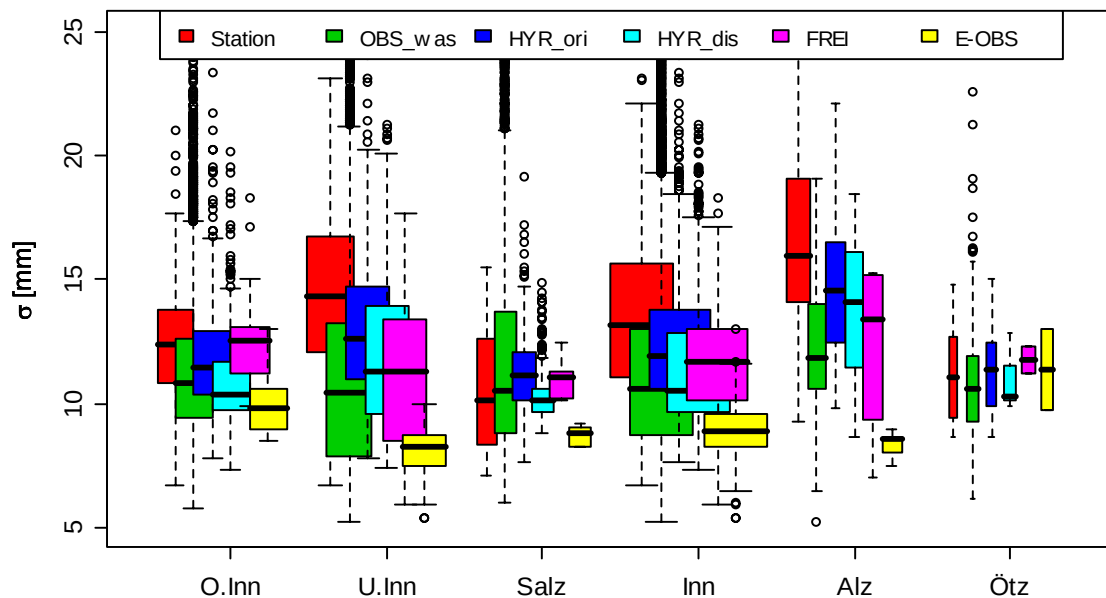


Abb. 18: Maximaler jährlicher Tagesniederschlag, Verteilung des Skalenparameters σ , eingeschränkter Ordinatenbereich, bei verschiedenen Referenzdatensätzen in 6 Zielgebieten

- Die Formparameter (Abb. 19) nehmen einen breiten Wertebereich sowohl oberhalb als auch unterhalb von Null an (Frechet- und Weibull-Bereich der GEV). Bei den Stationsdaten gilt dies ohne klar erkennbare Abhängigkeit von der Höhenlage, wobei die Nulllinie die Boxen bezogen auf alle Gebiete durchschneidet. Die fehlende Abhängigkeit von der Höhenlage zeigt sich auch bei den Obs_was-Daten. Dabei liegen die Boxen aber vollständig in den negativen Wertebereich verschoben. Dies bedeutet, dass Obs_was deutlich häufiger extrem hohe Tagesniederschläge liefert als dies bei den Stationsdaten der Fall ist. Bei E-OBS fällt demgegenüber auf, dass die Formparameterverteilung von Gebiet zu Gebiet stärker schwankt (vgl. Unterer Inn und Alz mit Salzach und Öztaler Ache). Bei den HYR_ori-Daten stimmt die Verteilung der Formparameter am besten mit derjenigen der Stationsdaten überein.

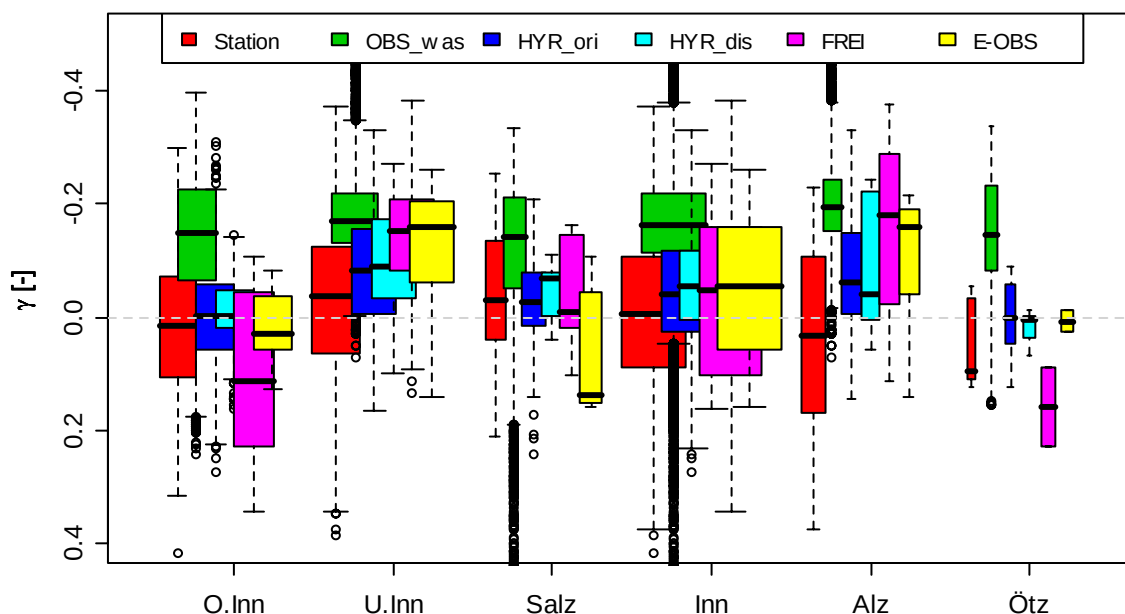


Abb. 19: Maximaler jährlicher Tagesniederschlag, Verteilung des Formparameters γ , eingeschränkter Ordinatenbereich, bei verschiedenen Referenzdatensätzen in 6 Zielgebieten

Insgesamt wird der in den Stationsdaten sich manifestierende Charakter der maximalen Tagesniederschläge damit nur sehr bedingt durch die verschiedenen Referenzdatensätze nachgebildet, wobei die besten Übereinstimmungen mit den HYR_ori-Daten auftreten.

2.3.5 Wahl des Referenzdatensatzes

Im ursprünglichen Projektplan war vorgesehen, den HYRAS-Datensatz als klimatischen Referenzdatensatz für die weiteren Auswertungen zu verwenden. Im Zuge der durchgeführten Vergleiche mit anderen Datensätzen, und insbesondere aufgrund der Tatsache, dass das später zu verwendende Wasserhaushaltsmodell (Abschnitt 4) auf dem Obs_was Datensatz basiert (Kalibrierung siehe Pöhler et al. (2011, Technical Report AdaptAlp)), sind die hier festgestellten Besonderheiten dieser beiden Datensätze gesondert zu beachten.

Obs_was

Bei der Interpolation von Niederschlagsdaten in WaSiM werden Höheninformationen berücksichtigt. Deswegen werden Niederschläge in Hochlagen jenseits der durch Stationsdaten abgedeckten Höhenbereiche stark extrapoliert (Abb. 20) und Lufttemperaturen stark abgemindert. Speziell in den Gebieten Oberer Inn, Salzach und Öztaler Ache sind Obs_was-Klimatologien daher tendenziell im Vergleich zu anderen Referenzklimaten eher „feucht“ und „kalt“, wobei die Höhenabhängigkeit des Niederschlags

in diesen Gebieten möglicherweise überschätzt wird. Da die Daten hydrologisch validiert sind, also im Rahmen der Wasserhaushaltsmodellierung zu relativ ausgeglichenen Wasserbilanzen führen (siehe Pöhler et al., 2011, Technical Report AdaptAlp), muss den Obs_was-Daten aus hydrologischer Sicht dennoch insgesamt eine hohe Glaubwürdigkeit zugewiesen werden.

Dies gilt allerdings nicht im Hinblick auf die Häufigkeit des Auftretens von Niederschlagstagen und auch nicht im Hinblick auf die Extremwerte von Niederschlag und Lufttemperatur. Obs_was-Daten liefern vielmehr generell zu viele Niederschlagstage und möglicherweise auch zu viele Extremwerte des Niederschlags am äußeren Rand der Extremwertverteilung. Darüber hinaus liefern sie in Gebieten, die unzureichend durch Stationsdaten repräsentiert sind (Oberer Inn, Salzach, Ötztaler Ache) möglicherweise zu niedrige Höchsttemperaturen.

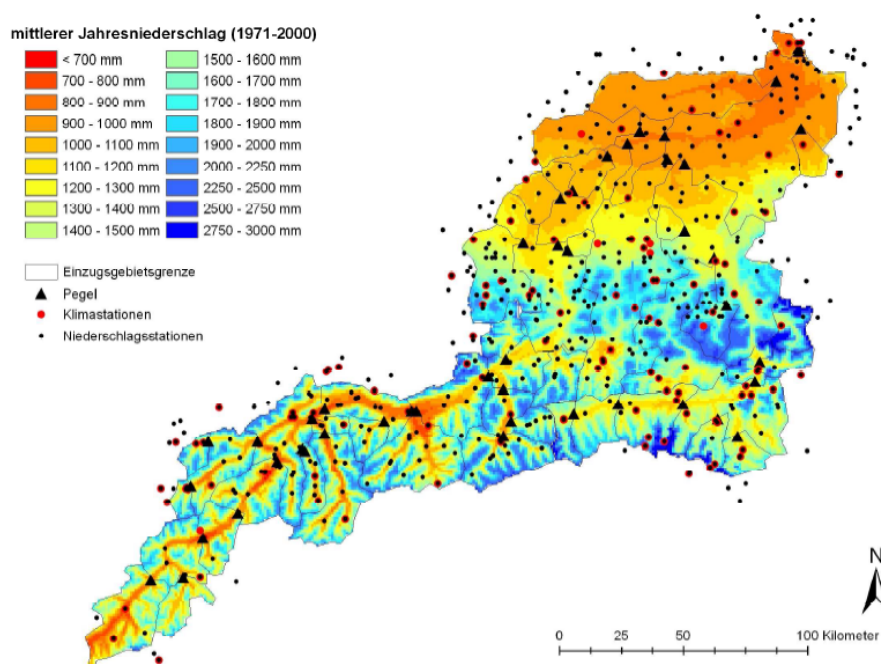


Abb. 20: Mittlerer Jahresniederschlag des Datensatzes Obs_was im Zeitraum 1971 – 2000 (Ergebnisse der Modellierung mit WaSiM-ETH, Pöhler et al. (2011, Technical Report AdaptAlp))

HYR_ori

Auch bei den HYRAS-Daten werden Höhendaten explizit bei der Interpolation genutzt. Die Gridding-Methode unterscheidet sich dabei stark von dem WaSiM-Interpolationsschema, weil die Höhenabhängigkeit der Daten ausschließlich über die Hintergrundklimatologien berücksichtigt wird und die täglichen Abweichungen von dieser Klimatologie als höhenunabhängig betrachtet werden. Bezüglich der Lufttemperaturen muss beachtet werden, dass hier eine ältere Version (Version 0.1) von HYRAS genutzt wurde und mittlerweile eine neuere Version des HYRAS-Temperaturdatensatzes vorliegt (Quelle: DWD). Bei der Betrachtung des Niederschlags zeigt sich, dass die HYRAS-Daten verglichen mit

Obs_was in Gebieten, deren Höhenverteilungen durch Stationen unzureichend repräsentiert sind, trockener ist. Dabei finden wegen der verwendeten Hintergrundklimatologien auch bei HYRAS-Daten Extrapolationen jenseits des an Stationen vorliegenden Wertebereiches statt.

Das Extremwertverhalten von Niederschlägen wird aus Sicht der Autoren in HYRAS besser wiedergegeben als in Obs_was. Die Anzahl von Niederschlagstagen wird auch durch HYRAS überschätzt, allerdings weniger drastisch als durch Obs_was.

Festlegung auf Obs_was als Referenzdatensatz

Der Datensatz Obs_was wurde im Zuge der Aufstellung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH für das Inngebiet erstellt und insbesondere in Bezug auf den Niederschlag validiert (Pöhler et al., 2011, Technical Report AdaptAlp). Die HYRAS-Niederschlagsdaten (Version 1.0) konnten bisher nicht in vergleichbarer Weise hydrologisch validiert werden. Aus diesem Grund und wegen der zum Bearbeitungszeitpunkt vorliegenden HYRAS-Versionen wurde der ursprüngliche Plan, den hier vorliegenden HYRAS-Datensatz als Referenz für die Biaskorrektur und die Plausibilitätsbetrachtungen zu verwenden, nicht umgesetzt. Stattdessen wurde der Datensatz „Obs_was“ – in Form der durch Aggregation auf ein 5x5-Kilometer-Gitter modifizierten Obs_was5-Daten – verwendet. Durch die Verwendung von Obs_was wird die Konsistenz in der Modellkette gewahrt: Es wird der gleiche Datensatz nicht nur für die Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells verwendet, sondern auch für die Biaskorrektur und Plausibilitätsbetrachtungen.

Hintergründe zur Unterscheidung in Obs_was und Obs_was5 sind in Krahe et al. (2011, Technical Report AdaptAlp) dokumentiert. Für die vorliegenden Untersuchungen ist in diesem Zusammenhang Folgendes zu beachten: für die Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells und die Plausibilitätsbetrachtungen der Klimaprojektionen wurde Obs_was verwendet, während für die Biaskorrektur und die Plausibilitätsbetrachtungen der Projektionen im Wasserhaushaltsmodell Obs_was5 verwendet wurde. Auswertungen zeigten, dass die Aggregation des Referenzdatensatzes auf das 5*5 km Raster für die Wasserhaushaltssimulationen in den oberen Teilen des Einzugsgebietes einen Einfluss auf die Modellierungsgüte hat, dies bei Betrachtungen über das Gesamtgebiet jedoch kaum ins Gewicht fällt (siehe Abschnitt 4.2.1). Es ist davon auszugehen, dass die Betrachtungen zum Klimasignal, insbesondere das Gesamtgebiet betreffend, von der Aggregation nicht beeinflusst sind.

Wegen der ursprünglichen Bedeutung der HYRAS-Daten, sowie zur Verdeutlichung der in Abschnitt 2 untersuchten Bandbreiten innerhalb der Referenzdatensätze, werden auch die HYR_ori und HYR_dis-Daten für den Niederschlag mit in die Betrachtungen bezüglich der Plausibilität der Klimaprojektionen einbezogen. Die HYRAS-Temperaturdaten werden wegen der bereits erwähnten zum Projektzeitpunkt veralteten Version nicht berücksichtigt.

Zusammenfassung des AdaptAlp Projektpartners LfU: 1. Referenzklima

Regionale Beobachtungsdatensätze basieren in der Regel auf gemessenen Punktwerten, die durch spezielle Verfahren in die Fläche übertragen wurden. Die tatsächlichen räumlichen Muster und zeitlichen Abläufe der Vergangenheit sind nur bedingt bekannt. Im heterogenen Relief der Alpen kommen regionalisierte Klimadatensätze daher zu unterschiedlichen Ergebnissen. Dies ist in Hinblick auf die nachfolgenden Untersuchungen von großer Bedeutung. Ein ausgewählter Datensatz wird im weiteren Vorgehen als Referenz für die Korrektur der systematischen Fehler in dynamischen Klimamodellen sowie für die Plausibilisierung der Projektionen verwendet.

Der Vergleich verschiedener Beobachtungsdatensätze im Inngebiet für den Zeitraum 1971-1990 zeigte große Unterschiede auf. Diese kommen unter anderem durch die Anwendung verschiedener mathematisch-statistischer Regionalisierungsprinzipien sowie Unterschiede in der Messnetzdichte, Messstellenrepräsentanz und Fehlwertbehandlung zustande. Die geringe Messnetzdichte im Hochgebirge und die unterschiedlich starke Berücksichtigung von Höheninformationen in den Regionalisierungsverfahren zeigt sich bereits bei der Betrachtung von Mittelwerten: Bei den mittleren jährlichen Lufttemperaturen treten Unterschiede von 1°C bis maximal 3°C auf. Für die mittlere Jahressumme des Niederschlags ergeben sich für das Gesamtgebiet Werte zwischen 800 und 1500 mm. Für die betrachteten kleinen alpinen Teilgebiete weichen die Werte z.T. noch stärker voneinander ab.

Die ermittelten Unterschiede müssen bewertet und eingeordnet werden. Eine Analyse der Regionalisierungsansätze liefert erste Erkenntnisse. Hohe mittlere Niederschlagssummen resultieren beispielsweise aus einer stärkeren Berücksichtigung von Höheninformationen und werden als realistischer eingestuft. Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung eines Datensatzes bietet die Wasserhaushaltsmodellierung. Unter realistischen Modellannahmen müssen die Eingangsgrößen zu korrekten Abflüssen führen. Der Datensatz „Obs_was“ (Temperatur, Niederschlag u.a.) wurde im Zuge der Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells auf diesem Wege validiert.

Auch in den gemessenen Stationsdaten sind Informationen enthalten, die den „wahren Verhältnissen“ nahe kommen. Man kann beispielsweise davon ausgehen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Regentages im Stationswert gut wiedergegeben wird. Der anhand der Stationsdaten ermittelte Wert liegt in hohen und tiefen Lagen gleichermaßen bei etwa 50 %. In einigen regionalisierten Datensätzen wird hingegen von einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 70 % ausgegangen. Auch für Extremniederschläge liefern die betrachteten Datensätze oft unrealistische Werte. Für das Inngebiet unterschätzen sie die maximalen jährlichen Tagesniederschläge und überschätzen gleichzeitig die Häufigkeit hoher Tagesniederschläge. Dies gilt auch für „Obs_was“. Der Datensatz HYRAS 1.0 zeigt für Extremniederschläge die größte Übereinstimmung mit den Stationswerten.

In allen folgenden Untersuchungen wurde der Datensatz „Obs_was“ als Referenz für das Klima im Zeitraum 1971-2000 verwendet. Somit bleibt die Konsistenz in der Modellkette gewahrt.

3 Klimaprojektionen

Mögliche Veränderungen des Klimas in der Zukunft können durch globale und regionale Klimamodelle simuliert werden. Bei jedem regionalen Klimamodelllauf entstehen Datensätze aus klimatischen Variablen, die eine mögliche Entwicklung des künftigen regionalen Klimas darstellen. Diese werden Klimaprojektionen genannt und beruhen wiederum auf globalen Klimamodellen und Emissionsszenarien (siehe auch Abschnitt 1.2).

Klimaprojektionen unterscheiden sich demnach in dem zugrunde gelegten Emissionsszenario, im globalen Modell und im Downscaling durch das regionale Modell. Daher ist es für die Abschätzung der Bandbreite künftiger Klimaveränderungen unerlässlich, verschiedene Klimaprojektionen zu berücksichtigen. Die Auswahl der Klimaprojektionen für die nachfolgenden Untersuchungen erfolgte nach folgenden Kriterien: Datenverfügbarkeit, Eignung für die Wasserhaushaltsmodellierung (verfügbare Variablen und zeitliche Auflösung) und Vergleichbarkeit mit anderen ähnlichen gelagerten Vorhaben wie z.B. KLIWA, GLOWA-Danube und Rheinblick 2050. Ein Großteil der verwendeten dynamischen regionalen Klimamodellläufe wurden durch den AdaptAlp Projektpartner BfG in biaskorrigierter Form bereitgestellt (siehe Krahe et al. (2011, Technical Report AdaptAlp)).

Die meisten verwendeten Klimaprojektionen beruhen auf dem Emissionsszenario A1B (siehe IPCC: Nakicenovic et al., 2000). Die „GLOWA-Danube-Szenarien“ bilden hierbei aus methodischen Gründen eine Ausnahme. Beim Emissionsszenario A1B wird von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- global orientierte Entwicklung mit starkem Wirtschaftswachstum,
- schnelle Einführung neuer und effizienterer Techniken,
- Nutzung fossiler und erneuerbarer Energien,
- Anstieg der Weltbevölkerung bis Mitte des 21. Jahrhunderts, gefolgt von einer Abnahme der Weltbevölkerung,
- Anstieg der CO₂-Emissionen bis Mitte des 21. Jahrhunderts und einem leichten Rückgang bis 2100.

3.1 Übersicht über betrachtete Datensätze

Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht über die verwendeten Datensätze:

Tab. 4 zeigt die in den Plausibilitätsbetrachtungen verwendeten Beobachtungsdatensätze. Tab. 5 zeigt zwei weitere Klimadatensätze, die für die Vergangenheit vorliegen und auf Beobachtungen basieren: der in AdaptAlp entstandene CCLM ERA40 Lauf (siehe Bucchignani, 2011, Technical Report AdaptAlp) und der „GLOWA-Danube“ Datensatz für die Vergangenheit. Tab. 6 zeigt die in dieser Untersuchung betrachteten Klimaprojektionen mit dem verwendeten globalen Antrieb.

In der Spalte „Variablen“ sind die jeweils verfügbaren Klimavariablen Lufttemperatur (T), Niederschlag (P), Windgeschwindigkeit (W), Luftfeuchte (rF), Sonnenscheindauer (Sd) und Globalstrahlung (Rg) aufgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen zugrunde liegenden Methoden unterscheiden sich die betrachteten Klimaprojektionen hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Auflösung (Spalten „Zeit“ und „Raum“). Die mit „Kürzel“ überschriebene Spalte liefert Kurzbezeichnungen, die im Weiteren zur Referenzierung der verschiedenen Projektionen verwendet werden. In der letzten Spalte der Tabelle wird durch „J“ angezeigt, ob die entsprechende Klimaprojektion auch für die Wasserhaushaltssimulation mittels WaSiM verwendet wird.

In Abschnitt 3.2 werden die Klimaprojektionen in Tab. 6 näher beschrieben. In Abschnitt 6 sind nähere Informationen zu den Datenquellen aufgeführt.

Tab. 4: Übersicht über regionalisierte Beobachtungsdatensätze (1971-2000)

Datensatz Klimaprojektion	Antrieb	Variablen	Auflösung		Kürzel	WH
			Zeit	Raum		
Beobachtungsdaten Inn, WaSiM interpoliert	-	T,P,W,rF,Sd	1d	1 km	Obs_was	J
Beobachtungsdaten Inn, WaSiM interpol. auf Gitter übertragen	-	T,P,W,rF,Sg	1d	5 km	Obs_was5	J
HYRAS	-	(T)*,P,	1d	5 km	HYR_ori	
HYRAS disaggregiert	-	(T)*,P	1d	5 km	HYR_dis	

* HYRAS Temperatur Version 0.1

Tab. 5: Weitere Klimadatensätze für die Vergangenheit (1971-2000)

Datensatz Klimaprojektion	Antrieb	Variablen	Auflösung		Kürzel	WH
			Zeit	Raum		
Klimaprojektionen aus statistischem Downscaling						
GLOWA Vergangenheit	(Messungen)	T,P,W,rF,Rg	1d	1 km	GLO_vgh	J
Dynamische Regionalmodelle, nicht biaskorrigiert						
CCLM ERA40 AdaptAlp	ECMWF- Reanalyse	T,P (W,rF,Sd)	1d	8 km	CMCC_er	

Tab. 6: In den Untersuchungen betrachtete Klimaprojektionen (siehe Tab. 7 für Angaben zu den Betrachtungszeiträumen)

Datensatz Klimaprojektion	Antrieb	Variablen	Auflösung		Kürzel	WH
			Zeit	Raum		
Klimaprojektionen aus statistischem Downscaling						
1) WETTREG 2009	ECHAM5 r1	T,P,W,rF,Sd	1d	1 km	WET09_eh	
2) WETTREG 2009	HadGEM2-AO	T,P,W,rF,Sd	1d	1 km	WET09_hd	J
3) WETTREG 2009	CNRMCM3	T,P,W,rF,Sd	1d	1 km	WET09_cn	
4) WETTREG 2010	ECHAM5 r1	T,P,W,rF,Sd	1d	1 km	WET10_eh	J
5) GLOWA Trend IPCC	Klimatrend 21 GCMs	T,P,W,rF,Rg	1d	1 km	GLO_ipc	
6) GLOWA Trend REMO	Klimatrend ECHAM5-REMO	T,P,W,rF,Rg	1d	1 km	GLO_rem	J
7) GLOWA Trend MM5	Klimatrend ECHAM5-MM5	T,P,W,rF,Rg	1d	1 km	GLO_mm5	
8) GLOWA Trend Fortschreibung	Klimatrend Messungen	T,P,W,rF,Rg	1d	1 km	GLO_frt	J
Dynamische Regionalmodelle, biaskorrigiert und disaggregiert (durch BfG)						
9) REMO UBA	ECHAM5 r1	T,P,W,rF,Rg	1d	5 aus 10 km	REM_uba_b	J
10) REMO BFG	ECHAM5 r2	T,P,W,rF,Rg	1d	5 aus 10 km	REM_bfg_b	J
11) REMO ENSEMBLES	ECHAM5 r3	T,P,W,rF,Rg	1d	5 aus 25 km	REM_ens_b	J
12) CCLM ENSEMBLES	HadCM3	T,P,W,rF,Sd	1d	5 aus 25 km	CLM_hd_b	J
13) CLM CONSORTIAL1	ECHAM5 r1	T,P,W,rF,Sd	1d	5 aus 18 km	CLM_eh_b	J
14) CLM CONSORTIAL2	ECHAM5 r2	T,P,W,rF,Sd	1d	5 aus 18 km	CLM_eh2_b	J
Dynamische Regionalmodelle, nur für Niederschlagsbetrachtungen						
15) REMO UBA, P verdriftet	ECHAM5 r1	P	1d	10 km	REM_ubv	
Dynamische Regionalmodelle, nicht biaskorrigiert						
16) REMO UBA	ECHAM5 r1	T,P,W,rF,Rg	1d	10 km	REM_uba	
17) CCLM SINTEX AdaptAlp	SINTEX-G (ECHAM4+CMCC)	T,P (W,rF,Sd)	1d	14 km	CMCC_ec4	
18) CCLM CMCC AdaptAlp	CMCC-MED (ECHAM5+CMCC)	T,P (W,rF,Sd)	1d	8 km	CMCC_ec5	

3.2 Beschreibung der Klimaprojektionen

WETTREG2009 und WETTREG2010

WETTREG-Klimaprojektionen basieren auf einem von der Fa. Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC), Potsdam, entwickelten, statistischen Downscaling-Ansatz, der Klimavariablen für diejenigen Koordinaten liefert, an denen auch Messreihen zur Verfügung stehen (Spekat et al., 2007). WETTREG bestimmt das Klimasignal über die Kausalkette von sich ändernden Häufigkeiten der Wetterlagen in den täglichen Realisierungen des jeweiligen Globalmodells. Die hier vorliegenden WETTREG-Klimaprojektionen setzen auf den Globalmodellen ECHAM5, HadGEM2-AO und CNRMCM3 auf und liefern jeweils 10 transiente Realisationen für den Zeitraum 1961-2100 mit Bezug auf das Emissionsszenario A1B.

Im Laufe des Projektes werden Klimaprojektionen des WETTREG-Klimamodells sowohl mit dem Entwicklungsstand 2009 als auch zum methodisch erweiterten Stand 2010 verwendet. Die Erweiterungen betreffen gegenüber einer älteren Version von 2006 (Spekat et al., 2007) einen erweiterten Beobachtungszeitraum, eine erhöhte Stationsdichte sowie verschiedene methodische Erweiterungen (nur WETTREG2010), die z.B. in Kraus & Hübener (2010) kurz erläutert sind. Im Folgenden werden die beiden Varianten mittels der Bezeichnungen WETTREG2009 und WETTREG2010 unterschieden. Laut Kreienkamp et al. (2010) liefert WETTREG2010 gegenüber dem älteren Ansatz insbesondere höhere Amplituden der Temperatursignale und stärkere Extreme. Bedingt durch die Verwendung eines statistischen Ansatzes ist zu berücksichtigen, dass die Unsicherheit der Projektionen für die Zukunft gegen Ende des Jahrhunderts zunimmt (Kraus & Hübener, 2010).

Die WETTREG-Klimaprojektionen liegen entsprechend des zugrundeliegenden Erstellungsprinzips stationsbezogen vor. Insgesamt handelt es sich bezogen auf das Inneinzugsgebiet je nach Klimavariablen um bis zu 292 irregulär verteilte Punkte.

„GLOWA-Danube-Szenarien“

Die dem BMBF-Projekt „GLOWA-Danube“ zugrunde liegenden Klimaprojektionen (www.glowa-danube.de) unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Erzeugung grundsätzlich von den anderen hier betrachteten Projektionen, denn es handelt sich dabei nicht um Ergebnisse eines deterministischen oder statistischen Downscalings globaler Klimamodelle. Vielmehr sind sie das Ergebnis statistischer Monte Carlo-Simulationen eines Klimagenerators. Generiert werden dabei raumzeitliche Felder von Niederschlag, kurz- und langwelliger Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit in zeitlicher Schrittweite von einer Stunde und mit einer räumlichen Rasterweite von einem Kilometer. Als wesentliche Eingangsinformation benötigt der Klimagenerator Aussagen zu Trends von Niederschlag und Lufttemperatur im Zeitraum 1990 bis 2100. Die vier Klimatrends basieren

auf den folgenden Grundlagen:

- „Trend IPCC regional“: Ausgewertet werden die auf grober Maschenweite vorliegenden Niederschlags- und Temperaturzeitreihen von insgesamt 21 Globalmodellen. Es werden Zeitreihen gewonnen, indem die Ergebnisse der dem Einzugsgebiet obere Donau nächstgelegenen Modellstützstellen gemittelt werden. Die Mittelung über alle betrachteten Globalmodelle führt zu folgenden Trendaussagen für den Zeitraum 1990 – 2100:
 - o Temperaturanstieg: +3,3 °C im Sommer und im Winter
 - o Niederschlagsänderung: +7 % im Winter und -14 % im Sommer
- „Trend REMO regional“: Die im Gebiet obere Donau ermittelten Niederschlags- und Temperaturzeitreihen des Regionalmodells REMO / UBA mit ECHAM5-Antrieb, Szenario A1B, beschrieben in Jacob et al. (2008) werden ausgewertet. Dies führt bezogen auf die beiden Variablen zu folgenden Trendaussagen für den Zeitraum 1990 bis 2100:
 - o Temperaturanstieg: +6,8 °C im Winter, +3,7 °C im Frühjahr, +5,3 °C im Sommer, +5,1 °C im Herbst
 - o Niederschlagsänderung: +4,9 % im Winter, +9,1 % im Frühjahr, -31,4 % im Sommer und -14,5 % im Herbst
- „Trend MM5 regional“: Die durch die GLOWA-Danube Arbeitsgruppe „Meteorologie“ auf der Grundlage des (nicht-hydrostatischen) Regionalmodells MM5 / ECHAM5, Szenario A1B, für das Gebiet Obere Donau ermittelten Trends im Zeitraum 1990 bis 2100 führen zu folgenden Trendaussagen:
 - o Temperaturanstieg: +4,2 °C im Winter, +3,2 °C im Frühjahr, +5,8 °C im Sommer, +4,8 °C im Herbst
 - o Niederschlagsänderung +7,7 % im Winter +13,1 % im Frühjahr, -28,7 % im Sommer und -1 % im Herbst
- „Trend Fortschreibung“: Hier werden die in den Messreihen im Zeitraum 1960 bis 2006 sich abzeichnenden Trends in die Zukunft fortgeschrieben. Zur Art der Fortschreibung sei auf den Textteil zu Blatt S2 des GLOWA-Danube-Online-Atlases verwiesen (www.glowa-danube.de). Auf dieser empirischen Grundlage ergeben sich für den Zeitraum 1990 bis 2100 die folgenden Trendaussagen:
 - o Temperaturanstieg: +5,2 °C im Sommer und Winter
 - o Niederschlagsänderung: +47 % im Winter, -42 % im Frühjahr, -69 % im Sommer und -2 % im Herbst

Um den Klimaantriebs-Generator mit den oben dargestellten Klimatrends nutzen zu können, ist eine Annahme über den zeitlichen Verlauf der Veränderung zwischen 1990 und 2100 erforderlich. Dazu wird festgelegt, dass dieser Verlauf des mittleren Temperaturanstiegs und der mittleren Niederschlagsveränderung sich entsprechend des Verlaufs des IPCC Szenarios A1B (Abb. 21, rot durchgezogene Linie) verhält.

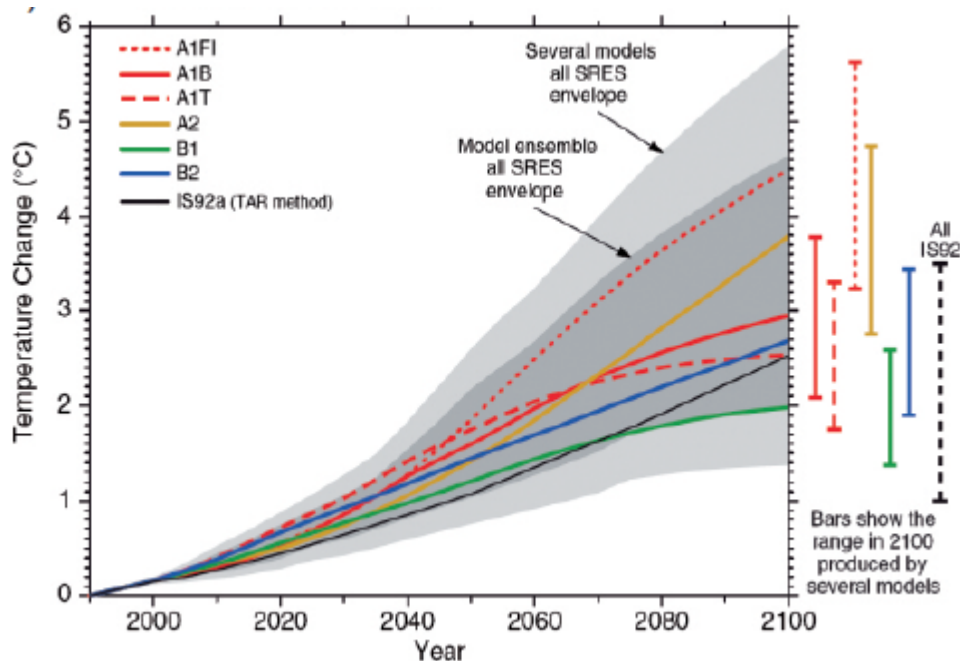


Abb. 21: Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderung bei verschiedenen Emissionsszenarien (aus IPCC, 2001)

Der Klimagenerator kann bei vorgegebenem Klimatrend eine beliebige Anzahl von Realisationen erzeugen. Um diese sinnvoll auswerten zu können, definierte die GLOWA-Danube-Arbeitsgruppe sogenannte Klimavarianten, anhand derer eine Gruppierung der Realisationen vorgenommen werden kann. Da hier nur die Klimavariante „Baseline“ betrachtet wird, sei hinsichtlich weiterer Details zur Variantenbildung auf den Textteil S4 des GLOWA-Online-Atlases verwiesen.

Die „GLOWA-Danube-Szenarien“ decken nur den Zeitraum 2011-2060 ab. Für die Vergangenheit liegt ein zum GLOWA-Danube-Projekt zugehöriger und auf das 1-Km-Gitter regionalisierter Beobachtungsdatensatz über den Zeitraum 1970 bis 2000 vor. Dieser Datensatz wird nachfolgend mit „GLOWA Vergangenheit“ bezeichnet.

REMO

REMO ist das hydrostatistische regionale Klimamodell des Max-Planck-Institutes für Meteorologie, das aus dem Europa-Modell des Deutschen Wetterdienstes hervorgegangen ist (UBA, 2006). Hydrostatisch bedeutet, dass die Vertikalbeschleunigung eines Luftteilchens auf Null gesetzt wird. Diese Annahme ist auf größeren Skalen gerechtfertigt, wenn die horizontale Beschleunigung erheblich größer ist als die vertikale. Auf kleinen Skalen (z.B. Gewitterwolke) ist die Annahme nicht mehr gültig (Werner & Gerstengarbe, 2007).

REMO simuliert die horizontalen Windkomponenten, den Luftdruck, die Temperatur, die Luftfeuchte und den Wassergehalt der Atmosphäre in räumlicher Auflösung von etwa 10 Kilometern und übernimmt dabei als Randbedingungen die Parameter des Globalmodells ECHAM5. Das Globalmodell wird in den drei Realisierungsläufen r1, r2 und r3 durchgeführt,

die sich hinsichtlich der jeweiligen Anfangsbedingungen unterscheiden.

Die REMO-Klimaprojektionen stehen in den Versionen REMO-UBA (MPI Hamburg i.A. des Bundesumweltamtes, 2006), REMO-ENSEMBLES (basierend auf EU Projekt ENSEMBLES) und REMO-BfG (MPI Hamburg i.A. der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2009) für den Zeitraum 1951-2100 zur Verfügung, wobei die Ausgabedaten für alle drei Varianten mit einem bei der BfG entwickelten Verfahren biaskorrigiert werden (siehe Abschnitt 3.3).

CLM-Familie

Bei den Modellen der CLM-Familie handelt es sich um nicht-hydrostatische, dynamische Regionalmodelle, die aus dem Lokalen Modell des Deutschen Wetterdienstes hervorgegangen sind (siehe www.clm-community.eu, Hollweg et al., 2008). Nicht-hydrostatische Modelle werden eingesetzt, wenn Prozesse berücksichtigt werden sollen, die unterhalb einer Auflösung von 10 Kilometern ablaufen (Werner & Gerstengarbe, 2007). Aufgrund des nicht-hydrostatischen Kerns können Modelle der CLM-Familie bis hinunter auf eine räumliche Skala von etwa 3 Kilometern angewandt werden. Simuliert werden zumindest die horizontalen Windkomponenten, die Temperatur, die Luftdruckabweichung von einem konstanten Hintergrunddruck, die Luftfeuchte und der Wolkenwassergehalt.

Klimaprojektionen aus der CLM-Familie liegen hier in verschiedenen Varianten vor, die sich insbesondere hinsichtlich des Antriebs (ECHAM4, ECHAM5, HadleyCM3) und der räumlichen Auflösung (8 bis 25 Kilometer Kantenlänge) unterscheiden. Bei den drei in AdaptAlp neu gerechneten COSMO-CLM-CMCC-Varianten (CMCC - Il Centro di Ricerca Nazionale sulla scienza e le politiche del clima: ricerca di frontiera integrata e multidisciplinare per capire, controllare ed adattarsi ai Cambiamenti Climatici, Italien) werden folgende Antriebe verwendet (für nähere Informationen siehe Bucchignani (2011, AdaptAlp Technical Report)):

- CMCC Lauf 1 (14 km): SINTEX-G (Atmosphärenmodell ECHAM4 und CMCC Ozeanmodell)
- CMCC Lauf 2 (8 km): CMCC-MED (Atmosphärenmodell ECHAM 5 und CMCC Ozeanmodell)
- CMCC Lauf 3 (14 km): Antrieb "ERA40-Variante" aus einer ECMWF-Reanalyse

Bei den weiteren Läufen der CLM-Familie handelt es sich um die zwei sog. „CLM-Konsortial-Läufe“ (Antrieb ECHAM5 A1B, r1 und r2, 18 km, Zeitraum 1961-2100) (Version 2.4.11, MPI Hamburg, i. A. des BMBF) und dem ETH-Z COSMO-CLM-Lauf (Antrieb HadleyCM3 A1B, 25 km Zeitraum 1951-2100) (basierend auf dem EU-ENSEMBLES Projekt). Ebenso wie bei REMO werden die Ergebnisse der CLM-Konsortialläufe mittels des von der BfG entwickelten Ansatzes biaskorrigiert (Ausnahme CMCC).

3.3 Biaskorrektur

Globale Klimamodelle und regionale Klimamodelle geben die realen klimatischen Verhältnisse an einem Standort nur näherungsweise wieder, insbesondere, weil Prozesse in Ozeanen und der Atmosphäre nicht im Detail bekannt sind und weil die Modelle nicht beliebig hoch in räumlicher und zeitlicher Dimension aufgelöst werden können. Um Abweichungen zwischen den real gemessenen Klimavariablen und den modellierten Klimavariablen zu verringern, werden die mittels der dynamischen Regionalmodelle REMO und CLM ermittelten Klimavariablen einer sogenannten Biaskorrektur unterzogen (Fowler et al., 2007; Graham et al., 2007; Krahe et al., 2009; Mudelsee et al., 2010).

Grundsätzlich werden im ersten Schritt Korrekturfaktoren durch Vergleich mit Referenzdaten ermittelt und im zweiten Schritt dann auf die zu korrigierenden Daten angewandt. Eine generelle Annahme dieser Verfahren ist, dass die für den Kontrollzeitraum ermittelten Transferfunktionen auch für Zukunftsprojektionen angewendet werden können, wenngleich diese möglicherweise Extremwerte außerhalb des Kalibrierungsbereichs aufweisen. Bei den angewandten Verfahren handelt es sich zum einen um Scaling-Methoden und zum anderen um Quantile-Mapping.

Scaling-Methoden

Einen Überblick über den auf „Scaling“ basierenden die Bias-Korrekturmethode („Linear Scaling“ und darauf aufsetzende nichtlineare Erweiterungen) liefert der CHR-Report I-23 (CHR, 2010, bzw. Görgen et al., 2010).

Der Korrekturfaktor a wird dabei für die 12 Monate des Jahres und für Modellteilgebiete getrennt ermittelt und danach zur Erzielung räumlich stetiger Korrekturfaktorverteilungen geglättet. Nach Görgen et al. (2010) werden zur Ermittlung der Korrekturfaktoren je nach Variable Differenzen oder Quotienten betrachtet, so dass die Berechnung von biaskorrigierten Werten V' anhand der originären Werte V mittels des Korrekturfaktors anhand von Gleichungen des Typs $V' = a \cdot V$ oder $V' = V + a$ erfolgt. Die erweiterten Skalierungsansätze zielen neben einer Korrektur des mittleren Verhaltens z. T. auch auf die Korrektur weiterer Momente ab. So werden beispielsweise bei der Lufttemperatur T biaskorrigierte Werte T' durch Anwendung einer Korrekturformel erreicht, bei der auch die Standardabweichungen an die Standardabweichungen des Referenzdatensatzes angeglichen werden (s. Görgen et al., 2010).

Quantile-Mapping

Noch weitergehende Korrekturen werden durch Anwendung von sogenanntem Quantile-Mapping eingeführt. Die nachfolgenden Erläuterungen orientieren sich dabei an Mudelsee

et al. (2010). Beim Quantile-Mapping wird die gesamte empirische Verteilungsfunktion der Variable auf diejenige des Referenzdatensatzes verschoben. Dies wird in Abb. 22 anhand eines Beispiels dargestellt.

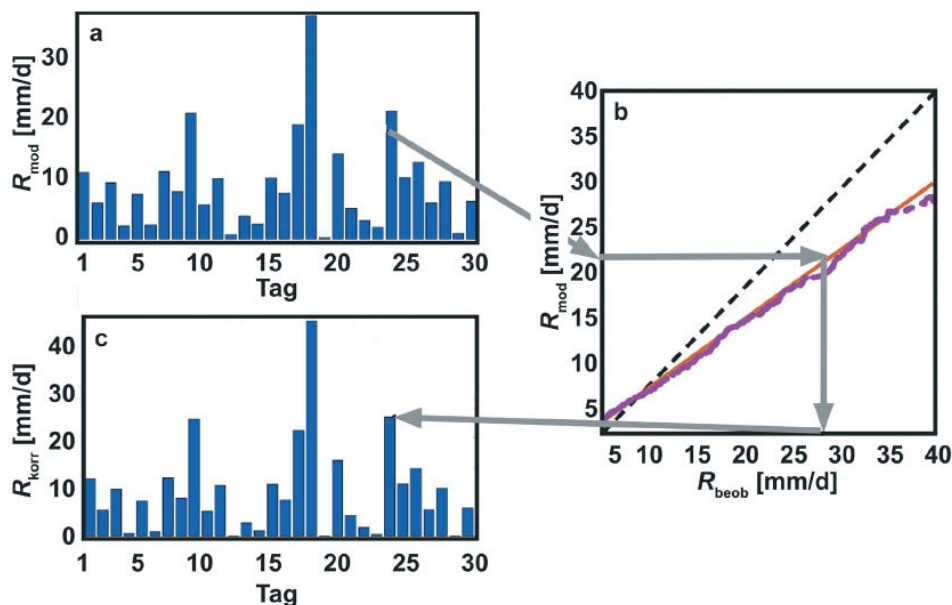


Abb. 22: Prinzipiendarstellung zum Quantile-Mapping-Verfahren, aus Mudelsee et al. (2010)

Wird an die in Abb. 22 aufgetragenen Wertepaare, die sich jeweils aus der aufsteigenden Sortierung der Einzelwerte ergeben, eine Funktion angepasst (z.B. in Form einer Regressionsgerade, orangefarben), dann spricht man von einem parametrischen Ansatz, während die unmittelbare Nutzung der empirisch erhaltenen Wertepaare einen nichtparametrischen Ansatz darstellen (lilafarbene Wertepaare). Laut Mudelsee et al. (2010) ergeben sich bei den beiden Ansätzen folgende Vor- und Nachteile: Bei der nichtparametrischen Form legt der beobachtete Wertebereich den Korrekturwertebereich fest. Ein potentieller Nachteil ist dabei, dass keine neuen „Rekordereignisse“ in den korrigierten Zeitreihen auftreten können. Ein Vorteil: Extrapolationen (korrigierte Werte jenseits des Beobachtungsbereiches) sind ausgeschlossen.

Prinzipiell ist im Zuge des Quantile-Mappings auch die Anpassung von theoretischen Verteilungsfunktionen möglich. Dies wird beispielsweise in Li et al. (2010) sowie Piani et al. (2010) beschrieben. Letztere bewerten für tägliche Niederschläge angewandte, auf der Anpassung der Gammaverteilung aufsetzende Methode als sehr erfolgreich, da nicht allein Momente zutreffend abgebildet werden sondern auch Trockenheits- und Starkniederschlagsindizes.

Die an der Bundesanstalt für Gewässerkunde entwickelten Korrekturverfahren werden in Abhängigkeit von der jeweils betrachteten Klimavariablen wie folgt eingesetzt:

- Bei der Lufttemperatur: Linear Scaling inklusive Angleichung der Standardabweichung
- Beim Niederschlag: parametrisches Quantile Mapping ohne Anpassung einer

theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung

- Bei der Sonnenscheindauer: Linear Scaling
- Bei der relativen Luftfeuchte: indirekte Biaskorrektur, da die relativen Luftfeuchten über das Mischungsverhältnis rückgerechnet werden und bei dieser Rückrechnung die biaskorrigierte anstelle der nicht biaskorrigierten Lufttemperatur verwendet wird
- Bei der Windgeschwindigkeit: keine Biaskorrektur

Im Zuge der Biaskorrektur werden die Daten zunächst räumlich auf Gitter mit 50 Kilometer Kantenlänge aggregiert und dann im zweiten Schritt auf Raster mit 5 Kilometer Kantenlänge disaggregiert. Aus diesem Grund erfährt bei dem Ansatz auch die Windgeschwindigkeit gewisse Modifikationen. Als Referenzdatensatz liegt stets der Obs_was5-Datensatz zugrunde. Daher liegen die biaskorrigierten Größen einheitlich in einem 5x5-Kilometer-Gitter vor. Eine genauere Beschreibung der Bias-Korrektur der BfG findet sich in Krahe et al. (2011, AdaptAlp Technical Report).

3.4 Durchführung der Vergleiche

Prinzipiell werden im Rahmen der Untersuchung die Aspekte der Plausibilität der Projektionen und der in den Projektionen sich manifestierenden Klimasignale getrennt voneinander betrachtet.

Bei der Plausibilität ist zu eruieren, inwieweit die für den Beobachtungszeitraum vorliegenden Klimaprojektionsdaten die tatsächlichen klimatischen Verhältnisse zutreffend beschreiben. Dies erfolgt durch Vergleich der Klimaprojektionen mit dem Referenzdatensatz Obs_was. Die HYRAS-Niederschlagsdaten werden zu Vergleichszwecken in die Betrachtungen einbezogen. Es wird dabei einheitlich der Ist-Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 betrachtet. Dies ist keine Beurteilung der Qualität der für sich stehenden Datensätze. Es erfolgt lediglich eine Einschätzung hinsichtlich der Plausibilität in der hier gewählten Modellkette, bei der die Klimatologie des WaSiM-Datensatzes die Referenz darstellt.

Die Quantifizierung des Klimasignals erfolgt, indem Relationen zwischen dem durch die Projektionen beschriebenen Ist-Klima und den zukünftigen Verhältnissen gebildet werden. Dabei werden die zwei Zukunftszeiträume „nahe Zukunft“ von 2021 bis 2050 (z1) und „ferne Zukunft“ von 2071-2100 (z2) unterschieden. Ein Vergleich der Simulationen für die Zukunft mit Messdaten der Vergangenheit ist nicht zulässig, da sich bei einem solchen Vergleich Klimasignal und Modellfehler überlagern würden. Dies gilt auch für biaskorrigierte Klimamodellläufe, da der systematische Fehler durch die Biaskorrektur nicht vollständig behoben wird.

Insgesamt ergeben sich die in Tab. 7 dargestellten Kombinationen aus Klimaprojektion bzw. Klimadatensatz, Referenzdatensätzen für Plausibilitäts- und Klimasignalbetrachtungen sowie

den jeweils abgedeckten Zukunftszeiträumen.

Tab. 7 : Modelllauf, Referenzdatensatz und Betrachtungszeiträume (z1: 2021-2050; z2: 2071-2100)

Klimaprojektion / Datensatz	Referenz Plausibilität	Referenz Klimasignal	Zukunftszeiträume
Obs_was			
HYR_ori	Obs_was		
HYR_dis	Obs_was		
GLO_vgl	Obs_was		
GLO_frt	Obs_was	GLO_vgh	z1
GLO_ipc	Obs_was	GLO_vgh	z1
GLO_rem	Obs_was	GLO_vgh	z1
WET09_hc	Obs_was	WET09_hc	z1,z2
WET09_eh	Obs_was	WET09_eh	z1,z2
WET09_cn	Obs_was	WET09_cn	z1,z2
WET10_eh	Obs_was	WET10_eh	z1,z2
GLO_mm5	Obs_was	GLO_vgh	z1
REM_uba	Obs_was	REM_uba	z1,z2
REM_ubv	Obs_was	REM_uba	z1,z2
REM_uba_b	Obs_was	REM_uba_b	z1,z2
REM_bfg_b	Obs_was	REM_bfg_b	z1,z2
REM_ens_b	Obs_was	REM_ens_b	z1,z2
CLM_eh_b	Obs_was	CLM_eh_b	z1,z2
CLM_hd_b	Obs_was	CLM_hd_b	z1,z2
CLM_eh2_b	Obs_was	CLM_eh2_b	z1,z2
CMCC_ec4	Obs_was		
CMCC_ec5	Obs_was		
CMCC_er	Obs_was		

Zu beachten ist, dass die CMCC-Projektionen nicht bias-korrigiert sind. Sie werden daher in den nachfolgenden Untersuchungen zur Plausibilität nur noch zu Vergleichszwecken in Form von Jahreswerten berücksichtigt. In den Betrachtungen zum Klimasignal werden sie nicht mehr berücksichtigt. Eine Bias-Korrektur der Projektionen wird angestrebt (Quelle: CMCC).

Die ermittelten Ergebnisse werden sowohl hinsichtlich der Plausibilität als auch hinsichtlich des Klimasignals in den nachfolgenden Abschnitten häufig in Form von eingefärbten Tabellen dargestellt (Beispiel in Tab. 8). Dabei gilt folgender Aufbau der Tabellen:

- Die erste Zeile enthält die Referenzwerte ref in Form von Absolutangaben in der jeweils angegebenen Dimension
- Die Folgezeilen weisen Differenzen der dargestellten Projektion x zur Referenz ref in der Form x-ref aus, weisen also die gleiche Einheit auf wie die Referenzzeile
- Die Tabellenzellen sämtlicher Folgezeilen sind in fünf Farbklassen eingefärbt. Die Klassenzuordnung erfolgt (außer bei der Temperatur) anhand prozentualer Abweichungen der Form $p = (x - \text{ref}) / \text{ref} * 100$ mit den Klassengrenzen $\pm 10\%$ („deutliche Änderung“) sowie $\pm 20\%$ („starke Änderung“).
- Die Klasseneinteilung der Temperaturabweichungen erfolgt in 0,5 °C-Schritten.
- Es gilt in Abhängigkeit von der betrachteten Klimavariablen folgende Farbgebung:

Bei P und rF	Bei Sd und W	Bei T
Geringer Unterschied (+/- 10 %)	Geringer Unterschied (+/- 10 %)	Geringer Unterschied (+/- 0,5 °C)
Deutl. Unterschätzung (< -10 %)	Deutl. Überschätzung (> +10 %)	Deutl. Überschätzung (> +0,5 °C)
Starke Unterschätzung (< -20 %)	Starke Überschätzung (> +20 %)	Starke Überschätzung (> +1 °C)
Deutl. Überschätzung (> +10 %)	Deutl. Unterschätzung (< -10 %)	Deutl. Unterschätzung (< -0,5 °C)
Starke Überschätzung (> +20 %)	Starke Unterschätzung (< -20 %)	Starke Unterschätzung (< -1 °C)

Die betrachteten Variablen sind:

- T: Temperatur [°C]
- Sd: relative Sonnenscheindauer [-]
- P: Niederschlag [mm]
- W: Windgeschwindigkeit [m/s]
- rF: relative Luftfeuchte [-]

Tab. 8 Beispiel für eine eingefärbte Tabelle

Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
OBS_was	-3,71	-2,87	0,40	3,63	8,72	11,4	13,7	13,6	10,3	6,02	0,31	-2,66	4,95	-3,09	4,26	12,9	5,54
HYR_ori	1,6	1,8	1,9	1,6	1,2	1,2	1,3	1,3	1,1	1,0	1,4	1,4	1,4	1,6	1,6	1,3	1,2
HYR_dis	1,1	1,3	1,4	1,1	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,9	1,0	0,9	1,2	1,0	0,6	0,7
GLO_vgh	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,0	-0,2	0,2	-0,1	0,1	0,4	0,2
REM_uba	-1,1	-0,9	-0,1	1,5	0,0	0,5	0,5	-0,1	0,6	0,4	0,6	-0,2	0,1	-0,7	0,5	0,3	0,5

3.5 Ergebnisse der Plausibilitätsbetrachtungen

3.5.1 Jahreswerte

In Tab. 9 werden langjährige Jahreswerte für die Klimavariablen Lufttemperatur (T), Niederschlag (P), Windgeschwindigkeit (W), Luftfeuchte (rF) und Sonnenscheindauer (Sd) für das gesamte Inneinzugsgebiet zusammenfassend dargestellt. Der obere Teil liefert die absoluten und der untere die relativen Werte (Differenzen).

Insgesamt ist festzustellen:

- Lufttemperatur: Geringe Abweichungen zwischen den Jahreswerten und dem Referenzdatensatz über alle Einzugsgebiete hinweg liefern die WETTREG-Daten, GLO_vgh sowie REM_uba. Die unkorrigierten CMCC-Datensätze liefern Lufttemperaturen weit unterhalb der Referenzdaten.
- Niederschlag: Der mittlere Jahresniederschlag wird im Vergleich zur Referenz bei HYRAS sowie GLO_vgh deutlich unterschätzt und bei den nicht biaskorrigierten REMO-Läufen REM_uba und REM_ubv (verdrifteter Niederschlag) deutlich überschätzt. Die unkorrigierten CMCC-Datensätze unterschätzen die Referenz-Niederschläge sehr stark. Gute Übereinstimmungen zur Referenz liefern die verschiedenen WETTREG-Projektionen sowie sämtliche biaskorrigierten Datensätze. Generell treten die geringsten Abweichungen im Gebiet Unterer Inn auf, bei dem die Höhenverteilung der Niederschlagsstationen repräsentativ für die Höhenverteilung im Einzugsgebiet ist (s. Abschnitt 2.1.2).
- Windgeschwindigkeit: Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit wird nur durch die WETTREG2009-Szenarien relativ zutreffend abgebildet. Bei den anderen Modellläufen zeigen sich deutliche (WETTREG2010) bis starke Überschätzungen gegenüber der Referenz, wobei der Grad der Überschätzungen in allen betrachteten Teilgebieten ähnliche Größenordnungen zwischen einem halben und einem Meter pro Sekunde ausmacht. Im Gebiet der Öztaler Ache sind die Überschätzungen nochmals größer.
- Luftfeuchte: Die mittlere jährliche relative Luftfeuchte wird zumindest bezogen auf das Gesamtgebiet durch nahezu alle Projektionen recht zutreffend nachgebildet. Einzige Ausnahme ist der nicht biaskorrigierte REMO_uba-Lauf, bei dem teilweise starke Unterschätzungen auftreten.
- Relative Sonnenscheindauer: Die mittlere jährliche relative Sonnenscheindauer wird durch alle betrachteten Modellläufe recht zutreffend abgebildet.

Tab. 9: Mittlere Jahreswerte von T, P, W, rF und Sd im Zeitraum 1971-2000 im Inneinzugsgebiet (oben) und relative Abweichungen zur Referenz Obs_was (unten)

Absolut	T [°C]	P [mm]	Sd [-]	rF [-]	W [m/s]
Obs_was	5	1425	0,4	0,8	2,1
HYR_ori		1189			
HYR_dis		1190			
GLO_vgh	5,1	1245		0,8	2,7
REM_uba	5,1	1629		0,7	2,8
REM_ubv		1640			
REM_uba_b	4,6	1464	0,4	0,7	2,9
REM_bfg_b	4,6	1451	0,4	0,7	2,9
REM_ens_b	4,7	1444	0,4	0,8	2,7
CLM_eh_b	4,7	1453	0,4	0,8	3,0
CLM_hd_b	4,8	1446	0,4	0,8	3,5
CLM_eh2_b	4,7	1433	0,4	0,8	2,9
WET09_eh	5,2	1439	0,4	0,8	2
WET09_hd	5,2	1446	0,4	0,8	2
WET09_cn	5,2	1466	0,4	0,8	2
WET10_eh	5,2	1431	0,4	0,8	2,4
CMCC_er	0,5	819			
CMCC_ec4	2,7	787			
CMCC_ec5	1,1	1008			
Relativ zu Obs_was	T [°C]	P [mm]	Sd [-]	rF [-]	W [m/s]
HYR_ori		-236			
HYR_dis		-235			
GLO_vgh	0,2	-179		0,1	0,6
REM_uba	0,1	204		-0,1	0,8
REM_ubv		215			
REM_uba_b	-0,3	40	0	-0,0	0,9
REM_bfg_b	-0,3	26	0	-0,0	0,8
REM_ens_b	-0,2	19	0	0,0	0,6
CLM_eh_b	-0,2	29	0	0,1	0,9
CLM_hd_b	-0,2	21	0	0,1	1,4
CLM_eh2_b	-0,3	9	0	0,0	0,9
WET09_eh	0,3	14	0	-0,0	-0,1
WET09_hd	0,2	22	0	-0,0	-0,1
WET09_cn	0,2	41	0	0,0	-0,1
WET10_eh	0,2	7	0	0,0	0,4
CMCC_er	-4,4	-606			
CMCC_ec4	-2,2	-638			
CMCC_ec5	-3,8	-417			

3.5.2 Langjährige Quartals- und Monatswerte

Innerhalb des Jahres können die Klimadaten in den Untersuchungsgebieten erheblich von den über das Jahr gemittelten Ergebnissen abweichen. Entsprechend differenzierter stellt sich daher auch die Plausibilitätsbetrachtung auf Monatsbasis dar.

Die langjährigen Monatsmittelwerte am Beispiel der Lufttemperatur für das Inneinzugsgebiet zeigt Abb. 23 in Form von Absolutwerten und Abweichungen zu Obs_was. In ähnlicher Weise sind auch die Ergebnisse für den Niederschlag (Abb. 24), den Wind (Abb. 25) und die relative Luftfeuchte (Abb. 26) abgebildet.

Man erkennt:

- Lufttemperatur: Die bei der überwiegenden Zahl der Projektionen im Gesamtgebiet zutreffende Nachbildung der Lufttemperatur gilt bei Betrachtung von Monatswerten bedingt. So treten in den Wintermonaten speziell bei den REMO Projektionen starke Unterschätzungen auf.
- Niederschlag: Die langjährigen HYR_ori- und HYR_dis-Niederschlagswerte unterschreiten die Obs_was-Werte das ganze Jahr über um etwa gleiche Größenordnungen von ca. 20 mm. Gleichartig verhalten sich die GLO_vgh-Daten, wobei die Unterschätzungen hier zwischen -10 mm und -20 mm liegen. Demgegenüber zeigen die Abweichungen bei den nicht biaskorrigierten REM_uba- und REM_ubv-Daten eine deutliche Saisonalität mit starken Überschätzungen von Obs_was im Winter und geringen Abweichungen im Sommer (Ausnahme Mai). Darüber hinaus scheint bei diesen beiden Projektionen auch eine Phasenverschiebung vorzuliegen, denn die Maxima treten bereits im Juni und nicht wie bei allen anderen Klimäläufen und dem Referenzdatensatz im Juli auf.
- Sonnenscheindauer (keine Abb.): Die relative Sonnenscheindauer wird auch im saisonalen Gang sehr zutreffend abgebildet. Dies gilt für alle Projektionen, für die bezüglich der Variable Daten bereit stehen und die hier betrachtet werden (REMO, CLM, WETTREG2009 und WETTREG2010).
- Windgeschwindigkeit: Sehr gute Wiedergaben der Windgeschwindigkeiten zeigen sich das gesamte Jahr über bei den WETTREG2009-Daten. Demgegenüber treten bei WETTREG2010 deutliche und bei den dynamischen Projektionen zumeist starke Überschätzungen der Windgeschwindigkeiten über das gesamte Jahr hinweg. Dabei sind mitunter Überschätzungen in Größenordnungen von 1 m/s und mehr zu konstatieren.
- Relative Luftfeuchte: Die WETTREG-Datensätze spiegeln die relativen Luftfeuchten mit ihrer vergleichsweise schwach ausgeprägten Saisonalität nahezu abweichungsfrei ab. Auch die REMO-Projektionen sowie die biaskorrigierten CLM-Projektionen zeigen in der Regel nur geringe Abweichungen.

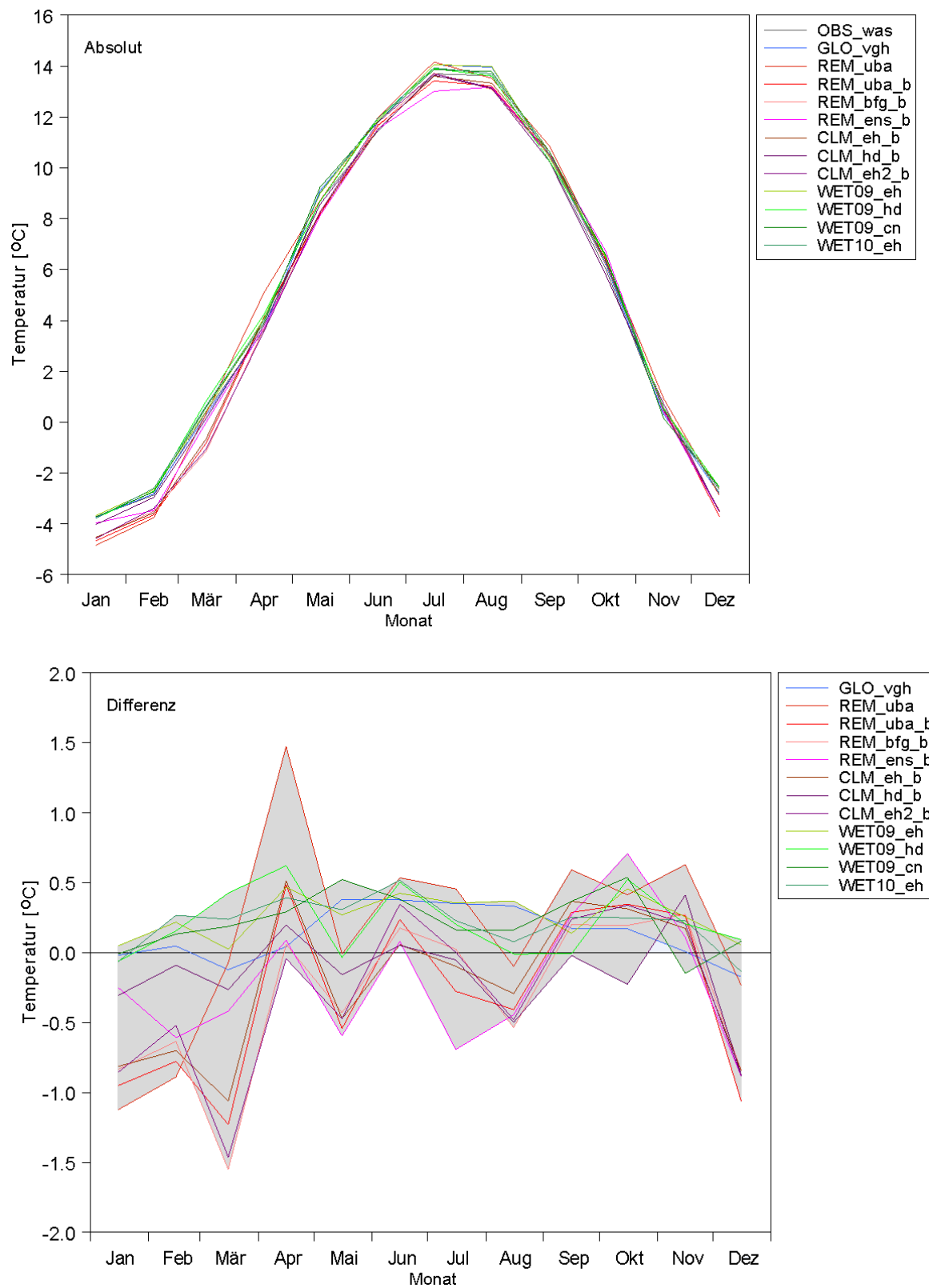


Abb. 23: Mittlere monatliche Lufttemperaturen, 1971-2000, Inneinzugsgebiet, oben absolut, unten relativ zu Obs_was

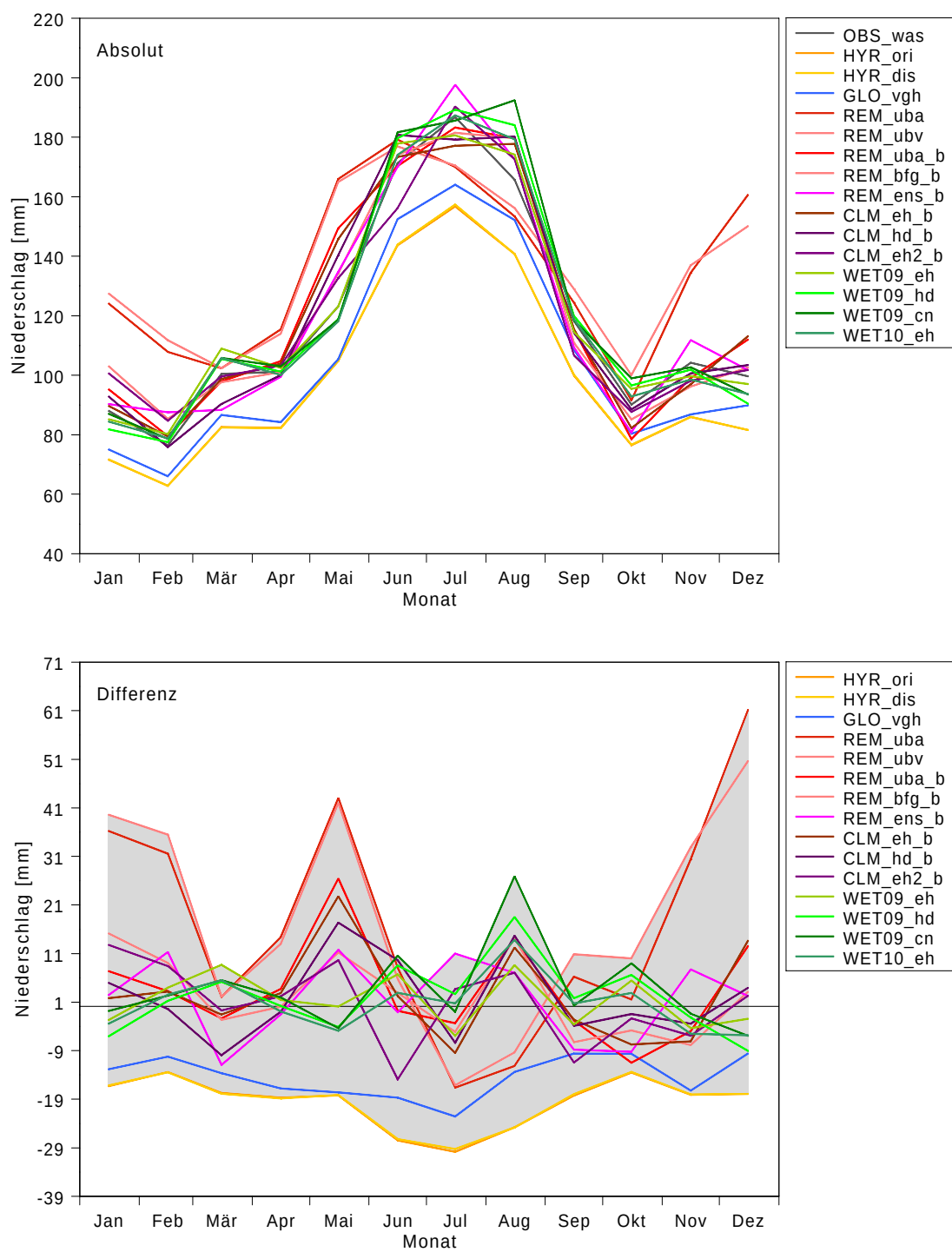


Abb. 24: Mittlere monatliche Niederschläge, 1971-2000, Inneinzugsgebiet, oben absolut, unten relativ zu Obs_was

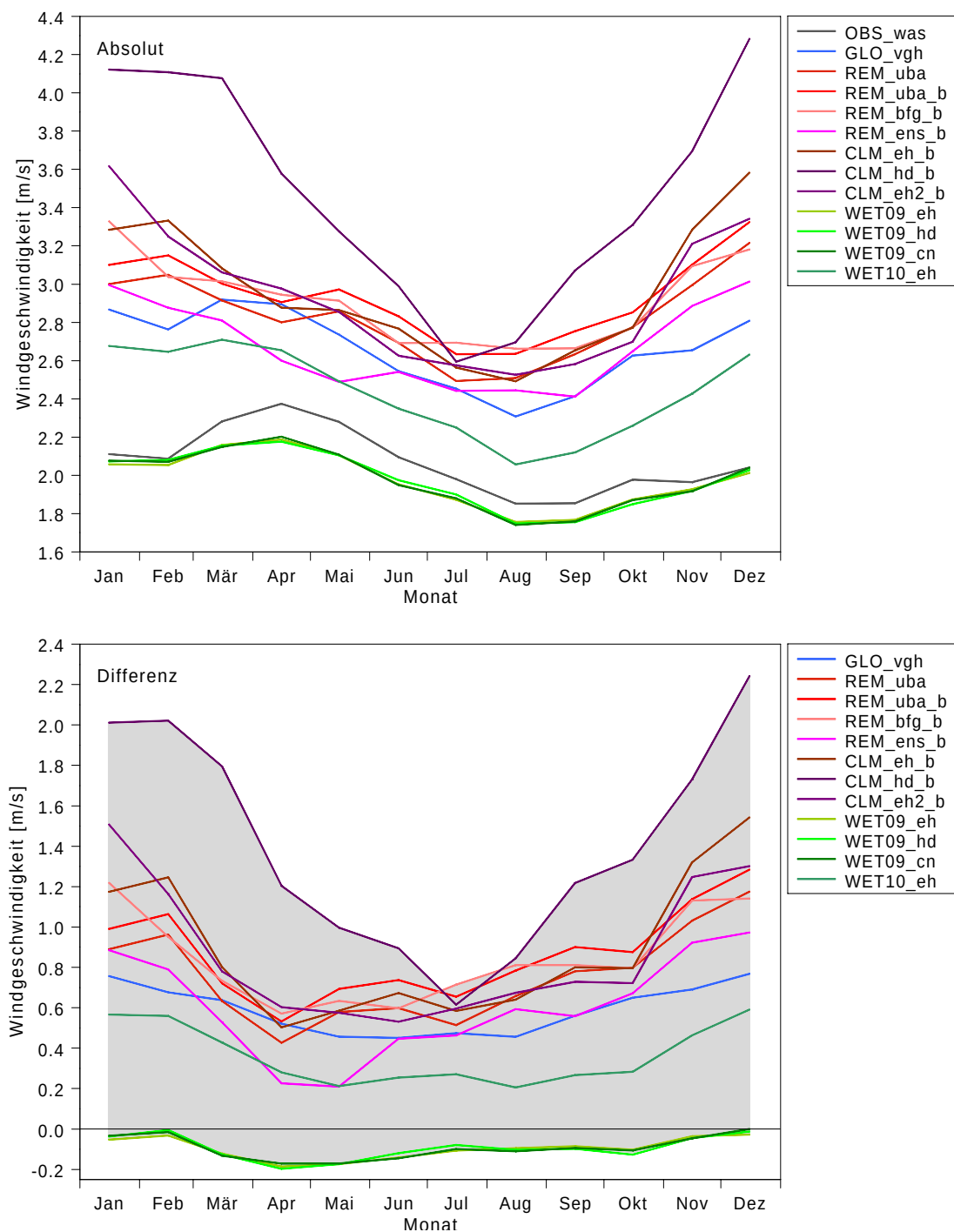


Abb. 25: Mittlere monatliche Windgeschwindigkeiten, 1971-2000, Inneinzugsgebiet, oben absolut, unten relativ zu Obs_was

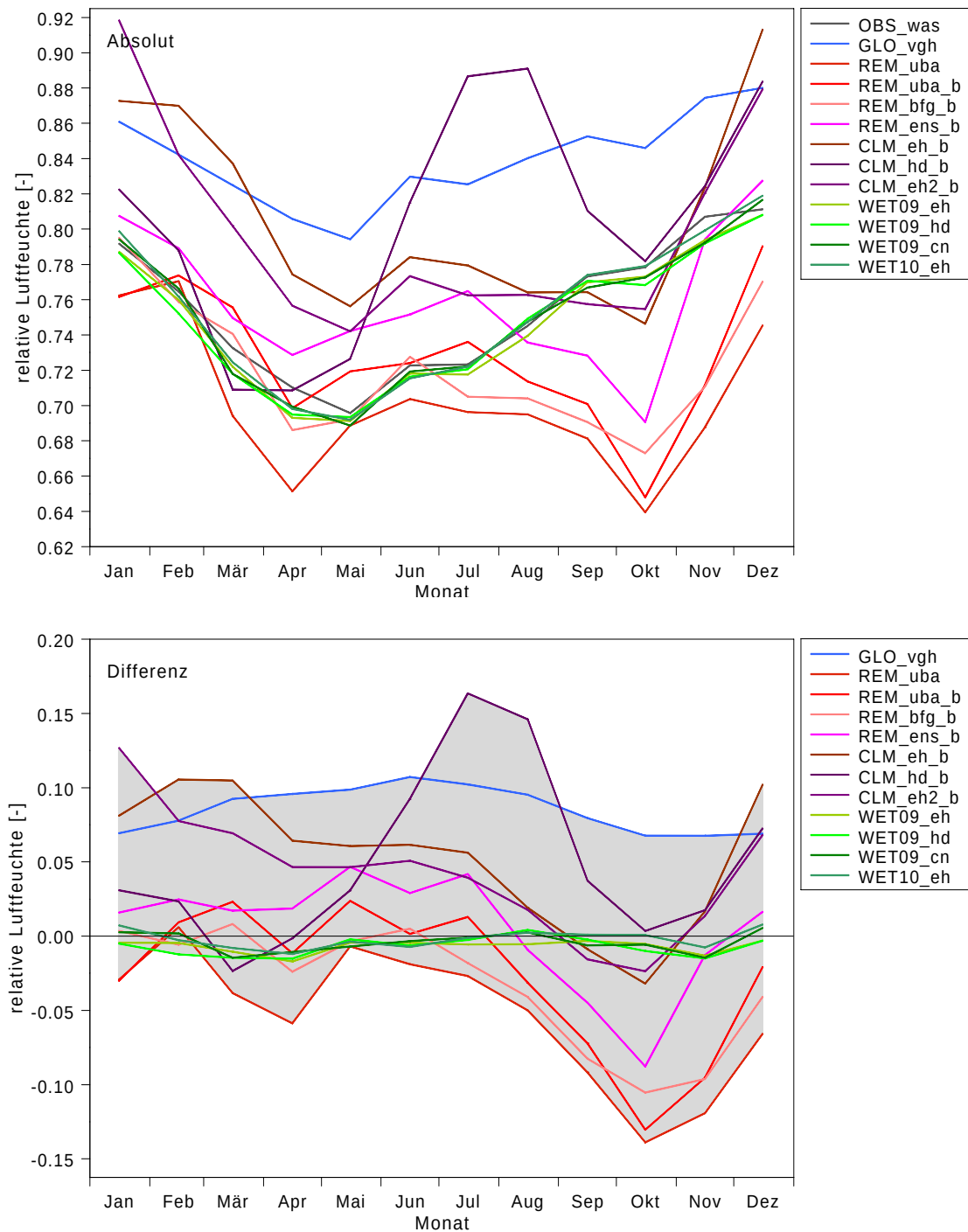


Abb. 26: Mittlere monatliche relative Luftfeuchten, 1971-2000, Inn-Einzugsgebiet, oben absolut, unten relativ zu Obs_was

In Tab. 10 (a bis d) werden die Ergebnisse für das gesamte Inneinzugsgebiet nochmals zusammengefasst.

Tab. 10: Mittlere Monats- Quartals- und Jahreswerte von T, P, W und rF (a bis d) im Zeitraum 1971-2000 im Inneinzugsgebiet, erste Datenzeile: Absolutwerte der Referenz, Folgezeilen: Abweichung von Referenz;

a) Variable T, alle Werte in [°C]

Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
OBS_was	-3,71	-2,87	0,40	3,63	8,72	11,4	13,7	13,6	10,3	6,02	0,31	-2,66	4,95	-3,09	4,26	12,9	5,54
GLO_vgh	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,0	-0,2	0,2	-0,1	0,1	0,4	0,2
REM_uba	-1,1	-0,9	-0,1	1,5	0,0	0,5	0,5	-0,1	0,6	0,4	0,6	-0,2	0,1	-0,7	0,5	0,3	0,5
REM_uba_b	-1,0	-0,8	-1,2	0,5	-0,5	0,2	-0,3	-0,4	0,3	0,4	0,3	-1,1	-0,3	-0,9	-0,4	-0,2	0,3
REM_bfg_b	-0,8	-0,6	-1,6	0,1	-0,4	0,2	0,0	-0,5	0,2	0,2	0,3	-0,8	-0,3	-0,8	-0,7	-0,1	0,2
REM_ens_b	-0,3	-0,6	-0,4	0,1	-0,6	0,1	-0,7	-0,4	0,3	0,7	0,1	-0,9	-0,2	-0,6	-0,3	-0,4	0,4
CLM_eh_b	-0,8	-0,7	-1,1	0,5	-0,5	0,1	-0,1	-0,3	0,4	0,3	0,2	-0,9	-0,2	-0,8	-0,4	-0,1	0,3
CLM_hd_b	-0,3	-0,1	-0,3	0,2	-0,2	0,1	-0,1	-0,5	0,0	-0,2	0,4	-0,9	-0,2	-0,4	-0,1	-0,2	0,1
CLM_eh2_b	-0,9	-0,5	-1,5	0,0	-0,5	0,4	0,0	-0,5	0,2	0,3	0,2	-0,9	-0,3	-0,8	-0,7	-0,1	0,3
WET09_eh	0,1	0,2	0,0	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,1	0,5	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,4	0,3
WET09_hd	-0,1	0,2	0,4	0,6	0,0	0,5	0,2	0,0	0,0	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2
WET09_cn	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2	0,2	0,4	0,5	-0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3
WET10_eh	-0,1	0,3	0,2	0,4	0,3	0,5	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2	-0,1	0,2	0,0	0,3	0,3	0,2

b) Variable P, alle Werte in [mm]

Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
OBS_was	88,0	76,4	100	101	123	171	187	166	118	90,1	104	99,6	1425	264	325	524	312
HYR_ori	-16,5	-13,6	-17,9	-18,8	-18,4	-27,6	-30,0	-24,9	-18,4	-13,7	-18,2	-18,0	-235,9	-48,1	-55,1	-82,6	-50,3
HYR_dis	-16,3	-13,6	-18,0	-19,0	-18,3	-27,4	-29,4	-25,0	-18,1	-13,5	-18,2	-18,1	-234,7	-48,0	-55,3	-81,7	-49,8
GLO_vgh	-13,0	-10,4	-13,8	-16,9	-17,7	-18,8	-22,7	-13,5	-9,7	-9,8	-17,4	-9,7	-179,4	-36,1	-48,4	-55,1	-39,8
REM_uba	36,1	31,4	1,9	14,3	42,8	7,9	-16,8	-12,3	6,1	1,4	30,3	61,1	204,2	128,6	59,0	-21,2	37,7
REM_ubv	39,5	35,4	1,9	12,8	41,8	5,6	-16,3	-9,5	10,7	9,9	32,8	50,6	215,1	125,4	56,6	-20,2	53,3
REM_uba_b	7,2	3,1	-2,5	3,6	26,3	-0,9	-3,5	13,9	-2,9	-11,6	-5,1	12,4	39,9	22,8	27,3	9,5	-19,7
REM_bfg_b	15,0	8,9	-2,8	-0,1	11,1	2,8	-5,3	14,0	-7,4	-5,0	-8,0	3,0	26,2	27,0	8,2	11,5	-20,4
REM_ens_b	2,3	11,1	-12,1	-1,7	11,6	-1,3	10,8	6,9	-9,0	-9,4	7,6	2,1	19,0	15,5	-2,2	16,5	-10,8
CLM_eh_b	1,7	3,0	-1,7	2,7	22,6	2,1	-9,6	12,1	-2,8	-7,9	-7,2	13,6	28,6	18,3	23,6	4,6	-17,9
CLM_hd_b	4,8	-0,6	-10,1	-1,1	17,2	9,5	-7,6	14,5	-4,0	-1,6	-3,6	3,8	21,3	8,1	6,0	16,4	-9,2
CLM_eh2_b	12,6	8,3	-0,9	2,1	9,5	-15,1	3,5	6,9	-11,6	-2,5	-6,1	2,2	8,9	23,1	10,7	-4,7	-20,2
WET09_eh	-2,9	3,8	8,5	1,3	-0,1	6,6	-6,1	8,5	-3,8	5,3	-4,5	-2,6	14,1	-1,6	9,8	8,9	-3,0
WET09_hd	-6,2	1,1	5,0	0,1	-4,3	8,4	2,5	18,4	1,6	6,5	-2,3	-9,2	21,5	-14,3	0,8	29,2	5,8
WET09_cn	-1,0	2,2	5,4	1,8	-4,5	10,4	-1,2	26,7	0,1	8,8	-1,5	-6,1	41,1	-4,9	2,7	36,0	7,4
WET10_eh	-3,6	2,4	5,3	-1,1	-5,1	2,8	0,6	13,6	0,6	2,7	-5,7	-6,0	6,7	-7,2	-0,8	17,0	-2,4

c) Variable W, alle Werte in [m/s]

Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
OBS_was	2,1	2,1	2,3	2,4	2,3	2,1	2,0	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,3	2,0	1,9
GLO_vgh	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,6	0,7	0,5	0,5	0,6
REM_uba	0,9	1,0	0,6	0,4	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	0,6	0,6	0,9
REM_uba_b	1,0	1,1	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,3	0,9	1,1	0,7	0,7	1,0
REM_bfg_b	1,2	1,0	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1	0,8	1,1	0,7	0,7	0,9
REM_ens_b	0,9	0,8	0,5	0,2	0,2	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,9	1,0	0,6	0,9	0,3	0,5	0,7
CLM_eh_b	1,2	1,2	0,8	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	0,8	1,3	1,5	0,9	1,3	0,6	0,6	1,0
CLM_hd_b	2,0	2,0	1,8	1,2	1,0	0,9	0,6	0,8	1,2	1,3	1,7	2,2	1,4	2,1	1,3	0,8	1,4
CLM_eh2_b	1,5	1,2	0,8	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	1,3	1,3	0,9	1,3	0,7	0,6	0,9
WET09_eh	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,2	-0,1	-0,1
WET09_hd	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,2	-0,1	-0,1
WET09_cn	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,2	-0,1	-0,1
WET10_eh	0,6	0,6	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6	0,4	0,6	0,3	0,2	0,3

d) Variable rF, alle Werte in [-]

Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
OBS_was	0,79	0,76	0,73	0,71	0,70	0,72	0,72	0,74	0,77	0,78	0,81	0,81	0,75	0,79	0,71	0,73	0,79
GLO_vgh	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
REM_uba	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1
REM_uba_b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1
REM_bfg_b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1
REM_ens_b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1
CLM_eh_b	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
CLM_hd_b	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
CLM_eh2_b	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
WET09_eh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
WET09_hd	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
WET09_cn	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
WET10_eh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Bei P und rF	Bei W	Bei T
Geringer Unterschied (+/- 10 %)	Geringer Unterschied (+/- 10 %)	Geringer Unterschied (+/- 0,5 °C)
Deutl. Unterschätzung (< -10 %)	Deutl. Überschätzung (> +10 %)	Deutl. Überschätzung (> +0,5 °C)
Starke Unterschätzung (< -20 %)	Starke Überschätzung (> +20 %)	Starke Überschätzung (> +1 °C)
Deutl. Überschätzung (> +10 %)	Deutl. Unterschätzung (< -10 %)	Deutl. Unterschätzung (< -0,5 °C)
Starke Überschätzung (> +20 %)	Starke Unterschätzung (< -20 %)	Starke Unterschätzung (< -1 °C)

3.5.3 Weitere Kennwerte in den Gebieten Alz und Ötztaler Ache

Für die kleineren Einzugsgebiete der Alz und Ötztaler Ache werden weitere Kennwerte zur Lufttemperatur und zum Niederschlag betrachtet. Bei den Temperaturen handelt es sich um Diagramme von aufsteigend sortierten, jährlichen Maximal- und Minimaltemperaturen. Bei den Niederschlägen werden quartalsbezogene Betrachtungen zu Tagesmittelwert, Anzahl von Tagen mit Überschreitung der Niederschlagsschwellen von 1 mm, 10 mm und 20 mm sowie zum maximalen Dreitagesniederschlag gemacht und relativ zu den Referenzdaten angegeben. Die Ergebnisse sind in Abb. 27 und Abb. 28 für das Alzgebiet dargestellt.

Folgendes ist erkennbar:

- Temperaturkennwerte: Im Alzgebiet werden die maximalen jährlichen Lufttemperaturen durch die WETTREG-Projektionen deutlich überschätzt, während bei den anderen Projektionen die Unterschiede zu Obs_was vergleichsweise gering sind. Es sind deutliche Unterschiede in den Gebieten Alz und Ötztaler Ache zu verzeichnen: Im Gebiet Ötztaler Ache liegen die Maximaltemperaturen bei den meisten Projektionen stark oberhalb der Obs_was-Werte. Bei den Minimaltemperaturen werden die Obs_was-Werte im Alzgebiet bei fast allen Projektionen stark untertroffen. Nur GLO_vgh liefert ähnliche Werte. Im Gebiet Ötztaler Ache gilt ebenfalls die Tendenz niedrigerer Werte durch die Klimaprojektionen, vor allem bei WETTREG.

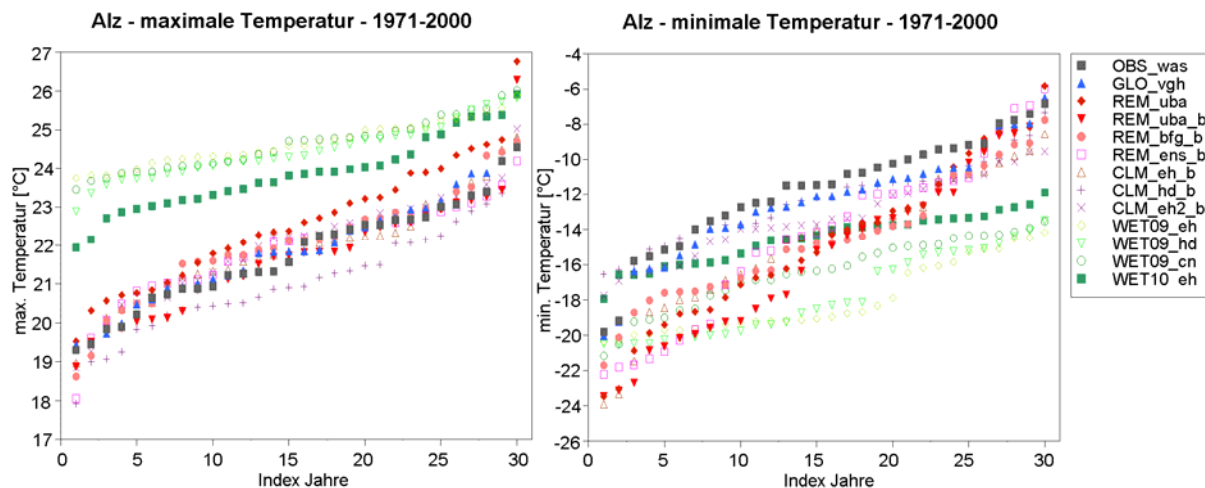


Abb. 27: Jährliche maximale und minimale Lufttemperaturen im Zeitraum 1971-2000, Alzgebiet

- Niederschlagskennwerte: Die Tagesmittelwerte werden durch REM_uba und REM_ubv im Winter (Quartal DJF) zumeist überschätzt, besonders stark durch den unkorrigierten REMO-Lauf (REM_uba). Bei den anderen Niederschlagskennwerten (Anzahl von Niederschlagstagen größer 1 mm, größer 10 mm und größer 20 mm, sowie das Drei-Tages-Maximum) spannt sich eine große Bandbreite an Über- und Unterschätzungen durch die Klimaprojektionen auf. Im Sommer (Quartal JJA) treten bei den meisten Projektionen Unterschätzungen auf. Die WETTREG-Projektionen zeigen bei den Niederschlagskennwerten meist geringe Abweichungen von der Referenz.

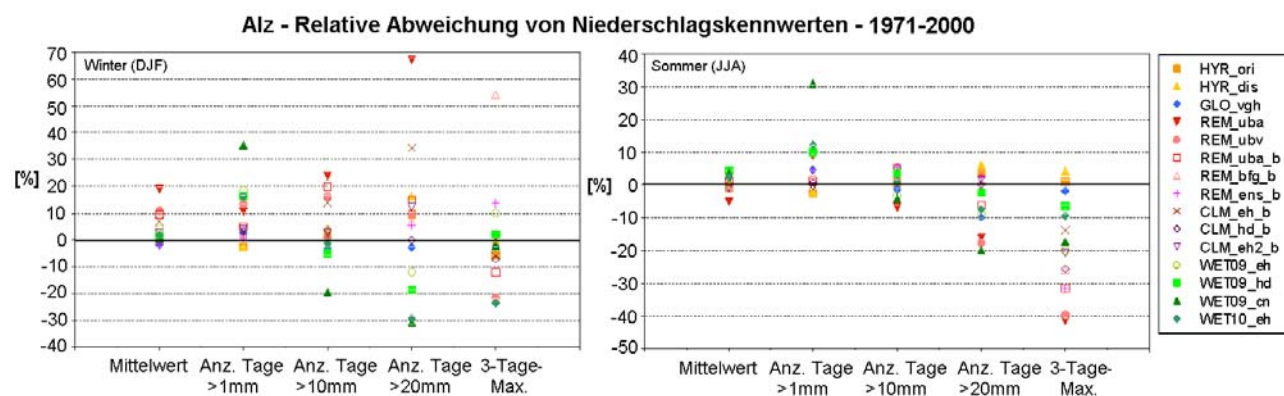


Abb. 28: Auf Obs_was bezogene Niederschlagskennwerte im Zeitraum 1971-2000, links: Quartal DJF, rechts: JJA, Alzgebiet

3.6 Auswirkung der Biaskorrektur

Bezüglich der Klimaprojektion REMO-UBA liegen hier sowohl originäre (REM_uba) und – beim Niederschlag – verdriftete Datensätze vor (REM_ubv) (Raster 10 Kilometer), als auch die Resultate der an der Bundesanstalt für Gewässerkunde durchgeführten Biaskorrektur (REM_uba_b), bei der die in 5x5-km-Gitterweite aufgelösten Obs_was5-Daten als Referenz dienen (siehe auch Tab. 6). Anhand dieser Datensätze ist daher eine beispielhafte Einschätzung der Auswirkung der Bias-Korrektur möglich.

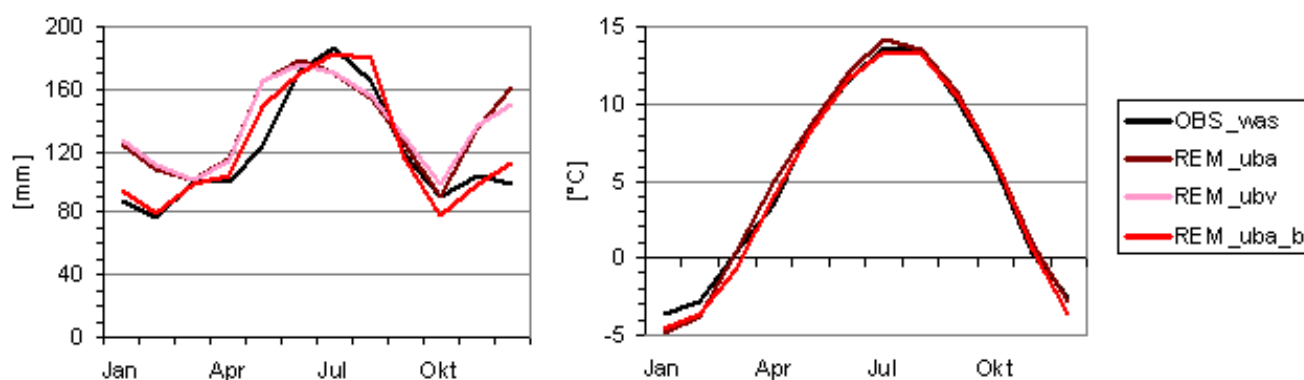


Abb. 29: Auswirkung der Bias-Korrektur auf Niederschlag (links) und Temperatur (rechts) für das Inngebiet im Zeitraum 1971-2000

In der Abb. 29 werden die Mittelwerte der Datensätze für das Inngebiet dargestellt. Diese, sowie die in Tab. 11, Tab. 12 und Tab. 13 gezeigten Mittelwerte für die anderen Untersuchungsgebiete, ergeben folgendes:

- Niederschlag: von der Biaskorrektur sind im Wesentlichen die Niederschlagswerte in den Wintermonaten betroffen, wobei fast ausschließlich höhere Werte der originären Werte abgemindert werden. Dies gilt sowohl für das Gesamtgebiet als auch für alle betrachteten Teilgebiete. Die nicht biaskorrigierten monatlichen Werte sind in den Wintermonaten im Gesamtgebiet um ca. 30-40 mm höher als die biaskorrigierten Werte. In den Teilgebieten sind die Unterschiede z.T. deutlich größer. Im August kommt es zu gegenläufigen Korrekturen, bei denen die originären Werte um 20 mm bis 30 mm angehoben werden. Die Unterschiede zwischen nicht verdrifteten und verdrifteten Werten sind zumindest auf das Inn-Gesamtgebiet bezogen meist gering. In den Teilgebieten werden die verdrifteten Werte oft stärker korrigiert als die nicht verdrifteten.
- Lufttemperatur: Die Biaskorrektur der Lufttemperatur erfolgt im Wesentlichen bezogen auf die Wintermonate. Die Korrektur führt dabei in fast allen Gebieten zu einer Absenkung der Temperaturen um bis zu ein bis knapp zwei Grad. Im Salzachgebiet sind die originären Temperaturen demgegenüber im Winter um mehr als ein Grad niedriger.

- Relative Luftfeuchte: Die originären relativen Luftfeuchten werden in der Regel kaum korrigiert. Wie in Abschnitt 3.3 erläutert, basiert die Luftfeuchte-Korrektur auf der Nutzung der biaskorrigierten Lufttemperatur bei Rückrechnung der relativen Luftfeuchte aus dem Mischungsverhältnis.

Tab. 11: Auswirkung der Bias-Korrektur -Niederschlag [mm], relativ zu REM_uba_b, Zeitraum 1971-2000

Einzugsgebiet	Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
Inn	REM_uba_b	95	79	98	105	149	170	183	180	115	78	99	112	1464	287	352	533	293
	REM_uba	29	28	4	11	17	9	-13	-26	9	13	35	49	164	106	32	-31	57
	REM_ubv	32	32	4	9	16	7	-13	-23	14	21	38	38	175	103	29	-30	73
Oberer Inn	REM_uba_b	101	87	101	106	147	167	191	188	123	79	98	116	1504	304	354	547	300
	REM_uba	34	35	19	27	33	26	-5	-13	19	25	52	63	315	133	78	8	96
	REM_ubv	52	52	28	30	34	23	-8	-9	25	41	66	61	394	166	91	6	132
Unterer Inn	REM_uba_b	88	73	92	97	142	164	161	161	100	74	95	105	1352	266	331	485	269
	REM_uba	24	20	-9	-1	4	-4	-15	-32	5	2	22	32	46	75	-6	-51	28
	REM_ubv	8	7	-20	-10	-2	-9	-15	-33	3	-1	8	8	-56	23	-33	-56	9
Salzach	REM_uba_b	108	84	111	131	183	203	247	228	152	94	117	128	1785	319	425	678	362
	REM_uba	34	42	16	12	19	11	-30	-40	-1	25	42	73	204	149	47	-58	66
	REM_ubv	69	75	35	27	34	19	-16	-27	23	55	76	89	460	233	97	-25	155
Alz	REM_uba_b	99	82	107	110	157	185	182	181	115	83	109	122	1532	303	375	548	307
	REM_uba	44	38	4	10	19	0	-8	-25	22	18	46	59	227	140	33	-33	86
	REM_ubv	21	19	-12	0	17	8	1	-21	20	14	25	25	118	65	5	-12	60
Ötztaler Ache	REM_uba_b	109	96	109	118	149	165	189	184	123	83	105	121	1549	325	376	538	310
	REM_uba	4	9	-4	-1	5	-10	-40	-39	1	16	18	21	-18	34	1	-88	36
	REM_ubv	38	44	32	31	30	14	-17	-16	19	48	47	49	320	131	94	-19	114

Tab. 12: Auswirkung der Bias-Korrektur - Temperatur [°C], relativ zu REM_uba_b, Zeitraum 1971-2000

Einzugsgebiet	Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
Inn	REM_uba_b	-4,7	-3,6	-0,8	4,1	8,2	11,7	13,4	13,2	10,6	6,4	0,6	-3,7	4,6	-4,0	3,8	12,8	5,8
	REM_uba	-0,2	-0,1	1,2	1,0	0,5	0,3	0,7	0,3	0,3	0,1	0,4	0,8	0,5	0,2	0,9	0,5	0,2
Oberer Inn	REM_uba_b	-4,7	-3,6	-0,8	4,1	8,2	11,7	13,4	13,2	10,6	6,4	0,6	-3,7	4,6	-4,0	3,8	12,8	5,8
	REM_uba	-0,2	-0,1	1,2	1,0	0,5	0,3	0,7	0,3	0,3	0,1	0,4	0,8	0,5	0,2	0,9	0,5	0,2
Uterer Inn	REM_uba_b	-2,8	-1,4	2,0	7,3	11,4	14,9	16,5	16,2	13,1	8,4	2,7	-1,8	7,2	-2,0	6,9	15,9	8,1
	REM_uba	0,8	0,7	1,9	1,7	0,8	0,3	0,7	0,3	0,6	0,8	1,1	1,7	1,0	1,1	1,5	0,5	0,8
Salzach	REM_uba_b	-5,5	-4,5	-1,9	2,9	7,0	10,5	12,2	12,1	9,7	5,6	-0,3	-4,7	3,6	-4,9	2,6	11,6	5,0
	REM_uba	-1,3	-1,5	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-0,3	-0,8	-0,8	-1,1	-0,7	-0,3	-0,8	-1,0	-0,5	-0,6	-0,9
Alz	REM_uba_b	-3,3	-2,0	1,1	6,3	10,4	13,9	15,5	15,3	12,4	7,9	2,0	-2,4	6,5	-2,6	5,9	14,9	7,4
	REM_uba	0,5	0,2	1,2	1,2	0,5	0,1	0,5	0,1	0,3	0,4	0,8	1,5	0,6	0,7	1,0	0,2	0,5
Ötztaler Ache	REM_uba_b	-9,7	-9,4	-7,5	-3,2	0,7	4,3	6,3	6,3	4,2	0,9	-4,9	-8,7	-1,7	-9,3	-3,3	5,7	0,1
	REM_uba	-1,5	-0,9	-0,1	0,0	0,4	0,9	1,5	1,1	0,6	-0,7	-0,6	-0,3	0,0	-0,9	0,1	1,2	-0,3

Tab. 13: Auswirkung der Bias-Korrektur -relative Feuchtigkeit [-], relativ zu REM_uba_b, Zeitraum 1971-2000

Einzugsgebiet	Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
Inn	REM_uba_b	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7
	REM_uba	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oberer Inn	REM_uba_b	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	REM_uba	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0
Uterer Inn	REM_uba_b	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
	REM_uba	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0
Salzach	REM_uba_b	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
	REM_uba	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Alz	REM_uba_b	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7
	REM_uba	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ötztaler Ache	REM_uba_b	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
	REM_uba	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0

Die Plausibilität der Ergebnisse wird durch die Biaskorrektur deutlich erhöht. Dies zeigen direkte Vergleiche zwischen den nicht bias-korrigierten REMO UBA Daten (REM_uba) und den bias-korrigierten Daten (REM_uba_b) im vorangegangenen Abschnitt 3.5.2 (Tab. 10).

Zusammenfassung des AdaptAlp Projektpartners LfU: 2. Plausibilität der Klimaprojektionen

Ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen einer Klimaprojektion und einem gegebenen Referenzklima für die Vergangenheit gilt als Nachweis für die Plausibilität des Modelllaufs. In den vorliegenden Untersuchungen besteht eine Besonderheit: Da hauptsächlich statistische und biaskorrigierte dynamische regionale Klimamodelle verwendet wurden, beinhalten die Klimaprojektionen bereits Informationen aus Beobachtungsdaten. Eine gute Übereinstimmung ist daher bei beiden methodischen Ansätzen zu erwarten.

Für das Innggebiet wurden langjährige Jahres- und Monatswerte für Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte und Sonnenscheindauer für den Zeitraum 1971-2000 verglichen. Als Referenz diente der Datensatz „Obs_was“. Die mittleren Jahrestemperaturen der Klimaprojektionen unterscheiden sich erwartungsgemäß nur geringfügig von der Referenz. Die langjährigen mittleren Jahresniederschläge weichen meist um weniger als $\pm 10\%$ von der Referenz (1425 mm) ab. Ausnahmen bilden hierbei der nicht-biaskorrigierte REMO-UBA-Lauf (deutlich feuchter als die Referenz) sowie „GLOWA-Vergangenheit“ (trockener als die Referenz). Bei der relativen Sonnenscheindauer liegen die Abweichungen unter $\pm 10\%$.

Im Jahresgang der Klimavariablen zeigten sich durchaus größere Abweichungen von der Referenz. So sind die Temperaturen im Winter und Frühjahr teilweise deutlich niedriger als im Referenzklima, mit Unterschätzungen von ca. $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Monatliche Niederschlagssummen weichen vereinzelt um mehr als $\pm 10\%$ von der Referenz ab.

Die Extreme von Lufttemperatur und Niederschlag wurden für die Einzugsgebiete der Alz und der Öztaler Ache untersucht. Für Temperaturextreme zeigten sich insbesondere bei den minimalen jährlichen Tagestemperaturen Abweichungen. Viele Klimaprojektionen unterschätzen die Referenzwerte um deutlich mehr als $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, teilweise auch um deutlich mehr als $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Niederschlagsextreme werden durch die Klimaprojektionen in einer breiten Bandbreite sowohl unter- als auch überschätzt.

Die Auswertungen zeigen, dass die Klimaprojektionen langjährige Jahreswerte der Klimavariablen gut wiedergeben. Dies gilt mit kleinen Abstrichen auch für die Monatswerte. Kennwerte für Temperatur- und Niederschlagsextreme werden hingegen nur bedingt wiedergegeben.

Bei der Interpretation der Ergebnisse der Plausibilitätsbetrachtung ist Vorsicht geboten: Aufgrund der Eigenschaften des Referenzdatensatzes sowie der Fokussierung auf statistische und biaskorrigierte dynamische regionale Klimamodelle kann die Plausibilität nicht abschließend belegt werden.

3.7 Klimasignale in Klimaprojektionen

3.7.1 Langjährige Jahres-, Quartals- und Monatsmittelwerte

In den nachfolgenden Tabellen (Tab. 14 und Tab. 15) werden die Differenzen zwischen den langjährigen Mitteln der Lufttemperatur und des Niederschlags für die beiden Zukunftszeiträume z1 und z2 und dem jeweiligen Kontrolllauf im Referenzzeitraum 1971-2000 für das Inneinzugsgebiet dargestellt. Die Zukunftszeiträume sind dabei in der ersten Tabellenspalte durch angehängtes „_z1“ bzw. „_z2“ an das Klimaprojektionskürzel symbolisiert. In der zweiten Tabellenspalte ist die jeweilige Kontrolllauf-Referenz zur eindeutigen Zuordnung nochmals benannt. Insgesamt lässt sich feststellen:

- Lufttemperatur: Bei allen Klimaprojektionen zeigen sich bereits im Zeitraum z1 in den Wintermonaten deutliche bis starke Erhöhungen gegenüber dem Referenzzeitraum. Im Zukunftszeitraum z1 liegen die Erhöhungen im Winter je nach Klimaprojektion in der Regel zwischen +1 bis +2 °C (nur bei WET09_cn etwa ein halbes Grad). Im Zukunftszeitraum z2 sind es in den Wintermonaten zum Teil mehr als +4 °C (REM_uba). Die Sommermonate zeigen demgegenüber fast durchgängig über alle Klimaprojektionen hinweg relativ betrachtet kleinere Anstiege, wenngleich die Absolutzunahmen auch hier in der Regel mindestens ein Grad bezogen auf den Zeitraum z1 und zumeist mehr als zweieinhalb Grad im Zeitraum z2 betragen.
- Niederschlag: Beim Niederschlag weisen die GLOWA- und WETTREG-Projektionen bereits im Zeitraum z1 und alle Projektionen im Zeitraum z2 deutliche bis starke Abnahmen in den Sommermonaten aus. In den Wintermonaten sind die Verhältnisse weniger klar und schwanken zwischen starken Zunahmen (GLO_frt, GLO_rem_z1) und deutlichen Abnahmen (WET10_eh_z2). In den anderen Fällen werden oft keine Unterschiede oberhalb ±10 %-Schwelle ausgewiesen.

Tab. 14: Veränderungen der Lufttemperatur gegenüber Kontrolllauf 1971-2000, Innggebiet, Werte in [°C] (z1: nahe Zukunft 2021-2050, z2: ferne Zukunft 2071-2100)

Klimaprojektion	relativ_zu	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
GLO_frt_z1	GLO_vgh	1,2	1,6	2,3	2,9	2,3	2,4	1,8	1,7	1,8	1,8	2,1	1,1	1,9	1,3	2,5	1,9	1,8
GLO_ipc_z1	GLO_vgh	1,7	1,8	2,1	2,5	1,6	2,0	1,4	1,5	1,3	1,4	2,3	1,6	1,7	1,7	2,1	1,6	1,6
GLO_mm5_z1	GLO_vgh	2,2	1,6	2,0	2,0	2,1	2,5	2,0	1,6	2,1	1,7	2,5	2,2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
GLO_rem_z1	GLO_vgh	2,2	1,8	2,4	2,2	2,3	2,8	2,0	1,7	2,2	1,8	2,3	2,2	2,1	2,1	2,3	2,1	2,0
REM_uba_z1	REM_uba	1,3	2,0	0,7	-0,3	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,3	1,4	1,2	1,1	1,5	0,5	1,0	1,3
REM_uba_b_z1	REM_uba_b	1,3	2,1	0,8	-0,3	0,9	1,1	1,0	1,0	1,0	1,3	1,4	1,3	1,1	1,6	0,5	1,0	1,2
REM_bfg_b_z1	REM_bfg_b	2,2	1,9	1,4	0,8	1,0	0,7	1,2	1,6	1,7	2,1	2,2	1,6	1,5	1,9	1,1	1,2	2,0
REM_ens_b_z1	REM_ens_b	1,0	2,3	1,0	1,1	0,7	0,7	1,1	1,3	0,8	1,1	1,8	0,8	1,1	1,4	0,9	1,0	1,2
CLM_eh_b_z1	CLM_eh_b	1,2	1,7	0,8	-0,2	0,9	1,2	1,0	1,1	1,1	1,4	1,7	1,1	1,1	1,3	0,5	1,1	1,4
CLM_hd_b_z1	CLM_hd_b	2,7	0,9	1,1	1,5	1,8	2,2	2,1	1,6	1,9	1,8	1,9	1,7	1,8	1,8	1,5	2,0	1,8
CLM_eh2_b_z1	CLM_eh2_b	2,1	1,8	1,5	1,4	1,3	0,6	0,9	1,4	1,6	2,0	2,0	1,6	1,5	1,8	1,4	1,0	1,9
WET09_eh_z1	WET09_eh	1,5	1,0	0,5	0,6	0,5	1,2	1,1	0,9	1,3	1,3	1,6	1,2	1,0	1,2	0,5	1,1	1,4
WET09_hd_z1	WET09_hd	0,9	0,8	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,5	2,0	2,1	1,9	1,0	1,4	0,9	1,5	1,3	2,0
WET09_cn_z1	WET09_cn	0,5	0,6	0,8	0,7	0,7	1,0	1,1	1,1	0,3	0,4	1,1	0,2	0,7	0,4	0,7	1,1	0,6
WET10_eh_z1	WET10_eh	1,7	1,5	1,0	0,4	0,6	1,3	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,7	1,3	1,6	0,7	1,4	1,3

Klimaprojektion	relativ_zu	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
REM_uba_z2	REM_uba	5,0	4,7	2,4	2,0	3,2	3,5	3,9	4,8	4,2	4,2	3,9	4,8	3,9	4,8	2,6	4,1	4,1
REM_uba_b_z2	REM_uba_b	5,0	5,0	2,7	1,9	2,9	3,5	3,9	4,3	3,8	4,0	3,9	5,3	3,8	5,1	2,5	3,9	3,9
REM_bfg_b_z2	REM_bfg_b	4,6	4,0	4,1	3,5	3,2	3,7	4,2	4,2	3,7	4,3	4,5	4,4	4,0	4,3	3,6	4,0	4,2
REM_ens_b_z2	REM_ens_b	3,7	4,0	3,0	2,7	2,5	3,3	3,8	3,8	2,9	2,9	3,8	4,0	3,4	3,9	2,7	3,7	3,2
CLM_eh_b_z2	CLM_eh_b	4,9	4,4	2,8	2,0	3,1	3,6	3,9	3,9	3,5	3,8	3,7	4,7	3,7	4,7	2,6	3,8	3,6
CLM_hd_b_z2	CLM_hd_b	3,6	2,7	3,6	2,9	3,1	3,4	3,2	3,5	3,6	3,6	4,2	3,5	3,4	3,3	3,2	3,4	3,8
CLM_eh2_b_z2	CLM_eh2_b	4,3	3,3	4,2	4,0	3,4	3,5	4,1	4,1	3,5	4,3	4,5	4,0	3,9	3,9	3,9	3,9	4,1
WET09_eh_z2	WET09_eh	2,9	2,8	1,6	1,8	1,7	2,6	2,5	2,3	3,0	2,9	3,0	2,8	2,5	2,8	1,7	2,5	3,0
WET09_hd_z2	WET09_hd	2,0	2,3	2,5	2,3	2,5	2,1	2,4	2,2	3,5	3,0	3,4	2,0	2,5	2,1	2,4	2,2	3,3
WET09_cn_z2	WET09_cn	1,2	1,3	1,6	1,5	1,4	2,0	2,3	2,1	1,3	1,4	1,5	1,2	1,6	1,3	1,5	2,1	1,4
WET10_eh_z2	WET10_eh	3,8	3,7	2,5	2,1	2,0	3,0	3,6	3,7	3,4	3,2	3,3	3,8	3,2	3,8	2,2	3,4	3,3

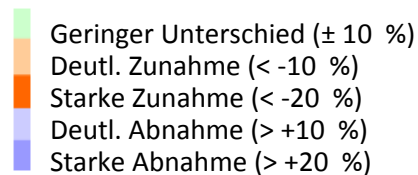
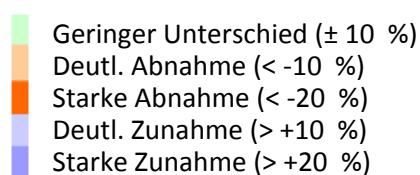
Tab. 15: Veränderungen des Niederschlags gegenüber Kontrolllauf 1971-2000, Innggebiet, Werte in [mm] (z1: nahe Zukunft 2021-2050, z2: ferne Zukunft 2071-2100)

Klimaprojektion	relativ_zu	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
GLO_frt_z1	GLO_vgh	18	20	-14	-17	4	-21	-29	-32	-16	8	14	8	-49	49	-26	-82	9
GLO_ipc_z1	GLO_vgh	5	21	2	13	18	-10	-32	-22	6	23	4	6	39	35	33	-65	36
GLO_mm5_z1	GLO_vgh	12	12	10	11	26	-19	-45	-23	4	31	12	8	43	34	47	-88	50
GLO_rem_z1	GLO_vgh	19	12	-6	4	12	-20	-49	-31	0	8	-2	20	-27	55	10	-100	9
REM_uba_z1	REM_uba	1	34	28	20	-8	-7	12	-1	7	27	18	-26	105	9	39	4	52
REM_ubv_z1	REM_ubv	-3	25	27	20	-11	-5	14	-2	6	18	13	-12	91	10	36	7	38
REM_uba_b_z1	REM_uba_b	1	27	27	19	-9	-5	15	-1	7	24	15	-13	106	15	37	10	45
REM_bfg_b_z1	REM_bfg_b	-8	7	16	11	3	21	10	-8	2	-8	10	24	79	22	31	22	4
REM_ens_b_z1	REM_ens_b	-13	-3	-15	0	13	6	-11	-14	27	17	-22	22	5	6	-2	-20	21
CLM_eh_b_z1	CLM_eh_b	0	12	26	23	-1	-20	-1	-8	-4	16	11	-22	32	-10	47	-28	23
CLM_hd_b_z1	CLM_hd_b	8	19	-2	0	9	-1	-20	-13	8	13	-1	10	31	37	7	-34	20
CLM_eh2_b_z1	CLM_eh2_b	-11	9	3	8	3	24	-11	-13	-4	-16	6	24	23	22	14	0	-14
WET09_eh_z1	WET09_eh	4	0	-2	0	-3	-26	-20	-19	-12	-10	-11	-5	-105	-1	-6	-65	-33
WET09_hd_z1	WET09_hd	-3	-4	-2	-3	-5	-32	-35	-36	-21	-16	-12	3	-167	-5	-10	-103	-49
WET09_cn_z1	WET09_cn	-6	-4	-8	-5	-7	-33	-23	-43	-8	-9	-9	-5	-159	-14	-20	-99	-26
WET10_eh_z1	WET10_eh	-6	-9	-2	6	-1	-26	-28	-26	-6	0	1	-5	-100	-19	4	-80	-4

Klimaprojektion	relativ zu	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
REM_uba_z2	REM_uba	11	15	26	27	-18	-29	-31	-32	-22	5	-1	-5	-55	20	35	-92	-17
REM_ubv_z2	REM_ubv	3	9	26	27	-20	-29	-32	-32	-20	0	0	-1	-69	12	33	-93	-20
REM_uba_b_z2	REM_uba_b	10	13	25	26	-17	-27	-33	-40	-19	7	3	3	-50	26	35	-101	-10
REM_bfg_b_z2	REM_bfg_b	-11	11	8	11	-9	-21	-26	-12	7	-18	6	22	-33	22	9	-59	-5
REM_ens_b_z2	REM_ens_b	21	4	6	15	10	-14	-30	-28	14	20	10	14	43	39	31	-71	44
CLM_eh_b_z2	CLM_eh_b	4	11	28	53	-8	-32	-44	-53	-12	-1	5	-4	-52	11	73	-128	-8
CLM_hd_b_z2	CLM_hd_b	11	6	-2	0	30	-32	-31	-38	-6	-10	5	-4	-71	12	28	-100	-11
CLM_eh2_b_z2	CLM_eh2_b	-16	7	3	22	4	-23	-43	-27	-12	-11	7	25	-63	16	29	-93	-16
WET09_eh_z2	WET09_eh	-3	-4	-7	-5	-6	-46	-38	-41	-17	-17	-14	-6	-205	-13	-18	-125	-48
WET09_hd_z2	WET09_hd	-5	-2	-10	-9	-12	-55	-51	-49	-26	-17	-18	-3	-257	-10	-30	-155	-61
WET09_cn_z2	WET09_cn	-4	-8	-9	-12	-8	-41	-41	-53	-12	-12	-12	-7	-217	-19	-29	-134	-35
WET10_eh_z2	WET10_eh	-13	-11	-7	-7	-7	-36	-48	-52	-13	-11	-12	-18	-233	-41	-21	-135	-35

Bei P

Bei T



Für die Größen Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte und relative Sonnenscheindauer wird auf eine Darstellung in Tabellenform verzichtet. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Windgeschwindigkeit: Im Zeitraum z1 bleiben die Änderungen bei allen Projektionen, für die Daten vorliegen, unterhalb der $\pm 10 \%$ -Schwelle. Im Zeitraum z2 liefern die REMO-Ensembles-Projektion sowie CLM_eh und CLM_hd vereinzelt deutliche Abnahmen. Ansonsten werden auch bezogen auf die ferne Zukunft keine klaren Veränderungsmuster erkennbar.
- Relative Luftfeuchte: Auch bezogen auf die relative Luftfeuchte zeigen sich keine klaren Veränderungsmuster. So werden im Zeitraum z1 keinerlei deutliche Veränderungen ausgewiesen und im Zeitraum z2 sind es nur vereinzelte Monate bei einigen REMO-Projektionen und WETTREG2010.
- Relative Sonnenscheindauer: Deutliche Zunahmen zeigen sich hier im Wesentlichen in den Sommer- und Herbst-Quartalen der vier WETTREG-Projektionen im Zeitraum z1. In der fernen Zukunft erhöhen sich diese teilweise auf starke Zunahmen. Bei den dynamischen Projektionen sind teilweise deutliche Abnahmen in den Wintermonaten festzustellen.

3.7.2 Gleitende Mittelwerte über den Gesamtzeitraum

Betrachtet man die Veränderung der Klimavariablen im Innggebiet über den Zeitraum von 1971-2100 hinweg in Form von 30-jährigen gleitenden Mitteln der Halbjahreswerte relativ zum Mittelwert der Periode 1971-2000, dann ergeben sich bezogen auf die Variablen Lufttemperatur und Niederschlag die in Abb. 30 bis Abb. 32 dargestellten Verläufe.

Man erkennt:

- Die Lufttemperatur zeigt in beiden Halbjahren Anstiege bei allen Klimaprojektionen.
- Eindeutige Veränderungen über alle Projektionen hinweg erkennt man auch bei den Niederschlägen im Sommerhalbjahr (Abnahmen).
- Bei den Winterniederschlägen zeigt die überwiegende Zahl der Projektionen Zunahmen. Ausnahmen bilden speziell die WETTREG-Projektionen, die Abnahmen erkennen lassen.
- Auffallend ist bei den Niederschlägen der REMO ENSEMBLES Lauf im Winter, der zunächst Abnahmen, und dann Zunahmen modelliert. Denkbar ist hier eine starke Prägung durch das zugrunde liegende Globalmodell (ECHAM5 Lauf 3). Keine andere betrachtete Projektion verwendet diesen globalen Antrieb.
- Bei der Sonnenscheindauer zeigen die WETTREG-Projektionen sowohl im Sommer als auch im Winter die stärksten Zunahmen. Im Winterhalbjahr zeigen die anderen Projektionen demgegenüber sogar Abnahmen.

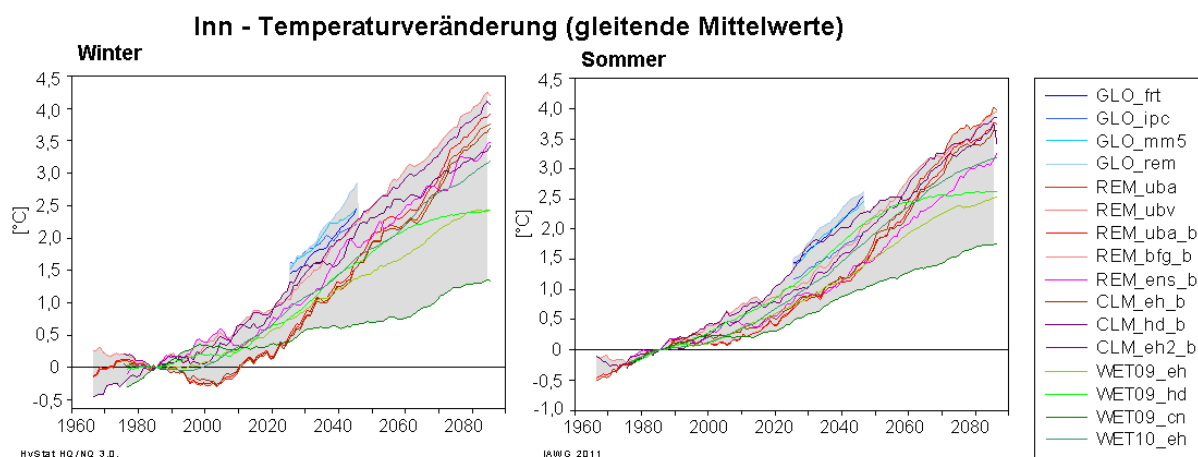


Abb. 30: Veränderung der Lufttemperatur im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr, 30-jähriges gleitendes Mittel, relativ zum Mittelwert 1971-2000, Inngbiet

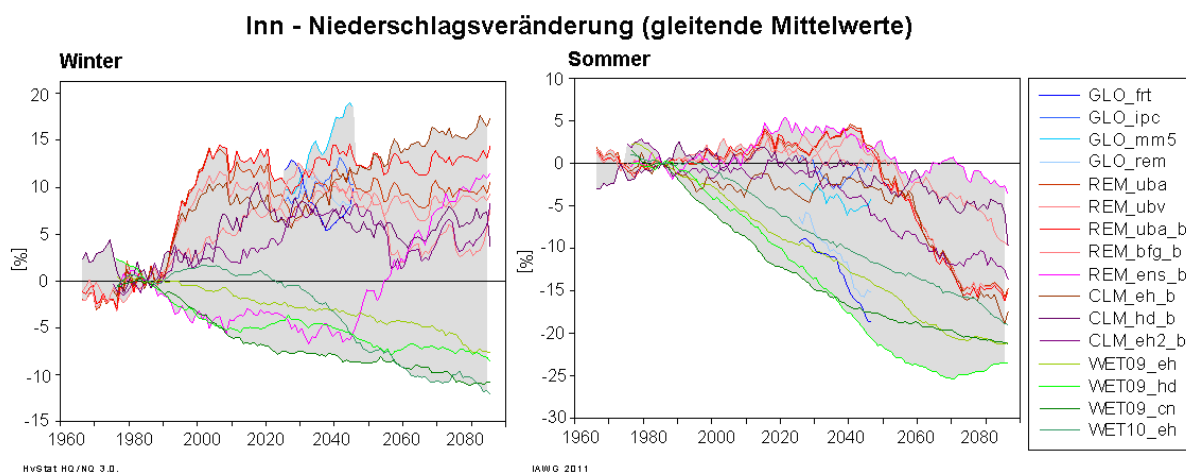


Abb. 31: Veränderung des Niederschlags im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr, 30-jähriges gleitendes Mittel, relativ zum Mittelwert 1971-2000, Inngbiet

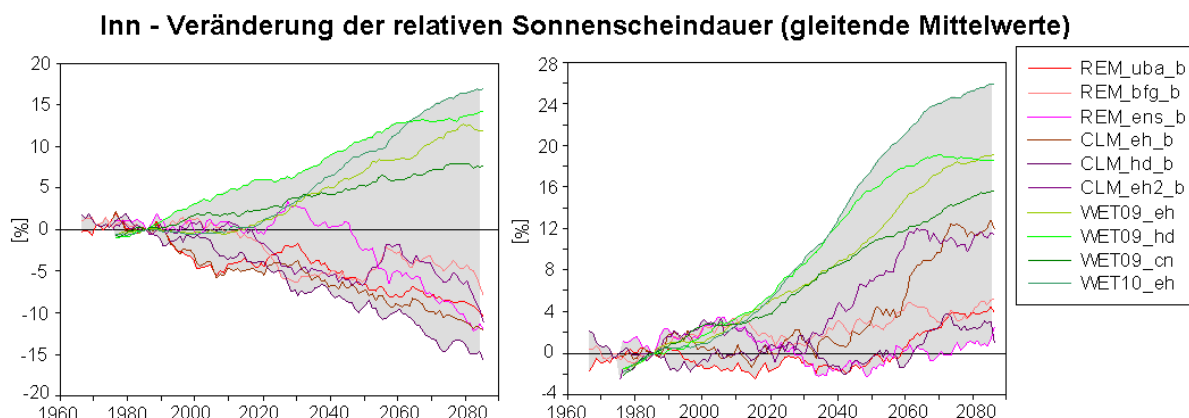


Abb. 32: Veränderung der Sonnenscheindauer im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr, 30-jähriges gleitendes Mittel, relativ zum Mittelwert 1971-2000, Inngebiet

3.7.3 Weitere Kennwerte in den Gebieten Alz und Ötztaler Ache

Ähnlich wie bei den Plausibilitätsbetrachtungen (Abschnitt 3.5.3) werden auch für das Klimasignal weitere Kennwerte im Gebiet der Alz und der Ötztaler Ache betrachtet. Wegen ihrer hohen Relevanz für Abflussprozesse werden insbesondere Niederschlagskennwerte betrachtet. Die für die Gebiete Alz und Ötztaler Ache quartalsweise ermittelten relativen Änderungen der Niederschlagskennwerte „Tagesmittelwerte“, „Niederschlagstage>1mm“, „Niederschlagstage>10mm“, „Niederschlagstage>20mm“ und „3-Tages-Maximum“ werden in Abb. 33 an den Beispielen der Quartale DJF und JJA für die nahe Zukunft im Alzgebiet, dargestellt.

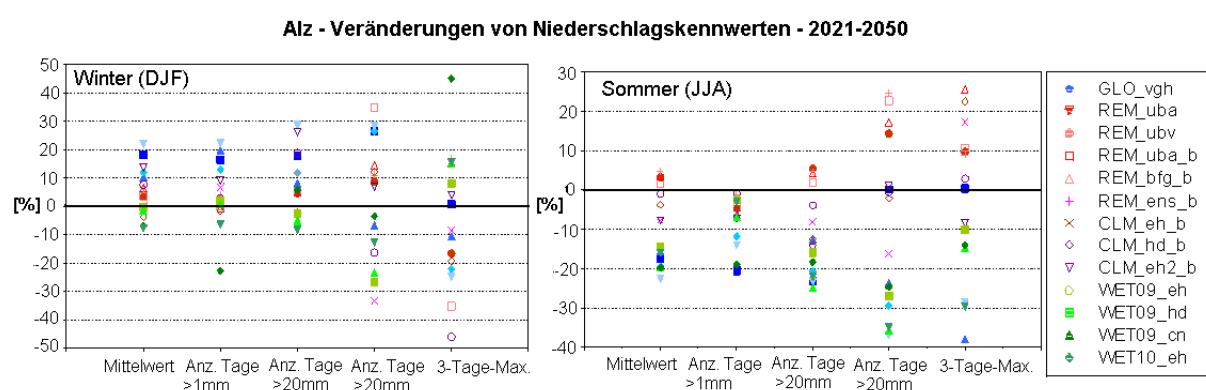


Abb. 33: Niederschlagskennwerte im Zeitraum 2021-2050, relativ zu Referenzzeitraum 1971-2000, Quartal DJF, Quartal JJA, Alzgebiet

Man erkennt:

- Die relativen Veränderungen liegen in der Regel bezogen auf „Tagesmittelwerte“ und „Niederschlagstage>1mm“ hinsichtlich des Änderungsbetrages bei bis zu $\pm 20\%$ und bei „Niederschlagstage>10mm“ bei bis zu $\pm 30\%$, wobei je nach Klimaprojektion sowohl Zunahmen als auch Abnahmen auftreten. Die Ergebnisse für „Niederschlagstage>20mm“ sowie das 3-Tages-Maximum spannen eine sehr große Bandbreite von Zunahmen bis ca. $+30\%$ und Abnahmen bis ca. -40% auf.
- Betrachtet man die Ergebnisse über die vier Quartale hinweg, lassen sich keine allgemeinen Aussagen darüber treffen, ob bestimmte Projektionen tendenziell Verschiebungen in bestimmte Richtungen liefern. Vielmehr wechseln gerade bei Projektionen mit betragsmäßig größeren Veränderungen die Vorzeichen des Betrages von einem Quartal zum nächsten (z.B. GLO_frt_z1 in Quartalen DJF und MAM im Alzgebiet). Relativ stabil sind die Veränderungsmuster bei den REMO-Projektionen, die häufig Zunahmen der Kennwerte über alle vier Quartale und beide betrachteten Gebiete hinweg anzeigen.

3.8 Auswahl der Klimaprojektionen für die Wasserhaushaltsmodellierung

Für die weiteren Untersuchungen, die die Wasserhaushaltssimulationen betreffen (siehe Abschnitt 4), wird eine Auswahl an Klimaprojektionen getroffen. Diese Auswahl geschieht auf Basis der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Plausibilität und der Analyse der Klimasignale, aber auch mit Blick darauf, möglichst methodisch verschiedene regionale Klimamodelle zu berücksichtigen. Bei der Auswahl wurde dementsprechend darauf geachtet, dass einerseits die Bandbreite der möglichen Veränderungen abgedeckt war und andererseits nur Klimamodelle weiterverwendet wurden, die die klimatischen Bedingungen der Vergangenheit im Untersuchungsgebiet gut abbilden konnten. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl der Klimamodellläufe für die Wasserhaushaltsmodellierung war die Vergleichbarkeit mit anderen ähnlichen gelagerten Vorhaben wie KLIWA, GLOWA-Danube und Rheinblick 2050. Es wurde folgende Auswahl getroffen (siehe auch Abschnitt 3.1):

- 2 WETTREG-Läufe : Wet09_hd, WET10_eh,
- 2 "Glowa-Danube-Szenarien": GLO_rem, GLO_frt
- 6 biaskorrigierte RCM-Läufe: REM_uba_b, REM_bfg_b, REM_ens_b,
CLM_eh_b, CLM_hd_b, CLM_eh2_b.

Zusammenfassung des AdaptAlp Projektpartners LfU: 3. Klimasignale in den Klimaprojektionen

Klimasignale ergeben sich aus dem Vergleich mittlerer Klimagrößen für klimatisch relevante Zeiträume (mindesten 30 Jahre). Die vorliegenden Klimaprojektionen liegen überwiegend für den Zeitraum 1951-2100 vor. Das Klimasignal wurde durch den Vergleich des simulierten Klimas für den Zeitraum 1971-2000 mit zwei Zukunftszeiträumen ermittelt, die „nahe Zukunft“ 2021-2050 und die „ferne Zukunft“ 2071-2100.

Analysiert wurden unter anderem Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag für das Innggebiet und Kennwerte für extreme Niederschläge für das Einzugsgebiet der Alz.

Alle Klimaprojektionen zeigen für das Innggebiet Temperaturzunahmen zwischen +0,7 °C und +2 °C in der nahen Zukunft und zwischen +1,6 °C und +4 °C in der fernen Zukunft. Die Zunahmen fallen im Sommer geringer aus als im Winter. Für den Zeitraum ihrer Verfügbarkeit weisen die GLOWA-Projektionen die höchsten Temperaturanstiege auf.

Die Projektionen für die zukünftige Entwicklung des Niederschlags sind uneinheitlich. Insbesondere für die nahe Zukunft liegen die Projektionen weit auseinander: Die WETTREG-Projektionen gehen für Sommermonate von Abnahmen von 10 bis 20 % aus. Andere Projektionen zeigen im Sommer kaum Veränderungen, rechnen jedoch mit Zunahmen der Winterniederschläge um 10 bis 20 %. In der fernen Zukunft gehen alle Projektionen von abnehmenden Sommerniederschlägen aus.

Die Niederschlagskennwerte für das Einzugsgebiet der Alz zeigen für die nahe Zukunft im Winter tendenziell Zunahmen und im Sommer Abnahmen bei den moderaten Größen (z.B. Anzahl der Niederschlagstage > 1 mm). Die Ergebnisse für die Kennwerte extremer Niederschläge (z.B. Anzahl der Niederschlagstage > 20 mm) spannen eine sehr große Bandbreite zwischen + 30% und -40% auf.

Die projizierten Temperaturzunahmen im Innggebiet werden als vergleichsweise belastbare Ergebnisse bewertet, da die verschiedenen Klimaprojektionen in der Tendenz miteinander übereinstimmen. Veränderungen des Niederschlags werden als weniger sicher eingestuft, da die Projektionen eine deutlich größere Spannbreite aufweisen. Auch Veränderungen bei extremen Niederschlagsereignissen müssen in diesem Sinne als unsicher bewertet werden. Die WETTREG-Projektionen sind für das Inneinzugsgebiet als „trockene“ Szenarien zu bewerten.

4 Wasserhaushaltssimulationen

4.1 Durchführung der Vergleiche

Die nachfolgend dargestellten Wasserhaushaltssimulationen mit der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Auswahl an Klimaprojektionen als Eingangsdaten basieren auf der Anwendung des Programms WaSiM ETH, Version 8.06.02. Es handelt sich um ein rasterbasiertes Wasserhaushaltsmodell mit physikalisch basierter Beschreibung der hydrologischen Prozesse, wie Verdunstung, Infiltration und Abflussbildung (Modellbeschreibung siehe z.B. Schulla, 1997; Schulla et al., 1998).

Für die Untersuchungen stand das Modell in kalibrierter Form für die Gebiete Salzach, Oberer Inn und Unterer Inn in Tagesschrittweite aus vorherigen Arbeiten im Projekt AdaptAlp (vgl. Pöhler et al., 2011, Technical Report AdaptAlp) am LfU zur Verfügung. Es handelt sich dabei um die erweiterte WaSiM-Version, bei der der konzeptionelle Topmodel-Ansatz durch den prozessorientierten Richards-Ansatz ersetzt wird, so dass der Wassertransport im Boden auf Grundlage von Potenzialgradienten und detaillierten bodenphysikalischen Eigenschaften (pF-Kurve, k(u)-Funktion) berechnet werden. Details zu Kalibrierung und die im Rahmen der Kalibrierung und Validierung erzielten Ergebnisse und Gütemaße sind in Pöhler et al. (2011, Technical Report AdaptAlp) dargestellt. Die im Rahmen einer Langzeitsimulation über den Zeitraum 1971 bis 2000 mit Obs_WAS ermittelten Nash-Sutcliffe-Koeffizienten unterscheiden sich nur leicht von den in der Kalibrierung und Validierung erzielten Ergebnissen. Dies wird als Hinweis auf eine zufriedenstellende Güte der Simulation interpretiert. Auf eine Darstellung der erzielten Gütewerte wird hier verzichtet.

Da die im vorliegenden Wasserhaushaltsmodell enthaltenen Gletscherabflüsse implementierungsbedingt nicht versiegen können, ist bei Simulationen bis zum Jahr 2100 mit nichtplausiblen Ergebnissen in Bezug auf die Alpengletscher zu rechnen. Laut Weber et al. (2009) ist davon auszugehen, dass die im Inngebiet vorhandene Eisreserve bis zum Jahr 2060 nahezu vollständig aufgebraucht ist. Um diesen Aspekt in einfacher Form zu berücksichtigen, werden die Simulationsläufe hier prinzipiell zum Ende des Jahres 2060 gestoppt und die weiteren Jahre mit aus dem Vorjahr übernommenen Anfangsbedingungen, aber abgeschaltetem Gletschermodul, weiter gerechnet.

Wie bereits für die meteorologischen Kenngrößen erfolgt auch bezogen auf die Ausgabegrößen des Wasserhaushaltsmodells zunächst eine Plausibilisierung der Klimaprojektionen, also der Vergleich zwischen modellierten und erwarteten (mit dem Referenzdatensatz modellierten) Ausgabegrößen für den Plausibilisierungszeitraum 1971 bis 2000. Im Anschluss werden die Auswertungen zur Veränderung der Wasserhaushaltsgrößen dargestellt. Als Referenz dient dafür der Obs_was5-Datensatz im Zeitraum 1971-2000. Die Werte resultieren bzgl. des Niederschlags aus der WaSiM-spezifischen

Niederschlagsregionalisierung und sind im Falle von realer Verdunstung und Abfluss Modellausgabegrößen bei Belastung mit dem Obs_was5-Klimadatensatz. Zusätzlich zu den Klimaprojektionen werden auch die nicht aggregierten Obs_was-Daten in den Vergleich mit einbezogen. Der Vergleich zeigt, dass die Verwendung der auf das 5*5 km Raster aggregierten Obs_was5 Daten statt der höher aufgelösten Obs_was Daten für die Auswertungen zulässig ist.

Die Auswertungen erfolgten für die drei Auslasspegel der Teileinzugsgebiete Oberer Inn (Pegel Oberaudorf), Salzach (Pegel Golling) und Unterer Inn (Pegel Passau-Ingling), sowie für weitere in Abb. 3 dargestellte Pegel. In den folgenden Ausführungen wird jedoch größtenteils auf die drei genannten Pegel eingegangen.

Ebenso wie in Abschnitt 3 werden auch in diesem Abschnitt eingefärbte Tabellen zur besseren Übersicht der aggregierten Ergebnisse verwendet. Wiederum ergibt sich folgender Aufbau: die erste Zeile liefert die absoluten Werte, die darunter folgenden Wertezeilen zeigen die Differenzen zur ersten Zeile an und visualisieren dabei anhand von Farbstufen die prozentualen Abweichung von der Referenz. Dabei wird $\pm 10\%$ als „deutliche“ $\pm 20\%$ als „starke“ Abweichung interpretiert. Beim Abfluss werden hierbei Überschätzungen bzw. Zunahmen durch Blautöne und Unterschätzungen bzw. Abnahmen durch Rottöne gekennzeichnet.

o Farblegende für monatliche Abflusswerte:

	Geringer Unterschied zu Obs_was5 ($\pm 10\%$)
	Deutl. Unterschätzung zu Obs_was5 ($< -10\%$)
	Starke Unterschätzung zu Obs_was5 ($< -20\%$)
	Deutl. Überschätzung zu Obs_was5 ($> +10\%$)
	Starke Überschätzung zu Obs_was5 ($> +20\%$)

4.2 Ergebnisse der Plausibilitätsbetrachtungen

4.2.1 Wasserbilanz und langjährige Mittelwerte der Wasserbilanzglieder

Die langjährigen Jahresmittel der drei Wasserbilanzglieder Niederschlag P, Verdunstung V und Abfluss Q bezogen auf den Zeitraum 1971 bis 2000 zeigt Tab. 16. In der jeweils letzten Spalte der Teilgebiete von Tab. 16 ist die Differenz $DIF = P - V - Q$ ausgewiesen. Wie zu erkennen, sind die Berechnungen weder für das Gesamtgebiet noch für die Teilgebiete vollständig bilanzrein. Vielmehr ist zumindest in den größeren Teilgebieten die langjährige Summe aus Abfluss und Verdunstung meist größer als der langjährige Niederschlag, wobei die Überschreitungen in der Regel unter $+5\%$ liegen (im Salzach-Gebiet unter 10%). Der Hauptgrund dafür ist möglicherweise das Abschmelzen von Gletschern. Dies erklärt auch, warum die größeren Differenzen in den Gebieten Oberer Inn und Salzach auftreten, während im Alzgebiet nur geringfügige Abweichungen von Null auftreten. Grob setzen sich

die Anteile am Niederschlag zu einem Drittel aus Verdunstung und zu zwei Dritteln aus Abfluss zusammen.

Tab. 16: Langjährige Jahressummen der Wasserbilanzglieder in [mm] , Zeitraum 1971-2000

Klimaprojektion	Inn				Oberer Inn				Unterer Inn				Salzach				Alz				Öztaler Ache			
	P	V	Q	WB	P	V	Q	WB	P	V	Q	WB	P	V	Q	WB	P	V	Q	WB	P	V	Q	WB
Obs_was5	1435	516	956	-36.3	1477	466	1096	-85.6	1323	557			1751	497	1401	-147	1492	554	947	-8.50	1510	371	1175	-36.6
Obs_was	1425	515	930	-19.9	1480	463	1061	-44.1	1299	556			1752	498	1356	-102	1493	554	948	-7.83	1521	372	1021	1.29
GLO_vgh	1245	254	1033	-41.8	1196	225	1062	-90.9	1236	279			1414	236	1296	-118	1473	303	1179	-8.95	1068	159	996	-86.4
REM_uba_b	1464	548	949	-32.5	1504	487	1084	-66.9	1352	588			1785	560	1384	-158	1532	600	939	-6.58	1549	347	1092	1.10
REM_bfg_b	1451	554	932	-34.4	1496	491	1075	-69.9	1335	595			1769	567	1361	-159	1518	611	914	-7.79	1531	346	1091	94.3
REM_ens_b	1444	521	955	-33.1	1479	454	1093	-66.9	1334	570			1764	523	1399	-158	1517	581	946	-9.65	1514	310	1093	1.11
CLM_eh_b	1453	488	998	-32.8	1500	427	1142	-69.1	1339	530			1762	496	1427	-161	1522	527	1003	-7.72	1532	292	1132	1.07
CLM_hd_b	1446	465	1016	-35.4	1485	402	1155	-72.7	1339	505			1745	484	1424	-162	1512	507	1015	-10.4	1513	261	1151	1.01
CLM_eh2_b	1433	494	972	-33.0	1482	432	1121	-70.6	1320	536			1733	501	1388	-157	1496	533	970	-6.63	1511	296	1126	89.3
WET09_hd	1446	536	946	-35.5	1489	476	1089	-76.3	1321	584			1806	513	1419	-125	1524	576	957	-8.85	1498	375	1128	-5.14
WET10_eh	1431	534	926	-29.1	1450	474	1042	-65.2	1320	582			1804	515	1404	-115	1528	577	959	-8.73	1439	373	1028	37.5

Die Abb. 34, Abb. 35 und Abb. 36 zeigen die Ergebnisse für die Jahreswerte der Wasserhaushaltsgrößen. In der Langfassung des vorliegenden Berichts (Willems & Stricker, 2011) werden auch monatliche und saisonale Verteilungen aufgeführt, diese Ergebnisse sind hier nicht abgebildet, fließen aber in die Auswertungen mit ein. Folgende Unterschiede zur Referenz Obs_was5 können bei den Klimaprojektionen festgestellt werden:

- Niederschlag: Bezogen auf das Gesamtgebiet und die größeren Teilgebiete treten in der Regel nur vereinzelt größere Abweichungen im Jahresverlauf auf. Dies gilt für alle betrachteten Projektionen mit Ausnahme von GLO_vgh, die im Gesamtgebiet, sowie den Teilgebieten Oberen Inn, Salzach und Öztaler Ache über alle Monate des Jahres deutliche bis starke Unterschätzungen ausweist.
- Verdunstung: Die biaskorrigierten REMO-Projektionen führen in den Herbstmonaten zu deutlichen bis starken Überschätzungen der Verdunstung. Dies gilt für das Gesamtgebiet ebenso wie für die betrachteten Teilgebiete und schlägt sich auch in den Jahreswerten nieder. Bei GLO_vgh wird die Verdunstung im Vergleich zu

Obs_was5 in allen Monaten des Jahres deutlich bis stark unterschätzt. Im Gesamtgebiet des Inn liefern CLM_eh_b und CLM_eh2_b in den Wintermonaten starke Unterschätzungen der Verdunstung, bei CLM_hd_b treten deutliche Unterschätzungen in Sommer- und Wintermonaten auf. Die WETTREG-Projektionen liefern im Wesentlichen durchweg geringe Abweichungen zur Referenz.

- Insgesamt zeigt sich: Bei den REMO-Projektionen sind die langjährigen Niederschlags- und zumeist auch Verdunstungsmittelwerte in der Regel größer als diejenigen nach Obs_was5, während bei den anderen Projektionen speziell bei der Verdunstung tendenziell oft Unterschätzungen auftreten.
- Abfluss: Bezogen auf das Gesamtgebiet treten hinsichtlich des mittleren Jahresabflusses nur geringe Abweichungen bei allen betrachteten Klimaprojektionen auf. Bezogen auf die größeren Teilgebiete zeigen sich eher in Ausnahmefällen Über- und Unterschätzungen. Anders ist dies in den kleineren Gebieten Öztaler Ache und Alz. Im Alzgebiet liefern über das gesamte Jahr betrachtet allein die beiden WETTREG-Projektionen WET09_hd und WET10_eh zufriedenstellende Abbildungen der Referenz. Bei den dynamischen Klimaprojektionen liegen demgegenüber im Alzgebiet starke Überschätzungen im Sommer und zum Teil starke Unterschätzungen im Winter vor. Im Gebiet Öztaler Ache liegen die Verhältnisse anders: Hier liefert insbesondere WET10_eh deutliche bis starke Unterschätzungen in fast allen Monaten des Jahres. Bei den anderen Projektionen zeigen sich im Gebiet Öztaler Ache nicht selten Unterschätzungen in der zweiten Jahreshälfte und – bezogen auf GLO_vgh – starke Überschätzungen von Januar bis März.
- Obs_was5 vs. Obs_was: In der Regel sind die Abweichungen zwischen den beiden Datensätzen bezogen auf Niederschlag, Verdunstung und Abfluss gering. Davon ausgenommen sind im Wesentlichen nur Abflüsse im Gebiet Öztaler Ache. Dort führen die Obs_was-Daten zu klar niedrigeren Werten als die Obs_was5-Daten.

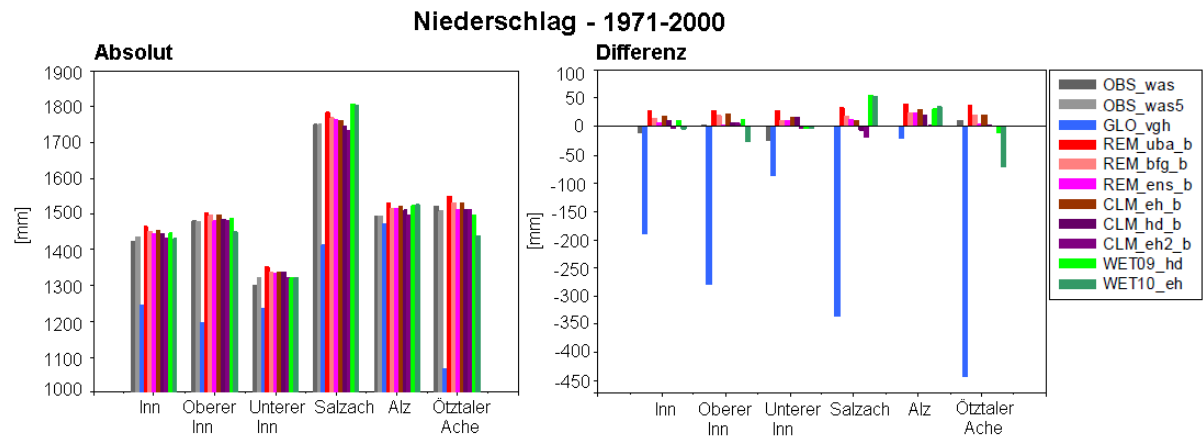


Abb. 34: Niederschlag im Zeitraum 1971-2000; links: Absolutwerte; rechts: Differenzen zur Referenz obs_was5

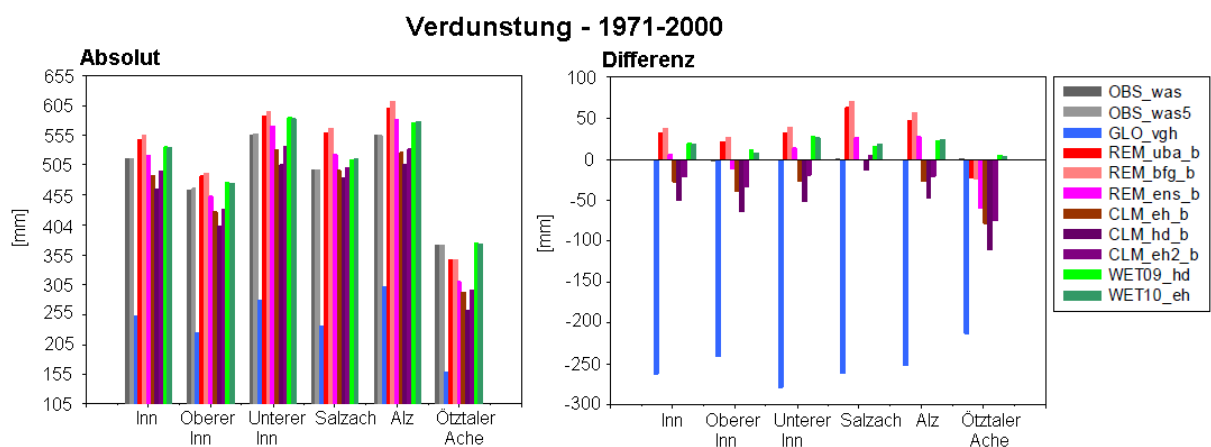


Abb. 35: Verdunstung im Zeitraum 1971-2000; links: Absolutwerte; rechts: Differenzen zur Referenz obs_was5

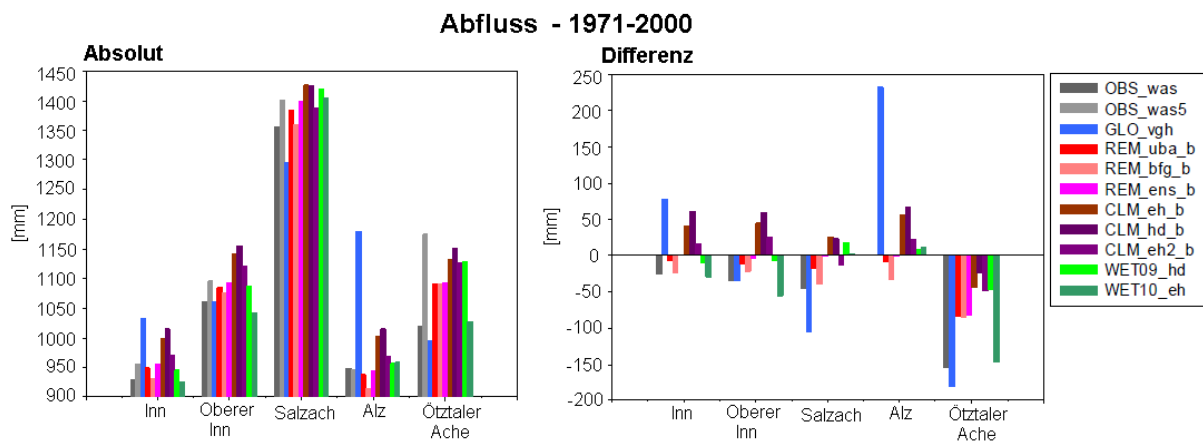


Abb. 36: Abfluss im Zeitraum 1971-2000; links: Absolutwerte; rechts: Differenzen zur Referenz obs_was5

4.2.2 Abfluss aus Schneespeichern und Gletschern

Vergleicht man den mittels Obs_was5 modellierten Abfluss aus Schneespeichern und Gletschern mit den Ergebnissen der Klimaprojektionen, dann wird folgendes deutlich:

- Bezüglich der Abflüsse aus Schneespeichern ergeben sich bereits bezogen auf das

Gesamtgebiet des Inn zum Teil starke Unterschiede zur Referenz. Dabei erkennt man starke Überschätzungen ebenso wie starke Unterschätzungen. Im August treten dabei starke Überschätzungen des Referenzwertes bei allen betrachteten Klimaprojektionen auf. Dies gilt – anders als bei den Kennwerten zu den Wasserbilanzgrößen (s. Abschnitt 4.2.1) – auch für den Vergleich zwischen Obs_was5 und Obs_was. Dies zeigt, dass der modellierte Schneeabfluss hier offensichtlich eine sehr sensitive Größe ist, die auch bei kleineren Änderungen der Eingangsdaten bereits merklich verändert wird.

- Über alle Projektionen und Gebiete gesehen muss konstatiert werden, dass die Plausibilitätsbetrachtungen zur Nachbildung des Schneeschmelzabflusses nicht zufriedenstellend sind.
- Bei den Gletscherabflüssen sind die absoluten Unterschiede zur Referenz im Gebiet Oberer Inn in der Regel unter $\pm 20\%$. Im Gebiet Salzach sind bezogen auf GLO_vgh und die WETTREG-Projektionen starke Unterschätzungen in den Sommermonaten zu konstatieren. Unterschiede zwischen Obs_was5 und Obs_was sind auch bei den Gletscherabflüssen erheblich, wobei Obs_was in den Sommermonaten zu deutlich bis stark niedrigeren Gletscherabflusswerten führt.

Der Einfluss der Gletscherschmelze betrifft vor allem die Kopfeinzugsgebiete des Inngebiets. Aussagen zu Veränderungen von Wasserhaushalt und Abflüssen in diesen hoch gelegenen Teileinzugsgebieten sind aufgrund der hohen Abweichungen der Klimaprojektionen zur Referenz mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet, als in den größeren Teilgebieten Oberer Inn, Salzach und Unterer Inn, bzw. für das Gesamtgebiet. Die Schneeschmelzabflüsse haben zwar auch im Gesamtgebiet einen großen Einfluss auf das Abflussregime – insbesondere auf die frühjährlichen Abflüsse –, jedoch haben die Bilanzbetrachtungen (Abschnitt 4.2.1) zufriedenstellende Ergebnisse geliefert. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Defizite in der Modellierung der Schnee- und Gletscherabflüsse durch andere Abflusskomponenten aufgewogen werden. Auf eine Darstellung von Klimasignalen bei den Schnee- und Gletscherabflüssen wird jedoch aufgrund der Unsicherheiten der Modellierung im Folgenden verzichtet.

4.2.3 Monatliche Abflusskennwerte: MoMQ, MoMNQ, MoMHQ

Die Betrachtungen zu den langjährigen monatlichen Abflusswerten mittlerer monatlicher Abfluss (MoMQ), mittlerer monatlicher Niedrigwasserabfluss (MoMNQ) und mittlerer monatlicher Hochwasserabfluss (MoMHQ) erfolgen pegelbezogen (für die Pegel siehe Abschnitt 1.3, Abb. 3). Die Abb. 37 bis Abb. 39 zeigen die modellierten Abflusskennwerte in m^3/s an drei ausgewählten Pegeln: dem Pegel Golling an der Salzach, dem Pegel Oberaudorf am Oberlauf des Inn und den Pegel Passau-Ingling als Auslasspegel des

Gesamteinzugsgebietes des Inn. Am Beispiel des Pegels Passau-Ingling / Inn erfolgt in der Abb. 40 die grafische Darstellung der Abweichungen zur jeweiligen Referenzgröße. In Tab. 17 werden die drei Variablen in numerischer Form für den Pegel Passau-Ingling aufgeführt.

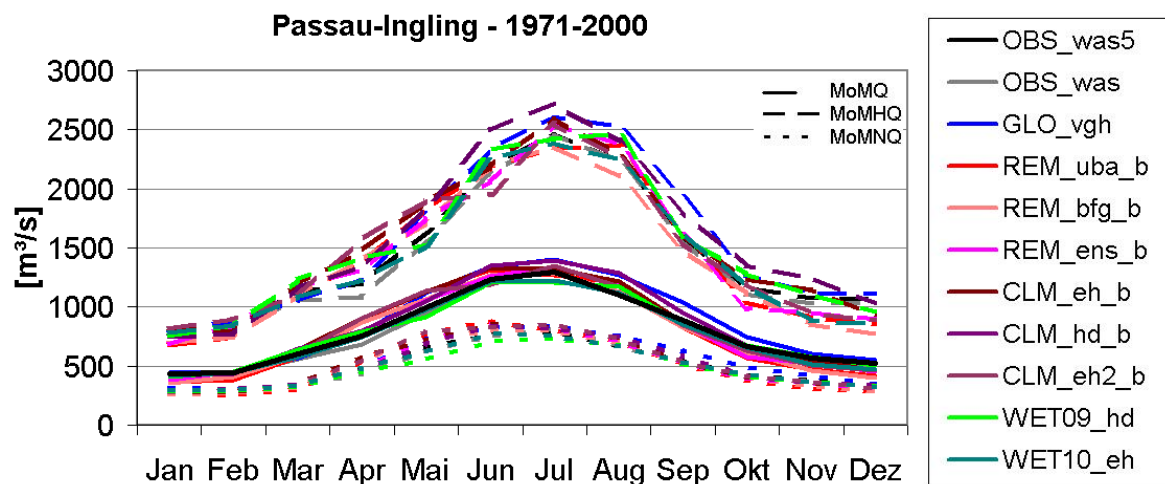


Abb. 37: Abfluss am Pegel Passau-Ingling / Inn, Variable MoMQ, MoMHQ, MoMNO, Zeitraum 1971-2000

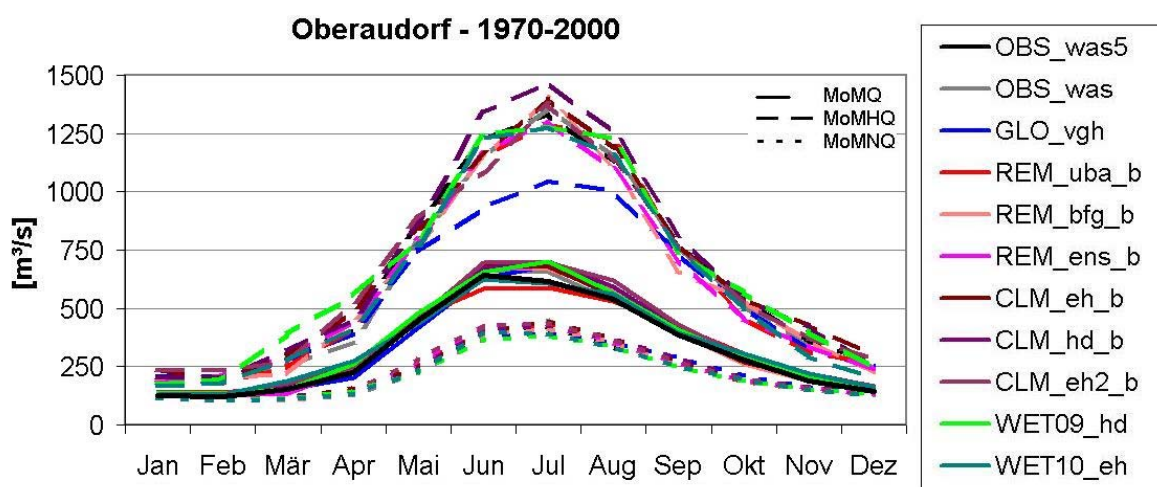


Abb. 38: Abfluss am Pegel Oberaudorf / Inn, Variable MoMQ, MoMHQ, MoMNO, Zeitraum 1971-2000

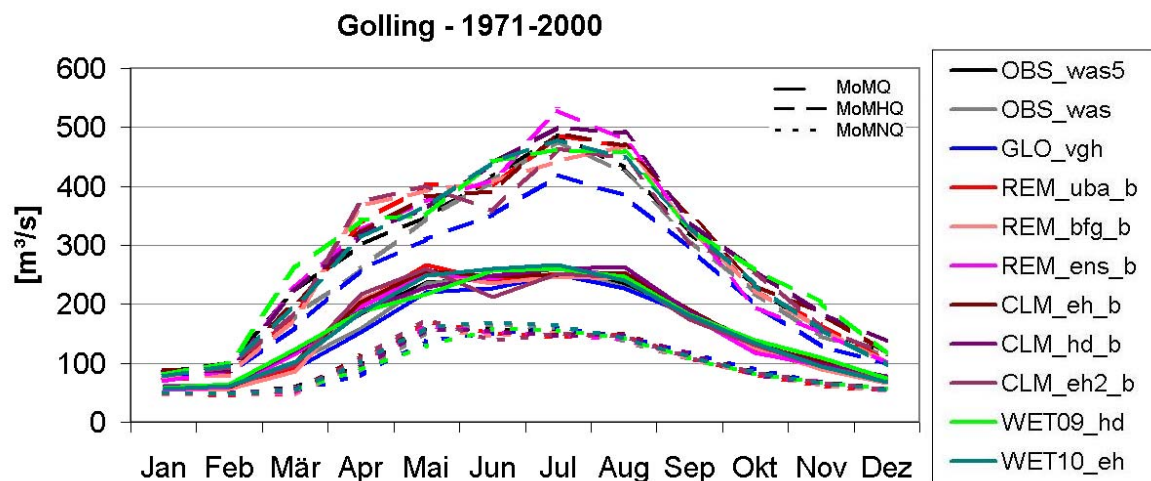


Abb. 39: Abfluss am Pegel Golling / Salzach, Variable MoMQ, MoMHQ, MoMnQ, Zeitraum 1971-2000

Insgesamt ist festzustellen:

- Die Unterschiede zwischen den monatlichen Hauptwerten bei Zugrundelegung von Obs_was5 und von Obs_was sind in der Regel gering. Ausnahmen sind Berechnungsergebnisse in den Monaten März, April und Mai, für die an den Pegeln Oberaudorf und Golling bei Zugrundelegung von Obs_was teilweise deutlich niedrigere Hauptwerte ermittelt werden.
- Die mittleren Abflussverhältnisse MoMQ sind im Wesentlichen in Abschnitt 4.2.1 bereits beschrieben. Die Modellierung mit den Klimaprojektionen führt zu ähnlichen mittleren monatlichen Abflüssen wie mit Obs_was5, die Abweichungen sind meist unter $\pm 10\%$. Ausnahmen bilden die REMO Projektionen am Pegel Passau-Ingling im Winter, die deutliche bis starke Unterschätzungen aufweisen (Abweichungen von -10% bis mehr als -20%)
- Die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse MoMHQ werden in der Regel in allen drei Pegelbezugsgebieten in Bezug auf Obs_was5 relativ gut abgebildet. Zwar treten vereinzelt deutliche bis starke Unter- oder Überschätzungen auf, jedoch zeigen diese keine klar systematischen Muster. Eine Ausnahme bildet der GLOWA Datensatz, der die sommerlichen Spitzenabflüsse an den beiden Pegeln im Oberlauf, Golling und Oberaudorf, deutlich unterschätzt.
- Auch die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MoMnQ werden an allen drei Pegeln, von einzelnen Werten abgesehen, in der Regel gut wiedergegeben, also mit Abweichungen unter $\pm 10\%$. Unterschätzungen liefern einige REMO- und WETTREG-Projektionen am Pegel Passau-Ingling im Winter.

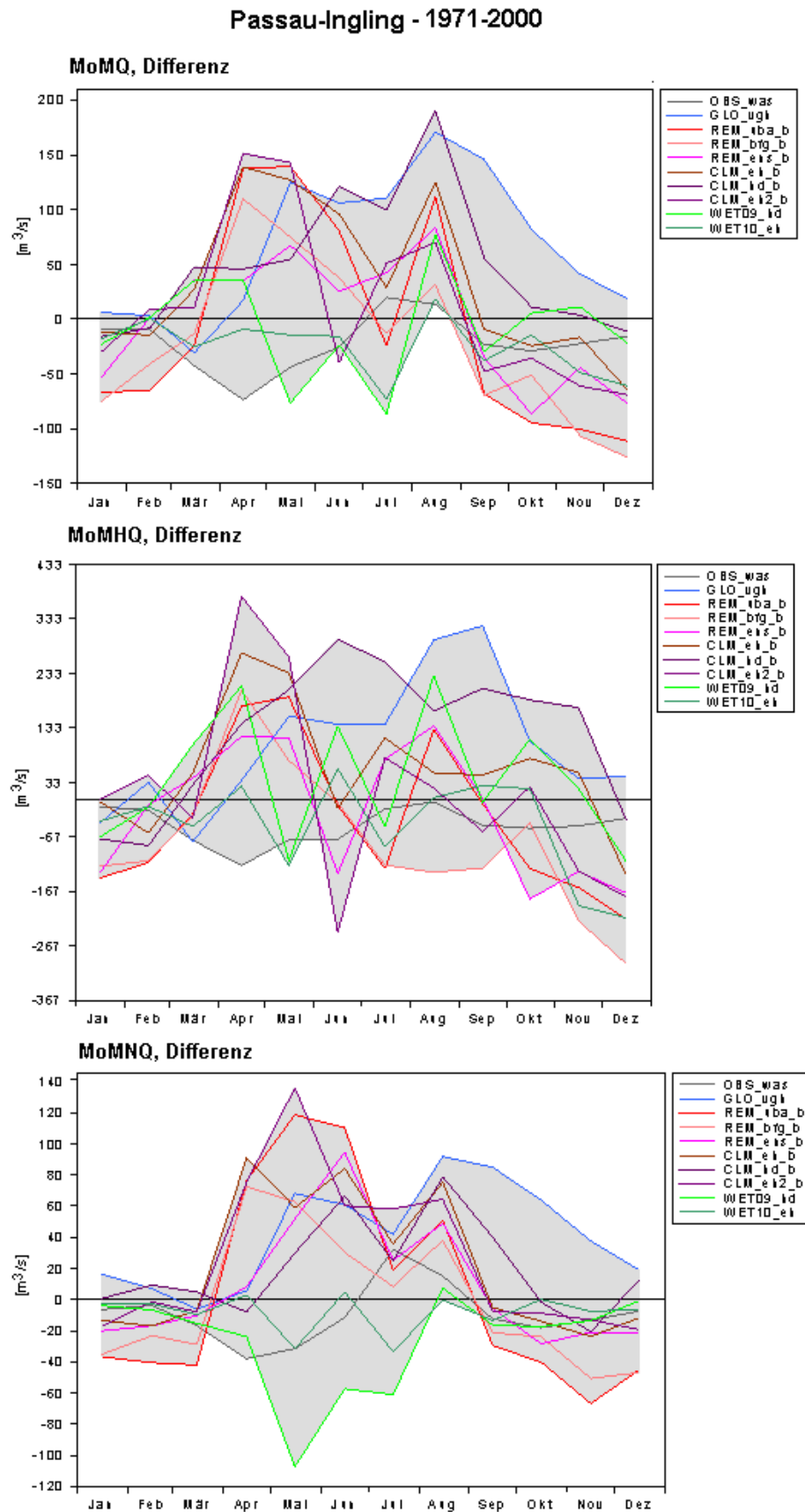


Abb. 40: Abfluss am Pegel Passau-Ingling / Inn, Variable MoMQ, MoMHQ, MoMnQ, Abweichungen zu Obs_was5, Zeitraum 1971-2000

Tab. 17: Abfluss am Pegel Passau-Ingling / Inn, Variable MoMQ, MoMHQ, MoMnQ, Abweichungen zu Obs_was5, Zeitraum 1971-2000

MoMQ

Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
OBS_was5	434	447	601	756	991	1232	1296	1097	891	667	566	528	792	470	783	1208	708
OBS_was	-9	-10	-42	-73	-44	-26	20	14	-23	-29	-22	-16	-22	-11	-53	3	-25
GLO_vgh	6	3	-31	17	124	105	109	170	145	82	41	18	66	9	37	128	89
REM_uba_b	-67	-64	-24	137	139	80	-24	112	-68	-94	-100	-111	-7	-81	84	56	-87
REM_bfg_b	-75	-41	-14	110	75	37	-13	31	-69	-51	-106	-126	-20	-80	57	19	-76
REM_ens_b	-53	2	35	35	67	25	42	83	-35	-86	-44	-76	0	-42	46	50	-55
CLM_eh_b	-12	-11	35	145	133	104	23	122	-21	-33	-16	-68	34	-30	105	83	-23
CLM_hd_b	-16	-8	47	46	54	121	99	190	56	11	4	-11	49	-12	49	137	23
CLM_eh2_b	-30	9	10	152	143	-40	51	70	-48	-35	-61	-69	13	-30	101	27	-48
WET09_hd	-23	2	35	35	-77	-24	-86	77	-30	5	12	-22	-9	-14	-2	-11	-4
WET10_eh	-18	1	-25	-9	-14	-16	-73	19	-38	-14	-48	-60	-25	-26	-16	-23	-34

MoMHQ

Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
OBS_was5	291	293	346	474	656	767	790	663	542	423	376	329	496	304	492	740	447
OBS_was	-6	-4	-17	-38	-32	-12	32	15	-12	-18	-13	-8	-9	-6	-29	12	-14
GLO_vgh	16	7	-6	5	68	60	41	91	85	64	37	19	41	14	22	64	62
REM_uba_b	-37	-40	-42	76	119	110	18	51	-30	-40	-67	-45	6	-41	51	60	-45
REM_bfg_b	-35	-23	-29	73	63	30	9	38	-21	-24	-51	-47	-1	-35	35	25	-32
REM_ens_b	-20	-17	-11	8	52	94	25	49	-6	-28	-21	-22	9	-19	17	56	-18
CLM_eh_b	-14	-17	1	99	63	89	39	73	-9	-17	-21	-12	23	-15	55	67	-16
CLM_hd_b	1	9	5	-8	30	66	25	79	40	-2	-21	12	20	7	9	57	6
CLM_eh2_b	-17	-1	-8	75	136	60	58	64	-8	-9	-13	-19	27	-13	68	61	-10
WET09_hd	-4	-6	-15	-24	-107	-57	-61	7	-17	-17	-14	-1	-27	-4	-49	-37	-16
WET10_eh	-2	-3	-10	3	-32	5	-33	0	-13	0	-8	-6	-8	-4	-13	-10	-7

MoMnQ

Klimaprojektion	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
OBS_was5	818	855	1131	1199	1637	2196	2471	2241	1605	1162	1076	1068	1455	914	1322	2302	1281
OBS_was	-12	-19	-74	-120	-73	-72	-16	-3	-46	-51	-47	-33	-47	-21	-89	-30	-48
GLO_vgh	-43	33	-77	36	153	137	135	293	319	107	39	43	98	11	37	188	155
REM_uba_b	-143	-114	-27	173	188	-10	-128	129	-6	-125	-160	-217	-37	-158	111	-3	-97
REM_bfg_b	-121	-111	-29	202	73	-6	-121	-135	-124	-41	-221	-299	-78	-177	82	-87	-129
REM_ens_b	-134	-9	41	118	113	-136	72	135	3	-181	-130	-169	-23	-104	90	24	-103
CLM_eh_b	6	-61	65	274	253	-7	128	46	7	73	67	-137	59	-64	197	56	49
CLM_hd_b	-71	-83	28	141	201	295	252	162	205	185	170	-35	121	-63	123	236	186
CLM_eh2_b	1	45	-33	374	263	-244	79	20	-58	25	-129	-177	14	-43	201	-48	-54
WET09_hd	-67	-12	101	210	-111	137	-50	227	-4	113	22	-111	35	-64	67	105	43
WET10_eh	-39	-11	-48	25	-121	59	-87	4	28	21	-193	-215	-48	-88	-48	-8	-48

Farblgende für monatliche Abflusswerte:

- Geringer Unterschied zu Obs_was5 (± 10 %)
- Deutl. Unterschätzung zu Obs_was5 (< -10 %)
- Starke Unterschätzung zu Obs_was5 (< -20 %)
- Deutl. Überschätzung zu Obs_was5 ($> +10$ %)
- Starke Überschätzung zu Obs_was5 ($> +20$ %)

4.2.4 Hoch- und Niedrigwasserabflussquantile

Da nicht nur mittlere Abflussverhältnisse, sondern auch die Veränderungen bei Extremwerten untersucht werden sollen, wird in diesem Teil der Plausibilitätsuntersuchungen überprüft, inwieweit die Klimaprojektionen geeignet sind, Veränderungen der Hoch- und Niedrigwasserquantile an verschiedenen Pegeln im Einzugsgebiet zu modellieren.

Die Quantile werden für 13 Pegel im Einzugsgebiet berechnet und aggregiert dargestellt (für die Lage der Pegel siehe Abb. 3).

Für die Ermittlung der Hoch- und Niedrigwasserabflussquantile ist – anders als bei den Auswertungen zum mittleren Abflussgeschehen – generell eine zweistufige Vorgehensweise erforderlich: Zunächst werden die Hoch- und Niedrigwasserwerte in Form von jährlichen Serien aus der Gesamtheit der Berechnungsergebnisse im Referenzzeitraum 1970 – 2000 extrahiert und im zweiten Schritt wird eine geeignete Wahrscheinlichkeitsverteilung an die Extremwerte angepasst, um anhand von dieser angepassten Verteilung dann Quantile beliebiger Jährlichkeit zu ermitteln. Folgende jährlichen Serien werden gebildet:

- HQg: Serie der Höchstabflüsse im hydrologischen Jahr (Bezugszeitraum Nov-Okt)
- HQw: Serie der Höchstabflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr (Nov-Apr)
- HQs: Serie der Höchstabflüsse im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai-Okt)
- NQg: Serie der Niedrigstwasserabflüsse (NMxQ mit $x=1$) im Wasserhaushaltsjahr (Apr-Mrz)
- NQw: Serie der Niedrigstwasserabflüsse im Winterhalbjahr (Okt-Mrz)
- NQs: Serie der Niedrigstwasserabflüsse im Sommerhalbjahr (Apr-Sep)

Als Verteilungsfunktion zur Beschreibung der Extremwertserien wird in allen Fällen die Verallgemeinerte Extremwertverteilung (Generalized Extreme Value Distribution GEV) zugrunde gelegt. Die Parameterschätzung erfolgt auf der Grundlage der L-Momente.

Zusätzlich zu den aus der Wasserhaushaltsmodellierung zur Verfügung stehenden Abflussreihen des Inn-Modells (Obs_was5) werden hierbei zur Plausibilisierung der Hochwasserquantile auch gemessene Hochwasserserien an 6 der betrachteten Pegel herangezogen (zu Datenquelle und Datenbezug siehe Abschnitt 6 Daten und Literatur), mit folgenden Variablenbezeichnungen:

- HQ_{mess}: jährliche Serie der höchsten gemessenen Hochwasserscheitelabflüsse
- HM1Q_{mess}: jährliche Serie der höchsten gemessenen mittleren Tagesabflüsse

Die Hochwasserserien, die aus den mit Klimaprojektionen modellierten Abflussreihen gebildet werden, werden mit diesen gemessenen Hochwasserserien, sowie mit den Hochwasserserien aus dem modellierten Referenzdatensatz verglichen.

Verschiedene Kenngrößen können zur Beurteilung der Plausibilität der mit den Klimaprojektionen modellierten Abflussextrême herangezogen werden. Einer davon ist der Formparameter der aus der Serie geschätzten Verteilungsfunktion (siehe Abschnitt 2.3.4). Die Wertebereiche der Quantile im Bereich hoher Jährlichkeiten hängen wesentlich von Vorzeichen und Betrag des Formparameters ab. So spricht man bei negativem Formparameter γ von endlastigen Verteilungen („heavy tailed“), weil sehr viel Masse am oberen Ende der Verteilung konzentriert ist. Diese Verteilungen führen zu hohen Werten bei Ereignissen mit geringer Überschreitungswahrscheinlichkeit. Demgegenüber hat eine GEV-verteilte Größe mit positivem Formparameter γ einen festen oberen Grenzwert, so dass die Extremwerte weniger hoch ausfallen. Speziell der Formparameter ist damit ein vergleichsweise einfach zu ermittelnder Kennwert, mit Hilfe dessen das Extremwertverhalten einer betrachteten Größe sehr komprimiert beschrieben werden kann.

Die Verteilung des Formparameters bei Anpassung der Verallgemeinerten Extremwertverteilung an Hochwasserjahresserien bezogen auf die Messdaten und sämtliche hier betrachteten Klimaprojektionen zeigt Abb. 41. Die Boxplots beinhalten hierbei für die Werte des Formparameters aus den gemessenen Hochwasserreihen die Ergebnisse an 6 Pegeln, und für die Klimaprojektionen und den Referenzdatensatz Obs_was5 die Werte für alle 13 betrachteten Pegel. Vergleicht man die Lage und Ausdehnung der Boxplots mit den Werten der Reihe HQ_{mess}, die auf gemessenen Hochwasserscheitelwerten beruhen, dann fällt folgendes auf:

- Hochwasserserien, extrahiert aus Berechnungsergebnissen mit Klimadaten aus GLO_vgh, WET09_hd und in geringerem Maß WET10_eh zeigen bei Anpassung der Verallgemeinerten Extremwertverteilung Formparameter, die auf ein systematisch stärkeres „heavy tailed“-Verhalten hinweisen, als es den realen Scheitelserien HQ_{mess} und den aus Tagesmittelwerten extrahierten Höchstwerten HM1Q_{mess} entspricht. Die so ermittelten Hochwasserquantile hoher Jährlichkeit werden möglicherweise systematisch überschätzt, sofern die Verteilung die mittlere Tendenz der Hochwasserwerte zutreffend beschreibt. Dies gilt auch für den Referenzdatensatz Obs_was5.
- Hochwasserquantile hoher Jährlichkeit, die der Simulation mit REM_uba_b-Klimadaten entstammen, werden möglicherweise systematisch unterschätzt, sofern die Verteilung die mittlere Tendenz der Hochwasserwerte zutreffend beschreibt.

Die Abb. 42 zeigt die Verteilung der relativen Unterschiede der einhundertjährigen Hochwasserabflüsse und der fünfzigjährigen Niedrigwasserabflüsse bezogen auf alle betrachteten Klimaprojektionen. Als Referenz wird dabei stets Obs_was5 verwendet. Wie zu sehen, liefern die Klimaprojektionen an den 13 betrachteten Pegeln zumeist hundertjährige Hochwasserabflüsse, die systematisch kleiner sind als diejenigen auf der

Grundlage von Obs_was5. Davon ausgenommen sind die Klimaprojektionen basierend auf WETTREG, sowie REM_bfg. Damit bestätigt sich der zuvor erläuterte Zusammenhang zum Formparameter.

Bei den Niedrigwasserabflüssen werden die Quantilquotienten bezüglich der fünfzigjährigen Quantils dargestellt. Man erkennt, dass bei den meisten Klimaprojektionen keine systematischen Abweichungen zu den anhand Obs_was5 ermittelten Werten auftreten. Eine Ausnahme ist die Referenz für die GLOWA-Projektionen, GLO_vgh.

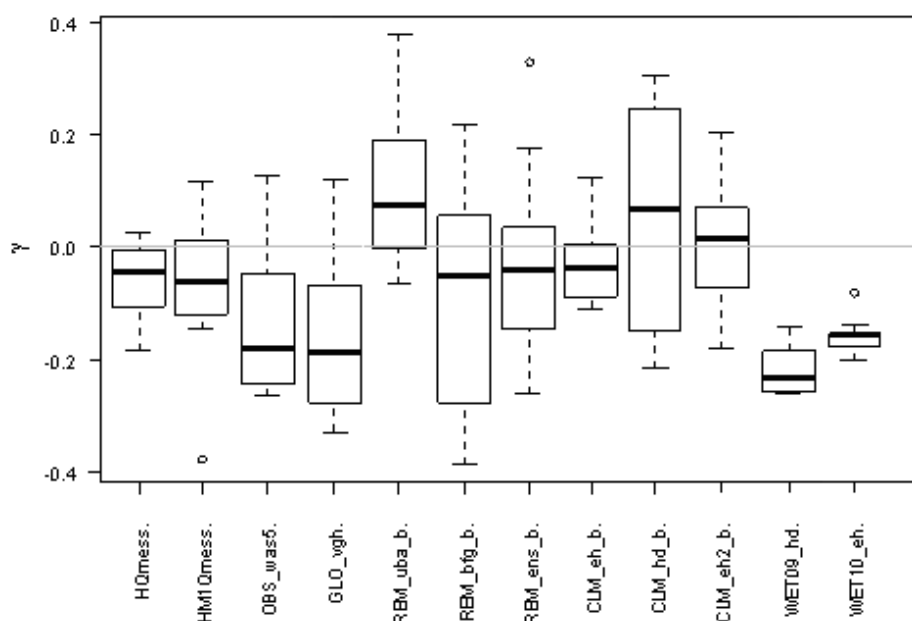


Abb. 41: Verteilung des Formparameters bei der an die jährliche Hochwasserserie HQg angepassten Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV) bei verschiedenen Klimaprojektionen; Zeitraum: 1971-2000; Boxplots für HQ_{mess} und HM10Q_{mess} aus den Ergebnissen an 6 Pegeln im Einzugsgebiet; alle anderen Boxplots: aus 13 Pegeln

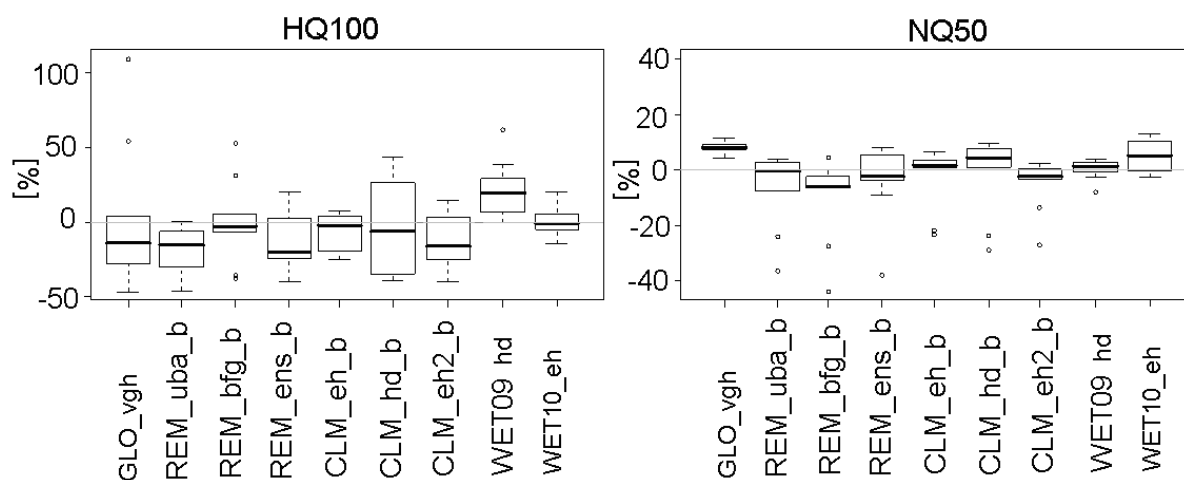


Abb. 42: Verteilung der prozentualen Abweichungen von Quantilen der jährlichen Hochwasserserie HQg mit Jährlichkeit T=100 und der jährlichen Niedrigwasserserie NQg mit Jährlichkeit T=50 bei verschiedenen Klimaprojektionen; Referenz Obs_was5; Zeitraum 1971-2000; Boxplots aus den Ergebnissen an 13 Pegeln im Einzugsgebiet

Zusammenfassung des AdaptAlp Projektpartners LfU: 4. Plausibilität der Abflussprojektionen

Aus den bisher betrachteten Klimaprojektionen wurden 10 Modellläufe als Basis für die Berechnung von Abflussprojektionen ausgewählt. In einem weiteren Schritt wurde das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH für das gesamte Inneinzugsgebiet mit den ausgewählten Projektionen angetrieben. Man spricht von „Realisationen“ einer „Modellkette“. Für die Untersuchung der Plausibilität der Abflussprojektionen werden die in den 10 Realisationen der Modellkette simulierten Wasserhaushaltsgrößen für den Zeitraum 1971-2000 mit einer Referenz verglichen. Eine hohe Übereinstimmung wird als Nachweis für die Plausibilität der Modellkette angesehen.

Als Referenz werden aus Gründen der Konsistenz nicht gemessene Werte, sondern für den Zeitraum 1971-2000 berechnete Größen aus dem kalibrierten Wasserhaushaltsmodell verwendet. Die Plausibilitätsbetrachtung umfasst langjährige Jahres- und Monatswerte für die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Verdunstung und Abfluss, sowie die Modellausgaben für Schneeschmelz- und Gletscherabfluss. Darüber hinaus wurden die mittels Extremwertstatistik ermittelten Hoch- und Niedrigwasserquantile verschiedener Jährlichkeiten mit der Referenz verglichen.

Die betrachteten Realisationen der Modellkette waren überwiegend in der Lage, langjährige Jahres- und Monatsmittelwerte für das Untersuchungsgebiet zufriedenstellend nachzubilden. Die Abweichungen liegen in den allermeisten Fällen unter 10 %. Für langjährige Mittelwerte werden die Abflussprojektionen für das Inneinzugsgebiet daher auch für die Zukunft als belastbar eingestuft. Dies gilt nur eingeschränkt für den Lauf „GLOWA-Vergangenheit“, der neben dem Niederschlag auch die Verdunstung deutlich unterschätzt. Für die untersuchten kleinen alpinen Teilgebiete wurde generell eine geringere Plausibilität der Realisationen der Modellkette festgestellt.

Die Abflüsse aus Schnee- und Gletscherschmelze werden durch die Modellkette nicht zufriedenstellend wiedergegeben. Da die Bilanzbetrachtungen zufriedenstellende Ergebnisse geliefert haben, ist die Plausibilität der Abflussprojektionen hiervon nicht entscheidend betroffen.

Die auf den Projektionen basierenden Hochwasserserien unterscheiden sich deutlich von der Referenz. Extremwertstatistische Auswertungen der Abflussprojektionen für den Referenzzeitraum deuten für mehrere Realisationen der Modellkette auf eine systematische Überschätzung von Hochwasserwerten hoher Jährlichkeit (z.B. HQ 100) hin. Dies ist sowohl durch Schwächen der regionalen Klimamodelle als auch durch Überschätzungen mittlerer Hochwasserabflüsse durch das Wasserhaushaltsmodell (siehe Pöhler et al., 2011, Technical Report AdaptAlp) bedingt. Die modellierten Hochwasserabflüsse können nicht als plausibel eingestuft werden. Auf eine Auswertung dieser Größen für die Zukunft wird verzichtet.

Die Unterschiede zwischen den Projektionen und der Referenz sind für Niedrigwasserserien deutlich kleiner (unter $\pm 10\%$). Niedrigwasserquantile können demnach auch für die Zukunft ausgewertet werden.

4.3 Veränderungen des Wasserhaushalts und der Abflüsse

4.3.1 Wasserbilanz und langjährige Mittelwerte der Wasserbilanzglieder

Im Folgenden werden die Absolutwerte und die Differenzen der jährlichen Wasserbilanzglieder zu den jeweiligen Referenzwerten für die beiden Zukunftszeiträume „nahe Zukunft“ (2021-2050, z1) und „ferne Zukunft“ (2071-2100, z2) dargestellt. Für Niederschlag und Abfluss werden auch die monatlichen Absolutwerte und Differenzen für im Gesamtgebiet dargestellt. Die monatlichen Ergebnisse für die Verdunstung werden hier nicht dargestellt, fließen aber in die Auswertungen mit ein.

Die Abb. 43 bis Abb. 47 zeigen:

- Niederschlag: Im Gesamtgebiet des Inn zeigen die drei REMO-Projektionen, die beiden GLOWA- sowie die CLM-Projektionen deutliche bis starke Zunahmen der Niederschläge in einigen Monaten des Winterhalbjahres, nahe Zukunft, die sich auch in den jährlichen Werten niederschlagen. Bei REM_ens_b treten demgegenüber deutliche Abnahmen im Januar und März auf. Die Sommermonate der nahen Zukunft sind bei beiden WETTREG- und beiden GLOWA-Projektionen durch deutliche bis starke Abnahmen geprägt, was sich auch in den Jahreswerten zeigt. Diese deutlichen bis starken Abnahme in den Sommermonaten weisen im Hinblick auf die ferne Zukunft auch die REMO- und CLM-Projektionen auf. Die in den Teilgebieten auftretenden Veränderungsmuster ähneln den für das Gesamtgebiet beschriebenen weitgehend.
- Verdunstung: Die ausgewiesenen Veränderungsmuster der Verdunstung unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Projektionen in der Regel nur geringfügig. Generell treten deutliche bis zumeist starke Verdunstungszunahmen in den Wintermonaten auf und prägen die jährlichen Verdunstungszunahmen, während Veränderungen in den übrigen Monaten des Jahres bei den meisten Projektionen in der nahen Zukunft nicht ausgewiesen werden. In den Gebieten Oberer Inn, Salzach, Alz und insbesondere Öztaler Ache werden hinsichtlich der fernen Zukunft deutliche bis starke Zunahmen auch in den Sommermonaten ausgewiesen. In den Wintermonaten verstärkt sich die für die nahe Zukunft bereits starke Zunahme nochmals um Größenordnungen.
- Abfluss: Niederschlags- und Verdunstungszunahmen im Winter und Niederschlagsabnahmen im Sommer führen zu erheblichen Veränderungen in der saisonalen Verteilung der Abflüsse bereits in der nahen Zukunft. Generell treten dabei starke Zunahmen der Abflüsse im Winter und über das Jahr gesehen auf (alle Projektionen außer WETTREG). Bei den beiden GLOWA- und den beiden WETTREG-Projektionen treten darüber hinaus deutliche bis starke Abnahmen in den

Sommermonaten der nahen Zukunft auf, so dass diese Projektionen über das Jahr gesehen Abflussabnahmen modellieren. In der fernen Zukunft werden diese starken sommerlichen Abnahmen bei allen Projektionen ausgewiesen. Die starken Zunahmen im Winter bleiben dabei – mit Ausnahme von WETTREG – unvermindert erhalten. Die dargestellten Veränderungsmuster gelten im Prinzip auch für die verschiedenen, hier betrachteten Teilgebiete.

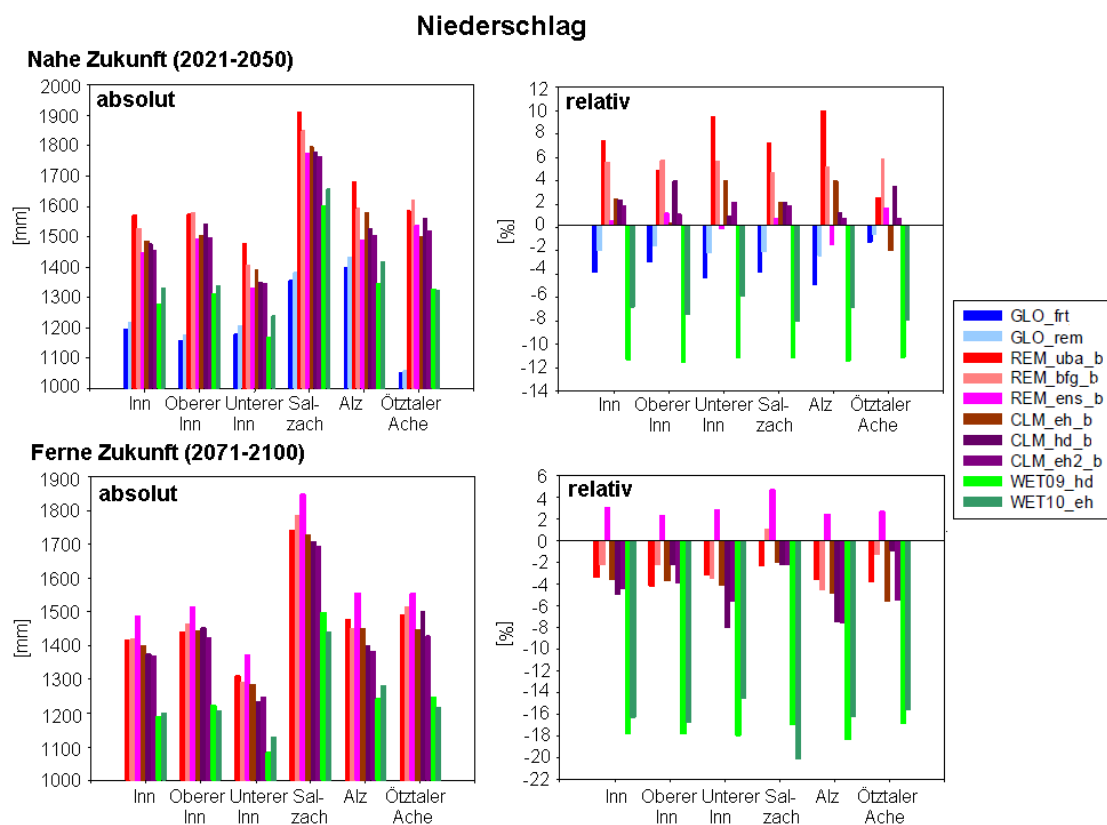


Abb. 43: Mittlerer jährlicher Niederschlag für die betrachteten Teiluntersuchungsgebiete in „naher“ und „ferner Zukunft“ (links: absolut, rechts: relativ zu Kontrolllauf)

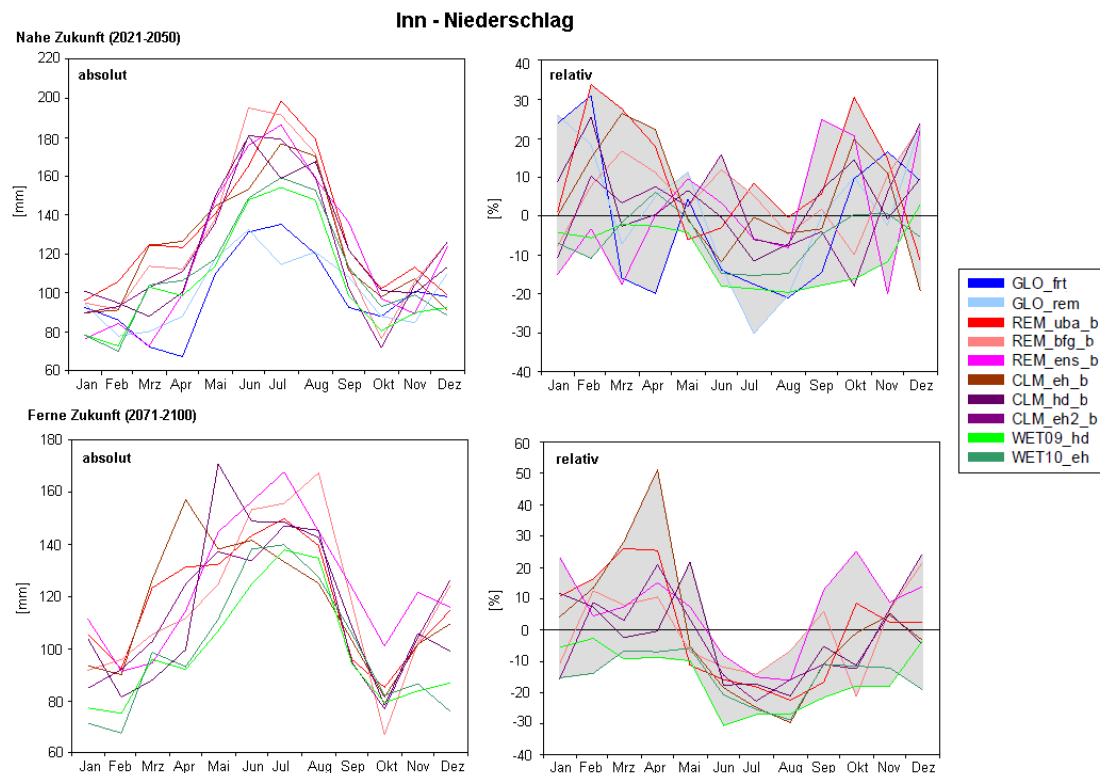


Abb. 44: Mittlerer monatlicher Niederschlag im Inn-Gebiet in „naher“ und „ferner Zukunft“ (links: absolut, rechts: relativ zu Kontrolllauf)

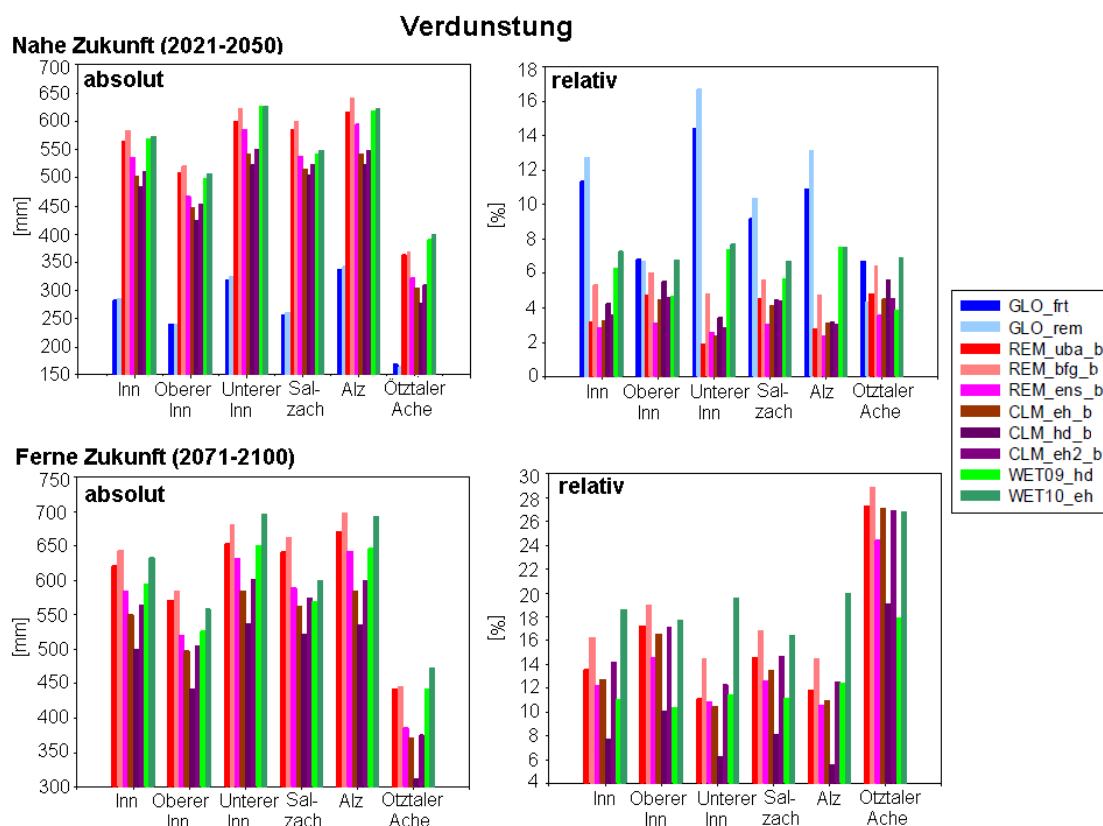


Abb. 45: Mittlere jährliche Verdunstung für die betrachteten Teiluntersuchungsgebiete in „naher“ und „ferner Zukunft“ (links: absolut, rechts: relativ zu Kontrolllauf)

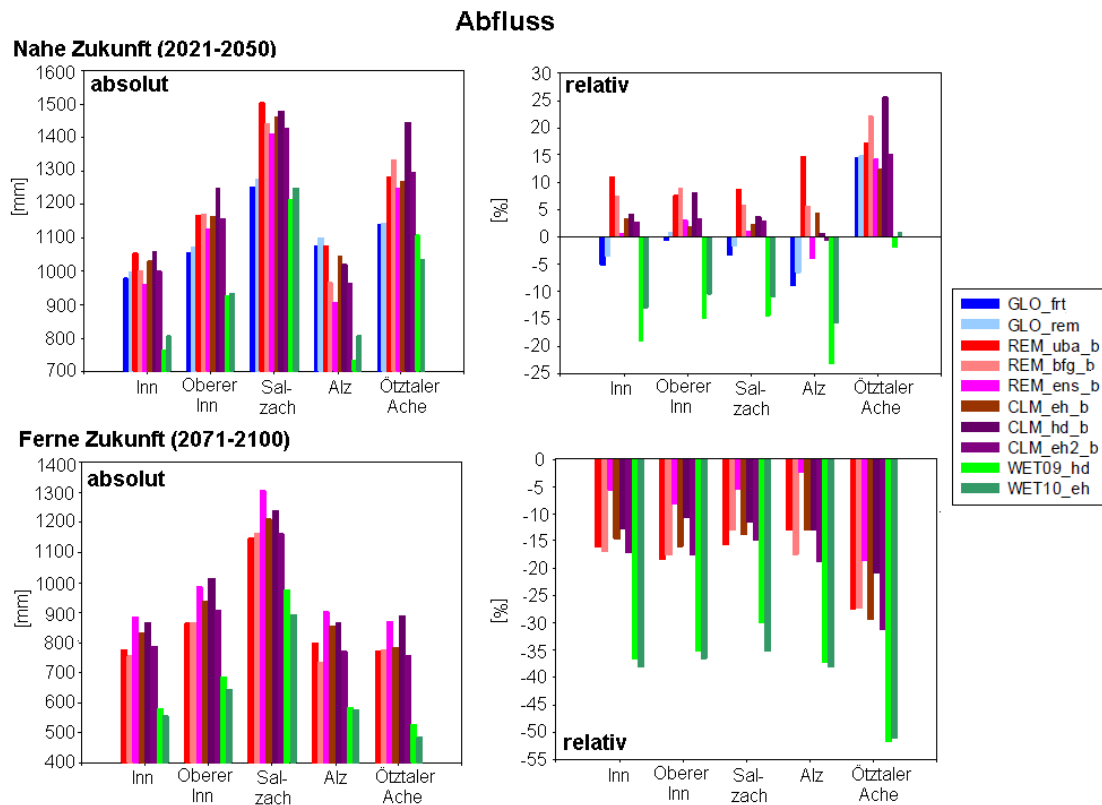


Abb. 46: Mittlerer jährliche Abfluss für die betrachteten Teiluntersuchungsgebiete in „naher“ und „ferner Zukunft“ (links: absolut, rechts: relativ zu Kontrolllauf)

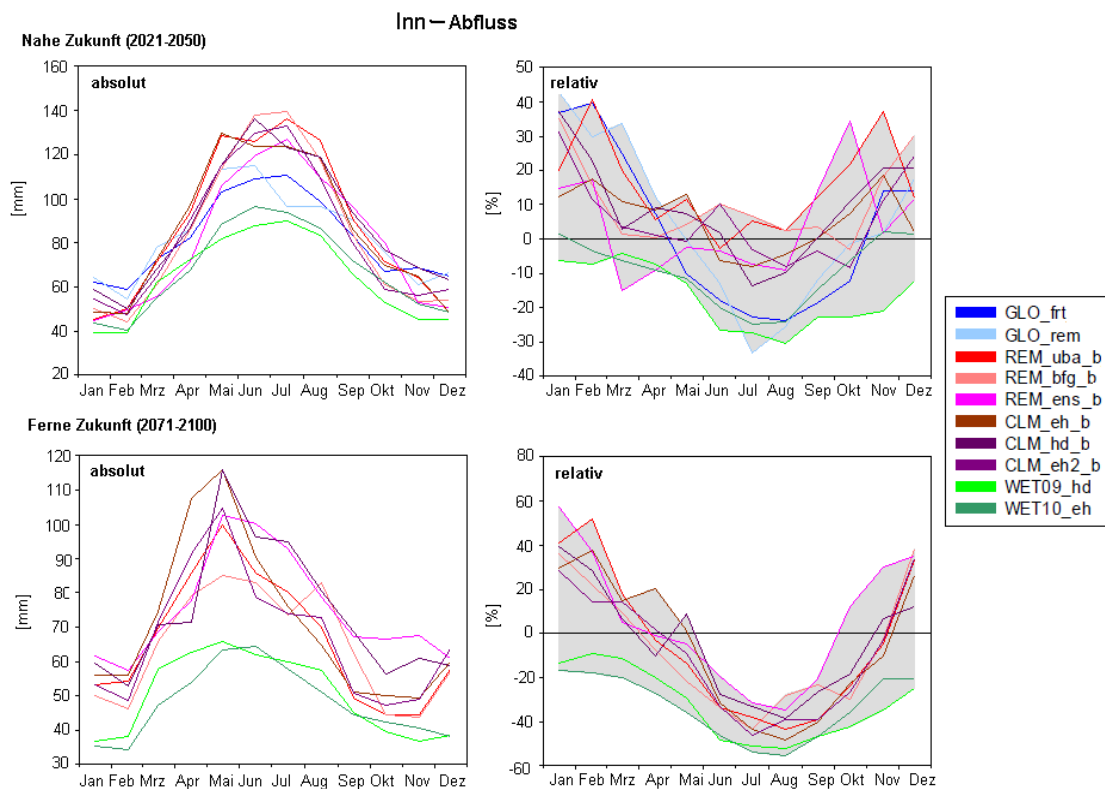


Abb. 47: Mittlerer monatlicher Abfluss im Inn-Gebiet in „naher“ und „ferner Zukunft“ (links: absolut, rechts: relativ zu Kontrolllauf)

4.3.2 Monatliche Abflusskennwerte: MoMQ, MoMNHQ, MoMHQ

In diesem Abschnitt werden die projizierten Veränderungen der monatlichen Hauptwerte MoMQ, MoMNHQ und MoMHQ bezogen auf die nahe und ferne Zukunft für die Pegel Passau-Ingling, Oberaudorf und Golling gezeigt. Zur Veranschaulichung der aktuellen Abflussverhältnisse im Untersuchungsgebiet werden zunächst in Abb. 48 für diese Pegel Kennwerte aus gemessenen Daten dargestellt. Die darauf folgenden Abbildungen (Abb. 49 bis Abb. 57) zeigen die projizierten Änderungen als prozentuale Veränderungen der Abflüsse im Vergleich zum jeweiligen Simulationsergebnis für 1971-2000.

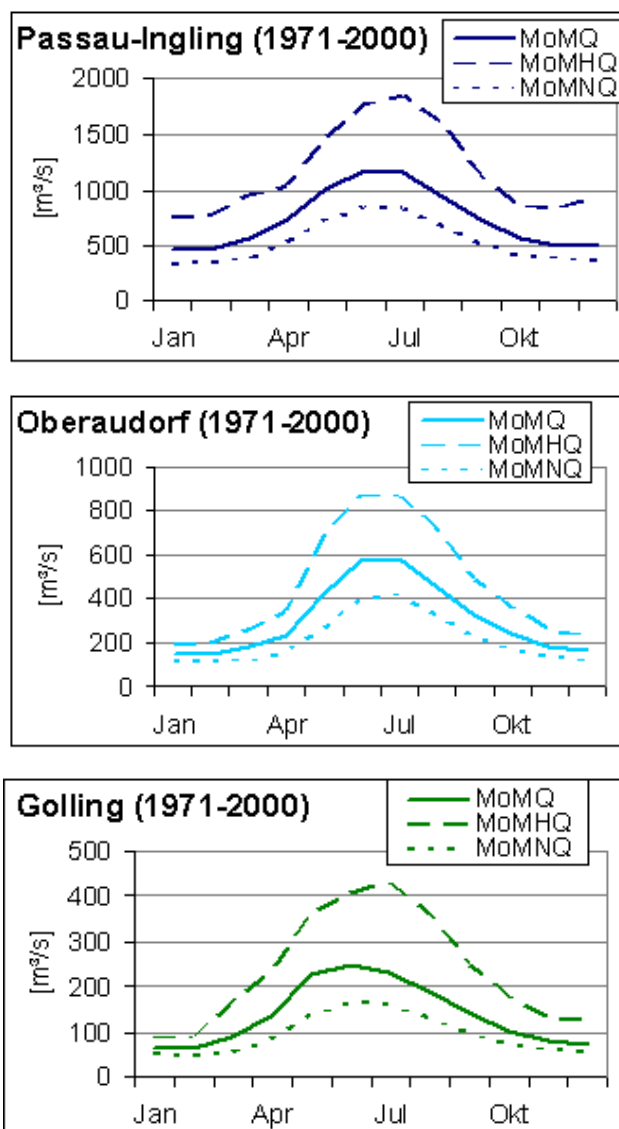


Abb. 48: Abflusskennwerte im Zeitraum 1971-2000 an den Pegeln Passau-Ingling / Inn, Oberaudorf / Inn und Golling / Salzach aus gemessenen Abflusswerten, Variablen MoMQ, MoMNHQ, MoMNHQ

In Bezug auf die Abflussprojektionen ist festzustellen:

- Bei den mittleren Abflussverhältnisse MoMQ (Abb. 49 bis Abb. 51) treten in der nahen Zukunft Zunahmen von +40 % in den Wintermonaten Dezember bis April auf, vor allem bei den GLOWA-Projektionen. Bei den auf dynamischen Regionalmodellen basierenden Projektionen werden in der fernen Zukunft Zunahmen bis zu +60 % modelliert. Die WETTREG Projektionen zeigen keine winterlichen Zunahmen, demgegenüber sind die sommerlichen Abnahmen besonders deutlich, die bei den WETTREG Projektionen bis zu -30 % in der nahen Zukunft erreichen, und bis -50 % in der fernen Zukunft. Im Salzachgebiet sind die winterlichen Zunahmen des MoMQ besonders stark ausgeprägt.
- Die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse MoMHQ (Abb. 52 bis Abb. 54) nehmen, außer bei den WETTREG-Projektionen, in den Wintermonaten am Pegel Passau-Ingling um bis zu +60 % zu. An den Oberläufen sind diese Zunahmen deutlich ausgeprägter: an den Pegeln Oberaudorf und Golling steigen die mittleren Hochwasserabflüsse im Winter, die in der Vergangenheit deutlich niedriger waren als im Sommer, teilweise um mehr als +100 %. Im Sommer, wenn im Einzugsgebiet die Spitzenabflüsse auftreten, treten Abnahmen auf, bis über -40 % in der fernen Zukunft. Diese Abnahmen sind besonders ausgeprägt bei den WETTREG-Projektionen.
- Auch bei den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen MoMNQ (Abb. 55 bis Abb. 57) zeigt sich ein ähnliches Bild mit Zunahmen im Winter und Frühjahr (bis +25 % in der nahen Zukunft und bis über +30 % in der fernen Zukunft) und Abnahmen im Sommer (bis -25 % in der nahen Zukunft und bis -60 % in der fernen Zukunft).

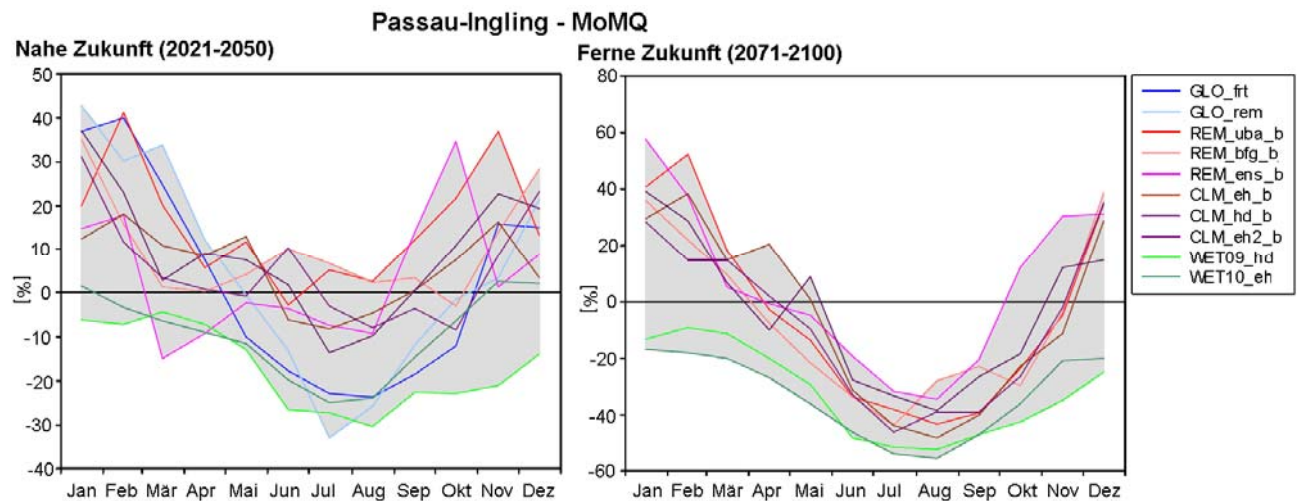


Abb. 49: Veränderungen des MoMQ am Pegel Passau-Ingling / Inn

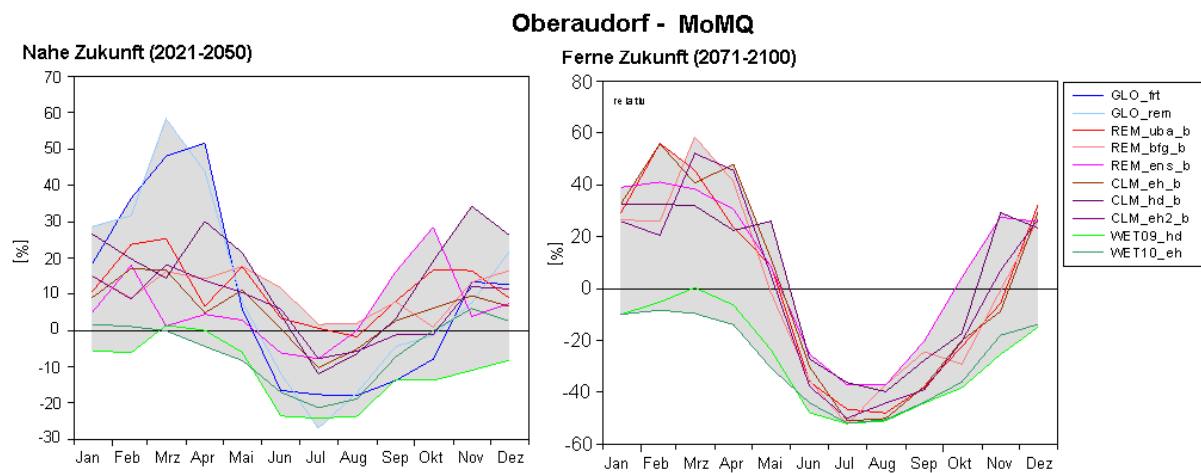


Abb. 50: Veränderungen des MoMQ am Pegel Oberaudorf / Inn

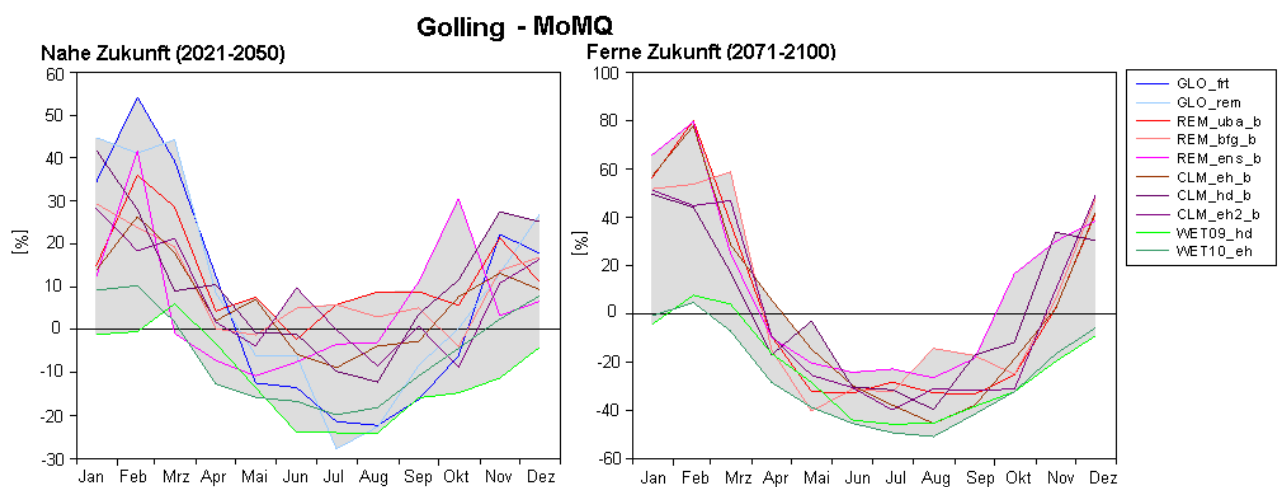


Abb. 51: Veränderungen des MoMQ am Pegel Golling / Salzach

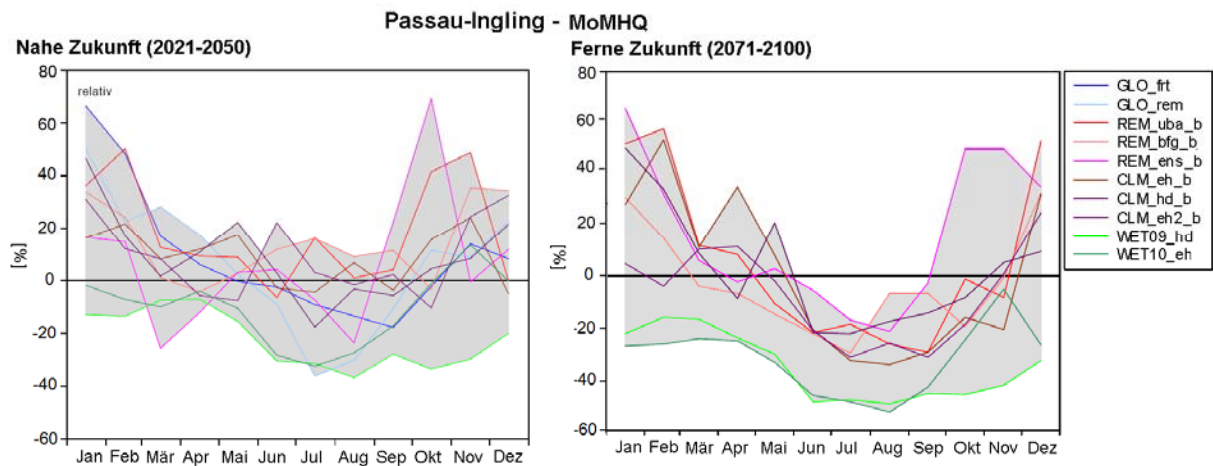


Abb. 52: Veränderungen des MoMHQ am Pegel Passau-Ingling / Inn

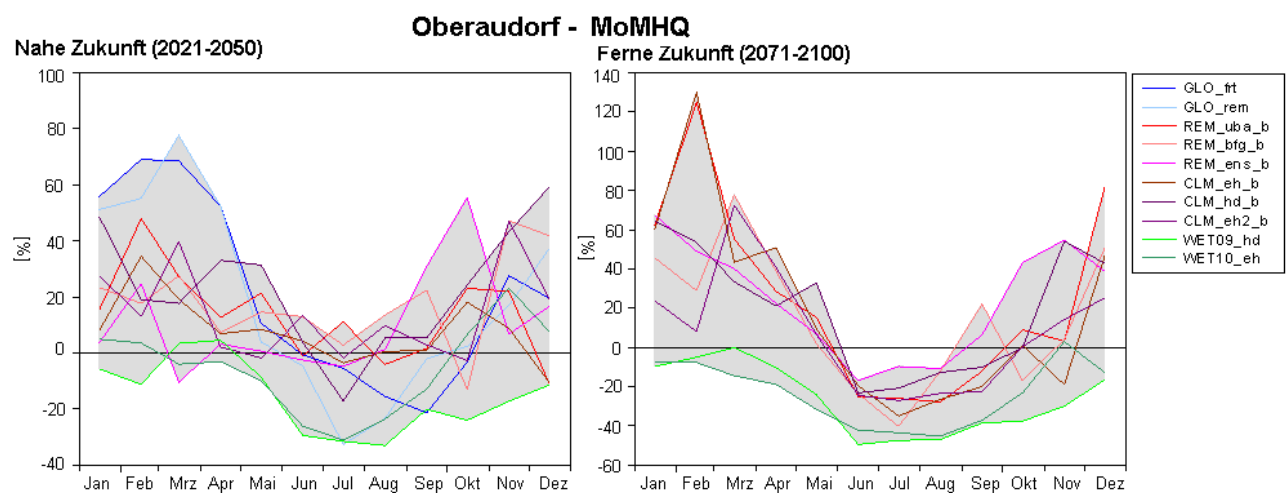


Abb. 53: Veränderungen des MoMHQ am Pegel Oberaudorf / Inn

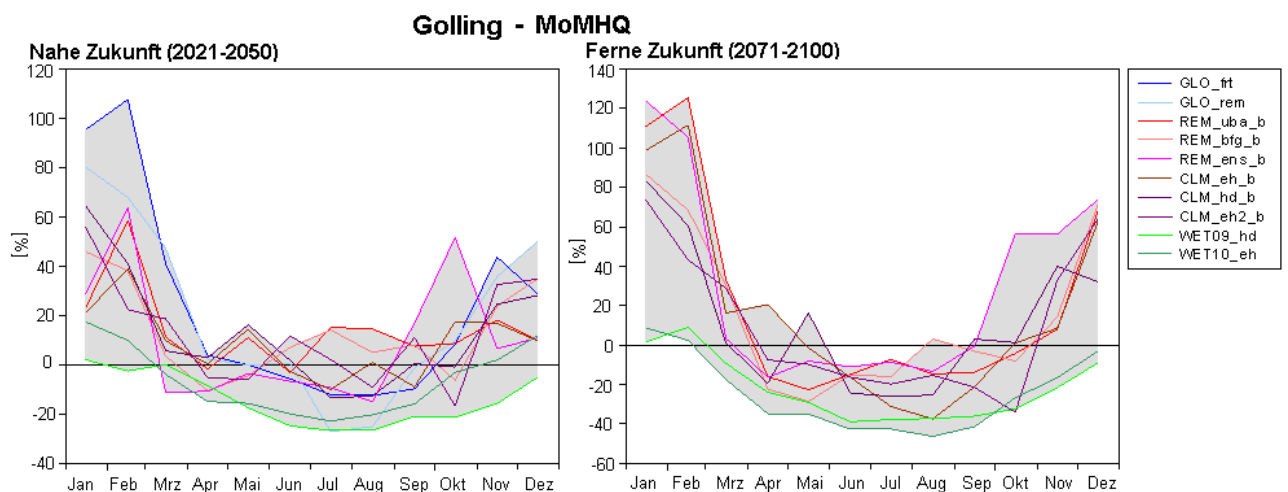


Abb. 54: Veränderungen des MoMHQ am Pegel Golling / Salzach

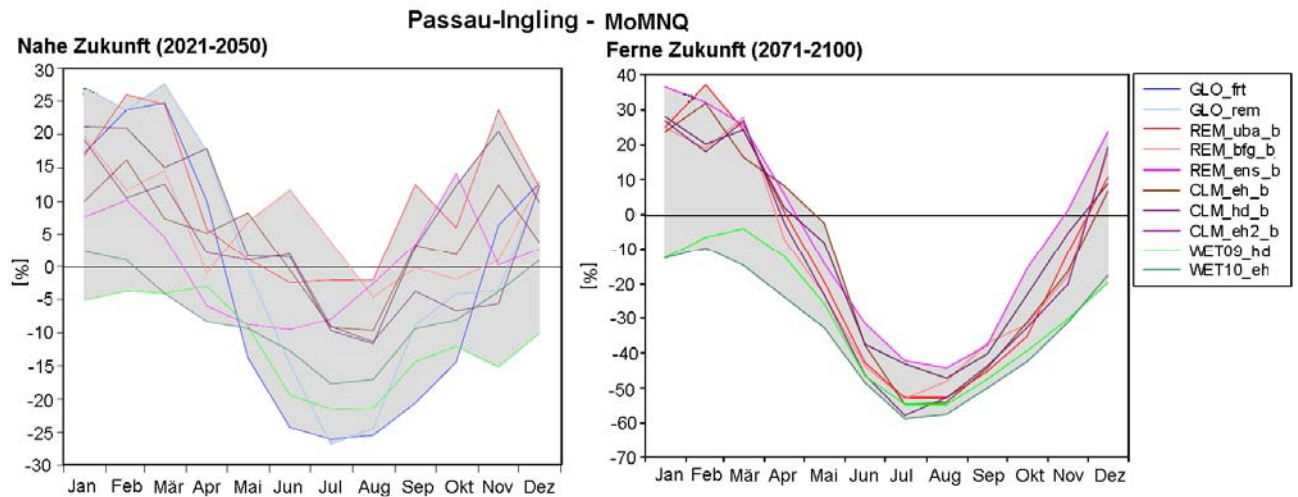


Abb. 55: Veränderungen des MoMNQ am Pegel Passau-Ingling / Inn

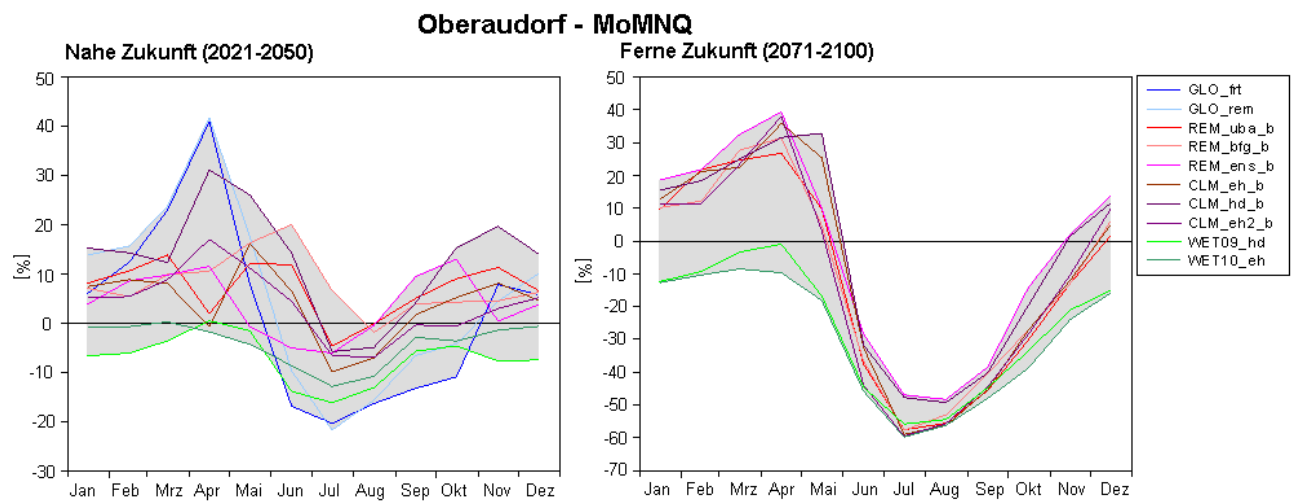


Abb. 56: Veränderungen des MoMNQ am Pegel Oberaudorf / Inn

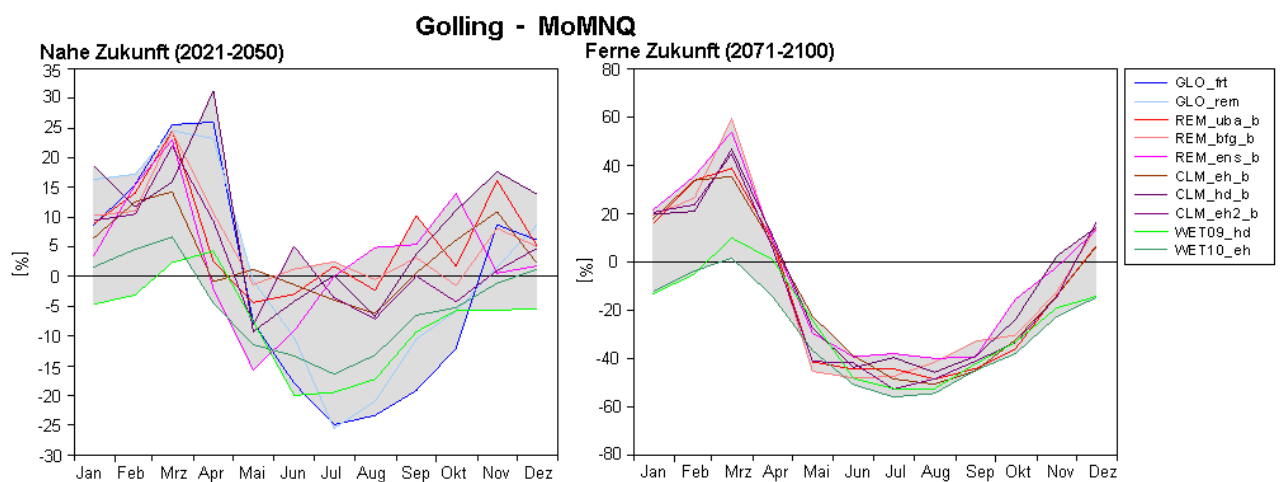


Abb. 57: Veränderungen des MoMNQ am Pegel Golling / Salzach

Die folgende Tabelle (Tab. 18) zeigt nochmals die Projektionen für die monatlichen Abflusswerte für den Pegel Passau-Ingling in der nahen Zukunft.

Tab. 18: Veränderungen der monatlichen Hauptwerte MoMQ, MoMHQ, MoMNQ am Pegel Passau-Ingling / Inn, alle Variablen in [m³/s], Zeitraum 2021-2050

MoMQ

Klimaprojektion	relativ_zu	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
GLO_frt_z1	GLO_vgh	163	179	142	58	-112	-237	-322	-300	-193	-91	95	82	-44	142	30	-286	-63
GLO_rem_z1	GLO_vgh	188	135	192	94	-5	-176	-464	-325	-121	-11	20	117	-30	147	94	-322	-37
REM_uba_b_z1	REM_uba_b	73	157	116	51	132	-37	65	30	100	124	172	55	87	95	100	19	132
REM_bfg_b_z1	REM_bfg_b	126	65	8	4	43	128	85	28	27	-18	64	114	56	101	18	80	24
REM_ens_b_z1	REM_ens_b	56	80	-95	-72	-24	-46	-98	-108	120	200	7	39	5	58	-64	-84	109
CLM_eh_b_z1	CLM_eh_b	53	78	69	77	145	-83	-107	-56	4	47	90	15	28	49	97	-82	47
CLM_hd_b_z1	CLM_hd_b	155	101	18	73	80	24	-191	-125	5	73	130	101	37	119	57	-97	69
CLM_eh2_b_z1	CLM_eh2_b	126	53	22	8	-8	124	-42	-94	-29	-53	43	106	21	95	7	-4	-13
WET09_hd_z1	WET09_hd	-25	-32	-28	-57	-117	-319	-330	-356	-195	-153	-122	-70	-149	-43	-67	-335	-157
WET10_eh_z1	WET10_eh	6	-15	-36	-67	-113	-241	-306	-268	-126	-42	14	10	-99	0	-72	-272	-51

MoMHQ

Klimaprojektion	relativ_zu	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
GLO_frt_z1	GLO_vgh	53	71	84	48	-100	-200	-216	-192	-129	-70	26	44	-48	56	11	-203	-57
GLO_rem_z1	GLO_vgh	83	71	94	84	-3	-122	-223	-184	-55	-20	-15	42	-21	65	58	-176	-30
REM_uba_b_z1	REM_uba_b	43	65	75	32	9	-21	-16	-14	64	23	73	34	31	47	38	-17	53
REM_bfg_b_z1	REM_bfg_b	51	31	47	-5	49	93	30	-32	-1	-7	3	36	25	39	30	30	-1
REM_ens_b_z1	REM_ens_b	20	28	16	-29	-62	-82	-65	-18	18	56	1	8	-9	19	-25	-55	25
CLM_eh_b_z1	CLM_eh_b	29	45	17	30	57	-10	-76	-71	16	11	40	10	8	28	35	-52	23
CLM_hd_b_z1	CLM_hd_b	62	63	53	83	11	12	-79	-86	18	52	73	34	25	53	49	-51	48
CLM_eh2_b_z1	CLM_eh2_b	53	30	43	12	8	16	-77	-82	-20	-28	-20	38	-2	40	21	-48	-23
WET09_hd_z1	WET09_hd	-14	-11	-13	-13	-49	-138	-157	-143	-75	-49	-55	-33	-62	-19	-25	-146	-60
WET10_eh_z1	WET10_eh	7	3	-14	-40	-58	-98	-134	-113	-49	-34	-14	3	-45	4	-37	-115	-32

MoMNQ

Klimaprojektion	relativ_zu	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON
GLO_frt_z1	GLO_vgh	517	431	179	76	-4	-58	-236	-340	-341	-27	156	94	37	347	83	-211	-71
GLO_rem_z1	GLO_vgh	391	200	296	214	42	-211	-941	-765	-205	146	99	252	-40	281	184	-639	13
REM_uba_b_z1	REM_uba_b	244	372	139	128	163	-142	381	22	65	431	447	-2	187	205	143	87	314
REM_bfg_b_z1	REM_bfg_b	236	180	13	-60	46	260	376	192	169	-35	304	267	162	227	0	276	146
REM_ens_b_z1	REM_ens_b	112	125	-300	-159	55	86	-189	-560	361	681	-5	105	26	114	-135	-221	346
CLM_eh_b_z1	CLM_eh_b	122	169	77	176	323	-72	-122	99	-56	218	225	-103	88	63	192	-32	129
CLM_hd_b_z1	CLM_hd_b	348	132	20	145	411	71	-480	-78	-102	59	104	221	71	234	192	-162	21
CLM_eh2_b_z1	CLM_eh2_b	255	109	91	-90	-146	431	73	-33	36	-122	233	292	94	219	-49	157	49
WET09_hd_z1	WET09_hd	-97	-114	-91	-99	-235	-710	-759	-907	-445	-426	-326	-191	-364	-134	-142	-792	-399
WET10_eh_z1	WET10_eh	-14	-61	-108	-50	-160	-638	-773	-615	-281	-14	119	-1	-216	-25	-106	-675	-58

Farblegende für monatliche Abflusswerte:

- Geringer Unterschied (± 10 %)
- Deutl. Abnahme (< -10 %)
- Starke Abnahme (< -20 %)
- Deutl. Zunahme ($> +10$ %)
- Starke Zunahme ($> +20$ %)

4.3.3 Niedrigwasserabflussquantile

Die relativen Veränderungen der Niedrigwasserquantile, jeweils bezogen auf das Gesamtjahr für die beiden Zukunftszeiträume z1 und z2, werden in den nachfolgenden Boxplots dargestellt. Die Auswertungen erfolgten auch für die hydrologischen Halbjahre Sommer und Winter, was ähnliche Ergebnisse wie für das Gesamtjahr lieferte. Auf eine Darstellung wird daher hier verzichtet.

Die zweijährlichen Niedrigwasserabflüsse zeigen Zunahmen bei beiden Zukunftszeiträumen und fast allen Projektionen. Ausgenommen davon sind beide Zukunftszeiträume bei der WETTREG-Projektion WET_hd. In der nahen Zukunft zeigen die fünfzigjährigen Niedrigwasserabflüsse sowohl Zu- als auch Abnahmen. Zunahmen treten bei CLM_hd_b_z1, den beiden GLOWA-Projektionen sowie REM_bfg_z1 auf. Bei den anderen Projektionen treten in der Regel Abnahmen in beiden Zukunftszeiträumen auf (Abb. 58).

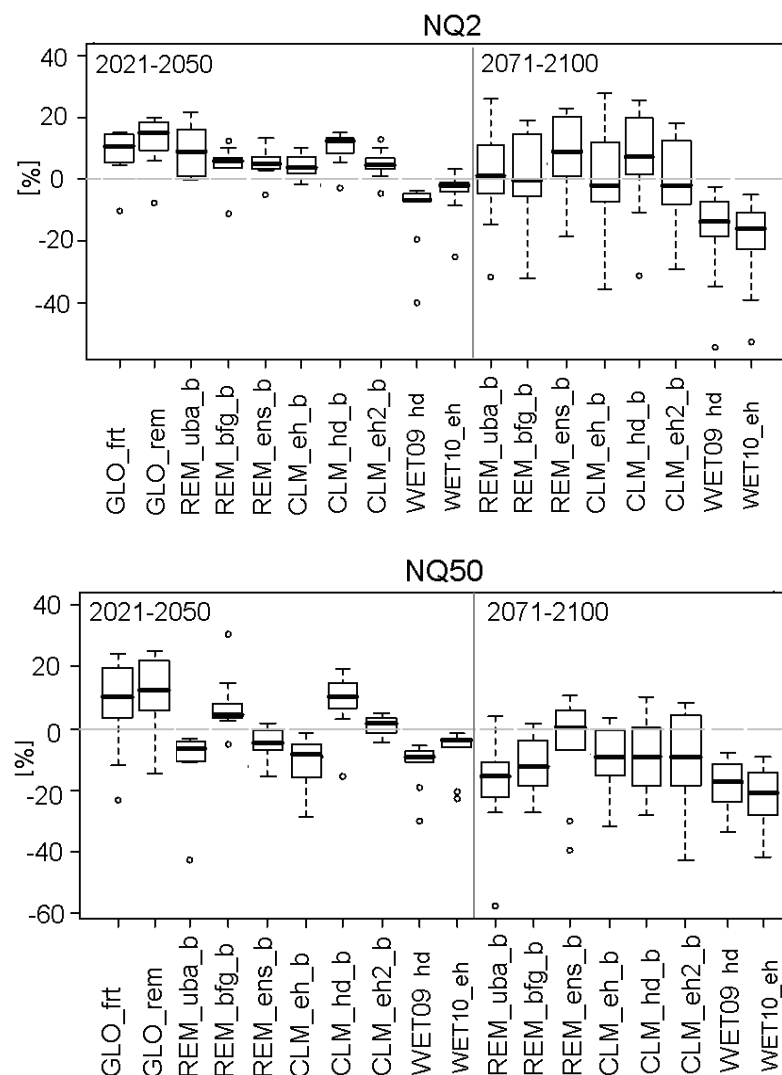
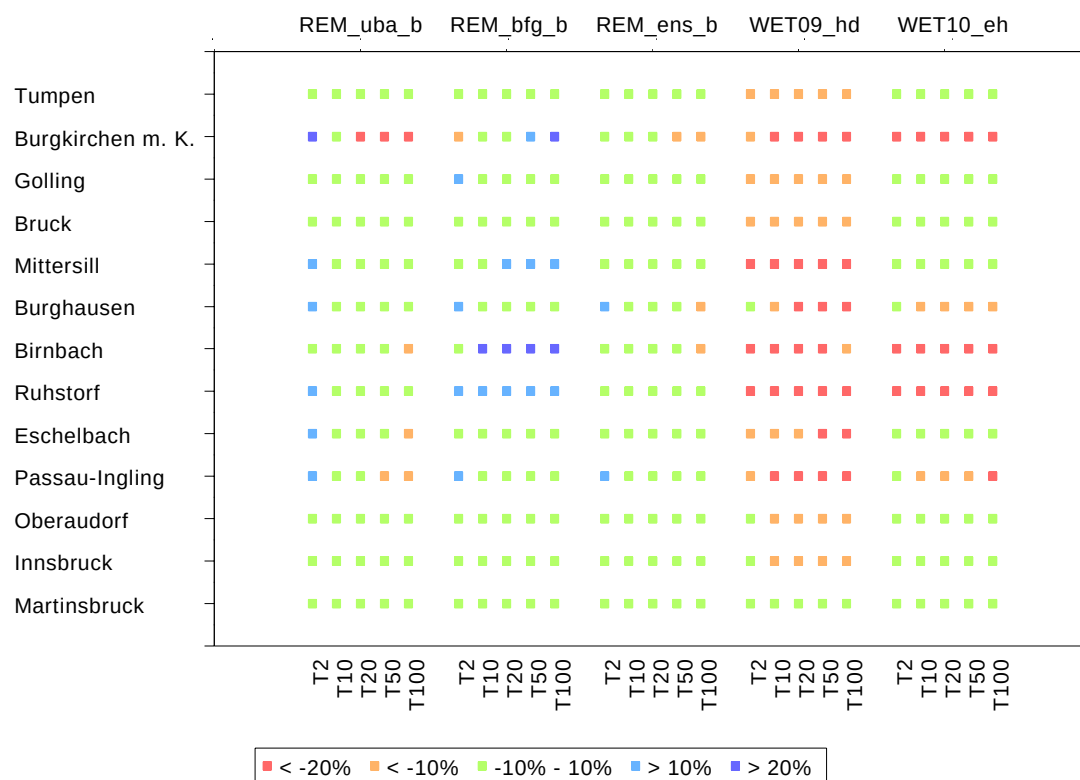


Abb. 58: Boxplots zur Verteilung der prozentualen Abweichungen von Quantilen der jährlichen Niedrigwasserserie NQg mit Jährlichkeiten T=2 und T=50 bei verschiedenen Klimaprojektionen in naher und ferner Zukunft, Referenz Obs_was5, Boxplots aus den Ergebnissen an 13 Pegeln im Einzugsgebiet

Die folgenden Abbildungen (Abb. 59 und Abb. 60) zeigen projizierte Veränderungen von Niedrigwasserquantilen der Jährlichkeiten T=2, 10, 20, 50 und 100 an allen Pegeln bezogen auf die nahe Zukunft (z1) und ferne Zukunft (z2) beispielhaft für die WETTREG- und REMO-Projektionen.

Insgesamt erkennt man folgendes:

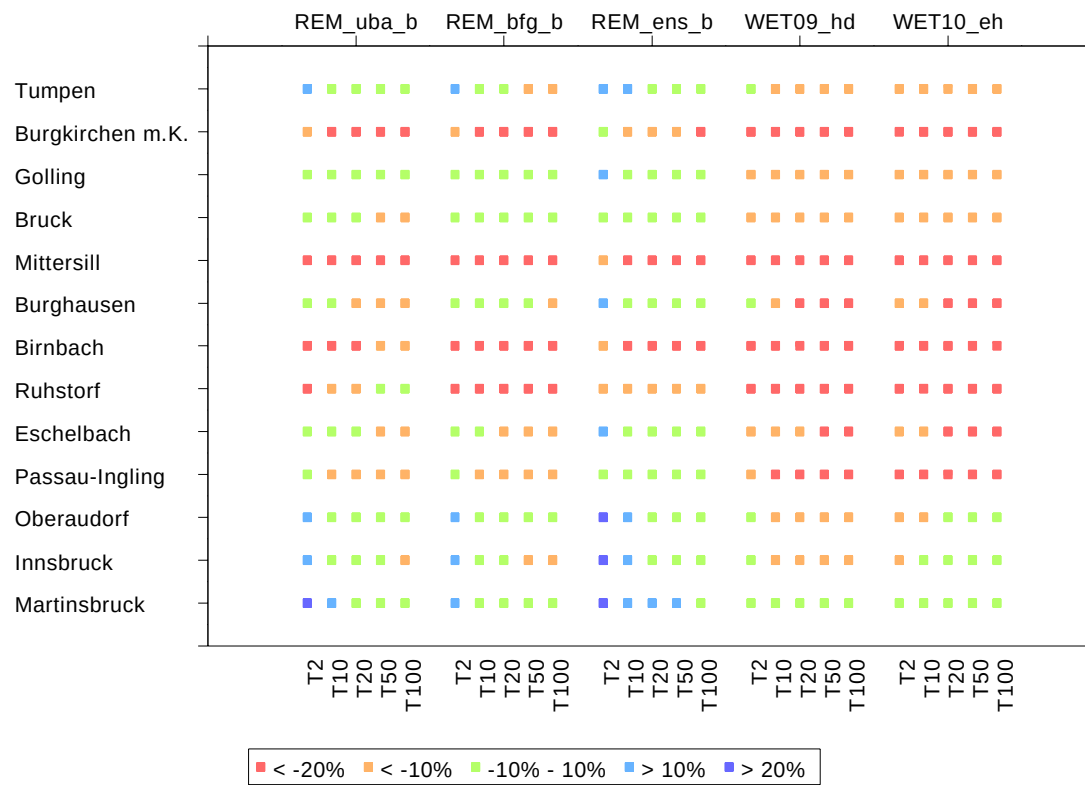
- Viele Pegel zeigen einen Übergang von keinen Veränderungen im Zeitraum z1 hin zu deutlichen bis starken Abnahmen im Zeitraum z2. Bei den WETTREG-Projektionen treten bei vielen Pegeln starke Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse auf. Dies gilt bzgl. WET09_hd bereits für die nahe Zukunft.
- Die Abnahmen treten an den meisten Pegeln und bei den meisten Projektionen in der fernen Zukunft deutlicher auf.



HyStat HQ/NQ 3.0

IAWG 2011

Abb. 59: Veränderungen der Niedrigwasserquantile NQg, hydrologisches Jahr, Zeitraum 2021-2050



HyStat HQ/NQ 3.0

IAWG 2011

Abb. 60: Veränderungen der Niedrigwasserquantile NQg, hydrologisches Jahr, Zeitraum 2071-2100

Zusammenfassung des AdaptAlp Projektpartners LfU: 5. Klimasignale in den Abflussprojektionen

Die 10 Realisationen der Modellkette werden grundsätzlich als plausible Zukunftsszenarien für den Wasserhaushalt des Inngebiets angesehen. Da nicht alle hydrologischen Prozesse von der Modellkette zufriedenstellend nachgebildet werden können, ist eine quantitative Analyse der Klimasignale nur für bestimmte Größen sinnvoll. In den Plausibilitätsuntersuchungen erwiesen sich folgende Kenngrößen als geeignet: Langjährige Jahres- und Monatswerte der Wasserbilanz (Niederschlag, Verdunstung und Abfluss), mittlere Monateswerte für Hoch- und Niedrigwasserabfluss (MoMHQ bzw. MoMnQ) sowie verschiedene Niedrigwasserquantile (z.B. NQ50).

Klimasignale für den Niederschlag wurden bereits bei der Analyse der Klimaprojektionen ermittelt. Die Weiterverwendung ausgewählter Klimaprojektionen im Wasserhaushaltsmodell führte erwartungsgemäß zu ähnlichen Ergebnissen: Besonders für die nahe Zukunft (2021-2050) ergibt sich in Bezug auf den Niederschlag ein diffuses Bild. Für die ferne Zukunft (2071-2100) zeichnen sich hingegen deutliche Abnahmen im Sommer ab, wobei einige Projektionen gleichzeitig von Zunahmen in den Wintermonaten ausgehen. Mit Ausnahme der „trockenen“ WETTREG-Läufe zeigen die Projektionen für beide Zukunftszeiträume nur geringe jährliche Veränderungen des Niederschlags (unter $\pm 10\%$). Für die jährlichen Verdunstungssummen werden Zunahmen in einer Größenordnung von 5-15 % projiziert, die überwiegend auf Zunahmen im Winter zurückgehen. Die innerjährliche Änderung der Abflussverteilung spiegelt die projizierten Änderungen des Niederschlags wieder: In der nahen Zukunft zeigen die WETTREG-Projektionen Abnahmen der jährlichen Abflusssummen um bis zu -20 %, die anderen Projektionen eher Zunahmen unterhalb von +10 %. In der fernen Zukunft zeigen alle Abflussprojektionen Abnahmen im Sommer. Obwohl einige Projektionen gleichzeitig von höheren Winterabflüssen ausgehen, nimmt der Gesamtabfluss in allen Projektionen deutlich ab.

Die Analyse der Abflusskennwerte MoMQ, MoMHQ und MoMnQ wurde für verschiedene Pegel im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Für die Monate Dezember bis April gehen die meisten Projektionen von deutlichen Zunahmen aller Kennwerte aus. Bereits in der nahen Zukunft könnte der MoMHQ demnach für diese Monate um deutlich mehr als 20% zunehmen. Abweichend davon zeigen die WETTREG-Projektionen auch in den Wintermonaten überwiegend Abnahmen. Für die ferne Zukunft waren für alle Teilgebiete starke Abnahmen in den Monaten Juni bis Oktober erkennbar. Für MoMQ liegt die Größenordnung der Abnahme zwischen -20 % und -40 %, für MoMnQ bei mehr als -40 %. Auch für den NQ50 werden für die ferne Zukunft überwiegend Abnahmen projiziert.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird eine deutliche Veränderung der innerjährlichen Abflussverteilung im Innbezugsgebiet erwartet. Die projizierten Veränderungen im Wasserhaushalt spiegeln erwartungsgemäß die Klimasignale aus den verwendeten Klimamodellläufen wieder. Innerjährliche Niederschlagsänderungen schlagen sich im Abfluss nieder und führen überwiegend zu Abnahmen im Sommer, teils zu Zunahmen im Winter. Zunahmen in der Verdunstung gehen auf höhere Wintertemperaturen zurück. Mögliche Zunahmen des MoMHQ in Wintermonaten stehen Abnahmen des MoMnQ im Sommer gegenüber. Signifikante Abnahmen des Gesamtabflusses werden nur für die ferne Zukunft von allen Realisationen übereinstimmend projiziert.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie beschreibt mögliche hydrologische Auswirkungen von Klimaänderungen im Einzugsgebiet des Inn. Dazu werden zunächst verschiedene Referenzdatensätze zur Beschreibung der im Gebiet aktuell gültigen Niederschlags- und Temperaturverhältnisse betrachtet, wobei der Schwerpunkt auf dem Niederschlag liegt.

Im zweiten Teil werden die im Rahmen des Projektes betrachteten Klimaprojektionen zur Abbildung des derzeitigen und des zukünftigen Klimas hinsichtlich ihrer Plausibilität und des darin sich abzeichnenden Klimasignals dargestellt.

Der dritte Teil beschreibt schließlich die Auswirkungen dieser klimatologischen Veränderungen im Hinblick auf den Wasserhaushalt und die hydrologischen Extreme.

Referenzdatensätze zur Beschreibung der Inn-Klimatologie

Die betrachteten Referenzdatensätze basieren auf unterschiedlichen Messstellendichten, unterschiedlicher Homogenisierung der Stationsdaten und unterschiedlichen Gridding-Ansätzen und werden in insgesamt sechs Gebieten (Oberer Inn, Unterer Inn, Salzach, Alz, Öztaler Ache und Gesamteinzugsgebiet des Inn) miteinander verglichen. Als Referenzzeitraum wird dabei die Periode von 1971 bis 1990 zugrunde gelegt. Neben Vergleichen von mittleren Jahres- und Monatswerten werden bezogen auf den Niederschlag auch Verteilungscharakteristika maximaler Tageswerte und Übergangswahrscheinlichkeiten gegenüber gestellt.

Es zeigt sich, dass dort, wo die Stationsdaten repräsentativ für die in den Gebieten auftretenden Höhenverteilungen sind, bei den mittleren Jahres- und Monatswerten relativ geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Referenzdatensätzen auftreten (Unterschiede von ca. $\pm 1^\circ\text{C}$ in der Jahresmitteltemperatur, und ca. 200 mm bei den Jahresniederschlagssummen). In den anderen Gebieten sind die Unterschiede zum Teil erheblich (bis zu 1000 mm bei den Jahresniederschlagssummen). Die Gründe liegen in den zugrunde gelegten Gridding-Methoden, die mehr oder weniger stark die Höhenabhängigkeit der Klimaparameter berücksichtigen. Die für Niederschlagsdaten charakteristischen Übergangswahrscheinlichkeiten können nur bedingt durch die Datensätze nachgebildet werden. Die Charakteristika extremer Tagesniederschläge werden mit gewissen Abstrichen durch die Referenzdatensätze wiedergegeben.

Nach dem Vergleich wurde der Referenzdatensatz Obs_was für die weiteren Auswertungen ausgewählt. Es handelt sich um einen Datensatz, der die betrachteten Kenngrößen im Referenzzeitraum in einer plausiblen Weise wiedergibt, und der sowohl für die Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells, als auch für die Biaskorrektur verwendet wurde.

Klimaprojektionen

Im zweiten Teil des Projektes wurden verschiedene regionale Klimaprojektionen mit dem Referenzklima verglichen und auf Klimasignale untersucht. Es handelt sich dabei sowohl um Projektionen aus statistischem Downscaling (4 WETTREG-Projektionen und 5 „GLOWA-Danube-Szenarien“), als auch um Projektionen auf der Grundlage von dynamischen Regionalmodellen (5 REMO-Projektionen und 6 CLM-Projektionen). Die Projektionen der dynamischen Regionalmodelle liegen dabei zum Teil in einer von der Bundesanstalt für Gewässerkunde durchgeführten, biaskorrigierten Form vor (vier REMO-Projektionen und drei CLM-Projektionen). Die Biaskorrektur hat dabei die Nachbildung ausgewählter statistischer Eigenschaften des für die Kalibrierung und Validierung des Wasserhaushaltsmodells zugrunde liegenden Datensatzes zum Ziel und wird dann mit identischen Korrekturparametern auch auf die Zukunftszeiträume angewandt.

Bei den betrachteten Bezugszeiträumen handelt es sich um den Referenzzeitraum 1971-2000, die nahe Zukunft 2021 – 2050 (z1) und die „ferne Zukunft“ 2071 – 2100 (z2).

Es wurden zunächst Betrachtungen zur Plausibilität der Klimaprojektionen durchgeführt, wobei diese dann als plausibel gelten, wenn die Abweichungen zum Referenzdatensatz im Referenzzeitraum möglichst gering sind. Betrachtet wurden dabei Kennwerte der Klimavariablen Lufttemperatur (T), Niederschlag (P), Windgeschwindigkeit (W), relative Luftfeuchte (rF) und relative Sonnenscheindauern (Sd). Die Ergebnisse zeigen, dass Aussagen zu mittleren Verhältnissen durch die Klimaprojektionen mit größerer Sicherheit getroffen werden können als zu extremeren klimatischen Situationen. So weichen die langjährigen mittleren Jahresniederschläge zumeist mit weniger als ± 50 mm um weniger als ± 10 % vom Referenzniederschlag (1425 mm) ab. Demgegenüber werden die Kennwerte, die extremere Niederschlagsverhältnisse charakterisieren, wie die Anzahl an Tagen mit mehr als 20 mm Niederschlag, oder die maximale Niederschlagssumme in 3 Tagen, durch die Klimaprojektionen in einer breiten Bandbreite sowohl unter- als auch überschätzt, mit Abweichungen von oft deutlich mehr als ± 10 %.

Im zweiten Schritt werden Betrachtungen zum Klimasignal der Klimaprojektionen angestellt, also zu den von den Klimaprojektionen projizierten Veränderungen zwischen dem Referenzzeitraum und den Zukunftszeiträumen. In der Zukunft muss im Inngbiet mit deutlich erhöhten Jahresmitteltemperaturen gerechnet werden. Zunahmen von bis zu $+2$ °C bis zum Jahr 2050 und bis zu $+4$ °C bis zum Jahr 2100 sind möglich. Diese Aussagen können als vergleichsweise sicher bewertet werden. Im Sommer ist mit Niederschlagsabnahmen bis zu -20 % bis zum Jahr 2100 zu rechnen, wobei die Aussage als weniger sicher gelten kann, da die verschiedenen Projektionen eine deutlich größere Spannbreite aufweisen. Im Winter müssen die Niederschlagsveränderungen als noch unsicherer bewertet werden, da sowohl Zunahmen (bis über $+15$ %) als auch Abnahmen (bis mehr als -10 %) modelliert werden. Die

extremere Niederschlagsereignisse, wie zum Beispiel die Tage mit Niederschlägen über 10 mm, zeigen ebenfalls ein nach Jahreszeit differenziertes Bild, mit Zunahmen im Winter und Abnahmen im Sommer. Auch diese Aussagen müssen als vergleichsweise unsicher bewertet werden.

Für die weiteren Untersuchungen in diesem Bericht, die die Wasserhaushaltssimulationen betreffen, wird eine Auswahl an 10 Klimaprojektionen getroffen. Diese Auswahl geschieht auf Basis der qualitativen Erkenntnisse aus der Plausibilisierung, aber auch mit Blick darauf, möglichst methodisch verschiedene regionale Klimamodelle zu berücksichtigen.

Veränderungen von Wasserhaushaltsgrößen und von hydrologischen Extremen

Die Wasserhaushaltsmodellierung erfolgt getrennt für die drei Teilgebiete Oberer Inn, Salzach und Unterer Inn in Tagesschrittweite unter Nutzung der WaSiM-Version mit Richardsgleichung zur Beschreibung des Wassertransports im Boden.

Die erzielten Modellierungsergebnisse werden zunächst hinsichtlich ihrer Plausibilität beurteilt und dann im Hinblick auf etwaige Klimasignale ausgewertet.

Die Plausibilitätsprüfung erfolgt, in dem die für den Referenzzeitraum (1971-2000) mit Klimaprojektionen erzielten Berechnungsergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen mit Referenzdaten verglichen werden. Als Referenzdaten werden dabei die mit dem Wasserhaushaltsmodell über den gleichen Zeitraum erzielten Berechnungsergebnisse verwendet. Insgesamt sind die auf die langjährigen Jahreswerte bezogenen Unterschiede in den Wasserhaushaltsgrößen bei den verschiedenen Klimaprojektionen zumindest in den größeren Teilgebieten eher gering. Die Abweichungen liegen in den allermeisten Fällen unter 10 %. Betrachtungen zu Schnee- und Gletscherabflüssen und zu extremen Hochwasserereignissen sind allerdings mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Hinsichtlich der Veränderungen in den Wasserhaushaltsgrößen und Abflusskennwerten, die sich durch die Klimasignale der Klimaprojektionen ergeben, ist festzustellen, dass die Abflüsse erhebliche Veränderungen im saisonalen Verteilungsmuster zeigen. Zunahmen im Winter von teilweise weit über +20 %, in den Kopfeinzugsgebieten sogar über +100 %, stehen starken Abnahmen im Sommer gegenüber. Bei den Niedrigwasserabflüssen verschiedener Jährlichkeiten liefern die Projektionen Quantilzunahmen in der nahen Zukunft, in der fernen Zukunft jedoch bei den fünfzigjährigen Niedrigwasserereignissen auch Abnahmen von über -20 %.

Die Ergebnisse zeigen ein differenziertes Bild von klimatisch bedingten Veränderungen im Wasserhaushalt des Inneinzugsgebietes. Insbesondere muss während der Wintermonate, in denen in der Vergangenheit eher Niedrigwasser herrschte, mit Abflusszunahmen gerechnet

werden. Die Sommermonate, die in der Vergangenheit die Spitzenabflüsse brachten, werden demgegenüber trockener.

6 Daten und Literatur

Daten

Die im Projekt verwendeten Daten wurden teilweise durch den Auftragnehmer (IAWG) beschafft, und teilweise durch den Auftraggeber, das Bayerische Landesamt Umwelt (LfU), sowie den Projektpartner Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zur Verfügung gestellt.

- **Frei** (Frei & Schär, 1998): Für die Nutzung der Daten stellte das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) dem IAWG am 5.5.2010 freundlicherweise einen „Account to Supplement Data“ zu Verfügung.
- **HISTALP** (Efthymiadis et al., 2006): Die durch das ZAMG bereitgestellten Daten wurden heruntergeladen von der Internetpräsenz <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/alpine/> und unterliegen der sogenannten „Open Database Licence“.
- **Ensembles-EOBS** (Haylock et al., 2008): Die Beschaffung der Daten erfolgte am 2.5.2010 über die Internetpräsenz <http://eca.knmi.nl/download/ensembles/ensembles.php>. Die Daten basieren auf dem Projekt „EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539)“.
- **GPCC** (Rudolf & Schneider, 2005, Rudolf et al., 2010, Schneider et al., 2008): Die GPCC-Daten des Deutschen Wetterdienstes sind über die GPCC-Homepage <http://gpcc.dwd.de> verfügbar. Der hier verwendete Datensatz wurde am 30.6.2010 heruntergeladen über die Plattform <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>, wo sie durch NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA bereitgestellt werden.
- **HAÖ** (Skoda & Lorenz, 2003): Die verwendeten HAÖ-Daten beruhen auf dem auf das österreichische Inn-Gebiet ausgeschnittenen Datensatz „gjns6190“, Lizenz 0274, SN OQCL-LTRK-QDXY-VNDC der vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) herausgegebenen CD „Digitaler Hydrologischer Datensatz von Österreich“
- **HYRAS**: Der Datensatz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (Version 0.1 hinsichtlich der Temperatur und 1.0 hinsichtlich des Niederschlags) wurde im Rahmen des Projektes HYRAS („Erstellung von hydrologisch relevanten Raster- und Gitterpunktsdatensätze“) in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) erstellt. Zur Information konnte auf einen Zwischenbericht des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen werden (DWD 2010), der durch die BfG zur Verfügung gestellt wurde. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Temperaturdatensatz um einen ersten, vorläufigen „HYRAS“-Datensatz handelte, der zwischenzeitlich weiterentwickelt wurde.
- **HADES**: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Hydrologischer Atlas der Schweiz, Texttafel 2.6, Texttafel 2.7; wurde mit Zustimmung des BAFU durch die Uni Bern bereitgestellt.
- **Obs_was-Datensätze (tägliche und stündliche Auflösung)**: Die Regionalisierung der WaSiM-Eingangsdaten wurde durchgeführt durch UDATA (beauftragt durch LfU), die Methodik wird beschrieben in Pöhler et al. (2011, Technical Report AdaptAlp).
- **Station**: Originäre Stationsdaten (Quellen: DWD, MeteoSchweiz, ZAMG, BAFU, BMLFUW, Daten beschafft durch LfU)
- **Abflüsse / Hochwasserstatistik**: durch das LfU, Ref. 87 bereitgestellt
- **GLOWA-Projektionen**: die Daten wurden im Rahmen des BMBF-Projektes GLOWA-

Danube erstellt (www.glowa-danube.org). Für die vorliegenden Auswertungen wurden sie durch die LMU München, Arbeitsgruppe Prof. Mauser, zur Verfügung gestellt.

- **WETTREG-Projektionen:** Die statistischen WETTREG-Projektionen werden von der CEC Potsdam (Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH) erstellt. Die hier verwendeten Läufe von WETTREG2009 wurden durch das LfU beauftragt, der WETTREG2010 Lauf wurde durch das UBA beauftragt und liegt dem LfU in einer für das Innggebiet angepassten Form vor.
- **REMO-Projektionen:** Das REMO-Modell wird am MPI Hamburg betrieben. Die hier vorliegenden Projektionen wurden teilweise im Rahmen von AdaptAlp beschafft (REMO UBA, Datenurheber: MPI Hamburg i.A. des Umweltbundesamtes 2006). Des Weiteren wurden REMO-Daten aus dem EU-Projektes ENSEMBLES (EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES; Contract number 505539, <http://ensembles-eu.metoffice.com>; Datenanbieter ECA&D project, <http://eca.knmi.nl>) und dem Projekte KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt) verwendet (REMO BfG, Datenurheber: MPI Hamburg i.A. der Bundesanstalt für Gewässerkunde 2009). Diese Daten wurden für die Auswertungen im Rahmen von AdaptAlp durch die BfG zur Verfügung gestellt.
- **CLM-Projektionen:** Das CLM-Modell wurde ursprünglich durch die CLM-community (Climate limited area Community) erstellt. Die hier vorliegenden Projektionen wurden innerhalb des AdaptAlp Projektes durch den Projektpartner MATTM (Ministero dell’Ambiente e delle Tutela del Territorio e del Mare, Itlaien) beauftragt und durch CMCC (Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici) erstellt. Des Weiteren wurden Projektionen des EU-Projektes ENSEMBLES und der Gruppe Modelle & Daten (M&D) am MPI Hamburg (im Auftrag des BMBF) verwendet, die für die Auswertungen im Rahmen von AdaptAlp durch die BfG zur Verfügung gestellt wurden.
- **Bias-korrigierte Projektionen (betrifft REMO und CLM):** die Bias-Korrekturen wurden durch den AdaptAlp Projektpartner BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) durchgeführt (siehe Krahe et al. (2011, Technical Report AdaptAlp)).

Allen genannten Institutionen sei an dieser Stelle erneut für die Bereitstellung der Daten herzlich gedankt.

Literatur

- Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, P. D. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J.-M. Moisselin, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic & E. Nieplova (2007): HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology*, 27: 17-46.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007): Gewässerkundlicher Bericht Hochwasser August 2005. Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2002): Hochwasser im August 2002 (mit Berichtigungen vom 28.10.2002). München.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (2011): 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. Wien.
- Borkowski, A. (2004): Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Heft Nr. 575, München.
- Bucchignani, E. (2011) Climate Projections for the Greater Alpine Region with a new high resolution Regional Climate Model (AdaptAlp Technical Report, www.adaptalp.org).
- Bundesamt für Umwelt: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Texttafel 2.6, Texttafel 2.7.
- CHR Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes - International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR) (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. Report No. I-23 of the CHR.
- Daly, C., Gibson, W.P., Taylor, G.H., Johnson, G.L. and Pasteris, P. (2002): A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research*, 22: 99–113.
- Daly, C., Neilson, R.P. and Phillips, D.L. (1993): A Statistical-topographic Model for Mapping Climatological Precipitation over Mountainous Terrains. *Journal of Applied Meteorology*, 33: 140 – 158.
- DWD (2010): Erstellung hydrologisch relevanter Raster- und Gitterpunktsdatensätze für das Bundesgebiet und internationalen Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe auf der Basis qualitätsbewerteter meteorologischer Beobachtungsdaten. Zwischenbericht zum Projekt HYRAS (unveröffentlicht), Offenbach.
- Dyck, S. (1980): Angewandte Hydrologie, Teil I, VEB Verlag für Bauwesen. Berlin 1980.
- Efthymiadis, D., Jones, P. D., Briffa, K. R., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Frei, C. and Schmidli, J. (2006): Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800–2003. *Journal of Geophysical Research*, 110, D01105, doi:10.1029/2005JD006120.
- Fowler, H. J., S. Blenkinsop & C. Tebaldi (2007): Review – Linking climate change modelling techniques for hydrological modelling. *International Journal of climatology*, 27: 1547 –

1578.

- Frei, C. and Schar, C. (1998): A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of climatology*, 18: 873-900.
- Frei, C. und Schmidli, J. (2006): Das Niederschlagsklima der Alpen: Wo sich Extreme nahe kommen. *Promet Jahrg.* 32, Nr. 1/2, 61-67.
- Gattermayr, W. & J. Steck (2006): Innsbruck und das Hochwasser. Geschichte und Geschichten geschrieben vom Inn. Abteilung Wasserwirtschaft der Tiroler Landesregierung.
- GLOWA Danube Projekt (2010): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau. 5. Lieferung. Ludwig-Maximilian-Universität München. www.glowa-danube.de (accessed: 14/07/11).
- Goovaerts, P. (1997): *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 483 pp.
- Görger, K., Beersma, J., Buiteveld, H., Brahmer, G., Carambia, M., Keizer, O. de, Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. und Volken, D. (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 project. CHR report I-23.
- Graham, L. P., J. Andreasson & B. Carlsson (2007): Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 81: 293 – 307.
- Haylock, M., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D. and New, M. (2008): A European daily highresolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*, 113, D20119, doi: 10.1029/2008JD010201.
- Hollweg, H.-D., Böhm, U., Fast, I., Hennemuth, B., Keuler, K., Keup-Thiel, E., Lautenschlager, M., Legutke, S., Radtke, K., Rockel, B., Schubert, M., Will, A., Woldt, M. & C. Wunram (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. M&D Technical Report No. 3, Hamburg, Germany. http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/documents/reports/MaD_TechRep3_CLM__1_.pdf.
- Hofstra, N., Haylock, M., New, M. and Jones, P. D. (2009): Testing E-OBS- European high resolution gridded data set of daily precipitation and surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 114, D21101, doi:10.1029/2009JD011799.
- Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R. (1997): *Regional Frequency Analysis – An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press. Cambridge, New York, Melbourne, 224 pp.
- Hutchinson, M. F. (1995): Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 9: 385– 403.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Nougier, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell & C. A. Johnson (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P. & K. Sieck (2008): *Klimaauswirkungen und*

Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für
Deutschland Climate Change Nr. 11/2008. Umweltbundesamt.

- Krahe, P., Carambia, M., Klein, B., Rachimow, C., Horsten, T., Schickowski, G., Kling, H., Fuchs, M. (2011): Preprocessing and Application of Regional Climate Projections for Hydrological Impact Studies in the Alpine Region (AdaptAlp Technical Report, in Vorbereitung, , www.adaptalp.org).
- Krahe, P., E. Nilson, M. Carambia, T. Maurer, L. Tomassini, K. Bölow, D. Jacob & H. Moser (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 53: 316 – 331.
- Kraus, C. & H. Hübener (2010): WETTREG-2010 Länderbewertung mit eingearbeiteten Anregungen der übrigen Ländervertreter, des UBA und von CEC; Stand 11/2010. http://www.anpassung.net/cln_108/nn_701048/SharedDocs/Downloads/DE/WETTREG2010_E2_80_93L_C3_A4nderbewertung.html.
- Kreienkamp, F., Spekat, A. & W. Enke (2010): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Bericht, i.A. des Umweltbundesamtes. Potsdam.
- Li, H., Sheffield, J. and Wood, E. F. (2010): Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. Journal of Geophysical Research, 115, D10101, 20 PP. doi:10.1029 / 2009JD012882.
- Mudelsee, M., Chirila, D., Deutschländer, T., Döring, C., Haerter, J., Hagemann, S., Hoffmann, H., Jacob, D., Krahe, P., Lohmann, G., Moeley, C., Nilson, E., Panferov, O., Rath, T. & B. Tinz (2010): Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie. In: Mitteilungen Deutsche Meteorologische Gesellschaft 3, 2 - 7.
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H. H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor & Z. Dadi (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Mesfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194.
- Rudolf, B., Becker, A., Schneider, U., Meyer-Christoffer, A. und Ziese, M. (2010): WZN Status Report Dezember 2010 (Neue globale Rasterdaten des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie).
- Rudolf, B., U. Schneider (2005): Calculation of Gridded Precipitation Data for the Global Land-Surface using in-situ Gauge Observations, Proceedings of the 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group IPWG, Monterey Oktober 2004, EUMETSAT, ISBN 92-9110-070-6, ISSN 1727-432X, 231-247.
- Piani, C., Haerter, J. O. and Coppola, E. (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theor Appl Climatol, 99: 187 –192

DOI 10.1007/s00704-009-0134-9.

- Pöhler, H., Wendel, S., Schultze, B., Karl, S. und Scherzer, J. (2011): Water Balance Modelling for the Inn River Basin and Improved Precipitation Regionalisation for Southern Tributaries to the Danube in Bavaria using the Physically Based, Fully Distributed Water Balance Model WaSiM-ETH (AdaptAlp Technical Report, www.adaptalp.org).
- Schneider, U., Fuchs, T., Meyer-Christoffer, B. und Rudolf, B. (2008): Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., Germany.
- Schwarb, M. (2001): The Alpine Precipitation Climate. Evaluation of a High-Resolution Analysis Scheme Using Comprehensive Rain-Gauge Data. Zuercher Klimaschriften 80.
- Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Diss. 12018, ETH Zurich, 161 S.
- Schulla, J. & K. Jasper (1998): Modellbeschreibung WaSiM-ETH (Wasserhaushalts-Simulations-Modell ETH). - Technischer Bericht, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich.
- Schulla, J. und Jasper, K. (2007): Model Description WaSiM-ETH. Technical report, pp. 181.
- Schulla, J. (2009): Interpolation of meteorological input data. Technical report, pp. 25, WaSiM-ETH-Internetpräsenz.
- Schwarb, M. (2001): The Alpine Precipitation Climate. Evaluation of a High-Resolution Analysis Scheme Using Comprehensive Rain-Gauge Data. Zuercher Klimaschriften 80.
- Shepard, D. S. (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. Proceedings 23rd. National Conference ACM, 517–523.
- Shepard, D.S. (1984): Computer mapping: the SYMAP interpolation algorithm. In: Gaile, G.L. and Willmott, C.J., (eds.): Spatial Statistics and Models. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Netherlands, pp. 133-145.
- Skoda, G. und Lorenz, P. (2003): Mittlere Jahresniederschlagshöhe – Modellrechnungen mit unkorrigierten Daten. HAÖ. Blatt 2.2.
- Sluiter, R. (2009): Interpolation methods for climate data - Literature review. KNMI, R&D Information and Observation Technology, De Bilt.
- Spekat, A., Enke, W. & F. Kreienkamp (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRESSzenarios B1, A1B und A2. UBA Bericht.
- UBA (Umweltbundesamt) (2006): Künftige Klimaänderungen in Deutschland - Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert Hintergrundpapier, April 2006, updated in September 2006. www.umweltbundesamt.de.
- Wackernagel, H. (1998): Principal component analysis for autocorrelated data: A geostatistical perspective. Centre de Geostatistique - Ecole des Mines de Paris. Technical Report, 22G.
- Weber, M., Braun, L., Mauser, W. und Prasch, M. (2009): Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft,

Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 86, S. 1-29, Wien.

Werner, P.C. und Gerstengarbe, F.-W. (2007): Welche Klimaänderungen sind in Deutschland zu erwarten? In: Endlicher, W. und Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Berlin.

Wijngaard, J. B., et al. (2003): Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. Int. J. Climatol., 23: 679 – 692, doi:10.1002/joc.906.

Willems, W. (1993): El Nino und die Short Rains in den Trockenräumen von Kenya – Saisonale Niederschlagsvorhersage auf der Basis eines stochastischen Modells für tägliche Niederschläge. Materialien zur Ostafrika-Forschung, Heft 10.