



KlimaZwei - Klimawerkstatt
Klimaschutz- und Anpassungspotenziale einer Region und ihre
Erschließung – Fallstudie „Chiemgau - Inn – Salzach –
Berchtesgadener Land“

Auswirkung der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt der Alz



Andreas Marx, Markus Mast, Richard Knoche, Harald Kunstmann

05. November 2008

Projekt: Klima-Werkstatt
Klimaschutz- und Anpassungspotenziale einer Region und
ihre Erschließung
Chiemgau - Inn - Salzach - Berchtesgadener Land
www.klimawerkstatt.wzw.tum.de/

Auftraggeber: Technische Universität München
Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues
Alte Akademie 14
85350 Freising-Weihenstephan

Ansprechpartner: Dr. Ulrich Wild
Dr. Christian Ganzert

Auftragnehmer: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU)
Kreuzeckbahnstrasse 19
82467 Garmisch-Partenkirchen
Tel. : 08821 / 183 214
Fax: 08821 / 183 243
eMail: andreas.marx@imk.fzk.de
Internet: www.fzk.de/imk-ifu

Projektleiter: Dr. Andreas Marx

Bearbeiter: Dipl.-Ing. (Fh) Markus Mast
Dr. Andreas Marx
Dr. Hans-Richard Knoche
Dr. Harald Kunstmann

Quelle Abbildung Titelseite: Wasserwirtschaftsamt Traunstein, <http://www.wwa-ts.bayern.de/>

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	4
2 Das Untersuchungsgebiet.....	5
3 Material und Methoden	6
3.1 Wasserhaushaltssimulationsmodell WaSiM-ETH	6
3.2 Geographische Daten aus dem KLIWA-Projekt WHM Alz	7
3.3 Meteorologische und hydrologische Stationsdaten	9
3.4 Modellsetup	9
3.5 Kalibrierung des hydrologischen Modells auf Tageszeitschritte.....	11
3.6 Ergebnisse der WaSiM-Kalibrierung für die Alz	14
3.7 Validierung des Alz-Setups durch Langzeitsimulationen.....	16
3.8 Aufbereitung und Biaskorrektur der meteorologischen Daten aus den MM5- Klimasimulationen	19
4 Ergebnisse der kombinierten Klimasimulation-Wasserhaushaltssimulation	22
4.1 Vorgehensweise	22
4.2 Ergebnisse der hydrologischen Modellierung.....	24
4.2.1 Potentielle und reale Evapotranspiration im Jahresmittel.....	24
4.2.2 Veränderung des Schneespeichers und Tage mit Schneebedeckung.....	26
4.2.3 Auswirkung der Klimaänderung auf den Abflussjahresgang	28
4.2.4 Auswirkung der Klimaänderung auf die Häufigkeiten des Abflusses.....	31
5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	33
6 Literaturverzeichnis	36
A Anhang.....	37
A.1 Modellsetup	37
A.2 Ergebnisse der WaSiM-Kalibrierung	42
A.3 Flächendaten aus den hydrologischen Langzeitsimulationen 1995-2004.....	49

1 Einleitung

Der globale Klimawandel ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) lässt in seinem vierten Sachstandsbericht (AR4) keinen Zweifel daran, dass sich das Klima seit dem Beginn der weltweiten Aufzeichnung der Temperaturen um 1850 umfassend verändert hat und dieser Klimawandel mit erheblichen ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen verbunden ist. Daneben beobachten auch hydrologische Dienste heute schon Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten, insbesondere des Oberflächenabflusses.

Im Rahmen des KlimaZwei-Projektes „Klimawerkstatt: Klimaschutz- und Anpassungspotenziale einer Region und ihre Erschließung“ wurde bereits eine regionale Klimasimulation hinsichtlich der Aussagekräftigkeit für die Region Chiemgau - Inn - Salzach - Berchtesgadener Land untersucht und die Klimaänderung hinsichtlich Temperatur und Niederschlag quantifiziert (Marx et al. 2008a, 2008b). Dabei hat sich gezeigt, dass sich die mittlere Temperatur im Zeitraum 2070-99 im Vergleich zum Zeitraum 1960-89 um ungefähr 3°C erhöhen wird. Die Sommermonate erwärmen sich dabei im Flächenmittel am stärksten. Es wurde deutlich, dass das Maximum der Erwärmung im südlichen Teil der Region, also im Alpenraum, zu finden ist. Neben der mittleren Erwärmung hat sich auch eine Zunahme der Extreme gezeigt. Dies haben die Untersuchungen zur Entwicklung der Sommertage und der heißen Tage ergeben. Die Anzahl der Frosttage nimmt hingegen ab. Die Klimadaten zeigen eine zukünftige Erhöhung des Jahresniederschlages um durchschnittlich 10%. Eine jahreszeitliche Betrachtung hat jedoch eine Abnahme des Sommerniederschlages um bis zu 30% ergeben. Hier ist wiederum der Alpenbereich am stärksten betroffen. Bei den Stundenniederschlagsintensitäten haben sich im Zeitraum 2070-99 im Vergleich zu 1960-89 neue Maxima gezeigt. Weiterhin wurde eine deutliche Zunahme der maximalen Tagesniederschläge festgestellt.

Im Rahmen dieser Studie soll am Beispiel des Einzugsgebietes der Alz gezeigt werden, wie sich die Veränderung des Klimas auf den Wasserhaushalt auswirkt. Dabei werden neben der Veränderung des Abflusses auch Veränderungen anderer Wasserhaushaltskomponenten, wie z.B. der Evapotranspiration und des Schneespeichers, gezeigt.

2 Das Untersuchungsgebiet

Das Einzugsgebiet der Alz gehört zum danubischen Flusssystem. Es erstreckt sich ungefähr von Kitzbühel in Tirol im Süden bis zur Mündung in den Inn auf einer Fläche von ungefähr 2256 km² (Abb. 1). Der südliche Teil ist alpin und durch starke Reliefierung geprägt, während der nördliche, voralpine Teil von Moränenlandschaften mit dem spätglazial entstandenen Chiemsee dominiert ist.



Abbildung 1: Lage des Alz-Einzugsgebietes zwischen München und Salzburg

Im südlichen Teil des EZG gehen die drei Quellflüsse Kitzbühler Ache, Fieberbrunner Ache und Reither Ache in die Tiroler Ache über. Diese mündet nach einer Strecke von 79 km in den Chiemsee. Als Gebirgsfluss führt der Fluss eine große Geschiebefracht mit sich, die an der Mündung das am besten erhaltene natürliche Binnendelta Europas aufschüttet. Der See hat bei einer Fläche von 7990 ha und einen mittleren Wasserspiegel von 518 m ü.NN. Das Volumen wird auf 2047.8 mio. m³ geschätzt. Die maximale und mittlere Tiefe ist 73.40 m bzw. 25.40 m. Das Einzugsgebiet des Chiemsees wird mit 1.398 km² angegeben. Weitere Zuflüsse sind, westlich der Tiroler Ache, die Prien sowie östlich die Bernauer Ache. Nördlich des Chiemsees läuft die Alz dem Inn zu. Diese wird, neben dem Chiemsee, von der

Traun gespeist. Die Alz ist ein stark anthropogen beeinflusster, regulierter Fluss, an dem sich unter anderem Kanalwirtschaft findet. Die mittlere Abflussmenge der Alz liegt im nördlichen Teil in Burgkirchen etwa bei 12,7 m³/s.

Aus hydrogeologischer Sicht stellt sich das Zielgebiet klar zweigeteilt dar: Während südlich des Chiemsees Grundwasserleiter mit gering ergebnigen bzw. nicht zusammenhängenden Grundwasservorkommen dominieren (Festgestein), sind in den nördlichen Gebietsanteilen quartäre Grundwasserleiter basierend auf voralpinen Schotterplatten und Flusstalfüllungen anzutreffen (Lockergestein).

In den letzten 7 Jahren waren Teile des Alz-Einzugsgebietes von zwei verheerenden Hochwasserereignissen (im Juli 2002 und August 2005) betroffen.

3 Material und Methoden

3.1 Wasserhaushaltssimulationsmodell WaSiM-ETH

WaSiM ist ein deterministisches, flächendifferenziertes hydrologisches Modell, das auf Einzugsgebietsbasis arbeitet. Es kann sowohl für eventbasierte als auch für kontinuierliche Simulationen eingesetzt werden. Ursprünglich wurde das Modellsystem entwickelt, um die Auswirkungen eines sich verändernden Klimas auf die Wasserbilanz in alpinen Einzugsgebieten zu untersuchen. Auf der Grundlage vereinfachter physikalischer Prozessbeschreibungen werden die wichtigsten Prozesse der Zustandsänderung, des Transports und der Speicherung des Wassers beschrieben. Im Grundwassermodell sind die Modellgrenzen in horizontaler und vertikaler Richtung undurchlässig. Durch vordefinierte Randbedingungen kann Wasser zu- oder abgeführt werden. Dies kann z.B. zur Modellierung von verkarsteten Gebieten genutzt werden, wenn entsprechende Messdaten vorliegen. Die horizontale Begrenzung des simulierten Raumes wird durch Einzugsgebietsgrenzen vorgegeben (Schulla 1997). Das hydrologische Modell hat sich vielfältig in alpinen Einzugsgebieten bewährt. Dazu zählen z.B. der Einsatz im EZG der Thur mit einer Gesamtfläche von 1700 km² und des Wernersbaches (4.6 km², Schulla 1997), der Mangfall (1102 m², Kunstmann & Stadler 2005), der Ammer (Marx 2007) eine detaillierte Beschreibung des Modells, der grundlegenden Formeln und ein Tutorial finden sich bei Schulla & Jasper (2006).

Im KLIWA-Projekt „Modelltechnische Erweiterung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH und Aufbau des Modells, Test und Anwendung der Erweiterung am Beispiel des Flussgebietes Alz“ (Jasper et al. 2008, Kurzbezeichnung WHM Alz)

wurde das hydrologische Modell am IMK-IFU im Auftrag des LfU Bayern um ein Seenmodell sowie Kanalbewirtschaftung erweitert. Die daraus resultierende WaSiM-Version 8.0.10 wird für diese Studie eingesetzt. Für die flächendifferenzierte Modellierung werden Raumdaten sowie meteorologischen und hydrologischen Eingangsdaten benötigt. Hier konnte mit freundlicher Genehmigung des LfU Bayern auf die im oben genannten KLIWA-Projekt genutzten Daten zurückgegriffen werden.

3.2 Geographische Daten aus dem KLIWA-Projekt WHM Aiz

Das digitale Höhenmodell (DHM) stellt die Grundlage für die Erstellung eines WaSiM-ETH Modellsetups dar. Für die Herstellung eines Höhenmodells, welches die gesamte Fläche der Region Chiemgau überspannt, wurden drei DHMs auf eine einheitliche Rastergröße von 500 m x 500 m interpoliert und zu einem flächendeckendem Höhenmodell verschnitten (siehe Abb.2). Das Höhenmodell wird in der Präprozessierung benötigt, um Daten wie der Hangneigung, Exposition, und der Flussläufe zu generieren.

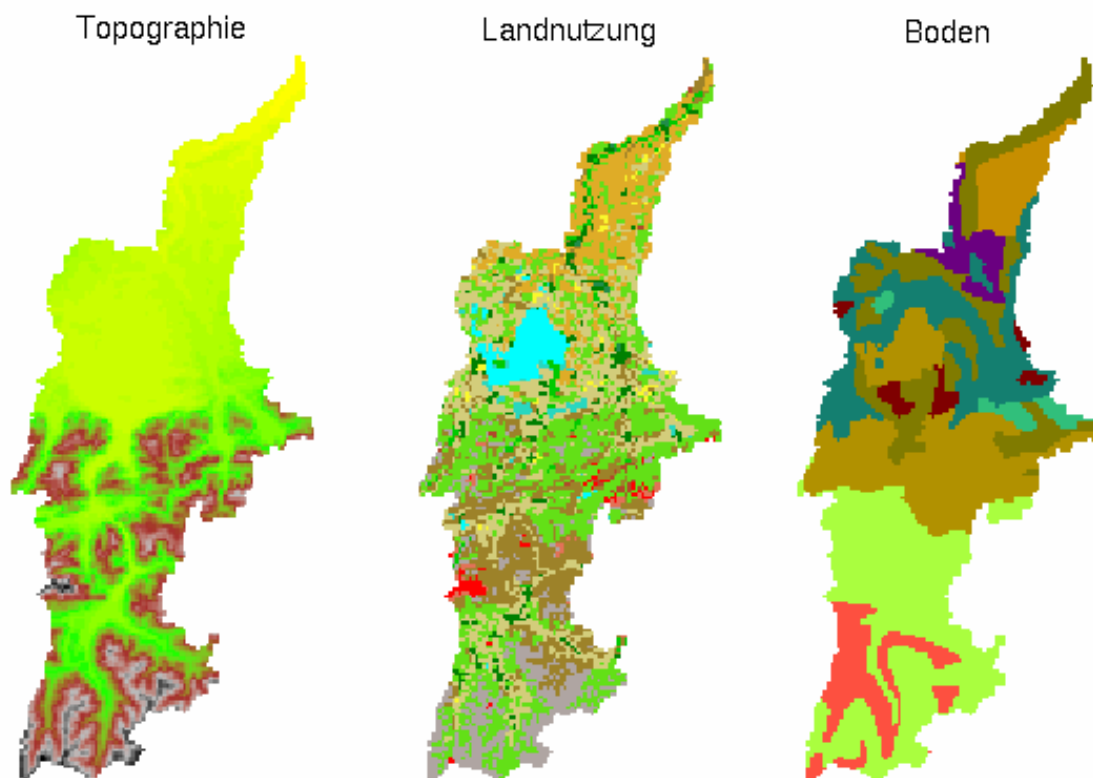


Abbildung 2 Höhenmodell, Bodenkarte und Landnutzung

Daneben verwendet das hydrologische Modell Landnutzungsdaten, die u.a. für die Berechnung der Größe des Interzeptionsspeichers und der Verdunstung, aber auch

des Bodenwassergehaltes der durchwurzelten Zone verwendet wird. Als Grundlage wurde der Datensatz zur Landnutzung aus dem CORINE Land Cover (CLC) Projekt verwendet. Dieser Datensatz wurde ebenfalls auf das Modellgitter interpoliert und auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten. Danach folgte eine Reklassifizierung der CLC-Codes in hydrologisch relevante Landnutzungsklassen. Insgesamt wurden 14 Landnutzungsklassen für die Modellanwendung ausgegliedert. Die dominanten Landnutzungen im Untersuchungsgebiet sind danach Nadelwald (28% Flächenanteil), Wiesen & Weiden (22%) und Mischwald (16%). 11% bzw. 10% Flächenanteil verbuchen Ackerland und natürliches Grasland. (Abb. 2)

Entsprechend der Generierung des Höhenmodells und der Landnutzung mussten auch die Bodeninformationen für das Untersuchungsgebiet hergeleitet werden. Für die Beschreibung der Böden im Alz-Gebiet wurden 20 unterschiedliche Typen gefunden die aus den Datensätzen der digitalen Bodenübersichtskarte Deutschland (BÜK1000) und der Konzeptbodenkarte (KBK25) abgeleitet wurden. Für den österreichischen Gebietsanteil wurden mit der BÜK1000 vergleichbare, bodentypenbasierte Daten bereitgestellt. Die flächendifferenzierte Verteilung der Böden im Untersuchungsgebiet wird im hydrologischen Modell z.B. für die Berechnung der Infiltration des Niederschlagswassers in den Boden sowie der Perkulationsgeschwindigkeit verwendet.

In weiten Teilen des Untersuchungsgebiets wird das Abflussgeschehen durch die hydrogeologischen Verhältnisse mitgeprägt und sollte somit auch bei der Modellierung mitberücksichtigt werden. Für den bayerischen Gebietsanteil konnte auf die Informationen der Hydrogeologischen Übersichtskarte (HÜK200) zurückgegriffen werden. Die interessanten Elemente hierbei sind z.B. Durchlässigkeiten, Art des Hohlraums, Verfestigung, Gesteinsart und hydraulische Eigenschaft des Untergrundes. Aus Sicht der aktuellen Modellanwendung verdienen insbesondere die Angaben zu der Lage von potentiellen Karstgebieten Erwähnung. Für die österreichischen Gebietsanteile des Alz-Gebietes liegen leider keine vergleichbaren Flächendatensätze vor, so dass hier Annahmen getroffen werden mussten. Das gehäufte Auftreten von Verkarstungen in den südlichsten bayerischen Gebietsanteilen der Alz deutet darauf hin, dass auch das Abflussgeschehen der weiter südlich gelegenen Zustromgebiete zum Chiemsee bzw. zur Alz durch Verkarstung beeinflusst werden.

3.3 Meteorologische und hydrologische Stationsdaten

Wie schon bei den Raumdaten konnten die Stationsdaten aus dem KLIWA-Projekt WHM Alz verwendet werden. Diese waren bereits auf Plausibilität überprüft und von Datenfehlern bereinigt. Da im hydrologischen Modell für Klimasimulationen ein täglicher Zeitschritt verwendet wird, wurden meteorologischen Stationsdaten und die Abflussdaten, die als Stundendaten vorlagen, auf Tageswerte aggregiert. Als meteorologische Parameter werden in WaSiM der Niederschlag und die Temperatur benötigt.

3.4 Modellsetup

Für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Region Chiemgau wurde die aktuelle WaSiM-ETH Version 8.0.10 mit der Möglichkeit der Speicherbewirtschaftung und einem Seebilanzmodul zur besseren Berechnung des Seenwasserhaushaltes verwendet. Aufgrund des alpinen und voralpinen Geländes wurde eine hohe räumliche Auflösung von 500m×500m und eine Modellierungszeitschritt von einem Tag gewählt. Insgesamt stehen hydrologische Zeitreihen von 18 Pegelstationen zur Verfügung. Davon wurden 8 Pegel (siehe Abb. 3) mit möglichst wenigen Datenlücken für die Kalibrierung des Modells ausgewählt. Bei der Auswahl der Pegel wurde ebenfalls darauf geachtet, die Heterogenität des Einzugsgebietes abzubilden (siehe Tab. 1).

Tabelle 1: Verwendete Pegel für die Kalibrierung des hydrologischen Modells

Pegel	Gewässer	Eigenschaft
Burgkirchen	Alz	Starke Beeinflussung des Abflusses durch die kontrollierte Entnahme von Wasser an vier Wehren oberhalb des Pegels
Stein b. Altenmarkt	Traun	Lage der Pegel in stärker bevölkertem Gebietsanteil; Das Abschätzen des Hochwasserrisikos ist hier von hoher Bedeutung
Siegsdorf	Weisse Traun	Ursprungsgebiet unter wahrscheinlicher Abfluss- oder Zuflussbeeinträchtigung durch Karstgebilde
Fritz a. Sand	Weisse Traun	Ausfluss des Chiemsees; Ermöglicht die Beobachtung des Ausflussverhaltens
Seebruck	Alz	Zweitgrößtes Teileinzugsgebiet; Ermöglicht die Beobachtung des Zuflusses aus dem österreichischem Gebietsanteil
Staudach	Tiroler Ache	Beeinflussung des Abflusses durch den Prienkanal
Prien	Prien	Kleinstes Teileinzugsgebiet mit beobachtetem Abflussverhalten
Bergen	Bergen	

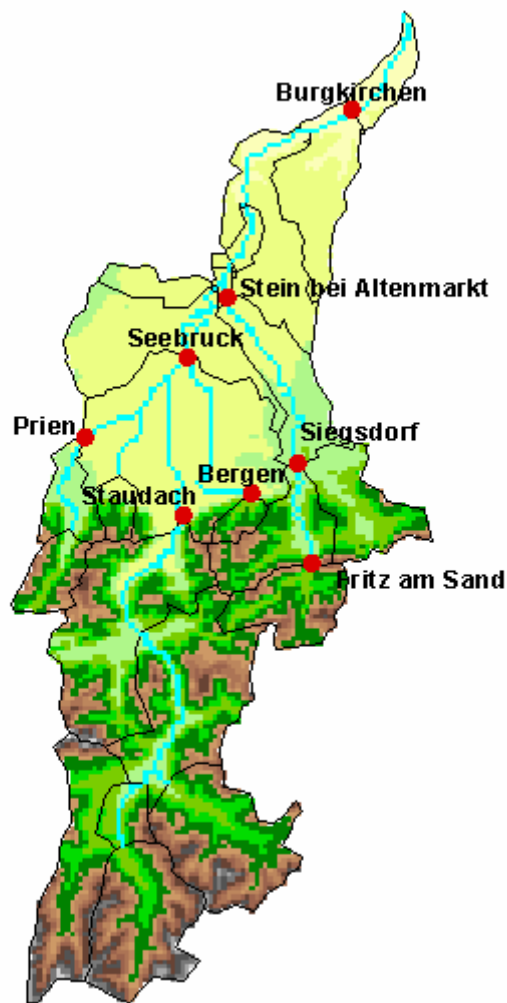


Abbildung 3: Höhenmodell und Teileinzugsgebiete für die hydrologische Modellierung mit verwendeten Kalibrierungspegeln

Im Anhang A findet sich eine Übersicht über alle Teileinzugsgebiete, deren Lage (Abb. A1) sowie Zuflüsse und Größen der Teilgebiete (Tab A1).

Das Abflussverhalten im Alzgebiet wird zum Teil durch vorhandene, wirtschaftlich genutzte Wehre und dem Chiemsee beeinflusst. Dies kann bei der Modellierung mitberücksichtigt werden. Die hierfür am LfU Bayern sowie Wasserwirtschaftsamt Traunstein vorliegenden, umfangreichen Daten wurden uns zur Verfügung gestellt. Eine Systemskizze zur Speicherbewirtschaftung findet sich im Anhang A (Abb. A2), ebenso Volumen-Abfluss-Beziehungen für den Chiemsee (Tab. A2) sowie und Restwasserführungen in der Alz und erlaubte Wasserentnahmen.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verwendete Modellkonfiguration, im Einzelnen über die modellinterne Interpolation und Korrektur der meteorologischen Eingangsdaten sowie über die Modellansätze für Verdunstung, Schneespeicher,

Interzeption, Perkolation und Saugspannung, Seewasserhaushalt und Grundwasserbewegung.

Tabelle 2: *Verwendete Modellkonfiguration (IDW: Inverse-Distance-Weighting Interpolation)*

	Teilmodell	verwendeter Ansatz
1	Interpolation der Meteodaten: - Niederschlag - Lufttemperatur	- Kombination IDW+Regress (IDW: 85%) - Kombination IDW+Regress (IDW: 40%)
2	Niederschlagskorrektur	Getrennte Korrektur für flüssigen und festen Anteil
3	Strahlungskorrektur	Korrektur nach Hangneigung und Exposition (auch für Lufttemperatur)
4	Verdunstungsmodell	Penman-Monteith-Methode
5	Schneemodell	Temperatur-Wind-Index-Verfahren
6	Interzeptionsmodell	Speichermodell
7	Seenmodell	Bilanzverfahren
8	Bodenmodell	Richards-Ansatz
9	Grundwassermodell	Finite-Differenzen-Verfahren
10	Routing-Modell	Translation-Retention mit Berücksichtigung von Ableitungs- und Speicherregeln

3.5 Kalibrierung des hydrologischen Modells auf Tageszeitschritte

Ziel bei der Kalibrierung ist, das verwendete Computermodell bestmöglich an die in der Natur beobachteten und gemessenen Größen, in der hydrologischen Simulation meist des gemessenen Abflusses, anzupassen. Diese Kalibrierung muss auch bei physikalisch basierten Modellen durchgeführt werden, da diese ebenfalls empirische Ansätze sowie Parameter, zu denen keine Messwerte vorhanden sind, enthalten.

Eine Modellkalibrierung wird im allgemeinen so vorgenommen, dass für weniger sensitiv reagierende Modellteile die Parameter aus bereits modellierten, hydrologisch ähnlichen Gebieten übernommen werden und nur jene Teilmodelle eine Kalibrierung erfahren, deren Parameter stark von den Eigenschaften des zu untersuchenden Gebietes beeinflusst werden.

Die Kalibrierung des Modells erfolgte für das Jahr 1997 durch kontinuierliche Simulationen im Tageszeitschritt. Zur Kalibrierung des Modells konnte kein Zeitraum aus den Jahren 1961-1990 gewählt, da die Datenbasis dies nicht erlaubt. Für die Jahre 1990-2005 lagen die besten verfügbaren Daten vor.

Die Kalibrierung wurde für die hydrologischen Jahre 1991-1997 durchgeführt, wobei eine 6-jährigen Initialisierungsperiode (1991 – 1996) für die Speicherfüllung (z.B.

Bodenfeuchte, Schneespeicher) und die Lage des Grundwasserstandes benutzt wurde. Das Jahr 1997 war danach das eigentliche Kalibrierungsjahr.

Im aktuellen Projekt wurde die Kalibrierung manuell mit mehreren Vorwärtsläufen durchgeführt. In Tab.3 sind die zu kalibrierenden Parameter mit den gültigen Wertebereichen dargestellt.

Tabelle 3: Empirische Parameter mit gültigen Wertebereichen

	Parameter	Wertebereich
dr	Entwässerungsdichte	0 - 40
kd, ki	Retentionskonstanten für Direktabfluss und	5 – 250 h
k_sat	Interflow	variiert bis Faktor 100
PMacroThresh	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	1 – 2 mm/h
MacroCapacity	Schwellwert des Makroporenabflusses	2 – 10 mm/h
kol	Kapazität der Makroporen	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶ m/s
	Kolmation des Flussnetzes	

Bei der Parametrisierung des Boden- und Grundwassermodells konnte auf die Ergebnisse des KLIWA-Projektes WHM Alz zurückgegriffen werden. Diese erfolgte unter Verwendung der vorliegenden pedologischen und hydrogeologischen Datenbasis. Aufbauend auf dieser Datenbasis wurden Bodenhorizonte ausgegliedert und parametrisiert sowie Angaben zu horizontalen Leitfähigkeiten im Untergrund bestimmt. Das Grundwassermodell wurde mit einem ungespannten Grundwasserleiter (Grundwasserstockwerk) betrieben.

Ein Maß für die Richtigkeit der simulierten Modellergebnisse, z.B. bei dem Vergleich von modelliertem Abfluss gegenüber gemessenem Abfluss, ist die Modellgüte. Bei der hydrologischen Modellierung wird die Modellgüte meist durch die Nash-Sutcliffe Modelleffizienz (NSE) angegeben. Sie berechnet sich mit dem gemessenen (Q_{OBS}) und simuliertem Abfluss (Q_{SIM}) über alle n Zeitschritte i des Modells wie folgt:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,OBS} - Q_{i,SIM})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{Q_{OBS}} - Q_{i,SIM})^2} \quad [-\infty \dots 1] \quad (Gl.1)$$

Der Wertebereich liegt zwischen $-\infty$ und 1. Ein NSE von 1 bildet dabei eine perfekte Übereinstimmung von modelliertem und gemessenem Abfluss ab. Liegt der NSE im

positiven Bereich, ist das Modellergebnis besser als der Mittelwert des gemessenen Abflusses. Dieses Gütemaß bildet vor allem die Fähigkeit des Modells ab, die Abflussspitzen zu simulieren. Dies ist im Hinblick auf die Modellierung von Hochwasserspitzen mit einem hydrologischen Modell zielführend. Zur Bestimmung der Güte des Basisabflusses wird das NS-Kriterium logarithmiert (NSE_{\log}) berechnet.

Um eine ausreichende Datenbasis für die Abschätzung des aktuell besten Parametersatzes zu gewährleisten, wurden pro Iteration der Kalibrierung zwischen 20 und 96 WaSiM Läufe gleichzeitig durchgeführt. Da die Parameter dr und ki sich in Kombination auf den gleichen Teil der Abflusskurve auswirken, wurden diese gleichzeitig angepasst. Abb. 4 zeigt ein Zwischenergebnis dieser Kalibrierung am Pegel Fritz a.S., resultieren aus 72 WaSiM-Läufen.

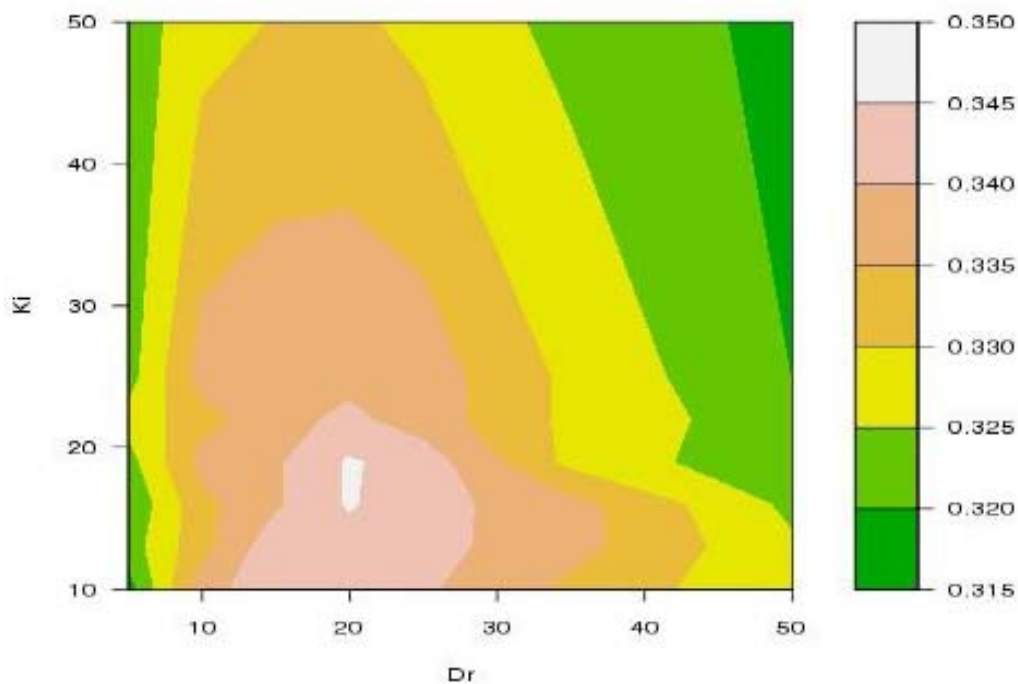


Abbildung 4: Zwischenergebnis der Kalibrierung im Teileinzugsgebiet Fritz a.S., $\log NSE$ in Abhängigkeit von Drainagedichte dr und Speicherkoeffizient für den Interflow ki

Auf dieser Datenbasis konnten optimale ki und dr -Werte ermittelt werden, die als Grundlage für die weitere Kalibrierung verwendet wurden.

3.6 Ergebnisse der WaSiM-Kalibrierung für die Alz

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kalibrierung des hydrologischen Modells für das Alz-Einzugsgebiet vorgestellt. Generell zeigen die Simulationsergebnisse gute Übereinstimmungen mit gemessenen Abflusskurven (siehe Abb. 5).

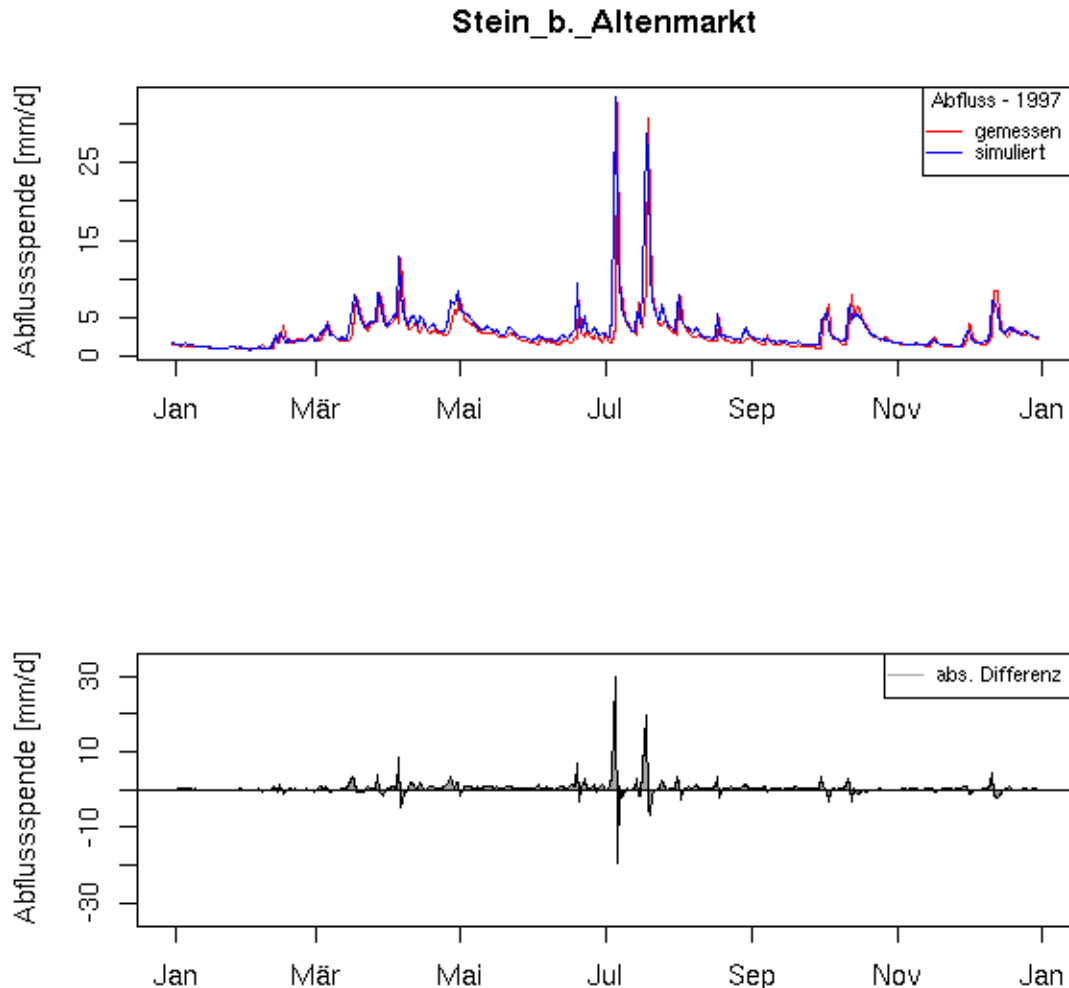


Abbildung 5: Simulierte und gemessene Abflussganglinie des Pegels Stein b. Altenmarkt [Traun] für das Jahr 1997. Darstellung der abs. Differenzen zwischen gemessener Abflussspende und simuliertem Abfluss [$\text{mm d}^{-1} \text{ km}^{-2}$].

Die zugehörigen Abbildungen für die sieben anderen kalibrierten Einzugsgebiete finden sich im Anhang A2. Zusätzlich zu den Abflussganglinien ist im unteren Teil der Abbildungen jeweils die absolute Differenz zwischen gemessenem und simuliertem Abfluss aufgetragen. Die Unterschiede in Abb. 5 weisen auf einen zeitlichen Versatz der Kurven zueinander hin. Generell ist die Modellgüte durch die Genauigkeit der Eingangsdaten und deren räumliche Verteilung, vor allem des Niederschlages, limitiert.

Die Güte der Kalibrierung ist für alle EZG in Tabelle 4 dargestellt. Es zeigt sich, dass das Modell in der Lage ist, die Abflussdynamik im Alz-Gebiet gut zuspiegeln. Dies gilt insbesondere für die vergleichsweise wenig anthropogen beeinflussten Pegel Stein b. A. an der Traun, dem Pegel Seebruck am Chiemseeausfluss und des Pegels Staudach an der Tiroler Ache. Der Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten Abflussganglinien zeigt an den Hauptpegeln (Burgkirchen, Seebruck, Staudach und Stein b. A.) für die Kalibrierungsperiode sehr gute lineare und logarithmische Modelleffizienzen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Kalibrierung für das Untersuchungsgebiet und Gütewerte der Anpassung zwischen gemessenen (gem) und simulierten (sim) Abflüssen (NSE: Nash-Sutcliffe-Effizienz, EV: erklärte Varianz) sowie mit Abflussbilanzen (Q: Jahresabflussvolumen, ΔQ : Differenz im Abflussvolumen [absolut; relativ])

Pegel (Gewässer*)	NSE _{lin}	NSE _{log}	EV _{lin}	EV _{log}	Q _{gem} [mm/a]	Q _{sim} [mm/a]	ΔQ_{abs} [mm/a]	ΔQ_{rel} [%]
Ergebnisse mit gemessenen Zuläufen								
Burgkirchen (A)	0.69	0.58	0.71	0.58	144	115	-29	-20
Stein b.A. (T)	0.93	0.90	0.94	0.94	1086	1219	133	12
Siegsdorf (WT)	0.72	0.77	0.72	0.77	1331	1359	28	2
Fritz a. S. (WT)	0.06	0.25	0.12	0.38	1314	1631	317	24
Seebruck (A)	0.93	0.93	0.93	0.93	1031	1071	40	4
Staudach (TA)	0.92	0.93	0.94	0.95	1172	1300	128	11
Prien (P)	0.62	-0.67	0.87	0.62	560	1326	766	137
Bergen (WA)	0.35	0.46	0.35	0.46	1295	1266	-29	-2
Ergebnisse mit simulierten Zuläufen								
Burgkirchen (A)	-2.23	-0.86	-1.47	-0.23	144	350	207	144
Stein b.A. (T)	0.43	0.57	0.46	0.64	1086	1281	195	18
Siegsdorf (WT)	0.23	0.53	0.24	0.55	1331	1501	170	13
Fritz a. S. (WT)	0.10	0.25	0.16	0.38	1314	1628	314	24
Seebruck (A)	-0.06	0.43	0.60	0.86	1031	1479	448	43
Staudach (TA)	0.15	0.52	0.39	0.78	1172	1659	487	42
Prien (P)	-0.05	-1.31	0.30	0.40	560	1465	905	162
Bergen (WA)	0.40	0.49	0.40	0.49	1295	1277	-18	-1

* A: Alz, TA: Tiroler Achen, T: Traun, WT: Weisse Traun, P: Prien, WA: Weisse Achen

Die Analyse der Abflussvolumina weist mehrheitlich auf eine leichte Überschätzung der simulierten Abflüsse gegenüber den beobachteten hin. Besonders auffallend sind die Abflussüberschätzungen im Prien EZG, wo die berechneten Defizite bis zu 162 % betragen. Der gute Wert des linearen NSE zeigt, dass Hochwasserereignisse gut wiedergegeben werden können, während der negative logarithmische NSE die limitierte Aussagekräftigkeit der Simulation für den Basisabfluss widerspiegelt. Dies

deutet entweder auf Verkarstungserscheinungen im Untergrund oder den unterirdischen Zufluss relevanter Mengen an gebietsfremden Wasser hin, der im Modell aufgrund fehlender (Rand-)Informationen nicht berücksichtigt werden kann. Bei der Prien kommt hinzu, dass Flusswasser über den Prienkanal abgeführt wird. Für diese Überleitung liegen keine Ableitungsregeln vor, so dass diese Sondersituation nicht vom Modell-Setup abgebildet werden konnte.

Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen im Winter und Frühjahr könnten auf ungenaue Flächeninterpolationen der Temperatur und deren Auswirkungen auf die Schneeschmelze zurückgeführt werden. Speziell in den alpinen Gebietsanteilen fehlen Temperaturmessungen in mehreren Höhenlagen, unter anderem zur Identifikation von Inversionswetterlagen. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Gesamtwasserbilanz des Alz EZG für das hydrologische Jahr 1997.

Tabelle 5: Jahreswasserbilanz für das gesamte Alz-Einzugsgebiet (2256 km²) für das Kalibrierungsjahr 1997 (N: Niederschlag; ETR: aktuelle Evapotranspiration; Q: Abfluss; ΔS : Speicheränderung mit $\Delta S = N - ETR - Q$; QDIR: Direktabfluss, QINT: Interflow, QBAS: Basisabfluss) (alle Angaben in mm/a)

N	ETR	Q	ΔS	GWN ¹	QDIR	QINT	QBAS
1600	333	1258	9	332	210	615	433

¹ Netto-Grundwasserneubildung: Bilanz der nach unten und oben gerichteten Flüsse zwischen ungesättigter und gesättigter Zone

3.7 Validierung des Alz-Setups durch Langzeitsimulationen

Die Verifizierung oder Validierung eines kalibrierten Modells dient dazu, die Gültigkeit für andere als bei der Kalibrierung verwendete Zeiträume und Systembelastungen zu prüfen und zu bewerten. Im Rahmen der Verifizierung werden Modellrechnungen mit gemessenen Eingangsdaten und kalibrierten Parametern durchgeführt und die Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Daten verglichen. Anhand ausgewählter Prüfgrößen werden Bewertungen vorgenommen, ob das kalibrierte Modell übertragbar und gültig für mögliche andere Systembelastungen ist.

In der vorliegenden Studie erfolgte die Verifizierung des kalibrierten Modells durch kontinuierliche, auf Tagesschritte basierenden, Modellrechnungen für das Jahr 1995. Daneben wurde eine Modellverifizierung über eine Langzeitsimulation (1995-2004) durchgeführt. Dieser Zeitraum ist besonders interessant, da im Jahr 2002 sehr große

Hochwasserereignisse aufgetreten sind, während 2003 einen außergewöhnlich trockenen Sommer hatte. Die Ergebnisse der Modellverifizierung und Langzeitsimulation werden im Folgenden gezeigt. Es wurde jeweils ein 5-jähriger Vorlauf (1990-1994) für die Initialisierung verwendet. Ausgewählte Ergebnisse der Langzeitsimulation 1995-2004 sind in Abb. 5 und Abbildung 6 zu finden. Diese zeigen an den Pegeln Siegsdorf und Staudach gute Übereinstimmungen zwischen modellierten und gemessenen Abflusskurven.

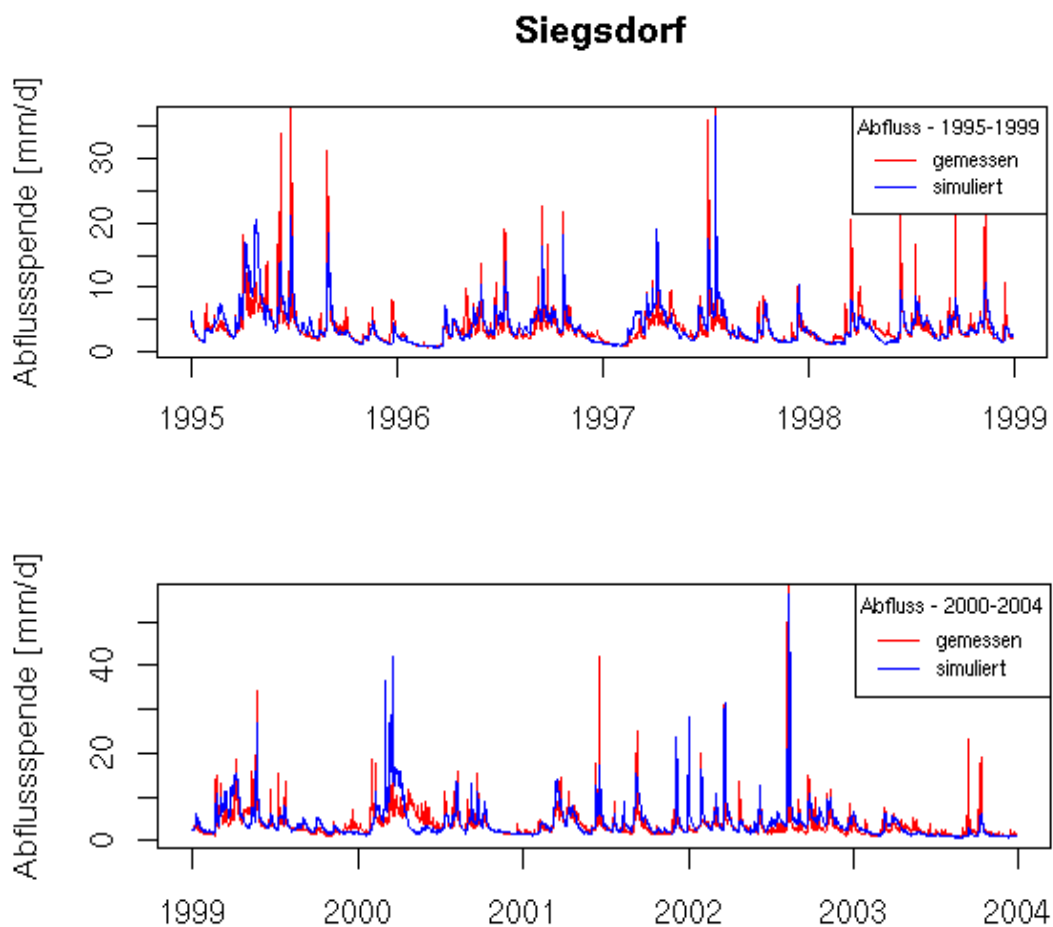


Abbildung 5: Ergebnis der Validierung für den Pegel Siegsdorf [Traun] für die Jahre 1995-1999 (a) und 2000-2004 (b). Dargestellt sind die gemessenen und simulierten Abflüsse [mm/d].

Staudach

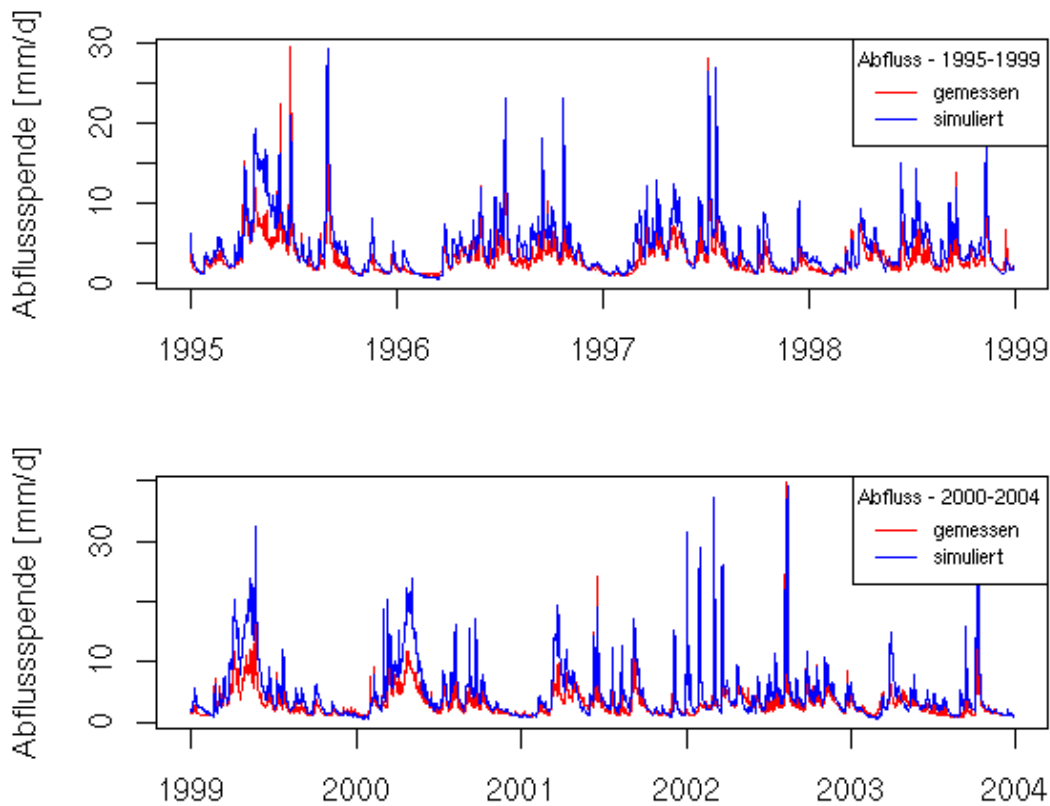


Abbildung 6: Ergebnis der Validierung für den Pegel Staudach [Tiroler Ache] für die Jahre 1995-1999 (a) und 2000-2004 (b). Dargestellt sind die gemessenen und simulierten Abflüsse [mm/d].

Die Gütekriterien sowie gemessenen und simulierte Abflussvolumina finden sich für alle kalibrierten Einzugsgebiete für die Modellverifizierung und die Langzeitsimulation in Tabelle 6. Die guten Gütewerte der Kalibrierung konnten hier nur zum Teil erreicht werden. Betrachtet man allerdings die Abflussvolumina, so ist eine gute Übereinstimmung zu finden. So liegt die Abweichung des Gesamtabflusses bei 5 von 8 Einzugsgebieten unter 10%. Wie in der Kalibrierung zeigt sich ist die Überschätzung des Abflusses am Pegel Prien auch in den hier vorgestellten Simulationen.

Tabelle 6:: Ergebnisse der Validierung des hydrologischen Modells für das Alz-Gebiet

Pegel (Gewässer*)	NSE _{lin}	NSE _{log}	EV _{lin}	EV _{log}	Q _{gem} [mm/a]	Q _{sim} [mm/a]	ΔQ _{abs} [mm/a]	ΔQ _{rel} [%]
MODELLValidierung (1995)								
Burgkirchen (A)	-1.02	0.43	-0.48	0.51	305	591	286	94
Stein b.A. (T)	0.41	0.54	0.43	0.59	1411	1615	204	14
Siegsdorf (WT)	0.24	0.48	0.25	0.49	1692	1818	126	7
Fritz a. S. (WT)	-0.24	-0.77	-0.24	-0.69	1896	1884	-12	-1
Seebruck (A)	0.16	0.68	0.53	0.88	1395	1825	430	31
Staudach (TA)	0.26	0.63	0.41	0.77	1429	1911	482	34
Prien (P)	-0.12	-0.75	0.27	0.48	838	1849	1011	121
Bergen (WA)	0.17	0.13	0.19	0.18	1905	1716	-189	-10
Langzeitsimulation (1995-2004)								
Burgkirchen (A)	-3.50	-0.47	-2.63	-0.06	179	424	244	136
Stein b.A. (T)	0.12	0.37	0.17	0.43	1112	1323	211	19
Siegsdorf (WT)	0.09	0.31	0.09	0.31	1376	1445	69	5
Fritz a. S. (WT)	-0.10	0.18	-0.09	0.19	1435	1529	94	7
Seebruck (A)	-0.42	0.43	0.16	0.74	1155	1589	434	38
Staudach (TA)	-0.42	0.37	-0.13	0.56	1207	1714	507	42
Prien (P)	-0.26	-1.05	0.17	0.45	617	1503	886	144
Bergen (WA)	0.08	0.07	0.09	0.10	1469	1344	-125	-8

* A: Alz, TA: Tiroler Achen, T: Traun, WT: Weiße Traun, P: Prien, WA: Weisse Achen

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse der Kalibrierung, Validierung und der Langzeitsimulation, dass das hydrologische Wasserhaushaltsmodell WaSiM für das Einzugsgebiet der Alz belastbare Ergebnisse produzieren kann. Daraus begründet sich die Anwendbarkeit auf meteorologische Klimasimulationsdaten zur Abschätzung der Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt der Alz.

3.8 Aufbereitung und Biaskorrektur der meteorologischen Daten aus den MM5-Klimasimulationen

Für die Quantifizierung der Auswirkung der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt der Alz wurden die MM5-Klimasimulationsdaten aus dem Deutschen Klimaforschungsprogramm (DEKLIM) genutzt, die bereits in MARX et al. (2008a) statistisch für die Region CISBL untersucht wurde. Die horizontale Auflösung der Daten beträgt 19.2km. Als Antriebsdaten für das regionale Modell MM5 wurden REMO 1° Daten aus ECHAM4/T106 genutzt. Dabei wurde der anthropogene Einfluss durch das IPCC Emissionsszenario B2, bei dem von einer kontinuierlich wachsenden Weltbevölkerung, die wirtschaftlichem Wachstum mit nachhaltigen, lokalen Lösungsansätzen entgegentritt, berücksichtigt.

Die Temperaturdaten aus diesen regionalen Klimaszenarien wurden ins WaSiM-Tabellenformat überführt.

Bei der Untersuchung der Niederschlagsdaten wurde ein Vergleich des langjährigen statistischen Mittels der mittleren Monatsniederschläge und des Jahresniederschlags durchgeführt. Dazu standen insgesamt 16 Stationen mit langjährigen Beobachtungsdaten 1961-1990 zur Verfügung. Dabei hat sich gezeigt, dass

- der Jahresverlauf des Niederschlags im Klimamodell (Saisonalität) nicht optimal reproduziert wird und
- das Klimamodell den gemessenen Niederschlag in der Region unterschätzt.

So liegt das Maximum der Niederschlagsmenge im Monatsmittel im Februar und nicht wie in den Beobachtungsdaten in den Sommermonaten Juni bis August.

Da die Reproduktion des Abflussregimes mit einem Wasserhaushaltsmodell sowohl von der absoluten Menge des Niederschlags als auch von deren Jahresverteilung abhängt, wurde eine monatsbasierte Biaskorrektur der MM5-Daten nach Kunstmann et al. (2004) durchgeführt.

Aus den langjährigen Monatsmitteln aus Beobachtungen und der Klimasimulation konnten so Skalierungsfaktoren räumlich differenziert bestimmt werden. Aufgrund der limitierten Repräsentativität von Stationsmessungen für den zugehörigen Gridpunkt im Klimamodell wurden die 16 räumlich verteilten Korrekturfaktoren zu einem Korrekturfaktor pro Monat gemittelt (siehe Tab. 7). Aus den Monatskorrekturfaktoren ergibt sich eine mittlere Biaskorrektur mit dem Faktor 1.26, wodurch neben der Konditionierung des Jahresganges auch der Bias im Jahresniederschlag beseitigt wurde.

Tabelle 7: Monatliche spezifische Korrekturfaktoren für den Niederschlag aus den MM5-Klimasimulationen für die Region Chiemgau

Monat	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.
Faktor	0.79	0.59	0.79	1.14	1.42	1.77	2.12	2.3	1.36	1.12	0.96	0.81

Anhand dieser Faktoren wurden dann jeweils für die Zeitscheiben 1960-89 und 2070-99 eine Korrektur der Niederschlagsdaten durchgeführt.

Abb. 7 zeigt monatliche Niederschlagssummen gemittelt über 30 Jahre von 1960 bis 1989. In der Darstellung sind die gemessenen Niederschläge rot und die Werte des Niederschlags aus der Klimasimulation blau dargestellt. Auf der Sekundärachse in

schwarz sind die Korrekturfaktoren sowie in grün die resultierenden, konditionierten Niederschläge aus der Klimasimulation 1960-89 dargestellt.

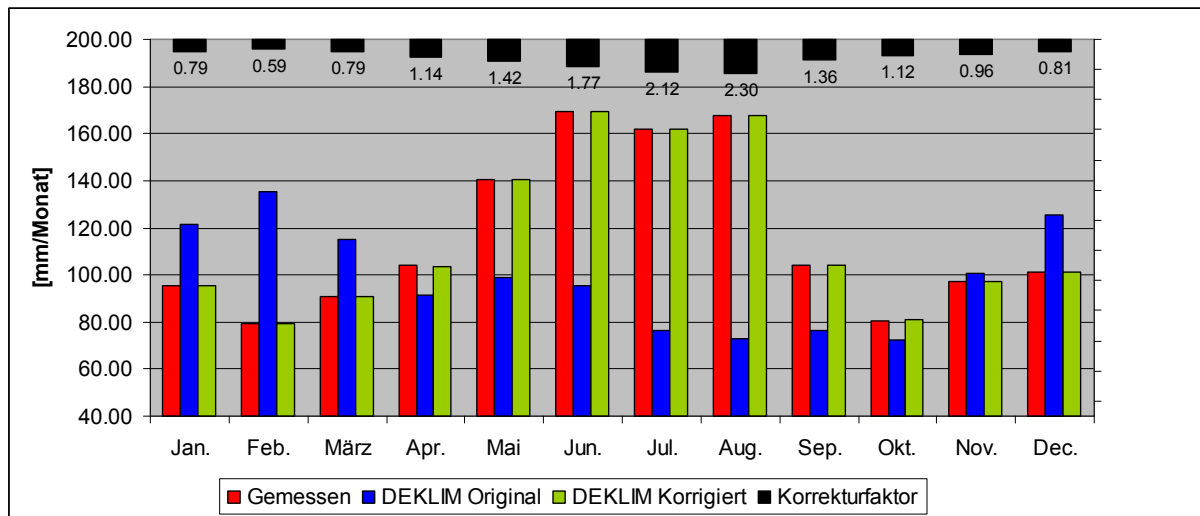


Abbildung 7: Monatliche Niederschlagsmenge [mm/Monat] gemittelt über 30 J. und berechnete Niederschlagskorrekturfaktoren der einzelnen Monate.

4 Ergebnisse der kombinierten Klimasimulation-Wasserhaushaltssimulation

4.1 Vorgehensweise

Für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Untersuchungsgebiet wurden zwei Zeitscheiben von jeweils 30 Jahren, von 1960-1989 für die Vergangenheit und 2070-2099 in der Zukunft simuliert. Dazu wurden die DEKLIM-Klimadaten (siehe Abschnitt 3.8) mit einer Auflösung von 19.2 km in der Wasserhaushaltssimulation verwendet. Dabei wurden die Klimadaten durch abstandsgewichtete Interpolation in Kombination mit einer Höhenregression an das Einzugsgebiet der Alz, das in einer Auflösung von 500m simuliert wird, angepasst. Durch die Höhenregression wird dem großen Höhengradienten von rund 2000 hm (359 m – 2328 m), den das Untersuchungsgebiet aufweist, Rechnung getragen. Die resultierenden mittleren Temperaturen finden sich in Abb. 7.

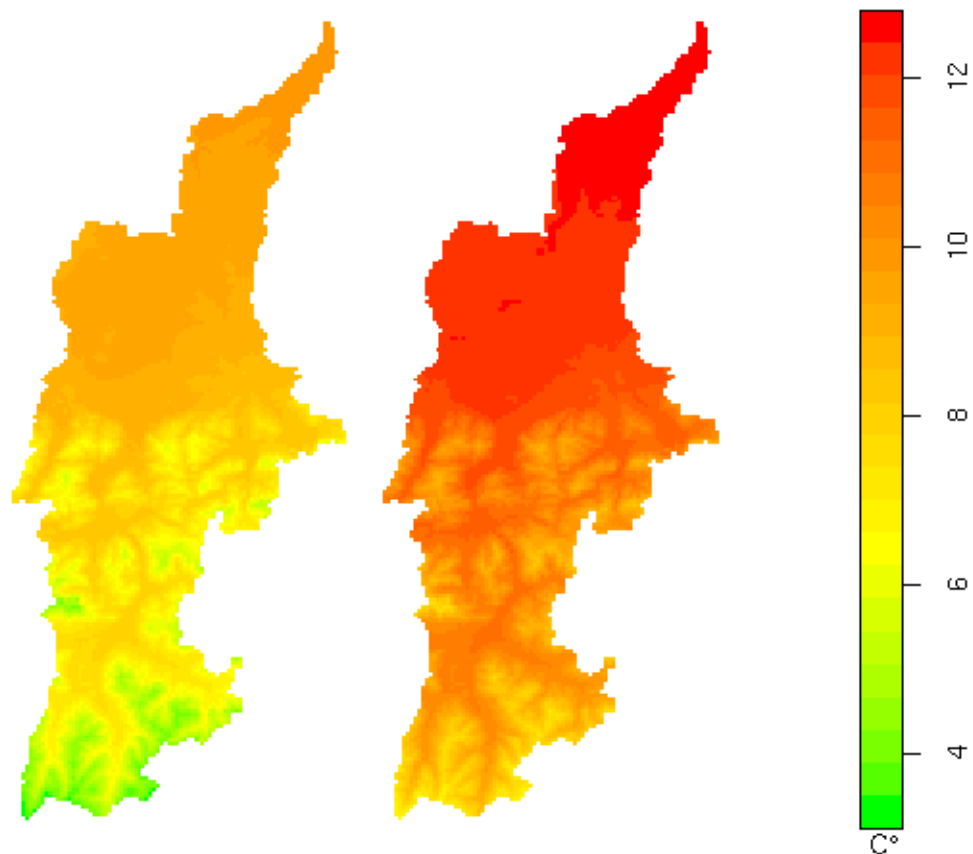


Abbildung 7: Mittlere Jahrestemperatur [°C] für die Zeiträume 1960-89 (li) und 2070-99 (re.)

Beim Vergleich der mittleren Temperatur zeigt sich die zukünftige Zunahme um 2.8°C im Norden und 3.4°C im Süden des EZG (vgl. auch Abb. A14).

Wie schon bei der Temperatur weist der mittlere Niederschlag in der Vergangenheits- und Zukunftszeitscheibe (Abb. 8) im Vergleich zu aus Beobachtungen abgeleiteten Niederschlagsfelder (Abb. A10) ähnliche Muster auf.

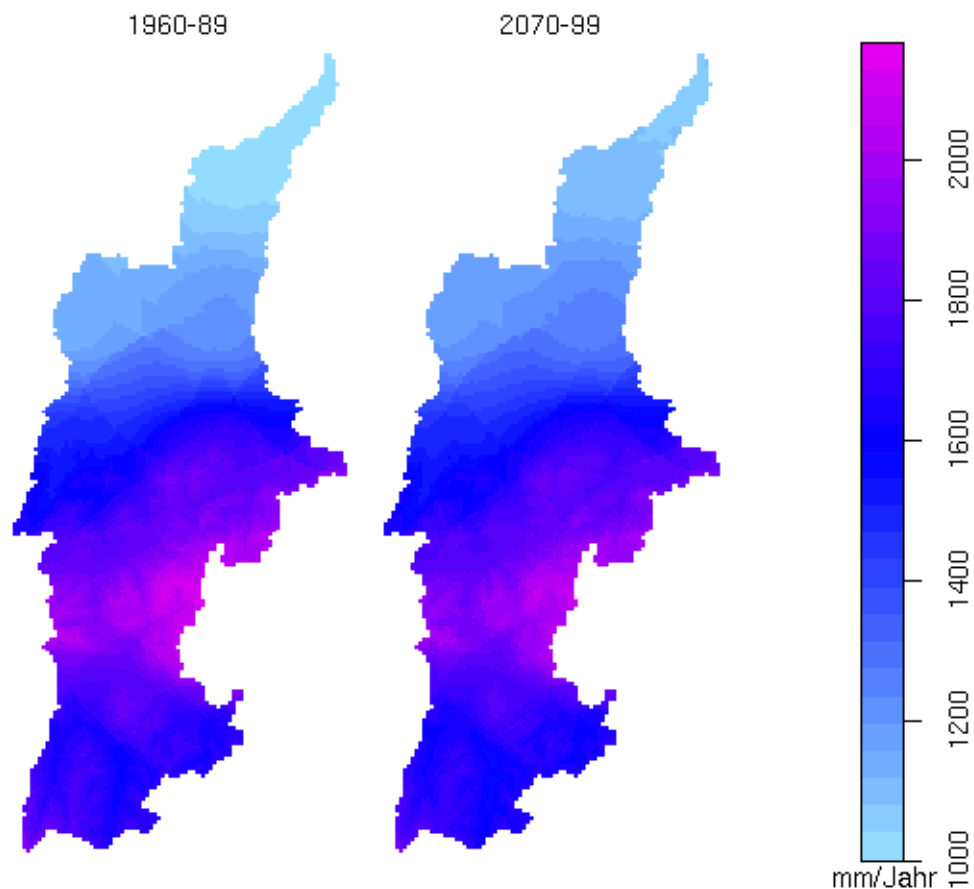


Abbildung 8: Mittlerer Jahresniederschlag der Zeiträume 1960-89 (li) und 2070-99 (re.)

Hierbei ist deutlich das Niederschlagsmaximum im Staubereich, dem Übergangsbereich von Alpenvorland zu den Alpen, erkennbar. In südlicher Richtung ist wiederum ein alpiner Abschattungsbereich, verbunden mit einer Niederschlagsabnahme, zu beobachten. Abb. A15 zeigt die zukünftige Änderung des mittleren Jahresniederschlages, der im nördlichen Teil des EZG um bis zu 6% zunimmt, während im alpinen Teil eine leichte Niederschlagsabnahme um bis zu 2.5% auftritt. Im Folgenden werden die klimasimulationsbasierten hydrologischen Modellierungsergebnisse gezeigt.

4.2 Ergebnisse der hydrologischen Modellierung

4.2.1 Potentielle und reale Evapotranspiration im Jahresmittel

Wasserhaushaltssimulationen liefern neben Informationen über den Abfluss auch alle weiteren Komponenten der Wasserbilanz. Eine nicht zu unterschätzende Verlustgröße ist hierbei die Verdunstung. Abbildung 9 zeigt die flächenhafte Verteilung der potentiellen, also der maximal möglichen Evapotranspiration.

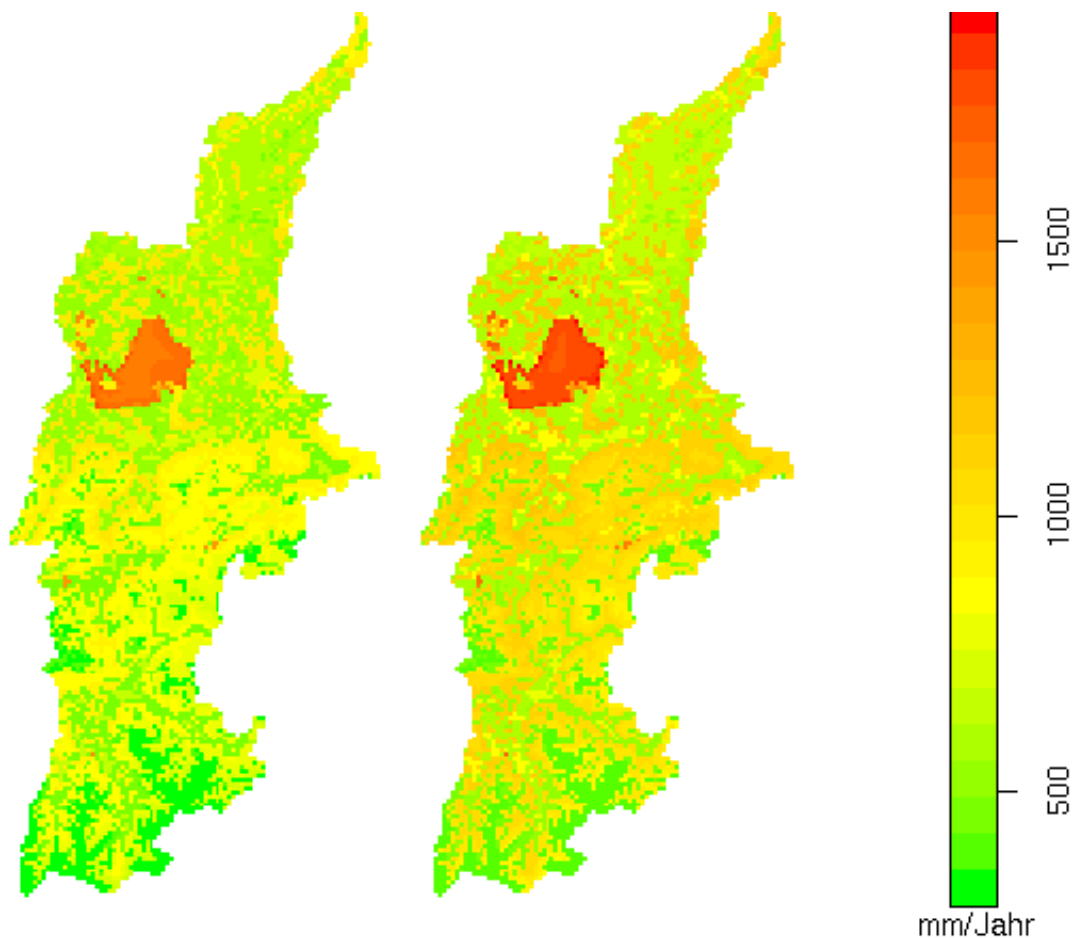


Abbildung 9: Mittlere potentielle Jahresevapotranspiration der Zeiträume 1960-89 (li) und 2070-99 (re.)

Neben der Temperatur wirkt sich vor allem die Oberflächenalbedo, die im hydrologischen Modell über den Landnutzungstypen und die Jahreszeit parametrisiert wird, auf die potentielle Evapotranspiration aus. Zukünftig ist, bedingt durch höhere mittlere Temperaturen und Temperaturextreme, mit bis zu 30 % höherer potentieller Evaporation in den Gipfelbereichen zu rechnen. In Richtung Burgkirchen im Norden des EZG nimmt dieser Trend bis auf eine 10%ige Zunahme

ab. Ein Änderungssignal durch eine sich ändernde zukünftige Landnutzung konnte nicht simuliert werden, da hierzu keine Zukunftsszenarien vorliegen.

Die reale Evaporation ist durch die Wasserverfügbarkeit, vor allem im Oberboden und der Vegetation, begrenzt. Abbildung 10 zeigt einen Vergleich der realen jährlichen Verdunstungshöhe in der Vergangenheits- und Zukunftszeitscheibe.

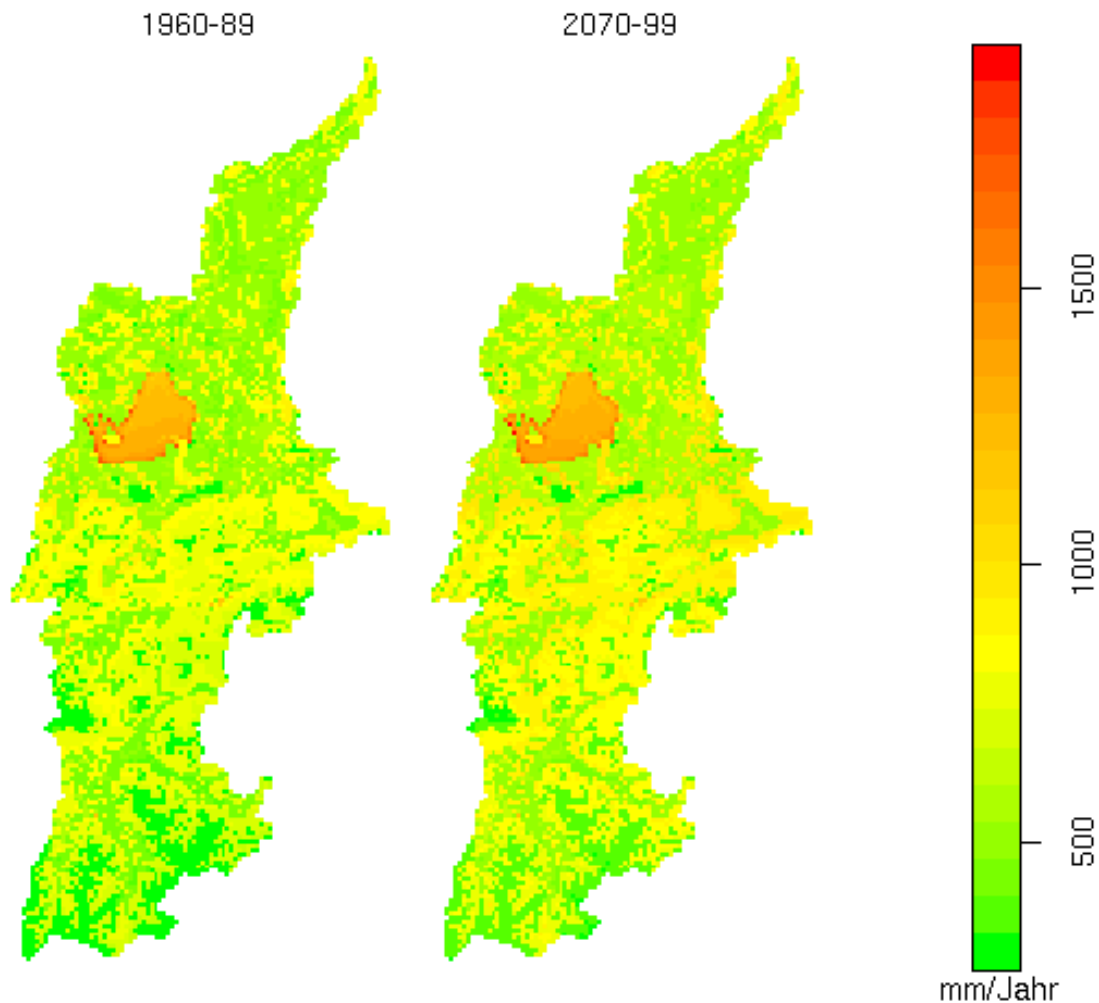


Abbildung 10: Mittlere reale Jahresevapotranspiration [mm/a] für die Zeiträume 1960-89 (li) und 2070-99 (re.)

Die Muster der Verdunstung sind sich hierbei ähnlich. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die reale Verdunstung neben der Temperatur- und Bodenartenabhängigkeit auch sensitiv für die Landnutzung ist. Auch hier konnte ein Effekt durch eine Landnutzungsänderung aufgrund fehlender Szenarien nicht quantifiziert werden.

In Abb. 11 ist die Änderung der mittleren realen Jahresevapotranspiration zwischen den Zeiträumen 1960-89 und 2070-99 dargestellt. Hierbei zeigt sich eine deutliche,

ca. 10%ige Zunahme der Verdunstungsverluste in der Zukunftszeitscheibe. An den Rändern des Chiemsees ist eine leichte Abnahme der realen Verdunstung zu beobachten, die auf die verminderte Wasserverfügbarkeit durch einen leichten Rückgang des Seespiegels zurückzuführen ist.

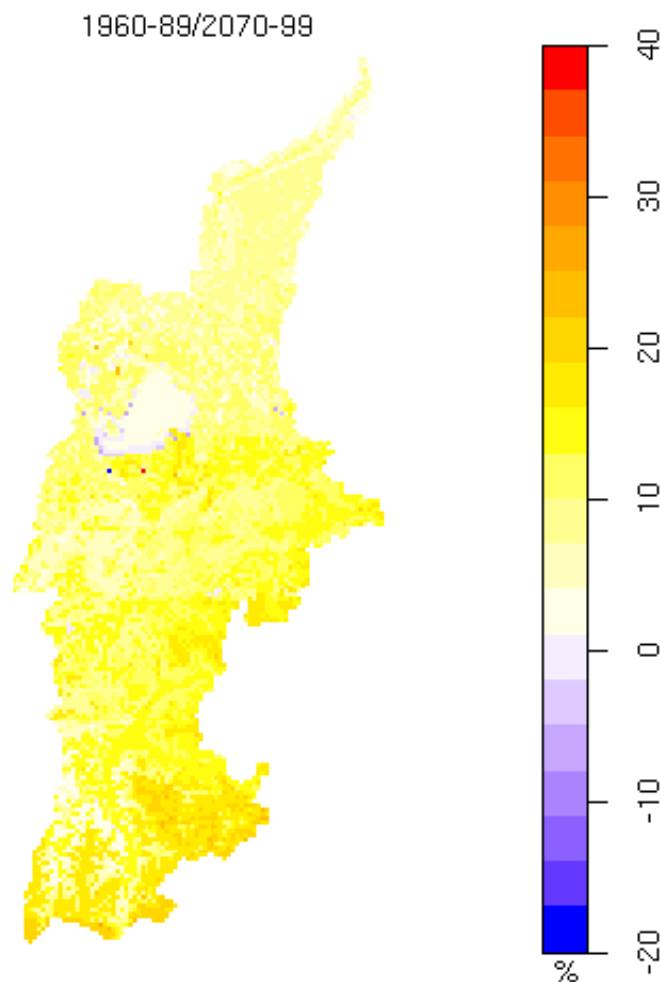


Abbildung 11: Änderung der mittleren relativen realen Jahresevapotranspiration [%] zwischen den Zeiträumen 1960-89 und 2070-99

4.2.2 Veränderung des Schneespeichers und Tage mit Schneebedeckung

Aufgrund der zukünftig höheren Temperaturen ist mit einem Rückgang der Schneemenge und der Tage mit Schneebedeckung zu rechnen. In der Analyse der Klimasimulation (Marx et al. 2008a) konnte bereits gezeigt werden, dass die zukünftige Temperaturerhöhung ein räumliches Maximum im alpinen Bereich hat.

In Abb. 12 ist der resultierende Rückgang des mittleren jährlichen Schneespeichers aus den Wasserhaushaltssimulationen in der Zukunftszeitscheibe dargestellt. Hier zeigt sich ein dramatischer Rückgang der schneebedeckten Fläche und ein Rückzug in die höheren Bergregionen (>1100 m ü.NN). Weite Teile der Talbereiche bleiben schneefrei. Insgesamt ist ein Rückgang des Schneespeichers um bis zu 70 % zu beobachten.

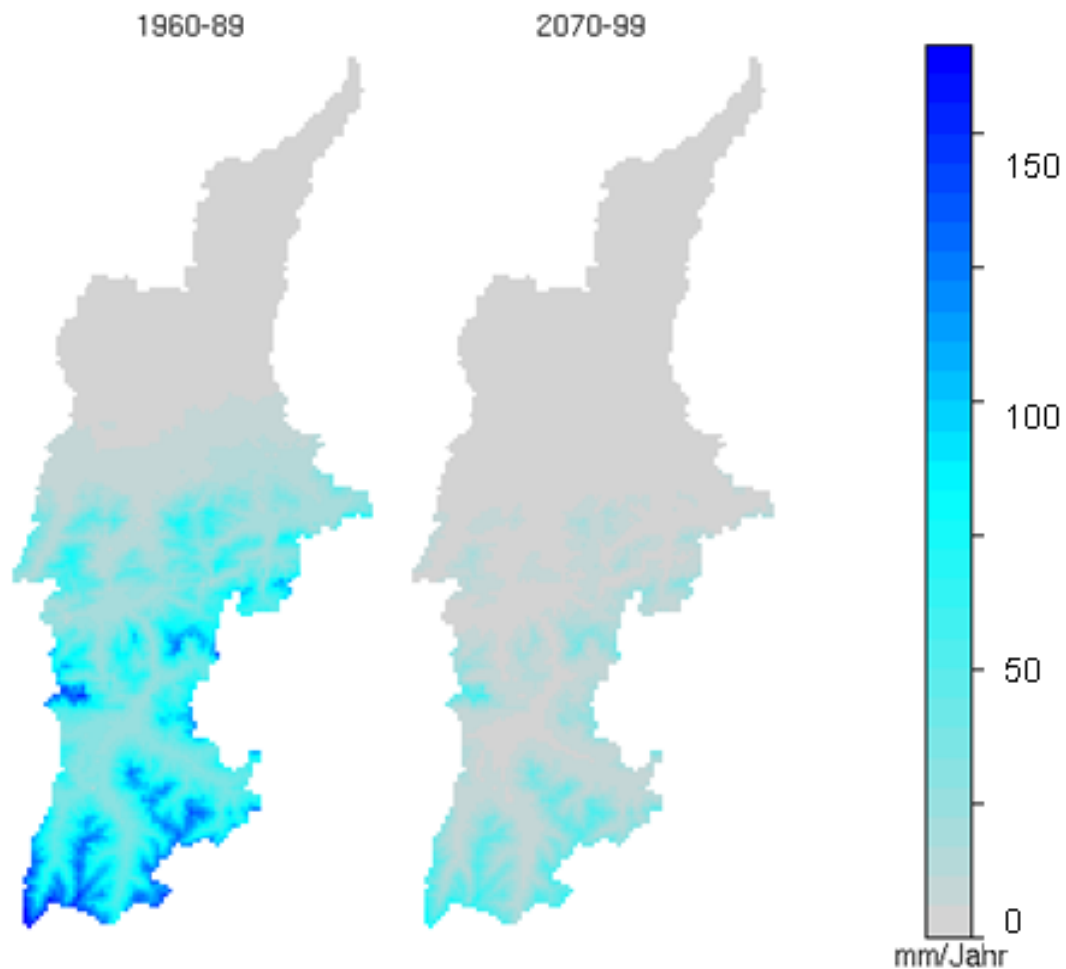


Abbildung 12: Mittlere jährliche Schneebedeckung aus der klimasimulationsbasierten Wasserhaushaltsmodellierung

In Abbildung 13 ist der zukünftige Rückgang der Tage mit Schneebedeckung dargestellt. Der Rückgang um bis zu 48 Tage in den voralpinen, niedrig gelegenen Bereichen bedeutet, wie auch schon in Abb. 12 erkennbar, praktisch eine winterliche Schneefreiheit. In den alpinen Einzugsgebieten ist ein Rückgang um durchschnittlich 45 Tage festzustellen, der in absoluten Schneetagen von bis zu 150 Tagen resultiert. Diese maximalen Schneetage finden sich jedoch nur in den höhergelegenen

Bergregionen (>1100 m ü.NN) und nicht, wie in Abb. 13 dargestellt, im jeweiligen gesamten Teileinzugsgebiet.

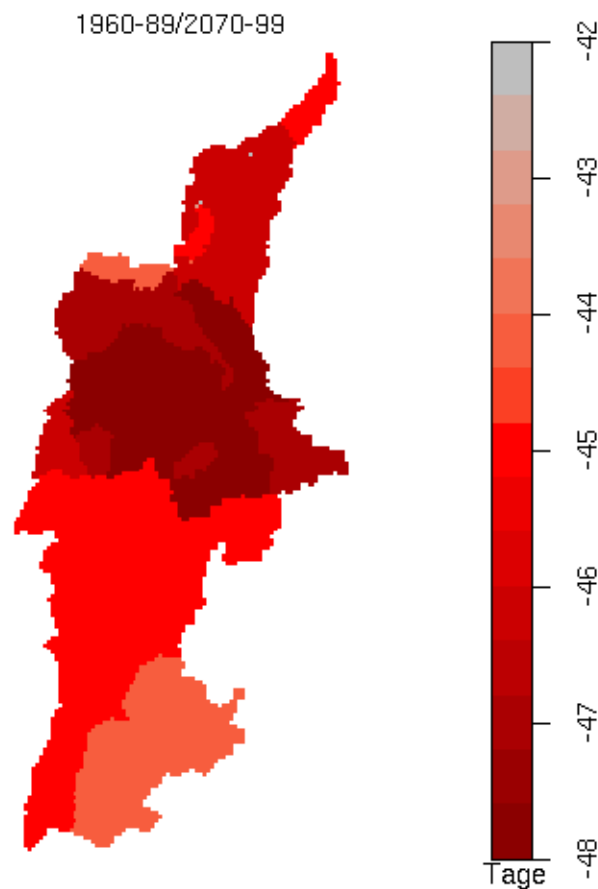


Abbildung 13: Rückgang der zukünftigen Tage mit Schneebedeckung im Einzugsgebietsmittel

Die gezeigten Veränderungen des Schneespeichers wirken sich vor allem auf die winterlichen und frühjährlichen Abflussganglinien aus. Im Folgenden werden die Auswirkungen der Klimaänderung auf das Abflussverhalten im Alz-EZG gezeigt.

4.2.3 Auswirkung der Klimaänderung auf den Abflussjahrgang

Zur Quantifizierung der Auswirkung der Klimaänderung wurden die Abflüsse der klimasimulationsbasierten Wasserhaushaltssimulationen für die Vergangenheitszeitscheibe 1960-89 und der Zukunftszeitscheibe 2070-99 ausgewertet. Im ersten Schritt wurden die mittleren Monatsabflüsse berechnet und in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt.

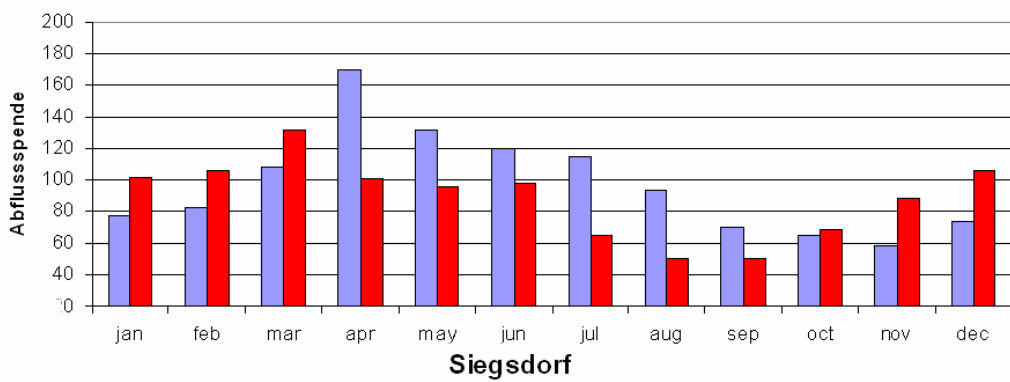
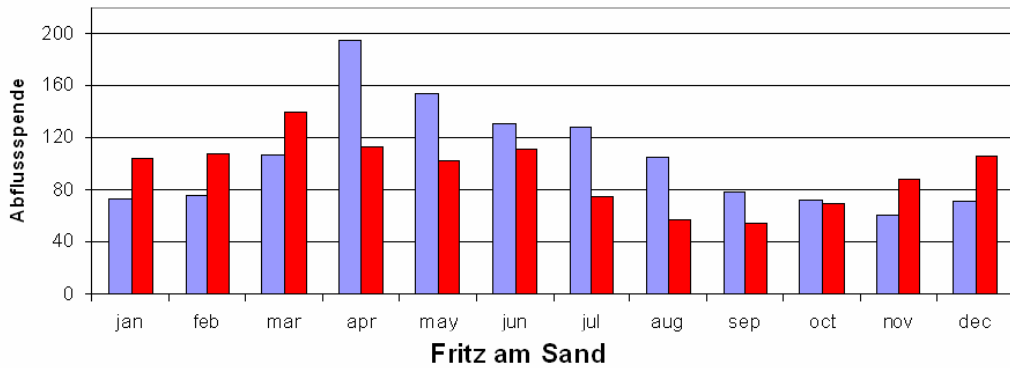
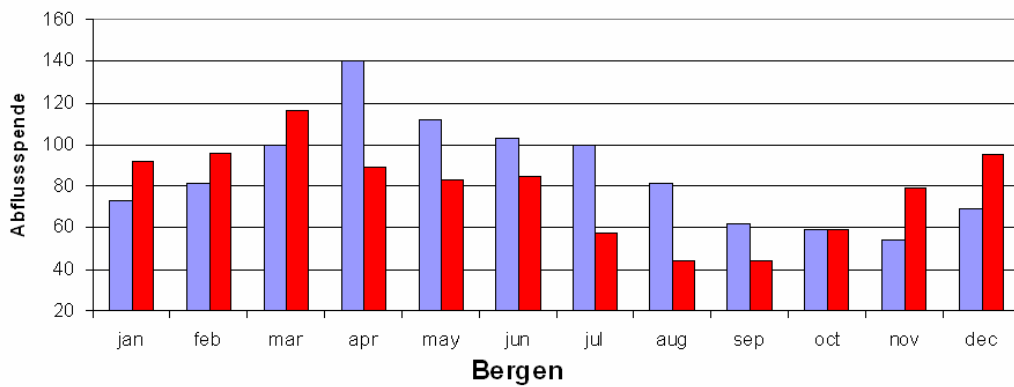
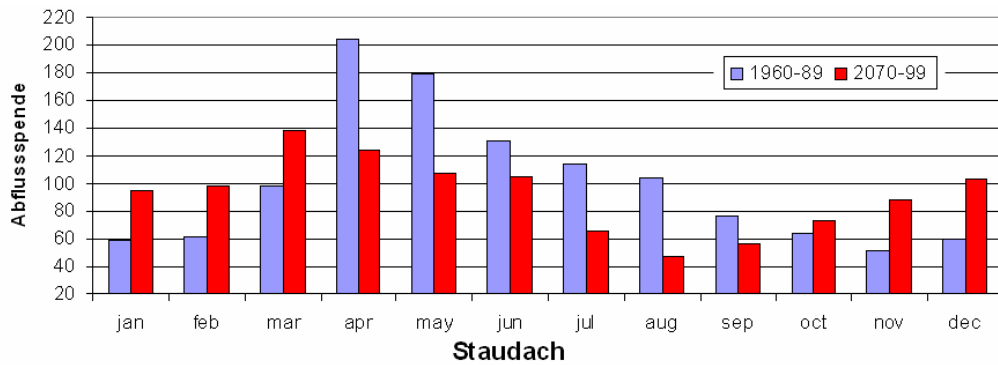


Abbildung 14: Mittlere monatliche Abflusspende [$\text{mm d}^{-1} \text{km}^{-2}$] für die stark alpin beeinflussten Einzugsgebiete, aus WaSim-Simulationen mit DEKLIM-Klimaantriebsdaten gerechnet; Erläuterung im Text.

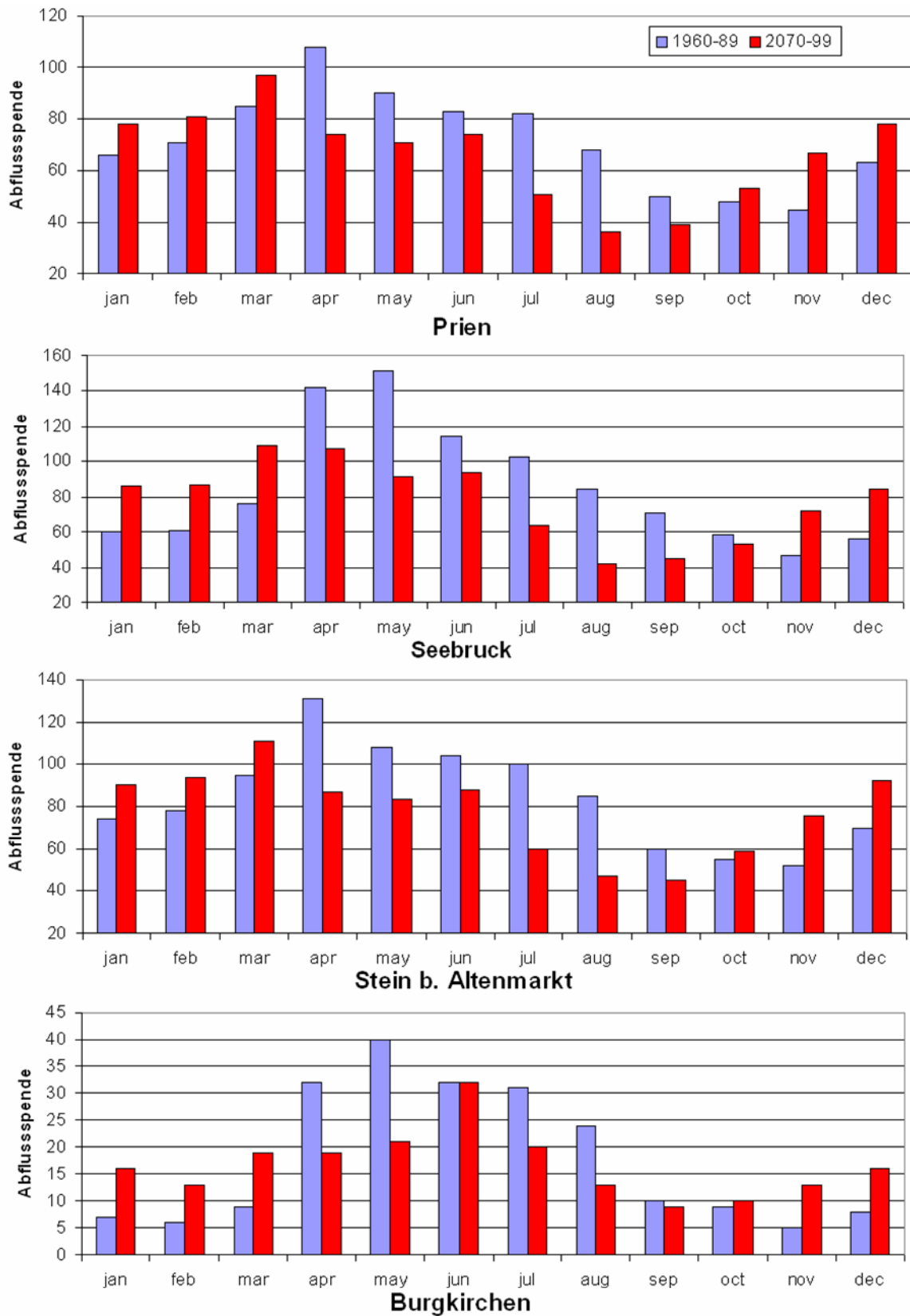


Abbildung 15: Mittlere monatliche Abflussspende [$\text{mm a}^{-1} \text{km}^{-2}$] der Einzugsgebiete nördlich und westlich des Chiemsees, aus WaSim-Simulationen mit DEKLIM-Klimaantriebsdaten gerechnet; Erläuterung im Text.

In Abb. 14 sind die Ergebnisse für die alpinen Teilbereiche des Einzugsgebietes an der Tiroler Ache (Staudach), der Weißen Ache (Bergen), der Weißen Traun (Fritz am Sand) sowie der Traun in Siegsdorf dargestellt.

Die Klimadaten zeigen zwar in der Jahressumme des Niederschlags kaum Änderungen zwischen Vergangenheits- und Zukunftszeitscheibe, die Saisonalität verschiebt sich jedoch (siehe Marx et al. 2008a). Hier ist vor allem eine starke sommerliche Niederschlagsabnahme festzustellen. In Abb. 14 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Saisonalität des Abflusses ebenfalls verschiebt. Das Frühjahrsmaximum der Vergangenheitszeitscheibe, das durch die Schneeschmelze hervorgerufen wurde, verschiebt sich zum Winter hin. Die erklärt sich durch den ausbleibenden Schneeniederschlag. Die zukünftigen Sommerabflüsse sind vor allem im Juli und August dramatisch reduziert. Dies erklärt sich durch die Reduzierung des sommerlichen Niederschlags um bis zu 30% in Verbindung mit den durchschnittlich 10%ig höheren realen Verdunstungswerten, die sich wiederum vor allem durch die Temperaturerhöhung begründen.

In Abb. 15 finden sich für die nördlich und westlich des Chiemsees gelegenen Einzugsgebiete ähnlich Ergebnisse, vor allem an den Pegeln Seebruck und Prien. An der Prien sei wieder auf die in Abschnitt 3.5 aufgezeigten Limitierungen der Aussagekräftigkeit der Ergebnisse hingewiesen. Am Pegel Seebruck findet eine leichte Überlagerung von Wasserwirtschaft und Klimaänderungssignal statt. Die Kanalbewirtschaftung auf der Flussstrecke bis nach Burgkirchen dominiert das Klimaänderungssignal. Hier muss erwartet werden, dass sich die Bewirtschaftungsregeln zukünftig einem sich ändernden Klima und Abfluss anpassen.

4.2.4 Auswirkung der Klimaänderung auf die Häufigkeiten des Abflusses

Häufigkeiten des Abflusses geben Auskunft über die Anzahl der Niedrigwasser- und Hochwassersituationen. In Abb. 16 sind diese absoluten Häufigkeiten des Abflusses in den Zeitscheiben 1960-89 sowie 2070-99 am Pegel Stein bei Altenmark dargestellt. Die Ergebnisse an diesem Pegel sind repräsentativ für das gesamte Alz-Einzugsgebiet. Im oberen Teil der Abbildung sind die Häufigkeiten für die gesamte Zeitreihe dargestellt. Dabei fällt auf, dass zukünftig insgesamt mehr

Niedrigwasserereignisse und weniger stark ausgeprägte großflächige Hochwasserereignisse zu erwarten sind. Dies bedeutet jedoch keine Entwarnung für

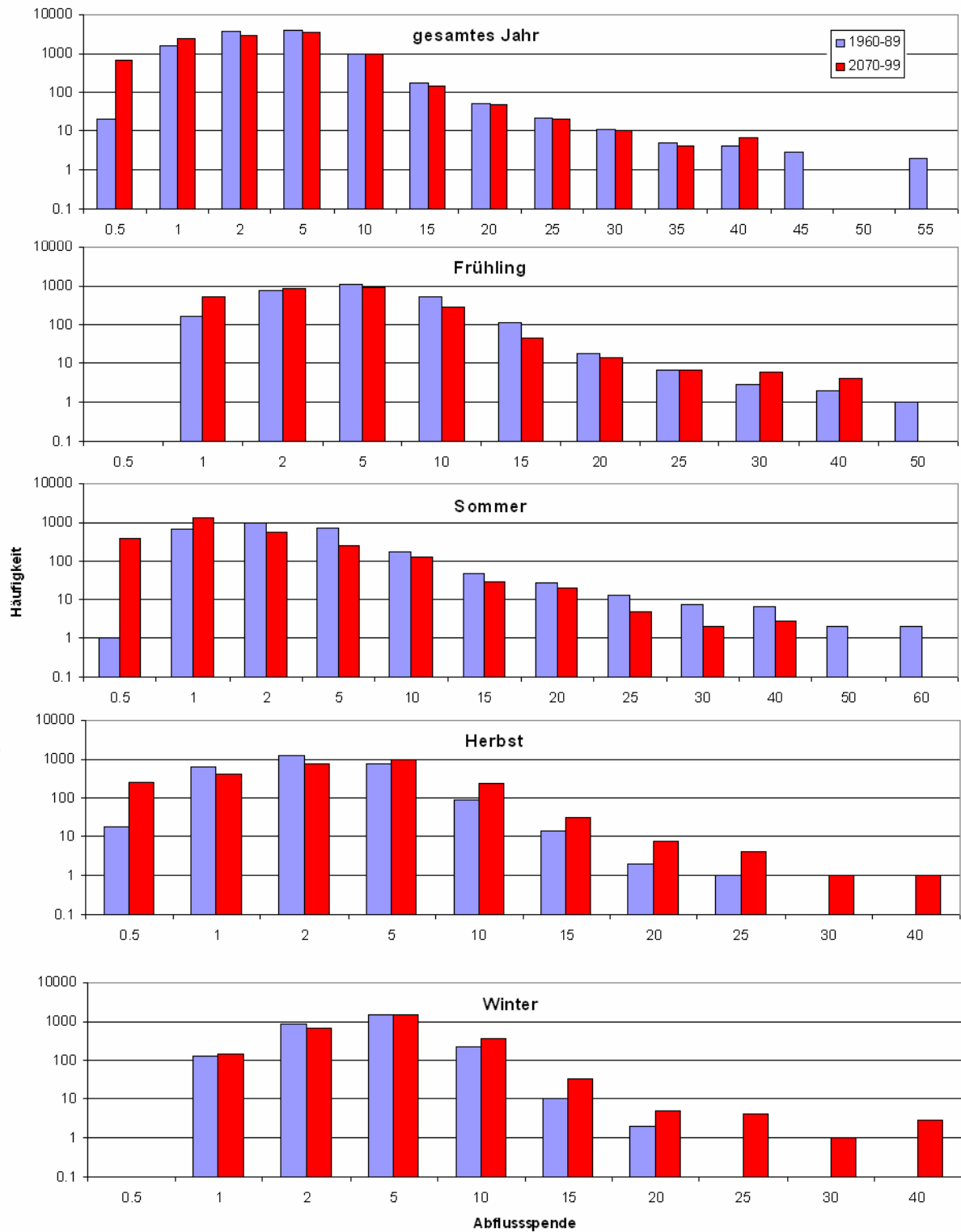


Abbildung 16: Absolute Häufigkeiten des Abflusses in den Zeitscheiben 1960-89 sowie 2070-99 am Pegel Stein bei Altenmark, aus WaSim-Simulationen mit DEKLIM-Klimaantriebsdaten gerechnet; Erläuterung im Text.

zukünftige Hochwasserereignisse, da hier keine Aussagen zu kleinräumigen Überschwemmungen, z.B. durch Gewitter auf der Skala von Straßenzügen, gemacht werden können. Aufgrund der zunehmenden Stundenniederschlagsintensitäten in der Zukunftszeitscheibe muss hier mit einer zunehmenden Überschwemmungsgefahr gerechnet werden. Eine jahreszeitliche Differenzierung zeigt im meteorologischen Frühjahr (März-Mai) nur leichte Änderungen in der Häufigkeitsverteilung des Abflusses. Im Bereich der großen, schneeschnmelzebedingten Ereignisse, kommt es im Zeitraum 2070-99 zu einer Abflussabnahme. Der Gesamtabfluss zwischen den beiden Zeitscheiben verändert sich aber nur leicht. Die extremen Niedrigwasserereignisse häufen sich im Sommer (Juni-August) stark. Insgesamt gehen die Sommerabflüsse über fast alle Klassen zurück. Die Gefahr großer Hochwasserereignisse ist im Sommer im Chiemgau zukünftig als geringer einzuschätzen. Dies wird im Wesentlichen auf die verringerte Niederschlagsmenge im Sommer und die oben gezeigte erhöhte reale Verdunstung in der Zukunftszeitscheibe zurückgeführt. Im meteorologischen Herbst (September-November) nehmen sowohl Niedrigwasser als auch Hochwasserereignisse zu. Die Wahrscheinlichkeit großer Abflussereignisse nimmt auch in den Wintermonaten Dezember-Februar durch den verringerten Schneeniederschlag zu.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt des Alz-Einzugsgebietes im südbayerischen alpinen und voralpinen Raum untersucht. Dabei wurde auf die Arbeit von Marx et al. (2008a) aufgebaut, in der bereits eine regionale Klimasimulation hinsichtlich der Aussagekräftigkeit für die Region Chiemgau - Inn - Salzach - Berchtesgadener Land untersucht und die Klimaänderung hinsichtlich Temperatur und Niederschlag quantifiziert wurde. Der regionalen Klimasimulation lag das globale Emissionsszenario B2, das von moderaten zukünftigen CO₂-Emissionen ausgeht, zugrunde. Es hat sich gezeigt, dass sich die mittlere Temperatur im Zeitraum 2070-99 im Vergleich zum Zeitraum 1960-89 um ungefähr 3°C erhöhen wird. Die Sommermonate erwärmen sich dabei im Flächenmittel am stärksten, das Maximum der Erwärmung war dabei in den Alpen zu finden. Neben der mittleren Erwärmung hat sich auch eine Zunahme der Extreme gezeigt. Dies haben die Untersuchungen zur Entwicklung der Sommertage und der heißen Tage ergeben. Die Anzahl der Frosttage nimmt hingegen ab. Die Klimadaten zeigten eine zukünftige Erhöhung des Jahresniederschlages um durchschnittlich

10%. Eine jahreszeitliche Betrachtung hat jedoch eine Abnahme des Sommerniederschlags um bis zu 30% ergeben.

Die Niederschläge aus diesen Klimasimulationen wurden auf Basis von Beobachtungsdaten für den Zeitraum 1960-1989 konditioniert, um sowohl die real beobachtete Jahresmenge und die Saisonalität des Niederschlags auf die Klimasimulation zu übertragen. Danach wurden die Klimadaten auf das Einzugsgebiet der Alz angewendet. Dazu wurde das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH verwendet. Das hydrologische Modell wurde am IMK-IFU im Auftrag des LfU Bayern im Rahmen des KLIWA-Projektes „WHM Alz“ unter anderem um ein Seenmodell und die Kanalbewirtschaftung erweitert und am Einzugsgebiet der Alz mit Stundenzeitschritten getestet. Auf dieses existierende Setup für das hydrologische Modell wurde in dieser Arbeit zurückgegriffen. Für die Verwendung mit Tagesdaten wurde WaSiM für das hydrologische Jahr 1997 neu kalibriert. Dabei hat sich gezeigt, dass die beobachtete Abflusscharakteristik im Alz-EZG gut reproduziert werden kann. Zusätzlich zu einer einjährigen Validierung wurde die Stabilität des hydrologischen Modells bei einer Langzeitsimulation für die Jahre 1995-2004 nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen haben eine Zunahme der mittleren realen Jahresevapotranspiration zwischen den Zeiträumen 1960-89 und 2070-99 um ca. 10% im Flächenmittel gezeigt. Dies wird durch die Temperaturerhöhung begründet. Einzig an den Rändern des Chiemsees ist eine leichte Abnahme der realen Verdunstung zu beobachten, die auf die verminderte Wasserverfügbarkeit durch einen leichten Rückgang des Seespiegels zurückzuführen ist. Eine Untersuchung der Veränderung des Schneespeichers hat ergeben, dass sowohl die Schneemenge als auch die Tage mit Schneebedeckung deutlich zurückgehen. So bleiben Gebiete in Höhenlagen <1100m. ü.NN in der Zukunftszeitscheibe weitgehend schneefrei.

Die Klimadaten zeigen in der Jahressumme des Niederschlags kaum Änderungen zwischen Vergangenheits- und Zukunftszeitscheibe, die Saisonalität verschiebt sich jedoch. Hier ist vor allem eine starke sommerliche Niederschlagsabnahme festzustellen. Diese führt in Kombination mit erhöhten realen Verdunstungswerten zu einer starken Reduktion des sommerlichen Oberflächenabflusses. Das Frühjahrsmaximum der Vergangenheitszeitscheibe, das durch die Schneeschmelze

hervorgerufen wurde, verschiebt sich durch den ausbleibenden Schneeniederschlag zum Winter hin.

Bei der Untersuchung der Häufigkeiten des Abflusses hat sich gezeigt, dass die Gefahr großflächiger Hochwasserereignisse im Sommer zukünftig im Chiemgau abnimmt. Über kleinräumige Überschwemmungen durch Gewitter können aus dem hydrologischen Modell jedoch keine Informationen abgeleitet werden. Hier muss zukünftig mit einer höheren Gefahr von Überschwemmungen durch zunehmende Stundenniederschlagsintensitäten gerechnet werden. Im Winter können in der Zukunftszeitscheibe durch mehr flüssigen Niederschlag größere großflächige Abflussereignisse auftreten. Untersuchungen der Niedrigwassersituationen haben durch reduzierte Niederschlagsmengen und erhöhte realer Evapotranspiration starke Rückgänge des sommerlichen Abflusses in der Zeitscheibe 2070-99 ergeben.

Die hier gezeigten Ergebnisse lassen weit reichende zukünftige Veränderungen erwarten. Diese werden z.B. die Energie-, Land-, Forst- und Wasserwirtschaft betreffen, aber auch Flüsse als Infrastruktur beeinflussen. Daher müssen Handlungsstrategien entwickelt werden, um den zukünftigen Änderungen des Klimas und den damit verbundenen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt entgegenzutreten.

6 Literaturverzeichnis

- JASPER, K., MARX, A., KUNSTMANN, H. (2008): Vorhaben KLIWA: Modelltechnische Erweiterung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH und Aufbau des Modells, Test und Anwendung der Erweiterung am Beispiel des Flussgebietes der Alz – Kurzbezeichnung WHM Alz, LfU Az: 81-4421.9-211115/2007, Abschlussbericht, 117 S.
- KUNSTMANN, H. & STADLER, C. (2005): High resolution distributed atmospheric hydrological modelling for Alpine catchments, *Journal of Hydrology*, 314, pp. 105-124.
- KUNSTMANN, H. SCHNEIDER, K., FORKEL, R., KNOCHE, R. (2004): Impact analysis of climate change for an Alpine catchment using high resolution dynamic downscaling of ECHAM4 time slices, *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), S. 1030-1044.
- MARX, A., MAST, M., KNOCHE, H.R., KUNSTMANN, H. (2008a): KlimaZwei - Klimawerkstatt Klimaschutz- und Anpassungspotenziale einer Region und ihre Erschließung – Fallstudie „Chiemgau - Inn – Salzach – Berchtesgadener Land“, Regionalbezogene statistische Analyse der DEKLIM-Daten, Zwischenbericht, 20 S.
- MARX, A., MAST, M., KNOCHE, H.R., KUNSTMANN, H. (2008b): Globaler Klimawandel und regionale Auswirkungen auf den Wasserhaushalt – Fallstudie Chiemgau-Inn-Salzach-Berchtesgadener Land, *Wasserwirtschaft* 09/2008, S. 12-16.
- MARX, A. (2007): Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage, *Mitteilungen Institut für Wasserbau Universität Stuttgart*, Heft 160, Dissertation, 184 S.
- SCHULLA, J. & JASPER, K. (2006): Model Description WaSiM-ETH, Zürich, 167 S.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, *Zürcher Geographische Schriften*, 69, 161 S.

A Anhang

A.1 Modellsetup

Tabelle A1: Abgeleitete Teileinzugsgebiete für die Alz

Pegel	TG-Nummere	Zulauf zu Zone	Fläche TG (ber.) [km ²]
Virtuell	1		39.7
Burgkirchen	2	1	108.1
Hirtener Wehr	27	2	0.5
Virtuell	26	27	130.8
Tachertinger Wehr	25	26	0.2
Virtuell	99	25	0.3
Virtuell	24	99	16
Trostberg	3	24	3.5
Trostberger Wehr	23	3	0.5
Virtuell	22	23	6.4
Altenmarkter Wehr	21	22	0.2
Virtuell	20	21	32.3
Altenmarkt	4	20	158.6
Seebruck	5	4	311.9
Staudach	6	5	235.6
Kössen-H.	7	6	206.1
Stein b.A.	12	22	98.3
St. Johann	8	7	32.5
Siegsdorf	13	12	95
Almdorf	9	7	165.7
Kitzbühel	10	8	153.4
Sperten	11	8	147.2
Prien	16	5	47.2
Wernleiten	14	12	90.9
Fritz a.S.	15	13	85.9
Hohenaschau	17	16	45.8
Bernau	18	5	24.8
Bergen	19	5	18.1
Summe			2255.6

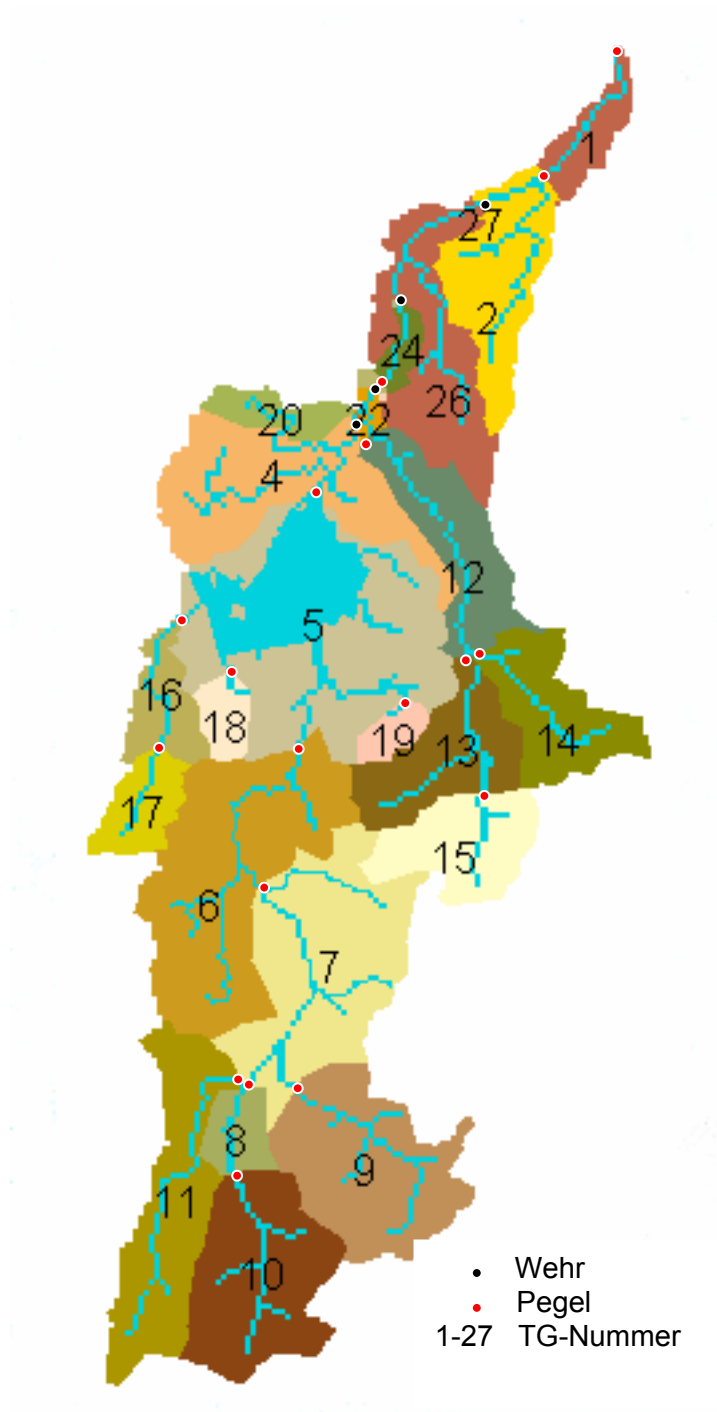


Abbildung A1: Teileinzugsgebiete mit Pegeln und Wehren des Untersuchungsgebiets..

Speicherbewirtschaftung: Restwasserführungen in der Alz und erlaubte Wasserentnahmen

Teilgebiet 41, Altenmarkter Naturwehr (Möglinger Mühlbachach)

1. Entnahmemenge bei weniger als 27 m³/s Wasserführung in der Alz: → 7 m³/s
2. Entnahmemenge bei mehr als 27 m³/s Wasserführung in der Alz: → 8 m³/s

Teilgebiet 42, Trostberger Wehr der Firma AlzChem

1. Die erlaubten Entnahmemengen aus der Alz sind abhängig von der zeitlich gestaffelten Restwasserführung.

01.09.	bis	28.02.	→	7,0 m ³ /s
01.03.	bis	31.03.	→	7,5 m ³ /s
01.04.	bis	30.04.	→	10,5 m ³ /s
01.05.	bis	30.06.	→	12,5 m ³ /s
01.07.	bis	31.07.	→	11,0 m ³ /s
01.08.	bis	31.08.	→	8,5 m ³ /s
2. Maximal genehmigte Entnahmemengen aus der Alz:
max. 52 m³/s bei einer Entnahmemenge von 8 m³/s am Altenmarkter Naturwehr
max. 53 m³/s bei einer Entnahmemenge von 7 m³/s am Altenmarkter Naturwehr
3. Die Wiedereinleitung der maximal 60 m³/s entnommenen Wassermengen in die Alz erfolgt vor dem Knoten 48 (Tachertinger Wehr).

Teilgebiet 48, Tachertinger Wehr der Firma AlzChem

1. Die erlaubten Entnahmemengen aus der Alz sind wiederum abhängig von der zeitlich gestaffelten Restwasserführung.

01.11.	bis	31.01.	→	5,0 m ³ /s
01.02.	bis	31.03.	→	5,5 m ³ /s
01.04.	bis	30.04.	→	7,0 m ³ /s
01.05.	bis	31.05.	→	11,5 m ³ /s
01.06.	bis	30.06.	→	11,0 m ³ /s
01.07.	bis	31.07.	→	9,0 m ³ /s
01.08.	bis	31.08.	→	6,5 m ³ /s
01.09.	bis	30.09.	→	6,0 m ³ /s
01.10.	bis	31.10.	→	5,5 m ³ /s
2. Die maximal wasserrechtlich erlaubte Entnahmemenge aus der Alz liegt bei 64,1 m³/s.

Teilgebiet 51, Wehranlage Hirten der Alzwerke

1. Die erlaubten Entnahmemengen aus der Alz sind abhängig von der Wassertemperatur gestaffelt.

Mindestrestwasserführung	→	3,0 m ³ /s
Wassertemperatur < 3°C	→	6,0 m ³ /s
Wassertemperatur < 18°C	→	5,0 m ³ /s
Wassertemperatur -> ur, > 19°C	→	6,0 m ³ /s
Wassertemperatur > 22°C	→	7,0 m ³ /s

2. Die maximal wasserrechtlich erlaubte Entnahmemenge aus der Alz liegt bei 24,5 m³/s.

Volumen-Abfluss-Beziehung für den Chiemsee

- Ermittelte V-Q-Beziehung:
V: 2.17 km³ → Q: 32.0 m³/s
- Anfangsspeicherinhalt: 2.215 km³

Tabelle A2: Volumen-Abfluss-Beziehung für den Chiemsee (Datenlieferung 29.11.2007)

Stützpunkt	Volumen [km ³]	Abfluss [m ³ /s]
1	2.1392544	10.577
2	2.1576763	21.403
3	2.1778614	38.776
4	2.1978158	61.288
5	2.2180541	87.904
6	2.2388090	117.374
7	2.2600675	149.406
8	2.2817037	183.721
9	2.3046529	229.277
10	2.3279921	288.152
11	2.3518371	356.447

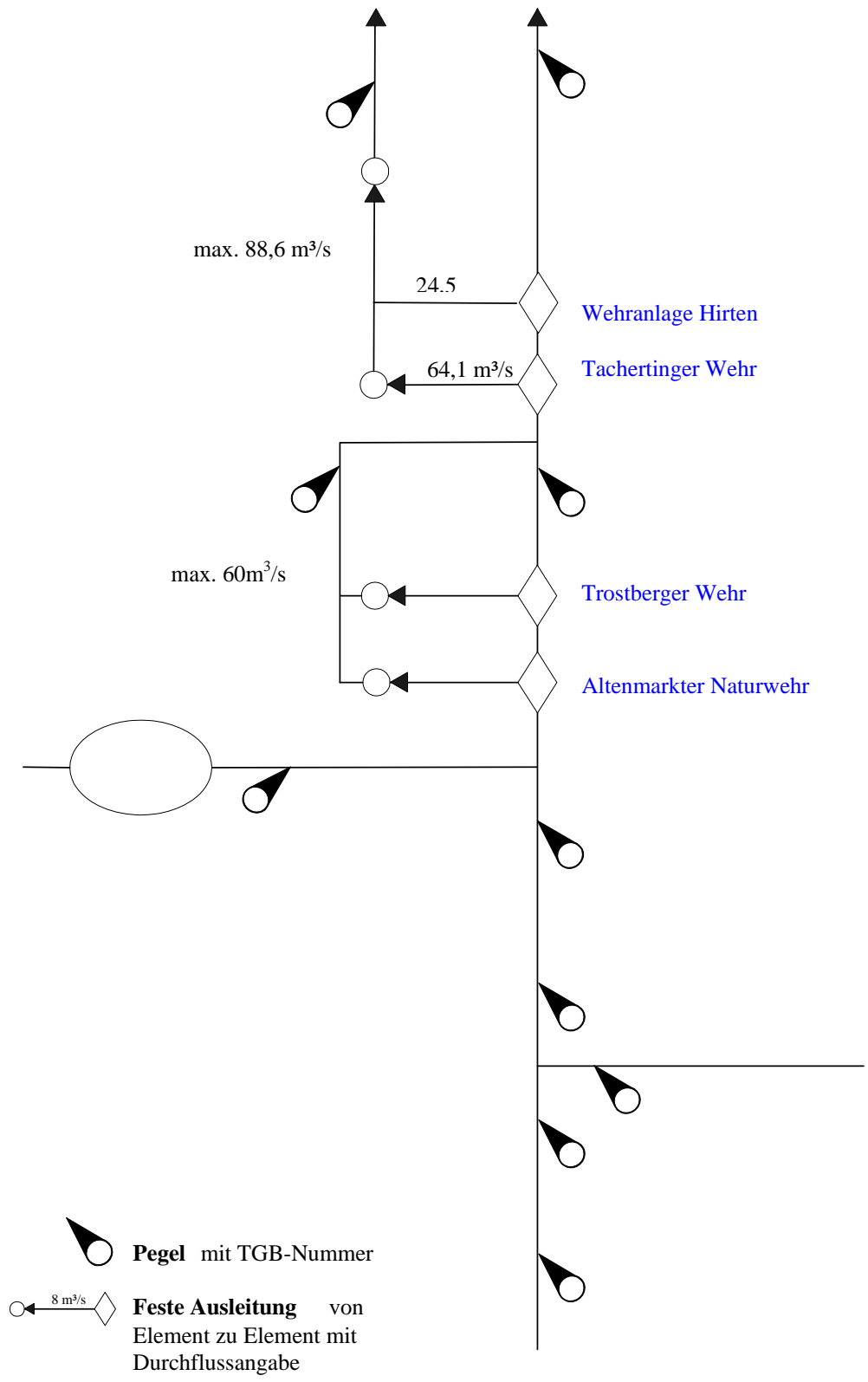


Abbildung A2: Vereinfachte Systemskizze der Speicherbewirtschaftung (Stand: 09.06.2004;
Quelle: Wasserwirtschaftsamt Traunstein, aus Marx et al. 2008a)

A.2 Ergebnisse der WaSiM-Kalibrierung

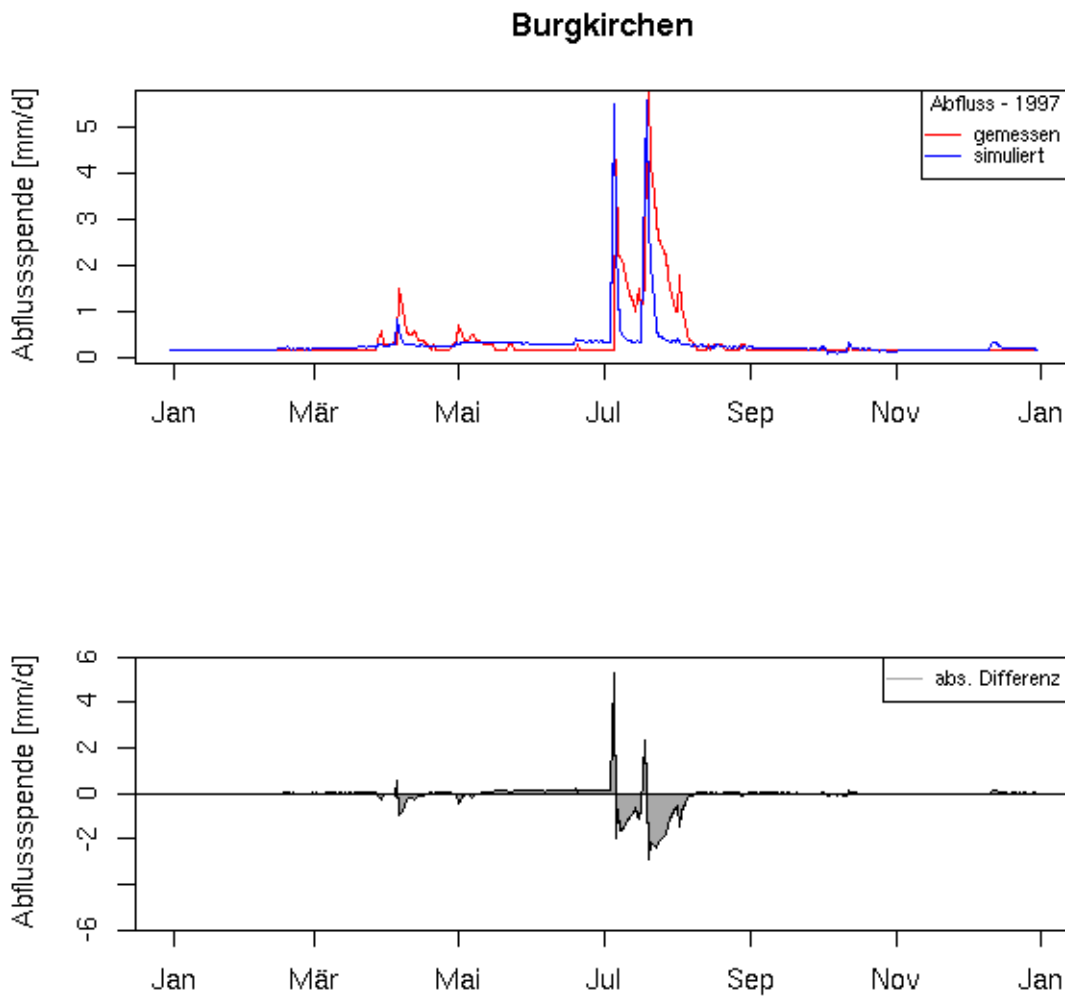


Abbildung A3: Simulierte und gemessene Abflussganglinie des Pegels Burgkirchen [Alz] für das Jahr 1997. Darstellung der abs. Differenzen zwischen gemessener Abflussspende [mm/d] und simuliertem Abfluss [mm/d].

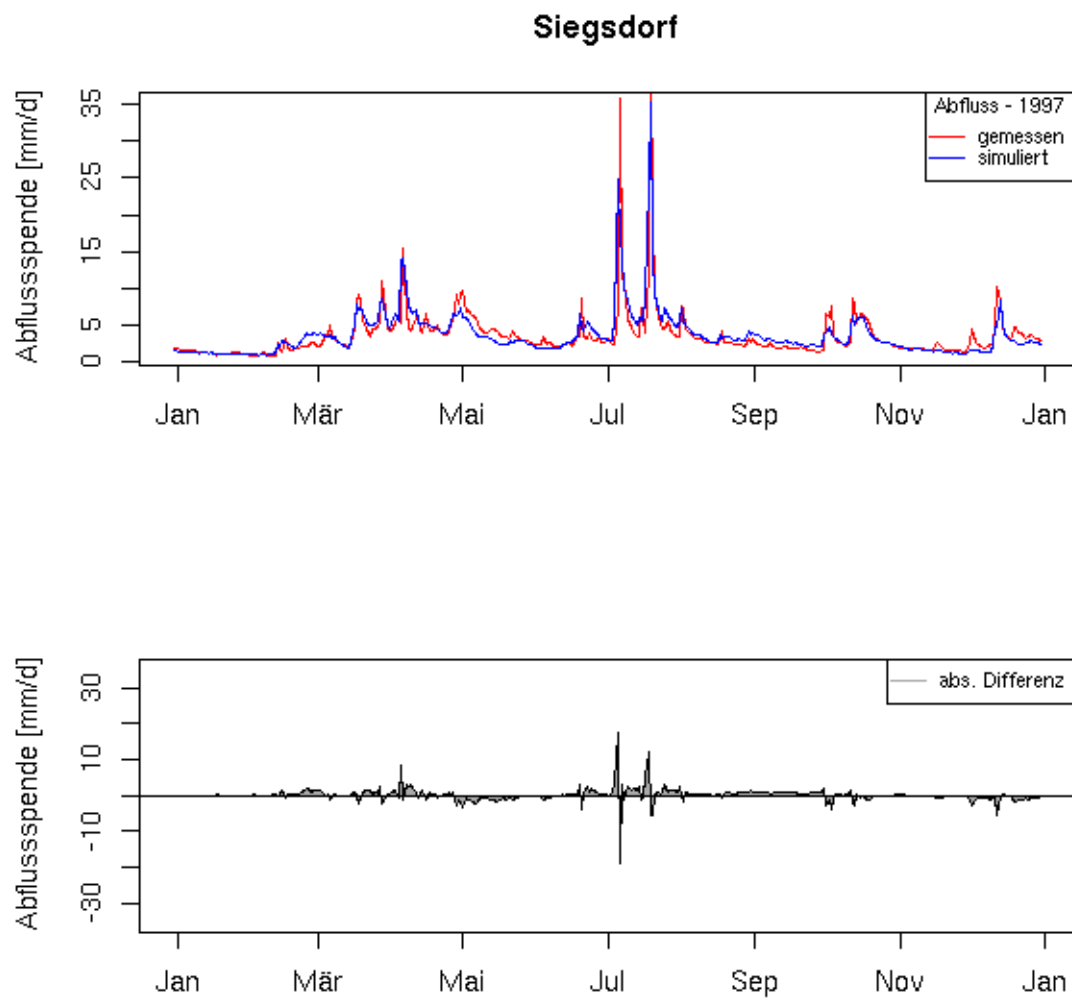


Abbildung A4: Simulierte und gemessene Abflussganglinie des Pegels Siegsdorf [Weisse Traun] für das Jahr 1997. Darstellung der abs. Differenzen zwischen gemessener Abflussspende [mm/d] und simuliertem Abfluss [mm/d].

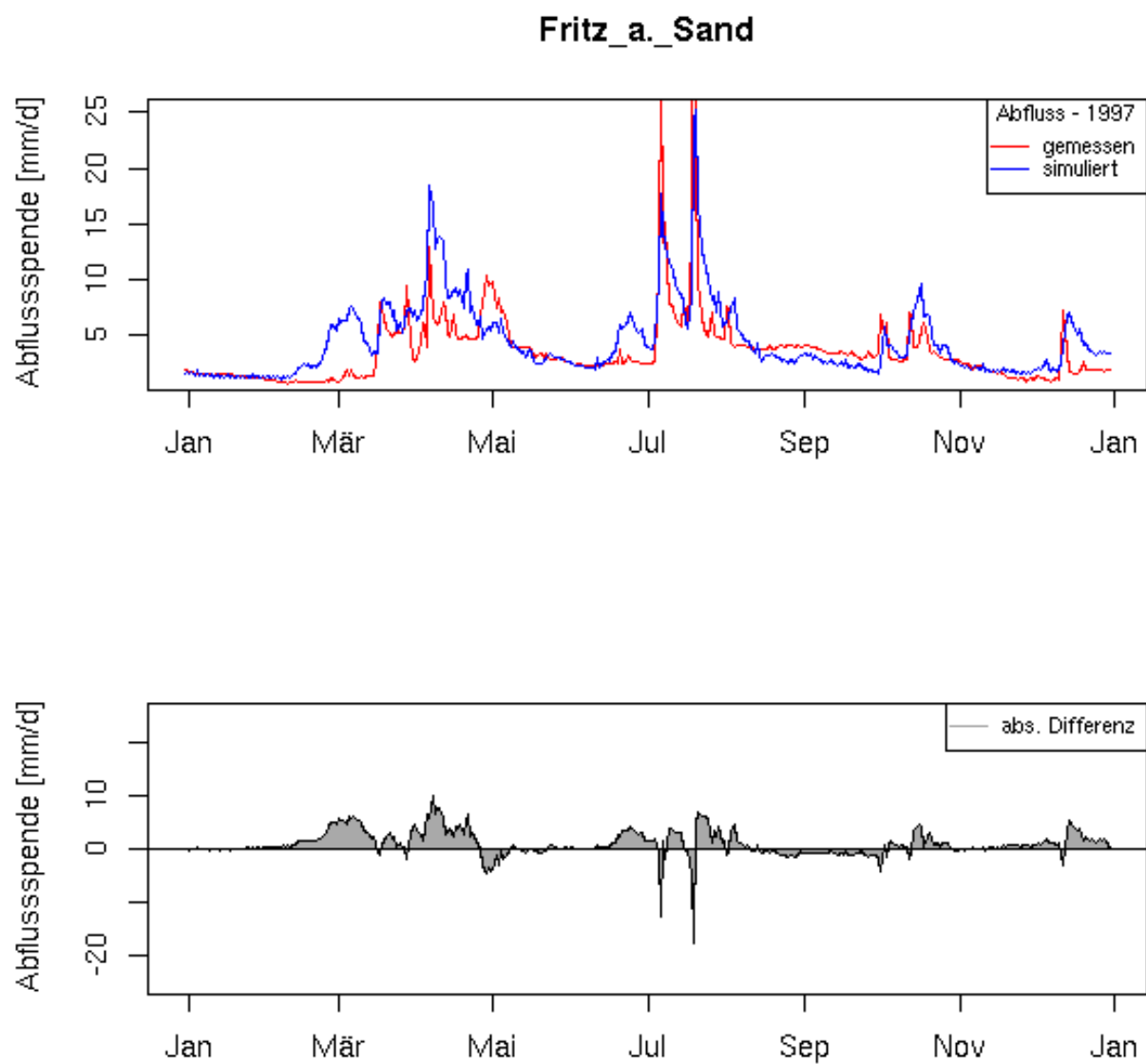


Abbildung A5: Simulierte und gemessene Abflussganglinie des Pegels Fritz am Sand [Weisse Traun] für das Jahr 1997. Darstellung der abs. Differenzen zwischen gemessener Abflussspende [mm/d] und simuliertem Abfluss [mm/d].

Staudach

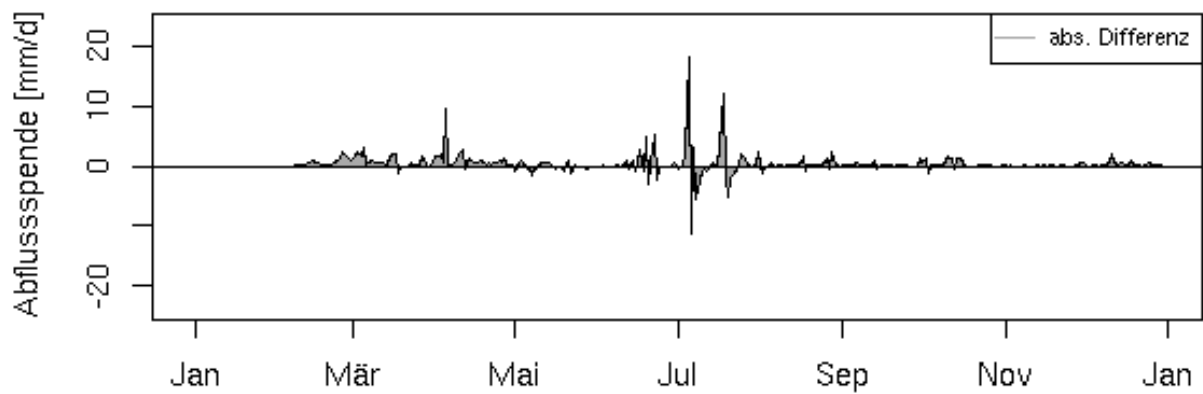
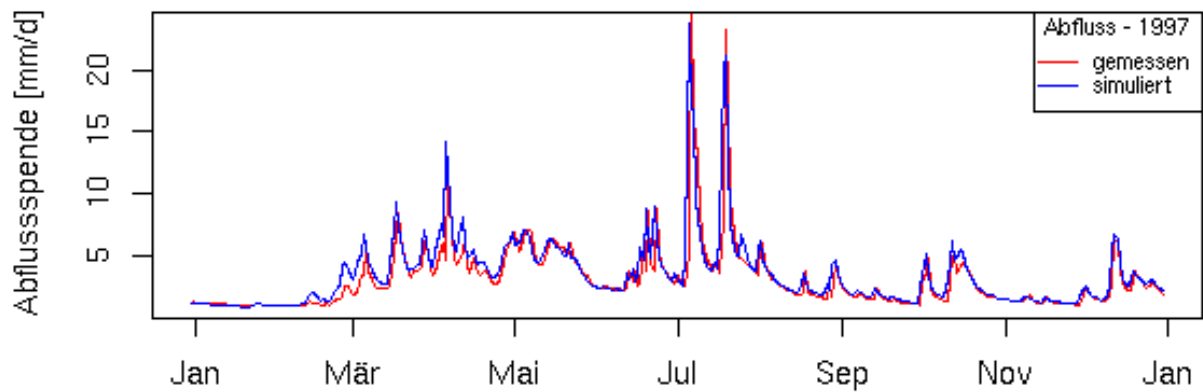


Abbildung A6: Simulierte und gemessene Abflussganglinie des Pegels Staudach [Tiroler Ache] für das Jahr 1997. Darstellung der abs. Differenzen zwischen gemessener Abflusspende [mm/d] und simuliertem Abfluss [mm/d].

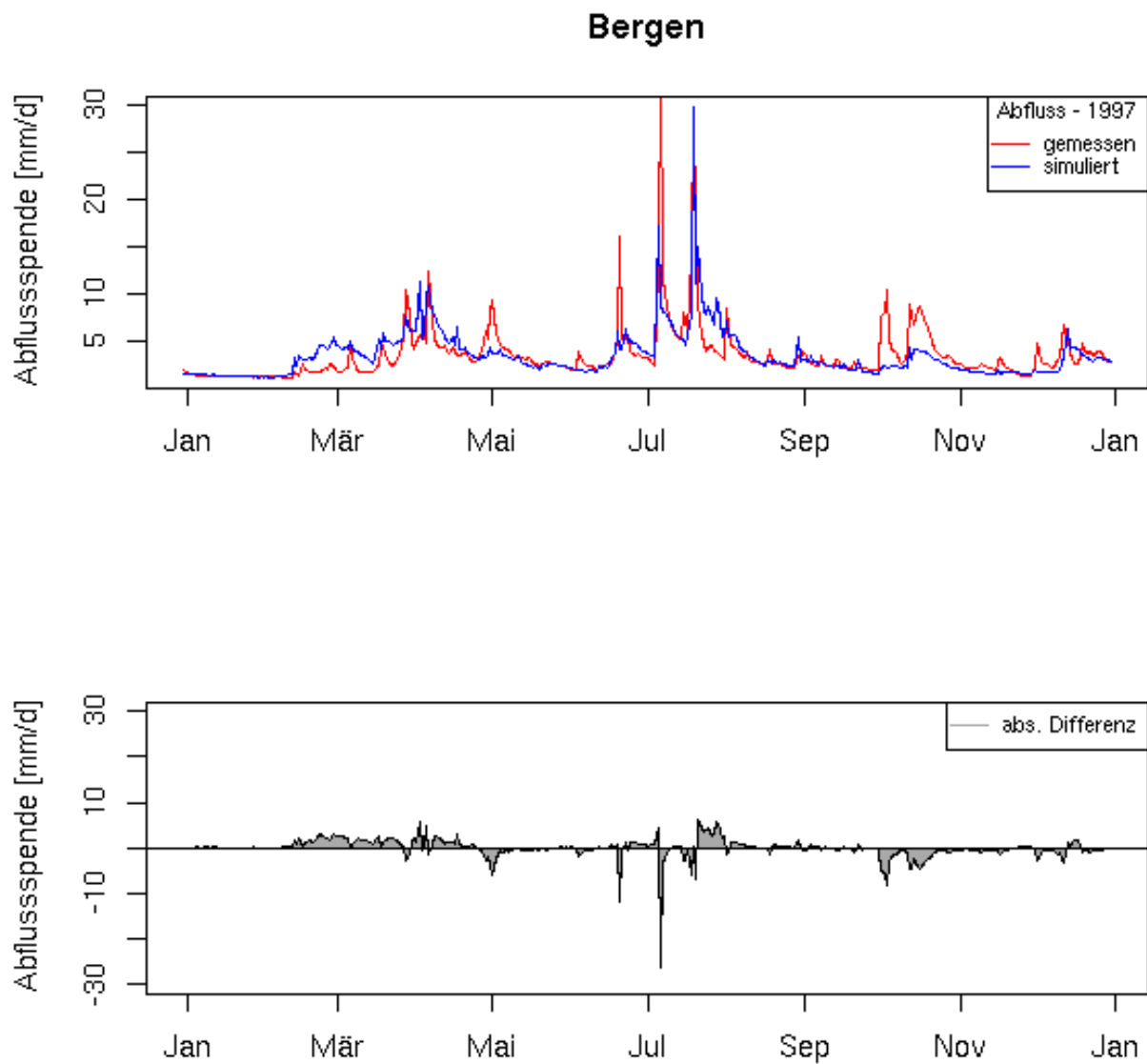


Abbildung A7: Simulierte und gemessene Abflussganglinie des Pegels Bergen [Weisse Ache] für das Jahr 1997. Darstellung der abs. Differenzen zwischen gemessener Abflussspende [mm/d] und simuliertem Abfluss [mm/d].

Seebruck

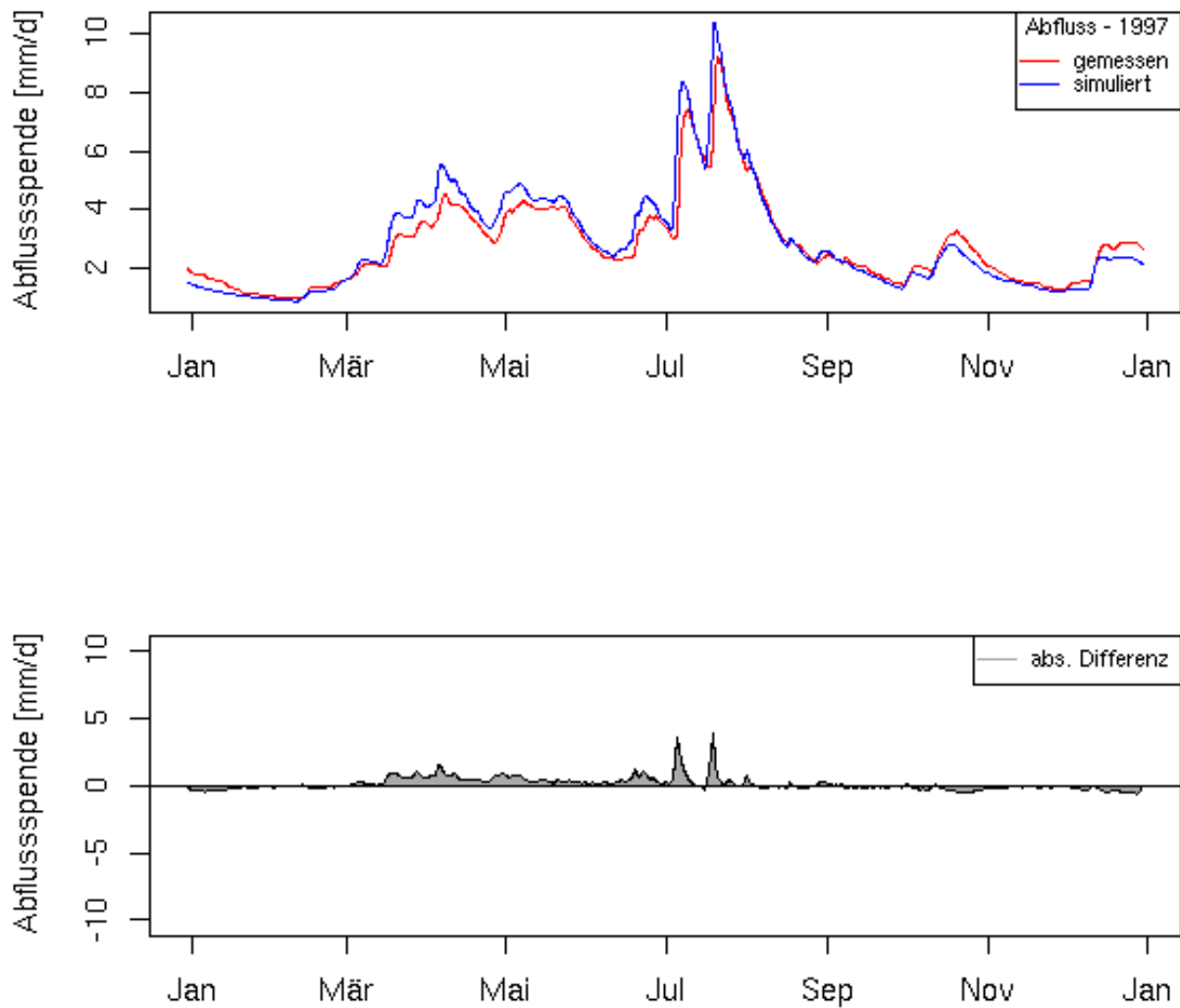


Abbildung A8: Simulierte und gemessene Abflussganglinie des Pegels Seebruck [Alz] für das Jahr 1997. Darstellung der abs. Differenzen zwischen gemessener Abflussspende [mm/d] und simuliertem Abfluss [mm/d].

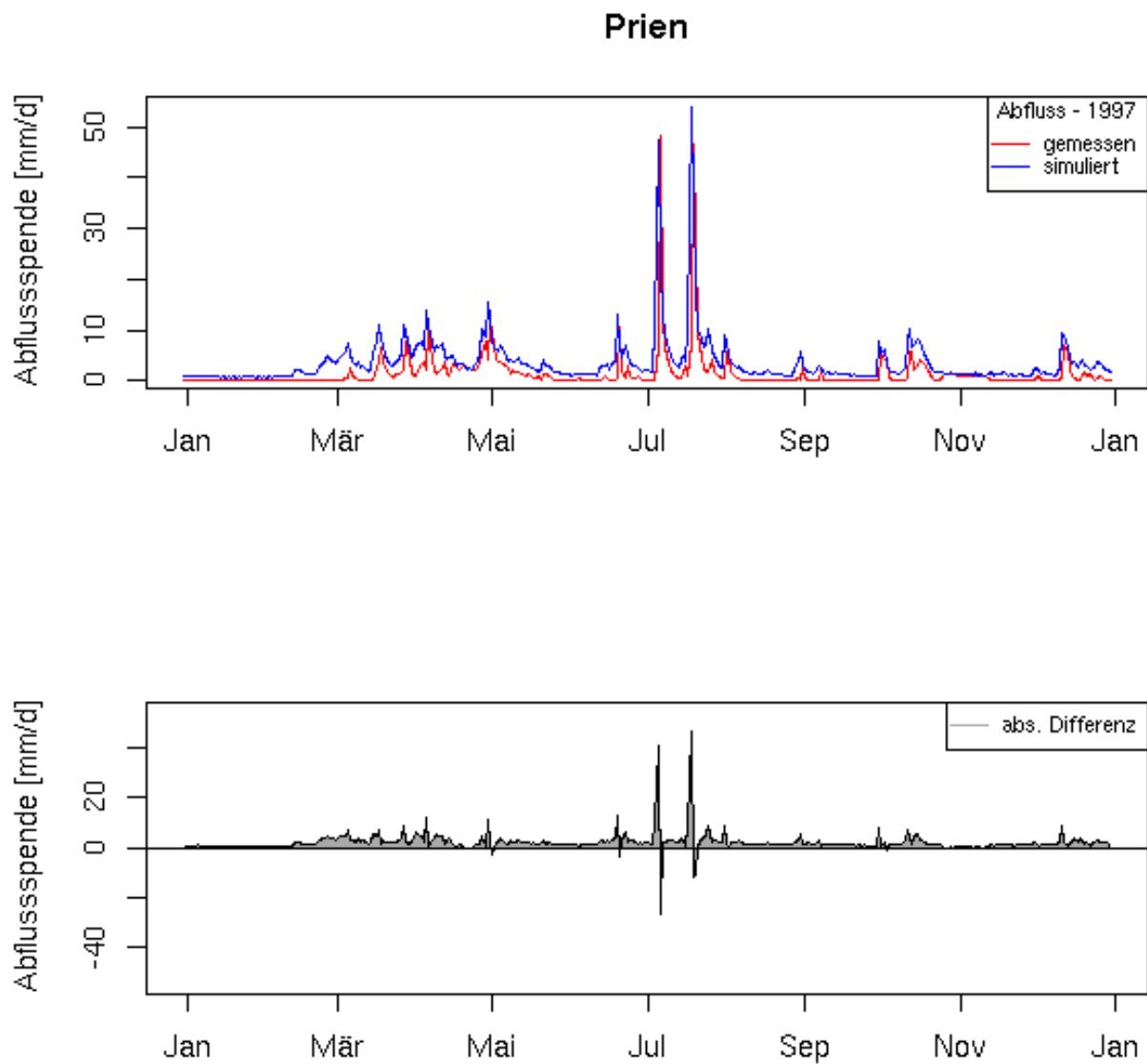


Abbildung A9: Simulierte und gemessene Abflussganglinie des Pegels Prien [Prien] für das Jahr 1997. Darstellung der abs. Differenzen zwischen gemessener Abflusssspende [mm/d] und simuliertem Abfluss [mm/d].

A.3 Flächendaten aus den hydrologischen Langzeitsimulationen 1995-2004

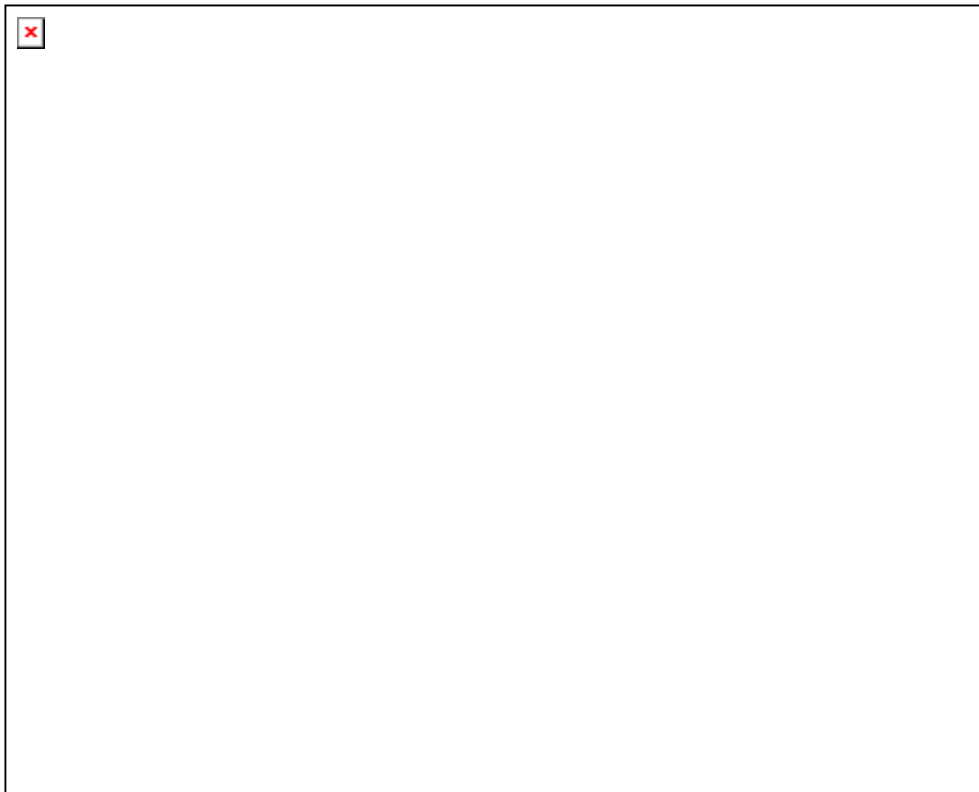


Abbildung A10: Mittlerer jährlicher Niederschlag (mm) im Alz-Gebiet (1995-2004)

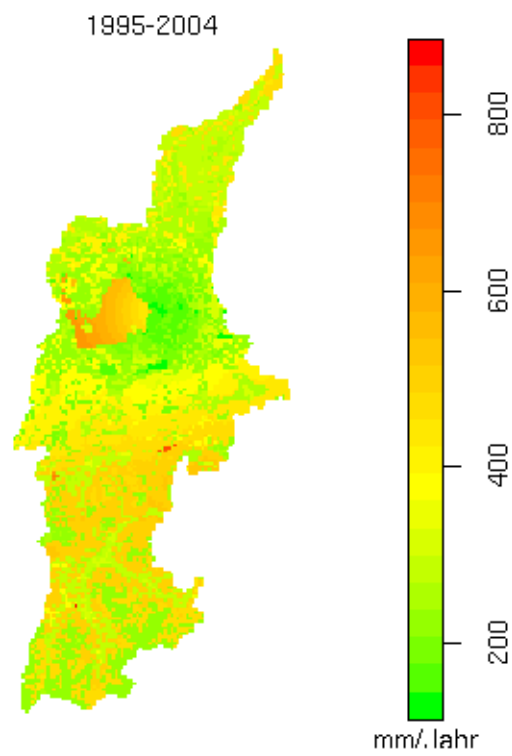


Abbildung A11: Mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration (mm) (1995-2004)

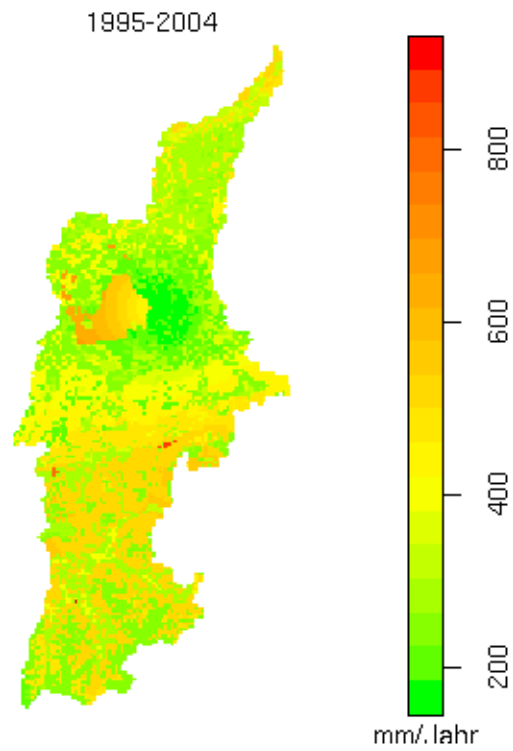


Abbildung A12: Mittlere jährliche aktuelle Evapotranspiration (ETR) im Alz-Gebiet (1995-2004)

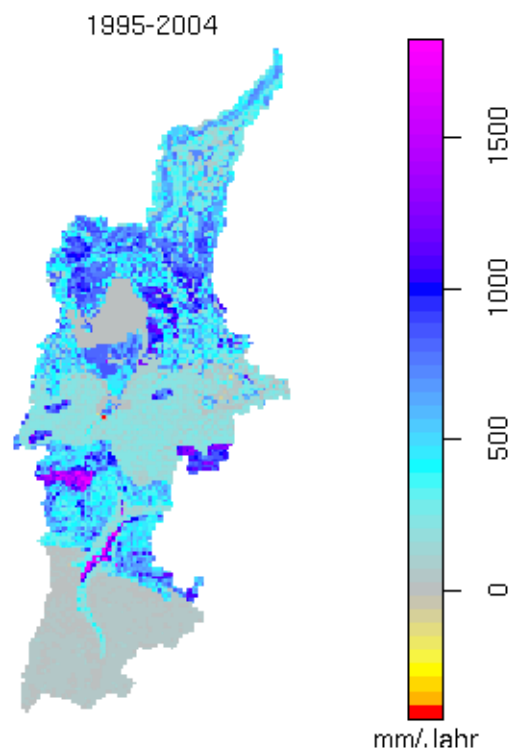


Abbildung A13: Mittlere jährliche Netto-Grundwasserneubildung (GWN = Bilanz aus Tiefenversickerung und kapillarer Aufstieg) im Alz-Gebiet (1995-2004)

ANHANG A4: Klimasimulationsbasierte hydrologische Modellierung

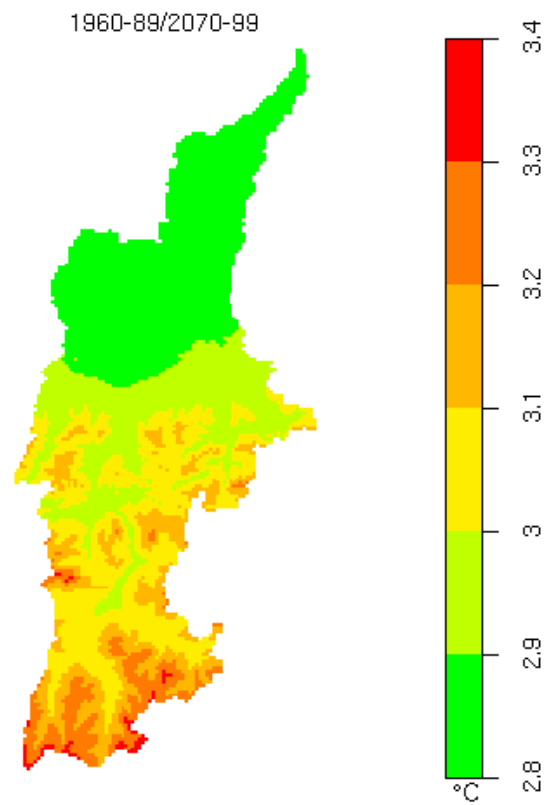


Abbildung A14: Änderung der mittleren Jahrestemperatur [°C] zwischen den Zeiträumen 1960-89 und 2070-99

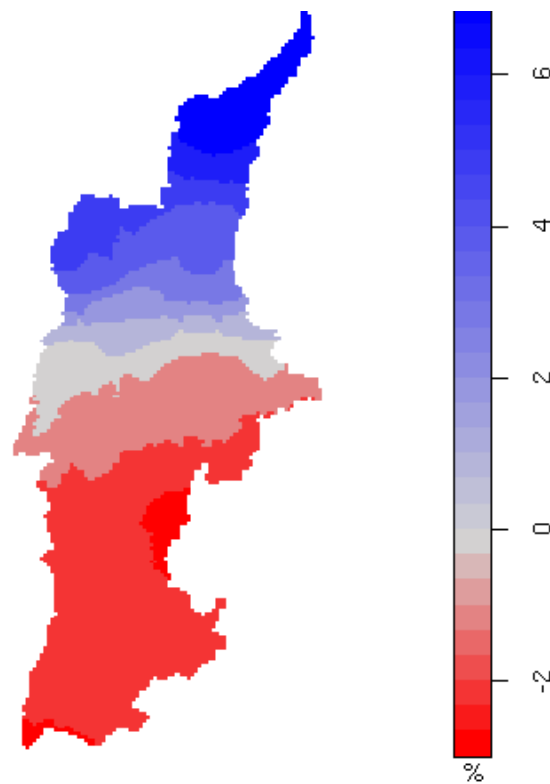


Abbildung A15: Änderung des mittleren Jahresniederschlags [%] zwischen den Zeiträumen 1960-89 und 2070-99