

Bern, 30. November 2011

**Klimaänderung und Niedrigwasser**

Auswirkung der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland



---

*b*  
**UNIVERSITÄT  
BERN**

Geographisches Institut  
**Gruppe für Hydrologie**

Schlussbericht CCHydro – Modul 4:

# Klimaänderung und Niedrigwasser

Auswirkungen der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021-2050 und 2070-2099

Von Raphael Meyer, Bruno Schädler, Daniel Viviroli und Rolf Weingartner

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)

Raphael Meyer  
Dipl. Geograph  
Hallerstrasse 12  
CH-3012 Bern  
raphael.meyer@giub.unibe.ch  
[www.hydrologie.unibe.ch](http://www.hydrologie.unibe.ch)

## **Impressum**

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern  
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
- Auftragnehmer:** Universität Bern, Geographisches Institut
- Autoren:** Raphael Meyer, Bruno Schädler, Daniel Viviroli, Rolf Weingartner
- Begleitung BAFU:** David Volken, Bruno Schädler, Hugo Aschwanden, Dominique Bérod, Gian Reto Bezzola, Willy Geiger, Roland Hohmann, Adrian Jakob, Ronald Kozel, Petra Schmocker-Fackel
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>3</b>
2.1	Auftrag .....	3
2.2	Untersuchte Stationen .....	4
<b>3.</b>	<b>Methoden</b> .....	<b>6</b>
3.1	Analyse der Niedrigwasserprozesse mittels Basisabfluss .....	6
3.2	Verwendung der MeteoSchweiz Rasterdaten für Niederschlag .....	7
3.3	Kalibrierung mit zwei Zielgrössen (multiPREVAH) .....	8
<b>4.</b>	<b>Resultate</b> .....	<b>9</b>
4.1	Übersicht zu den Resultaten .....	9
4.2	Resultate je Einzugsgebiet .....	9
4.2.1	Der Modelloutput .....	9
4.2.2	Bewertung der Modellierung .....	14
4.2.3	Veränderte Klimabedingungen bezüglich Trockenheitsdauern .....	21
4.3	Vergleich aller 29 Einzugsgebiete .....	21
4.3.1	Tagesmittelabfluss der an 95% aller Tage erreicht oder überschritten wird .....	22
4.3.2	Tiefstes arithmetisches Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Abflusstagesmitteln (MAM7) ..	24
4.3.3	Unterschreitung des heutigen 95% Perzentils (Q347) .....	26
4.3.4	Unterschreitung des heutigen MAM7 .....	32
<b>5.</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>35</b>
<b>6.</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>40</b>
6.1	Anhang A .....	40
6.2	Anhang B .....	41
6.3	Anhang C .....	42

## 1. Zusammenfassung

Die Modellierung von Niedrigwassern stellt die Forschung heute noch vor grosse Herausforderungen. Bestehende Projektionen beinhalten daher oftmals grosse Unsicherheiten. Im Rahmen des Moduls Klimaänderung und Niedrigwasser wurde das Niedrigwasserverhalten der Schweiz zuerst vertiefter untersucht, um dann im Anschluss eine Methodik zu entwickeln womit plausible Projektionen des Niedrigwassers möglich sind. Mit einer neuen, speziell auf Niedrigwasserprozesse zugeschnittenen, Version des hydrologischen Modells PREVAH ist eine prozessnähere Modellierung von Niedrigwasserperioden möglich geworden.

Die Ergebnisse dieser quantitativen Untersuchung der Niedrigwasserabflüsse unter veränderten Klimabedingungen bestätigen bisherige Annahmen: Im Sommer werden die Abflüsse in Flüssen des Mittellandes generell zurückgehen und in den Wintermonaten ansteigen. In der fernen Zukunft (2070 bis 2099) fallen diese Veränderung deutlicher aus, als in der nahen Zukunft (2021 bis 2050). Die Veränderung des 95% Perzentils (Q347) muss differenzierter betrachtet werden, da diese Grösse Abflussminima aus verschiedenen Jahreszeiten (Sommer und Winter) gemeinsam betrachtet. Es sind daher, neben dem allgemeinen Rückgang der Abflüsse beim 95% Perzentil, auch Zunahmen zu beobachten, nämlich in Einzugsgebieten in denen bisher niedrige Winterabflüsse für tiefe Abflusswerte des 95% Perzentils verantwortlich waren. In diesen Gebieten wird durch die Zunahme der winterlichen Abflüsse durch erhöhte Niederschläge in Form von Regen auch der entsprechende Wert für das 95% Perzentil zunehmen.

Die Projektionen des Niedrigwassers bieten die Möglichkeit entstehende Konflikte in Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes frühzeitig zu erkennen und entsprechende Massnahmen zu treffen.

## 2. Einführung

### 2.1 Auftrag

Die Modellierung von Niedrigwassern in der Zukunft mittels Klimaszenarien stellt die Forschung heute noch vor grosse Herausforderungen. Einerseits fehlt es an einem fundierten Prozessverständnis der Entstehung von Niedrigwassern und andererseits sind die bestehenden hydrologischen Modelle auf die Modellierung von Mittel- und Hochwasser ausgerichtet. Auch wenn diese Modelle heute gute Resultate für Niedrigwasserperioden zeigen, so können sie nicht direkt für die Erzeugung von Projektionen des Niedrigwassers verwendet werden. Aufgrund der Prozessferne ist es unwahrscheinlich, dass auch für die Zukunft mit diesen Modellen gute Niedrigwassermodellierungen entstehen. Ein zusätzlicher Aufwand ist notwendig, um ein Modell für Klimaimpaktstudien im Niedrigwasserbereich verwendbar zu machen. Um den Auftrag im Rahmen von CCHydro – die Zurverfügungstellung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten quantitativen Projektionen des Niedrigwassers – zu erfüllen, wurden im Modul 4 *Klimaänderung und Niedrigwasser* diesbezüglich verschiedene Massnahmen ergriffen: Die Niedrigwasserprozesse wurden für 59 Einzugsgebiete

der gesamten Schweiz vertieft untersucht (Kapitel 3.1). Die vorgefundenen unterschiedlichen Prozesse führten zu einer räumlichen Fokussierung auf das Schweizer Mittelland. Da dort in Zukunft während Trockenperioden die grössten Konflikte zwischen verschiedenen Nutzergruppen des Wassers zu erwarten sind, ist diese Einschränkung vertretbar. Für 29 Einzugsgebiete im Schweizer Mittelland konnte mit dem erlangten Prozesswissen ein neues Verfahren entwickelt werden, wodurch das hydrologische Modell PREVAH (VIVIROLI et al. 2009) auf Niedrigwasserprozesse kalibriert werden kann (Kapitel 3.3). Diese neuartige Kalibrierung erlaubt die Anwendung von PREVAH auch in zeitlich weit von der Kalibrierungs- und Validierungsperiode entfernten Zeitabschnitten. Die Verwendung von flächenhaft vorliegenden Niederschlagsdaten der MeteoSchweiz (Kapitel 3.2) erhöht die Verlässlichkeit der Modellierung, da diese Niederschlagswerte durch eine ausgeklügelte räumliche Interpolation erzeugt wurden und daher deutlich besser mit den tatsächlichen Niederschlagswerten in einem Einzugsgebiet übereinstimmen.

Die Auswirkungen der erwarteten Klimaänderung auf die Niedrigwasser werden im Kapitel 4 (Resultate) aufgezeigt. Die Ergebnisse pro Einzugsgebiet werden im Kapitel 4.2 exemplarisch anhand von aussagekräftigen Einzugsgebieten dargestellt. Die Ergebnisse stehen für alle 29 untersuchten Einzugsgebiete zur Verfügung (Anhang C). In Kapitel 4.3 folgt eine gemeinsame Analyse aller untersuchter Einzugsgebiete anhand von vier Niedrigwasserkennwerten: 95% Perzentil (Q347), Tiefstes arithmetisches Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Abflusstagesmitteln (MAM7), Niedrigwasser-Dauer und Niedrigwasser-Intensität. Schliesslich werden im Kapitel 5 Schlüsse gezogen zur Auswirkung der Klimaänderung auf das Niedrigwasser im Schweizer Mittelland.

## 2.2 Untersuchte Stationen

Gemäss DVWK-Regeln zur Analyse von Niedrigwasser können beeinflusste Einzugsgebiete nicht zur Ermittlung von Niedrigwasserkenngrössen verwendet werden, da die entsprechenden Zeitreihen nicht homogen sind (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (DVWK) 1983). Auch kann das Modell PREVAH Beeinflussungen des Abflussverhaltens, sei es durch Stauseen, Ableitungen, Seeregulierungen oder Bewässerungen, nicht berücksichtigen. Es ist daher entscheidend, für die Modellierung nur Daten von unbeeinflussten Abflussmessstationen zu verwenden. Die Niedrigwasserdatenbank NQstat (BWG 2005) des BAFU bietet für 345 Stationen eine Einteilung in drei Stufen der Beeinflussung: stark, mässig und schwach. Für das Projekt Klimaänderung und Niedrigwasser wurden ausschliesslich Stationen mit schwacher oder mässiger Beeinflussung des Niedrigwasserabflusses verwendet. Eine *schwache* Beeinflussung bedeutet, dass keine Beeinflussung bekannt ist. Bei einer *mässigen* Beeinflussung gibt es vermerkte Beeinflussungen, die in den Daten aber nicht nachweisbar sind. Meist handelt es sich dabei um Trinkwasserleitungen (BWG 2005). Der Niedrigwasserdatenbank können auch Angaben zur Messgenauigkeit entnommen werden. Da die Volumenfehler bei Niedrigwasser auch bei kleinen Fehlern in der Pegelmessung sehr gross sind, wurden ausschliesslich Stationen mit einer ho-

hen Messgenauigkeit im Niedrigwasserbereich verwendet. Für die Untersuchung der Niedrigwasserprozesse wurden schliesslich 59 Einzugsgebiete aus der ganzen Schweiz verwendet (Abb. 1).

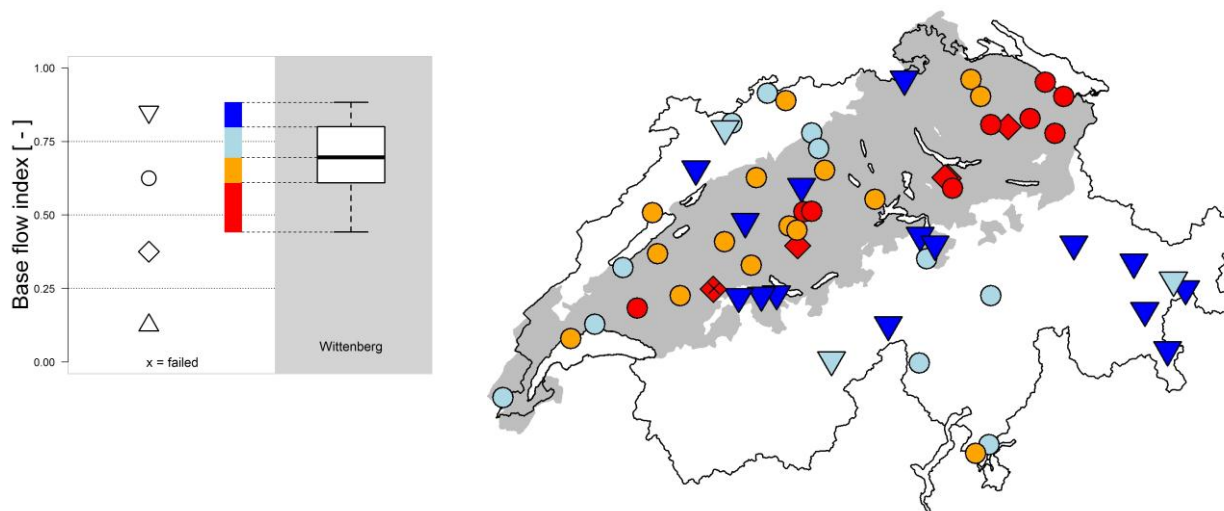


Abb. 1: Lage der 59 gesamtschweizerisch untersuchten Einzugsgebiete und Angabe der BFI-Wert des Basisabflusses Wittenberg. Die Bedeutung der verwendeten Symbole und Farben wird aus der linken Graphik ersichtlich: mit Kreisen sind bspw. BFI-Werte zwischen 0.5 und 0.75 dargestellt und rot sind alle Symbole mit einem BFI-Wert kleiner als das 25 Prozent Quantil aller BFI-Werte.

Die Niedrigwasserprozesse wurden im Zeitraum 1974 bis 2009 untersucht, wobei an einzelnen Stationen Analysen zurück bis in die 1920er Jahre möglich waren. Für die Analyse von Niedrigwassern wird ein Beobachtungszeitraum von nicht wesentlich weniger als 20-30 Jahren vorgeschlagen (1992). Diese Vorgabe konnte dank den langjährigen Messreihen des BAFU an praktisch allen Stationen eingehalten werden. Die kürzeste Messreihe der Stationen im Schweizer Mittelland beträgt 19 Jahre (Anhang A). Nach der Fokussierung auf das Schweizer Mittelland verblieben 29 Einzugsgebiete für die Modellierung mit PREVAH (Abb. 2). Eine Liste der 29 Einzugsgebiete des Schweizer Mittellandes befindet sich in Anhang A. Für die Modellierungen wurden die Jahre 1983 bis 2009 als Kontrollperiode definiert. Für die Jahre 1980 bis 1982 ist die Dichte an ANETZ-Stationen zu gering, als das die benötigten klimatischen Eingangsvariablen für alle Einzugsgebiet in ausreichender Qualität bestimmt werden könnten. Nach dem Wegfall eines Initialisierungsjahres – indem sich die Speicherinhalte anpassen – verbleiben 26 Jahre von 1984 bis 2009 zur Analyse.

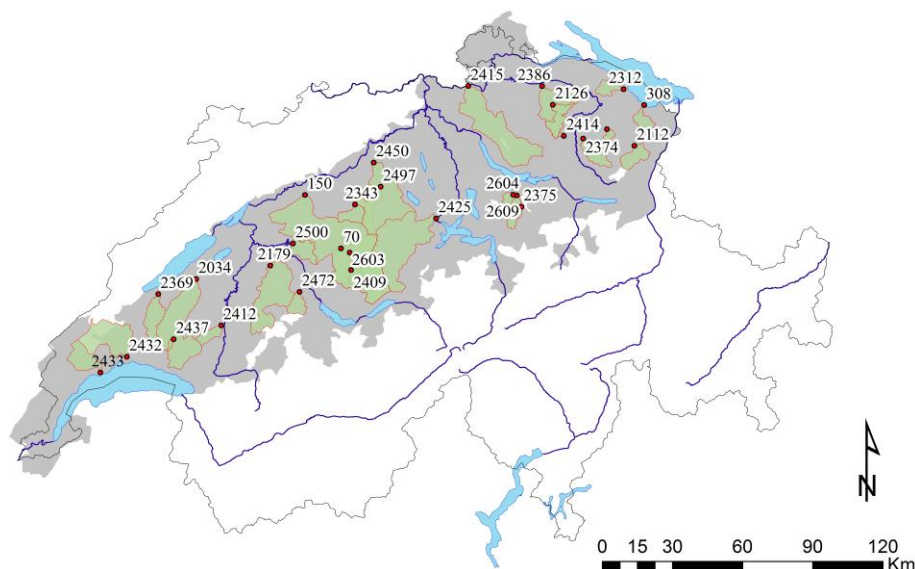


Abb. 2: Untersuchte Einzugsgebiete im Mittelland (grün). Neben der Messstation (rot) ist die DBLH-Nummer angegeben.

### 3. Methoden

*„Da bisher in der Schweiz meist genügend oder sogar viel Wasser verfügbar war, wurde die Erforschung der Niedrigwasserverhältnisse und der Niedrigwasserprozesse eher stiefmütterlich behandelt.“ (VOLKEN 2010)*

#### 3.1 Analyse der Niedrigwasserprozesse mittels Basisabfluss

Für die Analyse des Niedrigwassers steht eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verfügung. Für CCHydro Niedrigwasser hat sich die Analyse mittels bestehender Verfahren zur mathematischen Basisabflusssparation angeboten. Die verwendeten Verfahren sind etablierte Verfahren und benötigen ausschliesslich das Tagesmittel des gemessenen Abflusses um den Basisabfluss eines Einzugsgebietes zu bestimmen. Der Basisabfluss ist eine Grösse nahe an den Prozessen die zu Niedrigwasser führen: „Nach Fröhlich et al. (1994) ist der Basisabfluss derjenige Teil des Abflusses, der nicht eine unmittelbare Konsequenz des Niederschlages ist. Basisabfluss kann daher auch als Ausfluss aus dem Grundwasser angesehen werden, der ein oberirdisches Fließgewässer während niederschlagsloser Perioden mit Wasser versorgt“ (MEYER et al. 2011). Beim Basisabfluss handelt es sich demnach um jenen Anteil des gemessenen Gesamtabflusses, der niedrigwasserrelevant ist. Abflussspitzen sowie Abflusskomponenten ohne direkten Zusammenhang mit Niedrigwasser können somit von der Untersuchung ausgeschlossen werden.

Es hat sich gezeigt, dass der Basisabfluss nach Wittenberg (1999) die Niedrigwasserprozesse am plausibelsten widerspiegelt. In Abbildung 1 ist für 59 Stationen der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss – der sogenannte Basisabflussindex (BFI) – während der Monate Mai bis Oktober angegeben. Sowohl für alpine als auch teilweise für mittelländische Einzugsgebiete konnte ein hoher BFI-Wert nachgewiesen werden. Es wurde gezeigt, dass verschiedene Speicherprozesse – Gletscher und Schnee in den Alpen und Grundwasser im Mittelland – für den hohen Anteil des Basisabflusses verantwortlich gemacht werden können. Das Fehlen eines entsprechenden Speichers in voralpinen Gebieten führt dort zu tiefen BFI-Werten. Die zeitliche Konstanz des BFI-Wertes in grundwassergeprägten mittelländischen Einzugsgebieten spricht zusätzlich für seine Verwendung für Klimastudien. In voralpinen Einzugsgebieten (diese zählen noch zum Untersuchungsraum Mittelland) zeigt sich ein Rückgang der BFI-Werte seit den 1970er Jahren, was durch den Rückgang der Schneedecke, und der entsprechenden Schneeschmelze im Frühling, zu erklären ist. Genauere Angaben zu dieser Analyse finden sich in MEYER et al. 2011. Die Fokussierung auf das Mittelland (Abb. 1, graue Fläche) erklärt sich durch die stark unterschiedlichen Speichermechanismen in den Alpen und im Jura. Die geringe Anzahl Stationen auf der Alpensüdseite hat zum Ausschluss dieser Region geführt.

### **3.2 Verwendung der MeteoSchweiz Rasterdaten für Niederschlag**

Eine der grössten Unsicherheiten bei der hydrologischen Modellierung entsteht bei der Interpolation des Niederschlags von Stationsmessung auf Flächenniederschlag. Das Standardverfahren bei der Verwendung des PREVAH-Programmes zur Aufbereitung von meteorologischen Daten (Winmet) besteht in einer höhengewichteten inversen Distanzgewichtung (DTIDW). In Einzugsgebieten der Schweiz mit stark heterogener Ausprägung der Oberflächenmorphologie ist die Annahme einer höhen- und distanzgewichteten Abnahme des Niederschlags von einer Punktmessung oftmals nicht zutreffend. Der verwendete Datensatz der MeteoSchweiz trägt diesem Umstand besonders Rechnung. Das verwendete Verfahren bestimmt den Flächenniederschlag abhängig von Distanz, Höhe und Richtungsorientierung der interpolierten Station. Zusätzlich wird die Differenz der Messung zur mittleren Klimatologie, und dadurch ein stabiles Mass zur Berechnung des Flächenniederschlags verwendet. Detaillierte Angaben zu diesem Verfahren finden sich in FREI & SCHÄR 1998. Der Datensatz existiert in täglicher Auflösung für den Zeitraum 1961 bis 2009 womit die gesamte Untersuchungsperiode abgedeckt ist. Der Datensatz liegt in einem Raster mit Kantenlänge von 2 Kilometern vor (Abb. 3) und wurde für die Modellierung auf ein Raster mit einer Kantenlänge von 500 Metern neu skaliert.



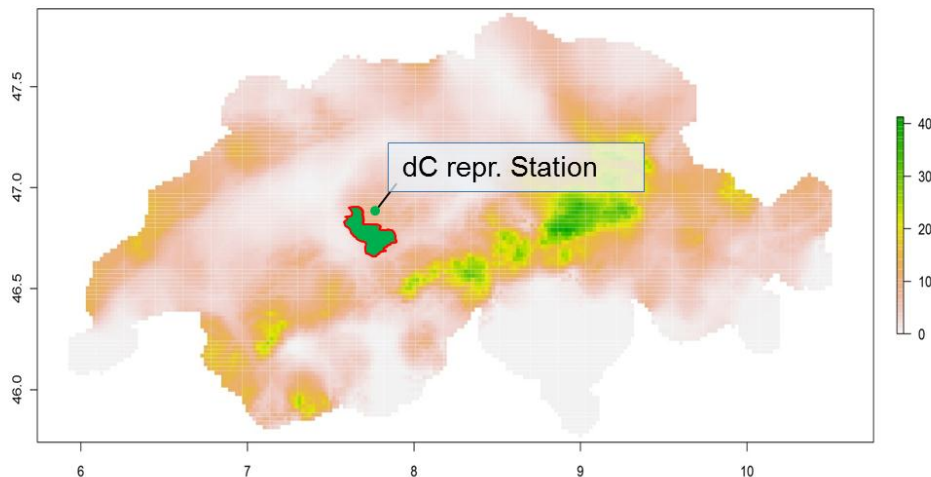


Abb. 3: Niederschlagskarte des 2. Januar 1980 aus dem Datensatz der MeteoSchweiz (Angaben in mm/d, räumliche Auflösung 2km).

Neben Niederschlag benötigt PREVAH fünf weitere meteorologische Eingangsvariablen (Temperatur, relative Feuchtigkeit, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer). Diese werden wie bisher mit dem „Pre-processing Tool“ Winmet aufbereitet (VIVIROLI et al. 2009). Für diese Variablen stellt die höhenabhängige inverse Distanzgewichtung, aufgrund der grossskalig wirkenden physikalischen Prozesse kein Problem dar.

Die Verwendung des Rasterdatensatzes bedingt eine leicht modifizierte Anwendung des Delta Change Ansatzes (BOSSHARD et al. 2011), da für den Niederschlag keine Stationsmessdaten verwendet werden. In Absprache mit dem IAC (Modul 1) und im Einklang mit dem Projektmitglied WSL (Modul 2) wird der Delta Change Faktor einer repräsentativen Messstation für das gesamte Einzugsgebiet verwendet (Abb. 3). Die Zuordnung von repräsentativen Meteostationen zu den Einzugsgebieten befindet sich in Anhang B.

### 3.3 Kalibrierung mit zwei Zielgrössen (multiPREVAH)

Abflussspitzen können in einem Model korrekt wiedergegeben werden ohne die Prozesse des Basisabflusses richtig zu berücksichtigen. Die hochwasserspezifische Version des PREVAH (VIVIROLI & WEINGARTNER 2011) beispielsweise gibt die Hochwasserspitzen sehr gut wieder, ohne die Niedrigwasserprozesse korrekt abzubilden. Um die Prozessnähe des hydrologischen Modells PREVAH in Bezug auf Niedrigwasser zu erhöhen und um die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Modellierung des Abflussgeschehens in einer von der Kalibrierungsperiode zeitlich weit entfernten Zukunft zu erhöhen, wurde das Vorgehen bei der Modellkalibrierung geändert. Die Modellstruktur von PREVAH widerspiegelt den aktuellen Stand des Wissens und ist geeignet, die Prozesse auch

unter extremen klimatischen Veränderungen zu simulieren. Die Modellkalibrierung basiert neu auf einem sogenannten multi-kriteriellen Ansatz – daher die Bezeichnung multiPREVAH. Multi-kriterielle Kalibrierung bietet eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, physikalisch korrekte Abflussgenerierungsprozesse zu simulieren. Sie basiert auf der Kalibrierung des Modells mit mehr als einer Ergebnisvariable (bspw. Gesamtabfluss, Schneevertelung, Grundwasserstände etc.). Der Gebrauch von mehr als nur einer Ergebnisvariablen erhöht die Wahrscheinlichkeit aus der Kalibrierung die richtigen Parameter zu erhalten, weil mehr als nur eine Voraussetzung erfüllt sein muss (SEIBERT 2000). Dadurch kommt die interne Situation eines Modells in eine bessere Übereinstimmung mit den wirklichen Bedingungen in dem Einzugsgebiet. Diese verbesserte interne Konsistenz des Modells ermöglicht verlässlichere Vorhersagen auch ausserhalb des Kalibrierungszeitraumes. Bestehende hydrologische Klimamodellierungen verzichten häufig auf eine multi-kriterielle Kalibrierung aufgrund fehlender Referenzgrössen. Der zur Analyse der Niedrigwasserprozesse berechnete Basisabfluss Wittenberg eignet sich am besten für eine multi-kriterielle Kalibrierung von PREVAH. Insbesondere die Prozessnähe zum Niedrigwasser macht den Basisabfluss Wittenberg, im Vergleich zu Schneedaten oder Grundwasserständen, zu einer sehr wertvollen Referenzgrösse. Einzelheiten zur Kalibrierung finden sich in Meyer et al. (submitted).

## **4. Resultate**

### **4.1 Übersicht zu den Resultaten**

Aus der Modellierung der Klimaszenarien geht eine grosse Datenmenge hervor. Pro Einzugsgebiet entstehen für zwei Zeitabschnitte – 2021 bis 2050 (2035 genannt) und 2070 bis 2099 (2085 genannt) – 30-jährige Zeitreihen für je 10 verschiedene Niederschlags- / Temperaturszenarien. Insgesamt stehe für die Analyse der Auswirkungen der Klimaänderung auf das Niedrigwasser im Schweizer Mittelland also 580 Zeitreihen (über 30 Jahre) zur Verfügung, die in Relation zur Kontrollperiode 1995 untersucht werden sollen. Im Folgenden werden die Resultate der Datenanalyse vorgestellt.

### **4.2 Resultate je Einzugsgebiet**

#### **4.2.1 Der Modelloutput**

Die Modellierungen der Szenarien erzeugen für 2035 und 2085 je 10 verschiedene mittlere Jahresgänge des Abflusses. Abbildung 4 (links) zeigt den mittleren Jahresgang des Abflusses für die Broye-Payerne anhand der Pardé-Koeffizienten. In Relation zum mittleren Jahresgang der Kontrollperiode zeigen die Kurven der Szenarioperioden die zu erwartende Veränderung des Regimes, sowie den aus den 10 Szenarien aufgespannten Unsicherheitsbereich. Am Beispiel der Broye kann das allgemeine Verhalten sehr gut aufgezeigt werden: Sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft nehmen die Abflüsse im Sommer ab und im Winter zu. Wobei die Zu- beziehungsweise

Abnahme in der fernen Periode (2085) jeweils stärker ausgeprägt ist als in der nahen Periode (2035). Die Tendenz zu weniger Abfluss in den Monaten März und April in der nahen Zukunft ändert in der fernen Zukunft zu wiederum mehr Abfluss. Dies kann so interpretiert werden, dass der Rückgang der Schneedecke bis 2035 zu einer Abnahme des Abflusses in den Monaten März und April führt und die stärkere Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr bis 2085 wiederum zu einer Erhöhung des Abflusses in den Monaten März und April auf heutiges Niveau bewirkt.

Nicht in allen Einzugsgebieten ist der durch die verschiedenen Klimaszenarien vorgegebene Unsicherheitsbereich so klein wie an der Broye beziehungsweise ist eine Interpretation gleich gut möglich: Für die Necker-Mogelsberg (Abb. 4, rechts) beinhaltet der Unsicherheitsbereich weitgehend auch das Abflussverhalten während der Kontrollperiode, dies insbesondere in der nahen Zukunft. Obwohl auch in der nahen Zukunft eine Tendenz hin zu einer leichten Unterschreitung der Abflusswerte in den Monaten Juli und August besteht, wird das Vorzeichen erst in der fernen Zukunft eindeutig negativ für diese beiden Monate. Die Regimekurven aller Einzugsgebiete sind in Anhang C zu finden.

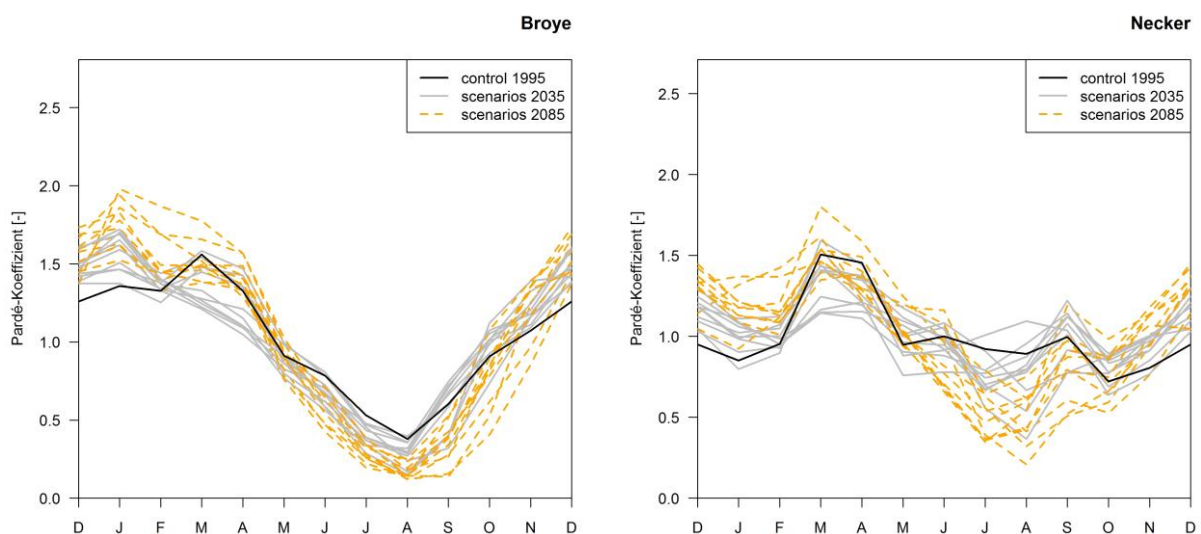


Abb. 4: Veränderung des Abflussregimes an der Broye-Payerne und Necker-Mogelsberg für die nahe und ferne Zukunft.

Die Abflussdauerkurven der Kontrollperiode und der Szenarien ermöglicht eine Analyse der Veränderung eines bestimmten Abflusswertes durch die Klimaänderung. Insbesondere die Veränderung des 95% Perzentils (Q347) ist von Interesse. Neben diesem Wert wurden in die Abbildung 5, in Anlehnung an die Niedrigwasserdatenbank und die Jahrbücher des BAFU, die 90% (Q329) und 50% (Q182) Perzentile eingezeichnet. Das modellierte 95%-Perzentil der Kontrollperiode beträgt

an der Broye  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (Abb. 5). Aus den gemessenen Abflussdaten errechnet sich ein entsprechender Wert von  $1.37 \text{ m}^3/\text{s}$  für die Jahre 1984 bis 2009 (Abb. 5, rechte y-Achse). In der nahen Zukunft liegen die Szenarien bei beiden Einzugsgebieten im Bereich des Abflusses während der Kontrollperiode. In der fernen Zukunft hingegen verändern sich die niedrigwasserrelevanten Perzentile mit der zu erwartenden Klimaänderung alle hin zu einer höheren Häufigkeit. Der Abflusswert des 95%-Perzentil (Q347) wird nach Abbildung 5 an der Broye in der fernen Zukunft zu einem 90%-Perzentil (Q329). Der entsprechende Abflusswert wird also nicht mehr nur an 18 Tagen unterschritten, sondern an rund 37 Tagen im Jahr. Alle Dauerkurven befinden sich wiederum im Anhang C. Zudem ist eine Karte analog der Tafel 5.8 im hydrologischen Atlas der Schweiz im Entstehen. Auf dieser Karte werden für die untersuchten Stationen neben dem Q347 der gemessenen Abflusswerte von 1984 bis 2009 auch der entsprechende Wert der Modellierung für diesen Zeitraum und für die Perioden 2035 und 2085 aufgeführt.

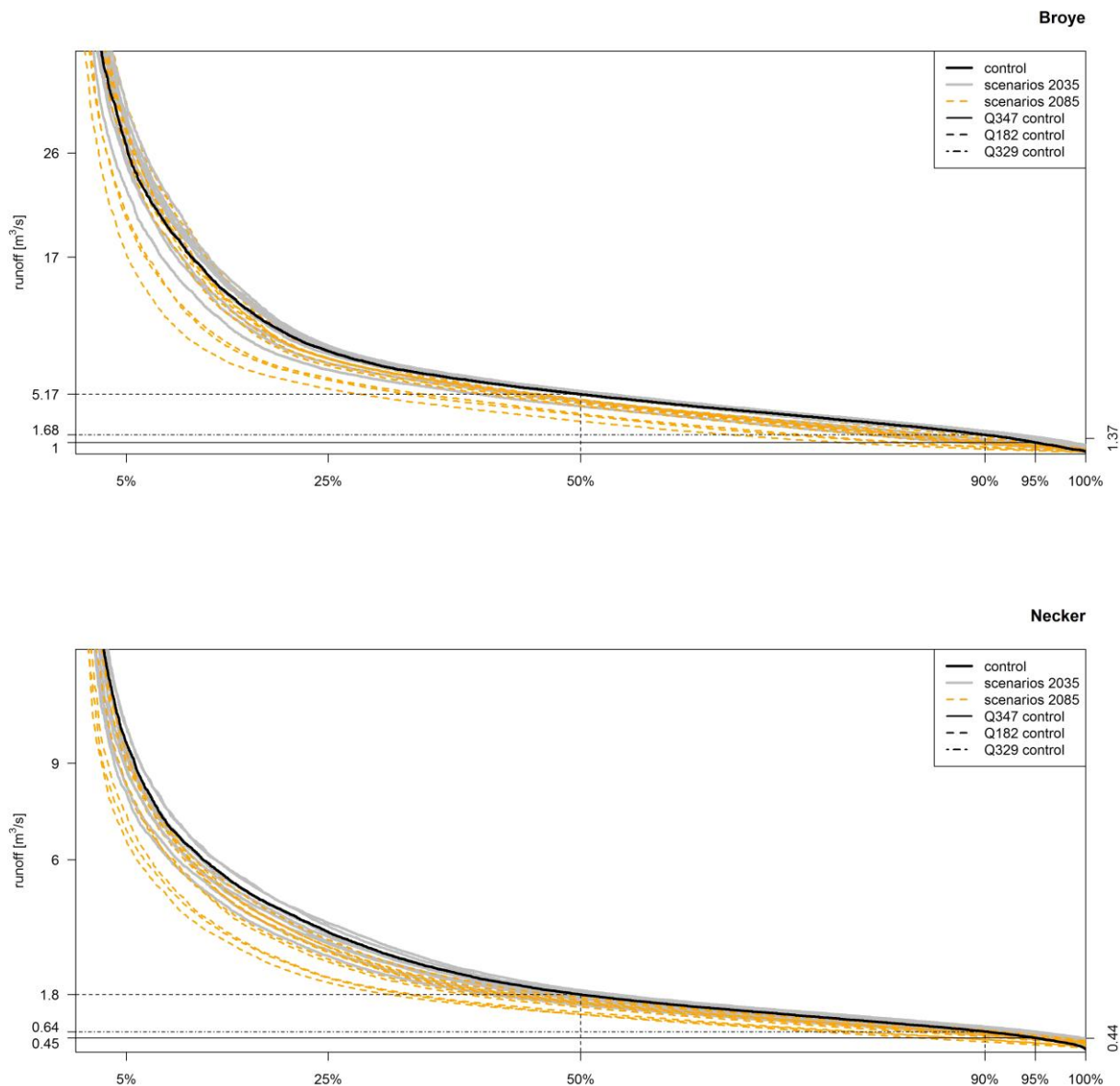


Abb. 5: Auszug aus der modellierten Abflussdauerkurve für die Broye-Payerne (die Abflussspitzen liegen ausserhalb des Graphikbereichs). Die modellierten Abflusswerte der Kontrollperiode (schwarz) sind zusammen mit den 10 Szenarienläufen für die nahe und ferne Zukunft aufgetragen. Auf der zweiten y-Achse (rechts) ist das Q347 der gemessenen Daten angegeben.

Neben den Regimen und den Perzentilen wurde im Rahmen von CCHydro Niedrigwasser die tiefsten arithmetischen Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Abflusstagesmitteln (AM7: annual mean 7

day flow) innerhalb eines Jahres ermittelt. Beim in der Niedrigwasserdatenbank ausgeschiedenen NM7Q handelt es sich um dieselbe Grösse, AM7 ist lediglich die englische Bezeichnung. Im Gegensatz zum NM7Q wurde das AM7 in dieser Untersuchung aber pro Kalenderjahr und auch nur in den Sommermonaten (Mai-Oktober) bestimmt und nicht für das in der Niedrigwasserdatenbank ausgewiesene Niedrigwasserjahr (Mai-April). Ein direkter Vergleich dieser beiden Werte ist daher nicht möglich. Der AM7 hat sich als Kenngrösse für Niedrigwasser stark etabliert. Seine Vorteile liegen einerseits darin, dass die Tagesmittel der Abflüsse nicht losgelöst von ihrem „Kontext“ (Abflusswerte vorher und nachher) analysiert werden, wie das bei der Abflussdauerkurve der Fall ist, andererseits werden durch die Mittelung über 7 Tage einzelne durch Messfehler verursachte Extreme korrigiert. Die modellierten AM7 stimmen daher auch gut mit der gemessenen Realität überein (vgl. dazu auch Kapitel 4.2.2 Bewertung). Abbildung 6 zeigt die zu erwartende Veränderung des AM7 an der Broye durch die Klimaveränderung in der nahen und fernen Zukunft: Pro Jahr der Kontrollperiode entstehen 10 Werte für die 10 Szenarien (schwarze X) und ein zugehöriger Median (roter Punkt). An der Broye finden sich von 1984 bis 2009 jährliche AM7 von rund 0.05 mm bis 0.6 mm. Praktisch alle Szenarienläufe ergeben für jedes dieser Jahre für 2035 tiefere AM7 als während der Kontrollperiode. Der Median aller Szenarien liegt in jedem Jahr unterhalb des entsprechenden AM7 Wertes der Kontrollperiode. 2085 liegen alle AM7-Werte unter der Kontrollperiode. Die Mediane 2085 sind deutlich kleiner als während der Kontrollperiode (Abb. 6, rechts). Die Graphiken aller Einzugsgebiete befinden sich wiederum im Anhang. Eine weiterführende Diskussion all dieser Ergebnisse wird in Meyer et al. (in prep.) gemacht.

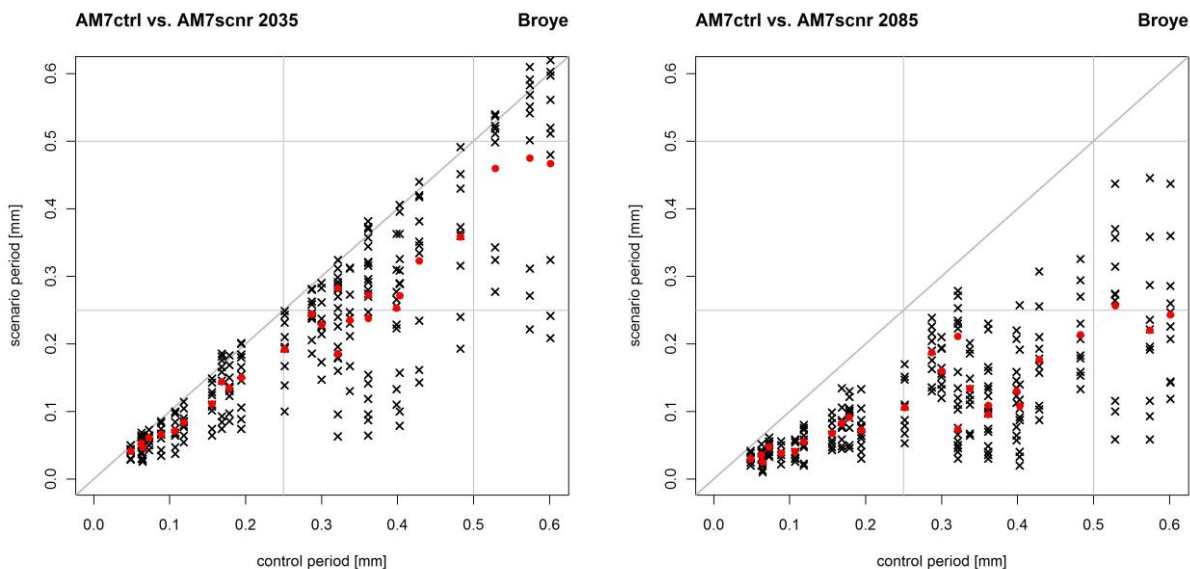


Abb. 6: Veränderung der jährlichen minimalen mittleren 7 Tages-Abflüsse (AM7) an der Broye für alle 26 Untersuchungsjahre. Ergebnisse für die Szenarienkäufe der nahen Zukunft links und der fernen Zukunft rechts.

#### 4.2.2 Bewertung der Modellierung

Für alle 29 untersuchten Einzugsgebiete des Schweizer Mittellandes war die Modellierung mit multiPREVAH möglich und erreichte beim Vergleich mit den Messungen hohe Effizienzwerte. Für die hier angestrebte Aussageschärfe ist es dennoch nötig genauer zu bewerten, wie gut die Modellierungen im Hinblick auf die angestrebte Aufgabe – Niedrigwasserprojektionen in die Zukunft – sind. Es wird dabei zwischen drei Stufen unterschieden: harte Aussage möglich, mittelharte Aussage möglich oder weiche Aussage möglich. Dazu werden drei graphische Ansätze verwendet anhand derer sich die Modellierung je Einzugsgebiet semiquantitativ bewerten lässt: AM7-Graphik (Abb. 7), 2003-Graphik (Abb. 8), 2002-2004-Graphik (Abb. 9). Das Gesamtprädikat aller drei Graphiken führt zur Gewichtung der erzeugten Szenarien bei der Beurteilung der Auswirkung der Klimaänderung auf das Niedrigwasser.

Die erste Graphik, die sogenannte AM7-Graphik, zeigt die Abweichungen des jährlichen 7 Tages Minimum (AM7) aus der modellierten Zeitreihe vom jährlichen AM7 der gemessenen Zeitreihe. Das jährliche 7 Tages Minimum der Modellierung muss dabei nicht zwangsläufig an denselben Tagen stattfinden wie bei den gemessenen Daten. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für ein Einzugsgebiet (Broye) mit dem harte Aussagen für die zukünftige Entwicklung möglich sind. Die modellierten AM7 zeigen einen starken positiven Zusammenhang mit den gemessenen AM7 und die absoluten Ab-

weichungen sind gering. Das Extremjahr 2003 und auch das mittlere AM7 (MAM7) der Modellierung decken sich weitgehend mit den Messungen.

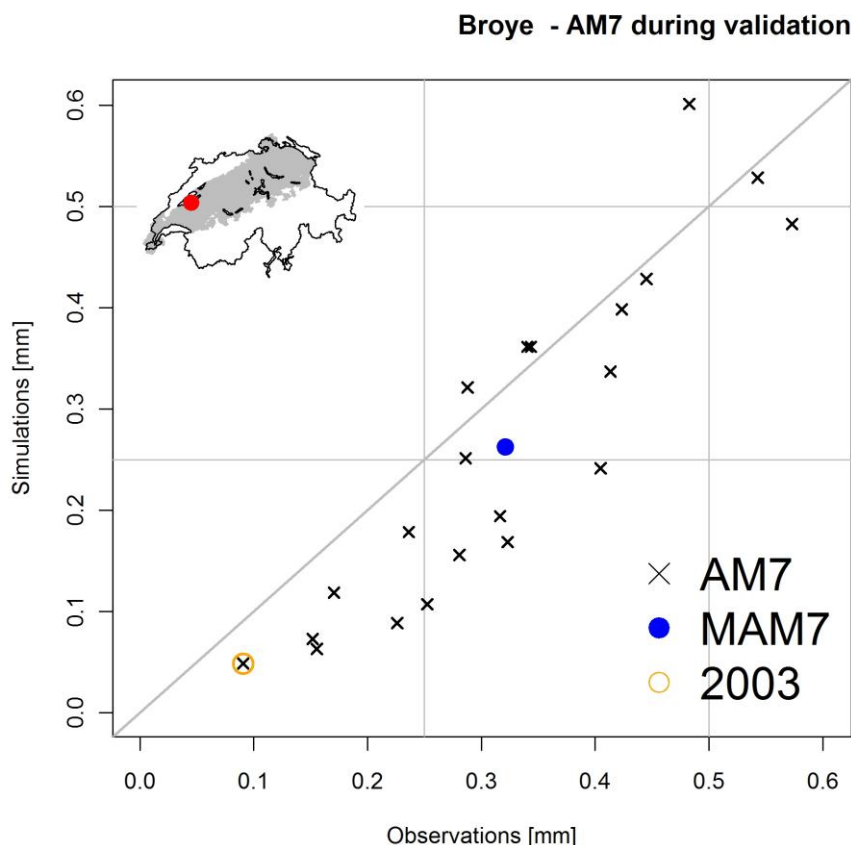


Abb. 7: AM7-Graphik zur Beurteilung der Modellierung von sommerlichen Niedrigwassern für die Broye.

Die 2003-Graphik zeigt das Verhalten des hydrologischen Modells im Extremsommer 2003 – welcher hier als Modellfall für die trockenen Sommer der Zukunft aufgefasst wird (SCHÄR et al. 2004) – gesamthaft auf (Abb. 8). Diese Graphik ermöglicht eine Beurteilung, ob PREVAH die Prozesse im 2003 plausibel simuliert (für ein Modellschema von PREVAH siehe Abbildung 10). Neben den täglichen Niederschlagswerten und der Evapotranspiration (Abb. 8, oben), sind die verschiedenen Abflusskomponenten (Abb. 8, Mitte) und der Füllungsgrad der einzelnen Speichermodule (Abb. 8, unten), ebenfalls in täglicher Auflösung, angegeben. Ende Oktober 2003 ist der Gesamtinhalt aller Speichermodule bei rund 150 mm und besteht aus: Schneespeicher (0 mm), Bodenfeuchtespeicher (~120 mm), oberer Abflussspeicher (~2 mm), unterer Abflussspeicher (~28 mm). Die Graphik mit den vier modellierten Abflusskomponenten (RTOT, R0, R1 und R2) wurde mit den beiden Zielgrößen gemessener Abfluss (Q observed) und dem Basisabfluss Wittenberg (base flow Witten-



berg) ergänzt. An der Broye werden zwar einzelne Niederschlagsereignisse im Juli und August 2003 nicht richtig in Abfluss umgewandelt: der modellierte Gesamtabfluss steigt nicht entsprechend der Messung an. Dennoch werden die Niedrigwasserphasen richtig simuliert, daher wird die Zuordnung der Broye zu einem Gebiet, mit dem harte Aussagen möglich sind, gestützt.

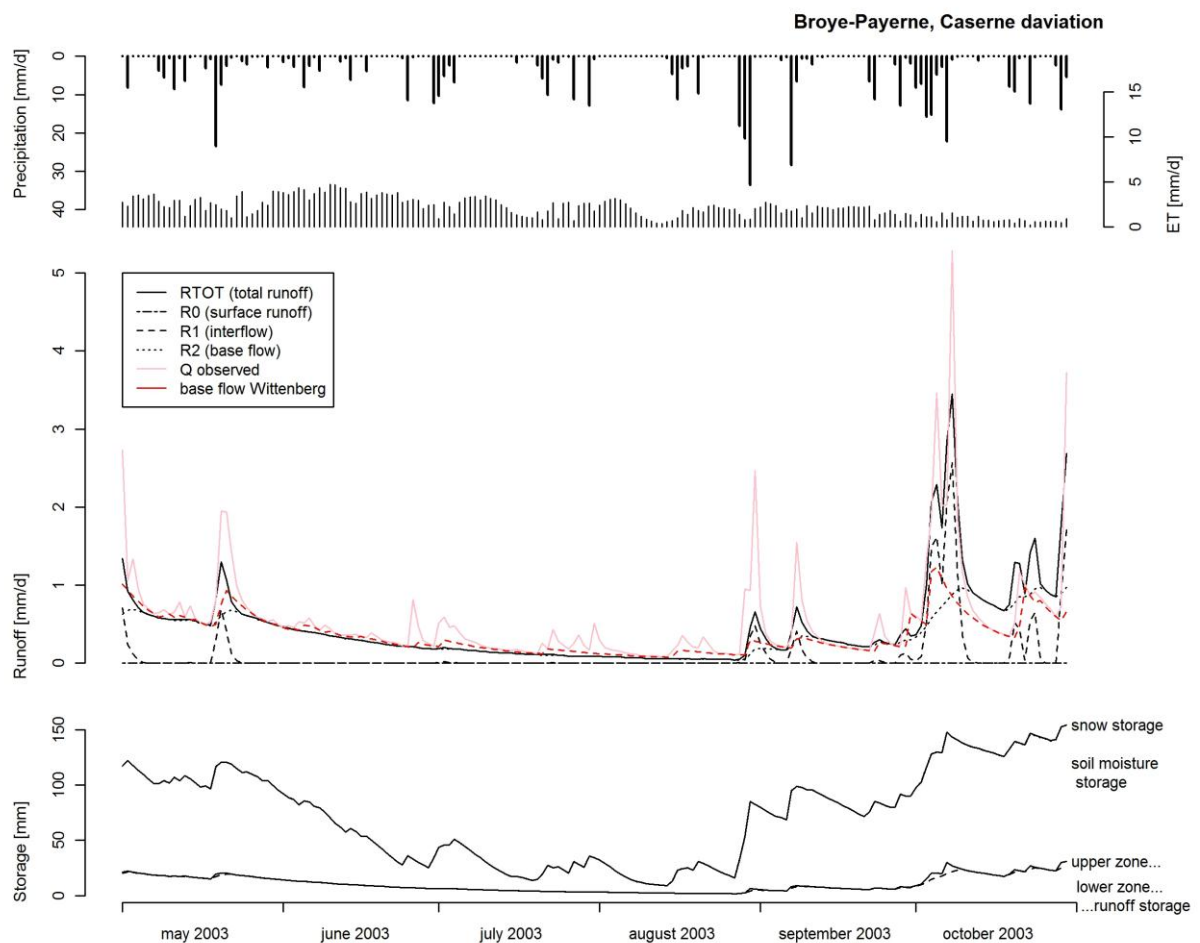


Abb. 8: 2003-Graphik zur Beurteilung des Modellverhaltens während des trockenen Sommers 2003 für die Broye.

Die dritte Graphik schliesslich, die 2002-2004-Graphik (Abb. 9), ermöglicht den Einbezug dreier Sommer und der dazwischen liegenden Wintermonate. Graphik 9 ist eine vereinfachte Darstellung von Abbildung 8. In der Abflussgraphik (Abb. 9, oben) werden gemessener (Q observed) und modellierter Gesamtabfluss (Q simulated) miteinander verglichen. Die Graphik mit dem Füllungsgrad der Speichermodule (Abb. 9, unten) ist gleich aufgebaut wie in Abbildung 8. Auch Abbildung 9 gibt keinen Anlass dazu, das Prädikat „harte Aussage“ anzuzweifeln: Der Abfluss wird auch in anderen

Sommern und auch in den Wintermonaten – in denen andere Speicherprozesse dominant sind – korrekt simuliert.

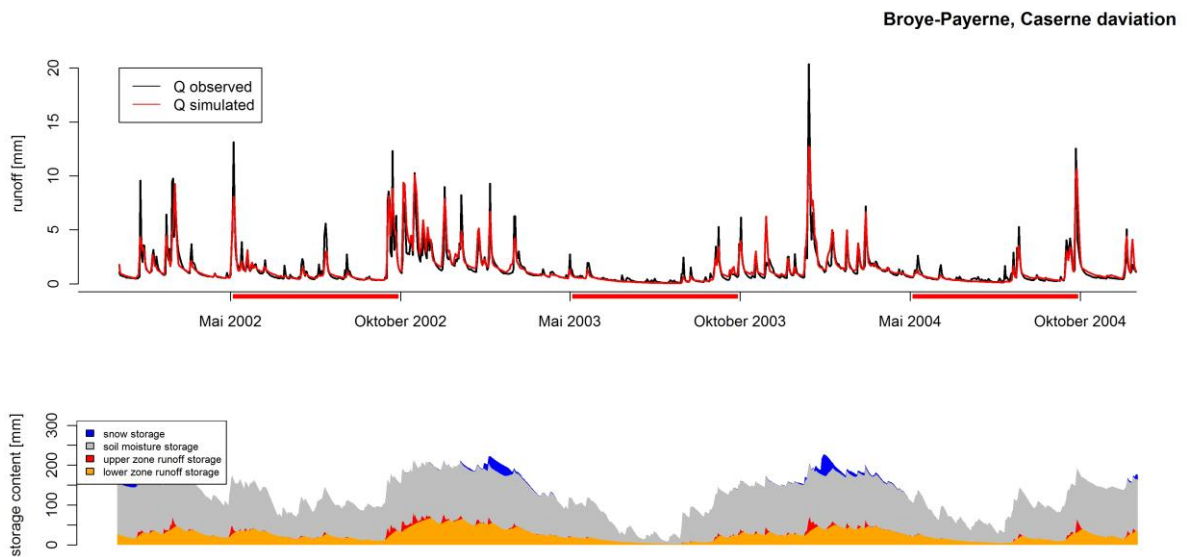
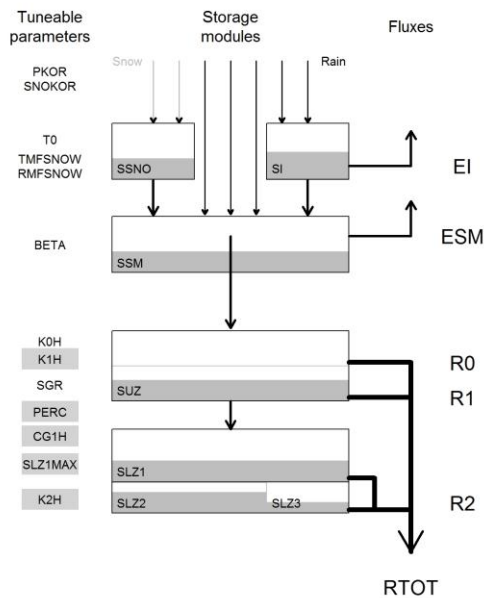


Abb. 9: 2002-2004-Graphik zur Beurteilung der Modellierung im Jahresverlauf für die Broye.



**TUNEABLE PARAMETERS**

**Precipitation**

PKOR Precipitation adjustment for rain [%]  
SNOKOR Precipitation adjustment for snow [%]

**Snowmelt**

T0 Threshold temperature snowmelt [°C]  
TMFSNOW Temperature melt factor for snow [mm/(d\*K)]  
RMFSNOW Constant radiation melt factor snow [mm/(h\*K\*W\*m2)]

**Soil moisture recharge**

BETA Non-linearity parameter for infiltration module [-]

**Runoff formation**

K0H Storage time for surface runoff [h]  
K1H Storage time for interflow [h]  
SGR Threshold for quick runoff formation [mm]  
PERC Percolation rate [mm/h]  
CG1H Storage time for quick base flow [h]  
SLZ1MAX Maximal content of the quick base flow storage [mm]  
K2H Storage time for slow base flow [h]

**STORAGE MODULES**

SSNO Snow storage [mm]  
SI Interception storage [mm]  
SSM Soil moisture storage [mm]  
SUZ Upper zone (unsaturated) runoff storage [mm]  
SLZ1-3 Lower zone (saturated) runoff storages [mm]

**FLUXES**

EI Evaporation from interception storage [mm/h]  
ESM Evapotranspiration from soil moisture storage [mm/h]  
R0 Quick runoff (surface runoff) [mm/h]  
R1 Delayed runoff (interflow) [mm/h]  
R2 Slow runoff (base flow) [mm/h]  
RTOT Total runoff [mm/h]

Abb. 10: Modellschema des hydrologischen Modells PREVAH mit Speichermodulen und Wasserflüssen (MEYER et al. submitted).

Abbildung 11 zeigt dieselben drei Graphiken für ein Einzugsgebiet mit dem Prädikat „mittlere Aussage möglich“. An der Gürbe wird das AM7 mehrheitlich unterschätzt. Im Jahr 2003 stimmt es jedoch ziemlich gut mit der Messung überein (Abb. 11, oben links). Im Sommer 2003 wird der Gesamtabfluss nach einem Niederschlagsereignis meist überschätzt, die niedrigsten gemessenen Abflusswerte stimmen aber gut mit den Modellergebnissen überein (Abb. 11, oben rechts). Überschätzungen des Gesamtabflusses treten auch in anderen Jahren und auch in den Wintermonaten auf. Der Gesamtgang des Hydrographen stimmt jedoch gut mit der Messung überein (Abb. 11, unten).

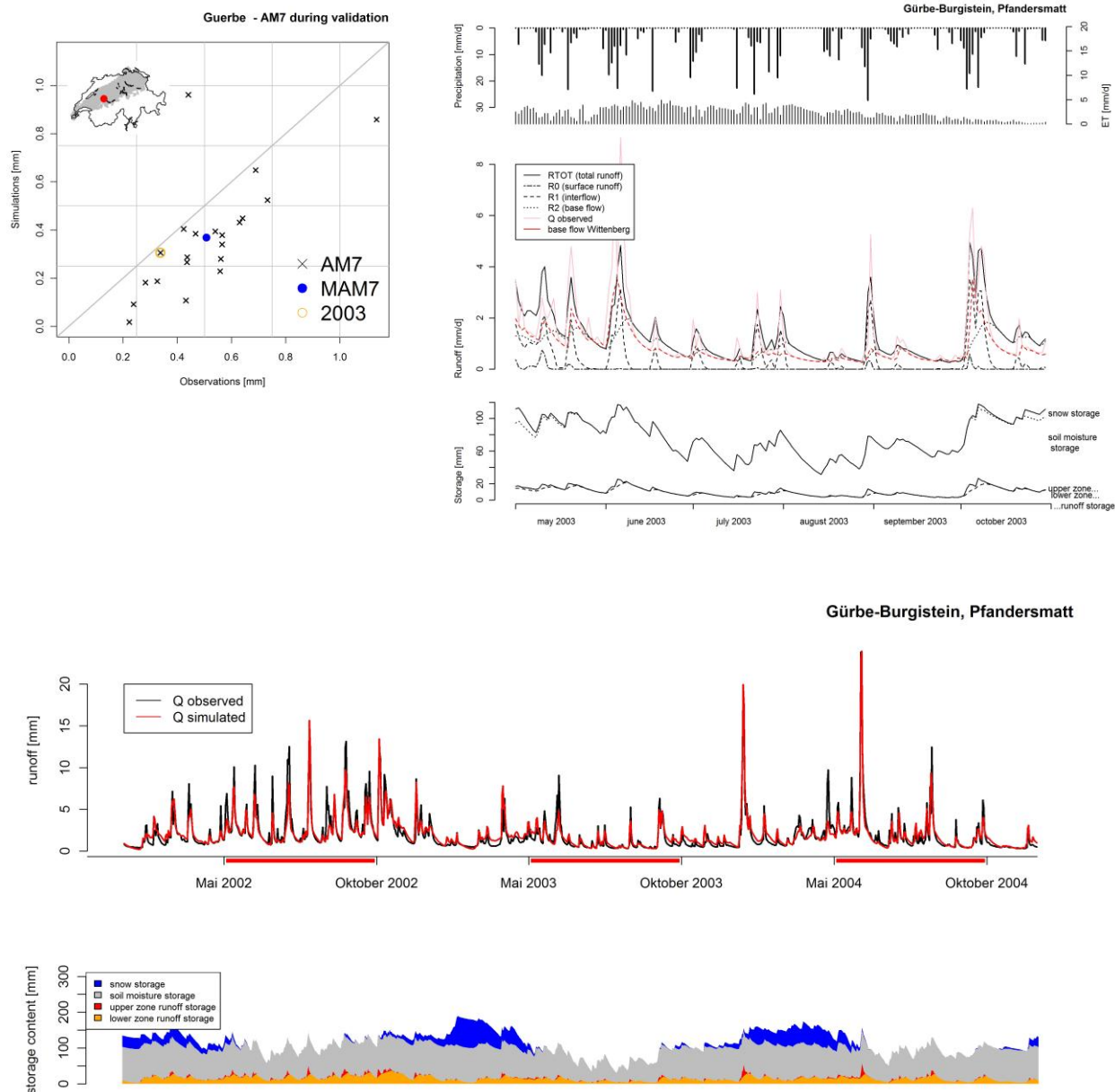


Abb. 11: Drei Graphiken zur Beurteilung zur Modellierung von Niedrigwasser für die Gürbe. Oben links: AM7-Graphik. Oben rechts: 2003-Graphik. Unten: 2002-2004-Graphik.

Ein Beispiel für eine weiche Aussage zeigt Abbildung 9. An der Emme in Eggiwil werden alle AM7 überschätzt, insbesondere auch im Jahr 2003. Ein Zusammenhang zwischen den gemessenen und den modellierten AM7 ist nicht zu erkennen (Abb. 9, oben rechts). Im Sommer 2003 stimmt der modellierte Gesamtabfluss schlecht mit dem gemessenen Abfluss überein (Abb. 9, oben rechts).

Der simulierte Abfluss stimmt auch in anderen Sommern schlecht mit der Messung überein. Im Winter ist die Modellierung deutlich näher an der Messung (Abb. 9, unten).

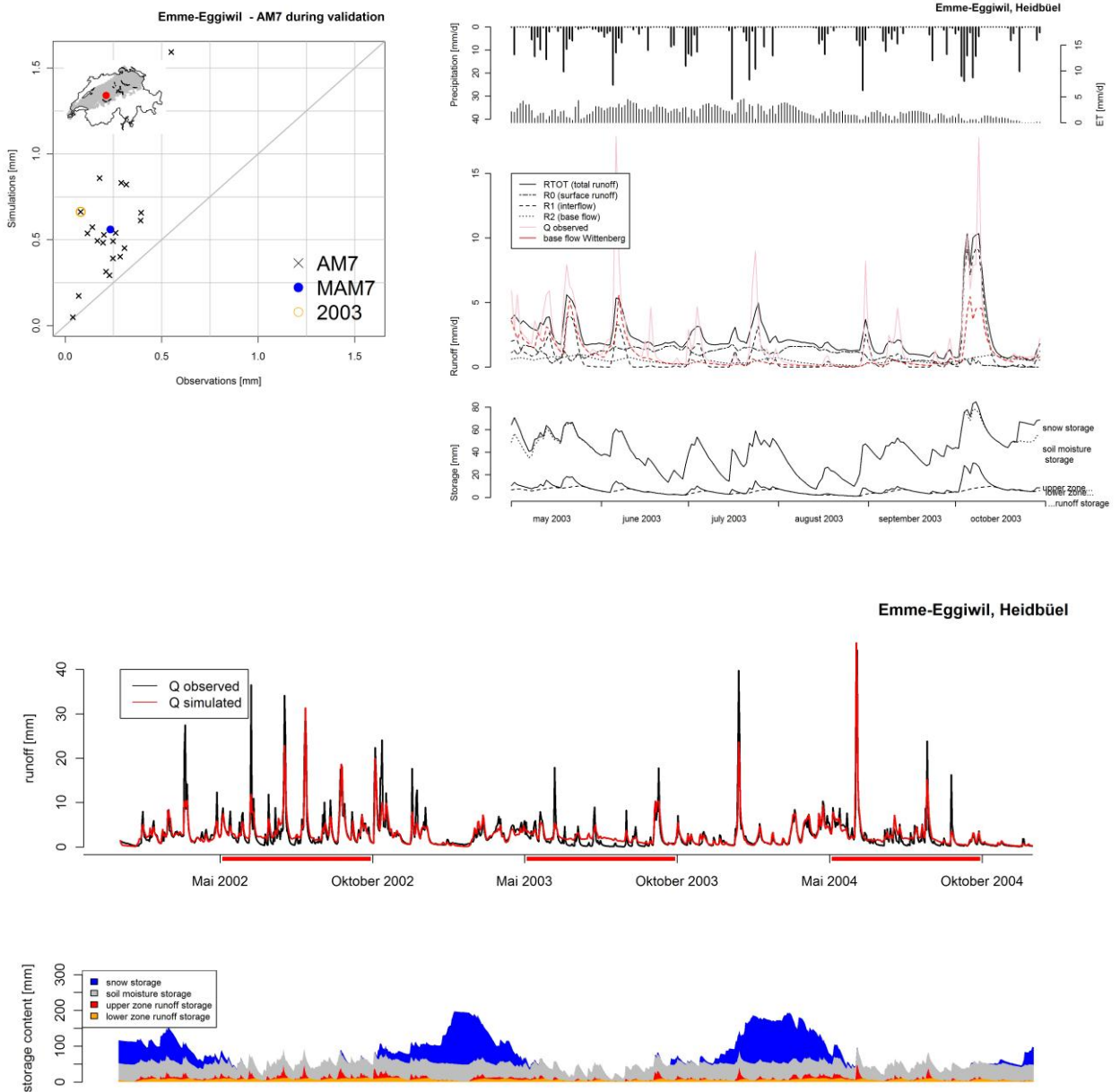


Abb. 12: Drei Graphiken zur Beurteilung zur Modellierung von Niedrigwasser für die Emme-Eggiwil. Oben links: AM7-Graphik. Oben rechts: 2003-Graphik. Unten: 2002-2004-Graphik.

#### 4.2.3 Veränderte Klimabedingungen bezüglich Trockenheitsdauern

Für die Zukunft werden allgemein längere und intensivere Perioden ohne Niederschlag erwartet. Im folgenden Abschnitt wird die mit dem Delta Change Ansatz zu erwartende Veränderung aufgezeigt. Die Frage stellt sich, ob mit dem Delta Change Ansatz längere meteorologische Trockenperioden – Niederschlag an einem Tag unter 1 mm – entstehen. Abbildung 13 zeigt am Beispiel der Aach-Salmsach, dass Änderungen stattfinden, diese sind aber sehr gering. Sowohl in der nahen (grauen Linien), wie auch in der fernen Zukunft (orange Linien) gibt es keine markante Veränderung der Länge der Trockenperioden.

Diese Aussage lässt sich auf das Niederschlagsverhalten in allen Einzugsgebieten ausweiten. Eine Frequenzänderung in der Länge von Trockenperioden ist mit dem Delta Change Ansatz demnach nicht möglich.

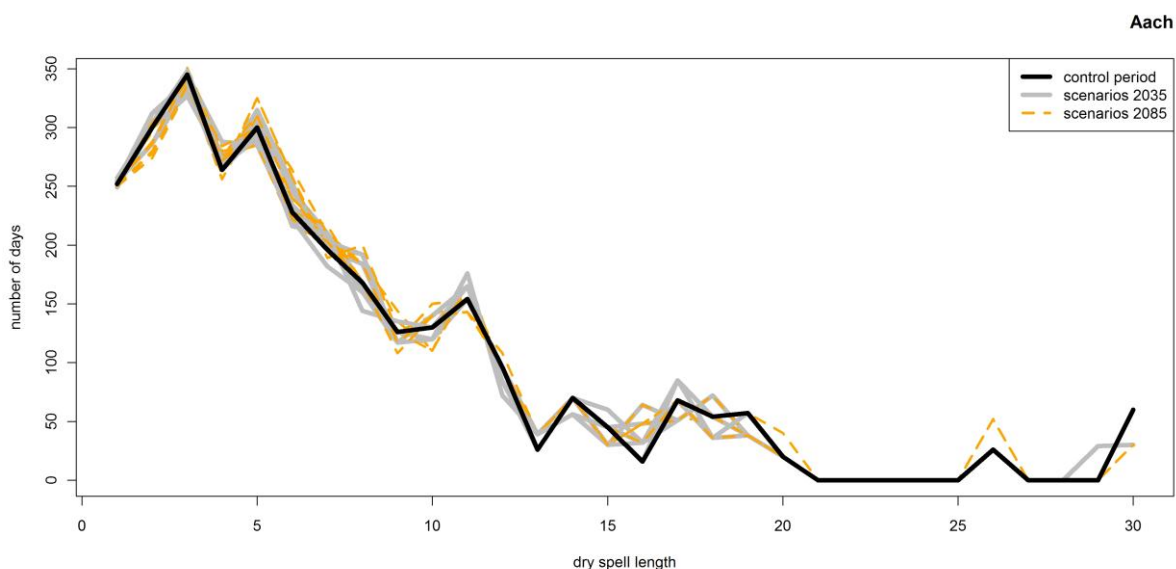


Abb. 13: Häufigkeitsverteilung von Trockenperioden verschiedener Dauer an der Aach-Salmsach für alle Delta Change Szenarien der nahen (graue Kurven) und der fernen Zukunft (orange Kurven).

#### 4.3 Vergleich aller 29 Einzugsgebiete

Der Mittelwert des unter Kapitel 4.2 bereits eingeführten Niedrigwasserkennwertes AM7 (MAM7) und das 95% Perzentil werden hier für alle Einzugsgebiete zusammenfassend betrachtet. Zusätzlich werden Niedrigwasserereignisse – definiert durch Abflüsse tiefer als ein bestimmter Grenzwert (hier: MAM7 und Q347) – untersucht.

#### 4.3.1 Tagesmittelabfluss der an 95% aller Tage erreicht oder überschritten wird

Die 95% Perzentile (Q347) zeigen nur eine geringe Tendenz zu einer Abnahme (Abb. 14). Hier sind sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft auch positive Abweichungen möglich, also Zunahmen des Abflusswertes, der an 347 Tagen des Jahrs erreicht oder überschritten wird. Selbst die Mediane der fernen Zukunft liegen vereinzelt noch über dem Wert der Kontrollperiode. Dies ist auch aus den Dauerkurven (Abb. 5 und Anhang C) ersichtlich.

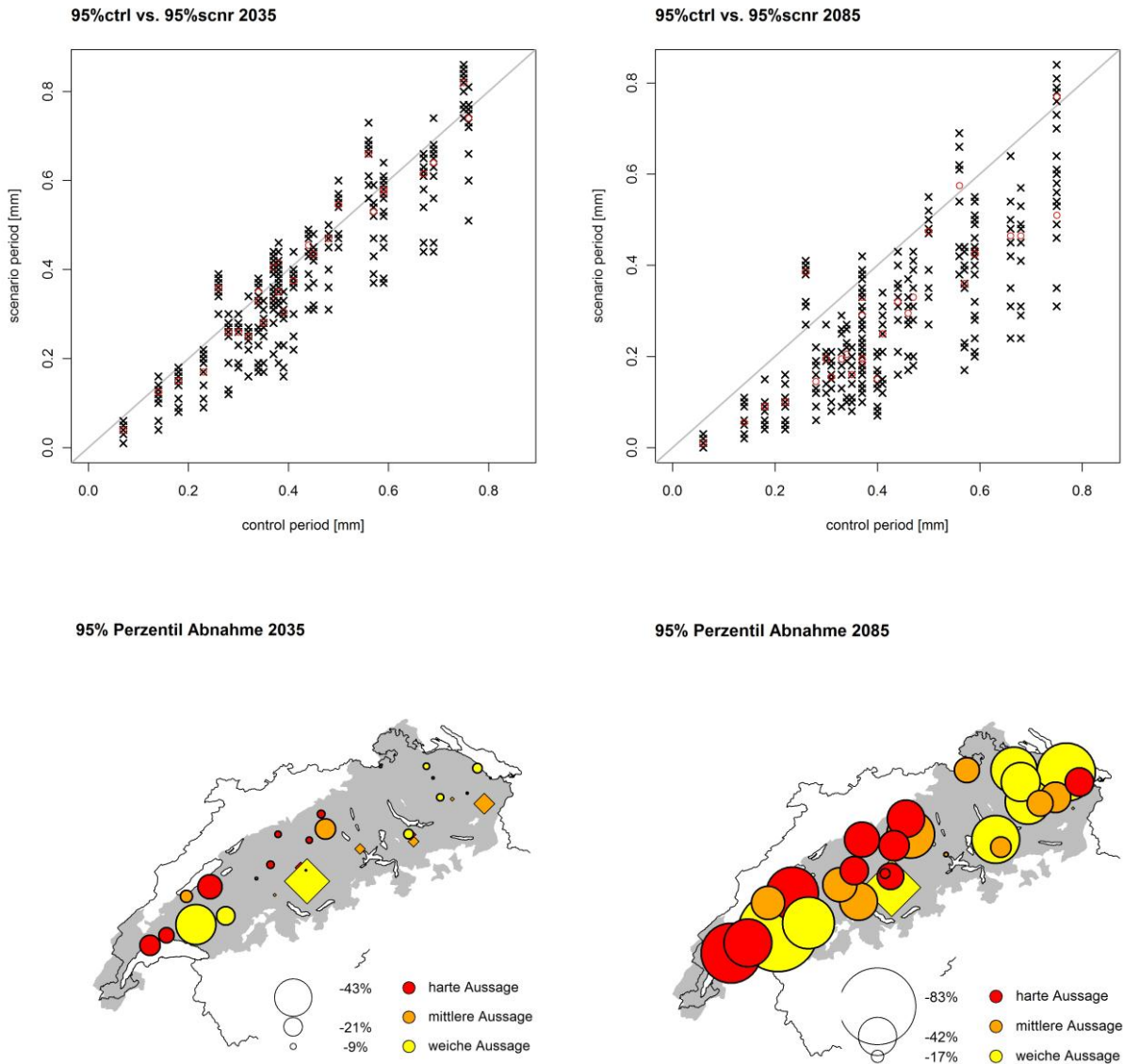


Abb. 14: Oben: Vergleich der 95% Perzentile der Kontrollperiode und denjenigen der Szenarioperioden (links nahe Zukunft, rechts ferne Zukunft). Jeder Wert der Kontrollperiode entspricht einem der 29 Einzugsgebiete, für den 10 Szenarioläufe (schwarze X) bestehen. Der Median aller 10 Szenarien ist mit einem roten Kreis eingezeichnet (oben). Unten: Räumliche Darstellung der Abnahme des 95% Perzentils pro Einzugsgebiet zwischen 1995 und 2035: links; und zwischen 1995 und 2085: rechts. Zunahmen sind mit einer Raute dargestellt.



#### 4.3.2 Tiefstes arithmetisches Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Abflusstagesmitteln (MAM7)

Der Mittelwert aller jährlichen AM7 eines Einzugsgebietes ergibt einen Wert pro Einzugsgebiet über die Gesamte Untersuchungsperiode (MAM7). Die Abweichung der Szenarienläufe vom MAM7 der Kontrollperiode sind in Abbildung 15 (oben) für alle untersuchten Einzugsgebiete eingetragen. In beiden untersuchten Zukunftsperioden nimmt der über 7 Tage gemittelte minimale Abfluss ab. Die Abnahme wird in der fernen Zukunft noch deutlicher. Der Median aller 10 Szenarien (roter Kreis) ist in jedem Fall tiefer als der MAM7 der Kontrollperiode. Für die weiteren Untersuchungen dient der MAM7 der Kontrollperiode eines Einzugsgebietes als Schwellenwert für die Betrachtungen von Unterschreitungen und damit als Definition für ein Niedrigwasserereignis.

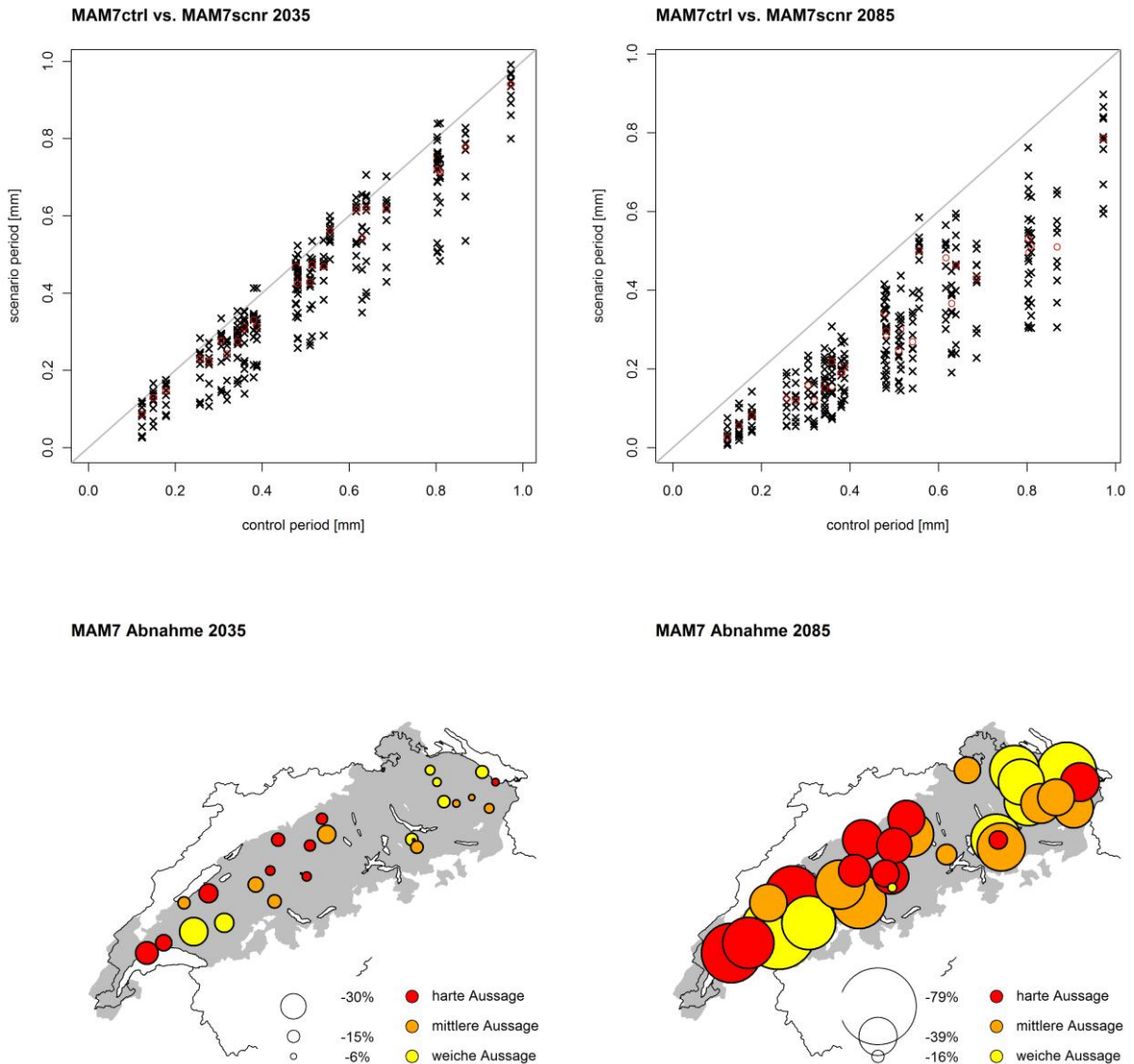


Abb. 15: Oben: Vergleich der MAM7 der Kontrollperiode und denjenigen der Szenarioperioden (links nahe Zukunft, rechts ferne Zukunft). Jeder Wert der Kontrollperiode entspricht einem der 29 Einzugsgebiete, für den 10 Szenarioläufe (schwarze X) bestehen. Der Median aller 10 Szenarien ist mit einem roten Kreis eingezeichnet. Unten: Räumliche Darstellung der Abnahme der MAM7 pro Einzugsgebiet zwischen 1995 und 2035: links; und zwischen 1995 und 2085: rechts.

Die räumliche Analyse zeigt, dass diese Abnahme in der nahe Zukunft im zentralen Mittelland am deutlichsten ausfällt (Abb. 15, unten). Für diese Stationen kann aufgrund der Bewertung der Modellierung auch eine harte Aussage gemacht werden. Auch in der fernen Zukunft konzentriert sich die Abnahme, die nun in allen Gebieten stärker ist, besonders auf das zentrale Mittelland. Wobei für 2085 nun ebenso starke Abnahmen des MAM7 für die voralpin geprägten Einzugsgebietes des östlichen Mittellandes zu erwarten sind. Die Aussagestärke ist hier mit mittel immer noch ausreichend um eine entsprechende Aussage zu machen.

#### 4.3.3 Unterschreitung des heutigen 95% Perzentils (Q347)

Die Dauer der Unterschreitung eines Schwellenwertes (Abb. 16) ist für die Nutzung der Gewässer und zur Beurteilung von Auswirkungen von Niedrigwassern auf das Ökosystem von besonderem Interesse (1992). Der Schwellenwert hängt dabei von der entsprechenden Fragestellung ab und ist von hoher Bedeutung für die Ergebnisse. In der Schweiz ist das 95% Perzentil (Q347) wichtig zur Bestimmung der Restwassermenge. Aus Abbildung 17 wird deutlich, dass die maximale Dauer der Unterschreitung des heutigen 95% Perzentils über die gesamte Zeitperiode in jedem Einzugsgebiet zunehmen wird. Eine Zunahme um bis zu 45 Tage ist in der Westschweiz bis 2035 wahrscheinlich, möglich ist aber auch Zunahme um 76 Tage. Sehr wahrscheinlich ist eine starke Zunahme im zentralen Mittelland in der fernen Zukunft (2085). Für das ganze Mittelland ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die maximale Dauer einer Unterschreitung des heutigen 95% Perzentil (Q347) deutlich zunehmen wird. Die mittlere jährliche Zunahme der Unterschreitungsdauer (Abb. 18) ist im zentralen Mittelland wiederum sehr wahrscheinlich. Zunahmen bis 17 Tage sind projiziert. Die mittlere Unterschreitungsdauer beträgt heute 18 Tage. Zunahmen bis 17 Tage sind auch im westlichen Mittelland möglich, nur bis 9 Tage sind diese aber sehr wahrscheinlich. Im östlichen Mittelland sind Zunahmen bis 9 Tage möglich, sehr wahrscheinlich sind aber nur Zunahmen bis 3 Tage.

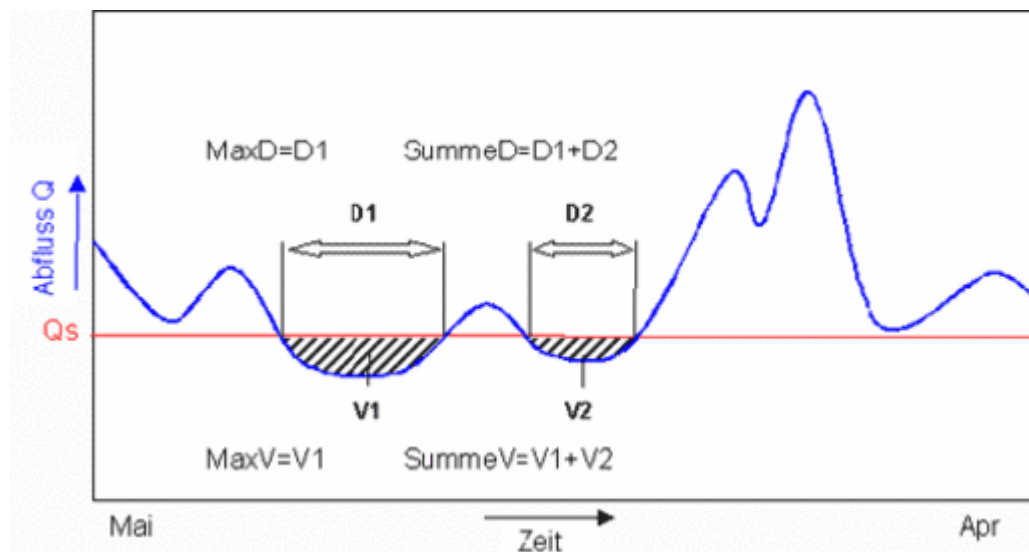
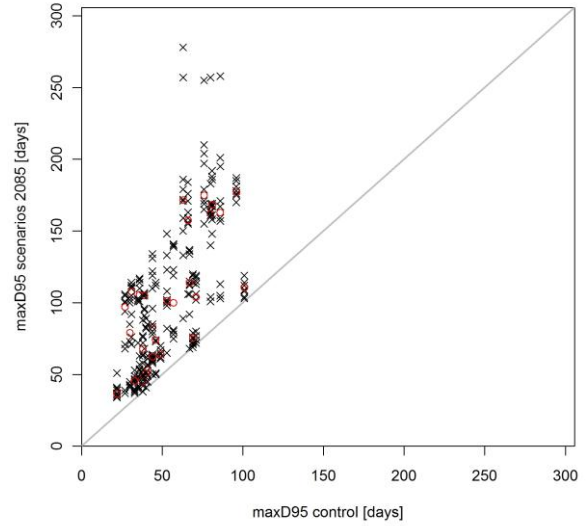
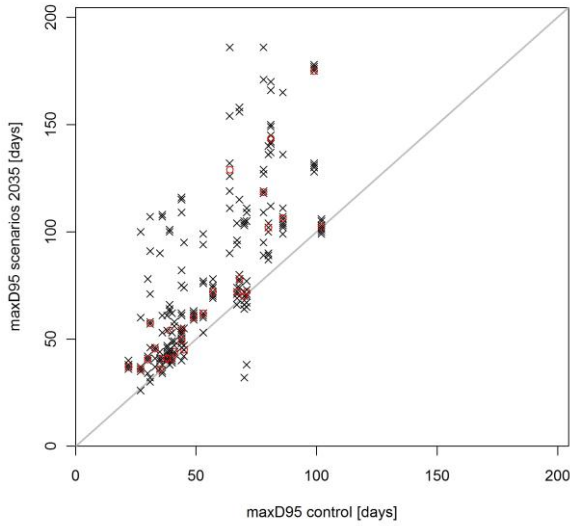


Abb. 16: Illustration der Niedrigwasser-Kenngrößen SummeD, MaxD, SummeV und MaxV anhand einer fiktiven Abflussganglinie (blau).  $Q_s$  = Abflussschwellenwert (2011).

Die Niedrigwasserintensität wird hier als Unterschreitungs-volumen eines bestimmten Grenzwertes angesehen (Abb. 16). Zunahmen der Niedrigwasserintensität bedeuten daher ein Verlust an potenziell nutzbarem Wasser. Die Niedrigwasserintensität beim 95% Perzentil (Unterschreitungs-volumen des 95% Perzentils, Abb. 19 und 20) nimmt vor allem in der fernen Zukunft und auch mehrheitlich im zentralen und westlichen Mittelland stark zu. Zunahmen bis plus 423% sind bei der maximalen Niedrigwasserintensität im zentralen Mittelland sehr wahrscheinlich und im östlichen Mittelland wahrscheinlich. In der nahen Zukunft gibt es vereinzelt auch geringere Niedrigwasserintensitäten. In der Karte in Abbildung 19 (links unten) sind diese Gebiete durch eine Raute gekennzeichnet (Station an Lac Lemman). Die Veränderung der mittleren Niedrigwasserintensität (Abb. 20) zeigt wiederum ein ähnliches Muster. Im zentralen Mittelland wird die Niedrigwasserintensität auch im Mittel mit sehr grosser Wahrscheinlichkeit am stärksten zunehmen. Das östliche Mittelland erfährt im Mittel über alle Jahre eine deutlich geringere Zunahme der Niedrigwasserintensität als beim Maximalereignis (Abb. 19).



**maxD95 Zunahme 2035**

**maxD95 Zunahme 2085**

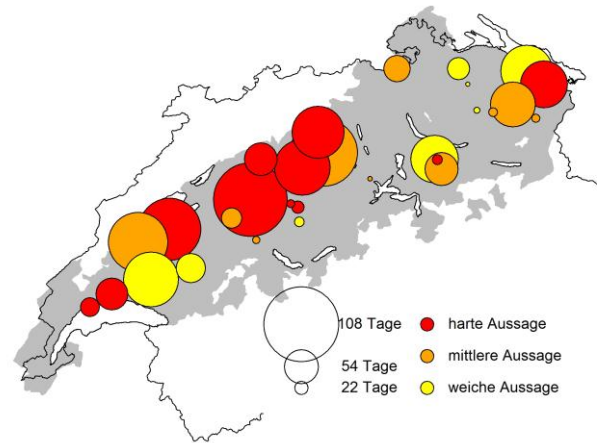
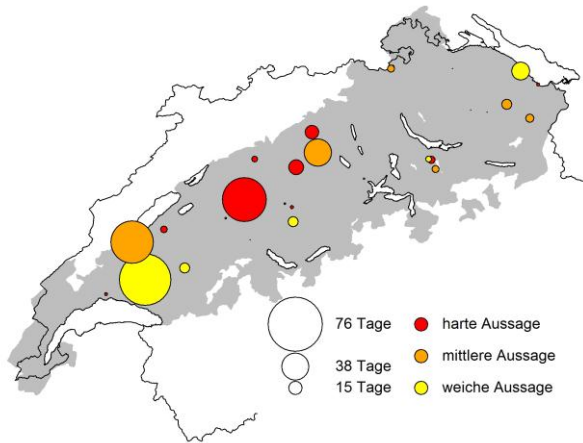
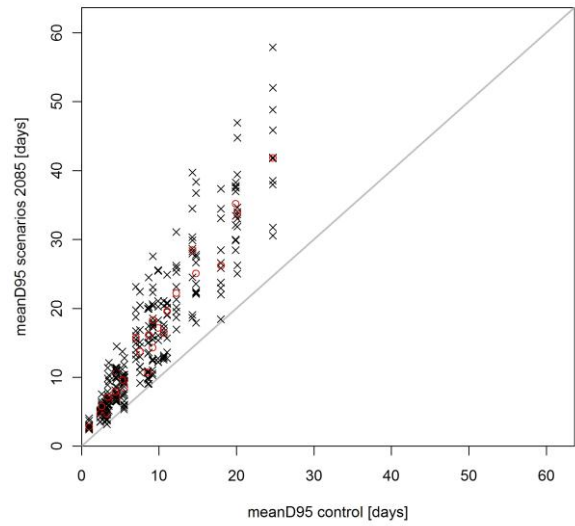
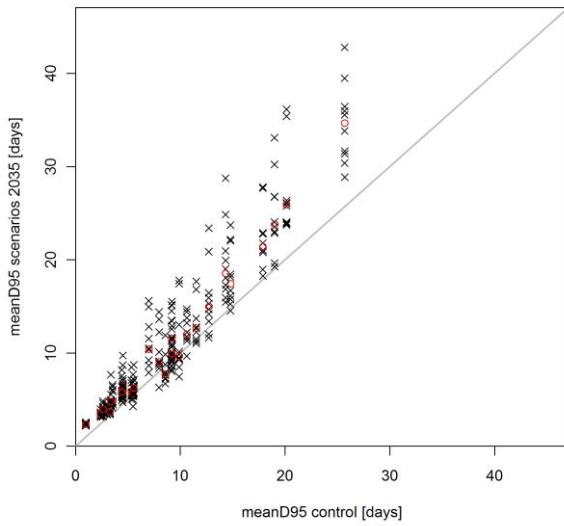


Abb. 17: Vergleich der maximalen Unterschreitungsdauer des 95% Perzentils der Kontrollperiode mit der Dauer der entsprechenden Unterschreitung der beiden Szenarioperioden.



meanD95 Zunahme 2035

meanD95 Zunahme 2085

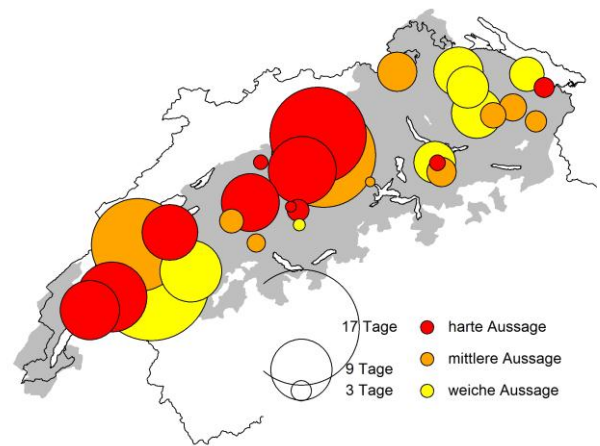
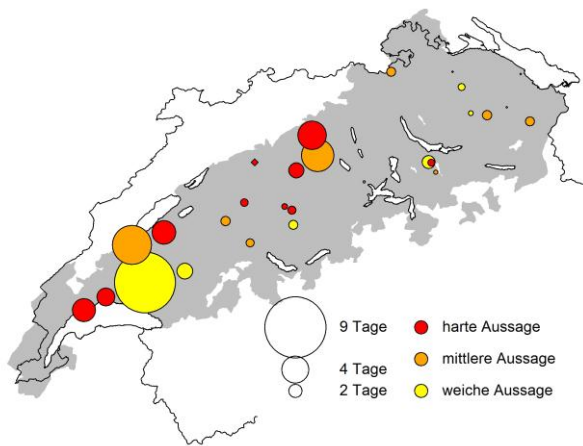
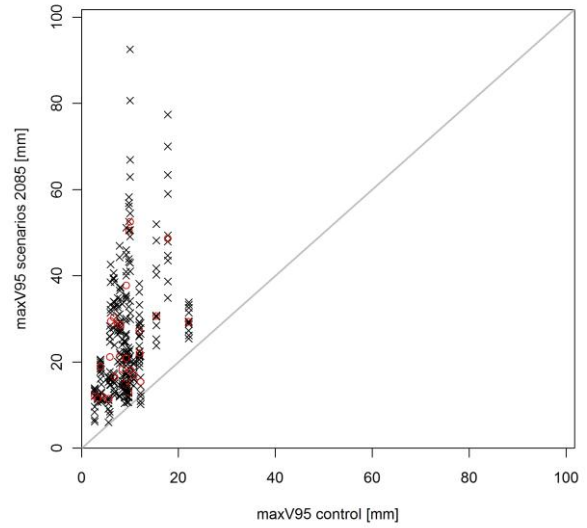
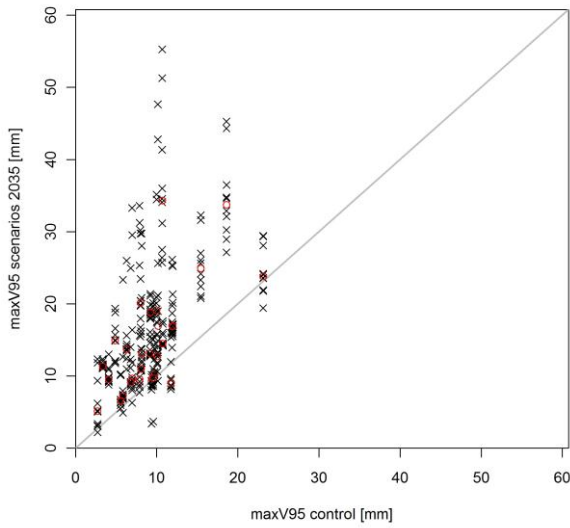


Abb. 18: Vergleich der mittleren Unterschreitungsdauer des 95% Perzentils der Kontrollperiode mit der Dauer der entsprechenden Unterschreitung der beiden Szenarioperioden.



**maxV95 Zunahme 2035**

**maxV95 Zunahme 2085**

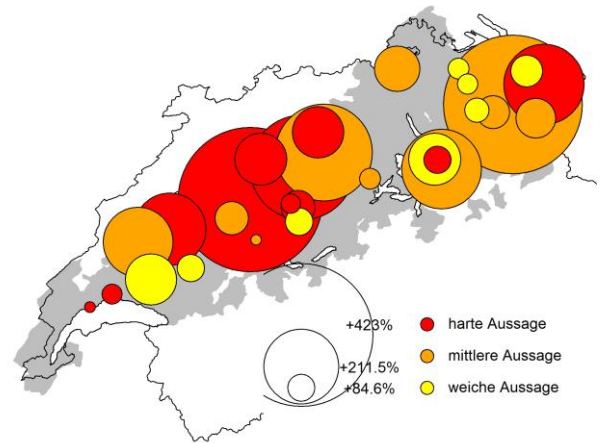
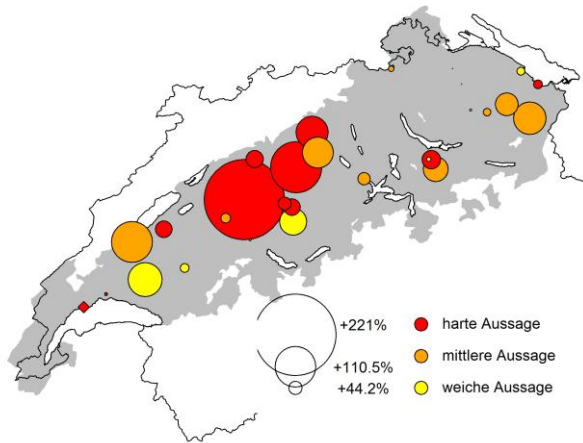
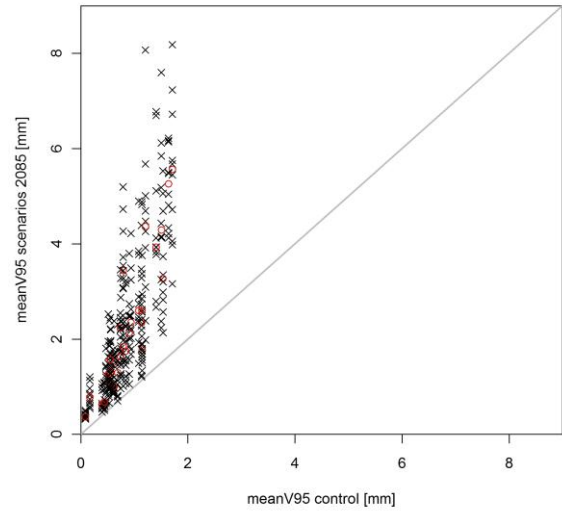
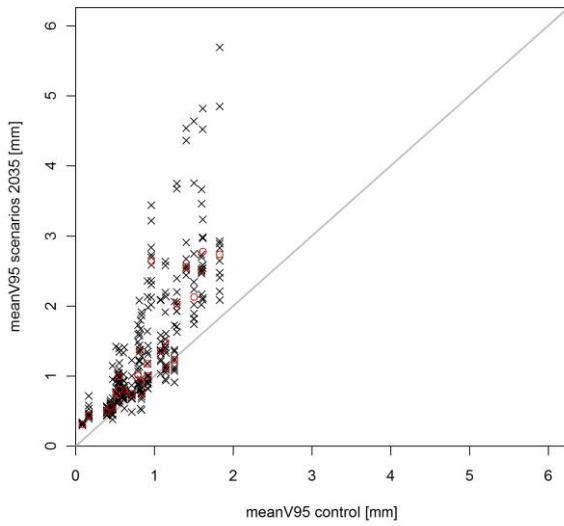


Abb. 19: Vergleich der maximalen Niedrigwasserintensität (95% Perzentil) der Kontrollperiode mit der Intensität der entsprechenden Unterschreitung der beiden Szenarioperioden.



**meanV95 Zunahme 2035**

**meanV95 Zunahme 2085**

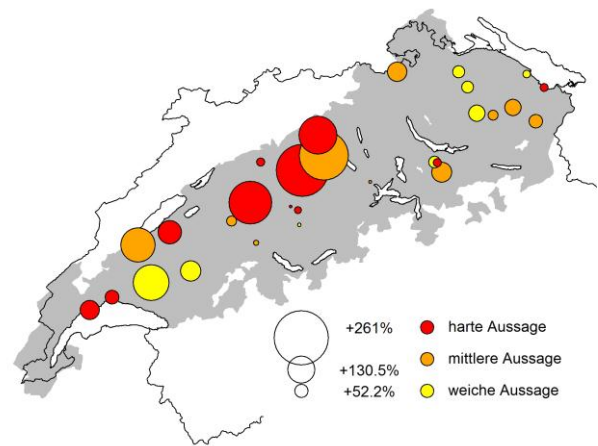
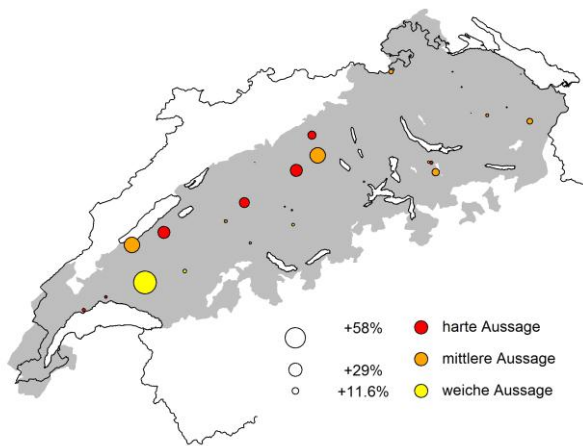
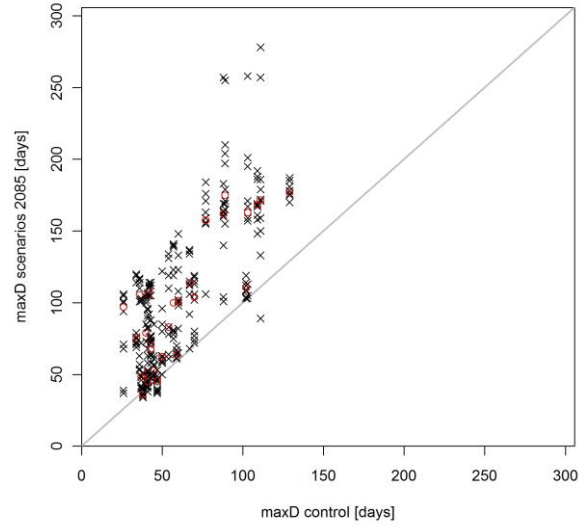
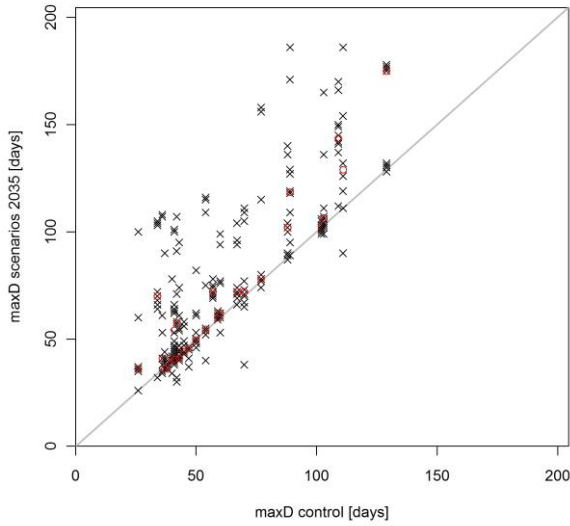


Abb. 20: Vergleich der mittleren Niedrigwasserintensität (95% Perzentil) der Kontrollperiode mit der Intensität der entsprechenden Unterschreitung der beiden Szenarioperioden.



#### 4.3.4 Unterschreitung des heutigen MAM7

Das MAM7 bezieht sich im Gegensatz zum 95% Perzentil nur auf die Sommermonate. Für diesen Grenzwert werden nur die maximale Dauer (Abb. 21) und die maximale Niedrigwasserintensität (Abb. 22) für alle Einzugsgebiete gezeigt. Im Vergleich zum vorherigen Grenzwert zeigen sich ähnliche Muster, bei deutlich tieferen Werten: Die maximale Zunahme bei der Unterschreitungsdauer ist noch 86 Tage in der fernen Zukunft, im Vergleich zu 108 Tagen bei der fernen Zukunft für das 95% Perzentil. Beim maximalen Unterschreitungsvolumen sind die Zunahmen beim Grenzwert MAM7 deutlich kleiner als beim 95% Perzentil. Vor allem in der nahen Zukunft gibt es nur geringe Zunahmen der Niedrigwasserintensität.



**maxD Zunahme 2035**

**maxD Zunahme 2085**

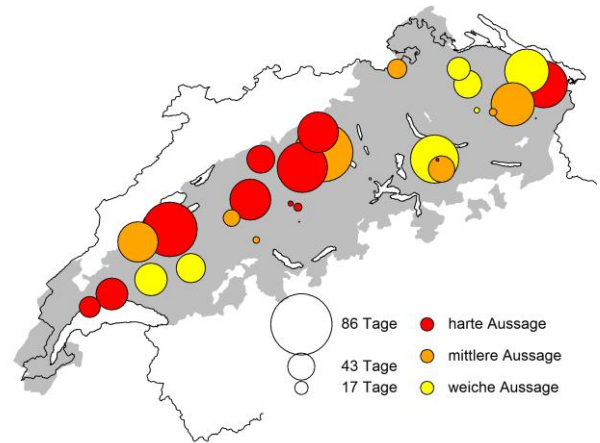
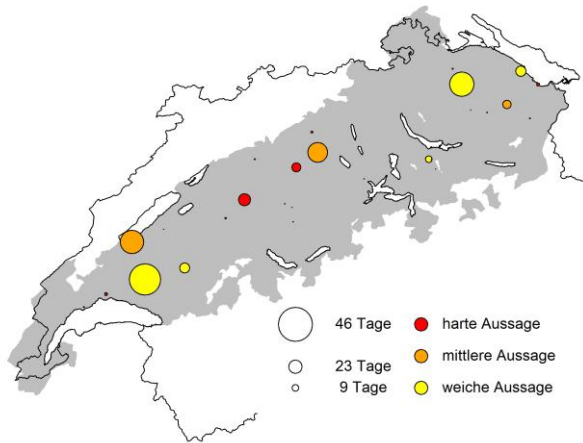
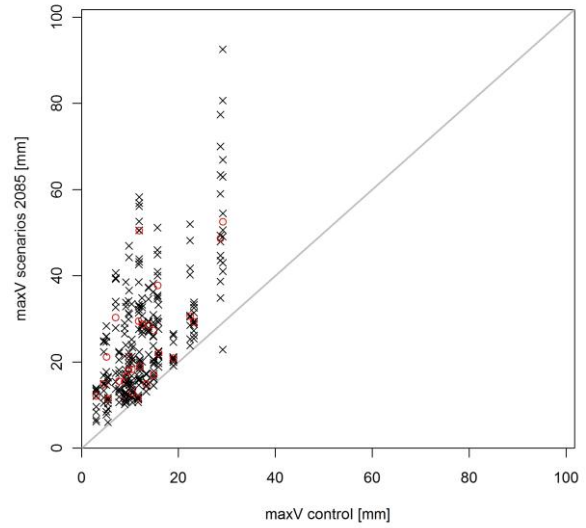
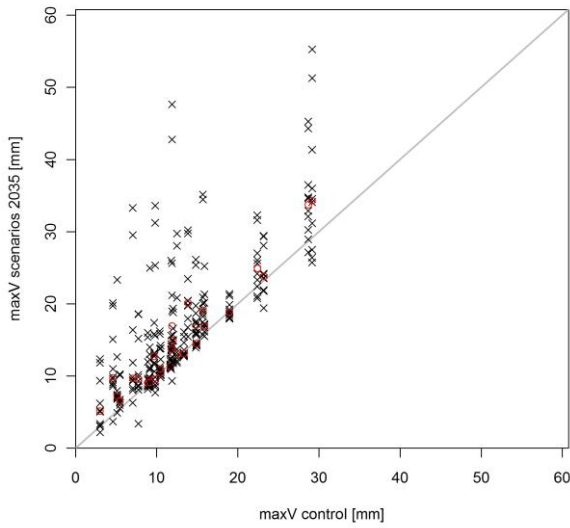


Abb. 21: Vergleich der maximalen Unterschreitungsdauer des MAM7 der Kontrollperiode mit der Dauer der entsprechenden Unterschreitung der beiden Szenarioperioden.



**maxV Zunahme 2035**

**maxV Zunahme 2085**

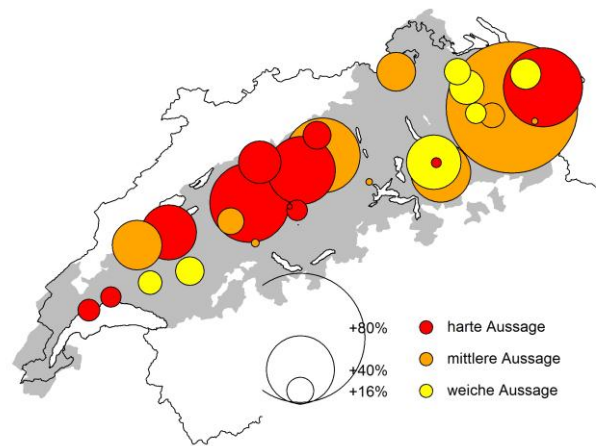
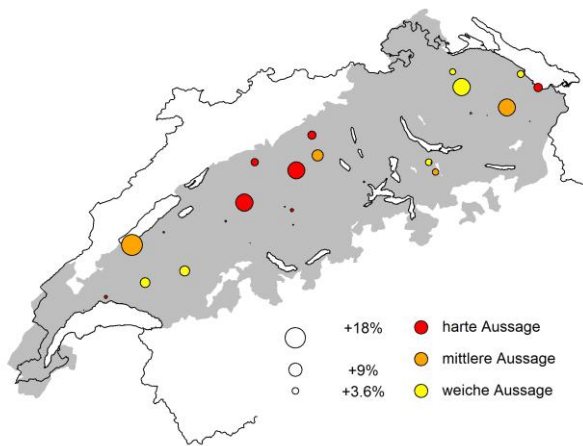


Abb. 22: Vergleich der maximalen Niedrigwasserintensität (MAM7) der Kontrollperiode mit der Intensität der entsprechenden Unterschreitung der beiden Szenarioperioden.

## **5. Schlussfolgerung**

Projektionen des Niedrigwassers konnten für 29 Einzugsgebiete im Schweizer Mittelland erstellt werden. Die Projektionen basieren stärker als bei bisherigen Simulationen auf den relevanten Niedrigwasserprozessen, wodurch die Unsicherheit bei den modellierten Projektionen verringert werden konnte. Die besten Ergebnisse erreicht das verwendete hydrologische Modell während der Sommermonate Mai bis Oktober. Es ist daher besonders geeignet den Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserperioden im Sommer zu beurteilen.

Mit der Zuordnung der Aussagestärke der Stationen in „harte“, „mittlere“ und „weiche“ Aussagen aufgrund der Modellierungsgüte, werden die Schlussfolgerungen noch stärker auf der Zielsetzung – den Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasser – fokussiert. In den gezeigten Karten entsteht so ein differenziert interpretierbares Bild.

Die Ergebnisse dieser quantitativen Analyse bestätigen die in bisherigen Studien auf qualitativen Auswertungen beruhenden Annahmen, dass die Abflusswerte während sommerlichen Niedrigwasserperioden in der nahen und fernen Zukunft abnehmen. Diese Abnahme zeigt sich bei allen untersuchten Einzugsgebieten, unabhängig von ihrer Aussagestärke. Bei den 95% Perzentilen können auch Zunahmen beobachtet werden. Diese müssen aber mit Vorsicht interpretiert werden: Im Gegensatz zu den Veränderungen des sommerlichen MAM7 basieren die 95% Perzentile auf der Analyse des gesamten Jahres. Die Zunahmen können daher auch durch eine Zunahme der Winterabflüsse entstehen und müssen im Einzelfall genauer betrachtet werden. Einzugsgebiete mit einer Zunahme des 95% Perzentils sind mehrheitlich im Übergangsbereich von Mittelland zu Alpen gelegen, wodurch eine erhöhter Abfluss während Winterniedrigwassern aufgrund eines höheren Anteils von Niederschlag in Form von Regen in den Wintermonaten sehr wahrscheinlich ist.

Obwohl mit dem gewählten Delta Change Ansatz zur Erzeugung von Klimaszenarien keine Frequenzänderungen möglich sind – die Dauer von meteorologischen Trockenperioden (Niederschlag < 1mm) sich also nicht ändert –, werden in den erstellten Projektionen längere und intensivere hydrologische Trockenperioden (Abfluss < heutiges 95% Perzentil resp. Abfluss < heutiges MAM7) beobachtet. Da eine Klimaveränderung hin zu längeren meteorologischen Trockenperioden aber sehr wahrscheinlich ist (APPENZELLER 2011), muss von einer noch stärkeren Auswirkung der Klimaänderung auf das Niedrigwasser im Schweizer Mittelland erwartet werden, als das mit dem Delta Change Ansatz in den gemachten Projektionen aufgezeigt werden konnte. Da noch keine entsprechenden Klimaszenarien bestehen ist hier aber nur eine qualitative Aussage möglich.

Die im Rahmen des Moduls „Klimaänderung und Niedrigwasser“ erstellten Projektionen des Niedrigwassers können für folgende Bereiche von Interesse sein:

- Früherkennung von möglichen Konflikten zwischen verschiedenen Nutzern der Ressource Wasser an den untersuchten Einzugsgebieten:  
Die Landwirtschaft benötigt heute hauptsächlich in den Monaten Juni bis August Wasser zur Bewässerung. Rund 10% des Bewässerungswassers stammt aus Fliessgewässern. Mit zunehmender Bewässerungsbedürftigkeit der trockenheitsanfälligen Kulturen im Schweizer Mittelland kann eine Zunahme des Wasserbedarfs erwartet werden.
- Standortfragen zur Entnahme von Bewässerungswasser aus Fliessgewässern:  
Für die Mitfinanzierung einer landwirtschaftlichen Bewässerungsanlage durch das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) wird eine sichere Wasserquelle vorausgesetzt. Gewässer im Mittelland sind in Zukunft vielleicht keine sichere Wasserquelle mehr.
- Bestimmung der Restwassermenge:  
Die Rechtsprechung zur Restwassermenge basiert auf aktuellen Abflusswerten zur Bestimmung des Q347 (95% Perzentils). Die zu erwartenden Veränderung des 95% Perzentils in der nahen und fernen Zukunft hat daher Auswirkungen auf die gesetzlich vorgeschriebene Restwassermenge.

Die gemachten Projektionen basieren auf einer Modellierung, die stärker auf den Niedrigwasserprozessen beruht. Wollte man die Modellierung noch weiter verbessern, müsste man die Struktur von PREVAH dahingehend ändern, dass Boden und Grundwasserspeicher gemeinsam kommunizieren können und dadurch ein tatsächliches nichtlineares Verhalten der Untergrundspeicherung, wie sie von Wittenberg gefordert wird, simulieren kann. Da PREVAH in Sachen Modellstruktur jedoch auf dem neuesten Stand ist, müssten diese Änderungen mit Bedacht ausgeführt werden, um nicht von der physikalischen Prozessbeschreibung wegzukommen, die heute bereits stark in PREVAH integriert ist.

#### Dank

Wir bedanken uns bei der Projektleitung und der Projektgruppe CCHydro für die wertvolle Zusammenarbeit. Besonders dem *Institute for Atmospheric and Climate Science* (IAC) sei für die Bereitstellung der notwendigen Klimaszenarien gedankt. Dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) danken wir für die Finanzierung der Studie sowie für die Bereitstellung der Abflussdaten und der Niedrigwasser-Datenbank NQstat. Bei der MeteoSchweiz bedanken wir uns für die Zurverfügungstellung der interpolierten Niederschlagswerte.

Hauptaussagen zur Auswirkung der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021-2050 und 2070-2099:

- Auswirkungen der Klimaänderung auf das Niedrigwasser sind in der fernen Zukunft generell grösser als in der nahen Zukunft.
- Beim Q347 ist ein Rückgang des entsprechenden Abflusswertes in der Zukunft im Vergleich zu heute zu erwarten, der in der fernen Zukunft auch deutlich ausfällt. Zunahmen des Q347 sind auf höhere Abflüsse während Winterniedrigwassern zurückzuführen.
- Die sommerlichen Extremniedrigwasser (MAM7) weisen sowohl in der nahen, als auch in der fernen Zukunft deutlich geringere Abflusswerte auf.
- Die Dauer von Niedrigwassern nimmt, basierend auf dem heutigen Q347, im Mittel zu. Vor allem im zentralen und westlichen Mittelland sind Zunahmen von heute 18 Tagen auf mehr als 30 Tage sehr wahrscheinlich.
- Die Niedrigwasserintensität nimmt vor allem im zentralen Mittelland deutlich zu. Der fehlende Abfluss in Bezug auf den heutigen Q347 nimmt um mehr als 250% zu.

## Literaturverzeichnis

Appenzeller, C. (2011): Swiss climate change scenarios CH2011, Zürich

Bosshard, T., Kotlarski, S., Ewen, T. & Schär, C. (2011): Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. – Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Bd. 8, S. 1161-1192

Bundesamt für Umwelt BAFU (2011): BAFU - Hydrologische Grundlagen und Daten - Niedrigwasserstatistik: <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01834/02051/index.html?lang=de>.

BWG (2005): Die Niedrigwasser-Datenbank NQStat. Bedienungsanleitung, Bern

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (1983): Niedrigwasseranalyse: Teil 1, Statistische Untersuchung des Niedrigwasser-Abflusses: DK 556.167.2 Niedrigwasser, DK 556.047 Analyse. – DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Bd. 120, Hamburg

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (1992): Niedrigwasseranalyse: Teil 2, Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflußdefizits: DK 556.167.2 Niedrigwasserabfluß, DK 556.047 Statistische Auswertung. – DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Bd. 121, Hamburg

Frei, C. & Schär, C. (1998): A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. – Int. J. Climatol., Bd. 18, S. 873-900

Fröhlich, K., Fröhlich, W. & Wittenberg, H. (1994): Determination of groundwater recharge by baseflow separation: regional analysis in northeast China. – In: FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data. – IAHS Publication, Bd. 221. Wallingford, Oxfordshire, UK, S. 69-75

Meyer, R., Schädler, B., Viviroli, D. & Weingartner, R. (submitted): Multi-criteria calibration for a sound modeling of low flow under future climate. – Hydrological Processes.

Meyer, R., Viviroli, D., Schädler, B. & Weingartner, R. (2011): Die Rolle des Basisabflusses bei der Modellierung von Niedrigwasserprozessen in Klimaimpaktstudien. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Bd. 55.

Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A. & Appenzeller, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. – *nature*, Bd. 427, S. 332-336

Seibert, J. (2000): Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. – *Hydrology and Earth System Sciences*, Bd. 4, S. 215-224

Viviroli, D. & Weingartner, R. (2011): Umfassende hochwasserhydrologische Beurteilung ungemessener mesoskaliger Einzugsgebiete im schweizerischen Rheineinzugsgebiet durch prozessorientierte Modellierung. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Bd. 55, S. 258-272

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. & Weingartner, R. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. – *Environmental Modelling & Software*, Bd. 24, S. 1209-1222

Volken, D. (2010): Projektbericht. CCHydro - Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Bd. 54, S. 143-146

Wittenberg, H. (1999): Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. – *Hydrological Processes*, Bd. 13, S. 715-726



## 6. Anhang

### 6.1 Anhang A

#### Stationsliste

DBLH	Stationsname	Abkürzung	Messb.	Messe.	Beeinfl.*	Fläche	Genauigk*.	Bewertung
2312	Aach-Salmsach, Hungerbühl	AacSal	1962	2009	schwach	48.5	hoch	weich
2609	Alp-Einsiedeln	AlpEin	1991	2009	schwach	46.4	hoch	stark
2433	Aubonne-Allaman, Le Coulet	AubAll	1979	2009	mässig	91.4	hoch	stark
2604	Biber-Biberbrugg	BibBib	1990	2009	schwach	31.9	hoch	weich
2034	Broye-Payerne, Caserne d'aviation	BroPay	1920	2009	mässig	392	hoch	stark
2409	Emme-Eggiwil, Heidbüel	EmmEgg	1975	2009	schwach	124	hoch	weich
70	Emme-Emmenmatt	EmmEmm	1918	2009	schwach	443	hoch	stark
150	Emme-Wiler, Limpachmündung	EmmWil	1922	2009	schwach	939	hoch	stark
2305	Glatt-Herisau, Zellersmühle	GlaHer	1984	2009	mässig	16.2	hoch	mittel
2415	Glatt-Rheinsfelden	GlaRhe	1976	2009	schwach	416	hoch	mittel
308	Goldach-Goldach	GolGol	1962	2009	schwach	49.8	hoch	stark
2375	Grossbach-Gross, Säge	GroGro	1972	2009	schwach	9.06	hoch	mittel
2472	Gürbe-Burgistein, Pfandersmatt	GueBur	1982	2008	schwach	53.7	hoch	mittel
2603	Ilfis-Langnau	IlfLan	1990	2009	schwach	188	hoch	stark
2425	Kleine Emme-Littau, Reussbühl	KEmLit	1978	2009	schwach	477	hoch	mittel
2343	Langeten-Huttwil, Häberenbad	LanHut	1966	2009	mässig	59.9	hoch	stark
2497	Luthern-Nebikon	LutNeb	1988	2009	schwach	108	hoch	mittel
2369	Mentue-Yvonand, La Mauguettaz	MenYvo	1971	2009	mässig	105	hoch	mittel
2386	Murg-Frauenfeld	MurFra	1974	2009	schwach	212	hoch	weich
2126	Murg-Wängi	MurWae	1954	2009	schwach	78.9	hoch	weich
2374	Necker-Mogelsberg, Aachsäge	NecMog	1972	2009	schwach	88.2	hoch	mittel
2437	Parimbot-Ecublens, Eschiens	ParEcu	1979	2009	mässig	6.75	hoch	weich
2414	Rietholzbach-Mosnang, Rietholz	RieMos	1976	2009	schwach	3.305	hoch	weich
2179	Sense-Thörishaus, Sensematt	SenTho	1928	2009	schwach	352	hoch	mittel
2412	Sionge-Vuippens, Château	SioVui	1976	2009	schwach	45.3	hoch	weich
2112	Sitter-Appenzell	SitApp	1923	2009	mässig	74.2	hoch	mittel
2432	Venoge-Ecublens, Les Bois	VenEcu	1979	2009	schwach	231	hoch	stark
2450	Wigger-Zofingen	WigZof	1980	2009	schwach	368	hoch	stark
2500	Worble-Ittigen	WorlItt	1989	2009	schwach	60.51	hoch	stark

\* aus NQstat (BWG 2005)

## 6.2 Anhang B

### Repräsentative Meteostationen

EZG	Niederschlag	Temperatur
AacSal	Amriswil (AMW)	Güttingen (GUT)
AllDar	Genève-Cointrin (GVE)	Genève-Cointrin (GVE)
AlpEin	Alpthal (APT)	Einsiedeln (EIN)
AubAll	Signal-de-Bougy (SDB)	Signal-de-Bougy (SDB)
BibBib	Altmatt (ALM)	Einsiedeln (EIN)
BroPay	Moudon-Origine (MDO)	Payerne (PAY)
EmmEgg	Marbach (MBA)	Langnau i.E. (LAG)
EmmEmm	Langnau i.E. (LAG)	Langnau i.E. (LAG)
EmmWil	Langnau i.E. (LAG)	Langnau i.E. (LAG)
GlaHer	Herisau (HES)	Stein,AR (STI)
GlaRhe	Zürich/Kloten (KLO)	Zürich/Kloten (KLO)
GolGol	Eggersriet (EGR)	St. Gallen (STG)
GroGro	Gross,SZ (GSS)	Einsiedeln (EIN)
GueBur	Blumenstein (BLU)	Thun (THU)
IlfLan	Langnau i.E. (LAG)	Langnau i.E. (LAG)
KEmLit	Entlebuch (ENT)	Menzberg (MEB)
LanHut	Eriswil (ERI)	Huttwil (HUT)
LutNeb	Luthern (LUT)	Huttwil (HUT)
MenYvo	Orzens (ORZ)	Method (MAH)
MurFra	Hunzikon (HUN)	Aadorf/Tänikon (TAE)
MurWae	Eschlikon (EKO)	Aadorf/Tänikon (TAE)
NecMog	St. Peterzell (SPZ)	Ebnat-Kappel (EBK)
ParEcu	Chalet du Villars (CVI)	Lausanne (LSN)
RieMos	Kirchberg,SG (KIB)	Hörnli (HOE)
SenTho	Plaffeien (PFN)	Plaffeien (PFN)
SioVui	Marsens (MAS)	Broc/Usine(BRO)
SitApp	Brülisau (BLS)	Säntis (SAE)
VenEcu	Cossonay (COS)	Bière (BIE)
WigZof	Wauwil (WAU)	Huttwil (HUT)
Worltt	Bern/Zollikofen (BER)	Bern/Zollikofen (BER)

Bern, 30. November 2011

**Klimaänderung und Niedrigwasser**

Auswirkung der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland

**u<sup>b</sup>**

---

**UNIVERSITÄT  
BERN**

### **6.3 Anhang C**

CD mit Abbildungen je EZG und den modellierten Abflusswerten.