

HEFT **32.13**

Wasserressourcen im globalen Wandel

Hydrologische Grundlagen – von der Messung zur Anwendung

Beiträge zum Tag der Hydrologie 4. bis 6. April 2013

an der Universität Bern

Rolf Weingartner und Bruno Schädler (Herausgeber)

Veranstalter:

- ≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA, Aachen, Hennef
- ≈ Geographisches Institut der Universität Bern, Gruppe für Hydrologie
- ≈ Hauptausschuss Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA, Hennef

Mitveranstalter:

- ≈ Schweizerische Hydrologische Kommission der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz
- ≈ Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- ≈ Oeschger Centre for Climate Change Research, Universität Bern
- ≈ Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie
- ≈ Deutsche Hydrologische Gesellschaft



Hydrologische Wissenschaften

Fachgemeinschaft in der DWA

Rolf Weingartner und Bruno Schädler (Herausgeber):

**Wasserressourcen im globalen Wandel
Hydrologische Grundlagen – von der Messung zur Anwendung**

**Beiträge zum Tag der Hydrologie 2013
4. bis 6. April 2013 an der Universität Bern**

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 32.13

ISBN: 978-3-942964-89-0

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2013

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Herausgeber:

Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA

Geschäftsstelle

Theodor-Heuss-Allee 17

D – 53773 Hennef

Tel.: 02242/872 – 0

Fax: 02242/872 – 135

info@fghw.de

www.fghw.de

Vertrieb:

DWA Deutsche Vereinigung
für Wasserwirtschaft, Abwasser und

Abfall e.V., Bundesgeschäftsstelle

Theodor-Heuss-Allee 17

D – 53773 Hennef

Tel.: 02242/872 – 333

Fax: 02242/872 – 100

vertrieb@dwa.de

www.dwa.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heribert Nacken

Fachgemeinschaft Hydrologische

Wissenschaften in der DWA

Druck und Binden:

Publikation Digital AG

Gerlafingen, Schweiz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Disse

Hauptausschuss Hydrologie und

Wasserbewirtschaftung der DWA

Umschlaggestaltung:

Dorit Steinberger, München

© FgHW – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2013

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeber in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Die wissenschaftliche Richtigkeit der Texte, Abbildungen und Tabellen unterliegt nicht der Verantwortung der Herausgeber.

Vorwort

Das von den Vereinten Nationen für 2013 deklarierte „Internationale Jahr der Zusammenarbeit im Bereich Wasser“ wie auch das 150-jährige Jubiläum der hydrometrischen Beobachtungen in der Schweiz bilden das Umfeld des „Tages der Hydrologie 2013“. Das Tagungsthema „Wasserressourcen im globalen Wandel: Hydrologische Grundlagen – von der Messung zur Anwendung“ soll zum Ausdruck bringen, dass für die wissenschaftliche Forschung und für die praktischen Anwendungen in der Hydrologie umfangreiche und langfristig erhobene Daten eine unerlässliche Grundlage darstellen. Glücklicherweise gründeten weitsichtige Köpfe in der Schweiz bereits 1863 die „Hydrometrische Kommission der Naturforschenden Gesellschaft“.

Der globale Wandel verändert nicht nur die Mengen und die zeitliche Verteilung der Wasservorkommen, sondern auch die Wassernutzung. Für ein optimales und nachhaltiges Management der Wasservorkommen und der Gewässer sind deshalb umfassende Datengrundlagen, Kenntnisse der vergangenen und zukünftigen Entwicklungen der Wasservorkommen sowie der hydrologischen Prozesse und Kreisläufe von grösster Bedeutung. Die Auswirkungen von menschlichen Eingriffen müssen dabei speziell beachtet werden.

Die rund 100 zum Tag der Hydrologie eingereichten wissenschaftlichen Beiträge wurden in vier Themenbereiche gegliedert:

- 150 Jahre Hydrometrie in der Schweiz
- Hydrologie in natürlichen Einzugsgebieten
- Wasserkreislauf und Klimaänderung
- Hydrologie und Wasserkraftnutzung

Zum ersten Mal seit Beginn der von der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften (FgHW) innerhalb der DWA im Jahre 1999 initiierten Tagungsserie findet der Tag der Hydrologie in der Schweiz statt. Die Schweizerische Hydrologische Kommission zeichnet für die Organisation der Tagung verantwortlich. Für das Vertrauen und die Unterstützung der Kolleginnen und Kollegen der FgHW und des Hauptausschusses Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA sowie der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft danken wir herzlich.

Die Veranstaltung wurde finanziell namhaft unterstützt vom Oeschger-Zentrum für Klimaforschung der Universität Bern, vom Bundesamt für Umwelt, von der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz, von der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie sowie vom Geographischen Institut der Universität Bern. Herzlich bedanken wollen wir uns beim wissenschaftlichen Komitee für die Begutachtung der Tagungsbeiträge. Ein ganz besonderer Dank geht an Pascal Blanc, Alexander Hermann, Tobias Wechsler, Bernhard Luder und Beat Sigrist, welche ganz besonders zum Gelingen dieser Tagung und zur Produktion des Tagungsbandes beigetragen haben.

Allen Teilnehmenden wünschen wir einen schönen Aufenthalt in Bern und eine gelungene Tagung.

Rolf Weingartner und Bruno Schädler

Bern, im März 2013

Heft 32 2013 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Wasserressourcen im globalen Wandel Hydrologische Grundlagen – von der Messung zur Anwendung

Vorträge zur Session 1: 150 Jahre Hydrometrie in der Schweiz

Gerd Morgenschweis

Hydrometrisches Informationssystem der Zukunft – Bereitstellung von Wasserstands- und Durchflussdaten jederzeit und für jeden beliebigen Punkt im Gewässer 5

Barbara Staudinger

Die Analyse von langen Datenreihen ermöglicht die Dokumentation von Veränderungen im Abflussverhalten in den Hohen Tauern und im Alpenvorland 15

Massimiliano Zappa

Verbesserung von Pegelschlüsselkurven: Probabilistische Vorhersagen zur gezielten Planung und Durchführung von Abflussmessungen während Hochwasserereignissen 25

Uwe Büttner

Methodik der hydrologischen Auswertungen der extremen Hochwasserereignisse in Sachsen in den letzten 10 Jahren 31

Vorträge zur Session 2: Hydrologie in natürlichen Einzugsgebieten

Ingo Heidbüchel

Modellierung zeitlich variabler Einzugsgebietsreaktion: Methode und Anwendung 41

Simon Scherrer

Spannungsfeld Prozesswissen – Hydrologische Modellierung aufgezeigt an einem vielseitigen Beispiel aus den Schweizer Voralpen 47

Matthias H. Müller

Fliesswege und Speicherung von Niederschlag in subalpinen Einzugsgebieten im Urserental, Schweiz 57

Thomas Cornelissen

Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Simulation der Bodenfeuchtevariabilität in einem Waldeinzugsgebiet mit HydroGeoSphere 65

Benny Selle

Wassergebundener Stofftransport in Flußeinzugsgebieten: verbessertes Verständnis durch Synthese von „Top-down“ und „Bottom-up“ Modellansätzen 77

Vorträge zur Session 3: Wasserkreislauf und Klimaänderung

David Volken

Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz (CCHydro) 83

Luzi Bernhard

- Auswirkungen der CH2011 Klimaszenarien auf die Wasserressourcen – eine Abschätzung für die Schweiz 93

Maximilian Heilig

- Herausragende Klimaperioden in Niederösterreich 1896 – 2012 103

Ina Pohle

- Abschätzung möglicher Folgen des Klimawandels auf die regionalen Wasserressourcen der Lausitz 113

Annelie Holzkämper

- Optimierung der landwirtschaftlichen Praxis unter Klimawandel – Eine Modellstudie im Einzugsgebiet der Broye 123

Gundula Paul

- Einfluss prognostizierter Klimaveränderungen auf die Grundwasserneubildung in einem wasserwirtschaftlich sensiblen Teileinzugsgebiet der Elbe 133

Vorträge zur Session 4: Hydrologie und Wasserkraftnutzung*Simon Frey*

- Die Auswirkung möglicher Klimawandelszenarien auf das Erzeugungspotenzial von Wasserkraftwerken 145

Margret Johst

- Zusammenhang zwischen Photovoltaik- und Windstromeinspeisung, Kühlwasserbedarf und Wasserkraftnutzung am Neckar 153

Paolo Reggiani

- Modellgestützte Analyse von Wasserbilanzen auf der Skala von großen Einzugsgebieten: Wie menschliche Eingriffe die Abflüsse am Nil beeinflussen 163

Martin Pfaundler

- Das Modul Hydrologie (HYDMOD) zur Beurteilung des Natürlichkeitsgrades des Abflussregimes: Methode, Hilfsmittel, hydrologische sowie wasserwirtschaftliche Grundlagen 175

Peter Fischer

- Ökologie und Wasserkraftnutzung – Monitoring von Renaturierungsmaßnahmen zwischen zwei Staustufen 185

Autorenverzeichnis

195

Erschienene Hefte der Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 199

Hydrometrisches Informationssystem der Zukunft – Bereitstellung von Wasserstands- und Durchflussdaten jederzeit und für jeden beliebigen Punkt im Gewässer

Gerd Morgenschweis

Zusammenfassung

Eine kritische Durchsicht der heute im Durchflussmesswesen eingesetzten Verfahren zeigt, dass diese ausnahmslos punkthafte, an den jeweiligen Messquerschnitt gebundene Daten zu liefern vermögen. Nach Darstellung der Anwendungsgrenzen herkömmlicher Messverfahren unter schwierigen hydraulischen Bedingungen werden 3 denkbare Lösungswege zur Bereitstellung von flächendeckenden Wasserstands- und Durchflussdaten aufgezeigt. Im Ausblick werden die Realisierungschancen abgeschätzt und Sorgen über den schwindenden Stellenwert hydrometrischer Daten geäußert.

1. Einleitung

Für mich als Hydrologen, der mehr als 20 Jahre eines der komplexesten wasserwirtschaftlichen Systeme in einer der dicht besiedelsten Regionen der Welt verantwortlich gesteuert hat, erscheint es wie ein Alptraum, ohne zuverlässige Daten ein solches System, z. B. während eines extremen Hochwassers, zu steuern. Als langjähriger wissenschaftlicher Mitstreiter des IPCC weiß ich zudem, dass Extremsituationen in Zukunft häufiger werden, dass die Vorwarnzeiten knapper werden. Da stellt sich durchaus die Frage, wie steht es mit den messtechnischen Möglichkeiten, wie zuverlässig werden die Messdaten registriert bzw. fernübertragen und wie stabil arbeiten die Datenmanagementsysteme in allen denkbaren Extremsituationen? Wem diese Fragestellung zu akademisch erscheint, der sei z.B. an das Elbehochwasser 2002 erinnert, bei dem die Elbe und ihren Nebenflüssen fast alle Pegelstellen (s. Abbildung 1) und die Übertragungswege so überflutete, dass ein flächenhafter Totalausfall eintrat.



Abb.1: Überfluteter Pegel Berthelsdorf 2 / Freiburger Mulde (Staatl. Betriebsgesellschaft f. Umwelt u. Landwirtschaft, Radebeul)

Das war für viele verantwortungsbewusste Wasserwirtschaftler in unserem Lande Anlass, die bestehenden Messsysteme einer kritischen Prüfung zu unterwerfen. Welche Messverfahren und Übertragungswege stehen heute in der gewässerkundlichen Praxis zur Erfassung des Durchflusses zur Verfügung und welche Defizite bzw. Grenzen sind zu beachten? Diesen Fragen widmen sich die beiden folgenden Kapitel.

2. Methoden der kontinuierlichen Durchflusserfassung

In Tabelle 1 sind die heute eingesetzten Messverfahren zusammengestellt. Eine kritische Durchsicht ergibt, dass es nur 3 Verfahren gibt, die sich bei extremen Ereignissen bewährt haben:

Tab. 1: Überblick über kontinuierliche Durchflussmessverfahren (aus: MORGENSCHWEIS 2010a)

- 1 Bestimmung des Durchflusses über Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen
- 2 Bestimmung des Durchflusses mit Durchflussbauwerken und hydraulischen Bestimmungsgrößen
 - 2.1 Messwehre und Wehrschwellen
 - 2.2 Venturigerinne
 - 2.3 Messkästen (Flumes)
 - 2.4 Ausflussöffnungen (Orifice)
- 3 Erfassung des Durchflusses über kontinuierliche Geschwindigkeitsmessung mittels Ultraschall
 - 3.1 Laufzeitverfahren
 - 3.2 Dopplerverfahren
- 4 Erfassung des Durchflusses nach der magnetisch-induktiven Methode
- 5 Erfassung des Durchflusses durch kontinuierliche Messung des Wassergefälles (ΔW -Verfahren)
- 6 Visuelle Durchflussmessung
- 7 Erfassung des Durchflusses durch kontinuierliche Messung der Oberflächengeschwindigkeit mittels Radar
- 8 Durchflussmessung an Stauwehren

2.1 Durchflusserfassung über Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen (W-Q)

Dieses traditionelle Verfahren, bei dem der gemessene Wasserstand mit Hilfe einer funktionalen Beziehung zwischen Durchfluss und Wasserstand indirekt in Durchfluss umgewandelt wird, hat den Vorteil der einfachen Umsetzung, so dass es beinahe ubiquitär eingesetzt werden kann. Systemimmanent ist jedoch der Nachteil, dass die Wasserstand-Durchfluss-Beziehung zeitvariant ist und daher immer wieder mit Hilfe geeigneter diskontinuierlicher Messverfahren geprüft und ggfls. revidiert werden muss. Wegen dieses Nachteils und der insgesamt bescheidenen Genauigkeit wurde dieses Verfahren in der Vergangenheit oft als unzureichend abqualifiziert. Zurzeit erlebt es jedoch eine Renaissance, da durch neue Messgeräte (wie den Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP), schnellere und genauere Messergebnisse zur Verfügung stehen und zudem die W-Q-Beziehungen durch geeignete

numerisch-hydrodynamische Modelle rechnerisch abgesichert werden können (MORGENSCHWEIS 2011). Damit steht ein einfaches Verfahren mit ausreichender Messsicherheit zur Verfügung.

2.2 Durchflusserfassung über kontinuierliche Geschwindigkeitsmessung mittels Ultraschall

Diese Messtechnik, bei der die Fließgeschwindigkeit eines Gewässers entweder über die Laufzeit oder den Dopplereffekt kontinuierlich gemessen wird, erfährt u.a. aufgrund vereinfachter Installationsmöglichkeiten (insbesondere bei den Dopplergeräten) und dadurch bedingte sinkende Kosten in den letzten Jahren zunehmende Verbreitung. Sie sind jedoch bei Extremereignissen anfällig, da die Messgeräte unter Wasser eingebaut sind und bei Defekten z.B. im Hochwasserfall schwer zu überprüfen bzw. zu reparieren sind.

2.3. Durchflusserfassung durch kontinuierliche Messung der Oberflächengeschwindigkeit mittels Radar

Hierbei handelt es sich dagegen um eine berührungslose Methode, bei der die Oberflächengeschwindigkeit eines Gewässers kontinuierlich mit Hilfe von Mikrowellen-Radar nach dem Echolotprinzip gemessen wird. Unter der Voraussetzung, dass an der Gewässeroberfläche eine gewisse Rauigkeit vorhanden ist (minimal 6 mm), was außer bei extremem Niedrigwasser meistens zutrifft, ist dieses Indexverfahren, bei dem lediglich die Oberflächengeschwindigkeit messtechnisch erfasst und die mittlere Geschwindigkeit rechnerisch ermittelt werden muss relativ einfach und schnell sowie kostengünstig an vielen Messpunkten einsetzbar. Dies gilt insbesondere für Hochwassersituationen.

Die übrigen aufgeführten Verfahren sind noch im Entwicklungsstadium und daher nicht allgemein bzw. nur für Sonderaufgaben verfügbar (MORGENSCHWEIS 2010b).

Alle 3 aufgezeigten Verfahren sind an einen Flussquerschnitt gebunden, d.h. sie liefern streng genommen nur punkthafte Informationen. Darüber hinaus setzen sie bestimmte hydraulische Randbedingungen voraus, die leider in der rauen Wirklichkeit nicht immer eingehalten werden, wie die nachfolgenden Beispiele zeigen.

3. Anwendungsgrenzen unter schwierigen hydraulischen Bedingungen

Bei Sturzfluten, wie sie z.B. in torrenteartigen Gewässern in semi-ariden Klimaräumen relativ häufig auftreten, die durch instationäres Fließen mit stark unruhigen Oberflächenstrukturen gekennzeichnet sind, fallen alle bekannten Messverfahren mehr oder weniger aus. Selbst Nachrechnungen mit hydrodynamischen Modellen erweisen sich häufig als nicht zielführend. Noch schwieriger wird es bei Extremereignissen, bei denen der Durchfluss aus einem Schlamm-Wasser-Gemisch besteht. Dies ist nicht untypisch für Murengänge in alpinen Einzugsgebieten. Bekannt für solche Ereignisse ist der Illgraben im Wallis, in dem die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) zur Beobachtung und Analyse solcher Ereignisse ein komplexes Messsystem betreibt, bei dem eine ganze „Familie“ verschiedener Messsysteme (Geophone, Laser- und Radargeräte, Murwaagen) zeitsynchron eingesetzt wird; es handelt sich um ein hybrides Messsystem.

Nicht ganz so gravierend aussehend, dafür aber umso häufiger in Flachlandgewässern auftretend, ist die zunehmende intensive Verkräutung von Gewässern. Diese erschwert sowohl die eigentlich einfache Wasserstandsmessung, da aufgrund des Rückstaus sich ein virtueller Wasserstand einstellt, als auch die Durchflusserfassung. Auch hier wird zurzeit an einer Lösung mit Hilfe eines hybriden Messsystems bestehend aus der synchronen Messung der Oberflächengeschwindigkeit mit Radar und der Messung des Wasserspiegelgefälles mit dem ΔW -Verfahren gearbeitet (MORGENSCHWEIS & DOSE 2012).

Für alle 3 aufgezeigten Problemfelder mussten oder müssen noch neuartige Messverfahren entwickelt oder aus der Kombination vorhandener Messmethoden abgeleitet werden. Dies ist umso wichtiger als die aufgezeigten Beispiele auch im Hinblick auf Auswirkungen von Klimaänderungen in Zukunft durchaus häufiger und mit höherer Intensität auftreten können.

Abschließend ist festzuhalten, dass alle aufgezeigten kontinuierlichen Durchflussmessverfahren, auch die neu zu entwickelnden aus Kap. 3, immer nur Ergebnisse für einen Messquerschnitt, d.h. für einen Punkt im Einzugsgebiet, liefern.

4. Denkbare Lösungswege zur Bereitstellung von flächendeckenden Durchflussdaten

Wie in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt, erfüllen alle vorgestellten Systeme von der Messung über die Fernübertragung bis zur Datenspeicherung nicht die im Untertitel formulierten Kriterien. Im Bereich „Datenkommunikation“ und „Datenmanagement“ dürften m.E. aufgrund der unvermindert weitergehenden technischen Entwicklung in der IT-Branche probate Lösungen gefunden werden, schwieriger dürfte es dagegen bei der Bereitstellung flächendeckender Durchflussdaten werden. Daher sollen im Folgenden bevorzugt mögliche Lösungswege für diesen Bereich aufgezeigt werden.

Aus meiner Sicht ergeben sich 3 grundsätzliche Entwicklungspfade:

1. Verdichtung punkthaft erfasster Messwerte zu flächenhafter Aussage
2. Installation von Messsystemen im Gewässer zur direkten flächenhaften Messung
3. Flächenhafte Erfassung von Gewässerdaten mittels Fernerkundung

4.1 Verdichtung punkthaft erfasster Messwerte zu flächenhafter Aussage

Unter der Voraussetzung, dass belastbare Messdaten für jede Messstelle in einem vorhandenen Pegelmessnetz verfügbar sind, können diese Daten räumlich interpoliert werden mit Hilfe von hydrodynamischen Modellen im 2D- oder 3D-Modus. Solche Modelle sollten in absehbarer Zukunft nach Ansicht vieler Fachkollegen in Echtzeit arbeitend verfügbar sein.

Ein Beispiel für ein solches in Ansätzen schon funktionierendes System ist das Central Texas Hub am Lower Colorado River (Abbildung 2), das in den letzten Jahren insbesondere auf Initiative von Prof. Maidment von der University of Austin implementiert wurde und betrieben wird.

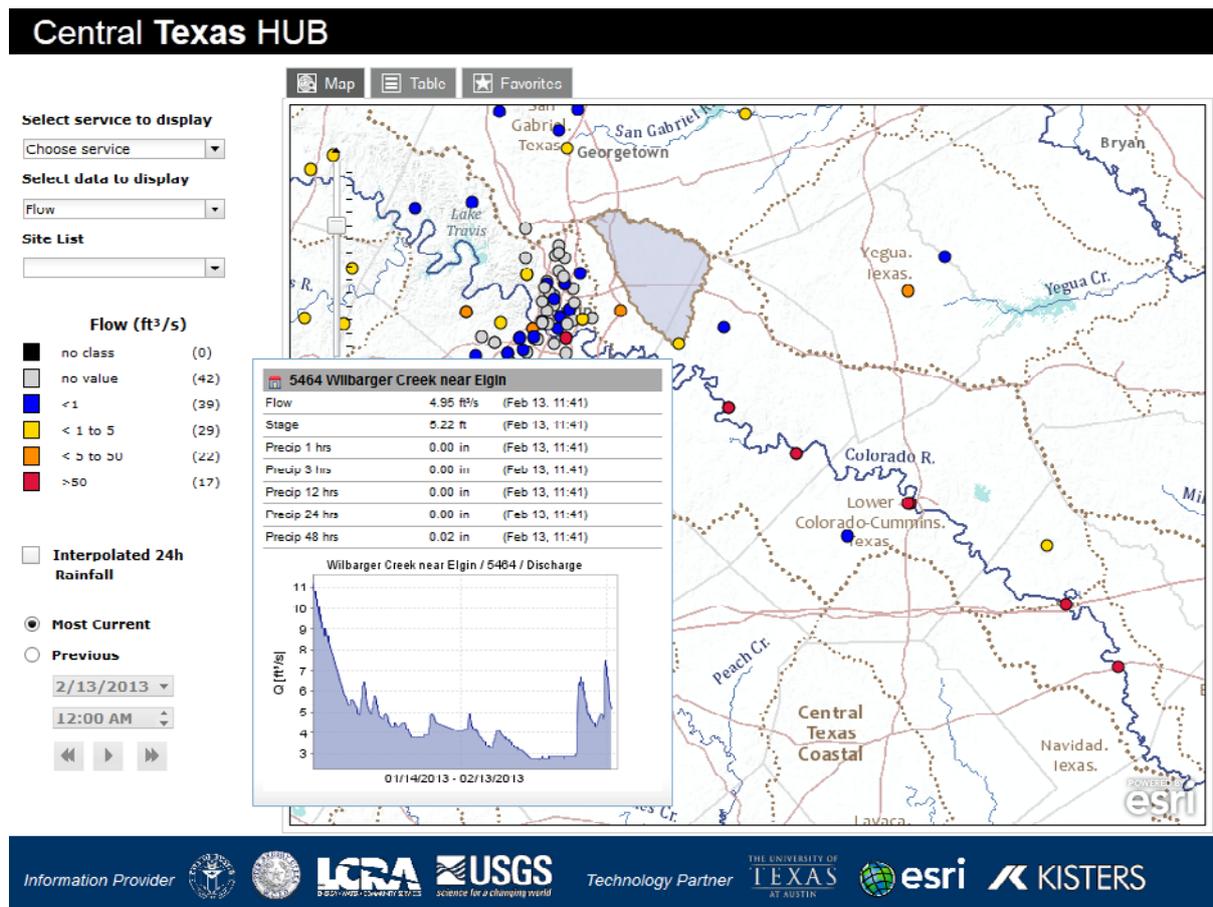


Abb. 2: Informationssystem am Lower Colorado River (www.centraltexashub.org)

Im kleineren Maßstab gibt es auch in Europa Beispiele wie ELWAS-IMS für die deutschen Bundeswasserstraßen, Pegelonline in NRW, Hydris in Österreich oder GEWISS und HydroWatch in der Schweiz. Diese Informationssysteme stellen heute schon punkthaft gemessene Daten der Öffentlichkeit zur Verfügung, beinhalten jedoch noch keine flächenhafte Interpolation mit Hilfe von Modellen.

Mit Hilfe von neuronalen Netzwerken und durch klassifizierte hydraulische Parameter, die durch Voruntersuchungen ermittelt wurden, können solche datengetriebenen Modelle, die an die heutige Situation angepasst sind, beschleunigt werden.

Schwieriger wird es bei unvorhergesehenen Ereignissen, wie z.B. den Wegfall des Waldspeichers als Folgewirkung von großflächigen Waldschäden durch Kyrill, da fachlich „Neuland“ betreten wird. Dies führt zu Systemwechseln und häufig zum Scheitern bei der Anwendung von parametergestützten hydrodynamischen Modellen. Lösung kann hier die Nutzung von deterministischen hydrologischen Modellen sein, da hier auf Prozessverständnis zurückgegriffen werden kann (persönl. Mitt. A. Schlenkhoff, 2013).

Künftige Informationssysteme sollten daher (zentral oder dezentral) ein Cluster von Modellen verschiedener Komplexität parallel betreiben, um der Forderung nach jederzeitigen Daten gerecht zu werden.

Die Realisierungschancen dieses Entwicklungspfad sind für die nahe Zukunft recht hoch, da auf vorhandene (evtl. ergänzte) Messnetze und Modelle zurückgegriffen werden kann. Es

ist ein Optimierungsprozess notwendig, um eine ausreichende Performance zu erreichen, damit Echtzeitdaten geliefert werden können. In ersten, vielversprechenden Ansätzen sind solche Systeme schon im praktischen Einsatz.

4.2 Installation von Messsystemen im Gewässer zur direkten flächenhaften Messung

Hierbei geht es um ein sehr dichtes Messnetz, das in kurzen Abständen entlang eines Gewässers Messdaten liefert. Da die Installation herkömmlicher Messgeräte in dieser Dichte wirtschaftlich und technisch kaum realisierbar ist, müssen neuartige Messverfahren entwickelt und angewandt werden.

Eine Möglichkeit könnte z.B. die in situ-Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe von faseroptischen Verfahren sein, bei denen Glasfaserkabel flächendeckend in die Gewässersohle verlegt werden. Zum Messen wird das Kabel pulsartig aufgeheizt und es werden über die durch das vorbeiströmende Wasser verursachte Temperaturänderung Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt (Heat-Pulse-Methode). Bei Durchströmungsmessungen von Staudämmen wird dieses Verfahren seit Jahren erfolgreich eingesetzt wird (s. AUFLEGER 2000.). In seiner 2006 am Institut für Wasserbau der TU München erschienenen Dissertation hat S. Perzlmairer bei Laborversuchen u. a. nachgewiesen, dass „der geschwindigkeitsabhängige Konvektionseinfluss messbar ist“. Jedoch zeigte sich auch, dass bei frei fließendem Wasser in einer Versuchsrinne der Messfehler gegenüber der freien Konvektion übermäßig groß war, da die im Wasser auftretenden Störgrößen zu hoch sind und die Messergebnisse überlagern. Die Störgrößen resultieren z.T. aus Inhomogenitäten der Messkabel. Problematisch dürfte auch die hohe erforderliche Heizleistung bei Anwendung der Heat-Pulse-Methode in Freispiegelgerinnen sein. Daher ist der Hauptinitiator dieser Methode in der Geotechnik, Prof. M. Aufleger (Univ. Innsbruck) sehr skeptisch im Hinblick auf die Anwendung dieses Verfahrens für Freispiegelgerinne. Es ist sicherlich noch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig ist. Bezüglich der Kosten ist anzumerken, dass Glasfaserkabel heute ein Massenartikel sind, die preiswert für solche Installationen eingesetzt werden könnten.

Eine weitere Möglichkeit könnte die Nutzung von aktiven LIDAR (Light Detection and Ranging)-Systemen sein, bei denen im Wesentlichen Laserstrahlen zum Einsatz kommen. Mit ihnen lässt sich der Wasserstand terrestrischer Gewässer schon heute berührungsfrei nach dem Echolotprinzip über die Messung der Laufzeit zwischen einem Transmitter und der Wasseroberfläche mit hoher Genauigkeit abtasten (s. Abbildung 3). Problematisch beim Einsatz dieses optischen Verfahrens sind Störeinflüsse von der durchleuchteten Luftsäule. Daher werden LIDAR-Systeme bisher ausschließlich vom Flugzeug aus betrieben (s. Abbildung 3). Um auch größere Gewässerabschnitte erfassen zu können, experimentiert der Lehrstuhl für Wasserbau der Universität Innsbruck (persönl. Mitt. M. Aufleger, 2013) mit grünen Laserstrahlen, die eine besonders hohe Intensität aufweisen. Dem Einsatz von einem Satelliten aus steht bisher der für die Durchdringung der großen Luftsäule erforderliche hohe Energiebedarf entgegen. Auch hier ist erheblicher Forschungsbedarf zu konstatieren.

Ein weiteres Messverfahren könnte die kontinuierliche Messung des Schwerefeldes der Erde mit Hilfe von Satelliten-Altmetrie sein. Nach V. Liebig vom IRS der Univ. Stuttgart (LIEBIG 2009) können Radar-Altimeter heute schon die Entfernung zur Meeresoberfläche mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern messen. Aus der Kombination mit der per GPS be-

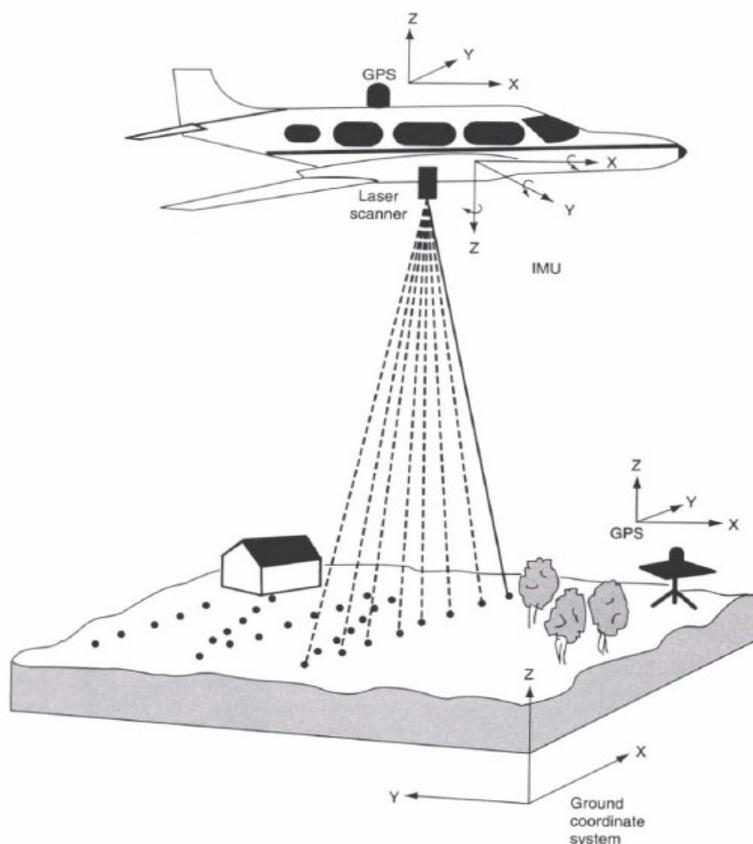


Abb. 3: Prinzip aktiver LIDAR-Systeme (aus: LILLESAND et al. 2004)

stimmten Satellitenposition kann die Meereshöhe berechnet werden. Denkbar wäre die Anwendung auf die Messung des Wasserstands in Gewässern.

Dieses letzte Beispiel leitet über zu dem Komplex der Messung hydrologischer Daten mit Hilfe von Fernerkundung.

4.3 Flächenhafte Erfassung von Gewässerdaten mittels Fernerkundung

Die unter 4.2. aufgeführten Verfahren zur Höhenbestimmung mit Hilfe von Lasertechnik und über die Messung des Schwerfeldes gehören streng genommen schon zu den Verfahren Fernerkundung, auch wenn als Messgeräteträger bei diesen Verfahren bisher Flugzeuge eingesetzt werden.

Bei der Satelliten-Fernerkundung hat in den letzten Jahrzehnten eine rasante Entwicklung stattgefunden. Heute befindet sich eine fast unüberschaubare Vielzahl von staatlichen, halbstaatlichen und kommerziellen Satelliten in der Erdumlaufbahn und weitere sind für die nahe Zukunft geplant. Satelliten tragen heute eine ganze Palette von Fernerkundungssensoren an Bord vom Kameras und Spektrometer im Bereich des sichtbaren Lichts über Laser-Radar und Infrarot-Radiometer im nahen und fernen Infrarotbereich bis hin zu Altimeter und Radiometer im Mikrowellenbereich. Für hydrologische Fragestellungen sind Letztere von besonderer Bedeutung. In einem 1. Schritt wurden für hydrologische Fragestellungen passive Mikrowellen in Verbindung mit digitalen Geländemodellen für die Erstellung von (statischen) Gewässernetzen genutzt (PAPADAKIS et al. 2000). Für mehr dynamische Fragestellungen bieten Messsysteme, die aktive Mikrowellen, besser unter Radar bekannt, einsetzen, den Vor-

teil haben, dass sie sowohl Tag und Nacht messen können als auch Atmosphäre und Wolken weitgehend durchdringen können (SÖRGE 2008). Die neueste Entwicklung in diesem Bereich ist das „Radar mit synthetischer Apertur (SAR)“, dessen Hochfrequenzelektronik im Wesentlichen physikalische Merkmale der Erdoberfläche wie Dielektrizität, Leitfähigkeit, Rauigkeit erfasst. Im Prinzip wird ein elektromagnetischer Puls ausgesandt und seine Reflexion erfasst. Die neueste Satellitengeneration (z.B. COSMO-SkyMed 1-4, GSM Sentinel 1-5) soll damit eine beachtliche räumliche Auflösung von – je nach Modus – bis zu 1 m erreichen und wiederkehrende Beobachtung im 3h-Takt liefern. Für eine globale Abdeckung ist jedoch eine ganze Flotte von Satelliten erforderlich, deren Installation noch einige Jahre dauern dürfte.

Problematisch für unsere Fragestellung ist, dass die heutigen und die geplanten Satellitensysteme im Wasserbereich im Wesentlichen auf die Erfassung von Schnee und Regen sowie die Bodenfeuchte konzipiert sind. Wasserstand und Durchfluss von Fließgewässern spielen aktuell eine untergeordnete Rolle. So gibt es weltweit auch nur wenige wissenschaftliche Institutionen, die sich damit befassen, wie z.B. Prof. Monique Bernier vom Centre Eau Terre Environnement (INRS) der Universität Quebec/Kanada, die sich mit einem internationalen Team u. a. im Projekt CLIMB intensiv mit Eis- aber auch Fließgewässer-Monitoring befasst. Bisher ist es jedoch noch nicht gelungen, Wasserstandsdaten von Gewässern in ausreichender räumlicher und zeitlicher Diskretisierung zu ermitteln. Hoffnung gibt die Methodik der SAR-Inferometrie, bei der die zeitgleich von 2 im Tandem nebeneinanderfliegenden Satelliten (z.B. TerraSAR-X, Tandem-X) gemessenen Radarsignale und ihre Phasenverschiebung genutzt werden können. Hier steht man jedoch noch am Anfang der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen.

Kenner der Materie wie W. Mauser vom Lehrstuhl für Geographie und Fernerkundung der Ludwigs-Universität München, ausgewiesener Fachmann und Mitglied einer Reihe von internationalen Gremien zur praktischen Anwendung von Fernerkundung, beklagen jedoch, dass die Hydrometrie eine zu schwache Lobby habe (persönl. Mitt. W. Mauser, 2013). Hier gilt es bei der Planung für die messtechnische Ausstattung der neuen Satelliten-Familien (z.B. GSM Sentinel) den Belangen der Hydrometrie Gehör zu verschaffen und die Bedeutung von raumdeckenden zuverlässigen Daten im Zusammenhang mit z.B. Hochwasserkatastrophen und zugehörigem Krisenmanagement deutlich zu machen.

Eine weitere erfolgversprechende Anwendung der Fernerkundung könnte sich durch die Entwicklung eines neuen Satelliten-Radarsensors, der analog zu den existierenden terrestrischen Systemen (z.B. RQ30 der Fa. Sommer/Österreich) die Oberflächengeschwindigkeit von Gewässern kontinuierlich erfasst (Abbildung 4), aufbauen. Voraussetzung dafür ist eine ausreichend ausgeprägte Rauigkeit der Gewässeroberfläche, die aber - wie bisherige praktische Erfahrungen gezeigt haben - sehr häufig und auf jeden Fall bei Hochwasserabflüssen ausreichend gegeben sind (MORGENSCHWEIS 2010a). Gegenüber den terrestrischen Geschwindigkeit-Radargeräten, die heute maximal 200 m Entfernung überwinden können (bei 24 1/8 GHz) müsste hier eine wesentlich höhere Frequenz eingesetzt werden, die wiederum einen sehr hohen Energiebedarf mit sich bringen würde. Nach Meinung von M. Sommer, dem führenden Entwickler von solchen Radargeräten, ist dies zurzeit nicht lösbar (persönl. Mitt. M. Sommer, 2013). Aber die Zukunft wird zeigen, ob es für dieses technische Problem

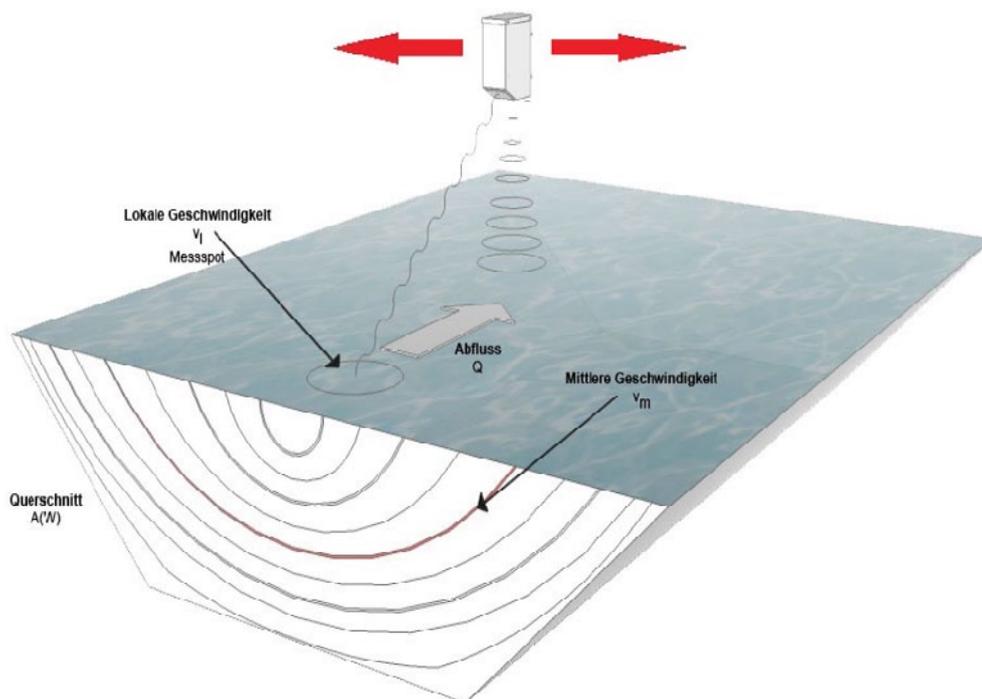


Abb. 4: Prinzip der Oberflächengeschwindigkeitsmessung mit Radar (aus RP30, SOMMER 2013)

nicht eine Lösung gibt. Wenn ja, wäre die Messung der Oberflächengeschwindigkeit ebenso wie im terrestrischen Bereich m. E. die Messtechnik der Zukunft, die kombiniert mit einfachen hydraulischen Modellen Durchflusswerte mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung kontinuierlich liefern könnte.

5. Ausblick

Bei der vorgestellten Vision eines hydrometrischen Informationssystems der Zukunft geht es darum, aktuelle Messdaten (Wasserstand, Durchfluss von Fließgewässern u.a.) in hoher zeitlicher Auflösung (Minuten, Stunden) in Echtzeit, d.h. unmittelbar nach der messtechnischen Erfassung mit entsprechender Zugriffsautorisierung über vielfache Medien sowie von jedem Ort der Welt zur Verfügung zu stellen. Diese Vision könnte nach meiner persönlichen Überzeugung in den nächsten Jahrzehnten in weiten Bereichen Wirklichkeit werden, da die wissenschaftlich-technische Entwicklung in diesem Bereich unvermindert weitergehen und die Nutzung von Datenmanagementsystemen zur Selbstverständlichkeit wird. Gleichzeitig wird durch verbesserte Regionalisierungs- und Interpolationsverfahren sowie durch die Installation neuer flächenhaft arbeitender Messverfahren die flächenhafte Dichte von Wasserstands- und Durchflussmessdaten erheblich zunehmen.

Kritische Kollegen warnen gleichzeitig davor, dass trotz erheblich höherer Datendichte „die Zuverlässigkeit belastbarer Daten stark abnehmen wird“ (persönl. Mitt. M. Langstädtler, 2013). Tatsache ist, dass heute schon Daten, sobald sie im Internet abrufbar sind, häufig unkritisch genutzt werden. Dies liegt auch daran, dass in Politik und Fachverwaltung, aber auch in der Wissenschaft Messdaten nicht mehr den Stellenwert und ihnen zugehörige Wertschätzung haben. Dies hat dazu geführt, dass seit Jahren z.B. in der deutschen staatli-

chen Wasserwirtschaftsverwaltung und hier insbesondere im Bereich des gewässerkundlichen Messwesens Personal abgebaut wird. Es besteht konkret die Gefahr, dass trotz der aufgezeigten visionären Entwicklung im Bereich der Wasserstands- und Durchflussmesstechnik der bisher hohe Qualitätsstandard von Wasserstands- und Durchflussdaten in Zukunft nicht mehr gesichert ist. (MORGENSCHWEIS 2010b). Hier gilt es gegenzusteuern! Das was in dieser Session über den Stand und Stellenwert der Hydrometrie in der Schweiz, dem Gastland des diesjährigen Tages der Hydrologie, vorgetragen wurde, könnte durchaus als Vorbild dienen!

Inwieweit meine ganz persönlichen Vorstellungen eines zukünftigen hydrologischen Informationssystems Wirklichkeit werden, ist schwer zu sagen. Die vorgestellten denkbaren Entwicklungspfade sind jedoch nicht ohne Realitätssinn formuliert worden, sie beruhen auf langjährigen eigenen Erfahrungen in der operationellen Hydrologie und auf vielen aktuellen Gesprächen mit von mir hoch geschätzten nationalen und internationalen Fachkollegen aus der Messtechnik, der Fernerkundung und der Datenkommunikation, die mir bereitwillig ihre persönliche Sicht der Dinge mitgeteilt haben. Herzlichen Dank dafür an dieser Stelle! Nichtsdestotrotz handelt es sich um eine subjektive Einschätzung.

Literatur

- MORGENSCHWEIS, G. (2010a): Hydrometrie – Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. S. 1-582. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.
- MORGENSCHWEIS, G. (2010b): Gedanken zur Entwicklung des Pegelwesens und der Durchflussmesstechnik in den letzten 100 Jahren. Wasserwirtschaft, Jg.: 100, Nr. 1/2, S. 48-54.
- AUFLEGER, M. (2000): Verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau. Habilitationsschrift. – Ber. d. Lehrstuhl. u. Versuchsanstalt für Wasserbau u. Wasserwirtschaft der TU München Nr. 89.
- PERZLMAIER, S. (2007): Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen. Diss., Ber. d. Lehrstuhl u. Versuchsanstalt für Wasserbau u. Wasserwirtschaft der TU München Nr.109.
- LILLESAND, Th.M., KIEFER, R.W. & J.W. CHIPMAN (2004): Remote Sensing and Image Interpretation. Wiley New York.
- LIEBIG, V. (2009): Das Schwerefeld der Erde. www.irs.uni.stuttgart.de/skript/satsys/M1b-Schwerefeld.pdf
- SÖRGEL, U. (ed) (2010): Review of Radar Remote Sensing of Urban Areas. Springer Verlag. New York.
- NIEMEYER, I. (2009): Fernerkundung. Skript TU Freiberg.
- PAPADAKIS, I. & G. A. SCHULTZ (2000): Computation of Hydrological Data for Design of Water Projects in Ungauged River Basins. In: SCHULTZ, G.A. et al. (2000).p. 401-418.

Die Analyse von langen Datenreihen ermöglicht die Dokumentation von Veränderungen im Abflussverhalten in den Hohen Tauern und im Alpenvorland

Barbara Staudinger

Zusammenfassung

In der Betrachtung des gesamten Hydrologischen Jahres sind Trends im Niederschlag und Abflusshöhen nur schwach ausgeprägt (BMLFUW 2008), eine zeitlich und räumlich differenzierte Analyse ergibt deutlichere Trends. Vergleicht man historische Aufzeichnungen und Beobachtungen mit hoch aufgelösten Beobachtungsreihen aufgezeichnet mit Datensammlern der letzten Jahrzehnte, ist eine Verschiebung des hydrologischen Regimes und eine Reduktion der Gebietspende zu beobachten. Beim Abfluss in Einzugsgebieten mit Vergletscherung zeigt sich ein Rückgang in den Sommermonaten und eine deutliche Vergleichmäßigung des Abflussregimes im Jahresgang (BMLFUW 2008). Es tritt eine Verschiebung der jahreszeitlichen Spitze in Richtung Frühjahr, das heißt eine Veränderung vom glazialen zu nivalem Regime ein.

Änderungen in der Niederschlagsverteilung sind im Alpenvorland zu beobachten. Besonders im Frühjahr ist eine Zunahme des Niederschlags zu beobachten und dies kann auch bei einer Abflussmessstelle im Einzugsgebiet der Fuschler Ache durch eine Erhöhung des mittleren monatlichen Abflusses nachgewiesen werden. Niederschlagsänderung und Verdunstungszunahme durch die Klimaänderung beeinflussen das Abflussregime in den Gewässern.

Auch bei der Beurteilung der künftigen Wasserführung an Gewässern für Wasserkraftnutzung sind lange Beobachtungsreihen von großer Bedeutung. Die optimale Nutzung der Wasserkraft bezogen auf alle Sachbereiche (z.B. Leistungsvermögen, Gewässerökologie) kann in der Planung nur dann umgesetzt werden, wenn entsprechende Beobachtungsreihen als Datengrundlage für Berechnungen zur Verfügung stehen. Bei der Beurteilung der maßgebenden hydrologischen Kennzahlen wird jene Beobachtungsreihe herangezogen, welche das bestmögliche Ergebnis für die Einschätzung der künftigen Wasserführung ergibt, da Änderungen in der hydrologischen Charakteristik vorhanden sein können. Für die systematische Beobachtung des Wasserkreislaufes in Österreich ist der Hydrographische Dienst seit mehr als 100 Jahren verantwortlich. Datenreihen werden der Öffentlichkeit zur weiteren Verwendung kostenlos zur Verfügung gestellt.

1. Einleitung

Der Gesamtabfluss in Oberflächengewässern mit Vergletscherung im Einzugsgebiet setzt sich aus 4 Anteilen zusammen, die je nach Jahreszeit in unterschiedlichem Ausmaß wirksam werden (Oberflächenabfluss auf Grund von Niederschlagsereignissen; Basisabfluss als Entwässerung des Bodenkörpers; Schneeschmelze und Gletscherschmelze). Gletscherschmelze ist jener Abflussanteil, der direkt aus dem Abschmelzen der in gletschergebundenen Eismassen resultiert. Der Schmelzanteil der Gletscherflächen in den Hohen Tauern trägt wesentlich zur ausgeglichenen Abflusssituation während der Sommerperioden bei. Durch die ehemals größeren Gletscherflächen konnte sich die Schneedecke, die sich aus Niederschlag

in Form von Schnee und Windverfrachtung akkumuliert hatte, länger halten. Daraus ergibt sich das veränderte Abflussregime in den Sommermonaten.

Der Gesamtabfluss in Oberflächengewässern ohne Vergletscherung im Einzugsgebiet setzt sich aus 3 Anteilen zusammen, die je nach Jahreszeit in unterschiedlichem Ausmaß wirksam werden (Oberflächenabfluss auf Grund von Niederschlagsereignissen; Basisabfluss als Entwässerung des Bodenkörpers; Schneeschmelze).

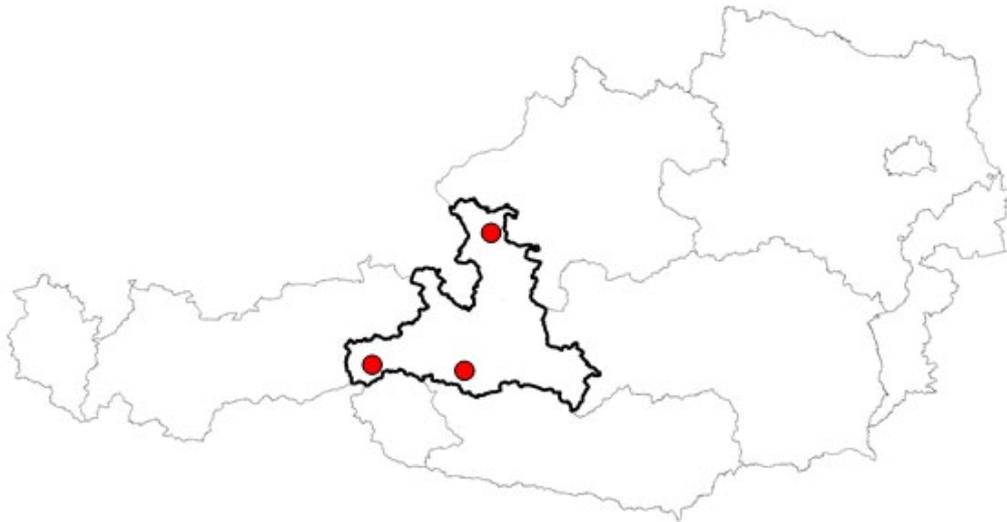


Abb. 1: Übersichtskarte, Bundesland Salzburg, Österreich, Lage der Betrachtungspunkte

Im Jahr 1980 war der letzte Gletschervorstoß in den Alpen bezogen auf die Gesamtfläche Österreichs entspricht das in den Alpen als Eis gebundene Wasser einer Wasserhöhe von 190 mm, das ca. 16 % eines mittleren Jahresniederschlages entspricht (KUHNS 2008).

Bezogen auf die Wasserbilanz Österreichs beträgt der Abflussanteil der Gletscherschmelze mit 2mm pro Jahr weniger als 1% des Gesamtabflusses. Viel deutlicher ist der Gletschereinfluss in den Alpentälern, wo er an Pegelmessstellen beobachtet wird.

Die Ablation des Eises besteht zum überwiegenden Teil aus Abschmelzen, für das die Temperatur als Kenngröße herangezogen werden kann. Beträgt das Tagesmittel der Lufttemperatur 1°C muss mit einem Abschmelzen von 5 mm gerechnet werden. Bei einer mittleren Tagestemperatur von 8°C können an einem Sommertag 4cm schmelzen (KUHNS 2008). Meist ist nicht mit reiner Eisschmelze zu rechnen, da in dieser Höhenlage Niederschlag immer wieder als Schnee fällt und das Eis bedeckt. Abflussbeobachtungen mit Einfluss von Schmelze ist daher meistens eine Kombination aus mehreren Prozessen, die gleichzeitig stattfinden.

Im Bundesland Salzburg gab es Anfang des 20. Jahrhunderts an allen Gewässern in den Tauerntälern Abflussuntersuchungen, um das Wasserdargebot zu erheben und mögliche Kraftwerkstandorte, Ausleitungen und Überleitungen planen zu können. Diese vergleichbaren Beobachtungen wurden über mindestens drei Jahre durchgeführt. Um Aussagen über Auswirkungen des Klimawandels auch mit Daten belegen zu können wurden diese digitalisiert, eine vergleichbare Datenbasis geschaffen und die Ergebnisse miteinander verglichen. Beispielhaft wurden Messstellen in der Venedigergruppe und Sonnblickgruppe, wo heute

noch Stationen vom Hydrographischen Dienst Salzburg betrieben werden, ausgewählt (siehe Abbildung 1).

Zusätzlich wurde ein Gewässer im Alpenvorland, welches zusätzlich durch Seeretention beeinflusst ist, zur Analyse herangezogen, ob auch ohne Beeinflussung des Gletscherabflusses Veränderungen in den Beobachtungsreihen nachzuweisen sind.

Da für geplante Standorte für Wasserkraftwerke hydrologische Kennzahlen angefragt wurden, wurde in der Analyse der langen Beobachtungsreihen festgestellt, dass Veränderungen nachweislich vorhanden sind. Ziel war es diesem Trend auch über andere Beobachtungen begründen zu können.

Ziel dieser Studie ist es Veränderungen in den Beobachtungsreihen dokumentieren und wenn möglich auch interpretieren zu können.

2. Methodik

Um die Entwicklung an Beobachtungsstandorten über einen großen Zeitraum mit historischen Datenreihen zu dokumentieren, wurden diese historischen Daten digitalisiert. Wegen dem möglichen Einfluss der Art der Beobachtung wurde für den Vergleich und die Beschreibung der Veränderung in der Charakteristik der Messstellen die Einheit der Monatsmittel gewählt und für den jeweiligen Standort der spezifische Abfluss berechnet, da in diesem Fall der Einfluss die Art der Erhebung der Daten geringer ist. Für die Vergleichbarkeit der Charakteristik der Messstelle zu verschiedenen Zeitpunkten wurden Beobachtungsreihen und Dekaden herangezogen.

Im Alpenvorland liegt eine Veränderung der Charakteristik des Abflussregimes in den letzten Jahrzehnten vor, auf historische Datenreihen konnte in diesem Fall nicht zurückgegriffen werden.

Die Erhebung von Abflussdaten erfolgte bis zur Errichtung von Schreibpegeln über Wasserstandbeobachtung einmal täglich. Bei der Berechnung von Tagesfrachten wurde der erhoebene Wasserstand in Abflussfrachten umgerechnet, deshalb liegen bei historischen Beobachtungsreihen diese Datengrundlagen vor. Die Datenbasis betrachtet über den gesamten Beobachtungszeitraum ist unterschiedlich und die Vergleichbarkeit ist erst bei der Betrachtung von Monatsmittelwerten und Spaltenvergleich sinnvoll.

3. Charakteristische Messstellen

Bei der Auswahl von charakteristischen Messstellen wurde darauf Rücksicht genommen, dass eine Vergleichbarkeit der Einzugsgebietsgröße von historischen aufgelassenen Messstellen mit bestehenden Stationen des hydrographischen Dienstes vorhanden ist. Von Interesse waren auch Stationen ohne Gletschereinfluss im Alpenvorland auf beobachtete Trends untersuchen zu können.

3.1 Nördliche Tauerntäler der Venedigergruppe und Sonnblickgruppe

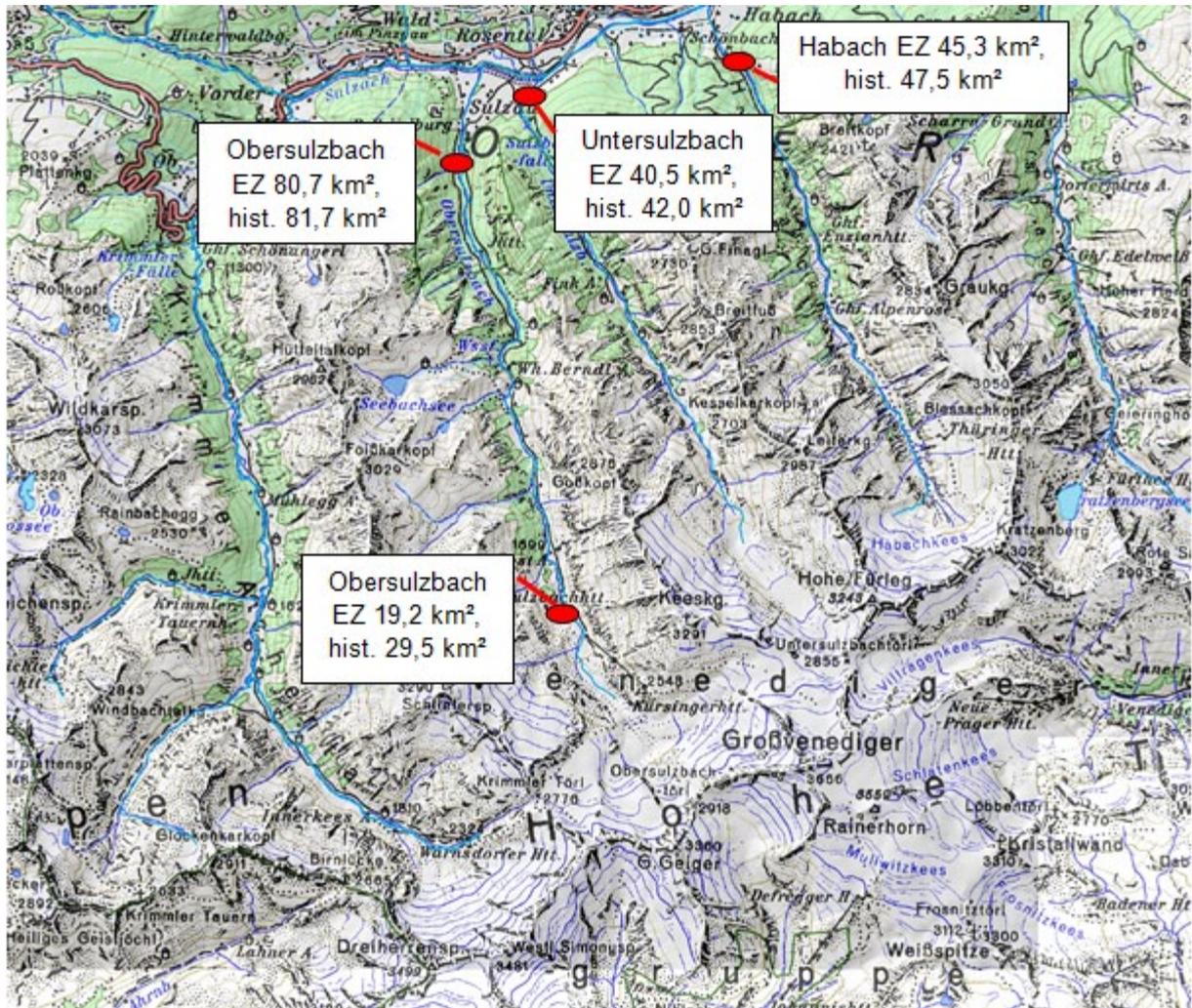


Abb. 2: Venedigergruppe, Lage der Messstellen

In Abbildung 2 ist die Lage der für die Analyse herangezogenen Messstellen dargestellt. Das Einzugsgebiet reicht von ca. 1000 m.ü.A. bis in eine Höhe von 3666 m.ü.A., den Gipfel des Großvenediger. Die historischen Messstellen mit einer längeren Beobachtungsreihe waren in unmittelbarer Nähe situiert, die entsprechenden Einzugsgebietsgrößen sind in der Grafik angegeben.

Bei allen Messstellen wurde der spezifische Abfluss im Monatsmittel berechnet und im Vergleich zu unterschiedlichen Beobachtungsreihen dargestellt. Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse in Abbildung 3 bis 6 dargestellt.

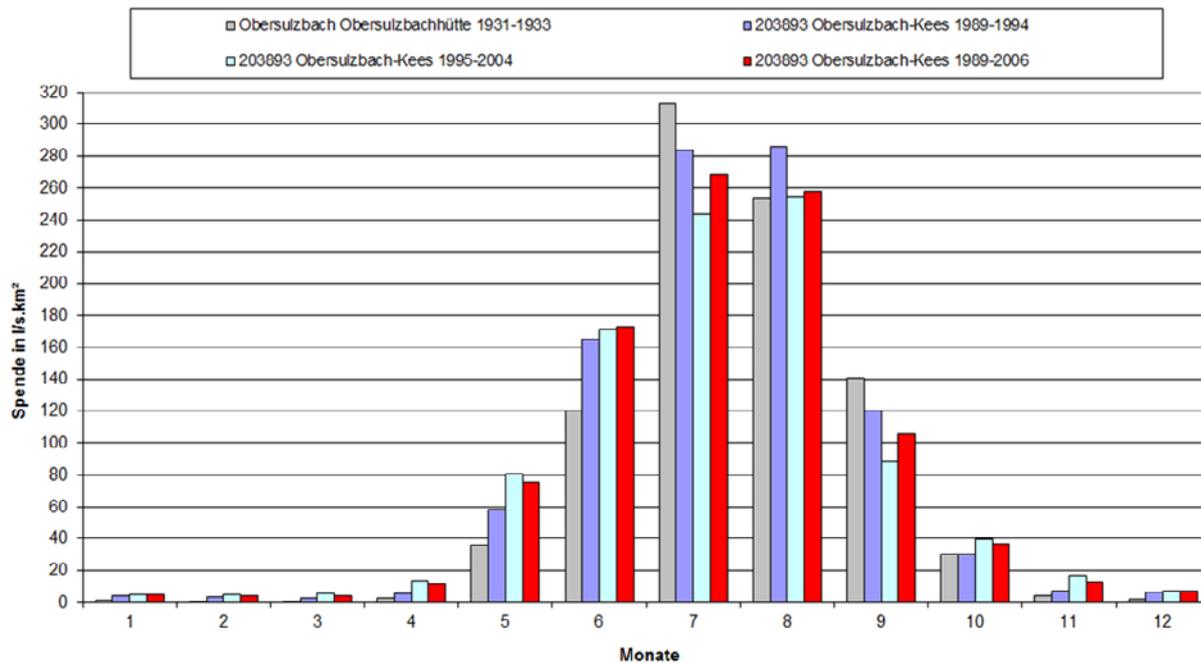


Abb. 3: Obersulzbachhütte/Obersulzbach hist. Reihe (EZ 29,5 km²) und Jahresreihen aus kontinuierlichen Datenreihen Station Kees (EZ 19,2 km²)

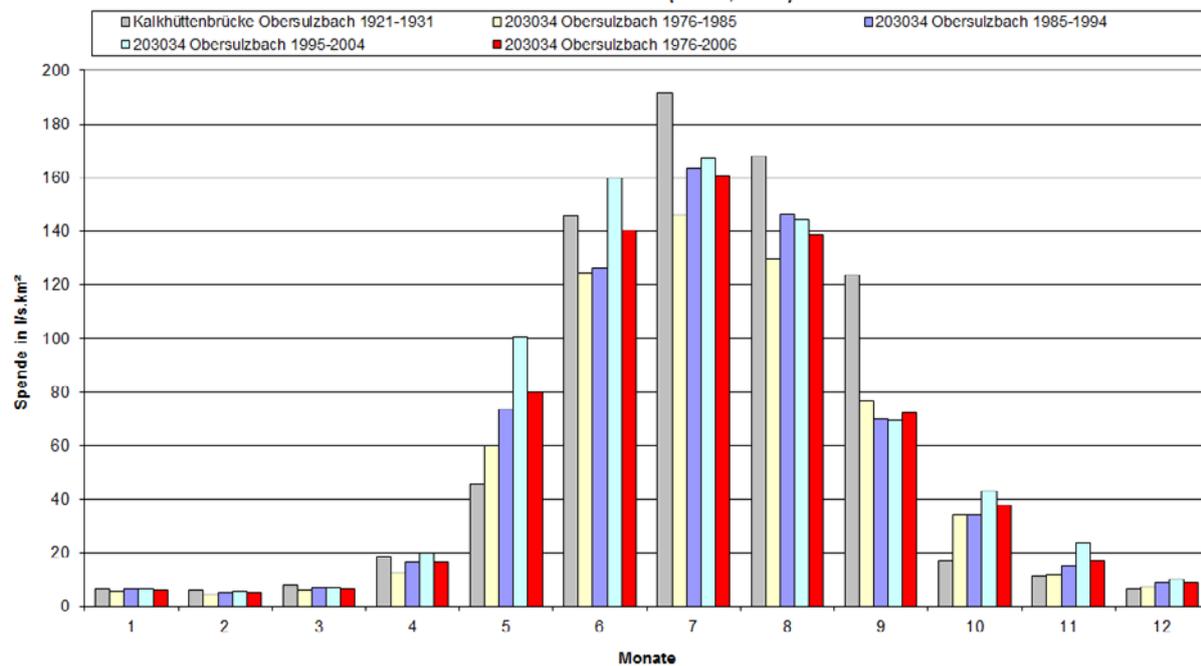


Abb. 4: Kalkhüttenbrücke/Obersulzbach hist. Reihe (81,7 km²) und Jahresreihen aus kontinuierlichen Datenreihen Station Sulzau (EZ 80,7 km²)

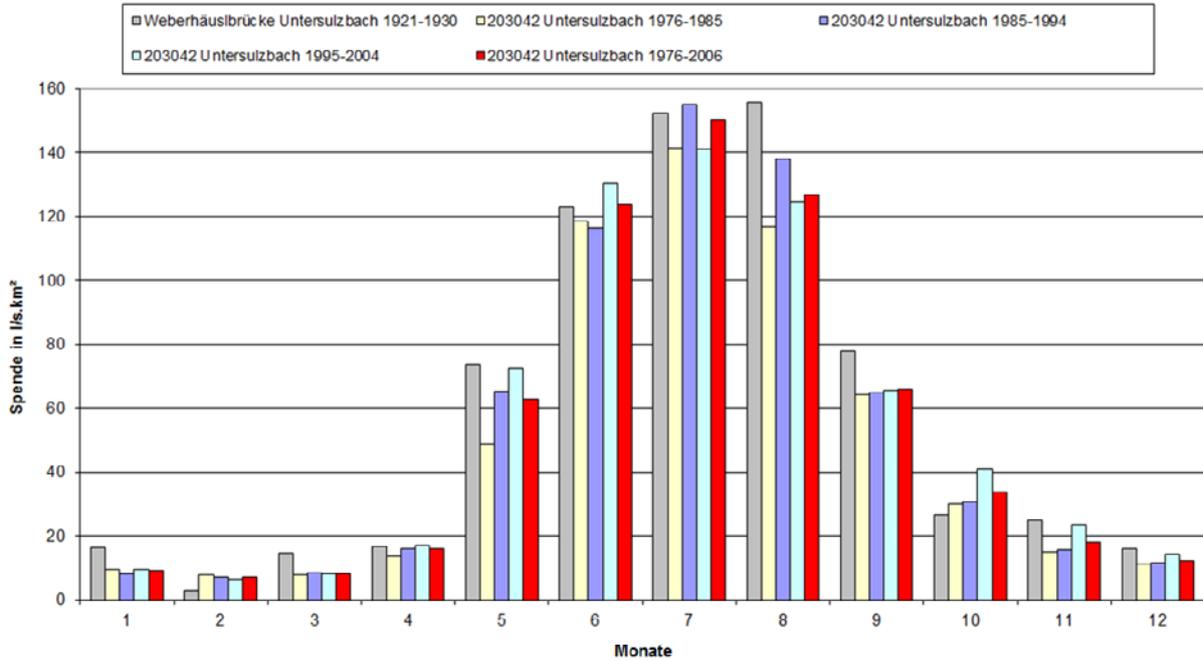


Abb. 5: Neukirchen/Untersulzbach hist. Reihe (EZ 42 km²) und Jahresreihen aus kontinuierlichen Datenreihen Station Neukirchen (EZ 40,5 km²)

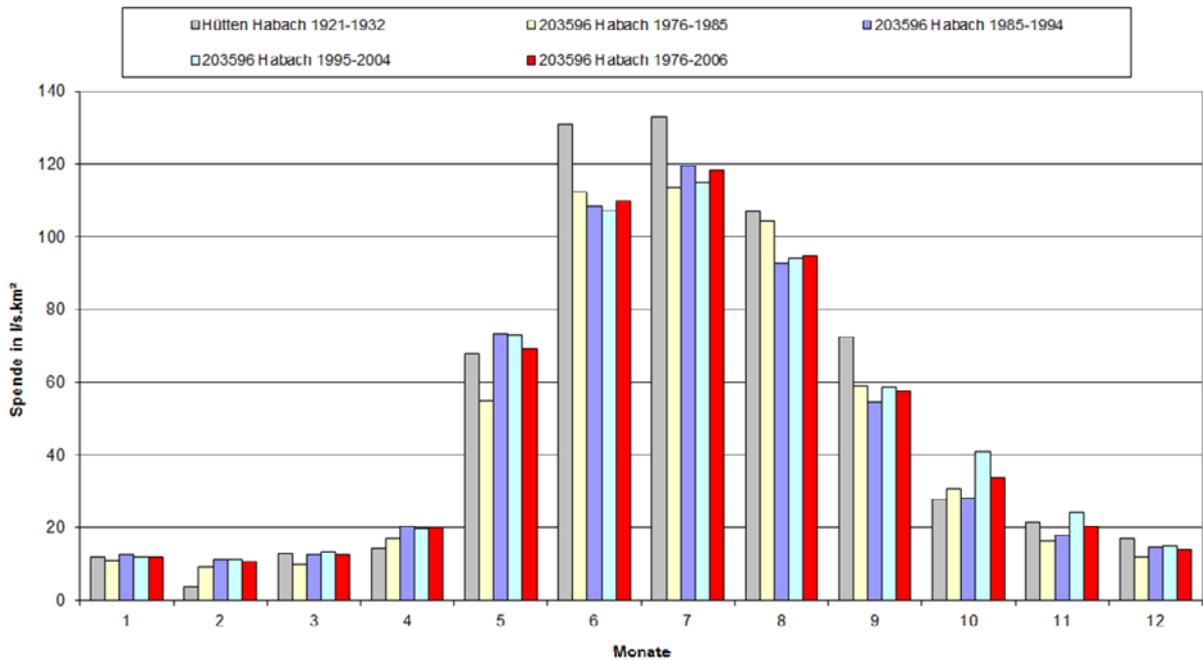


Abb. 6: Hütten/Habach hist. Reihe (EZ 47,5 km²) und Jahresreihen aus kontinuierlichen Datenreihen Station Habach (EZ 45,3 km²)

Im Einzugsgebiet der Rauriserache konnte die Station Bucheben an der Hüttwinklache für die Analyse herangezogen werden, Ergebnisse sind in der Abbildung 7 dargestellt. Bei dieser Station ist ein genereller Rückgang der Spende in den Sommermonaten feststellbar.

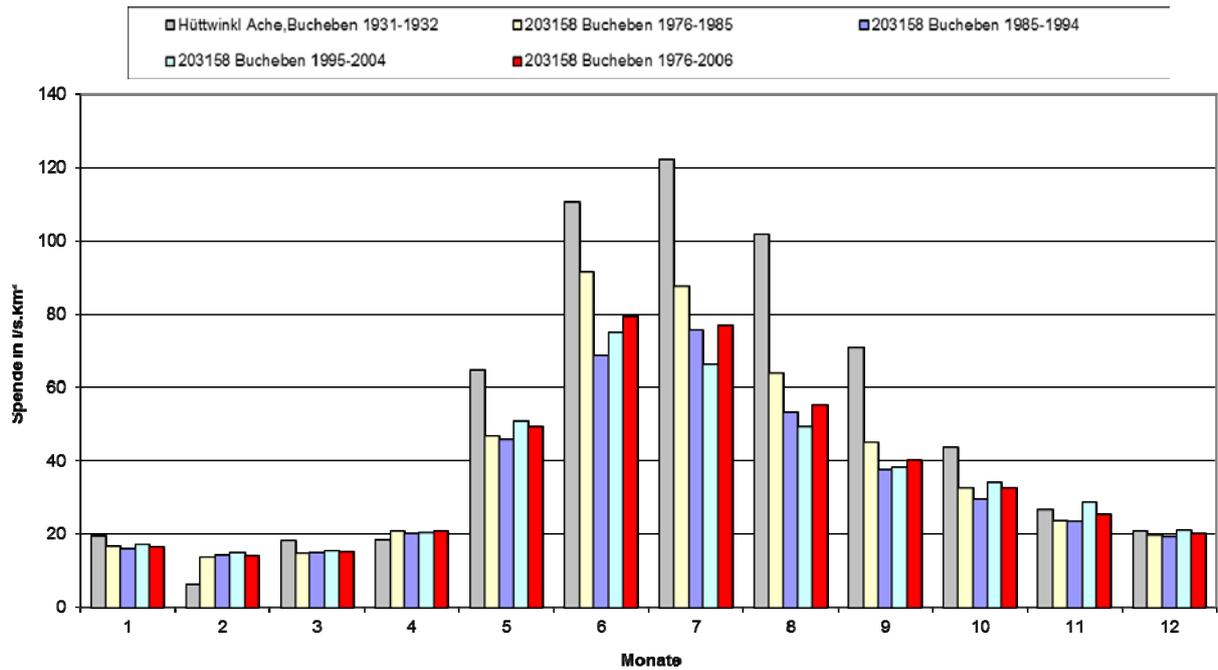


Abb. 7: Bucheben/Hüttwinklache hist. Reihe (EZ 94,6 km²) und Jahresreihen aus kontinuierlichen Datenreihen (EZ 96,1 km²)

3.2 Alpenvorland, Fuschler Ache

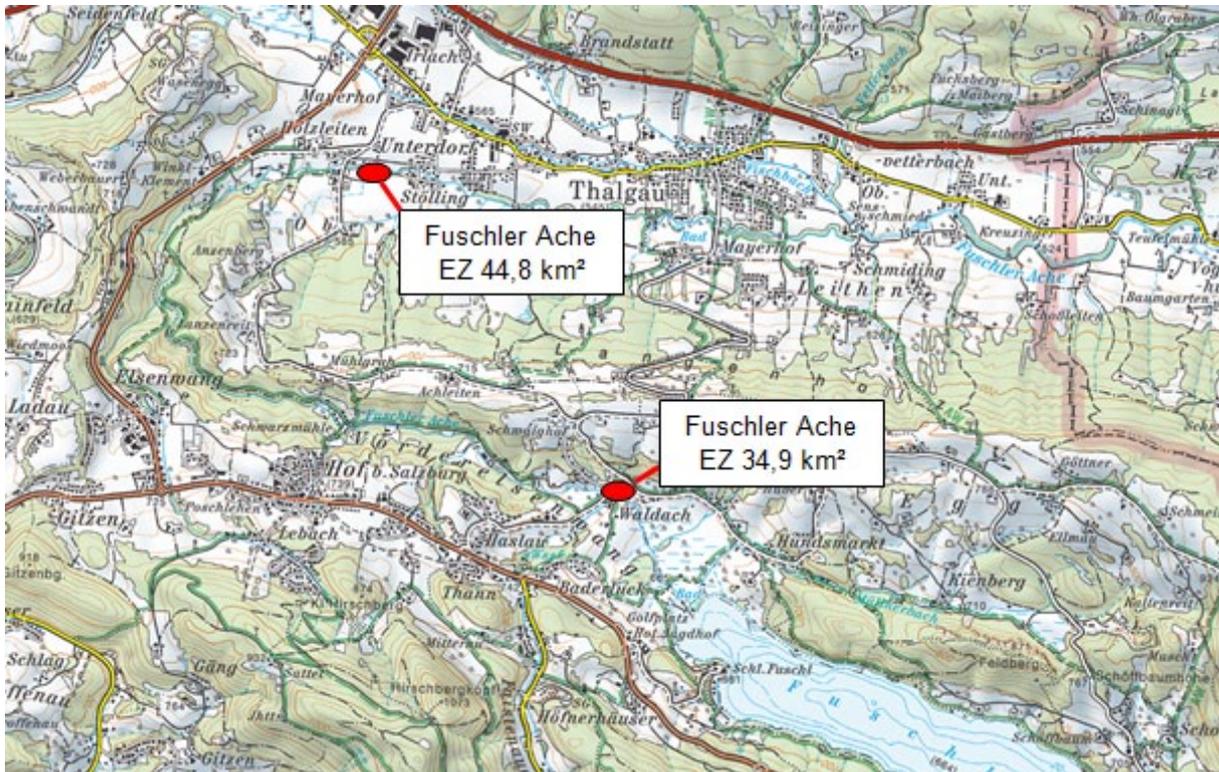


Abb. 8: Alpenvorland, Lage der Messstelle

Das Einzugsgebiet der Fuschler Ache (Abbildung 8) liegt am Rande der nördlichen Kalkalpen.

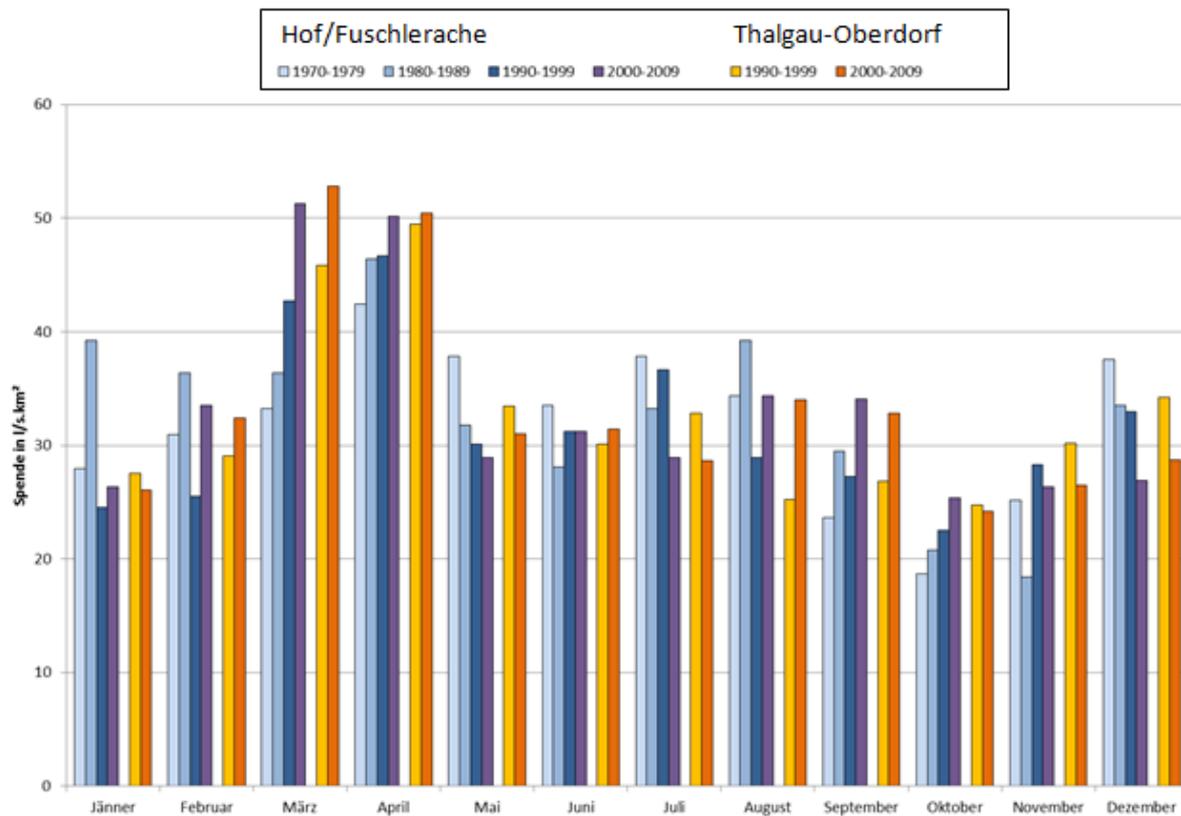


Abb. 9: Fuschler Ache, Hof bei Salzburg (EZ 34,9 km²) und Thalgau-Oberdorf (EZ 44,8 km²)

Für das Alpenvorland wurden zwei Messstellen an der Fuschler Ache ausgewählt die Veränderung im Abflussverhalten zu dokumentieren und einen möglichen Einfluss des Niederschlags belegen zu können. Zusätzlich wurden Beobachtungsreihen von Niederschlagsstationen der Lufttemperatur und des Niederschlags in die Analyse einbezogen.

Tab. 1: Niederschlagsauswertung der Monatssummen, Station Thalgauberg, liegt im Einzugsgebiet der Fuschlerache

Beobachtungsreihen	1976-1987	1986-1997	1996-2007	2006
Jänner	153,3	102,8	94,6	114,9
Februar	77,1	94,6	117,7	147,7
März	107,4	155,3	162,8	199,8
April	124,2	134,3	119,3	165,6
Mai	136,8	148,1	159,2	209,3
Juni	198,0	215,2	174,5	170,2
Juli	213,7	192,4	221,4	146,4
August	208,7	168,1	201,7	313,6
September	134,6	157,5	175,4	157,4
Oktober	108,2	100,9	125,5	83,2
November	122,2	135,7	126,7	158,4
Dezember	121,5	144,0	117,0	62,7

Für das Einzugsgebiet der Fuschlerache sind beispielhaft die Niederschlagssummen der Station Thalgauberg in der Tabelle 1 dargestellt. Der Trend im Monat März zu höheren Niederschlagssummen ist erkennbar, und kann den Anstieg des mittleren monatlichen Abflusses im März und April der Fuschler Ache begründen.

4. Ergebnisse und Interpretation

Für eine Darstellung im Hydrologischen Atlas Österreichs (HAÖ) (BMLFUW 2007) wurden Trendanalysen an Messstellen des hydrographischen Dienstes Österreich mit langen Beobachtungsreihen (mindestens ab 1951) auf Grundlage der Monatsdaten und Niederschläge durchgeführt (FÜRST et al. 2008). Die Wasserbilanz für ganz Österreich wurde mit dem konzeptionellen Modell COSERO berechnet und diese Ergebnisse weiter analysiert. In der Auswertung wurde der Zeitraum von einem Jahresmittel, Auswertung getrennt in Winterhalbjahr und Sommerhalbjahr sowie in Vierteljahren, aufgeteilt auf die Jahreszeiten durchgeführt. Im Unterschied zu den Messdaten, sind die berechneten Ergebnisse im Wasserbilanzmodell nicht anthropogen beeinflusst, und stellen daher eine andere Datengrundlage dar als reine Beobachtungsdaten. Bei zeitlich differenzierterer Analyse, Halbjahr und Vierteljahr ergeben sich deutliche Trends, die zeitlich und räumlich stark unterschiedlich sind (FÜRST et al. 2008). Für die in dieser Studie betrachteten Einzugsgebiete kann aus der Auswertung der Wasserbilanz eine Erhöhung des Niederschlags im Herbst nördlich des Alpenhauptkammes und eine signifikante Abnahme der Abflusshöhe im Sommer abgeleitet werden. Die Jahresauswertung der Trends (Kendall-Theill Trendgerade) in den monatlichen Abflusshöhen für den Zeitraum 1951 bis 2006 ergibt einen negativen Trend in den Monatsabflusswerten (BÖHM et al. 2008).

In der vorliegenden Studie wurden beobachtete Messdaten in der Analyse herangezogen. Monatsmittel von längeren Beobachtungsreihen an bestehenden ausgewählten Messstellen des Hydrographischen Dienstes Salzburg in den Tauerntälern wurden für den gesamten Zeitraum (1976 – 2006) und in Dekaden (1976 – 1985; 1985 – 1994; 1995 – 2004) unterteilt berechnet. Für die historischen Beobachtungen wurde die Reihe 1921 – 1930 herangezogen. Das Monatsmittel der Abflussspende in den Dekaden bzw. der Beobachtungsreihe wurden miteinander verglichen und in Beziehung gesetzt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 bis 7 dargestellt.

Die Erhöhung des mittleren monatlichen spezifischen Abflusses ist im Mai und im Oktober sowie die Abnahme der Spende in den Sommermonaten Juli und August bei allen Messstellen in der Venedigergruppe zu erkennen. Das Jahresmittelwasser hat sich kaum verändert, die Charakteristik und das hydrologische Regime haben sich im Beobachtungszeitraum verändert. Die Auswertung von Niederschlagsdaten kann diesen Trend nicht belegen, der Temperaturanstieg und die früher einsetzende Schneeschmelze können Auslöser dieses Phänomens sein.

In Abbildung 7 ist bei der Station Bucheben /Hüttwinklache ein genereller Rückgang der Abflussspende in den Sommermonaten feststellbar. Eine Veränderung der hydrologischen Charakteristik ist nicht nachweisbar. Zusätzlich beeinflusst eine Ausleitung mit Überleitung zu einem Kraftwerk im Gasteinertal ab dem Jahr 1982 die Analyse dieser Datenreihen.

Für die Analyse der Messstellen an der Fuschler Ache im Alpenvorland (Abbildung 9) wurde gewählt eine lange Beobachtungsreihe am Pegel Hof mit Beobachtungen beim Pegel Thalgau-Oberdorf in Beziehung zu setzen und das Ergebnis mit Auswertungen von Niederschlagsdaten vergleichen bzw. bestätigen zu können.

Der Vergleich der Ergebnisse der mittleren monatlichen Abflussspenden der Reihen 1970 – 1979, 1980 – 1989, 1990 – 1999 und 2000 – 2009 zeigen kaum Unterschiede im Jahresverlauf bis auf die Monate März und April mit Spenden bis zu 53 l/s.km². Eindeutig erkennbar ist zusätzlich die steigende Tendenz des Abflusses im Monat März und April. Um diesen Trend genauer analysieren zu können, wurden Beobachtungen an den Niederschlagsstationen Thalgauberg (siehe Tabelle 1) und Fuschl im Einzugsgebiet der Fuschler Ache herangezogen. Die Analyse der Ergebnisse hat ergeben, dass in den letzten drei Jahrzehnten eine Erhöhung der Niederschlagssumme um ca. 50 mm pro Jahrzehnt zu beobachten ist, und dies kann die Veränderung in der Hydrologie begründen. Eindeutig nachzuweisen ist, dass sich die Niederschlagssumme im Monat März ab den 1990er Jahren erhöht hat und über dem Jahresmittel liegt. Im Jahresverlauf der Monatssummen des Niederschlags hat sich eine Verlagerung in das Frühjahr ergeben. Die Theorie eines Zusammenhangs der Schneeschmelze mit Niederschlagsereignissen und daraus resultierende höhere Abflüsse kann nicht untermauert werden, da sich die mittlere monatliche Tagestemperatur nicht nachweislich verändert hat.

Literatur

- BMLFUW (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs, 3. Lieferung. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, ISBN 3-85437-250-7.
- BÖHM, R., GODINA, R., NACHTNEBEL, H.-P. & O. PIRKNER (2008): Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich. In: BMLFUW 2008 (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft: S. 7-26.
- FÜRST, J., KLING, H., NACHTNEBEL, H.-P. & TH. HÖRHAN (2008): Trends in hydrologischen Variablen und in der Wasserbilanz. In: BMLFUW 2008 (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft: S. 105-115.
- KUHN, M. (2008): Klimawandel und Gletscherschwund. In: BMLFUW 2008 (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft: S. 129-140.
- MANIAK, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. –5., bearb. u. erw. Aufl.: S. 1-666. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.

Verbesserung von Pegelschlüsselkurven: Probabilistische Vorhersagen zur gezielten Planung und Durchführung von Abflussmessungen während Hochwasserereignissen

Massimiliano Zappa, Katarina Liechi, Ulrich Schneider, Hanspeter Hodel

Zusammenfassung

Hydrometrie ist ein wichtiger Zweig der Hydrologie. In den letzten Jahrzehnten haben die Hydrologen der Schweiz die vom Bundesamt für Umwelt BAFU erfassten und bereitgestellten Abflussdaten für unzählige Zwecke verwendet. Die Unsicherheiten der Wasserstand-Abfluss Beziehungen (P/Q) wurde wenig erforscht. Es ist aber bekannt, dass nur wenige direkte Abflussmessungen im Hochwasserbereich zur Verfügung stehen und somit keine idealen Voraussetzungen für die Ableitung von Pegelschlüsselkurven bestehen. Wir stellen hier ein Konzept zur gezielten Planung von Wassermessungen anhand operationell probabilistischen Abflussvorhersagen vor, wie sie in der Schweiz und seit über fünf Jahren zur Verfügung stehen. Wir möchten somit eine Diskussion anregen, ob und wo es möglich ist, mit weniger als vier Tagen Planungszeit eine nützliche und zuverlässige Wassermessung durchzuführen.

1. Einleitung

Abflussdaten, die das Bundesamt für Umwelt BAFU ermittelt, werden für mehrere unterschiedliche Zwecke verwendet. Für die Dimensionierung von Schutzbauten oder für die Erstellung von Gefahrenkarten sind sie unabdingbare Inputgrößen, wie auch für die Bestimmung der Wiederkehrperioden (Jährlichkeiten) oder zur Abschätzung der Restwassermengen. Ausserdem greifen hydrologische Modellierer zur Eichung und Verifizierung hydrologischer und hydraulischer Modelle inkl. der Quantifizierung der enthaltenen Unsicherheiten auf diese Daten zurück.

Da immer noch keine praxisrelevanten Verfahren existieren, mit denen die Abflüsse direkt und fortlaufend ermittelt werden können, ist für die Bestimmung der Abflüsse weiterhin die Anwendung von Wasserstand-Abfluss-Beziehungen (P/Q-Beziehungen oder Pegelschlüsselkurven) notwendig um von den Pegelständen, die mit Radar-Sonden, Pneumatik-Sonden oder Schwimmer ermittelt werden, auf die Abflüsse schliessen zu können. Diese Umrechnung kann jedoch nur dann mit einer guten Zuverlässigkeit ausgeführt werden, wenn Abflüsse für den gesamten Bereich der Pegelstände vorliegen.

Doch infolge erschwelter Messbedingungen bei Hochwasserereignissen (Holztrieb, grosse Wasserkraft beschädigt Messstangen oder drückt das Flügelgewicht aus dem Wasserkörper) ist es schwierig und teilweise unmöglich, dass zuverlässige Abflussmessungen während Hochwasserereignissen ausgeführt werden können. Aus diesen Gründen weisen viele Pegelschlüsselkurven im Hochwasserbereich keine oder kaum Messungen aus. Die Folge sind grosse Unsicherheiten bei der Berechnung von Hochwasserabflüssen. In den letzten Jahrzehnten wurden viele unterschiedliche Vorschläge zur Bestimmung oder Berechnung von zuverlässigeren Hochwasserabflüssen unterbreitet.

Beim BAFU laufen zurzeit Abklärungen, wie mit Hilfe von numerisch hydraulischen Modellierungen die Zuverlässigkeit der Pegelschlüsselkurven verbessert werden kann.

Mit diesem Beitrag möchten wir ein Konzept zur gezielten Planung von Wassermessungen an Pegelmessstationen, bei denen es „Lücken“ in der Datenbasis zur Bestimmung der P/Q Beziehungen gibt, vorstellen.

Seit 2007 werden in der Schweiz vermehrt probabilistische Methoden zur Erstellung von Abflussvorhersagen für die kommenden fünf Tage verwendet (ROTACH et al. 2009; ZAPPA & VOGT 2007). Weitere Produkte ermöglichen Vorhersagen für die nächsten zehn Tage (z.B. ZAPPA et al. 2010). Mit solchen Informationen sollte es möglich sein, rechtzeitig zu erkennen, wo in der Schweiz mit hoher Wahrscheinlichkeit erhöhte Abflüsse auftreten können. Eine Gruppe aus Mailand (CISLAGHI & RUSSO 2008) hat dank gezielter Messungen während eines korrekt vorausgesagten Hochwassers des Lambro (Flussgebiet in der Lombardei) eine wichtige Zusatzmessung für die Pegelschlüsselkurve des Gebietes erhalten. Dadurch können gezielt Abflussmessungen im Hochwasserfall geplant und durchgeführt werden. Wir möchten im Sommer 2013 für die Einzugsgebiete der Verzasca, der Linth und der Reppisch Beispiele zur Anwendung dieses Konzeptes verwirklichen. Kann dies realisiert werden, würden zusätzliche Abflussmessungen im Hochwasserbereich zur Verfügung stehen, die zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit der Pegelschlüsselkurven führen würden.

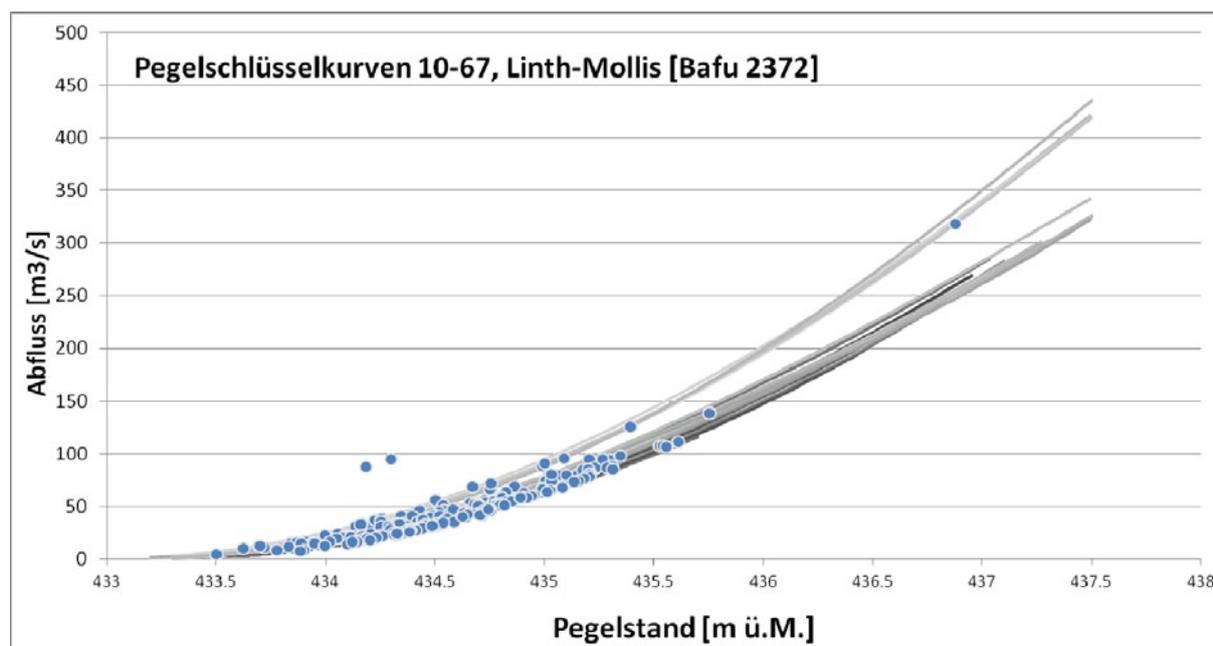


Abb. 1: Darstellung der Pegelschlüsselkurven für die Linth-Mollis (je heller die Kurve, desto aktueller). Die blauen Punkte stellen die verfügbaren Messungen seit 1970 (253 Punkte). Der Messwert „319 m³/s“ vom 23.8.2005 beeinflusst die aktuellsten P-Q- Beziehung deutlich.

Mit diesem Beitrag möchten wir in erster Linie eine Diskussion anregen, ob und wie es möglich ist, dass für die Hochwasserbereiche der Pegelstand-Abfluss-Beziehungen eine bessere Datengrundlage vorhanden ist.

Dieselbe Methodik kann auch verwendet werden um innert kürzester Zeit einen neuen Standort mit einer P/Q-Beziehung zu versehen, welche sowohl im Niedrigwasser als auch bei hohen Abflüssen repräsentative Abstützmessungen aufzeigen.

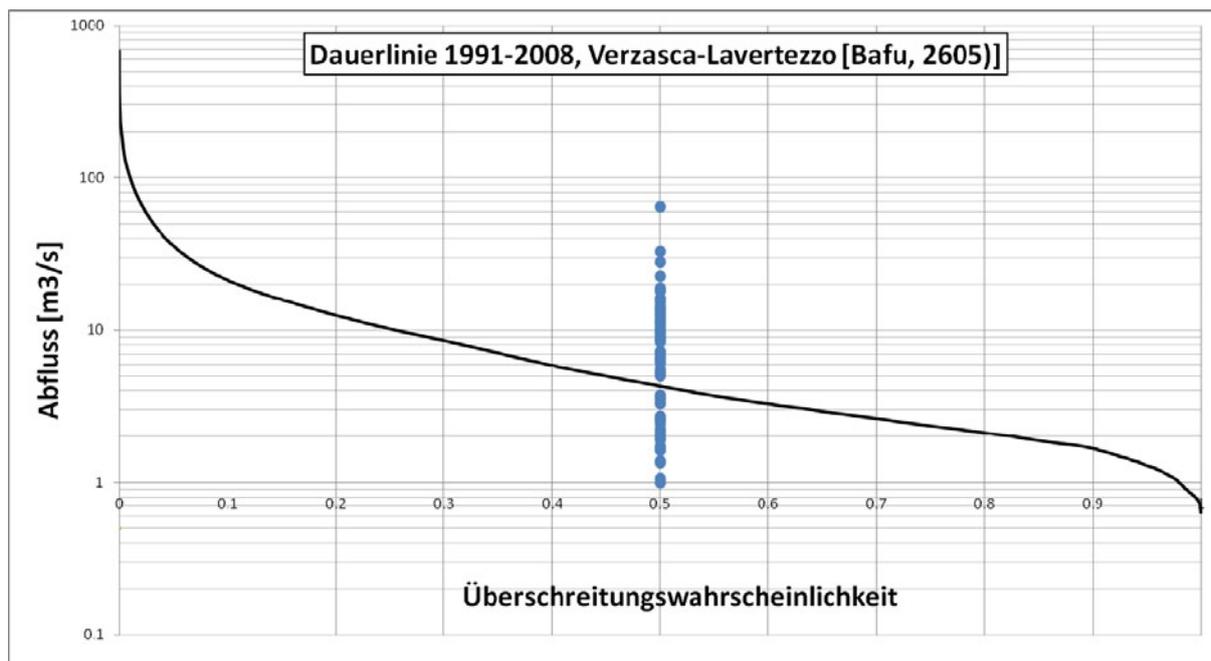


Abb. 2: Darstellung der Abflussdauerlinie (schwarze Linie) für die Verzasca-Lavertezzo. Die blauen Punkte stellen die verfügbaren Messungen seit 1990 (78 Punkte) dar.

2. Problematik

Pegelschlüsselkurven werden anhand weniger Messungen des Abflusses im Gerinne abgeleitet und für sehr hohe Abflüsse extrapoliert. Es ist selten der Fall, dass Messungen während Hochwasser durchgeführt werden können.

Drei Beispiele:

- Pegel der Linth in Mollis (Abbildung 1): In der Periode zwischen 1974 und 2009 wurden für diesen Pegel über 60 unterschiedliche P/Q Beziehungskurven publiziert. Die Abschätzung der grössten Jahres-Abflussspitzen ergab für diese Station einen Abfluss von $402 \text{ m}^3/\text{s}$ (August 2005). Demgegenüber beträgt der höchste gemessene Abflusswert $319 \text{ m}^3/\text{s}$ (Durchführung: 23.8.2005). Abbildung 1 zeigt, wie stark sich eine einzige Abflussmessung während eines grösseren Hochwassers auf die Neubestimmung von Pegelschlüsselkurven auswirken kann.
- Pegel: Verzasca-Lavertezzo. In der Periode zwischen 1989 und 2009 wurden für den Pegel 15 P/Q-Beziehungskurven veröffentlicht. Die Abschätzung der grössten Jahres-Abflussspitzen ergab für diese Station einen Abfluss von $702 \text{ m}^3/\text{s}$ (1992). Dem gegenüber beträgt der Wert der höchsten für die Abschätzung der P/Q Beziehung verwendeten Abflussmessung $70 \text{ m}^3/\text{s}$ (BAFU, 2010). Für die Verzasca treten gemäss der aktuellen Dauerlinie immerhin durchschnittlich an drei Tagen im Jahr Abflüsse von über $100 \text{ m}^3/\text{s}$ auf (Abbildung 2). Es sollte darum möglich sein, Tage zu finden, wo Abflüsse über $100 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen werden können.

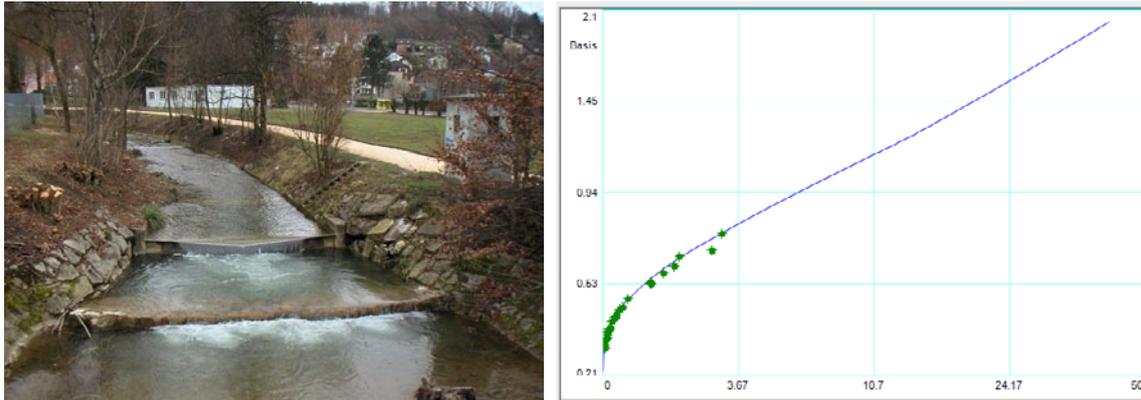


Abb. 3: Pegelmessstation der Reppisch in Birmensdorf. Links: Bild des Messstandortes (Quelle AWEL). Rechts: Aktuelle Pegelschlüsselkurve (x-Achse: Abfluss in m^3/s ; y-Achse: Wasserstand in m; Grüne Punkte, Stützmessungen).

- Pegel Reppisch, Birmensdorf (AWEL, Zürich): In der Periode zwischen 1970 und 2012 wurden für diesen Pegel drei P/Q Beziehungskurven publiziert. Die grösste Abflussspitze wurde 1994 (über $30 \text{ m}^3/\text{s}$) verzeichnet. Abbildung 3 zeigt die Situation an der Station, sowie die aktuelle Pegelschlüsselkurve. Es wurde keine direkte Messung für Abflüsse über vier m^3/s realisiert.

3. Methodik und Ziele

3.1 Idealisierte Anwendungen

Die WSL betreibt seit 2007 operationell probabilistische Vorhersagen für die Einzugsgebiete der Linth und der Verzasca (e.g. ZAPPA et al. 2013; Abbildung 4). Im Sommer 2013 möchten wir durch Interpretation unserer Vorhersagen (idealisiert auf drei bis fünf Tagen) Vorlaufzeiten bestimmen, ob wir an einem Tag um 11:00 und 15:00 Uhr zwei Abflussmessungen durchführen sollen. Wir möchten anschliessend die Ereignisse auswerten, bei welchen Pegelständen wir die Messung effektiv hätten realisieren können und somit evaluieren, ob wir einen Beitrag zur Verbesserung der Pegelschlüsselkurve erhalten hätten. Für die Linth möchten wir unbedingt Messungen zwischen 150 und $300 \text{ m}^3/\text{s}$ erfassen (Abbildung 1), während für die Verzasca vor allem Messungen über $70 \text{ m}^3/\text{s}$ nötig sind.

Die exemplarische Vorhersage in Abbildung 4 zeigt, dass am 5. November 2011 der Pegelstand der Verzasca mit hoher Wahrscheinlichkeit auf über $100 \text{ m}^3/\text{s}$ hätte steigen können.

Am Donnerstag 3. November hätte man sich für einen Messtag entschieden können. Laut Messungen (abgeleitet durch die aktuelle Pegelschlüsselkurve) vom 5. November hätte man um 9:00 Uhr rund $180 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen, und um 14:00 Uhr hätte man noch deutlich über $130 \text{ m}^3/\text{s}$ messen können. Der Messtag hätte sich gelohnt.

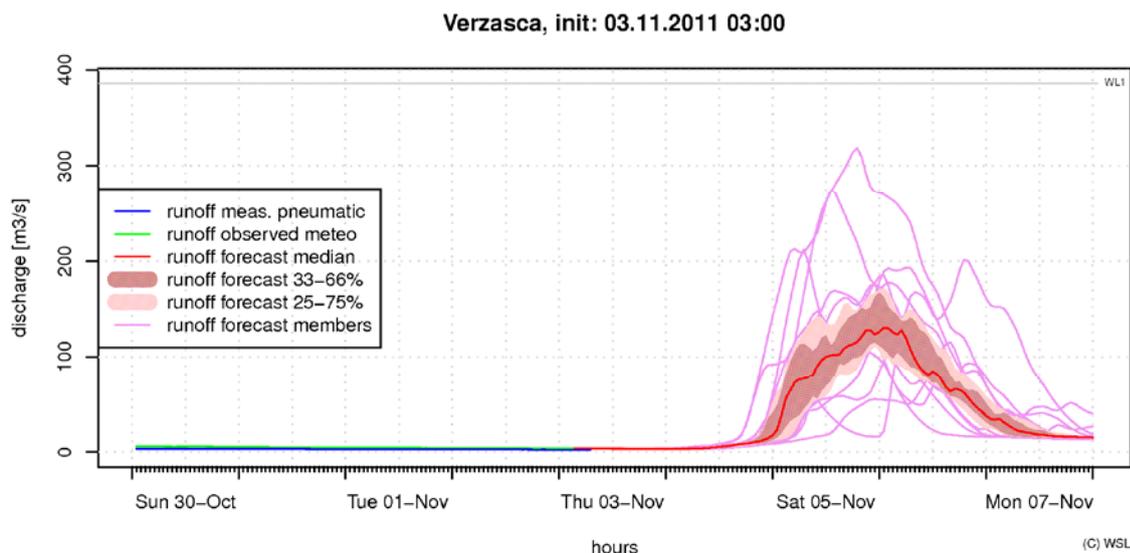


Abb. 4: Abflussprognose für den 3.11.2011 für die Verzasca bei Lavertezzo, basierend auf dem meteorologischen Input von COSMO-LEPS (e.g. ZAPPA et al. 2010).

3.2 Fallstudien Reppisch und Vogelbach

In Sommer 2013 möchte wir zudem für die Reppisch bei Birmensdorf (und allenfalls auch für das WSL Forschungseinzugsgebiet des Vogelbaches bei Einsiedeln) zielgerichtete Messkampagnen, mit dem Ziel binnen wenigen Wochen eine Pegelschlüsselkurve aufstellen zu können, ausführen. Wir möchten die neu bestimmten Pegelschlüsselkurven mit den bisherigen Kurven und den Einfluss auf die kontinuierlichen indirekten Messungen des Abflusses vergleichen. Bei der Reppisch werden wir den Abfluss mit dem Salzverdünnungsverfahren (mit mehreren Sonden) messen (siehe WERNLI 2007). Im Vogelbach verfügen wir über eine automatische Anlage, welche eine Messung durchführt, sobald der Wasserstand über eine vordefinierte Schwelle steigt (Wasserbehälter mit gelöstem Salz wird ins Flussgerinne gekippt). Die Schwelle kann per Modem geändert werden, während der Wasserbehälter wöchentlich während Routinemessungen im Gebiet bereitgestellt werden kann. Wir möchten mit Hilfe von Abflussvorhersagen die Schwelle regelmässig verändern, damit wir einmal wöchentlich eine Messung erhalten.

4. Ausblick

Nach vielen Jahren, in welchen die Forschung die Abflussmessungen mehr oder wenig als „vorgegebene Wahrheit“ angenommen hat, ist es nun an der Zeit, dass auch in diesem Themenbereich geforscht wird. Aktuell sind unter anderem neue Studien für hochalpine Einzugsgebiete (WEIJS et al. 2013) und über die Unsicherheiten von Pegelschlüsselkurven (z.B. SIKORSKA et al. 2013) in Arbeit.

Dieser konzeptionelle Beitrag hat geplante Arbeiten für den Sommer 2013 vorgestellt. Wir sind zuversichtlich, dass wir Erkenntnisse gewinnen werden, welche praxisrelevante Folgen für die Hydrometrie in der Schweiz haben dürften.

Dank

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt und dem AWEL (A. Gnägi und M. Solomir) für die Bereitstellung der Datengrundlagen. Teile dieser Studie wurden durch das EU-Projekt IM-PRINTS (226555/FP7-ENV-2008-1-226555) finanziert.

Literatur

- CISLAGHI, M., RUSSO, M. & C. PRETARA (2009): "Flood forecasting for discharge measure planning and rating curve calibration in Lombardy." – EGU General Assembly, Vienna.
- ROTACH, M.W., AMBROSETTI, P., AMENT, F., APPENZELLER, C., ARPAGAUS, M., BAUER, H.S., BEHRENDT, A., BOUTTIER, F., BUZZI, A., CORRAZZA, M., DAVOLIO, S., DENHARD, M., DORNINGER, M., FONTANNAZ, L., FRICK, J., FUNDEL, F., GERMANN, U., GORGAS, T., HEGG, C., HERING, A., KEIL, C., LINIGER, M.A., MARSIGLI, C., MCTAGGART-COWAN, R., MONTANI, A., MYLNE, K., RANZI, R., RICHARD, E., ROSSA, A., SANTOS-MUÑOZ, D., SCHÄR, C., SEITY, Y., STAUDINGER, M., STOLL, M., VOLKERT, H., WALSER, A., WANG, Y., WULFMEYER, V. & M. ZAPPA (2009): MAP D-PHASE: Real-time Demonstration of Weather Forecast Quality in the Alpine Region – Bulletin of the American Meteorological Society. 90. Pages 1321-1336.
- SIKORSKA, A. E., SCHEIDEGGER, A., BANASIK, K. & J. RIECKERMANN (2013): Considering rating curve uncertainty in water level predictions, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 10, 2955-2986.
- WEIJS, S. V., MUTZNER, R. & M. B. PARLANGE (2013): Could electrical conductivity replace water level in rating curves for alpine streams? Water Resour. Res., 49, doi:10.1029/2012WR012181.
- WERNLI, H.R. (2007): Abflussmessung mittels Tracerverdünnung – Pumpmethode mit Pocketfluorimeter – In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. 51. Jahrgang. Heft 1.2007. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- ZAPPA, M. & S. VOGT (2007): Hochwasservorhersagesysteme der neusten Generation im Praxis-Test. Forum für Wissen 2007, pp. 25-31. ISSN 1021-2256.
- ZAPPA, M., FUNDEL F. & S. JAUN (2013): A "Peak-Flow Box" Approach for Supporting Interpretation and Evaluation of Operational Ensemble Flood Forecasts – Hydrological processes. 27: 117-131.
- ZAPPA, M., JAUN, S., BADOUX, A., SCHWANBECK, J., ADDOR, N., LIECHTI, K., ROESER, I., WALSER, A., VIVIROLI, D., VOGT, S., GERBER, M., TRÖSCH, J., WEINGARTNER, R., OPLATKA, M., BEZZOLA, G.R. & J. RHYNER (2010): IFKIS-Hydro Sihl: Ein operationelles Hochwasservorhersagesystem für die Stadt Zürich und das Sihltal. Wasser, Energie, Luft, Heft 3/2010: S. 238-248.

Methodik der hydrologischen Auswertungen der extremen Hochwasserereignisse in Sachsen in den letzten 10 Jahren

Uwe Büttner, Thomas Fichtner, Uwe Höhne, Bernd Pfützner, Jörg Walther, Petra Walther, Erhard Wolf

Zusammenfassung

Die ereignisspezifischen Untersuchungen der Hochwasserabläufe in den Jahren 2002 und 2010 in Sachsen gründen sich hauptsächlich auf den Wasserstands- und Abflussdaten der Pegel des gewässerkundlichen Messnetzes. Die Abflussganglinien wurden zunächst aus den Wasserstandsaufzeichnungen der Schreibpegel mit Hilfe von extrapolierten Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen bestimmt, wobei die Hochwasserscheitelabflüsse an den Pegeln auf der Grundlage von Längsschnittbetrachtungen der Hochwasserscheitelabflussspenden plausibilisiert wurden. Die weitere Prüfung erfolgte in der Regel durch stationär ungleichförmige hydraulische Berechnungen. Bei hochwasserbedingtem Verlust der Aufzeichnungen oder breitflächigen Ausuferungen an Pegeln im Tiefland kamen konzeptionelle hydrologische Modelle mit intensitätsbasiertem Abflussbildungsansatz zur Rekonstruktion der Abflussganglinie aus Niederschlagsauswertungen zum Einsatz.

Aus den sich ergebenden Abflussganglinien wurden als charakteristische Kennwerte der Scheitelabfluss, die Scheiteleintrittszeit und die Scheitelabflussspende sowie die Direktabflussfülle bestimmt. Zu letzterem erfolgte eine Separation des Basisabflusses.

Auf Grundlage von Änderungen der W-Q-Beziehungen der Pegel wurde schließlich iterativ – ausgehend von den am höchsten gelegenen Pegelinzugsgebieten – unter Berücksichtigung des Gebietsniederschlags, des Auenretentionsvolumens und der vorhandenen Umfluten an einzelnen Pegeln sowohl eine plausible Füllenbilanz als auch ein plausibles Abflussbeiwertverhalten in den einzelnen Gewässerlängsschnitten hergestellt.

Die Bestimmung der Jährlichkeit des Hochwassers an den Pegeln erfolgte mit einer Verteilungsfunktion, die sowohl auf die Jahreshöchstabflüsse (Jahresstatistik), gegebenenfalls unter Berücksichtigung historischer Hochwasser im Sinne einer zeitlichen Informationserweiterung, als auch auf die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeiten der größten Abflüsse der Sommer- und Winterhalbjahre (saisonale Statistik) als kausale Informationserweiterung Anwendung fand.

1. Einleitung

Nach großen Hochwassern verlangt die Öffentlichkeit eine schnelle Schadensbeseitigung. Dagegen erfordern die notwendigerweise vorausgehenden hydrologischen Untersuchungen einen weit über die routinemäßig ablaufenden Auswertungen der Pegelaufzeichnungen hinausgehenden Aufwand insbesondere dann, wenn die bisher beobachteten höchsten Wasserstände und Durchflüsse großräumig überschritten wurden.

In den letzten zehn Jahren waren mit Ausnahme des Flussgebietes der Weißen Elster alle sächsischen Hauptflussgebiete von Extrem-Hochwassern betroffen, wobei die Jährlichkeiten der Hochwasserscheitel verbreitet bei 50 bis 200 Jahren, in Einzelfällen auch wesentlich darüber lagen. In der zweiten Augustdekade des Jahres 2002 in den linksseitigen Nebenflüssen der oberen Elbe und im Gebiet der Mulde sowie Anfang August und Ende September

2010 in den östlich der Elbe gelegenen Gebieten wurden an einer Vielzahl von Pegeln bisher unerreichte Wasserstände und Abflüsse beobachtet. (Auf die Auswertungen der Hochwasser im Elbestrom wird in diesem Beitrag kein Bezug genommen.)

2. Hydraulische Randbedingungen und Situation nach den Hochwassern

Das Bundesland Sachsen ist naturräumlich in Tiefland-, Hügelland- und Mittelgebirgsbereiche gegliedert (Abbildung 1). Die Fließgewässer folgen verschiedenen Talformen mit unterschiedlichen Gefälleverhältnissen. Ihre Abflüsse sind durch gebietstypische Niederschlagsereignisse und teilweise anthropogen geprägt.

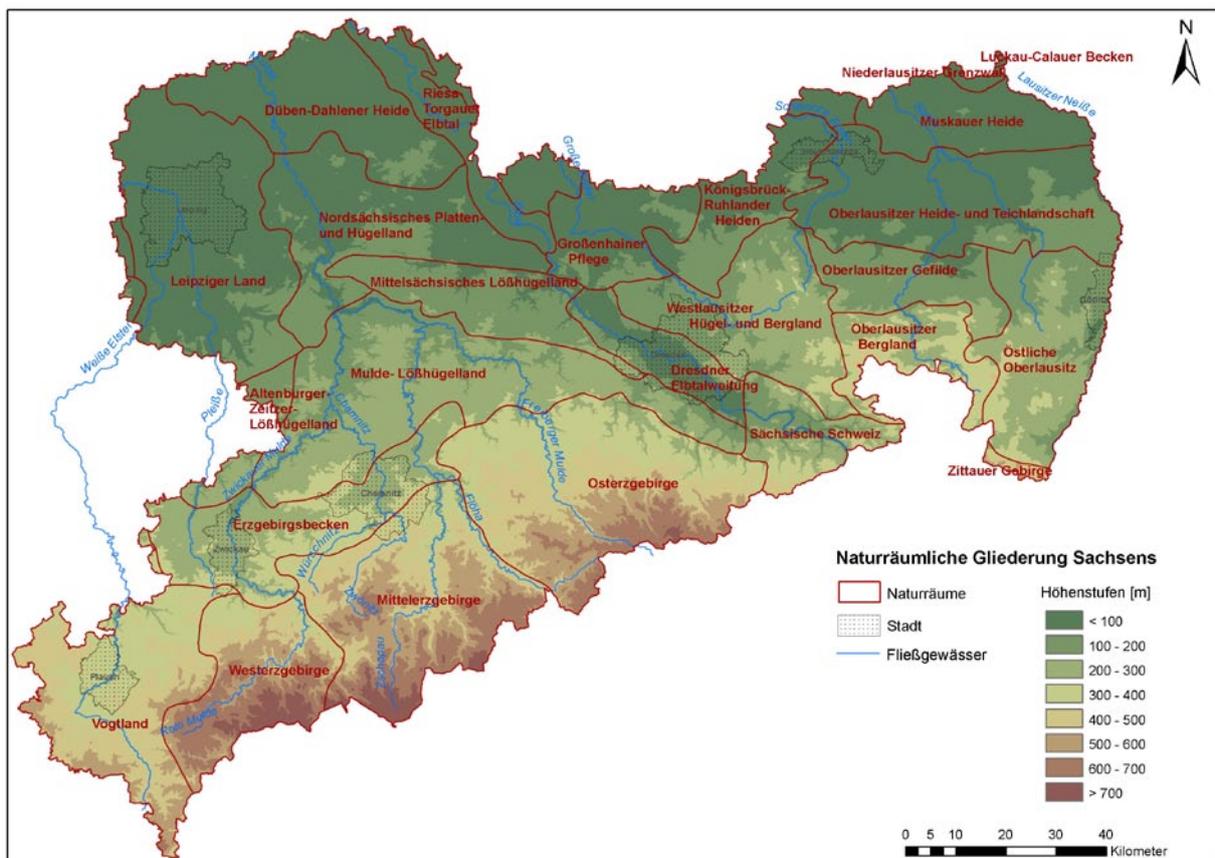


Abb. 1: Sachsen und seine naturräumliche Gliederung

Die Standorte der Pegel des gewässerkundlichen Messnetzes sind u. a.

- stark schwankenden Wasserständen und Durchflüssen,
- großen Unterschieden zwischen Niedrig- und Hochwasser,
- starker Geröll- und Geschiebeführung (Abbildung 2),
- Treibgutbewegungen bei Hochwasser (Abbildung 3),
- Vereisungen im Winter und
- Verkrautungen im Sommer vor allem im Tiefland

ausgesetzt und müssen eine robuste messtechnische Ausstattung aufweisen. Durch die aufgetretenen Extrem-Hochwasser wurden entsprechende Defizite in der bautechnischen Ausführung und der messtechnischen Ausstattung deutlich, die vom zeitlich begrenzten Ausfall der Datenübertragungen bis zur völligen Zerstörung einzelner Anlagen mit dem Verlust der

Messtechnik und den in ihr gespeicherten Daten reichten. Mit den gewonnenen Erkenntnissen begann 2002 sukzessive die hochwassersichere Ertüchtigung des gewässerkundlichen Pegelnetzes, die zum Hochwasser 2010 insbesondere in Ostsachsen noch nicht abgeschlossen war. Demzufolge traten die schon aus dem Jahr 2002 bekannten Schäden teilweise an noch nicht ertüchtigten Pegelanlagen auf.



Abb. 2: Einschotterung eines Pegelhauses an der Roten Weißeritz im August 2002 (Foto: BfUL)



Abb. 3: Treibgut während einer Durchflussmessung an der Zwickauer Mulde im August 2002 (Foto: BfUL)

3. Vorgehen zur Prüfung der während des Hochwassers erhobenen Daten

Zur hydrologischen Analyse der Extrem-Hochwasser hat sich ein Vorgehen bewährt, dessen einzelne Schritte im Folgenden kurz erläutert werden:

1. Im ersten Schritt, der möglichst unmittelbar nach dem Scheiteldurchgang an den Pegeln erfolgen sollte, wird der Scheitelwasserstand anhand von Hochwasserspuren an Lattenpegel und Pegelhaus aufgenommen und dokumentiert. Zusätzlich erfolgt für spätere hydraulische Nachrechnungen die Vermarkung der Wasserspiegellinie des Hochwasserscheitels auf einer Länge von etwa des zehnfachen der Breite des in der Regel ausgeferten Gewässers. Der Pegel liegt dabei im oberen Drittel dieser Strecke. Die lage- und höhenmäßige Einmessung der markierten Wasserspiegellinie kann etwas später erfolgen.
2. Nach dem Rückgang des Hochwassers wird die Wasserstandszeichnung unter Hinzuziehung aller vorliegenden Wasserstandsdaten in Form von analogen und digitalen Aufzeichnungen sowie während des Hochwassers erfolgten Lattenpegelablesungen und des vor Ort festgestellten Scheitelwasserstandes geprüft. Eine Rekonstruktion nach den gegebenen Möglichkeiten wird dann vorgenommen, wenn die analogen und digitalen Aufzeichnungen lücken- oder offensichtlich fehlerbehaftet sind.
3. Die Bearbeitung setzt sich mit der Erstellung einer ersten vorläufigen Durchflussganglinie auf Basis der bisher gültigen Wasserstand-Durchfluss-Beziehung (Durchflusskurve) fort, die in Sachsen in folgender Form verwendet werden:

$$Q = EXP[\ln a + n \cdot \ln(W - W_0)]$$

mit

Q ... Durchfluss [m³/s],

W ... am Pegel beobachteter Wasserstand [cm],

W₀ ... Wasserstand bei Q = 0 m³/s [cm],

- a ... Durchfluss bei der Wasserstandsdifferenz $(W - W_0) = 1 \text{ cm}$,
 n ... als Ausdruck der Neigung der Durchflusskurve.

Sollte diese meist mehrästige Durchflusskurve nicht den beobachteten Scheitelwasserstand erfassen, erfolgt im einfachsten Fall eine mathematische Verlängerung unter Beibehaltung der Steigung des oberen Astes, sinnvoller Weise jedoch unter Berücksichtigung von Hilfskurven (MORGENSCHWEIS 2010).

4. Aus dem über die (extrapolierte) Durchflusskurve ermittelten Scheiteldurchfluss HQ wird unter Berücksichtigung der Größe des Pegeleinzugsgebietes AE die Scheitelabflussspende $Hq = \frac{HQ}{AE}$ bestimmt und
5. durch regionalen Vergleich mit den gleichartigen Spenden benachbarter Pegel und durch die qualitative Betrachtung der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung plausibilisiert.
6. Ergeben sich bei relevanten Abweichungen daraus Änderungen des Scheiteldurchflusses, erfolgt eine vorläufige Anpassung von Durchflusskurve und -ganglinie.
7. Parallel zu den Schritten 2 bis 6 wird eine Schätzung der möglichen Spannweite des Scheiteldurchflusses mit Hilfe von eindimensionalen stationär ungleichförmigen hydraulischen Berechnungen durch Variation der Rauheiten in einem dem Gewässerzustand zur Zeit des Hochwassers entsprechenden plausiblen Bereich vorgenommen. Voraussetzung dafür sind nach dem Hochwasser stattgefundenene Querprofilaufnahmen im erforderlichen Umfang über die Strecke, die der Aufnahme des Wasserspiegelliniengefälles (siehe Schritt 1) zugrunde lag sowie die generelle Eignung dieses Modellansatzes für die gegebenen hydraulischen Bedingungen.
8. Anhand dieser Ergebnisse werden die Scheitelabflussspenden erneut geprüft, gegebenenfalls der Scheiteldurchfluss neu festgelegt sowie Durchflusskurve und -ganglinie wiederholt angepasst.
9. Eine Voraussetzung für Bilanzbetrachtungen ist die Kenntnis des Gebietsniederschlags P der Pegeleinzugsgebiete. Durch Verknüpfung von Bodenbeobachtungen und Radarmessungen mit Hilfe eines geostatistischen Interpolationsverfahrens standen zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Gebietsniederschläge zur Verfügung (HABERLANDT et. al. 2005). Für die Untersuchungen in Sachsen hat sich das External Drift Kriging als geeignet erwiesen.
10. Für die ebenfalls erforderliche Separierung des Basisabflusses RB zur Bestimmung der Direktabflussfülle RD wurde ein der Datenlage entsprechender pragmatischer Ansatz gewählt: Der Beginn des Direktabflusses wird mit dem Beginn des Anstiegs in der Durchflussganglinie gleichgesetzt und sein Ende mit dem Beginn der nächsten niederschlagsbedingten hochwasserunabhängigen Durchflussanschwellung definiert. Ist der niederschlagsfreie Zeitraum zwischen der Hochwasserwelle und dem nächsten niederschlagsgebundenen Anstieg sehr lang, ist das Ende des Direktabflusses auf Grundlage von Erfahrungen festzulegen. Unter Beachtung der Fließzeit zwischen den Pegeln liegt das Direktabflussende in der Regel beim Drei- bis Vierfachen des mittleren Durchflusses.
11. Zur weitergehenden Plausibilisierung erfolgt für Pegel- und Zwischeneinzugsgebiete die Bestimmung des Abflussbeiwertes $\psi = \frac{RD}{P}$ und des nicht zum Abfluss kommenden Nie-

derschlagsanteiles ($P - RD$), der die Gebietsspeicherungs- (S), Verdunstungs- (ET) und bodengebundenen (RB) Abflusskomponenten summarisch beschreibt. Ein Beispiel von der Lausitzer Neiße mit ihrem größten sächsischen Zufluss Mandau befindet sich am Ende des Beitrages (Abbildung 4, Tabelle 1).

12. Die Schritte 8, 10, und 11 werden solange wiederholt, bis sich Scheitelabflusspenden, Direktabflussfüllen und -beiwerte plausibel im Gewässerlängsschnitt darstellen lassen und somit endgültige Durchflussganglinien für alle untersuchten Pegel vorliegen.



Abb. 4: Einzugsgebietsteile der Lausitzer Neiße

4. Vorgehen in Sonderfällen

Das oben beschriebene Vorgehen reduziert sich, wenn durch kontinuierliche Messung der Fließgeschwindigkeit mittels Ultraschalltechnik die Durchflussganglinie nicht über eine Durchflusskurve erzeugt wird. In Sachsen sind gegenwärtig an drei Pegeln Ultraschallanlagen installiert, die entweder in Staubereichen von Wasserkraftanlagen liegen oder an denen der Hochwasserdurchfluss messtechnisch nicht anders zu bestimmen ist. Die Ausrüstung besteht in einem Fall aus je einer Laufzeit-Differenz- und einer Horizontal-ADCP-Anlage sowie an den anderen Pegeln jeweils aus einer Mehr-Ebenen-Horizontal-ADCP-Anlage. Die Lage der Ultraschallsensoren wurde vor ihrer Installation durch eine Simulation der Geschwindigkeitsverteilung mit

Hilfe eines hochauflösenden Strömungsmodells (SIMK[®]) festgelegt (KÖLLING, 2004). Die Prüfung der Durchflussganglinie und eine gegebenenfalls notwendige manuelle Korrektur erfolgt hier zum einen auf Basis von mobil vorgenommenen Durchflussmessungen während des Hochwassers und zum anderen mit den oben beschriebenen Längsschnitt-Bilanz-Betrachtungen. Lassen sich rückstauunbeeinflusste Durchflussteilbereiche identifizieren, wird dafür zusätzlich eine Durchflusskurve erstellt.

Besondere Schwierigkeiten bei der Prüfung oder Rekonstruktion der Durchflussganglinie entstehen bei großflächiger Ausuferung bzw. der Ausbildung einer weitreichenden Umflut am Pegel oder bei Verlust der Wasserstandsaufzeichnungen durch eine funktionsrelevante Beschädigung des Pegels.

Durch die besondere Schwere des August-Hochwassers 2002 in den linksseitigen Zuflüssen zur oberen Elbe mit Einzugsgebietsgrößen kleiner 400 km² waren damals nur wenige verwertbare Wasserstandsaufzeichnungen vorhanden. Außerdem sind die Abflüsse aus dem Osterzgebirge durch zahlreiche Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken beeinflusst. In die Betrachtungen einbezogen wurden deshalb die aufgezeichneten Beckeninhaltsänderungen der vorhandenen Speicher bei bekannter Beckeninhaltslinie $V = f(H)$ und Abgabecharakteristik $Q_A = f(H)$. Damit konnten die Zufluss- und Abgabeganglinien iterativ als Bausteine innerhalb der Bilanzbetrachtungen berechnet werden. Weitere relevante Durchflussganglinien, insbesondere für Pegelstandorte, an denen die Aufzeichnungen unbrauchbar waren, aber auch an Zusammenflussbereichen wurden mit Hilfe von kalibrierten Niederschlag-Abfluss-Modellen bestimmt (Abbildung 5; WASY, 2004). Dazu benutzt wurde seinerzeit die Software NASIM (HYDROTEC, 2002).

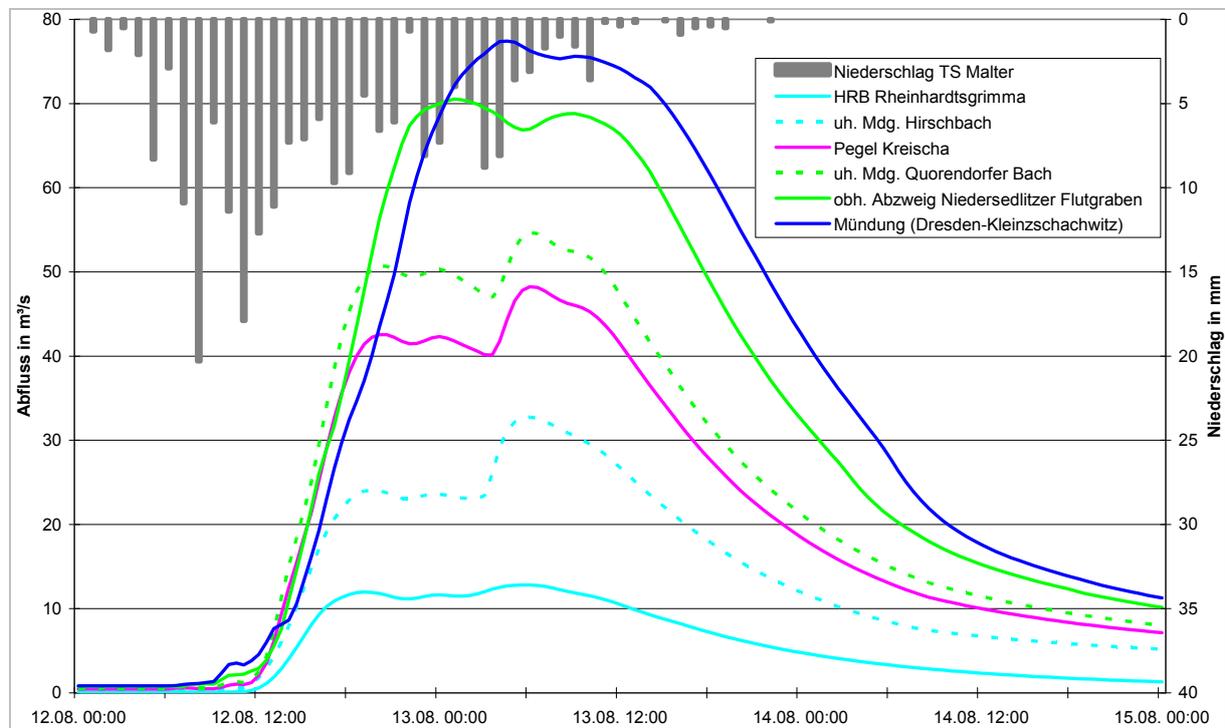


Abb. 5: Niederschlags- und Abflussverlauf für das Einzugsgebiet des Lockwitzbaches

Auch für die Überprüfung der Durchflussganglinien des Hochwassers 2010 an zwei Tiefland-Pegeln im Gebiet der Schwarzen Elster wurde der Einsatz eines Niederschlag-Abfluss-

Modells notwendig (PFÜTZNER, 2012). Aufgrund der breiten Ausuferung und zusätzlicher Umflut schieden herkömmliche Verfahren zur Prüfung von Durchflusskurve und -ganglinie aus. Zum Einsatz kam das Modellsystem ArcEGMO (www.arcegmo.de), das auch schon früher im Gebiet der Schwarzen Elster mehrfach Anwendung fand. Bei den Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass an zwei von sechs zur Verfügung stehenden Pegeln nur die im Ausuferungsbereich liegenden Durchflüsse als unsicher zu betrachten sind. Ist das Modell in der Lage, das komplexe Hochwasserabflussgeschehen hinreichend genau abzubilden, ergeben sich die größten Abweichungen zwischen ursprünglicher und modellierter Ganglinie im unsicheren Ausuferungsbereich (Abbildung 6). Zum Nachweis der Eignung des Modells zur adäquaten Abbildung der grundlegenden Prozesse des Hochwasserereignisses hat sich die Optimierung der Modellparameter für den Hochwasserzeitraum als günstig erwiesen.

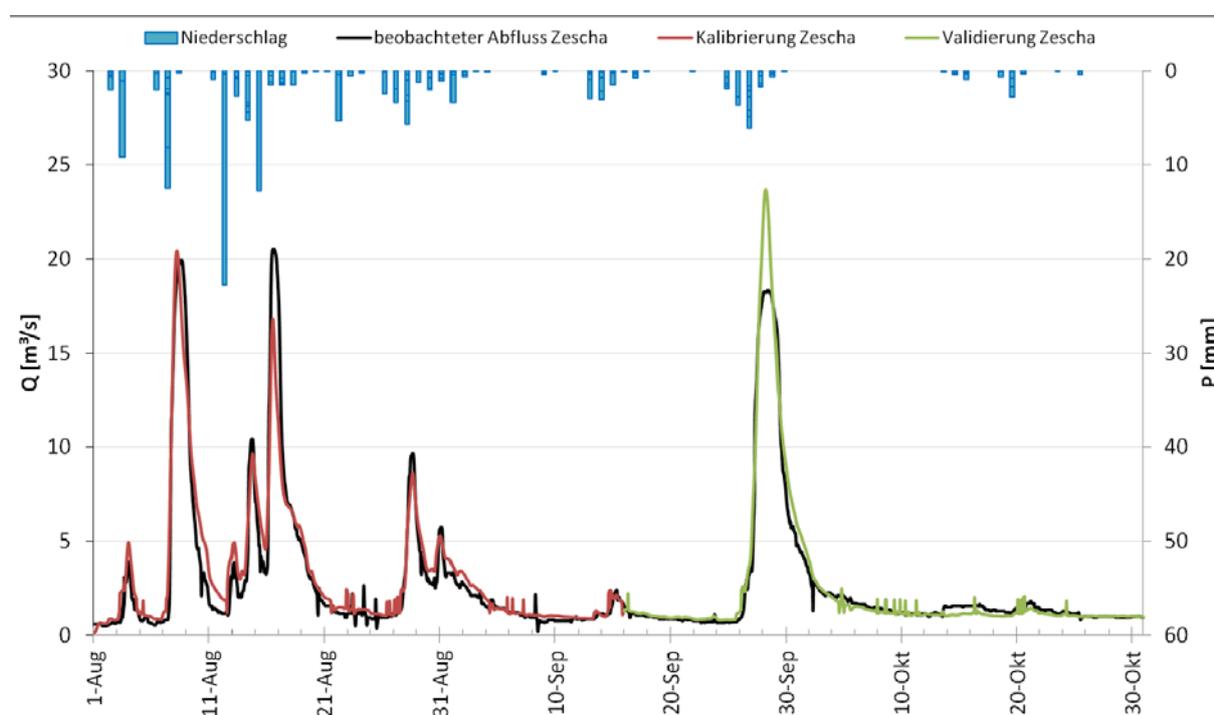


Abb. 6: Beobachtete sowie berechnete Abflussganglinie für den Pegel Zescha/Hoyerswerdaer Schwarzwasser

Die Beobachtungen während der in Sachsen abgelaufenen Hochwasser zeigen, dass bei der Hochwasseranalyse mit Hilfe von Niederschlag-Abfluss-Modellen solche mit intensitätsbasiertem Abflussbildungsansatz den mit volumenbasiertem vorzuziehen sind. Wie Abbildung 7 am Beispiel des Pegels Jahnsdorf 1/Würschnitz illustriert, gelangte in diesem Einzugsgebiet trotz eines um 50,2 mm höheren Gesamtniederschlags beim August-Hochwasser 2002 gegenüber dem August-Hochwasser 2010 mit nahezu gleichem Scheiteldurchfluss im Verhältnis weniger Niederschlag zum Abfluss. Dieses Phänomen spiegelt sich im Abflussbeiwert wider, der im August 2002 59 % beträgt. Für den August 2010 wurde ein Abflussbeiwert von 65 % bestimmt. Die Ursache dafür liegt vordergründig in den über drei Stunden aufgetretenen Niederschlagsintensitäten von 10,0 mm/h bis 12,5 mm/h. Im August 2002 betrug die

zwei höchsten und auch aufeinanderfolgenden Stundenniederschlagshöhen „nur“ 9,5 mm und 10,8 mm. Hieraus wird der große Einfluss von Verteilung und Höhe der Niederschlagsintensitäten innerhalb des Ereignisses auf die Größe des Durchflussscheitels und die Anstiegszeit deutlich. Während im August 2002 innerhalb von zwei Stunden am Pegel Jahnsdorf 1 ein maximaler Wasserstandsanstieg um „nur“ 50 cm zu beobachten war, betrug dieser im August 2010 mit 90 cm fast doppelt soviel.

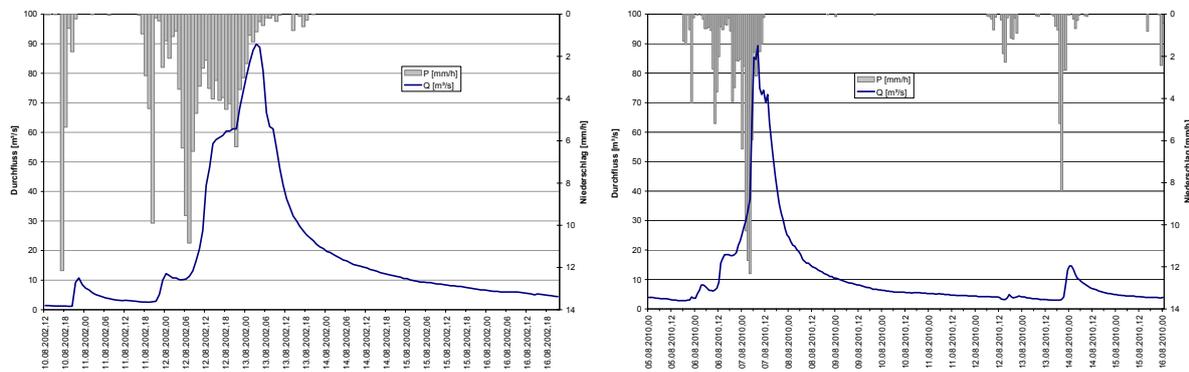


Abb. 7: Niederschlags- und Abflussverlauf für das Einzugsgebiet der Würschnitz am Pegel Jahnsdorf 1 während der Hochwasser 2002 und 2010

Lassen sich aufgrund ungenügenden Aufzeichnungsumfangs Durchflussganglinien nicht plausibel erstellen, empfiehlt sich eine gekoppelte Anwendung von Niederschlag-Abfluss- und instationären hydraulischen Modellen. Für letztere ist zu entscheiden, ob ein eindimensionales Modell das Fließverhalten im konkreten Fall hinreichend genau widerspiegeln kann oder ein mehrdimensionaler Ansatz genutzt werden muss.

5. Vorgehen zur extremwertstatistischen Einordnung der Hochwasserscheitel

Die Bestimmung der Jährlichkeit der aufgetretenen Hochwasserscheitel erfolgte für Pegel mit mehr als 25 Jahren Beobachtungslänge. Verwendet wurde die Allgemeine Extremwertverteilung, die sich in Sachsen zur Berechnung von HQ_T bewährt hat. Als Schätzmethode für deren Parameter wird die wahrscheinlichkeitsgewichtete Momentenmethode (WGM) genutzt. Zur Erhöhung der Aussagekraft ist es notwendig, die gegebenen Möglichkeiten zur Informationserweiterung auszuschöpfen. Eine davon ist die Einbeziehung historischer Hochwasser als zeitliche Informationserweiterung. Allerdings liegen gesicherte Aussagen über historische Hochwasserabflüsse nur für wenige Pegel vor. Eine andere Möglichkeit ist die kausale Informationserweiterung in Form der Aufgliederung der Hochwasser auf genetisch homogene Kollektive. Dies kann näherungsweise dadurch erreicht werden, dass für das Winter- und das Sommerhalbjahr je eine Reihe von Jahreshöchstabflüssen gebildet wird. Für die saisonale Hochwasserstatistik wird dann zunächst je eine Verteilungsfunktion an die Reihe der Winter- und der Sommer-HQ angepasst. Durch Multiplikation der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der saisonalen Verteilungsfunktionen ergibt sich eine Mischverteilung, die sich oft besser an einzelne extreme Sommer-Hochwasser anpasst. Das Vorgehen stützt sich auf die Empfehlungen in DWA (2012).

Literatur

- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. – Merkblatt DWA-M 552. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- HABERLANDT, U., SCHUMANN A. & U. BÜTTNER (2005): Räumliche Niederschlagsschätzung aus Punktmessungen und Radar am Beispiel des Elbehochwassers 2002. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 49: Heft 2.
- MORGENSCHWEIS, G. (2010): Hydrometrie – Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. - Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- KÖLLING, C. (2004): SIMK[®] – Kalibrierung von Durchflussmessstellen in Flüssen und Kanälen. Internationales Seminar "Neue Entwicklungen in der Durchflussmessung in natürlichen und künstlichen Gerinnen" - TU München (www.isar-consult.de)
- HYDROTEC (2002): Modelldokumentation und Handbuch NASIM 3.1. - Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt GmbH, Aachen.
- PFÜTZNER, B. (2012): Modellgestützte hydrologische Analysen in der oberen Schwarzen Elster für die Hochwasserperiode von August bis September 2010. - Büro für Angewandte Hydrologie (unveröffentlicht).
- WASY (2004): Hydrologische Auswertung des August-Hochwassers 2002 für die linksseitigen Nebenflüsse der oberen Elbe. – Abschlussbericht (unveröffentlicht), WASY GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.

Tab.1: Teil der Längsschnittbetrachtung an der Lausitzer Neiße vom Hochwasser 2010

Pegel/ Einzugsgebiet	Gewässer	AE	HQ	Hq	Ein- trittszeit MEZ	Direktabfluss					
		km ²	m ³ / s	l/s-k m ²		Beginn MEZ	Q m/s ₃	Ende MEZ	Q m/s ₃	RD hm ₃	RD mm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hartau	Lausitzer Neiße	37 8	360	953	07.08., 17:15	06.08., 22:00	5,0 7	12.08., 19:00	18, 3	31, 3	82,8
Zittau 5	Mandau	29 6	300	1014	07.08., 17:30	06.08., 23:45	1,8 6	12.08., 18:30	6,4 8	21, 0	71,1
Zwischeneinzugs- gebiet Zittau 1 – Hartau – Zittau 5		20, 5	-	-	-	-	-	-	-	2,1 0	101, 5
Zittau 1	Lausitzer Neiße	69 4	601	866	07.08., 19:30	06.08., 20:45	5,9 2	12.08., 18:45	22, 5	54, 4	78,4
Zwischeneinzugs- gebiet Rosenthal – Zittau 1		18 5	-	-	-	-	-	-	-	15, 3	83,1
Rosenthal	Lausitzer Neiße	87 9	730	831	07.08., 21:30	06.08., 22:45	7,8 9	12.08., 20:00	49, 7	69, 7	79,4

Tab.1: Fortsetzung

Pegel/ Einzugsgebiet	Gewässer	Hochwasserauslösender Niederschlag			$P - RD = (S + ET + RB)$	$\frac{(S + ET + RB)}{P}$	ψ
		Beginn MEZ	Ende MEZ	P mm	mm	-	-
1	2	13	14	15	16	17	18
Hartau	Lausitzer Neiße	06.08., 05:00	08.08., 05:00	139,3	56,5	0,41	0,59
Zittau 5	Mandau	06.08., 07:00	08.08., 06:00	145,3	74,2	0,51	0,49
Zwischeneinzugsgebiet Zittau 1 – Hartau – Zittau 5		06.08., 05:00	08.08., 06:00	145,9	44,4	0,30	0,7
Zittau 1	Lausitzer Neiße	06.08., 05:00	08.08., 06:00	144,5	66,1	0,46	0,54
Zwischeneinzugsgebiet Rosenthal – Zittau 1		06.08., 05:00	08.08., 06:00	117,4	34,3	0,29	0,71
Rosenthal	Lausitzer Neiße	06.08., 05:00	08.08., 06:00	138,9	59,5	0,43	0,57

Modellierung zeitlich variabler Einzugsgebietsreaktion: Methode und Anwendung

Ingo Heidbüchel, Peter A. Troch

Zusammenfassung

Einzugsgebiete reagieren unterschiedlich auf Niederschlagsereignisse, je nachdem, in welchem hydrologischen Zustand sie sich zu einem bestimmten Zeitpunkt befinden. Wenn z.B. die Speicherkapazität der Böden ausgeschöpft ist, können schon kleine Niederschlagsereignisse schnelle und starke Abflussreaktionen hervorrufen. Wenn dagegen noch große Speicherkapazitäten vorhanden sind, werden selbst Starkregen „absorbiert“, ohne nennenswerten Abfluss zu erzeugen. Um die zeitliche Variabilität der Einzugsgebietsreaktion zu messen, haben wir eine Methode entwickelt, die auf der klassischen Methode der Faltung konstanter Impulsantworten beruht, welche Eingabezeitreihen stabiler Isotope im Niederschlag in Ausgabezeitreihen derselben Isotope im Abfluss umwandelt. Unsere Methode lässt sowohl den Mittelwert als auch die Form der Impulsantworten veränderlich. Die Form der Impulsantworten wird dabei schon vor dem eigentlichen Modelllauf für jeden Zeitschritt anhand von aktuellen Speicher-, Transport- und Antriebseigenschaften festgelegt. Der Mittelwert der Impulsantwort kann anschließend mit einem gleitenden Fenster bestimmt werden. Zeitlich variable Transit- und Reaktionszeiten ermöglichen die systematische Untersuchung, welche Kontrollfaktoren (Topographie, Geologie, Boden-, Vegetations- oder Niederschlagseigenschaften) zu welchem Zeitpunkt vorherrschen. Somit wird die Vorhersage von (hydrochemischer und hydrologischer) Einzugsgebietsreaktion erleichtert.

1. Einleitung

Zur Vorhersage von Hochwasserereignissen, zur Bewertung von Wasservorkommen und zur Abschätzung von Kontaminationsgefährdungen ist es notwendig, die genauen zeitlichen Abläufe der Fließprozesse in Einzugsgebieten zu kennen. Wann setzen schnelle Prozesse wie Oberflächen- oder Makroporenabfluss ein? Sind Informationen über Bodenmächtigkeit wichtiger als Informationen über hydraulische Leitfähigkeit zur Bestimmung von Transitzeiten? Anhand welcher Einzugsgebietsmerkmale kann man die Geschwindigkeit von Grundwasserabfluss bestimmen? Spielt Topographie eine größere Rolle als Vegetation? Um diese Fragen zu klären, bedarf es zuerst einmal der eingehenden Beobachtung von hydrologischen Zuständen, Niederschlagsereignisparametern, zugehörigen hydrologischen Einzugsgebietsreaktionen und Transitzeiten. Während man hydrologischen Zustand anhand von Bodenfeuchtemessungen und Grundwasserständen und Niederschlagsereignisse anhand von Intensität und Dauer charakterisieren kann, ist die Messung von zeitlicher Einzugsgebietsreaktion und Transitzeit schwieriger. Im Folgenden stellen wir eine neue Methode vor, welche Zeitreihen stabiler Isotope in Niederschlag und Abfluss verwendet, um die zeitlich variable Einzugsgebietsreaktion und Transitzeitverteilung zu bestimmen. Anschließend können diese Ergebnisse mit hydrologischen Zuständen und Niederschlagsereignisparametern korreliert werden, um die dominanten Kontrollfaktoren zu isolieren.

2. Methode

Unsere Methode basiert auf der Methode von MAŁOSZEWSKI und ZUBER (1982), welche Niederschlagszeitreihen stabiler Isotope durch Faltung konstanter Impulsantworten in Abflusszeitreihen umwandelt. Diese klassische Methode wird dabei in vier wesentlichen Punkten erweitert (HEIDBÜCHEL et al. 2012):

1. Es wird zwischen hydrologischer Reaktionszeit und Transitzeit unterschieden.
2. Der Einzugsgebietspeicher ist zeitlich variabel.
3. Hydrologische Reaktionszeit und Transitzeit sind zeitlich variabel.
4. Die Form der Impulsantworten (Einzugsgebietsreaktion oder Transitzeitverteilung) ist zeitlich variabel.

Während die Einzugsgebietsreaktion wiedergibt, wie ein Einzugsgebiet hydrologisch auf ein bestimmtes Niederschlagsereignis reagiert, beschreibt die Transitzeitverteilung, wie schnell das Wasser eines bestimmten Niederschlagsereignisses das Einzugsgebiet durchfließt. Die Einzugsgebietsreaktion ist demnach zusammengesetzt aus Druckübertragung und Teilchentransport, die Transitzeitverteilung beschreibt einzig den Teilchentransport. Daher lässt ein Vergleich von Einzugsgebietsreaktion und Transitzeitverteilung Rückschlüsse auf Speicheränderungen im Einzugsgebiet zu, außerdem kann die Dynamik der Aktivierung von Vorereigniswasser nachvollzogen werden. Durch die Einführung des variablen Speichers ist es möglich, für jeden Zeitschritt die mittlere Reaktions- und Transitzeit eines Niederschlagsimpulses mithilfe eines gleitenden Fensters zu bestimmen und somit Anhaltspunkte für die sich ändernden Fließpfade im Einzugsgebiet zu finden. Die Form der Impulsantworten wird vor dem eigentlichen Modelllauf zur Ermittlung der variablen Reaktions- und Transitzeiten festgelegt. Dabei bestimmt eine dimensionslose Kennzahl, bestehend aus Speicher- (Bodenmächtigkeit, Porosität, Vorfeuchte), Transport- (gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) und Antriebseigenschaften (Niederschlagsmenge), Art und Form der Impulsantwort (Gammaverteilung, endlastige Verteilung, Advektions-Dispersions-Verteilung bzw. Form- und Dispersionsparameter).

3. Ergebnisse und Diskussion

Verwendet man die hier beschriebene Methode, erhält man für jeden Zeitschritt (d.h. wenn die Zeitschritte klein genug sind für jedes Niederschlagsereignis) eine individuelle Einzugsgebietsreaktion sowie eine individuelle Transitzeitverteilung (drei davon sind in Abbildung 1 zu sehen). Berechnet man den Mittelwert jeder dieser Verteilungen, kann man den zeitlich-variablen Verlauf darstellen (siehe Abbildung 2) und anhand der Unterschiede Rückschlüsse auf dominante Fließwege und Speichereigenschaften ziehen. Kurze Transitzeiten deuten auf schnelle Fließpfade (wie Oberflächen- und Makroporenabfluss) hin, lange Transitzeiten deuten auf langsamen Basisabfluss hin. Kurze Reaktionszeiten sind meist zu beobachten, wenn die Speicher (Boden, Aquifer) gefüllt sind, langsame Reaktionszeiten wenn die Speicher relativ leer sind. Wir haben die mittleren Transitzeiten für drei aufeinanderfolgende Monsunzeiten in zehn Teileinzugsgebieten bestimmt (Abbildung 3) und versucht zu erklären, warum große Unterschiede sowohl zwischen einzelnen Teileinzugsgebieten, als auch zwischen ein und demselben Einzugsgebiet in unterschiedlichen Jahren bestanden.

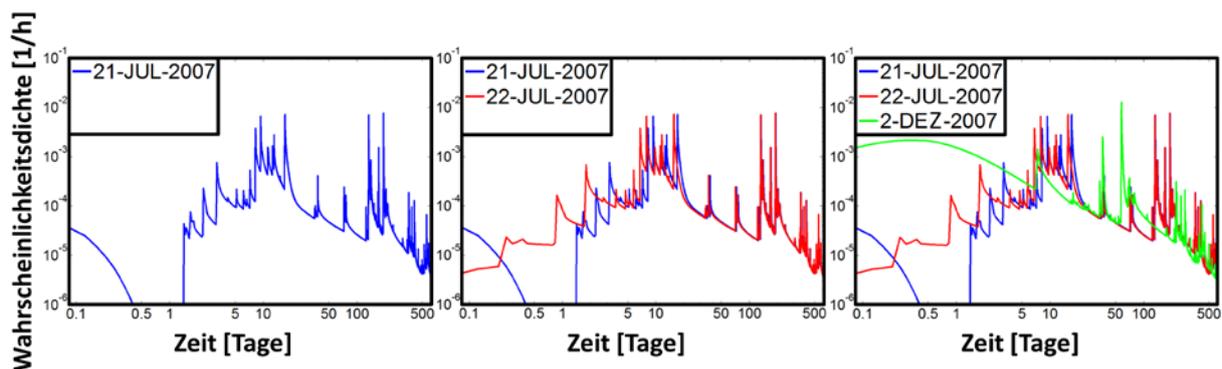


Abb. 1: Individuelle Transitzeitverteilungen dreier Niederschlagsereignisse von Juli und Dezember 2007. Charakteristisch sind mehrgipflige Verteilungen, wobei jedes Maximum von nachfolgenden Niederschlagsereignissen ausgelöst wird. Das Dezember-Ereignis (grün) ist ein Beispiel für sehr schnellen Wassertransport mit einem hohen Anteil an sehr kurzen Transitzeiten (bedingt durch raschen Oberflächen- und Makroporenabfluss).

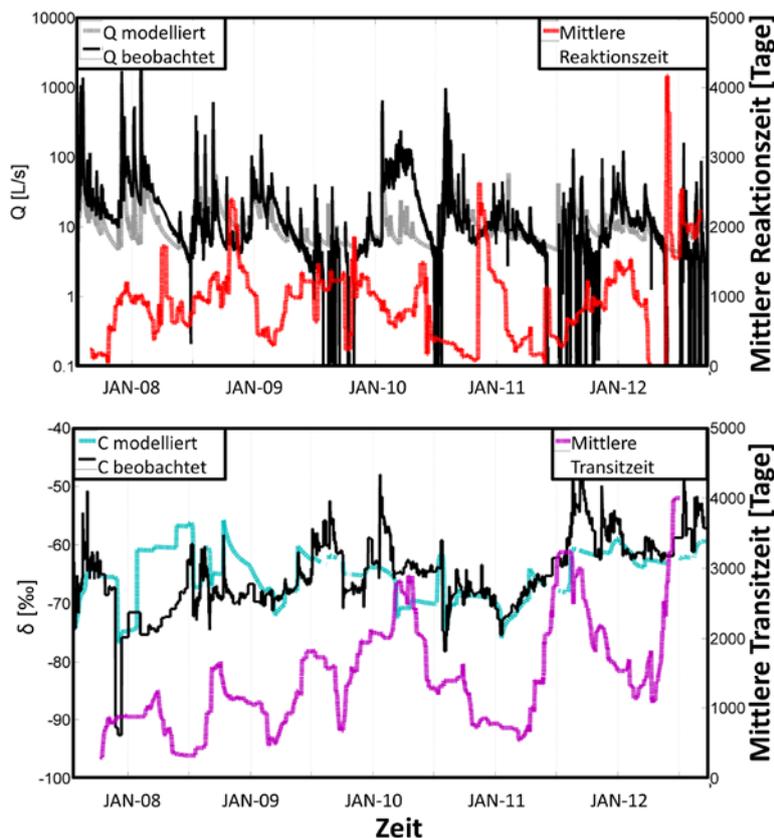


Abb. 2: Variable mittlere Reaktionszeiten (oben, rot) und Transitzeiten (unten, violett). Außerdem modellierter (oben, grau) und beobachteter (oben, schwarz) Abfluss und modellierte (unten, hellblau) und beobachtete (unten, schwarz) Isotopenwerte. Man beachte, dass kurze Reaktionszeiten nicht zwangsläufig mit kurzen Transitzeiten korrelieren (der zwischen-geschaltete variable Speicher kann für große Unterschiede sorgen).

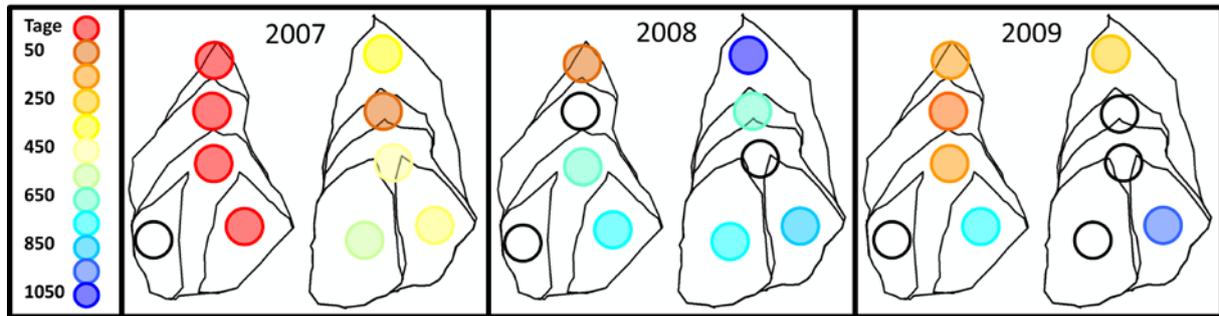


Abb. 3: Mittlere Transitzeiten in zehn Teileinzugsgebieten (verteilt auf zwei Hangeinzugsgebiete nullter Ordnung) für drei aufeinanderfolgende Monsunzeiten (leere Kreise bedeuten, dass die Ermittlung von mittleren Transitzeiten, z.B. aufgrund von Geräteausfällen oder Trockenheit, nicht möglich war).

Für jedes Teileinzugsgebiet wurden mittlere Bodeneigenschaften und topographische Parameter ermittelt und in Beziehung zu den mittleren Transitzeiten gesetzt. In der Saison von 2007 korrelierte die mittlere Bodenmächtigkeit am besten mit der mittleren Transitzeit (wobei geringere Mächtigkeiten schnelleren Abfluss bedingten). 2008 war es allerdings die hydraulische Leitfähigkeit der Böden, welche die mittleren Transitzeiten am besten erklärte (wobei höhere Leitfähigkeiten schnelleren Abfluss bedingten). Und schließlich in der Saison 2009 fand sich der beste Zusammenhang zwischen mittlerer Transitzeit und Geländekrümmung (wobei konvexere Landformen schnelleren Abfluss bedingten). Diese wechselnden Abhängigkeiten deuten auf unterschiedliche dominante Fließprozesse hin, die sich unter Einbeziehung von Wettermustern erklären lassen (HEIDBÜCHEL et al. 2013; Abbildung 4). 2007 führte eine intensive Niederschlagsperiode zu Anfang der Monsunzeit zu einer vollständigen Sättigung der flacheren Böden, so dass dort Oberflächen- und Makroporenabfluss dominierte. 2008 war dieselbe Niederschlagsmenge über die gesamte Monsunperiode verteilt und ein größerer Teil des Niederschlags verdunstete (oder wurde transpiriert), bevor der Boden vollständig gesättigt war. Daher dominierte 2008 Zwischenabfluss (dessen Geschwindigkeit von der hydraulischen Leitfähigkeit abhängt) an der Grenze von Boden und Festgestein. Der Monsun 2009 war sehr trocken und die geringen Niederschlagsmengen verdunsteten fast vollständig. Der geringe Anteil, der im Abfluss ankam, musste den Weg über das Festgestein nehmen. Dabei war der Anteil des langsamen Basisabflusses in konkavere Landschaftsteilen offensichtlich größer.

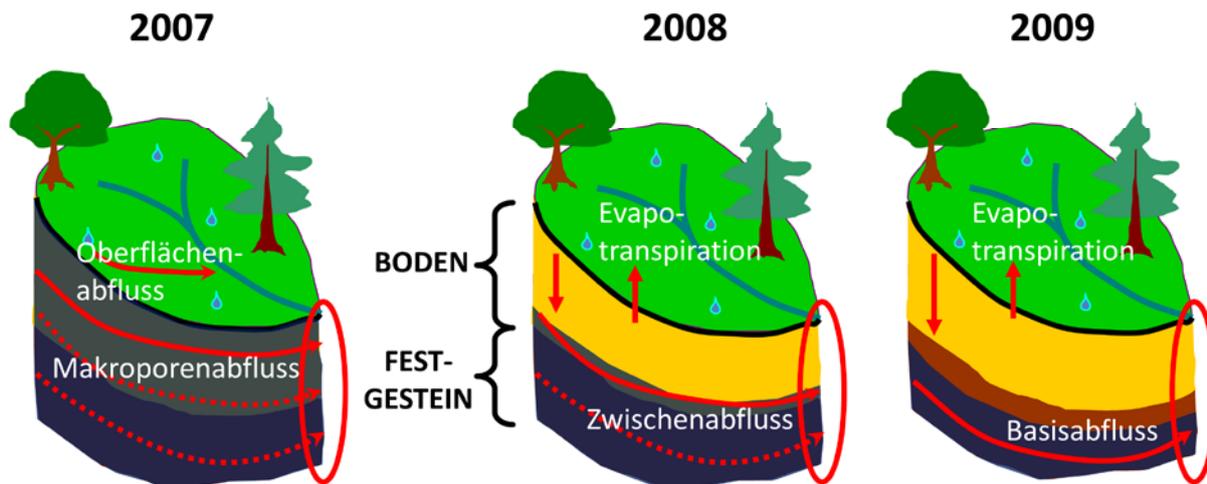


Abb. 4: Unterschiedliche dominante Fließwege in Abhängigkeit des Speicherzustandes im Einzugsgebiet erklären die veränderliche Abhängigkeit der mittleren Transitzeiten von Bodeneigenschaften und topographischen Parametern.

4. Schlussfolgerung

Durch die Anwendung der Methode zur Bestimmung zeitlich variabler Transitzeitverteilungen ist es möglich, zwischen dominanten Fließprozessen in Einzugsgebieten zu unterscheiden. Darüber hinaus lässt der Vergleich von Einzugsgebietsreaktion und Transitzeitverteilung Rückschlüsse auf aktuelle Speicherzustände zu. Um die Natur von Transitzeiten besser zu verstehen und vorherzusagen, ist es notwendig, die sich ändernden Kontrollfaktoren zu beachten. Welcher Kontrollfaktor dominiert, hängt vom Zusammenspiel physischer (Bodenmächtigkeit, Porosität, Leitfähigkeit) und meteorologischer (Niederschlagsmenge) Parameter ab. Eine dimensionslose Kennzahl, welche Speicher-, Antriebs- und Transporteigenschaften ins Verhältnis setzt, kann helfen, die wechselnden dominanten Fließpfade und dadurch bedingte Transitzeiten vorherzusagen (HEIDBÜCHEL et al. 2013). Diese Storage-Forcing-Transport Number (SFTN) setzt sich aus mittlerer Bodenmächtigkeit D_{soil} , Porosität n , Vorfeuchte θ_{ant} , Niederschlagsmenge P_{sub} und hydraulischer Leitfähigkeit K_{sub} zusammen:

$$SFTN = \frac{D_{\text{soil}} * (n - \theta_{\text{ant}})}{P_{\text{sub}} - K_{\text{sub}}},$$

wobei P_{sub} die Niederschlagsmenge im Anschluss an das zu betrachtende Ereignis darstellt - über den Zeitraum, welcher der typischen Zwischenereigniszeit entspricht - und K_{sub} die Fähigkeit der Böden im Einzugsgebiet beschreibt, Niederschlagswasser während dieser Zeit abzuleiten:

$$K_{\text{sub}} = k_{\text{sat}} * t_i * \frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}},$$

wobei k_{sat} die gesättigte Leitfähigkeit der Böden, t_i die typische Zwischenereigniszeit, A_{out} die Querschnittsfläche des Bodens am Gebietsausfluss und A_{in} die Einzugsgebietsoberfläche ist. Entspricht die SFTN einem Wert kleiner als 1, so folgt eine komplette Bodensättigung und schnelle Abflussprozesse (Makroporen-, Oberflächenabfluss) können erwartet werden. In

diesem Fall wird die mittlere Transitzeit maßgeblich von der Bodenmächtigkeit kontrolliert. Bei SFTN-Werten über 10 sind dagegen eher langsame Fließprozesse (Basisabfluss) zu erwarten, da der Boden relativ trocken bleibt. Die mittlere Transitzeit korreliert in solch einer Situation stärker mit topographischen Parametern (wie z. B. der Geländekrümmung). Zusammenfassend bleibt zu bemerken, dass Einzugsgebiete dynamische Systeme sind, die situationsabhängig auf Niederschlagsereignisse reagieren. Dabei sind die Wechsel zwischen dominanten Fließpfaden von relativ klaren Schwellenwerten im Zustand des Bodenwasserspeichers abhängig. Diese Erkenntnis kann in Zukunft in die Entwicklung hydrologischer Einzugsgebietsmodelle einfließen.

Literatur

- MAŁOSZEWSKI, P. & A. ZUBER (1982): Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability. –*Journal of Hydrology* 57: 207-231.
- HEIDBÜCHEL, I., TROCH, P.A., LYON, S.W. & M. WEILER (2012): The master transit time distribution of variable flow systems. –*Water Resources Research* 48, W06520, doi:10.1029/2011WR011293.
- HEIDBÜCHEL, I., TROCH, P.A. & S.W. LYON (2013): Isolating physical and meteorological controls on variable hydrologic catchment response. –*Water Resources Research*, in review.

Spannungsfeld Prozesswissen – Hydrologische Modellierung aufgezeigt an einem vielseitigen Beispiel aus den Schweizer Voralpen

Simon Scherrer, Michael Margreth, Peter Kienzler

Zusammenfassung

Die bei Starkregen auftretenden Abflussprozesse sind in ihrer Art und ihrer Intensität räumlich unterschiedlich. Ihr Wesen wurde in den letzten Dekaden von verschiedenen Forschenden mit unterschiedlichen Methoden untersucht (Abflussuntersuchungen an Hängen, in Klein- und Kleinst Einzugsgebieten, Beregnungsversuche, etc.). Dies vergrösserte das Wissen und das Verständnis über Abflussprozesse. Diese Grundlagen ermöglichten die detaillierte Kartierung klein- und mesoskaliger Einzugsgebiete (EZG) nach der Abflussbereitschaft. Die Kartiermethodik wurde automatisiert, um mit Hilfe von GIS die Abflussprozesse und -bereitschaft auch für grössere EZG in hoher räumlicher Auflösung effizient ermitteln zu können.

Mit Hilfe von Abflussprozesskarten lassen sich Flächen mit starker, mittlerer und schwacher Abflussreaktion identifizieren. Diese flächendifferenzierte Betrachtung der Abflussprozesse kann als Grundlage für Niederschlag-Abflussmodelle dienen. Im Einzugsgebiet der Kleinen Emme in den Luzernischen Voralpen wurde ein solches Modell aufgebaut, um die Reaktion des Gebiets auf seltene Niederschläge zu untersuchen und um Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten abzuleiten. Mit Hilfe dieses flächendifferenzierten Ansatzes der Abflusentstehung konnte zusätzlich die Wirkung von Landnutzungsänderungen und von dezentralen Hochwasserschutzmassnahmen auf die Grösse extremer Hochwasser evaluiert werden. Die Ergebnisse zeigen, unter welchen Umständen und für welche Ereignisse Landnutzungsänderungen und dezentrale Hochwasserschutzmassnahmen als abflussmindernde Eingriffe für den Hochwasserschutz effizient und sinnvoll sind. Die flächendifferenzierte Betrachtung ermöglichte so eine prozessnahe Modellierung und erlaubte die Beurteilung von praktischen Fragestellungen.

1. Einleitung

Die kleinräumige Erforschung von Abflussbildungsprozessen wurde oft mit dem Ziel durchgeführt, die Reaktion von Einzugsgebieten (EZG) auf grosse Niederschläge und die Entstehung von Hochwasser besser zu verstehen. Die Prozesskenntnis führt jedoch nur dann zu einem massgeblichen Fortschritt für die Abschätzung von extremen Hochwassern und für die operationelle Hochwasservorhersage, wenn dafür geeignete Niederschlag-Abflussmodelle (NAM) verwendet werden. Etliche der heute verfügbaren NAM sind aufgrund ihrer Modellstruktur nicht in der Lage, vorhandene Information über die Abflussprozesse zu berücksichtigen. Denn üblicherweise werden NAM anhand von Niederschlag- und Abflussdaten geeicht, indem die Parameter solange verändert werden, bis ein guter „Fit“ erreicht wird.

In diesem Artikel wird an einem praktischen Beispiel das an der ETH Zürich entwickelte Niederschlag-Abflussmodell QAREA präsentiert, das Informationen über Abflussprozesse berücksichtigt, indem räumliche Unterschiede der Abflussbereitschaft in einer Karte der Abflussprozesse als Modellgrundlage verwendet werden. Diese Informationen beruhen auf Beobachtungen und gehen unabhängig von einer Modelleichung ins NAM ein. Die Prozesskarten werden basierend auf Geländeinformationen „manuell“ erstellt. Grundlage dazu ist ein

Bestimmungsschlüssel, der es erlaubt, die Prozesse zu kartieren (SCHERRER AG 2006). Bei grösseren Gebieten wie dem der Kleinen Emme kann die Erstellung solcher Karten durch den Einsatz von GIS automatisiert werden. Das hier verwendete Verfahren wurde im Wesentlichen im Zuge der Erstellung einer Abflussprozesskarte für den Kanton Zürich (1830 km²) entwickelt (NAEF et al. 2007 und MARGRETH et al. 2010 und SCHMOCKER-FAKEL et al. 2007). Die Übertragung dieses automatisierten Verfahrens auf andere Gebiete ist mit der manuellen Kartierung von „Lern“- oder Referenzgebieten“ möglich. Im Folgenden wird das Vorgehen am Beispiel der Kleinen Emme detailliert dargestellt.

2. Automatisierte Prozesskartierung

2.1 Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme

Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme (460 km²) liegt in den Voralpen der Zentralschweiz (Abbildung 1). Der Untergrund wird aus helvetischen Decken (mehrheitlich Kalk), Flysch, Molasse (Sandsteine, Mergel und Nagelfluh) und Moräne gebildet. Abbildung 1 zeigt die Lage der Pegel Sörenberg, Wolhusen und Litttau. Die höchsten Erhebungen bilden Pilatus (2'119 m ü.M.), Briener Rothorn (2'350 m. ü. M), Schratzenfluh (2'092 m ü.M.) und Napf (1'408 m ü.M.).

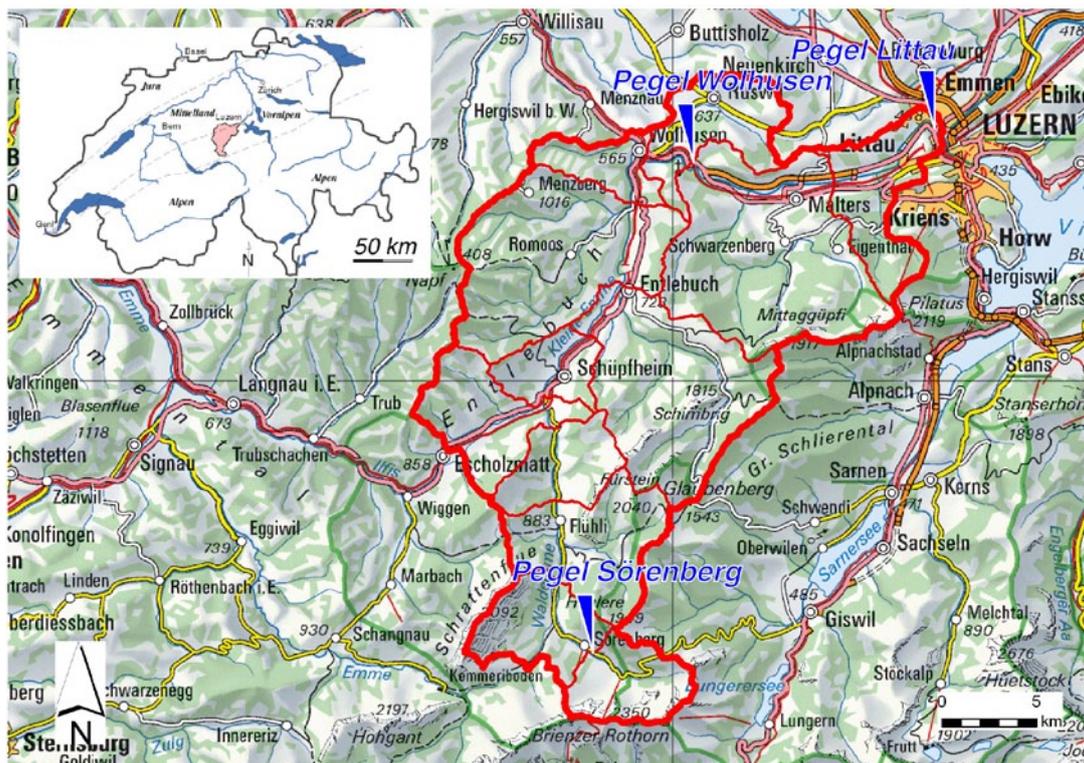


Abb. 1: Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme (rot) mit den Teileinzugsgebieten und den Abflussmesspegeln.

2.2 „Manuelle“ und automatisierte Kartierung

In sogenannten Referenzgebieten (Abbildung 2, links) wurde die Abflussbereitschaft „manuell“ kartiert. Dazu wurden in einem ersten Schritt alle verfügbaren Unterlagen über Geologie, Geomorphologie, Landnutzung und Böden zusammengetragen. Im Fall des Referenzgebiets

Hasle (Abbildung 2, rechts) ist der geologische Untergrund vorwiegend Moräne. Fehlende Informationen über die Böden wurden durch Bodensondierungen erfasst, das Infiltrations- und Speichervermögen der Böden abgeschätzt und der jeweils massgebende Abflussprozess anhand des Bestimmungsschlüssels (SCHERRER AG, 2006) bestimmt. Abflussprozesse ähnlicher Intensität wurden zu sogenannten Abflusstypen (Abflusstyp 1 – 5) zusammengefasst.

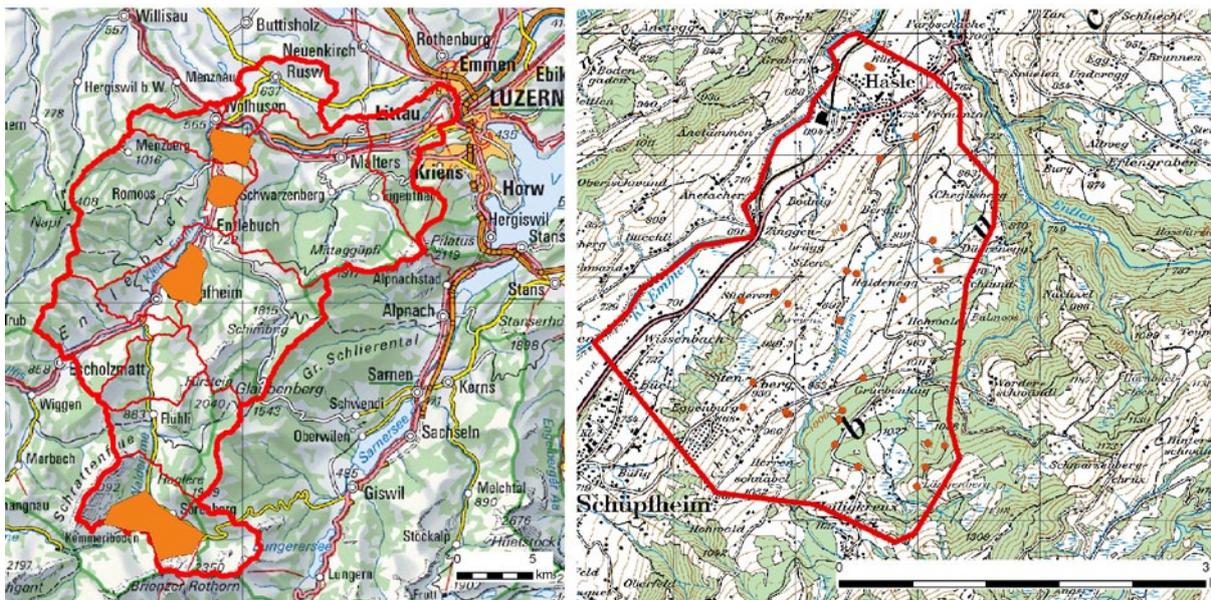


Abb. 2: Die Referenzgebiete im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (orange, links) und als Beispiel das Referenzgebiet Hasle mit den durchgeführten Bodensondierungen.

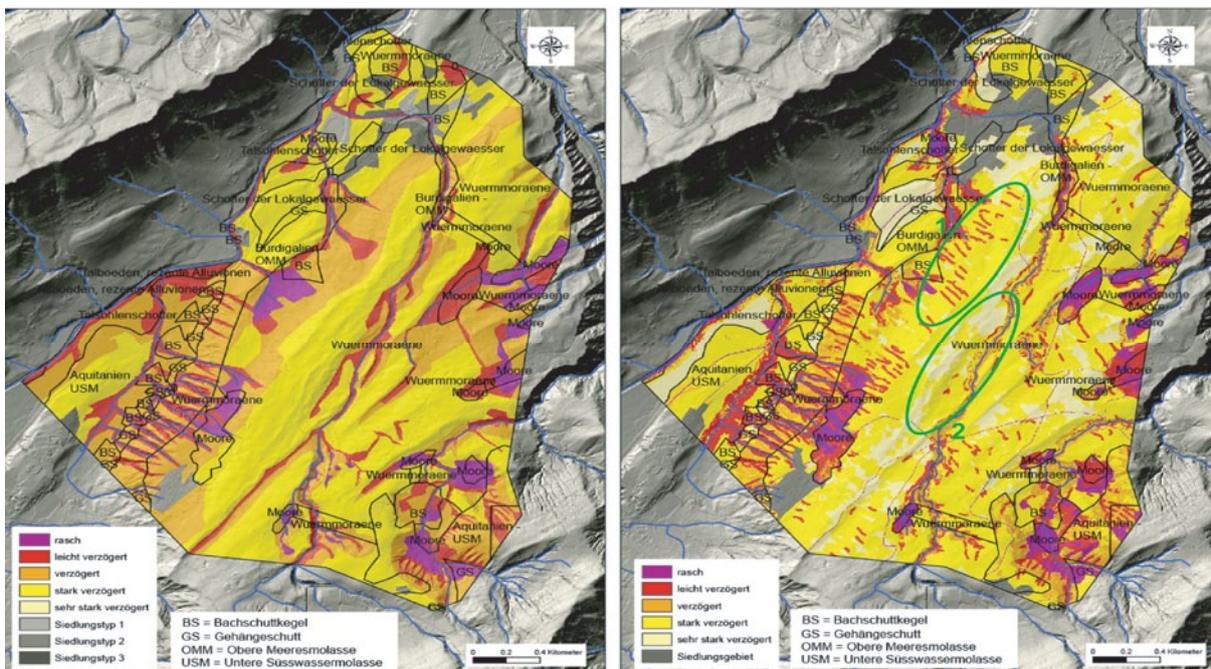


Abbildung 3 zeigt die „manuelle“ Kartierung (links) und die automatisierte Karte (rechts) des Referenzgebiets Hasle im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (vgl. Abbildung 2). Die automa-

tisierte, GIS-gestützte Kartierung basiert auf der Geologie, Landnutzung, topographischen Parametern und Geländeformen (z.B. Kuppen, Mulden, Hangkanten und Tobel). Das dafür entwickelte Regelwerk definiert, unter welchen Bedingungen rasche, leicht verzögerte, verzögerte, stark verzögerte und sehr stark verzögerte Abflussreaktion zu erwarten ist (NAEF et al. 2007). Die topographischen Parameter und Geländeformen wurden vom „Detaillierten Terrain Modell“ der amtlichen Vermessung (DTM-AV) hergeleitet. Anhand der in den Referenzgebieten manuell kartierten Abflussprozesskarten wurde das automatisierte Verfahren auf die vorherrschenden Böden, Gesteinstypen und topographischen Gegebenheiten angepasst und dann auf eine grössere Fläche übertragen. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der beiden Kartiermethoden im Referenzgebiet Hasle im Vergleich. In diesem Fall konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Die Abweichungen zur manuell kartierten Abflussbereitschaft betreffen vor allem Gebiete mit einer Moränenbedeckung. Im Einzugsgebiet der Kleinen Emme weisen Moränen ungewöhnlich grosse Gebiete vernässter Böden auf.

Nach den Anpassungen anhand der vier manuell kartierten Referenzgebiete wurde das Regelwerk auf das ganze Gebiet der Kleinen Emme angewendet (Abbildung 4). Die Kuchendiagramme zeigen je Flussabschnitt resp. Teil-Einzugsgebiet wie gross der Anteil der unterschiedlich stark beitragenden Gebiete ist. Summiert man die Abflusstypen 4 und 5 auf (Flächen mit stark verzögerter und sehr stark verzögerter Abflussreaktion), so zeigt sich im Teil-Einzugsgebiet oberhalb Sörenberg ein Wert von 53% (mässige Abflussreaktion) im Teil-Einzugsgebiet oberhalb Flühli 18% (starke bis sehr starke Reaktion) und im Teileinzugsgebiet des Bielbachs bei Ruswil 68% (schwache Reaktion). Im gesamten EZG der Kleinen Emme weisen 36% der Fläche die Abflusstypen 4 und 5 auf (mässig – starke Reaktion).

4. Abflussberechnungen mit dem Niederschlag-Abflussmodell QAREA

4.1 Aufbau des Niederschlag-Abflussmodells

Auf der Grundlage der Prozesskarte wurde das NAM QAREA (SCHERRER & NAEF 2003) für das EZG der Kleinen Emme aufgebaut. Das NAM basiert auf der Klassifizierung der Abflussbereitschaft der Teileinzugsgebietsflächen (Abflusstypen in Abbildung 4), den dazugehörigen Abflussreaktionen (Abflussreaktionskurven) sowie auf den Laufzeiten bis zum Teileinzugsgebietsausgang (Isochronen). Zur Simulation von Landregen aber auch kurzen Gewiterniederschlägen kann das Gebiet gleichmässig überregnet werden oder auch nur Teile davon. Der gefallene Niederschlag wird aufgeteilt in Direktabfluss und in den Boden infiltrierendes Wasser. Das infiltrierte Wasser wird im Boden gespeichert und verzögert wieder abgegeben. Die Reaktion dieser Bodenspeicher wird mit linearen Speichern modelliert. Für jeden Abflusstyp wird eine eigene Speichercharakteristik angenommen. Der Direktabfluss erfährt auf dem Weg ins Gerinne eine Verzögerung durch Retention (Oberflächenspeicher), welche ebenfalls mit einem linearen Speicher simuliert wird.

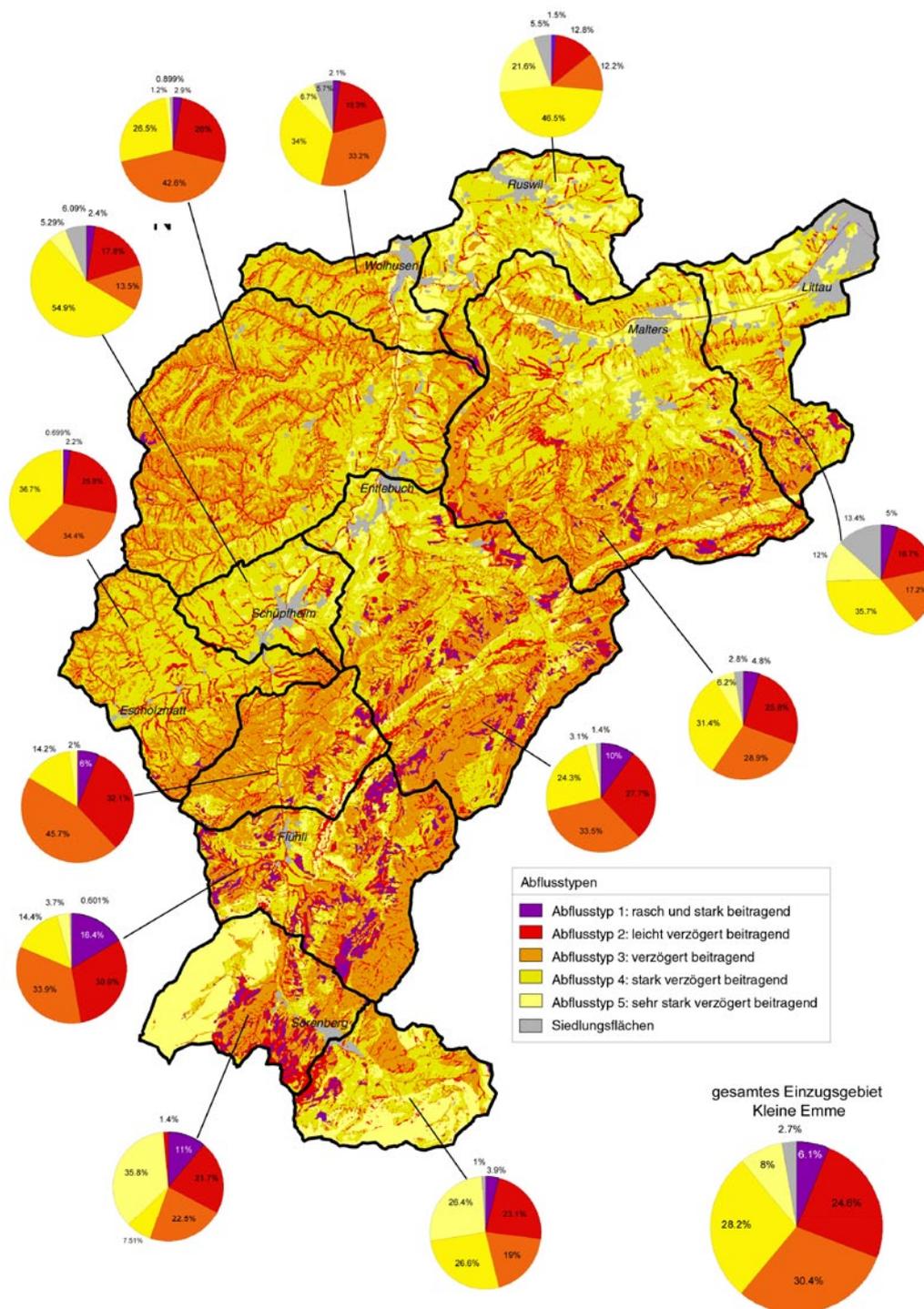


Abb. 4: Flächen ähnlicher Abflussbereitschaft (Abflusstypen) im Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Die Kuchendiagramme zeigen die Anteile der Abflusstypen je Teileinzugsgebiet an. Das Diagramm unten rechts bezieht sich auf das gesamte Einzugsgebiet der Kl. Emme.

4.2 Verifikation des Modells

Das NAM wurde durch Nachrechnen diverser Ereignisse überprüft bzw. verifiziert. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Nachrechnung an den drei Pegelstellen im EZG des Ereignisses vom 16. Juli 2002 als intensive Niederschläge eines der grössten Hochwasser der letzten

Jahre an der Kleinen Emme verursachten. Der zeitliche Verlauf und das Volumen werden durch das NAM gut nachgebildet, lediglich beim ersten Peak reagiert das Modell etwas zu langsam. Aufgrund dieser Nachrechnungen zeigte sich, dass das NAM für die Berechnung von Szenarien eingesetzt werden kann (Kap. 4.3 und 5).

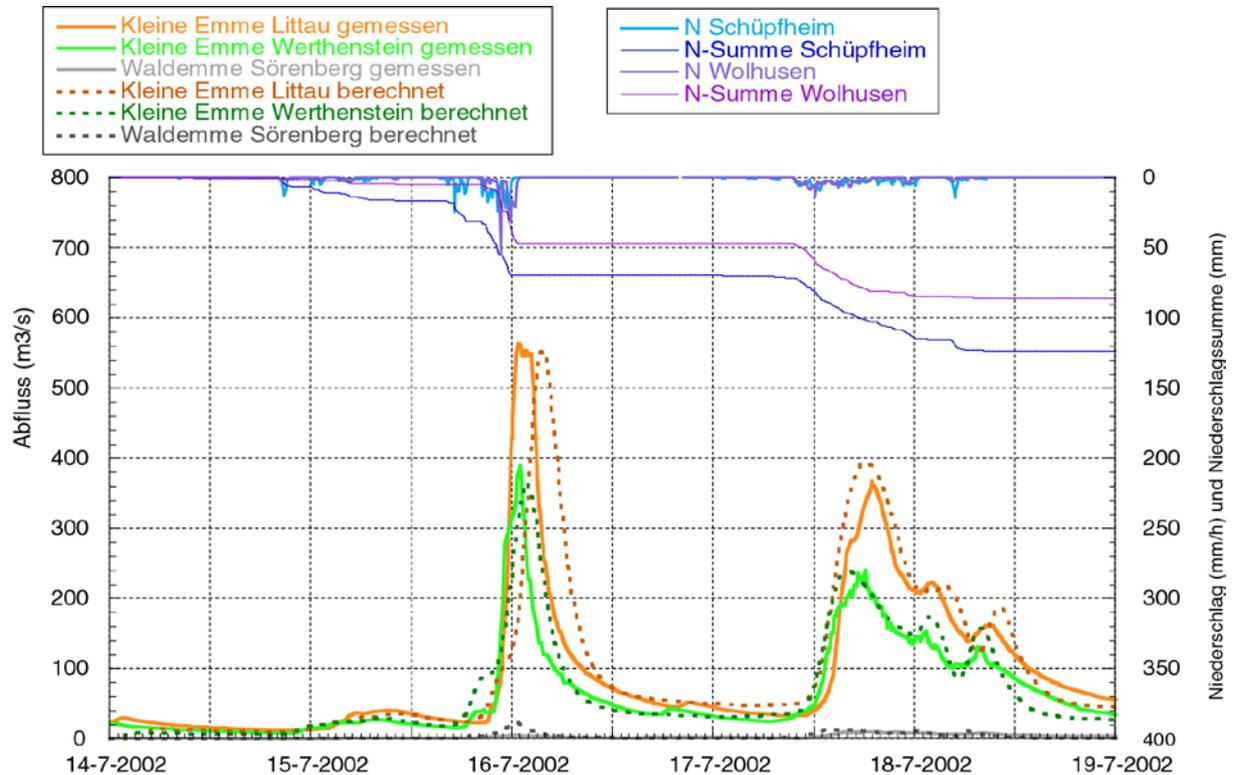


Abb. 5: Der Niederschlagsverlauf der Stationen Schüpfheim und Wolhusen und die an den verschiedenen Pegeln gemessenen Abflussganglinien des Hochwassers vom 16./17.7.2002. Die gepunkteten Linien zeigen die Berechnung mit dem Modell QAREA.

4.3 Hochwasserbeeinflussung durch Landnutzungsänderungen

Um die Abflussreaktion von EZG zu beeinflussen, können Landnutzungsänderungen eingesetzt werden. Eingriffe in die Landnutzung sind aber nur dort sinnvoll, wo durch entsprechende Massnahmen Flächen mit einer starken Abflussreaktion in eine schwächere Abflussreaktion überführt werden können (NAEF et al. 2002). Im EZG der Kleinen Emme kommen vor allem Moore und Waldflächen für solche Massnahmen in Frage. Wie gross der mögliche Einfluss der unterschiedlichen Bewirtschaftung und Nutzung von Mooren und Waldflächen auf das Abflussverhalten bei Hochwasser sein kann, lässt sich mit dem NAM simulieren.

Drei grosse Hochwasser (Juli 2002, August 2005 und August 2007) wurden im Sinne einer Maximalbetrachtung nochmals gerechnet, in dem die Nutzung / Bewirtschaftung einerseits der Moore und andererseits der Waldflächen verändert wird. Die Veränderung erfolgte über eine Neueinschätzung der Abflussbereitschaft der Gebiete.

a) Hochwasserbeeinflussung durch rekultivierbare Moore

Moore sind heute geschützt, vor allem im 1. und 2. Weltkrieg wurde jedoch vielerorts Torf abgebaut, getrocknet und als Brennstoff verwendet. Zur Verbesserung der Holzproduktion wurden viele Moore drainiert, durch die angelegten Gräben wurde der Wasserspiegel im Moor abgesenkt und damit die Wuchsbedingungen der Bäume verbessert. Der Hochwasser dämpfende Einfluss einer Moorrenaturierung wurde in einer Untersuchung aus Bayern aufgezeigt (ZOLLER & CRONAUER 2003). Demnach wies das drainierte Moor grössere Hochwasserspitzen auf, als das renaturierte Vergleichsgebiet. Ob sich diese Erkenntnisse verallgemeinern lassen, ist unklar. Verschiedene Moor-Renaturierungsprojekte sind in den letzten Jahren auch in der Schweiz ausgeführt worden (Grabenverfüllungen, Querriegel in Drainagegräben oder Ausflussregulierungen). Auf diese Weise wird versucht, tief liegende Wasserspiegel bis in Oberflächennähe anzuheben (0.1 bis 0.2 m unter Flur). Um in Mooren eine abflussmindernde Wirkung zu erreichen, muss verhindert werden, dass diese bei Niederschlägen rasch (oder leicht verzögert) entwässern. Solche Eingriffe machen nur in wenig oder kaum geneigten Mooregebieten Sinn, denn bei zu grosser Neigung muss angenommen werden, dass Entwässerungsprozesse (Subsurface Flow) unabhängig von Gräben stattfinden (KIENZLER & NAEF 2008).

Die Ermittlung flacher Mooregebiete im EZG der Kleinen Emme erfolgte über das GIS. Die meisten Moore haben im EZG eine Neigung > 10%. Den Mooren mit einer Neigung < 10% wurde eine schwächere Abflussreaktion zugeordnet (Abflusstyp 1 und 2 wurde zu Abflusstyp 3; Abflusstyp 3 zu 4). Betroffen von dieser Massnahme sind allerdings nur 4.2 km² (0.9% des EZG). Wie Tabelle 1 zeigt, ist die Wirkung von rekultivierten Moorflächen im EZG der Kleinen Emme auf die Hochwasserspitzen gering.

Tab. 1: Vergleich der Abflussspitzen im Ist-Zustand und bei maximal möglicher Dämpfung in den Mooren.

Ereignis	Pegel	Ist-Zustand gerechnet [m ³ /s]	Szenario Dämpfung in Mooren [m ³ /s]	Dämpfung der Abflussspitze
16.7.2002	Littau	553.4	549.5	0.7 %
	Werthenstein	366.9	364.3	0.7 %
	Sörenberg	24.6	24.3	1.2 %
21./22.8.2005	Littau	801.9	800.1	0.2 %
	Werthenstein	458.5	457.1	0.3 %
	Sörenberg	45.7	45.7	0.0 %
8.8.2007	Littau	554.2	551.3	0.5 %
	Werthenstein	385.2	383.0	0.6 %
	Sörenberg	24.9	24.7	0.8 %

b) Hochwasserbeeinflussung durch Waldflächen (sog. Hochwasserschutzwälder)

Im EZG der kleinen Emme sind grosse Bestände flachwurzelnder Fichten vorhanden. Langfristig besteht die Idee, diese ortsfremden Bestände durch tiefer wurzelnde Baumarten zu ersetzen (Buche, Ahorn, etc). Diese Massnahmen hätten den Effekt, dass ein grösserer Teil des Bodens durch (Grob-) Poren erschlossen und damit das Speichervermögen des Bodens erhöht würde. Im EZG der Kl. Emme wurden 96.7 km² Wald als sog. Hochwasserschutzwald ausgewiesen. Einige dieser Waldflächen weisen Böden mit gehemmter Durchlässigkeit und/oder mässigem bis geringem Speichervolumen auf. Das Potential für eine Erhöhung des Bodenspeichers ist bei diesen Flächen sehr begrenzt. Zudem gibt es Standorte, an denen eine Erhöhung des Speichervermögens kaum möglich ist, weil die Artenzusammensetzung bezüglich Wasserspeicherung schon heute gut oder aus anderen Gründen nicht zu beeinflussen ist. Im Einzugsgebiet der Kleinen Emme wurde daher angenommen, dass auf den 96.7 km² Hochwasserschutzwäldern das hochwasserrelevante Speichervolumen durch Eingriffe hin zu einer günstigeren Artenzusammensetzung durchschnittlich um maximal 10 mm erhöht werden kann.

Tab. 2: Vergleich der Abflussspitzen im Ist-Zustand und bei maximal möglicher Dämpfung in den Waldflächen.

Ereignis	Pegel	Ist-Zustand gerechnet [m ³ /s]	Szenario Dämpfung in Mooren [m ³ /s]	Dämpfung
16.7.2002	Littau	553.4	522.5	5.6 %
	Werthenstein	366.9	348.8	4.9 %
	Sörenberg	24.6	24.5	0.4 %
21./22.8.2005	Littau	801.9	800.8	0.1 %
	Werthenstein	458.5	456.9	0.3 %
	Sörenberg	45.7	45.7	0.0 %
8.8.2007	Littau	554.2	533.9	3.7 %
	Werthenstein	385.2	370.8	3.7 %
	Sörenberg	24.9	24.8	0.4 %

Tabelle 2 zeigt, dass die Abflussspitzen bei den Hochwassern 2002 und 2007 im einstelligen Prozentbereich gedämpft werden. Beim Hochwasser 2005, dessen Gebietsniederschlag um 100 mm höher liegt als bei den Hochwassern 2002 und 2007, ist die Dämpfung der Abflussspitzen sogar noch geringer. Es gilt weiterhin zu bedenken, dass die Einleitung solcher Massnahmen einige Jahre dauert, und bis zum Wirksamwerden nochmals ein paar Jahrzehnte verstreichen.

6. Abschätzung von Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeit

Das auf Abflussprozesskarten basierende NAM kann auch eingesetzt werden, um die Reaktionsweise von EZG auf seltene meteorologische Bedingungen zu untersuchen (Starkregen). Dazu wurden Niederschlagsszenarien hergeleitet, welche aus Niederschlägen unterschiedlicher Dauer und Jährlichkeit bestehen. Im Unterlauf der kleinen Emme wurden auf diese Weise in verschiedenen Teileinzugsgebiete Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit berechnet. Abbildung 6 zeigt als Beispiel das Frequenzdiagramm des Bielbachs mit den grössten Werten der Abflussberechnungen mit dem NAM (gelb) sowie rekonstruierten Abflussspitzen historischer Hochwasser (blaue Kästchen). Mit dieser Vorgehensweise werden Beobachtungen (historische Hochwasser, Kartierung der Abflussbereitschaft) und Abflussberechnungen kombiniert. Dieser umfassende Ansatz verleiht der Hochwasserabschätzung eine höhere Zuverlässigkeit.

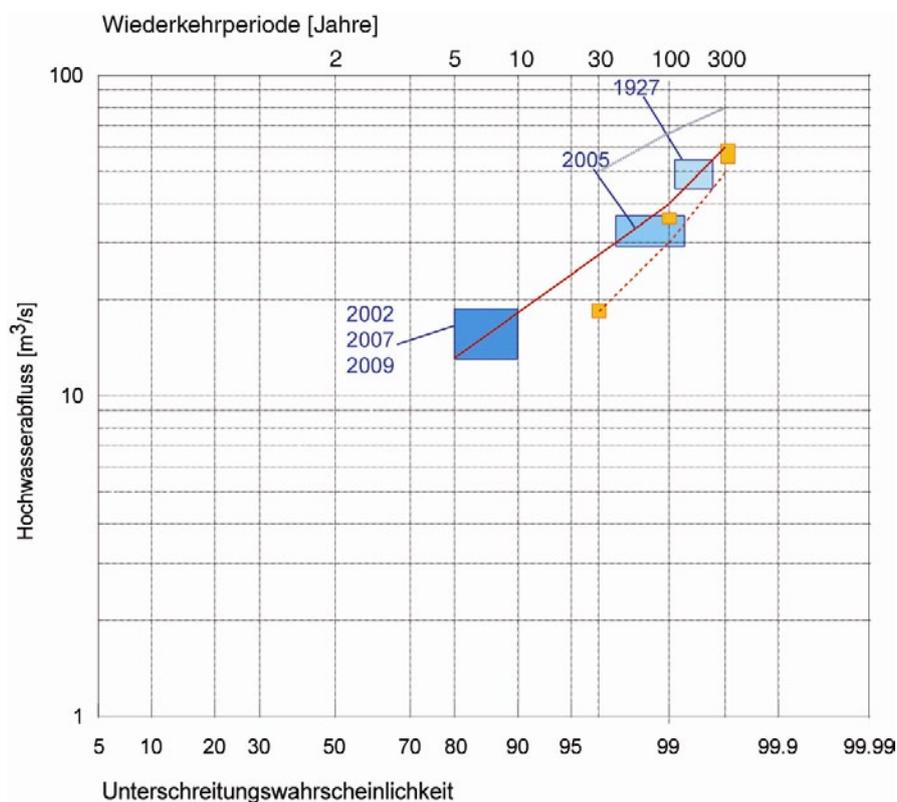


Abb. 6: Frequenzdiagramm des Bielbachs (Oberlauf, 14.5 km²). Eingetragen sind die abgeschätzten Abflussspitzen der Hochwasser der Jahre 1927, 2005 sowie 2002, 2007 und 2009. Die Resultate der Modellrechnungen sind orange dargestellt. Die roten Linien markieren den vorgeschlagenen Bereich der Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit.

7. Schlussfolgerungen

Abflussprozesskarten lassen sich verwenden, um räumlich differenzierte Informationen zur Abflussbildung in Niederschlag-Abflussmodelle einzubringen. Die Modellstruktur des NAM muss aber fähig sein, die Abflussreaktion der einzelnen Flächen zu erfassen und in einen Abfluss umzurechnen. Im vorliegenden Fall liess sich mit Hilfe der kartierten Abflussbereitschaft die Wirksamkeit zur Hochwasserminderung möglicher Landnutzungsänderungen untersuchen. Die Rekultivierung entwässerter Moore erwies sich im Gebiet der Kleinen Emme

als wenig wirksame Massnahme, um gezielt Niederschlag zurückzuhalten und die Spitze grosser Hochwasser zu dämpfen. Etwas wirksamer dürfte der Ersatz flachwurzelnder Fichtenbestände mit tiefer wurzelnden Baumarten sein. Die Abflussspitzen grosser Hochwasser liessen sich um ein paar Prozente vermindern. Angesichts des enormen Aufwandes und der Dauer für die Umsetzung solcher Massnahmen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme, scheinen andere Hochwasserschutzmassnahmen am Gerinne sinnvoller. Das auf Abflussprozesskarten basierende Niederschlag-Abflussmodell liess sich auch einsetzen, um Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit abzuschätzen.

Dank

Wir bedanken uns beim Kanton Luzern, Verkehr und Infrastruktur, Abteilung Naturgefahren für die Möglichkeit, diese spannende Studie durchführen zu können.

Literatur

- KIENZLER, P. & F. NAEF (2008): Subsurface storm flow formation at different hillslopes and implications for the 'old water paradox'. *Hydrological Processes*, 22, 104-116
- MARGRETH, M., NAEF, F. & S. SCHERRER (2010): Weiterentwicklung der Abflussprozesskarte Zürich in den Waldgebieten. Projekt im Auftrag des AWEL, Kanton Zürich
- NAEF, F., SCHERRER, S. & M. WEILER (2002): A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology* 267 (2002) 74–79
- NAEF, F., MARGRETH, M., SCHMOCKER-FACKEL, P. & S. SCHERRER (2007): Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *Wasser, Energie, Luft*, 99, 3. Baden
- SCHERRER, S. & F. NAEF (2003): Hochwasserabschätzung in Schweizer Einzugsgebieten - Praxishilfe. Kap. 3 Grundlagen zu den Abflussbildungsprozessen, 4.1 Niederschlag-Abfluss-Modelle. In: M. Spreafico, R. Weingartner, M. Barben, A. Ryser, *Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4 – Bern 2003*
- SCHERRER, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, 18/2006
- SCHERRER AG & SoilCom GmbH (2010): Beurteilung der Abflussbereitschaft des Einzugsgebiets der Kleinen Emme (Kt. LU) durch automatisierte Kartierung (GIS) - Ermittlung von Flächen mit potentiell Wasserrückhalt und ihr Einfluss auf den Hochwasserabfluss. Auftraggeber: Verkehr und Infrastruktur des Kt. Luzern vif, Abteilung Naturgefahren. Bericht 10-136
- SCHERRER AG & SoilCom GmbH (2011): Hydrologische Grundlagen an den Seitenbächen der Kleinen Emme (Unterlauf). Auftraggeber: Verkehr und Infrastruktur des Kt. Luzern vif, Abteilung Naturgefahren. Bericht 11-153.
- SCHMOCKER-FACKEL, P., NAEF, F. & S. SCHERRER (2006): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 2, 891-906
- ZOLLER, A. & H. CRONAUER (2003): Der Wasserhaushalt von Hochmooreinzugsgebieten in Abhängigkeit der Nutzung. *Hochwasserschutz im Wald*. Hrsg. Bayr. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Fließwege und Speicherung von Niederschlag in subalpinen Einzugsgebieten im Urserntal, Schweiz

Matthias H. Mueller, Christine Alewell

Zusammenfassung

Es wurden vier subalpine Kleinstzugsgebiete im Urserntal (Zentralschweiz) mit unterschiedlichem Buschbestand untersucht und die mittleren Verweilzeiten der Oberflächenwässer modelliert. Ziel der Studie war es, die Auswirkung der sich in den Alpen ausbreitenden Buschvegetation auf die Verweilzeiten des Wassers und dessen Geochemie zu untersuchen. Der zeitliche Verlauf der stabilen Wasserisotope deutet darauf hin, dass ein Teil des Niederschlags durch tiefer gelegene Gesteinsschichten fließt und sich Wässer verschiedener Niederschlagsperioden mischen. Aus geochemischen Daten kann zudem gefolgert werden, dass die Gesteinsformationen teilweise verkarstet sind. Gleichzeitig zeigen zeitlich hoch aufgelöste Messungen während eines Niederschlagsereignisses, dass ein kleiner Teil des Niederschlags sehr schnell die Oberflächengewässer erreicht und die Einzugsgebiete innerhalb weniger Stunden verlässt.

Die Geologie, Pedologie und die Schneeakkumulation und -schmelze haben offenbar in subalpinen, steilen Einzugsgebieten mit einer relativ flachgründigen Bodendecke einen stärkeren Einfluss auf die mittleren Verweilzeiten des Basisabflusses, sowie auf die Abflussspitzen und deren Geochemie als die Vegetationsbedeckung.

1. Einführung

Aus der mittleren Verweilzeit des Wassers in einem Einzugsgebiet können Rückschlüsse über die Speicherung, die Fließwege und die Herkunftsräume des Wassers und seiner Inhaltsstoffe gezogen werden (MCGUIRE et al. 2005). Die Fließwege können durch die Landschaftsstruktur und die Landbedeckung beeinflusst werden (MCDONNELL et al. 2010, MCGUIRE et al. 2005), wobei aber die Bedeutung der Vegetationsbedeckung bisher kaum auf Einzugsgebietsebene untersucht worden ist (z.B. ROA-GARCIA & WEILER 2010). In den letzten Jahrzehnten führte ein Landnutzungswandel in den Schweizer Alpen zu einer Verbuchung ehemals offener Weideflächen (TASSER et al. 2005 und WETTSTEIN 1999). Eine sich daraus ergebende verstärkte Durchwurzelung der Böden könnte zu einer erhöhten Infiltration in die Böden (ALAOUI et al. 2013) und zu einer schnelleren Versickerung in das Gestein führen, wodurch die Verweilzeiten des Basisabflusses verlängert würden (SOULSBY & TETZLAFF 2008).

Es wurden vier subalpine Kleinstzugsgebiete im Urserntal (Zentralschweiz) mit unterschiedlichem Buschbestand untersucht und die mittleren Verweilzeiten der Oberflächenwässer mittels stabiler Wasserisotope modelliert. Ausserdem wurden zur Charakterisierung der Fließwege weitere geochemische Parameter in den Oberflächengewässern erfasst. Ziel der Studie war es, den Einfluss der Vegetationsdecke auf die mittleren Verweilzeiten des Wassers und dessen Geochemie zu beleuchten.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Es wurden vier relativ steile Kleinsteinzugsgebiete (Tabelle 1) im Urserntal (Zentralschweiz, Abbildung 1) mit unterschiedlichem Buschbestand untersucht. Das Urserntal ist ein glazial geprägtes U-Tal und erstreckt sich von 1400 bis 3200 m ü. M.. Entlang der Talachse verläuft eine geologische Grenze, die das nördlich liegende Aarmassiv (Granit) und das sogenannte Altkristallin (Gneise und Migmatite) vom südlich liegenden Gotthardmassiv (Gneise und Granite) trennt (LABHART 1977). Der Talboden und Teile des nördlichen Hangfusses werden der sogenannten Ursernzone zugeschrieben (LABHART 1977). Diese Zone besteht aus permokarbonischen und mesozoischen Sedimenten, die u.a. Sandsteine, Marmore und Kalksteine umfassen können (LABHART 1977). Podsole, Braunerden und podsolierte Braunerden sind die am häufigsten vorkommenden Bodentypen im Urserntal (MEUSBURGER & ALEWELL 2008). In tieferen und flachen Lagen können auch Moorböden, Auenböden und Gleye auftreten. Die Vegetation ist durch Weidenutzung stark anthropogen geprägt (KÄGI 1973). Vor allem an den nordexponierten Hängen haben sich Buschbestände, insbesondere *Alnus viridis*, *Calluna vulgaris*, *Salix appendiculata*, *Sorbus aucuparia* und *Rhododendron ferrugineum*, ausgebreitet (KÄGI 1973, KÜTTEL 1990 und WETTSTEIN 1999). Die südexponierten Hänge werden von Zwergsträuchern (*Rhododendron ferrugineum* und *Juniperus sibirica*) (KÄGI, 1973 und KÜTTEL 1990) und diversen Kraut- und Grasspezies geprägt. WETTSTEIN (1999) schätzt, dass etwa ein Drittel der Buschbestände seit 1959 eingewachsen ist.

Tab. 1: Charakteristika der Kleinsteinzugsgebiete

	Chämleten	Wallenboden	Bonegg	Laubgädem
Fläche ¹ (ha)	1.98	56.43	34.30	2.98
Buschvegetation ¹ (%)	82.2	13.8	38.5	14.5
Höhenlage ² (m ü. M.)	1669 - 1810	1501 - 2354	1551 - 2492	1721 - 1915
mittlere Hangneigung ² (°)	24	20	28	20
mittlere Verweilzeit ² (Wochen)	70	70	64	98

¹Daten von FERCHER (2013) und VAN DEN BERGH et al. (2011) (verändert)

²Daten von MUELLER et al. (2012)

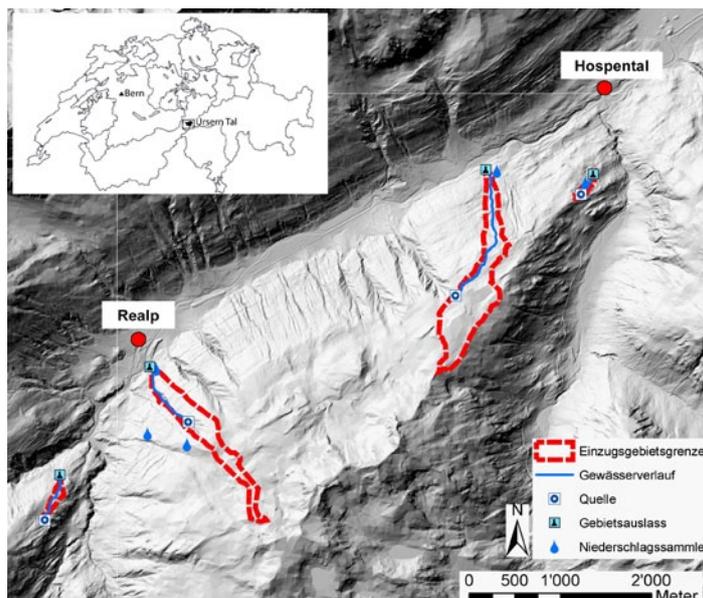


Abb. 1: Lage des Ursern Tals und der Kleinsteinzugsgebiete. Einzugsgebietsgrenzen von FERCHER (2013) und VAN DEN BERGH et al. (2011) (verändert).

2.2 Probenahmen und Analysen

Während zwei Jahren wurden geochemische Parameter (u.a. stabile Wasserisotope, Calcium und gelöster organischer Kohlenstoff, DOC) in den Oberflächenfließgewässern in zweiwöchentlichem Rhythmus und zusätzlich während eines Niederschlagsereignisses zeitlich hoch aufgelöst entnommen. Die Wasserisotope wurden mittels Massen- bzw. Laserspektroskopie (CF-IRMS, DELTAplus XP, Thermo, Bremen, Deutschland bzw. LWIA, Los Gatos Research, Inc. (LGR), Mountain View, USA) ermittelt. Die Messung des Calcium erfolgte über optische Emissionsspektrometrie (ICP-OES, Spectro Genesis, Spectro Analytical Instruments, Deutschland). Der gelöste organische Kohlenstoff wurde mittels TOC Analysator (Shimadzu, Tokyo) quantifiziert. Die mittleren Verweilzeiten wurden anhand der stabilen Wasserisotope des Niederschlags und des Basisabflusses nach dem Ansatz von MALOSZEWSKI & ZUBER (2002) modelliert. Hierbei wird ein Isotopensignal des Abflusses in Abhängigkeit des Isotopensignals des Niederschlags, einer mittleren Verweilzeit und einer Transferfunktion berechnet und mit den gemessenen Isotopensignalen des Abflusses verglichen. Die Transferfunktion beschreibt hierbei die hydraulischen Eigenschaften des Aquifers.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Stabile Wasserisotope in Niederschlag und Abfluss

Das saisonal stark variierende Isotopensignal im Niederschlag (P) war im Basisabfluss (Q) deutlich gedämpft (Abbildung 2). Die Modellierung der mittleren Verweilzeiten ergab unabhängig von der Vegetationsbedeckung 64 bis 98 Wochen für die vier Gebiete (MUELLER et al. 2012). Die starke Dämpfung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Basisabfluss deutet darauf hin, dass ein Teil des sehr schnell infiltrierenden Niederschlags in tiefer gelegenen Gesteinsschichten fließt und sich Wasser verschiedenen Alters im Aquifer mischen. Nur ein kleiner Anteil des Gesamtniederschlags (<10 %) war während der Ereignisbeprobung im Abfluss zu finden. Dieses Ereigniswasser gelangte aber wiederum sehr schnell in die Gewässer und verliess

die Einzugsgebiete innerhalb weniger Stunden. Der Anteil des Ereigniswassers am Hochwasserabfluss betrug während der Abflussspitze bis zu 70 % (Abbildung 2).

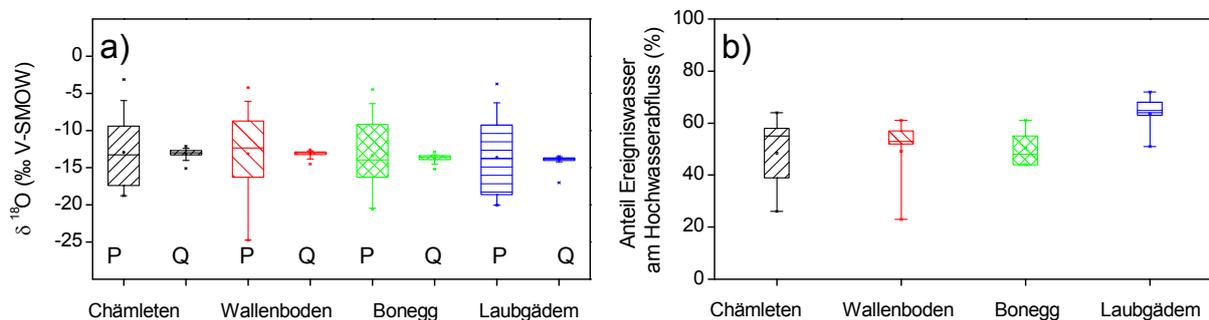


Abb. 2: a) $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in den vier Kleinst Einzugsgebieten Chämleten, Wallenboden, Bonegg, Laubgädem im Niederschlag (P) und Basisabfluss (Q), $n = 50$ pro Gebiet. b) Anteil Ereigniswasser im Hochwasserabfluss während der Abflussspitze.

3.3 Geochemische Parameter

Die für ein reines Gneis-Gebiet relativ hohen Calcium-Konzentrationen (Abbildung 3) legen den Schluss nahe, dass die Wässer durch gips- und/oder kalkhaltige Schichten oder Linsen fließen, die in die anstehenden Gneise eingefaltet sein können (AMBUEHL 1929). Während des Niederschlagsereignisses wiesen die Calcium-Konzentrationen eine Verdünnung auf (Abbildung 3). Das Minimum der Calcium-Konzentrationen von ca. 10 mg L^{-1} fiel hierbei mit der Abflussspitze zusammen. Dies unterstützt die Folgerung, dass Niederschlagswasser, welches niedrige Calcium-Konzentrationen aufweist, schnell in die Oberflächenfließgewässer gelangte.

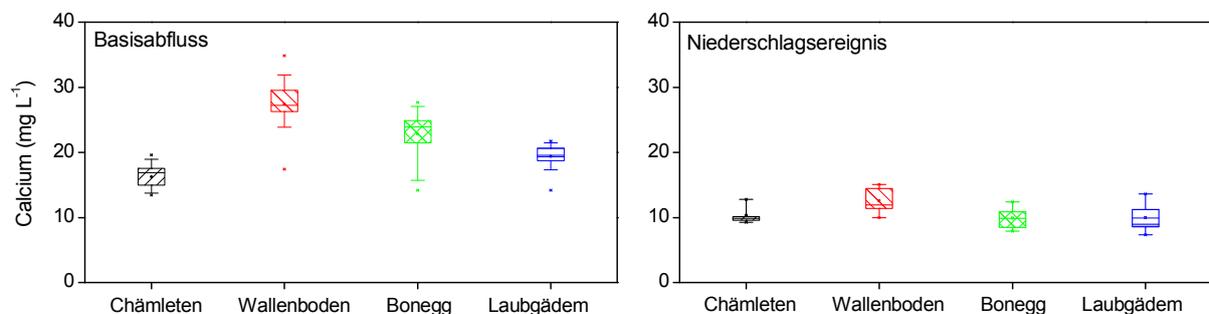


Abb. 3: Calcium-Konzentration bei Basisabfluss und während der Abflussspitze des Niederschlagsereignisses.

Die DOC-Konzentrationen waren während des Basisabflusses insgesamt sehr gering (Abbildung 4). Im Verlauf des Niederschlagsereignisses stiegen sie schnell an und erreichten während der Abflussspitze ein Maximum. Höchstwahrscheinlich wurden während des Niederschlagsereignisses vor allem die Bodenhorizonte, die reich an organischer Substanz sind und teilweise als anmoorig bezeichnet werden können, durchspült. Diese Vermutung wird durch die geringen Calcium-Konzentrationen während der Abflussspitze (Abbildung 3) bestätigt.

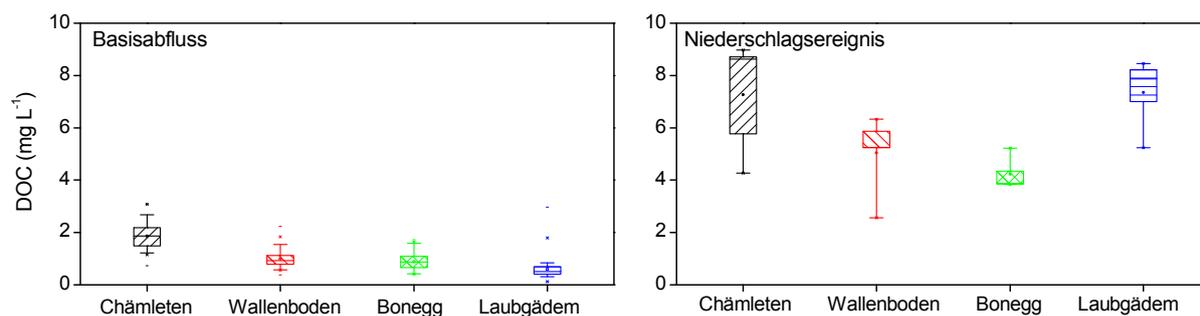


Abb. 4: DOC-Konzentration des Basisabflusses und während der Abflussspitze des Niederschlagsereignisses.

3.4 Hydrogeologie

Aus den mittleren Verweilzeiten, hydrologischen Daten (Abfluss) und dem digitalen Geländemodell wurden hydrogeologische Parameter für die Kleinsteinzugsgebiete abgeschätzt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte (8×10^{-8} bis $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$) und die Porositäten (8×10^{-4} bis 7×10^{-2}) liegen im oberen Bereich, der von FRICK (1994), HIMMELSBACH et al. (1998) und OFTERDINGER (2001) für Kluftaquifere im Gotthard- und Aar-Massiv angegeben wird. Daraus kann gefolgert werden, dass auch das Gestein in den hier untersuchten Gebieten stark zerklüftet ist und Wasser im Gestein fließen und gespeichert werden kann.

3.5 Schlussfolgerung

Mindestens zwei Teilsysteme schienen jeweils in den vier Gebieten auf verschiedenen Zeitskalen abflusswirksam zu sein. Einerseits ein System, das den Basisabfluss speist und mittlere Verweilzeiten von 1.2 bis 1.9 Jahren aufweist. Hierbei fließt das Wasser durch geklüftetes und teilweise verkarstetes Gestein. Andererseits existiert ein oberflächennahes Fließsystem, das in kürzester Zeit durch den infiltrierenden Niederschlag aktiviert wird.

Es konnte kein Einfluss der Vegetationsbedeckung auf die mittleren Verweilzeiten des Basisabflusses sowie dessen Geochemie festgestellt werden. Offensichtlich haben die geologische und pedologische Situation und die Dynamik der Schneeakkumulation und -schmelze in subalpinen, steilen Einzugsgebieten mit einer relativ dünnen Bodendecke einen stärkeren Einfluss als die Vegetationsbedeckung.

Literatur

- ALAOUI, A., WILLIMANN, E., JASPER, K., FELDER, G., HERGER, F. & R. WEINGARTNER (2013): Modelling the effects of land use and climate changes on hydrology in the Ursern valley, Switzerland. –Hydrological Processes, in review.
- AMBUEHL, E. (1929): Petrographie und Geologie des zentralen Gotthardmassivs südlich Andermatt. –PhD Thesis, A.G. Gebr. Leemann.
- FERCHER, M. (2013): Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Hochwassersituation im Urserental: Eine Untersuchung mit dem Model ZEMOKOST. University of Bern.

- FRICK, U. (1994): The Grimsel radionuclide migration experiment - a contribution to raising confidence in the validity of solute transport models used in performance assessment. GEOVAL '94 - Validation Through Model Testing, Proceedings of an NEA/SKI Symposium. OECD Nuclear Energy Agency.
- HIMMELSBACH, T., HOTZL, H. & P. MALOSZEWSKI (1998): Solute transport processes in a highly permeable fault zone of lindau fractured rock test site (Germany). –Ground Water, 36, 792-800.
- KÄGI, H. U. (1973): Die traditionelle Kulturlandschaft im Urserental; Beitrag zur alpinen Kulturgeographie. –PhD thesis at University of Zurich, Switzerland, University of Zürich.
- KÜTTEL, M. (1990): Der subalpine Schutzwald im Urserental - ein inelastisches Oekosystem. –Botanica Helvetica, 100/2.
- LABHART, T. P. (1977): Aarmassiv und Gotthardmassiv, –Berlin, Borntraeger.
- MALOSZEWSKI, P. & A. ZUBER (2002): Manual on lumped-parameter models used for the interpretation of environmental tracer data in groundwaters. In: YURTSEVER, Y. (ed.) Use of Isotopes for Analyses of Flow and Transport Dynamics in Groundwater Systems. Vienna.
- MCDONNELL, J. J., MCGUIRE, K. J., AGGARWAL, P., BEVEN, K. J., BIONDI, D., DESTOUNI, G., DUNN, S., JAMES, A., KIRCHNER, J., KRAFT, P., LYON, S., MALOSZEWSKI, P., NEWMAN, B., PFISTER, L., RINALDO, A., RODHE, A., SAYAMA, T., SEIBERT, J., SOLOMON, K., SOULSBY, C., STEWART, M., TETZLAFF, D., TOBIN, C., TROCH, P., WEILER, M., WESTERN, A., WÖRMAN, A. & S. WREDE (2010): How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. –Hydrological Processes, 24, 1745-1754.
- MCGUIRE, K. J., MCDONNELL, J. J., WEILER, M., KENDALL, C., MCGLYNN, B. L., WELKER, J. M. & J. SEIBERT (2005): The role of topography on catchment-scale water residence time. –Water Resources Research, 41, W05002.
- MEUSBURGER, K. & C. ALEWELL (2008): Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Urseren Valley, Switzerland). –Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, 509-520.
- MUELLER, M. H., WEINGARTNER, R. & C. ALEWELL (2012): Relating stable isotope and geochemical data to conclude on water residence times in four small alpine headwater catchments with differing vegetation cover. –Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 9, 11005-11048.
- OFTERDINGER, U. S. (2001): Ground Water Flow Systems in the Rotondo Granite, Central Alps (Switzerland). –PhD Thesis, University of Zürich.
- ROA-GARCIA, M. C. & M. WEILER (2010): Integrated response and transit time distributions of watersheds by combining hydrograph separation and long-term transit time modeling. –Hydrology and Earth System Sciences, 14, 1537-1549.
- SOULSBY, C. & D. TETZLAFF (2008): Towards simple approaches for mean residence time estimation in ungauged basins using tracers and soil distributions. –Journal of Hydrology, 363, 60-74.

- TASSER, E., TAPPEINER, U. & A. CERNUSCA (2005): Ecological effects of land use changes in the European Alps In: HUBER, U. M., BUGMANN, H. K. M. & REASONER, M. A. (eds.) Global Change and Mountain Regions - A State of Knowledge Overview. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- VAN DEN BERGH, T., HILTBRUNNER, E. & C. KÖRNER (2011): A landcover map and land cover statistics for the Urserntal, Central Alps, Switzerland. Institute of Botany, Section Plant Ecology, University of Basel.
- WETTSTEIN, S. (1999): Grünerlengebüsche in den Schweizer Alpen: Ein Simulationsmodell aufgrund abiotischer Faktoren und Untersuchungen über morphologische und strukturelle Variabilität. University of Bern.

Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Simulation der Bodenfeuchtevariabilität in einem Waldeinzugsgebiet mit HydroGeoSphere

Thomas Cornelissen, Bernd Diekkrüger, Heye Bogena

Zusammenfassung

Messung und Simulation des Musters und der räumlich-zeitlichen Variabilität der Bodenfeuchte sind aktuelle Herausforderungen der Hydrologie. Die vorliegende Studie wendet das Modell HydroGeoSphere auf ein natürliches Wald-Ökosystem an. Um die Eignung des Modells zur Simulation der räumlich-zeitlichen Variabilität und des Musters der Bodenfeuchte zu bestimmen, werden die Simulationsergebnisse mit gemessenen Bodenfeuchtwerten verglichen. Das Modell wird in zwei unterschiedlichen räumlichen Auflösungen eingesetzt, um die Skalenabhängigkeit der kalibrierten Modellparameter, der Wasserbilanz, der Abflusskomponenten, der räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte sowie deren Variogram-Parameter zu untersuchen. Die Ergebnisse der Abflusssimulation zeigen, dass das Modell in der Lage ist, die Merkmale der Abflusssimulation zu reproduzieren. Die Simulation zeigt bei beiden Auflösungen eine Dominanz schnellen Grundwasserflusses. Die Dynamik der gemessenen Bodenfeuchte unterscheidet sich von der simulierten Dynamik am stärksten in 5 cm Tiefe. Während der langfristige Trend der Bodenfeuchte in 50 cm Tiefe gut modelliert wird, können aufgrund der fehlenden Berücksichtigung des präferentiellen Flusses die schnellen Reaktionen der Bodenfeuchte auf Niederschläge nicht simuliert werden. Während andauernder Trockenperioden ist bei beiden Modellauflösungen sowie bei den Messungen eine Abnahme der Varianz der Bodenfeuchte zu beobachten. Das gemessene Muster der Bodenfeuchte des Oberbodens zeigt eine mosaikartige Struktur, die nicht im simulierten Muster vorhanden ist. Dies deutet darauf hin, dass der Einsatz von homogenen Bodeneigenschaften zu Ungenauigkeiten bei der Simulation der Bodenfeuchte führt.

1. Einleitung

Die Bodenfeuchte ist eine Schlüsselgröße des Systems Boden-Pflanze-Atmosphäre, weil sie über zahlreiche Wechselwirkungen mit den Komponenten dieses Systems verknüpft ist. Die Klimabedingungen (WESTERN et al. 2004), der Vegetationstyp (SCHWÄRZEL et al. 2009), die Topographie (GRAYSON et al. 1997), der Bodenfeuchtezustand (PAN & PETERS-LIDARD 2008) sowie die Bodeneigenschaften (VERECKEN et al. 2007) bestimmen die räumlich-zeitliche Variabilität sowie das Muster der Bodenfeuchte, und beeinflussen unter anderem die Abflusssimulation und die Transpiration. Die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte ist u.a. mit geostatistischen Methoden (ROSENBAUM et al. 2012), mit der Methode der zeitlichen Stabilität (BROCCA et al. 2012), von der Plotskala (BUTTAFUOCO et al. 2005) bis zu Einzugsgebietsgrößen von mehreren 1.000 km² (JAWSON & NIEMANN 2007), auf landwirtschaftlichen Flächen (IBRAHIM & HUGGINS 2011), für eine Gras- und Weidelandschaft (WESTERN et al. 2004) sowie für Wälder (SCHWÄRZEL et al. 2009) untersucht worden.

Die Beziehung zwischen mittlerem Bodenwassergehalt und ihrer Varianz wird in der Literatur häufig verwendet, weil sie ein klares Muster aufweist und ein Interpretationsschema liefert, um den Einfluss verschiedener Prozesse auf die Bodenfeuchtevariabilität zu untersuchen. In

einem idealisierten Experiment mit zwei Bodentypen gegensätzlicher Bodenart fanden PAN & PETERS-LIDARD (2008) eine unimodale und nicht-lineare Beziehung zwischen mittlerer Bodenfeuchte und ihrer Varianz mit einem Maximum bei durchschnittlichen Bodenfeuchtwerten. Dies bedeutet, dass die Varianz der Bodenfeuchte bei Befeuchtung zunächst auf durchschnittliche Werte ansteigt, um bei weiterer Befeuchtung wieder abzusinken. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass die Bodenfeuchtevariabilität im Sättigungsbereich durch die Varianz der Porosität begrenzt wird. Weitere Einflussfaktoren auf die Beziehung zwischen mittlerer Bodenfeuchte und ihrer Varianz, wie z.B. Vegetation, Topographie, Bodenwassertransport, Grundwasser etc., wurden durch ROSENBAUM et al. (2012) anhand eines mit einem Bodenfeuchte-Sensornetzwerks ausgestatteten Untersuchungsgebiets identifiziert. BOGENA et al. (2010) betonen, dass zur besseren Identifikation der dominanten Einflussfaktoren auf Bodenfeuchtevariabilität, eine dreidimensionale Modellierung der Bodenwasserflüsse durchgeführt werden muss.

SUDICKY et al. (2008) heben hervor, dass die Kalibrierung der Eigenschaften der ungesättigten Zone sowohl mit räumlich differenzierten Daten (z.B. Bodenfeuchte, Grundwasserpegel) als auch integrierten Werten (z.B. Abfluss, latenter Wärmefluss) die Simulationsergebnisse hydrologischer Modelle verbessern würde. Trotz dieser ermutigenden Hinweise ist eine explizite Analyse und ein Vergleich der simulierten Bodenfeuchte mit physikalisch basierten hydrologischen Modellen für den Maßstab von Einzugsgebieten noch selten (z.B. MAHMOOD & VIVONI 2011, ZHANG & WEGEHENKEL 2006, HERBST & DIEKKRÜGER 2003).

In dieser Studie wird die Skalenabhängigkeit der Bodenfeuchtedynamik und ihrer räumlichen Variabilität unter Einsatz zweier Skalierungsmethoden untersucht. Zum einen wird mittels des physikalisch basierten Modells HydroGeoSphere eine dreidimensionale Simulation der Bodenfeuchtemuster bei verschiedenen räumlicher Auflösung realisiert (prozessbasierte Skalierung), und zum zweiten liefern die Variogrammanalyse und das nachfolgende Krigingverfahren als verhaltensbezogene Skalierungsmethoden einen Vergleich zwischen den gemessenen und den simulierten Bodenfeuchtemustern bei einer bestimmten Auflösung. Durch diese Untersuchung soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit die dreidimensionale Simulation die statistischen Merkmale des beobachteten Bodenfeuchtemusters korrekt wiedergibt.

2. Einzugsgebiet

Das Wüstebach-Einzugsgebiet ist ein Quellgebiet im Eifel-Nationalpark mit einer Fläche von 0,27 km². Seine Höhe liegt zwischen 595 und 628 Metern, die mittlere Neigung beträgt 3,6 % und das maximale Gefälle 10,4 % (BOGENA et al. 2010). Seit 1950 ist das Gebiet mit Norwegischen Fichten bewaldet (*Picea Abies* (L.) H. Karst. (LEHMKUHL et al. 2010)). Das Klima ist warmgemäßigt mit einem mittleren Jahresniederschlag von 1220 mm (1979–1999; BOGENA et al. 2010) und einer Jahresmitteltemperatur von 7°C. Die Böden haben sich in einer 1–3 Meter mächtigen periglazialen Solifluktionsschicht ausgebildet, die über Devonischem Schiefer liegt, der durch sporadische Sandsteineinschlüsse geprägt wird. Braunerden sind im westlichen und Braunerde-Pseudogleye im östlichen Gebietsteil ausgeprägt. In durch Grundwasser dominierten Bereichen, sind Gleye, Pseudogleye und moorige Böden ausgebildet. Die vorherrschende Bodentextur ist schluffiger Lehm.

3. Methoden

Das gekoppelte hydrologische Modell HydroGeoSphere (HGS, THERRIEN et al. 2010) ist ein physikalisch basiertes, dreidimensionales Modell, das oberirdische und unterirdische Fließbewegungen für getrennte Bereiche beschreibt, die durch Interaktionsterme miteinander verbunden sind. Das Modell löst die 3D-Richard's-Gleichung für unterirdische Fließbewegungen und die 2D- bzw. 1D-Diffusionswellen-Approximation der Saint Venant-Gleichung für den Oberflächen- bzw. den Gerinneabfluss. Um zwischen einzelnen Fließkomponenten unterscheiden zu können, wurde HGS mit der ‚hydraulic mixing-cell‘ Methode erweitert, die die Fließkomponenten aus der Massenbilanzgleichung für jede beliebige Modellzelle extrahiert (PARTINGTON et al. 2011). Das Modell verwendet für die Simulation der Interzeption einen Speicheransatz und für die aktuelle Verdunstung den Ansatz von KRISTENSEN & JENSEN (1975). Bei diesem Ansatz hängt die aktuelle Evapotranspiration vom Blattflächenindex und der Wurzelverteilung ab, wobei die Wasseraufnahme der Wurzeln mit einer nichtlinearen Funktion in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte beschrieben wird. Der Beitrag der Bodenfeuchte zur Transpiration ist maximal zwischen der Feldkapazität und dem oxischen Grenzwert und sinkt linear auf null am permanenten Welkepunkt und am anoxischen Grenzwert. Diese Schwellenwerte unterliegen einer Kalibrierung. Das Modellsetup und die Parametrierung wurden durch SCIUTO & DIEKKRÜGER (2010) durchgeführt und dort im Detail beschrieben.

Der Modellbereich wird in 969 Knoten aufgeteilt, einschließlich 164 Knoten für das Flussbett, bei der feineren Auflösung, sowie in 71 Knoten bei der gröberen Auflösung. Vertikal werden 23 Schichten bis in eine Tiefe von 1,5 m bei beiden Auflösungen eingesetzt. Für die feinere Auflösung stammen die Bodendaten aus repräsentativen Profilen für Bodentypen, die in der Bodenkarte des Einzugsgebiets mit einem Maßstab von 1:2'500 (Geologische Übersicht für NRW) festgelegt sind. Bei der gröberen Auflösung wurden die Van Genuchten Parameter (VAN GENUCHTEN 1980) und die Werte der gesättigten Leitfähigkeit durch Berechnung des arithmetischen Mittels hochskaliert (vgl. SCIUTO & DIEKKRÜGER 2010).

Das Modell wird für 2010 kalibriert und für 2011 validiert, jeweils mit einer Spin-Up-Zeit von sechs Monaten für die 25-m- und 100-m-Auflösung. Die Initialisierung des Modells erfolgt mit mittleren gemessenen Sättigungswerten zum 1. Juli 2009 (Kalibrierung) und zum 1. Juli 2010 (Validierung). Die Klimadaten stammen von der TERENO-Station "Schöneseiffen" östlich des Einzugsgebiets, und die Niederschlagsdaten kommen von der meteorologischen Station "Kalterherberg" (betrieben durch den DWD), ungefähr 6 km westlich des Einzugsgebiets. Eine Korrektur der Niederschlagsdaten erfolgte entsprechend dem Verfahren von RICHTER (1995) und führte zu einer Zunahme des Niederschlags um 13 % in beiden Jahren. Schneeschmelze wird mithilfe des Tagesgrad-Verfahren simuliert. Der Tagesgrad-Faktor wird mit gemessenen Schneehöhen der meteorologischen Station "Kalterherberg" kalibriert. Die potentielle Evapotranspiration wird extern mit der FAO Penman-Monteith Crop-Reference-Methode (ALLEN et al. 1998) für tägliche Zeitschritte berechnet. Die Bodenfeuchtedaten werden über das funkbasierte Bodenfeuchte-Sensornetzwerk "SoilNet" (BOGENA et al. 2010) an 150 Punkten mit jeweils drei Sensoren in 5, 20 und 50 cm Tiefe gemessen. Weil das Netz für die Unterstützung geostatistischer Analysen entwickelt wurde, sind 50 Sensoreinheiten in einem regelmäßigen Raster (60 x 60 m) verteilt, während 100 weitere Sensoreinheiten zu-

fallsbedingt verteilt wurden (BOGENA et al. 2010). In dieser Studie werden qualitätsgeprüfte Daten von 112 Messpunkten (1. Juli 2009 bis 31. Dezember 2011) verwendet.

Da die vorliegende Studie auf die raumzeitlichen Muster der Bodenfeuchte und der räumlich-zeitlichen Bodenfeuchtevariabilität ausgerichtet ist, besteht das erste Ziel der Kalibrierung darin, eine gute Übereinstimmung zwischen der beobachteten und der modellierten Bodenfeuchtedynamik zu erreichen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bei den verwendeten Van Genuchten Parametern Einfluss des Skelettgehalts berücksichtigt wurde, sich jedoch die Bodensensoren nicht in skelettreichen Bodenpartien befinden, ergab sich die Notwendigkeit einer Kalibrierung des residualen und des gesättigten Wassergehalts. Aufgrund des Fehlens von Felddaten wurden die Werte des residualen Wassergehalts in einer Tiefe von 5, 20 und 50 cm mit einem räumlich konstanten Kalibrierungsfaktor multipliziert. Zur Berechnung der neuen Porositätswerte wurden die kalibrierten Residualgehalte zur Differenz zwischen den alten Residualgehalten und den alten Porositätswerten addiert.

Das zweite Ziel der Kalibrierung besteht darin, einen Ausgleich zwischen den einzelnen Komponenten der Wasserbilanz zu erreichen. Dies bedeutet, dass die erfolgreiche Simulation der Höhe und Dynamik des Abflusses – gemessen mit dem Nash-Sutcliffe-Koeffizienten (NASH & SUTCLIFFE 1970) und dem Bestimmtheitsmaß – ebenso wichtig ist wie die Höhe der Interzeption und das Verhältnis zwischen Interzeptionsevaporation und Transpiration. Diese Ziele werden durch Veränderungen des Speicherparameters des Kronendachs, der Sättigungswerte, die die Transpiration regulieren, sowie der Porositätswerte erreicht.

Zur Untersuchung des Skaleneffekts auf das Bodenfeuchtemuster werden Variogramm- und Kriging-Analysen durch MATLAB-Algorithmen durchgeführt. Da die feinere Rasterauflösung achtmal mehr Knoten als Bodenfeuchtemesspunkte aufweist, wurden 112 Knoten in möglichst geringer Entfernung zu den Messpunkten ausgewählt, um vergleichbare geostatistische Parameter zu erhalten. Der Einfluss dieser Vorgehensweise auf die mittlere Bodenfeuchte ist marginal, da die Bodenfeuchte in 5 cm durchschnittlich um 2,4 % ansteigt, mit einem maximalen Anstieg von 3,6 %. Trotzdem steigt die Varianz um durchschnittlich 22 % im Oberboden an (der maximale Anstieg liegt bei 74 %). Dies bedeutet, dass ein Anstieg des Sill-Wertes und somit eine Abnahme der Reichweite durch die Auswahl dieser Punkte erwartet werden kann. Für die gemessenen Bodenfeuchtedaten wird ein exponentielles Modell an das experimentelle Semivariogramm unter Einsatz von 30 Raumschritten (Lags) angepasst, mit einer maximalen Entfernung von 300 m und einer Toleranz von 50 %. Die simulierten Bodenfeuchtedaten werden an das sphärische Modell angepasst, mit einer maximalen Entfernung von 300 m, einer Toleranz von 50 % und 10 Raumschritten (Lags). Um Ausreißer bei der Reichweite – Reichweiten, die über die maximalen Distanzen im Einzugsgebiet reichten – für die gröbere Auflösung zu minimieren, musste das theoretische Modell und die Anzahl der Lags angepasst werden. Das Blockkriging wird für ein 10-m-Raster mit einem Suchradius von 300 m für mindestens 4 und maximal 71 für die gröbere Auflösung und maximal 112 für die feine Auflösung durchgeführt.

4. Ergebnisse und Diskussion

Abb. 1 zeigt das Ergebnis der Abflusssimulation bei der 25-m-Auflösung für die Kalibrierung (2010) und Validierung (2011). In beiden Jahren folgt auf die Phase des Schneefalls und der

Schneesmelze eine ausgeprägte Niedrigwasser-Periode zwischen Mai und Mitte August, die 2010 durch einen plötzlichen Rückgang der Abflüsse und eine Periode hoher Abflussdynamik unterbrochen wird. Aufgrund geringer Niederschläge zwischen August und November 2011 tritt der Abflussrückgang erst verspätet Anfang Dezember ein.

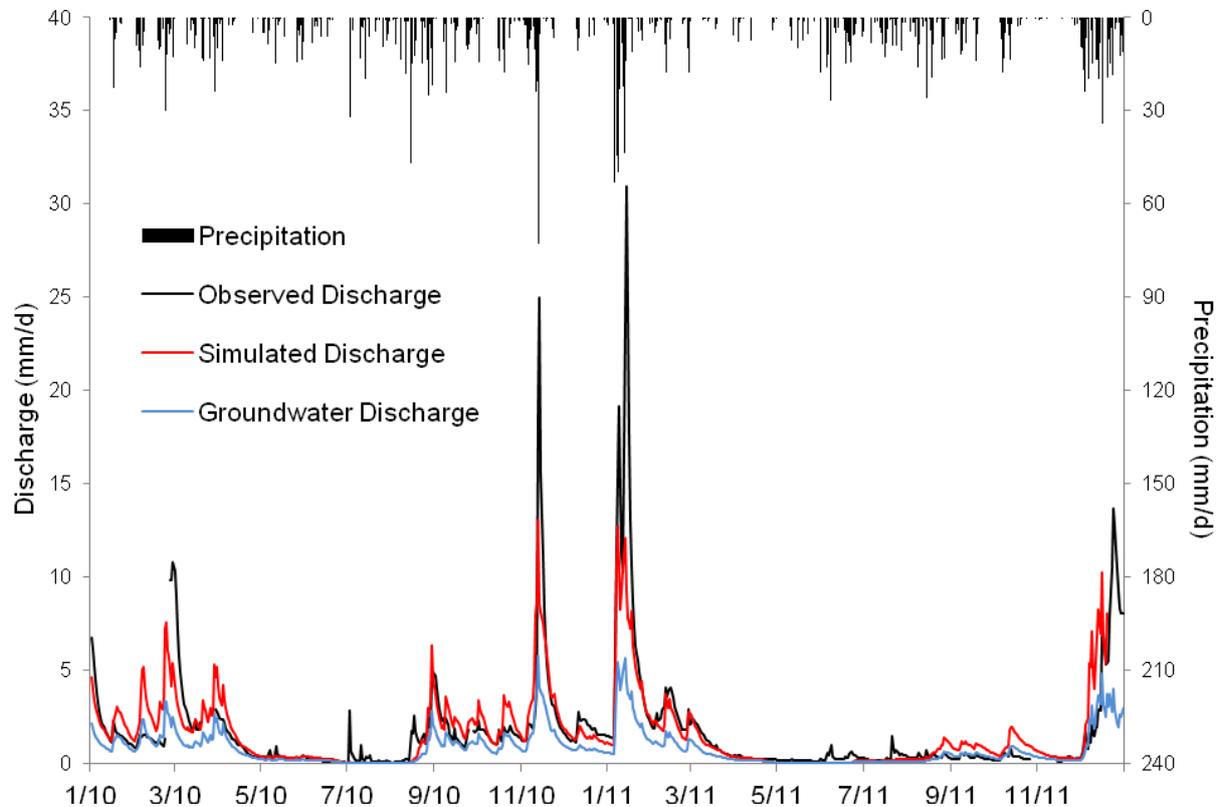


Abb. 1: Ergebnisse der Abflusssimulation der 25-m-Auflösung für 2010 und 2011.

Beide Auflösungen, simulieren erfolgreich die Niedrigwasserphasen mit Ausnahme der Abflussspitzen; der Abflussrückgang im August 2010 fehlt jedoch bei beiden Auflösungen. Außerdem werden bei der feineren Auflösung höhere Abflussspitzen im Sommer und Winter simuliert. Beide Auflösungen zeigen eine Dominanz der schnellen Grundwasserflüsse.

Dieses Ergebnis wird von ZEHE et al. (2010) bestätigt, denen zufolge der schnelle Grundwasserfluss der dominierende Prozess in bewaldeten Quelleinzugsgebieten darstellt. Die schnellen Abflusskomponenten werden jedoch wahrscheinlich aus den falschen Gründen simuliert, weil diese nicht durch den schnell reagierenden Basisfluss verursacht werden, sondern durch den präferentiellen Fluss, der in bewaldeten Einzugsgebieten auftritt (SCHWÄRZEL et al. 2009), vom Modell aber nicht simuliert wird.

Bei beiden Auflösungen überschätzt das Modell den Abfluss während des Kalibrierungszeitraums, vor allem im Winter; es produziert jedoch bessere Simulationsergebnisse während des Validierungszeitraums (Tabelle 1).

Die Maßstabsabhängigkeit des Speicherparameters des Kronendachs sowie der oxischen und anoxischen Grenzwerte ist niedrig, wobei der Speicherparameter des Kronendachs um 0,002 (auf 0,0012) angehoben werden musste, ebenso wie der anoxische Grenzwert um 0,02 (auf 0,97), während der oxische Grenzwert bei Übergang zur höheren Auflösung unver-

ändert blieb. SCIUTO & DIEKKRÜGER (2010) beobachten, dass die Maßstabsvergrößerung bei HGS zu einer Abnahme der Transpiration und damit zu höheren Bodenfeuchtwerten führt. Diese Skalenabhängigkeit wird in dieser Studie durch die Kalibrierung der Porositäten kompensiert, weil die Kalibrierungsfaktoren für die 100-m-Auflösung um eine Einheit niedriger liegen als bei der 25-m-Auflösung.

Tab. 1: Komponenten der Wasserbilanz und statistische Maße für die beiden räumlichen Auflösungen für Kalibrierung und Validierung.

Messwerte	Kalibrierung		Validierung	
Niederschlag (mm)	1230		1308	
Abfluss (mm)	593		605	
Potentielle Evapotranspiration (mm)	689		740	
Simulierte Werte	25 m	100 m	25 m	100 m
Gesamtabfluss (mm)	716	710	665	623
Anteil Grundwasser (%)	91	82	80	66
Interzeption (mm)	223	234	246	265
Transpiration (mm)	275	260	314	329
Aktuelle Evapotranspiration (mm)	498	494	560	594
Bestimmtheitsmaß	0.68	0.58	0.79	0.74
Nash-Sutcliffe Coefficient	0.66	0.57	0.78	0.74

Der Vergleich des zeitlichen Verlaufs der mittleren Bodenfeuchte des Einzugsgebiets zeigt keine Skalenabhängigkeit, jedoch erhebliche Unterschiede zwischen Simulation und Messwerten. So vergleicht Abbildung 2 lediglich die gemessene Bodenfeuchte mit der simulierten Bodenfeuchte in der feineren Auflösung. Die Simulation erfasst nicht die kurzfristige Dynamik in 50 cm Tiefe, gibt die kurzfristige Dynamik in 20 cm Tiefe teilweise wieder, überschätzt jedoch die Dynamik im Oberboden. Die Dynamik in den Tiefen 20 und 50 cm beruht auf vertikalen Flusskomponenten, bedingt durch den bypass flow, der bei Einzugsgebieten mit Fichtenbestand auftritt (SCHWÄRZEL et al. 2009), jedoch durch das Modell nicht simuliert werden. Darüber hinaus fehlt eine erhebliche Wassermenge während des Sommerzeitraums 2010 in sämtlichen Tiefen und bei beiden Auflösungen. Dies könnte auf die Überschätzung der potentiellen Evapotranspiration, das Fehlen eines Aquifers in unserer Simulation oder auf Unsicherheiten bei den Van Genuchten Parametern zurückzuführen sein. Festzustellen ist, dass die Simulation der Bodenfeuchtedynamik lediglich für eine Tiefe von 20 cm erfolgreich ist und in den anderen Tiefen nur den langzeitigen Trend wiedergibt.

Der Vergleich mit publizierten Studien ist nur eingeschränkt möglich, weil beispielsweise HERBST & DIEKKRÜGER (2003) sowie MAHMOOD & VIVONI (2011) nur eine geringe Zahl von Messungen verwenden und ZHANG & WEGEHENKEL (2006) TDR-Messungen einsetzen, die lediglich integrierte Werte über eine bestimmte Schicht bereitstellen.

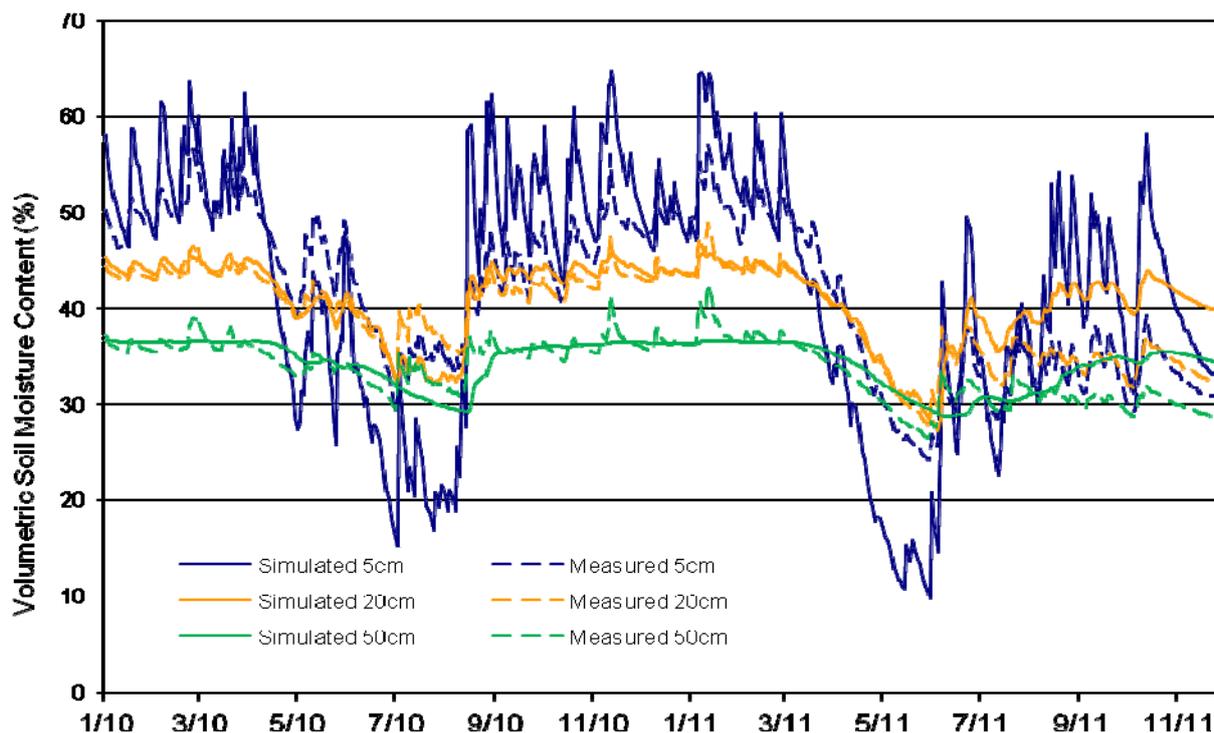


Abb. 2: Ergebnisse der Bodenfeuchtesimulation bei einer Auflösung von 25 m für die Jahre 2010 und 2011

Die nachfolgende Analyse beschränkt sich auf die Bodenfeuchtedynamik des Oberbodens, weil dieser die größte Variation der Bodenfeuchte aufweist. Die Beziehung zwischen der mittleren Bodenfeuchte und ihrer Varianz zeigt einen unimodalen Verlauf bei der gemessenen und simulierten Bodenfeuchte, wie z.B. durch PAN & PETERS-LIDARD (2008) berichtet. Die höchsten Varianzen (192 %) ergeben sich für Bodenfeuchten zwischen 35 und 40 % bei den Messungen sowie zwischen 40 und 45 % bei der gröberen Auflösung (110 %) und zwischen 30 und 45 % bei der feineren Auflösung (97 %). Im Durchschnitt simuliert die feinere Auflösung eine um ca. 9 % geringere Varianzen als die gröbere Auflösung. Während einer Trockenperiode (21.6.10 bis 2.7.10) nimmt die Bodenfeuchte der obersten Bodenschicht für die simulierte und die gemessene Bodenfeuchte linear um 10% ab. Der Rückgang der Varianz ist bei der gemessenen Bodenfeuchte am stärksten (65 %) und bei der gröberen Auflösung am schwächsten ausgeprägt (14 %). Dies lässt sich durch die feiner aufgelöste Topographie im Falle der 25-m-Auflösung erklären. Wenn die Trockenzeit länger andauert, so trocknen jene Flächen aus, die noch ausreichend Bodenwasser für die Transpiration besitzen was die Varianz reduziert (IVANOV et al. 2010).

Abbildung 3 vergleicht die Kriging-Ergebnisse der gemessenen und der simulierten Bodenfeuchte für den ersten und den letzten Tag der Trockenperiode. Lediglich die Simulationsergebnisse der 25-m-Auflösung werden hier präsentiert. Abbildung 3 zeigt, dass das Muster der gemessenen Feuchte der Deckschicht mosaikartig erscheint, wobei jedoch das simulierte Muster nur von der Topographie abhängt, weil die Bodeneigenschaften des Oberbodens aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit je Bodeneinheit als räumlich homogen angenommen werden. Während der Trockenzeit sinkt die Reichweite von 30 m auf 27 m bei der ge-

messenen Bodenfeuchte und von 316 m auf 280 m bei der gröberen Auflösung. Die feinere Auflösung zeigt einen Anstieg der Reichweite von 155 m auf 162 m. Der Rückgang ist bei den Sill-Werten stärker ausgeprägt, mit einer Abnahme von 46 % (von 190 % auf 144 %) für die gemessene Bodenfeuchte sowie von 16 % (von 87 % auf 61 %) für die gröbere und von 85 % (von 183 % auf 98 %) für die feinere Auflösung.

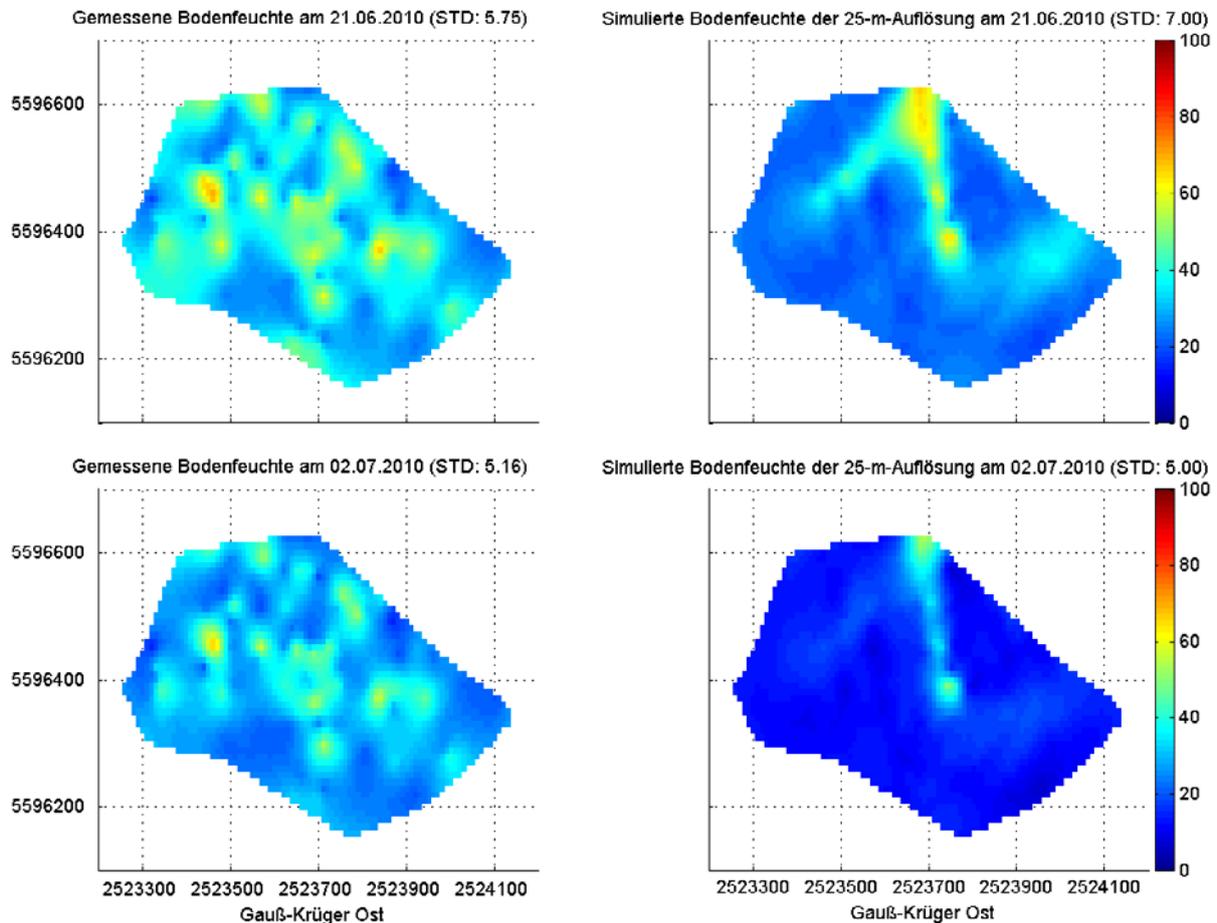


Abb. 3: Simulationsergebnisse für die Bodenfeuchte bei einer Auflösung von 25 m für 2010 und 2011.

5. Zusammenfassung

In dieser Studie wurde ein voll gekoppeltes dreidimensionales hydrologisches Modell auf ein Waldeinzugsgebiet angewandt. Die Simulation des Abflusses und der Bodenfeuchte stimmen gut mit der gemessenen Wasserbilanz und der Abflussdynamik überein. Die Simulation überschätzt die Dynamik der Bodenfeuchte in 5 cm und zeigt ein Wasserdefizit im Sommer in allen Tiefen. Außerdem weist die gemessene Bodenfeuchte eine mosaikartige Struktur auf, die in der Simulation nicht auftritt. Des Weiteren führt das Hochskalieren der nicht-linearen Transpirationsfunktion von HGS nicht zu einer ausgeprägten Skalenabhängigkeit der Transpirationsanpassungsparameter, denn die Kalibrierung der Porositäten kompensiert diese. Das Fehlen der kurzfristigen Dynamik der Bodenfeuchte in 50 cm Tiefe darauf hin, dass das Modell HGS einen bedeutenden Teil der hydrologischen Prozesse nicht abdeckt. Zukünftige Arbeiten versuchen durch den Einsatz eines weiteren Modells und durch die Er-

weiterung des Modells in größere Tiefen unterhalb des Grundwasserspiegels, die Muster der gemessenen Bodenfeuchte und die Dynamik des Oberbodens besser zu simulieren.

Danksagung

Die Autoren danken Rob McLaren (Universität Waterloo) für die uns erteilte Erlaubnis, sein Softwarepaket (HGS und Grid Builder) einzusetzen und für seine Unterstützung. Wir danken dem Deutschen Wetterdienst für die Bereitstellung der Wetterdaten und an die Deutsche Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Projektes C1 des Transregional Collaborative Research Centre 32 "Patterns in Soil-Vegetation-Atmosphere Systems". Die Autoren danken herzlich Daniel Partington (Universität Adelaide) für seine Bereitstellung des Baseflow-Filters für HGS sowie für seine intensive Unterstützung.

Literatur

- ALLEN, R.-G., PEREIRA, L.-S., RAES, D. & M. SMITH (1998): Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and drainage paper 56.
- BOGENA, H.-R., HERBST, M., HUISMAN, J.-A., ROSENBAUM, U., WEUTHEN, A. & A. VERECKEN (2010): Potential of Wireless Sensor Networks for Measuring Soil Water Content Variability. -Vadose Zone Journal 9:1002–1013.
- BROCCA, L., TULLO, T., MELONE, F., MORAMARCO, T. & R. MORBIDELLI (2012): Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. -Journal of Hydrology 422-423:63-75.
- BUTTAFUOCO, G., CASTRIGNANÒ, A., BUSONI, E. & A.-C. DIMASE (2005): Studying the spatial structure evolution of soil water content using multivariate geostatistics. -Journal of Hydrology 311:202–218.
- GRAYSON, R.-B., WESTERN, A.-W., CHIEW, F. & G. BLÖSCHL (1997): Preferred states in spatial soil moisture patterns - Local and nonlocal controls. -Water Resources Research 33:2897–2908.
- HERBST, M. & B. DIEKKRÜGER (2003): Modelling the spatial variability of soil moisture in a micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. -Physics and Chemistry of the Earth 28:239–245.
- IBRAHIM, H.-M. & D.-R. HUGGINS (2011): Spatio-temporal patterns of soil water storage under dryland agriculture at the watershed scale. -Journal of Hydrology 404:186–197.
- IVANOV, V.-Y., FATCHI, S., JENERETTE, D.-G., ESPELETA, J.-F., TROCH, P.-A. & T.-E. HUXMAN (2010): Hysteresis of soil moisture spatial heterogeneity and the “homogenizing” effect of vegetation. -Water Resources Research 46.
- JAWSON, S.-D. & J.-D. NIEMANN (2007): Spatial patterns from EOF analysis of soil moisture at a large scale and their dependence on soil, land-use, and topographic properties. -Advances in Water Resources 30:366–381.
- KRISTENSEN, K. & S. JENSEN (1975): A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. -Nordic Hydrology 6:170-188.
- LEHMKUHL, F., LOIBL, D. & H. BORCHARDT (2010): Geomorphological map of the Wüstebach (Nationalpark Eifel, Germany)—an example of human impact on mid-European mountain areas. -Journal of Maps 6:520–530.

- MAHMOOD, T.-H. & E.-R. VIVONI (2011): Breakdown of hydrologic patterns upon model coarsening at hillslope scales and implications for experimental design. –*Journal of Hydrology* 411:309–321.
- NASH, J. & J. SUTCLIFFE (1970): River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. –*Journal of Hydrology* 10:282-290.
- PAN, F. & C.-D. PETERS-LIDARD (2008): On the Relationship Between Mean and Variance of Soil Moisture Fields. –*Journal of the American Water Resources Association* 44:235–242.
- PARTINGTON, D., BRUNNER, P., SIMMONS, C.-T., THERRIEN, R., WERNER, A.-D., DANDY, G.-C. & H.-R. MAIER (2011): A hydraulic mixing-cell method to quantify the groundwater component of streamflow within spatially distributed fully integrated surface water-groundwater flow models. –*Environmental Modelling & Software* 2011 25:886-898.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 194.
- ROSENBAUM, U., BOGENA, H.-R., HERBST, M., HUISMAN, J.-A., PETERSON, T.-J., WEUTHEN, A., WESTERN, A.-W. & H. VEREECKEN (2012): Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale. –*Water Resources Research* 48.
- SCHWÄRZEL, K., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., HÄNTZSCHEL, J., GRÜNWALD, T., KÖSTNER, B., BERNHOFER, C. & K.-H. FEGER (2009): Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes - A comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt forest (Saxony, Germany). –*Agricultural and Forest Meteorology* 149:1994–2006.
- SCIUTO, G. & B. DIEKKRÜGER (2010): Influence of soil heterogeneity and spatial discretization on catchment water balance modeling. –*Vadose Zone Journal* 9:955–969.
- SUDICKY, E.-A., JONES, J.-P., PARK, Y.-J., BROOKFIELD, A.-F. & D. COLAUTTI (2008): Simulating complex flow and transport dynamics in an integrated surface-subsurface modeling framework. –*Geosciences Journal* 12:107–122.
- THERRIEN, R., McLAREN, R.-G., SUDICKY E.-A. & S.-M. PANDAY (2010): HydroGeoSphere. A Three-Dimensional Numerical Model Describing Fully-integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport - Model Description.
- VAN GENUCHTEN, M.-T. (1980): A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. –*Soil Science Society of America Journal* 44:892-898.
- VEREECKEN, H., T., KAMAI, T., HARTER, T., KASTEEL, J., HOPMANS & J. VANDERBORGHT (2007): Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture - A stochastic unsaturated flow perspective. –*Geophysical Research Letters* 34.
- WESTERN, A.-W., ZHOU, S.-L., GRAYSON, R.-B., McMAHON, T.-A., BLÖSCHL, G. & D.-J. WILSON (2004): Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. –*Journal of Hydrology* 286:113–134.
- ZEHE, E., T., GRÄFF, M., MORGNER, A., BAUER & A. BRONSTERT (2010): Plot and field scale soil moisture dynamics and subsurface wetness control on runoff generation in a headwater in the Ore Mountains. –*Hydrology and Earth System Science* 14:873–889.

ZHANG, Y. & M. WEGEHENKEL (2006): Integration of MODIS data into a simple model for the spatial distributed simulation of soil water content and evapotranspiration. -Remote Sensing of Environment 104:393–408.

Wassergebundener Stofftransport in Flusseinzugsgebieten: verbessertes Verständnis durch Synthese von „Top-down“ und „Bottom-up“ Modellansätzen

Benny Selle, Marc Schwientek, Karsten Osenbrück

Zusammenfassung

Die kombinierte Anwendung von „Bottom-up“ und „Top-down“ Ansätzen kann zu einem besseren Verständnis des wassergebundenen Stofftransportes in Flusseinzugsgebieten beitragen, da sich diese sinnvoll ergänzen. „Bottom-up“ Ansätze beinhalten typischerweise die Anwendung von räumlich expliziten Prozessmodellen. Diese können das Fließgeschehen - insbesondere den Einfluss heterogener Transporteigenschaften in der Modelldomäne und variabler Randbedingungen - umfassend abbilden. „Top-down“ Ansätze nutzen integrale Beobachtungen, um dominante Prozesse zu quantifizieren, welche anschließend verortet werden müssen. Oft werden dabei nur minimale Annahmen zu Wirkungszusammenhängen benötigt, um Schlüsselprozesse und deren Steuergrößen abzuleiten. In dieser Studie wurde das 180 km² große Ammereinzugsgebiet in Baden-Württemberg untersucht, welches zur Trinkwassergewinnung aus Grundwässern des Oberen Muschelkalkes genutzt wird. In einem ersten Schritt wurden Konzentrationen von Hauptionen, ausgewählten organischen Spurenstoffen und Umwelttracern an Grundwasserbrunnen analysiert. Dabei wurden typische „Top-down“ Verfahren wie die Hauptkomponentenanalyse und Speicher-Durchfluss-Modelle angewendet, um ein erstes Verständnis zu den Fließpfaden und -zeiten des Wassers und der darin gelösten Stoffe zu entwickeln. Die durch dieses Vorgehen erhaltenen Hypothesen bezüglich der unterirdischen Fließpfade und -zeiten wurden anschließend mit einem numerischen Grundwassermodell – also einem typischen Vertreter eines „Bottom-up“ Ansatzes – überprüft. Die Synthese der oben beschriebenen Ansätze ergab ein relativ konsistentes Bild der dominanten Prozesse, die die Wassergüte in den Tiefbrunnen des Ammereinzugsgebietes steuern. Mit Agrochemikalien angereicherte Sickerwässer sind in den Trinkwasserbrunnen einer relativ sauberen Komponente, die älter als 50 Jahre ist, zugemischt. Die meisten der geförderten Trinkwässer weisen aufgrund von Abbauvorgängen, vor allem aber wegen ihres relativ großen Anteils der alten Komponente, noch eine gute Qualität auf. Diese wird allerdings in absehbare Zeit beeinträchtigt, wenn die durch lange Fließzeiten verzögerten Schadstofffronten durchbrechen oder sich die Bedingungen für mikrobielle Umsätze verschlechtern würden, etwa durch Erschöpfung geeigneter Elektronendonoren.

1. Einleitung

Wie in Abbildung 1 dargestellt, gibt es zwei grundlegende Herangehensweisen (KLEMEŠ, 1983), um zu einem Verständnis des Wasser- und Stofftransportes auf der Einzugsgebietskala zu gelangen.

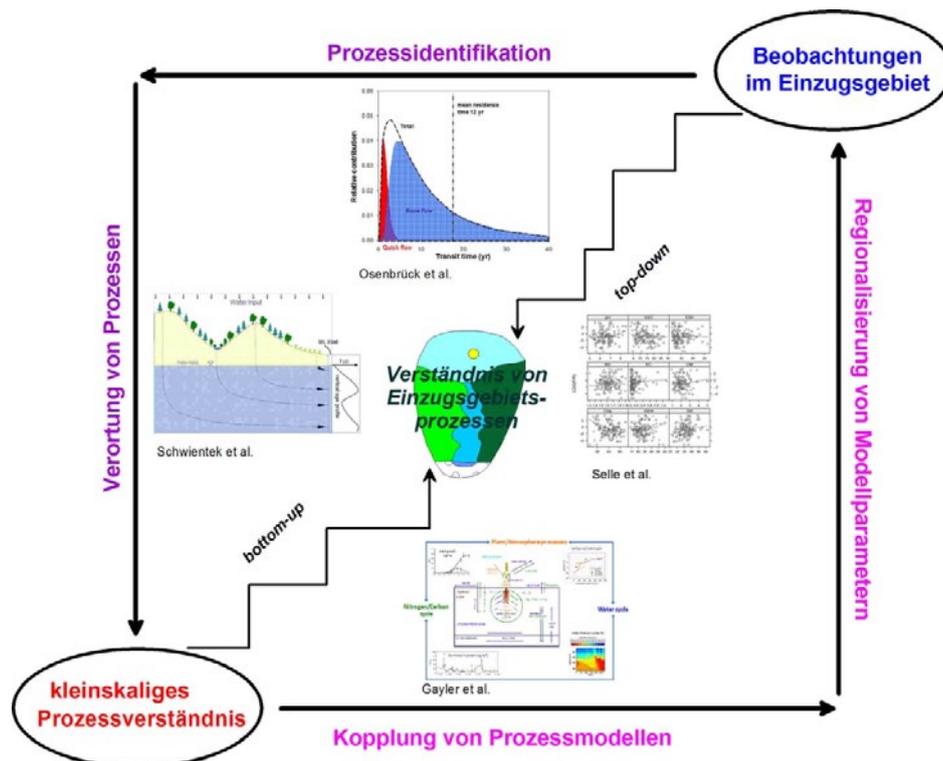


Abb. 1: Synthese von „Top-Down“ und „Bottom-Up“ Modellansätzen.

Beim „Bottom-Up“ Modellansatz sind Prozessmodelle der Ausgangspunkt, welche typischerweise in kleinskaligen Studien entwickelt wurden und sich oft auf einen bestimmten Prozess und ein spezielles Umweltkompartiment, wie z.B. den Wassertransport im Boden, beschränken. Diese lokalen Prozessmodelle müssen dann in einem ersten Schritt über verschiedene Kompartimentgrenzen hinweg gekoppelt werden; oder man koppelt beispielsweise den Wasser- und Stofftransport miteinander. In einem zweiten Schritte müssen diese gekoppelten Modelle dann für die größere Skala parametrisiert werden, wobei Regionalisierungsverfahren zum Einsatz kommen. Der „Top-Down“ Modellansatz geht von Beobachtungen auf der Einzugsgebietsebene aus und versucht zunächst Prozesse zu identifizieren, die diese Beobachtungen möglichst einfach erklären. Dabei kommen oft multivariate statistische Verfahren zum Einsatz. In einem zweiten Schritt müssen die gefundenen Prozesse dann verortet werden, was sich meistens schwieriger als der erste Schritt gestaltet. Allgemein gesagt, ist der zweite Schritt bei beiden Ansätzen schwieriger: also die Parametrisierung bei den „Bottom-Up“ Verfahren und die Verortung bei den „Top-Down“ Ansätzen. Hier kommt man bei komplexen Modellanwendungen auf der Einzugsgebietsskala ohne Annahmen oft nicht aus. Da beide Ansätze diese Schwierigkeiten mit sich bringen, ist eine Synthese notwendig. Deshalb stellten wir die Hypothese auf, dass man nur durch die Integration von „Top-Down“ und „Bottom-Up“ Ansätzen belastbare und detaillierte Aussagen zu Einzugsgebietsprozessen gewinnen kann. Eine Synthese beider Modellansätze wurde beispielhaft anhand des Ammereinzugsgebietes untersucht. Hier sollte ein Verständnis von Prozessen erreicht werden, die die Wassergüte im Grundwasser steuern.

2. Untersuchungsgebiet

In dieser Studie wurde das 180 km² große Grundwassereinzugsgebiet der Ammer bei Pfäffingen in Baden-Württemberg untersucht (Abbildung 2). Die Ammer, mit einem mittleren Abfluss von etwa 1 m³/s, wird vorwiegend aus Grundwässern des Oberen Muschelkalks (mo) und Gipskeupers (km1) gespeist. Im Einzugsgebiet werden ca. 100 l/s Trinkwasser aus Tiefbrunnen im gespannten Oberen Muschelkalk gefördert. Das Einzugsgebiet hat einen hohen Anteil an Siedlungs- (17%) und Ackerflächen (71%).

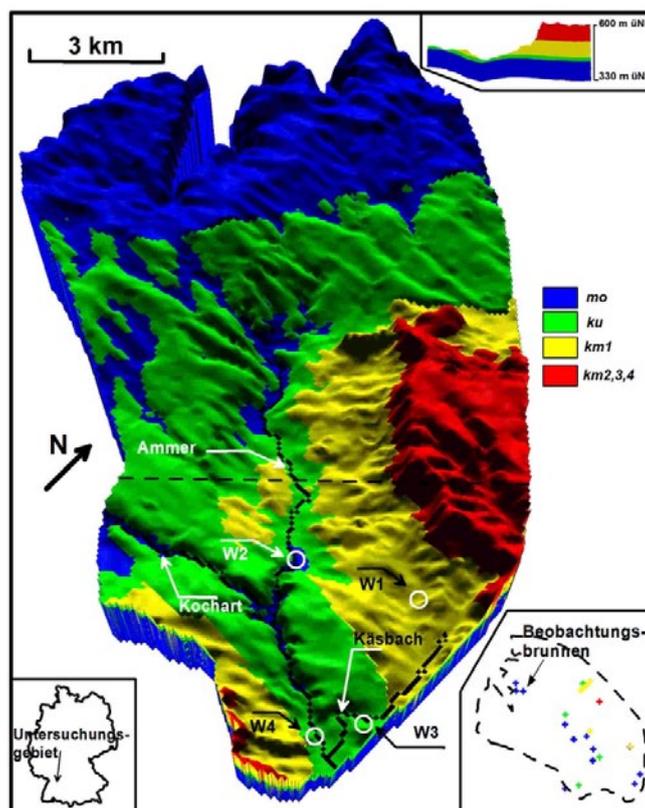


Abb. 2: Grundwassereinzugsgebiet der Ammer bei Pfäffingen mit Ammer und Nebenbächen (gerastert), Trinkwasserbrunnen (weiße Kreise) und hydrogeologischen Einheiten: *mo* (Oberer Muschelkalk), *km1* (Gipskeuper), *ku* (Lettenkeuper) und *km2,3,4* (Schilfsandstein, Bunte Mergel und Stubensandstein, nehmen im Wesentlichen den Schönbuch ein). Gestrichelte Linie markiert den rechts oben dargestellten hydrogeologischen Schnitt durch das Gebiet. Die Beobachtungsbrunnen (rechts unten) sind farbcodiert.

3. „Top-Down“ Modellansatz

Ausgangspunkt für die „Top-Down“ Analyse waren Daten für die Tiefbrunnen im Oberen Muschelkalk, wobei gemessene Konzentrationen von Hauptionen, Sauerstoff, das Redoxpotentials sowie Tritium- und Schwefelhexafluorid-Gehalte zu Verfügung standen. Zuerst wurden diese einzugsgebietsbezogenen Daten mit Hilfe von einer Hauptkomponentenanalyse und Speicher-Durchfluss-Modellen – als typischen Vertretern von „Top-Down“ Ansätzen – untersucht. Mit diesen Verfahren wurden die verfügbaren Daten so aufbereitet, das sie für einen Hypothesentest durch einen „Bottom-Up“-Ansatz verwendet werden konnten. Dies schloss

sowohl die Prozessidentifikation als auch die anschließende ungefähre Verortung der identifizierten Prozesse ein.

Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse wurden zwei Prozesse identifiziert, die die gemessene Wassergüte in den Tiefbrunnen erklärten. Das waren einerseits die Zumischung junger, landwirtschaftlich geprägter Grundwasserneubildung zu einer dominanten alten, relativ sauberen Komponente, und andererseits mikrobiell gesteuerte Redoxprozesse. Interessanterweise war – für die beobachtete Variabilität der Nitratkonzentrationen – die Zumischung junger, belasteter Wässer wichtiger als Redoxprozesse. Für weitere Details zur Untersuchung der Wasserqualität im Ammereinzugsgebiet mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse wird auf SELLE et al. (2013a) verwiesen.

Durch den Vergleich der Sulfatkonzentrationen in den Brunnenwässern mit denen der Gipskeuperquellen konnte abgeleitet werden, dass die Neubildungsgebiete der Brunnen im nicht mit Gipskeuper überdeckten Bereich des Einzugsgebietes liegen müssen (Abbildung 2). Dadurch, und durch die Ableitung von Fließzeiten aus den gemessenen Tritium- und Schwefelhexafluorid-Gehalten, konnten die Alter und Herkunftsräume der – mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse bereits identifizierten – alten und jungen Grundwasserkomponenten herausgearbeitet werden. Die Trinkwasserbrunnen im Ammertal speisen sich demnach aus zwei Komponenten mit unterschiedlichem Alter und Neubildungsgebieten: eine alte Komponente > 50 Jahre mit dem Neubildungsgebiet nördlich des Schönbuch und eine relativ junge Komponente mit einem mittleren Alter von etwa 10 Jahren, die hauptsächlich aus dem Einzugsgebiet westlich der Ammer kommt. Beide Grundwasserkomponenten werden wahrscheinlich durch Redoxprozesse beeinflusst.

4. „Bottom-Up“-Modellansatz und Synthese

Das mit dem „Top-Down“-Modellansatz erstellte und oben beschriebene konzeptionelle Modell von den Fließpfaden und -zeiten zu den Trinkwasserbrunnen wurde mit einem „Bottom-Up“-Ansatz im Sinne eines Hypothesentests überprüft.

Als typischer „Bottom-Up“-Ansatz wurde ein stationäres, dreidimensionales Grundwassermodell erstellt, das den Untergrund mit seinen einzelnen hydrogeologischen Einheiten (Abbildung 2) detailliert abbildet. Dem Modell wurden geeignete Randbedingungen zugewiesen, und die hydraulischen Eigenschaften für die einzelnen hydrogeologischen Einheiten wurden über gemessene Grundwasserstände (Abbildung 2) angepasst. Detailliertere Informationen zum Modell und den erzielten Ergebnissen finden sich in SELLE et al. (2013b).

Um den Unsicherheitsraum dieses komplexen Grundwassermodells zu durchleuchten, wurden verschiedene Fallrechnungen durchgeführt, die sich in der Art, wie das Grundwasser in die Vorfluter gelangte, unterschieden. Im ersten Rechenfall erfolgten Grundwasserzutritte über diskrete Quellen; im zweiten Fall als diffuser Prozess über das gesamte Gewässernetz. Im Rechenfall mit dem Grundwasserzustrom über Quellzutritte ergab sich zwar eine deutlich schlechtere Modellanpassung an die Grundwasserstände als für den anderen Rechenfall. Im Gegensatz zur Modellanpassung waren die Fließpfade aber wesentlich plausibler; und die mit dem „Top-Down“ Ansatz abgeleiteten Neubildungsgebiete waren gut zu erkennen. Eine Modellauswahl anhand der Güte der Modellanpassung war hier also nicht hilfreich, da die Modellunsicherheiten nicht hinreichend bekannt waren. Die Modellergebnisse aus dem Re-

chenfall mit den Quellzutritten können aber, trotz der vergleichsweise schlechten Modellanpassung, extrem nützlich sein, da sie detailliertere Informationen zum Fließgeschehen liefern, als der „Top-Down“ Ansatz. Die Abweichungen von den beobachteten Grundwasserständen sind wahrscheinlich tolerierbar, da es sich um ein stationäres Grundwassermodell handelte und die Grundwasserstände zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen wurden.

5. Schlussfolgerungen

Nur die Synthese von „Top-Down“ und „Bottom-Up“-Modellansätzen führte zu belastbaren Aussagen zum Wasser- und Stofftransport auf der Einzugsgebietsskala; und zu einem detaillierten Prozessverständnis. Durch eine Kombination konnten detailliertere Erkenntnisse erzielt werden als mit dem „Top-Down“ Ansatz allein. Die ausschließliche Anwendung von „Bottom-Up“-Modellansätzen kann zu falschen Ergebnissen führen. Zur weiterführenden Erfassung des reaktiven Fließgeschehens im Boden und im Grundwasser wäre wiederum eine Synthese der beiden Modellansätze notwendig.

Die praktische Bedeutung der bisher gewonnenen Ergebnisse aus Sicht der Grundwasserbewirtschaftung liegt auf der Hand. Die Wasserqualität in den Brunnen ist derzeit noch gut, da ein hoher Anteil alter Wässer gefördert wird; aber sie wird sich in absehbarer Zukunft wahrscheinlich verschlechtern, wenn die durch lange Fließzeiten verzögerten Schadstofffronten durchbrechen oder sich die Bedingungen für mikrobielle Umsätze verschlechtern würden, etwa durch Erschöpfung geeigneter Elektronendonoren.

Literatur

- KLEMEŠ, V. (1983): Conceptualization and scale in hydrology. – *Journal of Hydrology* 65:1-23
- SELLE, B., SCHWIENTEK, M. & G. LISCHIED (2013a): Understanding processes governing water quality in catchments using principal component scores. - *Journal of Hydrology*, im Druck
- SELLE, B., RINK, K. & O. KOLDITZ (2013b): Recharge and discharge controls on groundwater travel times and flow paths to production wells for the Ammer catchment in southwestern Germany. –*Environmental Earth Sciences*, im Druck

Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz (CCHydro)

David Volken, Bruno Schädler

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro) des Bundesamts für Umwelt (BAFU) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Schweiz bis zum Jahr 2100 untersucht. Bis Ende des Jahrhunderts werden die jährlich verfügbaren Wasserressourcen nur leicht abnehmen. Die jahreszeitlichen Verteilungen der Abflüsse (Abflussregimes) hingegen werden sich beinahe in der ganzen Schweiz verschieben. Dies ist auf die temperaturbedingten Speicheränderungen (Schnee, Eis) sowie auf eine erwartete saisonale Umverteilung der Niederschläge zurückzuführen: im Winter mehr Niederschlag in Form von Regen, im Sommer deutlich weniger Niederschlag und reduzierte Schmelzwassermengen. Im Winter wird in vielen Gebieten deutlich mehr Abfluss, im Sommer jedoch weniger – ausser in den noch vergletscherten Gebieten – erwartet. Deshalb wird sich im grössten Teil des Mittellandes die potenzielle Hochwasserzeit vom Frühsommer in das Winterhalbjahr verschieben und teilweise auch verlängern. Hochwasser- und insbesondere Niedrigwasserereignisse werden wahrscheinlich vermehrt auftreten – vor allem in sensitiven Regionen wie dem Mittelland, dem Wallis oder dem Tessin.

1. Einleitung

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) hatte im Jahre 2008 das Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz (CCHydro) mit dem Ziel lanciert, basierend auf den neusten Klimaszenarien für die verschiedenen Klimaregionen und Höhenstufen der Schweiz zeitlich und räumlich hochaufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufs und der Abflüsse für die Zeitperioden um 2035 und 2085 zur Verfügung zu stellen (VOLKEN 2010). Ein weiteres, wichtiges Ziel des Projekts war die Bereitstellung von wissenschaftlichen hydrologischen Grundlagen zur Erarbeitung einer Strategie zur Anpassung an die Klimaänderung (BAFU 2012a).

Insgesamt umfasste das Projekt CCHydro sieben verschiedene Module, welche von folgenden Forschungsgruppen bearbeitet worden sind:

- Klimaszenarien für die Schweiz bis ins Jahr 2100, Institut für Atmosphäre und Klima IAC, ETH Zürich
- Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Gross-Einzugsgebiete, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Geographisches Institut der Universität Zürich GIUZ
- Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB
- Klimaänderung und Niedrigwasser, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB
- Abflussmodellierung von Schweizer Gletschern, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich VAW
- Klimaänderung und Hochwasser, HYBEST GmbH
- Klimaänderung und Wassertemperatur (Pilotstudie), Laboratoire de mécanique des fluides de l'environnement et de l'hydrologie EPF Lausanne.

Die wichtigsten Ergebnisse sind in einem Synthesebericht (BAFU 2012b) festgehalten. Alle weiteren Informationen können auf der Website des BAFU www.bafu.admin.ch/projekt-cchydro eingesehen werden.

2. Methoden

Um in einem derart grossen Projekt, in dem verschiedene Forschungsgruppen mit arbeiten, vergleichbare Ergebnisse zu gewinnen, war es unerlässlich, auf gemeinsamen wichtigen Grundlagen zu basieren. Abbildung 1 gibt die Zusammenhänge und die verwendeten Grundlagen schematisch wieder. Allen Teilprojekten wurden dieselben Klimaszenarien, wie sie in Kapitel 3 beschrieben werden, verbindlich zur Verfügung gestellt. Auch wurde in allen Projekten mindestens die Perioden 2021–2050 (nahe Zukunft) und 2070–2099 (ferne Zukunft) jeweils im Vergleich zur Referenzperiode 1980–2009 berücksichtigt. Da die Veränderungen der vergletscherten Flächen in den hydrologischen Modellen von zentraler Bedeutung sind, wurden die Gletscherszenarien, wie sie von LINSBAUER et al. (2012) mit dem Modell GWL-Verschiebung abgeschätzt worden sind, verwendet. Alle verwendeten hydrologischen Modelle sind spezifisch angepasste Varianten des Modells PREVAH (VIVIROLI et al. 2009). Dabei werden alle wichtigen hydrologischen Prozesse umfassend auf der Grundlage von detaillierten meteorologischen Daten und von Daten welche die Einzugsgebiete und deren Landnutzung räumlich hoch aufgelöst beschreiben, berücksichtigt.

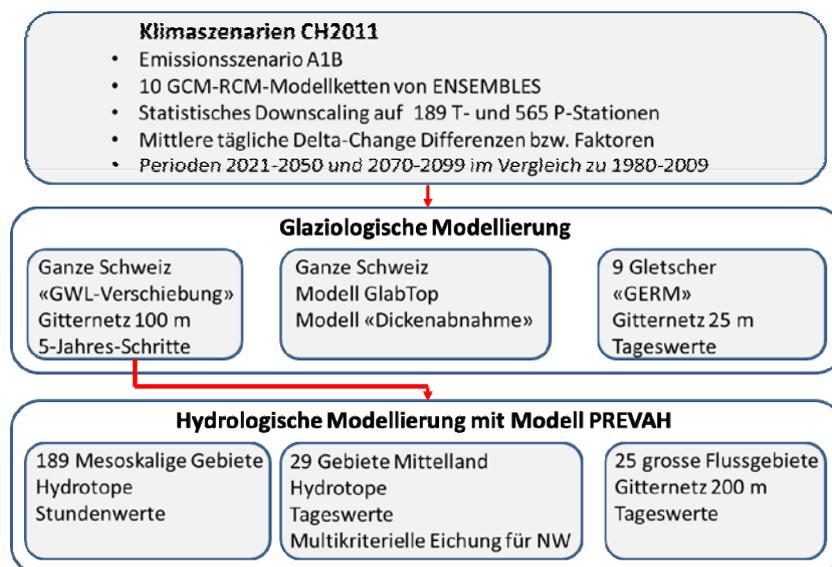


Abb. 1: Verwendete Grundlagen und Modelle und deren Zusammenspiel

3. Klimaszenarien

Innerhalb des Projekts CCHydro wurden Daten von 10 regionalen Klimamodellen des europäischen Projekts ENSEMBLE aufbereitet. Diese Klimaszenarien basieren auf dem A1B-Emissionsszenario vom IPCC und sind täglich und lokal verfügbar (BOSSHARD et al. 2011). Dazu wurde die Delta Change Methode auf die beiden Parameter Lufttemperatur und Niederschlag und die beiden Szenarioperioden 2021–2050 und 2070–2099 angewandt. Die Resultate zeigen einerseits eine grosse Bandbreite der projizierten Veränderungen der Temperatur und des Niederschlages (Abbildung 2). Andererseits lassen sich auch trotz der gros-

sen Unsicherheit einige robuste Aussagen über die projizierte Klimazukunft machen. Die Modellrechnungen sagen für die nächsten Jahrzehnte für alle Jahreszeiten und alle Regionen

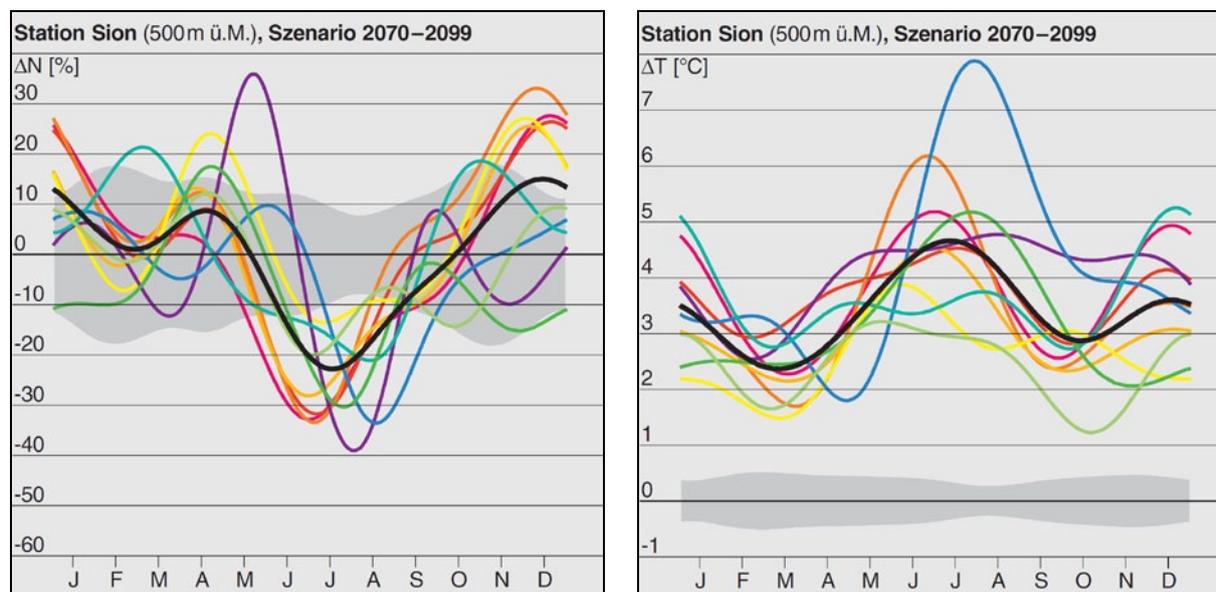


Abb. 2: Jahresgänge der Temperaturänderung ΔT (links) und Niederschlagsänderung ΔN (rechts) im Vergleich der Referenzperiode 1980 bis 2009 für die Station Sion für die Periode 2070 bis 2099. Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der 10 genutzten Modellketten (farbige Linien), der graue Bereich die Standardabweichung der natürlichen Variabilität (BOSSHARD et al. 2011; CH2011 2011; SGHL 2011).

	2021–2050		2070–2099	
	Temperatur	Niederschlag	Temperatur	Niederschlag
Jahr	+1.2°C ± 0.5°C	N → S →	+3°C ± 1°C	N → S →
Frühling	+1°C ± 0.5°C		+2.5°C ± 1°C	N → S →
Sommer	+1.5°C ± 0.5°C	N →	+4°C ± 1°C	N/S →
Herbst	+1°C ± 0.5°C	N →	+2°C ± 1°C	N →
Winter	+1°C ± 0.5°C	N →	+3°C ± 1°C	N/S →

leicht (< 10%) → stark (10 - 20%) → sehr stark (> 20%) →

Abb. 3: Klimaänderung in der Schweiz für die nahe (2021–2050) und die ferne (2070–2099) Zukunft nach dem Emissionsszenario A1B. Angegeben ist die Temperaturänderung (Ensemble-Mittel), deren Unsicherheit (Standardabweichung) sowie die Tendenz des Niederschlags. N: Alpennordseite, S: Alpensüdseite (BAFU 2012b).

der Schweiz eine Temperaturzunahme voraus. Für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) liegt die erwartete Temperaturzunahme zwischen 0.7 und 1.7 °C gegenüber der Referenzperiode 1980 bis 2009 und liegt durchwegs über dem Unsicherheitsbereich der natürlichen Variabilität. Für die ferne Zukunft (2070 bis 2099) beträgt der Anstieg 2 bis 4 °C. Die grössten Änderungen der Temperatur werden im Sommer und in den höher gelegenen alpinen Regionen prognostiziert. Beim Niederschlag kann keine klare Aussage gemacht werden, da die Niederschlagsänderung sowohl in der nahen wie auch in der fernen Zukunft häufig innerhalb der natürlichen Variabilität liegt. Eine starke Abnahme von 20 bis 30 % wird für die Sommermonate in der fernen Zukunft sowohl nördlich als auch südlich der Alpen erwartet. Im Norden dürften die Niederschläge, mit Ausnahme des Sommers, leicht zunehmen. Die einzelnen Ergebnisse der Parameter Niederschlag und Temperatur für die verschiedenen Jahreszeiten der Perioden 2021 bis 2050 sowie 2070 bis 2099 sind in Abbildung 3 aufgeteilt nach Alpen-nord- und -südseite übersichtlich dargestellt

4. Gletscher

Seit dem Hochstand der Gletscher in der kleinen Eiszeit (1600 bis 1850) um 1850 haben die Gletscher der Schweizer Alpen ca. 50 % ihres Volumens verloren. Aufgrund der starken sommerlichen Temperaturerhöhung seit dem Jahr 1987, hat sich die Eisschmelze in den letzten Jahrzehnten beschleunigt. Die Schweizer Gletscher verzeichnen seit 1998 einen Massenverlust von durchschnittlich 1 m pro Jahr. Dies ergibt einen jährlichen Eisvolumenverlust von ca. 1 km³ bei einem geschätzten Restvolumen von 50 bis 60 km³.

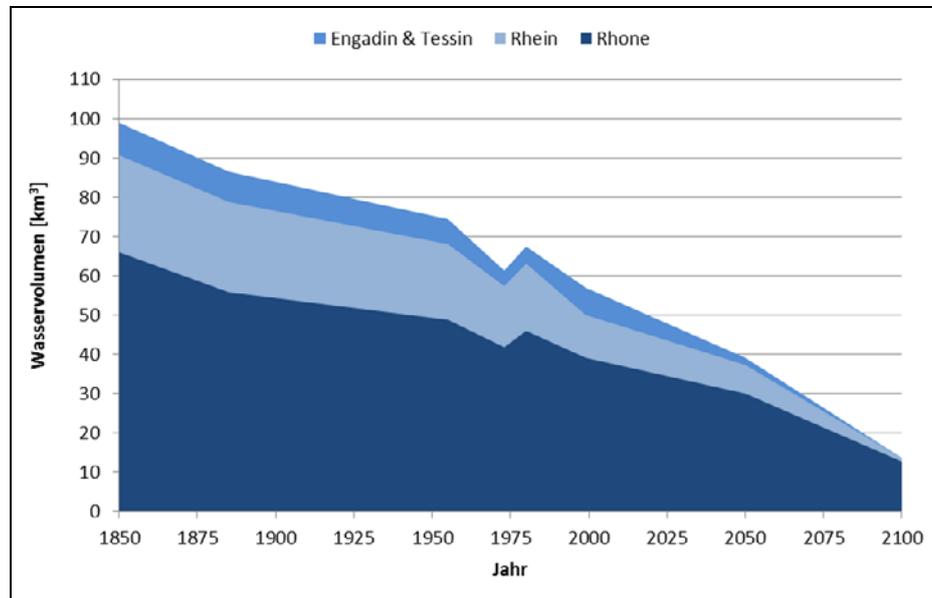


Abb. 4: Entwicklung der in den Schweizer Gletschern gespeicherten Wasservolumen für die Einzugsgebiete Rhone, Rhein, Inn und Ticino seit 1850 bis 2100 (aus BAFU 2012b).

Bis Ende dieses Jahrhunderts werden sich die Gletscher in den Schweizer Alpen weiter stark zurückziehen. Gletscher werden nur noch in den hochgelegenen Gebieten der Berner und Walliser Alpen zu finden sein. Je nach verwendetem Modell und Klimaszenario ist von einem Verlust von 60 bis 80 % der heute noch in der Schweiz vorhandenen Gletscherfläche auszu-

gehen. Die grössten absoluten Massenverluste werden in den Einzugsgebieten der Aare und der Rhone prognostiziert, da dort am meisten Eis vorhanden ist (LINSBAUER et al. 2012). Bei diesen dicken Talgletscher wie z.B. Aletsch- oder Gornergletscher finden in den nächsten Jahrzehnten ein grosser Massenverlust und in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts dann ein beschleunigter Flächenverlust statt. Am meisten Eis wird Ende Jahrhundert im Einzugsgebiet der Rhone (Wallis), wo heute 80 % der Schweizer Eismasse zu finden ist, übrigbleiben. Das Einzugsgebiet des Rheins verliert bis auf wenige Eisreste im Berner Oberland alle Gletscher. Das Engadin und das Tessin sind bis Ende Jahrhundert vollständig eisfrei (Abbildung 4).

Die Entwicklung der Gletscher im Aletschgebiet, der grössten zusammenhängenden Eisfläche der Alpen, ist für die Jahre 2030, 2060 und 2090 in Abbildung 5 dargestellt. Obwohl der Grosse Aletschgletscher beim Konkordiaplatz immer noch fast 900 m Eisdicke aufweist, wird dieser bis Ende Jahrhundert seine Gletscherzunge vollständig verlieren und sich in die höchstgelegenen Einzugsgebiete oberhalb 3000 m ü.M. zurückgezogen haben. Die Fläche des Gletschers wird sich von heute noch 118 km² bis ins Jahr 2090 auf 35 km² zurückgebildet haben. Beim Volumen bleiben nur noch 1.7 km³ Eis übrig, was weniger als 10 % der heutigen Eismasse entspricht (VAW 2011).

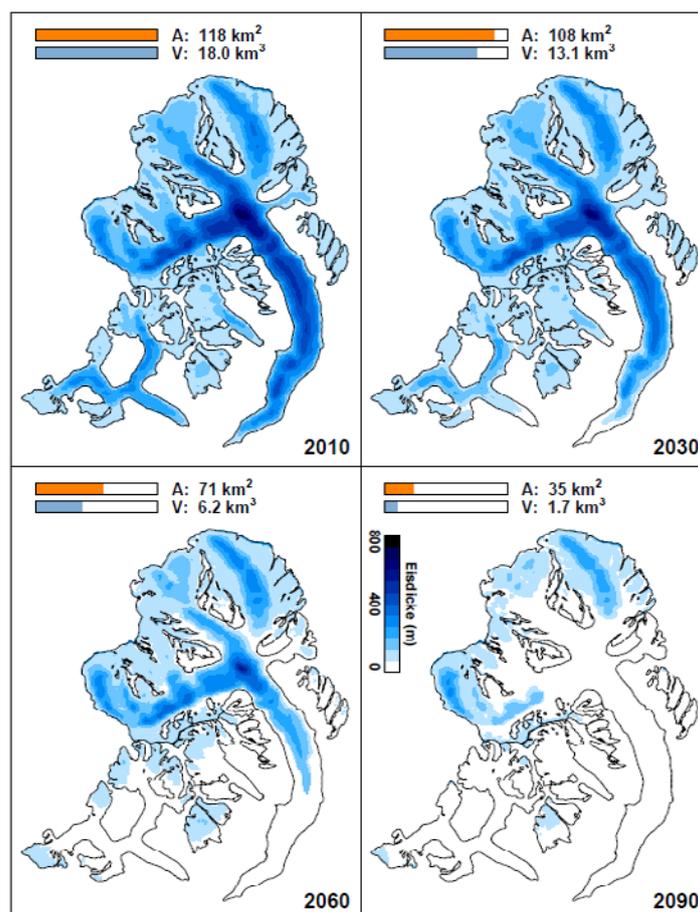


Abb. 5: Gletscherentwicklung des Aletschgletschers im Jahr 2010 und für 3 verschiedene Zeitperioden in der Zukunft: 2030, 2060 und 2090. A: Gletscherfläche, V: Gletschervolumen. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand von 1999 (VAW 2011).

Dieser starke Flächen- und Volumenverlust der Aletschgletscher bis Ende Jahrhundert hat grosse Konsequenzen auf das Abflussregime dieses Einzugsgebiets. Abbildung 6 zeigt die Abflussentwicklung der Aletschgletscher für die Vergangenheit und die Zeitperioden 2020 bis 2049 und 2070 bis 2099. Für die nahe Zukunft (2020 bis 2049) wird aufgrund einer verstärkt einsetzenden Eisschmelze von Juni bis August mehr Abfluss erwartet im Vergleich mit der Periode 1980 bis 2009. Zudem verlagert sich der maximale sommerliche Abfluss von anfangs August in Richtung Juli. Aufgrund des zu erwartenden wärmeren Klimas setzt die Schneeschmelze in Zukunft immer früher ein. Dies führt zu mehr Abfluss im Frühling im Vergleich zu heute. In der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts werden sich die saisonalen Abflüsse markant verändern: Die immer kleiner werdende Gletscherfläche im Einzugsgebiet produziert immer weniger Schmelzwasser und der über den Winter gespeicherte Schnee wird im Sommer im früher geschmolzen sein. Der maximale Abfluss wird sich auf Ende Juni vorverchieben und sogar unter die Werte von 1940 bis 1969 sinken. Der gesamte Jahresabfluss aus dem Einzugsgebiet der Aletschgletscher wird bis Mitte Jahrhundert noch zunehmen. Danach sinken die abfliessenden Wasserressourcen bis Ende Jahrhundert langsam ab, bleiben aber auf einem höheren Niveau im Vergleich zu 1900.

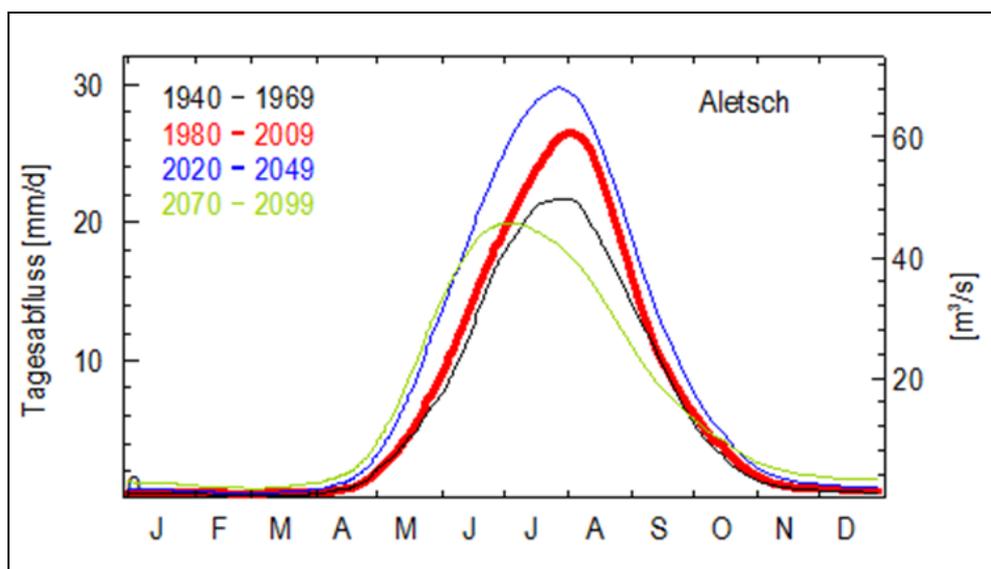


Abb. 6: Jahreszeitliche Entwicklung des Abflusses im Einzugsgebiet Aletsch. Gezeigt wird der Abfluss aus der Zeit von 1940–1969 (schwarze Kurve), der Referenzperiode (1980–2009, rote Kurve), für die nahe Zukunft (2020–2049, blaue Kurve) und die ferne Zukunft (2070–2099, grüne Kurve) (VAW 2011).

5. Schnee

Die Schneedecke, welche jeden Winter neu auf- und abgebaut wird, ist der bedeutendste periodische Wasserspeicher in der Schweiz. Das Maximum des Schneespeichers wird anfangs April erreicht und beträgt inklusive der ausländischen Anteile der Einzugsgebiete durchschnittlich etwa 13 km^3 Wasser. Da zusätzlich öfters Schnee fällt, der innert weniger Tage oder Wochen wieder schmilzt, verlassen insgesamt etwa 22 km^3 Schmelzwasser aus der Schneedecke die Schweiz (BERNHARD et al. 2012). Das sind etwa 42% des Gesamtab-

flusses aus der Schweiz. Diese Schmelzwassermengen prägen ganz markant die verschiedenen hydrologischen Regimes in den unterschiedlichen Höhenstufen.

Die Erwärmung des Klimas führt einerseits zu einem Anstieg der Schneegrenze um rund 500 Meter bis 2070–2099 und andererseits zu einer deutlichen Reduktion des Schneeanteils im Gesamtniederschlag und damit einer massiven Veränderung der Schneedecke. Das maximale Schnee-Wasseräquivalent dürfte bis 2035 um 20–50%, bis 2085 um 50–60% sinken. Bis in die ferne Zukunft sinkt damit auch das Volumen des gesamten Schmelzwassers auf etwa 60 % im Vergleich zur Kontrollperiode (Abbildung 7). In sehr grossen Höhen über 3000 m ü.M. könnte wegen der zunehmenden Winterniederschläge die Schneedecke sogar zunehmen.

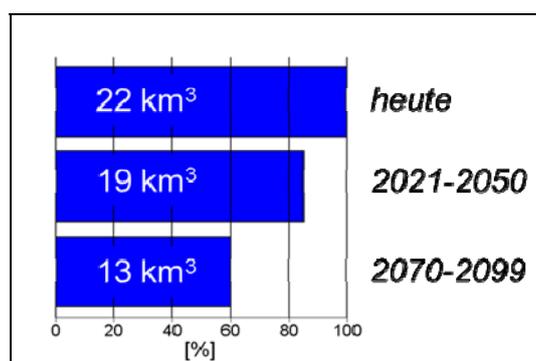


Abb. 7: Mittlere Schnee-Schmelzwasservolumen, welche jährlich über die Flüsse die Schweiz verlassen (BERNHARD et al. 2012)

6. Abfluss

Die Abflüsse in der Schweiz verändern sich bis in die nahe Zukunft (2035) nur wenig mit vorübergehenden Zunahmen in vergletscherten Gebieten. Sie nehmen bis in die ferne Zukunft (2085) zumeist leicht ab, mit Ausnahme der Flüsse Ticino und Toce, wo die Abnahme dann etwa 10 % beträgt. Im Alpengebiet ist die Temperaturzunahme die wichtigste Einflussgrösse für die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse: Die Schneefallgrenze steigt an, während die winterlichen Schneereserven, die Gletschervolumen und die Gletscherflächen schwinden. Die Verdunstung nimmt in allen Regionen zuerst nur wenig, später stärker zu.

Die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse (Regimes) ändern fast in der ganzen Schweiz. Im Winter gibt es in vielen Gebieten deutlich mehr Abfluss, im Sommer vermindern sich die Abflüsse. In vielen Gebieten tauchen heute unbekannte Regimetypern mit einem jahreszeitlichen Abflussmaximum im Winter und einem deutlichen Minimum im August auf (KÖPLIN 2012; BAFU 2012b). In der Schweiz verschwinden die heute dominanten nordalpinen zu Gunsten der heute südalpinen Regimetypern weitgehend.

Auch die grossen Flüsse verändern sich entsprechend. Während heute die Niedrigwasserzeit im Winter beobachtet wird, ist in ferner Zukunft mit eher noch ausgeprägteren Niedrigwasserzeiten im Spätsommer zu rechnen (Abbildung 8) Umgekehrt muss am Jahreswechsel mit deutlich höheren Abflüssen gerechnet werden, die ähnlich hoch ausfallen wie die saisonalen Hochwasser im Frühsommer. Diese extremen Abflüsse dürfen zu einer Verstärkung der saisonalen Niedrig- bzw. Hochwasserständen weiter Rhein abwärts beitragen.

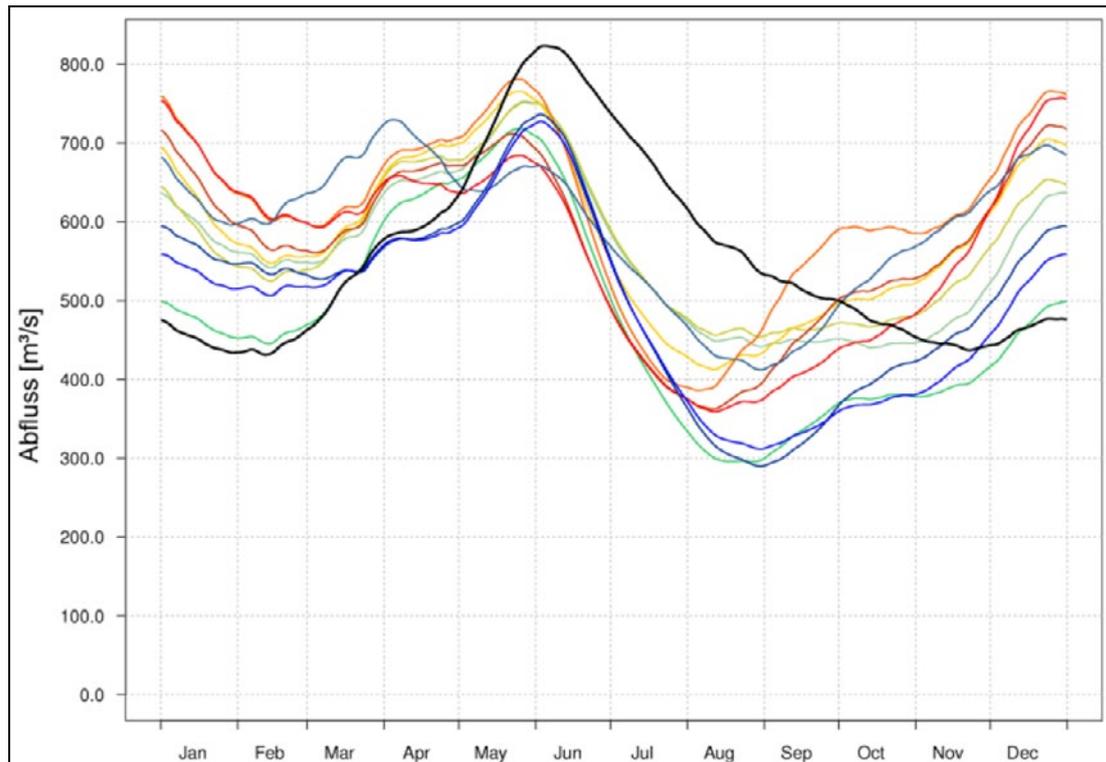


Abb. 8: Mittlerer Abfluss im Rhein in Basel für die Zeitperiode 2070-2099 (farbige Kurven) im Vergleich zur Kontrollperiode 1980–2009 (schwarze Kurve). Die farbigen kurven zeigen die Ergebnisse der 10 Klimaszenarien und damit auch den Bereich der Unsicherheit (BERNHARD et al. 2012).

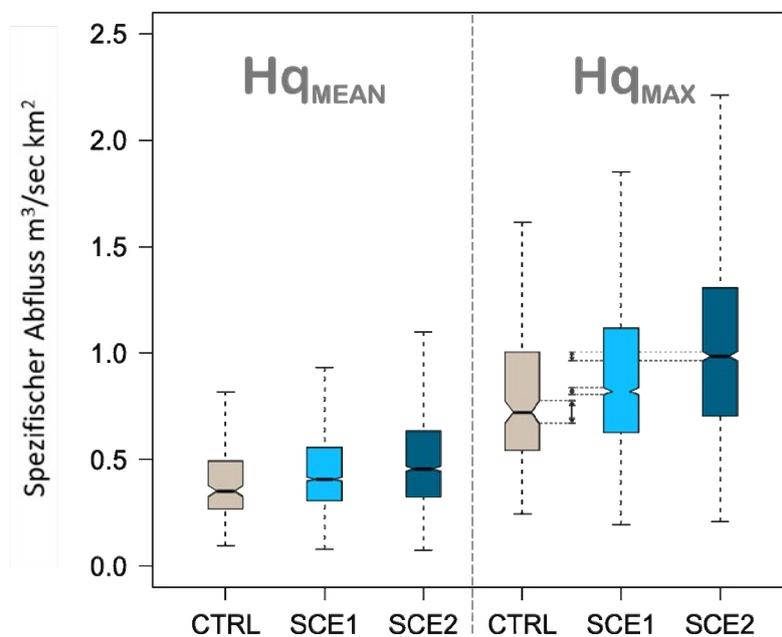


Abb. 9: Boxplots der spezifischen Hochwasser-Abflüsse von 189 mesoskaligen Einzugsgebieten in der Schweiz. Links die mittleren jährlichen Hochwasser, rechts die maximalen Hochwasser der jeweils angegebenen Zeitperioden (KÖPLIN et al. 2013).

Mittlere Hochwasser scheinen sich in mesoskaligen Einzugsgebieten auch in der fernen Zukunft nicht wesentlich zu verändern, könnten aber tendenziell leicht höher liegen. Die in Abbildung 9 als „maximal“ bezeichneten Hochwasser sind nicht wirklich extreme Hochwasser, da der Betrachtungszeitraum nur 22 Jahre beträgt und in den Klimaszenarien keine Veränderungen der Starkniederschlagsintensitäten simuliert sind. Die sich abzeichnende Verstärkung der grösseren Hochwasser ist also mit einiger Vorsicht zu behandeln (KÖPLIN et al. 2013)

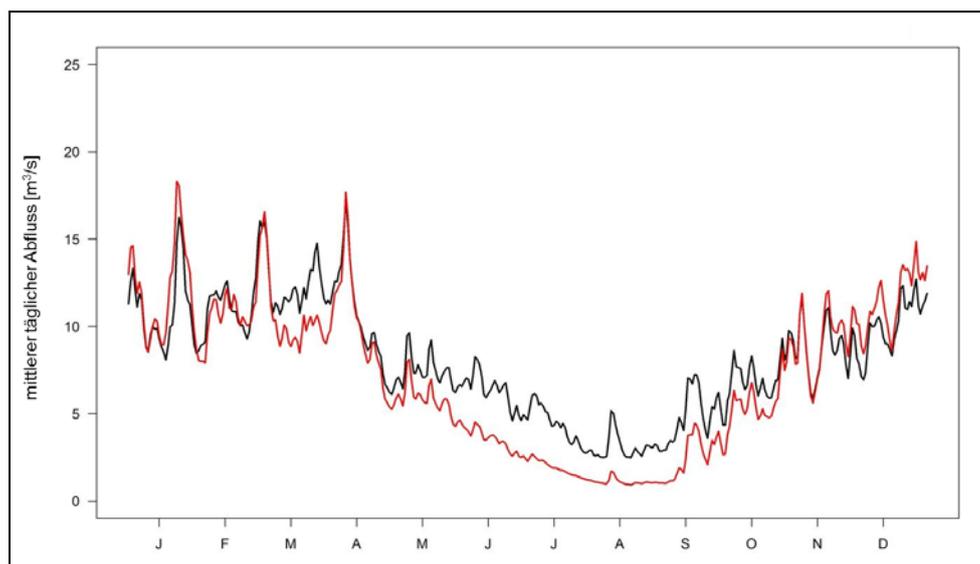


Abb. 10: Mittlere tägliche Abflüsse der Broye für die Kontrollperiode 1980–2009 (schwarz) und die ferne Zukunft: Median der Szenarien 2070–2099, rote Kurve (MEYER et al. 2012)

Sowohl die Dauer der sommerlichen Niedrigwasser wie auch deren Intensität nehmen im Mittelland deutlich zu (Abbildung 10). Somit sinken auch die Q_{347} Werte, welche heute massgeblich sind für die Festlegung der Restwassermengen. Die Unterschreitungsdauern der heutigen Q_{347} könnten bis zum Ende des Jahrhunderts um 9 bis 17 Tage zunehmen (MEYER et al. 2012) Dies gilt auch für die grossen Flüsse. In den Alpen verschiebt sich die Niedrigwasserzeit vom Winter teilweise in den Spätsommer, die Abflüsse im Winter werden mit der Temperaturzunahme ansteigen.

7. Fazit

Selbst wenn die Klimaszenarien, gerade beim Niederschlag, noch gewisse Unsicherheiten aufweisen, können klare Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Wasserressourcen in der Schweiz gemacht werden. Dank hochqualifizierten Partnern, guter Zusammenarbeit und Koordination mit anderen zurzeit laufenden Forschungsprojekten im Bereich von Klimaänderung und Hydrologie können erstmals wissenschaftlich verlässliche flächige und quantitative Aussagen gemacht werden, wie sich der Wasserhaushalt in der Schweiz bis Ende Jahrhundert verändern wird. Die Wasserressourcen werden nur geringfügig abnehmen, dafür aber anders übers Jahr verteilt sein. Dadurch dürfte es in Zukunft zeitweise zu regionalen und lokalen Engpässen kommen, welche wasserwirtschaftliche Anpassungsmassnahmen erfordern würden. Auf der Angebotsseite kann durch eine bessere regionale Vernetzung der

Wasserversorgung sowie durch die Erschliessung bisher nicht genutzter Wasservorkommen das Angebot erhöht werden. Andererseits kann die Nachfrage durch Effizienzsteigerung bei technischen Massnahmen und durch ökonomische Anreizmechanismen (Wasserpreis) reduziert werden. Trotz allem bleibt die Schweiz das Wasserschloss Europas. Diese Wasserschlossfunktion wird in einem zukünftig wärmer und trockener werdenden Europa vermutlich an Bedeutung gewinnen.

Literatur

- BAFU (2012a): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz – Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. 1. Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. 81 S
- BAFU (2012b): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217; 76 S
- BERNHARD, L. & M. ZAPPA (2012): Klimaänderung und natürlicher Wasserhaushalt der Grosseinzugsgebiete der Schweiz. Technischer Bericht WSL
- BOSSHARD, T., KOTLARSKI, S., EWEN, T. & C. SCHÄR (2011): Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 2777–2788
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC. Zurich: 88p. ISBN 978-3-033-03065-7
- KÖPLIN, N. (2012): Hydrological impacts of climate change in Switzerland during the 21st century, PhD Thesis, Faculty of Science, University of Bern, Bern, Switzerland, 112 pp
- KÖPLIN, N., SCHÄDLER, B., VIVIROLI, D. & R. WEINGARTNER (2013): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change, *Hydrol. Process.* (accepted for publication)
- LINSBAUER, A., PAUL, F. & W. HAEBERLI (2012): Grossräumige Modellierung von Schwundszenerarien für alle Schweizer Gletscher. Modellvergleich, Unsicherheiten und eine Analyse bezogen auf Grosseinzugsgebiete. Schlussbericht CCHydro, Ergebnisse vom Teilprojekt CCGlinCH. Universität Zürich. 18 S
- MEYER (2012): Die Auswirkungen der projizierten Klimaänderung auf Sommerniedrigwasser im Schweizer Mittelland basierend auf einer multi-variablen Kalibrierung des hydrologischen Modellsystems PREVAH. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern
- SGHL, CHY (Hrsg.) (2011): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 38. Bern: 28 S
- VAW (2011): Gletscher- und Abflussveränderungen im Zeitraum 1900-2100 in sieben Einzugsgebieten der Schweiz. 77 S
- VIVIROLI, D., GURTZ, J., ZAPPA, M. & R. WEINGARTNER (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software* 24: 1209–1222
- VOLKEN, D. (2010): Projektbericht. CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* Bd. 54: 143–146

Auswirkungen der CH2011 Klimaszenarien auf die Wasserressourcen – eine Abschätzung für die Schweiz

Luzi Bernhard, Christoph Pflugshaupt, Sven Kotlarski, Massimiliano Zappa

1. Einleitung

Die prognostizierte Klimaänderung wird einen bedeutenden Einfluss auf Schneedecke und Gletscher und somit auf die Wasserressourcen im gesamten Alpenraum haben. Im Rahmen der Studie CCHydro des BAFU (BAFU 2012) wurden für die verschiedenen Klimaregionen und Höhenstufen der Schweiz zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufes und der Abflüsse für das 21. Jahrhundert bereitgestellt. Für die Zeiträume 2021 – 2050 und 2070 – 2099 wurden die lokalen meteorologischen Veränderungen und die daraus resultierenden Änderungen in der Vergletscherung, der Schneedecke sowie im Abfluss gegenüber der Kontrollperiode 1980 – 2009 simuliert. Um die erwarteten lokalen Klimaänderungen für die Grosseinzugsgebiete abzubilden, wurden die Klimaszenarien des ENSEMBLES-Projektes mittels der Delta-Change-Methode auf Tagesbasis berechnet, welche auf dem A1B-Emissionsszenario für Temperatur und Niederschlag beruhen.

Diese Untersuchungen wurden durch die Verwendung der Klimaszenarien CH2011-plus der MeteoSchweiz erweitert. Diese neuen Szenarien basieren auf einer probabilistischen Methode, welche durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung („lower“, „medium“ und „upper“ Band) Auskünfte über die Modellunsicherheit und die dekadale Variabilität zulassen. Im Gegensatz zum im CCHydro-Bericht verwendeten Ansatz liegen die prognostizierten Klimadaten nicht auf Stationsbasis, sondern für fünf Regionen der Schweiz vor. Zusätzlich werden neben dem Emissionsszenario A1B zwei weitere bereitgestellt: das moderate RCP3PD-Szenario sowie das „worst case“-Szenario A2. Der Vergleich dieser Ergebnisse mit den Erkenntnissen aus der CCHydro-Studie bildet den Fokus unseres Beitrages für die Skala der hydrologischen Schweiz. Abbildung 1 gibt einen Überblick über das Setup inklusive der verwendeten Grosseinzugsgebiete.

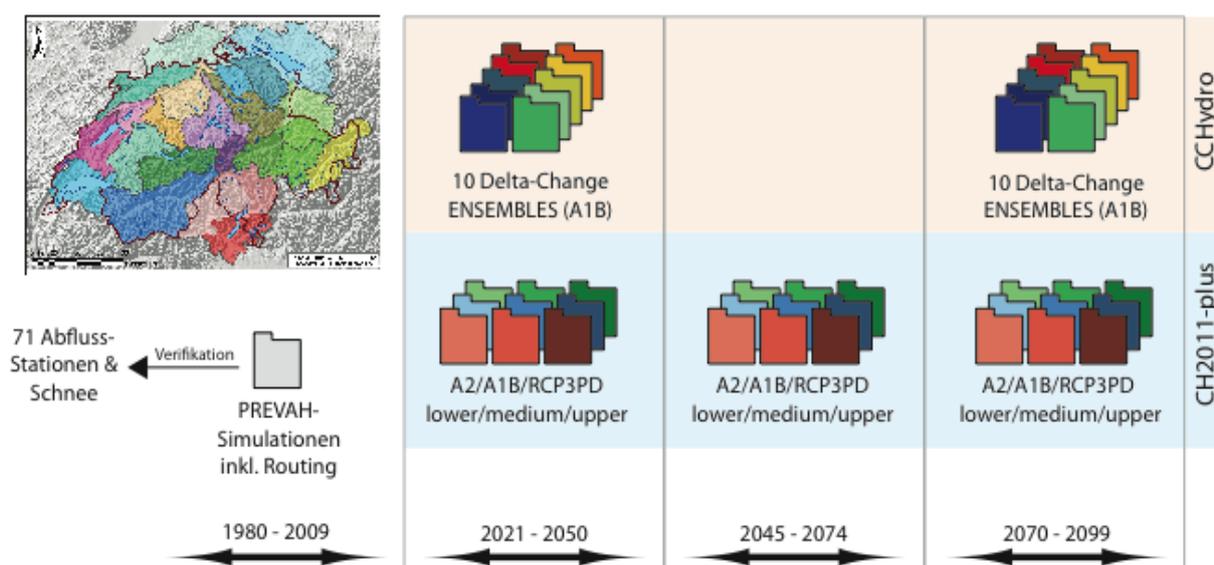


Abb. 1: Setup der Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen der Vergleichsstudie von CCHydro und CH2011-plus

2. Methoden und Daten

Die Ergebnisse basieren einerseits auf der Assimilation von regionalen Klimamodelldaten des europäischen Projektes ENSEMBLES, welche alle vom Emissionsszenario A1B (moderate Erwärmung) ausgehen und im Simulationsexperiment mit einem flächendetaillierten hydrologischen Modell resultieren (BERNHARD & ZAPPA 2012). Diese Klimamodelldaten umfassen zehn verschiedene Modellketten von Globalen Zirkulationsmodellen (GCM) und Regionalen Klimamodellen (RCM) und widerspiegeln die Unsicherheits-Bandbreite der Klimamodelle. Andererseits wurden die Klimaszenarien CH2011-plus der MeteoSchweiz eingesetzt, welche auf einer probabilistischen Methode basieren, um Auskünfte über die Modellunsicherheit sowie die dekadale Variabilität zu ermöglichen. Diese Szenarien liegen als Saisondaten (DJF, Winter; MAM, Frühling; JJA, Sommer; SON, Herbst) vor und repräsentieren jeweils fünf Regionen der Schweiz (Nordostschweiz; Westschweiz; Westalpen; Ostalpen; Südschweiz).

Für die drei Zukunftsszenarien wurden die für die Anpassung des hydrologischen Modelles benötigten kalibrierten Parameter wie bei der Kontrollsimulation unverändert beibehalten. Es entstanden drei neue 30-jährige Zeitreihen mit ähnlicher Variabilität (CCHydro), wie sie in der Kontrollperiode beobachtet wurde, aber mit erwarteten Zukunftstrends; durch die drei Perzentilbänder (2.5%, 60%, 97.5%) der CH2011-plus Szenarien können regional detailliertere Aussagen über die Variabilität getätigt werden.

Bezüglich Vergletscherung wurde für die drei Zukunftsszenarien der Ausgangszustand von 1985 mit einem Schrumpfmodell von PAUL et al. 2007 in 5-Jahresschritten kontinuierlich reduziert. Das Modell basiert auf der einfachen Annahme, dass die Gleichgewichtslinie (GWL) entsprechend der Lufttemperaturerhöhung mit einer Reaktionszeit von 50 Jahren ansteigt. Dadurch verringern sich jeweils die Flächen der Akkumulationsgebiete der Gletscher.

2.1 Klimaszenarien

Klimatologische Grundlage der vorliegenden Studie sind die Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz CH2011 (CH2011), die eine umfassende Analyse der im 21. Jahrhundert erwarteten Änderungen von Temperatur und Niederschlag in der Schweiz zur Verfügung stellen. Basis der CH2011 Szenarien sind Simulationen der neuesten Generation globaler und regionaler Klimamodelle, insbesondere die regionalen Klimaprojektionen des europäischen ENSEMBLES Projektes (van der Linden und Mitchell 2009). Diese Projektionen wurden mit unterschiedlichen Kombinationen regionaler und globaler Klimamodelle (GCMs, RCMs) mit einer räumlichen Auflösung von ca. 25 km und unter Annahme des IPCC SRES A1B Emissionsszenarios erstellt. Sie wurden im Rahmen der CH2011 Initiative auf unterschiedliche Art und Weise für die Schweiz ausgewertet und liefern eine Reihe von Szenarioprodukten zur Verwendung in Klimaimpaktstudien.

Erster CH2011 Szenariotyp sind probabilistische Szenarien des mittleren saisonalen Klimaänderungssignals für grössere Regionen der Schweiz. Hierfür wurden Simulationen von insgesamt 20 GCM-RCM Modellketten mithilfe eines probabilistischen Algorithmus (FISCHER et al. 2012) ausgewertet. Endprodukt sind Abschätzungen der zu erwartenden mittleren saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen (unterer, mittlerer und oberer Schätz-

wert; jeweils für Winter, Frühjahr, Sommer und Herbst) für drei Regionen der Schweiz (Westschweiz/CHW, Nordostschweiz/CHNE und Schweiz südlich der Alpen/CHS) sowie drei Szenarioperioden (2020 – 2049, 2045 – 2074 und 2070 – 2099) im Vergleich zur Referenzperiode 1980 – 2009. Die für das A1B Emissionsszenario gültigen Schätzwerte wurden anschliessend mithilfe der Methode des pattern scaling auf die beiden zusätzlichen Emissionsszenarien A2 (pessimistischer als A1B, d.h. höhere zukünftige Treibhausgasemissionen) und RCP3PD (optimistisches Mitigationsszenario mit Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs bis 2100 auf ca. 2°C) skaliert. Eine Erweiterung der saisonalen probabilistischen Szenarien sind die probabilistischen Szenarien auf Tagesbasis, die mittels einer heuristischen Interpolation aus den mittleren saisonalen Schätzwerten gewonnen wurde.

Als zweiter CH2011 Szenariotyp stehen stationsbasierte Abschätzungen des mittleren Jahresgangs der Temperatur- und Niederschlagsänderung in täglicher Auflösung zur Verfügung. Hierzu wurden die Ergebnisse von insgesamt 10 GCM-RCM Modellketten auf Stationsebene herunterskaliert und der mittlere Jahresgang des Klimaänderungssignals mittels harmonischer Analyse (BOSSHARD et al. 2011) für insgesamt 188 Temperaturstationen bzw. 565 Niederschlagsstationen sowie für jede der drei oben genannten Szenarioperioden bestimmt. Da die zehn zugrundeliegenden regionalen Klimaprojektionen das A1B Emissionsszenario annehmen und kein pattern scaling durchgeführt wurde, stehen die täglichen Szenarien auf Stationsebene nur für dieses eine Emissionsszenario zur Verfügung. Sie bilden die Grundlage der Untersuchungen des CCHydro Projektes.

Die CH2011 Szenarioprodukte geben einen umfassenden Überblick über die zu erwartenden klimatischen Änderungen in der Schweiz im 21. Jahrhundert und erlauben eine direkte Verwendung dieser Information in Klimaimpaktstudien. Je nach Emissionsszenario, Jahreszeit und Region ist mit einer Erwärmung zwischen 1.2 und 4.8°C bis zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Im Sommer wird zudem eine deutliche Reduktion der Niederschlagsmengen von bis zu 28% erwartet. Jedoch ist zu beachten, dass die CH2011 Szenarien trotz ihrer vielseitigen Verwendbarkeit Einschränkungen unterliegen. So basieren alle Szenarioprodukte auf dem sog. Delta Change Ansatz, d.h. es werden lediglich Änderungssignale bereitgestellt, mit denen Beobachtungen im heutigen Klimazustand skaliert werden müssen, um Zeitreihen für zukünftige Perioden zu erhalten. Dieser Ansatz hat deutliche Vorteile (z.B. räumliche Konsistenz und Erhaltung physikalischer Konsistenz zwischen verschiedenen Klimaparametern), kann allerdings Änderungen der zeitlichen Temperatur und Niederschlagsvariabilität nur bedingt abbilden. Weitere Einschränkungen betreffen die Ausklammerung der Alpen bei der probabilistischen Bestimmung der regionalen Änderungssignale, die unvollständige Abbildung der Modellunsicherheit durch die 20 verwendeten GCM-RCM Modellketten, den einfachen Skalierungsansatz der pattern scaling Methode oder die unabhängige Schätzung von Temperatur- und Niederschlagsänderungen. Einige dieser Einschränkungen werden derzeit im Rahmen einer Erweiterung der CH2011 Szenarien (CH2011-plus) bearbeitet. Die resultierenden zusätzlichen Szenarioprodukte wurden jedoch im Rahmen der vorliegenden Studie noch nicht verwendet.

2.2 Hydrologisches Modell PREVAH

Für die Abflussberechnung wurde eine neue Gitterversion des hydrologischen Modells PREVAH (VIVIROLI et al. 2009) für die Einzugsgebiete mit regionalisierten Parametern aufgesetzt. Anhand von gemessenen Abflussdaten des BAFU wurden die Modellparameter optimiert. Danach wurden für die Kontrollperiode 1980 – 2009 in täglicher Auflösung folgende hydrologischen Größen berechnet: Niederschlag, Verdunstung, Schneewasserwert, Eis- und Schneeschmelze, Bodenwasserspeicher und Abfluss. Dazu wurden die gemessenen meteorologischen Größen der nahegelegenen MeteoSchweiz-Stationen über die gesamten Einzugsgebiete hinweg interpoliert.

2.3 Gravitative Verlagerung der Schneedecke

Seit mehreren Jahren wird beobachtet, dass hydrologische Modell massenhaft ewigen Schnee in den höchsten und steilsten Gipfeln der Einzugsgebiete ansammeln (z.B. VERBUNT et al. 2003). GRUBER (2007) liefert eine einfach implementierbare Lösung zu diesem Problem (Abbildung 2). Je nach Steilheit des Geländes darf nur eine bestimmte Menge Schnee pro Rasterelement im Modell gespeichert werden. Ist das Element gesättigt, verlagert sich der überschüssige Schnee in ein tiefer liegendes Rasterelement. In tieferer Lage ist es wahrscheinlicher, dass Schnee geschmolzen werden kann. Wie im rechten Teil der Abbildung 2 ersichtlich wird, erreicht die MTD-Version (Mass Transport and Deposition) des Simulationsexperimentes nach rund vier Jahren ein Gleichgewicht. Im Testgebiet schwanken die Wasserwerte der Schneedecke zwischen 500 und 1500 mm. In der MTD-freien Version sammeln sich innert weniger Jahre über 3000 mm Schneewasseräquivalent an; meist in steilen Regionen oberhalb von 2500 m ü.M.

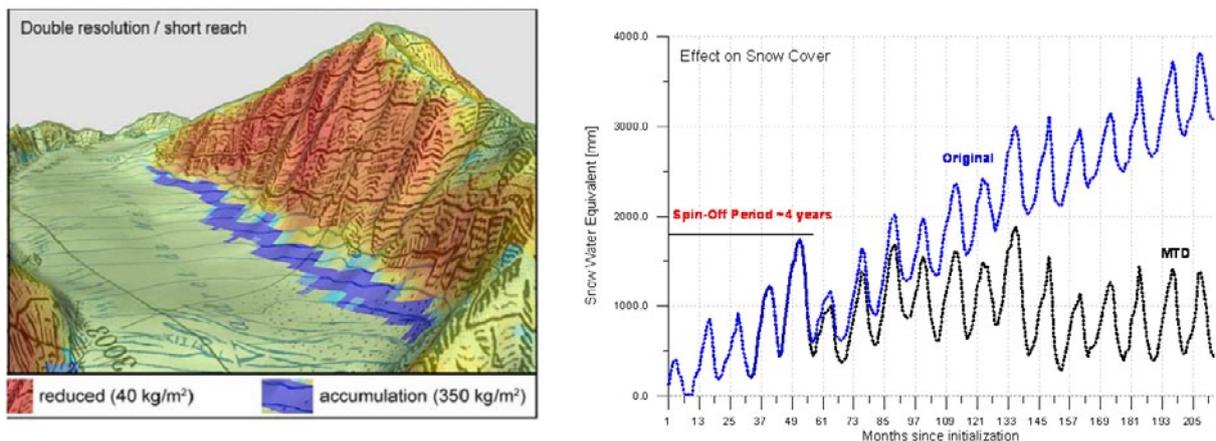


Abb. 2: Gravitative Verlagerung (MTD, Mass Transport and Deposition) von Schnee auf steilen Hängen (GRUBER, 2007). Rechts: Tageswerte des Wasserwertes der Schneedecke für ein Teileinzugsgebiet der Reuss (Göscheneralpsee) in den ersten 210 Monaten seit Initialisierung. Blau: Ergebnisse ohne MTD Algorithmus; schwarz: mit MTD Algorithmus

2.4 Transiente Aufdatierung der sich verändernden Gletscherflächen

Das für die Simulation zukünftiger Gletscherausdehnungen verwendete GWL Reaktionsmodell wurde im Rahmen des NFP 48 entwickelt (ROTHENBÜHLER 2006) und ist in PAUL et al. (2007) veröffentlicht. Das Modell basiert auf der einfachen Annahme, dass die Gleichge-

wichtslinie (GWL) ansteigt, wenn sich die Temperatur erhöht und sich das Akkumulationsgebiet entsprechend verkleinert. Unter der Annahme, dass ein verkleinertes Akkumulationsgebiet auch einen kleineren Gletscher zur Folge hat, lässt sich mit bekannten Beziehungen zwischen der Grösse des Akkumulations- und Ablationsgebietes für eine Gletscherausdehnung, welche im Gleichgewicht mit dem Klima ist, eine neue Gesamtgrösse bestimmen.

Während die Änderung der Gletscherfläche (bzw. Länge) verzögert erfolgt und sich als Reaktion auf ein vorgegebenes Klimasignal (d.h. GWL-Anstieg) einstellt, reagiert die GWL direkt und unverzögert auf die jeweiligen klimatischen Bedingungen. Da für das hydrologische Modell beide Angaben wichtig sind (Gletscherfläche und Fläche des Akkumulationsgebietes), mussten für beide Bereiche zeitversetzte Szenarien angewendet werden. Während sich die Gletscherfläche retrospektiv ändert, folgt die Höhe der aktuellen GWL direkt den vorgegebenen Klimaszenarien.

3. Resultate

Die Resultate werden anhand von zwei Einzugsgebieten in Graubünden beispielhaft präsentiert: Engadin und Landquart/Plessur. Für beide Regionen werden die jährlichen Mittelwerte präsentiert, welche auf den CH2011-plus basieren. Die Unsicherheit wird durch die Standardabweichung der drei ‚lower‘, ‚medium‘ und ‚upper‘ Zyklen hergeleitet.

Die Ergebnisse werden für jede Region mit den Werten der Abflussstationen sowie mit den Resultaten der CCHydro-Studie verglichen. Zusätzlich werden für die einzelnen Regionen einzelne Parameter detailliert untersucht, um den Einfluss der verschiedenen Emissionsszenarien beurteilen zu können. Generell verstärken sich die Veränderungen gegen Ende des 21. Jahrhunderts. (Hinweis: in den Abbildungen werden die CH2011-plus Szenarien mit CH2014 bezeichnet)

Tab. 1: Natürlicher Wasserhaushalt der Einzugsgebiete Engadin (links) und Landquart/Plessur (rechts für die Kontrollperiode und die drei Szenarioperioden. P-kor: korrigierter Niederschlag; EREA: Verdunstung; RGES: Gesamtabfluss; GLAC: Gletscherschmelze; P-SME: Schneeschmelze

Period	Emission scenario		P-kor	EREA	RGES	GLAC	P-SME	Period	Emission scenario		P-kor	EREA	RGES	GLAC	P-SME
1980-2009		annual mean [mm]	1089	281	839	28	566	1980-2009		annual mean [mm]	1484	406	1086	5	674
2021-2045	A2	annual mean [mm]	1073	288	803	17	497	2021-2045	A2	annual mean [mm]	1491	414	1080	2	583
		change [%]	-1.50	2.57	-4.23	-39.21	-12.25			change [%]	0.46	2.12	-0.50	-57.97	-13.42
		σ (std.dev.) [%]	14.83	5.10	17.82	8.92	7.30			σ (std.dev.) [%]	11.70	3.48	14.71	5.80	3.00
A1B	annual mean [mm]	1071	289	802	18	489	A1B	annual mean [mm]	1492	415	1081	2	572		
		change [%]	-1.66	2.83	-4.40	-35.25			-13.69	change [%]	0.54	2.38	-0.49	-54.72	-15.09
		σ (std.dev.) [%]	15.51	5.40	18.64	9.73			7.30	σ (std.dev.) [%]	12.21	3.68	15.34	6.72	2.66
RCP3PD	annual mean [mm]	1072	288	803	18	493	RCP3PD	annual mean [mm]	1491	415	1081	2	578		
		change [%]	-1.57	2.70	-4.31	-37.20			-12.98	change [%]	0.52	2.26	-0.48	-56.31	-14.26
		σ (std.dev.) [%]	15.15	5.24	18.21	9.33			7.28	σ (std.dev.) [%]	11.95	3.58	15.03	6.16	2.81
2045-2075	A2	annual mean [mm]	1037	292	769	22	430	2045-2075	A2	annual mean [mm]	1454	417	1041	3	492
		change [%]	-4.73	3.94	-8.28	-20.13	-24.11			change [%]	-2.01	2.74	-4.10	-48.53	-26.97
		σ (std.dev.) [%]	15.71	5.63	19.49	15.66	5.80			σ (std.dev.) [%]	12.43	4.13	15.75	17.35	2.56
A1B	annual mean [mm]	1036	292	768	23	427	A1B	annual mean [mm]	1453	417	1041	3	488		
		change [%]	-4.85	3.98	-8.40	-18.97			-24.61	change [%]	-2.05	2.79	-4.16	-47.67	-27.54
		σ (std.dev.) [%]	15.87	5.70	19.69	15.78			5.76	σ (std.dev.) [%]	12.54	4.17	15.88	17.58	2.77
RCP3PD	annual mean [mm]	1057	288	787	16	481	RCP3PD	annual mean [mm]	1466	413	1057	2	564		
		change [%]	-2.89	2.75	-6.19	-41.87			-15.02	change [%]	-1.19	1.79	-2.68	-65.20	-16.25
		σ (std.dev.) [%]	13.31	4.55	16.49	14.39			6.61	σ (std.dev.) [%]	10.58	3.29	13.42	12.09	1.55
2070-2099	A2	annual mean [mm]	1004	293	729	16	361	2070-2099	A2	annual mean [mm]	1427	417	1011	0	391
		change [%]	-7.79	4.22	-13.11	-42.99	-36.20			change [%]	-3.80	2.91	-6.89	-100.00	-41.96
		σ (std.dev.) [%]	18.84	7.62	23.38	22.00	2.10			σ (std.dev.) [%]	15.14	5.74	19.01	0.00	9.91
A1B	annual mean [mm]	1016	293	739	14	388	A1B	annual mean [mm]	1435	417	1019	0	429		
		change [%]	-6.70	4.18	-11.96	-50.90			-31.39	change [%]	-3.27	2.81	-6.12	-100.00	-36.37
		σ (std.dev.) [%]	17.26	6.80	21.44	21.30			2.94	σ (std.dev.) [%]	13.83	5.07	17.40	0.00	7.05
RCP3PD	annual mean [mm]	1058	288	777	6	486	RCP3PD	annual mean [mm]	1463	412	1053	0	569		
		change [%]	-2.87	2.66	-7.38	-79.42			-14.09	change [%]	-1.39	1.59	-3.06	-100.00	-15.56
		σ (std.dev.) [%]	12.97	4.53	16.13	23.22			6.13	σ (std.dev.) [%]	10.27	3.23	13.00	0.00	1.49

3.1 Engadin

Signifikante Veränderungen können nur bei der Schnee- und Eisschmelze beobachtet werden. Die Magnitude der Änderungen hängt sehr stark vom gewählten Emissionsszenario ab. Obwohl die Klimasignale des RCP3PD Szenarios am Kleinsten sind, resultieren für die Eisschmelze des Zeitraums 2085 die grössten Unterschiede zu der Kontrollperiode (-79.4%); die Unsicherheit ist mit 23.2% auch entsprechend hoch. Da die Niederschläge sich kaum

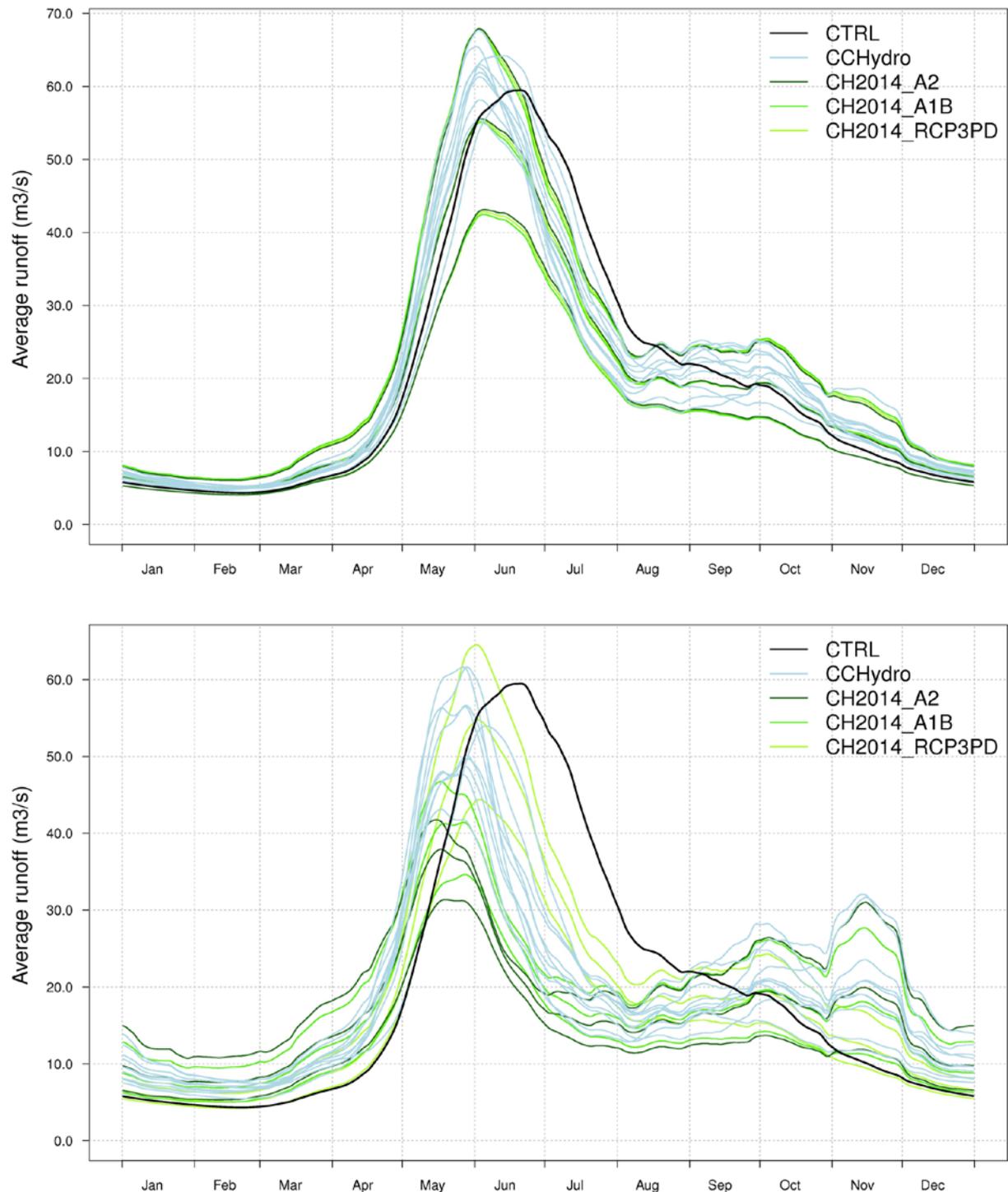


Abb. 3: 30-jähriger mittlerer Abfluss für die Abflussstation des Inn bei Tarasp (oben: 2035; unten: 2085)

stark verändern dürften, kann die Veränderung des Schneeschmelzanteils mit der Temperaturänderung erklärt werden.

Der maximale Abfluss für den Inn bei Tarasp zeigt eine Vorverlagerung um etwa zwei Wochen für die nähere Zukunft; für das Ende des 21. Jahrhunderts dürften die grössten Abflüsse um bis zu sechs Wochen früher eintreten. In den Monaten September bis Juni werden die Abflüsse höher als heute, im restlichen Jahr tiefer ausfallen. Die CH2011-plus Szenarien zeigen eindeutig, dass die zu erwartenden Veränderungen stark vom Emissionsszenario abhängen (Abbildung 3).

In der Abbildung 4 sind die Unterschiede der CCHydro und CH2011-plus Resultate aufgeführt. Deutlich sticht heraus, dass alle Simulationen eine Reduktion des Schneespeichers während des ganzen Jahres aufweisen, im Sommer bis zu 100%; für die CH2011-plus Szenarien ist der Bereich eher schmaler. Gründe dafür liegen bei der kleinen Anzahl von CH2011-plus Ketten einerseits, andererseits in der Konstruktion der Klimasignale liegen, da der Niederschlag und die Temperatur voneinander nicht unabhängig behandelt werden.

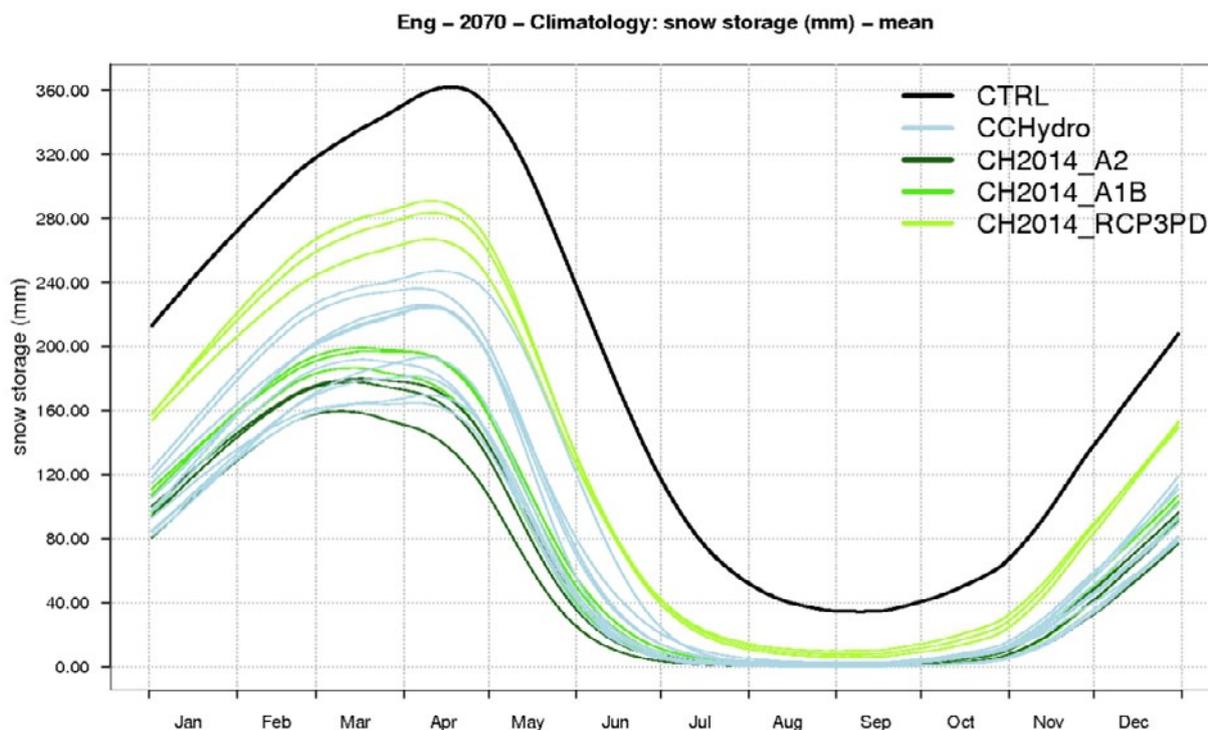


Abb. 4: Vergleich zwischen Kontrollperiode, CCHydro und CH2014 des Schneespeichers im Engadin für die Periode 2085

3.2 Landquart/Plessur

Die Trends der mittleren jährlichen Veränderungen der Landquart/Plessur Region sind mit den Simulationen des Engadins vergleichbar. Insgesamt gibt es mehr Niederschläge und daraus folgend grössere Abflüsse und weniger Verdunstung; die Änderungen der Parameter bis zum Ende des Jahrhunderts sind jedoch nicht signifikant. Im Gegenzug sind die Veränderung der Schnee- und Eisschmelze evident. Da die Gletscher in dieser Region klein sind, verschwinden sie bis in die Mitte des Jahrhunderts. Mit dem Emissionsszenario A2 sinkt der

Schneesmelzanteil um 42% für den Zeitraum 2085, mit dem moderaten Szenario RCP3PD bleibt der Trend mit -15% nach der Periode 2035 konstant. Diese Entwicklungen sind wahrscheinlich die Folgen der unterschiedlichen Temperaturschwankungen und der daraus resultierenden Verschiebung der Schneefallgrenze, welche bei den Emissionsszenarien A2 und A1B ständig ansteigen, hingegen sich bei RCP3PD einpendeln wird.

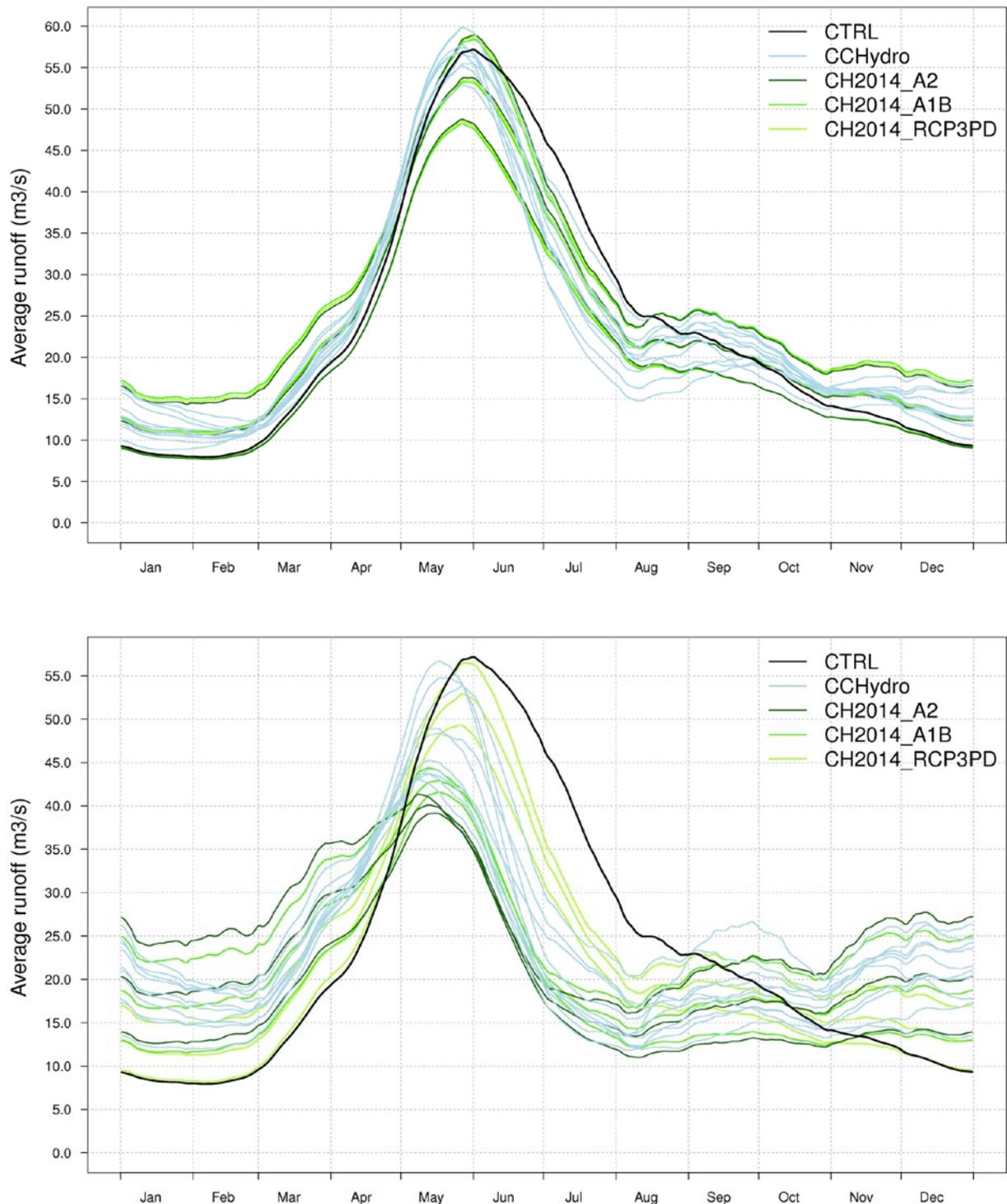


Abb. 5: 30-jähriger mittlerer Abfluss für die Abflussstation der Landquart bei Felsenbach (oben: 2035; unten: 2085)

Die Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des Abflussregimes an der Messstation der Landquart in Felsenbach. Ähnlich wie bei den Trends sind mit Tarasp vergleichbar, es gibt ebenfalls eine Vorverschiebung im Jahr, im Herbst wird eine Zunahme erwartet, im Frühjahr und Sommer im Gegensatz eine Abnahme. Der Rückgang ist primär durch die Verkleinerung des Schneespeichers im Herbst und Winter zu erklären. Der Einfluss der Wahl des Emissions-szenarios wird erst gegen Ende Jahrhundert ausgeprägt und es wird deutlich, dass v.a. die Temperaturentwicklung des RCP3PD Szenarios im Gegensatz zu den beiden anderen positiven Auswirkungen aufweist.

Die Vergleiche der Simulationen von CCHydro und CH2011-plus zeigen ähnliche Trends in ähnlichen Grössenordnungen, die Bandbreiten sind jedoch bei den CH2014 Szenarien kleiner (Abbildung 6).

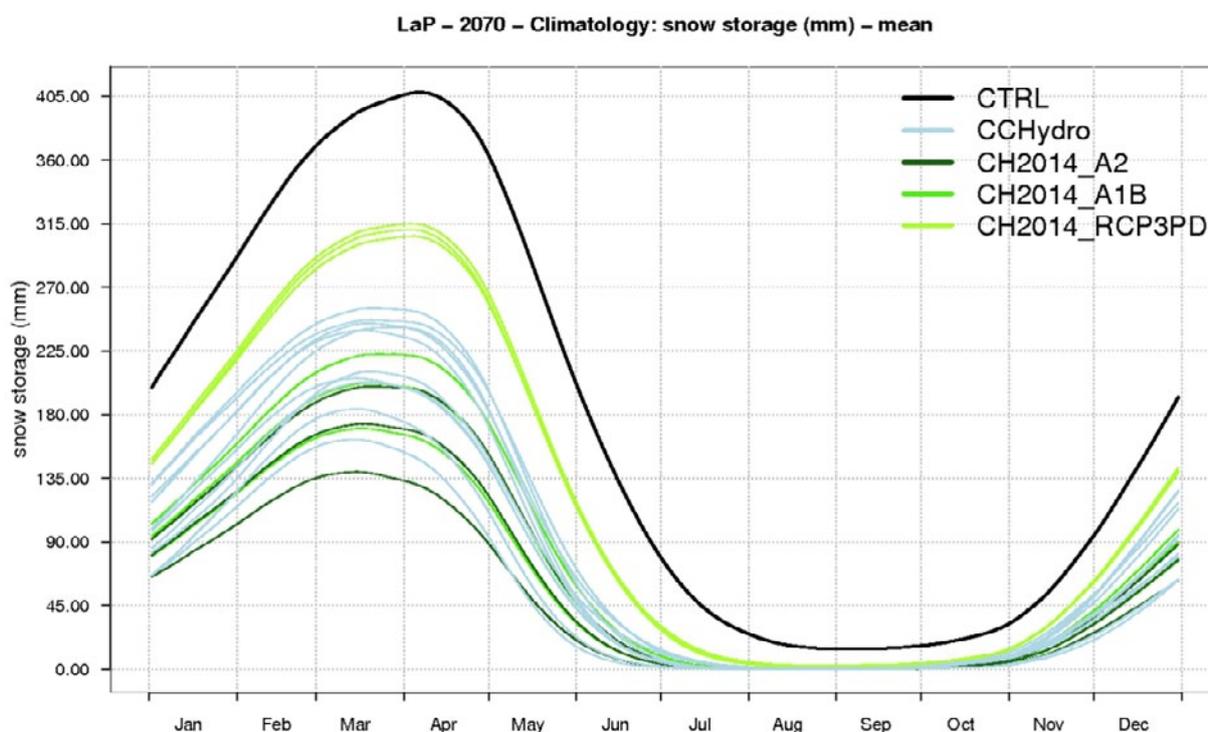


Abb. 6: Vergleich zwischen CCHydro und CH2014 des Schneespeichers der Region Landquart/Plessur für die Periode 2085

4. Schlussfolgerungen

Betrachtet man die zu erwartenden Änderungen, fällt primär die prozentuale Veränderung des stark abnehmenden (-22%) Gletscheranteils (hydrologische Schweiz) am Gesamtabfluss in der ersten Hälfte des laufenden Jahrhunderts auf, welcher sich in der fernen Zukunft einpendeln dürfte. Hingegen wird der Schneeschmelzanteil am gesamten Abfluss in der ersten Hälfte des laufenden Jahrhunderts um ca. 15% und in der zweiten Periode um bis zu 40% abnehmen. Die Änderungen der gesamten Abflussmengen sowie der Verdunstung fallen als Jahresmittelwerte betrachtet klein aus. Deutlicher zeigen sich jedoch die entsprechenden saisonalen und regionalen Folgen der Klimasignale auf den Wasserhaushalt. Vergleicht man nun die auf A1B basierten CCHydro-Ergebnisse mit dem optimistischen Emissionsszenario

RCP3PD, kann eindeutig aufgezeigt werden, dass sich eine Reduktion von Treibhausgasen v.a. bis zum Ende des Jahrhunderts positiv auswirken dürfte: Alle Varianten der probabilistischen Methode weisen für den Gesamtabfluss leichte Verschiebungen zur Kontrollperiode auf, welche sich jedoch innerhalb der natürlichen Variabilität bewegen. Die Resultate von A2 sind im Gegensatz mit den A1B-Werten vergleichbar, die Veränderungen sind einfach noch offensichtlicher und weichen erst in der fernen Zukunft signifikant vom A1B-Szenario ab.

Literatur

- BAFU (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217; 76 S.
- BERNHARD, L. & M. ZAPPA (2012): Schlussbericht CCHydrologie: Teilprojekt WHH– CH–Hydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete. Technical report, WSL, Birmensdorf.
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate und RcCC, Zürich, Schweiz
- BOSSHARD, T., KOTLARSKI, S., EWEN, T. & C. SCHÄR (2011): Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15
- FISCHER, A. M., WEIGEL, A. P., BUSER, C. M., KNUTTI, R., KÜNSCH, H. R., LINIGER M. A., SCHÄR, C. & C. APPENZELLER (2012): Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *Int. J. Clim.* 32(15)
- GRUBER, S. (2007): A mass-conserving fast algorithm to parameterize gravitational transport and deposition using digital elevation models. *Wat. Res. Research.* 43(W06412)
- PAUL, F., MAISCH, M., ROTHENBÜHLER, C., HOELZLE, M. & W. HAEBERLI (2007): Calculation and visualisation of future glacier extent in the SWISS Alps by means of hypsographic modelling. *Glob. & Plan. Change.* 55(4)
- ROTHENBÜHLER, C. (2006): GISALP – Räumlich-zeitliche Modellierung der klimasensitiven Hochgebirgslandschaft des Oberengadins. PhD thesis, Geographisches Institut, Universität Zürich
- Van der LINDEN, P. & J. F. B. MITCHELL (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met. Office Hadley Centre, Exeter
- VERBUNT, M., GURTZ, J., LANG, H., WARMERDAM, P. & M. Zappa (2003): The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *J. Hydr.* 282(1-4)
- VIVIROLI, D., ZAPPA, M., GURTZ, J. & R. Weingartner (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Env. Mod. & Soft.* 24(10)

Herausragende Klimaperioden in Niederösterreich 1896 – 2012

Maximilian Heilig, Friedrich Salzer

Zusammenfassung

In einem Projekt der Niederösterreichischen Landesregierung zur regionalen Klimadiagnose Niederösterreichs erfolgte die Digitalisierung, Überprüfung und Korrektur von 90 Langzeittagesklimareihen ab 1896. Mit einer multivarianten Datenanalyse wurden herausragende Klimaperioden ausgewiesen. Die Variabilität dieser mehrjährigen Perioden deckt ein weites Spektrum von baltischen bis zu submediterranen Klimaverhältnissen ab. Erwähnenswert sind die feuchtkühlen Sommer um 1913, die Winter mit russischer Kälte von 1940 bis 1942 und die Häufung warmer Temperaturanomalien ab den späten 1980er Jahren.

1. Einleitung

Das Klima Niederösterreichs ist durch seine Übergangslage zwischen atlantischen, mediterranen und kontinentalen Klimaeinflüssen und durch die reichhaltige Orographie des Landes von großen räumlichen und zeitlichen Unterschieden geprägt. Übergangsklimate sind generell besonders sensibel gegenüber Klimaänderungen, welche grundlegende Änderungen im Wasserkreislauf nach sich ziehen.

Im Rahmen des Projektes regionale Klimadiagnose Niederösterreich wurden von 2005 – 2010

- analoge Altdatenbestände mit täglichen Niederschlags-, Schneehöhen und Temperaturdaten von 90 Stationen digitalisiert und mit
- Raum- Zeitvergleichen (1400 Monatstabellen und 40000 Tageskarten) überprüft und korrigiert,
- aus Literaturinformationen der Ablauf der wichtigsten natürlichen und anthropogenen Klimafaktoren für Niederösterreich nachvollzogen.

Auf der Grundlage dieser Informationen und weiterer homogener Langzeitreihen aus dem ZAMG HISTALP Projekt erfolgte die Analyse der Klimaentwicklung in Niederösterreich unter Verwendung von multivariaten statistischen Verfahren. Ein Schwerpunkt lag dabei auf regionalen Unterschieden in den Klimaregionen des Landes. Neben der räumlichen Differenzierung des klimatisch sehr heterogenen Bundeslandes war die Ausweisung herausragender Klimaperioden zur Kennzeichnung der klimatischen Variabilität und klimatischen Änderungen ein Hauptziel des Projektes. Die Untersuchungen ergaben eine außerordentlich große zeitliche und räumliche Variabilität der Klimaverhältnisse in Niederösterreich und signifikante, davor nicht feststellbare Änderungen in den letzten Dekaden.

2. Herausragende Klimaperioden von 1896 bis dato

Die Klimaparameter seit 1896 zeigen die wichtigsten Klimaphasen des zwanzigsten Jahrhunderts an. In den ersten Jahren bzw. Jahrzehnten überwogen feuchtere Verhältnisse bei niedrigen Temperaturen und weniger Sonnenschein, wobei die Winter eher auf der milderen Seite lagen, während sich in den Perioden um 1945 die Strengwinter häuften. In der Nachkriegszeit folgte ein sonnig warmes Intermezzo mit reichlichen Winterniederschlägen, dem

eine längere sonnenarme und zunehmend trockenere Phase des „Global Dimming“ folgte. In diesen Zeitraum von etwa 1955 bis 1985 fielen um die Höhepunkte des Sonnenfleckenzyklus die trockensten Jahre des Untersuchungszeitraumes. Die Trendwende zu feuchteren Verhältnissen ab den achtziger Jahren geht parallel zu mehr Sonnenschein und höheren Temperaturen. Die letzte Periode ist geprägt durch die Kombination Wärme, viel Sonne und reichlich Niederschlag. Diese Periode der Jahre ab 2005 bricht damit einige Trends: Der Zusammenhang feucht kühl und sonnenscheinarm wird aufgebrochen, es treten gegen den Langzeittrend zu trockeneren Sommern die höchsten mittleren Sommerniederschläge aller Perioden auf. Die Verschiebung zu mehr Winterniederschlägen wird trotz erhöhter Winterniederschläge ebenfalls unterbrochen.

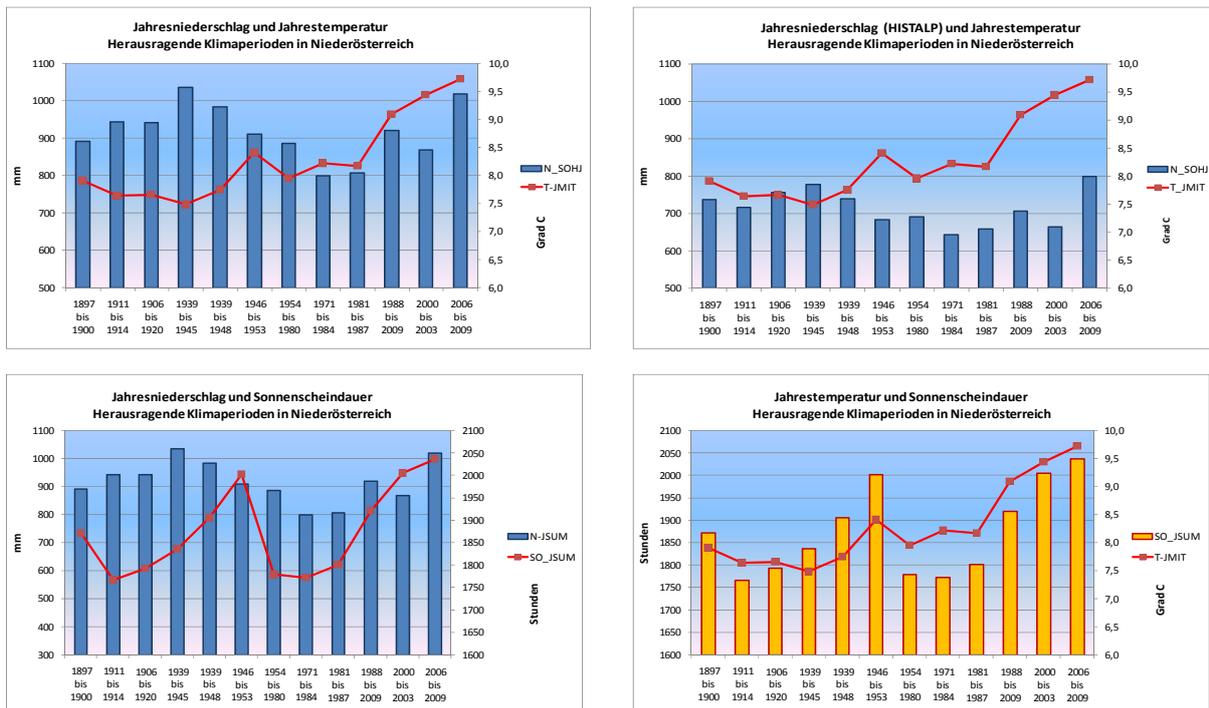


Abb. 1: Jahresniederschlag, Temperatur und Sonnenscheindauer in den herausragenden Klimaperioden

Die bedingt formatierte Tabelle der Kennwerte der herausragenden Perioden zeigt die Konzentration feucht kühler Saisonen und Jahre in den früheren Perioden und die Häufung warmer Anomalien ab 1988.

Tab. 1: Kennwerte der herausragenden Perioden (Abweichungen im Vergleich zu 1896 – 2009, Abweichungen in % und Grad C)

		Mittel der Klimaelemente der herausragenden Klimaperioden in Niederösterreich											
Element	Zeit	1897 bis 1900	1911 bis 1914	1906 bis 1920	1939 bis 1945	1939 bis 1948	1946 bis 1953	1954 bis 1980	1971 bis 1984	1981 bis 1987	1988 bis 2009	2000 bis 2003	2006 bis 2009
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Niederschlag Summen in mm	WI	132.6	140.2	162.3	160.0	196.0	202.2	156.1	158.1	176.2	159.0	165.7	174.8
	FR	255.0	239.9	222.6	301.3	249.3	187.4	218.4	195.2	187.4	223.3	187.4	230.5
	SO	313.9	326.2	350.7	344.4	338.7	338.8	331.2	295.6	269.7	328.1	301.3	394.5
	HE	181.8	235.9	203.0	227.8	202.3	187.4	178.8	179.3	170.1	211.4	220.3	225.8
	WIHJ	270.9	324.4	336.4	385.6	414.3	400.3	325.6	325.3	335.8	357.3	370.8	377.4
	N_SOHJ	595.2	628.3	614.3	633.9	574.0	533.6	554.4	500.6	478.7	563.8	500.9	636.3
	N-JSUM	891.7	943.7	941.8	1035.6	984.0	910.5	885.8	827.9	807.1	920.5	869.5	1018.9
Lufttemperatur Mittel in Grad C	WI	-0.7	-1.0	-0.8	-2.7	-2.5	-1.0	-1.1	-0.6	-1.8	0.1	-0.2	0.5
	FR	7.3	8.1	7.8	7.4	8.1	8.7	7.8	8.3	8.2	9.2	10.0	9.9
	SO	16.7	16.2	16.2	16.8	17.0	17.4	16.8	17.3	17.4	18.3	19.0	18.9
	HE	8.2	7.4	7.4	8.3	8.3	8.5	8.3	8.3	8.7	8.8	9.1	9.5
	WIHJ	1.9	2.0	1.8	1.0	1.1	1.9	1.9	2.2	1.5	2.9	3.2	3.2
	T-SOHJ	13.8	13.4	13.5	14.0	14.4	14.9	14.0	14.4	14.7	15.3	15.8	16.0
	T-JMIT	7.9	7.6	7.7	7.5	7.7	8.4	8.0	8.3	8.2	9.1	9.4	9.7
Sonnenscheindauer Summen in Stunden	WI	206.3	241.5	216.9	198.8	188.7	179.8	182.7	193.9	198.2	221.6	225.4	227.9
	FR	484.5	504.6	509.5	526.6	582.6	650.9	540.5	549.8	536.1	593.4	625.6	640.0
	SO	791.3	706.9	711.8	747.1	748.3	776.4	681.1	690.8	690.4	741.8	794.5	776.9
	HE	390.4	315.3	357.3	363.4	386.2	397.0	373.3	363.8	379.8	363.5	358.6	393.0
	WIHJ	523.0	545.4	502.9	506.0	520.3	543.1	509.5	518.1	521.4	549.2	555.4	567.3
	SO-SOHJ	1349.6	1239.6	1283.1	1329.7	1387.3	1457.3	1269.7	1281.5	1285.4	1370.0	1445.4	1481.6
	JS	1872.0	1766.6	1793.1	1836.0	1906.0	2002.7	1779.2	1798.4	1801.4	1920.7	2005.6	2036.9

		Abweichungen der Klimaelemente der herausragenden Klimaperioden in Niederösterreich											
Element	Zeit	1897 bis 1900	1911 bis 1914	1906 bis 1920	1939 bis 1945	1939 bis 1948	1946 bis 1953	1954 bis 1980	1971 bis 1984	1981 bis 1987	1988 bis 2009	2000 bis 2003	2006 bis 2009
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Niederschlag Abweichungen Prozent	WI	-18.5	-13.8	-0.1	-1.6	20.5	24.4	-4.0	-6.5	8.4	-2.2	1.9	7.5
	FR	16.1	9.2	1.4	37.2	13.5	-14.7	-0.6	-12.8	-14.7	1.7	-14.7	4.9
	SO	-4.0	-0.2	7.3	5.3	3.6	3.6	1.3	-14.4	-17.5	0.3	-7.8	20.7
	HE	-8.0	19.4	2.7	15.3	2.4	-5.2	-9.5	-10.1	-13.9	7.0	11.5	14.3
	WIHJ	-20.8	-5.2	-1.7	12.7	21.1	17.0	-4.8	-6.7	-1.9	4.4	8.4	10.3
	N_SOHJ	5.4	11.3	8.8	12.3	1.7	-5.5	-1.8	-12.9	-15.2	-0.1	-11.3	12.7
	N-JSUM	-1.6	4.1	3.9	14.3	8.6	0.5	-2.3	-11.7	-10.9	1.6	-4.1	12.4
Lufttemperatur Abweichungen Grad C	WI	0.3	0.0	0.2	-1.7	-1.5	0.0	-0.1	0.5	-0.8	1.1	0.8	1.5
	FR	-0.8	0.0	-0.3	-0.7	0.0	0.6	-0.3	0.0	0.1	1.1	1.9	1.8
	SO	-0.4	-0.9	-0.9	-0.3	-0.1	0.3	-0.3	0.0	0.3	1.2	1.9	1.8
	HE	-0.1	-0.9	-0.9	0.0	0.1	0.2	0.1	-0.1	0.5	0.5	0.8	1.2
	WIHJ	-0.1	0.0	-0.1	-1.0	-0.8	-0.1	0.0	0.3	-0.4	0.9	1.2	1.3
	T-SOHJ	-0.5	-0.9	-0.8	-0.3	0.1	0.7	-0.3	-0.1	0.4	1.1	1.5	1.8
	T-JMIT	-0.2	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4	0.3	-0.2	0.1	0.1	1.0	1.3	1.6
Sonnenscheindauer Abweichungen Prozent	WI	2.7	20.3	8.0	-1.0	-6.0	-10.4	-9.0	-7.2	-1.3	10.4	12.3	13.5
	FR	-11.3	-7.6	-6.7	-3.6	6.6	19.1	-1.1	1.0	-1.9	8.6	14.5	17.1
	SO	9.3	-2.3	-1.7	3.2	3.4	7.3	-5.9	-6.4	-4.6	2.5	9.8	7.3
	HE	6.9	-13.7	-2.2	-0.5	5.7	8.7	2.2	-1.7	4.0	-0.5	-1.8	7.6
	WIHJ	0.8	5.1	-3.0	-2.5	0.3	4.7	-1.8	-0.6	0.5	5.9	7.1	9.4
	SO-SOHJ	2.5	-5.9	-2.6	1.0	5.3	10.6	-3.6	-4.5	-2.4	4.0	9.7	12.5
	JS	1.9	-3.8	-2.3	0.0	3.8	9.1	-3.1	-3.5	-1.9	4.6	9.2	10.9

3. Herausragende Klimaperioden von 1896 bis 2009

3.1 Periode 1897 – 1900 Große Hochwässer in der auslaufenden kleinen Eiszeit

Diese Periode ist geprägt durch im langzeitlichen Vergleich trockene Winter und feuchte Sommerhalbjahre. Die punktuellen Spitzen der Abweichungen ergeben sich durch im Rahmen der Datenkorrektur in HYDAMS (Hydrologisches Datenbanksystem des Hydrographischen Dienstes) nicht entfernbare Inhomogenitäten.

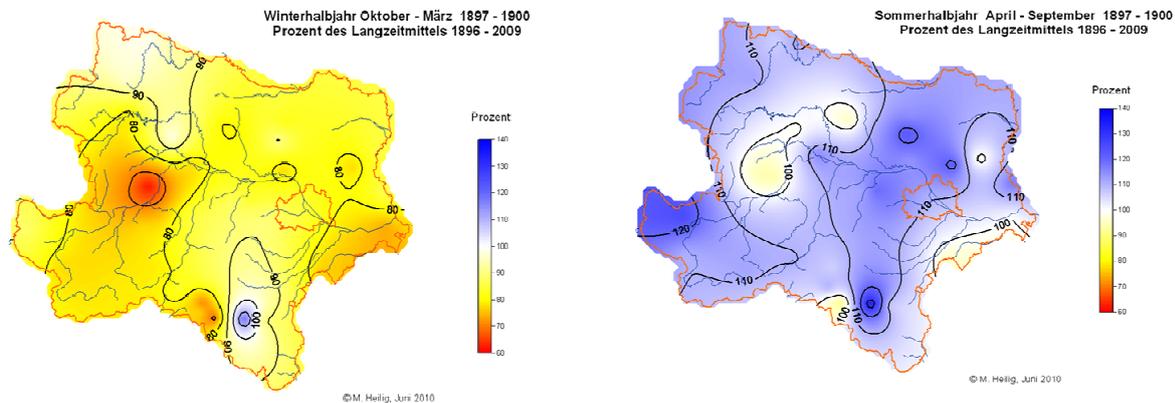


Abb. 2: Saisonale Niederschlagsabweichungen in Prozent von 1897 – 1900

Von 1896 bis 1900 traten in den niederschlagsreichen Sommerhalbjahren Ende Juli 1897 und Anfang September 1899 großräumige Starkregen auf, die Rekordhochwässer auslösten. An der Mehrzahl der alpinen Stationen stammen die Höchstwerte der maximalen Tagesniederschläge aus diesem Zeitraum. Die Winterhalbjahre waren trockener als das Langzeitmittel, die Temperaturen im Winterhalbjahr entsprachen dem Langzeitmittel, jene des Sommerhalbjahres lagen etwas darunter. Auffällig ist in dieser Periode der geringe Anteil des Winterhalbjahres am Gesamtniederschlag, dieser war in diesem Zeitraum der geringste aller Perioden.

3.2 Periode 1911 – 1914 Solares Minimum und Novarupta - Katvai Ausbruch 1912

Von 1912 bis 1914 bewirkte das Zusammenspiel einer Phase solarer Inaktivität mit sommerkühlen und wintermilden feuchten Verhältnissen mit einem rasch klimawirksamen großen außertropischen Vulkanausbruch (Novarupta - Katvai in Alaska; ROBOCK 2000) einen Klimasturz in Niederösterreich (zeitverzögert stark negativer NAO nach LUTERBACHER et.al. 2002). In den Sommern 1912 und 1913 stiegen die Tagesmaxima im niederösterreichischen Flachland kaum über 25 Grad („Jahre ohne Sommer“), August und September 1912 sowie Juli 1913 wiesen herausragende negative Temperaturanomalien bis über 4 Grad bei weit überdurchschnittlichen Niederschlägen auf. Die Temperaturen lagen im Jahresmittel 0.5 Grad unter dem Langzeitschnitt, die Sonnenscheindauer war mit Ausnahme des sonnigen August unterdurchschnittlich.

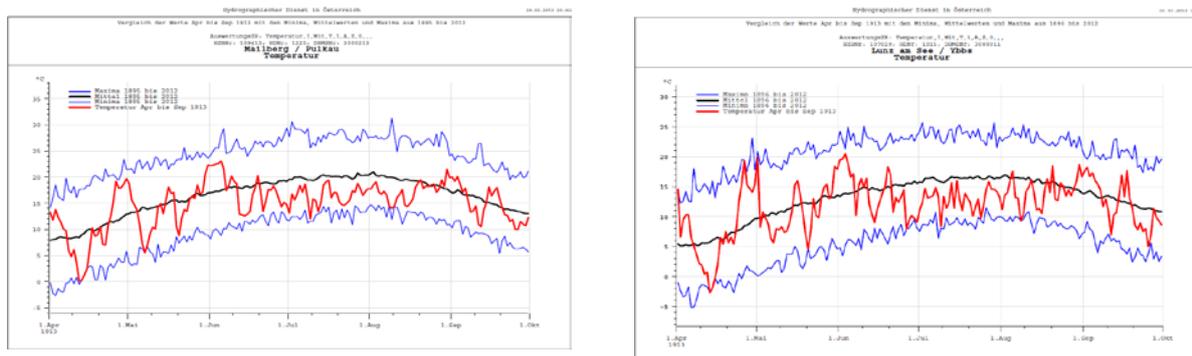


Abb. 3: Abweichungen der Temperaturtagesmittel in Mailberg und Lunz am See im Sommer 1913 vom Langzeitmittel

In Niederösterreich wurden im September 1912 und Juli 1913 die im Landesmittel der HISTALP Stationen größten negativen Temperaturanomalien des gesamten Untersuchungszeitraumes 1896 bis 2009 festgestellt. In der Gesamtheit der Jahre 1911 bis 1914 stehen überwiegend niederschlagsärmere Verhältnisse im Winterhalbjahr regional deutlich positiven Abweichungen im Sommer gegenüber.

3.3 Die „baltische“ Phase der Kriegsjahre 1939 – 1945

Ab 1937 setzt eine feuchte Klimaphase ein, die von 1939 bis 1942 mit einer Serie von herausragenden Strengwintern und Jahren ohne Sommer ihren Höhepunkt erreichte. Diese Phase kann keinem direkt wirksamen natürlichen äußeren Klimaantrieb zugeordnet werden, die anthropogenen SO_2 Emissionen (SMITH et al. 2011) nahmen allerdings mit der Industrialisierung nach 1930 stark zu, die Kriegshandlungen verstärkten diese kühlenden Einflüsse. Nach BRÖNNIMANN 2004, 2007 förderte eine herausragende globale Zirkulationskonstellation mit einer starken El Niño Phase der ENSO (El Niño/Southern Oscillation) und anhaltend stark negativen NAO Index gehäufte blockierende Winterwetterlagen mit verstärkter Zufuhr polarer und kontinentaler Kaltluft. Im Jahr 1940 verband sich bis weit in das Frühjahr anhaltende Winterwitterung mit Sommerkühle zu einem „Jahr ohne Sommer“. Die Wintermittel lagen von 1939 bis 1945 um 1.5 Grad tiefer als der Schnitt 1896 bis 2009, das Jahresmittel 0.5 Grad, lediglich der Herbst war normal.

Dieser Zeitraum ist mit Ausnahme des äußersten Westen und Südosten (südliche Bucklige Welt) sowohl im Winter als auch im Sommerhalbjahr durch Niederschlagsüberschüsse geprägt. Negative Temperaturabweichungen mit Schwergewicht im Winter verschärften die Wirkung der Niederschlagsüberschüsse zusätzlich. Den teilweise überlangen Strengwintern schloss sich meist feucht kühle Frühjahrswitterung an, mit Folgen wie weit in die Vegetationsperiode reichende Staunässe, hohe Grundwasserstände und Abflüsse.

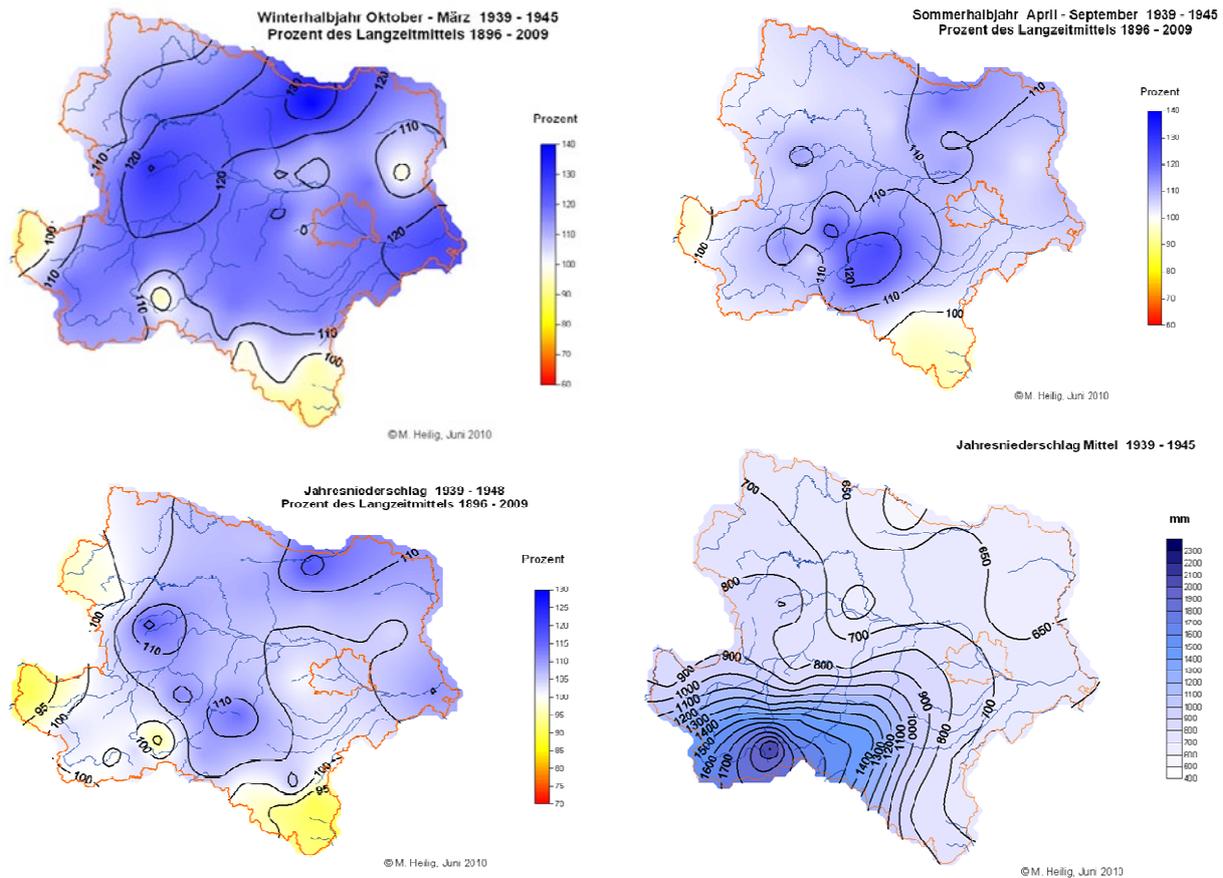


Abb. 4: Saisonale und jährliche Niederschlagsabweichungen in Prozent und Jahresniederschläge von 1939 – 1945

Die Phase der Kriegsjahre ist durch die nach Meinung vieler Historiker kriegsentscheidenden Extremwinter in die Klimageschichte eingegangen. In den Wintern von 1939/1940, 1940/1941 (starker S – N Gradient) und 1941/1942 blieben die Temperaturen wochenlang im negativen Bereich. Im Jänner 1942 überschritt die Temperatur an mehreren Stationen Niederösterreichs wochenlang nicht die -10 Grad Marke. Im Jänner 1940 betrug das Monatsmittel in Niederösterreichschnitt -10.4 Grad, im Jänner 1942 -9.8 Grad. Diese Temperaturen liegen unter dem Langzeitmittel der Region Moskau. In Zwettl erreichten die Mittel -12.4 bzw. -11.9 Grad. Im Mai 1941 blieb das Mittel von Niederösterreich unter 10 Grad, das Winterhalbjahr 1939/40 war mit einem Mittel von -1.4 Grad (Langzeitmittel +2 Grad) das kälteste des Untersuchungszeitraumes von 1896 bis 2009. Diese winterlichen Temperaturverhältnisse waren auch im Flachland mit sehr großen Schneemengen verbunden, schwere Schneeverwehungen führten zu massiven Verkehrsbehinderungen.

Die Witterungsverhältnisse in diesen Jahren entsprechen durchaus jenen am Höhepunkt der kleinen Eiszeit. Im Jahr 1943 war vor allem in den östlichen Landesteilen der Jänner streng, im Spätwinter 1944 gab es nach einem milden Hochwinter in einem kalten Februar und März Schneerekorde in den niederösterreichischen Alpen, die auch in den vergangenen Jahren nur teilweise eingestellt wurden.

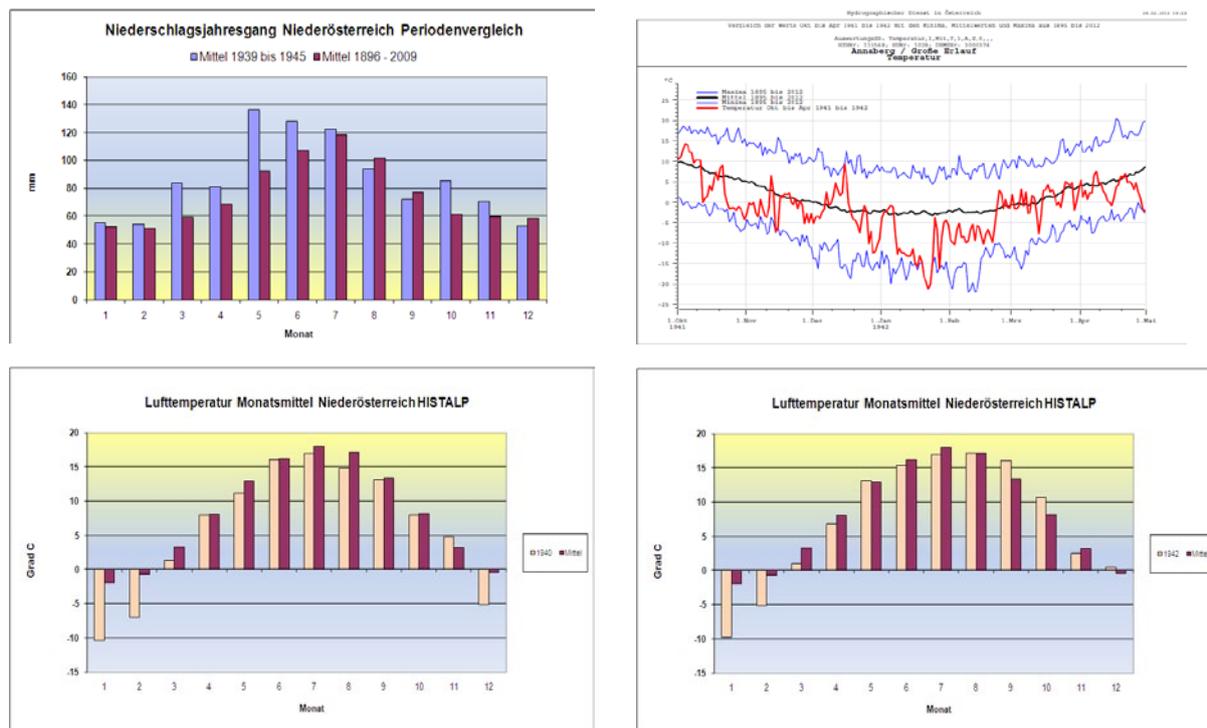


Abb. 5: Jahresgänge der Monatssummen des Niederschlages, der Monatsmittel der Lufttemperatur Niederösterreich 1940 und 1942 und Abweichungen der Temperaturtagesmittel von Annaberg im Strengwinter 1941/42

Die Kenntnis der Verhältnisse dieses Zeitraumes ist deshalb bedeutend, da sie eine untere Grenze der unter den Klimafaktorkombinationen im mittleren 20. Jahrhunderts klimatischen Möglichkeiten ausloten.

3.4 Global Dimming 1954 – 1980

Ab Mitte der fünfziger Jahre setzte nach einige überwiegend sonnig warmen Sommerhalbjahren eine nachhaltige Verschlechterung der Witterung ein, die Temperaturen gingen in allen Jahreszeiten zurück, die Zahl der Sonnenstunden fiel ab, die Niederschläge nahmen im Winter ab, im Sommer leicht zu. Diese Änderungen lassen sich nach den Ergebnissen von Klimasimulationen überwiegend mit der starken Zunahme der Aerosol- und SO_2 -Emissionen (SMITH et al. 2011) durch den Aufbau der energieintensiven Industrien und Verkehrssysteme mit fossilen Energieträgern ohne Umweltschutzmaßnahmen erklären („Global Dimming“ – WILD 2008).

Dieser Zeitraum zerfällt in eine feuchtere Phase bis 1966 und einem nachfolgenden Rückgang der Niederschläge. 1962/63 und 1963/64 traten in Niederösterreich die bis gegenwärtig letzten Strengwinter auf, 1965 und 1966 zwei aufeinanderfolgende sommerkühle Nässejahre mit einem weiteren Grundwasserhochstand. In den siebziger Jahren werden die Winter milder, die Sommer waren insgesamt mäßig warm bis kühl, aber überwiegend niederschlagsarm, die Grundwasserstände beginnen stark zu sinken. Insgesamt treten in diesem Zeitraum Trockenjahre gehäuft auf, die Starkniederschläge nahmen an Intensität ab.

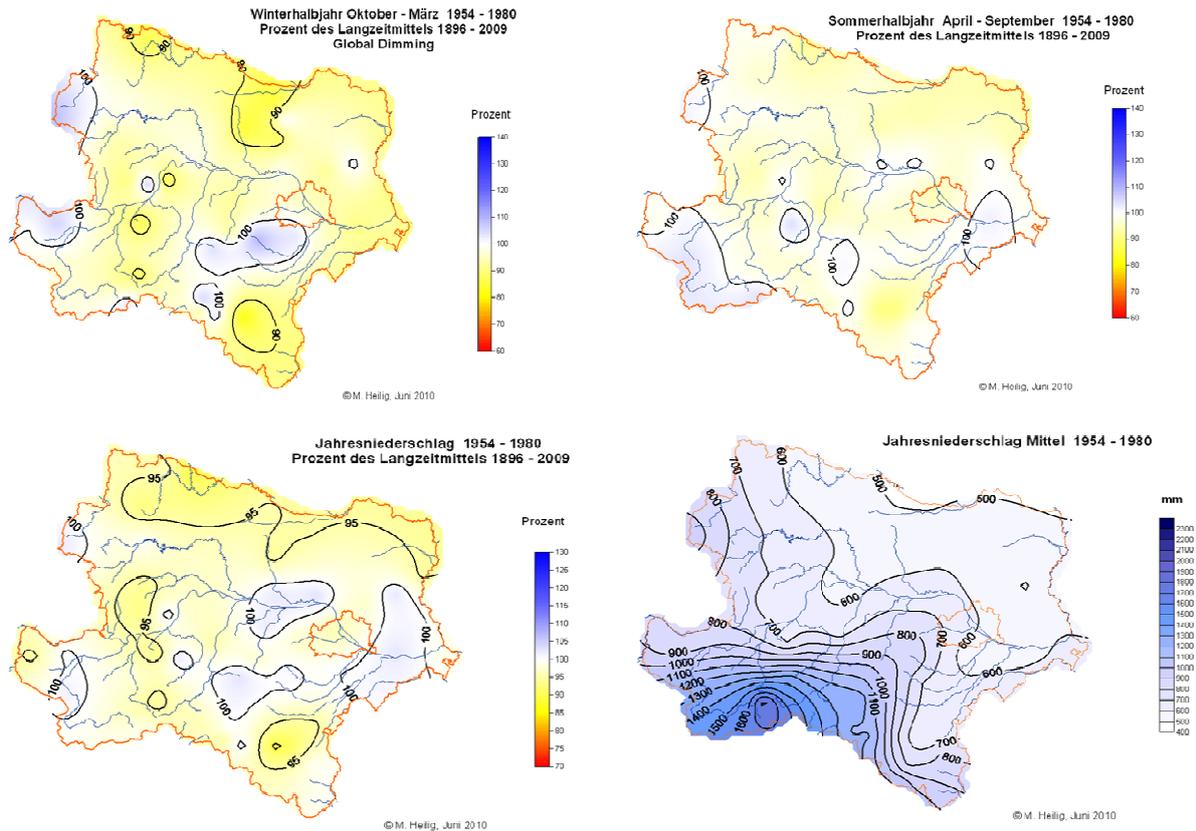


Abb. 6: Saisonale und jährliche Niederschlagsabweichungen in Prozent und Jahresniederschläge von 1954 – 1980

3.5 Treibhausphase 1988 bis dato

Diese Phase ist durch die Folgen des Durchgreifens des Treibhauseffektes in Mitteleuropa zusammen mit einem Anstieg der Sonnenstrahlung geprägt (Global Brightening, WILD 2008). In diesen Zeitraum fallen nahezu alle Höchstwerte der Temperatur und der Sonnenscheindauer in Niederösterreich, aber auch zahlreiche Spitzenwerte der Niederschläge. Es traten an vielen Stationen Einzelereignisse und vor allem Monats- und saisonale Summen auf, die in einigen Regionen (Waldviertel, südwestlicher Wienerwald) den Rahmen der bisherigen Statistik sprengten. Bei 73 von 76 untersuchten Langzeitreihen fiel der maximale Monatsniederschlag ab Stationsbeginn in diesen Zeitraum. Es traten aber auch alternierend mit den teilweise bisher nicht beobachteten Niederschlagsperioden einige Trockenphasen auf, die in einigen Gebieten ebenfalls die bisherigen Rekorde übertrafen. Zusammen mit Temperaturmitteln, die in einigen Monaten (Jänner 2007, April 2000, 2007, 2009, Juni 2003, Juli 1994, 1995 und 2006, August 1992 und 2003) auch länger zurückliegende Rekorde brachen, traten in den genannten Monaten im Sommerhalbjahr zusammen mit neuen Spitzenwerten an Sonnenschein und Strahlung extreme Trockenphasen auf, die teilweise enorme Schäden in der Land- und Forstwirtschaft anrichteten. In den Phasen der im natürlichen Zyklus verstärkten Sonnenaktivität häuften sich 1990 bis 1995, 2000 bis 2003 und ab 2011 heiße Sommer mit langanhaltenden Dürre- und Hitzephasen auf, die massive Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft hatten.

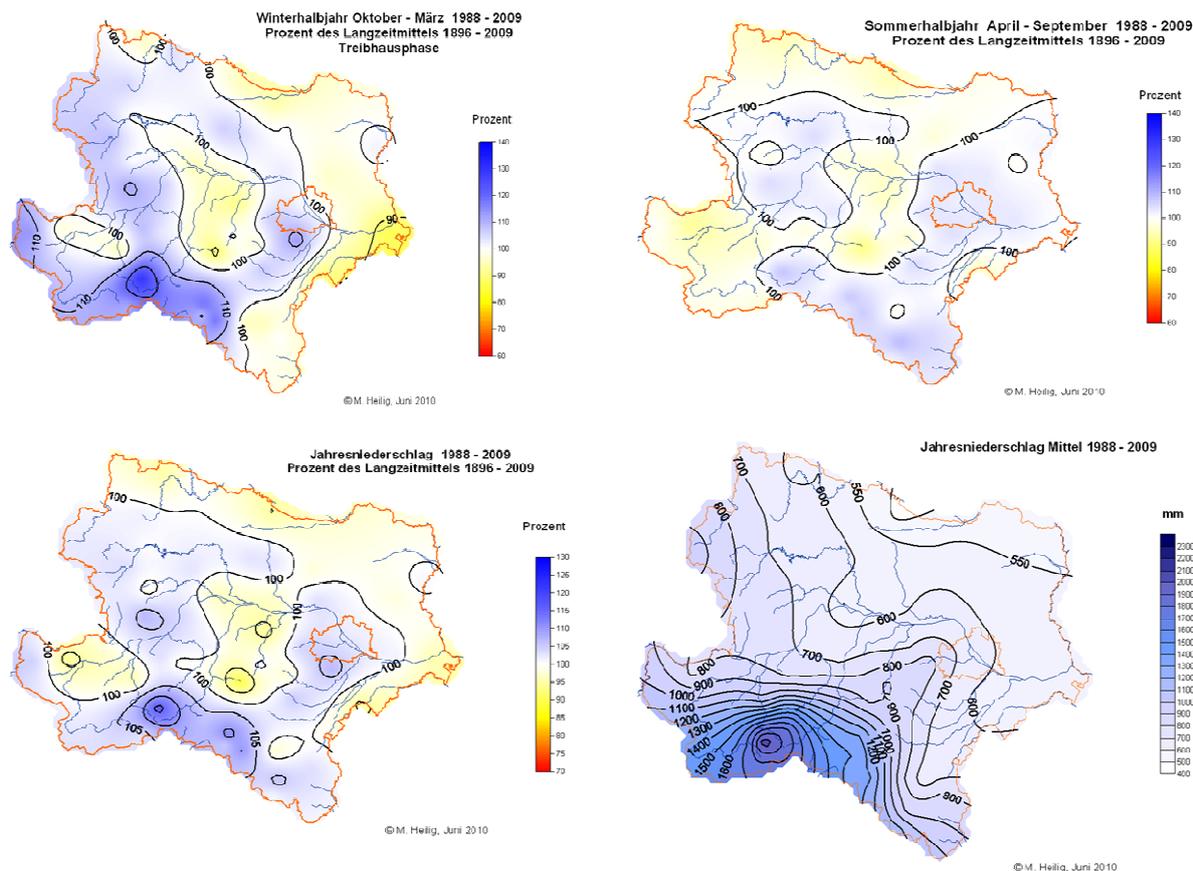


Abb. 7: Saisonale und jährliche Niederschlagsabweichungen in Prozent und Jahresniederschläge von 1988 – 2009

Die Niederschläge des Winterhalbjahres nahmen vor allem im Bereich der niederösterreichischen Kalkalpen deutlich zu, nach Nordosten hingegen eher ab. Bei den Niederschlägen des Sommerhalbjahres zeigt sich eine Tendenz zu verstärkten Niederschlägen in vom Anstau aus dem Osten betroffenen Gebieten (Bucklige Welt, Wiener Wald, südöstliches Waldviertel), während in den westlich gelegenen Leelagen die Niederschläge eher abnahmen.

Aus den letzten 10 Jahren ragen zwei Phasen besonders heraus: Eine eher sommertrockene sehr warme und sonnige Phase von 2000 bis 2003 und eine insgesamt weiterhin sehr warme und sonnige, gleichzeitig aber sehr niederschlagsreiche Phase von 2005 bis 2010. Die erste der beiden Perioden war durch wiederholte besonders große Niederschlagsdefizite in der ökologisch bedeutenden Zeit von April bis Juni geprägt, die durch große positive Temperaturanomalien in ihrer Wirkung verschärft wurden.

Die zweite der beiden Perioden war durch sehr hohe Niederschläge bei weiter steigenden Temperaturen und Sonnenscheinreichtum im Sommerhalbjahr geprägt. In den letzten Jahren häuften sich Signale einer wieder zunehmenden Winterstrenge mit Schneereichtum vor allem in den Hochlagen. Die Sommertemperaturen lagen in den letzten Jahren bis zu knapp 2 Grad über dem Langzeitmittel der Gesamtperiode 1896 bis 2010.

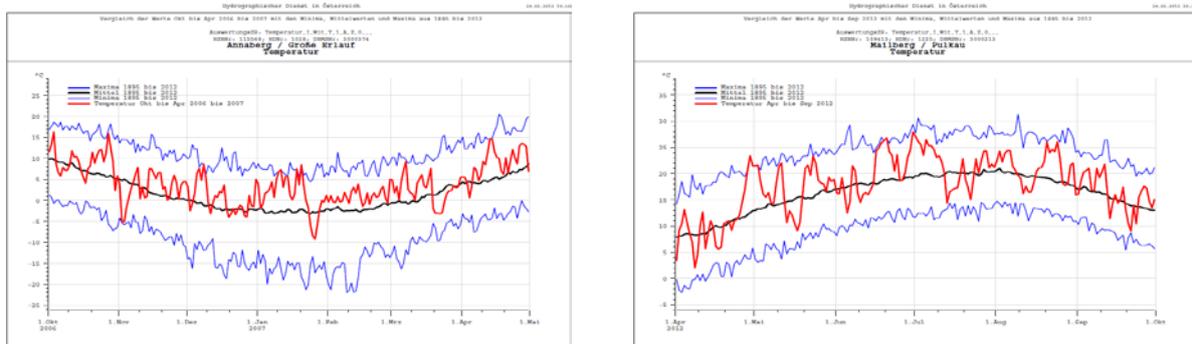


Abb. 8: Abweichungen der Temperaturtagesmittel von Annaberg im extrem milden Winter 2006/2007 und Abweichungen der Temperaturtagesmittel im sehr warmen Sommerhalbjahr 2012

Literatur

- AUER, I. et al. (2007): HISTALP - Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology*, 27: 17-46
- BRÖNNIMANN, S. (2005): The global climate anomaly 1940–1942. -*Weather*: Vol 60, No12, December 2005
- BRÖNNIMANN, S. (2007): Impact of El Niño–Southern Oscillation on European climate. - *Reviews of Geophysics*: Volume 45, Issue 3, September 2007.
- HEILIG, M. (2007): Klimadiagnose Niederösterreich. Endbericht Mai 2007. Auftrag Kennzeichen WA2-A-512/004-2005 vom 21.10.2005. Amt der NÖ Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft, Abt. Hydrologie, 3109 St. Pölten
- HEILIG, M. (2010): Regionale Klimadiagnose Niederösterreich. Räumliche Detailanalyse mit multivariaten Klimafaktoren. Endbericht Dezember 2010. Auftrag Kennzeichen WA2-A-51/004-2005 vom 23.07.2007. Amt der NÖ Landesregierung, Abt. Wasserwirtschaft, Abt. Hydrologie, 3109 St. Pölten
- LUTERBACHER, J., XOPLAKI, E., DIETRICH, D., JONES, P.D., DAVIES, T.D., PORTIS, D., GONZALEZ-ROUCO, J.F., VON STORCH, H., GYAAKISTRAS, D., CASTY, C. & H. WANNER (2002): Extending North Atlantic Oscillation Reconstructions Back to 1500. - *Atmos. Sci. Lett.*, 2, 114-124
- ROBOCK, A. (2000): Volcanic Eruptions and climate. -*Reviews of Geophysics*, 38, 2 / May 2000, pages 191–219
- SMITH, S. J., VAN ARDENNE, J., KLIMMONT, Z., ANDRES, R. J., VOLKE, A., & S. DELGADO ARIAS (2011): Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. -*Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1101–1116
- WILD, M. (2008): Decadal Changes in Surface Radiative Fluxes and Their Role in Global Climate Change. In: BRÖNNIMANN, S., EWEN, T., LUTERBACHER, J.; DIAZ, H. F., STOLARSKI, R. S., NEU, U., 2008: *Climate Variability and Extremes during the Past 100 years*. Springer

Abschätzung möglicher Folgen des Klimawandels auf die regionalen Wasserressourcen der Lausitz

Ina Pohle, Anne Gädeke, Hagen Koch, Uwe Grünewald

Zusammenfassung

Das ökohydrologische Modell SWIM wurde für die Gesamteinzugsgebiete der Dahme, der Schwarzen Elster und die Einzugsgebiete der Spree bis zum Pegel Große Tränke und der Lausitzer Neiße bis zum Pegel Steinbach aufgebaut und parametrisiert. Aufgrund starker anthropogener Beeinflussung durch Braunkohleförderung und Wasserbewirtschaftung ist der klassische Ansatz der Kalibrierung hydrologischer Modelle an den Endpegeln der Einzugsgebiete nicht möglich. Der in dieser Studie genutzte Ansatz ist daher, SWIM für Teileinzugsgebiete zu kalibrieren und zu validieren und die sensitivsten Modellparameter zu regionalisieren. Zur Verifizierung der Kalibrierung wurden für unbeeinflusste Teileinzugsgebiete Modellergebnisse von SWIM mit denen von WaSim-ETH und HBV light verglichen. Der Regionalisierungsansatz wurde durch Vergleich mit diesen Modellen in einem anthropogen stärker beeinflussten Teileinzugsgebiet und unter Berücksichtigung langjähriger natürlicher und naturalisierter Abflüsse verifiziert. Zwischen den Simulationsergebnissen von SWIM, HBV light und WaSim-ETH zeigen sich unter Antrieb der Szenarien WettReg A1B und STAR 2K nur geringe Unterschiede. Hingegen wirkt sich die Wahl des Regionalen Klimamodells deutlich auf die Simulationsergebnisse aus. Simulationen für die Gesamteinzugsgebiete im Untersuchungsgebiet zeigen einen deutlichen Rückgang von Abfluss und Grundwasserneubildung für WettReg A1B. Das Szenario STAR 0K führt zu sehr geringen Änderungen dieser Wasserhaushaltskomponenten in den Einzugsgebieten der Dahme, der Schwarzen Elster und der Spree, während die Szenarien STAR 2K und STAR 3K zu deutlichen Rückgängen beider Größen führen. Im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße wird für die STAR-Szenarien ein Anstieg des Abflusses bei Verringerung der Grundwasserneubildung simuliert.

1. Einleitung und Problemstellung

Die Lausitz zählt zu den trockensten Regionen Deutschlands: bereits unter aktuellen Bedingungen ist die klimatische Wasserbilanz negativ. Aufgrund des Braunkohletagebaus ist der Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten von Spree, Schwarzer Elster und Lausitzer Neiße tiefgreifend gestört (GRÜNEWALD, 2005). Studien zu potenziellen Auswirkungen von Klimaveränderungen in der Region zeigen eine Verstärkung der negativen klimatischen Wasserbilanz und meist einen Rückgang der quasi-natürlichen Abflüsse auf (GÄDEKE et al. 2012; POHLE et al. 2012a). Geänderte klimatische Bedingungen können weiterhin Auswirkungen auf Wasserbewirtschaftung und Wasserqualität nach sich ziehen. Die Abschätzung möglicher Folgen des Klimawandels auf die regionalen Wasserressourcen erfolgt daher im Rahmen des Teilprojekts 21 „Instrumentarien für die nachhaltige regionale wasserwirtschaftliche Planung und Entwicklung – Beispiel Lausitz“ des BMBF – Projekts INKABB mittels integrierter Betrachtung von Wassermenge und -beschaffenheit als Voraussetzung der Entwicklung von Maßnahmen zur Klimaanpassung. Die Unsicherheiten in der Modellkette: Globales Klimamodell (GCM) – Regionales Klimamodell (RCM) – Hydrologisches Modell – Wasserbewirtschaftungsmodell – Wassergütemodell stehen im Vordergrund.

2. Hydrologische Modellierung

Ziel der hydrologischen Modellierung ist es, Niederschlags-Abfluss-Modelle aufzubauen, welche quasi-natürliche Abflüsse liefern. Einflüsse der Wasserbewirtschaftung auf die Abflüsse sollen daher nicht einbezogen werden. Datengrundlage sind das Digitale Geländemodell von ASTER GDEM (ASTER GDEM VALIDATION TEAM: METI/ERSDAC 2009) und die Landnutzungsdaten aus CORINE (BÜTTNER et al. 2002). Aufgrund einer Detailstudie zur Auswirkung national unterschiedlich diskretisierter Bodendaten auf die Kalibrierung der Lausitzer Neiße (POHLE et al. 2012b) wurden die den Autoren für die jeweiligen Staaten in der höchsten Auflösung zur Verfügung stehenden Bodendaten genutzt (Bundesrepublik Deutschland: BGR (1998), Tschechische Republik CGS (2005), Republik Polen IUNG (2012)). Als Klimaeingangsdaten dienen Messreihen der klimatischen Größen an 67 Klima- und Niederschlagsstationen. Die verwendeten konzeptionell unterschiedlichen Modelle sind das prozessbasierte, semidistributive ökohydrologische Modell SWIM, Soil and Water Integrated Model, (KRYSAKOVA et al. 1998; KRYSAKOVA et al. 2000), das prozessbasierte, voll-distributive Wasserhaushaltssimulationsmodell WaSim-ETH (SCHULLA & JASPER 2007) und das konzeptionelle Blockmodell HBV light (SEIBERT 2002).

2.1 Modellkalibrierung für ausgewählte Teileinzugsgebiete

Der klassische Ansatz der Kalibrierung hydrologischer Modelle an Pegeln ist aufgrund der starken Beeinflussung durch Braunkohleförderung und Wasserwirtschaft nicht möglich. Die Abflüsse im Untersuchungsgebiet sind größtenteils anthropogen beeinflusst durch Aufhöhung der Abflüsse und Vergleichmäßigung des Jahresganges über Sumpfungswassereinleitung aus der Braunkohleförderung. Weiterhin erfolgt eine räumliche und zeitliche Verteilung durch Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen. Der Ansatz für diese Gebiete ist daher, SWIM, WaSim-ETH und HBV light für anthropogen wenig beeinflusste Teileinzugsgebiete im Tagesschritt zu kalibrieren. Bei der Kalibrierung steht die Abbildung des gesamten Wasserhaushalts und des Abflusses in Niedrigwasserperioden im Vordergrund. Für unbeeinflusste Einzugsgebiete liefern die Modelle in der Kalibrierungs- (1999–2001) und Validierungsphase (2002–2006) und für langjährige Bilanzen vergleichbare Ergebnisse, dargestellt in Tabelle 1 und Abbildung 1 für den Pegel Ortrand (Pulsnitz, Zufluss zur Schwarzen Elster, A=245 km²). WaSim-ETH simuliert die höchsten Winter- und die geringsten Sommerabflüsse, HBV light die geringsten Winter- und die höchsten Sommerabflüsse. Im Gesamtjahr sind die Abflüsse von WaSim-ETH leicht geringer als jene von SWIM und HBV light.

Tab. 1: Gütekriterien täglicher Abflüsse am Pegel Ortrand (Pulsnitz)

Gütekriterien (Kalibrierung / Validierung)	SWIM	WaSim-ETH	HBV light
Relativer Volumenfehler [%]	-1,60 / 5,80	-6,20 / 1,10	0,96 / 0,95
Nash Sutcliffe Effizienz	0,90 / 0,60	0,74 / 0,73	0,86 / 0,82
Nash Sutcliffe Effizienz, logarithmierte Abflüsse	0,88 / 0,71	0,80 / 0,80	0,79 / 0,60
Pearsons R ²	0,90 / 0,64	0,87 / 0,74	0,86 / 0,82

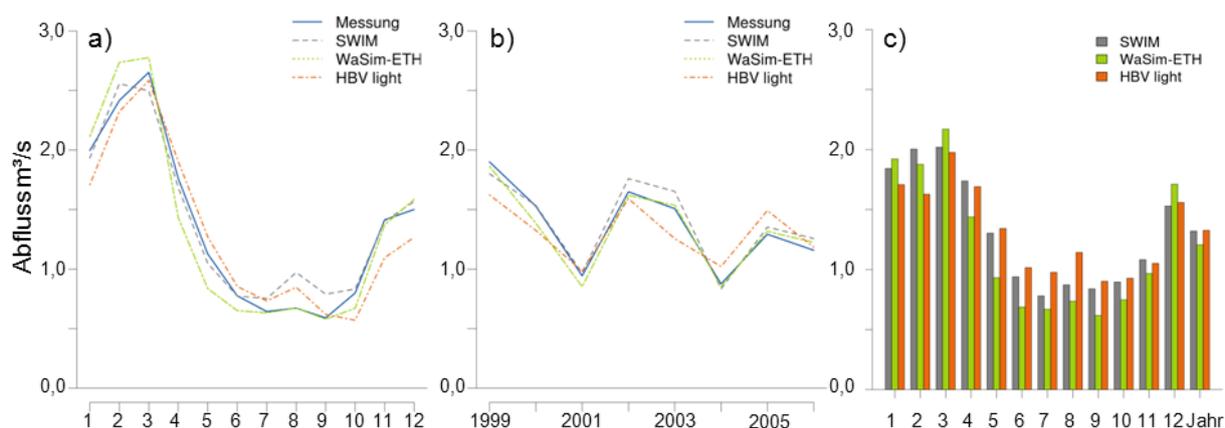


Abb. 1: Vergleich der Modellergebnisse für den Abfluss am Pegel Ortrand (Pulsnitz) a) Monatsmittel der Kalibrierungs- und Validierungszeit, b) Jahresmittel der Kalibrierungs- und Validierungszeit, c) langjährige Monatsmittel und Jahresmittel der Referenzperiode (1961–1990)

2.2 Regionalisierung der Modellparameter für SWIM

Die Regionalisierung erlaubt es, Modellparameter in Einzugsgebiete zu übertragen, für welche keine Kalibrierung möglich ist (MAGETTE et al. 1976). SWIM wurde daher für die Gesamteinzugsgebiete von Schwarzer Elster und Dahme und für die Einzugsgebiete der Spree bis zum Pegel Große Tränke und der Lausitzer Neiße bis zum Pegel Steinbach aufgebaut und durch Regionalisierung parametrisiert. Dazu erfolgte zunächst eine Kalibrierung anhand aller Modellparameter für anthropogen wenig beeinflusste Teileinzugsgebiete an den Pegeln Särichen (Weißer Schöps, Zufluss zur Spree, Hügelland), Jänkendorf (Schwarzer Schöps, Zufluss zur Spree, Hügelland), Großschönau (Mandau, Zufluss zur Lausitzer Neiße, gebirgisches Gebiet), Königsbrück (Hügelland) und Ortrand (Flachlandbereich, beide Pulsnitz, Zufluss zur Schwarzen Elster). Dabei ergaben sich deutliche Unterschiede für die optimalen Parametersätze. Die Übertragung der optimalen Parametersätze jedes der Gebiete auf alle anderen Pegel führte nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Daher wurden anstatt der Kalibrierung von über 20 Modellparametern für jedes Gebiet die drei in der Region sensitivsten Modellparameter einzugsgebietsspezifisch nachkalibriert: die Korrekturfaktoren für gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und potenzielle Verdunstung und ein Stellfaktor für die Rezessionsraten der Grundwasserleiter. Die Korrektur der potenziellen Verdunstung zur Erreichung des langjährigen mittleren Abflusses kann als statthaft angesehen werden, da die Übertragung der Klimagrößen von den Klimastationen auf Teilgebiete mit Unsicherheiten behaftet ist. Zur Unsicherheit der Klimaeingangsgrößen trägt weiterhin bei, dass die Verdunstung nicht direkt gemessen und zudem die für die Verdunstungsberechnung notwendige Globalstrahlung wiederum aus der Sonnenscheindauer ermittelt wird (CONRADT et al. 2012; HATTERMANN et al. 2005; QUASCHNING 2009). Die Korrektur der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit trägt dem Skalenproblem der Bestimmung bodenhydraulischer Eigenschaften Rechnung. Ein Stellparameter für die Grundwasserrezessionsraten berücksichtigt die Grundwasserdynamik. Die drei Modellparameter wurden regionalisiert anhand räumlicher Nähe (EGBUNIWE & TODD 1976) und physikalischer Ähnlichkeiten (BURN & BOORMAN 1993). Eine Überprü-

fung des Ansatzes erfolgte durch Einbezug weiterer wenig beeinflusster Einzugsgebiete und durch Vergleich mit langjährigen mittleren Messwerten vor dem Bergbau aus der N-A-U-Karte (IFW 1959), mit naturalisierten langjährigen Monatsmitteln aus dem Ländermodell WBalMo Spree-Schwarze Elster (GRÜNEWALD et al. 2001) und Abflusskomponenten aus DIFGA (LFULG 2012; SCHWARZE et al. 1989).

Für das Teileinzugsgebiet der Dahme bis Prierow ($A=300 \text{ km}^2$), welches als Repräsentant für Einzugsgebiete im sandigen Flachland der Spree dienen soll, erfolgte eine Überprüfung der Regionalisierung im Vergleich zu Modellergebnissen von WaSim-ETH und HBV light. Für das Gebiet sind den Autoren keine bedeutenden Bewirtschaftungsmaßnahmen bekannt, dennoch weichen die Messungen in der designierten Kalibrierungs- und Validierungsphase deutlich vom langjährigen Mittel ab. Mögliche Erklärungen können deutlich geänderte Landnutzungsbedingungen sein, aber auch eine den Autoren nicht bekannte Bewirtschaftung der im Gebiet vorhandenen Gräben. Innerhalb plausibler Parametergrenzen ist für die Modelle eine Kalibrierung an der gemessenen Ganglinie daher nicht möglich. Unter der Annahme, dass das Volumen der Messung nicht repräsentativ ist, die Dynamik aber dennoch wiedergegeben wird, wurden die Modelle hinsichtlich des Gütemaßes Pearsons R^2 , welches die Dynamik berücksichtigt, parametrisiert (siehe Tabelle 2, Abbildung 2). Für SWIM erfolgte dies unter leichter Variierung der Parameter für das flachlandige Zwischeneinzugsgebiet der Pulsnitz zwischen den Pegeln Königsbrück und Ortrand.

Tab. 2: Gütekriterium R^2 am Pegel Prierow (Dahme)

Gütekriterien am Pegel Prierow (Kalibrierung / Validierung)	SWIM	WaSim-ETH	HBV light
Pearsons R^2	0,55 / 0,49	0,80 / 0,26	0,65 / 0,49

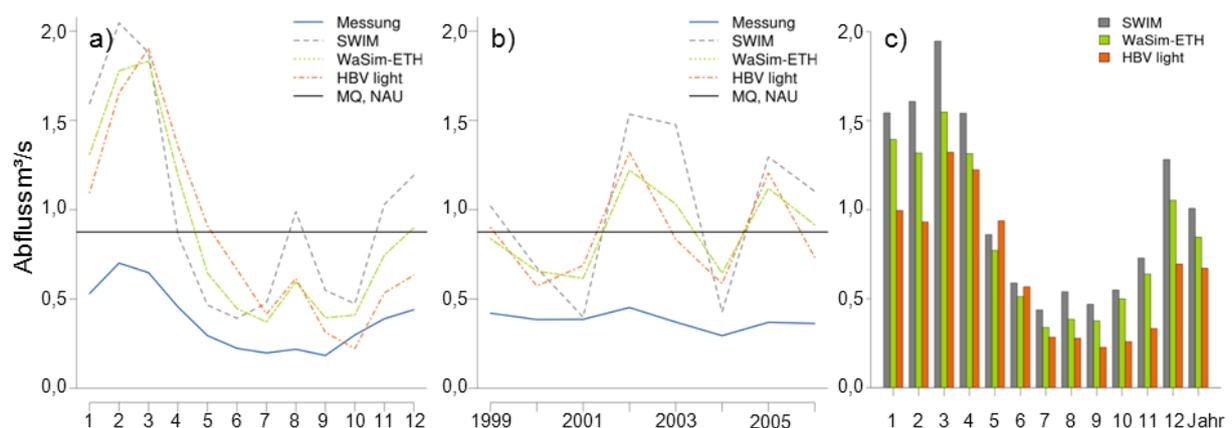


Abb. 2: Vergleich der Modellergebnisse für den Abfluss am Pegel Prierow (Dahme) a) Monatsmittel der Kalibrierungs- und Validierungszeit, b) Jahresmittel der Kalibrierungs- und Validierungszeit, c) langjährige Monatsmittel und Jahresmittel der Referenzperiode (1961–1990)

Die drei konzeptionell unterschiedlichen Modelle, welche unabhängig von zwei Bearbeiterinnen (SWIM: I. Pohle; WaSim-ETH/HBV light: A. Gädeke) parametrisiert wurden, liefern deutlich ähnlichere Ergebnisse als die Messungen. Die Dynamik im Jahresverlauf und zwischen

feuchten und trockenen Jahren wird durch alle Modelle gut wiedergegeben. Die langjährigen Abflüsse entsprechen in guter Näherung denen der N-A-U-Karte. Durch das Modell SWIM werden ganzjährig außer im Frühjahr relativ hohe Abflüsse simuliert. Die geringsten Abflüsse simuliert HBV light. Das Modell SWIM zeigt auch am flussabwärts gelegenen Pegel Märkisch-Buchholz nur geringe Differenzen zum jährlichen Abfluss aus der N-A-U-Karte und den monatlichen Abflüssen aus Ländermodell und DIFGA.

3. Regionale Klimamodelle

In dieser Studie wurden Realisierungen des Statistischen Regionalisierungsmodells, STAR (GERSTENGARBE et al. 2008; ORLOWSKY et al. 2008) und des Wetterlagenbasierten Regionalisierungsverfahrens WettReg (ENKE et al. 2005a; ENKE et al. 2005b) genutzt. Für STAR wurden drei Szenarien (a 100 Realisierungen) verwendet, die im Gebietsmittel von einem weiteren Temperaturanstieg von 0 K (STAR 0K), 2 K (STAR 2K) respektive 3 K (STAR 3K) bis 2055 ausgehen. Für WettReg wurde das Szenario A1B (10 Realisierungen) betrachtet, welches vom Temperaturtrend etwa dem STAR 2K- Szenario entspricht.

4. Vergleich der Simulationsergebnisse für Klimaszenarien anhand ausgewählter Einzugsgebiete

Der Vergleich der Simulationsergebnisse der hydrologischen Modelle SWIM, WaSim-ETH und HBV light unter Antrieb der Szenarien WettReg A1B und STAR 2K ermöglicht es, auch den durch das hydrologische Modell verursachten Unsicherheiten Rechnung zu tragen. Abbildung 3 zeigt die relativen Änderungen der langjährigen monatlichen Abflüsse der Szenarioperiode 2051–2055 im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 für die Pegel Ortrand und Prierow. Für WettReg werden in der Referenzperiode Simulationsergebnisse der Reanalysephase, für STAR gemessene Klimagrößen in dieser Periode betrachtet.

Für WettReg A1B zeigt sich ganzjährig ein deutlicher Abflussrückgang um ca. 50 % an beiden Pegeln. Für Ortrand zeigt HBV light die geringsten und WaSim-ETH die höchsten Änderungen, für Prierow sind die Änderungen bei SWIM am höchsten und bei HBV light am geringsten. Auffällig sind die in Prierow gegenüber Ortrand aus den 10 Realisierungen für WettReg A1B entstehenden deutlich weiteren Bandbreiten bei SWIM. Für STAR 2K stellt sich ganzjährig ein Abflussrückgang um ca. 25 % in Ortrand und um ca. 30 % in Prierow bei allen hydrologischen Modellen ein. HBV light zeigt ganzjährig die geringsten Änderungen. Die geringsten Abflussänderungen treten bei allen Modellen im Januar und Februar auf. Die Abflussreduzierung ist bei SWIM an beiden Pegeln am höchsten im April und Mai. Während für Ortrand in den Monaten September bis November mit HBV light die geringsten Abflussänderungen simuliert werden, sind die Änderungen in diesen Monaten für Prierow mit HBV light am höchsten. Auffällig sind weiterhin die im Vergleich zu den anderen Modellen hohen Bandbreiten der Änderungen in den Sommermonaten bei SWIM. Nicht nur im Gesamtjahr, auch in den einzelnen Monaten sind die Abflussänderungen für STAR 2K geringer als für WettReg A1B. Nur im April und Mai werden mit SWIM ähnlich starke Abflussänderungen für STAR 2K wie für WettReg A1B simuliert. Bedingt durch die höhere Anzahl der verwendeten Realisierungen sind die Bandbreiten bei STAR 2K deutlich weiter als bei WettReg A1B. Der Vergleich der Änderungen der STAR-Szenarien für SWIM zeigt ganzjährig geringe Änderungen bei leichtem Abflussrückgang im

April bis Juni und leichter Abflusszunahme im November im Vergleich zur Referenz für STAR 0K an beiden Pegeln. Für STAR 3K ist der Abflussrückgang im Gesamtjahr und insbesondere im Mai und Juni deutlich stärker ausgeprägt als für STAR 2K. Die Bandbreiten sind bedingt durch die Generierung der Realisierungen am weitesten in STAR 0K und am geringsten in STAR 3K. Am Pegel Ortrand sind die Änderungen aller STAR-Szenarien geringer als bei WettReg A1B, lediglich im Juni ist der Abflussrückgang in STAR 3K ähnlich wie bei WettReg A1B. Am Pegel Prierow sind die mit SWIM simulierten Abflussänderungen für STAR 3K in den Sommermonaten größer als in WettReg A1B. Insgesamt sind für beide Pegel die Unsicherheiten, welche sich aus der Wahl des hydrologischen Modells ergeben, geringer als jene aus der Wahl des Regionalen Klimamodells und des Szenarios. Die Unsicherheiten, die sich aus dem Regionalen Klimamodell und dem Szenario ergeben, sind für die betrachteten Modelle, Szenarien und Gebiete vergleichbar hoch.

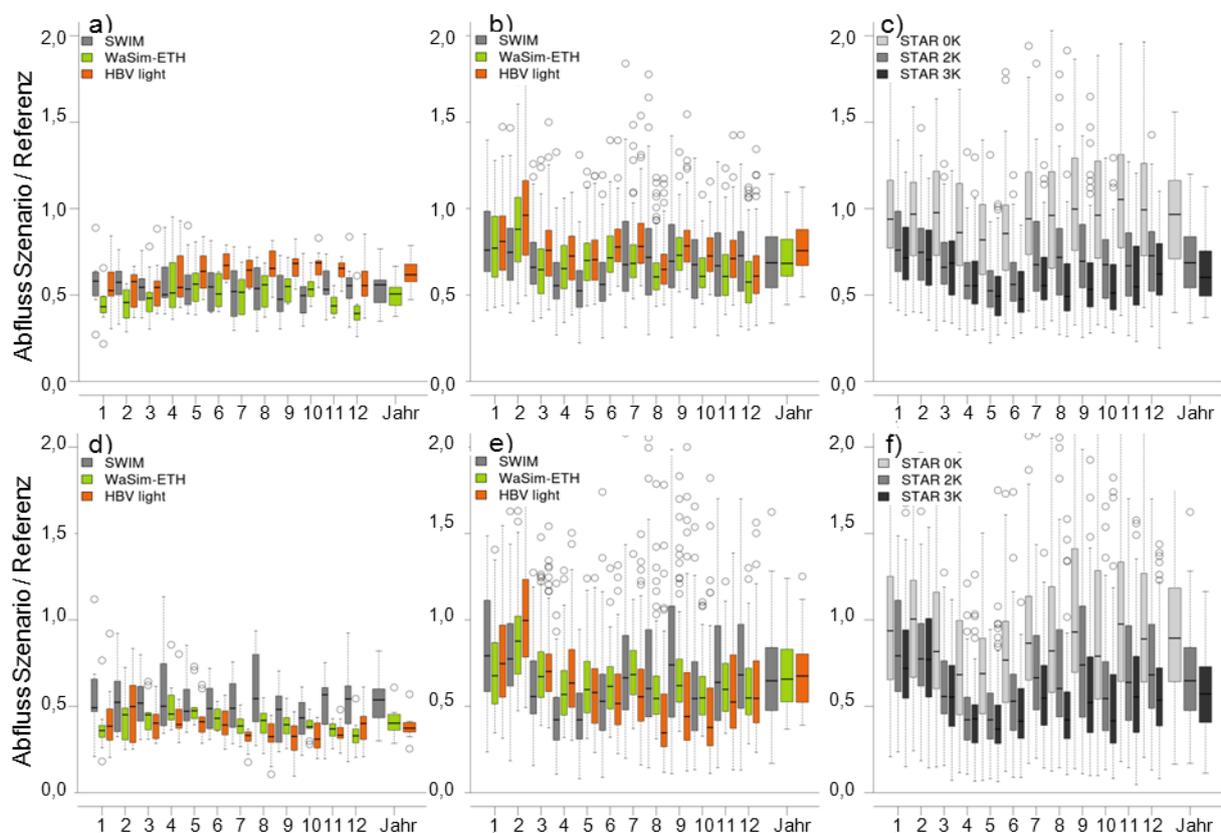


Abb. 3: Relative Änderung der langjährigen Monatsabflüsse im Szenariozeitraum im Vergleich zum Referenzzeitraum a) Ortrand, WettReg A1B, SWIM, WaSim-ETH, HBV light, b) Ortrand, STAR 2K, SWIM, WaSim-ETH, HBV light, c) Ortrand, STAR 0K, STAR 2K, STAR 3K, SWIM d) Prierow, WettReg A1B, SWIM, WaSim-ETH, HBV light, e) Prierow, STAR 2K, SWIM, WaSim-ETH, HBV light, f) Prierow, STAR 0K, STAR 2K, STAR 3K, SWIM

5. Ergebnisse der Klimaszenarien für das gesamte Untersuchungsgebiet

Die Änderungen in den Simulationsergebnissen mit SWIM für die Gesamteinzugsgebiete von Dahme und Schwarzer Elster sowie für die Einzugsgebiete der Spree bis zum Pegel Große Tränke und der Lausitzer Neiße bis zum Pegel Steinbach ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tab. 3: Prozentuale Änderung langjähriger Wasserhaushaltskomponenten unter Simulation mit SWIM im Vergleich der Szenarioperiode 2051–2055 mit der Referenzperiode 1961–1990 (Median der Realisierungen)

Szenario	Größe	Dahme			Schwarze Elster			Spree			Lausitzer Neiße		
		Wi	So	Jahr	Wi	So	Jahr	Wi	So	Jahr	Wi	So	Jahr
WettReg	P	-5	-12	-9	-5	-8	-8	-4	-10	-8	-8	-10	-9
A1B	ETR	21	-5	0	18	-2	3	19	-4	1	19	-1	3
	Q	-55	-56	-55	-49	-48	-48	-47	-46	-48	-41	-46	-43
	GWN	-58	-60	-58	-52	-51	-53	-50	-41	-52	-51	-46	-52
STAR 0K	P	-2	-2	-1	-2	-1	-1	0	-2	-1	6	0	3
	ETR	14	0	1	11	-1	2	11	-1	1	13	0	3
	Q	18	-13	8	9	-5	3	27	0	14	75	32	58
	GWN	-13	-22	-12	-12	-12	-13	-8	-16	-10	4	-17	2
STAR 2K	P	1	-12	-5	-2	-9	-6	1	-12	-7	1	-12	-4
	ETR	44	-6	4	37	-4	4	40	-7	3	47	-1	9
	Q	-23	-42	-30	-28	-35	-31	-13	-34	-22	34	-13	16
	GWN	-44	-42	-44	-44	-41	-41	-40	-47	-40	-27	-54	-31
STAR 3K	P	7	-19	-7	3	-19	-9	5	-20	-9	6	-21	-8
	ETR	51	-9	4	42	-9	2	46	-10	2	55	-3	8
	Q	-27	-50	-36	-32	-50	-39	-20	-47	-22	29	-31	5
	GWN	-46	-61	-49	-44	-60	-47	-42	-62	-48	-28	-69	-37

Ausgehend von geringen Änderungen der Niederschläge P in STAR 0K und leichtem Rückgang von P in WettReg A1B und STAR 2K sowie deutlicheren in STAR 3K und den damit verbundenen Temperaturänderungen werden die anderen Wasserhaushaltsgrößen in den Gebieten beeinflusst. Die Sommerniederschläge nehmen bei WettReg A1B deutlicher ab, während es in den STAR-Szenarien eine Tendenz zu zunehmenden Winterniederschlägen gibt. Im Gesamtjahr sind die Änderungen in der tatsächlichen Verdunstung ETR und die Unterschiede zwischen den Szenarien und den Gebieten gering. In allen Szenarien und Gebieten nimmt die ETR im Winter aufgrund höherer Temperaturen zu. Die geringste Zunahme erfolgt in STAR 0K (< 15 %), gefolgt von WettReg A1B (ca. 20 %), STAR 2K (37 – 47 %) und STAR 3K (42 – 55 %). Die hohen relativen Änderungen sind durch geringe Absolutwerte von ETR im Winter erklärbar. Die geringsten Änderungen treten in allen Szenarien im Einzugsgebiet der Schwarzen Elster auf. Mit ansteigender Temperatur steigt die potenzielle Verdunstung in den Sommermonaten, die tatsächliche Verdunstung wird durch das Wasserangebot limitiert und sinkt in WettReg A1B, STAR 2K und STAR 3K. Die Änderungen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße sind am geringsten. Der Abfluss Q steigt im Winter und im Gesamtjahr für STAR 0K an. In den Einzugsgebieten der Dahme, der Schwarzen Elster und der Spree verringert sich Q in den Szenarien STAR 2K, STAR 3K und am stärksten in WettReg A1B in beiden Halbjahren, aber im Sommer etwas stärker als im Winter. In WettReg A1B geht Q in beiden Halbjahren auch im Gebiet der Lausitzer Neiße deutlich zurück. Für STAR 2K und STAR 3K erhöht sich dort Q im Winter und kompensiert den sinkenden Q im

Sommer, so dass ganzjährig höherer Q auftritt. Bei der Grundwasserneubildung GWN kommt es im Szenario WettReg A1B zu einem deutlichen Rückgang in allen Gebieten. In den Einzugsgebieten der Dahme, der Schwarzen Elster und der Spree geht GWN bereits in STAR 0K zurück, im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße ist dies erst in STAR 2K und STAR 3K deutlich. Während für die Änderungen von P und ETR im Gesamtjahr die Unterschiede zwischen den Szenarien und den Gebieten noch gering sind, fallen deutliche Unterschiede der Änderung von ETR im Winter und der Änderungen von Q und GWN zwischen den Szenarien und den Gebieten auf. Der deutlichste Rückgang von Q und GWN tritt in allen Gebieten bei WettReg A1B auf. Die STAR-Szenarien ziehen in der Reihenfolge STAR 0K, STAR 2K und STAR 3K entsprechend der Änderung der Temperatur und damit der potenziellen Verdunstung zunehmenden Rückgang von Q und GWN nach sich. Der Effekt ansteigender winterlicher Abflüsse, welcher in den anderen Gebieten nur in STAR 0K auftritt, wird im Gebiet der Lausitzer Neiße auch in den anderen STAR-Szenarien festgestellt.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Modell SWIM wurde für die Gesamteinzugsgebiete von Dahme und Schwarzer Elster und für die Einzugsgebiete der Spree bis zum Pegel Große Tränke und der Lausitzer Neiße bis zum Pegel Steinbach aufgebaut und durch Regionalisierung parametrisiert. Ein Vergleich von Simulationsergebnissen von SWIM und den Modellen WaSim-ETH und HBV light sowohl für kalibrierte Teileinzugsgebiete als auch für das Einzugsgebiet der Dahme bis zum Pegel Prierow mit regionalisierten Parametern konnte zur zusätzlichen Verifizierung der Modellkalibrierung und des Regionalisierungsansatzes genutzt werden. Bei Simulationen unter Antrieb von Realisierungen der Szenarien WettReg A1B und STAR 2K für die drei hydrologischen Modelle zeigte sich, dass die Unsicherheiten aus der Wahl des hydrologischen Modells denen aus dem Regionalen Klimamodell nachgeordnet sind. Die sich aus den STAR-Szenarien ergebenden Unsicherheiten liegen in der ähnlichen Größenordnung wie jene aus den Regionalen Klimamodellen. Hinsichtlich Abfluss und Grundwasserneubildung sind die Änderungen aus WettReg A1B denen aus STAR 3K am ähnlichsten. Die Änderungen der Wasserhaushaltskomponenten in den Einzugsgebieten der Dahme, der Schwarzen Elster und der Spree unterscheiden sich kaum. Das gebirgigere Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße zeigt bezüglich Abfluss und Grundwasserneubildung deutlich unterschiedliche Reaktionen. Weiterhin ist der Einbezug von Landnutzungsszenarien mit Fokus auf Energieszenarien geplant, zum einen bezüglich der Entwicklung und Verortung der Tagebaue und zum anderen Szenarien hinsichtlich eines verstärkten Anbaus von nachwachsenden agrarischen Rohstoffen. Die unter Antrieb durch RCM und Landnutzungsszenarien mit SWIM ermittelten potenziellen zukünftigen quasi-natürlichen Abflüsse der Teileinzugsgebiete dienen dann als Eingabedaten für das Langfristbewirtschaftungsmodell WBalMo (KADEN et al. 2005), womit unter Berücksichtigung von Nutzeransprüchen und Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen die zukünftige Wasserverfügbarkeit und bewirtschaftete Abflüsse simuliert werden sollen.

Literatur

- ASTER GDEM VALIDATION TEAM: METI/ERSDAC, N. L., USGS/EROS (2009): ASTER Global DEM Validation, Summary Report
- BGR (1998): Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1 000 000. BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE. Hannover
- BURN, D. H. & D. B. BOORMAN (1993): Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of Hydrology* 143 (3–4): 429-454
- BÜTTNER, G., FERANEC, J. & G. JAFFRAIN (2002): CORINE land cover update 2000 - Technical guidelines. EEA Technical Report European Environment Agency. Kopenhagen, Dänemark.
- CGS (2005): Bodenkarte der Tschechischen Republik 1:1 000 000. TSCHECHISCHER GEOLOGISCHER DIENST
- CONRADT, T., KOCH, H., HATTERMANN, F. F. & F. WECHSUNG (2012): Precipitation or evapotranspiration? Bayesian analysis of potential error sources in the simulation of sub-basin discharges in the Czech Elbe River basin. *Regional Environmental Change* 12: 649-661
- EGBUNIWE, N. & D. K. TODD (1976): Application of the Stanford watershed model to Nigerian watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 12 (3): 449-460
- ENKE, W., DEUTSCHLÄNDER, T., SCHNEIDER, F. & W. KÜCHLER (2005a): Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulation. *Meteorologische Zeitschrift* 14 (2): 247-257
- ENKE, W., SCHNEIDER, F. & T. DEUTSCHLÄNDER (2005b): A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. *Theoretical and Applied Climatology* 82 (1): 51-63
- GÄDEKE, A., POHLE, I., HÖLZEL, H., KOCH, H. & U. GRÜNEWALD (2012): Analyse zum Einfluss des Landschafts- und Klimawandels auf den Wasserhaushalt in einem Teileinzugsgebiet der Spree. In: GRÜNEWALD, U., BENS, O., FISCHER, H., HÜTTL, R. F., KAISER, K., KNIERIM, A. (Hrsg.): Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart. 81-94
- GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P. C., ORLOWSKY, B. & M. WODINSKI (2008): Klimaprojektion für Ostdeutschland. Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel 1. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung. Potsdam
- GRÜNEWALD, U. (2005): Probleme der integrierten Wasserbewirtschaftung im Spree-Havel-Gebiet im Kontext des globalen Wandels. In: WECHSUNG, F., BECKER, A., GRÄFE, P. (Hrsg.): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Weißensee Verlag. Berlin. 209-218
- GRÜNEWALD, U., KALTOFEN, M., KADEN, S. & M. SCHRAMM (2001): Länderübergreifende Bewirtschaftung der Spree und der Schwarzen Elster. *KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* 48 (2): 205-213
- HATTERMANN, F. F., WATTENBACH, M., KRYSANOVA, V. & F. WECHSUNG (2005): Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment-validation and uncertainty analysis. *Hydrological Processes* 19: 21

- IFW (1959): N-A-U-Karte 1921 – 1940 über das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik 1:200 000 Niederschlagshöhen und -gleichen, Abflusshöhen und -gleichen, Unterschiedswerte und -gleichen, Abflüsse und Abflusspenden INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT. Berlin
- IUNG (2012): Landwirtschaftliche Bodenkarte der Republik Polen 1:100 000. INSTITUT FÜR BODENKUNDE UND PFLANZENZÜCHTUNG. Pulawi.
- KADEN, S., SCHRAMM, M. & M. REDEZKY (2005): Großräumige Wasserbewirtschaftungsmodelle als Instrumentarium für das Flussgebietsmanagement. In: WECHSUNG, F., BECKER, A., GRÄFE, P. (Hrsg.): Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft - Bd. 6: Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet (GLOWA-Elbe). Weißensee Verlag. Berlin. 223-233
- KRYSAKOVA, V., MÜLLER-WOHLFEIL, D. I. & A. BECKER (1998): Development and test of a spatially distributed hydrological water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106 (2-3): 261-289
- KRYSAKOVA, V., WECHSUNG, F., ARNOLD, J., SRINIVASAN, R. & J. WILLIAMS (2000): SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual. PIK Report 69. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung. Potsdam
- LFULG, Wasserhaushaltsportal Sachsen – Analyse von Durchflussreihen 1951 – 2005, <<http://141.30.240.113/lenya/kliwes/live/index/Wasserhaushalt/SaeuleA/Durchflussreihen.html>> (19.09.2012)
- MAGETTE, W. L., SHANHOLTZ, V. O. & J. C. CARR (1976): Estimating selected parameters for Kentucky watershed model from watershed characteristics. *Water Resources Research* 12 (3): 472-476
- NASH, J. E. & J. V. SUTCLIFFE (1970): River Flow Forecasting Through Conceptual Models - Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology* 10 (1970): 282-290
- ORLOWSKY, B., GERSTENGARBE, F.-W. & P. C. WERNER (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology* 92 (3-4): 209-223
- POHLE, I., KOCH, H. & U. GRÜNEWALD (2012a): Potential climate change impacts on the water balance of subcatchments of the River Spree, Germany. *Advances in Geosciences* 32: 49-53
- POHLE, I., KOCH, H. & U. GRÜNEWALD (2012b): Wasserhaushaltsmodellierung der Lausitzer Neiße auf Basis von national unterschiedlichen Datengrundlagen. In: WEILER, M. (Hrsg.): Wasser ohne Grenzen. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2012. 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Freiburg. 381-382
- QUASCHNING, V. (2009): Solarstrahlung im Wandel der Zeit. *Sonne Wind und Wärme* 6: 22-25
- SCHULLA, J. & K. JASPER (2007): Model description WaSim-ETH. ETH Zürich. Zürich. 181 S
- SCHWARZE, R., GRÜNEWALD, U., BECKER, A. & W. FRÖHLICH (1989): Computer-aided analyses of flow recessions and coupled basin water balance investigations. *IAHS Publication* 187: 78-83
- SEIBERT, J. (2002): HBV light version 2, User's manual. Uppsala

Optimierung der landwirtschaftlichen Praxis unter Klimawandel – Eine Modellstudie im Einzugsgebiet der Broye

Annelie Holzkämper, Tommy Klein, Pierluigi Calanca, Jürg Fuhrer

Zusammenfassung

Der Klimawandel stellt die Schweizer Landwirtschaft vor Herausforderungen. In Teilen der Schweiz ist die Pflanzenproduktion bereits heute von der Bewässerung abhängig und mit fortschreitender Klimaerwärmung ist in Zukunft häufiger mit Beeinträchtigungen durch Wassermangel zu rechnen. Wenn Gebietsabflüsse abnehmen und im Sommer, wenn das Wasser für das Pflanzenwachstum am nötigsten gebraucht wird, Wasserknappheit auftritt, steht unter Umständen nicht genügend Wasser für Bewässerung zur Verfügung. Andere Anpassungsmassnahmen, wie z.B. Änderungen in der Wahl der angebauten Kulturen, in der Landnutzung oder in der Bewirtschaftung müssen in Erwägung gezogen werden, um die Effizienz der Wassernutzung in der Landwirtschaft zu verbessern.

Im Einzugsgebiet der Broye in der Westschweiz untersuchen wir modellgestützt, wie sich der Klimawandel auf die Pflanzenproduktion auswirken könnte und welche Möglichkeiten es für die Anpassung gibt. Dabei berücksichtigen wir, dass die Landwirtschaft neben der Produktionsfunktion auch eine wichtige Rolle für andere Ökosystemdienstleistungen spielt, wie zum Beispiel für die Reinhaltung der Gewässer oder für den Bodenschutz.

Es zeigt sich, dass bis zum Zeithorizont 2036–2065 gegenüber heute (1981–2010) in dieser Region mit einer Abnahme der Produktivität zu rechnen ist, während Umweltauswirkungen, speziell Bodenerosion und Nährstoffauswaschung, gleichzeitig zunehmen. Mit einem multikriteriellen Optimierungsansatz werden räumlich explizite Anpassungsmöglichkeiten zur Erhaltung der Produktivität bzw. zur Reduktion der Umweltauswirkungen erarbeitet. Für verschiedene Gewichtungen der einzelnen Funktionen werden Konflikte zwischen Produktion und Umweltwirkungen identifiziert. Es werden Kompromisslösungen aufgezeigt, mit der die Pflanzenproduktion auch unter Klimawandel gewährleistet bleibt, und die gleichzeitig umwelt- und wasserschonend sind.

1. Das Einzugsgebiet der Broye

Das Einzugsgebiet der Broye in der Westschweiz umfasst eine Fläche von 63'500 ha. Dabei werden etwa 42'750 ha, also ungefähr 67% der Gesamtfläche, landwirtschaftlich genutzt. Da die Region der Broye mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von etwa 9°C und mittlerem jährlichen Niederschlag von ca. 900 mm zu den wärmeren und trockeneren Gebieten in der Schweiz gehört, spielt die Bewässerung hier schon heute eine wesentliche Rolle für die landwirtschaftliche Produktion. Auf einer Fläche von etwa 1'400 ha werden pro Jahr durchschnittlich 1.15 Mio m³ Wasser zur Bewässerung verwendet. Zu etwa 80% stammt dieses Wasser aus der Broye; andere genutzte Bewässerungsquellen sind Grundwasser, künstliche Speicher und der Neuenburger See. Die Kulturarten, die dabei am häufigsten bewässert werden, sind Kartoffel, Tabak, Mais und Zuckerrüben. (ROBRA & MASTRULLO 2011)

Der Zeitraum, in dem der Bewässerungsbedarf am grössten ist – zwischen Mai und August mit Spitzen im Juni und Juli – fällt zusammen mit der Periode, in welcher der Abfluss der Broye am niedrigsten ist. Da Sommer-Abflüsse aus Gletschern fehlen, die ein Wasserdefizit ausgleichen könnten, kann der Bewässerungsbedarf – insbesondere in extremen Hitzejahren wie 2003 – die zur Verfügung stehende Durchflussmenge in der Broye bei weitem übersteigen (FUHRER & JASPER 2012).

Neben der Einschränkung der Pflanzenproduktion durch Wassermangel können auch Konflikte mit anderen Wassernutzern (z.B. Trinkwasser) oder – infolge niedriger Wasserstände, erhöhter Temperaturen und niedrigen Sauerstoffgehalts – negative Effekte auf die aquatische Biodiversität auftreten.

Mit zunehmenden Temperaturen und abnehmenden Sommerniederschlägen ist in Zukunft mit einer Verschärfung solcher Probleme zu rechnen, so dass Anpassungen in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung notwendig werden. Dies kann zum Beispiel durch Änderungen in der Sortenwahl, der Bewässerung, der Düngung oder der Bodenbearbeitung geschehen. Da das Agrarökosystem aber ein System mit komplexen Verknüpfungen ist, können Anpassungen, die allein auf die Sicherung der Produktionsleistung abzielen, negative Effekte auf andere Funktionen des Agrarökosystems haben. Neben möglichen negativen Auswirkungen von Bewässerung auf die aquatische Biodiversität ist die landwirtschaftliche Nutzung auch eng verknüpft mit der Boden- und Gewässerschutzfunktion: Bodenabtrag und Nährstoffauswaschung hängen wesentlich von der Bewirtschaftungsform ab. Bei der Planung von landwirtschaftlichen Anpassungsmassnahmen sollten daher auch solche Funktionen des Agrarökosystems berücksichtigt werden.

In dieser Fallstudie untersuchen wir, wie sich die prognostizierte Klimaänderung auf verschiedene Agrarfunktionen in der Broye auswirken könnte und welche Möglichkeiten zur Anpassung durch Änderungen in der Bewirtschaftung bestehen. Dabei werden unterschiedliche Agrarökosystemfunktionen betrachtet, um der Multifunktionalität des Agrarökosystems Rechnung zu tragen. Unberücksichtigt bleiben dabei ökonomische Kriterien, wie Agrarpreise und Direktzahlungen, die aber in einer verwandten Arbeit von Lehmann (2013) für das Gebiet untersucht werden. In der vorliegenden Arbeit werden mithilfe eines multikriteriellen regionalen Optimierungsansatzes Muster der Bewirtschaftung identifiziert, die den vier Agrarfunktionen Pflanzenproduktion, Bodenschutz, Grundwasserschutz und aquatische Biodiversität optimal Rechnung tragen: in einer Optimallösung kann eine Funktion nicht weiter verbessert werden, ohne dass sich eine andere verschlechtert (= Pareto-Optimalität). Solche optimalen Kompromisslösungen können als richtungsweisende Zielszenarien für die landwirtschaftliche Planung im Sinne einer möglichst ressourcen-schonenden Anpassung an den Klimawandel gesehen werden.

2. Die Agrarökosystemfunktionen

Das Agrarökosystem erfüllt unterschiedliche Funktionen. Neben der Produktion von Nahrungsmitteln und Futter spielt die Landwirtschaft auch eine wichtige Rolle zur Pflege der Kulturlandschaft und zur Erhaltung der natürlichen Ressourcen und der Artenvielfalt. Die Erhaltung dieser Multifunktionalität in der Schweizer Agrarlandschaft ist in der Bundesverfassung (Art. 104) festgeschrieben und wird durch das Direktzahlungssystem unterstützt.

Für diese Studie haben wir die vier Funktionen Pflanzenproduktion, Bodenschutz, Grundwasserschutz und Schutz der aquatischen Biodiversität ausgewählt, um die Multifunktionalität zu berücksichtigen. Die Indikatoren für diese Funktionen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Indikatoren für Agrarökosystemfunktionen.

Agrarökosystemfunktionen	Indikator	Einheit
Pflanzenproduktion	Skalierte Erträge	% zwischen Minimal- und Maximalertrag
Bodenschutz	Bodenabtrag	t/ha*Jahr
Grundwasserschutz	Nitratauswaschung	Kg N/ha*Jahr
Aquatische Biodiversität	Wasserverbrauch für Bewässerung	m ³ /ha

3. Klimawandel in der Broye

In dieser Studie betrachten wir ein Klimaszenario für den Zeithorizont 2036–2065, das aus den Resultaten einer Simulation mit dem regionalen Klimamodell ETHZ-CLM abgeleitet wurde (VAN DER LINDEN & MITCHELL 2009, Tabelle 2).

Tab. 2: Projizierte Änderungen in Temperatur und Niederschlag für den Zeithorizont 2036–2065 im Vergleich zu den Referenzwerten (1981–2010) am Standort Payerne.

Monat	Temperatur- änderung [°C]	Niederschlags- änderung [%]	Referenz- Temperatur [°C]	Referenz- Niederschlag [mm]
Januar	+2.59	0	0.3	53
Februar	+1.88	-21	1.3	47
März	+1.85	+11	5.3	60
April	+2.10	-8	8.7	68
Mai	+1.84	-20	13.2	90
Juni	+2.72	-15	16.6	90
Juli	+3.47	-19	18.9	88
August	+3.76	-32	18.3	95
September	+3.12	-21	14.3	84
Oktober	+2.45	-1	9.9	86
November	+2.33	-1	4.3	64
Dezember	+2.54	-3	1.4	66

4. Anpassungsmöglichkeiten in der Bewirtschaftung

Eine naheliegende Anpassungsmöglichkeit an zunehmende Trockenheit ist der Einsatz von Bewässerung. Aber auch durch Änderungen in der Wahl der Kulturarten und deren Bewirtschaftungsform lassen sich Anpassungen erzielen. In dieser Studie betrachten wir 50 Rotationen mit den Kulturarten Winterweizen, Wintergerste, Körnermais/Silomais, Kartoffel, Zuckerrübe, Winterraps und Kunstwiese. Für jede Rotation kommen unterschiedliche Bewirtschaftungsmöglichkeiten in Frage: unbewässert oder bewässert, empfohlene Düngemengen nach ACW/ART (2009) sowie um 25% und 50% reduzierte Düngemengen, und konventionelle oder reduzierte Bodenbearbeitung. Zusätzlich zu den 50 Ackerrotationen

werden auch Weide und Dauergrünland betrachtet. Für Kunstwiese innerhalb der Rotationen und Dauergrünland sind drei unterschiedliche Intensitätsniveaus möglich: (a) empfohlene Düngemenge und 5 Schnitte (b) um 25% reduzierte Düngemenge und 4 Schnitte, und (c) um 50% reduzierte Düngemenge und 3 Schnitte. Für Weideland sind die Düngemengen der Intensitätsniveaus an unterschiedliche Beweidungsintensitäten gekoppelt: (a) empfohlene Düngemenge und 3 Grossvieheinheiten (GVE)/ha, (b) reduzierte Düngemenge und 2 GVE/ha, und (c) niedrige Düngemenge und 1 GVE/ha.

5. Der Modellansatz

Für die Bewertung der Einflüsse von Klima, Boden und Bewirtschaftung auf Pflanzenproduktion, sowie Wasserverbrauch, Nährstoffauswaschung und Erosion wurde das prozessbasierte Pflanzenwachstumsmodell CropSyst (Version 4.13.04) verwendet (STÖCKLE et al. 2003). Dieses generische Modell kann unterschiedliche Kulturarten und Bewirtschaftungspraktiken simulieren, insbesondere Bewässerung, Düngung und Bodenbearbeitung. Ergänzt wird dieses durch ein empirisches Tierproduktionsmodell, das basierend auf Literaturangaben die Zusammenhänge zwischen Tierproduktion und Verbrauch von Wasser und Futter bzw. Anfall von Gülle herstellt. Um regional optimale Muster der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung zu identifizieren, werden diese Modelle in eine multikriterielle räumliche Optimierungsroutine integriert. Hierbei können die vier Agrarfunktionen unterschiedlich gewichtet werden. Je nach Gewichtungen werden dann Optimallösungen gefunden, die die vier Agrarfunktionen unterschiedlich stark priorisieren.

5.1 Räumliche Modelldaten

Da die Eignung unterschiedlicher Anpassungsmassnahmen stark von den lokalen Bedingungen abhängen kann und landwirtschaftliche Planung meist auf der regionalen Ebene ansetzt, ist es wichtig, die räumliche Heterogenität von Gelände, Boden und Klima im Untersuchungsgebiet zu berücksichtigen. Für diese Modellstudie wurde das Gebiet in Rasterzellen mit 500 m Auflösung unterteilt. Anpassungsmöglichkeiten durch Änderungen in der Bewirtschaftung betrachten wir ausschliesslich in Flächen, die laut der aktuellen Arealstatistik (BFS 2004) landwirtschaftlich genutzt sind. Für diese Flächen wurden Informationen über die Bodenart und Hangneigung abgeleitet (BFS 2012, SWISSTOPO 2001). Klimatisch wurde das Gebiet in drei Zonen unterteilt, die durch Daten der drei Klimastationen Payerne, Moudon und Semsales repräsentiert sind (Quelle: MeteoSchweiz). Für diese drei Zonen wurden mithilfe des Wettergenerators LARS-WG (SEMENOV & BARROW 1997) synthetische Klimadaten für die Referenzperiode (1981–2010) sowie für das ETHZ-Klimaszenario für das Zeitfenster 2036–2065 generiert.

5.2 Biophysikalische Bewertungsmodelle

Basierend auf Ertragsdaten der Zentralen Auswertung der Buchhaltungsdaten aus der Region um Payerne (FAT 2003) wurde CropSyst für die sieben Hauptkulturen Winterweizen, Wintergerste, Körnermais/Silomais, Kartoffel, Zuckerrübe und Winterraps kalibriert (KLEIN et al. 2012). Für Grünland standen keine Daten aus der Region zur Verfügung, die zur Kalibrierung hätten verwendet werden können. Daher wurde hier eine manuelle Kalibrierung

basierend auf experimentellen Daten aus einer Feldstudie in Oensingen im zentralen Mittelland vorgenommen (AMMANN et al. 2009).

Das Tierproduktionsmodell stützt sich im Wesentlichen auf schweizspezifische Literaturangaben über die Zusammenhänge zwischen Tierproduktion und Verbrauch von Wasser und Futter bzw. Anfall von Gülle. Kennzahlen über Futterbedarf und Nährstoff-Ausscheidungen stammen aus ACW/ART (2009). Der Futterbedarf wird nach Möglichkeit durch die in CropSyst simulierte Beweidung sowie durch simulierte Grünland- und Silomaiserträge gedeckt. Nährstoffausscheidungen der produzierten Tiere werden als organische Düngung auf das Grünland in der Region verteilt. Informationen über den Wasserverbrauch in Abhängigkeit von der Tierart und der Temperatur sind McDonald et al. (2002) entnommen.

5.3 Regionale Optimierung

Ziel der regionalen Optimierung ist es, die Erträge zu maximieren und gleichzeitig Bodenabtrag, Nitratauswaschung und Wasserverbrauch zu minimieren. Dementsprechend wird die multikriterielle Zielfunktion als gewichtete Kombination aus den in Abschnitt 2 beschriebenen Indikatoren der Agrarökosystemfunktionen definiert (Formel 1). Die einzelnen Indikatoren werden dabei normiert auf die Wertspanne zwischen 0 und 1, so dass die Gewichte für die einzelnen Funktionen vergleichbare Bedeutung haben.

$$J = w_P P + w_I (1 - I) + w_E (1 - E) + w_N (1 - N) \quad (1)$$

$$J \rightarrow \max$$

J = Zielkriterium

w = Gewicht der Agrarökosystemfunktionen

P = skalierte Erträge gemittelt über alle simulierten Kulturarten

I = skalierte Bewässerungsmenge

E = skaliertes Bodenabtrag

N = skalierte Nitratauswaschung

Einschränkungen für die regionale Optimierung bestehen zum einen durch die vorgegebene Anzahl an zu produzierenden Tieren und zum anderen durch die Topographie (bei Hangneigungen > 33% ist der Anbau von Ackerkulturen nicht mehr möglich).

Innerhalb der Optimierung wird die Zielfunktion für jede Rasterzelle mit landwirtschaftlicher Nutzung und für alle dort möglichen Kombinationen von Bewirtschaftungspraktiken berechnet. Bei der räumlichen Zuordnung der Optimallösungen werden zuerst die Weideflächen alloziert, damit der Flächenanspruch für die Tierproduktion erfüllt ist.

Um einen Satz von optimalen Kompromisslösungen aus dem multikriteriellen Lösungsraum abzugreifen, wurden die Gewichte w in Intervallen von 0.1 zwischen 0 und 1 systematisch variiert. Alle Gewichtungskombinationen, bei denen sich die vier Gewichte zu 1 summieren, wurden als eindeutige Gewichtungskombinationen ausgewählt. Insgesamt wurden so für die

Referenzperiode und das Klimaszenario jeweils 258 optimale Kompromisslösungen zwischen den vier Agrarökosystemfunktionen generiert, die im Weiteren mit einem statistischen Ansatz (KOHONEN 2001) zu 16 Musterlösungen gruppiert wurden.

Der Ansatz zur regionalen Optimierung sowie eine weiterführende Analyse der Ergebnisse für die Broye-Region sind Gegenstand einer eingereichten wissenschaftlichen Publikation (KLEIN et al., *submitted*).

6. Ergebnisse

Tabelle 3 zeigt, dass unter Klimawandel in der Broye-Region tendenziell mit einer Abnahme der Produktivität zu rechnen ist, während Umweltauswirkungen, speziell Bodenerosion und Nährstoffauswaschung, gleichzeitig zunehmen. Ebenso steigt der Wasserverbrauch für Bewässerung mit Klimawandel deutlich an.

Tab. 3: Quantile der Verteilungen der regional aggregierten Indikatoren aus den optimalen Kompromisslösungen für die Referenzperiode im Vergleich zu denen unter Klimawandel.

		q5	q25	q50	q75	q95
Referenz- periode (1981–2010)	Skalierter mittl. Ertrag					
	Bodenabtrag [Mio t/Jahr]	0.32	0.65	0.72	0.77	0.82
	N-Auswaschung [Mio kgN/Jahr]	0.15	0.33	0.57	0.66	0.74
	Wasserverbrauch [Mio m ³ /Jahr]	0.56	0.76	1.11	1.66	1.90
		0.00	0.00	0.00	11.48	29.10
ETHZ-CLM (2036–2065)	Skalierter mittl. Ertrag					
	Bodenabtrag [Mio t/Jahr]	0.45	0.59	0.65	0.69	0.83
	N-Auswaschung [Mio kgN/Jahr]	0.14	0.26	0.67	0.92	1.13
	Wasserverbrauch [Mio m ³ /Jahr]	0.81	0.88	1.05	1.61	2.33
		0.00	0.00	0.00	28.57	50.78

Eine Analyse der optimalen Kompromisslösungen unter Klimawandel deckt Konflikte und mögliche Synergien zwischen den vier Agrarökosystemfunktionen auf. In Abbildung 1 wird ersichtlich, dass ein deutlicher Konflikt zwischen der Pflanzenproduktionsfunktion und den Funktionen Bodenschutz, Grundwasserschutz und Schutz der aquatischen Biodiversität besteht: Je höher die Erträge, desto höher sind auch Nitratauswaschung, Erosion und Wasserverbrauch. Zwischen den Funktionen Bodenschutz, Grundwasserschutz und Schutz aquatischer Biodiversität bestehen dagegen grösstenteils Synergien, wenn auch je nach Lösung Konflikte auftreten können.

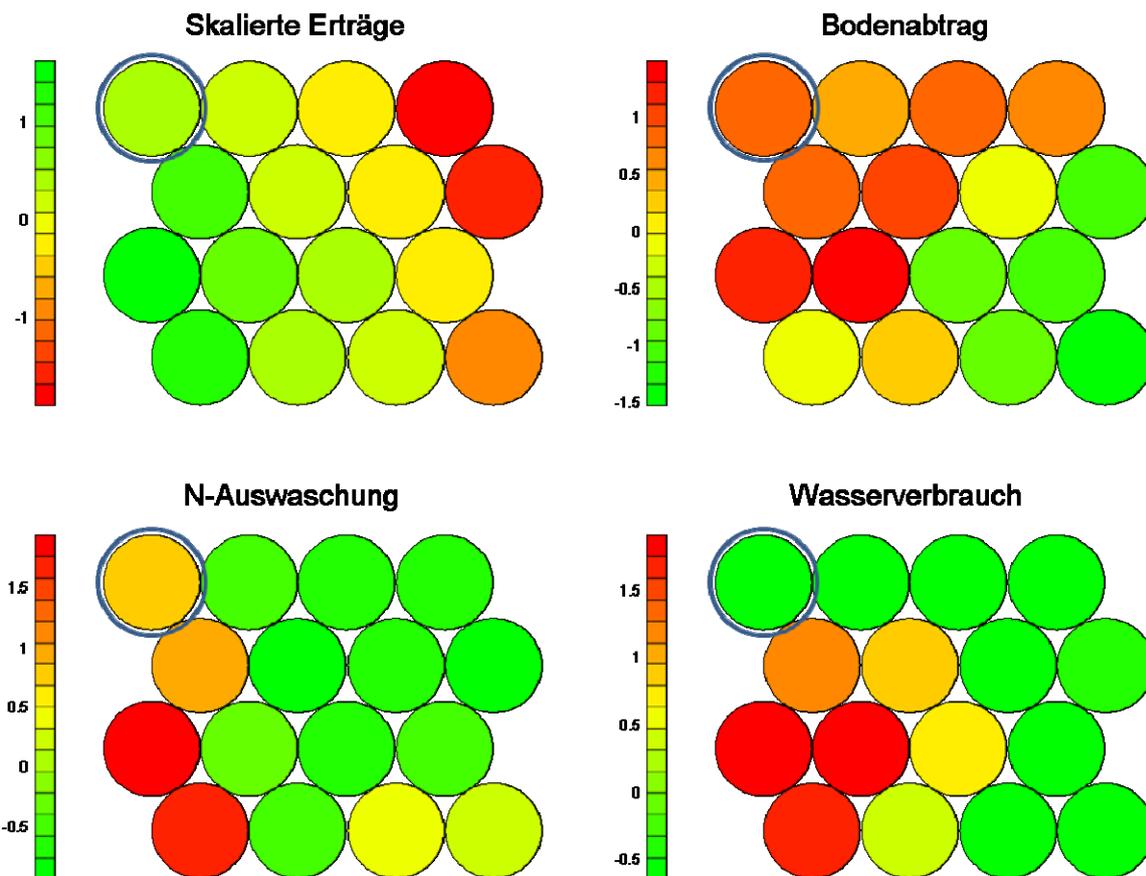


Abb. 1: „Self-Organizing Map“ (SOM; KOHONEN 2001) der skalierten Werte der vier Indikatoren; grün/rot = gut/schlecht im Sinne der Agrarökosystemfunktion; blau umrandet ist die Gruppe, aus der die ausgewählten und in Abbildung 2 dargestellten Kompromisslösungen stammen.

Mit der angenommenen Einschränkung, dass auch mit Klimawandel noch mindestens 70% der unter Referenzbedingungen maximalen Erträge erreicht werden sollen und der Wasserverbrauch unter 10 Mio m³/Jahr bleiben soll (die Bewässerungsmenge, die knapp aus der Broye für Bewässerung zur Verfügung steht und oberhalb derer keine wesentliche Erhöhung der Produktivität erreicht wird), werden zwei Kompromisslösungen ausgewählt, die sich in der oberen linken Ecke der SOM in Abbildung 1 wiederfinden. Dies zeigt, dass die Kompromisslösungen eine vergleichsweise gute Performance im Hinblick auf die skalierten Erträge und den Wasserverbrauch haben; die Nitratauswaschung bleibt moderat und die Werte des Bodenabtrags rangieren im oberen Mittelfeld aller optimalen Kompromisslösungen.

Wendet man die gleichen Auswahlkriterien auf die 258 optimalen Kompromisslösungen der Referenzperiode an, so werden anstatt zwei 97 Kompromisslösungen ausgewählt. Das zeigt deutlich, dass die projizierten Klimaänderungen Konflikte zwischen den Agrarökosystemfunktionen verschärfen und damit den Raum für Kompromisslösungen einschränken.

In den beiden ausgewählten Kompromisslösungen für die Anpassung bis 2036–2065 gibt es nur unwesentliche Unterschiede im Landnutzungsmuster und in der Bewirtschaftung (Abbildung 2). Im Vergleich zum aktuellen Zustand zeigt sich, dass Weide und Teile des Dauergrünlands im höhergelegenen Südosten des Einzugsgebietes der Broye durch Ackerland

ersetzt werden, da sich die Eignung für Ackerland mit dem Klimawandel verbessert. Insgesamt nehmen die Grünlandanteile im Vergleich zum Ackerland leicht zu. Um den Bodenabtrag gering zu halten, ist das Grünland auf Flächen mit starker Hangneigung verteilt. In Bezug auf die Kulturarten nimmt der Anteil von Winterweizen deutlich ab. Ebenso nehmen die Anteile der stark von Bewässerung abhängigen Kulturen Kartoffel und Zuckerrübe ab. Die Anteile von Wintergerste, Winterraps, Körnermais und Kunstwiese nehmen dagegen zu. Die Bodenbearbeitung in den beiden Kompromisslösungen ist überwiegend konventionell und die Düngenniveaus entsprechen den in ACW/ART (2009) empfohlenen Werten. Bewässerte Flächen konzentrieren sich in beiden Kompromisslösungen auf die tiefergelegenen Flächen mit sandigem Lehm.

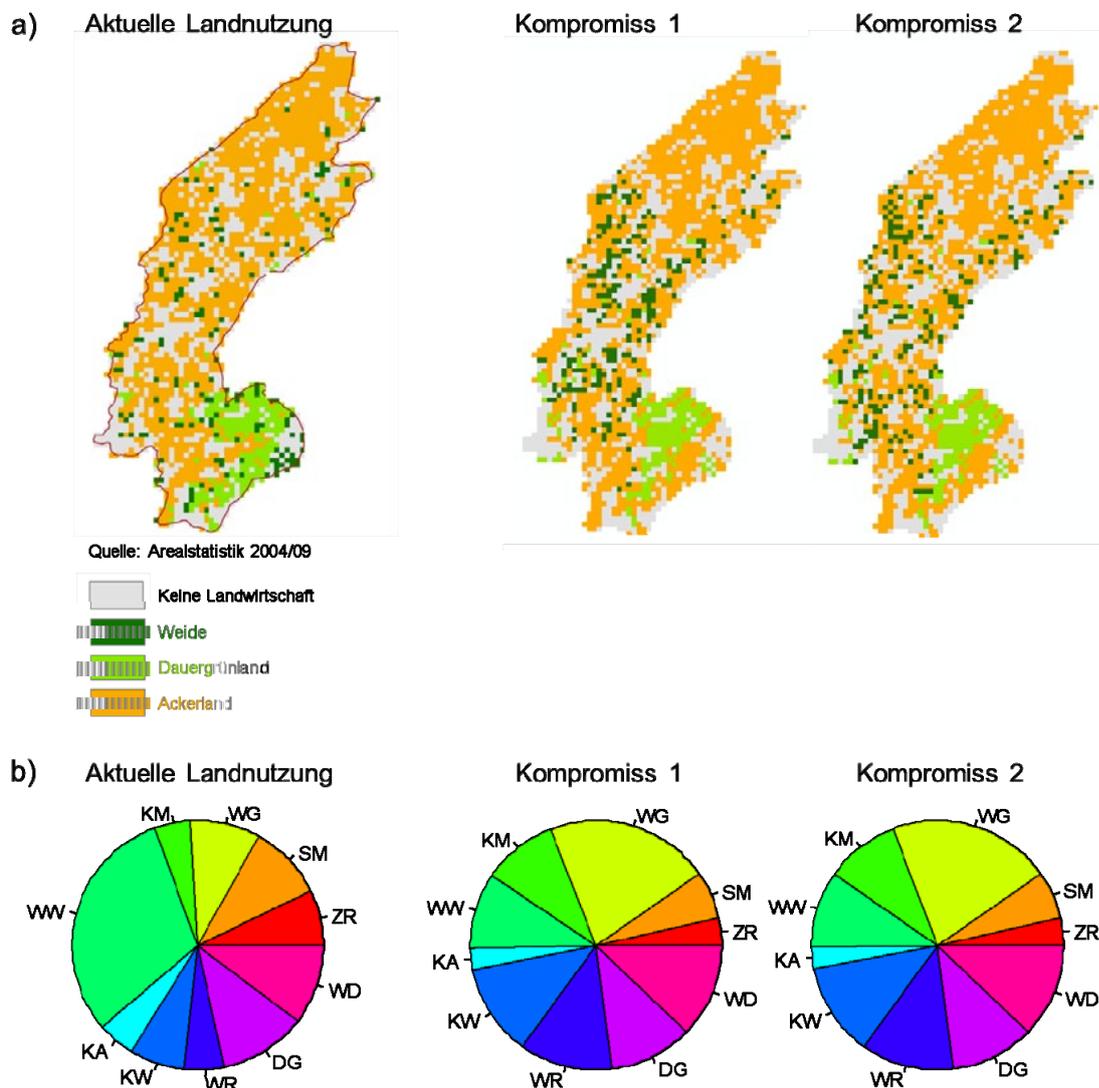


Abb. 2: Aktuelles Landnutzungsmuster (a) und Kulturartenanteile (b; Quelle: AGIS Datenbank) im Einzugsgebiet der Broye im Vergleich zu Landnutzungsmustern und Kulturartenanteilen der zwei ausgewählten Kompromisslösungen für die Anpassung an den Klimawandel ("ZR" = Zuckerrübe, "SM" = Silomais, "WG" = Wintergerste, "KM" = Körnermais, "WW" = Winterweizen, "KA" = Kartoffel, "KW" = Kunstwiese, "WR" = Winterraps, "DG" = Dauergrünland, "WD" = Weide).

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass mit projizierten Klimaveränderungen für den Zeithorizont 2036–2065 mit einer Abnahme der Pflanzenproduktion und gleichzeitig mit zunehmenden Umweltauswirkungen zu rechnen ist. Die Planung von Anpassungsmassnahmen mit einseitigem Fokus auf die Steigerung der Pflanzenproduktion könnte negative Umweltauswirkungen zusätzlich verstärken. Um der Multifunktionalität der Landwirtschaft bei der Planung von Anpassungsmassnahmen Rechnung zu tragen, sollte Grünland im höher gelegenen Südosten der Region in Ackerland umgewandelt werden, weil hier die Produktivität von Ackerkulturen zunimmt. Weideland sollte auf Flächen mit stärkerer Hangneigung verteilt werden, um den Bodenabtrag gering zu halten. Damit wird erreicht, dass die Pflanzenproduktion bei 70% der unter Referenzbedingungen maximalen Erträge bleibt und der Wasserverbrauch unter 10 Mio m³/Jahr. Nitratauswaschung und Bodenabtrag bleiben dabei moderat bis leicht überdurchschnittlich.

Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Forschungsprojektes AGWAM innerhalb des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 „Nachhaltige Wassernutzung“. Wir bedanken uns beim SNF für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- ACW/ART (2009): Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). Agrarforschung 16(2): 1-100
- AMMANN, C., SPIRIG, C., LEIFELD, J. & A. NEFTEL (2009): Assessment of the nitrogen and carbon budget of two managed temperate grassland fields. Agriculture, Ecosystems & Environment 133(3–4): 150-162
- BFS (2004): Arealstatistik der Schweiz, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel
- BFS (2012): Bodeneignungskarte der Schweiz. GEOSTAT. CH-2010 Neuchatel, Schweiz
- FAT (2003): Ergebnisse der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten. Agroscope FAT Tänikon. Schweiz
- FUHRER, J. & K. JASPER (2012): Demand and Supply of Water for Agriculture: Influence of Topography and Climate in Pre-Alpine, Mesoscale Catchments. Natural Resources 3(3): 145-155
- KLEIN, T., CALANCA, P., HOLZKÄMPER, A., LEHMANN, N., ROESCH, A. & J. FUHRER (2012): Using farm accountancy data to calibrate a crop model for climate impact studies. Agricultural Systems 111: 23-33
- KLEIN, T., HOLZKÄMPER, A., CALANCA, P., SEPPELT, R. & J. FUHRER (submitted to Landscape Ecology): Adapting agricultural land management to climate change: A regional multi-objective optimization approach
- KOHONEN, T. (2001): Self-organizing maps. Berlin, Springer
- LEHMANN, N. (2013): How climate change impacts on local cropping systems: A bioeconomic simulation study for western Switzerland. Dissertation ETH Zürich
- MCDONALD, P., GREENHALGH, J. & C. MORGAN (2002): Animal nutrition, Pearson Education

- ROBRA, J. P. & J. MASTRULLO (2011): Evaluation d'irrigation dans la Broye des besoins en eau. Rapport final. Service du développement territorial du canton de Vaud (SDT), MandaTerre sàrl
- SEMENOV, M. A. & E. M. BARROW (1997): Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change* 35(4): 397-414
- STÖCKLE, C. O., DONATELLI, M. & R. NELSON (2003): CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18(3-4): 289-307
- SWISSTOPO (2001): DHM25. Bundesamt für Landestopografie. Schweiz
- VAN DER LINDEN, P. & J.F.B. MITCHELL (EDS.) (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp

Einfluss prognostizierter Klimaveränderungen auf die Grundwasserneubildung in einem wasserwirtschaftlich sensiblen Teileinzugsgebiet der Elbe

Gundula Paul, Ralph Meißner, Gregor Ollesch

Zusammenfassung

Die sich zukünftig ändernden klimatischen Bedingungen werden im Fläming, einem Teileinzugsgebiet der Elbe, zu einer Verschärfung von bestehenden Interessenkonflikten um die Ressource Wasser zwischen Wasserversorgern sowie Land- und Forstwirten führen. Da bereits heute das Elbeeinzugsgebiet mit mittleren jährlichen Abflussspenden von 5.4 l/s/km² zu den europaweit abflussärmsten großen Flussgebieten gehört, werden Fragen des Wassermanagements zukünftig noch bedeutsamer werden.

Um eine nachhaltige land- und wasserwirtschaftliche Bewirtschaftung dieser für die Trinkwasserversorgung sensiblen Region zu gewährleisten, sind Kenntnisse und Prognosen über die Entwicklung der jährlichen Sickerwasserraten unter den Bedingungen des Klimawandels dringend notwendig. Die Sickerwasserbildung wird neben den klimatischen Verhältnissen wesentlich von der Landnutzungsart, den Bodeneigenschaften und dem Grundwasserflurabstand beeinflusst. Basierend auf dem TUB-BGR-Verfahren wird anhand von Beispielen gezeigt, wie sich Sickerwasserraten unter dem Einfluss von aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen verändern werden und welchen Einfluss die Landnutzung darauf ausübt.

Für die Fläming-Region wurden die jährlichen Sickerwasserraten für die Jahre 1990 bis 2070 berechnet. Während bis 2010 gemessene Klimadaten genutzt wurden, basieren die zukünftigen Prognosen über die Entwicklung der Grundwasserneubildung auf Daten aus dem neuen IPCC-Klimaszenario RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway Scenario 8.5).

Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen werden Probleme bezüglich der zukünftigen Sicherheit der Wasserversorgung diskutiert und Lösungsansätze für ein nachhaltiges Landmanagement in dieser Region vorgestellt.

1. Einleitung

Das Nordostdeutsche Tiefland gehört bezüglich des Klimawandels zu den vulnerabelsten Regionen Deutschlands; Wasser-, Land- und Forstwirtschaft werden hiervon besonders betroffen sein (ZEBISCH et al. 2005). Die klimatischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte führten im östlichen Sachsen-Anhalt, in dem das Untersuchungsgebiet liegt, dazu, dass die Winter feuchter und wärmer und die Sommer noch trockener als bisher wurden. Bereits gegenwärtig wurden für diese Region im langjährigen Mittel negative klimatischen Wasserbilanzen (KROPP et al. 2005) mit geringen Grundwasserneubildungsraten ausgewiesen (BMU 2003). Klimamodellrechnungen deuten darauf hin, dass sich die in der Vergangenheit in Sachsen-Anhalt beobachteten klimatischen Veränderungen fortsetzen werden. Da bereits heute das Elbeeinzugsgebiet mit einer mittleren jährlichen Abflussspende von 5.4 l/s/km² (Pegel Neu Darchau) zu den abflussärmsten großen Flussgebieten Europas gehört (IKSE 2005), sind Fragen des Wassermanagements in Zukunft noch bedeutender. Detaillierte Kenntnisse der Sickerwasserraten, also derjenigen Wassermenge, die abzüglich des kapillaren Aufstiegs den Wurzelraum nach unten verlässt (JANKIEWICZ et al. 2005), sind not-

wendig. Für die Trinkwassergewinnung sind die Sickerwasserraten aus dem Boden von großer Bedeutung (BMU 2003), da in Sachsen-Anhalt mehr als 2/3 des Trinkwassers aus Grund- und Quellwasser gewonnen wird (LUA & LAV 2012).

Für den „Hydrologischen Atlas von Deutschland“ (HAD) (BMU 2003) wurde das TUB-BGR-Verfahren entwickelt und mit ihm – basierend auf der BÜK 1000 und der CORINE-Landnutzung – für die Klimanormperiode 1961–1990 eine Karte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate für ganz Deutschland berechnet. Aus dieser Karte wird deutlich, dass in Deutschland die mittleren jährlichen Sickerwasserraten hauptsächlich durch den Niederschlag bestimmt werden. Erst danach haben Landnutzung und Bodeneigenschaften einen Einfluss auf die Sickerwasserhöhe. Mittlere jährliche Sickerwasserraten von < 50mm/Jahr werden in Ostdeutschland in der Magdeburger Börde sowie im Thüringer Becken erreicht. Während ab Niederschlagshöhen von ≥ 800 mm/Jahr die Höhe der Sickerwasserraten vor allem von der Landnutzung abhängt, gewinnen Grundwasserflurabstand und Bodeneigenschaften mit abnehmenden Niederschlagsmengen zunehmend eine Bedeutung. So versickert beispielsweise auf den typischen Böden der nordostdeutschen Flusslandschaften kaum Wasser, da durch die hohen Grundwasserstände die aktuelle Evapotranspiration nahezu der potentiellen entspricht (BMU 2003).

Ein Vergleich der für Deutschland berechneten mittleren jährlichen Sickerwasserraten nach dem TUB-BGR- und dem BAGLUVA-Verfahren zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse (JANKIEWICZ et al. 2005). Auch im Westfläming wurde das BAGLUVA-Verfahren für die Berechnungen der Grundwasserneubildungen für den Zeitraum 1971–2000 angewandt. Für die bewaldeten Hochflächen wurde eine mittlere jährliche Grundwasserneubildung von 108mm/Jahr und für das Zerbster Ackerland von 139mm/Jahr ermittelt. Des Weiteren wurde im Westfläming beobachtet, dass die Grundwasserstände seit den 1970er Jahren gesunken sind. Dies liegt vor allem an leicht zurückgegangene Grundwasserneubildungsraten. Besonders sensibel reagieren die Hochflächen auf veränderte Grundwasserstände (LUCKNER et al. 2002).

Erste Abschätzungen über den Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung mit Daten der Klimamodelle WETTREG und REMO sowie unter Annahme der SRES-Klimaszenarien haben ergeben, dass in Sachsen-Anhalt die Grundwasserneubildung in Zukunft weiter abnehmen wird (KROPP et al. 2009). Das Ziel dieses Beitrages besteht darin, auf Grundlage des neuen IPCC-Szenarios RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway Scenario 8.5) den Einfluss von bis zum Jahr 2070 zu erwartenden klimatischen Veränderungen auf die Sickerwasser- bzw. Grundwasserneubildungsraten in der wasserwirtschaftlich sensiblen Region Fläming zu untersuchen und Schlussfolgerungen über die zukünftige Nutzung des Gebietes abzuleiten.

2. Datengrundlagen und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Im Fläming, der im mittleren Elbeinzugsgebiet liegt, treten aufgrund seiner geologischen Prägung während der Saaleeiszeit überwiegend sandige Böden auf (LUCKNER et al. 2002). Knapp 60% der Fläche werden von Braunerden bedeckt, die oft nur geringe Wassermengen speichern können. Saisonal bis ganzjährig durch Grund- oder Stauwasser beeinflusste Bö-

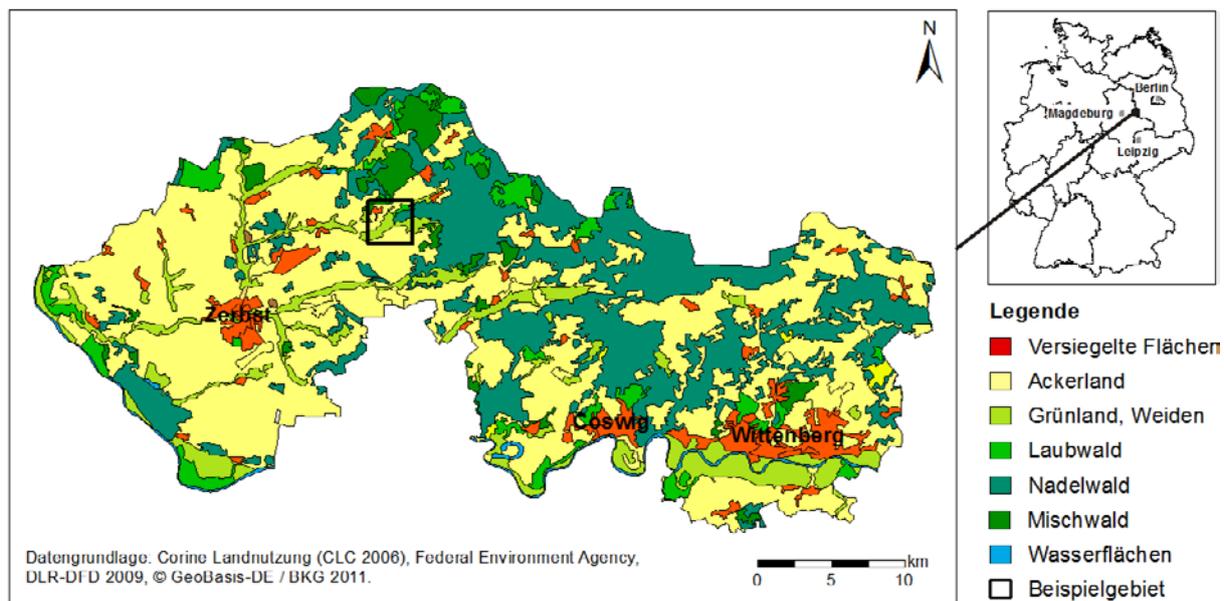


Abb. 1: Landnutzung und geographische Lage des Untersuchungsgebietes Fläming.

den wie Gleye oder Vegen kommen schwerpunktmäßig entlang der Flusssysteme von Elbe und Nuthe vor. Diese Bereiche werden überwiegend als Grünland und Weide bewirtschaftet (Abbildung 1). Die höheren, östlichen Teile des Untersuchungsgebietes werden intensiv forstwirtschaftlich genutzt. Dominierend sind Nadelwälder in Form von Kiefernforsten; nur kleine Flächen werden von Laub- und Mischwald bedeckt. Der westliche, flache Teil (Zerbscher Ackerland) wird intensiv landwirtschaftlich bewirtschaftet. Aufgrund der vor allem in den 1970er und 1980er Jahren durchgeführten Maßnahmen zur Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion wurden in diesem Teilgebiet bis hin zu den angrenzenden Waldflächen umfangreiche Hydromeliorationsmaßnahmen durchgeführt, die zu einer flächenhaften Absenkung der Grundwasserstände führte. Da der Fläming auch ein wichtiges Trinkwassergewinnungsgebiet ist (LUCKNER et al. 2002), verstärkten sich in den letzten Jahren die Nutzungskonflikte um die Ressource Wasser zwischen den in der Region ansässigen Land- und Forstwirten sowie dem Wasserversorger.

2.2 Datengrundlagen und Methoden

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die für die Berechnung der Sickerwasserraten verwendeten Daten. Für die Jahre 1990–2010 wurden für das Klima Beobachtungsdaten und für 2011–2070 Klimaszenariendaten des vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelten statistischen Klimamodells STARS, angetrieben durch das Globalmodell ECHAM6, verwendet. Es wurde das IPCC-Szenario RCP 8.5 genutzt. Aus 1000 Realisierungen wurde nach dem Trend der klimatischen Wasserbilanz das 50%-Quantil (Median) ausgewählt.

Zwischen den Klimastationen wurden die Daten mit dem Modell WaSiM-ETH über das IDW-Verfahren interpoliert (SCHULLA & JASPER 2007). Die FAO-Grasreferenzverdunstung wurde über den Penman-Monteith-Ansatz berechnet (ALLEN et al. 1998). Die Bodendaten wurden aus der „Vorläufigen Bodenkarte Sachsen-Anhalts“ und den Leitbodenprofilen der dazu-

gehörigen Bodendatenbank LAGB gemäß der Methodendokumentation Bodenkunde und der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2000, 2005, 2010) abgeleitet. Für die Landnutzung wurde der CORINE-Datensatz von 2006 verwendet. Die Landnutzung wurde, ebenso wie die Bodendaten, über den gesamten Zeitraum von 1990 bis 2070 als konstant angenommen.

Für die Berechnung der Sickerwasserraten wurde das TUB-BGR-Verfahren verwendet (WESSOLEK et al. 2008). Es besteht aus landnutzungsabhängigen, nicht linearen, multiplen Regressionsgleichungen, in die der Sommer-, der Jahresniederschlag, die Jahressumme der FAO-Grasreferenzverdunstung, die Landnutzung und die Höhe des kapillaren Aufstiegs aus dem Grundwasser eingehen. Mit diesem Verfahren wurden – mit Ausnahme der versiegelten Flächen – auf einem 25m-Raster flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet zwischen 1990 und 2070 die jährlichen Sickerwasserraten berechnet.

3. Ergebnisse

3.1 Entwicklung des Klimas im Fläming (1990-2070)

Der in den letzten 20 Jahren beobachtete Anstieg der Jahresgebietsmitteltemperaturen im Fläming wird sich auch in Zukunft weiter fortsetzen (Abbildung 2). In ferner Zukunft (2051–2070) wird das Gebietsmittel der mittleren jährlichen Lufttemperatur 2.5°C über dem heutigen Mittelwert (1990–2010; Referenzperiode) liegen. Jedoch wird der Temperaturanstieg nicht in allen Monaten gleich stark ausfallen. Bis 2050 wird die mittlere Lufttemperatur vor allem im Herbst und Winter zunehmen; erst nach 2050 wird sie auch im Sommer stärker ansteigen. Eine Folge der steigenden Lufttemperaturen wird u.a. eine Verlängerung der Vegetationsperiode sein.

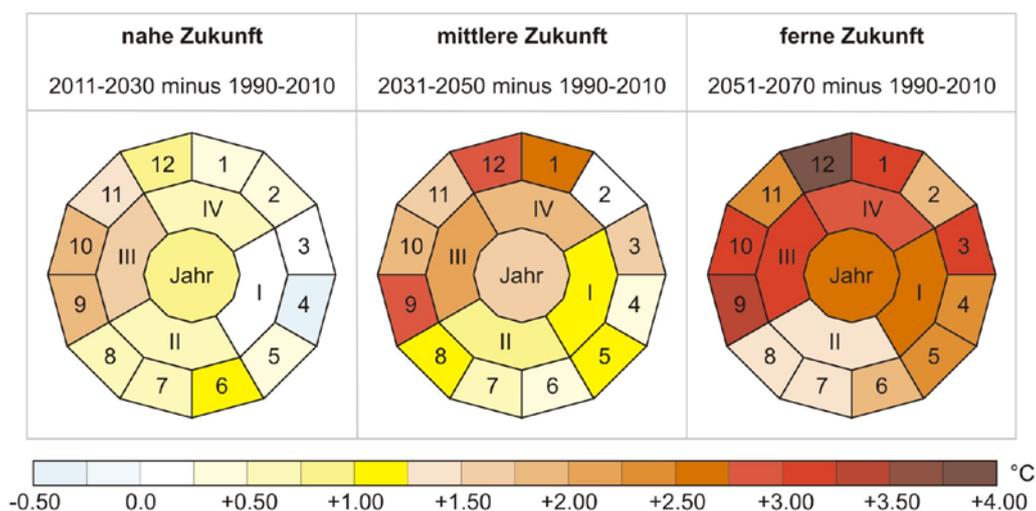


Abb. 2: Anomalien der mittleren Lufttemperaturen 2011–2070 im Fläming (Gebietsmittelwerte). Dargestellt sind die Differenzen zur Referenzperiode 1990–2010 (mittlere Jahrestemperatur: 9.76°C). Jahr = Jahresmittel, I–IV = Mittel der meteorologischen Jahreszeit, 1–12 = Monatsmittel. Datengrundlage: DWD (2011), PIK (2012), mündliche Mitteilung.

Tab. 1: Datengrundlage für die Sickerwasserratenberechnung mit dem TUB-BGR-Verfahren.

	Datensatz	Datentyp	Datenquelle	Maßstab/ Auflösung
Bodendaten	Vorläufige Bodenübersichtskarte Sachsen-Anhalt (VBK50)	Vektordaten	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) (2011)	1:50.000
Bodendaten	Bodendaten LAGB Sachsen-Anhalt (Horizont- und Profil/ Flächendaten)	Datenbank	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) (2011)	-
Digitales Geländemodell	DGM25	Rasterdaten	© GeoBasis-DE/ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2011)	25 m
Landnutzungsdaten	CORINE Land Cover 2006	Vektordaten	European Environment Agency, DLRFDF (2009)	1:50.000
Klimadaten (Beobachtungen)	Lufttemperatur, Niederschlag, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer	Stationsdaten	Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011)	-
Klimaszenario- daten (STARS)	Lufttemperatur, Niederschlag, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer	Stationsdaten	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2012), mündliche Mitteilung	-

Der Niederschlag, ein von Natur aus sehr variables Element, weist im Fläming keinen eindeutigen Trend auf. Auch in Zukunft werden sich niederschlagsärmere und niederschlagsreichere Perioden abwechseln. Phasen geringer Jahresniederschlagsmengen werden zukünftig häufiger auftreten und länger sein. Die mittlere Jahresniederschlagssumme wird im Vergleich zur Referenzperiode in naher Zukunft (2011–2030) um ca. 5% und in ferner Zukunft um ca. 8% abnehmen (Abbildung 3). In mittlerer Zukunft (2031–2050) wird die mittlere Jahresniederschlagssumme etwa der heutigen entsprechen. Innerhalb des Jahres wird es jedoch eine Umverteilung der Niederschlagsmengen geben. So wird z.B. ab 2031 der Spätsommer bei gleichzeitig steigenden Lufttemperaturen deutlich trockener werden.

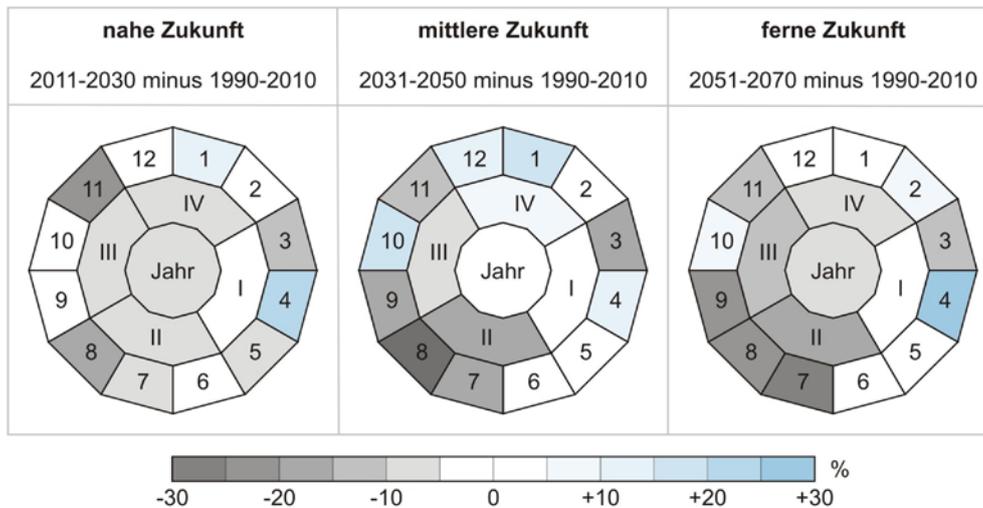


Abb. 3: Anomalien der mittleren Niederschlagssummen 2011–2070 im Fläming (Gebietsmittelwerte). Dargestellt sind die Differenzen zur Referenzperiode 1990–2010 (mittlere Jahresniederschlagssumme: 566mm). Erläuterungen und Datengrundlage siehe Abbildung 2.

Auch die Evapotranspiration wird wegen der steigenden Lufttemperaturen zunehmen, sodass im Fläming zukünftig in fast allen Jahren negative jährliche klimatische Wasserbilanzen auftreten werden. Damit nimmt die Trockenheitsgefährdung der schon jetzt niederschlagsarmen Region deutlich zu. Besonders betroffen wird hiervon der Sommer sein.

3.2 Entwicklung der Sickerwasserraten im Fläming (1990–2070)

Die Höhe der jährlichen Sickerwasserrate ist landnutzungsabhängig (Abbildung 4). Die höchsten Sickerwasserraten treten im Mittel über das gesamte Untersuchungsgebiet unter Ackerland auf und nehmen über Laub-, Nadel- und Mischwald bis zum Grünland hin ab. Aufgrund der in Zukunft zu erwartenden klimatischen Veränderungen werden sich die jährlichen Sickerwasserraten – unabhängig von der Landnutzungsart – im gesamten Untersuchungsgebiet verringern (vgl. Abbildung 4). Dieser Trend ist bei Acker-, Grünland, Nadel-, Laub- und Mischwald unter schieflich stark ausgeprägt. Im Mittel über alle Landnutzungsarten werden die jährlichen Sickerwasserraten gegenüber der Referenzperiode im Mittel 2051–2070 nur noch bei ca. 40% des heutigen Gebietsmittelwertes liegen. Da im Mittel 2031–2050 die Niederschläge in der Größenordnung der Referenzperiode liegen werden, unterscheiden sich die jährlichen Sickerwasserraten nur wenig von den heutigen. Die prozentual größten Veränderungen bis 2070 sind auf den Grünlandflächen, gefolgt von Misch-, Laub-, Nadelwald- und Ackerflächen zu erwarten.

An zwei Beispielen wurde der Einfluss der Landnutzung, des Grundwasserstandes und der Bodeneigenschaften auf die jährlichen Sickerwasserraten untersucht. Hierzu wurde ein innerhalb des Untersuchungsgebietes liegendes 3km x 3km großes Gebiet ausgewählt (vgl. Abbildung 1). Darin sind Flächenareale mit Acker-, Grünland, Nadel-, Laub- und Mischwald sowie gleichen Bodeneigenschaften und Grundwasserständen enthalten. Abbildung 5a zeigt in diesem Beispielgebiet die jährlichen Sickerwasserraten über alle Flächen mit Humusgleyen, einer nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) von 134mm und einem

mittleren Niedriggrundwasserstand (MNGW) von 0.8m. Die höchsten Sickerwasserraten treten unter Ackerflächen, die niedrigsten unter Nadelwäldern auf. Die Sickerwasserraten von

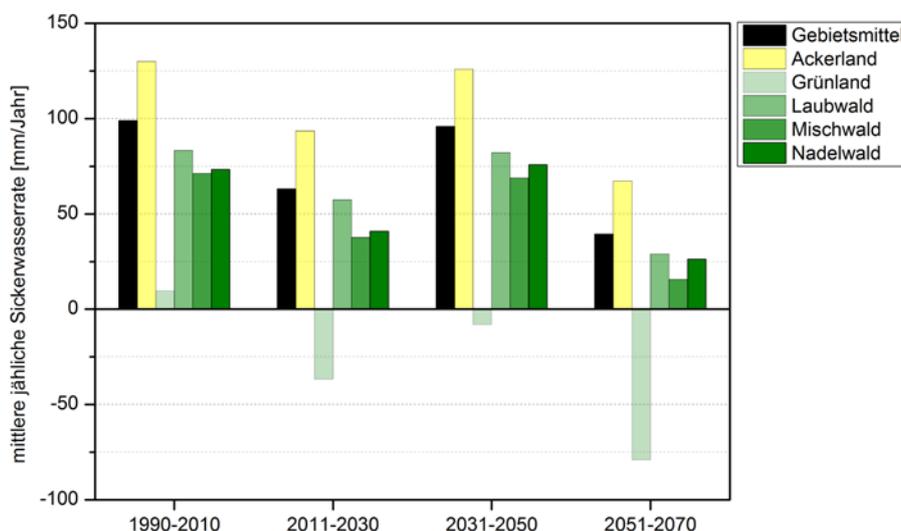


Abb. 4: Mittlere jährliche Sickerwasserraten im sachsen-anhaltinischen Teil des Flämings.

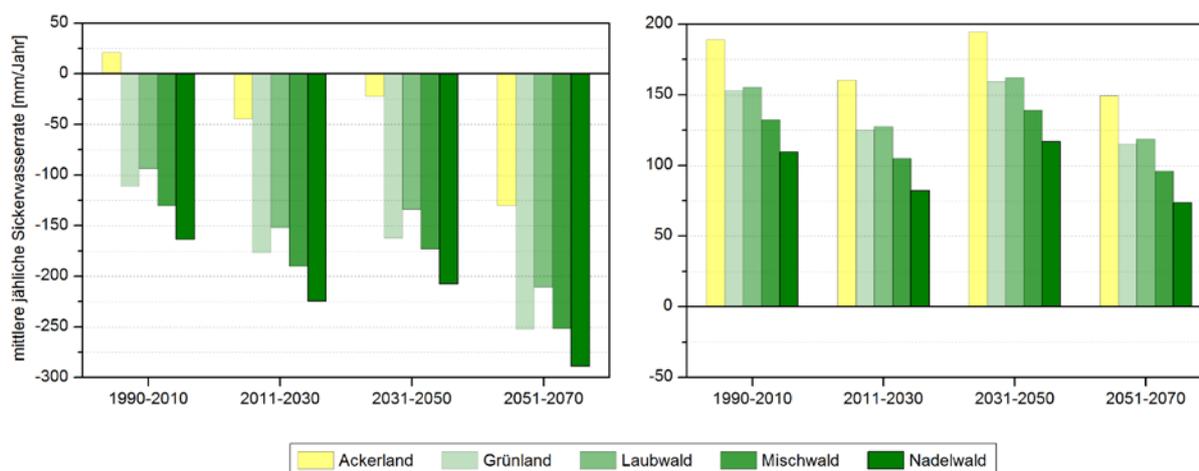


Abb. 5a: Mittlere jährliche Sickerwasserraten unter Humusgleyen (nFKWe = 134mm, MNGW = 0.8m)

Abb. 5b: Mittlere jährliche Sickerwasserraten unter Braunerden (nFKWe = 63mm, MNGW = 3.0m)

Grünland, Laub- und Mischwald liegen dazwischen. In diesem Beispiel wird ebenfalls – wie bei den Gebietsmittelwerten – der abnehmende Trend der mittleren jährlichen Sickerwasserraten deutlich. Allerdings treten fast nur negative Werte, die eine Grundwasserzehrung bedeuten, auf.

Auch unter Braunerden mit einer nFKWe = 63mm und einem MNGW = 3.0m ist dieser negative Trend bezüglich der jährlichen Sickerwasserraten zu erwarten (Abbildung. 5b). Die Höhe der jährlichen Sickerwasserraten folgt dabei der gleichen Reihenfolge wie unter den Humusgleyen. Der markanteste Unterschied zum Gebietsmittel (vgl. Abbildung 4) und den Hu-

musgleyen (vgl. Abbildung 5a) besteht darin, dass die mittleren jährlichen Sickerwasserraten durchweg positive Werte annehmen.

4. Diskussion

Die Höhe der jährlichen Sickerwasserraten ist landnutzungsabhängig. Im Fläming werden, bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet, die höchsten jährlichen Sickerwasserraten auf Ackerflächen, die niedrigsten auf Grünlandflächen erreicht (vgl. Abbildung 4). Die Werte für Nadel-, Laub- und Mischwald liegen dazwischen. Bis zum Jahr 2070 werden die jährlichen Sickerwasserraten unter allen Landnutzungsarten deutlich abnehmen.

Die prozentual größten Veränderungen in der Sickerwassermenge gegenüber der Referenzperiode sind auf den Grünlandflächen zu erwarten, die im Untersuchungsgebiet vor allem entlang der Flusssysteme von Elbe und Nuthe vorkommen und einen mittleren MNGW von etwa nur 1.1m aufweisen. In Jahren negativer klimatischer Wasserbilanzen steigt Grundwasser kapillar auf, sodass es zur Grundwasserzehrung kommt. Da die jährlichen klimatischen Wasserbilanzen aufgrund des Klimawandels zukünftig häufiger negativ sein werden, wird die Grundwasserzehrung auf den Grünlandflächen zunehmen. Durch die steigenden Temperaturen verlängert sich außerdem die Vegetationsperiode und die Evapotranspiration nimmt zu. Diese Effekte könnten langfristig zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels unter den Grünlandflächen führen.

Unter den ackerbaulich genutzten Flächen im Fläming werden die jährlichen Sickerwasserraten bis 2070 gegenüber der Referenzperiode um etwa 50% abnehmen (vgl. Abbildung 4). Auf diesen Flächen, bei denen im Mittel der MNGW bei mehr als 2.2m liegt, spielt der kapillare Aufstieg eine untergeordnete Rolle. Da der Boden meist nur während des Sommers durch Vegetation bedeckt ist, die aktiv transpiriert, kann während der übrigen Zeit ein großer Teil des Jahresniederschlags auf diesen Flächen infiltrieren und trägt als Sickerwasser zur Grundwasserneubildung bei.

Die Wälder stehen meist an grundwasserfernen Standorten, sodass auch auf den Waldflächen der kapillare Aufstieg nur an einzelnen Stellen eine Rolle spielt. Die höheren jährlichen Sickerwasserraten unter Laubwäldern gegenüber Nadelwäldern (vgl. Abbildung 4) sind im Blattabwurf der Laubbäume im Winter und der damit einhergehenden geringeren Interzeption begründet. Nadelwälder weisen wegen der ganzjährigen Belaubung höhere jährliche Transpirations- und Interzeptionsraten als Laubbäume auf, sodass weniger Niederschlagswasser versickern kann. Die vergleichsweise niedrigen Sickerwasserraten unter Mischwäldern sind durch die – im Vergleich zu Nadelwäldern – im Mittel etwas höheren Werte der nFKWe begründet. Folglich kann unter Mischwäldern im Boden mehr Wasser gespeichert werden und die Sickerwasserraten sind geringer.

Die Beispiele für grundwasserferne und grundwassernahe Standorte (vgl. Abbildung 5a, 5b), belegen die unterschiedliche Regionalität der jährlichen Sickerwasserraten und ihre starke Abhängigkeit vom Grundwasserstand. Auf den grundwassernahen Humusgleyen ist die Wasserversorgung fast ganzjährig uneingeschränkt, sodass die jährliche aktuelle Evapotranspiration im Bereich der potenziellen liegt, und es somit zur Grundwasserzehrung kommt.

Die jährlichen Sickerwasserraten auf den grundwassernahen Humusgley-Standorten werden signifikant von den jährlichen klimatischen Wasserbilanzen beeinflusst (Korrelationskoeffizient r zwischen 0.98 und 0.99, landnutzungsabhängig). In Jahren negativer jährlicher klimatischer Wasserbilanzen kommt es zum kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser und damit zu einer Grundwasserzehrung. Lediglich in Jahren positiver klimatischer Wasserbilanzen sind auch höhere Sickerwasserraten zu erwarten. Die Variabilität zwischen den einzelnen Jahren wird zukünftig zunehmen. Während in besonders trockenen Jahren kaum eine Sickerwasserbildung auftritt, wird sie in sehr feuchten Jahren reichlicher ausfallen. Da jedoch in fast allen Jahren zukünftig negative klimatische Wasserbilanzen auftreten werden, ist davon auszugehen, dass dies langfristig zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels führen wird.

Die jährlichen Sickerwasserraten der grundwasserfernen Braunerde-Standorte (vgl. Abbildung 5b) liegen deutlich über denen der grundwassernahen Humusgley-Standorte. Aufgrund der niedrigen Grundwasserstände findet kein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser statt. Auch die nFKWe ist nur gering, sodass ein Großteil des infiltrierenden Wassers den Wurzelraum als Sickerwasser verlässt und das Grundwasser erneuert.

Auch an diesem Standort treten die höchsten jährlichen Sickerwasserraten in Jahren positiver klimatischer Wasserbilanzen auf (r zwischen 0.31 und 0.58, landnutzungsabhängig). Die Höhe der Sickerwasserraten wird jedoch zu einem großen Teil von der Höhe der Winterniederschläge bestimmt (r zwischen 0.73 und 0.82, landnutzungsabhängig). Da letztere tendenziell zunehmen werden (vgl. Abbildung 3), könnten die grundwasserfernen Standorte in Zukunft eine wichtigere Rolle bei der Grundwasserneubildung spielen. Allerdings werden auch hier die Sickerwasserraten und somit langfristig die Grundwasserstände bis 2070 abnehmen (vgl. Abbildung 5b).

Die Ergebnisse zeigen, dass zukünftig die Lufttemperaturen weiter steigen werden und sich die Vegetationsperiode im Fläming verlängern wird. Dies führt zu einer Zunahme der jährlichen Transpirationsraten. Sie werden insbesondere im Sommerhalbjahr bei den Laub- und Nadelbäumen ansteigen. Durch die milderen Winter wird aber auch die Evapotranspiration im Winterhalbjahr zunehmen. Folglich werden die Sickerwasser- und die Grundwasserneubildungsraten abnehmen.

Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der abnehmenden Sickerwasserraten bis zum Jahr 2070 eine Verschärfung der Nutzungskonflikte um die Ressource Wasser im Fläming eintreten wird. Es bleibt abzuwarten, ob der demographische Wandel und die damit einhergehende Bevölkerungsabnahme, vor allem in ländlichen Gebieten, einen Beitrag zur Entschärfung der Nutzungskonflikte leisten kann. Während 1990 der tatsächliche Trinkwasserverbrauch bei etwa 330l/Einwohner/Tag lag, ist er bis 2010 auf etwa 136l/Einwohner/Tag zurückgegangen (LAU & LVA 2012). Da ein weiterer Bevölkerungsrückgang auch die benötigte Trinkwassermenge verringert, könnte dies der negativen Tendenz abnehmender Grundwasserneubildungsraten entgegenwirken. Andererseits wird es wahrscheinlicher, dass wegen der sich ändernden klimatischen Rahmenbedingungen eine Bewässerung auf den Ackerstandorten notwendig wird, um weiterhin Landwirtschaft rentabel betreiben zu können. Auch ein Umbau der großflächig vorkommenden Kiefernforste hin zu Mischwäldern könnte sinnvoll sein, da sich Mischwälder besser an den Klimawandel anpassen können (ZEBISCH et al. 2005).

5. Zusammenfassung und Ausblick

In einer hohen räumlichen Auflösung wurden mit dem TUB-BGR-Verfahren die jährlichen Sicherwasserraten für den sachsen-anhaltinischen Teil des Flämings berechnet. Die in den letzten Jahrzehnten hier bereits beobachteten klimatischen Veränderungen werden sich auch in Zukunft fortsetzen: die Sommer werden trockener und wärmer, die Winter etwas feuchter. Die Grundwasserneubildungsrate wird sich verringern; sie nimmt vom Ackerland über Laubwald, Grünland und Mischwald bis hin zum Nadelwald ab. Da insbesondere auf grundwassernahen Standorten mit einer erhöhten Grundwasserzehrung zu rechnen ist, wird der Grundwasserspiegel tendenziell absinken. Es ist einerseits mit einer Verschärfung der Interessenskonflikte um die Ressource Wasser in dieser wasserwirtschaftlich sensiblen Region zu rechnen. Andererseits könnten die rückläufigen Einwohnerzahlen dieser Region und damit geringe geförderte Trinkwassermengen diesem Trend entgegenwirken. Anhand zukünftiger Untersuchungen mit dem hydrologischen Modell WaSiM-ETH soll geprüft werden, ob eine Erhöhung der Sickerwasserraten durch eine Veränderung der Landnutzung im Fläming möglich ist.

Danksagungen

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Förderkennzeichen 033L029J gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2000): Methodendokumentation Bodenkunde. Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Informationen aus den Bund-Länder-Arbeitsgruppen der staatlichen geologischen Dienste. –2. überarb. Aufl.: S. 1-232. Schweizerbart, Stuttgart
- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. –5. verb. u. erw. Aufl.: S. 1-438. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover
- AD-HOC-AG BODEN (2010): Neue Methoden und Aktualisierungen der Methodendokumentation Bodenkunde. <http://www.bgr.bund.de>
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. & M. SMITH (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. –FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rom. <https://www.fao.org>
- BMU (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, Hrsg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Bonn
- IKSE (INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DER ELBE, Hrsg.) (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Magdeburg. <http://www.ikse-mkol.org>
- JANKIEWICZ, P., NEUMANN, J., DUIJNISVELD, W.H.M., WESSOLEK, G., WYCISK, P. & V. HENNINGS (2005): Abflusshöhe - Sickerwasserrate - Grundwasserneubildung - Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland. –Hydrologie und Wasserwirtschaft 49: 2-13

- KROPP, J., ROITHMEIER, O., HATTERMANN, F., RACHIMOW, C., LÜTTGER, A., WECHSUNG, F., LASCH, P., CHRISTIANSEN, E.S., REYER, C., SUCKOW, F., GUTSCH, M., HOLSTEN, A., KARTSCHALL, T., WODINSKI, M., HAUF, Y., CONRADT, T., ÖSTERLE, H., WALTHER, C., LISSER, T., LUX, N., TEKKE, V., RITCHIE, S., KOSSAK, J., KLAUS, M., COSTA, L., VETTER, T. & M. KLOSE (2009): Klimawandel in Sachsen-Anhalt. Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Endbericht. –S. 1-312. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
- LAU (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt) & LAV (Landesamt für Verbraucherschutz Sachsen-Anhalt) (2012): Bericht zur öffentlichen Wasserversorgung in Sachsen-Anhalt für das Jahr 2010. –S. 1-25. <http://www.sachsen-anhalt.de>
- LUCKNER, L., BÖRNER, F., TIEMER, K. & C. BEYER (2002): Grundwasserressourcen im Westfläming. Langfristige Nutzung des Wasserdargebots im Westfläming. Gutachten. – S. 1-177. Dresdener Grundwasserforschungszentrum (DGFZ), Dresden
- SCHULLA, J. & K. JASPER (2007): WaSiM-ETH. Model description. –S. 1-181. Zürich. <https://www.wasim.ch>
- WESSOLEK, G., DUIJNISVELD, W.H.M. & S. TRINKS (2008): Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on regional scale. –Journal of Hydrology 356: 17-27
- ZEBISCH, M., GROTHMANN, T., SCHRÖTER, D., HASSE, C., FRITSCH, U. & W. CRAMER (2005): Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Climate Change, 08/05. –UBA (Bundesumweltamt), Dessau. S. 1-205

Die Auswirkung möglicher Klimawandelszenarien auf das Erzeugungspotenzial von Wasserkraftwerken

Simon Frey, Robert Goler, Herbert Formayer, Hubert Holzmann

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die hydrologischen und klimatologischen Auswirkungen des Klimawandels auf vier Einzugsgebiete mit verschiedenen Charakteristika vorgestellt: Saalach (alpin, unvergletschert), Obere Salzach (alpin, vergletschert), Ybbs (mittlere Höhenlage, nördliches Alpenvorland) sowie Gurk (mittlere Höhenlage, südliches Alpenvorland). Dazu werden an der BOKU die regionalen Klimamodelle ALADIN, sowie REMO und REGCM3 verwendet. Als Emissionsszenario dient das IPCC-Szenario A1B. Die hydrologische Modellierung erfolgt mit einem tageswertbasierten konzeptionellen hydrologischen Modell, welches die Prozesse Schnee- und Gletscherschmelze, Oberflächen- und Zwischenabfluss sowie Basisabfluss und Evapotranspiration erfasst. Die Verdunstung wird mittels eines vereinfachten Ansatzes von TURC (1961), ohne Berücksichtigung der Luftfeuchte gerechnet. Schnee- und Gletscherschmelze werden durch das Temperatur-Index-Verfahren abgebildet. Die Berechnung der Temperatur erfolgt auf 100 m Höhenbändern. Dabei ist das Modell in der Lage Inversionswetterlagen zu berücksichtigen. Die Kalibrierung des Modells erfolgte mittels Monte Carlo Simulationen im Zeitraum von 1996 bis 2005, validiert wurde direkt im Anschluss von 2006 bis 2010. Zur Kalibrierung wurden neben dem Abfluss auch Informationen zur Schneebedeckung von MODIS verwendet.

Während bezüglich der Jahresgesamtmenge des Abflusses keine eindeutigen Trends erkennbar sind, so zeigt sich bei monatlicher Betrachtung eine Reduktion der Abflüsse im Sommer bei gleichzeitigem Anstieg der Winterabflüsse.

1. Motivation

Die Wasserkraft stellt in alpinen Räumen eine der wichtigsten Quellen von erneuerbaren Energien dar. Mögliche Veränderungen der Verfügbarkeit von Wasserressourcen aufgrund von Klimaänderungen stehen damit in direkter Verbindung zu veränderten Bedingungen für die Energiegewinnung. Diese Einflüsse sind komplex und nicht linear. So hat die Aussage, dass mehr Wasser automatisch zu einer größeren Leistung führt, nur bedingt Gültigkeit (GIESECKE & MOSONYI 2009).

Basierend auf Emissionsszenarien (IPCC 2000) können globale Klimamodelle (GCM) betrieben werden, die unter Einbindung von gemessenen meteorologischen Größen regionale Klimamodelle (RCMs) antreiben (siehe z.B. NIKULIN et al. 2011). Die auf diese Weise gewonnenen Informationen über mögliche Entwicklungen des Klimas dienen wiederum als Eingangsgrößen für hydrologische Modelle, welche an die Gegebenheiten eines Einzugsgebietes angepasst (kalibriert) werden müssen (KLING et al. 2012; MAUSER & BACH 2009). Für die hydrologische Modellierung steht eine Vielzahl von Modellansätzen zur Verfügung. Diese reichen von komplexen, rasterbasierten Modellen, bis zu sehr einfachen, konzeptionellen Ansätzen. Dem Vorteil einer sehr guten, physikalisch begründeten Abbildung der hydrologi-

schen Größen bei komplexen Ansätzen steht die robuste Struktur von einfachen Modellen gegenüber (KHAKBAZ et al. 2012; UHLENBROOK et al. 1999).

2. Methodik

2.1 Klimatologie

Die hier vorgestellte Arbeit berücksichtigt nur das IPCC-Emissionsszenario A1B, da dies als ein „mittleres“ Szenario angesehen werden kann (KLING et al. 2012). Dabei werden die drei RCMs ALADIN, REMO und REGCM3 verwendet. Während REMO und REGCM3 von dem globalen Klimamodell ECHAM5 (ROECKNER et al. 2003) angetrieben werden, verwendet ALADIN das GCM ARPEGE (DÉQUÉ et al. 1994). Da die von den RCMs gelieferte Daten erheblich von den gemessenen Daten des Zeitraumes 1971 bis 2000 abweichen, müssen diese fehlerkorrigiert werden. Dies erfolgte mittels der Quantile-Mapping-Methode (DÉQUÉ 2007) unter Verwendung des EOBS-Datensatzes (HAYLOCK et al. 2008). Aufgrund der groben räumlichen Auflösung der RCMs (25 x 25 km) wurden die fehlerkorrigierten Daten mittels des INCA-Datensatzes (HAIDEN et al. 2011) räumlich lokalisiert, so dass eine Auflösung von 1 x 1 km erzielt werden konnte. Aus den Klimamodellen wurde für alle Untersuchungsgebiete der Gebietsniederschlag, die Globalstrahlung auf Niveau der mittleren Gebietshöhe sowie die Lufttemperatur auf sieben Höhenstufen ermittelt, die als Eingangsgrößen für das hydrologische Modell dienen.

2.2 Hydrologie

In der hier vorgestellten Arbeit wird eine modifizierte und weiterentwickelte Version des von HOLZMANN et al. (2010) vorgestellten hydrologischen Modells verwendet, welches auf dem weitverbreiteten HBV (BERGSTRÖM, 1976) beruht. Die abflussbildenden Wasserhaushaltskomponenten sind der Niederschlag in Form von Regen sowie die Schmelze aus Schnee und Gletscherflächen. Die Berechnungen erfolgen tageswertbasiert. Nachfolgend werden die Veränderungen des Modells gegenüber dem Stand von 2010 beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der nicht veränderten Komponenten ist in HOLZMANN et al. (2010) gegeben, ein Modellschema findet sich in Abb. 1.

Die Berechnung der temperaturabhängigen Größen Schneeschmelze und -akkumulation, Gletscherschmelze, potentielle Evaporation sowie der Lufttemperatur selbst erfolgt höhendifferenziert durch eine Untergliederung in 100 m Höhenzonen. Die Lufttemperatur wird hierbei zwischen den gegebenen Höhengniveaus linear interpoliert. Oberhalb des obersten Niveaus von 2500 m wird mit einem feuchtadiabatischen Gradienten von $-0.65 \text{ C}/100 \text{ m}$ extrapoliert. Für die Berechnung der Globalstrahlung wird ein Höhengradient von $5.5 \text{ W}/\text{m}^2/100 \text{ m}$ verwendet.

Unterhalb der Schwellentemperatur von 0 °C wird Niederschlag in Form von Schnee behandelt. Um Schneeverlagerungsprozesse wie Drift durch Wind oder Lawinen konzeptionell abbilden zu können, wurde das Modell um eine Schneeverlagerungsroutine erweitert, welche den Schnee während des Niederschlagsereignisses volumentreu auf mehrere Höhenstufen verteilt. Die Anzahl der Höhenstufen, von denen aus Schnee verteilt wird, sowie die Anzahl der Stufen, die Schnee empfangen, können bei der Kalibrierung berücksichtigt werden. Dadurch wird einer extremen Schneeakkumulation auf sehr hoch gelegenen Höhenstufen, wel-

che selten Lufttemperaturen über 0 °C aufweisen, vorgebeugt. Sowohl Schnee- als auch Gletscherschmelze werden mittels Temperaturindexverfahren abgebildet, wobei für Schnee und Eis verschiedene Schmelzoeffizienten vorliegen.

Gleich wie die Aufteilung der Gebietsfläche in 100 m Zonen werden auch die Gletscherflächen im Modell höhendifferenziert betrachtet. Diese werden auf Basis des Gletscherinventars von 1969 (LAMBRECHT & KUHN 2007) eingelesen und die mittlere Mächtigkeit pro Höhenzone nach dem Ansatz von CHEN & OHMURA (1990) geschätzt. Nach HABERSACK et al. (2011) ist zu erwarten, dass die Gletscher unterhalb von 3000 m bis zum Jahr 2100 abgeschmolzen sein werden. Diese Information wird benutzt, um die vergletscherten Flächen im Modell vom Stand von 1969 bis 2100 linear zu verringern. Die Reduktion erfolgt dabei auf Tagesbasis, wobei 70 % des Flächenverlustes von der tiefst gelegenen Fläche und die restlichen 30 % von den übrigen Flächen unterhalb 3000 m abgezogen werden.

Der Wert der potentiellen Verdunstung wird pro Höhenschicht nach einem vereinfachten Ansatz von TURC (1961) ohne Berücksichtigung der Luftfeuchte gerechnet und anschließend zu einer potentiellen Gebietsverdunstung aggregiert. Unterschreitet der Bodenwasserwert einen zu kalibrierenden Schwellenwert wird die aktuelle Verdunstung durch lineare Abnahme berechnet.

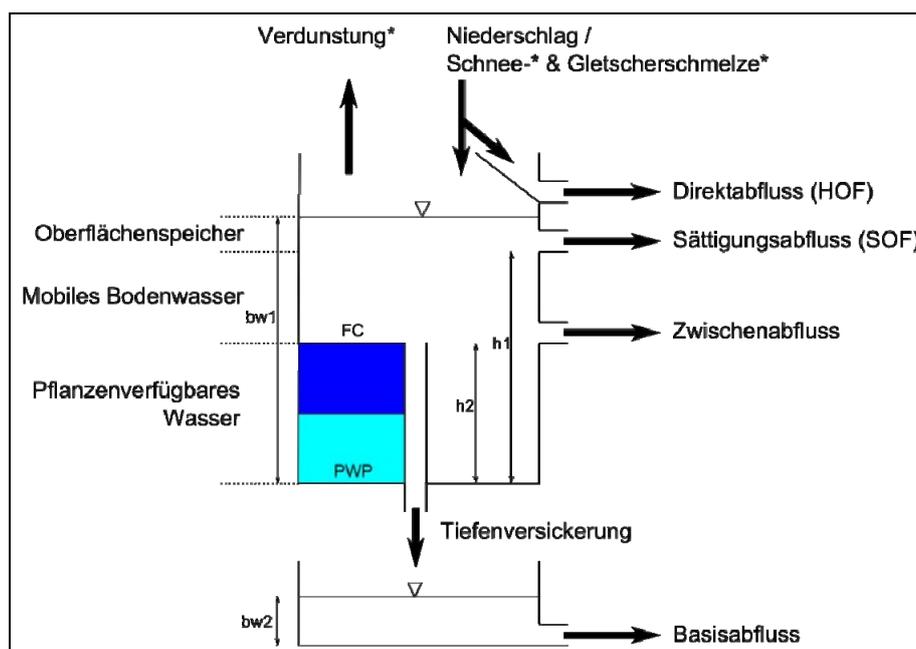


Abb. 1: Schema des verwendeten hydrologischen Modells. Mit (*) gekennzeichnete Größen werden höhendifferenziert in 100 m Höhenstufen gerechnet.

3. Untersuchungsgebiete

Bei den hier vorgestellten Untersuchungsgebieten handelt es sich um mesoskalige Einzugsgebiete in Österreich. Eine Übersicht gibt

Abb. 2 und Tab. 1. Während die beiden Gebiete der Saalach und der oberen Salzach (Pinzgau) alpin bis hochalpin gelegen sind, wobei nur das Gebiet im Pinzgau Vergletscherung aufweist, liegen die beiden anderen Gebiete der Ybbs und der Gurk in mittleren Höhenlagen. Dabei ist die Ybbs auf der Alpennordseite, die Gurk auf der Alpensüdseite angesiedelt.

Tab. 1: Charakteristika der Untersuchungsgebiete (Daten aus BMLFUW, 2007)

	Größe [km ²]	Vertikale Ausdehnung [m ü NN]	Mittlerer Niederschlag [mm/a]	Mittlere potentielle Verdunstung [mm/a]	Mittlere aktuelle Verdunstung [mm/a]
Saalach	1152	416 – 2818	1739	547	513
Obere Salzach	1166	742 – 3609	1642	411	346
Ybbs	1116	263 – 1841	1438	619	596
Gurk	2554	396 – 2372	949	574	566

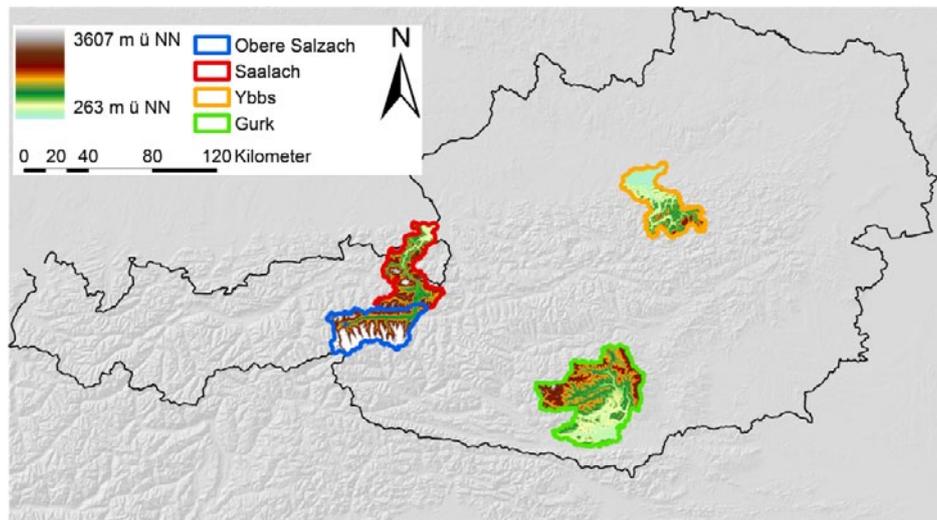


Abb. 2: Geographische Lage der Untersuchungsgebiete in Österreich

4. Ergebnisse

4.1. Kalibrierung und Validierung

Das hydrologische Modell wurde anhand der Abflusszeitreihen von 1996 bis 2005 mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen kalibriert, direkt im Anschluss daran erfolgte die Validierung in den Jahren 2006 bis 2010. Unter Berücksichtigung der energiewirtschaftlichen Interpretierbarkeit wurde bei der Kalibrierung das Augenmerk auf eine gute Übereinstimmung der Abflussdauerlinien (Abb. 3) sowie der Modellergebnisse im Bereich des Mittel- und Niedrigwassers gelegt. Zusätzlich zu den Abflussmessreihen wurden, im verfügbaren Zeitraum von 2003 bis 2010, Satellitendaten zur Schneebedeckung (MODIS) für die Kalibrierung und Validierung verwendet. Die Modellgüte nach NASH & SUTCLIFFE (1970) während der Kalibrierung und der Validierung ist in Abb. 3 (links) dargestellt.

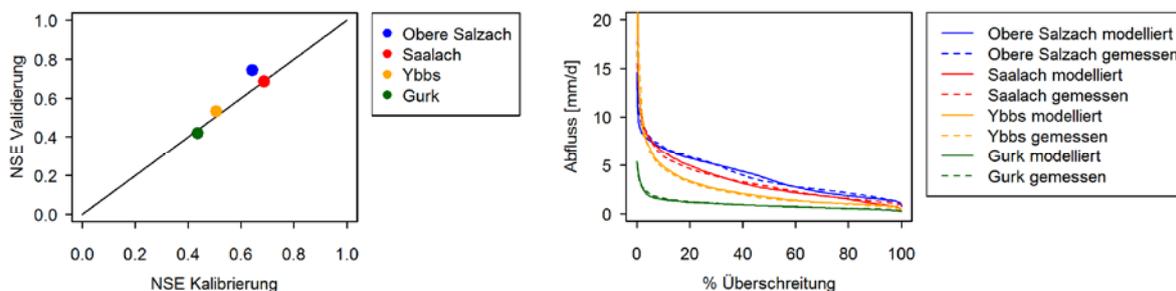


Abb. 3: Modellgüte während der Kalibrierung und Validierung (links) sowie Vergleich der gemessenen und modellierten Abflussdauerlinien (während des gesamten Zeitraums der Kalibrierung und Validierung).

4.2. Szenarienmodellierung

Abb. 4 zeigt die Klimaänderungssignale der drei Klimamodelle für die meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Globalstrahlung und Niederschlag sowie deren Auswirkungen auf die Verdunstung und den Abfluss in den vier Testgebieten. Als Referenzzeitraum wurde 1981 bis 2010 gewählt. Alle drei Klimamodelle zeigen einen ähnlich starken Anstieg der Lufttemperatur um durchschnittlich 3.4 °C in der Periode 2081 bis 2100. Ähnlich wie beim Niederschlag sind bei der Globalstrahlung keine eindeutigen Trends identifizierbar. Die vom hydrologischen Modell gerechnete potentielle Verdunstung verzeichnet einen Anstieg um bis zu 214 mm pro Jahr (Obere Salzach, REMO), wobei die aktuelle Verdunstung im gleichen Zeitraum um 165 mm pro Jahr ansteigt. Während ALADIN in allen Gebieten einen deutlichen Trend zu weniger Abfluss in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zeigt, sind die Signale von REMO und REGCM3 regional differenziert.

Im Hinblick auf die Wasserkraft spielt neben dem Jahresabfluss eines Gebietes die jährliche Verteilung eine wichtige Rolle. Mittlere Monatsabflüsse für die vier Gebiete im Referenzzeitraum verglichen mit der Periode 2081 bis 2100 sind in Abb. 5 dargestellt. Abb. 6 vergleicht die Anzahl der Tage mit Niederwasser (NQ_{95}) der Periode 1981 bis 2010 unterschritten wird, mit denen am Ende des 21. Jahrhunderts von 2081 bis 2100. NQ_{95} beschreibt den Abflusswert, der an 5 % des Jahres unterschritten wird.

Passend zu den Änderungssignalen auf Jahresbasis nimmt der Abfluss bei der Verwendung von ALADIN am deutlichsten ab, wobei die größte Abnahme in den Sommermonaten auftreten. Dementsprechend nehmen auch die Tage mit Niederwasser (NQ_{95}) bei der Verwendung von ALADIN am meisten zu, während die beiden anderen Klimamodelle teilweise weniger Tage mit Niederwasser aufweisen.

Bei den alpinen Gebieten ist eine Verschiebung des Abflussregimes von glazial in Richtung nival zu beobachten. Die beiden anderen Gebiete weisen eine Verschiebung von nival in Richtung pluvial auf. Diese Entwicklung ist, in unterschiedlicher Ausprägung, bei allen drei Klimaszenarien erkennbar.

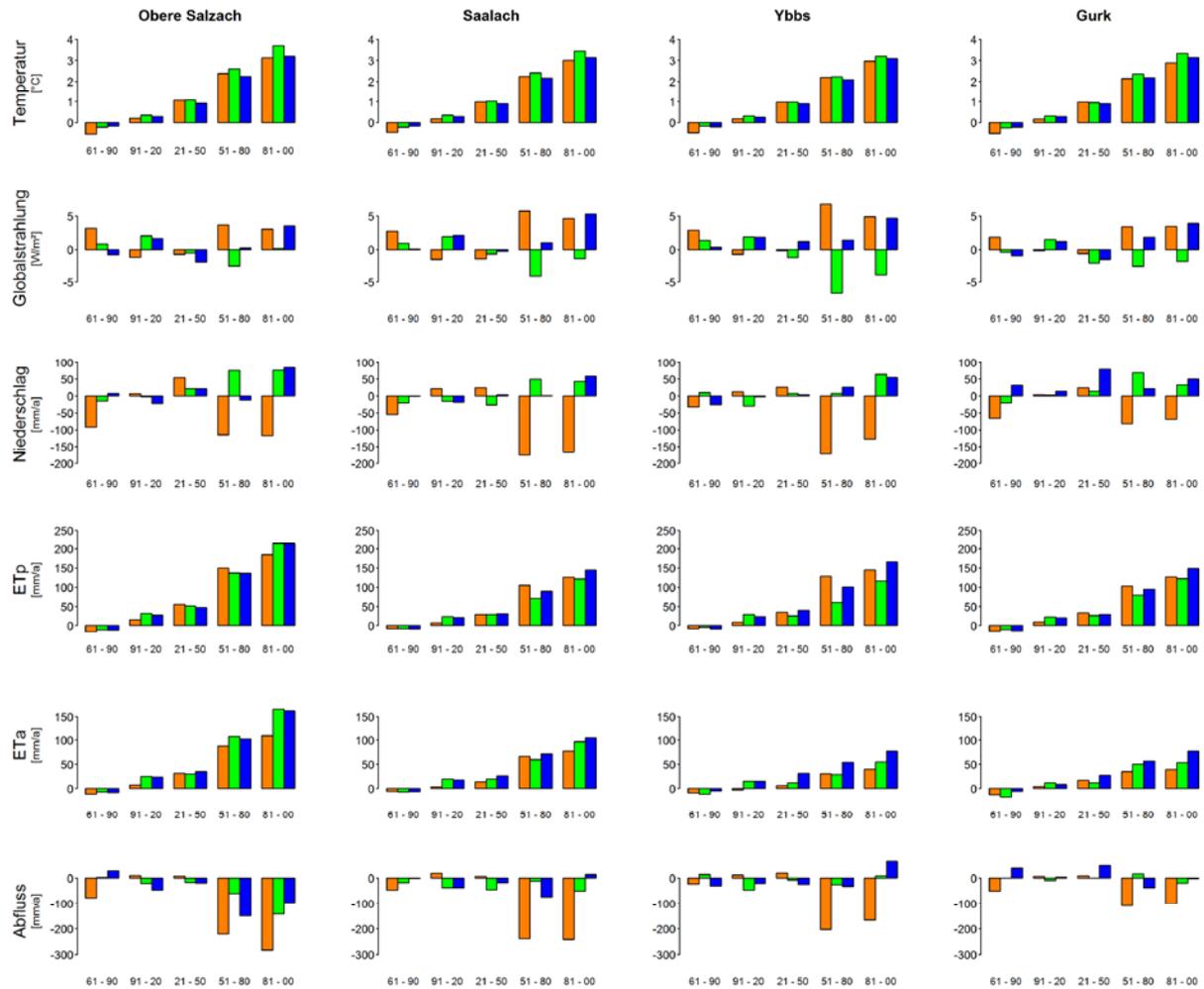


Abb. 4: Klimaänderungssignale von ALADIN (orange), REMO (grün) und REGCM3 (blau) und deren Auswirkungen auf Verdunstung und Abfluss der Untersuchungsgebiete.

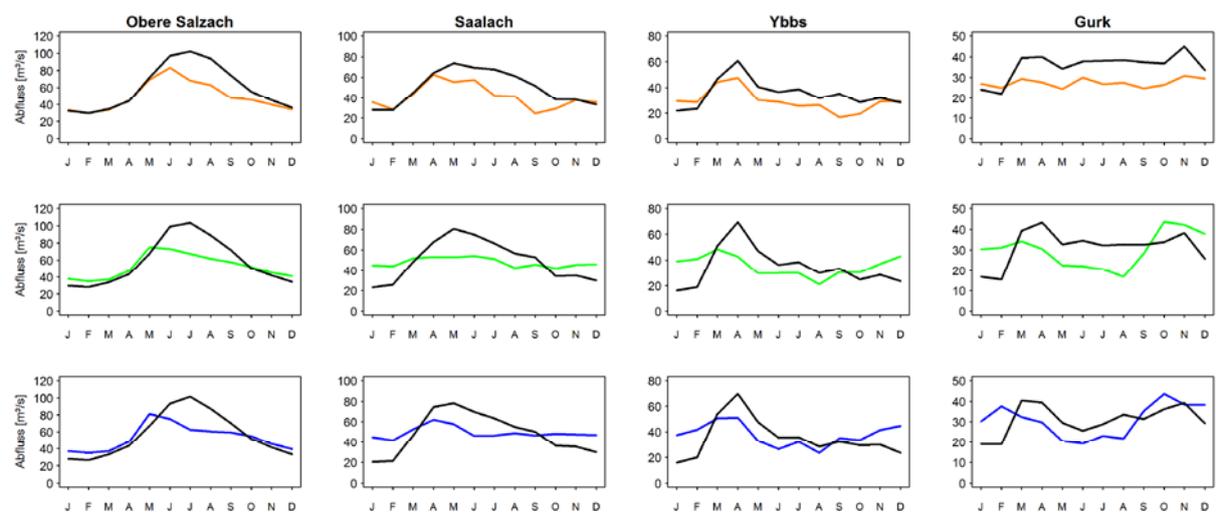


Abb. 5: Mittlere Monatsabflüsse aufgrund der Klimaszenarien ALADIN (orange), REMO (grün) und REGCM3 (blau) in den Jahren 2081 bis 2100 im Vergleich zu der Referenzperiode 1981 bis 2010 (schwarz).

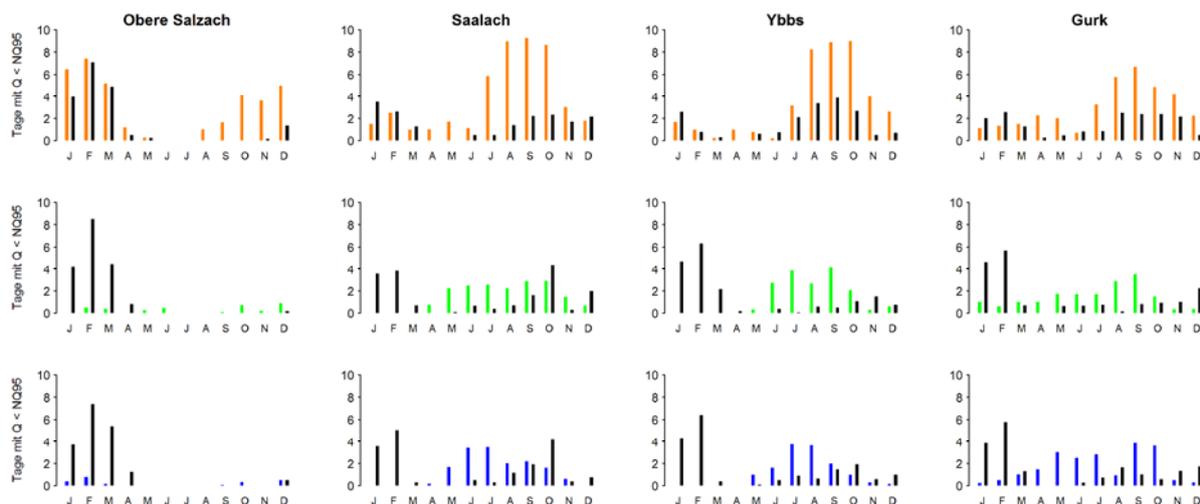


Abb. 6: Anzahl der Tage pro Monat im Zeitraum 2081 bis 2100, an denen NQ_{95} unterschritten wird. Klimaszenarien ALADIN (orange), REMO (grün) und REGCM3 (blau) im Vergleich zu der jeweiligen Referenzperiode 1981 bis 2010 (schwarz).

5. Diskussion

Das hydrologische Modell ist in der Lage, die hydrologischen Reaktionen aller ausgewählten Gebiete wieder zu geben. Dabei wird in der Kalibrierung eine vergleichbare Modellgüte erzielt wie in der Validierung (vgl. Abb. 3, links), was nach BERGSTRÖM (1991) als Indikator dafür angesehen werden kann, dass das Modell nicht überparametrisiert ist. Ebenso weist das Modell eine gute Übereinstimmung bezüglich der Abflussdauerlinien auf. Das Modell und die gefundenen Parametersätze werden daher als geeignet angesehen um Aussagen über zukünftige hydrologische Situationen treffen zu können.

Aufgrund des Temperaturanstiegs, der bei allen RCMs in ähnlichem Ausmaß beobachtet wird, ist mit einem deutlichen Anstieg der potenziellen und damit auch aktuellen Verdunstung zu rechnen. Dieser Verlust von verfügbarem Wasser kann durch Niederschläge nur bedingt kompensiert werden. So zeigen z.B. sowohl REMO als auch REGCM3 im Gebiet der Gurk eine Erhöhung der Niederschläge in der Periode 2081 bis 2100 verglichen mit der Periode 1981 bis 2010 um ca. 33, bzw. 50 mm im Jahr, die mittlere Abflusspende geht allerdings um ca. 18 bzw. 3 mm im Jahr zurück. Im Fall von ALADIN, welches für alle vier Gebiete ein sehr trockenes Klima in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts vorhersagt, führen die verminderten Niederschläge zusammen mit der erhöhten Verdunstung zu einer ausgeprägten Verminderung der Wasserverfügbarkeit. Zeigt ALADIN einen mit den anderen RCMs vergleichbaren Anstieg der potentiellen Verdunstung, so liegen die Werte für die aktuelle Verdunstung meist unterhalb der anderen Klimamodelle. Die Gründe hierfür liegen in häufigerem Auftreten von trockenen Zeitabschnitten, in denen die Bodenfeuchte unter den Wert der halben Feldkapazität fällt und somit die potenzielle zur aktuellen Verdunstung reduziert wird.

Für die Energiewasserwirtschaft sind saisonale Informationen allerdings wertvoller als reine Jahresbilanzen. So kann sich die Verschiebung der Abflussregime bei den alpinen Gebieten in Richtung nival für die Energieerzeugung positiv auswirken, da im Winter höhere Abflüsse zu erwarten sind (Abb. 5) was im Winter zu seltenerem Auftreten von Tagen mit Niedrigwas-

ser ($Q < NQ_{95}$) führt (Abb. 6). Eine Ausnahme hierbei bildet nur das Gebiet der oberen Salzach mit der Realisierung durch ALADIN.

Dem gegenüber stehen die verminderten Sommerabflüsse, welche aus der verfrühten und niedrigeren Schneeschmelze im Vergleich zu heute resultieren. Somit ist in den Sommermonaten auch mit einer häufigeren Unterschreitung des für die Energiewasserwirtschaft kritischen NQ_{95} zu rechnen. Zusätzlich wirkt der Rückgang der Gletscher abflussvermindernd. Dies äußert sich im Falle der oberen Salzach, bei der trotz leicht steigender Niederschläge von REMO und REGCM3 eine Reduktion der Abflüsse auftreten.

Literatur

- BERGSTROM, S. (1976): Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Report RHO 7, S. 1-134. Norrköping.
- BERGSTROM, S. (1991): Principles and Confidence in Hydrological Modelling Nordic Hydrology 22: S. 123-136.
- BMLFUW (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag. Wien.
- CHEN, J. & A. OHMURA (1990): On the influence of Alpine glaciers on runoff. In: LANG, H. & A. MUSY (Hrsg.): Hydrology in Mountainous Regions. 1 - Hydrological Measurements; The Water Cycle. IAHS Publication 193: S. 117-125.
- DÉQUÉ, M., DREVETON, C., BRAUN, A. & D. CARIOLLE (1994): The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modeling. Climate Dynamics 10: 249-266.
- DÉQUÉ, M. (2007): Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change 57: 16-26.
- GIESECKE, J. & E. MONSOYI (2009): Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb, 5. Aufl.: S. 1-892. Springer Verlag. Heidelberg, Dordrecht, London, New York.
- HABERSACK, H.; WAGNER, B.; HAUER, C.; JÄGER, E.; KRAPESCH, G.; STRAHLHOFER, L.; VOLLERITSCH, M.; HOLZAPFEL, P.; SCHMUTZ, S.; SCHINEGGER, R.; PLETTERBAUER, F.; FORMAYER, H.; GERERSDORFER, T.; POSPICHAL, B.; STEINER, D.; KÖBERL, J. & N. ROGLER (2011): DSS_KLIM:EN: Entwicklung eines Decision Support Systems zur Beurteilung des Wechselwirkungen zwischen Klimawandel, Energie aus Wasserkraft und Ökologie. Endbericht. Studie im Auftrag der Kommunalkredit Austria AG, gefördert vom Klima- und Energiefonds. S. 1-132 S. Wien.
- HAIDEN, T., KANN, A., WITTMANN, C., PISTOTNIK, G., BICA, B. & C. GRUBER (2010): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. Weather and Forecasting 26: 166-183.
- HAYLOCK, M.R., HOFSTRA, N., KLEIN TANK, A.M.G., KLONK, E.J., JONES, P.D. & M. NEW (2008): A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 113: D20119.

Zusammenhang zwischen Photovoltaik- und Windstromerzeugung, Kühlwasserbedarf und Wasserkraftnutzung am Neckar

Margret Johst, Benno Rothstein, Sebastian Raiber, Henriette Kammer

Zusammenfassung

In Baden-Württemberg wird die Stromerzeugung durch Photovoltaik und Windkraft massiv ausgebaut. In den sonnenreichen Mittagsstunden können dadurch konventionelle Mittellastkraftwerke gedrosselt werden. Da die Stromerzeugung thermischer Kraftwerke oftmals mit einem Kühlwasserverbrauch einhergeht, resultiert aus einer Kraftwerksdrosselung eine Kühlwassereinsparung, die wiederum einen erhöhten Abfluss nach sich zieht. Mit dem Modell PVW² wurde die eingesparte Kühlwassermenge am energiewirtschaftlich intensiv genutzten Neckar berechnet. Datengrundlage waren der Netzlastverlauf sowie die PV- und Windeinspeisung für das zweite Halbjahr 2011. Abschließend wurde für die Kühlwassereinsparung die erhöhte Stromerzeugung aus Wasserkraft berechnet. Bei niedriger Netzlast und hoher PV- und Windeinspeisung ist der kühlungsbedingte Wasserverlust mit 0,6 m³/s nur halb so hoch wie ohne PV- und Windeinspeisung. Das dadurch erhöhte Wasserkraftpotenzial entspricht der Leistung einer Windkraftanlage.

1. Einführung

1.1 Wassernutzung und (zukünftige) Abflussverhältnisse am Neckar

Der Neckar mit einem dicht bevölkerten und stark industrialisierten Einzugsgebiet von rund 14 000 km² ist einer der am intensivsten genutzten Flüsse Europas (KOBIOUS & BÜRKLE 1996; RP STUTTGART 2009): Er ist von Plochingen abwärts auf einer Strecke von 200 km als Großschiffahrtsstraße ausgebaut. An zahlreichen Laufwasserkraftwerken wird Strom erzeugt. Zudem dient der Neckar als Vorflut für die Abwasserentsorgung: Bei Niedrigwasser besteht der Abfluss zu etwa einem Drittel aus Abwasser, das dem relativ trockenen mittleren Neckarraum über Fernleitungen aus dem Bodensee und dem Donauried zugeführt wird. Schließlich werden große Wassermengen für die Kühlung der thermischen Kraftwerke genutzt.

Niedrigere Zustrommengen und/oder höhere Entnahme- bzw. Verdunstungsmengen könnten in Zukunft zu kritischen Niedrigwassersituationen und ökologisch nicht tragbaren hohen Wassertemperaturen führen, mit denen im Extremfall Wassernutzungsverbote und damit erhebliche wirtschaftliche Schäden verbunden wären. In einem vom Forschungsprogramm „Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS)“ geförderten Projekt werden somit unter Berücksichtigung der Energiewende die Folgen des Klimawandels für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg analysiert. Vor dem Hintergrund des hohen Kühlwasserbedarfs thermischer Kraftwerke und des relativ großen Anteils der Wasserkraftwerke an der regenerativen Stromerzeugung sollen potenziell auftretende Wassernutzungskonkurrenzen untersucht werden.

1.2. Energiewende und Stromerzeugung in Baden-Württemberg

Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz war im Jahr 2000 der Grundstein gelegt für einen massiven Ausbau von Biogas-, Photovoltaik- und Windkraftanlagen. In Baden-Württemberg stieg der Anteil der erneuerbaren Energieträger an der Stromerzeugung von 9% im Jahr 2004 auf 20% im Jahr 2011 (STALA, 2012). Hierbei war der Anstieg der Photovoltaik-Stromerzeugung mit einer Zunahme von 0,2% auf 5,6% am größten, gefolgt von der Biomasse, deren Anteil von 1,5% auf 5,6% stieg. Der Bau von Windkraftanlagen verlief in Baden-Württemberg wegen planungsrechtlicher Restriktionen hingegen schleppend: Die Stromerzeugung durch Windkraft stieg zwischen 2004 und 2011 lediglich von 0,4% auf 1%. Ein im Mai 2012 beschlossenes neues Landesplanungsgesetz dürfte jedoch in den nächsten Jahren zu einem starken Windkraftausbau führen. Das Ausbauziel für Windkraft liegt bei 10%, für Photovoltaik bei 12% (Abbildung 1).

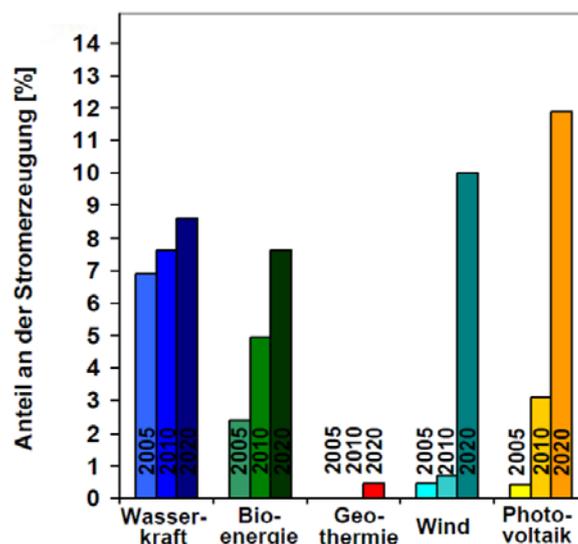


Abb. 1: Ausbauziele der baden-württembergischen Landesregierung für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (STAISS & SCHMIDT 2012, geringfügig verändert)

Unter den konventionellen Kraftwerken in Baden-Württemberg produzieren die beiden Kernkraftwerke Phillipsburg 2 und Neckarwestheim 2 am meisten Strom. Nach Abschaltung der Kernkraftwerke Phillipsburg 1 und Neckarwestheim 1 ist der Anteil der Kernenergie an der baden-württembergischen Stromerzeugung von 50% (Mittelwert für die Jahre 2004 – 2010) auf etwa 40% (geschätzter Wert für 2012) gesunken. Gleichzeitig ist die importierte Strommenge um etwa 10% gestiegen (STALA & UM 2012). Mit Steinkohle wurden im Jahr 2011 rund 26 %, mit Erdgas 5% des insgesamt in Baden-Württemberg produzierten Stroms generiert (STALA 2012).

Entsprechend des hohen Energiebedarfs der Metropolregion Stuttgart sind entlang des Neckars zahlreiche Kraftwerke zu finden: Auf einer Strecke von 86 Flusskilometern zwischen Plochingen und Heilbronn liegen sieben konventionelle Kraftwerksstandorte, die z.T. jeweils mehrere Blöcke vereinen. Den Löwenanteil an Strom liefern die Steinkohlekraftwerke Altbach-Deizisau und Heilbronn sowie das Kernkraftwerke Neckarwestheim II mit einer installierten elektrischen Leistung von insgesamt 3600 MW. Zudem wird zwischen Plochingen und

Mannheim an 29 Laufwasserkraftwerken Strom mit einer Maximalleistung von 102 MW erzeugt.

2. Kühlwasserverbrauch thermischer Kraftwerke

In thermischen Kraftwerken werden zur Kondensation des Abdampfes der Turbinen große Mengen an Kühlwasser benötigt. Gemäß LAWA (1991) werden vier weithin gebräuchliche Kühlverfahren unterschieden, die mit einem unterschiedlichen Wasserverbrauch und Wärmeeintrag ins Gewässer verbunden sind (Tabelle 1): Bei der Durchlaufkühlung wird das kontinuierlich aus dem Fluss entnommene Wasser nach der Kühlung wieder vollständig in den Fluss zurückgeleitet. Die Flusswassererwärmung führt hier zu einer erhöhten Gewässerverdunstung. Zur Reduktion des Wärmeeintrags in das Gewässer kann der Kondensation im Ablauf ein Kühlturm nachgeschaltet werden. Diese sogenannte Ablaufkühlung ist mit einem höheren Wasserverbrauch durch Verdunstung und Tröpfchenauswurf verbunden. Bei der Umlaufkühlung wird das über den Kühlturm gekühlte Wasser wieder dem Kühlwasserkreislauf zugeführt, womit nochmals ein reduzierter Wärmeeintrag in das Gewässer, jedoch auch ein geringerer Kraftwerkswirkungsgrad und bei Verwendung eines Nasskühlturms ein höherer Wasserverbrauch verbunden ist. Durch Einsatz eines Hybridkühlturms anstelle eines Nasskühlturms ist die im Kühlturm verdunstende Wassermenge kleiner, da hier neben der Nasskühlung eine Trockenkühlung erfolgt: Das Kühlwasser wird zunächst auf Rohre verteilt wird, die durch ventilierende Luft gekühlt werden. Der Kühleffekt wird in Hybridkühltürmen somit auch durch Konvektion (Trockenkühlung) und nicht nur durch Verdunstung (Nasskühlung) erreicht.

Die tatsächlichen Verdunstungsmengen hängen von den meteorologischen Bedingungen und dem aktuell gewählten Kühlbetrieb ab. Anlagen mit Umlaufkühlung können beispielsweise im Mischkühlbetrieb gefahren werden, bei dem nur ein Teil des Kühlwassers nach der Kühlung in den Fluss zurück geleitet wird und der andere Teil im Kühlwasserkreislauf verbleibt.

Tab. 1: Mittlerer Wasserverbrauch [m^3/s] durch Verdunstung im Kraftwerk und erhöhter Verdunstung im Gewässer bei verschiedenen Kühlarten bezogen auf 1000 MW_{el} (LAWA, 1991)

Kühlverfahren	Konventionelle Kraftwerke	Kernkraftwerke
Durchlaufkühlung	0,25	0,40
Ablaufkühlung mit Nasskühlturm	0,33	0,52
Umlaufkühlung mit Nasskühlturm	0,37	0,59
Umlaufkühlung mit Hybridkühlturm	0,27	0,44

¹⁾ Annahme: Anteil Trockenkühlung = 30%

3. Zusammenhang zwischen Photovoltaik-/Wind-Stromeinspeisung und dem Betrieb thermischer Kraftwerke

Zum Zusammenhang zwischen Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien und Leistung thermischer Kraftwerke wurde eine Berechnungsmodell (PVW²) konzipiert, mit dem unter bestimmten Annahmen der Kühlwasserbedarf kontinuierlich simuliert werden kann. Als Ein-

gangsdatensätze werden Zeitreihen der Photovoltaik- und Wind-Stromeinspeisung sowie der Netzlast benötigt. Für Biomasse und Wasserkraft werden mittlere Grundlast-Einspeisewerte verwendet. Im PVW² sind zudem die einzelnen Kraftwerkstypen mit deren installierter Leistung und mittlerem Kühlwasserverbrauch zu definieren.

3.1 Berechnungsgrundlagen des PVW²

Die Kühlwassereinsparung entlang eines bestimmten Flussabschnitts wird für eine bestimmte Netzlast folgendermaßen berechnet: Zunächst wird von der Netzlast die Leistung aus Wasserkraft, Biomasse, Wind- und Photovoltaik abgezogen (gemäß EEG hat Strom aus erneuerbaren Energien Einspeisevorrang gegenüber konventionell erzeugtem Strom). Die Residuallast muss durch die konventionellen Kraftwerke gedeckt werden. Stromimporte und -exporte sowie Pumpspeicherkraftwerke werden im PVW² bisher nicht berücksichtigt. Aus der Leistung eines bestimmten thermischen Kraftwerks lässt sich der zugehörige Kühlwasserverbrauch ableiten. Wird ein Kraftwerk mit Kühlwasserbetrieb infolge der Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien gedrosselt oder gar vollständig heruntergefahren, so wird weniger bzw. kein Kühlwasser benötigt. Die Menge der Kühlwassereinsparung ergibt sich aus der Differenz der Kühlwassermengen ohne und mit Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien. Schließlich werden die Kühlwassereinsparungen der Kraftwerke entlang des betrachteten Flussabschnittes addiert.

3.2 Szenarien „Sukzessiver Betrieb“ und „Gleichzeitiger Betrieb“

Die Reihenfolge der Kraftwerke, die in oder außer Betrieb gehen richtet sich nach der sogenannten Merit-Order, in der die Kraftwerke nach ihren Stromerzeugungs-Grenzkosten geordnet sind. Die Grundlast wird im Wesentlichen durch Kraftwerke mit niedrigen Grenzkosten und ständiger Verfügbarkeit (Kernkraftwerke, Wasserkraft und Biomasse) gedeckt. Im unteren Mittellastbereich kommen verstärkt Kohlekraftwerke und im oberen Mittellastbereich Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke (GuD-Kraftwerke) hinzu. In Spitzenlastzeiten werden zudem die kurzfristig anschaltbaren, relativ kostenintensiven Gaskraftwerke hinzugeschaltet. Das Auf- bzw. Abschalten der einzelnen Kraftwerke eines Lastbereichs kann im PVW² mit zwei verschiedenen Ansätzen berechnet werden: Im Ansatz „Sukzessiver Betrieb“ wird der Einsatz eines Kraftwerks durch das Baujahr bestimmt, d.h. die älteren und damit teureren Kraftwerke mit schlechterem Wirkungsgrad gehen erst dann in Betrieb wenn die jüngeren bereits auf Vollast fahren. Umgekehrt werden bei Lastabfall die älteren Kraftwerke als erstes abgeschaltet.

Im Ansatz „Gleichzeitiger Betrieb“ sind alle Kraftwerke eines Lastbereichs gleichzeitig in bzw. außer Betrieb, wobei die Last proportional zur Maximalleistung der einzelnen Kraftwerke aufgeteilt wird. Liegt die Last beispielsweise im unteren Mittellastbereich, so werden die Kernkraftwerke mit Vollast gefahren und die Leistung eines einzelnen Kohlekraftwerks wird dann durch Multiplikation der Maximalleistung dieses Kohlekraftwerks mit dem Anteil der Restlast an der Maximalleistung aller Kohlekraftwerke multipliziert.

4. Fallbeispiele für den Neckar

4.1 Datengrundlage

Das Modell PVW² wurde für den Neckar und für den Zeitraum Juli bis Dezember 2011 angewendet. Für sämtliche Kraftwerke entlang des Neckars wurden, die installierte Leistung, die Feuerungsart sowie die Kühlverfahren recherchiert (BNETZA 2012; STRAUCH 2011; mündliche Mitteilungen) und gemäß Tabelle 1 die entsprechenden mittleren Wasserverbrauchsmengen zugewiesen. Die größten thermischen Neckar-Kraftwerke werden mit Umlaufkühlung betrieben, die Spitzenlastkraftwerke hingegen alle mit Durchlaufkühlung. Die großen Kraftwerke Altbach-Deizisau (HKW1 und KKW2) und Neckarwestheim 2 wurden als erste Kraftwerke in Deutschland mit Hybridkühltürmen ausgestattet. Zudem wird in neueren Kraftwerken durch den Einsatz von Kraft-Wärmekopplung grundsätzlich weniger Kühlwasser benötigt. Die Kraftwerksbetreiber haben sich also bereits an die eingeschränkte Wassernutzungssituation am Neckar angepasst.

Datengrundlage der Netzlast waren stündliche Lastwerte für ganz Deutschland, die auf der Internetseite von ENTSO-E (2012) frei verfügbar sind. Da der Letztverbraucherabsatz des baden-württembergischen Übertragungsnetzbetreibers TransnetBW in den letzten Jahren kontinuierlich bei 13% lag (BNETZA 2008 – 2011), betrug die baden-württembergische Netzlast etwa 13% der gesamtdeutschen Netzlast.

Daten zur Photovoltaik- und Wind-Stromeinspeisung werden über TransnetBW im Internet bereitgestellt (TRANSNETBW 2012). Diese im Viertelstundentakt vorliegenden mittleren Leistungen wurden in Stundenwerte umgewandelt. Die Stromeinspeisung der Biomasse- und Wasserkraftwerke wurde, anders als bei den konventionellen Kraftwerken, nicht die Leistung der einzelnen Kraftwerke betrachtet, sondern es wurde die durchschnittliche stündliche Leistung dieser Kraftwerke aus der tatsächlich produzierten Strommenge berechnet. Die stündliche Durchschnittsleistung im Jahr 2011 betrug für die Wasserkraft 466 MW_{el}, für die Biomasse 360 MW_{el} (STALA 2012).

4.2 Ergebnisse für einen Zeitraum mit hoher PV-Einspeisung

An Werktagen liegt das Maximum der Netzlast in den Mittagsstunden. Um diese Zeit ist normalerweise auch die Photovoltaik-Stromeinspeisung am höchsten, so dass beispielsweise im August 2011 zur Spitzenlastdeckung kein Einsatz von Gasturbinen und GuD-Kraftwerken nötig war. Durch die hohe PV-Einspeisung können die Steinkohlekraftwerke in den Mittagsstunden gedrosselt werden (Abbildung 2). Den Modellberechnungen zufolge würden dadurch bis zu 0,54 m³/s weniger Kühlwasser verdunsten, was einer Kühlwassereinsparung von 39% entspräche. Die höchsten Kühlwassereinsparungen werden dann erreicht, wenn die Netzlast niedrig und die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien hoch ist, wie dies beispielsweise am Sonntag in Abbildung 2 der Fall ist.

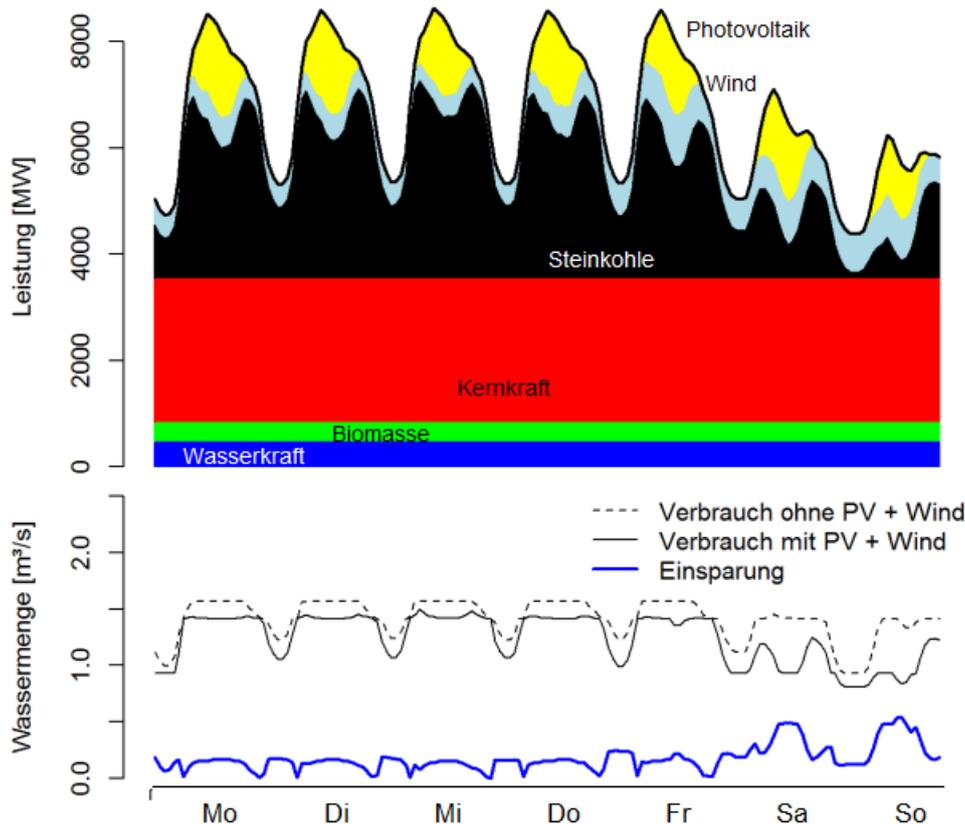


Abb. 2: Stromeinspeisung in Baden-Württemberg (oben) und für die Kühlung verbrauchte bzw. eingesparte Wassermenge am Neckar (unten) im Sommer (Szenario „Sukzessiver Betrieb“).

4.3 Ergebnisse für einen Tag sehr hoher Kühlwassereinsparung

An Sonntagen ist die Netzlast niedriger als an Werktagen und die Maxima liegen nicht nur in den Mittags- sondern auch in den Abendstunden. Am 27.11.2011 war die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien wegen des starken Windes besonders hoch (Abbildung 3). Die Photovoltaik- und Windeinspeisung dieses Tages wurde mit einem typischen Sonntagslastprofil kombiniert. Unter der Annahme, dass sämtliche Steinkohlekraftwerke entlang des Neckars (das Müllheizkraftwerk Stuttgart-Münster eingeschlossen) den Betrieb komplett herunterfahren würden, läge die eingesparte Kühlwassermenge bei $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$. Dies entspräche einer Kühlwassereinsparung von 43%. Durch eine Drosselung des Kernkraftwerks Neckarwestheim 2 könnte am Neckar weiteres Kühlwasser eingespart werden. In den in Abbildung 2 dargestellten Modellergebnissen wurde jedoch lediglich das ältere Kernkraftwerk Philippsburg 2 am Rhein gedrosselt, entsprechend des Szenarios „Sukzessiver Betrieb“.

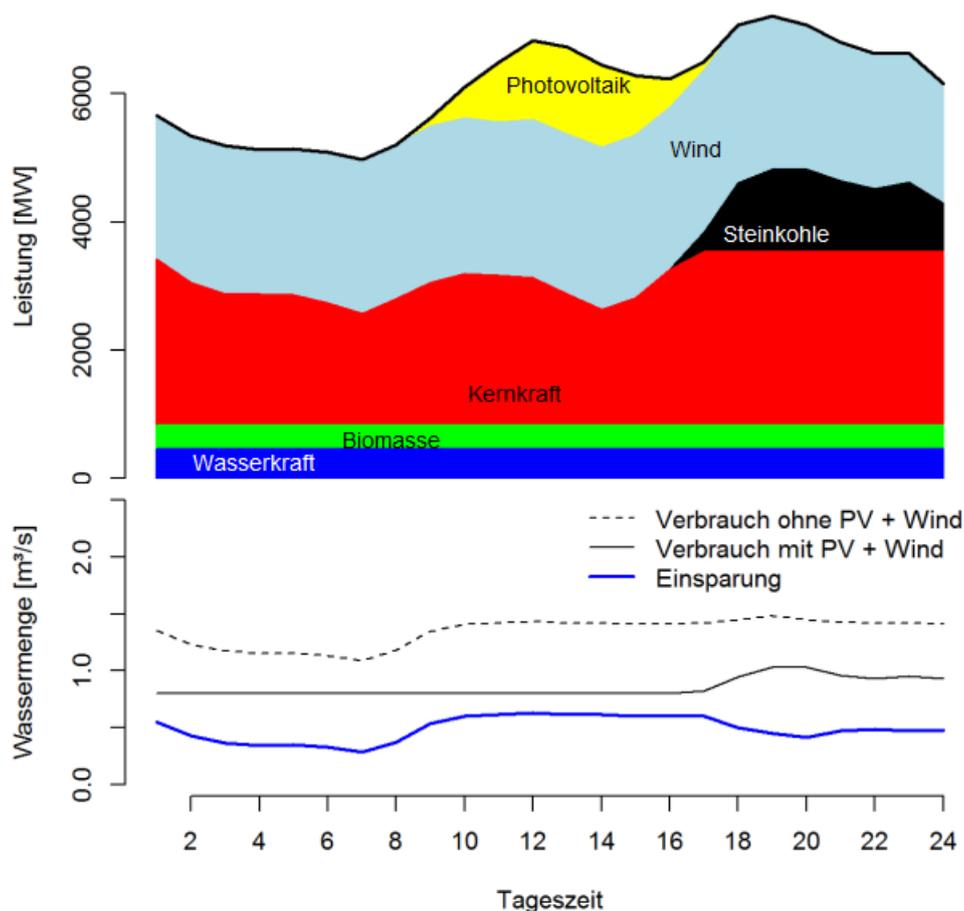


Abb. 3: Stromeinspeisung in Baden-Württemberg (oben) und für die Kühlung verbrauchte bzw. eingesparte Wassermenge am Neckar (unten) für einen Tag mit niedriger Netzlast und hoher Einspeisung aus Wind und Photovoltaik (Szenario „Sukzessiver Betrieb“).

5. Relevanz für die Wasserkraftnutzung

Ist der Durchfluss am Neckar höher, so ist im Normalfall auch die Stromerzeugung an den insgesamt 29 Laufwasserkraftwerken höher. Um den Effekt der Kühlwassereinsparung auf die Wasserkraft-Stromzeugung zu bewerten, wurde das zusätzliche Wasserkraftpotenzial P entsprechend Gleichung (1) berechnet:

$$P = Q \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

mit

Q = erhöhter Durchfluss durch Kühlwassereinsparung [m³/s]

Δh = Fallhöhe [m]

ρ = 1 kg/m³ (Dichte des Wassers)

g = 9,81 m/s² (Erdbeschleunigung)

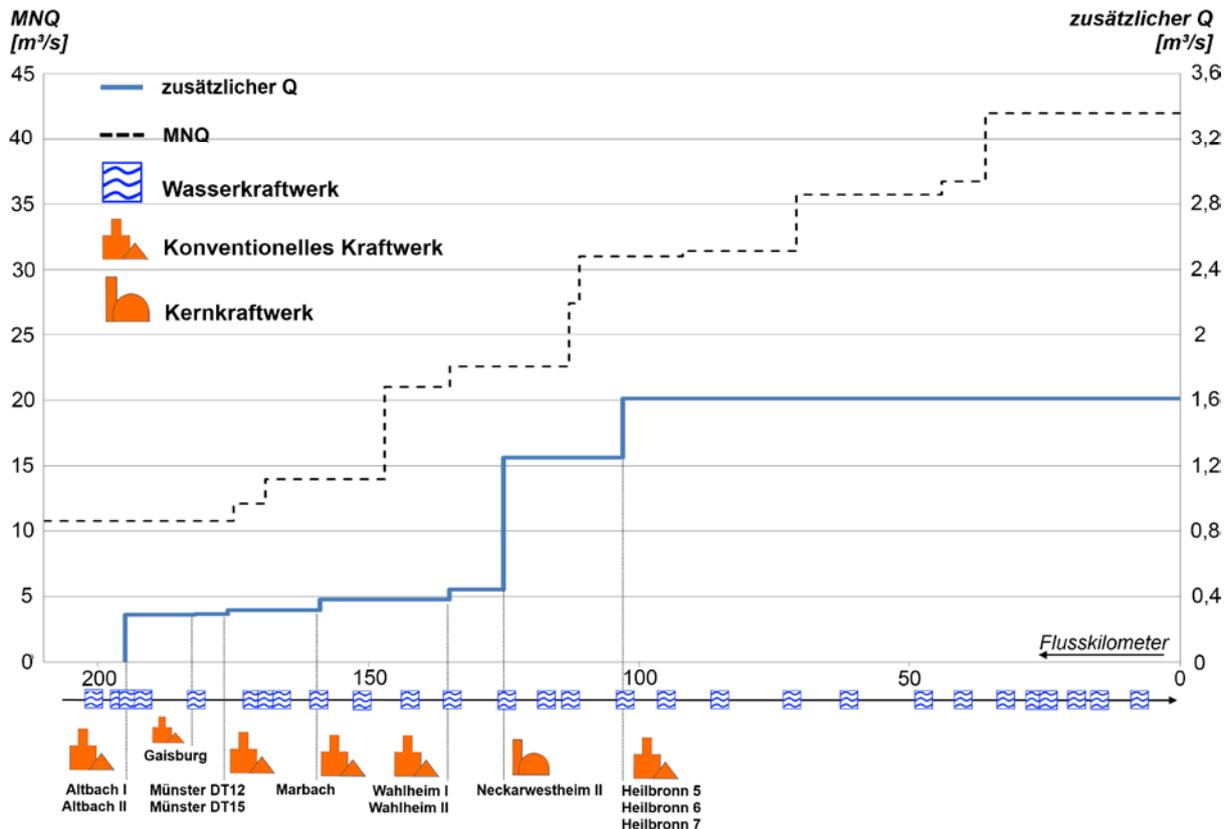


Abb. 4: Lage der Kraftwerke am Neckar; erhöhter Durchfluss Q bei maximaler Kühlwassereinsparung.

Die Fallhöhen aller flussabwärts eines bestimmten thermischen Kraftwerks liegenden Wasserkraftwerke wurden kumuliert. Somit konnte das Potenzial, das durch die Kühlwassereinsparung eines Kraftwerks frei wird, in Abhängigkeit von der Lage am Neckar berechnet werden (Abbildung 4). Durch eine maximale Kühlwassereinsparung (kein Wasserverlust durch Verdunstung) würde sich das Wasserkraftpotenzial um 1380 kW erhöhen. Unter der Annahme, dass der erhöhte Durchfluss an etwa zwei Drittel der Tage im Jahr genutzt werden kann (LfU, 2005) entspricht dies einer zusätzlichen Leistung von rund 8 MWh/a.

6. Diskussion und Ausblick

Durch die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien kann die Leistung der thermischen Kraftwerke gedrosselt werden. Dies ist mit einer geringfügigen Kühlwassereinsparung verbunden, die hinsichtlich der starken Wassernutzungskonkurrenz am Neckar sowie der Gewässerökologie positiv zu bewerten ist. Wegen der bereits wassersparenden Kühlverfahren der großen Kraftwerke sind die Einsparungen jedoch relativ gering, so dass sich das Wasserkraftpotenzial durch die Kühlwassereinsparung nur sehr wenig erhöht: Die Potenzialerhöhung entspricht etwa der Leistung einer Windkraftanlage. Positiv zu bewerten ist die sommerliche Spitzenlastabdeckung durch Photovoltaik, durch die im Sommer im Falle einer Leistungsrosselung der thermischen Kraftwerke auch der Kühlwasser bedingte Wärmeeintrag reduziert wird.

Die Auslastung und Fahrweise von Kraftwerken ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. Der in dieser Untersuchung verwendete Ansatz fährt ausschließlich die Last in Baden-Württemberg nach. In der Realität spielen der Handel an der Strombörse, Stromim- und -exporte sowie die Speicherung von Strom mit Hilfe von Pumpspeicherkraftwerken eine wichtige Rolle. Folglich kann das hier vorgestellte Modell PCWCoolM lediglich als eine grobe Näherung gesehen werden.

Der weitere starke Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien Wind und Photovoltaik wird in Zukunft zu einem deutlich veränderten Kraftwerkspark und Lastmanagement führen. Auch aufgrund der Abschaltung des Kernkraftwerks Neckarwestheim im Jahr 2022 ist künftig eher eine Verringerung des Kühlwasserverbrauchs und Wärmeeintrags in den Neckar zu erwarten. Dies kann als positiver, wenngleich auch sehr geringer Ausgleich für die Klimawandelbedingungen höheren Wassertemperaturen und niedrigeren Sommerabflüssen gesehen werden.

Literatur

- BNETZA (Bundesnetzagentur) (2012): Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur. Stand 04.05.2012. In: http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/Sonderthemen/Kraftwerksliste/VeroeffKraftwerksliste_node.html. (10.06.2012)
- ENTSO-E (2012): Hourly load values for specific country for a specific month. Homepage der European Network of Transmission System Operators for Electricity In: <https://www.entsoe.eu/db-query/consumption/mhlv-a-specific-country-for-a-specific-month/>. (15.06.2012)
- KOBUS, H. & F. BÜRKLE (1996): Konkurrierende Ansprüche an ein Fließgewässer – das Beispiel Neckar. In: Lehn, H., Steiner, M. & Mohr, H. (1996): Wasser – Die elementare Ressource. Arbeitsbericht der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Band 52, S. 86-113.
- LAWA (1991): Grundlagen für die Beurteilung für die Kühlwassereinleitung in Gewässer. 3. Auflage. Erich Schmidt Verlag. Hrsg.: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.
- LfU (2005): Mindestabflüsse in Ausleitungsstrecken. Grundlagen, Ermittlung und Beispiele. Hrsg.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (ehemalige Landesanstalt für Umweltschutz).
- RP STUTTGART (2009): Bewirtschaftungsplan Bearbeitungsgebiet Neckar gemäß EG-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG). Stand: 26. November 2009.
- STALA & UM (Statistisches Landesamt & Umweltministerium Baden-Württemberg) (2012): Energiebericht 2012.
- STALA (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg) (2012): Landesdaten zu Umwelt, Verkehr und Energie. Online unter <http://www.statistik-bw.de/> (letzter Zugriff: 18.02.2013)
- STAISS, F. & M. SCHMIDT (2012): Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg. Pressekonferenz mit dem Umweltminister des Landes Baden-Württemberg Franz Untersteller, Haus des Landtags, Stuttgart 9. Januar 2012. Online abrufbar unter <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/89900/Anlage.pdf?command=downloadContent&filename=Anlage.pdf> (letzter Aufruf: 12.02.2013).

STRAUCH, U. (2011): Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland und die Entwicklung rezenter und zukünftiger Flusswassertemperaturen im Kontext des Klimawandels. Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 106.

TRANSNET-BW (2012): Photovoltaikeinspeisung. Homepage der Transnet BW GmbH in: <http://www.transnetbw.de/kennzahlen/erneuerbare-energien/photovoltaikeinspeisung/> (14.08.2012)

Modellgestützte Analyse von Wasserbilanzen auf der Skala von großen Einzugsgebieten: Wie menschliche Eingriffe die Abflüsse am Nil beeinflussen

Paolo Reggiani, Daniel Wesselkamp, Wil van der Krogt

Zusammenfassung

Durch eine Studie mit dem Wasserbilanzmodell RIBASIM werden in verschiedenen Szenarien der zukünftige Wasserverbrauch und die Wasserverteilung am Hauptarm des Nil simuliert und zusammen mit den entsprechenden Auswirkungen analysiert.

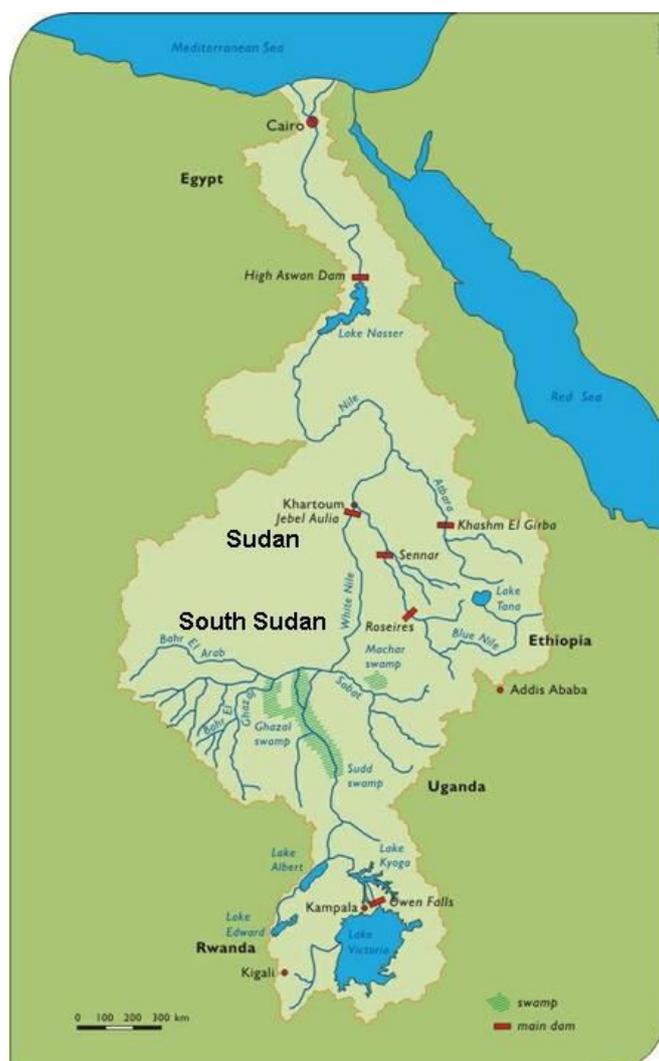


Abb. 1: Karte des Nilbeckens mit den wichtigsten Seitenflüssen, Seen und Stauanlagen (Quelle: ENTRO)

1. Das Nilbecken

Der Nil stellt mit mehr als 6.800 km Länge den längsten Fluss der Erde dar. Sein Einzugsgebiet hat eine Größe von ca. 3 Mio. km² und erstreckt sich über das Gebiet von elf mittel- und ostafrikanischen Staaten, namentlich Burundi, die Demokratische Republik Kongo, Ruanda,

Tansania, Uganda, Kenia, Eritrea, Äthiopien, den Südsudan und den Sudan sowie Ägypten (ASAØ et al. 2000). Diese Staaten umfassen insgesamt 10% der afrikanischen Landmasse und beherbergen ca. 40% der Bevölkerung des Kontinents, von denen wiederum 70% im Nilbecken wohnen (EL-FADEL et al. 2003). Es handelt sich damit um das viertgrößte Einzugsgebiet der Welt (DECONINCK 2009). Der Großteil des Gebietes befindet sich in der semi-ariden bis ariden Klimazone. Der Nil ist durch zwei Hauptströme charakterisiert, den Weißen Nil und den Blauen Nil. Erstgenannter entspringt einer Quelle in Burundi und fließt über Ruanda und Tansania in den Victoriasee. Von dort aus fließt er in nördlicher Richtung durch Uganda in den Südsudan und vereinigt sich schließlich in der sudanesischen Hauptstadt Khartoum mit dem Blauen Nil. Dieser entspringt aus einer Quelle im Äthiopischen Hochland, die den Tanasee speist. Von hier aus fließt der Fluss zunächst nach Süden, später nach Westen-Nordwesten, Richtung Sudan bis Khartoum. Von hier an fließen die beiden Ströme vereint in Richtung Norden und werden einige Kilometer nördlich von Khartoum durch den Atbara ergänzt, der wie der Blaue Nil dem Äthiopischen Hochland entspringt. Kurz hinter der sudanesisch-ägyptischen Grenze wird der Nil durch den Assuan-Hochdamm zum Nassersee aufgestaut, der sowohl in seiner Ausdehnung wie auch seinem Volumen nach zu den größten Stauseen der Erde zählt (ASAØ et al. 2000).

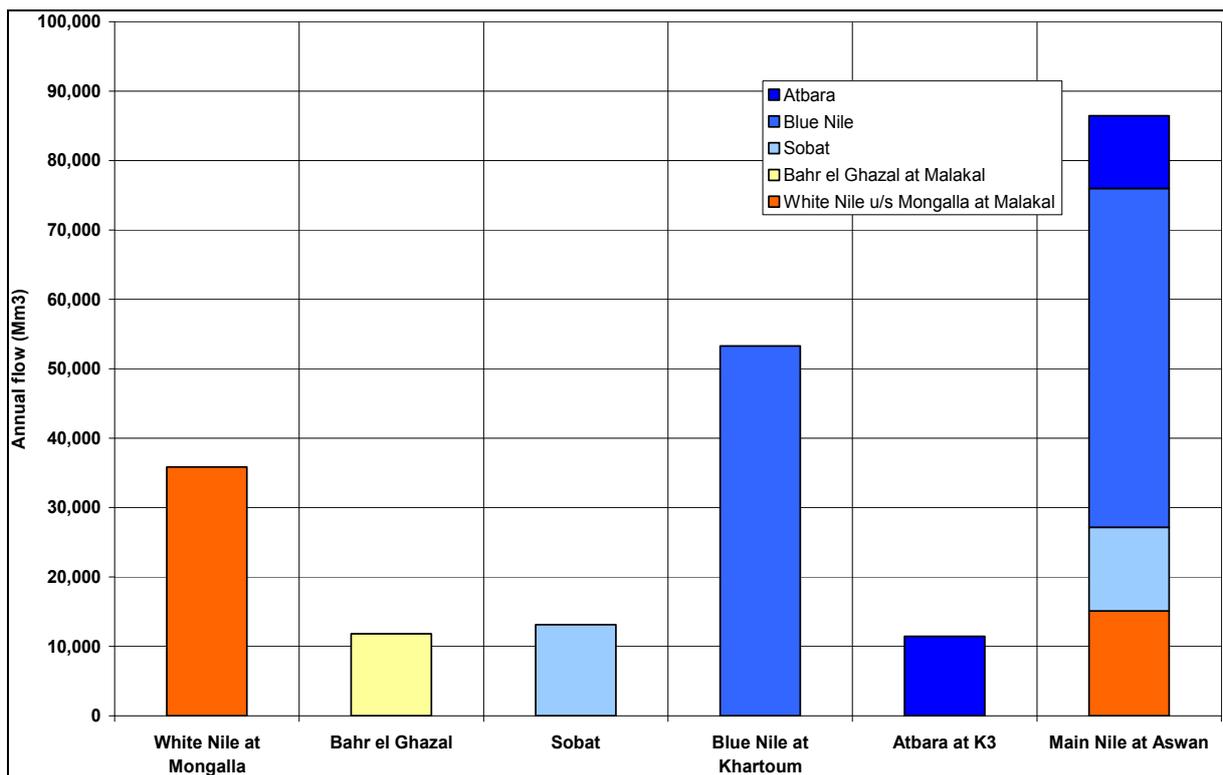


Abb. 2: Verteilung der Nilabflüsse in verschiedenen Teilabschnitten des Flusslaufs (RIBASIM, Deltares)

Nördlich von Kairo bildet der Nil ein großes Delta aus und entwässert in das Mittelmeer. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich stammen 85 % des Abflusses des Nil aus dem Äthiopischen Hochland, einer sehr niederschlagsreichen Region (GOOR et al. 2010; ASAØ et al. 2000). Von diesen 85 % werden 59 % durch den Blauen Nil und 13 % durch den Atbara bereitge-

stellt, sodass der Weiße Nil nur zu 28 % zum Gesamtabfluss beiträgt. Der Weiße Nil passiert im Südsudan die großen Sumpfbereiche des Sudd, die als gigantischer Wasserspeicher dienen und in denen große Teile des herangebrachten Wassers verdunsten. Insgesamt gehen hier 50 % des Abflusses des Victoriasees (27 Mrd. m³/a) an die Atmosphäre verloren. Insbesondere der Abfluss des Blauen Nil zeichnet sich durch große saisonale Schwankungen aus, die maßgeblich von der Variabilität der Niederschläge auf äthiopischem Gebiet abhängen. Außerdem wird der blaue Nil im Sudan durch starken Sedimenttransport aus dem Hochland wesentlich beeinträchtigt. Der durchschnittlich Gesamtabfluss des Nil kann, je nach betrachtetem Zeitraum, mit ca. 80–90 Mrd. m³/a angegeben werden (gemessen im Nassersee) und hat aufgrund verschiedener Faktoren seit Ende des 19. Jahrhunderts stetig abgenommen (EL-FADEL et al. 2003).

Heute bevölkern über 300 Mio. Menschen das Nilbecken, von denen über 50 % in vielfältiger Weise direkt vom Wasser des Nil abhängig sind (UN-WATER 2012). Des Weiteren trägt die stetige wirtschaftliche Entwicklung und Industrialisierung der Länder des Nilbeckens zu einer steigenden Wassernachfrage bei. Insbesondere die Länder des Beckens, die in der ariden Klimazone liegen, sind stark vom Wasser des Nil abhängig: Der Sudan zu 77% und Ägypten zu 97% (DECONINCK 2009). Die immense Bedeutung des Nil für die Region erklärt, warum viele Akteure sehr sensibel auf die das Nilwasser betreffenden Pläne anderer Anrainer reagieren.

2. Wassernutzung des Nil

Um die heutigen Konflikte bezüglich der Wasserressourcen im Nilbecken verstehen zu können ist ein Rückblick in die Historie der Region vonnöten. In der gesamten Besiedlungsgeschichte des Nilbeckens war es vor allem Ägypten, welches das Wasser des Flusses seit jeher genutzt und für sich beansprucht hat. So lässt sich der exklusive Anspruch, den das Land auf die Nutzung des Nilwassers in Teilen bis heute erhebt, zumindest nachvollziehen. Ähnlich exklusive Nutzungsrechte hat Ägyptens südlicher Nachbar, der Sudan, für seine Bevölkerung eingefordert. Auch der Sudan verbindet eine lange Geschichte und eine große Abhängigkeit mit dem Nil. Beide Länder sind bis heute die mit Abstand größten Nutzer der Wasserressourcen des Flusses, sowohl was die Energiegewinnung aus Wasserkraft, als auch die Wasserentnahme zu Bewässerungszwecken betrifft. Der dritte wichtige Akteur im Nilbecken ist Äthiopien, das sich in der Vergangenheit in der Regel an Abkommen über die Verteilung des Nilwassers nicht beteiligt hat oder von den Vertragspartnern ausgeschlossen wurde (vgl. SWAIN 1997).

Tab.1: Die drei größten Wasserverbraucher im Nilbecken, aufgeteilt nach Sektoren (Zahlen nach FAO 2012).

Land	Bevölkerung	Wasserverbrauch						Gesamtwasserverbrauch
		Landwirtschaft		Haushalt		Industrie		
	[Mio]	[km ³ /a]	[%]	[km ³ /a]	[%]	[km ³ /a]	[%]	[km ³ /a]
Ägypten	82,5	59	86	5,3	8	4	6	68,3
Sudan + Südsudan	44,6	26,15	95	1,14	4	0,3	1	27,59
Äthiopien	84,7	5,2	86	0,81	13	0,05	1	6,06

Tabelle 1 zeigt eine Auflistung der wichtigsten Wasserverbraucher im Nilbecken nach den aktuell verfügbaren Zahlen der FAO. Ägypten weist den mit Abstand höchsten Wasserverbrauch aller Anrainer auf, gefolgt vom Sudan mit Südsudan und Äthiopien. Es wird ersichtlich, dass der Verbrauch im Sektor Landwirtschaft in allen drei Ländern besonders hoch ist, in Sudan und Südsudan sogar beinahe den gesamten Wasserverbrauch ausmacht.

In der jüngeren Geschichte hat es zahlreiche Abkommen über die Aufteilung der Wasserressourcen des Nil zwischen einzelnen Staaten gegeben. 1929 wurde ein wichtiges Abkommen zwischen Britannien und Ägypten geschlossen, das letzterem ein Monopol über die Nilwasser-Nutzung zusprach (48 Mrd. m³/a) und nur einen Bruchteil von 4 Mrd. m³/a dem Sudan zusicherte. 32 Mrd. m³/a blieben unverteilt. 1959 wurde der Vertrag über die vollständige Nutzung des Nilwassers (Agreement for the full utilization of the Nile water) ausgehandelt. Dabei wurde der Abfluss des Nil am Assuan-Damm mit 84 Mrd. m³/a neu festgelegt, wovon 10 Mrd. m³/a als Verdunstungsverluste abgezogen, 55,5 Mrd. m³/a (bzw. 75 %) Ägypten und 18,5 Mrd. m³/a (bzw. 15 %) dem Sudan zugesprochen wurden.

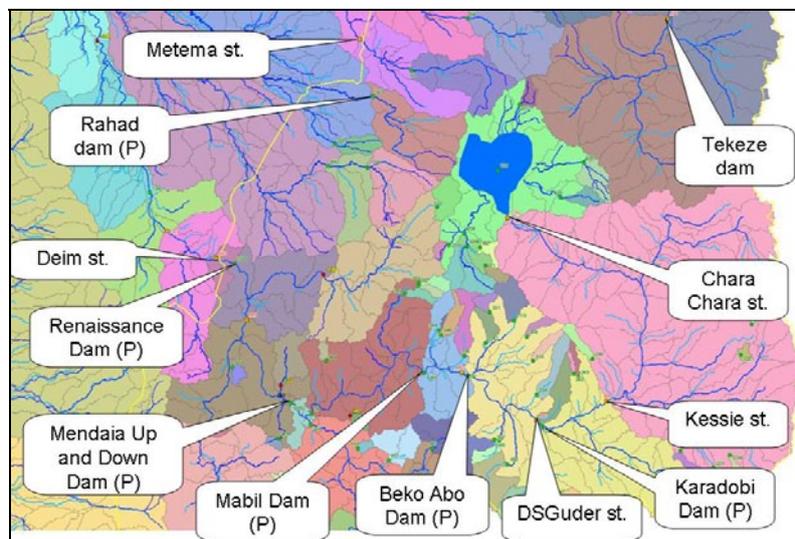


Abb. 3: Unterteilung des Blauen Nilbeckens in Untereinzugsgebiete. Bestehende und potentielle Stauanlagen (P) sind sichtbar gemacht. (Quelle: ENTRO)

Das aktuelle Spannungsfeld im Nilbecken ist durch diese historisch ungleiche Verteilung der Wasserressourcen geprägt. Treibender Faktor ist hierbei die anhaltende Abnahme der pro Kopf verfügbaren Wassermenge in den Anrainerstaaten. Hierfür ist zum einen der Klimawandel verantwortlich, der zu einer Veränderung der Niederschlagsmuster in den Quellgebieten führt. So geht zum Beispiel ELHANCE (1999) von einem Rückgang des durchschnittlichen Jahresabflusses des Nil und seiner Nebenflüsse um 25 % aus. Der wichtigste Faktor, der sich für die Wasserknappheit verantwortlich zeigt, ist allerdings der teils immense Bevölkerungszuwachs in der Region. UN-WATER (2012) geht für Ägypten, den Sudan mit Südsudan und Äthiopien von einem Bevölkerungswachstum von 50 % in den nächsten 20 Jahren aus. Weitere Ursachen einer zunehmenden Wasserknappheit sind der Trend der Urbanisierung und eine zunehmende positive wirtschaftliche Entwicklung der oben genannten Länder in Kombination mit der einhergehenden Industrialisierung. Es wird demnach angenommen,

dass die verfügbare Wassermenge in Ägypten bis 2017 auf $630 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{p})$ fallen wird. 2025 soll den Ägyptern sogar nur noch die Hälfte der Wassermenge zu Verfügung stehen, welche 1990 für sie bereitstand (WORLD BANK 2009). Inzwischen fordert auch Äthiopien eine erheblich größere Beteiligung an der Nutzung des Flusswassers, nicht zuletzt weil knapp 85 % des Wassers des Nil aus Äthiopien stammen und im Äthiopischen Hochland Potentiale zur Nutzung von Wasserkraft und Bewässerungsfeldbau vorhanden sind. Stromabwärts allerdings sehen dadurch vor allem die Sudanesen und die Ägypter ihren lebenswichtigen Zugang zur Ressource Nilwasser gefährdet, die insbesondere für die Bewässerung in der Landwirtschaft eingesetzt wird (Tabelle 1).

3. Errichtung von Stauanlagen am Blauen Nil

Derzeit sind 5 Stauseen und entsprechende Wasserkraftwerken am Blauen Nil auf Äthiopischem Gebiet geplant. Der größte davon ist der Millennium-Damm (auch Renaissance-Damm genannt), mit einem Fassungsvermögen von 65 km^3 , der am Blauen Nil an der Grenze von Äthiopien errichtet wird. Das Stauwerk dient vor allem der Erzeugung von 6000 MW Energie, hat aber einen stark regulierenden Effekt auf den Abfluss des Nil jenseits der Grenze und reduziert die starke Sedimentzufuhr flussabwärts. Dabei muss berücksichtigt werden, dass durch die Seeoberfläche die Verdunstung begünstigt wird und daher durch die Anwesenheit von Stauanlagen im System, neben den positiven Effekten, der direkte Wasserverlust steigt. Laut verschiedenen Entwürfen sind zusätzlich weitere Stauanlagen flussaufwärts geplant. Dies sind der Obere bzw. Untere Mendaia Damm, der Mabil-, der Beko Abo- und der Kardobi-Damm, wobei für diesen Anlagen noch keine definitiven Finanzierungs- und Ausführungsprojekte bestehen. In der anschließend beschriebenen Modellstudie werden verschiedenen Szenarien durchgespielt, die sich durch sich durch Konfigurationen und Anordnung der Staustufen unterscheiden.

4. Anwendung des Modells RIBASIM

Im Rahmen eines Projektes für das Eastern Nile Regional Office (ENTRO) wird gegenwärtig durch Deltares eine Wasserbilanzstudie für das gesamte Nilbecken, mit Schwerpunkt auf den östlichen Nil ausgeführt. Zweck der Studie ist es, die Effekte von zu errichtenden Stauanlagen am Blauen Nil auf die Wasserzufuhr für den Sudan und Ägypten zu simulieren. RIBASIM ist ein Wasserbilanzmodell, das die Verteilung von Wassermengen aufgrund von Zufuhr und Nachfrage ermittelt. Das Modell arbeitet mit monatlichen Zeitschritten und beschreibt die Evolution des Systems als Sequenz von sukzessiven, stationären Gleichgewichtszuständen. Das gesamte Einzugsgebiet wird als ein Netz von Knotenpunkten beschrieben, die durch Flusselemente untereinander verbunden sind. Die Knoten haben verschiedene Bedeutung und repräsentieren Einspeisungen oder Zusammenflüsse von Flussstrecken. Die Knoten gehören zu drei funktionellen Kategorien i) Einspeisungen, ii) Entnahmen und iii) Speicher. Einspeisungen sind alle jene Punkte, an denen dem System Wasser zugeführt wird, wie zum Beispiel Zuflüsse aus den einzelnen Untereinzugsgebieten oder Einspeisungen aus dem Grundwassersystem. Entnahmen sind alle jene Knoten, in denen Wasser aus dem Flussnetzwerk abgeleitet wird. Hierbei handelt es sich entweder um Ableitungen von Oberflächenwasser durch Kanäle, um Bewässerungsgebiete oder andere Ver-

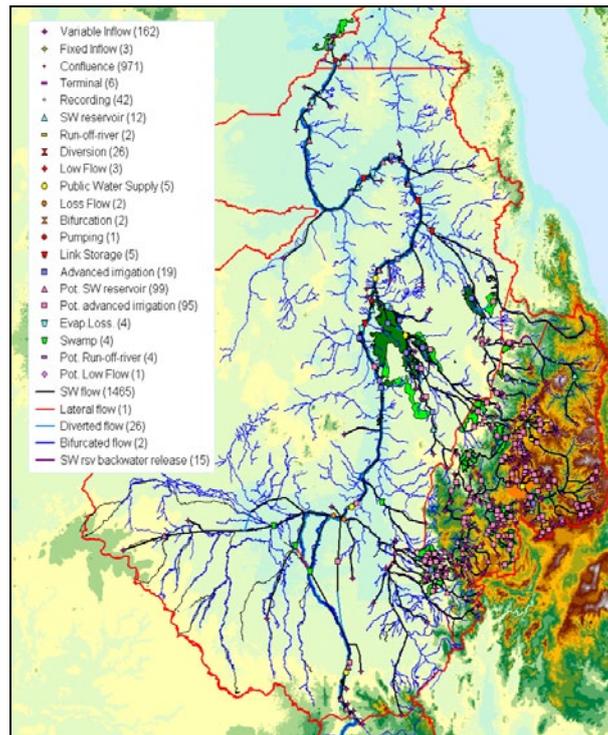


Abb. 4: Schematisierung des Nil und seiner Nebenflüsse als ein Netzwerk von Knoten und Flusselementen. (Quelle: ENTRO)

braucher wie Wasserkraftwerke, Siedlungen oder Industrieanlagen. Den Bewässerungsgebieten kommt im Falle des Nilbeckens eine besondere Bedeutung zu, da durch das Bevölkerungswachstum die Anbauflächen zunehmen und dadurch der Wasserverbrauch proportional steigt. Die Nutzpflanzen geben durch Verdunstung eine signifikante Menge an Feuchtigkeit direkt an die Atmosphäre ab, die dann flussabwärts fehlt. Die Speicherknoten sind wiederum Einheiten, in denen Wasser entweder auf natürliche oder künstliche Art gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt an das System wieder abgegeben wird. Speicher können natürlicher Art sein, wie etwa Seen, Sümpfe oder Moore oder künstliche Stauanlagen. Alle Speicherknoten haben eine bestimmte Speicherkapazität und eine Oberfläche als Eigenschaft, die sich als Funktion der gespeicherten Wassermenge in der Zeit verändern kann. Durch die Fluktuationen der freien Wasseroberfläche steigt oder sinkt die Verdunstung entsprechend. Im Falle von künstlichen Speichern, die mehreren Zwecken wie Stromerzeugung, Hochwasserregulierung und Bewässerung gleichzeitig dienen, wird das Speichervolumen durch Bewirtschaftungsregeln an die jeweiligen Ansprüche des Systems angepasst. Diese sind entsprechend im System berücksichtigt.

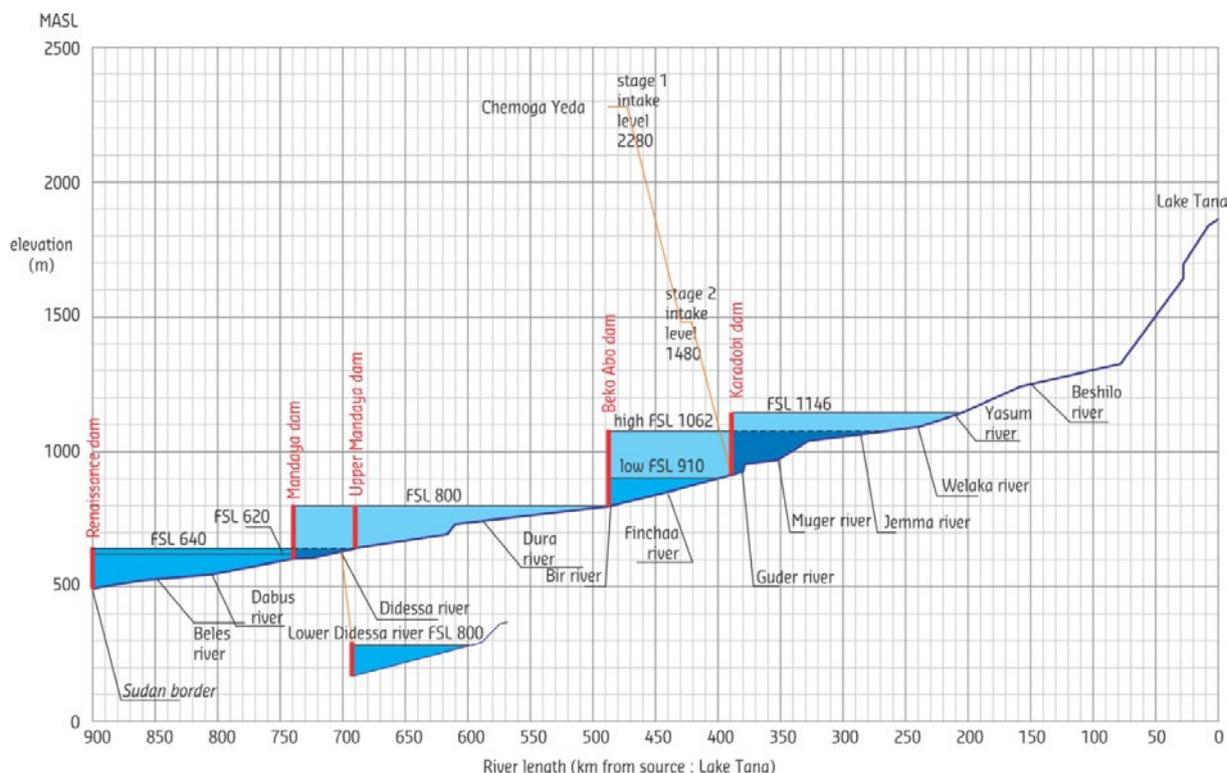


Abb. 5: Die die geplanten Staustufen am Blauen Nil (Quelle: Norplan-Norconsult)

Die Einspeisungen in das RIBASIM Modellnetz erfolgt durch gemessene Abflüsse. In jahrelanger Arbeit wurden Daten über Abflüsse der Untereinzugsgebiete gesammelt und in das Modell eingespeist. Die aktuelle Situation wurde im Modell erfasst und simulierte mittlere Monatsabflüsse an Kontrollschnittstellen mit Messungen validiert. Einige der wichtigsten Kontrollpunkte zur Modelleichung im Nil sind der Einfluss in den Nasseree (Sudan), der Messpunkt Mongalla am Weißen Nil (Süd-Sudan) und jener am Blauen Nil bei Karthoum.

5. Szenarien

Mittels RIBASIM wurden 8 Szenarien simuliert. Dies sind der Basisfall (S000), der die gegenwärtige Situation (2012) darstellt, weiters der Blaue Nil mit dem Millennium-Damm (S001) und 6 zusätzliche Szenarien (S002–S007) mit verschiedenen Kombinationen von Staustufen (Abbildung 5) am Blauen Nil. Die Beschreibung der 8 Szenario-Konfigurationen ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Ein Verifizierungsfall der ausschließlich der Kalibrierung von RIBASIM dient, ist ebenfalls aufgelistet. Die Szenarien unterscheiden sich auch durch Sozioökonomische Entwicklung (D000 gegenwärtig und D001 nach der Errichtung der Staustufen), Landbaunachfrage (A000, die aktuelle landwirtschaftliche Nutzung and A001, eine intensive landwirtschaftliche Nutzung), Klima (C000, C301, C302, C5021, C502 die sich durch höhere oder niedrigere zukünftige Niederschläge und Verdunstung unterscheiden) sowie Bewirtschaftungskriterien (M000–M005) die durch die jeweilige Staustufenkonfiguration bestimmt werden.

Tab. 2: Die verschiedenen Konfigurationen der Staustufen am Blauen Nil, die zur Szenario-berechnung herangezogen werden.

Cascade name	Description
Renaissance	<ul style="list-style-type: none"> • Renaissance640 • Beles dam + Dinder and Beles irr. • High Roseires + Kenana irr.
A	<ul style="list-style-type: none"> • Abay dams cascade A of Karadobi + Beko Abo Low + Mandaya + Renaissance620. • Beles dam + Dinder and Beles irr. • High Roseires + Kenana irr
B	<ul style="list-style-type: none"> • Abay dams cascade B of Karadobi – Beko Abo Low - Madaya Upper - Renaissance dam640 • Beles dam + Dinder and Beles irr. • High Roseires + Kenana irr
C	<ul style="list-style-type: none"> • Abay dams cascade C of Beko Abo High (1062) + Mandaya + Renaissance620 • Beles dam + Dinder and Beles irr. • High Roseires + Kenana irr
D	<ul style="list-style-type: none"> • Abay dams cascade D of Beko Abo High (1062) + Mandaya Upper + Renaissance640 • Beles dam + Dinder and Beles irr. • High Roseires + Kenana irr

Szenario S000-S005 weisen alle dieselbe Landbaunachfrage auf. S006 entspricht S001 mit einer erhöhten Landbaunachfrage, und verändertem Klima. Szenario S007 entspricht Szenario S001 mit einer um 84% erhöhten Nachfrage durch entsprechende Erweiterung der Anbauflächen im Sudan gegenüber S001. Die Simulationen zeigen, dass für die Szenarien S000–S0006 alle Wasserangebotsprobleme im Sudan durch den Bau des Renaissance-Damms gelöst werden. Szenario S0007 zeigt auf, dass bei Auftreten einer erhöhten Nachfrage im Sudan das Angebot dort noch immer erfüllt wird, mit Ausnahme einiger lokal auftretender Engpässe.

Tab. 3: Die verschiedenen Szenarien, einschließlich eines Verifizierungsfalles der ausschließlich der Modelleichung dient.

Case ID	ID Climate	ID Socio-econ.	ID Agr. sect.	ID Man. Action
Verification case	C000	D000	A000	M502
S000 : Base case	C000	D000	A000	M000
S001 : Renaissance	C000	D001	A000	M001
S002 : Abay Cascade A	C000	D001	A000	M002
S003 : Abay Cascade B	C000	D001	A000	M003
S004 : Abay Cascade C	C000	D001	A000	M004
S005 : Abay Cascade D	C000	D001	A000	M005
S006 : Renaissance High Demand	C502	D001	A001	M001
S007 : Like S001 + crop intensity of Sudan irrigation area doubled (184%)	C000	D001	A000	M001 + updated crop plan data

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass das Bewässerungspotential im Sudan durch die Errichtung der Stauanlagen am Blauen Nil im Prinzip wesentlich größer ist als bisher angenommen. Die Folge ist hierbei aber, dass weniger Wasser den Nassersee erreicht. Das hat zweierlei Konsequenzen: Erstens nimmt das Stromerzeugungspotential für Ägypten ab, welches dadurch auf Stromimporte angewiesen ist, gleichzeitig allerdings auch der Wasserverlust durch einen mittleren niedrigeren Spiegel am Nassersee, dank dem sich die Seeoberfläche und damit die Verdunstung reduziert. Des Weiteren verringert sich auch das Bewässerungspotential, wodurch Ägypten noch stärker von Lebensmittelimporten abhängig wird wie bisher. Abbildung 6 zeigt die Abflüsse, die in den Szenarien S000-S0006 den Nassersee erreichen. Es wird deutlich, dass der Bau von Staustufen am Blauen Nil diese stark beeinträchtigen. Abbildung 7 zeigt die Abflüsse bei El Deim, die erste Messtation im Sudan, flussabwärts von der Grenze mit Äthiopien und des zu errichtenden Millennium-Damms. Hier ist eine sehr starke Regulierung der Abflüsse über das gesamte Jahr hin deutlich zu erkennen, welche mit der Anzahl an Staustufen zunimmt. Das Ergebnis ist ein ausgeglichener Zufluss für den Sudan, der das dortige Bewässerungspotential erheblich steigert und die Sedimentzufuhr entsprechend reduziert.

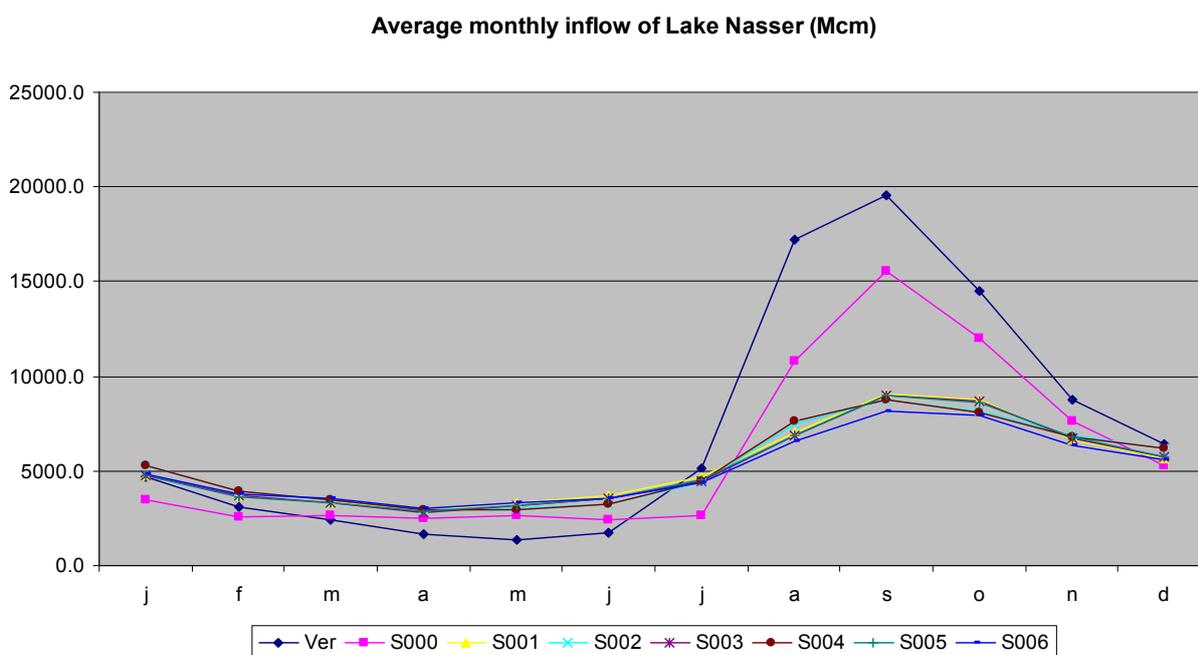


Abb. 6: Die Abflüsse am Eingang des Nassersees im Basisszenario (S000) und nach der Errichtung der Staustufen in Äthiopien. Szenario S000 enthält nur den Millennium-Damm.

Abbildung 8 zeigt die gesamte Stromerzeugung am Blauen Nil, wobei diese je nach Staustufenkonfiguration variiert. Abbildung 9 zeigt den Wasserverbrauch im Sudan für 8 Szenarien, wobei sich im Szenario 0007 der erhöhte Verbrauch, um die Grenzen des Bewässerungspotentials im Sudan zu erkunden, deutlich hervorhebt.

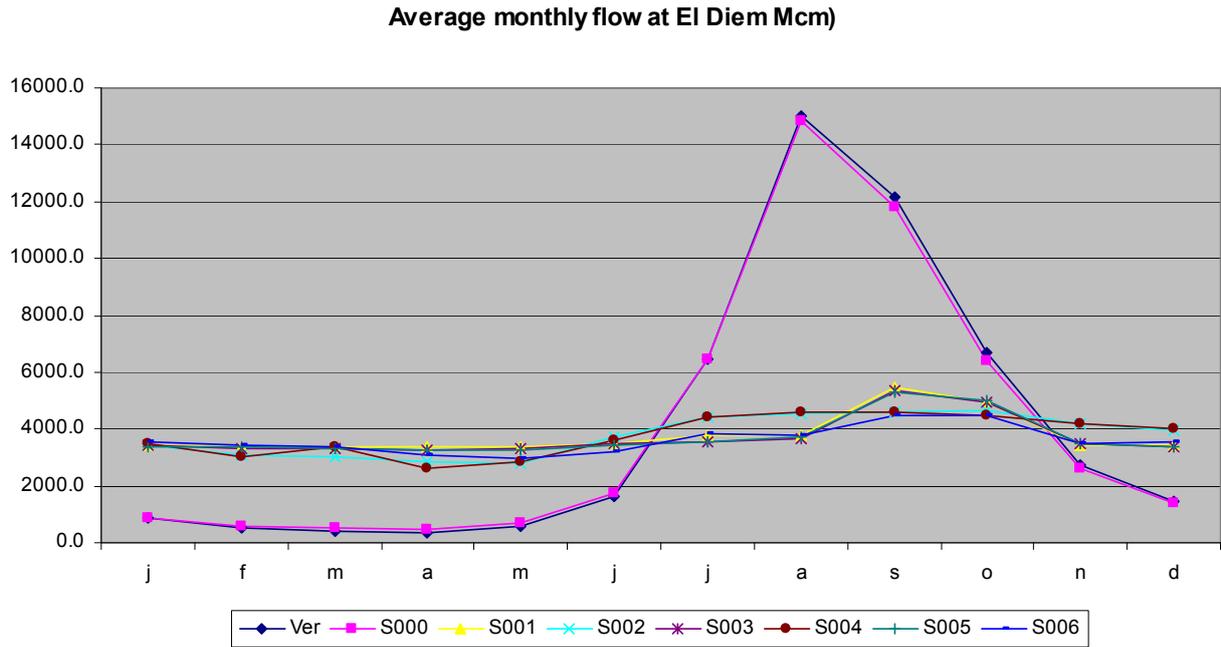


Abb. 7: Die Abflüsse am Eingang des Millennium-Damms zwischen dem Sudan und Äthiopien. S000 ist das gegenwärtige Basisszenario vor der Errichtung der Staustufen in Äthiopien. Szenario S001 Enthält nur den Millennium-Damm, die anderen Szenarien alle zusätzlichen zu errichtenden Staustufen.

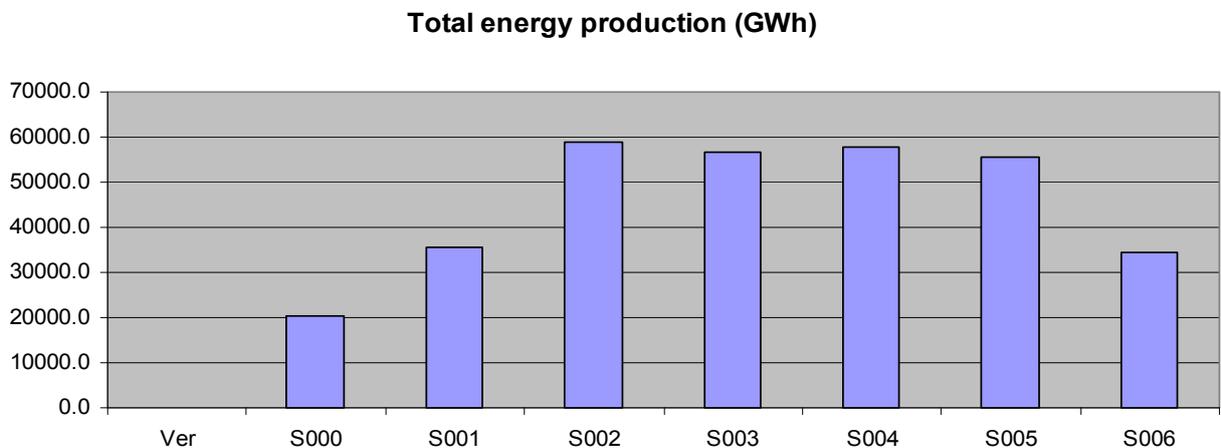


Abb. 8: Energieerzeugung Äthiopiens für die verschiedenen Szenarien.

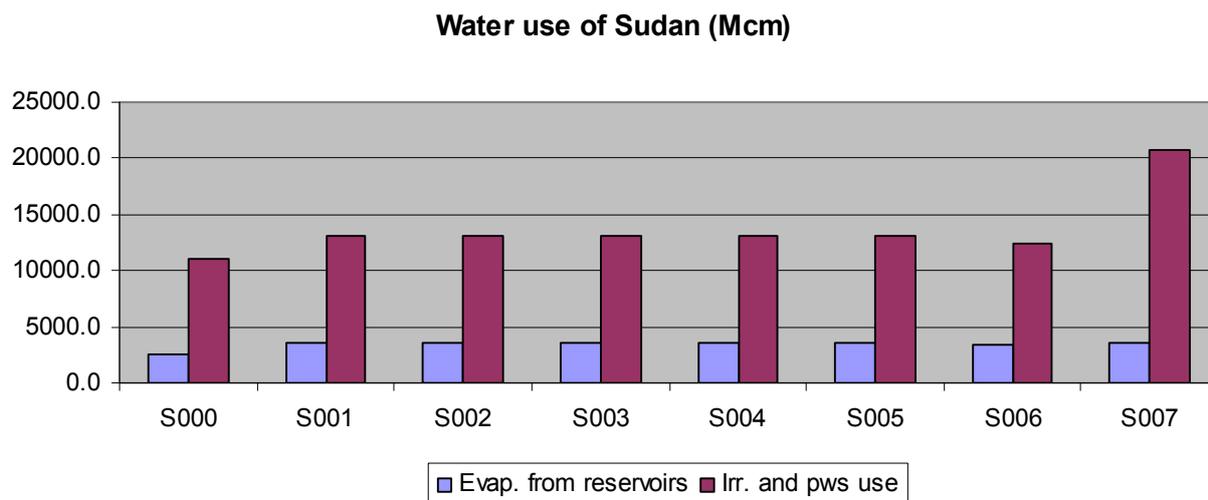


Abb. 9: Wasserverbrauch des Sudan für die verschiedenen Szenarien, wobei im Szenario S0007 die Nachfrage für Landbaubewässerung um 84% gegenüber S000–S006 erhöht worden ist.

6. Abschließende Bemerkungen

Die Modellsimulationen zeigen, dass von einer Umsetzung der geplanten großen Staustufenprojekte (Millennium, Karadobi, Beko-Abo, Mandaya) im Äthiopischen Hochland die Länder Sudan, Äthiopien und Ägypten im Prinzip profitieren würden (wobei ökologische Aspekte in dieser Studie außer Betracht gelassen worden sind). Dies insbesondere im Falle einer freien Handelszone innerhalb einer internationalen Kooperation zwischen den Anrainerstaaten, in deren Rahmen Energie, Agrar- und Industrieprodukte untereinander ausgetauscht und ergänzt werden. Saisonale Schwankungen am Nassersee durch die Stauung des Wassers des Blauen Nil würden signifikant abnehmen. Ein Problem bei der Errichtung der Staustufen ist eine zeitweise Abnahme der Zufuhr nach Ägypten während einer mehrjährigen Periode, die erforderlich ist um die Stauseen zu füllen. Die Hauptnutznießer dieser Maßnahmen bleiben Äthiopien, welches seine Bereitstellung von Energie durch Wasserkraft um ein Vielfaches steigern könnte und der Sudan, der sein landwirtschaftliches Potential signifikant steigern könnte. Ein explosives Anwachsen der Bevölkerung im Sudan würde diese Vorteile allerdings wieder neutralisieren. Ägyptens Stromproduktion würde durch die Maßnahmen hingegen fallen, ein Nachteil der aber durch Importe aus Äthiopien ausgeglichen werden könnte. In der Praxis ist jedoch anzunehmen, dass Ägypten auf eine autonome Energiepolitik besteht und auf eine Abhängigkeit von Äthiopien verzichtet, was eine länderübergreifende Zusammenarbeit in Nilbecken erschwert.

Literaturverzeichnis

- ASAØ, T., WORGU, S. & M. ESPINOSA (2000): Project 2: Water scarcity and potential conflict in the Nile River Basin.- Lumes 1999-2000, 14 S.; Lund University
- DECONINCK, S. (2009): Security as a threat to development: the geopolitics of the water scarcity in the Nile River basin.- Focus Paper: 14 S.; Royal High Institute for Defence, Brussels- Belgium

- EL-FADEL, M., EL-SAYEGH, Y., EL-FADL, K. & D. KHORBOTLY (2003): The Nile River Basin: A Case Study in Surface Water Conflict Resolution.- Journal of Natural Resources & Life Science Education 32. S. 107-117
- ELHANCE, P.A. (1999): Hydropolitics in the 3rd World.- United States Institute of Peace Press, Washington DC.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO) (2012): FAO Statistics, AQUASTAT.- URL: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>>. Aufgerufen am 04.01.2013
- GOOR, Q., HALLEUX, C., MOHAMED, Y. & A. TILMANT (2010): Optimal operation of a multipurpose multi-reservoir system in the Eastern Nile River Basin.- Hydrology and Earth System Science 7. S. 4331-4369
- SWAIN, A. (1997): Ethiopia, the Sudan, and Egypt: The Nile River Dispute.- The Journal of Modern Africa Studies 35/04. S. 675-694
- UN-WATER (2012): 4th UN World Water Development Report: Managing Water under Uncertainty and Risk.- United Nations World Water Assessment Programme
- WORLD BANK (2009): World Development Indicators - URL: <<http://go.worldbank.org/B53SONGPA0>>. Aufgerufen am 02.01.2013

Das Modul Hydrologie (HYDMOD) zur Beurteilung des Natürlichkeitsgrades des Abflussregimes: Methode, Hilfsmittel, hydrologische sowie wasserwirtschaftliche Grundlagen

Martin Pfandler

Zusammenfassung

Das Modul Hydrologie (HYDMOD) ist eine Methode zur Beschreibung, Beurteilung und Klassierung der Auswirkungen von wasserwirtschaftlichen Eingriffen auf das Abflussregime. Ausgangspunkt der Methode – angesiedelt an der Schnittstelle zwischen Hydrologie und aquatischer Ökologie – ist die Identifizierung menschlicher Eingriffe, welche das Abflussregime zu verändern vermögen. Für das untersuchte Einzugsgebiet wird ein Inventar solcher Eingriffe erstellt. In der Schweiz stammen die relevanten Eingriffe grossteils aus den Bereichen Siedlungswasserwirtschaft und Wasserkraftnutzung. Die Auswirkungen der Eingriffe, d.h. die Veränderungen des Abflussregimes werden anhand von neun Indikatoren beurteilt. Diese decken die hydro-ökologisch relevanten Aspekte des Niederwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserregimes ab und beinhalten auch die Kurzzeit-Phänomene Schwall-Sunk und Spülungen. Auf diesen Indikatoren basierend werden die Veränderungen des Abflussregimes quantifiziert und in ein fünf-klassiges Bewertungsschema übersetzt. Als Ergebnis resultiert eine kartographische Darstellung über den hydrologischen Zustand des Gewässersystems eines Einzugsgebietes mit den einzelnen Gewässerabschnitten als Bezugsobjekte.

Neben der eigentlichen Methode wurden zur Erleichterung der Anwendung eine Reihe von Hilfsmitteln und Grundlagen entwickelt. Das beinhaltet ein elektronisches Hilfsprogramm (HYMDOD-FIT), Methoden zur Grobabschätzung der benötigten hydrologischen Kenngrössen, Schweiz-weite Datensätze zu hydrologischen Kenngrössen sowie ein Web-basiertes Tool zur Bestimmung von Einzugsgebieten und deren Charakterisierung (als Funktionalitätserweiterung des Gewässerinformationssystems der Schweiz GEWISS <http://gewiss.admin.ch>).

1. Einleitung

Der ökologische Zustand der Fliessgewässer wird von vielfältigen menschlichen Nutzungen beeinflusst. Ganz allgemein können diese den Einflussfaktoren Qualität des Wassers, Morphologie und Raumverhältnisse der Gewässer sowie Wasserführung zugeordnet werden. Entsprechend wurden im Leitbild Fliessgewässer (BUWAL und BWG 2003) auf der Basis der geltenden Gesetzgebung die Entwicklungsziele «ausreichende Wasserqualität», «ausreichender Gewässerraum» und «ausreichende Wasserführung» formuliert. Diese drei abiotischen Einflussfaktoren bestimmen die Bedingungen für die biologischen Verhältnisse. Abiotische Faktoren und biologische Merkmale ergeben ein umfassendes Bild des ökologischen Gewässerzustandes (vgl. Abbildung 1).

Das Modul-Stufen-Konzept (BUWAL, 1998) – gemeinsames Vorhaben des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), der Eawag (das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs) und kantonaler Gewässerschutzfachstellen, vgl. www.modul-stufen-konzept.ch – hat schweizweit standardisierte Methoden zur Zustandsbewertung der Fliessgewässer zum Ziel. Neben den bestehenden Modulen, welche die Bereiche Biologie, Morphologie und Chemie abdecken, fehlte für ein umfassendes Bild des Gewässerzustandes lange Zeit ein Modul, welches die Wasserführung resp. die Hydrologie beinhaltet.

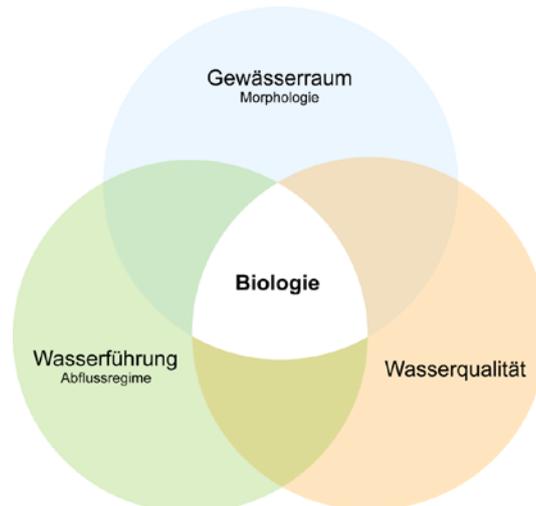


Abb. 1: Gesamtheitliche Gewässerbeurteilung als Zusammenschau von abiotischen Einflussfaktoren und biotischen Merkmalen.

Während die stoffliche Belastung durch Abwasser und diffuse Einträge in den letzten Jahrzehnten dank grossen Anstrengungen im Gewässerschutz deutlich reduziert werden konnte, ist die Morphologie vieler Schweizer Fliessgewässer nach wie vor stark beeinträchtigt. Zudem wird die Wasserführung zukünftig durch die aus der Klima- und Energiepolitik resultierende Förderung der Wasserkraft weiter zunehmendem Druck ausgesetzt.

Das Modul Hydrologie-Abflussregime auf Stufe F (kurz HYDMOD-F) wurde daher als Vollzugshilfe für die in der Eidgenössischen Gewässerschutzgesetzgebung festgelegte Zielsetzung nach naturnahen Verhältnissen des Abflussregimes und zur Beurteilung des im Leitbild Fliessgewässer formulierten Entwicklungszieles «ausreichende Wasserführung» ausgelegt.

Als Zielpublikum wendet sich HYDMOD-F an die betroffenen kantonalen Fachstellen, insbesondere an jene des Gewässerschutzes und der Wassernutzung. Als Anwender der Methode kommen auch spezialisierte Ingenieur- und Gutachterbüros sowie Anlagebetreiber in Frage.

In diesem Artikel werden die Grundzüge und Elemente von HYDMOD vorgestellt. Die Publikation (PFAUNDLER et al. 2011) ist in Deutsch und Französisch auf den Internetseiten des Modul-Stufen-Konzepts (www.modul-stufen-konzept.ch > Hydrologie) veröffentlicht.

2. Die Methode

2.1 Bewertungsindikatoren des Abflussregimes

Unter dem Begriff Abflussregime wird das Abflussverhalten eines Fliessgewässers verstanden. Es wird hauptsächlich durch die Milieufaktoren Klima, Relief, Vegetation und durch den hydrogeologischen Aufbau eines Gebietes gesteuert, wobei das Klima den wichtigsten Einflussfaktor darstellt. Das Abflussregime zeigt sich im Verlauf und der Ausprägung der Abflussganglinien. Aus der Ganglinie lassen sich verschiedene Kenngrössen ableiten, welche die hydrologischen Merkmale eines Gewässers charakterisieren:

- Grösse
- Häufigkeit

- Dauer
- Zeitpunkt (Saisonalität)
- Variabilität (Streuung der Merkmale von Jahr zu Jahr)
- Veränderungsrate

Das Abflussgeschehen lässt sich in drei Teilbereiche gliedern, namentlich das Mittelwasser- (MQ), das Hochwasser- (HQ) und das Niederwasserregime (NQ), deren charakteristische Merkmale eine unterschiedliche ökologische Bedeutung aufweisen und durch Eingriffe verändert werden können. Zusätzlich werden anthropogen verursachte Kurzzeiteffekte betrachtet. Die in HYDMOD-F verwendete Definition des Abflussregimes ist damit deutlich weiter gefasst als die Definition der Abflussregimetypen, welche für die Schweiz von ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985) aufgestellt wurden und Auskunft über den durchschnittlichen Jahrgang der mittleren monatlichen Abflüsse (Stichwort Pardé-Koeffizienten) geben. Diese Abflussregimetypen sind jedoch eine wichtige Grundlage für HYDMOD-F, indem sie bei fehlenden Daten für die Abschätzung der Referenzwerte beigezogen werden.

Die Auswahl der Bewertungsindikatoren (vgl. auch OLDEN und POFF 2003), auf denen HYDMOD-F beruht, orientiert sich an verschiedenen Faktoren wie

- der ökologischen Aussagekraft des Indikators,
- einer breiten Erfassung der Charakteristika des Abflussregimes,
- dem Erfassen der Auswirkungen von in der Schweiz verbreiteten wasserwirtschaftlichen Eingriffen,
- der Machbarkeit und der Aufwandbegrenzung der Auswertung.

Diesen Erwägungen führten zu der in Tabelle 1 aufgelisteten Auswahl an Bewertungsindikatoren. Sie decken alle der aufgeführten Teilbereiche des Abflussregimes ab. In die Berechnung der Bewertungsindikatoren fließen diverse hydrologische Kenngrößen sowie einige Hilfsgrößen ein.

Tab. 1. Die vier Teilbereiche des Abflussregimes mit den dazugehörigen Bewertungsindikatoren sowie den benötigten hydrologischen Kenngrößen

Bereich	Bewertungsindikatoren	Benötigte Hydrologische Kenngrößen
Mittelwasserregime	1 Mittelwasser-Abflussverlauf	Mittlere monatliche Abflüsse, Mittlerer jährlicher Abfluss, Pardékoeffizienten
Hochwasserregime	2 Hochwasserhäufigkeit 3 Hochwasser-Saisonalität	Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss (Tagesabfluss), Hochwasserswellenwert, Mittlere Hochwasserhäufigkeit (Momentanabflüsse) Hochwasser-Saisonalität (Mittleres Auftretensdatum und zeitliche Variabilität)
Niederwasserregime	4 Niedrigwasserabfluss 5 Niedrigwasser Saisonalität 6 Dauer Niedrigwasserperioden	Niedrigwasserabfluss, Variationskoeffizient Niedrigwasserabfluss Niedrigwasser Saisonalität (Mittleres Auftretensdatum und zeitliche Variabilität) Mittlere Dauer der Niedrigwasserperiode
Kurzzeiteffekte	7 Schwall/Sunk-Phänomen 8 Spulung und Entleerung 9 Regenwassereinleitungen	Schwallabfluss, Sunkabfluss, Schwall/Sunk-Verhältnis, Pegelanstiegsrate Schwall/Sunk, Pegelrückgangsrateschwall/Sunk Spulabfluss, Häufigkeit der Spülungen und Entleerungen, Pegelanstiegsrate Spülungen und Entleerungen Mittlere Hochwasserhäufigkeit durch Regenwassereinleitungen (Momentanabflüsse)

Die Bewertungsindikatoren berücksichtigen bei ihrer Berechnung sowohl den beeinflussten Zustand wie auch den Referenzzustand, also den natürlichen, unbeeinflussten Zustand, sowie seine natürliche Variabilität.

Weiter spielt es eine Rolle, ob sich der veränderte Zustand einer hydrologischen Kenngrösse in der Nähe des natürlichen Erwartungswertes (Mittelwert), innerhalb der natürlich vorkom-

menden Streuung (natürliche Variabilität) oder ausserhalb davon bewegt. Diese relative Lage des veränderten Abflussregimes im Verhältnis zu Lage und Streubereich des Referenzzustandes bildet die Basis für die Einteilung in die Zustandsklassen.

In den Grundzügen weist HYDMOD starke Bezüge zum Standardwerk „The Natural Flow Regime - A paradigm for river conservation and restoration“ (POFF et al. 1997) auf.

2.2 Die Schritte der Methode

Die Anwendung der Bewertungsmethodik erfolgt in vier Hauptarbeitsschritten, vgl. Abbildung 2.



Abb. 2 Hauptarbeitsschritte der HYDMOD-F Methodik.

2.2.1 Systemabgrenzung und Eingriffsinventar

Ausgangspunkt ist die Festlegung des Untersuchungsraumes. Dieser sollte sich idealerweise auf ein hydrologisch definiertes Einzugsgebiet beziehen, welches sich auch über politisch-administrative Grenzen hinweg ziehen kann. Grund dafür ist, dass das Einzugsgebiet den Wirkungsraum von Eingriffen auf das Abflussregime darstellt. Die eigentliche räumliche Bezugseinheit für die Bewertung ist aber das Gewässernetz, aufgeteilt in einzelne Gewässerabschnitte.

Für das Erstellen des Eingriffsinventars werden in einem nächsten Schritt alle Eingriffe mit potentiellen Auswirkungen auf das Abflussregime identifiziert und erfasst. Im Rahmen von HYDMOD-F werden unter Eingriffe anthropogene Massnahmen baulicher oder betrieblicher Natur verstanden, welche Auswirkungen auf das Abflussregime haben. Die Mehrheit der Eingriffe sind Massnahmen aus den Bereichen Wasserkraftnutzung und Siedlungswasserwirtschaft. Aus diesen beiden Sektoren der Wasserwirtschaft resultieren in der Schweiz die grössten Veränderungen des Abflussregimes. HYDMOD-F enthält eine Typisierung der Eingriffe, welche sich an der Art und dem primären Zweck des Eingriffs orientiert. Die folgenden Arbeitsschritte orientieren sich an dieser Typisierung.

In einem weiteren Schritt werden die Erheblichkeit und Signifikanz der identifizierten Eingriffe geprüft. Für HYDMOD-F ist ein Eingriff erheblich, wenn er ein bestimmtes, festgelegtes Mindestmass überschreitet. Damit wird verhindert, dass für kleine, oft schlecht dokumentierte Eingriffe mit nur geringem räumlichen Wirkungsbereich in den folgenden Arbeitsschritten grosser Aufwand betrieben werden muss. In einem nächsten Arbeitsschritt wird im Sinne einer Immissionsbetrachtung festgestellt, ob das Ausmass des Eingriffs im relativen Bezug zu den natürlichen hydrologischen Bedingungen am untersuchten Gewässer signifikant ist. Die Signifikanzkriterien sind so aufgebaut, dass sie eine Grösse, welche den Eingriff charakterisiert, mit einer hydrologischen Kenngrösse des natürlichen Abflussregimes am Ort des Eingriffs ins Verhältnis setzen. Wird das festgesetzte Signifikanzkriterium unterschritten, so wird angenommen, dass der Eingriff zu keiner signifikanten Beeinflussung des Abflussregimes führt und somit der Zustand des Abschnitts als natürlich oder naturnah eingestuft werden kann. Mit dieser Vorausscheidung wird der Aufwand der Methodenanwendung reduziert und stellt somit eine Konzession an die Anwendbarkeit der Methode dar.

2.2.2 Berechnung Bewertungsindikatoren

Im zweiten Arbeitsschritt werden für jeden Eingriff die in Kap. 2.1 beschriebenen neun Bewertungsindikatoren angewendet und die zutreffende Zustandsklasse ermittelt. Je nach Eingriffsart müssen nicht alle neun Bewertungsindikatoren berechnet werden. Manche Eingriffe verändern nur einzelne Merkmale des Abflussregimes. Um den Aufwand bei der Anwendung von HYDMOD-F zu beschränken, kann deshalb die Bewertung auf die Auswertung derjenigen Indikatoren eingeschränkt werden, bei denen Beeinträchtigungen erwartet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Bewertung der übrigen Bewertungsindikatoren in der Zustandsklasse 1 «natürlich/naturnah» liegt. Indikative Angaben, welche Indikatoren für spezifische Eingriffstypen zur Berechnung empfohlen werden, sind in der Methode beschrieben.

2.2.3 Abschnittsbewertung

Nach der Berechnung der Bewertungsindikatoren liegt eine punktuelle Bewertung an den Eingriffsstellen vor. Diese punktuelle Information muss in einem nächsten Schritt auf das Gewässernetz umgelegt werden, welches dazu in Gewässerabschnitte (GA) mit vergleichbaren hydrologischen Bedingungen unterteilt wird. Für die Abgrenzung der GA wird beim ersten flussaufwärts gelegenen signifikanten Eingriff begonnen und in Fließrichtung die Abschnittsausweisung unternommen. Die Auswirkungen der Eingriffe verändern sich flussabwärts mit dem Einfluss der Zuflüsse.

Für die Bewertung der flussabwärts von Eingriffen gelegenen Gewässerabschnitte wird ein gewichtetes Mittel aus den Bewertungsergebnissen der flussaufwärts gelegenen signifikanten Eingriffe berücksichtigt, in das auch unbeeinflusste Teileinzugsgebiete einfließen. Dabei wird den unbeeinflussten Teilflächen die Zustandsklasse 1 zugewiesen. Als Gewichte dienen die jeweiligen Einzugsgebietsflächen.

2.2.4 Gesamtbewertung

Nach der Abschnittsbewertung liegen für alle ausgewiesenen Gewässerabschnitte die Bewertungen der neun Bewertungsindikatoren als Einzelbewertungen vor. Das Modul-Stufen-Konzept verlangt jedoch eine Gesamtbewertung pro Modul, die einen raschen Überblick über den Zustand ermöglicht. Durch eine Aggregation der neun Einzelbewertungen muss also eine Gesamtbewertung pro Gewässerabschnitt erreicht werden. Die Definition der Aggregationsregel beruht auf folgenden Überlegungen:

- Die Bildung eines Mittelwerts aus allen Einzelbewertungen ist nicht zulässig, da sie unterschiedliche Aspekte bewerten, zwischen denen keine Kompensationseffekte erwartet werden.
- Da bereits ein schlechter Zustand bezüglich eines oder weniger Bewertungsindikatoren das Ökosystem beeinträchtigen kann, muss die Gesamtbewertung in Richtung «worst case» gehen.
- Die Erfahrungen aus Pilot-Anwendungen in Testgebieten zeigten, dass eine reine «worst case»-Regel eine zu pessimistische Gesamtbewertung bewirkt, insbesondere in Situationen, wo nur ein einziger Bewertungsindikator sehr schlecht abschneidet und alle anderen einen guten Zustand aufweisen.
- Eine allgemeingültige Gewichtung zwischen den Bewertungsindikatoren ist fachlich nicht begründbar.

Die aus diesen Erwägungen abgeleitete pragmatische Aggregationsregel bezieht sowohl die schlechteste der neun Einzelbewertungen («worst case») als auch einen Summenwert aller Einzelbewertungen ein.

3. Fallbeispiel

Zur Illustration werden hier die Ergebnisse der Anwendung von HYDMOD für das Bleniotal (SALVETTI & PFAUNDLER 2006) dargestellt. In diesem Einzugsgebiet im Kanton Tessin befinden sich eine Vielzahl von Eingriffen für die Wasserkraftnutzung (Wasserableitungen, -umleitungen und Wasserkraftanlagen). In Abbildung 3 sind die Ergebnisse sowohl für die Gesamtbewertung als auch zu ausgewählten Einzelindikatoren als kartographische Darstellungen aufgeführt.

Bei den meisten Gewässerstrecken ist der Einfluss der Wasserkraftnutzung auf den Bewertungsindikator Niederwasserabfluss sehr massiv, es dominieren die Zustandsklassen 3 bis 5. Nur beim Fluss Orino im Malvaglia-Tal ist die Bewertung besser. Kurz flussab der Fassung im oberen Tal wird die Strecke in Klasse 5 eingestuft. Der Einfluss der Fassung vermindert sich aber relativ schnell und der Fluss weist bei der Mündung in den Malvaglia See bereits wieder einen natürlichen Zustand auf. Die negative Auswirkung des Stausees ist dagegen eindeutig und erstreckt sich bis zum Zusammenfluss in den Brenno bei Malvaglia. Der Einfluss der Wasserfassungen in Valsoi auf die Bewertung des Indikators Q_{347} ist nicht gross und die ganze Gewässerstrecke wird der Klasse 1 zugeordnet, weil der Valsoi-Bach keine permanente Wasserführung hat ($Q_{347} = 0$ auch im natürlichen Zustand). Trotzdem beeinflussen die Wasserfassungen das Niederwasserregime, was bei den Indikatoren Niederwasser-Saisonalität und -Dauer zum Ausdruck kommt.

Beim Bewertungsindikator Niederwasser-Saisonalität sieht das Muster grundsätzlich ähnlich wie beim Niederwasserabfluss aus, obwohl der Einfluss etwas geringer ist. Der Grund dafür liegt darin, dass beim natürlichen Regime die Niederwasserperioden meistens zwischen Januar und März auftraten, mit der Wasserkraftnutzung sich diese Periode nun auf bis zu 6 Monate erstreckt (Oktober bis März), sowohl bei den Wasserfassungen ohne Dotierwassermenge als auch bei den Fassungen mit Dotation.

Bei der Hochwasser-Saisonalität erhält man ein ganz anderes Resultat. Praktisch alle bewerteten Strecken gehören hier zur Klasse 1, was einem natürlichen oder naturnahen Zustand entspricht. Dieser Umstand kann damit erklärt werden, dass einerseits bei allen Eingriffen die maximale Kapazität der Fassungen beschränkt ist, d.h. ausserhalb der Dimensionierungskapazität fliesst das Wasser beim Hochwasser im natürlichen Flussbett, und andererseits von den Speicherseen keine künstlichen Hochwasser generiert werden, welche die Saisonalität der Hochwasser verändern könnten.

Der Einfluss der Wasserfassungen auf das Hochwasserregime wird in diesem Fallbeispiel jedoch durch den Indikator der Hochwasser-Häufigkeit erfasst. Die Bewertung sieht hier so aus, dass der Einfluss am Ort des Eingriffs noch stark ist, sich aber dank den natürlichen Zubringern flussab schnell verbessert. Der Hauptfluss Brenno wird der Klasse 3 zugeordnet.

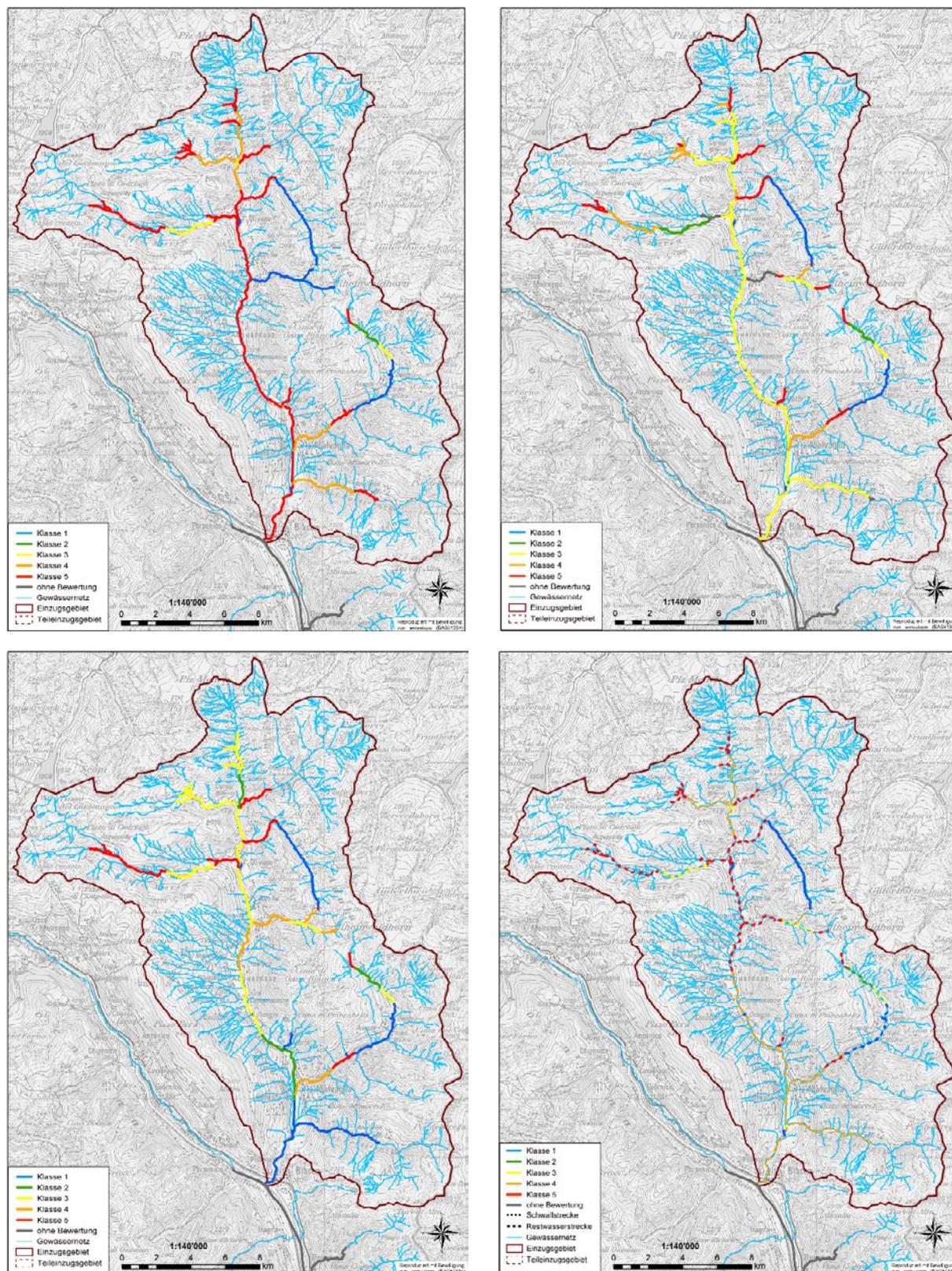


Abb. 3. Fallbeispiel Brenno im Bleniotal, Kanton Tessin. Ergebnisse für einzelne Bewertungsindikatoren von HYDMOD-F. Links oben: Niederwasserabfluss. Rechts oben: Niederwasser-Saisonalität. Links unten: Hochwasser-Häufigkeit. Rechts unten: Gesamtbewertung.

Die Gesamtbewertung gibt schliesslich als Gesamtbild einen Überblick über den hydrologischen Zustand im Einzugsgebiet und ist in diesem Fall durch die Bewertungsergebnisse zu den Indikatoren des Niederwasserregimes geprägt. Unterhalb von Wasserfassungen weisen die Fliessgewässer die massivsten Abweichungen vom natürlichen Abflussregime auf. Dieses „Störsignal“ wird zwar flussab durch Zufluss von unbeeinflussten Gewässern etwas gemildert, ist aber auch noch im Unterlauf des Brenno bei der Mündung in den Ticino als stark verändert (Klasse 4) klassiert.

4. Elektronisches Hilfsmittel HYDMOD-FIT

In der Publikation zur Methode HYDMOD-F sind grundsätzlich alle Schritte im Verfahrensablauf so beschrieben, dass sie nachvollziehbar und von einem Nutzer unabhängig von irgendwelchen Instrumenten angewendet werden können. Zur IT-gestützten Anwendung, Standardisierung und Verringerung des Anwendungsaufwands wurde aber ein elektronisches Hilfsmittel (HYDMOD-FIT) und zur kartographischen Umsetzung der Ergebnisse GIS-Hilfsdateien entwickelt. Diese Hilfsmittel sind – so wie die Publikation der Methode – in Deutsch und Französisch gratis unter folgender URL verfügbar: http://www.modul-stufen-konzept.ch/d/hydro_hilfsmittel_d.htm

5. Hydrologische und wasserwirtschaftliche Grundlagen

Parallel zur Methodenentwicklung musste als Voraussetzung zur Ermöglichung einer flächendeckenden Anwendung einige hydrologische Grundlagen entwickelt werden, damit die nötigen hydrologischen Kenngrössen ermittelt bzw. abgeschätzt werden können, wo keine verwertbaren Abflussmesstationen für das untersuchte Gewässersystem zur Verfügung stehen.

5.1 Grobe Abschätzung hydrologischer Kenngrössen über den Abflussregimetyyp

Einerseits ist hierbei die Grobabschätzung hydrologischer Kenngrössen über den Abflussregimetyyp zu nennen. Letzterer lässt sich auch für ungemessene Gewässer relativ leicht über geografische Attribute des Einzugsgebiets (Höhe, Vergletscherung, u.a.) bestimmen. Die für die hydrologischen Kenngrössen vorliegenden Beziehungen zum Abflussregimetyyp beruhen auf statistischen Analysen von Abflussdaten repräsentativer Messstationen. Für diese sind der Abflussregimetyyp und die hydrologischen Kenngrössen bekannt; sie wurden direkt aus den Messdaten berechnet. In der Folge lassen sich in Abhängigkeit des Abflussregimetyyps Verteilungen der typischen Wertebereiche der Kenngrössen bestimmen. Für manche der Kenngrössen zeigt sich eine gute Differenzierung nach dem Abflussregimetyyp, für andere ist diese weniger ausgeprägt. Aufschluss über die Grössenordnung erhält man aber in jedem Fall. Diese Abschätzmethode ist unter folgender URL verfügbar: <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01835/08987/index.html?lang=de>

5.2 Schweizweite digitale Datensätze zum mittleren Abflussverhalten

Hinsichtlich mittleren (monatlichen und jährlichen) Abflüssen und für den Abflussregimetyyp stehen schweizweit digitale Datensätze zur Verfügung. Diese geben modellierte natürliche mittlere Abflussverhältnisse, wie sie für die Periode 1980-2000 repräsentativ sind, wieder.

Einerseits ist das ein Rasterdatensatz (500x500m) zu den mittleren monatlichen und der jährlichen Abflusshöhe, der als MQ-CH bezeichnet wird (PFAUNDLER und ZAPPA 2006). Andererseits wurde dieser Rasterdatensatz auf das digitale Gewässernetz der Schweiz umgelegt (vgl. Abbildung 4), und steht als Datensatz MQ-GWN-CH (Mittlere Abflüsse [MQ] und der Abflussregimetyyp für das Gewässernetz [GWN] der Schweiz [CH]) zur Verfügung: www.bafu.admin.ch > Hydrologie > Informationssysteme und Methoden > Mittlerer monatlicher und jährlicher Abfluss

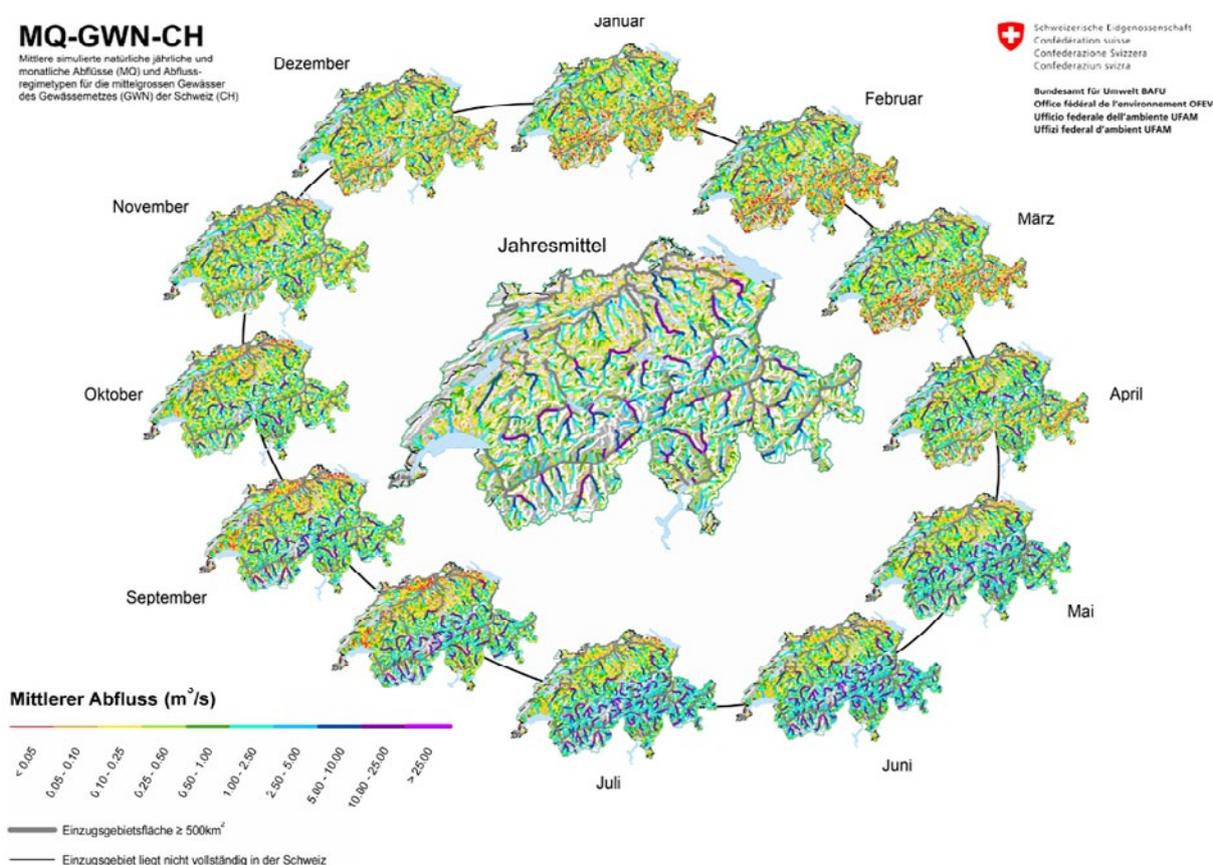


Abb. 4. Der Datensatz MQ-GWN-CH: simulierte mittlere natürliche Abflüsse (jährlich und monatlich) [MQ] für das digitale Gewässernetz [GWN] der Schweiz [CH]

Dieser Datensatz beinhaltet ebenfalls für die einzelnen Abschnitte des Schweizer Gewässernetzes die Information zum Abflussregimetyyp (als Erweiterung des bereits bestehenden Blattes 5.2 des Hydrologischen Atlas der Schweiz, der diese Information aber nur für die grösseren Gewässer bereit hält).

5.3 GEWISS – Gewässerinformationssystem Schweiz

Das gesamtschweizerische Gewässerinformationssystem GEWISS enthält Informationen zu hydrologischen Daten, wasserwirtschaftlichen Eingriffen, Messstationen sowie zum Zustand der Gewässer in der Schweiz. Es kann daher eine wertvolle Informationsquelle für die verschiedenen Schritte in der Methodenanwendung von HYDMOD darstellen: <http://gewiss.admin.ch>

5.4 GEWISS EZG-MQ-Tool

GEWISS EZG-MQ-Tool ist als Web-basiertes Tool eine in GEWISS integrierte Funktionalität. Der Benutzer kann damit eine beliebige Position in der Schweiz anwählen, für welche das Einzugsgebiet ermittelt wird. Für dieses Einzugsgebiet werden weitere Fachinformation wie z.B. die mittleren Abflüsse, der Abflussregimety, Grössen- und Höhenangaben sowie eine Aufschlüsselung der Landnutzung ausgegeben.

Dies sind Informationen, die bei der Anwendung der HYDMOD-Methode für ein bestimmtes Gewässersystem an vielen Punkten benötigt werden. Dieses Tool führt daher zu einer wesentlichen Erleichterung der Anwendung.

Literatur

- ASCHWANDEN, H. & R. WEINGARTNER (1985): Die Abflussregimes der Schweiz. Geographisches Institut der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 65. Bern, 237 Seiten
- BUWAL & BWG (Hrsg.) (2003): Leitbild Fliessgewässer Schweiz – Für eine nachhaltige Gewässerpolitik. Bern, 12 Seiten
- BUWAL (1998): Modul-Stufen-Konzept – Methoden zur Untersuchung und Beurteilung von Fliessgewässer. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 26. Bern, 43 Seiten
- OLDEN, J.D. & N.L. POFF (2003): Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. In: River Res. Applic. 19: 101-121
- PFAUNDLER, M., DÜBENDORFER, C. & A. ZYSSET (2011): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Hydrologie – Abflussregime Stufe F (flächendeckend). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1107: 113 S
- PFAUNDLER, M. & M. ZAPPA (2006): Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz. Ein optimierter Datensatz im 500×500 m Raster. In: Wasser, Energie, Luft, Heft 04/2006
- POFF, N.L., ALLAN, J.D., BAIN, M.B., KARR, J.R., PRESTEGAARD, K.L., RICHTER, B.D., SPARKS, R.E. & J.C. STROMBERG (1997): The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration. In: BioScience, Vol. 47, No. 11. (Dec., 1997), pp. 769-784
- SALVETTI, A. & M. PFAUNDLER (2006): Erprobung des Moduls Hydrologie (HYDMOD-F) am Brenno (Bleniotal). Interner Bericht. Dipartimento del Territorio, Ufficio dei corsi d'acqua del Cantone Ticino und Bundesamt für Umwelt, Bellinzona/Bern

Ökologie und Wasserkraftnutzung – Monitoring von Renaturierungsmaßnahmen zwischen zwei Staustufen

Peter Fischer, Bernd Cyffka

Zusammenfassung

Ein aus auenökologischer Perspektive optimales Abflussregime ist dann erreicht, wenn durch dessen Steuerung (Zeitpunkt, Dauer, Häufigkeit und Intensität) „Möglichkeiten“ geschaffen werden, dass auentypische Arten sich dauerhaft ansiedeln können. Für die Stromerzeugung ist die Vollausslastung der Turbinen an möglichst vielen Tagen im Jahr die Zielvorgabe. Wie und ob die beiden Interessen an einem Fluss umgesetzt werden können zeigt der vorliegende Beitrag. Dabei werden über die Interpretation von Wasserstandsganglinien an unterschiedlichen Auengewässern und der flächenhaften Kartierung von Überflutungsflächen erste Rückschlüsse auf die Funktionalität und Effektivität von den im Projektgebiet durchgeführten Renaturierungsmaßnahmen gezogen.

1. Einleitung

Fließgewässer und Auen sollen nach den Zielen der Biodiversitätsstrategie in ihrer Funktion als Lebensraum bis 2020 soweit gesichert werden, dass eine für Deutschland naturraumtypische Vielfalt gewährleistet ist (BMU, 2007). Dies kann nur erreicht werden, wenn Überschwemmungen, wechselnde Grundwasserstände, Abfluss- und Gewässerbettdynamik als natürliche Vorgänge in Fließgewässern und ihren angrenzenden Auen wieder zugelassen werden. Sie sind elementarer Bestandteil dieser Ökosysteme (BUNN & ARTHINGTON 2002, JÜRGING & PATT 2005).

Gerade weil Wasserkraftanlagen an naturfernen Flüssen durch ihr hohes Leistungsvermögen ein günstiges Kosten/Nutzen-Verhältnis haben (BUNGE 2001) und der Konflikt zwischen Klimaschutz und Naturschutz scheinbar schnell entschieden ist, lohnt es sich doch genauer hinzusehen, wenn Renaturierungsprojekte an Staustufen umgesetzt werden.

Im Rahmen des E+E-Begleitvorhabens „Monitoring auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen“ arbeiten seit 2009 acht Arbeitsgruppen aus unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen zusammen, die den Erfolg eines Projektes zur Auenrenaturierung messen und wissenschaftlich begleiten (STAMMEL et al. 2012).

Das Teilprojekt „Fluviale Morphodynamik, Bodenfeuchte und Grundwasser“, erforscht insbesondere die Steuerung der hydrologischen Einflussgrößen und deren Auswirkungen für den Lebensraum Aue. Treibende Kraft in den Fließgewässern der Auen sind üblicherweise die natürlichen Abflussschwankungen. In den Donauauen bei Neuburg werden diese seit etwa 2,5 Jahren durch die umgesetzten Renaturierungsmaßnahmen erzeugt bzw. dadurch wesentlich verstärkt. Damit Abflüsse und Wasserstände entlang der Donau zwischen zwei Staustufen dynamisiert und gesteuert werden können, bedarf es nicht nur bautechnischer Maßnahmen wie ein Umgehungsgewässer, sondern auch einer angepassten Steuerung für ökologische Flutungen und eines Grundwassermanagements. Dadurch kann nicht nur eine Wasserstandsdynamik (Hoch- und Niedrigwasser) hervorgerufen, sondern auch eine Morphodynamik in Folge des Auftretens hydraulischer Kräfte an den Ufern und Gewässersohlen initiiert werden.

2. Projektgebiet und Dynamisierungsmaßnahmen

Das Projektgebiet liegt an der bayerischen Donau zwischen den Flusskilometern 2473 und 2464. Hier hat sich einer der größten zusammenhängenden Hartholz-Auwälder Mitteleuropas erhalten. Der Auenzustand an der Donau wird maßgeblich von der Art des Gewässerausbaus bestimmt. Technischer Gewässerausbau in Kombination mit intensiver Wasserkraftnutzung bestimmt stark bis sehr stark die standörtlichen Verhältnisse an der Donau (BFN 2009). Auch der Auwald bei Neuburg ist durch die Flussbegradigungen während des 19. Jh. und den Bau zweier Staustufen in den 1970er Jahren weitgehend von der hydrologischen Dynamik des Stroms abgekoppelt worden. Eine fließgewässertypische Eigenentwicklung des Systems ist unterbunden oder zumindest maßgeblich eingeschränkt worden (SCHLEGEL 2000). Die dadurch entstandene, oft monotone Gewässerstruktur und die Vereinheitlichung der Strömungsverhältnisse haben von ehemals dynamischen zu eher stabilen und ausgeglichenen Zuständen geführt.

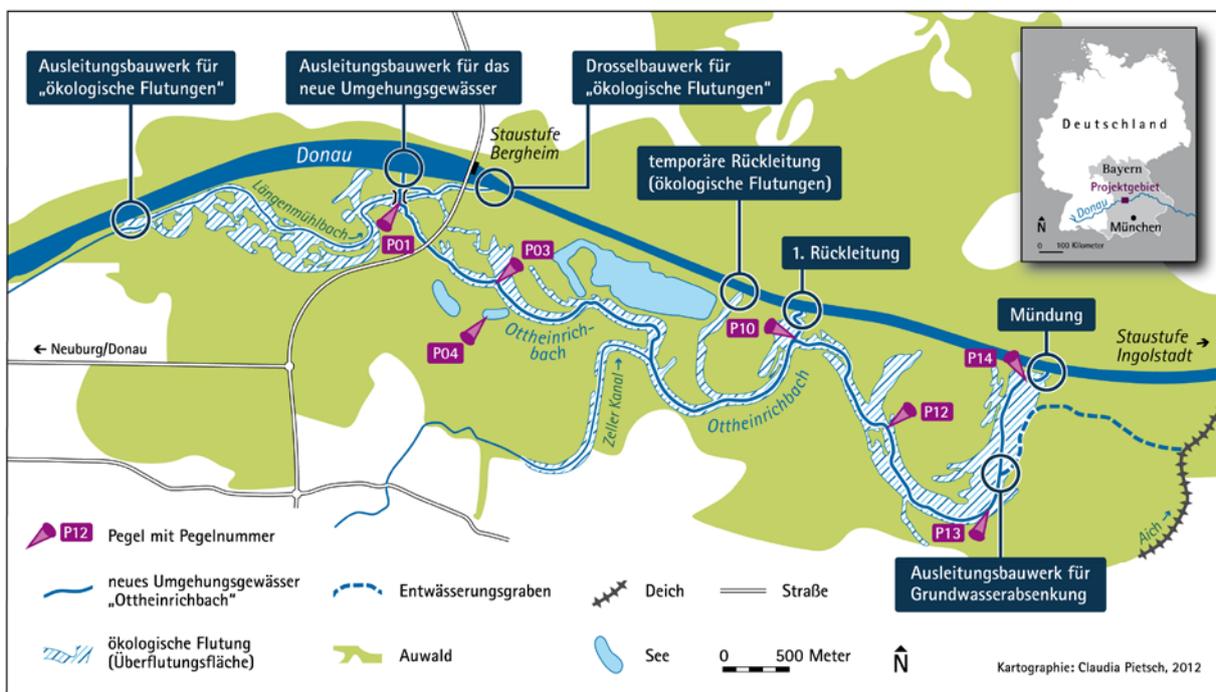


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes zwischen Neuburg und Ingolstadt, mit den wichtigsten Bauwerken, Seen und Fließgewässern, sowie ausgewählten Pegelstandorten.

Ein Vorhaben zur Verbesserung des Zustandes wird seit 2009 durch das Projekt „Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt“ vollzogen (CYFFKA & HAAS 2008, STAMMEL et al. 2011). In den südlichen Donauauen, mit einer Fläche von rund 1.200 ha, wurde der Auwald mit wasserbautechnischen Maßnahmen wieder an die Donau angeschlossen. Auch wenn bestehende Staudämme und die Staustufenregulierung die natürliche Dynamik unterbinden und die Abflüsse nivellieren, soll mit den im Folgenden beschriebenen Maßnahmen die eigenständige Entwicklung auentypischer Arten im bestehenden Auwald und die Dynamik gefördert werden:

- Neues Auengewässer, der „Ottheinrichbach“ in der Funktion eines Umgebungsba-ches mit 0,5 bis 5 m³/s Wasserführung auf 8,5 km in teilweise neuem naturnah angelegtem Gerinne, teilweise in bestehenden Auengewässern

- Ökologische Flutungen von Teilen des Auwaldes bei einem Wasserstand der Donau von 600-1000 m³/s, > 1000 m³/s soll das Gebiet als Retentionsraum genutzt werden. Über ein Ausleitungsbauwerk fließen bis zu 25 m³/s Donauwasser in den Längemühlbach und werden über ein Drosselbauwerk und zwei Flutmulden in den Auwald geleitet
- Grundwasserabsenkung während Niedrigwasserperioden (< 150 m³/s) des stellenweise hoch anstehenden Grundwasserspiegels.

3. Rahmenbedingungen

Alle Steuerungsmaßnahmen, insbesondere die Abflussregulierung und Wasserausbreitungsmöglichkeit sind aber an verschiedene Rahmenbedingungen geknüpft, die sich aus unterschiedlichen Nutzungsformen und Auflagen ergeben.

- a) Zur Energieerzeugung durch Wasserkraft wird die Donau an der Staustufe Bergheim staureguliert. Dabei kann ein Abfluss bis zu 550 m³/s energiewirtschaftlich genutzt werden.
- b) Einschränkungen durch Jagd (Drosselung der Wassermenge während Jagdterminen)
- c) Straßen, Wege und Brücken fixieren teilweise den Flusslauf oder unterbrechen alte Rinnensysteme. Die maximale Ausleitungsmenge wird ebenfalls durch diese Brückenbauwerke limitiert.
- d) Wasserrechtliche Auflagen aus Hochwasserschutz und Stauzielregelung

All diese Bedingungen sind im Planfeststellungsverfahren berücksichtigt worden, der Bescheid legt nun den Rahmen der Abflussregulierung fest, wie es in Kapitel 2 geschildert wurde.

Um trotzdem eine größtmögliche Wirkung zu erzielen, bedarf es einer angepassten Steuerung im Rahmen des vorgegebenen Handlungsspielraumes. Das heißt, ein aus ökologischer Perspektive optimales Abflussregime in Zeitpunkt, Dauer, Häufigkeit und Intensität über die Steuerung der Ausleitungsbauwerke zu erzeugen ohne die wirtschaftlichen und wasserrechtlichen Vorgaben zu verletzen. Daraus ergeben sich für alle drei Bauwerke verschiedene Steuerungsmöglichkeiten, die je nach Zielarten (aquatisch oder terrestrisch) teilweise entgegengesetzte Regelung verlangen. So sollten für Fische möglichst viel Wasser fließen, so dass weder Wassermangelsituation entstehen noch Flachwasserbereiche nach dem Ablachen trockenfallen. Dagegen sind für manche an Wechselwasserbereiche angepasste Pflanzenarten wie Weiden oder Arten der Zweizahnfluren auf eine zeitweise deutliche Absenkung des Wasserspiegels angewiesen.

Um die Kopplung des Gewässer-Aue-Systems zu erfassen, bedarf es deshalb eines „dynamischen Methodenmixes“ (FISCHER 2012a), der je nach Maßnahme und Auswirkung immer wieder neu an die Verhältnisse angepasst werden muss.

4. Pegel und Kartierung der Überflutungsflächen

Überflutungen, ob natürlich oder gesteuert und die sich daraus ergebenden schwankenden Wasserstände können weder in einem klar abgegrenzten Raum (ein Auengewässer oder Flussabschnitt) betrachtet werden, noch reichen Momentaufnahmen um für das hydrologische Geschehen im Auenökosystem ein ausreichendes Verständnis zu entwickeln. Deswegen hilft eine Vielzahl von unterschiedlichen Pegelsystemen (verschiedene Betreiber; eigene

Pegel, Kraftwerksbetreiber und Wasserwirtschaftsamt) und Abflussmessungen sowie die Kartierung von Überflutungsflächen mittels dGPS, die hydrologische Konnektivität zwischen Fluss und Aue nachvollziehen zu können.

Das stationäre hydrologische Messnetz des Aueninstitutes besteht aus einem Grundwasserpegel, zwei Stillgewässerpegeln und 16 Fließgewässerpegeln, die entlang des Umgehungs-gewässers den Wasserstand im Gerinne erfassen (siehe Abbildung 1).

Ereignisabhängig (bei einer ökologischen Flutung oder einer Grundwasserabsenkung) werden mobile Drucksensoren an Lattenpegeln ins Gelände ausgebracht, die die Wasserstandsveränderungen in Rinnen und Senken, in unmittelbaren ufernahen Bereichen oder temporären nicht angeschlossenen Auengewässern quantifizierbar machen und das Messnetz räumlich verdichten. Über die so gewonnenen Wasserstände in Kombination mit Kartierungsarbeit ist eine weiträumige Erfassung der Überflutungsflächen möglich (Abbildung 2).

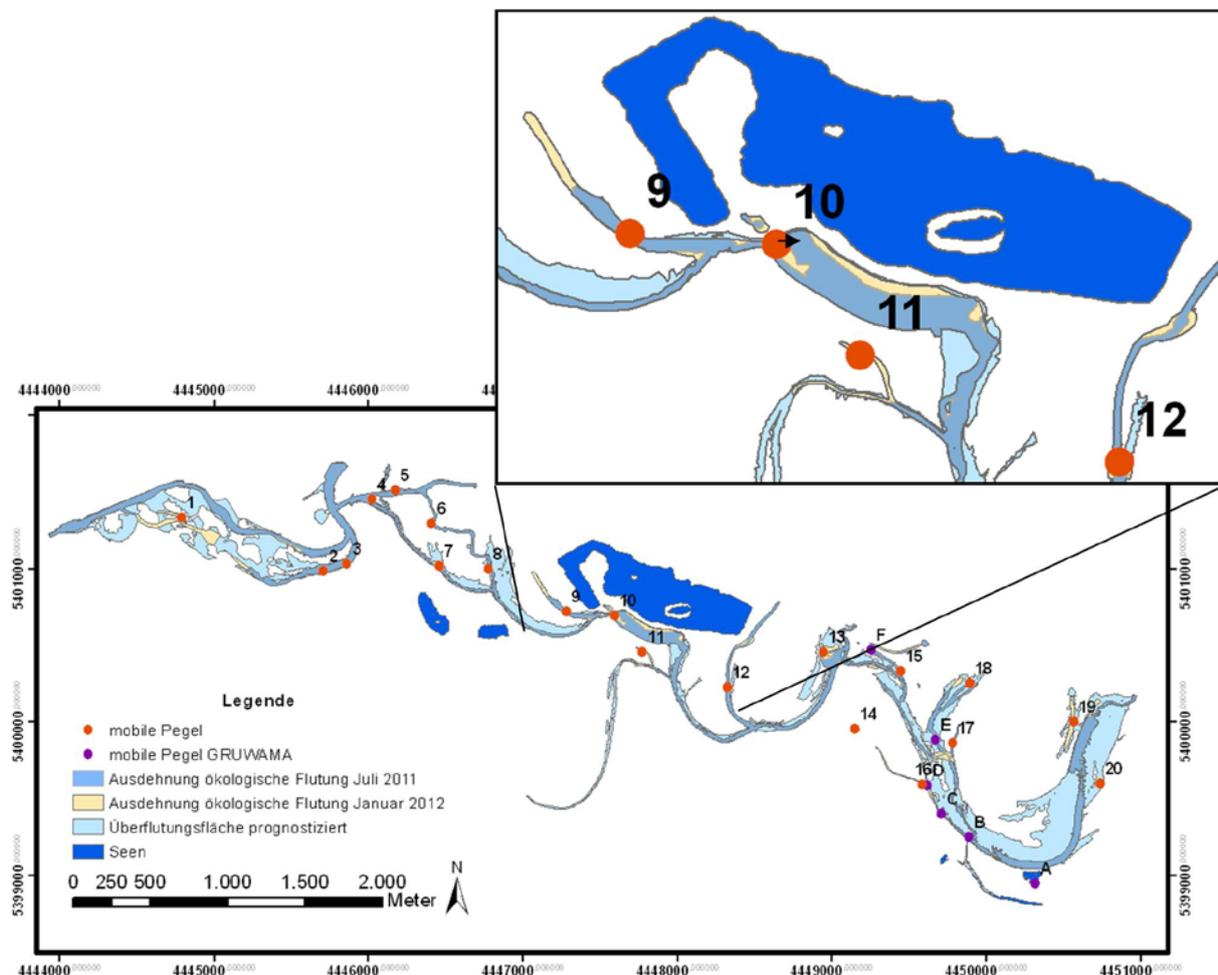


Abb. 2: Überflutungsflächen der beiden Ökologischen Flutungen (2011, 2012; kartiert und Wasserstandsinformation über Lattenpegel) und Pegelstandorte der mobilen Datenlogger im Projektgebiet. Pegel A bis F werden auch bei einer Grundwasserabsenkung eingesetzt. Zu den beschrifteten Pegeln (z. B. Nr. 5) sind die zugehörigen Wasserstandsganglinien der Abbildung 4 zu entnehmen.

5. Ergebnisse

5.1 Stationäre Pegel

Sowohl natürliche Hochwasserereignisse als auch anthropogene Durchflussveränderungen, durch Wasserbau oder wissenschaftliche Untersuchungen ausgelöst, sind in den Hydrographen in Abbildung 3 abzulesen. Einige der bisher markantesten Ereignisse sind mit Pfeilen markiert und zeigen die Reaktion des Wasserstandes auf die entsprechende Veränderung. Orange Pfeile zeigen die ersten drei ökologischen Flutungen und der grüne die erste Grundwasserabsenkung. Die lila Ganglinie aufgezeichnet am P14 entspricht etwa dem Donauwasserstand und ist noch deutlich vom Schwallbetrieb der Staustufe Ingolstadt beeinflusst. Erst zeitlich hochauflösende Darstellungen der Ganglinien erlauben Rückschlüsse auf die tatsächlich am Standort vorherrschenden Verhältnisse und liefern wichtige Erkenntnisse zur Feinsteuerung der Abflussmengen.

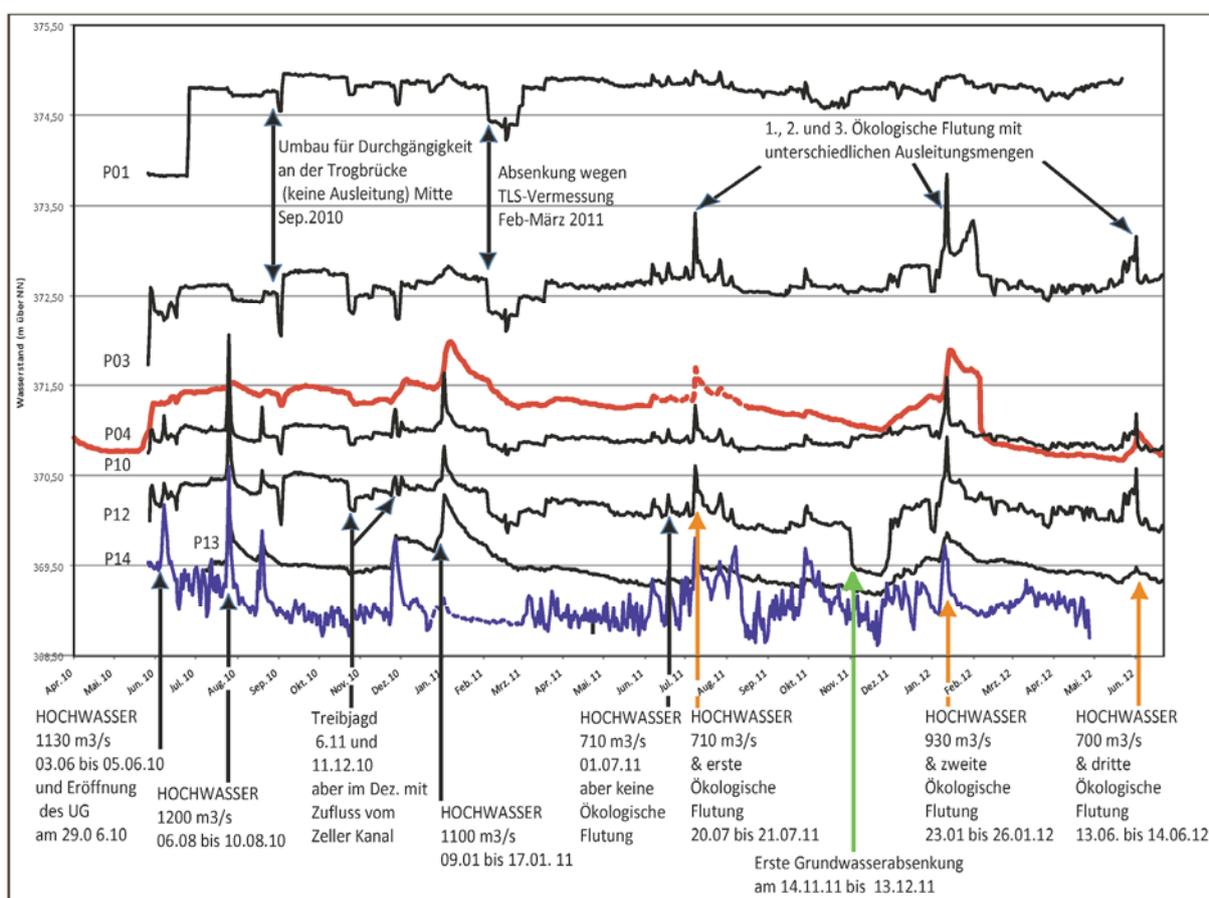


Abb. 3: Fließgewässerpegel (Tagesmittelwerte) am Umgehungsgewässer (ausgewählt) und Stillgewässerpegel P04 am „Kleinen Schlossweiher“ (rote Linie) mit ausgewählten Ereignissen (Pegelstandorte s. Abbildung 1).

5.2 Mobile Pegel

In der Abbildung 4 sind für den Zeitraum der siebten ökologischen Flutung (23.12 bis 31.12.12) die Wasserstandsganglinien der mobilen Pegel sichtbar. Deutlich ist der Anstieg (a) sowie die maximale Amplitude zu erkennen. Auch das Schließen des Ausleitungsbauwerks (b) und der weitere Abfall (c) nach dem Öffnen des Drosselbauwerks am Längen-

mühlbach sind an den Ganglinien abzulesen. Die Plateauphase vom 24.12.12 bis 28.12.12 lieferte zudem die wichtige Erkenntnis, dass der Pegelstand aufgrund der maximal zur Verfügung stehenden Ausleitungsmenge von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ Wassermenge unabhängig von der Dauer nicht mehr weiter zunehmen würde. Daraus ließ sich ableiten, dass die Dauer der Flutung in der momentanen Ausbau- und Steuerungskonfiguration kaum eine Auswirkung auf die Ausbreitung der Flutungsflächen hat! Die Steuerung der Bauwerke und die damit verbundene Reaktion in den Wasserständen ist wieder an allen Pegeln zu sehen (vgl. Abbildung 3). Die Reaktion der oberflächlich (direkt) oder über Flutrinnen ans Umgehungsgewässer angebundene Pegel ist gut nachzuvollziehen. Typisch für diese Pegelstandorte ist die schnelle und unmittelbare Reaktion auf die Flutung, sowie auf die Steuerung der Abflussmengen über die Ausleitungsbauwerke. Ein Beispiel hierfür sind die Standorte 5, 8 und 9 (Abbildung 2 u. 4). Pegel, welche nur indirekt ans Gewässer angebunden sind, reagieren etwas verzögert mit steigendem Wasserstand durch z.B. Rückstau, vgl. Pegel 18, oder durch die Anhebung des Grundwassers durch Qualmwasser in Senken, vgl. Pegel 17 oder 19 (Abbildung 2 u. 4).

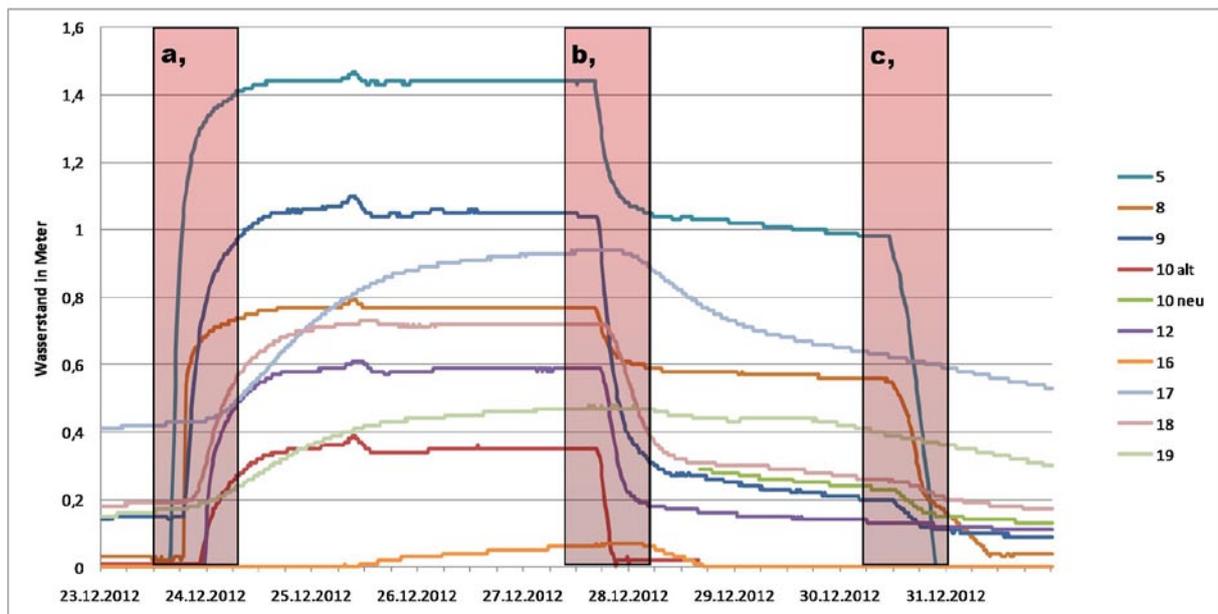


Abb. 4: Ganglinien der mobilen Pegel für den Zeitraum der siebten ökologischen Flutung vom 23.12 – 31.12.12. a: Öffnen des Ausleitungsbauwerks, b: Schließen und c: Öffnen des Drosselbauwerks am Längenmühlbach, vgl. Abbildung 1. Durch umsetzen des Pegels 10 während des Abklingens der ökologischen Flutung (s. Pfeil Pegel 10, Abbildung 2) ist ein Zugewinn an Wasserstandsdaten möglich, da am neuen Standort eine längere Aufzeichnung gegeben ist.

5.3 Kartierung der Überflutungsflächen

Mit den bisher durchgeführten Kartierungen können die durch die Maßnahmen ausgelösten Veränderungen (insbesondere in den Wechselwasserzonen) erfasst und dokumentiert werden. Für den Großteil des Projektgebietes kann die Ausdehnung der Überflutungsflächen entsprechend gut eingeschätzt werden (Abbildung 2). Das neue Umgehungsgewässer lässt den Grundwasserspiegel in der direkten Umgebung ansteigen. Je nach Ausleitungsmenge

werden verschiedene Wasserkörper „aktiv“. Seit der permanenten Beschickung des Ottheinrichbaches sind deswegen einige Standorte im Auwald dauerhaft überschwemmt. Andere Flächen werden nur bei höheren Ausleitungsmengen (ab 3,5 m³/s) oder einer ökologischen Flutung überstaut. Bei einer Flutung füllen sich Senken mit Qualm-, Grund- oder Umgebungsbachwasser (Unterschiede in der Anbindung, oberflächlich oder über den Kieskörper, konnten dokumentiert werden). Anders als erwartet bleiben die Auswirkungen aller bisher erfolgten ökologischen Flutungen bzgl. der Überschwemmungsfläche mit etwas weniger als der Hälfte (65 ha) weit hinter der Prognose von etwa 130 ha zurück (FISCHER 2012b).

6. Schlussfolgerung

Die Grundvoraussetzungen für eine eigenständige Entwicklung des neu angelegten Fließgewässers sind durch die technischen Maßnahmen in den Donauauen geschaffen worden. An vielen Standorten konnten damit auch auentypische Prozesse und Abflussvariationen initiiert werden. Diese führten und führen zur Ausbildung von gewünschten Lebensräumen wie Wechselwasserzonen und an wenigen Stellen auch zu typischen Weichholzaunen. Die für Auen entscheidende Dynamik in den Wasserständen kann hier, weil durch Stauhaltungen beeinflusst, nur mit der entsprechenden Steuerung erreicht werden. Je unnatürlicher die Ausgangsbedingungen im Abflussregime des Vorfluters sind und je mehr wasserbautechnische Maßnahmen für die Dynamisierung eingesetzt werden, umso wichtiger ist die Steuerung. Zusätzlich beschränken zahlreiche Nutzungsansprüche (siehe Kapitel 3) die für den Auwald so wichtige flächenhafte Überflutung durch enge Rahmenbedingungen bezüglich des Zeitpunkts und der Ausleitungsmenge (Kapitel 3) Hieraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Bei der baulichen Gestaltung von Wasserkraftanlagen und Stauhaltungen muss die Anbindung der Aue berücksichtigt werden, was aufgrund der EU-WRRL schon weitgehend berücksichtigt wird;
- Berechnungen und Modelle für die Planung von Renaturierungsvorhaben müssen unter Umständen nach einer gewissen Laufzeit des Projektes an die durch eigendynamische Entwicklung veränderten Ausgangsbedingungen angepasst werden. Dies erfordert eine Nachjustierung der Eingangsvariablen.
- Bei den zukünftig verstärkt umzusetzenden Renaturierungsvorhaben muss die zum ökologisch zielführenden Betrieb notwendige Wassermenge für die Auendynamisierung ein wichtiger Aspekt sein.

Der letzte Punkt erfordert für einen umfassenden Erfolg hinsichtlich einer naturähnlichen Dynamik in den Auenbereichen Entscheidungsfreiheit darüber Wann, Wie und Wo sowie in welcher Menge Wasser zur Verfügung gestellt wird, die Rahmenbedingungen müssen daher möglichst weit gefasst sein. Eine Orientierung am Abfluss des Hauptflusses, in unserem Fall der Donau, muss diskutiert werden, da insbesondere die Schwankungen im Bereich der halb- oder vierteljährlichen Ereignisse (mittleres Hoch- und Niedrigwasser) in der Donau deutlich durch die Steuerung des Kopfspeichers im Lech, den Forggensee, beeinflusst wird. Am Pegel Landsberg ist im Durchschnitt an 150 Tagen im Jahr der Abfluss durch Wasserrückhalt niedriger, während er an den restlichen Tagen durch Wasserzugabe höher ist (Lfw 1984). Gerade die kleinen Schwankungen werden möglichst nivelliert, um die Nutzung der

Wasserkraft zu optimieren. Wenn man aus Naturschutzgründen ein künstliches, möglichst dynamisches Fließgewässersystem erbaut, sollte sich das nicht an den für die Wasserkraft optimierten Abflüssen orientieren. Besser wäre ein an anderen Parametern wie Niederschlägen oder Abflüssen von ungesteuerten Flüssen im Einzugsgebiet oder ein nach ökologischen Erfordernissen ausgerichtetes Abflussmanagement. Dies wird besonders deutlich, wenn man die bisherige Betriebsvorschrift für einen Donauabfluss zwischen 100 und 300 m³/s betrachtet: hier waren bisher gleichbleibende 2,5 m³/s vorgesehen.

Inzwischen konnte eine naturnähere Abflusssteuerung eingestellt werden, die in 0,5 m³/s Schritten dem Donauabfluss folgt. In sehr kleinen Schritten, ist also ein „ökologische Steuerung“ möglich solange sie nicht den ökonomischen Interessen entgegensteht.

7. Danksagung

Das E+E-Vorhaben wird vom Bundesamt für Naturschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert. Das Monitoring wird auch noch für knapp eineinhalb Jahre bis Mitte 2014 weiter unterstützt. Herzlichen Dank dafür. Weiterer Dank gilt dem Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt für die stets gewährte Unterstützung.

Literatur

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (LFW) (1984): 100 Jahre Wasserbau am Lech zwischen Landsberg und Augsburg, Heft 19, 123 S. und Anhang
- BUNGE T. (Hrsg.) (2001): Wasserkraftanlagen als erneuerbare Energiequelle – rechtliche und ökologische Aspekte, Umweltbundesamt Text 01/01.
- BUNN, S.E. & A.H. ARTHINGTON(2002): Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30:492-507.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Berlin
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) & BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (BfN) (Hrsg.) (2009): Auenzustandsbericht – Flussauen in Deutschland. Berlin, Bonn.
- CYFFKA, B. & F. HAAS (2008): Erosion without sediment supply? The crux of a floodplain restoration project downstream dammed-up headwaters. In: *Sediment Dynamics in Changing Environments*. In: IAHS Publ. 325, S. 477-484.
- FISCHER, P., HAAS, F. & B. CYFFKA (2012a): E+E Begleitvorhaben Monitoring auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen. 2. Zwischenbericht vom 30. 04. 2012. Teilprojekt II: Fluviale Morphodynamik, Bodenfeuchte und Grundwasser – Monitoring hydrologischer Parameter. KU Eichstätt.
- FISCHER, P., HAAS, F. & B. CYFFKA (2012b): Driving forces in a floodplain restoration project - interaction between surface water, groundwater and morphodynamic processes during an ecological flooding. In: *Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment*. In: IAHS Publ. 356, S. 146-154.
- JÜRGING, P. & H. PATT (HRSG.) (2005): Fließgewässer und Auenentwicklung, Grundlagen und Erfahrungen. S. 523.

- SCHLEGEL GMBH (2000): Renaturierung der Donau-Auen. Auswertung der Grundwassermessdaten. unveröff. Gutachten, München.
- STAMMEL, B., CYFFKA, B., GEIST, J., MÜLLER, M., PANDER, J., BLASCH, G., FISCHER, P., GRUPPE, A., HAAS, F., KILG, M., LANG, P., SCHOPF, R., SCHWAB, A., UTSCHIK, H. & M. WEISSBROD A.H. (2012): Floodplain restoration on the Upper Danube (Germany) by re-establishing back water and sediment dynamics: a scientific monitoring as part of the implementation. River Systems, Vol. 20/1-2, S. 55-70.

Autorenverzeichnis

Alewell, Christine, Prof. Dr., Umweltgeowissenschaften, Universität Basel, Bernoullistrasse 30, 4056 Basel, E-Mail: christine.alewell@unibas.ch

Bernhard, Luzi, MSc, Hydrologische Vorhersagen, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, E-Mail: bernhard@wsl.ch

Bogena, Heye, Dr., Institut für Bio- und Geowissenschaften, Forschungszentrum Jülich, 52428 Jülich, E-Mail: h.bogena@fz-juelich.de

Büttner, Uwe, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Zur Wetterwarte 3, D-01109 Dresden, E-Mail: Uwe.Buettner@smul.sachsen.de

Calanca, Pierluigi, Dr., Agroscope Reckenholz-Tänikon, Reckenholzstr. 191, 8046 Zürich, E-Mail: pierluigi.calanca@agroscope.admin.ch

Cornelissen, Thomas, Dipl. Geogr., Geographisches Institut, Universität Bonn, Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn, E-Mail: thocor@uni-bonn.de

Cyffka, Bernd, Prof. Dr., Angewandte Physische Geographie, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Ostenstraße 18, 85072 Eichstätt, Aueninstitut Neuburg, Schloss Grünau, 86633 Neuburg a.d. Donau, E-Mail: bernd.cyffka@ku.de

Diekkrüger, Bernd, Prof. Dr., Geographisches Institut, Universität Bonn, Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn, E-Mail: b.diekkruenger@uni-bonn.de

Fichtner, Thomas, Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Altwahnsdorf 12, D-01445 Radebeul, E-Mail: Thomas.Fichtner@smul.sachsen.de

Fischer, Peter, Dipl.-Geogr., Angewandte Physische Geographie, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Ostenstraße 18, 85072 Eichstätt, Aueninstitut Neuburg, Schloss Grünau, 86633 Neuburg a.d. Donau, E-Mail: peter.fischer@ku.de

Formayer, Herbert, Dr., Institut für Meteorologie, Peter-Jordan-Str. 82, 1190 Wien, E-Mail: herbert.formayer@boku.ac.at

Frey, Simon, alpS-Centre for Climate Change Adaption, Grabenweg 68, 6020 Innsbruck, E-Mail: frey@alps-gmbh.com

Fuhrer, Jürg, Prof. Dr., Agroscope Reckenholz-Tänikon, Reckenholzstr. 191, 8046 Zürich, E-Mail: juerg.fuhrer@agroscope.admin.ch

Gädeke, Anne, M. Sc., Brandenburgische Technische Universität Cottbus Lehrstuhl Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus, E-Mail: Anne.Gaedeke@tu-cottbus.de

Goler, Robert, Dr., alpS-Centre for Climate Change Adaption, Grabenweg 68, 6020 Innsbruck, E-Mail: goler@alps-gmbh.com

Grünewald, Uwe, Prof. Dr. rer. nat. habil., Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Professur Hydrologie und Wasserwirtschaft, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus, E-
Mail: Uwe.Grünewald@tu-cottbus.de

Heidbüchel, Ingo, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Sektion 5.4 Hydrologie, Tele-
grafenberg, 14473 Potsdam, E-Mail: ingohei@gfz-potsdam.de

Heilig, Maximilian, Abt. BD3-Hydrologie und Geoinformation, Amt der NÖ Landesregierung,
Landhausplatz 1, Haus 13, A-3109 St. Pölten

Hodel, Hanspeter, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Sektion Hydrometrie, 3003 Bern, E-Mail:
hanspeter.hodel@bafu.admin.ch

Höhne, Uwe, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Zur Wetter-
warte 3, D-01109 Dresden, E-Mail: Uwe.Hoehne@smul.sachsen.de

Holzschläger, Annelie, Dr., Agroscope Reckenholz-Tänikon, Reckenholzstr. 191, 8046 Zürich,
E-Mail: annelie.holzkaemper@agroscope.admin.ch

Holzmann, Hubert, Prof. Dr., Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Was-
serbau, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, 1190 Wien, E-Mail: hubert.
holzmann@boku.ac.at

Johst, Margret, Dr., Geowissenschaftliches Ressourcenmanagement, Hochschule Konstanz,
Fakultät Bauingenieurwesen, Brauneggerstr. 55, D-78462 Konstanz, E-Mail: mjohst@htwg-
konstanz.de

Kammer, Henriette, B.Sc. Bioenergie, Hochschule Rottenburg, E-Mail: henriette.kammer@
gmx.net

Kienzler, Peter, Dr., Scherrer AG, Hydrologie und Hochwasserschutz, Schönmattdstr. 8, 4153
Reinach, E-Mail: kienzler@scherrer-hydrol.ch

Klein, Tommy, Agroscope Reckenholz-Tänikon, Reckenholzstr. 191, 8046 Zürich, E-Mail:
tommy.klein@agroscope.admin.ch

Koch, Hagen, Dr. rer. nat., Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung Forschungsbereich II
Klimawirkung und Vulnerabilität, Telegrafenberg A62/2.09, 14412 Potsdam, E-Mail: Hagen.
Koch@pik-potsdam.de

Kotlarski, Sven, Dr., Institut für Atmosphäre und Klima IAC, ETH Zürich, Universitätsstrasse
16, 8092, Zürich, E-Mail: sven.kotlarski@env.ethz.ch

Liechti, Katarina, Gruppe Hydrologische Vorhersagen, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 8903
Birmensdorf, E-Mail: kaethi.liechti@wsl.ch

Margreth, Michael, Soilcom GmbH, Probusweg 22, 8057 Zürich, E-Mail: michaelmargreth@
yahoo.com

Meißner, Ralph, Prof. Dr., Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Boden-
physik, Lysimeterstation, Dorfstraße 55, 39615 Falkenberg, E-Mail: ralph.meissner@ufz.de

Morgenschweis, Gerd, Prof., Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal, Pauluskirchstr. 7, 42285 Wuppertal, E-mail: morgen@uni-wuppertal.de

Mueller, Matthias H., Umweltgeowissenschaften, Universität Basel, Bernoullistrasse 30, 4056 Basel, E-Mail: matthias.mueller@unibas.ch

Ollesch, Gregor, PD Dr., Flussgebietsgemeinschaft Elbe, Geschäftsstelle, Otto-von-Guericke-Straße 5, 39104 Magdeburg, E-Mail: gregor.ollesch@fgg-elbe.de

Osenbrück, Karsten, Dr., Water & Earth System Science (WESS) Competence Cluster, c/o University of Tübingen, Hölderlinstraße 12, D-72074, Tübingen, E-Mail: karsten.osenbrueck@uni-tuebingen.de

Paul, Gundula, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Bodenphysik, Brückstraße 3a, 39114 Magdeburg, E-Mail: gundula.paul@ufz.de

Pfaundler, Martin, Dr., Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wasser, 3003 Bern, E-Mail: martin.pfaundler@bafu.admin.ch

Pflugshaupt, Christoph, Hydrologische Vorhersagen, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, E-Mail: pflugshc@student.ethz.ch

Pfützner, Bernd, Dr., Büro für Angewandte Hydrologie, Köberlesteig 6, D-13156 Berlin, E-Mail: Bernd.Pfuetzner@bah-berlin.de

Pohle, Ina, Dipl.-Hydrol., Brandenburgische Technische Universität Cottbus Lehrstuhl Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus, E-Mail: Ina.Pohle@tu-cottbus.de

Raiber, Sebastian, B.Sc. Bioenergie, Hochschule Rottenburg, E-Mail: raiber.sebastian@googlemail.com

Reggiani, Paolo, Dr., RWTH Aachen, Wuellnerstrasse 5b, 52056 Aachen und Deltares, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, E-Mail: paolo.reggiani@deltares.nl

Rothstein, Benno, Prof. Dr. Geowissenschaftliches Ressourcenmanagement, Hochschule Konstanz, Fakultät Bauingenieurwesen, Brauneggerstr. 55, D-78462 Konstanz, E-Mail: rothstein@htwg-konstanz.de

Salzer, Friedrich, Abt. BD3-Hydrologie und Geoinformation, Amt der NÖ Landesregierung, Landhausplatz 1, Haus 13, A-3109 St. Pölten, E-Mail: friedrich.salzer@noel.gv.at

Schädler, Bruno, Dr., Geographisches Institut, Gruppe Hydrologie & Oeschger Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern, E-Mail: bruno.schaedler@giub.unibe.ch

Scherrer, Simon, Dr., Scherrer AG, Hydrologie und Hochwasserschutz, Schönmatstr. 8, 4153 Reinach, E-Mail: scherrer@scherrer-hydrol.ch

Schneider, Ulrich, Gruppe Hydrologische Vorhersagen, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 8903 Birmensdorf, E-Mail: ulrich.schneider@wsl.ch

Schwientek, Marc, Dr., Water & Earth System Science (WESS) Competence Cluster, c/o University of Tübingen, Hölderlinstraße 12, D-72074 Tübingen, E-Mail: marc.schwientek@uni-tuebingen.de

Selle, Benny, Dr., Water & Earth System Science (WESS) Competence Cluster, c/o University of Tübingen, Hölderlinstraße 12, D-72074 Tübingen, E-Mail: benny.selle@uni-tuebingen.de

Staudinger, Barbara, Dr., Hydrographischer Dienst, Amt der Salzburger Landesregierung, Michael-Pacher-Str. 36, A-5020 Salzburg, E-Mail: barbara.staudinger@salzburg.gv.at

Troch, Peter A., University of Arizona, Department of Hydrology and Water Resources, 1133 E James E. Rogers Way, 85721 Tucson, E-Mail: patroch@hwr.arizona.edu

Van der Krogt, Wil, Deltares, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, E-Mail: wil.vanderkrogt@deltares.nl

Volken, David, Dr., Bundesamt für Umwelt, 3003 Bern, E-Mail: david.volken@bafu.admin.ch

Walther, Jörg, Dr., DHI-WASY GmbH, Niederlassung Dresden, Comeniusstraße 109, D-01309 Dresden, E-Mail: J.Walther@dhi-wasy.de

Walther, Petra, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Zur Wetterwarte 3, D-01109 Dresden, E-Mail: Petra.Walther@smul.sachsen.de

Wesselkamp, Daniel, RWTH Aachen, Wuellnerstrasse 5b, 52056 Aachen, E-Mail: daniel.wesselkamp@rwth-aachen.de

Wolf, Erhard, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Zur Wetterwarte 3, D-01109 Dresden, E-Mail: Erhard.Wolf@smul.sachsen.de

Zappa, Massimiliano, Dr., Gruppe Hydrologische Vorhersagen, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 8903 Birmensdorf, E-Mail: massimiliano.zappa@wsl.ch

Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Bisher erschienene Hefte

- Heft 01.02 Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleitern und Oberflächengewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2002 am 20./21. März 2002 in Suderburg
Herausgeber: Hartmut Wittenberg und Matthias Schöniger
210 Seiten, 63 Abbildungen, Format A4
ISBN: 3-936514-22-4 vergriffen
- Heft 02.02 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Beiträge zum Seminar am 7./8. November 2002 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
201 Seiten, 43 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-936514-26-7 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erschienen als Heft 02.03
Beiträge zum Seminar am 12./13. Juni 2003 in Weimar
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-58-3 vergriffen
- Heft 03.03 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 12./13. Mai 2003 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 32 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erscheinen als Heft 03.05
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
- Heft 04.03 Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2003 am 20./21. März 2003 in Freiburg i.Br.
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
Band1 Vorträge, 270 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 194 Seiten 105 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-59-1 vergriffen
- Heft 05.04 Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2004 am 22./23. März 2004 in Potsdam
Herausgeber: Axel Bronstert, Annegret Thieken, Bruno Merz,
Michael Rode, Lucas Menzel
Band1 Vorträge, 221 Seiten, 88 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 315 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-18-6 beide Bände zusammen 45 EUR
- Heft 06.04 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 17./18. Juni 2004 in Münster
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
172 Seiten, 61 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-19-4 vergriffen

- Heft 07.04 Niedrigwassermanagement
Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Gero Koehler
172 Seiten, 82 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-47-X vergriffen
- Heft 08.05 Hochwasser-Gefahrenkarten
Teil 1: Erarbeitung und Nutzung von Hochwassergefahrenkarten
Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 24. November 2004 in Erfurt
Teil 2: Zonierungssystem und Risikomodellierung in der Versicherungswirtschaft
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
140 Seiten, 34 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-48-8 vergriffen
- Heft 03.05 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Aktualisierte Neuauflage von Heft 03.03
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
- Heft 09.05 Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen
Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
159 Seiten, 44 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-67-4 vergriffen
- Heft 10.05 Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft –
von der Theorie zum Anwendungsfall
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005 am 22./23. März 2005 in Aachen
Herausgeber: Heribert Nacken, Sabine Bartussek, Hani Sewilam
314 Seiten, 131 Abbildungen, 25 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-68-2 42 EUR, CD 29 EUR
- Heft 11.05 Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte
Beiträge zum Seminar am 2./3. Juni 2005 in Braunschweig
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 75 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-80-1 38 EUR, CD 29 EUR
- Heft 12.05 Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie:
Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik
Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz
Herausgeber: Matthias Adler und Hans-B. Kleeberg
172 Seiten, 120 Abbildungen, 8 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-90-9 38 EUR, CD 29 EUR
- Heft 13.05 Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele
Herausgeber: Axel Bronstert
Monographie, 2005
148 Seiten, 81 Abbildungen, 12 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-91-7 38 EUR, CD 29 EUR

- Heft 14.06 Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen
Aktualisierte Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
205 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-30-4
ISBN-13: 978-3-939057-30-7 38 EUR, CD 29 EUR
- Heft 15.06 Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006 am 22./23. März 2006
an der Universität der Bundeswehr München
Herausgeber: Markus Disse, Karin Guckenberger, Sabine Pakosch,
Alpaslan Yörük, Astrid Zimmermann
Band 1 Vorträge 1, 278 Seiten
Band 2 Vorträge 2, 338 Seiten beide Vortragsbände zusammen 50 EUR
Band 3 Poster, 280 Seiten Posterband zusätzlich/alleine 15 EUR
ISBN-10: 3 939057-31-2
ISBN-13: 978-3-939057-31-4
- Heft 16.06 Niederschlag-Abfluss-Modellierung
Beiträge zum Workshop am 10./11. April 2006 in Trier
Herausgeber: Markus Casper und Marcus Herbst
195 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-55-X
ISBN-13: 978-3-939057-55-0 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 17.06 Dezentraler Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg
188 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-56-8
ISBN-13: 978-3-939057-56-7 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 18.06 Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzept
Beiträge zum Seminar am 6./7. November 2006 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg, Heribert Nacken
232 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-57-6
ISBN-13: 978-3-939057-57-4 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 19.07 Dezentraler Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg
196 Seiten, Format A4
ISBN-13: 978-3-940173-03-4 48 EUR, CD 29 EUR

- Heft 20.07 Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007 am 22./23. März 2007
an der Universität Rostock
Herausgeber: Konrad Miegel, Ellen-Rose Trübger, Hans-B. Kleeberg
Band 1 Vorträge, 276 Seiten
Band 2 Poster, 17 Seiten beide Bände zusammen 60 EUR , CD 29 EUR
ISBN: 978-3-940173-04-1
- Heft 21.07 Verdunstung
Beiträge zum Seminar am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam
Herausgeber: Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg
252 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-05-8 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 22.07 EU-Hochwasserrichtlinie
Wohin geht die Reise beim Europäischen Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 19./10. November 2007 in Koblenz
Herausgeber: Heribert Nacken
126 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-44-7 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 23.08 Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung
– Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008 am 27./28. März 2008
an der Leibniz Universität Hannover
Herausgeber: Uwe Haberlandt, Bernd Riemeier,
Max Billib, Hans-Reinhard Verworn, Hans-B. Kleeberg
300 Seiten, Format A4, mit Poster-CD 48 EUR, CD 29 EUR
ISBN: 978-3-940173-96-6
- Heft 24.08 Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?
Beiträge zum Symposium am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
256 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-97-3 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 25.09 EU-Hochwasserrichtlinie
In drei Schritten zur Umsetzung
Beiträge zum Seminar am 19. Februar 2009 in Magdeburg
Herausgeber: Heribert Nacken
126 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941089-53-2 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 26.09 Hydrologische Systeme im Wandel
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2009 am 26./27. März 2009
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Herausgeber: Nicola Fohrer, Britta Schmalz,
Georg Hörmann, Katrin Bieger
196 Seiten, Format A4 48 EUR, CD 29 EUR
ISBN: 978-3-941089-54-9

- Heft 27.10 Auen und Hochwasser
Beiträge zum Internationalen Symposium am 10./11. Februar 2010
in Ingolstadt
Herausgeber: Bernd Cyffka, Hans-B. Kleeberg
226 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-08-3 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 28.10 Abflüsse aus extremen Niederschlägen
Beiträge zum 2. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung
am 14./15. September 2009 in Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz
245 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-22-9 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 29.10 Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von
Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2010 am 25./26. März 2010
an der Technischen Universität Braunschweig
Herausgeber: Günter Meon
283Seiten, Format A4, mit Poster-CD
ISBN: 978-3-941897-49-6 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 30.11 Hydrologie & Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2011 am 24./25. März 2011
an der Technischen Universität Wien
Herausgeber: Günter Blöschl, Ralf Merz
394 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-79-3 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 31.12 Wasser ohne Grenzen
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2012 am 22./23. März 2012
an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Herausgeber: Markus Weiler
413 Seiten, Format A4, mit Poster-CD
ISBN: 978-3-942964-38-8 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 32.13 Wasserressourcen im globalen Wandel : Hydrologische Grundlagen -
von der Messung zur Anwendung
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2013 am 4.-6. April 2013
an der Universität Bern
Herausgeber: Rolf Weingartner, Bruno Schädler
199 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-942964-89-0 50 EUR, CD 29 EUR

Mitglieder der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften erhalten auf den Preis einen Nachlass von 20 %

