



# Behandlung künstlicher Speicher und Überleitungen in der alpinen Niederschlags-Abfluss-Vorhersage

Johannes Wesemann · Hubert Holzmann · Karsten Schulz · Mathew Herrnegger

Online publiziert: 3. Juli 2018  
 © Der/die Autor(en) 2018

**Zusammenfassung** Ein großer Anteil der Durchflusspegel in Österreich weist eine anthropogene Beeinflussung durch Speicherbewirtschaftung oder künstliche Überleitungen auf. Die gemessenen Zeitreihen sind nur eingeschränkt zur Erstellung und Kalibrierung von hydrologischen Niederschlags-Abfluss-Modellen verwendbar, da diese Modelle üblicherweise ungestörte natürliche Systeme simulieren. Vor allem der Verlust der natürlichen Dynamik und der saisonalen Verschiebung des Abflusses in alpinen Kopfeinzugsgebieten stellt dabei eine Herausforderung dar. Zusätzlich fehlen häufig kleinräumige Messdaten in Untereinzugsgebieten. Trotz beeinflusster Durchflussmessdaten werden in der Praxis jedoch kalibrierte Niederschlags-Abfluss-Modelle benötigt, um ingenieurhydrologische Fragestellungen, auch für kleinere Untereinzugsgebiete, zu beantworten.

Am Beispiel der stark anthropogen beeinflussten Stubache in Salzburg wird gezeigt, wie aus sekundären Messdaten wie Wasserständen in Speicherseen, Wasserfassungsdaten sowie Druckleitungsdaten, natürliche Abflüsse für sehr kleine Einzugsgebiete abgeschätzt und zur Kalibrierung des N-A-Modells COSERO verwendet werden können. Hierfür wird für Einzugsgebiete mit Speicherseen eine Bilanzierung aller Zu- und Abflüsse sowie die Veränderung des gespeicherten Volumens durchgeführt und dadurch der lokale Abfluss des Gebiets abgeschätzt. Teilweise können auch Daten der Wasserfassungen und Beileitungen verwen-

det werden, um die Abflussbeiträge aus den Zubringergebieten zu ermitteln. Messunsicherheiten und zeitliche Verschiebungen werden dabei durch zeitliche Aggregation ausgeglichen, was zu Zeitreihen mit 12- und 24-h-Auflösung führt. Die hydrologischen Simulationen zeigen meist gute Ergebnisse. Es konnten für den NSE und den KGE Spitzenwerte von 0,79 (0,79) und 0,85 (0,79) und mittlere Werte von 0,64 (0,57) bzw. 0,71 (0,58) für den Kalibrierungszeitraum (Validierungszeitraum) erreicht werden.

## Dealing with artificial reservoirs and diversions in alpine rainfall-runoff forecasting

**Abstract** A large number of the Austrian runoff gauging stations is influenced by reservoir management or artificial diversions. The measured time series are of limited use for the design and calibration of hydrological rainfall-runoff models since they can usually only reproduce natural flow systems. Especially in alpine headwater catchments, the loss of the natural dynamics and the seasonal shift of the discharge can be challenging. Furthermore, small scale information on the subbasin level is usually missing. Despite the missing discharge data, calibrated hydrological rainfall-runoff models are required for practical uses and engineering problems like reservoir management.

In this study, it is demonstrated how the natural discharge can be derived for very small subbasins from secondary information such as reservoir water levels, measurements at water intake structures and diversions for the highly disturbed Stubache catchment in Salzburg. This data is further used to calibrate the rainfall-runoff model COSERO. For subbasins with reservoirs, the local discharge is derived by balancing all inflows and outflows and the change in stored volume. Partly, the time series from the water intakes, the diversions and the pressure lines can

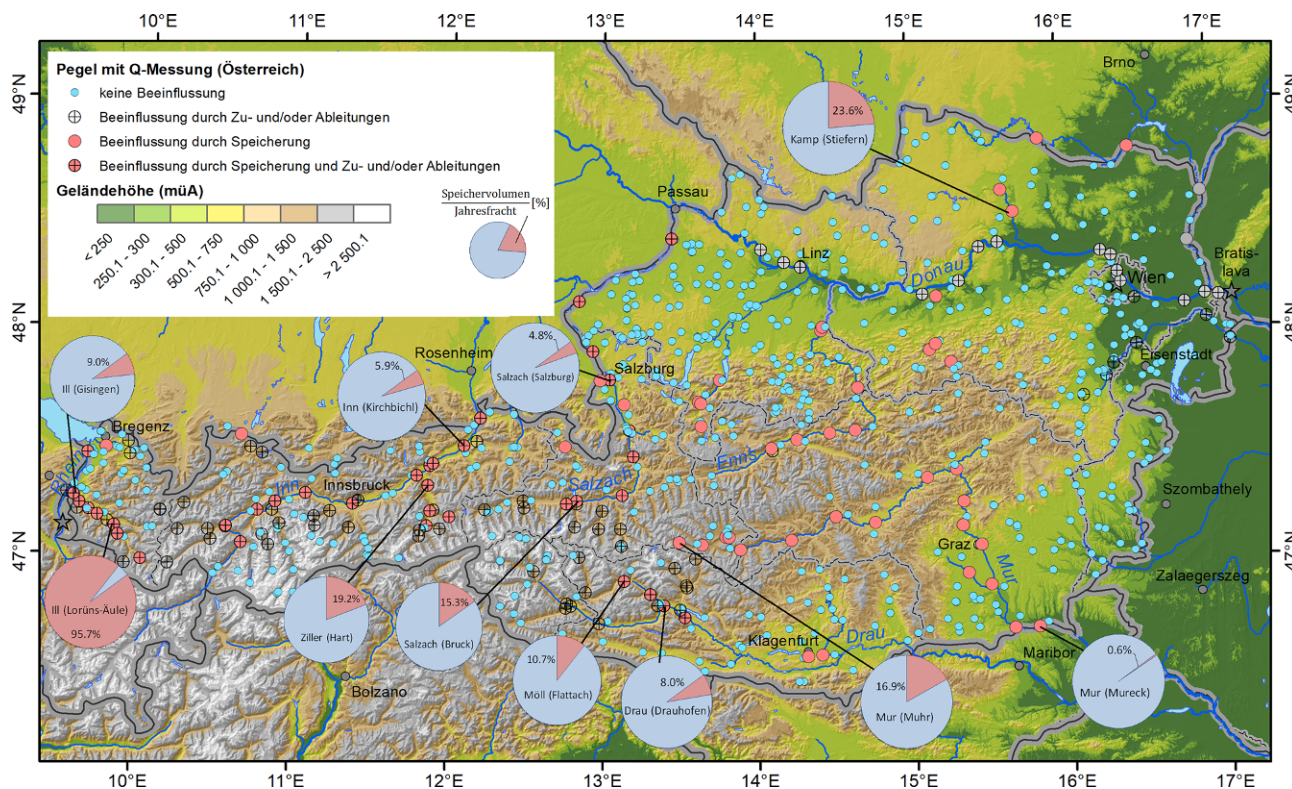
be used to estimate the flows from the feeding catchments. Uncertainties in the measurements and time shifts are being compensated by temporal aggregations leading to time series with 12- and 24-hours resolution. The hydrological simulations show mainly good results. For the Nash-Sutcliffe Efficiency and the Kling-Gupta Efficiency top values of 0.79 (0.79) and 0.85 (0.79) and mean values of 0.64 (0.57) and 0.71 (0.58) could be achieved for the calibration (validation) period.

## 1 Einleitung

Die alpine Topografie mit ihren großen Höhenunterschieden in Kombination mit hohen Niederschlagssummen und relativ niedrigen Verdunstungswerten begünstigen die Wasserkraftproduktion in Österreich. So deckte Österreich im Zeitraum 2010 bis 2016 im Mittel 61,7% des Inlandstromverbrauchs mittels Wasserkraft. Der Anteil der Wasserkraftproduktion ist jedoch seit den 1950er- bis 1960er-Jahren, als noch rund 85% des Stromverbrauchs durch Wasserkraft gedeckt wurde, deutlich gesunken. Dieser Rückgang ist durch den Zuwachs des Stromverbrauchs begründet. Derzeit (2010–2016) werden rund 41,2% durch Laufwasserkraftwerke und 20,5% durch Speicherkraftwerke gewonnen (E-Control 2018).

Der Bau und Betrieb der Wasserkraftwerke (Lauf-, Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke) hat Auswirkungen auf das natürliche Abflussgeschehen. In den Stauseen der Kopfeinzugsgebiete wird Wasser zwischengespeichert und es kommt zu einer zeitlichen Verschiebung des Abflusses in den Unterliegergebieten. Je nach Konstruktion und Betriebsweise kann zwischen Tages-, Wochen-, Monats- und Jahresspeichern unterschieden werden, was zu unterschiedlichen Änderungen in der Dynamik und der Saisonalität des Abflusses führt. Zur Erweiterung und Optimierung der zur Verfügung stehenden Wassermenge können wei-

DI J. Wesemann ·  
 ao. Univ.-Prof. DI Dr. H. Holzmann ·  
 Univ.-Prof. Dipl.-Geoökol. Dr. K. Schulz ·  
 DI Dr. M. Herrnegger (✉)  
 Institut für Wasserwirtschaft,  
 Hydrologie und konstruktiven  
 Wasserbau (IWHW), Universität  
 für Bodenkultur Wien,  
 Muthgasse 18, 1190 Wien, Österreich  
[mathew.herrnegger@boku.ac.at](mailto:mathew.herrnegger@boku.ac.at)



**Abb. 1** Pegel mit Durchflussmessung in Österreich. Dargestellt sind Messstellen (i) ohne Beeinflussung, (ii) beeinflusst durch Zu- und/oder Ableitung, (iii) beeinflusst durch Speicherung und (iv) beeinflusst durch Speicherung und Zu-/oder Ableitungen. Die Diagramme zeigen für ausgewählte Pegel und Fließgewässer das Verhältnis zwischen künstlichem Speichervolumen im Einzugsgebiet und Jahresfracht. (Quelle: BMLFUW 2015)

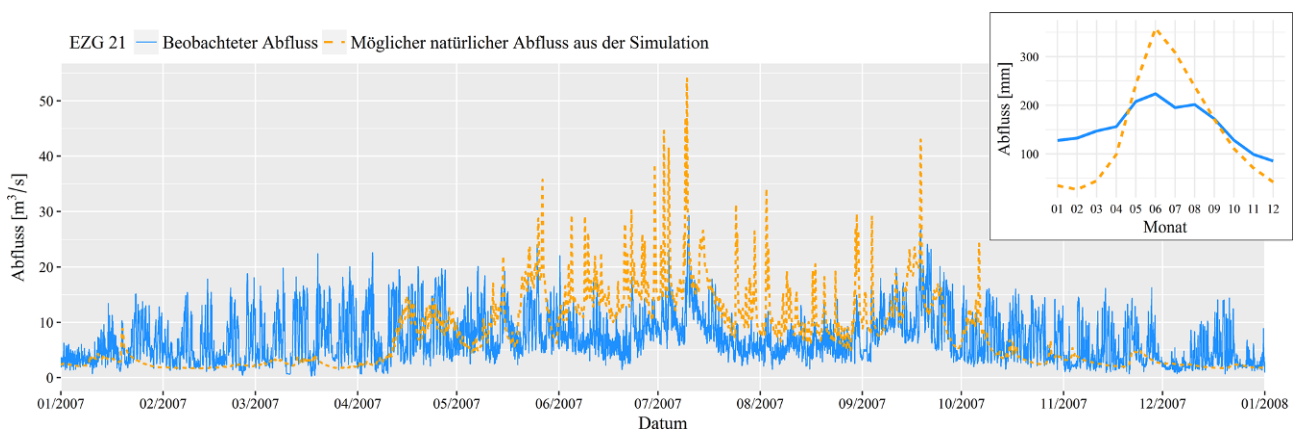
ters Überleitungen eingerichtet werden, um zusätzlich Wasser aus Nachbareinzugsgebieten für die Energieproduktion bereitzustellen. Dies hat eine Änderung der rechnerischen Einzugsgebietsgröße zur Folge, wobei sich diese bei Ableitungen verkleinert und bei Zuleitungen vergrößert. Der Einfluss von Laufwasserkraftwerken ist zeitlich begrenzt, wobei hier in erster Linie ein möglicher Schwallbetrieb die natürlichen Verhältnisse im Abfluss verändert.

Die Aktivitäten zur Energieproduktion beeinflussen die in den Unterliegergebieten befindlichen Durchflussmessungen, da die Messwerte nicht mehr die natürlichen Bedingungen wiedergeben. Von in Summe 745 ausgewerteten Pegeln mit Durchflussmessungen in Österreich (BMLFUW 2007) weisen 15% eine Beeinflussung durch Speicherung und 13% eine Beeinflussung durch Zu- und/oder Ableitungen auf. Bei Betrachtung der Pegel mit einer Einzugsgebietsgröße über 500 km<sup>2</sup> sind 43% bzw. 30% durch Speicherung bzw. Zu- und/oder Ableitungen beeinflusst (BMLFUW 2015). In Abb. 1 ist die räumliche Verteilung der beeinflussten und

unbeeinflussten Pegel entsprechend BMLFUW (2015) dargestellt. In den alpinen Einzugsgebieten der Ill, Inn, Salzach und Drau sind, zumindest an den Hauptgewässern, alle Pegel durch Zu- und/oder Ableitungen und Speicherung beeinflusst. In moderateren Lagen wie z. B. in den Einzugsgebieten der Enns-, Mur-, Erlauf-, Kamp- und Thaya-Pegel, findet sich zum Teil nur eine Beeinflussung durch Speicherung. Als Maß für den Einfluss der Speicherung auf das Abflussgeschehen ist in Abb. 1 das prozentuelle Verhältnis zwischen gesamtem Speichervolumen im Oberliegereinzugsgebiet und mittlerer Jahresfracht für ausgewählte Pegel dargestellt. Dabei wird angenommen, dass unabhängig von der Betriebsweise das gesamte Speichervolumen potenziell zur Speicherung zur Verfügung steht. Diese Verhältniszahl ist stark mit der Einzugsgebietsgröße und der damit verbundenen Größe der Jahresfracht verbunden. So können beispielsweise am Pegel Lorüns-Äule an der Ill mit einem orografischen Einzugsgebiet von 535,2 km<sup>2</sup> fast 96% der Jahresfracht in den Talsperren gespeichert werden.

Flussab, am Pegel Gisingen (1281 km<sup>2</sup>) sinkt dieser Wert bereits auf 9%. Bei einem Zubringer zum Inn, der Ziller (Pegel Hart; 1094,7 km<sup>2</sup>), können 19% der Jahresfracht gespeichert werden. Für den gesamten Inn beträgt dieser Wert knapp 6%. Obwohl im Oberlauf der Mur fast 17% der Jahresfracht gespeichert werden können, sinkt dieser Wert auf lediglich 0,6%, sobald man die gesamte österreichische Mur betrachtet. Dementsprechend sind auch die Pegel an der Donau zwar durch die vorher genannten Aktivitäten in den Kopfeinzugsgebieten beeinflusst, die Größe des Einflusses ist aber in Relation zum Abflussvolumen marginal.

Abb. 2 zeigt – exemplarisch dargestellt für den Pegel Uttendorf an der Stubache im Pinzgau – die typisch zu erwartenden Messwerte eines Durchflusspegels mit Beeinflussung durch Speicherung und Zuleitung. Im Einzugsgebiet können rund 34% der Jahresfracht in Speicherseen zurückgehalten werden (BMLFUW 2015) und dementsprechend kommt es zu einer starken Vergleichmäßigung des Abflusses im Jahresgang im Vergleich zu einem



**Abb. 2** Exemplarische Darstellung eines durch Speicherung und Zuleitung beeinflussten Pegels und als Referenz eine Simulation des natürlichen Regimes (60-Minuten-Daten bzw. langjährige mittlere Abflüsse)

**Tab. 1** Wasserbilanzkomponenten für die Stubache. (digHAO, BMLFUW 2007)

Variable	Wert
Gebietsniederschlag aus WB [mm]	1614
Akt. Gebietsverdunstung [mm]	283
Pot. Gebietsverdunstung aus 3.2 [mm]	374
Mittlere Abflusshöhe [mm]	1331

**Tab. 2** Nummerierung und Namen der Untereinzugsgebiete (EZG) der Stubache, sowie deren natürliche und akkumulierte (inklusive Zuleitungen, fett dargestellt) Einzugsgebietsgröße und die mittlere Höhenlage

EZG Nummer	EZG Name	Einzugsgebietsgröße [km <sup>2</sup> ]	Einzugsgebietsgröße akkumuliert mit Beileitungen [km <sup>2</sup> ]	Mittlere Höhe [m. ü. A.]
1	Beimsee	4,13	4,13	2628
2	Seetoerbach	0,40	0,40	2447
3	Oberer Landeckbach/Moosbach	6,09	6,09	2570
4	Unterer Landeckbach	1,91	1,91	2402
5	Amersee	2,22	2,22	2501
6	Salzplattensee	0,52	0,52	2461
7	Eisbach/Oberer Oedt bach	1,85	1,85	2601
8	Weisssee	5,45	<b>10,04</b>	2562
9	Schotterleitenbach	1,65	1,65	2376
10	Oberer Wurfbach	3,63	3,63	2593
11	Ödwinkelbach	9,50	9,50	2568
12	Tauernmoossee	12,91	<b>50,25</b>	2420
13	Gruensee	5,47	5,47	2131
14	Unterer Wurfbach/Roetentrogbach	4,12	4,12	2012
15	Ausgleichsbecken Enzingerboden	3,58	<b>63,42</b>	1787
16	Wiegenbachfassung	2,03	2,03	1897
17	Oedbach	20,25	20,25	1977
18	KW Schneiderau	11,27	<b>96,96</b>	1833
19	Schrofenbach	1,54	1,54	1660
20	Restwasser Uttendorf	42,32	42,32	1604
21	KW Uttendorf Summenpegel	0,52	<b>141,34</b>	1021

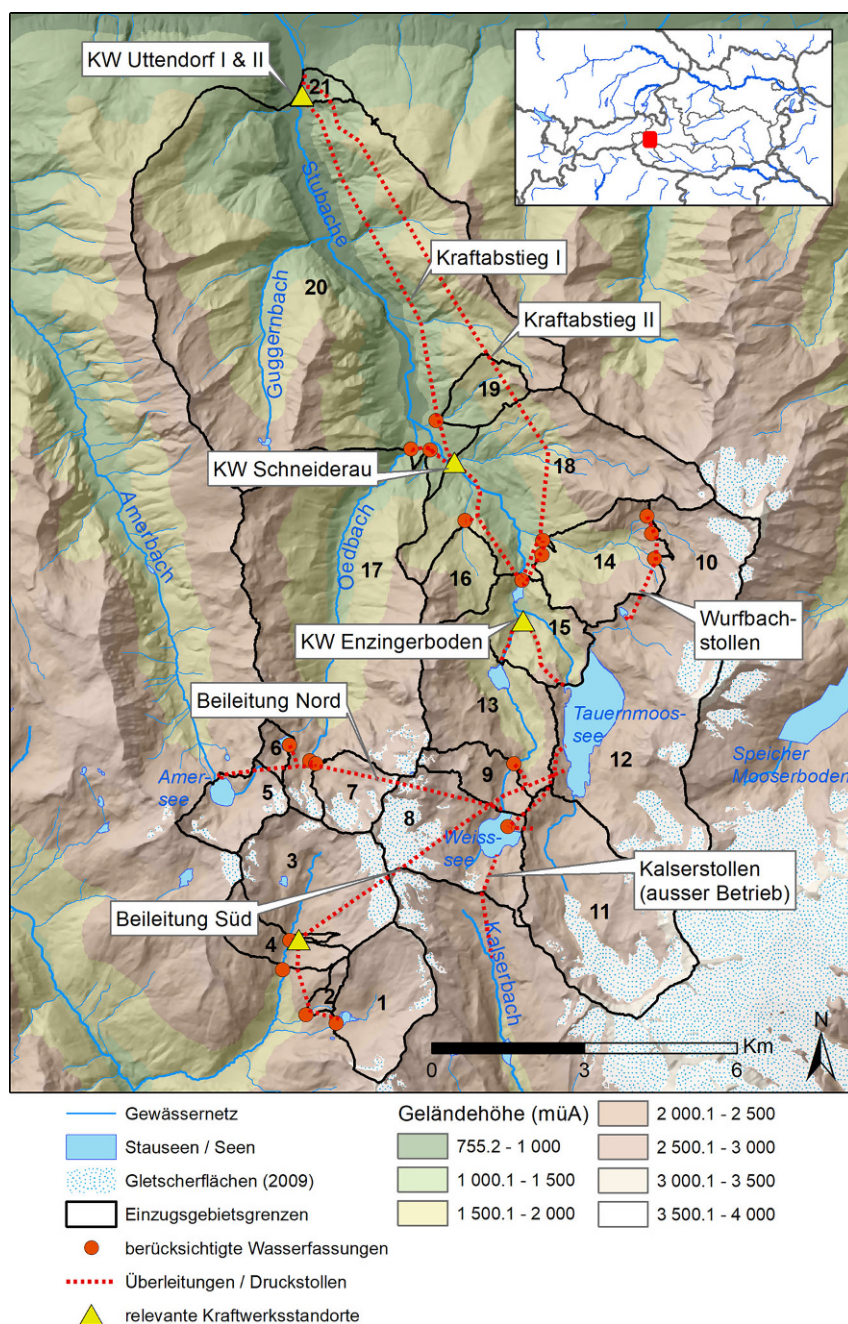
natürlichen System. Einerseits ist eine nennenswerte Niederwasseraufhöhung in den Wintermonaten und andererseits eine Reduktion der saisonalen Spitzen zum Zeitpunkt der Schneeschmelze ersichtlich. Die zeitlich hochaufgelöste beobachtete Ganglinie zeigt einen durch den Speicherbetrieb be-

dingten oszillierenden Verlauf, wobei in einzelnen Perioden ein Wochenzyklus erkennbar ist.

Vor allem in den durch Speicherung beeinflussten Einzugsgebieten wie der Stubache besteht somit zwischen Beobachtung und dem zu erwartenden Signal des natürlichen Systems keine

Ähnlichkeit. Bei vielen ingenieurhydrologischen Fragestellungen, wie der Ermittlung von Hochwasserbemessungswerten, Abflussuntersuchungen oder der Bereitstellung von Hochwasser- oder Zuflussprognosesystemen für den optimierten Betrieb von Wasserkraftwerken, sind Niederschlags-Ab-





**Abb. 3** Einzugsgebiet der Stubache und deren Lage in Österreich (kleine Karte – rot). Dargestellt sind die Geländehöhen, die Ausdehnung der Gletscher sowie die Wasserfassungen, Beileitungen/Druckstollen, Speicherseen und relevante Kraftwerke. (Quellen: ÖBB, SAGIS, TIRIS, Geoland.at, Gletscherinventur 2009, digHAO)

fluss-Modelle notwendig. Für die Kalibrierung der Modellparameter dieser Modelle ist man jedoch immer noch auf das Vorhandensein von ungestörten Durchflussmessungen angewiesen. Holländer et al. (2009, 2014) zeigen beispielsweise ein recht ernüchterndes Bild zu Niederschlags-Abfluss-Simulationen, wenn keine Beobachtungen zum Abfluss vorhanden sind. Wie oben

dargelegt, fehlen jedoch in alpinen Gebieten aufgrund anthropogener Aktivitäten vielfach Abflussganglinien dieser natürlichen Systeme. Zusätzlich finden oftmals in den Untereinzugsgebieten, welche ebenfalls durch die Modelle simuliert werden sollen, keine Messungen statt und Abflussdaten können nicht direkt verwendet werden.

Dieser Beitrag präsentiert auf Basis dieser Herausforderungen eine Methode, wie aus sekundären Messdaten wie Wasserständen in Speicherseen, Wasserfassungsdaten sowie Druckleitungsdaten natürliche Abflüsse abgeschätzt werden können. Exemplarisch dargestellt für das Einzugsgebiet der Stubache, werden diese zeitlich hochaufgelösten Zeitreihen zur Kalibrierung und Validierung des Niederschlags-Abfluss-Modells COSERO verwendet.

## 2 Datengrundlage und Methodik

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet dient das Einzugsgebiet der Stubache, einem südlichen Zubringer der Salzach. Die ÖBB-Infrastruktur AG betreibt hier eine Kraftwerksgruppe bestehend aus sieben Speicherseen und vier Kraftwerken, welche einen Hauptanteil an der Deckung des Energiebedarfs für den Bahnverkehr trägt. Das Einzugsgebiet hat eine natürliche Größe von 126,6 km<sup>2</sup>, wird jedoch durch Überleitungen aus umliegenden Einzugsgebieten um 14,74 km<sup>2</sup> auf 141,34 km<sup>2</sup> erweitert. Die südlichen Gipfelregionen befinden sich auf rund 3450 m. ü. A und der Gebietsauslass auf 790 m. ü. A.

Tab. 1 zeigt eine Übersicht der Wasserbilanzkomponenten für das gesamte modellierte Gebiet der Stubache aus dem digitalen hydrologischen Atlas Österreichs (digHAO; BMLFUW 2007). Die Bilanzgrößen wurden durch gewichtete Mittelung der Werte der Teileinzugsgebietsflächen errechnet. Für den Bezugszeitraum 1961–1990 ergibt sich ein mittlerer Gebietsniederschlag von 1614 mm pro Jahr. Die aktuelle Gebietsverdunstung beträgt 283 mm, was zu einer mittleren Abflusshöhe von 1331 mm pro Jahr führt. Es ist auffällig, dass die Verdunstung sehr gering ausfällt, was auf die hochalpine Lage des Gebiets zurückzuführen ist.

Die Hydrologie der Stubache ist maßgeblich von den 29 Wasserfassungen sowie den Bei- und Überleitungen und den Speicherseen beeinflusst. Dieses System, sowie die in dieser Untersuchung verwendete Einzugsgebietsgliederung sind in Abb. 3 dargestellt. Die Speicherseen werden von der ÖBB-Infrastruktur AG im Jahresausgleich betrieben und verschieben dadurch das natürliche saisonale Abflussgeschehen. Der Speicher Tauernmoossee (55,3 Mio. m<sup>3</sup> Speichervolumen – EZG 12) mit

**Tab. 3** Datengrundlage für den Aufbau, den Betrieb und die Kalibrierung von COSERO für das Einzugsgebiet der Stubache

Verwendungszweck	Daten	Datenursprung	Räumliche/Zeitliche Auflösung
Charakterisierung und Einteilung des Gebiets	Einzugsgebietsgrenzen	ÖBB-Infrastruktur	–
	Landnutzung	CORINE (Umweltbundesamt 2017)	100 m
	Hydrogeologie/Bodentyp	digHAO (BMLFUW 2007)	–
	Digitales Geländemodell	GEOLAND (2017)	10 m
	Wasserfassungen/Beileitungen	SAGIS TIRIS	–
	Gletscherflächen	Gletscherinventur (Fischer et al. 2015)	–
Parametrisierung/ Grundparameterfeld	Schmelzfaktoren	Kling et al. (2006)	1 km
	Langfristige mittlere monatliche Lufttemperatur	Hiebl et al. (2009)	1 km
	Vegetationsparameter	Kling (2006); Herrnegger et al. (2012)	1 km
	Bodenwasserspeicherkapazität	Eder et al. (2005)	1 km
	Speicherparameter	Schulz et al. (2016)	–
Meteorologischer Input	Lufttemperatur	INCA	1 km/60 min
	Niederschlag	INCA	1 km/60 min
Evaluierung des Modells	Abflussdaten (siehe Tab. 4)	ÖBB-Infrastruktur HZB	60 min
	Schneebedeckung (optional)	CryoLand (2017)	250/500 m

dem Kraftwerk Enzingerboden wird zusätzlich zum lokalen Zufluss über die Beileitung Süd, den Weisssee (16 Mio. m<sup>3</sup> – EZG 8) und die damit verbundene Beileitung Nord sowie die obere Wurfbachfassung gespeist. Die Beileitung Süd fasst Wasser von vier Einzugsgebieten südlich des Alpenhauptkamms, inklusive eines 0,1 Mio. m<sup>3</sup> Speichersees, sowie den Abfluss eines Einzugsgebiets im Stubachtal. Die Beileitung Nord fasst die Einzugsgebiete und Speicherseen Ammersee (4,3 Mio. m<sup>3</sup> – EZG 5), Salzlattensee (1,1 Mio. m<sup>3</sup> – EZG 6) und drei weitere Wasserfassungen (EZG 7) und leitet diese in den Weisssee-Speicher. Die kleineren Speicher werden im Jahresausgleich bewirtschaftet, um die Wasserverfügbarkeit im Hauptspeicher zu optimieren. Über eine Druckleitung wird das Wasser aus dem Tauernmoossee im Kraftwerk Enzingerboden (81 MW) im Einzugsgebiet 15 abgearbeitet. Von dem dort befindlichen Ausgleichsbecken Enzingerboden wird das Wasser, zusammen mit dem Wasser aus den Zwischeneinzugsgebieten, auf zwei Druckleitungen aufgeteilt. Der Kraftabstieg II geht direkt zum Kraftwerk Uttendorf II (66 MW) am Gebietsauslass (EZG 21) und die zweite zum Kraftwerk Schneiderau (35 MW) im Einzugsgebiet 18. Von dort wird das Wasser, mit den zusätzlich gefassten Zuflüssen der anliegenden Einzugsgebiete, über den Kraftabstieg I zum Kraftwerk Ut-

tendorf I (27 MW – EZG 21) geleitet. Die Einzugsgebiete 19–21 entwässern auf natürlichem Wege und werden am Gebietsauslass mit den wiedereingeleiteten Abflüssen der Kraftwerke zusammengeführt und am Pegel Uttendorf gemessen (siehe Abb. 2). Die Gliederung des Einzugsgebiets erfolgt anhand der Wasserfassungen, Speicherseen und Messstellen und resultiert in 21 Untereinzugsgebieten mit einer Größe von 0,4–42,3 km<sup>2</sup>. Diese sind in Tab. 2 dargestellt.

## 2.2 Datengrundlage

In Tab. 3 sind die zum Aufbau, zur Parametrisierung, zum Betrieb und zur Evaluierung des hydrologischen Modells verwendeten Daten aufgelistet. Zur Einteilung des Einzugsgebiets und dessen Untereinzugsgebieten in Berechnungszellen mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften sind räumlich verteilte Daten wie zum Beispiel Landnutzung und Hydrogeologie notwendig. Eine detailliertere Beschreibung zum Modellaufbau findet sich in Wesemann et al. (2018). Als Modellinput werden die raum-zeitlich hochaufgelösten INCA-Niederschlags- und Temperaturanalysedaten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verwendet. INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis, Haiden et al. 2011; Haiden und Pistot-

nik 2009) ist das operationelle Analyse- und Nowcasting-System der ZAMG.

Für das Management der Speicherseen und der Energieproduktion betreibt die ÖBB-Infrastruktur AG ein umfangreiches Monitoringsystem im Stubachtal. So gibt es Online-Messungen der Durchflüsse an Ein- und Auslässen der Wasserfassungen und Überleitungen sowie Messungen des Wasserstands in den Speicherseen, anhand derer mittels Speicherinhaltslinien auf das aktuell gespeicherte Volumen rückgeschlossen werden kann. Wie in Tab. 4 angeführt, stellen diese Zeitreihen nicht den benötigten lokalen Abfluss des Einzugsgebietes dar, welcher zu Kalibrierung benötigt wird. Dieser muss daher in weiterer Folge mithilfe der vorhandenen Daten ermittelt und abgeschätzt werden.

## 2.3 Methodik

### 2.3.1 Ableitung lokaler Abflüsse

Mithilfe des hydrologischen Modells soll der lokale, natürliche Abfluss in den Einzugsgebieten simuliert werden. Die Informationen der lokalen Abflüsse der Vergangenheit werden üblicherweise zur Kalibrierung des N-A-Modells benötigt, da diese trotz gewisser Unsicherheiten durch Messfehler (z. B. McMillan et al. 2010) direkt zur Evaluierung der Simulationsgüte herangezogen



**Tab. 4** Verfügbare Abflussdaten und deren Zuordnung zu den Einzugsgebieten des Stubachtals

Art der Messung	Einzugsgebiet
Wasserstand	1, 5, 6, 8, 12, 13, 15
Abfluss – Beileitungen	Beileitung Süd (1–4 & 9); Beileitung Nord (5, 6, 7)
Abfluss – Wasserfassungen	3, 4, 10, 14, 17
Abfluss – Speicherentnahme	5, 6, 8 (Entnahme und Überlauf), 12, 15, 18
Abfluss – Bach/Fluss	20, 21 & 18 (teilweise)

gen werden können. Im Stubachtal ist dieser Abfluss jedoch in kaum einem Gebiet (vollständig) gemessen (siehe Tab. 4), weshalb dieser aus den vorhandenen Messungen der Durchflüsse in den Beileitungen und den Wasserstandsänderungen ermittelt werden muss.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise exemplarisch für das EZG 8 vorgestellt, eine detailliertere Beschreibung für jedes Einzugsgebiet ist in Wesemann et al. (2018) zu finden. In den Einzugsgebieten mit größeren Speicherseen (EZG 5, EZG 6, EZG 8, EZG 12) ist die Ableitung der natürlichen Abflüsse über eine Bilanzierung aller Zu- und Abflüsse sowie der Veränderung des gespeicherten Volumens möglich. Abb. 4 zeigt dies beispielhaft für das Einzugsgebiet 8 mit dem Speicher Weisssee. Der lokale, natürliche Gebietsabfluss  $Q_{EZG}$  kann wie folgt berechnet werden:

$$Q_{EZG} = Q_{Aus} + \Delta V / dt + Q_{Ue} - Q_{Nord} \quad (1)$$

wobei  $\Delta V$  über die Wasserstandsänderung ( $\Delta W$ ) ermittelt werden kann.

Bei der Berechnung der Abflüsse konnten für die Speicher zwei wichtige Aspekte festgestellt werden:

1. Die Wasserstandsmessungen unterliegen oftmals kleinen Schwankungen (z. B. Wellenschlag durch Wind), was zu einer Oszillation der abgeleiteten Volumendifferenzen zwischen zwei Zeitschritten führt. Man

erhält dadurch sehr unnatürliche Abflussschwankungen, welche so nicht verwendet werden können (siehe Abb. 7).

2. Die Abflussmessungen der Beileitungen finden meist an den Auslässen statt, werden jedoch an den Wasserfassungen berücksichtigt. Daher findet eine zeitliche Verschiebung des Abflusses – bedingt durch die Fließzeiten im Abschnitt – statt, die in diesem Rahmen jedoch nicht bestimmt wurden. Vor allem zu Zeiten der Speicherbewirtschaftung kann es daher zu Fehlschätzungen in der Berechnung des lokalen Abflusses bis hin zu negativen Werten kommen.

Um die Unsicherheiten, die aus diesen zwei Effekten resultieren, zu verringern und trotzdem noch Abschätzungen des lokalen Abflusses zu erhalten, wurden für die Speichereinzugsgebiete die 24-Stunden-Mittelwerte gebildet. Die Wasserbilanz kann dadurch erhalten, negative Werte ausgeschlossen und die Datenreihe zur Kalibrierung des Modells verwendet werden.

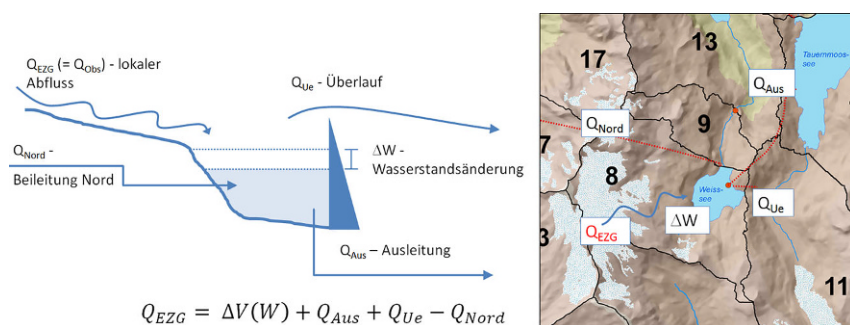
In manchen Einzugsgebieten kann mit Einschränkungen (große Datenlücken, begrenztes Fassungsvermögen der gemessenen Zubringerleitung) der Durchfluss der Wasserfassungen verwendet werden. Die Zuflüsse aus der Beileitung Süd sind, bis auf zwei Teilgebiete, nicht aufgezeichnet, weshalb der Summenabfluss gemäß den Grö-

ßenanteilen aufgeteilt wird. Da es auch hier zu einem Unterschied der Messzeitpunkte (Auslass Beileitung – Messung Wasserfassungen) kommt und die Fließzeiten der Leitung in diesem Rahmen nicht erfasst wurden, wird hier das 12-Stunden-Mittel gebildet. Dadurch ist die zeitliche Auflösung feiner als im Hauptspeicher Tauernmoossee und zusätzliche zeitliche Verschiebungen können ausgeschlossen werden.

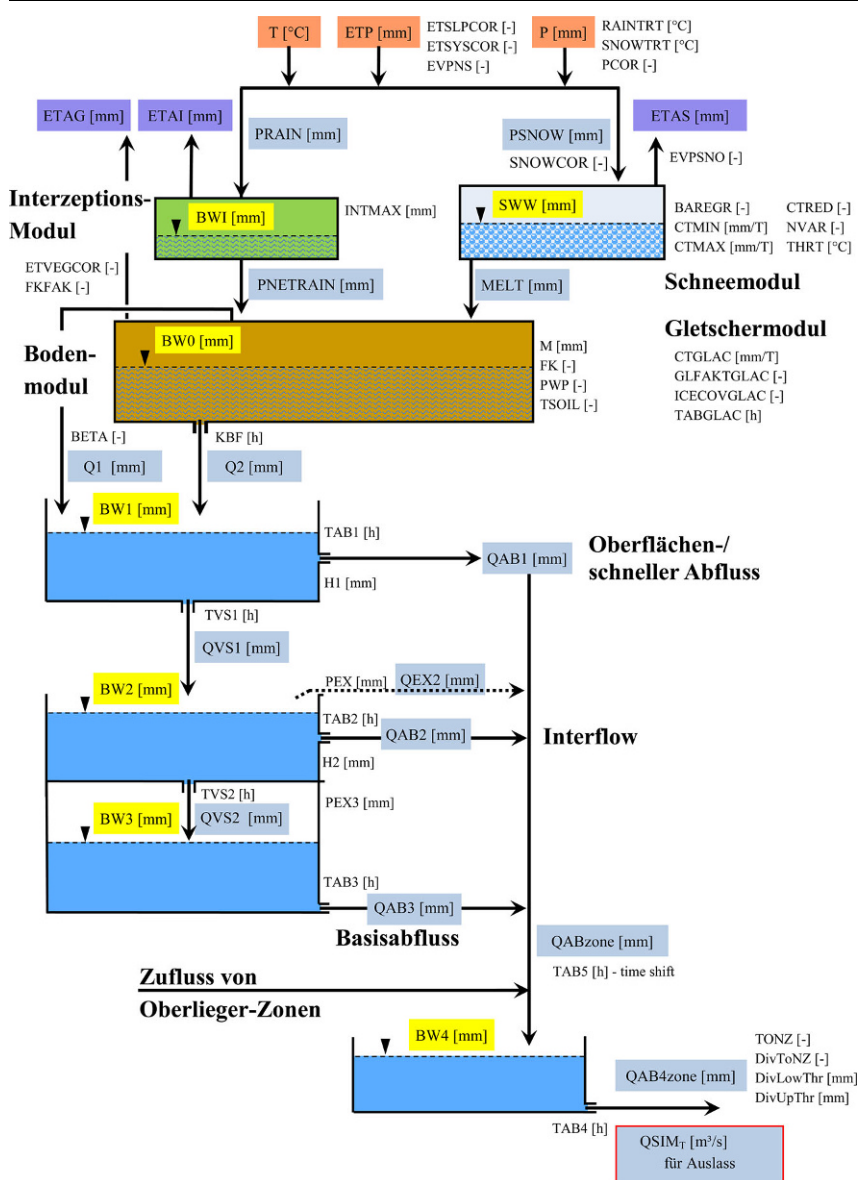
Durch diese Herangehensweise können viele der vorhandenen sekundären Informationen verwendet werden, um in möglichst vielen Teileinzugsgebieten den gewünschten lokalen Abfluss als Information zur Kalibrierung des N-A-Modells zu erhalten. In fünf Einzugsgebieten kann jedoch kein lokaler Abfluss ermittelt werden, sodass die Modellgüte hier nicht ausgewertet werden kann. In der angewandten Methode wird die Verdunstung aus den Speicherseen nicht berücksichtigt, was zu einem kleinen Fehler in der Abschätzung der lokalen Abflüsse führt. Für das Einzugsgebiet des Tauernmoossees ergibt sich, bei Zugrundelegung der mittleren, potenziellen Gebietsverdunstung von 374 mm (vgl. Tab. 1) ein Verdunstungsvolumen von 770.000 m<sup>3</sup>/a. Dies entspricht einem mittleren Abfluss von 0,024 m<sup>3</sup>/s und kann daher vernachlässigt werden.

### 2.3.2 N-A-Modellierung

Die hydrologischen Modellierungen werden mit dem konzeptionellen, kontinuierlichen Niederschlags-Abfluss-Modell COSERO (COntinuous SEmi-distributed RunOff Model) – Abb. 5; Nachtnebel et al. 1993; Eder et al. 2005; Herrnegger et al. 2018, 2015a, 2015b, 2012; Kling und Nachtnebel 2009; Kling et al. 2015; Stanzel et al. 2008 durchgeführt, welches auf dem HBV-Modell nach Bergström (1995) aufbaut. Es findet unter anderem Anwendung in der Abfluss- und Hochwasservorhersage sowie zur Abschätzung des Einflusses des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft. Kling et al. (2015)



**Abb. 4** Schematische Darstellung der Massenflüsse (links), die für die Bilanzierung und die Herleitung des lokalen Abflusses ( $Q_{EZG}$ ) im Einzugsgebiet 8 – Weisssee notwendig sind, sowie deren Lage im Untersuchungsgebiet (rechts)



**Abb. 5** COSERO-Modellstruktur inklusive Inputs (rot hinterlegt), relevanter Systemzustände (gelb hinterlegt), Flüsse (blau hinterlegt) und Parameter. Die einzelnen Module werden für jede Modellzelle berechnet

führen einige der durchgeführten forschungsrelevanten und ingenieurwissenschaftlichen Studien an.

Für die Anwendung im Stubachtal wurde das Modell auf einem Raster von  $250\text{ m} \times 250\text{ m}$  aufgebaut, wobei Zellen mit ähnlichen Eigenschaften (Einzugsgebiet, Landnutzung, Höhenlage, Bodentyp, Hydrogeologie) zu insgesamt 791 Berechnungszellen zusammengefasst wurden. Anhand dieser Charakteristika wurden Grundparameterfelder für das Einzugsgebiet erstellt, welches die Grundlage für die Kalibrierung bildet (siehe Schulz et al. 2016; Tab. 3). Für die Kalibrierungsphase vom 01.09.2004

bis 31.08.2012 wurde anschließend ein kombinierter, iterativer Ansatz aus automatischer Optimierung und manueller Kalibrierung verwendet, um diese Parameterfelder mit multiplikativen und additiven Faktoren gleichmäßig zu verändern. Dadurch bleibt die homogene Grundstruktur erhalten und es findet kein harter Bruch von Parameterwerten an Einzugsgebietsgrenzen statt. Die hydrologischen Simulationen finden grundsätzlich in einer zeitlichen Auflösung von 60 min statt. Nach gleicher zeitlicher Aggregation der Simulationsergebnisse gemäß den ermittelten lokalen Abflüssen kann die Simula-

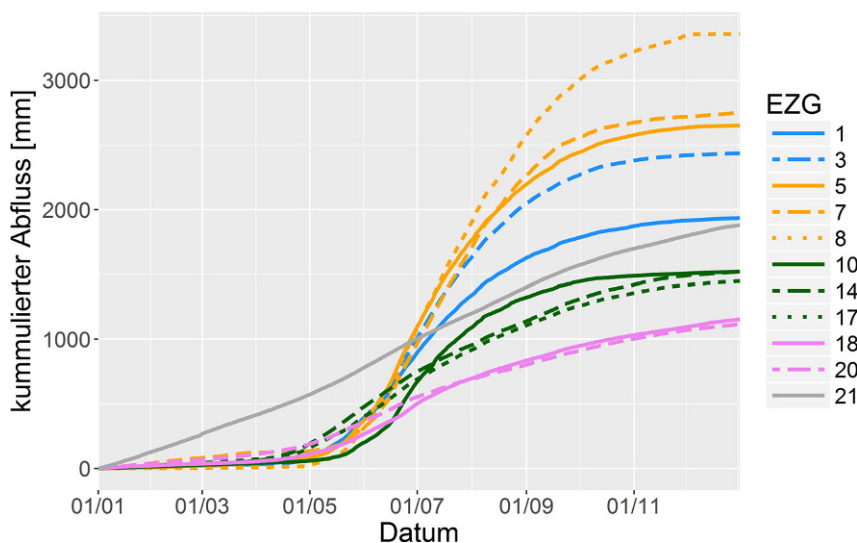
tionsgüte anhand der Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash und Sutcliffe 1970), der Kling-Gupta Efficiency (Gupta et al. 2009) und der Pearson-Korrelation ausgewertet werden. Abschließend wurden die Parameter für eine unabhängige Zeitreihe (01.09.2012 bis 31.08.2015) validiert. Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Schritte findet sich in Wesemann et al. (2018).

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Abgeleitete, lokale Abflüsse

Da der lokale Abfluss nicht direkt gemessen wird, ist eine direkte quantitative Überprüfung der Qualität der abgeleiteten Zeitreihen nicht möglich. Zur Prüfung der Plausibilität der Daten wurden daher die langjährigen kumulierten Abflusssummen berechnet. Diese sollten für Einzugsgebiete vergleichbarer Topografie und Lage auch ähnliche Ergebnisse liefern. Abb. 6 stellt diese für fünf verschiedene Gruppen dar: Blau – EZG der Beileitung Süd; Orange – EZG der Beileitung Nord; Grün – EZG mittlerer Höhenlage; Violett – tiefergelegene Einzugsgebiete; Grau – Summenpegel/ Gebietsauslass. Hierbei werden folgende Punkte ersichtlich, die durchaus plausibel sind: (1) Ähnliche Eigenschaften spiegeln sich in diesen Gruppen wider; (2) Zunahme der Abflusssummen mit der Höhe; (3) Erhöhte Abflusssummen in stärker vergletscherten Gebieten (EZG 3 & EZG 8); (4) Südliche Exposition verringert die Abflusssummen (EZG 1 & EZG 3); sowie (5) Starke Vergleichmäßigung der Abflusssummen am Gebietsauslass. Insgesamt zeigen die kumulierten Summen der abgeleiteten lokalen Abflüsse plausible/realistische Werte. Im Vergleich zu den Werten aus der Wasserbilanz (vgl. Tab. 1) mit mittlerer Abflusshöhe von 1331 mm liegen die berechneten Werte etwas höher. Dies kann durch die unterschiedlichen Bezugszeiträume erklärt werden, da der mittlere Niederschlag im Modellierungszeitraum um etwa 300 mm höher war (siehe Abb. 8). Zusätzlich konnte in den letzten Jahrzehnten durchwegs eine negative Massenbilanz der Gletscher beobachtet werden, welche eine zusätzliche Abflusskomponente darstellen kann.

Wie bereits in Abschn. 2.3.1 erwähnt, kommt es in den Einzugsgebieten mit Speicherseen teilweise zu unplausiblen Werten für den berechneten lokalen 60-Minuten-Abfluss, weshalb dieser



**Abb. 6** Langjährige mittlere tägliche Abflusssummen für repräsentative Einzugsgebiete. Die Farbgruppierungen spiegeln Gebiete mit ähnlichen topografischen Eigenschaften wieder

auf 24-h-Werte aggregiert wurde. Um die Ergebnisse genauer zu analysieren und Ursachen für die Schwankungen herauszustellen, wurden die einzelnen Flüsse des Einzugsgebiets 8 – Weisssee noch einmal genauer untersucht und in Abb. 7 visualisiert. Der obere Teil der Grafik zeigt den lokalen 60-Minuten-Abfluss in Dunkelblau, den aggregierten lokalen 24-Stunden-Abfluss in Schwarz sowie den Wasserstand im Speichersee in Violett. Zusätzlich sind hier die Zeiträume, in denen Aus- und Zuleitungen stattfanden, als einheitenlose Balken eingetragen. Deren genauer zeitlicher Verlauf ist im mittleren Teil der Abbildung dargestellt. Zusätzlich sind die Ergebnisse der Modellierung nach Kalibrierung des Modells für den gleichen Zeitraum im unteren Teil der Abb. 7 gezeigt.

Das stärkste „Rauschen“ und Schwankungen des lokalen Abflusses entstehen, sobald der Weisssee komplett gefüllt ist und es zum Ablauf des Wassers über den Überlauf kommt (hellblauer Balken). Auch während der Ausleitung in den Tauernmoossee (roter Balken) kommt es zu kurzfristigen Abflussveränderungen und negativen Abflusswerten, welche jedoch nicht die hohe Frequenz des Überlaufs erreichen. Der Einfluss der Beileitung Nord auf die Fehler des zeitlich hochaufgelösten lokalen Abflusses ist abhängig von dessen Größe und ist nur bei höheren Zuleitungen sichtbar. Der zeitlich aggregierte lokale Abfluss (schwarz) verdeutlicht jedoch, dass die grundsätzliche Dynamik

sowie die Wasserbilanz gut wiedergegeben werden. Auch die Reduktion des Abflusses auf ein Minimum ab Mitte September erscheint realistisch, da der simulierte Abfluss hier auch einen ähnlichen Verlauf aufzeigt. Generell stimmen die Simulation und der aggregierte lokale Abfluss meist gut überein (unterer Teil Abb. 7), wobei es jedoch tendenziell zu einer Unterschätzung des Durchflusses in der Simulation kommt. Dies kann z.T. (Juli–August) durch eine erhöhte Gletscherschmelze erklärt werden, was im Modell nicht richtig wiedergegeben wird. Der Zeitpunkt der Hauptschneeschmelze sowie der Spitzenabflüsse wird jedenfalls gut getroffen.

Wie bereits in Abb. 1 und Abb. 6 gezeigt, findet am Gebietsauslass durch die Speicherbewirtschaftung eine Vergleichsmäßigung der Saisonalität des Abflusses über das Jahr statt. Auf die natürliche Dynamik können also keine Rückschlüsse gezogen werden. Nichtsdestotrotz kann die jährliche Wasserbilanz als plausibel angesehen und somit zu einer Evaluierung der Inputdaten und der Simulation verwendet werden. In Abb. 8 sind daher der beobachtete Abfluss, der Gebietsniederschlag, die Gebietsverdunstung, der simulierte Gletscherabfluss und der simulierte Gesamtabfluss (ohne Berücksichtigung der Bewirtschaftung) für unterschiedliche hydrologische Jahre dargestellt. Die Beobachtung und die Simulation und dementsprechend auch Niederschlag und Verdunstung stimmen meist gut

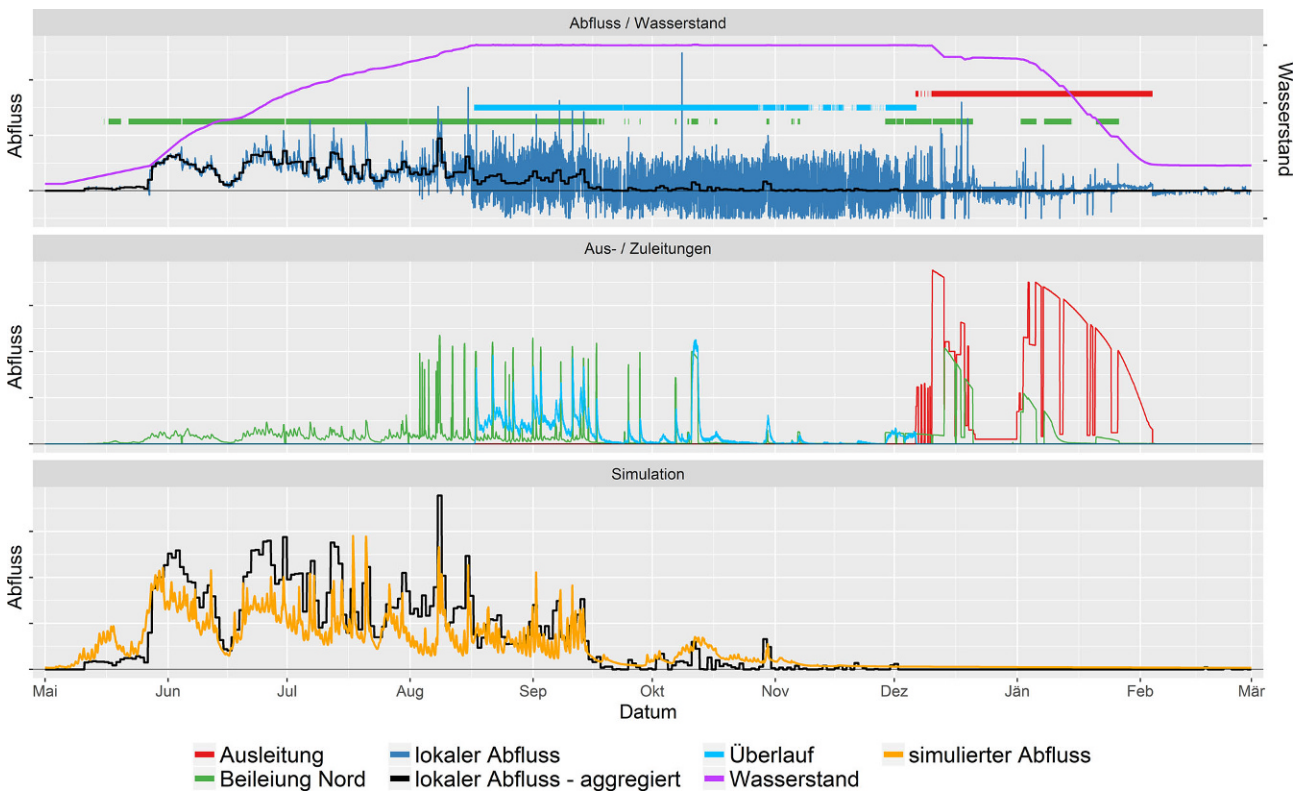
überein. Teilweise liegt jedoch der gemessene Abfluss sogar über der Gebietsniederschlagssumme, was jedoch auch auf die Speicherbewirtschaftung zurückgeführt werden kann, da das aktuelle Speichervolumen hier nicht berücksichtigt wird. Im letzten Jahr ist der Niederschlag und somit auch der simulierte Abfluss, im Gegensatz zum beobachteten Abfluss, sehr gering. Dies kann sowohl aus Messfehlern des Abflusses als auch aus einer Unterschätzung des Niederschlags resultieren. Durch diese Wasserbilanzanalyse können auch die sehr anthropogen beeinflussten Messungen zur Evaluierung des Modells herangezogen werden.

Des Weiteren zeigt Abb. 8 auf, dass der Anteil des Gletscherabflusses am Gesamtabfluss bezogen auf das Gesamteinzugsgebiet sehr gering ist. In einzelnen Einzugsgebieten kann dieser dabei deutlich höher liegen, unterliegt jedoch starken Schwankungen in den Einzeljahren. Dies zeigt sich auch in den Ergebnisberichten der Massenbilanzmessreihe vom Stubacher Sonnblickkees, welche für die Jahre 2001/2002 bis 2012/2013 vorliegen (z. B. Slupetzky und Ehgartner 2002) und für das Einzugsgebiet 8 – Weisssee repräsentativ sind. Die jährliche Gletscher-spende in den Bilanzierungsperioden schwankt hierbei zwischen +78 mm (Gletscherzuwachs) und -796 mm (Zufluss in den Weisssee) bei geschätzten Fehlern von  $\pm 5\%$  bis  $\pm 30\%$  für die einzelnen Bilanzkomponenten.

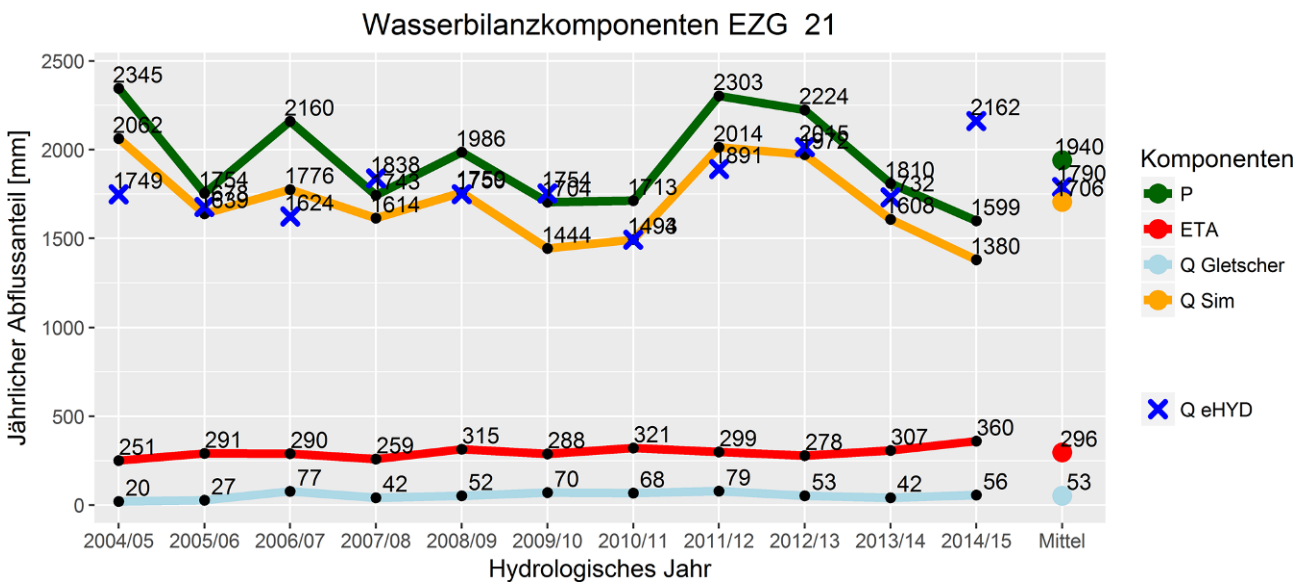
### 3.2 Güte der Niederschlagsabflussmodellierung

Für insgesamt 15 der 21 Einzugsgebiete konnte der lokale Abfluss abgeleitet und somit die Modellgüte für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum evaluiert werden (Tab. 5). Die Berechnung der Gütekriterien erfolgte, wo notwendig, mit den aggregierten 12-Stunden- bzw. Tagesabflüssen. Hierbei konnten für den NSE und den KGE Spitzenwerte von 0,79 und 0,85 und mittlere Werte von 0,64 bzw. 0,71 für den Kalibrierungszeitraum erreicht werden. Die geringsten Werte wurden dabei für die Einzugsgebiete 10, 12 und 18 erreicht, in denen jedoch auch die lokalen Abflüsse starken Unsicherheiten unterliegen (Bilanzierungsprobleme, begrenzte Wasserfassung). Generell bestand die Schwierigkeit, die Kalibrierung der 60-Minuten-Simulation so durchzuführen, dass diese einerseits die aggregierten,





**Abb. 7** *Oben:* 60-min-Ganglinie des lokalen Abflusses (*dunkelblau*), 24-h-Aggregation des lokalen Abflusses (*schwarz*) sowie Wasserstand im Weisssee (*violett*). Zusätzlich sind die Zeiträume der Aus- und Zuleitungen als farbige Balken dargestellt. *Mitte:* Ganglinie der Ausleitung in den Tauernmoossee (*rot*), Zufluss zum Weisssee über die Beileitung Nord (*grün*) sowie Überlauf in EZG 11 (*hellblau*). *Unten:* Ganglinien des aggregierten lokalen Abflusses sowie Ergebnisse aus der 60-Minuten-Simulation (*orange*). Alle Daten beziehen sich auf das EZG 8



**Abb. 8** Simulierte Wasserbilanzkomponenten und gemessener Gebietsabfluss am Pegel Uttendorf für das Gesamteinzugsgebiet repräsentiert in EZG 21 für die hydrologischen Jahre der Kalibrierung und der Validierung. Die angegebenen Zahlen stellen die jährlichen Summen in mm für die jeweilige Komponente dar (*P* Niederschlag, *ETA* aktuelle Verdunstung, *Q Gletscher* simulierter Gletscherabfluss, *Q Sim* simulierter Abfluss, *Q eHYD* beobachteter Abfluss). (Quelle: eHYD)

Tab. 5 Berechnete Gütekriterien für die verschiedenen Einzugsgebiete und Zeitabschnitte

EZG	Kalibrierung		Validierung	
	NSE	KGE	NSE	KGE
1	0,74	0,80	N/A	N/A
2	0,45	0,72	N/A	N/A
3	0,78	0,85	0,79	0,79
4	0,67	0,78	0,66	0,73
5	0,78	0,74	0,54	0,43
6	0,69	0,64	0,57	0,43
7	0,76	0,82	0,61	0,62
8	0,64	0,52	0,59	0,47
9	0,71	0,80	N/A	N/A
10	0,55	0,43	0,25	0,07
12	0,69	0,78	0,63	0,62
14	0,56	0,68	0,59	0,79
17	0,58	0,71	0,59	0,74
18	0,48	0,60	N/A	N/A
20	0,52	0,75	0,44	0,71

Bei unzureichender Datenlage konnten keine Werte berechnet werden (N/A not available)

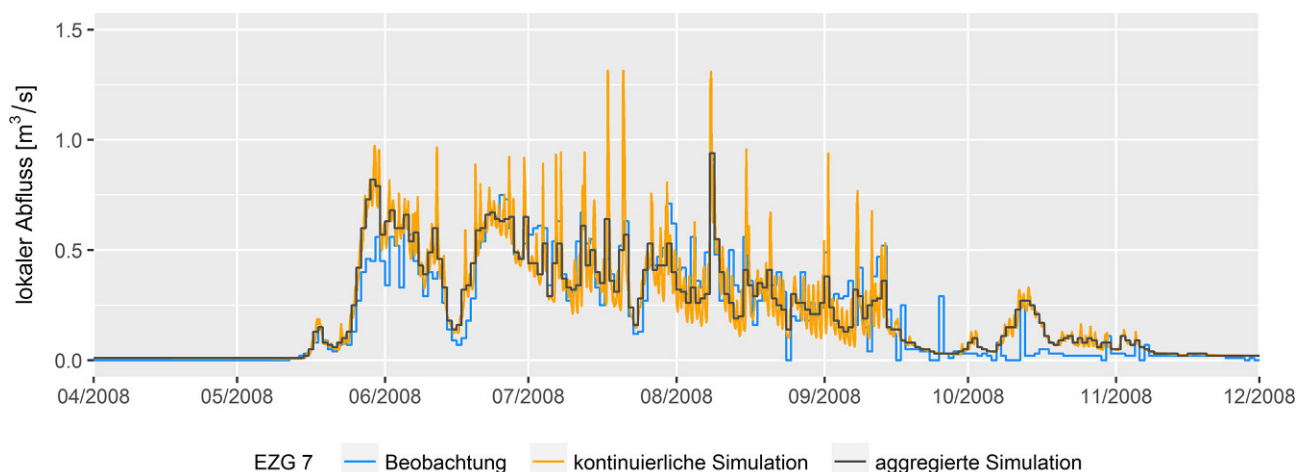


Abb. 9 Vergleich der Modellsimulationen (orange: kontinuierliche 60-Minuten-Simulation, schwarz: gemittelte 24-Stunden-Simulation) mit dem abgeleiteten lokalen Abfluss (blau: Beobachtung) für das Einzugsgebiet 7

hergeleiteten lokalen Abflüsse widerspiegeln und andererseits auch die natürliche Dynamik wiedergeben. Zur Veranschaulichung der Unterschiede sind in Abb. 9 der ermittelte lokale Abfluss (blau – Beobachtung), die 60-Minuten-Simulation (gelb – kontinuierliche Simulation) und die 24-Stunden-Mittelung der Simulation (schwarz – aggregierte Simulation) für das Einzugsgebiet 7 der nördlichen Beileitung dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Simulation die Dynamik der Beobachtung größtenteils gut wiedergibt und die zeitlich höher aufgelöste Simulation erwartungsgemäß die gemittelte Beobachtung und Simulation überschätzt. Außerdem ist hier erkennbar, dass die entscheidenden saisonalen Ab-

flussanteile (Schneeschnmelze im Frühjahr, Gletscherschnmelze im Sommer/Herbst) gut durch das Modell wiedergegeben werden. Dies wurde auch durch einen Vergleich der monatlichen Wasserbilanzen bestätigt (Wesemann et al. 2018).

Die Auswertung der Validierungsperiode bestätigt grundsätzlich das verwendete Parameterfeld, trotz einer üblichen geringen Reduktion der Modellgüte. Die Spitzenwerte liegen hier noch bei 0,79 für den NSE und den KGE. Auffällig ist, dass im EZG 10 die Modellgüte signifikant abnimmt. In diesem Untereinzugsgebiet und einzelnen anderen Gebieten, in denen die Güte verhältnismäßig stärker abgenommen hat, kann dies damit erklärt werden,

dass die lokalen Abflüsse für die Validierungsperiode nicht korrekt ermittelt werden konnten. Dies zeigt sich in den jährlichen Wasserbilanzen, da teilweise mehr lokaler Abfluss als Niederschlag geschätzt wird und dies nicht über die Speicher erklärt werden kann. Zur Plausibilitätskontrolle des Modells wurden daher zusätzlich die modellierten Schneebedeckungen mit den Daten der CryoLand Datenbank (CryoLand 2017; Malnes et al. 2015) verglichen, wobei hier eine zufriedenstellende Übereinstimmung nachgewiesen werden konnte (Wesemann et al. 2018).

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Viele Durchflussmessungen sind in Österreich durch Speicherung und Zu- und/oder Ableitungen in den Oberliegergebieten beeinflusst und spiegeln daher nicht die natürlichen Verhältnisse wider. Bei vielen ingenieurhydrologischen Fragestellungen, wie Abflussuntersuchungen oder der Bereitstellung von hydrologischen Prognosesystemen, spielen Niederschlags-Abfluss-Modelle eine große Rolle. Für die Kalibrierung der Modellparameter dieser Modelle ist man jedoch immer noch auf das Vorhandensein von ungestörten Durchflussmessungen angewiesen.

Die Stubache, ein südlicher Zubringer zur Salzach, ist ein typisches Beispiel für ein solches, stark anthropogen beeinflusstes Gebirgseinzugsgebiet mit vier relevanten Wasserkraftwerken und mehreren Speicherseen. Um trotz der starken Beeinflussung der Messwerte ein hydrologisches Modell zur Abflussvorhersage aufbauen zu können, wurden unter Verwendung sekundärer Informationen wie Wasserstands- und Druckleitungsmessungen lokale, „natürliche“ Abflüsse für unterschiedliche Teilgebiete des Einzugsgebietes zur Kalibrierung des Niederschlags-Abfluss-Modells COSERO in einer zeitlichen Auflösung von 60 min erstellt. Für die Einzugsgebiete mit Speicherseen wurden alle Zu- und Abflüsse sowie die Änderung des Speichervolumens bilanziert, um lokale Abflüsse abzuschätzen. Mehrere Faktoren können hier jedoch die Qualität der Ergebnisse beeinflussen und führen zum Teil zu unrealistischen Schwankungen in den abgeleiteten 60-min-Zeitreihen. Zum einen kommt es aufgrund der Lage der einzelnen Messstellen (am Speicher-auslass, am Ende der Beileitungen und Wasserfassungen) zu zeitlichen Inkonsistenzen, da Fließzeiten im Gelände und im See nicht bekannt sind. Des Weiteren führen kleine Schwankungen in den Wasserständen in den Speicherseen teilweise zu großen Änderungen des Volumens, wobei hier auch die Messgenauigkeit eine Rolle spielt. Um diese Schwankungen und die teilweise durch die Bilanzierung entstehenden negativen Abflusswerte auszugleichen, wurden die 24-Stunden-Mittelwerte des lokalen Abflusses gebildet. Auch

bei einigen Messungen an den Wasserfassungen und den Beileitungen kann es zu zeitlichen Verschiebungen kommen, weshalb auch hier eine Aggregation stattfand. Trotz dieser Einschränkungen wurde hier ein einmaliger Datensatz mit Zeitreihen des lokalen Abflusses für 15 Teileinzugsgebiete in einem sehr kleinräumigen Einzugsgebiet mit komplexer Topografie erstellt. Unter Verwendung dieser Daten sowie stündlicher Niederschlags- und Temperaturdaten, wurde das hydrologische Modell für die Vergangenheit erfolgreich kalibriert und validiert. Dieses Modell kann nun die Grundlage eines Zuflussprognosesystems zur Optimierung der Speicherbewirtschaftung im Einzugsgebiet bilden. Über die Integration von meteorologischen Vorhersagen als Input für das Modell können Abflussprognosen mit Vorhersagezeiten von 12 h bis 6 Tage erstellt werden. Integriert in ein Speicherbewirtschaftungs-Tool, kann es dadurch die Basis für die mittelfristige Planung des Kraftwerkbetriebs und der Energieproduktion bilden.

Die Anwendung des hydrologischen Modells im Stubachtal ist von verschiedenen Unsicherheitsfaktoren beeinflusst. So ist eine Vollständigkeit der Messdaten, sowohl der direkten Durchflussmessungen als auch der Bilanzierungsgrößen, nie gewährleistet und die Qualität der ermittelten lokalen Abflüsse kann nur auf Plausibilität überprüft werden. Vor allem auch das Fehlen eines Translationsterms zur Berechnung der Abflussverzögerung in den Fließstrecken (Überleitung, Treibwasserwege) kann zu zeitlichen Verschiebungen und Fehlern führen. Des Weiteren wäre die Integration von Messungen der Gletscherbilanz und des Gletscherabflusses sinnvoll. Eine Evaluierung der Gletscherschmelze war im vorliegenden Fall nicht möglich, da Messzeitreihen, obwohl vorhanden, nicht zur Verfügung gestellt wurden.

Darüber hinaus kann für zukünftige Anwendungen auch eine Anpassung der Modellstruktur und der abgebildeten Prozesse zu einer Verbesserung der Modellierung beitragen. So könnten zum Beispiel eine vereinfachte Schneeverlagerung basierend auf Frey und Holzmann (2015) oder bei Verfügbarkeit

sikalische Schneemodelle (z.B. Bernhardt et al. 2009) integriert werden. Die Anwendung und Weiterentwicklung komplexerer Kalibrierungs- und Parametrisierungsstrategien (z.B. Klotz et al. 2017; Hanzer et al. 2016) könnte zusätzlich die Unsicherheiten in der Parameterkalibrierung reduzieren.

Die Notwendigkeit von qualitativ guten Durchflussmessungen in bewirtschafteten Einzugsgebieten wird am Beispiel der Stubache aufgezeigt. Neben der Verwendung für Vorhersagesysteme können diese Daten auch die Grundlage für die Evaluierung anderer Messdaten wie Niederschlag, Schneewasserwerte oder Gletscherabflüsse bilden. Eine Kooperation der verschiedenen Einrichtungen ist hier empfehlenswert. Auch bei Neu- und Ausbauten von wasserwirtschaftlicher Infrastruktur sollte Bedacht darauf gelegt werden, hydrologisch relevante Gebietsbeobachtungen zu integrieren und das vorhandene Messnetz durch Pegeleinrichtungen zu erweitern. Dies würde nicht nur zum optimalen Management der Wasserressourcen beitragen, sondern auch die Sicherung des hydrologischen Messnetzes in Österreich unterstützen.

**Danksagung** Wir danken den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der ÖBB-Infrastruktur AG, allen voran Markus Wipbersberger und Michaela Haberler-Weber, für die konstruktive Begleitung der Arbeiten.

**Förderung** Diese Studie wurde von der ÖBB-Infrastruktur AG finanziert.

**Funding** Open access funding provided by University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU).

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. ■



## Literatur

- Bergström, S. (1995):** The HBV model. In: Singh VP (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highland Ranch, CO, USA. pp 443–476.
- Bernhardt, M., Zängl, G., Liston, G. E., et al. (2009):** Using wind fields from a high resolution atmospheric model for simulating snow dynamics in mountainous terrain. *Hydrological Processes* 23: 1064–1075. <https://doi.org/10.1002/hyp.7208>
- BMLFUW (2007):** Hydrologischer Atlas Österreichs (digHAO). 3. Lieferung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BMLFUW (2015):** Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2013. 121. Band – Daten und Auswertungen. OG434 – Durch Zuleitungen, Ableitungen und Speicherungen in Österreich beeinflusste Messstellen. Abteilung IV/4 – Wasserhaushalt (HZB). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), Wien.
- CryoLand (2017):** CryoLand—Copernicus Service Snow and Land Ice. <http://www.cryoland.eu> Gesehen am 21. Juni 2017
- E-Control (2018):** Betriebsstatistik – Jahresreihen. Datenstand Oktober 2017. <https://www.e-control.at/statistik/strom/betriebsstatistik/jahresreihen> Gesehen 14.05.2018
- Eder, G., Fuchs, M., Nachtnebel, H. P., Loibl, W. (2005):** Semi-distributed modelling of the monthly water balance in an alpine catchment. *Hydrological Processes* 19: 2339–2360. <https://doi.org/10.1002/hyp.5888>
- Fischer, A., Seiser, B., Stocker-Waldhuber, M., Mitterer, C., Abermann, J. (2015):** The Austrian Glacier Inventories GI 1 (1969), GI 2 (1998), GI 3 (2006), and GI LIA in ArcGIS (shapefile) format. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.844988>
- Frey, S., Holzmann, H. (2015):** A conceptual, distributed snow redistribution model. *Hydrology and Earth System Science* 19: 4517–4530. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4517-2015>
- GEOLAND.AT (2017):** Digitales Geländemodell (DGM) Österreich. Online verfügbar unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/d88a1246-9684-480b-a480-ff63286b35b7>. Zugegriffen: 20.10.2016
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., et al. (2009):** Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377: 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Haiden, T., Pistotnik, G. (2009):** Intensity-dependent parameterization of elevation effects in precipitation analysis. *Advanced Geoscience* 20: 33–38. <https://doi.org/10.5194/adgeo-20-33-2009>
- Haiden, T., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B., Gruber, C. (2011):** The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Weather Forecast* 26: 166–183. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222451.1>
- Hanzer, F., Helfricht, K., Marke, T., et al. (2016):** Multilevel spatiotemporal validation of snow/ice mass balance and runoff modeling in glacierized catchments. *The Cryosphere* 10: 1859–1881. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1859-2016>
- Herrnegger, M., Nachtnebel, H. P., Haiden, T. (2012):** Evapotranspiration in high alpine catchments—an important part of the water balance! *Hydrology Research* 43: 460. <https://doi.org/10.2166/nh.2012.132>
- Herrnegger, M., Nachtnebel, H. P., Schulz, K. (2015a):** From runoff to rainfall: inverse rainfall–runoff modelling in a high temporal resolution. *Hydrology and Earth System Science* 19: 4619–4639. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4619-2015>
- Herrnegger, M., Senoner, T., Klotz, D., Wesemann, J., Nachtnebel, H. P., Schulz, K. (2015b):** Rainfall-Runoff-Model COSERO—Handbook 2015b. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.
- Herrnegger, M., Senoner, T., Nachtnebel, H. P. (2018):** Adjustment of spatio-temporal precipitation patterns in a high Alpine environment. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.068>
- Hiebl, J., Auer, I., Böhm, R., et al (2009):** A high-resolution 1961–1990 monthly temperature climatology for the greater Alpine region. *Meteorologische Zeitschrift* 18: 507–530. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/0403>
- Holländer, H. M., Blume, T., Bormann, H., et al (2009):** Comparative predictions of discharge from an artificial catchment (Chicken Creek) using sparse data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 2069–2094. <https://doi.org/10.5194/hess-13-2069-2009>
- Holländer, H. M., Bormann, H., Blume, T., et al (2014):** Impact of modellers’ decisions on hydrological a priori predictions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2065–2085. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2065-2014>
- Kling, H. (2006):** Spatio-Temporal modelling of the water balance of Austria. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.
- Kling, H., Nachtnebel, H. P. (2009):** A method for the regional estimation of runoff separation parameters for hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 364: 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.10.015>
- Kling, H., Fürst, J., Nachtnebel, H.P. (2006):** Seasonal, spatially distributed modelling of accumulation and melting of snow for computing runoff in a long-term, large-basin water balance model. *Hydrological Processes* 20(10):2141–2156
- Kling, H., Stanzel, P., Fuchs, M., et al. (2015):** Performance of the COSERO precipitation—runoff model under non-stationary conditions in basins with different climates. *Hydrological Sciences Journal* 60: 1374–1393. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.959956>
- Klotz, D., Herrnegger, M., Schulz, K. (2017):** Symbolic regression for the estimation of transfer functions of hydrological models. *Water Resources Research* 53: 9402–9423. <https://doi.org/10.1002/2017WR021253>
- Malmes, E., Buanes, A., Nagler, T., et al. (2015):** User requirements for the snow and land ice services—CryoLand, The Cryosphere 9: 1191–1202. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1191-2015>
- McMillan, H., Freer, J., Pappenberger, F., Krueger, T., Clark, M. (2010):** Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrological Processes* 24: 1270–1284. <https://doi.org/10.1002/hyp.7587>
- Nachtnebel, H. P., Baumung, S., Lettl, W. (1993):** Abflußprognosemodell für das Einzugsgebiet der Enns und der Steyr. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970):** River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Schulz, K., Herrnegger, M., Wesemann, J., Klotz, D., Senoner, T. (2016):** Kalibrierung COSERO—Mur für ProVis. Bericht. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.
- Slupetzky, H., Ehgartner, G. (2002):** Programm "Wasser-Eishaushaltmessungen im Stubachtal" (Massenbilanzmessreihe vom Stubacher Sonnblickkees) – Ergebnisbericht für 2002. <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.829937>. Zugegriffen: 30.05.2018
- Stanzel, P., Kahl, B., Haberl, U., et al. (2008):** Continuous hydrological modelling in the context of real time flood forecasting in alpine Danube tributary catchments. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 4: 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1307/4/1/012005>
- Umweltbundesamt (2017):** CORINE Landbedeckung 2012. [http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/umweltinfo/opendata/oed\\_landbedeckung/](http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/umweltinfo/opendata/oed_landbedeckung/) Gesehen 15. Juni 2017
- Wesemann, J., Herrnegger, M., Schulz, K. (2018):** Hydrological modelling in the anthroposphere: predicting local runoff in a heavily modified high-alpine catchment. *J. Mt. Sci.* 15: 921. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4587-5>