

5 Entwicklung hydrometeorologischer Grundlagen

Martina Kauzlaric, Gilles Nicolet, Daniel Viviroli

Wie in Kapitel 4 erläutert, wurden hydrologische Ganglinien von rund 300000 Jahren Länge erzeugt. Die dazu eingesetzte Modellkette wird im Folgenden genauer beschrieben. Weitere Hintergründe dieser Modellkette sind im Detailbericht A zu den hydrometeorologischen Grundlagen zu finden. Dort werden insbesondere auch die ausführlichen Validierungsarbeiten diskutiert, mit welchen die resultierenden Simulationen vertieft untersucht wurden.

5.1 Meteorologische Zeitreihen

Für EXAR wurden mit dem stochastischen Multisite-Wettergenerator GWEX stündliche Datenreihen von Niederschlag und Temperatur an einer Vielzahl von Stationen simultan erzeugt. Es wurden 30 meteorologische Zeitreihen mit einer Länge von je 10000 Jahren generiert, die zusammengehängt 300000 Jahre ergeben. Mit einem zweiten Wettergenerator (SCAMP), der auf atmosphärischen und meteorologischen Analoga basiert, wurden ebenfalls 30 stündliche Datenreihen mit einer Länge von je 10000 Jahren erzeugt. Die Daten von SCAMP wurden für die Validierung der GWEX Daten verwendet. SCAMP ist im Detailbericht A beschrieben.

5.1.1 Multisite-Wettergenerator GWEX

Der Wettergenerator GWEX (EVIN *et al.* 2018) ist ein multilokales Niederschlags- und Temperaturmodell, das zum Ziel hat, das statistische Verhalten von Wetterereignissen auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen wiederzugeben. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf Extremereignissen. Als Basis dienen Stationsdaten von Niederschlag (105 Stationen) und Temperatur (26 Stationen) in täglicher Auflösung für die Zeitperiode 1930–2015 und in stündlicher Auflösung für 1990–2015. Das Niederschlagsmodell in GWEX lehnt sich stark an die von WILKS (1998) vorgeschlagene Struktur, in der das Auftreten von Niederschlag und die täglichen Niederschlagsmengen unabhängig voneinander erzeugt werden. Die Simulation der für die Aare besonders relevanten 3-Tages-Niederschläge wurde verbessert, indem GWEX in einem ersten Schritt 3-Tages-Summen des Niederschlags erzeugt. Diese Summen werden dann mit Hilfe von meteorologischen Analoga auf stündliche Werte disaggregiert. Für diese Disaggregation wurde die dazu entwickelte Methodik der «Meteorological Analogs for Disaggregation» verwendet, die für jeden Tag im Archiv nach einem analogen Tag sucht, für den die stündliche Zeitstruktur bekannt ist. Die Daten des einzelnen Tages wurden dann mithilfe des analogen Tages aus dem Archiv auf die 24 Stunden verteilt.

Das Auftreten von Niederschlägen wird für jede einzelne Station mit einer Markov-Kette erster Ordnung simuliert. Die beiden Zustände «Niederschlag» und «kein Niederschlag» werden dabei für Sequenzen von einer Länge von je 3 Tagen festgelegt. Saisonale Unterschiede im Auftreten von Niederschlag werden berücksichtigt, indem die entsprechenden Modellparameter monatlich differenziert sind. Die Wahrscheinlichkeit der Zustände «Niederschlag» und «kein Niederschlag» zu einem Zeitpunkt t ergeben sich an jeder Station durch Übergangswahrscheinlichkeiten. Diese Übergangswahrscheinlichkeiten definieren die Wahrscheinlichkeit des Zustands «Niederschlag» in Abhängigkeit der vorangegangenen Zustände. Eine multivariate Gaussverteilung dient dazu, die Korrelation im Auftreten von Niederschlägen zwischen verschiedenen Stationen einzuführen.

Für Sequenzen mit Niederschlag werden anschliessend die Niederschlagssummen geschätzt. Dies geschieht wiederum saisonal differenziert. Dabei wird das Summenmodell für jeden Monat separat angepasst. Als Grundlage für die Schätzung des 3-Tages-Niederschlags dient eine erweiterte generalisierte Paretoverteilung (E-GDP, PAPASTATHOPOULOS und TAWN 2013), die Niederschlagsintensitäten angemessen nachbilden kann (NAVEAU *et al.* 2016). Die Verteilung kann als gleitender Übergang zwischen einer Gamma-Vertei-

lung und einer endlastigen generalisierten Paretoverteilung («heavy tailed GPD») beschrieben werden. Der Formparameter von E-GPD kann robust über eine erweiterte Regionalisierungsmethode geschätzt werden (E_{VIN} *et al.* 2016). Die räumliche und zeitliche Abhängigkeit der Niederschlagssummen wird über ein Multivariates Autoregressives Modell erster Ordnung (MAR[1]) abgebildet.

Das Temperaturmodell in GWEX (E_{VIN} *et al.* 2019) simuliert für jede Station standardisierte Werte auf täglicher Basis. Die zeitliche und räumliche Korrelation wird wiederum mit einem MAR(1)-Prozess abgebildet, und die höhere zeitliche Auflösung der erzeugten täglichen Temperaturen wird schliesslich über eine Disaggregation erreicht. Die Temperatursimulation ist von den simulierten Niederschlägen abhängig.

Die 30 Simulationen von je 10 000 Jahren sind unabhängig voneinander und können zusammengehängt werden. Somit stehen aus GWEX insgesamt 300 000 Jahre an stündlichen Wetterdaten zur Verfügung, wobei im gesamten Einzugsgebiet der Aare 105 Niederschlags- und 26 Temperaturstationen simuliert werden.

5.1.2 Resultate und Unsicherheiten der meteorologischen Zeitreihen

Mit GWEX und SCAMP werden jeweils 30 Zeitreihen von Niederschlag und Temperatur erzeugt. Diese haben eine zeitliche Auflösung von einer Stunde, eine Länge von 10 000 Jahren, und sind für jedes der hydrologisch modellierten Teileinzugsgebiete verfügbar. Zusammengehängt erhält man so eine meteorologische Zeitreihe von 300 000 Jahren in stündlicher Auflösung. Die mit GWEX erzeugten meteorologischen Zeitreihen dienen als Grundlage für die langen kontinuierlichen hydrologischen Simulationen (Kap. 5.2). Die mit SCAMP erzeugten meteorologischen Zeitreihen dienen als Validierung.

Die Resultate beider Wettergeneratoren wurden eingehend analysiert und jeweils mit den Beobachtungen verglichen. Die Untersuchungen umfassen wichtige Charakteristika von Niederschlag (Häufigkeit trockener und nasser Tage, Länge von Trocken- und Nassperioden, Extremwerte, räumliche Korrelation, Saisonalität) und Temperatur (Hitzewellen und Kälteperioden, räumliche Korrelation, Minima und Maxima) und decken insgesamt eine grosse Bandbreite an zeitlichen (eintägig, mehrtägig sowie monatlich) und räumlichen (Stationen, Einzugsgebiete, Flussgebiete, gesamte Aare) Skalen ab. Die Kovarianz zwischen Niederschlag und Temperatur wurde ebenfalls beurteilt. Für alle geprüften Grössen fielen die Resultate sowohl für GWEX wie auch für SCAMP zufriedenstellend aus, und beide Wettergeneratoren können die wesentlichen zeitlichen und räumlichen Charakteristika der beobachteten Niederschläge und Temperaturen reproduzieren. Weiter zeigen GWEX und SCAMP sehr ähnliche Starkniederschläge. Dies gilt für alle untersuchten zeitlichen und räumlichen Skalen und bestärkt angesichts der sehr unterschiedlichen Ansätze der beiden Wettergeneratoren das Vertrauen in die Ergebnisse. Beachtet werden muss, dass die erzeugten extrem seltenen Starkniederschläge generell eine grosse Unsicherheit aufweisen, da auch sie letztlich auf einer Extrapolation von maximal 85 Jahren an Beobachtungen basieren. Als sehr grobe Einordnung kann abschliessend festgehalten werden, dass die mit GWEX und SCAMP erzeugten Starkniederschläge unterhalb der 24-Stunden PMP-Werte (Probable Maximum Precipitation) liegen, welche aus den PMP-Karten von Zeimetz (FLURA *et al.* 2018; ZEIMETZ 2017) herausgelesen werden können, die auf der im Projekt CRUEX++ (FALLOT *et al.* 2017; HERTIG und FALLOT 2009) entwickelten Methode basieren. Dieser Vergleich hat jedoch aus methodischen Gründen nur sehr geringe Aussagekraft (mehr dazu im Detailbericht A).

Aus Zeit- und Kostengründen wurden von den mit SCAMP erzeugten meteorologischen Zeitreihen nur eine Auswahl der extremsten Niederschlagsereignisse ausgesucht und zwecks Plausibilisierung der Ergebnisse via HBV und RS Minerve in Ereignisganglinien umgesetzt (Kap. 10.1 und Detailbericht A).

Die beiden Wettergeneratoren GWEX und SCAMP wurden speziell für EXAR entwickelt. Grundlage für methodische Entscheidungen waren dabei eine Vielzahl vorangehender Arbeiten (sowohl innerhalb als auch ausserhalb des Grenoble INP) sowie eine gründliche Evaluation der Simulationsresultate. Für beide Generatoren wurden methodisch etliche Alternativen erwogen und verglichen. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf der Fähigkeit, die verschiedenen Charakteristika des beobachteten Niederschlagsverhaltens (Gesamtsumme, flüssiger und fester Niederschlag, statistische Verteilung der Maxi-

malniederschläge, statistische Verteilung der täglichen Niederschläge, räumliche Kovarianz) und Temperaturverhaltens (u. a. Saisonalität, tägliche Variabilität) wiederzugeben. Die Evaluationen wurden auf verschiedenen Skalen vorgenommen, die sich räumlich von den einzelnen meteorologischen Messstationen mit Zwischenschritten bis zum gesamten Aaregebiet erstrecken und zeitlich von Stundenwerten zu kumulierten Werten für 7, 15 und 30 Tage aufsummieren. Darauf aufbauend wurde die definitive Struktur der beiden Wettergeneratoren gewählt. Eine wichtige Erkenntnis der Evaluationen war, dass GWEX und SCAMP auf allen betrachteten räumlichen und zeitlichen Aggregationskalen sehr ähnliche grosse und extreme Niederschlagsmengen erzeugen, obwohl sehr unterschiedliche Modellansätze verwendet wurden.

Der räumliche und zeitliche Ablauf einiger grosser mit GWEX und SCAMP simulierter Wetterereignisse wurde im Juli 2019 mit Experten der MeteoSchweiz diskutiert. Im Fokus standen dabei die zehn Ereignisse mit den grössten simulierten Niederschlagssummen über dem gesamten Aaregebiet (je fünf für GWEX und SCAMP) sowie die zehn Ereignisse mit den höchsten simulierten Abflüssen für das Gesamtsystem der Aare (wiederum je fünf für GWEX und SCAMP). Die vorgestellten Konfigurationen wurden von den Experten aufgrund ihrer Erfahrungen in der Schweiz für plausibel befunden.

Das Prinzip der beiden Wettergeneratoren GWEX und SCAMP wurde durch Artikel in qualitativ hochrangigen, begutachteten Fachzeitschriften (Environmetrics, Hydrology and Earth System Sciences, Theoretical and Applied Climatology) publiziert und somit von zahlreichen Forschern und Experten aus der wissenschaftlichen Gemeinschaft evaluiert und validiert. Diese Artikel befinden sich in den Anhängen des Detailberichts A zu den hydrometeorologischen Grundlagen.

5.2 Hydrologisches Modell HBV

5.2.1 Modellaufbau

Für die hydrologischen Simulationen in EXAR wurde das HBV-Modell (BERGSTRÖM 1992) in der Version HBV light (SEIBERT 1997; SEIBERT und VIS 2012) verwendet (Abb. 9). HBV ist ein konzeptionelles hydrologisches Einzugsgebietsmodell, das mit Zeitreihen von Tem-

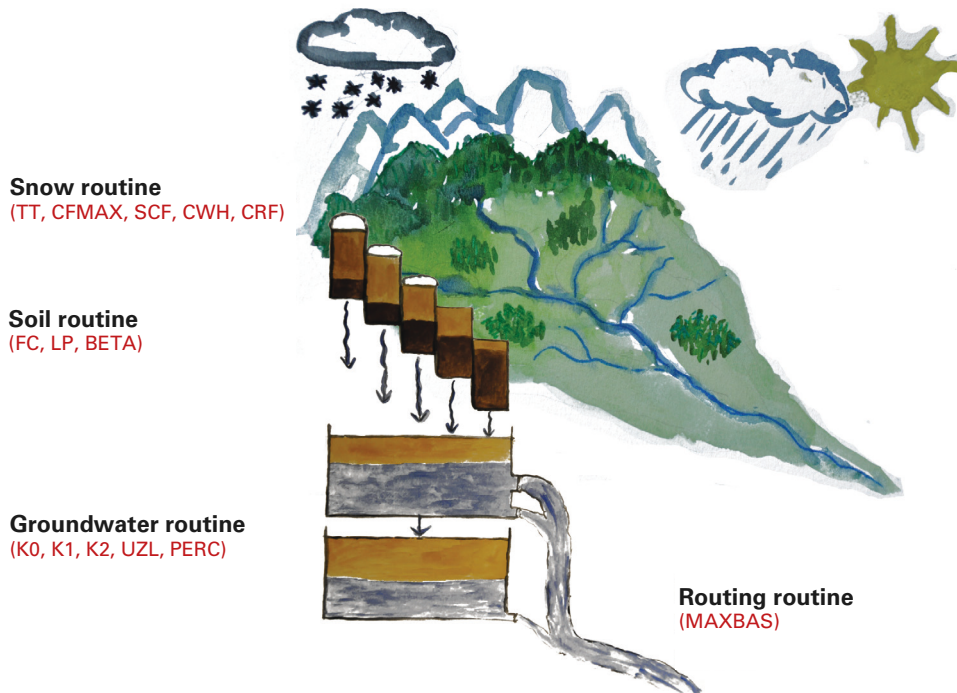


Abb. 9. Modellschema für HBV. Verarbeitung der Abflusszeitreihen durch vier Routinen (Schnee, Bodenfeuchte, Grundwasser und Verformung der Ganglinie). Die roten Abkürzungen entsprechen freien/zu kalibrierenden Modellparametern.

peratur und Niederschlag betrieben wird. Diese Zeitreihen werden durch vier Routinen (Modellkomponenten) verarbeitet, die Schnee, Bodenfeuchte, Grundwasser und die Verformung der Ganglinie repräsentieren. Die aktuelle Verdunstung wird in der Bodenfeuchteroutine berücksichtigt, indem Schätzwerte für die langfristige mittlere potenzielle Verdunstung mit der gemessenen Lufttemperatur kombiniert werden. Aus den Simulationen resultiert der Abfluss am Gebietsauslass.

In der hier verwendeten Version besitzt HBV 15 freie Modellparameter, die anhand von Abflussdaten kalibriert werden müssen (Kap. 5.2.3). Für Gebiete mit relevanter Vergletscherung (üblicherweise mehr als 5 Prozent der Gebietsfläche) kommen fünf weitere freie Modellparameter hinzu. In EXAR wurden die oben beschriebenen meteorologischen Zeitreihen aus GWEX als Antrieb für HBV verwendet, um für jedes der berücksichtigten Teileinzugsgebiete eine kontinuierliche stündliche Simulation über rund 300 000 Jahre zu erhalten. Die stündlichen Stationswerte des Wettergenerators wurden dabei mittels Thiessen-Polygonen interpoliert, um mittlere Gebietswerte zu erhalten. Während die hydrologischen Simulationen selbst nicht räumlich verteilt sind, wurden modellintern Höhenzonen mit einer Erstreckung von 100 m verwendet. Die stündlichen Gebietsmittel von Temperatur und Niederschlag wurden dann in Abhängigkeit dieser Höhenzonen angepasst. Für Temperatur wurde ein konstanter Faktor von $0,6^{\circ}\text{C}$ pro 100 m Höhendifferenz verwendet, für Niederschlag ein konstanter Faktor von +5 Prozent pro 100 m Höhendifferenz.

5.2.2 Unterteilung in Teileinzugsgebiete

Für die hydrologische Modellierung in EXAR wurde das Aaregebiet in 79 Teileinzugsgebiete unterteilt (Abb. 10). 72 dieser Gebiete decken die Fläche bis zu den Übergabepunkten ab, weitere sieben die grossen Talebenen unterhalb der Übergabepunkte. Für neun der zehn grossen Seeflächen (alle ausser Schifflensee) wurden separate, vereinfachte Modelle in HBV erstellt.

Je nach Grösse der Gebietsfläche, Verfügbarkeit von gemessenen Abflussdaten und Distanz zu den grossen Talflüssen wurden die Teileinzugsgebiete unterschiedlich behandelt. Die folgenden Gruppen wurden ausgeschieden:

- Hauptgebiete, kalibriert (dunkelgrün, 26 Gebiete): Diese Teileinzugsgebiete weisen meist eine Fläche von 50 km^2 oder mehr auf und verfügen über langjährige Abflussbeobachtungen in mindestens stündlicher Auflösung. Für diese Gebiete wurde ein vollständiges HBV-Modell erstellt und kalibriert.

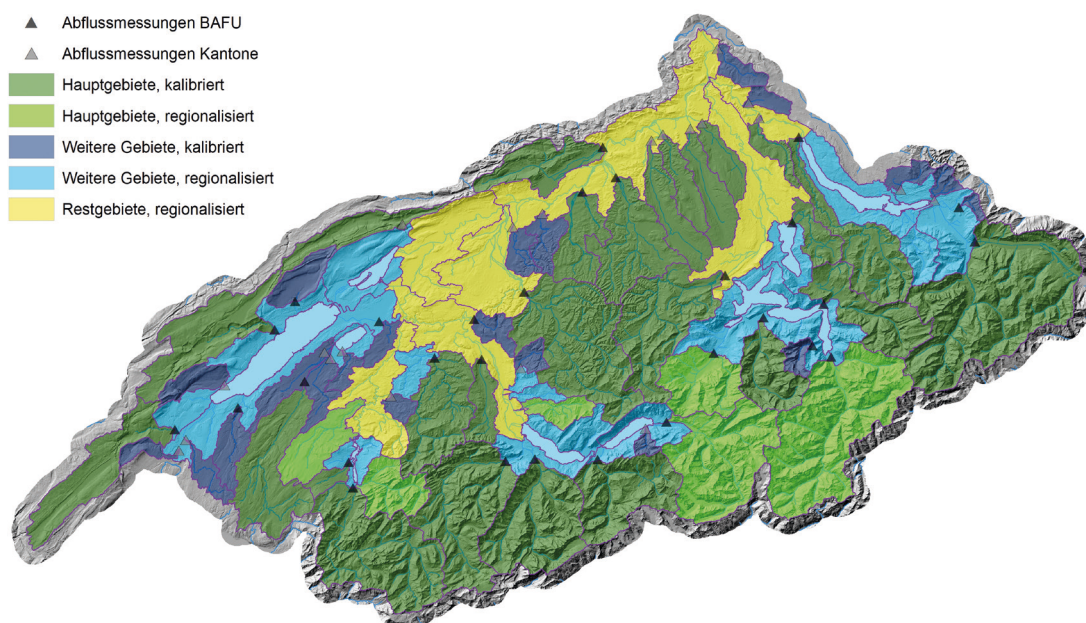


Abb. 10. Mit HBV simulierte Teileinzugsgebiete der Aare (vgl. Abb. 3).

- Hauptgebiete, regionalisiert (hellgrün, sechs Gebiete): Teileinzugsgebiete mit einer Fläche von meist 50 km² oder mehr, für die keine langjährigen Abflussbeobachtungen in hoher zeitlicher Auflösung verfügbar sind. Auch Gebiete mit stark anthropogen beeinflussten Abflussmessungen wurden in diese Gruppe eingeteilt. Die Modellparameter wurden hier nicht kalibriert, sondern mittels Regionalisierung geschätzt (Kap. 5.2.4).
- Weitere Gebiete, kalibriert (dunkelblau, 21 Gebiete): Teileinzugsgebiete mit einer Fläche von meist unter 50 km² und langjährigen Abflussbeobachtungen in mindestens stündlicher Auflösung. Es handelt sich hier um Zuflüsse zu den grossen Seen sowie Zuflüsse zu Aare und Limmat. Ein vollständig kalibriertes HBV-Modell wurde erstellt.
- Weitere Gebiete, regionalisiert (hellblau, 19 Gebiete): Teileinzugsgebiete mit einer Fläche von meist unter 50 km² ohne langjährige unbeeinflusste Abflussbeobachtungen in hoher zeitlicher Auflösung. Diese Gebiete umfassen einerseits ausgewählte Zuflüsse zu Saane und Aare sowie zum Zürichsee. Andererseits wurden die vielen kleinen, direkten Zuflüsse zu den grossen Seen hier zu Teileinzugsgebieten zusammengefasst. Die Modellparameter wurden mittels Regionalisierung geschätzt.
- Restgebiete, regionalisiert (gelb, sieben Gebiete): Talflächen unterhalb der Übergabepunkte entlang der grossen Flüsse (Zufluss aus den Flächen). Es liegen keine Abflussmessungen vor, die Modellparameter wurden mit einer vereinfachten Regionalisierung geschätzt.

Für fünf der simulierten Gebiete wurde ein Modul in HBV aktiviert, welches die bei Gletscherflächen relevanten Prozesse abbildet.

5.2.3 Kalibrierung

Die freien Modellparameter von HBV wurden wo immer möglich anhand von mehrjährigen Abflussmessungen kalibriert und anschliessend validiert. In 47 Teileinzugsgebieten war dies möglich, da stündlich aufgelöste Messungen des Bundes (26 Stationen) oder der Kantone (21 Stationen) zur Verfügung standen. Als Kalibrierungsperiode wurden die Jahre 1990–2015 verwendet, und pro Gebiet wurden mit einem genetischen Algorithmus 101 Parametersätze erhoben (SEIBERT 2000). Eine optimale Kalibrierung kann dabei mit verschiedenen Kombinationen von Parametern erreicht werden. Um möglichst robuste Parametersätze zu erhalten, die zudem auch eine gute Wiedergabe des Hochwasseregeschehens erreichen, wurde in der Kalibrierung ein Gütemass mit mehreren Komponenten verwendet. Es setzt sich zusammen aus der weitverbreiteten Modelleffizienz nach Nash und Sutcliffe (1970; Gewichtung 40%), der Abweichung im Bereich von Spitzenabflüssen (Gewichtung 40%) sowie der Abweichung im Abflussvolumen (Gewichtung 20%).

Die 101 kalibrierten Parametersätze dienen dazu, die Unsicherheit der hydrologischen Simulation zu quantifizieren. Im Normalfall könnte mit jedem dieser Parametersätze eine Simulation durchgeführt werden, um als Resultat eine kontinuierliche Ganglinie mit Unsicherheitsbereichen zu erhalten. Da dies hier aufgrund der sehr langen Simulationsperiode von rund 300 000 Jahren nicht möglich war, wurden die mit allen 101 Parametersätzen simulierten Jahresspitzenabflüsse pro Gebiet in drei Cluster unterteilt, welche tiefe, mittlere und hohe Resultate gruppieren. Dazu wurde für alle Gebiete eine 50 Jahre lange Simulation mit allen 101 Parametersätzen durchgeführt, und die entsprechenden Ganglinien wurden auf ihre Jahresspitzenabflüsse hin ausgewertet. Anhand dieser Jahresspitzen wurden schliesslich die drei Cluster gebildet und für jeden Cluster ein repräsentativer Parametersatz ausgewählt. Mit jedem der drei Parametersätze wurden 300 000 Jahre Abflussdaten simuliert, womit den Abflussdaten ein Unsicherheitsbereich zugeordnet werden konnte.

5.2.4 Regionalisierung

In Gebieten ohne Abflussbeobachtungen müssen die freien Modellparameter von HBV geschätzt werden. Von den verschiedenen Möglichkeiten für eine solche Schätzung wurde hier ein Vorgehen gewählt, bei dem komplette Parametersätze aus anderen, gemes-

senen und kalibrierten Gebieten übertragen werden. Als Ausgangspunkt dafür dienen die Modellparameter, die in 47 Teileinzugsgebieten anhand von Abflussmessungen kalibriert wurden. Diese Gebiete dienen als sogenannte Spendergebiete.

Wegen der für EXAR gewählten Gebietsunterteilung ergeben sich zwei grosse Herausforderungen für diese sogenannte Regionalisierung: Erstens sind die zu regionalisierenden Gebiete häufig kleiner als die kalibrierten Gebiete, die als Basis für die Regionalisierung dienen. Dies erschwert die Parameterwahl für ein ungemessenes Gebiet, da die Grösse des Teileinzugsgebiets die Parameter beeinflussen kann. Zweitens kann der in der Kalibrierung verwendete genetische Algorithmus dazu führen, dass die einzelnen Modellparameter keine kontinuierliche Verteilung aufweisen. Dies erschwert wiederum das Auffinden geeigneter Parameter für ungemessene Gebiete.

Um eine möglichst gute Regionalisierung zu erreichen, wurden verschiedene Ansätze getestet (Masse für räumliche Nähe, Masse für hydrologische Ähnlichkeit, Clustering (k-means), random forests). Die Ausführungen dazu sind im Detailbericht A zu finden. Für die Regionalisierung wurde letztlich der Ansatz gewählt, der in den Tests insgesamt die besten Resultate zeigte: Ein Clustering, welches das Abflussregime als Diskriminante verwendet und aus zwei ausgewählten Spendergebieten jeweils die 50 besten Parametersätze übernimmt.

5.3 Vereinfachte Gerinnehydraulik für das Gesamtsystem mit dem Routingmodell RS Minerve

Die Simulationen der einzelnen mit HBV abgebildeten Teileinzugsgebiete wurden schliesslich mit einem Routingmodell unterhalb der Übergabepunkte für das Gesamtsystem Aare modelliert. Ziel war ein Modell zu verwenden, das die rund 300 000 Jahre kontinuierlicher HBV-Simulationen in stündlicher Auflösung handhaben und mit vertretbarem Zeitaufwand verarbeiten kann.

Dazu wurde in RS Minerve (Routing System Minerve, GARCÍA HERNÁNDEZ *et al.* 2016) ein vereinfachtes Modell der Gerinnehydraulik aufgebaut. RS Minerve wird über das Research Center on Alpine Environment (CREALP) vom Kanton Wallis verwendet, um hydrologische Vorhersagen an wichtigen Punkten der Rhone und ihren Zuflüssen zu machen (GARCÍA HERNÁNDEZ *et al.* 2014). RS Minerve wird dort insbesondere eingesetzt, um kritische Situationen zu erkennen und Alarme auszulösen. Weiter erlaubt es die gezielte Bewirtschaftung von Speicherseen im Hinblick auf Hochwasserereignisse (CHY 2010).

Das Gesamtsystem der Aare unterhalb der Übergabepunkte wurde mit RS Minerve so umgesetzt, dass sowohl normale Abflussbedingungen als auch Extrembedingungen mit grossen Überflutungsflächen abgebildet werden können. Insbesondere wurden dazu wichtige Retentionseffekte unterhalb der Übergabepunkte abgebildet, vor allem die Talebenen ausgewählter Flussgebiete wie etwa das Grosse Moos oder die Überflutungsflächen der Emme und Reuss. Da keine Messdaten zur Verfügung stehen, wurden als Basis synthetische Ganglinien verwendet, die Wiederkehrperioden zwischen einem HQ_{100} und einem HQ_{10000u} abdecken (u bedeutet oberes Konfidenzintervall für den Spitzenabflusswert; Detailbericht E, Kap. 5). Da für RS Minerve Angaben zu Fliesszeiten und Retention benötigt werden, wurden diese synthetischen Ganglinien durch ein detaillierteres hydraulisches Modell (BASEMENT, Kap. 7) simuliert. Somit konnten die Bereiche mit stehender und fliessender Retention sowie die Fliesszeiten entlang der Gerinne bestimmt werden. Diese Informationen wurden an RS Minerve weitergegeben. Eine realistische Nachahmung der Retentionseffekte über eine grosse Bandbreite von Abflüssen konnte in RS Minerve erreicht werden, indem die betroffenen Flussabschnitte sowohl als parallele wie auch als serielle Gerinne abgebildet wurden. Dazu wird für jeden Abschnitt eine maximale Gerinnekapazität festgelegt. Der über die Kapazität hinausgehende Abfluss wird in die Retentionsfläche, d.h. im Fall von RS Minerve in ein parallel abgebildetes, langsam fliessendes Gerinne ausgeleitet.

Für die zehn grossen Seen im Aaregebiet wurden aus dem Digitalen Höhenmodell DHM25 Beziehungen zwischen Pegelstand, Fläche und Volumen abgeleitet. Sechs dieser Seen (Brienzersee, Thunersee, Bielersee, Vierwaldstättersee, Zugersee, Zürichsee) sind reguliert. Die entsprechenden Reguliervorschriften liegen in Form von Pegel-Abfluss-

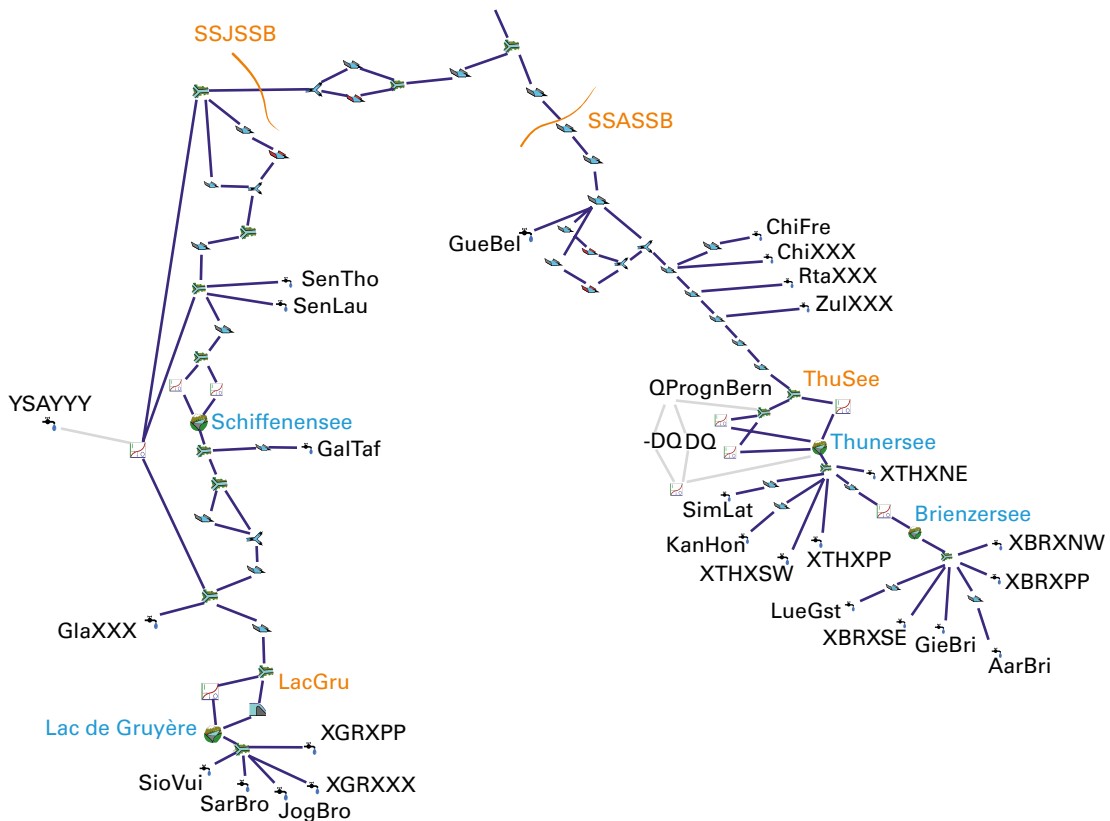


Abb. 11. Ausschnitt aus der Implementation in RS Minerve. Die Kürzel der mit HBV simulierten Teileinzugsgebiete sind in Schwarz angegeben und regulierte Seen in Hellblau. Die Transferpunkte Gümmenenbrücke (SSJSSB), Halen (SSASSB) und Thun (ThuSee) sind in Orange gegeben.

Diagrammen vor und sind meist nach Jahreszeit differenziert. Für den Einbau in RS Minerve wurden die Diagramme in monatliche Vorschriften übersetzt und als «Planner»-Elemente implementiert. Falls entsprechende Informationen verfügbar waren, wurden auch von den Normalreglementen abweichende Bedienvorschriften eingebaut. So werden z.B. die Abflüsse der Aare bei Thun so lange wie möglich unter $450 \text{ m}^3/\text{s}$ gehalten, bei Murgenthal so lange wie möglich unter $850 \text{ m}^3/\text{s}$. Für völlig geöffnete Wehre im Hochwasserfall wurden dieselben Pegel-Abfluss-Beziehungen wie im hydraulischen 2D-Modell verwendet (Detailbericht E, Kap. 7.2).

Die HBV-Simulationen für die grossen Talflächen (Aare, Reuss, Emme und Limmat) wurden dem Gesamtsystem jeweils am Ausflusspunkt der entsprechenden Teileinzugsgebiete hinzugefügt. Da die Talfläche der Aare sehr ausgedehnt ist, wurde sie in drei Teilgebiete aufgetrennt, die jeweils separat in HBV simuliert und dann RS Minerve hinzugefügt wurden. Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt des Gesamtsystems in RS Minerve.

Als Resultat der ganzen Modellkette vom Wettergenerator über das hydrologische Modell bis hin zum hydraulischen Modell RS Minerve entstehen stündliche Abflussganglinien von 300 000 Jahren, die an den Transferpunkten ausgelesen werden können.

Unsicherheiten entstehen bei der Modellierung mit RS Minerve aufgrund der Konfiguration des Modells, der Vereinfachung der Seeregulierungen und der Verwendung von synthetischen Ganglinien als Basis für die Simulationsanpassungen. Vergleiche von Simulationen mit RS Minerve mit vergangenen Ereignissen (2005, 2007) sowie mit dem detaillierten hydraulischen Modell BASEMENT zeigen, dass die ganze Modellierungskette und der für RS Minerve verwendete Aufbau gute, plausible und robuste Resultate liefern kann (Detailbericht A). Unsicherheiten aus dem hydraulischen Modell RS Minerve wurden in der Unsicherheitsfortpflanzung nicht berücksichtigt.

5.4 Korrektur der Ergebnisse

Wie in Kapitel 4.2 erwähnt, mussten 11 000 Jahre aus der simulierten Abflusszeitreihe ausgeschlossen werden, und die verbleibenden 289 000 Jahre mussten von einer noch nicht definitiven Modellkonfiguration (2018) von HBV und RS Minerve hin auf die definitive Konfiguration (2019) korrigiert werden. Dazu wurde ein statistischer Ansatz gewählt, für den 10 Prozent der gesamten verbleibenden Abflusszeitreihe (für Blöcke von 1000 Jahren jeweils die ersten 100 Jahre; insgesamt aneinandergereiht 28 900 Jahre) sowohl in der Konfiguration 2018 wie auch der Konfiguration 2019 simuliert und anschliessend verglichen wurden. Es wurde die Abflusszeitreihe des medianen Parametersatzes von HBV verwendet, die Korrektur wurde auf die beiden Simulationsresultate der anderen Parametersätze unverändert angewendet.

Mit den simulierten 28 900 Jahren in Konfigurationen 2018 und 2019 wurde ein von der Wiederkehrperiode abhängiger Korrekturfaktor für die jährlichen Spitzenabflüsse (HQ_x) ermittelt. Gebildet wurde dieser durch einen gleitenden Mittelwert, für den zwischen 4000 (für kleine Wiederkehrperioden) und 3 (für grosse Wiederkehrperioden) HQ_x -Werte einbezogen wurden. Die jährlichen Spitzenabflüsse der Simulationsresultate 2018 wurden schliesslich mit dem Korrekturfaktor multipliziert, um daraus eine definitive Extremwertstatistik für die Spitzenabflüsse zu erhalten. Der Verlauf des Korrekturfaktors ist in Abbildung 12 exemplarisch für zwei Transferpunkte gezeigt. Die Wiederkehrperioden der bereits zuvor ausgewählten Ganglinien (Kap. 5.5) wurden schliesslich auf Basis der definitiven Extremwertstatistik korrigiert. Eine ausführliche Erläuterung befindet sich im Detailbericht A zu den hydrometeorologischen Grundlagen.

5.5 Überschreitungskurven und Auswahl der Ganglinien

Aus den Daten der 289 000 Jahre wurden für die Transferpunkte und für weitere Standorte die jährlichen Spitzenabflüsse extrahiert und in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode in Überschreitungskurven dargestellt (Kap. 10.1 und Detailbericht A). Mittels «bootstrap resampling» wurden auch die dazugehörigen 95-Prozent-Konfidenzintervalle ermittelt.

Die Unsicherheit der Werte nimmt mit der Jährlichkeit zu. So sind die höchsten Wiederkehrperioden (100 000 Jahre) am unsichersten. Auf eine Extrapolation auf noch selteneren Wiederkehrperioden wurde aufgrund der grossen Unsicherheiten verzichtet.

Aufgrund begrenzter Rechenkapazitäten (u.a. wegen des hohen Berechnungsaufwandes) musste für die Analysen mit dem detaillierten hydraulischen Modell BASEMENT (Kap. 7.1) mit einer Auswahl von charakteristischen Hochwasser-Ganglinien gearbeitet werden. Aus den Daten der 289 000 Jahre (medianer Parametersatz) wurden für

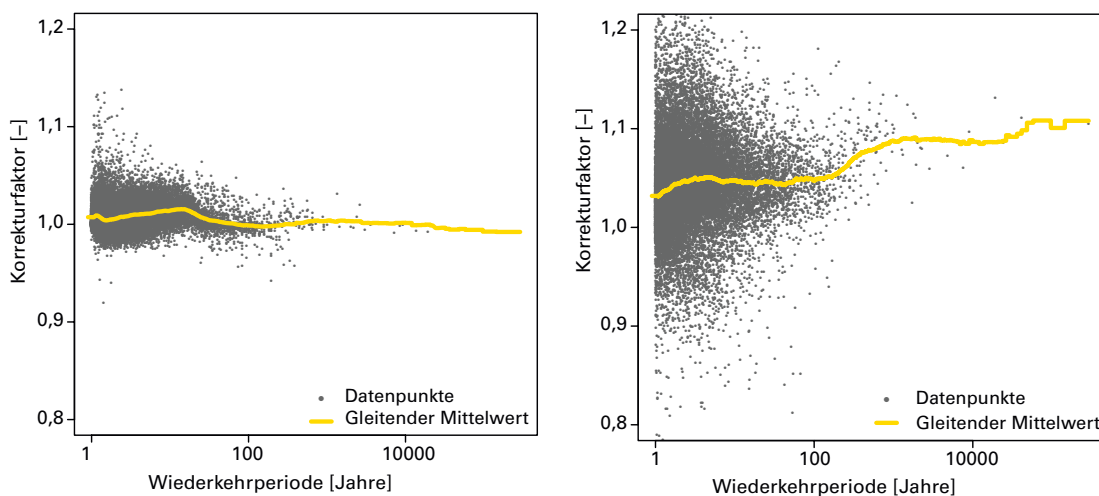


Abb. 12. Beispiel des Korrekturfaktors für die Spitzenabflüsse an den Transferpunkten Halen (links) und Golaten (rechts).

die Analyse des Effekts der Schlüsselstellen im Gesamtsystem verschiedene Ganglinien ausgewählt, die bestimmte Bedingungen erfüllten (z. B. Überströmungshöhen an Seitendämmen, Dauer, zeitliches Zusammentreffen von Ganglinien, Kap. 4.3).

Für die Analyse der Beurteilungssperimeter wurden an den jeweiligen Transferpunkten flussaufwärts jeweils drei repräsentative Ganglinien (FL3, FL4 und FL5) für diverse Wiederkehrperioden gutachterlich ausgewählt (basierend auf dem medianen Parametersatz). Massgebend für die Auswahl waren die Form der Ganglinien und der Spitzenabfluss. Für die meisten analysierten Bauwerksversagen spielt v. a. der Spitzenabfluss eine grosse Rolle. Einzig bei einem Versagen eines Seitendammes kann die Dauer des Hochwasserereignisses entscheidend sein. Je nach Seitendamm sind andere Belastungsdauern wichtig. Bei der Selektion von Ganglinien zum Beispiel beim Hagneckkanal, wo eine potenzielle Bresche im Seitendamm untersucht wurde, ist aufgefallen, dass es in den Ganglinien der 289000 Jahre nur wenige gab, die eine längere Dauer aufwiesen. Zudem hatten die Ereignisse mit längerer Dauer oft auch hohe Spitzenabflüsse. Des Weiteren sind in den untersuchten Subsystemen der Beurteilungssperimeter keine nennenswerten Retentionsbereiche, für welche Ganglinien mit langen Dauern oder mit grossem Volumen eine Rolle spielen würden. Aus diesen Gründen wurde bei der Auswahl der Ganglinien für die Analyse der Beurteilungssperimeter der Fokus auf den Spitzenabfluss gelegt.

Die ausgewählten Ganglinien wurden als Initialereignis bezeichnet. Die Bezeichnung des Initialereignisses in der Form von FLn zeigt an, dass der mit den ausgewählten Spitzenabflüssen modellierte Abflussbereich eine Häufigkeit in der Grössenordnung von $1E-n$ [/Jahr] aufweist. Die Ganglinien der Initialereignisse werden als repräsentativ in ihrem Wahrscheinlichkeitsband betrachtet. So weist beispielsweise das Initialereignis FL3 eine Häufigkeit in der Grössenordnung von $1E-3$ /Jahr auf. Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Initialereignisses wurden sämtliche Ereignisse betrachtet, welche innerhalb eines definierten Intervalls des Spitzenabflusses liegen (z. B. Event-Klasse FL3). Aus der Differenz der Überschreitungshäufigkeit der definierten Intervallgrenzen wurde die mittlere Eintretenshäufigkeit des Initialereignisses bestimmt (Detailbericht G, Kapitel 2.3.1). Mit den zusätzlich angegebenen Werten für das 5-Prozent- und 95-Prozent-Perzentil wird die Bandbreite des Unsicherheitsbereichs beschrieben. Die ausgewählten Initialereignisse für die verschiedenen Beurteilungssperimeter werden in den jeweiligen Resultatkapiteln aufgeführt.

Die Initialereignisse wurden für die Beurteilung von Versagensprozessen an Bauwerken und deren Auswirkungen, für die entsprechenden hydraulischen Simulationen sowie für die Ereignisbäume verwendet (Kap. 7–9). Die Ganglinien, die für die Analyse der Beurteilungssperimeter verwendet wurden, werden in den Kapiteln zu den Resultaten (Kap. 12 ff.) jeweils zu Beginn aufgeführt.