



**Universität
Zürich^{UZH}**



BAFU - Projekt Niedrigwasser und Grundwasser Synthesebericht

Projektpartner: Jan Seibert (Universität Zürich), Markus Weiler und Kerstin Stahl (Universität Freiburg, DE), Philip Brunner und Daniel Hunkeler (Universität Neuchâtel)

Autorenbeiträge von Maria Staudinger (Universität Zürich), Michael Stölzle (Universität Freiburg), Fabien Cochand, Stefanie Wirth und Claire Carlier (Universität Neuchâtel)

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Dezember 2018

Impressum:

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Jan Seibert (Universität Zürich), Markus Weiler und Kerstin Stahl (Universität Freiburg, DE), Philip Brunner und Daniel Hunkeler (Universität Neuchâtel)

Autorenbeiträge weiterhin von Maria Staudinger (Universität Zürich), Michael Stölzle (Universität Freiburg), Fabien Cochand, Stefanie Wirth und Claire Carlier (Universität Neuchâtel)

Begleitung BAFU: Petra Schmocker-Fackel, Michael Sinreich

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Motivation	7
2 Vorgehensweise im Projekt.....	8
2.1 Terminologie	8
2.2 Kennwerte	8
2.3 Statistische Datenanalyse	9
2.4 Verwendete Modelle im Überblick.....	10
2.4.1 Physikalisch basierte Modelle.....	10
2.4.2 Einfaches hydrologisches Speicherelementmodell HBV mit Austauschbox	10
2.5 Realisierte Modellsimulationen.....	10
2.5.1 Stresstest-Szenarien zur Sensitivitätsanalyse	10
2.5.2 Synthetische hydrogeologische Modelle.....	12
2.5.3 Detaillierte Einzugsgebiets-Modelle mit HGS	12
2.6 Datengrundlage	12
3 Empirische Abschätzung von Niedrigwassercharakteristika: statistische Beziehungen zwischen Einzugsgebietseigenschaften und Niedrigwasserkennwerten	14
4 Modellierung von Niedrigwassercharakteristika für ein besseres Verständnis der Prozesse und Einflussfaktoren.....	19
4.1 Physikalische Grundwassermodelle: Analyse entscheidender Faktoren bei Niedrigwasser	19
4.1.1 Synthetische Modelle mit HGS.....	19
4.1.2 Detaillierte Einzugsgebiets-Modelle mit HGS	23
4.2 Hydrologische Einzugsgebietsmodelle: Berücksichtigung des Austauschs zwischen Grund- und Oberflächenwasser	27
4.2.1 Entwicklung der konzeptionellen Austauschbox.....	27
4.2.2 Vergleich zu HGS detaillierte Röthenbach Variationen	28
4.2.3 Anwendung am Töss Einzugsgebiet	30
4.2.4 Anwendung auf Einzugsgebiete in der Schweiz	31
4.3 Blick in die Zukunft: Modellanwendungen zu Bestimmung der Sensitivität bei Klimaänderung.....	33
4.4 Qualität hydrologischer Messstationen.....	36
4.5 Die Molasse als Festgestein im Mittelland: variierende hydrogeologische Eigenschaften	37

5 Empfehlung für die Anwendung von Datenanalysen und Modellierung zur Abschätzung der Sensitivität von Einzugsgebieten auf längere Trockenphasen.....	40
5.1 Sensitivität von Fließgewässern und den dazugehörigen Systemdienstleistungen auf Trockenperioden.....	40
5.2 Sensitivität alluvialer Grundwasserleiter und den dazugehörigen Systemdienstleistungen auf Trockenperioden.....	45
6 Ausblick	47
6.1 Empfehlungen zur Erhebung von Daten (Monitoringvorschläge)	47
6.1.1 Effizientere Nutzung vorhandener Daten	47
6.1.2 Abschätzung von für die Niedrigwasserdynamik relevanten Grundwasserleiter-eigenschaften.....	48
6.1.3 Allgemeine Empfehlungen zur Verbesserung des Prozesswissens zu Grundwasser-Oberflächenwasser Austausch	49
7 Literatur	51

Zusammenfassung

In Anbetracht der wahrscheinlich häufiger werdenden Niedrigwassersituationen wurde in diesem Projekt das hydrologische Verhalten von Einzugsgebieten untersucht. Der Fokus lag hierbei auf den Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktionen und Kombination der Stärken physikalisch-hydrogeologischer und konzeptuell-hydrologischer Modelle. Ziel war trockenheitssensitive Gebiete zu identifizieren, den Einfluss von Klimaänderung und Wasserbewirtschaftung quantitativ abzuschätzen und geeignete Monitoring-Strategien zu entwickeln.

Für die Modellierung wurden mit dem HBV Modell und dem Modell HydroGeoSphere zwei typische Vertreter der Speicherelementmodelle beziehungsweise der räumlich-verteilen, physikalisch-basierten Modelle verwendet. Da bei es den meisten Speicherelementmodellen keinen Wasserfluss vom Gewässer zum Grundwasser gibt, musste das HBV Modell mit einer Austauschbox, die das gewässernahe Grundwasser repräsentiert, erweitert werden, um diesen Prozess zu berücksichtigen. Mit dem physikalisch basierten Modell HydroGeoSphere wurden die funktionalen Zusammenhänge zwischen dem Niedrigwasserverhalten von Fliessgewässern und der Hydrogeologie identifiziert. Ausserdem wurden die wichtigsten wasserspeichernden Struktureinheiten als sogenannte „funktionelle hydro(geo)logische Einheiten“ charakterisiert. Mit der Grundlage dieses vertieften Prozessverständnisses wurden vorhandene einfache hydrologischer Speicherelementmodelle weiterentwickelt und parametrisiert, die auch auf grösserer Einzugsgebietsskala anwendbar sind. Diese Modelle stellen damit ein wichtiges Werkzeug dar, um trockenheitssensitive Einzugsgebiete in der Schweiz zu identifizieren. Für die verschiedenen Modellierungsansätze und Skalen wurden Sensitivitätsanalysen mit Stresstestszenarien durchgeführt.

Die statistischen Analysen zeigten unter anderem, dass Einzugsgebiete mit mittlerer Höhe (zwischen 800 und 1600 m ü. NM) generell eine höhere Niedrigwassersensitivität als tieferliegende oder alpine Gebiete haben, was durch das Zusammenspiel der Faktoren Temperatursensitivität des Abflusses (Gebiete mit Minimum im Sommer) und Gebietsspeicher (Gebiete mit Minimum im Winter) erklärt werden kann. Für die Q_{95} -Werte konnte kein deutlicher Trend beobachtet werden. Allfällige Trends hängen stark davon ab, inwieweit einzelne Trockenjahre berücksichtigt werden.

Die neu entwickelte Austauschbox (*exchange box*) wird als Weiterentwicklung des HBV Modells beschrieben. Mit dieser Erweiterung konnte der MNM7Q-Kennwert in vielen Gebieten besser abgebildet werden. Die Bestimmung des dynamischen Grundwasserspeichers mithilfe hydrologischer Modellierung deutet auf eine Zunahme der Speichergrösse mit zunehmender Höhe hin. Dies kann mithilfe der Topographie erklärt werden, die zu einem hohen potentiellen Speicher (akkumulierte Höhe über dem Gewässernetz) führt, welcher die Abflussbildung und damit auch die Abschätzung des dynamischen Speichers beeinflusst. In einer detaillierten Modellstudie mit Daten aus dem Tössgebiet wurde die Güte der HBV-Modellerweiterung getestet. Das Tössgebiet eignete sich speziell für diese Analyse, da hier häufig Flussabschnitte trockenfallen, was mit dem normalen HBV Modell nicht simuliert werden kann. Die Ergebnisse zeigten dann auch deutlich den Wert der Modellerweiterung.

Mit HydroGeoSphere wurden verschiedene synthetische Einzugsgebiete sowie zwei reale Einzugsgebiete (Langeten und Röthenbach) simuliert. Aus den synthetischen Modellierungen ging hervor, dass die Leitfähigkeit des Festgesteins eine dominierende Auswirkung auf das Niedrigwasserverhalten hat, wogegen die anderen Parameter eine kleinere Rolle spielten. Je nach Festgesteinsleitfähigkeit waren dann, bei konstanter Leitfähigkeit, verschiedene Parameter wichtig, z.B. bei niedriger Festgesteinsleitfähigkeit die hydraulische Leitfähigkeit des alluvialen Grundwasserleiters. Die Modellierung mit HydroGeoSphere erlaubte es auch, die Ursachen für die stark unterschiedliche Grundwasserdynamik der Einzugsgebiete Röthenbach und Langeten und für das ausgeprägte Niedrigwasser im Falle des Röthenbachs zu untersuchen. Aus der Untersuchung ergab sich, dass der Niedrigwasserabfluss des Röthenbachs und dessen Kennwert Q_{95} u.a. deshalb so niedrig sind, weil ein signifikanter Anteil Wasser unterirdisch über den alluvialen Grundwasserleiter das Einzugsgebiet verlässt.

Der vorliegende Synthesebericht fasst die Hauptergebnisse des Projektes zusammen und gibt generelle Empfehlungen für Sensitivitätsanalysen von Einzugsgebieten zu längeren Trockenperioden.

1 Motivation

Niedrigwassersituationen im Sommer werden laut BAFU-Projekt CCHydro, welches auf den Klimaszenarien CH2011 (CH2011, 2011) basierte, wahrscheinlich zunehmen. Längere Trockenperioden sind zum Beispiel kritisch für die Wasserversorgung und grundwasserabhängige Ökosysteme. In solchen Trockenperioden ist Grundwasser besonders wichtig, da es neben lokal relevanten Speichern wie Seen, Gletschern und Feuchtgebieten die wichtigste Wasserressource für Fliessgewässer ist. Dementsprechend ist das hydrologische Verhalten eines Einzugsgebietes bei Niedrigwasser oft von Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktionen dominiert. Diese Interaktionen sind von einer starken räumlichen und zeitlichen Abhängigkeit geprägt. Manche der klassischen hydrologischen Ansätze, insbesondere einfache Speicherelementmodelle berücksichtigen die räumliche Abhängigkeit der Prozesse nur bedingt oder gar nicht (Stoelzle et al., 2013). Räumlich-verteilte, physikalisch-basierte Modelle, wie sie in der Hydrogeologie und Hydrologie verwendet werden, können grundsätzlich die oberflächennahen Abflussprozesse mit dem Grundwasser koppeln und sind deshalb potentiell geeignet, um das hydrologische Verhalten eines Einzugsgebietes bei Niedrigwasser zu verstehen (Brunner & Simmons, 2012). Häufig werden aber auch bei komplexeren Modellen, gewisse Prozesse vereinfacht dargestellt (Staudinger et al., submitted); in dieser Studie ist dies z.B. für die Verdunstung in dem komplexen Modell HGS der Fall (siehe 4.1.1). Für grössere Einzugsgebiete sind solche Modellansätze wegen ihrer komplexen Parametrisierung nur sehr bedingt geeignet. Hier fehlen meistens auch Daten in der erforderlichen räumlichen Auflösung, damit die räumlich-verteilte Modellierung einen wirklichen Mehrwert darstellen kann. Die Begrenzungen der Datenverfügbarkeit sowie der Rechenkapazitäten führen dazu, dass hydrologische Modelle mit wenigen Speicherelementen (d.h. einfache Speicherelementmodelle) nach wie vor unverzichtbar sind.

Das Forschungsprojekt „Niedrigwasser und Grundwasser“ setzte hier an und kombinierte die Stärken physikalisch-hydrogeologischer und konzeptuell-hydrologischer Modellierung mit dem Ziel trockenheitssensitive Gebiete zu identifizieren, den Einfluss von Klimaänderung und Wasserbewirtschaftung quantitativ abzuschätzen und geeignete Monitoring-Strategien zu entwickeln. Das Projekt knüpfte an bestehende Studien und Daten aus den Projekten des NFP61 zur Nachhaltigen Wassernutzung an und versuchte funktionale Zusammenhänge zwischen dem Niedrigwasserverhalten und der Hydrogeologie abzuleiten. Für die Modellierung wurden das HBV Modell sowie das Modell HydroGeoSphere gewählt. Auch wenn diese Wahl selbstverständlich auf den Erfahrungen der beteiligten Forschungsgruppen beruht, wurden mit diesen beiden Modellen typische Vertreter der Speicherelementmodelle beziehungsweise der räumlich-verteilten, physikalisch-basierten Modelle verwendet. Bei den meisten Speicherelementmodellen gibt es keinen Wasserfluss vom Gewässer zum Grundwasser. Um diesen Prozess zu berücksichtigen, musste das HBV Modell mit einer Austauschbox, die das gewässernahe Grundwasser repräsentiert, erweitert werden.

Der vorliegende Synthesebericht fasst die Hauptergebnisse des Projektes zusammen und gibt generelle Empfehlungen für eine Sensitivitätsanalyse von Einzugsgebieten zu längeren Trockenperioden. Im Folgenden werden die Arbeitsschritte des Projekts und die wichtigsten Resultate beschrieben. Schlussfolgerungen und Empfehlungen runden diesen Bericht ab.

2 Vorgehensweise im Projekt

Die funktionalen Zusammenhänge zwischen dem Niedrigwasserverhalten von Fliessgewässern und der Hydrogeologie sollten mit physikalisch basierten Modellen identifiziert, sowie dominierende wasserspeichernde Struktureinheiten und deren Dynamik als sogenannte „funktionelle hydro(geo)logische Einheiten“ charakterisiert werden. Zusätzlich zu den an der Oberfläche sichtbaren Eigenschaften wie Topographie oder Landnutzung wird die 3D-Struktur des Untergrunds berücksichtigt. Das vertiefte Prozessverständnis bildet die Grundlage für die Weiterentwicklung vorhandener einfacher hydrologischer Speicherelementmodelle und ihrer Parametrisierung. Diese einfachen hydrologischen Speicherelementmodelle sind auch auf grösserer Einzugsgebietsskala anwendbar und bilden ein wichtiges Werkzeug, um trockenheitssensitive Einzugsgebiete in der Schweiz zu identifizieren. Für beide Modellierungsansätze und Skalen wurden Sensitivitätsanalysen mit Stresstestszenarien durchgeführt.

Hieraus lassen sich relevante funktionelle Einheiten identifizieren, die es erlauben Kenntnisse aus diesem Projekt auf andere Gebiete und grössere Skalen zu übertragen. Darauf aufbauend wurde eine praxistaugliche Methode zur Identifikation von Risikogebieten sowie eine entsprechende Monitoring-Strategie entwickelt.

2.1 Terminologie

In diesem Projekt wurden länger anhaltende Perioden ohne oder mit nur wenig Niederschlag und deren Einfluss auf Oberflächen- und Grundwasserressourcen behandelt. Solche Perioden werden als Trockenperioden bezeichnet, nicht aber als Trockenheit im Sinne des in der englisch-sprachigen Literatur häufig verwendeten Begriffs «drought». Letztere beschreibt einen Wassermangel hinsichtlich einer natürlich verfügbaren Wassermenge. Auch wird von Sensitivität der Einzugsgebiete und nicht von Vulnerabilität gesprochen, weil kein Grenzwert für Trockenstress definiert wurde (Tallaksen und Lanen, 2004). Niedrigwasser dagegen ist ein wiederkehrendes saisonales Phänomen (Smakhtin, 2001).

2.2 Kennwerte

Die Sensitivität von Einzugsgebieten wird mit Kennwerten charakterisiert, die aufgrund der Simulationsergebnisse für Abfluss und Grundwasser berechnet werden. Beim Abfluss beziehen sich die Kennwerte auf den Rezessionsverlauf des Abflusses und Niedrigwasser während Trockenperioden. Je schneller und grösser der Rückgang im Abfluss, desto grösser ist die Sensitivität der Fliessgewässer auf Trockenperioden. Beim Grundwasser können mehrere Variablen ausgewertet werden, z.B. Änderungen beim Grundwasserfluss, bei Grundwasserständen und -volumen oder Austauschraten zwischen Grundwasserleiter und Oberflächengewässern. Je nachdem welche Variable betrachtet wird, ergibt sich eine spezifische Sensitivität des Einzugsgebietes bezüglich längerer Trockenperioden. So kann etwa ein Einzugsgebiet als wenig sensitiv angesehen werden, wenn während Trockenperioden der Grundwasserfluss der z.B. ein Fliessgewässer oder Quellen speist, mehr oder weniger unverändert bleibt. Ein Grundwasserabfluss führt aber zu einer Entwässerung des Grundwasservolumens (was wiederum als sensitiv gedeutet werden könnte). Wie diese Änderungen sich im Grundwasserstand auswirken, hängt von der effektiven Porosität ab und kann zwischen verschiedenen Bereichen des Grundwasserleiters stark schwanken. Weil Grundwasserfluss und Grundwasservolumen direkt über die Grundwasserleiterwasserbilanz in Beziehung stehen, wird hier nur das dynamische Grundwasservolumen verwendet. Es handelt sich dabei um den maximalen Schwankungsbereich im gespeicherten

Grundwasservolumen. Diese Grösse ist geringer als das nutzbare Grundwasservolumen, da bei letzterem das gesamte mobilisierbare Wasser betrachtet wird (Sinreich et al., 2012).

Grundwasserstände variieren stark zwischen Grundwasserleitertypen und innerhalb eines Grundwasserleiters, was die Auswahl repräsentativer Beobachtungsmessstellen erschwert. Das dynamische Grundwasservolumen dagegen kann als ein integraler Kennwert für das gesamte Einzugsgebiet genommen werden.

Folgende Kennwerte wurden zur Beschreibung des Niedrigwassers benutzt:

NM7Q und **MNM7Q**: n-Tage gleitende Mittelwerte von täglichen Abflussdaten werden weltweit benutzt, um n-Tage kleinste Abflüsse zu berechnen. Jährliche 7-Tage-Minima (NM7Q), d.h. niedrigstes Niedrigwasser auf Basis der gleitenden 7-Tagesmittel, werden allgemein als guter Kompromiss zwischen dem vorhandenen Abflusssignal und dem Rauschen unsicherer Messwerte wegen zu ungenauer Messpräzision während Niedrigwasser angesehen. Das langjährige Mittel dieses Wertes (MNM7Q) wird auch international verwendet (WMO, 2008)

Q347 (Q₉₅): Der Q347 ist ein häufig benutztes Mass, das als Grundlage zur Bestimmung von Restwassermengen in Fliessgewässern in der Schweiz dient (Aschwanden & Kan, 1999). Der Abfluss, der zu 95% der Zeit erreicht oder überschritten wird (oder an 347 Tagen im Jahr) ermöglicht die Identifizierung seltener, kritischer Niedrigwasserperioden, aber dieses Mass ist auch sehr sensitiv auf die Länge und Qualität der vorhandenen Zeitreihe (Margreth et al., 2013).

Q₅₀: Der Median des Abflusses kann als kritischer Wert angesehen werden, um Perioden unterhalb der normalen Wasserverfügbarkeit des Fliessgewässers zu identifizieren. Im Vergleich zum mittleren Abfluss ist er weniger sensitiv gegenüber extremen Hochwassern und daher wird er als bessere Referenz für Niedrigwasser angesehen.

Q₉₅/Q₅₀: Das Verhältnis Q_{95}/Q_{50} beschreibt die Dynamik von Niedrigwasser und kann als vereinfachter Kennwert für den Anteil des Niedrigwassers verwendet werden. Das Verhältnis kann theoretisch zwischen 0 und 1 variieren, wobei höhere Werte Gebiete mit eher ausgeglichener Abflussdynamik auszeichnen. Dieser Kennwert soll die Niedrigwassersensitivität unter den verschiedenen hydrologischen Regimetypen der Schweiz vergleichbar machen.

2.3 Statistische Datenanalyse

Um eine robuste empirische Abschätzung der Niedrigwassersensitivität der Untersuchungsgebiete entlang von topographischen und hydrogeologischen Gebietsmerkmalen durchzuführen, ist es wichtig die zeitliche Stabilität und die Aussagekraft einzelner Niedrigwasserkennwerte zu prüfen. In Kapitel 3 wurde daher eine statistische Datenanalyse durchgeführt, um die Repräsentativität der Kennwerte Q_{95} und Q_{95}/Q_{50} über alle Untersuchungsgebiete hinweg zu prüfen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Abflussregime und typischen Niedrigwasserzeiten im Jahresverlauf spielen saisonale Ausprägungen von Niedrigwasserkennwerten eine besondere Rolle in der Schweiz. In tiefer liegenden, pluvial geprägten Gebieten sind geringere Kennwerte häufig mit sommerlichen Niedrigwasserperioden verbunden, in alpinen Gebieten ist hingegen von winterlichen Niedrigwasserperioden auszugehen. Insbesondere wurde der Einfluss von extremen

Trockenjahren auf die Kennwertausprägung getestet. Die statistische Datenanalyse gibt Hinweise darauf, dass ähnlich wie bei Margreth et al. (2013) eine Zuordnung der Kennwertvariabilität an Eigenschaften der Gebietsspeicher erfolgen muss. Staudinger *et al.*, (2017) konnten daher im Rahmen dieser hier vorliegenden Studie auch zeigen, dass bei der Analyse von Gebietsspeichern Grundwasser-, Boden- und Schneespeicher gleichermassen zu berücksichtigen sind.

2.4 Verwendete Modelle im Überblick

2.4.1 Physikalisch basierte Modelle

Für die detaillierte Prozessbetrachtung wurde das physikalisch basierte Modell HydroGeoSphere (HGS, Therrien *et al.*, 2005, www.aquanty.com) verwendet. HGS berechnet die Aufteilung von Niederschlag in hydrologische Komponenten wie Oberflächenabfluss, Infiltration, Evapotranspiration oder dem Austausch zwischen Oberflächengewässern und den Grundwasserleitern. HGS wurde im vorliegenden Projekt für synthetische Modellansätze sowie für die Simulation von zwei realen Einzugsgebieten verwendet. Zwei zentrale Aspekte wurden dadurch erarbeitet: (1) ein besseres Verständnis der relevanten Prozesse und Parameter und (2) eine systematische Analyse der Übertragbarkeit von Kennwerten von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet. Wenn zum Beispiel die Analysen der Felddaten für ein bestimmtes Einzugsgebiet mit gegebener Geometrie und Neigung des flussgebundenen alluvialen Grundwasserleiters eine hohe Sensitivität gegenüber Trockenperioden aufweist, kann man mit physikalisch basierten Modellen testen, ob sich ein Einzugsgebiet mit unterschiedlicher Grösse aber ähnlicher Geometrie und/oder Geologie ähnlich verhält.

2.4.2 Einfaches hydrologisches Speicherelementmodell HBV mit Austauschbox

Da die detaillierte Prozessbetrachtung mit HGS nur für wenige Testeinzugsgebiete verwendet werden konnte, wurde das einfache Speicherelementmodell HBV (Seibert & Vis, 2012) für die Untersuchung der Sensitivität mehrerer Einzugsgebiete in der Schweiz (**Tabelle 1**) verwendet. Die komplexeren HGS Simulationen wurden mit dem HBV Modell nachsimuliert und dadurch die für Niedrigwasser relevanten Prozesse konzeptionell erfasst. Hierzu wurde das normale HBV Modell mit einer Austauschbox erweitert, welche den Grundwasser-Oberflächenwasser Austausch in beide Richtungen ermöglicht (im normalen HBV Modell fliesst, wie in den meisten Modellen dieser Art, das Wasser nur in Richtung vom Grundwasser zum Fliessgewässer). Das Ziel dieser Version des HBV Modells mit Möglichkeit für Grundwasser-Oberflächenwasser Austausch (HBV_{exchange}) war es, Niedrigwassersimulationen zu verbessern. Die Standardversion des HBV-Modells ist auf folgender Webseite frei verfügbar: <https://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/Services/HBV-Model.html>. Die neue Variante mit der Austauschbox (Staudinger *et al.*, in prep.) kann auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

2.5 Realisierte Modellsimulationen

Im Rahmen des Projekts werden einige Modellexperimente durchgeführt, sowohl zur Modellentwicklung und -evaluation (HBV Austauschbox), aber auch um die Sensitivität der Einzugsgebiete sowie die Rolle einzelner hydrogeologischer und topographischer Einzugsgebietseigenschaften besser abschätzen zu können.

2.5.1 Stresstest-Szenarien zur Sensitivitätsanalyse

Um die Sensitivität verschiedener Einzugsgebiete einzuschätzen, wurden Stresstestszenarien entwickelt und verwendet. Hinsichtlich der Sensitivität ist interessant, welche Auswirkungen

bereits beobachtete Trockenperioden gehabt hätten, wären die Ausgangsbedingungen trockener gewesen als tatsächlich beobachtet. Diese Szenarien wurden im Gegensatz zu CH2011 und vergleichbaren Klimaszenarien nicht von regionalen oder globalen Zirkulationsmodellen abgeleitet, sondern synthetisch konstruiert, um die Sensitivität auf längere Trockenperioden abzuschätzen.

Während Intensität und Variabilität des Niederschlags oft bestimmen, wie gross ein Hochwasser ist, sind bei Niedrigwasser vielmehr Grundwasserneubildung und -speicher relevant, weil sie verzögert zum Abfluss im Fliessgewässer beitragen. Daher wurden in den synthetischen Wetterszenarien die vorhergehenden Perioden über die simulierte Grundwasserneubildung definiert. Das heisst, Perioden wurden der Trockenheit vorgeschaltet, in denen es besonders wenig Grundwasserneubildung gab. Insgesamt wurden drei verschiedene Stresstest-Szenarien entwickelt:

NATVAR – Natürliche Variabilität: Die Daten aus jedem Jahr des Beobachtungszeitraums (1961-2016) wurden vor die beobachteten längeren Trockenperioden (1976, 2003, 2011 und 2015) geschaltet. Das bedeutet, dass z.B. das Kalenderjahr 2002 vor 2003 gegen alle Jahre 1961 bis 2016 getauscht wurde, um den Effekt anderer Vorbedingungen auf 2003 zu testen. Dieses Szenario hilft die natürliche Variabilität pro Einzugsgebiet für den gesamten verfügbaren Beobachtungszeitraum hinsichtlich eines Trockenjahres (z.B. 2003) zu erfassen.

WORSTFLEX - Worst-Case-Szenario mit flexiblem Enddatum: In diesem Szenario wurde die vorhergehende Periode vor spezifischen längeren Trockenperioden (z.B. 1976, 2003 und 2015) mit einer trockeneren vorhergehenden Periode ausgetauscht. Hierfür wurde ausgehend vom Tag des Auftretens des sommerlichen NM7Q die Zeitreihe rückwirkend geprüft, wann der letzte Tag mit einem Abflusswert grösser als der mittlere Abfluss an diesem Kalendertag vorlag. Dieser Tag wird als Beginn der Niedrigwasserperiode definiert. Dieser Periode werden nun verschiedene Szenarien mit der Dauer 30, 60, 90, 120... 360 Tage vorgeschaltet. Für die Umsetzung des Szenarios wird jeweils diejenige originale Zeitperiode (also in HBV entsprechend Niederschlags- und Temperaturdaten) aus der Gesamtzeitreihe eingesetzt, welche die geringste Neubildungssumme aus allen Jahren aufweist. Dieses Szenario zeigt, wie gravierend eine beobachtete Trockenheit gewesen wäre, hätte es trockenere Ausgangsbedingungen gegeben. In Relation zu den tatsächlich beobachteten Ausprägungen des Niedrigwassers lässt sich eine Sensitivität zu längeren Trockenperioden ableiten.

DRYOUT – Systematische Einzugsgebietsentwässerung: Beim DRYOUT Szenario wurde das Einzugsgebiet systematisch entwässert. Die hydrologischen Jahre wurden nach der Höhe der monatlichen Grundwasserneubildungssummen sortiert. Dieses Szenario liefert nicht wie die anderen ein Regenerationsdefizit oder eine Regenerationsperiode, sondern ein mögliches entwässerbares Volumen das zur Abschätzung der Sensitivität der Einzugsgebiete auf längere Trockenperioden verwendet werden kann.

Der vorliegende Synthesebericht fokussiert auf den Ergebnissen des WORSTFLEX Szenarios, weil dieses Szenario am besten die Sommerniedrigwasserereignisse und deren Änderung mit trockeneren vorhergehenden Perioden abbildet.

2.5.2 Synthetische hydrogeologische Modelle

Mit dem HGS Modell wurden zahlreiche „synthetische Modelle“ erstellt. Die synthetischen Modelle wurden aus zweierlei Gründen erstellt:

- 1) Für die Entwicklung der HBV Austauschbox wurden synthetische Modelle des alluvialen Grundwasserleiters im Einzugsgebiet definiert, die sich hinsichtlich hydraulischer Leitfähigkeit, Porosität und Grundwasserleitergeometrie (Steigung, Längen-Breitenverhältnis, etc.) unterscheiden.
- 2) Zur systematischen Untersuchung wie hydrogeologische Eigenschaften die Sensitivität von Einzugsgebieten auf Trockenperioden beeinflussen wurden synthetische Modelle und deren Parameter (hydrogeologische und topographische Eigenschaften) systematisch variiert.

2.5.3 Detaillierte Einzugsgebiets-Modelle mit HGS

Zwei Einzugsgebiete, Röthenbach und Langeten (beide Kanton Bern), wurden mit HGS modelliert. Diese Einzugsgebiete zeigen trotz geographischer Nähe und ähnlicher meteorologischer Bedingungen ein sehr unterschiedliches Niedrigwasserverhalten der Flüsse und sind daher für eine systematische Analyse der Einzugsgebietsparameter geeignet. Das Erstellen von physikalischen Grundwassermodellen ist wegen der komplexen Parametrisierung und wegen des signifikanten Rechenaufwandes nicht für den Vergleich oder die Evaluierung zahlreicher Einzugsgebiete geeignet. Die beiden erstellten Modelle liefern jedoch wertvolle Hinweise inwieweit sich die Erkenntnisse der synthetischen Modellierung (s. **Kap. 2.5.2**) auf komplexere Einzugsgebiete übertragen lassen.

2.6 Datengrundlage

Für die Modellexperimente und das einfache Speicherelementmodell wurden einige schweizerische Einzugsgebiete ausgewählt (**Tabelle 1**). Diese Einzugsgebiete sind auch die Basis für die statistische Datenanalyse zu Beziehungen zwischen Niedrigwasserdynamik und physiographischen Eigenschaften. Dazu gehören das Röthenbach-Einzugsgebiet, alle Einzugsgebieten aus dem Drought-CH Projekt (Staudinger et al., 2017) und alle Einzugsgebiete mit Messstationen des BAFU mit folgenden Eigenschaften: weniger als 10% der Fläche vergletschert, weniger als 10% Karst, weniger als 1% der Fläche See, mindestens 99.5% in der Schweiz, wenig anthropogen beeinflusst, gute Messqualität bei Niedrigwasser.

Tabelle 1 Auswahl der Einzugsgebiete als Grundlage zu den Untersuchungen im Projekt. Die mit einem * gekennzeichneten Gebiete werden kantonal oder von der WSL betrieben.

Einzugsgebiet	Pegel	Stationsnummer	Abflussregime
Broye	Payerne Caserne d'aviation	2034	pluvial inférieur
Emme	Emmenmatt	2070	nivo-pluvial préalpin
Murg	Wängi	2126	pluvial inférieur
Emme	Wiler, Limpachmündung	2155	nivo-pluvial préalpin
Guerbe	Belp, Mülimatt	2159	pluvial supérieur
Sense	Thörishaus, Sensematt	2179	nivo-pluvial préalpin
Melera	Melera (Valle Morobbia)	2206	nivo-pluvial méridional
Allenbach	Adelboden	2232	nival alpin
Krummbach	Klusmatten	2244	nival méridional
Rotenbach	Plaffeien, Schwyberg	2251	nivo-pluvial préalpin
Schwaendlibach	Plaffeien, Schwyberg	2252	pluvial inférieur
Sperbelgraben	Kurzeneialp	2282	nivo-pluvial préalpin
Rappengraben	Riedbad	2283	nivo-pluvial préalpin
Minster	Euthal, Rüti	2300	nival detransition
Glatt	Herisau, Zellersmühle	2305	pluvial inférieur
Goldach	Goldach, Bleiche	2308	pluvial supérieur
Aach	Salmsach, Hungerbühl	2312	pluvial inférieur
Cassarate	Pregassona	2321	pluvio-nival méridional
Dischma	Davos, Kriegsmatte	2327	b-glacio-nival
Langeten	Huttwil, Häberenbad	2343	pluvial inférieur
Rialediroggiasca	Roveredo, Bacino di compenso	2347	nivo-pluvial méridional
Rialedicalneggia	Cavergno, Pontit	2356	nival méridional
Poschiavino	La Rösa	2366	nival méridional
Mentue	Yvonand, La Mauguettaz	2369	pluvial jurassien
Necker	Mogelsberg, Aachsäge	2374	nivo-pluvial préalpin
Murg	Frauenfeld	2386	pluvial inférieur
Emme	Eqgiwil	2409	nival de transition
Sionge	Vuippens, Château	2412	nivo-pluvial préalpin
Rietholzbach	Mosnang, Rietholz	2414	pluvial inférieur
Reindasumvitg	Somvitg, Encardens	2430	b glacio nival
Parimbot	Ecublens, Eschiens	2437	pluvial jurassien
Wigger	Zofingen	2450	pluvial inférieur
Magliasina	Magliaso, Ponte	2461	pluvio-nival méridional
Vecchiovedeggio	Bioqqio, Campagna	2463	pluvio-nival méridional
Sitter	St. Gallen, Bruggen / Au	2468	nivo-pluvial préalpin
Murg	Murgenthal, Walliswil	2471	pluvial inférieur
Kleineemme	Werthenstein, Chappelboden	2487	nivo-pluvial préalpin
Luthern	Nebikon	2497	pluvial supérieur
Ilfis	Langnau	2603	nivo-pluvial préalpin
Biber	Biberbrugg	2604	pluvial supérieur
Verzasca	Lavertezzo, Campiöi	2605	nivo-pluvial méridional
Sellenbodenbach	Neuenkirch	2608	pluvial inférieur
Alp	Einsiedeln	2609	nivo-pluvial préalpin
Vedeggio	Agno	2629	nivo-pluvial méridional
Kleineemme	Emmen	2634	nivo-pluvial préalpin
Grossbach	Einsiedeln, Gross	2635	nivo-pluvial préalpin
Vogelbach*		5001	nivo-pluvial préalpin
Lümpenenbach*		5002	nivo-pluvial préalpin
Aabach*	Mönchaltorf	5003	pluvial inférieur
Röthenbach	Eqgiwil	5004	nivo-pluvial préalpin

3 Empirische Abschätzung von Niedrigwassercharakteristika: statistische Beziehungen zwischen Einzugsgebietseigenschaften und Niedrigwasserkennwerten

Aufgrund seiner gesetzlichen Relevanz (Aschwanden, 1992; Gewässerschutzgesetz GschG vom 24. Januar 1991) war der Niedrigwasserkennwert Q_{95} (auch Q_{347} , Abflusswert der in 95% der Zeit erreicht oder überschritten wird) Ausgangspunkt zur statistischen Datenanalyse zu den Niedrigwasserverhältnissen in den Einzugsgebieten dieser Studie. Die Normierung auf den Medianabfluss (Q_{95}/Q_{50}) bietet dabei in einem ersten Schritt die Möglichkeit, die Niedrigwassersensitivität zu bewerten: höhere Indexwerte des Q_{95}/Q_{50} weisen dabei auf eine geringere Niedrigwassersensitivität des Gebiets hin. Ein ähnlicher Ansatz (Q_{347} zu Q_{365}) wurde zuvor durch Magreth et al. (2013) getestet. Die Untersuchungen zeigen jedoch eine starke Abhängigkeit des Index hinsichtlich der gewählten Saisonalität und der verwendeten Zeitreihe. Hierzu wurden Unterschiede im saisonalen Q_{95}/Q_{50} -Verhältnis verschiedener Einzugsgebiete verglichen und zwei verschiedenen Zeitperioden, 2002-2011 im Vergleich zu 1992-2001, gegenübergestellt.

Einzugsgebiete mit mittlerer Höhe zwischen 800 und 1600 m ü. NM haben generell eine höhere Niedrigwassersensitivität als tieferliegende oder alpine Gebiete (**Abbildung 1**). Das Minimum des Q_{95}/Q_{50} -Verhältnisses kann hier teils durch eine höhere Temperatursensitivität des Abflusses (Gebiete mit Minimum im Sommer) und teils durch kleinere Gebietsspeicher (Gebiete mit Minimum im Winter) erklärt werden. Tieferliegende Gebiete, die stärker pluvial geprägt sind, zeigen mehr Variabilität in den sommerlichen, winterlichen und ganzjährlichen Q_{95}/Q_{50} -Verhältnissen, wobei Minima eher im Sommer auftreten. Die grösste Variabilität der

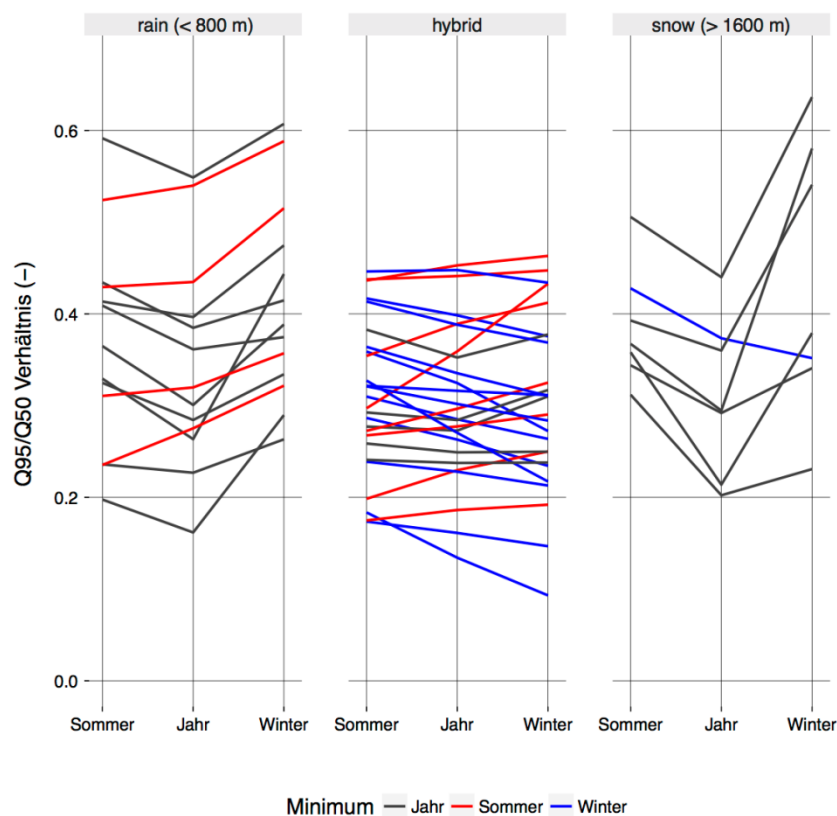


Abbildung 1 Vergleich des Q_{95}/Q_{50} -Verhältnisses für verschiedene Jahresabschnitte in den drei unterschiedlichen Abflussregime-Klassen.

Q_{95}/Q_{50} -Verhältnisse liegt jedoch für alpine Gebiete vor, dort weisen die Werte im Winter auf geringere Niedrigwassersensitivität dieser Gebiete hin, was durch grössere Gebietsspeicher begründet sein kann (Staudinger et al., 2017). Es ist davon auszugehen, dass sommerliche Schnee- und Gletscherschmelzen von Jahr zu Jahr die Kennwerte Q_{50} und Q_{95} unterschiedlich stark beeinflussen, was eine klare Attribution an die massgeblichen Abflussprozesse erschwert.

Für die Hälfte der Untersuchungsgebiete liegen die Unterschiede der Q_{95} -Werte der Periode 2002-2011 im Vergleich zu 1992-2001 im Bereich von $\pm 10\%$. Etwa ein Viertel der Untersuchungsgebiete hatten 2002-2011 einen um 20-50% geringeren Q_{95} -Wert. Diese Verringerungen treten vor allem in tieferliegenden Gebieten auf (z.B. Mentue, Broye, Gürbe), wohingegen in alpinen Gebieten auch leichte Zunahmen des ganzjährigen Q_{95} -Wertes in der zweiten Periode (2002-2011) zu verzeichnen sind und ausgeprägte Trockenjahre wie 2003 und 2011 offensichtlich hier weniger Einfluss auf die Kennwertausprägung haben. Um die Sensitivität des Kennwerts Q_{95} hinsichtlich einzelner Niedrigwasserjahre in einer 20-jährigen Bezugsperiode zu quantifizieren, wurden in einem virtuellen Experiment die Trocken- und Niedrigwasserjahre 2003 und 2011 aus den Zeitreihen entfernt. Die mittlere Abweichung der Q_{95} -Werte dieser gekürzten Periode im Vergleich zur Originalzeitreihe liegt bei etwa 5% (berechnet als Mittel der relativen absoluten Abweichungen). Im Schweizer Mittelland weisen einige Gebiete Zunahmen des Q_{95} -Wertes um 10%-20% auf, wenn die Jahre 2003 und 2011 zur Berechnung ausgeschlossen werden. In alpinen Gebieten ergeben sich durch die gekürzte Bezugsperiode teilweise um etwa 2% geringere Q_{95} -Werte. Gründe waren hier überdurchschnittliche Schnee- und Gletscherschmelzen während der heissen Sommer 2003 und 2015 in den Alpen sein (BUWAL, 2004). Insgesamt ist der Index Q_{95}/Q_{50} in der Schweiz also unterschiedlich zu bewerten; neben stabilen Indexwerten in einigen Gebieten treten auch dekadische Variabilität sowie negative und positive Trends auf. Ursache für diese Trends können dabei sowohl Veränderungen im Niedrigwasser als auch im Mittelwasser sein. Neben der Auswahl des saisonalen Bezugs und der zugrundeliegenden Zeitreihe können auch andere Faktoren den Index Q_{95}/Q_{50} massgeblich beeinflussen. Margreth *et al.* (2013) verweisen auf die teilweise unzureichende Auflösung von Wasserstandsmessungen der Pegelstationen während Niedrigwasserperioden.

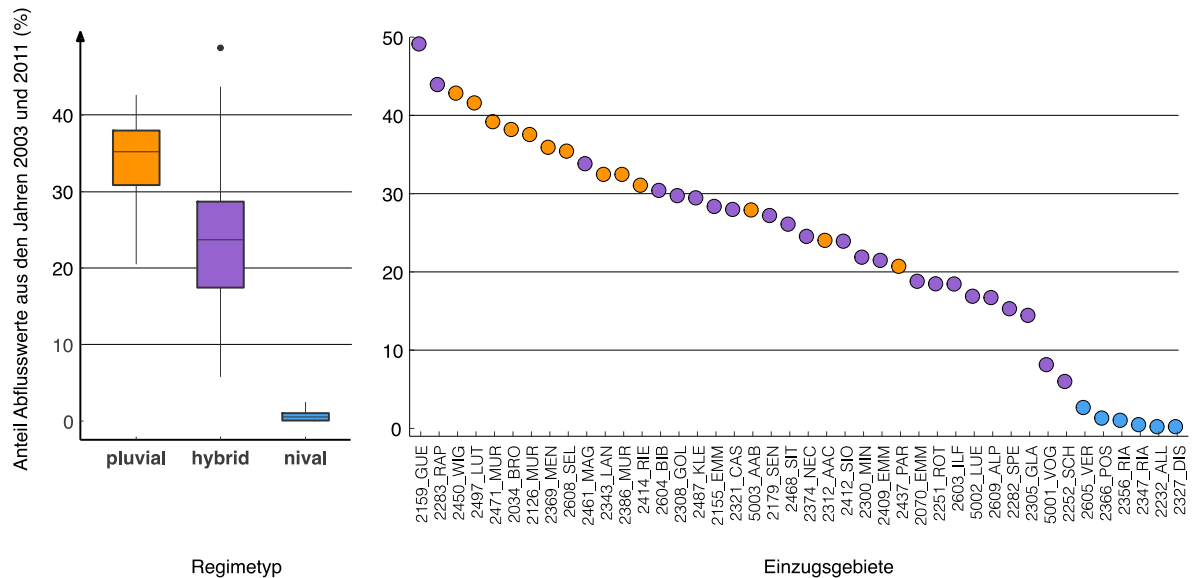


Abbildung 2 Welchen Einfluss haben die Niedrigwasserjahre 2003 und 2011 an der Ausprägung des Niedrigwasserkennwert Q_{95} der Gesamtzeitreihe 1992–2011 (20 Jahre)?

Es ist davon auszugehen, dass einzelne Niedrigwasserjahre erheblichen Einfluss auf die Ausprägung einzelner Niedrigwasserkennwerte haben können. Im Mittel fanden 23% der Unterschreitungen des Kennwerts Q_9 in den Jahren 2003 und 2011 statt (**Abbildung 2**). Besonders in pluvial-dominierten Gebieten haben diese Niedrigwasserjahre enormen Einfluss auf die Kennwertausprägung (bis zur Hälfte aller Unterschreitungstage stammen dann aus den Jahren 2003 und 2011). Dies bedeutet, dass der Kennwert Q_{95} stark sensitiv gegenüber einzelnen Niedrigwasserjahren sein kann und somit nicht immer als jährlich typischer Kennwert angesehen werden sollte. Die Wahl der Bezugsperiode hat zudem erheblichen Einfluss auf die Niedrigwasserstatistik und erschwert zudem eine robuste Regionalisierung bei unterschiedlicher Datenlage in den Gebieten. Es wird auch deutlich, dass in alpinen Gebieten der Einfluss von typischen Niedrigwasserjahren wie 2003 und 2011 auf den Kennwert Q_{95} wesentlich geringer bzw. kaum zu detektieren ist (**Abbildung 2**). Dies verdeutlicht, dass bei einer flächenhaften Niedrigwasseranalyse weniger stark ausgewählte Jahre, sondern vielmehr gebietsspezifische, extreme Niedrigwasserereignisse im Vordergrund stehen sollten. Verlässliche Niedrigwasserkennwerte sollten auf Grundlage dieser statistischen Datenauswertung folglich vielmehr spezifische Niedrigwasserereignisse als generelle Niedrigwasserschwellenwerte miteinschließen.

Zusätzlich zum Index Q_{95}/Q_{50} und zur zeitlichen Variation des Q_{95} sollte auch die zeitliche Abfolge berücksichtigt werden, d.h. die Dauer des Abflussrückgangs von Q_{50} auf Q_{95} und die damit verbundene Abflussmenge und somit der Verlust der Speicherhöhe aus dem Einzugsgebiet. Diese Größen können als weiteren Hinweis auf die Vulnerabilität von Einzugsgebieten während Trockenwetterphasen betrachtet werden, da sie die berücksichtigen, wie schnell ein Gebiet den kritischen Wert Q_{95} erreichen wird. Dazu wurden für alle Einzugsgebiete die langjährige mittlere Trockenwetterauslaufkurve (Master-Rezession) bestimmt und daraus die Dauer zwischen den Abflusskennwerten Q_{50} und Q_{95} bestimmt und zusätzlich noch die Speicherabnahme in diesem Zeitraum umgerechnet in Speicherhöhe. In **Abbildung 3** sind diese Größen gegen die mittlere Einzugsgebietshöhe aufgetragen. Wie sich auch bei den Modellierungen mit HBV zeigen wird, nimmt generell das

Speichervolumen zu, je höher das Einzugsgebiet liegt. Ob dieser Anteil durch den höheren Anteil der Schneespeicherung zu erklären ist, kann nur durch die nachfolgend beschriebene Modellierung aufgezeigt werden. Jedoch zeigt sich auch ein interessantes Muster bei der Rezessionsdauer von Q_{50} nach Q_{95} . In tieferliegenden Gebieten des Mittellands variieren diese zwischen 15 und 30 Tagen, in Gebieten zwischen 1000 und 1500m ü. NN sind generell die geringsten Dauern und in den höchsten Gebieten die längsten Rezessionsdauern zu finden.

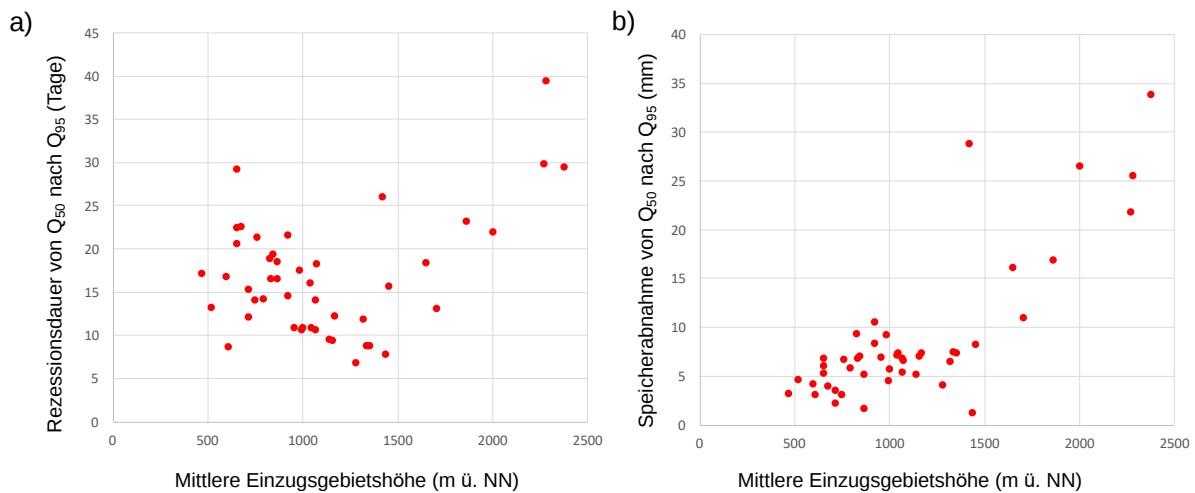


Abbildung 3 Rezessionsdauer (a) und Gebietsspeicherabnahme (b) von Q_{50} nach Q_{95} in Abhängigkeit der mittleren Einzugsgebietshöhe für 48 Einzugsgebiete in der Schweiz.

Eine Alternative zum Kennwert Q_{95} kann der Kennwert MNM7Q darstellen. Die Mittelwertbildung über 7 Tage und die Berücksichtigung aller einzelnen Abflussjahre in der Kennwertermittlung bietet prinzipiell die Grundlage für einen robusteren Niedrigwasserkennwert. Ein deutlicher Einfluss einzelner Trockenjahre ist aber auch auf den MNM7Q festzustellen. Jedoch basiert der Kennwert MNM7Q explizit auf Abflusswerten aus allen Zeitreihenjahren und kann mit zunehmender Zeitreihenlänge im Gegensatz zu Q_{95} deshalb als zeitlich stabiler betrachtet werden.

Wie in **Kap. 4.2.4** beschrieben, zeigt die HBV-Modellierung mit der neu entwickelten Austauschbox (*exchange box*), dass der MNM7Q-Kennwert in vielen Gebieten besser abgebildet werden kann als die Q_{95} -Kennwerte. Dies bedeutet, dass die für die Kennwertermittlung relevanten Zeitperioden (also die Niedrigwasserperioden) genau dann unter Berücksichtigung von Oberflächen-Grundwasser-Interaktion (SW-GW-Interaktion) verbessert abgebildet werden können, wenn die entsprechenden Kennwerte die zwischenjährliche Variabilität der Niedrigwasserperioden für alle Jahre berücksichtigen. Wie in der Untersuchung von Margreth *et al.* (2013) ist es auf Basis dieser Ergebnisse wichtig, als nächsten Schritt eine Attribution der Niedrigwasservariabilität an die Eigenschaften der relevanten Gebietsspeicher vorzunehmen. Staudinger *et al.* (2017) zeigen für einen vergleichbaren Satz von Einzugsgebieten in der Schweiz, dass sich der für die Abflussdynamik relevante Gebietsspeicher generell in Schnee-, Boden und Grundwasserspeicher aufteilen lässt (**Abbildung 4**). Die mittleren Speicherfüllungen innerhalb der Grundwasser-Box im verwendeten HBV-Modell schwanken dabei in der Größenordnung 10 bis 200 mm. Der relative Anteil der Grundwasser-Box am Gebietsspeicher

nimmt dabei um etwa 3% je 1000 Höhenmeter zu (**Abbildung 4**, unten links), das bedeutet zusammenfassend, dass höher liegende, alpine Gebiete in dieser Auswahl von Einzugsgebieten vergleichsweise grosse Grundwasserspeicher haben. Diese Gebiete haben aufgrund ihrer Topographie einen hohen potentiellen Speicher (akkumulierte Höhe über dem Gewässernetz), welcher die Abflussbildung und damit auch die Abschätzung des dynamischen Speichers beeinflusst. Die unterschiedliche Ausprägung der abgeschätzten Gebietsspeicherkomponenten (Grundwasser, Boden und Schnee) je Einzugsgebiet und über die Höhenstufen hinweg gibt Hinweise darauf, dass die Variabilität der Niedrigwasserperioden durch kleine, aber auch grosse Gebietsspeicher, aber auch durch langsam drainierende oder schneller auslaufende Gebietsspeicher gesteuert werden kann und Saisonalitäten der Speicher zu berücksichtigen sind.

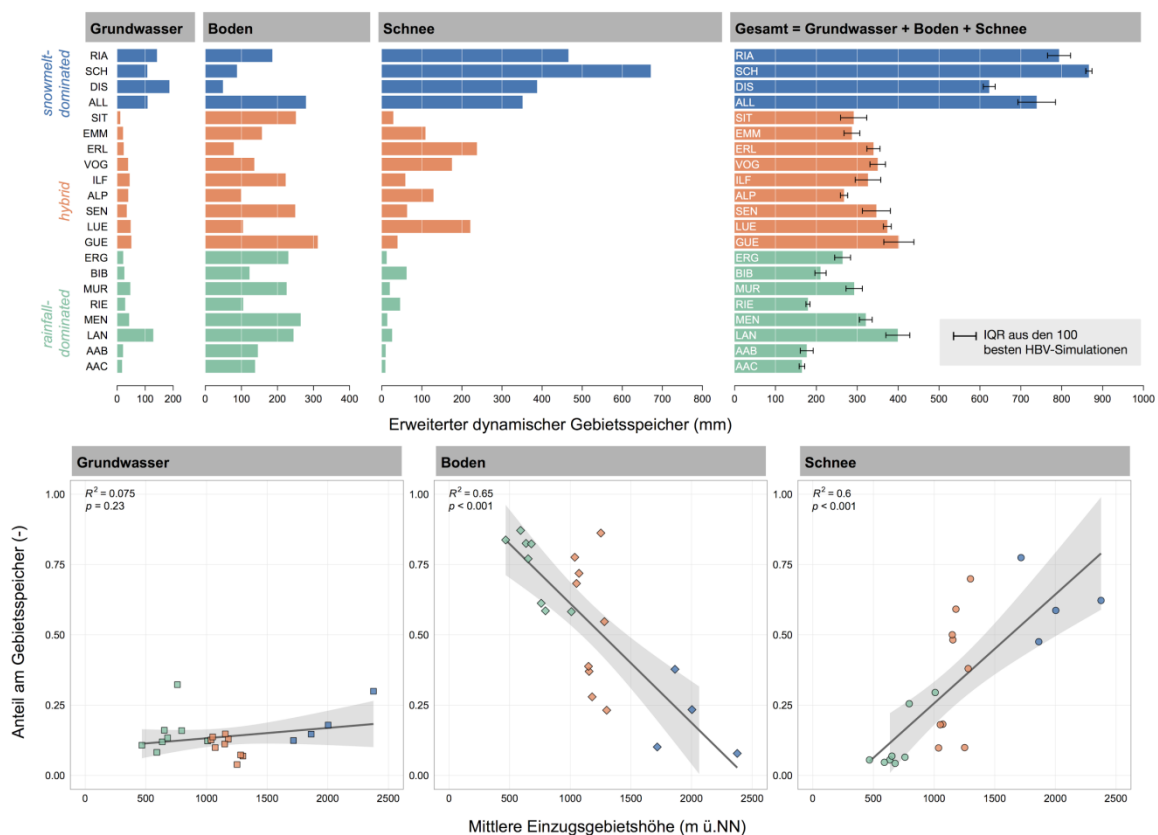


Abbildung 4 Abschätzungen der Gebietsspeicher aus HBV-Simulationen für Anteile Grundwasser, Boden und Schnee (oben) sowie relative Anteile der Komponenten der Gebietsspeicher (unten). Detaillierte Ergebnisse in Staudinger *et al.*, (2017).

Hydrogeologische Informationen und Modelle wie HGS liefern wichtige Anhaltspunkte wie diese Speicher mit Gebietseigenschaften (z.B. Hangneigung, Durchlässigkeit des Grundwasserleiters etc.) zusammenhängen. Tests diesbezüglich wurden mit den synthetischen Modellen gemacht (**Kap. 4.1.1**). Daneben kommen Staudinger *et al.* (2017) zu dem Ergebnis, dass die Zeit für die Erneuerung des Grundwassers im Grundwasserleiter für die dynamischen Gebietsspeicher in Bezug auf mittleres Abflussverhalten der Gebiete maximal im Bereich von 7 bis 8 Monaten liegt, häufig jedoch auch weit darunter. Dies zeigt, dass die ermittelten dynamischen Gebietsspeicher etwa bis zu 65% der jährlichen Abflusssummen entsprechen. Dies lässt die Vermutung zu, dass die zwischenjährliche Niedrigwasservariabilität häufig mit der Variabilität der Grundwasserneubildungsraten im

Bereich zwischen 6 bis 12 Monaten erklärbar sein müsste. Ähnlich wie die Vorschläge zur Entwicklung einer robusten Kartierung von abflussbeitragenden Flächen während Niedrigwasserperioden (Margreth *et al.*, 2013), geben die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung Hinweise darauf, dass die stärkere Berücksichtigung von geschachtelten Einzugsgebieten (*nested catchment approach*) gute Hilfestellungen liefern würden, beispielsweise vorherrschende geologischen Eigenschaften in Teileinzugsgebieten stärker mit der Abflussvariabilität entlang von Flussläufen während Niedrigwasser zu verknüpfen. Diese Variabilität war auch beim Röthenbacheinzugsgebiet erkennbar (s. **Kap. 4.1.2**). Eine Herausforderung bei der Durchführung solcher Analysen sind jedoch die zunehmenden Abflussregulierungen durch den Menschen entlang der Flüsse.

Eine generelle Regionalisierung dieser empirischen Grössen (sowie weiterer Grössen die im Rahmen des Projektes berechnet wurden) gestaltet sich für die Schweiz noch immer als sehr schwierig. Zum einen müssten die Speicherräume besser erfasst werden. Für einige ausgewählte Einzugsgebiete konnten diese am Ende des Projekts ermittelt werden. Aber auch die anthropogene Beeinflussung des Abflusses ist relevant. Da insbesondere bei Niedrigwasser Aus- und Zuleitungen eine wichtige Rolle spielen können, müssten diese Grössen für alle Einzugsgebiete der Schweiz quantitativ vorliegen. Insbesondere die Variation innerhalb der Einzugsgebiete, entlang der Flüsse, müssten besser quantitativ erfasst werden, um flächenhafte Aussagen machen zu können.

4 Modellierung von Niedrigwassercharakteristika für ein besseres Verständnis der Prozesse und Einflussfaktoren

4.1 Physikalische Grundwassermodelle: Analyse entscheidender Faktoren bei Niedrigwasser

4.1.1 Synthetische Modelle mit HGS

Mit HGS wurden synthetische Modelle entwickelt, um den Einfluss von hydrogeologischen und topographischen Eigenschaften von Einzugsgebieten auf Niedrigwasser systematisch und unabhängig zu quantifizieren. Die Resultate wurden durch Carlier *et al.* (2018b) publiziert und sind hier zusammengefasst. Die Standardkonfiguration des für die Modelle verwendeten Einzugsgebietes ist in **Abbildung 5** ersichtlich. Vier Parameter wurden systematisch verändert: 1) das Flussgefälle, 2) die Hangneigung, 3) die hydraulische Leitfähigkeit des Festgesteins und 4) die hydraulische Leitfähigkeit des alluvialen Grundwasserleiters. Als Festgestein wird der an der Oberfläche oder unter der quartären Bedeckung anstehende Fels bezeichnet (sedimentäre, metamorphe und magmatische Gesteine). Mit dem Begriff des alluvialen Grundwasserleiters werden produktive Grundwasservorkommen in grobkörnigen (mehrheitlich Kies und Sand) quartären Sedimenten bezeichnet, welche durch fluvio-glaziale oder fluviale Prozesse abgelagert wurden und entlang des untersuchten Flusslaufes vorkommen. Die für die vier Parameter verwendeten Werte (

Tabelle 2) basieren auf der Auswahl der schweizerischen Einzugsgebiete.

Tabelle 2 Werte für die vier Parameter, welche für die synthetischen Modelle systematisch variiert wurden.

Parameter	Werte			
Hydraulische Leitfähigkeit des Festgesteins:	10^{-8} m/s	10^{-7} m/s	10^{-6} m/s	10^{-5} m/s
Hydraulische Leitfähigkeit des alluvialen Grundwasserleiters:	nicht vorhanden	10^{-4} m/s	10^{-3} m/s	10^{-2} m/s
Flussgefälle:	0.5%	3%	9%	15%
Hangneigung:	5%	18%	35%	50%

Die vier Parameter wurden beliebig miteinander kombiniert, d.h. 4^4 (256) Modelle wurden aufgesetzt. Der in den Modellen verwendete meteorologische Input stellt eine vierjährige tägliche Niederschlagsreihe (2000-2003, Huttwil, Meteoschweiz) dar. Die Niederschlagsdaten werden mit einem konstanten Faktor 0.5 für Verdunstung korrigiert, was den mittleren lokalen Bedingungen entspricht. Q_{95}/Q_{50} und Q_{95} wurden für jedes Modell anhand von täglich simulierten Abflüssen für jedes einzelne Jahr berechnet und anschliessend über die vier Jahre gemittelt. Am Auslass der synthetischen Einzugsgebiete exfiltriert sämtliches Grundwasser in den Fluss, so dass der dortige Oberflächenabfluss die gesamte Dynamik des Einzugsgebiets widerspiegelt.

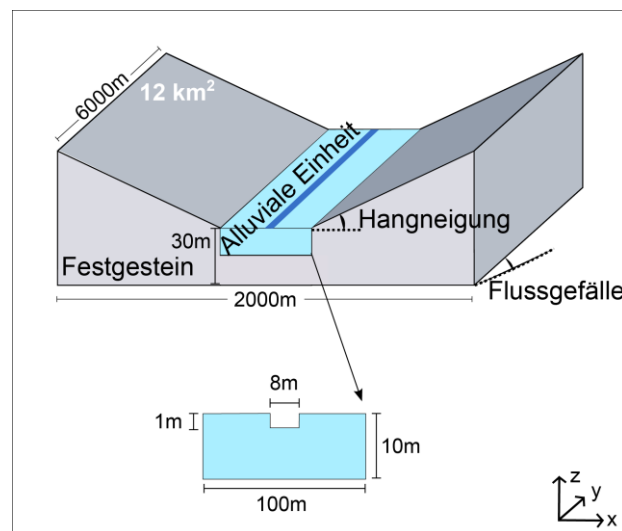


Abbildung 5 Standardkonfiguration der synthetischen Modelle.

Die Berechnung des Bestimmtheitsmasses R^2 (lineares Regressionsmodell) erlaubt die Evaluation des Einflusses der vier variierten Parameter auf Q_{95}/Q_{50} . Die Resultate sind in **Abbildung 6** zusammengefasst, wobei die Kreisgrösse proportional zu R^2 gewählt wurde. Die erste Zeile zeigt R^2 für alle 256 Modelle, während die Zeilen zwei bis fünf die Ergebnisse für jeweils eine spezifische hydraulische Leitfähigkeit des Festgesteins ($K_{\text{Festgestein}}$) anzeigt. Rechts ist die Variabilität von Q_{95}/Q_{50} und Q_{50} für die jeweilige Gruppe von Simulationen ersichtlich. Wenn sämtliche Modelle betrachtet werden, ist $K_{\text{Festgestein}}$ der einzige Parameter, der einen

dominierenden Einfluss auf das Niedrigwasserverhalten hat: $K_{\text{Festgestein}}$ erklärt 60% der Varianz von Q_{95}/Q_{50} . Wenn man die einzelnen Kategorien für die hydraulische Leitfähigkeit des Festgesteins betrachtet, werden jedoch auch andere Gebietseigenschaften wichtig. Für Einzugsgebiete mit einer niedrigen Durchlässigkeit des Festgesteins (10^{-8} m/s) wird die hydraulische Leitfähigkeit des alluvialen Grundwasserleiters (K_{Alluvial}) relevant. In diesem Fall ist das Festgestein hydrogeologisch quasi undurchlässig und Speicherprozesse können nur im alluvialen Grundwasserleiter der quartären Talfüllung stattfinden. Wenn $K_{\text{Festgestein}}$ grösser ist (10^{-7} bis 10^{-5} m/s), werden Speicherprozesse im Festgestein aktiviert. Die Hangneigung (*hillslope*) ist bei einigen Modellen verantwortlich für einen hohen Anteil der Q_{95}/Q_{50} -Varianz. Eine steilere Hangneigung fördert den Beitrag des Festgesteins zu Niedrigwasserabflüssen, indem sie das vorhandene Speichervolumen sowie den hydraulischen Gradienten erhöht.

Für die synthetischen Modelle, die nur aus Festgestein (kein alluvialer Grundwasserleiter) bestehen, kann der kombinierte Einfluss von Topographie und hydraulischer Leitfähigkeit auf Q_{95} mit einer Formel (**Gleichung 1**) beschrieben werden (**Abbildung 7**). Die X-Achse entspricht der Kombination von $K_{\text{Festgestein}}$ und der Hangneigung H_s dividiert durch den durchschnittlichen Netto-Niederschlag $N_{\text{netto,durchschn.}}$ (über die 4 simulierten Jahre) und wird als "bedrock productivity index" B_{PI} bezeichnet. Aufgrund der starken Korrelation mit dem Verhältnis $Q_{95}/N_{\text{netto,durchschn.}}$ erlaubt der B_{PI} den Q_{95} Kennwert eines Einzugsgebietes zu bestimmen. In **Abbildung 7** sind Resultate von zusätzlichen Modellkonfigurationen eingeschlossen. Die gezeigten Ergebnisse sind für unterschiedliche Geometrien des Einzugsgebietes (aspect-ratio), sowie verschiedene Porositäten und Niederschlagsreihen (Aigle, St-Gallen, Cimetta) gültig.

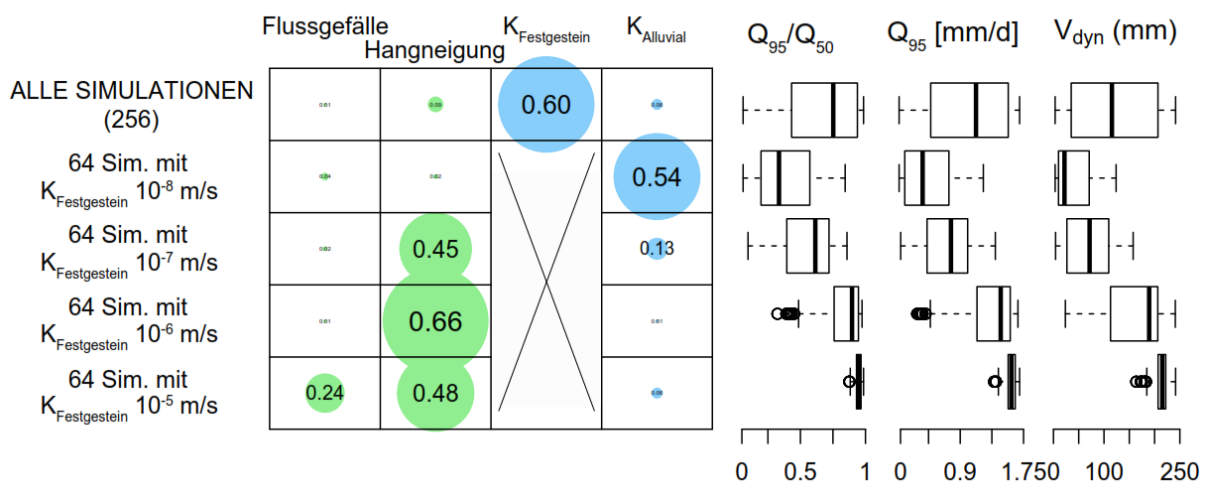


Abbildung 6 Links: Anteil der Q_{95}/Q_{50} -Varianz erklärt durch die vier Parameter (Flussgefälle, Hangneigung, Durchlässigkeit des Festgesteins und Durchlässigkeit des alluvialen Grundwasserleiters) für alle Simulationen (Zeile 1) und für verschiedene $K_{\text{Festgestein}}$ Kategorien (Zeile 2 bis 5). Die Grösse des Durchmessers der Kreise ist proportional zum berechneten Bestimmtheitsmass R^2 . Rechts: Variabilität von Q_{95}/Q_{50} und Q_{95} für jede Gruppe von Simulationen.

$$B_{PI} = \log \frac{K_{\text{Festgestein}} \cdot H_S^{3/2}}{N_{\text{netto,durchschn.}}}$$

Gleichung 1

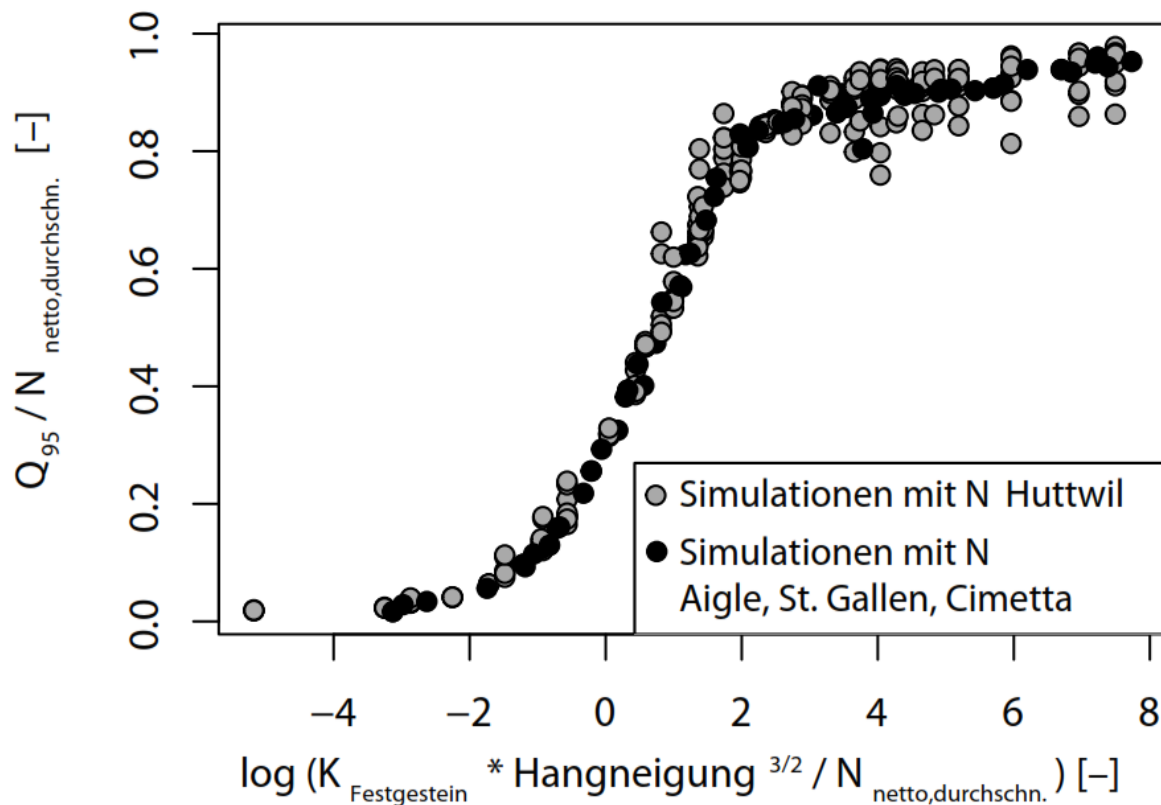


Abbildung 7 Das Verhältnis zwischen Q_{95} und dem durchschnittlichen Netto-Niederschlag $N_{\text{netto,durchschn.}}$ ist gegen BPI geplottet. Jeder Punkt repräsentiert eine Modellkonfiguration. Nur Modelle ohne alluviale Grundwasserleiter, d.h. ausschliesslich mit Festgestein, sind eingeschlossen. Dafür beinhalten die gezeigten Daten zusätzliche Simulationen, in denen das Querschnittsverhältnis (aspect-ratio), die Porosität, und der Niederschlagsinput (in grau/schwarz) variiert wurden. Korrelation der linearisierten Beziehung: $R^2 = 0.82$, $p < 2.2e-16$.

In **Abbildung 8** sind dynamische Speichervolumen im alluvialen Grundwasserleiter (blau) und im Festgesteinsgrundwasserleiter (weiss) illustriert. Das dynamische Volumen ist direkt zum Niedrigwasserabfluss korreliert. Alluviale Grundwasserleiter sind für Niedrigwasser vor allem wichtig, wenn das Festgestein wenig ergiebig ist, d.h. wenn $K_{\text{Festgestein}}$ klein (10^{-8} m/s) oder mittel (10^{-7} bis 10^{-6} m/s) ist und die Hangneigung begrenzt. In diesen Fällen ist der Beitrag des alluvialen Grundwasserleiters zum Niedrigwasserabfluss proportional zu seiner hydraulischen Leitfähigkeit und zum Flussgefälle (das dem Talgefälle entspricht). Für diese Analyse wurden Modelle mit steilem Flussgefälle (9%, 15%) nicht berücksichtigt, da sich in einem solch steilen Flusstal kaum bedeutenden Volumen durchlässiger quartärer Sedimente ablagern könnten und deshalb kein alluvialer Grundwasserleiter vorhanden wäre. Interessanterweise wird das dynamische Speichervolumen im Festgestein manchmal durch den alluvialen Grundwasserleiter aktiviert (rot angezeigt). Generell zeigen die Ergebnisse der

synthetischen Modelle, dass die Anwesenheit von alluvialen Grundwasserleitern nie einen negativen Einfluss auf Q_{95} hat. Das ist aber nur gültig, wenn kein signifikanter Grundwasserfluss am Auslass des Einzugsgebiets besteht und Wasser so das Gebiet verlässt. Der grosse Einfluss der Durchlässigkeit des Festgesteins auf das Niedrigwasserverhalten zeigte sich nicht nur in den synthetischen Modellen (Abb. 8) sondern auch bei der Auswertung von Abflusszeitreihen von 22 Einzugsgebieten (Carlier et al., 2018b). Das Q_{95}/Q_{50} -Verhältnis korreliert dabei mit der geschätzten mittleren hydraulischen Leitfähigkeit des Molasse Festgesteins im Einzugsgebiet wie auch dem Anteil an Sandstein. Eine Korrelation konnte ebenfalls mit dem Anteil an produktiven Lockergesteinsablagerungen nachgewiesen werden.

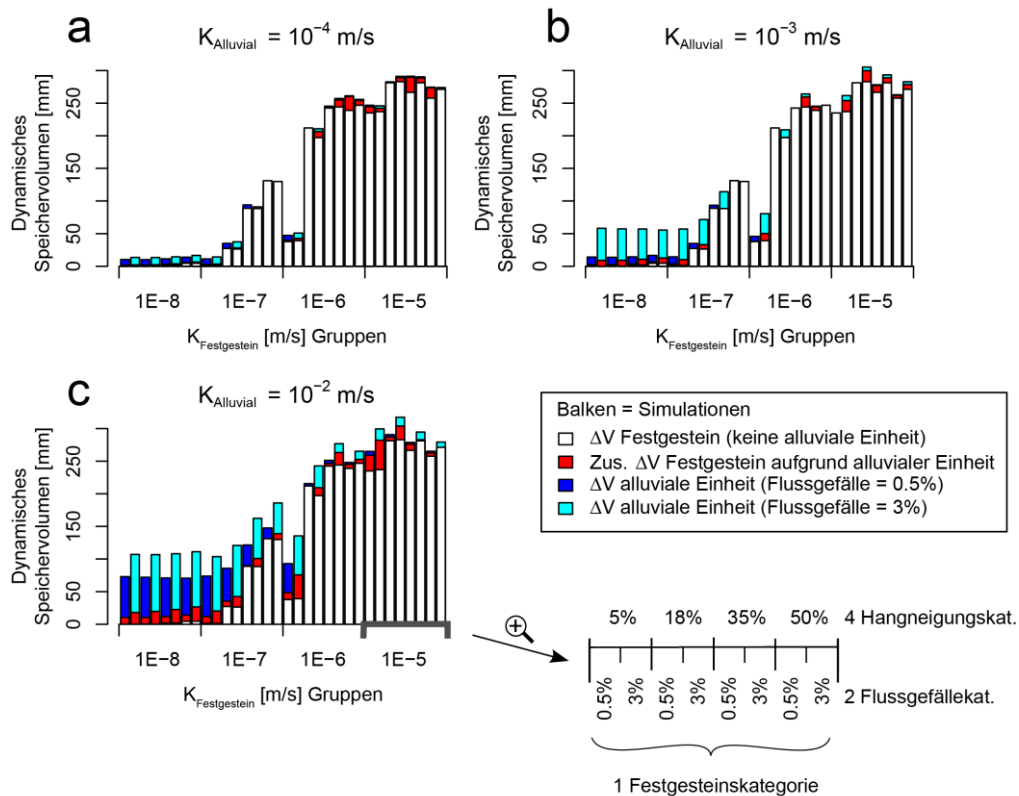


Abbildung 8 Darstellung des dynamischen Speichervolumens im Festgestein (weiss) und im alluvialen Grundwasserleiter (dunkelblau) für kleines Flussgefälle (hellblau) und für grosses Flussgefälle (dunkelblau) für jede $K_{alluvial}$ Kategorie (einzelne Graphen). Die x-Achsen sind in erster Linie nach $K_{Festgestein}$ geordnet. Innerhalb dieser $K_{Festgestein}$ Kategorien wird die Hangneigung und das Flussgefälle variiert (s. erklärender Graph unten rechts). Rot: zusätzliches dynamisches Speichervolumen durch den alluvialen Grundwasserleiter.

4.1.2 Detaillierte Einzugsgebiets-Modelle mit HGS

Zwei Einzugsgebiete, Röthenbach und Langeten (**Abbildung 9**), wurden detailliert modelliert. Diese Einzugsgebiete wurden ausgewählt, weil sie trotz geographischer Nähe und ähnlicher meteorologischer Bedingungen ein sehr unterschiedliches Niedrigwasserverhalten aufzeigen (**Abbildung 10**).

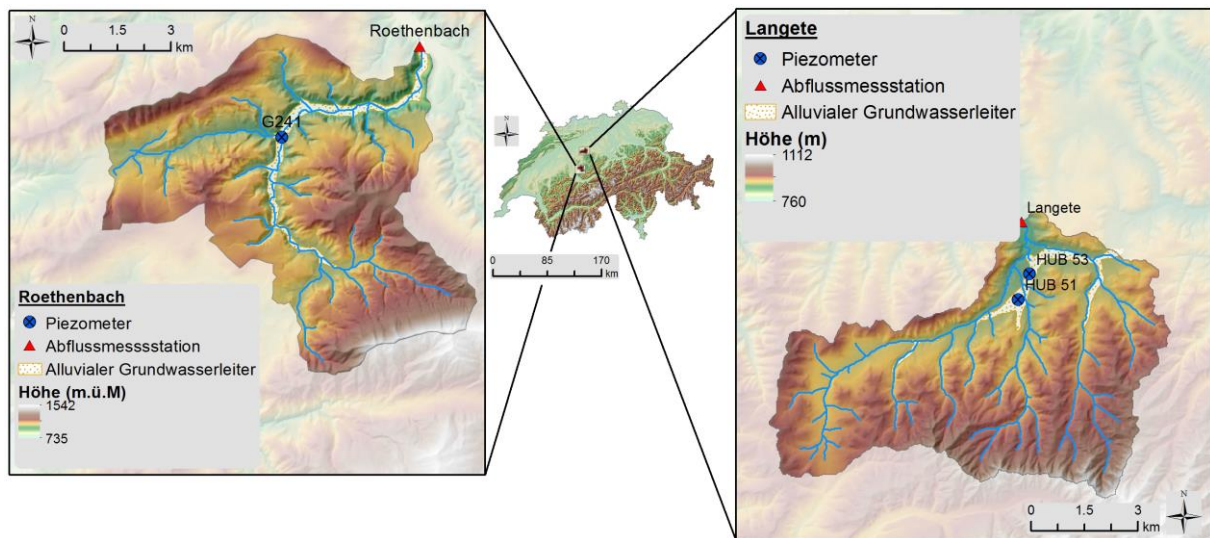


Abbildung 9 Lage der Einzugsgebiete Langeten und Röthenbach, die mit HGS modelliert wurden.

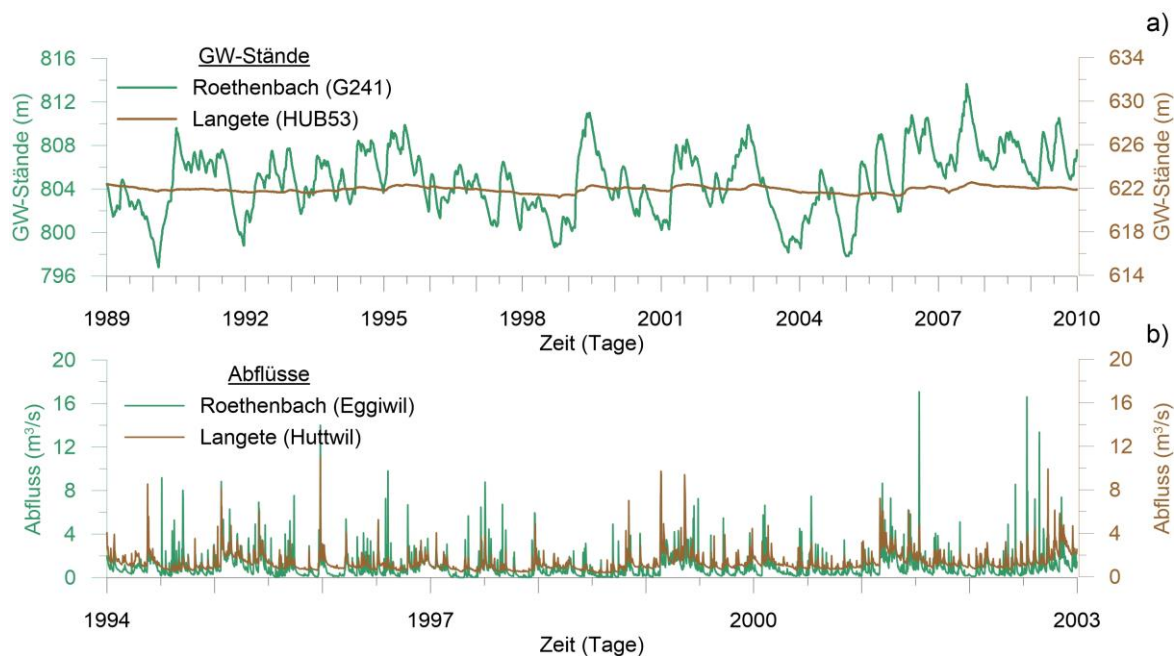


Abbildung 10 Beobachtete Abfluss- und Grundwasserstands-Ganglinien im Einzugsgebiet von Röthenbach und Langeten im Vergleich. Die Abflussdynamik ist sehr unterschiedlich in den beiden Einzugsgebieten.

Mithilfe des HGS Modells wurden die Ursachen für die stark unterschiedliche Grundwasserdynamik der Einzugsgebiete Röthenbach und Langeten und für das ausgeprägte Niedrigwasser im Falle des Röthenbachs untersucht. Zudem wurde evaluiert, welche Rolle den einzelnen Modellparametern während Niedrigwasserbedingungen zukommt. Niederschlagsdaten und potentielle Verdunstung sind klimatische Input-Daten. Damit simuliert HGS die Infiltrationsprozesse, Oberflächenabflüsse, aktuelle Verdunstung, Grundwasserströmungen und die Interaktionen mit den Flüssen. Das Model wurde anhand von beobachteten Grundwasserständen und Oberflächenabflüssen kalibriert. Um diese Kalibrierung zu ermöglichen, mussten gewisse Annahmen zu Böden und Geologie getroffen werden, um die Anzahl der freien Parameter zu begrenzen.

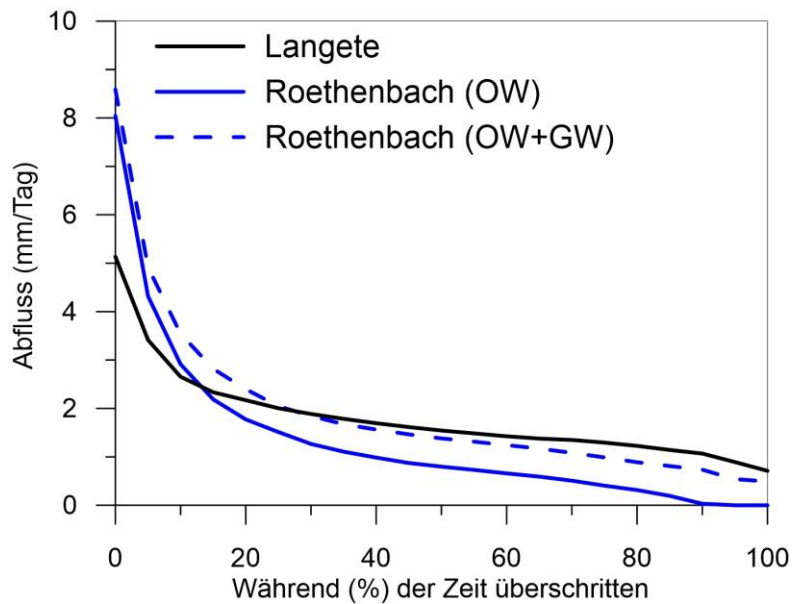


Abbildung 11 Simulierte Dauercurven des Röthenbachs und der Langeten. Für den Röthenbach wurde wie für die Langeten die Dauerkurve für den Oberflächenabfluss (OW) erstellt, sowie die Dauerkurve für die Summe von Oberflächenabfluss und Grundwasserabfluss (OW+GW).

Aus der Untersuchung ergab sich, dass der Niedrigwasserabfluss des Röthenbachs und dessen Kennwert Q_{95} u.a. deshalb so niedrig sind, weil ein signifikanter Anteil Wasser unterirdisch über den alluvialen Grundwasserleiter das Einzugsgebiet verlässt. Bei der Langeten dagegen fließt das gesamte Wasservolumen im Fluss ab. Wenn der Grundwasserabfluss des Röthenbachs in die Berechnung der Dauerkurve einbezogen wird, dann ist diese im Mittel- und Niedrigwasserbereich der Dauerkurve der Langeten sehr ähnlich (

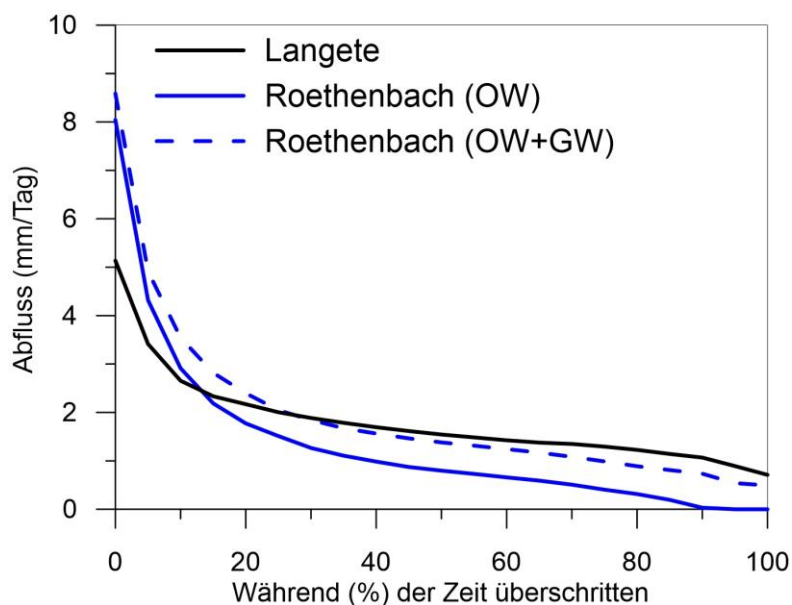


Abbildung 11). Der durch sehr niedrige Q_{95} Kennwerte charakterisierte Abfluss des Röthenbachs ist also nicht nur durch Einzugsgebietseigenschaften (z.B. hydraulische Leitfähigkeit) zu erklären, sondern durch einen signifikanten Anteil an Grundwasser, welches unterhalb der hydrologischen Messstation im alluvialen Grundwasserleiter abfließt.

Um zu verstehen, warum die Grundwasserdynamik im Einzugsgebiet des Röthenbachs deutlich höher ist als im Einzugsgebiet der Langeten, wurden beide Einzugsgebiete mit einer

zehnmal niedrigeren hydraulischen Leitfähigkeit des Festgesteins simuliert als sie zuvor für die Kalibrierung bestimmt wurde (**Abbildung 12**).

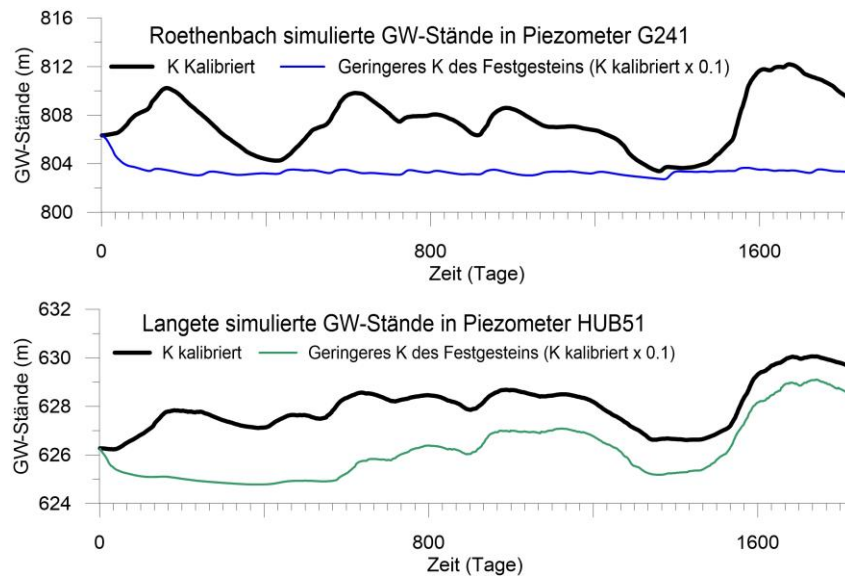


Abbildung 12 Simulierter Verlauf der Grundwasserstände in den beiden Einzugsgebieten Langeten und Röthenbach. Dargestellt ist jeweils eine Simulation mit den kalibrierten hydraulischen Leitfähigkeit des Festgesteins (schwarze Kurven) sowie eine Simulation mit einer reduzierten (Faktor 0.1) hydraulischen Leitfähigkeit des Festgesteins.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die hydraulische Leitfähigkeit des Festgesteins für die Grundwasserdynamik im Einzugsgebiet des Röthenbachs eine Schlüsselrolle spielt: die Dynamik wird reduziert, wenn die hydraulische Leitfähigkeit niedriger gewählt wird (1 m Amplitude im Vergleich zu sehr hohen Amplituden von etwa 8 m im kalibrierten Modell). Im Einzugsgebiet der Langeten dagegen bleibt die Grundwasserdynamik ähnlich wie im ursprünglichen, kalibrierten Modell. Das kann damit erklärt werden, dass der alluviale Grundwasserleiter hauptsächlich über das Festgestein gespeist wird. Im Falle des Röthenbachs hingegen wird das Festgestein in den alluvialen Grundwasserleiter entwässert. Da die entwässerbare Fläche gross ist, kann eine grosse Menge Wasser während nasser Perioden einen deutlichen Grundwasseranstieg bewirken. In Trockenperioden hingegen sinkt die Wassermenge, die vom Festgestein geliefert wird, was eine Grundwasserabsenkung bewirkt. Zusätzlich ist der alluviale Grundwasserleiter gut durchlässig, was den Rückgang des Grundwassers begünstigt. Im Einzugsgebiet der Langeten wird der alluviale Grundwasserleiter hauptsächlich vom Niederschlag gespeist, was erklärt, warum die Dynamik weniger ausgeprägt ist. Wenn man grob eine jährliche Grundwasserneubildung von Regen und Schnee von etwa 600 mm und eine Porosität von 0.3 annimmt, dann betragen die Grundwasseramplituden etwa 2000 mm, was sich in derselben Grössenordnung wie im Modell bewegt.

Um die Einzugsgebietseigenschaften zu identifizieren, welche die Niedrigwasserdynamik kontrollieren, wurde eine Sensitivitätsanalyse der Modellparameter durchgeführt. Die Ergebnisse aus dieser Analyse heben die Schlüsselrolle der Eigenschaften des Untergrundes und besonders der hydraulischen Leitfähigkeit des Festgesteins hervor. Die Resultate stimmen mit den synthetischen Modellen überein (s. **Kap.4.1.1**). Die Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit des Festgesteins erlaubt eine erste Einschätzung der Sensitivität gegenüber Trockenperioden.

4.2 Hydrologische Einzugsgebietsmodelle: Berücksichtigung des Austauschs zwischen Grund- und Oberflächenwasser

4.2.1 Entwicklung der konzeptionellen Austauschbox

Um auch mit dem einfachen hydrologischen Speicherelementmodell einen Grundwasser-Oberflächenwasser Austausch zu simulieren wurde mit Hilfe synthetischer Modelle (HGS) eine neue konzeptionelle Austauschbox entwickelt. Diese Austauschbox im HBV Modell ist mit der vorhandenen Grundwasserbox verbunden, sowie dem Fluss in einem unterhalb liegenden Teileinzugsgebiet. Über den Gradienten zwischen dem Wasserstand in der Austauschbox und des Flusses wird die Austauschrate bestimmt. Drei Parameter beschreiben den Grundwasser-Oberflächenwasser-Austausch: c_G fungiert als Reservoirkonstante und beschreibt die Grundwasserleitereigenschaften (siehe Brauer *et al.* (2014)), a und b wandeln die Abflussrate in einen Wasserstand um (**Abbildung 13**).

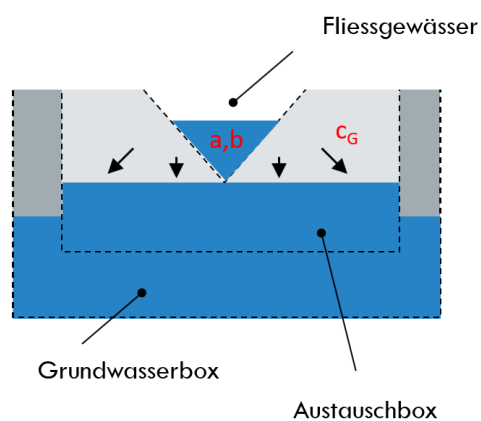


Abbildung 13 Skizze der Austauschbox und involvierten Parameter bei influenten Verhältnissen (Wasserfluss vom Fluss ins Grundwasser) Parameter a , b von der umgekehrten Pegel-Abfluss-Beziehung, c_G Reservoirkonstante zur Beschreibung der Grundwasserleitereigenschaften.

Um den Effekt der Austauschbox im HBV-Modell zu testen, wurde das HBV Modell in seiner Standardversion (d.h. ohne Austauschbox) als Bezugsmodell (*benchmark model*) für alle verwendeten Einzugsgebiete aufgesetzt. Bezugsmodelle können uns zeigen, was man mit bestimmten Daten in einer bestimmten Periode gemäss eines Gütemasses erreichen kann und damit also auch, wo das Modell noch Verbesserungspotenzial hat. Dieses Verbesserungspotenzial kann zum Beispiel in der Beschreibung der Verdunstung oder des Grundwasser-Oberflächenwasser Austausches liegen. Gleichzeitig können Bezugsmodelle aufzeigen, wo die Grenzen eines einfachen Speicherelementmodells liegen. Wenn z.B. räumlich auftretende Prozesse dominant sind und diese sich zeitlich verändern, führt der Versuch diese Prozesse zusammenfassend (*lumped*) zu modellieren zu unrealistischen Modellparametrisierungen.

Die Bezugsmodellierungen mit HBV dienen als Vergleich für Simulationen anderer Modelle. Diese Simulationen helfen zu verstehen, wo und warum Niedrigwassersimulationen gut oder schlecht zu den Beobachtungen bestimmter Einzugsgebiete passen. Dies kann als Grundlage für die Analyse der Sensitivität von Einzugsgebieten auf längere Trockenperioden genutzt werden.

4.2.2 Vergleich zu HGS detaillierte Röthenbach Variationen

Die Modellparameter des in HGS erstellten Modells des Röthenbachs wurden variiert, um eine Vielzahl unterschiedlicher Abflüsse und Grundwasserdynamiken zu generieren. Diese Simulationen wurden verwendet, um zu testen, wie das einfache Speicherelementmodell HBV den simulierten Abfluss, speziell Niedrigwasserabfluss, von HGS nachstellen kann. Die variierten Parameter in HGS sind Verdunstungstiefe (*evaporation depth*), Wurzeltiefe (*root depth*), Oberflächenrauigkeit (*surface roughness*), Oberflächenspeichertiefe (*rill storage height*), Kopplungslänge (*coupling length*) sowie Porosität, hydraulische Leitfähigkeit und die Parameter, welche die Beziehung zwischen Sättigung, Matrixpotential und hydraulischer Leitfähigkeit der ungesättigten Zone definieren. In diesem Modellexperiment hatte jedes Modell dieselben meteorologischen Rahmenbedingungen (gleicher Niederschlag und Verdunstung) bestehend aus Zeitreihen von fünf beobachteten Jahren. In diese wurden 100 Tage ohne Niederschlag zwischen das vierte und fünfte Jahr geschaltet, um eine Trockenperiode zu induzieren. Aus den Simulationsergebnissen der beiden Modelle wurden jeweils Niedrigwasserkennwerte berechnet und verglichen.

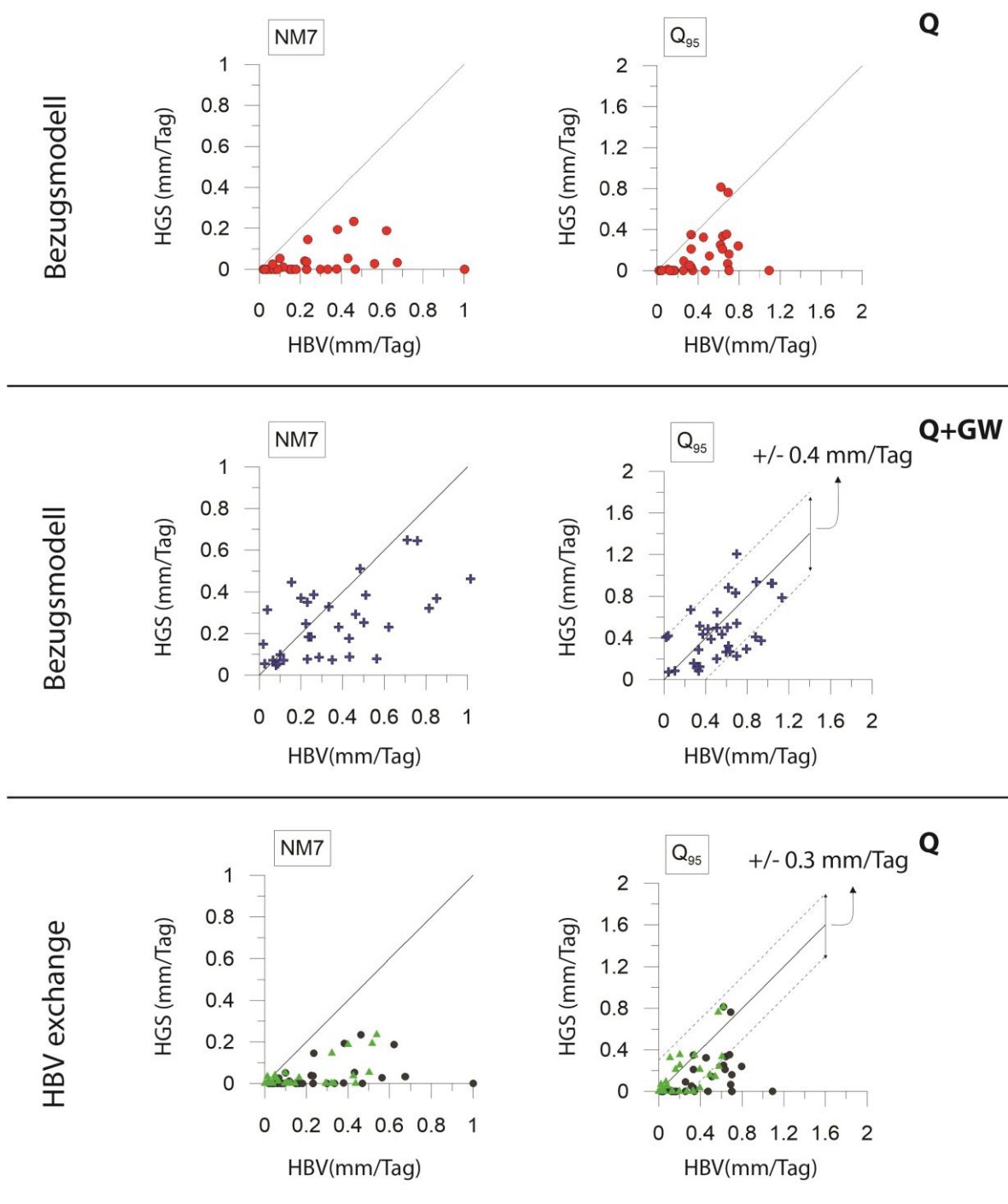


Abbildung 14) kann geschlossen werden, dass für Niedrigwassersimulationen im Röthenbacheinzugsgebiet nicht das Bezugsmodell, wenn es nur auf Abfluss kalibriert wurde, verwendet werden sollte, sondern HBV_{exchange} oder zumindest das Bezugsmodell mit Kalibrierung auf Abfluss und Grundwasserabfluss. Allgemein scheint es wichtig, den Grundwasserabfluss mit in die Kalibrierung einzubeziehen, so dass es einen signifikanten Grundwasserabfluss aus dem Einzugsgebiet unter dem Pegel gibt. Die HGS Simulationen konnten grundsätzlich mit HBV reproduziert werden, der Unterschied der beiden Simulationen betrug abhängig vom jeweiligen Kennwert +/-0.2mm/d und +/-0.4mm/d.

Das HBV Modell wurde dafür einmal mit Abflussdaten (HGS simuliert), einmal mit Abflussdaten und unterirdischen Grundwasserabflüssen (HGS simuliert) kalibriert und das Bezugsmodell sowie das Modell HBV_{exchange} wurde dafür verwendet (Abb.14).

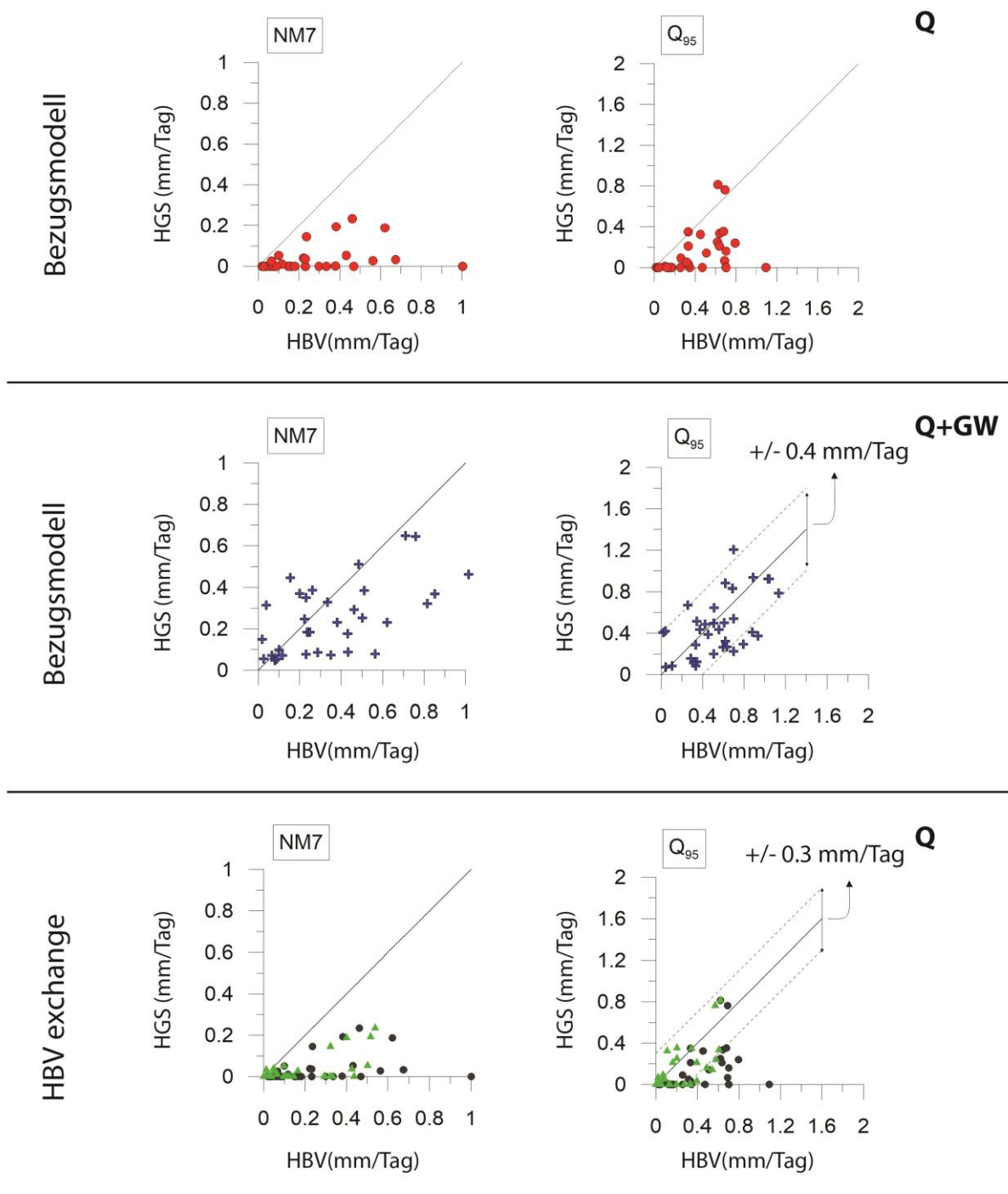


Abbildung 14 Auszug aus einer Reihe von Niedrigwasserkennwerten - hier NM7Q und Q₉₅ - um die Nachsimulierung des HGS Röthenbach-Modells und seinen Variationen mit HBV zu bewerten und Unsicherheiten abzuleiten. In der ersten Zeile wurde das Bezugsmodell nur mit Q (Oberflächen Abfluss) kalibriert. In der zweiten Zeile wurde das Benchmark

(Bezugsmodell) für die Kalibrierung von aufsummiertem Oberflächen- und Grundwasserabfluss verwendet. In der dritten Linie wurde das HBV-exchange Modell für die Kalibrierung mit Oberflächenabfluss (grüne Dreiecke) verwendet. Zum Vergleich wurde in der letzten Zeile noch die Eichung mit dem Bezugsmodell von HBV aufgetragen (schwarze Punkte). Es wurde in beiden Fällen nur mit Oberflächenabfluss kalibriert.

Die berechneten Unsicherheiten (rechte Panels in Figur 14) für HBV sind nur am Beispiel eines Einzugsgebietes entstanden, d.h. der direkte Übertrag der Unsicherheiten dieses Modellexperiments auf ein anderes Einzugsgebiet ist nicht zu empfehlen. Idealerweise sollte man derartige Modellberechnungen in vielen Einzugsgebieten durchspielen, um bessere Unsicherheitsabschätzungen für verschiedene Einzugsgebiete zu erhalten. Als erste grobe Abschätzung kann die obige Analyse jedoch auch für andere Einzugsgebiete nützlich sein.

4.2.3 Anwendung am Töss Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet der Töss ist bekannt für die hohen Infiltrationsraten in höher gelegenen Teilen des Einzugsgebietes, wo die Töss während längerer Trockenperioden trockenfällt. Am Gebietsauslass (Pegel Neftenbach) führt die Töss hingegen ganzjährig Wasser. Das heisst manche Teileinzugsgebiete fungieren als Senken, andere als Quellen und dazwischen gibt es unterirdische Fliesswege. Damit bietet das Töss Einzugsgebiet gute Voraussetzungen, um die Austauschbox in einem echten Einzugsgebiet (nicht nur am synthetischen Grundwasserleitermodell) zu testen.

Das HBV-Modell wurde für die Periode 1991-2000 kalibriert und für den trockenen Sommer 2003 validiert. Zum Vergleich wurden das normale HBV-Modell, das HBV_{exchange}-Modell basierend auf Abflussdaten und das HBV_{exchange}-Modell basierend auf Abfluss und Grundwasserständen (AWEL, Dr. Jäckli AG, 2017) kalibriert und verglichen. Für die Kalibrierung wurde eine kombinierte Zielfunktion benutzt, welche die Güte der Simulation allgemeiner Abflussdynamik, Volumen (Lindström, 1997) und besonders auch Niedrigwasser bewertet. Für die Evaluation wird das Gütemass F_{MARE} (mean absolute relative error, **Gleichung 2**) verwendet; es liegt zwischen minus Unendlich und 1, wobei 1 eine perfekte Simulation wäre.

$$F_{MARE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i)|}{Q_{obs}(i)} \quad \text{Gleichung 2}$$

F_{MARE} gewichtet mittlere und niedrige Abflüsse stärker als Spitzenabflüsse und ist daher besser für die Bewertung von Niedrigwasserabflüssen geeignet als z.B. die häufig verwendete Nash-Sutcliffe Efficiency.

F_{MARE} verbesserte sich mit dem HBV_{exchange}-Modell im Vergleich zum Bezugsmodell (**Abbildung 15**) deutlich. Der Vergleich zwischen simuliertem und beobachtetem Abfluss für den Sommer 2003, zeigt auch eine Verbesserung der Simulation sehr kleiner Abflüsse und besonders während Perioden ohne Abfluss (**Abbildung 16**).

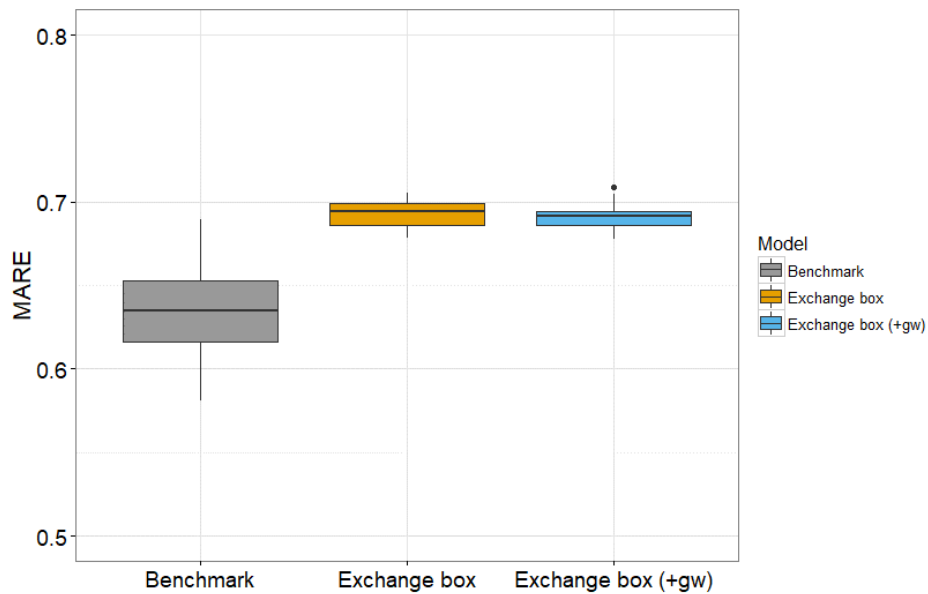


Abbildung 15 Das Gütemass F_{MARE} für die Kalibrierungsperiode für Bezugsmodell (benchmark) und das $HBV_{exchange}$ -Modell mit Einbezug von nur Abfluss (Exchange box) sowie Grundwasser und Abfluss (Exchange box+gw).

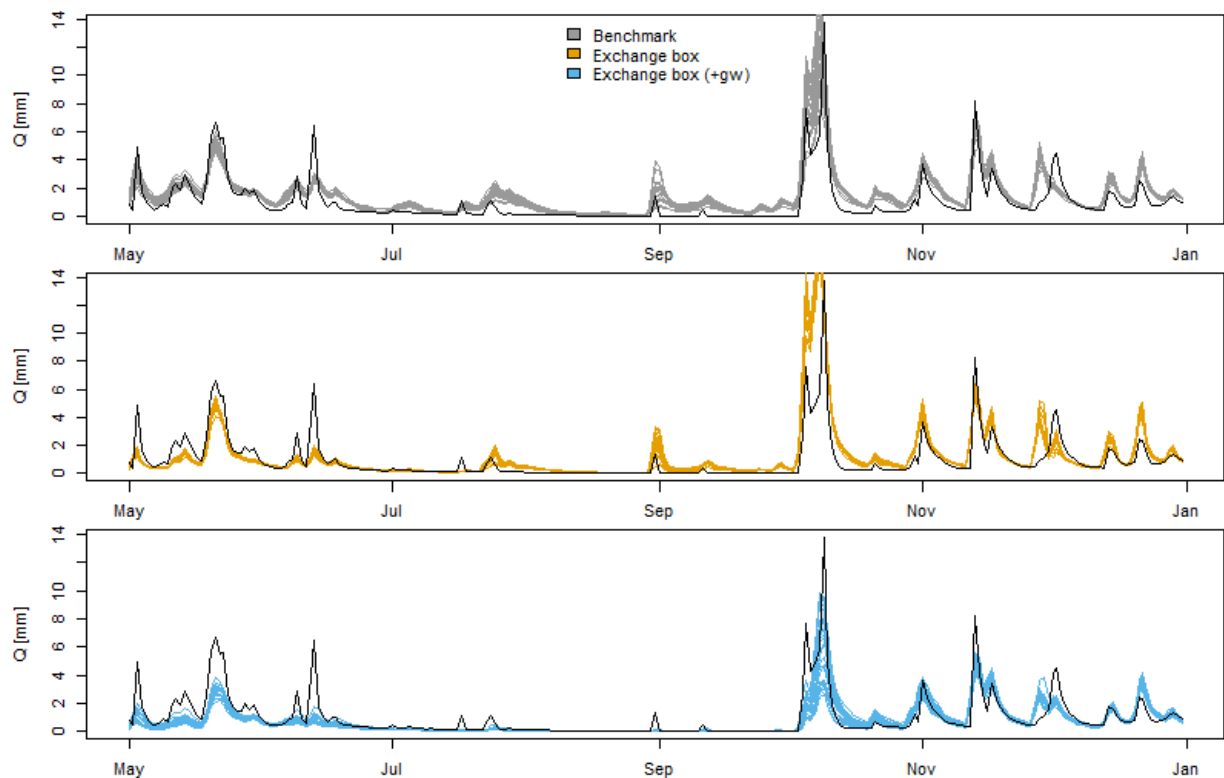


Abbildung 16 Vergleich zwischen Bezugsmodell und $HBV_{exchange}$ -Modell im Sommer 2003 (diese Periode war nicht Teil der Kalibrierung).

4.2.4 Anwendung auf Einzugsgebiete in der Schweiz

Für fast alle Einzugsgebiete ergibt sich eine Verbesserung der Niedrigwassersimulation hinsichtlich des Gütemasses F_{MARE} . Allerdings wird bei einigen Einzugsgebieten die Streuung der Simulationen höher, d.h. die Modellunsicherheit aufgrund der Modellparametrisierung steigt an (Ergebnisse nicht im Synthesebericht dargestellt). Dies ist den zusätzlichen Parametern der Austauschbox zuzuschreiben. Es wäre möglich, die Parametergrenzen besser

zu definieren, indem man zusätzlich zum Abfluss Grundwasserdaten zur Kalibrierung speziell der Austauschboxparameter verwendet, wie im Beispiel der Töss (**Abbildung 15**), wo sich durch die zusätzlichen Grundwasserdaten die Parameterunsicherheit reduzieren liess. Wie stark das für die anderen Einzugsgebiete auch zutrifft, und welche Grundwasserdaten sich dazu eignen oder eher nicht ist allerdings in zukünftigen Studien noch zu eruieren.

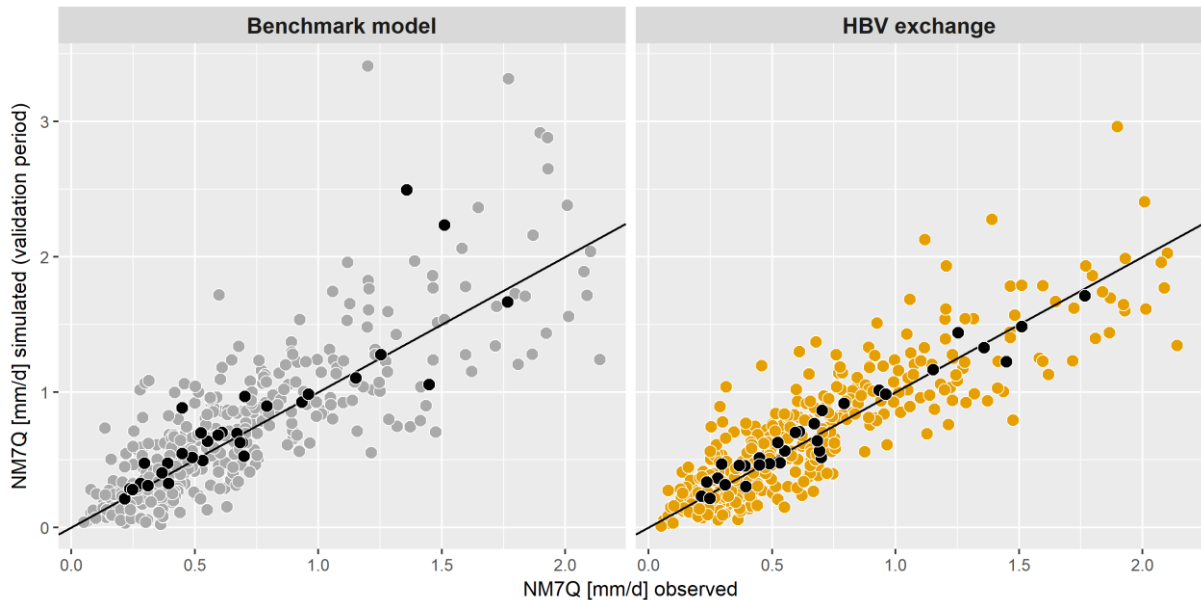


Abbildung 17 Vergleich der Simulationen des HBV_{exchange}-Modells zum Bezugsmodell hinsichtlich des Niedrigwasserkennwerts NM7Q (graue und gelbe Punkte) sowie das Mittel der NM7Q über die gesamte Periode MNM7Q (schwarze Punkte) für die Validationsperiode (2002-2013).

Die Kennwerte Q_{95} und MNM7Q (respektive NM7Q) wurden auf Basis der Abflüsse im Sommer (Juni-November) berechnet. Bezüglich der Kennwerte MNM7Q ist bei den Simulationen mit dem HBV-exchange Modell für die meisten Einzugsgebiete eine moderate Verbesserung ersichtlich, sowohl für Unter- als auch Überschätzungen des Bezugsmodells (**Abbildung 17**). Die Jahreswerte des Niedrigwasserkennwertes NM7Q sind deutlich variabler, allerdings zeigt sich auch hier, vor allem für Einzugsgebiete mit höheren Sommerniedrigwasser, eine Verbesserung der Simulationen mit HBV_{exchange} im Vergleich zum Bezugsmodell. Auffällig war eine Verbesserung der Simulationen der südlich der Alpen gelegenen Einzugsgebiete Riale di Calneggia und Poschiavino bei NM7Q und MNM7Q. Generell kann eine deutliche Über- oder Unterschätzung dieser Kennwerte nicht wie beim Q_{95} auch mit einer zeitlichen Verschiebung der simulierten Niedrigwasser begründet sein, d.h. also mit einem Fehler in der Dynamik von mehr als einer Woche.

Für den Niedrigwasserkennwert Q_{95} sind auch leichte Verbesserungen der Simulationen des HBV_{exchange} Modells zu erkennen (**Abbildung 18**), allerdings weniger ausgeprägt, als bei den MNM7Q Werten. Wie schon in der statistischen Datenanalyse festgehalten, beeinflusst ein einzelnes trockenes Jahr in der Bezugsperiode den Q_{95} deutlich stärker als die Kennwerte MNQ7, weil sie prozentual stärker eingehen können, während für den MNM7Q alle Jahre gleich gewichtet in die Berechnung einfließen.

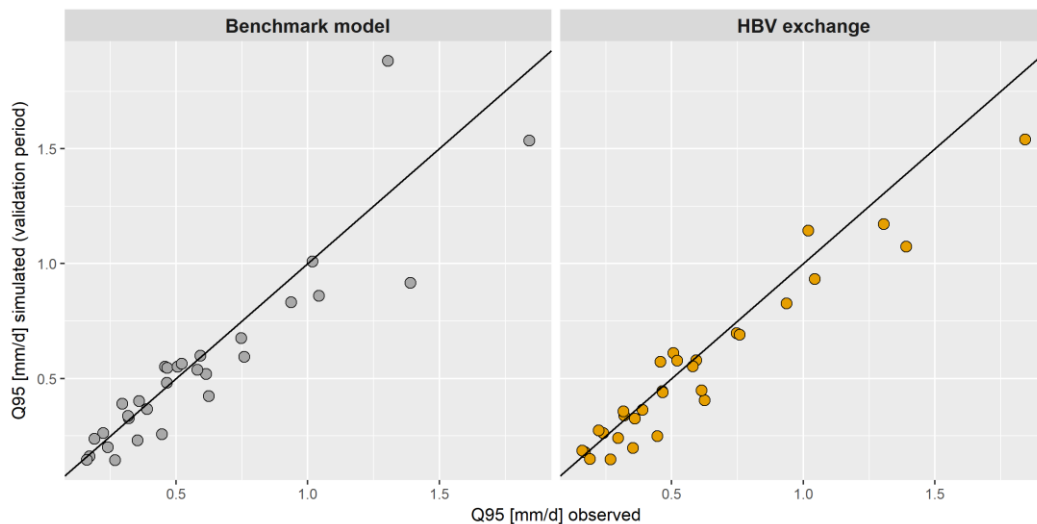


Abbildung 18 Vergleich der Simulationen des $HBV_{exchange}$ -Modells mit dem Bezugsmodell hinsichtlich des Niedrigwasserkennwerts Q_{95} für die Validationsperiode (2002-2013).

4.3 Blick in die Zukunft: Modellanwendungen zu Bestimmung der Sensitivität bei Klimaänderung

Ziel der WORSTFLEX-Szenarien war es, die Niedrigwassersensitivität von Einzugsgebieten in der Schweiz näher zu beleuchten. Anders als bei herkömmlichen Wetterszenarien werden hierfür Daten aus der Vergangenheit genutzt, um in einem „Was-wäre-wenn“-Ansatz zu testen, wie sich sommerliche Niedrigwasser ausgeprägt hätten, wenn andere Vorbedingungen vor den jeweiligen Niedrigwasserperioden geherrscht hätten. Hierfür eignet sich ein einfaches hydrologisches Speicherelementmodell wie HBV, weil sich bestimmte Perioden der Modelleingangsdaten schnell austauschen lassen. Da die Ausprägung von Niedrigwasser massgeblich durch die Grundwasser-Box in HBV gesteuert wird, nutzen die WORSTFLEX-Szenarien zwar simulierte Abflussdaten zur Auswahl der Niedrigwasserperioden, verwenden bei der Auswahl von Daten für die Szenarien aber die Grundwasserneubildung. Vor einer Niedrigwasserperiode werden also unterschiedlich lange Perioden von Niederschlags- und Temperaturdaten gegen andere Perioden ausgetauscht, welche durch eine geringere Grundwasserneubildung im Vergleich zum Original identifiziert wurden. Dabei wird beispielsweise für das Jahr 2003 ein Zeitraum von 60 Tagen im Frühjahr (1.4. bis 31.5.) mit Modelleingangsdaten aus dem gleichen Zeitraum, aber aus einem anderen Jahr getauscht. Diese Verminderung ist in geringerem Abfluss für verschiedene Szenarienzeiträume (-1 bis -12 Monate, also rückwärtsgerichtet) in **Abbildung 19** erkennbar (blaue Färbung steht für geringere Reduktion, gelbe Färbung für Einzugsgebiete mit stärkerer Reduktion). Zur Vergleichbarkeit wird das entstandene Abflussdefizit zwischen Szenarien- und Referenzmodellierung mit dem Median-Abfluss (Q_{50}) des entsprechenden Einzugsgebiets normiert, um die Defizite über Einzugsgebiete hinweg vergleichbar zu machen. Für die Jahre 2003 und 2015 sind z.B. für 12-monatige Szenarien im extremsten Fall Abflussdefizite von 600 Q_{50} -Tagen generiert worden (**Abbildung 18**, linke Spalte, Mitte), 1976 lag das Defizit hingegen im extremsten Fall nur bei etwa 200 Q_{50} -Tagen. Aufgrund der stark unterschiedlichen Abflussregime in den 40 Untersuchungsgebieten zeigt sich der Q_{50} im Vergleich zum MQ als robusterer Kennwert für diese Normierung. Es wäre auch eine Normierung auf den MNQ denkbar, dann würden grössere Werte für das Abflussdefizit entstehen. Die normierten Abflussdefizite müssen also folgendermassen verstanden werden: „Wie viele Tage mit einem

Q₅₀-Abfluss wären im jeweiligen Gebiet nötig, um das durch das Szenario entstandene Abflussdefizit wieder auszugleichen?“.

Die gleiche Normierung wurde auch für die Regenerationszeit verwendet. Hier wird untersucht, welches Abflussdefizit zwischen Szenario- und Referenzmodellierung entsteht und wie viele Q₅₀-Tage nötig sind, um dieses Defizit aufzufüllen (negative Werte bedeuten größere Defizite). Die Regeneration ist dabei abgeschlossen, wenn die Abflussganglinien aus Szenario- und Referenzmodellierung weniger als 2% Unterschied aufweisen. Für die Regeneration (**Abbildung 19**, rechte Spalte) wird deutlich, dass kürzere Szenarien (1 bis 6 Monate) zu grösseren Defiziten führen und die normierten Defizite mit ansteigender Szenariendauer zurückgehen. Dies zeigt sich insbesondere für 1976 und 2003, wohingegen für 2015 festzustellen ist, dass die Defizite zwischen 6 und 12 Monaten Szenariendauer auch wieder zunehmen können. In **Abbildung 19** sind farblich Perzentile dargestellt und eine Medianlinie, welche anzeigt, dass jeweils die Hälfte der Einzugsgebiete grössere bzw. kleinere Abflussdefizite aufweisen (dunklere Einfärbung zeigt extremere Abflussdefizite in den Gebieten, hellere Einfärbung weniger stark ausgeprägte Abflussdefizite). Da für die Szenarien mit 1 bis 12 Monaten Dauer jeweils „worst-case“-Perioden mit in der Summe niedrigen Grundwasserneubildungsraten gesucht werden, kann es vorkommen, dass zum Ende des Szenarios dennoch ein Neubildungsimpuls auf die Grundwasser-Box im HBV trifft und die Auswirkungen des Szenarios hinsichtlich der Regeneration deutlich abmildert. Die Entwicklung des WORSTFLEX-Szenarios ist gerade für die zahlreich unterschiedlichen Abflussregime und Trockenjahre in der Schweiz sehr aufwendig und facettenreich, daher bedarf es zukünftig weiterer Forschung in diesem Bereich, um zielgerichtete und aussagekräftige Szenarienkonzepte umzusetzen. Es wird allerdings jetzt schon deutlich, dass die ausgewählten Trockenjahre hinsichtlich der Abflusssummen um bis zu 40 Q₅₀-Tage niedriger hätten ausfallen können, wenn andere Vorbedingungen zu Beginn der Niedrigwasserperioden geherrscht hätten. Insbesondere für Gebiete mit einem kleinen Q₉₅/Q₅₀-Verhältnis bedeutet dies, dass sich die Niedrigwasserperioden extremer ausgeprägt hätten, weil 40 Q₅₀-Tage dann wesentlich mehr Tagen mit Niedrigwasserabfluss entspricht.

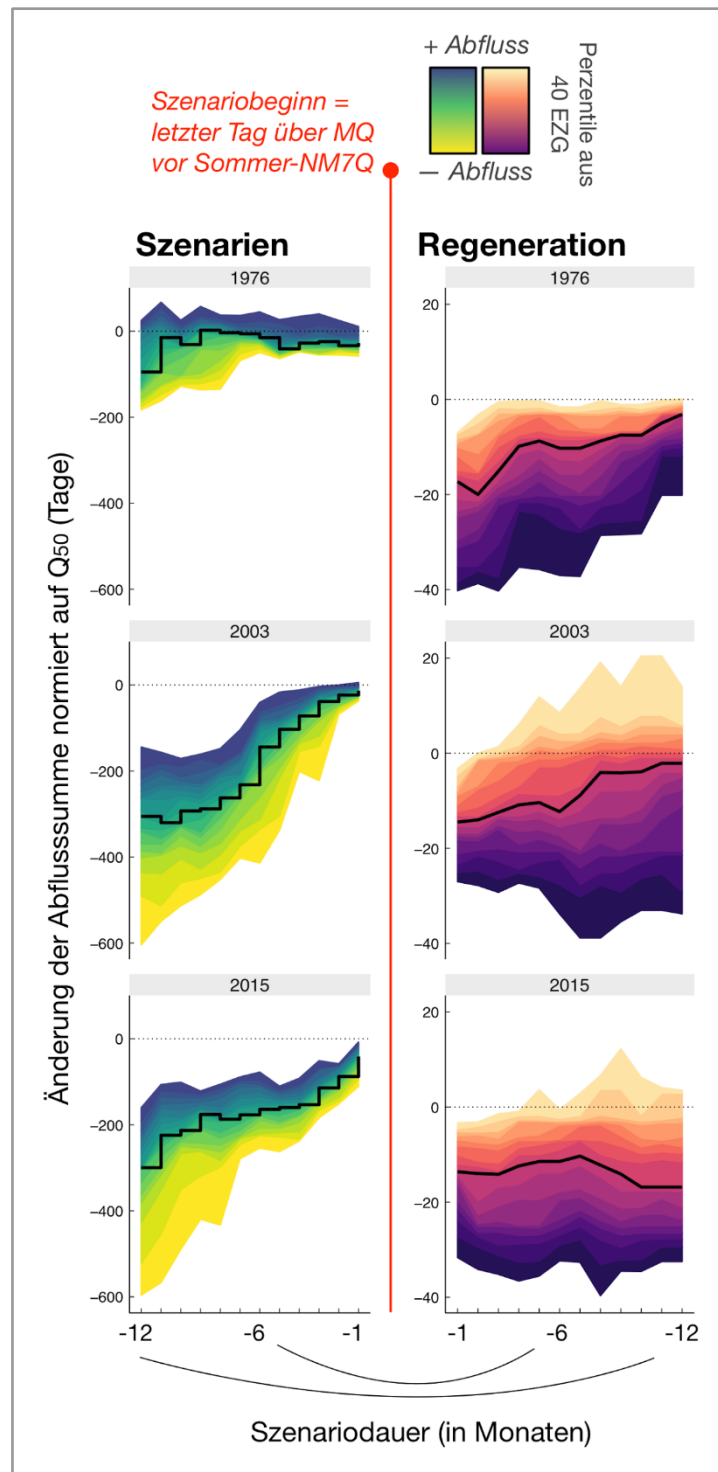


Abbildung 19 Zusammenfassung der WORSTFLEX-Szenarien aus der HBV-Simulation. Gegenüberstellung der veränderten Vorbedingungen (Szenarien linke Spalte) und der Auswirkungen (Regeneration rechte Spalte) für drei ausgewählte Niedrigwasserjahre in der Schweiz. Skalierung der y-Achse ist zu lesen als: "Wie viele Tage mit einem Median-Abflusswert sind nötig, um das Abflussdefizit bedingt durch einzelne Szenarien unterschiedlicher Länge (-1 bis -12 Monate) auszugleichen?" Ausführliche Erläuterungen zur Darstellung im Text.

4.4 Qualität hydrologischer Messstationen

Ein wichtiger Aspekt für Modellanwendungen ist die Messgenauigkeit einer Abflussmessstation, auf die sich die Kalibrierung der Modelle bezieht. Wenn eine beträchtliche Menge Wasser das Einzugsgebiet verlassen kann ohne durch die Abflussmessung erfasst zu werden (d.h. unterhalb der Station als Grundwasser abfließt) kann die Sensitivität des Einzugsgebiets auf Trockenheit überschätzt werden. Tabelle 3 vergleicht verschiedene Messstationen. Stationen mit einer guten Qualität sind so positioniert, dass kein oder wenig Grundwasser unter der Station fließt.

Tabelle 3 Qualität der hydrologischen Messstationen in Bezug auf Grundwasserabfluss unterhalb der Station, d.h. in Bezug auf Abfluss aus dem Einzugsgebiet, der durch die Messstation nicht erfasst wird. Gut: kein Grundwasserleiter an Position der Messstation. Schlecht: Grundwasserleiter vorhanden an Position der Messstation. Informationsquellen: online Geoportale der Kantone, GeoMol Raster der Felsoberfläche, BAFU Beschreibung der Messstationen (Geologische / hydrogeologische Charakterisierung, Geologische Vektordaten GeoCover 1:25000).

Fluss	Messstelle	Nummer	Qualität
Aabach	Mönchaltorf		gut
Aach	Salmsach, Hungerbühl	2312	gut
Alp	Einsiedeln	2609	gut
Biber	Biberbrugg	2604	gut
Broye	Payerne, Caserne d'aviation	2034	schlecht
Emme	Eggiwil	2409	gut
Emme	Emmenmatt	2070	schlecht
Emme	Wiler, Limpachmündung	2155	gut
Glatt	Herisau, Zellersmuehle	2305	gut
Goldach	Goldach, Bleiche	2308	schlecht
Gürbe	Belp, Mülimatt	2159	gut
Ilfis	Langnau	2603	schlecht
Kleine Emme	Emmen	2634	schlecht
Kleine Emme	Werthenstein, Chappelboden	2487	unklar
Langeten	Huttwil, Häberenbad	2343	gut
Luthern	Nebikon	2497	schlecht
Mentue	Yvonand, La Mauguettaz	2369	gut
Murg	Wängi	2126	gut
Murg	Frauenfeld	2386	unklar
Murg	Murgenthal, Walliswil	2471	gut
Necker	Mogelsberg, Aachsäge	2374	gut
Rappengraben	Wasen, Riedbad	2283	gut
Rietholzbach	Mosnang, Rietholz	2414	schlecht
Röthenbach	Eggiwil		schlecht
Sellenbodenbach	Neuenkirch	2608	schlecht

Sense	Thörishaus, Sensematt	2179	schlecht
Sitter	St. Gallen, Bruggen / Au	2468	unklar
Sperbelgraben	Wasen, Kurzeneialp	2282	gut
Wigger	Zofingen	2450	schlecht
Worble	Ittigen	2500	schlecht

4.5 Die Molasse als Festgestein im Mittelland: variierende hydrogeologische Eigenschaften

Die Modellberechnungen mit den synthetischen HGS Modellen bestätigten die Annahme, dass das Festgestein einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserneubildung während Niedrigwasserbedingungen hat. Daher wurde eine Methode entwickelt, um die hydrogeologische Eigenschaften der Molasse, welche das Festgestein im Mittelland bildet, für ein bestimmtes Einzugsgebiet oder eine bestimmte Region abzuschätzen. Diese Charakterisierung ist ein erster Ansatz und kann mit detaillierterer geologischer und hydrogeologischer Information erweitert werden.

Die Methode benutzt eine Karte der Lithologie der Molasse (**Abbildung 20**), wie sie an der Oberfläche oder unterhalb der quartären Ablagerungen vorkommt und wird kombiniert mit Karten der Mächtigkeiten der klassischen stratigraphischen Einheiten der Molasse (**Abbildung 20 b-d**) (Obere Süsswassermolasse (OSM), Obere Meeresmolasse (OMM), Untere Süsswassermolasse (USM), und Untere Meeresmolasse (UMM, zu tief gelegen um für diese Studie entscheidend zu sein). Die lithologische Karte basiert auf paläo-sedimentologischen Modellen (Trümpy, 1980). Diese Modelle illustrieren, dass die klassische stratigraphische Aufteilung der Molasse (OSM, OMM etc.) aufgrund der räumlichen Variabilität der sedimentären Bedingungen während der Ablagerung (z. B. Nähe bzw. Entfernung zu den Alpen, terrestrische oder marine Bedingungen) nicht unbedingt repräsentativ für die Lithologie eines bestimmten Gebiets sein muss.

Für die Abschätzung der hydrogeologischen Eigenschaften des in einem bestimmten Gebiet vorliegenden Festgesteins soll deshalb als erster Schritt die lithologische Karte hinzugezogen werden. Basierend auf den paläo-sedimentologischen Modellen (Trümpy, 1980) wurden fünf Lithologien ausgeschieden. Während fein- und grobkörnige Flussablagerungen wie Mergel und Konglomerate, hydrogeologisch als Aquitard einzustufen sind, sticht der marine Sandstein als poröser Grundwasserleiter hervor. Innerhalb der Gruppe der fünf Molasse-Lithologien verfügen diese Sandsteine über die vorteilhaftesten hydrogeologischen Eigenschaften (porös, $K = 10^{-4}$ bis 10^{-6} m/s, regionaler Grundwasserleiter), um bei Niedrigwasserbedingungen die alluvialen Grundwasserleiter oder die Oberflächengewässer auf stabile und kontinuierliche Weise mit Wasser zu versorgen. Diese Einschätzung stimmt mit dem Hydrologischen Atlas HADES (HADES, 1992; Tafel 8.1) überein. Der marine Sandstein wird dort mit einer mittleren Durchlässigkeit aufgeführt, während die Mergel, Sandsteine und Konglomerate der Süsswassermolasse als gering bis mittel durchlässig

eingestuft werden. Eine höhere Durchlässigkeit als dem marinen Sandstein wurde im HADES nur den Kalksteinen des Malms zugeteilt (Karstgrundwasserleiter). Verkarstete Gebiete wurden in der vorliegenden Studie jedoch nicht berücksichtigt.

Die Karten der Mächtigkeit der klassischen stratigraphischen Molasseeinheiten (OSM, OMM, USM) im Bereich der mittelländischen Molasse (Schichten horizontal bis subhorizontal gelagert) zeigen, wo aufgrund des Ausdünnens einer Molasseeinheit ein Wechsel der Lithologie an der Oberfläche wahrscheinlich ist sowie auch in welcher Tiefe mit einem bedeutenden Wechsel der Lithologie gerechnet werden muss. Datengrundlage für die Karten der Mächtigkeiten ist für die OSM eine Isohypsenkarte deren Basis (Gander, 2004) und für die OMM sowie USM, Profile von 33 tiefen Bohrungen, die zwischen den 1940er Jahren und 1998 im Rahmen der Erdöl/-gas Exploration und der Atommüllproblematik (NAGRA) abgeteuft wurden (Büchi et al 1965a, 1965b; Lahusen and Wyss, 1995; Gander, 2004; Sommaruga et al., 2012). Die Karten der OMM und USM basieren also auf Punktmessungen und haben daher begrenzte Aussagekraft für auf kleinem Raum vorkommende tektonische Falten und Brüche. Insbesondere die Region nördlich und westlich von Lausanne, wo zahlreiche Brüche zu vertikalen Versätzen in den Molasseschichten führten, ist mit zusätzlichen Unsicherheiten bezüglich der berechneten Mächtigkeiten zu rechnen. Aufgrund der starken tektonischen Überprägung sind die Zonen der gefalteten und subalpinen (hauptsächlich USM) Molasse nicht in den Mächtigkeitskarten mit inbegriffen. Aufgrund der geringen Anzahl verfügbaren Bohrungen in diesem Bereich und auch der Schrägstellung und Verfaltung dieser Einheiten ist eine Rekonstruktion der Dicke im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Generell lässt sich aber sagen, dass die Mächtigkeit dieser tektonisch überprägten Einheiten sehr hoch ist und ihr hydrogeologischer Charakter durch ihre starke Verdichtung sowie einer möglicherweise bedeutenden Kluftporosität gegeben ist, vor allem im Fall der subalpinen Molasse. Ob sich während der tektonischen Überprägung eine Kluftporosität gebildet hat, variiert regional und muss deshalb für einzelne Einzugsgebieten mit Hilfe von regionalen geologischen Informationen beurteilt werden.

Für 22 Einzugsgebiete in der Schweiz wurde untersucht ob ein Zusammenhang zwischen Niedrigwasserverhalten und den hydrogeologischen Eigenschaften des Molasse Festgesteins besteht. Es konnte dabei eine Korrelation zwischen dem Q95/Q50-Verhältnis und der geschätzten mittleren hydraulischen Leitfähigkeit bzw. dem % an Sandstein im Einzugsgebiet nachgewiesen werden (Carlier et al., 2018b). Dieses Ergebnis stimmt mit den Resultaten der synthetischen Modelle überein (siehe 4.1.1.), die ebenfalls den grossen Einfluss des Festgesteins auf das Niedrigwasserverhalten von Einzugsgebieten verdeutlichen.

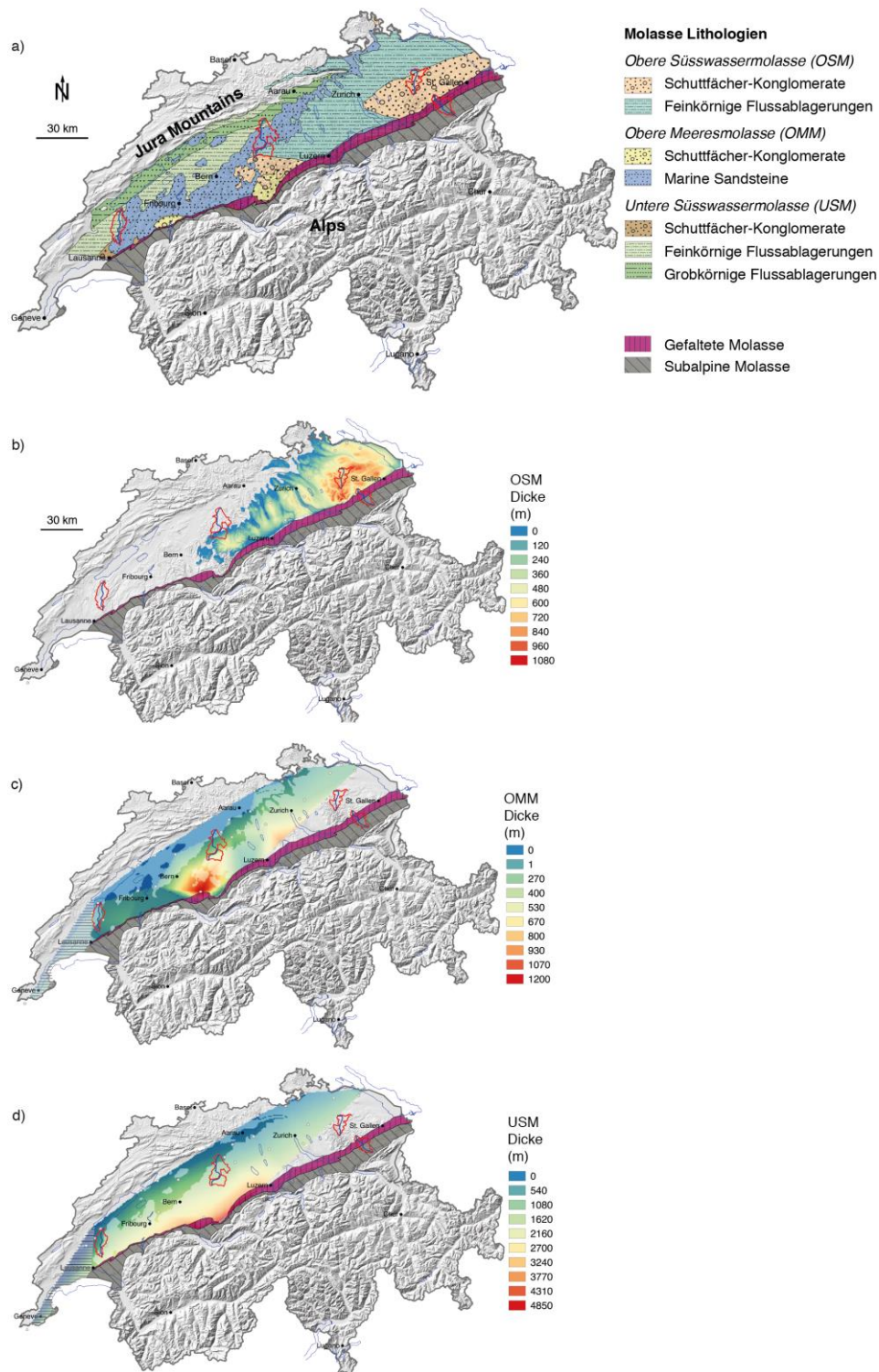


Abbildung 20 Überblick der (a) Molasselithologien basierend auf paläo-sedimentologischen Modellen (Trümpy, 1980) und der Mächtigkeit der (b) Oberen Süsswassermolasse OSM (Gander, 2004), der (c) Oberen Meeresmolasse OMM und der (d) Unteren Süsswassermolasse USM (graue Punkte = verwendete Tiefbohrungen; zusammenfassende Referenz: (Sommaruga et al., 2012) Dunkle Farben in (b) bis (d) zeigen, wo die entsprechende Molasseeinheit an der Oberfläche oder unter quartären Ablagerungen vorhanden ist. Die horizontal schraffierte Fläche nordwestlich von Lausanne zeigt ein Gebiet mit erhöhter Unsicherheit der Mächtigkeiten aufgrund tektonischer Brüche. In rot: Fünf detailliert untersuchte Einzugsgebiete mit dem Verlauf des Hauptflusses in blau ausgewählt aufgrund ihrer grossen Spannweite des Q_{95}/Q_{50} Kennwerts und gut positionierten hydrologischen Messstationen (auf Festgestein). Die Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil marinen Sandsteins als Festgestein zeigen die höchsten Q_{95}/Q_{50} Werte (Langete-Rotbach, Huttwil; Murg, Murgenthal).

5 Empfehlung für die Anwendung von Datenanalysen und Modellierung zur Abschätzung der Sensitivität von Einzugsgebieten auf längere Trockenphasen

Die in den letzten Kapiteln erarbeiteten Erkenntnisse und Konzepte können dazu beitragen Systemdienstleistungen (z.B. der Verfügbarkeit von Grundwasser), die sensitiv auf längere Trockenperioden sind, zu identifizieren. Dabei wird zwischen Systemdienstleistungen bezüglich Oberflächenabfluss und Systemdienstleistungen bezüglich Grundwasserstand unterschieden. In beiden Fällen werden unterschiedliche Verfahren vorgeschlagen in Abhängigkeit der verfügbaren Datenmenge. Es handelt sich dabei um qualitative Verfahren die auch bei einer geringeren Datenmenge umgesetzt werden können, und quantitative Verfahren, die auf der Berechnung von Wasserbilanzen, Auswertung von Abflusszeitreihen oder Modellierungen basieren. Die Empfehlungen richten sich in erster Line an kantonale Fachstellen welche für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen zuständig sind.

5.1 Sensitivität von Fliessgewässern und den dazugehörigen Systemdienstleistungen auf Trockenperioden

Das Vorgehen zur Abschätzung der Sensitivität von Fliessgewässern ist in Abschätzung der Sensitivität von Fliessgewässern auf Trockenperioden

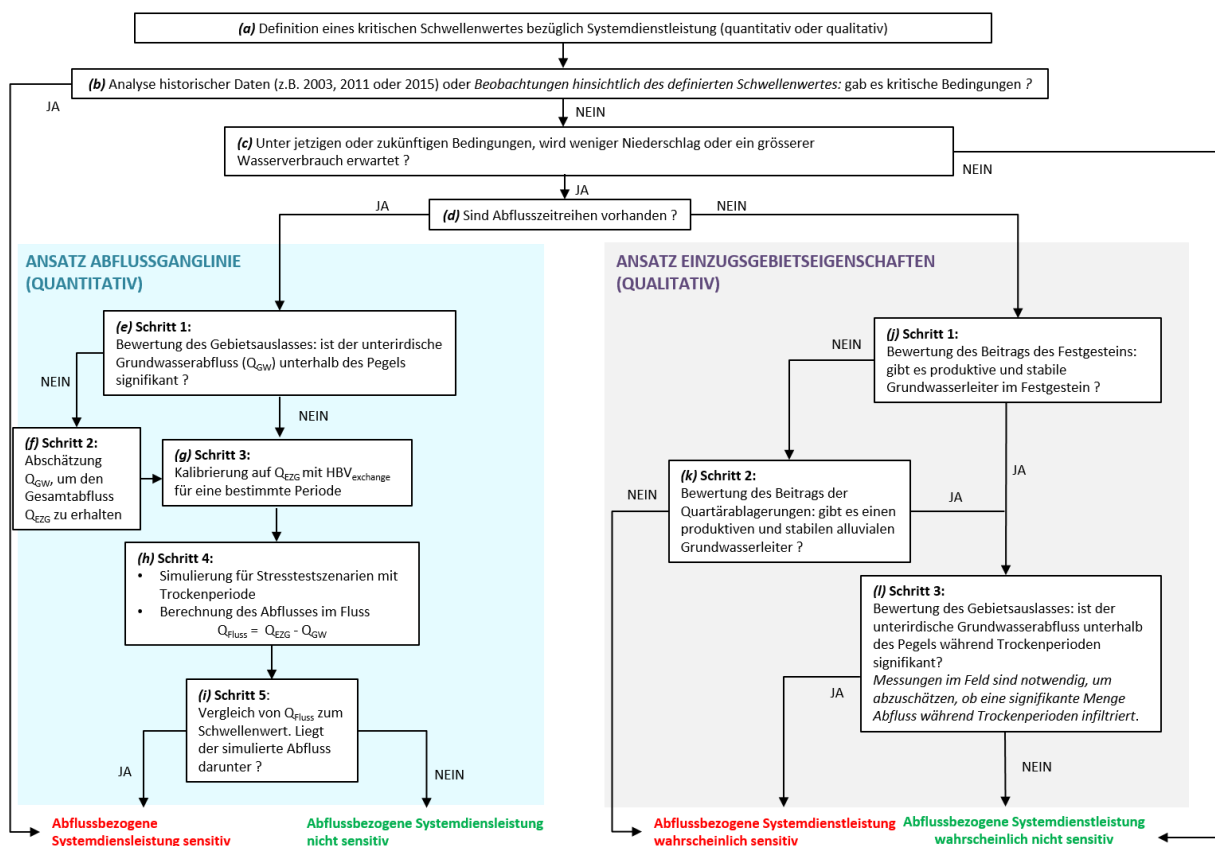


Abbildung 21 schematisch dargestellt. Im Folgenden wird jeder Schritt des Verfahrens, der jeweils mit einem Buchstaben gekennzeichnet ist, erläutert.

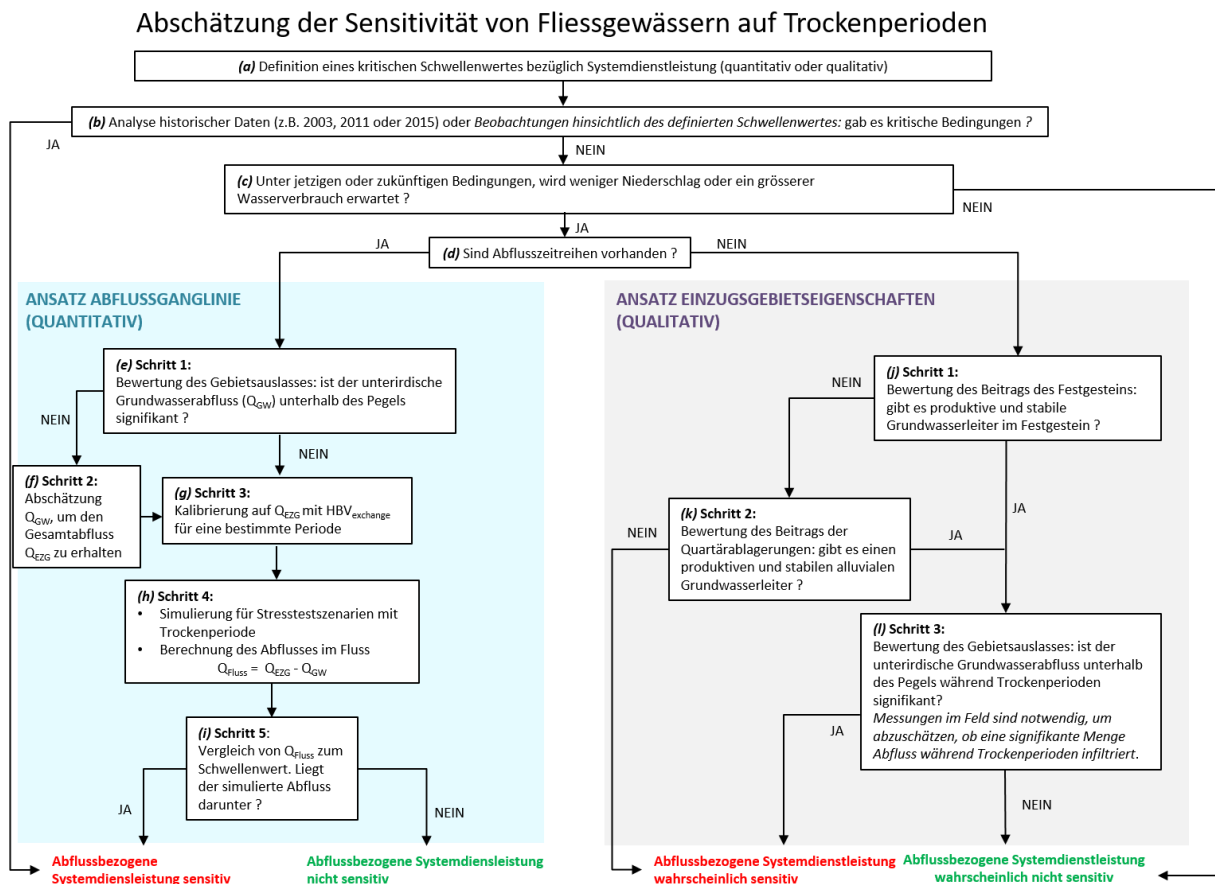


Abbildung 21 Abschätzung der Sensitivität von Fließgewässern auf Trockenperioden.

(a) Die Sensitivität muss bezüglich einer klar definierten Systemdienstleistung, welche vom Oberflächenabfluss abhängt, evaluiert werden. Mögliche Systemdienstleistungen können z.B. Mindestabflussmengen für ein bestimmtes Ökosystem oder Mindestabflussmengen im Kontext gesetzlicher Bestimmungen (Q347) sein. Quantitative Kriterien, sogenannte Indikatoren (z.B. Mindestabflussmengen, zeitlich Dynamik etc.), müssen in diesem Zusammenhang definiert werden. Falls verschiedene Kriterien relevant sind, muss die Evaluierung für jeden Indikator wiederholt werden.

(b) Historische Daten von Abflussmengen können wertvolle Information bezüglich Sensitivität der in (a) identifizierten Systemdienstleistung zu Trockenperioden liefern. Insbesondere Jahre mit Perioden mit tiefen Niederschlagsmengen sind wichtig (z.B. 2003, 2011 oder 2015). Falls in einem dieser Jahre Probleme bezüglich der identifizierten Systemdienstleistung aufgetreten sind, ist das Einzugsgebiet als sensitiv einzustufen und entsprechende Massnahmen müssen erarbeitet werden.

(c) Falls derartige Daten nicht vorhanden sind, oder Änderungen bezüglich Wassernutzung, Flussrevitalisierungen und/oder Niederschlagsmengen und Verdunstungsraten erwartet werden (etwa im Zuge der Klimaänderung), kann die Sensitivität mittels zwei im Projekt entwickelten Methoden evaluiert werden. Für die Erarbeitung künftiger Niederschlagsmengen können z.B. Stresstestszenarien (s. **Kap. 2.5.1**) verwendet

werden. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zeitlich hochaufgelöste Szenarien zu erarbeiten (mindestens monatliche Niederschlagsmengen).

(d) Falls Zeitreihen von Abflussmengen und die dazugehörigen Niederschlagsdaten vorhanden sind, können diese die Grundlagen für eine numerische Modellierung bilden. Es ist wichtig, dass die vorhandenen Zeitreihen Perioden von geringen Niederschlagsmengen (z.B. Sommer 2003) beinhalten, mehrjährig sind und mindestens eine tägliche Auflösung aufweisen. Die quantitative Evaluierung umfasst mehrere Schritte, die unter den Buchstaben (e)-(i) beschrieben sind.

(e) Die Konfiguration der Abflussmessung muss bestimmt werden. Falls die Abfluss-Messstation auf einer undurchlässigen geologischen Formation installiert ist, können die Abflussdaten direkt für die numerische Modellierung verwendet werden.

(f) Häufig ist dies jedoch nicht der Fall und ein Teil des Wassers fließt unterirdisch ab. Diese Grundwasserabflussraten können insbesondere in kleinen Einzugsgebieten und während Niedrigwasserbedingungen eine wichtige Rolle spielen. Deshalb muss mit hydrogeologischen Methoden die Abflussrate im Untergrund (Q_{GW}) am Abflussmesspegel bestimmt werden. Die unterirdischen Abflüsse müssen zu den Oberflächenabflüssen (Q_{Fluss}) addiert werden und entsprechen dem Gesamtabfluss aus dem Einzugsgebiet (Q_{EZG}). Falls möglich, ist die unterirdische Abflussrate zu verschiedenen Zeitpunkten zu messen. Da sich jedoch Grundwasserabflüsse zeitlich weniger stark als Oberflächenabflüsse ändern, können schon einige wenige Messungen wertvoll sein.

(g) Um das Abflussverhalten für künftige, veränderte Niederschlagsbedingungen zu evaluieren kann das HBV Modell von grossem Nutzen sein. Eine speziell für Niedrigwasserbedingungen entwickelte HBV Version ($HBV_{exchange}$) ist in diesem Zusammenhang empfohlen. Die Kalibrierung des Modells muss auf Niedrigwasserverhalten abgestimmt sein. Insbesondere muss für die Definition der Zielfunktion das Gewicht auf Niedrigwasserabflüsse gelegt werden. Das häufig verwendete Nash-Sutcliffe-Kriterium (NSE) ist nicht geeignet, da es nicht auf Niedrigwasser sondern besonders auf Hochwasser abzielt. Besser geeignet sind Zielfunktionen wie F_{MARE} (s. **Kap. 4.2.3**), die speziell die Niedrigwassersimulationen bewerten, oder Zielfunktionen wie $\log NSE$, die den gesamten Hydrographen berücksichtigen.

(h) Die in Schritt (c) erarbeitenden Niederschlags- und/oder Verdunstungsszenarien können nun in das kalibrierte Modell einfließen und der künftige Einzugsgebietsabfluss mit Hilfe des kalibrierten Modells abgeschätzt werden. Wie bei jeder numerischen Modellierung ist eine Abschätzung der Unsicherheit unumgänglich. Falls die Abflussmengen in Punkt (f) für Grundwasserabflüsse korrigiert wurden, muss der gemessene Grundwasserabfluss vom berechneten Gesamtabfluss abgezogen werden, um den Oberflächenabfluss zu erhalten.

(i) Die berechneten Oberflächenabflüsse können nun mit den Kriterien (in Schritt (a) definiert) verglichen werden, unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten. Dieser Vergleich erlaubt eine qualitative Abschätzung ob eine bestimmte Systemdienstleistung unter künftigen Niederschlags- oder Nutzungsbedingungen gefährdet ist oder nicht.

Sind **keine Zeitreihen von Abflussdaten** vorhanden, ist eine quantitative Evaluierung wie in den Schritten (e)-(i) beschrieben nicht möglich. Es können jedoch **qualitative** Abschätzungen aufgrund der Geologie und der Topographie im Einzugsgebiet gemacht werden. Die numerische Analyse einer grossen Menge geologischer und topographischer Konfiguration hat gezeigt, dass an erster Stelle ein ergiebiges Festgestein eine wichtige Voraussetzung für einen kontinuierlichen Abfluss aus dem Einzugsgebiet ist.

(j) Die Ergiebigkeit des Festgesteins ist hauptsächlich durch seine hydrogeologische Eigenschaften gegeben. Diese Eigenschaften sind lose mit dem Gesteinstyp assoziiert. Geologische Karten geben Aufschluss bezüglich der vorhandenen Gesteinstypen in einem Einzugsgebiet. Die Ergiebigkeit des Festgesteins ist auch von der Topographie des Einzugsgebiets beeinflusst: steilere Gefälle gewährleisten grössere hydraulische Gradienten und ein grösserer Anteil Speichervolumen trägt zum Abfluss bei. Die Ergiebigkeit des Festgesteins in einem flachen Einzugsgebiet, auch wenn die Geologie relativ durchlässig ist (z.B. Sandstein), ist wegen kleinen hydraulischen Gradienten und kleinen dynamischen Speichervolumen begrenzt. Sind verschiedene Formationen mit unterschiedlicher Ergiebigkeit im Einzugsgebiet vorhanden, sind diese unterschiedlichen Formationen entsprechend ihrer Grösse zu gewichten. **Abbildung 22** kann als Basis für die Ergiebigkeit des Festgesteins benutzt werden.

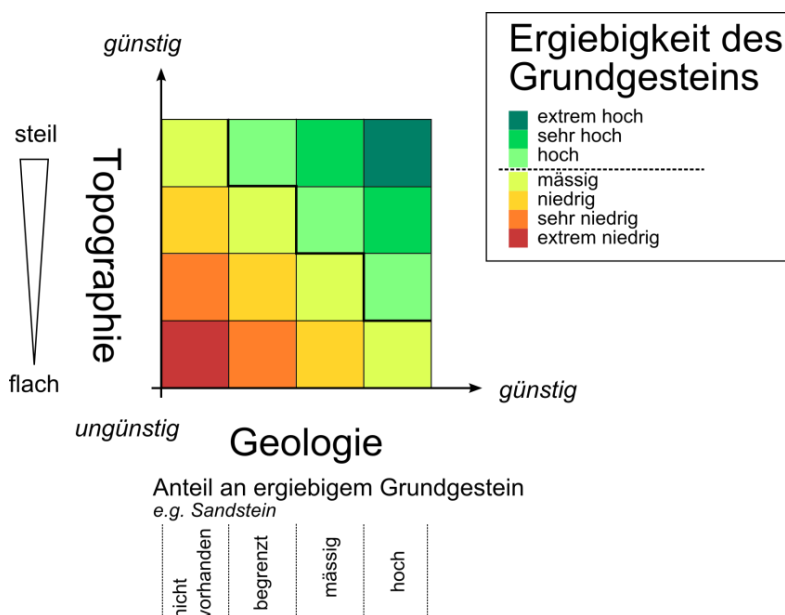


Abbildung 22 Schematische Darstellung der Beziehung zwischen der Ergiebigkeit des Festgesteins zu der Geologie und dem Gefälle (nicht maßstabgetreu).

(k) Ist kein ergiebiges Festgestein vorhanden, können alluviale Grundwasserleiter alleine einen signifikanten Basisabfluss garantieren. Die Ergiebigkeit und Dynamik dieser ergiebigen Quartärformationen müssen mit hydrogeologischen Methoden evaluiert werden. Falls weder das Festgestein noch der alluviale Grundwasserleiter ergiebig sind, ist das Fließgewässer als sensitiv gegenüber Trockenperioden einzustufen.

(l) Falls der alluviale Grundwasserleiter und/oder das Festgestein als ergiebig eingestuft wurden, ist die Ausflusskonfiguration zu bestimmen: ist der Grundwasserfluss unter der Abflussmessstation erheblich? Der erste Schritt, um diese Frage zu beantworten ist die Analyse von (hydro-)geologischen Karten für den Bereich mit der Messstation. Falls Karten darauf hinweisen, dass durchlässige und mächtige Quartärablagerungen am Auslass vorhanden sind, ist der Grundwasserfluss unter der Messstation voraussichtlich massgeblich, und der Fluss als sensitiv einzustufen. Dieses Vorgehen zur Bestimmung der Ausflusskonfiguration kann mit Feldmessungen vervollständigt werden: falls durchlässige Quartärlablagerungen am Auslass vorhanden sind, können z.B. klassische Abflussmessungen an verschiedenen Stellen entlang eines Fliessgewässers während einer Niedrigwasserperiode durchgeführt werden, um die Infiltration vom Fluss in den alluvialen Grundwasserleiter zu quantifizieren.

5.2 Sensitivität alluvialer Grundwasserleiter und den dazugehörigen Systemdienstleistungen auf Trockenperioden

Das Vorgehen zur Abschätzung der Sensitivität von alluvialen Grundwasserleitern ist in **Abbildung 23** schematisch dargestellt. Im Folgenden wird jeder Schritt des Verfahrens, die mit einem Buchstaben gekennzeichnet sind, erläutert.

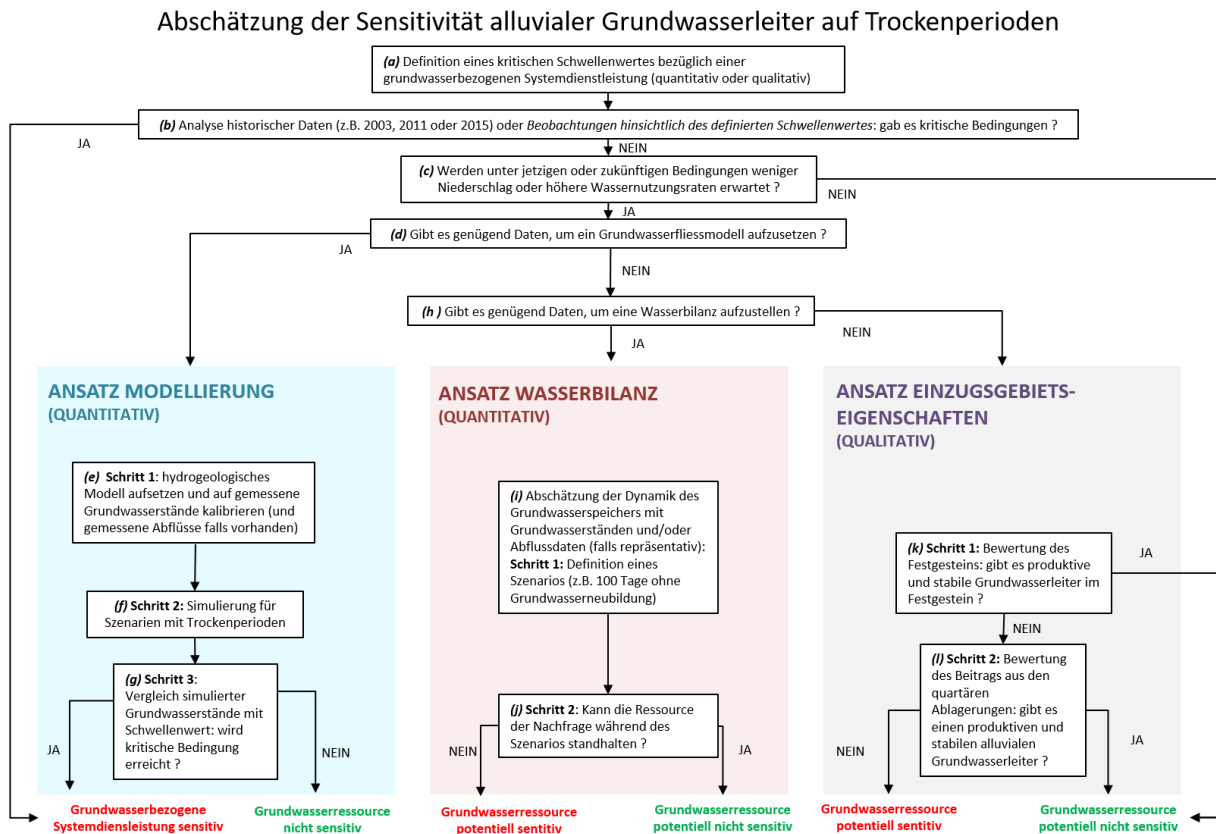


Abbildung 23 Sensitivität alluvialer Grundwasserleiter auf Trockenperioden.

(a) Die Sensitivität muss bezüglich einer klar definierten Systemdienstleistung, welche vom Grundwasserstand abhängt, evaluiert werden. Mögliche Systemdienstleistungen können z.B. Mindestpegelstände in einem Grundwasserleiter oder der Grundwassereintrag in einen Fluss oder ein Ökosystem sein. Quantitative Kriterien, sogenannte Indikatoren (z.B. Grundwasserstände oder Austauschraten mit einem Grundwasserleiter sein), müssen in diesem Zusammenhang definiert werden. Falls verschiedene Kriterien relevant sind (diese können gegenläufig sein), muss die Evaluierung für jeden Indikator wiederholt werden.

(b) Historische Daten von Pegelständen können wertvolle Information bezüglich Sensitivität der in (a) identifizierten Systemdienstleistung zu Trockenperioden liefern. Insbesondere Jahre mit Perioden mit tiefen Niederschlagsmengen sind wichtig (z.B. 2003, 2011 oder 2015). Falls in einem dieser Jahre Probleme bezüglich der Systemdienstleistung aufgetreten sind, ist das Einzugsgebiet als sensitiv einzustufen und entsprechende Massnahmen müssen erarbeitet werden.

(c) Falls solche Daten vorhanden sind, oder Änderungen bezüglich Wassernutzung, Versiegelung, Flussrevitalisierungen und/oder Niederschlagsmengen und

Verdunstungsraten erwartet werden (etwa im Zuge der Klimaänderung), kann die Sensitivität je nach Datenlagen mit einer von drei Methoden evaluiert werden. Für die Erarbeitung künftiger Niederschlagsmengen können z.B. Stresstestszenarien (s. Kap. 2.5.1) verwendet werden. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zeitlich hochaufgelöste Szenarien zu erarbeiten (mindestens monatliche Niederschlagsmengen).

(d) Eine quantitative Aussage über künftig Pegelstände ist nur durch eine numerische Modellierung möglich. Das Erstellen eines Grundwassermodells setzt das Vorhandensein von diversen Datensätzen voraus (z.B. Information über die Geologie, Landnutzung oder Neubildung). Insbesondere Information zum Festgestein und zu den alluvialen Grundwasserleitern ist grundlegend. Für die Eichung eines Modells sind Zeitreihen von Grundwasserständen eine wichtige Voraussetzung. Es ist ausserdem wesentlich, dass die vorhandenen Zeitreihen Perioden von geringen Niederschlagsmengen (z.B. Sommer 2003) beinhalten. Als zusätzliche Information können Austauschraten oder Abflussraten im Grundwasserleiter hinzugezogen werden. Falls Abflussdaten von Fliessgewässern verwendet werden, muss die Konfiguration der Abflussmessung bestimmt werden. Falls genügend Daten für das Erstellen eines Grundwassermodells vorhanden sind, ist ein Modell zu erarbeiten.

(e) Das Modell wird anhand vorhandener Beobachtungsdaten kalibriert. Dazu soll eine Unsicherheitsanalyse erstellt werden. Sind nur Pegelstände in der Eichung verwendet worden, sind Prognosen bezüglich Austauschraten oder Abflussraten im Grundwasserleiter sehr unsicher.

(f) Die in Schritt (c) erarbeiteten Niederschlags- und/oder Verdunstungsszenarien können nun in das kalibrierte Modell einfließen und die räumliche Verteilung der Grundwasserstände berechnet werden. Künftige Änderungen der Entnahme an Pumpbrunnen müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

(g) Die berechneten Pegelstände und/oder Austauschraten können nun mit den Kriterien (in Schritt (a) definiert) verglichen werden, unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten. Dieser Vergleich erlaubt eine qualitative Abschätzung, ob eine bestimmte Systemdienstleistung unter künftigen Niederschlags- oder Nutzungsbedingungen gefährdet ist oder nicht.

(h) Falls kein numerisches Modell erstellt werden kann, können trotzdem gewisse Aussagen bezüglich der Grundwasserreserven gemacht werden. Eine Wasserbilanz kann Aufschluss geben wie lange genügend Grundwasser vorhanden sein wird. Im Gegensatz zum numerischen Modell kann eine solche Analyse nur auf der Skala des Einzugsgebietes realisiert werden. Es können somit nur Aussagen über den mittleren Wasserstand gemacht werden. Für eine solche Wasserbilanz werden Pegelstände des Grundwasserleiters benötigt. Falls nötig sind Piezometer zu installieren. Ebenfalls benötigt werden Informationen bezüglich des Volumens des gesättigten Grundwasserleiters sowie der Porosität.

(i) Um eine Wasserbilanz zu erstellen müssen die relevanten Wasserflüsse (z.B. Neubildung durch Niederschlag, Eintrag aus dem Festgestein, Ausfluss durch den Grundwasserleiter oder durch das Oberflächengewässer, Pumpraten etc.) quantifiziert werden. Für eine konservative Schätzung kann angenommen werden, dass während der

Trockenperiode keine Grundwasserneubildung stattfindet. Das gespeicherte Volumen im Grundwasserleiter wird sich um die Ausflüsse verringern. Die Zeit bis das Volumen unter eine kritische Grenze fällt, kann somit berechnet werden.

(j) Falls sich der Grundwasserleiter schnell entleert, ist die Grundwasserressource als sensitiv einzustufen. Falls der Grundwasserleiter andererseits lange zum Abfluss beitragen kann, bedeutet das jedoch nicht, dass lokal keine Probleme auftauchen können. Insbesondere in höher gelegenen Talabschnitten können die Wasserstände auf tiefe Niveaus fallen.

(k) Falls keine Wasserbilanz erstellt werden kann, kann eine geologische Analyse des vom alluvialen Grundwasserleiter drainierten Festgesteins einen gewissen Aufschluss über die Sensitivität geben. Eine hohe Ergiebigkeit des Festgesteins kann die Sensitivität des alluvialen Grundwasserleiters deutlich verringern. Voraussetzung ist dabei, dass das Wasser aus dem Festgestein den alluvialen Grundwasserleiter speist und nicht vollständig via ein Fliessgewässer abfließt. Die Evaluation der Ergiebigkeit des Festgesteins ist hauptsächlich durch seine hydraulischen Eigenschaften gegeben, welche wiederum lose mit dem Gesteinstyp assoziiert sind. Geologische Karten geben Aufschluss bezüglich des Gesteinstyps. Die Ergiebigkeit des Festgesteins ist auch von der Topographie des Einzugsgebiets beeinflusst: steilere Gefälle gewährleisten grössere Speichervolumen und fördern den Grundwasserfluss, indem sie den hydraulischen Gradienten bestimmen. Abbildung 22 kann als Basis für die Ergiebigkeit des Festgesteins benutzt werden.

(l) Ist kein ergiebiges Festgestein vorhanden, muss die Grundwasser- und Speicherdynamik des alluvialen Grundwasserleiters quantifiziert werden. Dessen Ergiebigkeit muss mit hydrogeologischen Methoden evaluiert werden. Dazu kann der Ansatz Modellierung (Schritt e bis g) oder Ansatz Wasserbilanz (Schritt i und j) verwendet werden.

Falls weder das Festgestein noch der alluviale Grundwasserleiter ergiebig sind, ist der alluviale Grundwasserleiter als sensitiv auf Trockenperioden einzustufen. Im Spezialfall können auch ergiebige Grundwasserleiter sensitiv reagieren, wenn diese eine grosse Neigung aufweisen und entsprechend rascher auslaufen.

6 Ausblick

6.1 Empfehlungen zur Erhebung von Daten (Monitoringvorschläge)

Die Empfehlungen zur Erhebung von Daten orientieren sich an den Erfordernissen für die vorgeschlagenen Methoden d.h. sie sind besonders relevant in Bezug auf Niedrigwassersituationen und Trockenheit. Die erhobenen Daten sind für die Bewirtschaftung von Einzugsgebieten interessant, zu dieser Bewirtschaftung sollen hier jedoch keine Empfehlungen gegeben werden.

6.1.1 Effizientere Nutzung vorhandener Daten

Empfehlung 1: Für bestehende Abflussmessstationen ist eine Bestandsaufnahme bezüglich Störfaktoren der Wasserbilanz des Einzugsgebietes nötig; besonders Metadaten, aber auch kontinuierliche Abschätzungen zu:

- Entnahme- und Rückgabemengen von Oberflächenwasser, z.B. Abwasser, Industrie
- Grundwasserentnahmemengen

Begründung: Derartige anthropogene Einflüsse können die beobachteten Oberflächenabflüsse und die Wasserbilanz eines Einzugsgebietes signifikant ändern; sie sind aber nicht über Niederschlags- und Verdunstungsdaten eindeutig identifizierbar.

Herausforderung: Abschätzungen der Dynamik der Wasserbilanz eines Einzugsgebiets sind unsicher, das liegt im Speziellen an:

- Abschätzungen des Gesamtspeichers
- Abschätzung der Speicherdynamik, inklusive des Austausches zwischen Grund- und Oberflächenwasser

Diese Unsicherheiten gelten für jegliche Wasserbilanzabschätzung, sind jedoch besonders bedeutsam wenn es um die Quantifizierung menschlicher Einflüsse geht.

Empfehlung 2: Für bestehende Abflussmessstationen sollte eine robuste Abschätzung des unterirdischen Abflusses aus dem Einzugsgebiet gemacht werden.

Begründung: Die Wasserbilanz eines Einzugsgebietes ist oft nicht geschlossen, speziell in kleinen Einzugsgebieten, wo Grundwasser unterhalb des Flusses das Einzugsgebiet verlassen kann. Bei Abflussmessstationen auf undurchlässigem Festgestein kann der Grundwasserfluss vernachlässigt werden, aber der Grundwasserabfluss kann bis zu 100% des Abflusses aus einem Einzugsgebiet ausmachen, wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind.

Herausforderung: Wenn eine Einzugsgebietswasserbilanz modelliert wird, ist es wichtig, sowohl den Grundwasserfluss unterhalb der Abflussmessstation als auch grössere anthropogene Änderungen der Wasserbilanz zu kennen. Grundwasserflussraten müssen idealerweise während des ganzen Jahres abgeschätzt werden. Das kann mithilfe des Darcy-Gesetzes geschehen, indem man den hydraulischen Gradienten neben der Abflussmessstation misst und die hydraulische Leitfähigkeit abschätzt. Hierbei können auch Tracermethoden hilfreich sein.

Empfehlung 3: Gemeinden/Kantone/etc. könnten Informationen zu Quellschüttungen zur Verfügung stellen (inklusive derjenigen, die von Trinkwasserversorgern benutzt werden).

Begründung: Diese Information ist wertvoll, um mehr über das Grundwasser zu lernen, insbesondere direkt über die Ergiebigkeit von geologischen Einheiten im Einzugsgebiet, und kann auch zu einer besseren Beschreibung der Speicher und ihrer Dynamik verhelfen. Quellmessungen haben auch den Vorteil, dass sie nicht durch anthropogene Beeinflussungen der Oberflächengewässer beeinträchtigt werden.

Herausforderung: Der Ansatz birgt ein ideales Frühwarn-Potenzial, weil die Quellen eine direkte Antwort auf ein meteorologisches Signal sein können. Der Ansatz muss aber noch weiter evaluiert werden

6.1.2 Abschätzung von für die Niedrigwasserdynamik relevanten Grundwasserleiteigenschaften

Empfehlung 1: Verbesserung unseres Wissens über die hydrogeologischen Eigenschaften verschiedener Molasselithologien: Untersuchung kleiner und geologisch homogener

Einzugsgebiete ohne alluviale Grundwasserleiter, mehr hydrogeologische Daten für die Molasse und andere Gebiete mit hydrogeologischem Datendefizit.

Begründung: Synthetische Modelle haben gezeigt, dass die Molasse ein wesentlicher Spender von Grundwasser während Niedrigwasserbedingungen ist. Daten zur hydraulischen Leitfähigkeit und Porosität der Molasse sind jedoch nur begrenzt vorhanden.

Herausforderung: Derzeit untersuchte Einzugsgebiete sind oft sehr heterogen in Bezug auf die Molasse oder sie beinhalten grosse Volumina an quartären Sedimenten, welche die Untersuchung der Variabilität zwischen Molasselithologien hinsichtlich deren hydrogeologischen Eigenschaften erschweren. Die verfügbaren Daten zu hydraulischer Leitfähigkeit und Porosität wie auch zur Tiefenwasserzirkulation in der Molasse sind sehr beschränkt. Mehr Tiefbohrungen in der Molasse mit Pumpversuchen wären vorteilhaft.

Empfehlung 2: Untersuchung der Mächtigkeit und der räumlichen Architektur der quartären Talfüllungen und Lockergesteinsablagerungen im alpinen Raum (z.B. Moränen, Hangschuttdecken) mittels Bohrungen und geophysikalischen Methoden.

Begründung: Wissen zur räumlichen sedimentologischen Architektur bildet die Basis für ein verbessertes Verstehen der Grundwasserdynamik in alluvialen Grundwasserleitern und den Speicherräumen im Hochgebirge. Mit diesem Wissen kann auch beurteilt werden, ob die Abflussmessstation den Gesamtabfluss aus dem Einzugsgebiet erfasst. Grundlegend ist auch die Erhebung, ob Flussabschnitte, die zeitweise trockenfallen, von wichtigen Porengrundwasserleitern unterlegt sind, also ob Oberflächenwasser infiltriert.

Herausforderung: Die Menge und Qualität vorhandener Informationen zu Mächtigkeit und räumlicher Architektur der quartären Talfüllungen variiert stark von Region zu Region und ist daher oft nicht ausreichend für eine umfassende hydrogeologische Bewertung.

Empfehlung 3: Abschätzung des Wasseraustausches zwischen Quartärablagerungen und dem Molasse-Festgestein mittels hydrochemischer Methoden (z.B. regional spezifische Spurenelemente).

Begründung: Während Niedrigwasserbedingungen kann das Molassefestgestein für die Grundwasserneubildung im Lockergesteins-Grundwasserleiter in den Quartärfüllungen sorgen.

Herausforderung: Prozesswissen über den Austausch der Molasse und quartären Talfüllungen ist allgemein unsicher.

6.1.3 Allgemeine Empfehlungen zur Verbesserung des Prozesswissens zu Grundwasser-Oberflächenwasser Austausch

Empfehlung 1: Einrichtung neuer Abfluss-Messstationen in kleineren Teileinzugsgebieten.

Begründung: Kleinere Einzugsgebiete sind oft homogener als grössere Einzugsgebiete bezüglich ihrer geologischen Eigenschaften. Diese zu bemessen erlaubt einen direkten

Link zwischen hydrogeologischem Verhalten und hydrogeologischen Eigenschaften oder Bodenbedeckung.

Herausforderung: Die Skala der bemessenen Einzugsgebiete ist oft zu gross und damit auch deren Heterogenität, um zwischen verschiedenen geologischen Konfigurationen und Bodenbedeckung zu unterscheiden. Dies erschwert z.B. die Niedrigwasserregionalisierung. Die spezifische Auswahl dieser Gebiete und der weiteren Gebiete um Teilprozesse zu erfassen müsste in einer separaten Machbarkeitsstudie evaluiert werden.

Empfehlung 2: Kopplung von Abflussmessnetzen und Piezometern

Begründung: Die Dynamik von Grundwasser-Oberflächen Austauschprozessen kann durch ein erweitertes Beobachtungsnetz besser erfasst werden.

- effluente und influente Bedingungen können identifiziert werden.
- die Reaktion des Grundwassers zu Änderungen im Fließgewässer kann eine wichtige Information für Modelle sein und erlaubt eine Abschätzung der Austauschflüsse.

Herausforderung: Studien zu Grundwasser-Oberflächen Austauschprozessen sind durch eine geringe Anzahl von Beobachtungen eingeschränkt.

Empfehlung 3: Beobachtungen der Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- und Grundwasser mit Piezometern entlang von Flüssen

Begründung: Die räumlichen und zeitlichen Muster des Abflussregimes kann sich im Laufe eines Jahres ändern.

Herausforderung: Da Fließgewässer in bestimmten Abschnitten trockenfallen können, haben räumliche Muster des Abflussregimes einen hohen ökologischen Stellenwert. Transekte entlang eines Fluss-Grundwasserleiter-Systems, welche erlauben die hydraulischen Gradienten abzuschätzen, dokumentieren Fließdynamiken. Diese Information kann sensitive Teile des Fließgewässers in grossen Einzugsgebieten identifizieren. Ausserdem kann diese räumliche Information benutzt werden, um Modellparameter einzugrenzen.

Empfehlung 4: Installation zusätzlicher Grundwassermessstellen in Grundwasserleitern ohne Wasserentnahmen, um klimabedingte Grundwasserstandsänderungen (Referenzbeobachtungen) beobachten zu können.

Begründung: Grundwassermessstellen sind meistens dort, wo viel Grundwasser entnommen wird und daher wird die in einer Grundwassermessstelle sichtbare Dynamik von der Grundwasserentnahme beeinflusst.

Herausforderung: Trendsignale verschwinden oft hinter grossem Rauschen und daher müssen Trends in unbeeinflussten Messstationen erkannt werden. Dann kann das Trendsignal auch bei anderen Messstationen isoliert werden und Beobachtungen (monitoring) werden effektiver. Wenn dagegen beeinflusste Beobachtungen verwendet werden, um Modelle zu entwickeln, kalibrieren oder zu validieren, kommt es zu verzerrten Interpretationen.

7 Literatur

- Aschwanden, H. (1992). Die Niedrigwasserabflussmenge Q347 - Bestimmung und Abschätzung in alpinen schweizerischen Einzugsgebieten. Eine Arbeitsanleitung. Hrsg. Bundesamt für Umwelt BAFU, Hydrologische Mitteilungen, LHG-18-D, 70 S..
- Aschwanden, H., & Kan, C. (1999). *Die Abflussmenge Q347 - eine Standortbestimmung* (Vol. 27). Bern.
- Brauer, C. C., Teuling, A. J., F. Torfs, P. J. J., & Uijlenhoet, R. (2014). The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): A lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater. *Geoscientific Model Development*, 7(5), 2313–2332. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2313-2014>
- Brunner, P., & Simmons, C. T. (2012). HydroGeoSphere: A Fully Integrated, Physically Based Hydrological Model. *Ground Water*, 50(2), 170–176. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00882.x>
- Büchi, U. P., Lemcke, K., & Wiener, G. (1965a). Geologische Ergebnisse der Erdölexploration auf das Mesozoikum im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens. *Bull. Schweiz. Ver. Petroleum-Geol. U. -Ing.*, 32, 7–38.
- Büchi, U. P., Wiener, G., & Hofmann, F. (1965b). Neue Erkenntnisse im Molassebecken auf Grund von Erdöltiefbohrungen in der Zentral- und Ostschweiz. *Eclogae Geol. Helv.*, 58, 87–108.
- BUWAL, BWG, Meteoschweiz. (2004). *Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer*, 1–176.
- Carlier, C., Wirth, S.B., Cochand, F., Hunkeler, D. and Brunner, P. (2018a) Geology controls streamflow dynamics. *J. Hydrol.* 566, 756-769.
- Carlier, C. , Wirth, S. B., Cochand, F. , Hunkeler, D. and Brunner, P. (2018b), Exploring geological and topographical controls on low flows with hydrogeological models. *Groundwater*. Accepted Author Manuscript. doi:10.1111/gwat.12845
- Gander, P. (2004). *Geologie und Hydrogeologie der Oberen Süsswassermolasse, Dokumentation des aktuellen Kenntnisstandes*. Arbeitsbericht NAB 04-04, Nagra, Wettingen.
- HADES (1992) Hydrologischer Atlas der Schweiz, Druckausgabe. Tafel 8.1: Geologische, hydrogeologische und bodenkundliche Grundlagenkarten und Typprofile.
- Lahusen, P. H., & Wyss, R. (1995). Erdöl- und Erdgasexploration in der Schweiz: Ein Rückblick. *Bull. Schweiz. Ver. Petroleum-Geol. U. -Ing.*, 141, 43–72.
- Lindström, G. (1997). A simple automatic calibration routine for the HBV model. *Nordic Hydrology*, 28(3), 153–168.
- Margreth, M., Naef, F., & Scherrer, S. (2013). Pilotstudie Zur Anwendung Von Abflussprozesskarten Im Niedrigwasserbereich. *Auftraggeber: Bundesamt Für Umwelt (BAFU) Abteilung Hydrologie*, 1–53.
- Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315–3325. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
- Sinreich, M., Kozel, R., Lützenkirchen, V., Matousek, F., Jeannin, P.-Y., Löw, S., & Stauffer, F. (2012). Grundwasserressourcen der Schweiz. Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas*, 9, 16–28.
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240.3, 147–186.
- Sommaruga, A. Eichenberger, U., & Marillier, F. (2012). Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. Edited by the Swiss Geophysical Commission. *Matér. Géol. Suisse, Géophys*, 44.
- Staudinger, M., Stoelzle, M., Seeger, S., Seibert, J., Weiler, M., & Stahl, K. (2017). Catchment water storage variation with elevation. *Hydrological Processes*, 31(11). <https://doi.org/10.1002/hyp.11158>
- Staudinger, M., M. Stoelzle, F. Cochand, C. Carlier, J. Seibert, M. Weiler and D. Hunkeler (in review). Your work is my boundary condition! - Challenges and approaches for a closer collaboration between hydrologists and 2 hydrogeologists, *Journal of Hydrology*, in review. Stoelzle, M., Stahl, K., & Weiler, M. (2013). Are streamflow recession characteristics really characteristic? *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 817–828. <https://doi.org/10.5194/hess-17-817-2013>
- Tallaksen, L. M. and H. A. J. van Lanen (2004). Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Elsevier, 579 S..
- Therrien, R., Sudicky, E. A., McLaren, R. G., & Panday, S. M. (2005). HydroGeoSphere. A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport, 5, 343.
- Trümpy, R. (1980). *Geology of Switzerland – a guide-book, Part A: An Outline of the Geology of Switzerland*. Basel

New York: Wepf & Co. Publishers.

WMO. (2008). *Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report* (Vol. No, 50).
<https://doi.org/WMO-No. 1029>.