



Charakterisierung von Niedrigwasserregimen

**Auswertung und Gegenüberstellung von
Abflussdatenreihen und Einzugsgebietseigenschaften**

Marius Floriancic

im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum:

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

Auftragnehmer: Marius Floriancic, Peter Molnar (ETH Zürich)

Unter Mitarbeit von: Wouter Berghuijs, James W. Kirchner, Daniel Spies, Linus Odermatt, Wendelin Wild;

Begleitung BAFU: Caroline Kan, Petra Schmocker-Fackel

Daten: Die im Rahmen der Studie erhobenen Daten sind frei verfügbar und können über die Bibliothek der ETH Zürich unter folgenden Links bezogen werden.

Niedrigwasserstatistik der 380 Schweizer Einzugsgebiete:

<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/377748>

Niedrigwasser-Feldkampagnen 2015 / 2016:

<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/377752>

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich. Der Synthesebericht beinhaltet Teile der Dissertation von Marius Floriancic und den folgenden wissenschaftlichen Publikationen:

Floriancic M.G. 2019 Characterizing low flows across Switzerland – From catchment-scale field investigations to large-scale data evaluation; Dissertation No: 26147, ETH Zürich.

<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/371948>

Floriancic M.G., Berghuijs W.R., Kirchner J.W., Molnar P. (in review) The effects of climate anomalies on low flows across Switzerland. Hydrology and Earth System Sciences.

<https://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/hess-2019-448/>

Floriancic M.G., Berghuijs W.R., Kirchner J.W., Molnar P. (in review) Seasonality and drivers of low flows across Europe and the United States. Water Resources Research.

Floriancic M.G., Spies D., van Meerveld H.J., Molnar P. (in review) Low flow characteristics across Switzerland Snapshot campaigns, data evaluation and regression calculations. Journal of Hydrology.

Zusammenfassung

Mangelndes Management von Niedrigwasserereignissen in Fließgewässern hat negative Auswirkungen auf die Umwelt, kann jedoch auch schwerwiegende wirtschaftliche Konsequenzen nach sich ziehen. Um besser auf solche Niedrigwasserereignisse vorbereitet zu sein, müssen wir die massgebenden Prozesse und Mechanismen verstehen, die das Auftreten von Niedrigwasserereignissen beeinflussen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der datenbasierten Untersuchung der wichtigsten Charakteristika von Niedrigwasserereignissen in der Schweiz.

Im ersten Teil wird analysiert wann Niedrigwasserereignisse (genau genommen das NM7q) auftreten und wie beständig der Auftretenszeitpunkt in den Jahren 2000 bis 2018 war. In einem weiteren Schritt werden der Zeitpunkt des Auftretens von Niedrigwasserereignissen den potentiellen klimatischen Einflussfaktoren (Perioden mit geringem Niederschlag, hoher Evapotranspiration und niedrigen Temperaturen) gegenübergestellt. Die meisten Niedrigwasserabflüsse traten im Spätsommer und Frühherbst auf, in Zeiten mit hoher Evapotranspiration; einige Niedrigwasserabflüsse traten während der Wintermonate auf, als Folge von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Der Zeitpunkt des Auftretens von Niedrigwasserabflüssen hängt stark von der mittleren Einzugsgebietshöhe ab. Weiters wurden die Wetterbedingungen in verschiedenen Zeiträumen (von einer Woche bis zu einem halben Jahr) vor jedem NM7q in den Schweizer Einzugsgebieten analysiert. Es sollte beurteilt werden, wie der Zeitpunkt, die Magnitude und die Dauer von Klimaanomalien (unterdurchschnittlicher Niederschlag und überdurchschnittliche potentielle Evapotranspiration) und deren Kombination, das Auftreten und die Größe von Niedrigwasserabflüssen beeinflussen. Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Niedrigwasserabflüsse auf unterdurchschnittliche Niederschläge zurückzuführen sind. Diese Ereignisse werden häufig durch überdurchschnittlich hohe Evapotranspiration über Zeitfenster von typischerweise 30 bis 60 Tagen verstärkt. Niedrigwasserabflüsse in den extremen Trockenjahren 2003, 2011, 2015 und 2018 waren das Ergebnis längerer Klimaanomalien von bis zu einem halben Jahr.

In Feldkampagnen während Trockenperioden in 2015 und 2016 wurden Landschaftselemente identifiziert, die massgeblich zu Niedrigwasserabflüssen beitragen. Diese Ergebnisse der Feldkampagnen wurden verwendet, um gezielt Inputdaten für Regressionsansätze aufzubereiten und dadurch Eingabeparameter zu reduzieren. Ausserdem wurden die geologischen Inputdaten (Lithologie und Quartärbedeckung) homogenisiert, um sie gezielt für eine schweizweite Analyse zu nutzen. Die Relevanz von Landschaftselementen für die Vorhersage von Niedrigwasserabflüssen im Schweizer Mittelland und in den Schweizer Alpen wurde systematisch bewertet, robuste Regressionsansätze für die Vorhersage entwickelt und die räumliche Variabilität von Residuen in der ganzen Schweiz bestimmt.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Methoden und Daten.....	3
2.1. Messungen aus Feldkampagnen	3
2.2. Verfügbare Abfluss- Klima und Geodatensätze.....	3
3. Resultate und Diskussion.....	5
3.1 Saisonalität von Niedrigwasserereignissen.....	5
3.1.1 Wann treten Niedrigwasserereignisse auf?.....	5
3.1.2 Prognose des Auftretens von Niedrigwasserereignissen.....	8
3.2 Klimatische Einflussfaktoren auf Niedrigwasserereignisse.....	9
3.2.1 Dominante Klimaeinflüsse.....	9
3.2.2 Prognose der dominanten Klimaeinflüsse auf Niedrigwasserereignisse.....	12
3.3 Klimaanomalien vor Niedrigwasserereignissen.....	14
3.3.1 Magnitude von Klimaanomalien.....	14
3.3.2 Gleichzeitiges Auftreten von Klimaanomalien.....	15
3.3.3 Dauer von Klimaanomalien.....	18
3.4 Einfluss von Einzugsgebietseigenschaften auf Niedrigwasserereignissen.....	20
3.5 Modellierung von Niedrigwasserkennwerten.....	24
3.5.1 Übersicht über Niedrigwasserkennwerte in schweizerischen Einzugsgebieten.....	24
3.5.2 Resultate der Regressionsanalysen.....	26
4. Vorschläge für weitere Untersuchungen.....	31
4.1 Schwerpunktkampagnen in Gebieten mit grösseren Unsicherheiten.....	31
4.2 Interaktion von Oberflächenabflüssen und Grundwasserspeichern.....	31
4.3 Gezielte Analysen der Mechanismen und Prozesse der Speicherentwässerung.....	32
4.4 Möglichkeiten gezielter Prognosen von Niedrigwasserabflüssen.....	34
5. Conclusio.....	37

1. Einleitung

Die akkurate Abschätzung von Niedrigwasserabflüssen ist wesentlich für das Gewässermanagement an schweizerischen Flüssen. Bis zu 60% der Schweizer Stromproduktion stammen aus Wasserkraft (BFE, 2018). Darüber hinaus wird Wasser in Haushalten, in der Industrie, in der Landwirtschaft zur Bewässerung und zur Herstellung von Kunstschnee verwendet (Blanc & Schädler, 2013). Niedrige Abflüsse können auch die Flussschifffahrt beeinträchtigen. In den letzten zwanzig Jahren war die Schweiz (und ganz Europa) mehreren außergewöhnlichen Trockenperioden ausgesetzt, 2003, 2011, 2015 und 2018. Die Trockenperiode im Jahr 2003 verursachte in ganz Europa wirtschaftliche Verluste von mindestens 12 Mrd. EUR, vergleichbar mit den Kosten der schwersten Überschwemmungen in Europa (EurAqua, 2004; Munich Re, 2004). Diese Niedrigwassersituationen in Schweizerischen Gewässern und die mit dem Klimawandel einhergehende zu erwartende Verschärfung hat grosse wirtschaftliche und ökologische Konsequenzen. Häufigere und schwerere Niedrigwasserereignisse sind nicht nur eine Bedrohung für die Schweizer Umwelt und Wirtschaft, sondern auch für größere flussabwärts gelegene Gebiete in Europa (Viviroli et al., 2007). Die sommerliche Trockenheit am Rhein in Deutschland und den Niederlanden, ist zum Beispiel in hohem Maße das Ergebnis von Niedrigwasserereignissen in den alpinen Quelleinzugsgebieten der Schweiz (z.B. Stahl et al., 2016). Trockenperioden können auch schwerwiegende Folgen für das Ökosystem haben (z.B. Poff et al., 1997; Bradford & Heinonen, 2008; van Vliet et al., 2012). Bei tiefen Wasserständen erhöhen sich die Wassertemperaturen viel rascher, diese steigenden Wassertemperaturen und ausgetrocknete gefährden aquatische Organismen, längere Niedrigwasserperioden verringern die Qualität und Quantität des aquatischen Lebensraums (z.B. Lake, 2003; Rolls et al., 2012).

Im Rahmen dieses Projekts wurde die Rolle von klimatischen Einflüsse und den physikalischen Einzugsgebietseigenschaften auf das Auftreten und die Magnitude von Niedrigwasserereignissen untersucht. Der Zeitpunkt des Auftretens von Niedrigwasserereignissen ist sehr stark durch spezifische Klimaeinflüsse (wenig Niederschlag, hohe Evapotranspiration) beeinflusst, die

Synthesebericht – Charakterisierung von Niedrigwasserregimen

Magnitude dieser Niedrigwasserereignisse wird massgeblich von den Speicher- und Drainageverhältnissen von Einzugsgebieten kontrolliert. Im Rahmen der Arbeit wurden Abfluss- und Klimadaten (Niederschlag und Temperatur) für 380 Einzugsgebiete in der gesamten Schweiz für den Zeitraum 2000 bis 2018 ausgewertet. Im ersten Teil zeigen wir, wann Niedrigwasserereignisse (hier für das jährliche NM7q) auftreten, und welche regionalen Unterschiede es in der Schweiz gibt. Des Weiteren analysieren wir welche klimatischen Einflussfaktoren das Auftreten von Niedrigwasserereignissen (vom jährlichen NM7q) steuern, also wie sich Zeitpunkt, Grösse und Dauer von Niederschlag und Evapotranspiration auf die Magnitude des NM7q auswirken. Ausserdem wurde ausgewertet, wie die Wetterbedingungen in verschiedenen Zeiträumen vor dem NM7q, von einer Woche bis zu einem halben Jahr, die Magnitude von Niedrigwasserereignissen beeinflussen. Abschliessend verwenden wir Erkenntnisse aus Feldkampagnen um bestimmte Landschaftselemente zu identifizieren die massgebend zu Niedrigwasserabflüssen beitragen. Wir vergleichen Abflussdaten und Geodaten zu Landschaftscharakteristika mit besonderem Augenmerk auf die Geologie und Geomorphologie. Diese Informationen werden verwendet um Regressionsansätze (maschinelles Lernen mit Random Forest und Lasso) zu optimieren und so eine bessere Abschätzung von wesentlichen Niedrigwasserkennwerten (NM7q, q_{95} und den Rezessionskoeffizienten C) zu erreichen. Die Kombination von Feldkampagnen, Datenauswertung und Regressionsanalysen erlaubt eine robuste Aufstellung der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Magnitude von Niedrigwasserereignissen in schweizerischen Einzugsgebieten.

2. Methoden und Daten

2.1 Messungen aus Feldkampagnen

Im Rahmen dieser Arbeit, wurden Daten aus Feldkampagnen in 16 schweizerischen Einzugsgebieten ausgewertet, durchgeführt im Sommer 2015 im Mittelland und im Winter 2016 in den Einzugsgebieten der Schweizer Alpen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Feldkampagnen in den Sommern 2015 und 2016 sowie im Winter 2016 in der ganzen Schweiz: Name des Baches, Datum der Feldkampagne, Einzugsgebiet, Anzahl der Messungen (in Klammern die Anzahl der Volumenmessungen).

Name	Datum	Einzugsgebiets- grösse	Anzahl an Messungen
	TT/MM/JJ	km ²	#
Schweizerisches Mittelland			
<i>Gruene</i>	02/09/15	80.7	39 (16)
<i>Jona</i>	13/08/15	24.8	6
<i>Langete</i>	20/08/15	95.0	23
<i>Muehlibach</i>	17/07/15	31.6	13
<i>Naefbach</i>	07/07/15	36.4	9
<i>Oenz</i>	11/09/15	85.5	8
<i>Rot</i>	12/09/15	56.4	8 (2)
<i>Toess</i>	31/08/15	11.3	8 (3)
<i>Uerke</i>	14/07/15	25.0	19 (4)
Alpine Einzugsgebiete			
<i>Berninabach</i>	12/03/16	109.1	5
<i>Dischmabach</i>	07/02/16	43.3	10
<i>Goneri</i>	30/01/16	39.9	7
<i>Krummbach</i>	20/02/16	19.5	9
<i>Ova dal Fuorn</i>	10/03/16	55.2	13
<i>Poschiavino</i>	11/03/16	14.4	11
<i>Rosegbach</i>	12/03/16	65.5	2
TOTAL	16 Feldkampagnen		221

2.2 Verfügbare Abfluss- Klima und Geodatensätze

Die Abflussdaten wurden für den Zeitraum 2000 bis 2018 von 121 Messstationen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und von 259 Messstationen der Behörden der Kantone Aargau, Basel Landschaft, Bern, Genf, Graubünden, Luzern, Neuchâtel, Schaffhausen, Solothurn,

Synthesebericht – Charakterisierung von Niedrigwasserregimen

St.Gallen, Thurgau, Tessin, Waadt und Zürich gesammelt. Klimadaten wurden aus dem Rasterdatensatz der MeteoSwiss extrahiert. Ausserdem wurden tägliche Niederschlagssummen (RhiresD) und Tageshöchst-, Minimum- und Durchschnittstemperaturen (TmaxD, TminD und TabsD) verwendet. Für jedes Einzugsgebiet wurden die folgenden Einzugsgebietsparameter bestimmt (siehe Tabelle 2):

Tabelle 2: Übersicht der gesammelten Geodatenätzen und abgeleitete Klassen (Daten: Swisstopo)

Klasse	Beschreibung	Bezeichnung	Datensatz
Topographie	Einzugsgebietsgrösse minimale EZG Höhe maximale EZG Höhe mittlere EZG Höhe mittlere Hangneigung Exposition Hangneigung (<10°, 10-20°, 20-30°, 30-40°, 40-50°, 50-60°, 60-70°, 70-80°, 80-90°)	size H _{min} H _{max} H _{mean} slope _{mean} aspect _{xx} slope _{xx}	SwissAlti3D 2016 (2m)
Indices	EZG-Rauigkeit Topographic Wetness Index Dichte des Gewässernetzes	roughness TWI drainage density	Vector25 (1:25.000)
Bodenparameter	Speicherkapazität Permeabilität Gründigkeit	storage _{mean} permeability _{mean} soil depth _{mean}	soil suitability map (1:200.000)
Landnutzung	Festgestein Lockermaterial Gewässer Wald	bedrock debris waters forests	SwissTLM3D
Mächtigkeit Lockermaterial	in 7 classes (0m, 0.1-1m, 1-2m, 2-5m, 5-10m, 10-30m, >30m)	depth ₀ depth _{0.1-10m} depth _{>10m}	Mächtigkeits-modell Lockergestein
Geologie	Obere Süsswassermolasse Obere Meeresmolasse Untere Süsswassermolasse Kristalline Lithologien Sedimentgesteine	OSM OMM USM crystalline sedimentary	GeoCover (1:25.000) & GeoMol (for molasse)
Quartäre Ablagerungen	Gesamte Quartäre Ablagerungen Alluviale Ablagerungen Glaziale Ablagerungen Sonstiges Lockermaterial Rutschungen und Sackungen	total alluvial glacial debris landslide	GeoCover (1:25.000)

3. Resultate und Diskussion

3.1 Saisonalität von Niedrigwasserereignissen

3.1.1 Wann treten Niedrigwasserereignisse auf?

Das Auftreten des NM7q in 380 schweizerischen Einzugsgebieten wurde untersucht. In den meisten Einzugsgebieten des schweizerischen Mittellandes treten Niedrigwasserereignisse typischerweise im August und September auf, im Übergangsbereich der Voralpen gibt es einige Einzugsgebiete wo Niedrigwasserereignisse normalerweise im Oktober oder November auftreten. Im Gegensatz dazu haben die Einzugsgebiete in den alpinen Einzugsgebieten der Schweiz das NM7q typischerweise zwischen Januar und März (Abbildungen 1 und 2). Der Unterschied ist besonders deutlich beim Vergleich von Einzugsgebieten mit mittlere Höhe unter 1200m ü.M. und darüber.

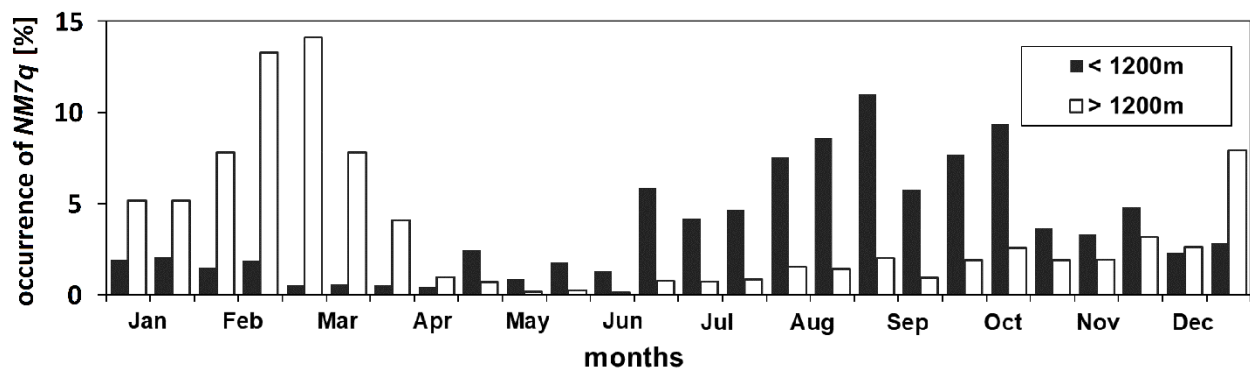


Abbildung 1: Das Auftreten von NM7q in den 380 Einzugsgebieten für Zeitfenster von zwei Wochen als Prozent aller NM7q, gruppiert nach Höhenlagen. In Einzugsgebieten oberhalb einer mittleren Höhe von 1200 m ü.M. tritt das NM7q typischerweise in den Wintermonaten auf (weiße Balken), während unterhalb von 1200 m ü.M das NM7q typischerweise im Spätsommer und Frühherbst auftritt (schwarze Balken).

Der Zeitpunkt des Auftretens vom NM7q im Zeitraum 2000 bis 2018 variiert regional (Abbildung 2). In den meisten Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes variiert der Zeitpunkt der jährlichen Niedrigwasserabflüsse zwischen den Jahren unter 80 Tagen, in einigen Einzugsgebieten ist das Auftreten jedoch weniger bzw. mehr einheitlich. Generell ist das

Auftreten von Niedrigwasser in den alpinen Einzugsgebieten der Schweiz in den einzelnen Jahren des Untersuchungszeitraums weniger variabel als im Mittelland.

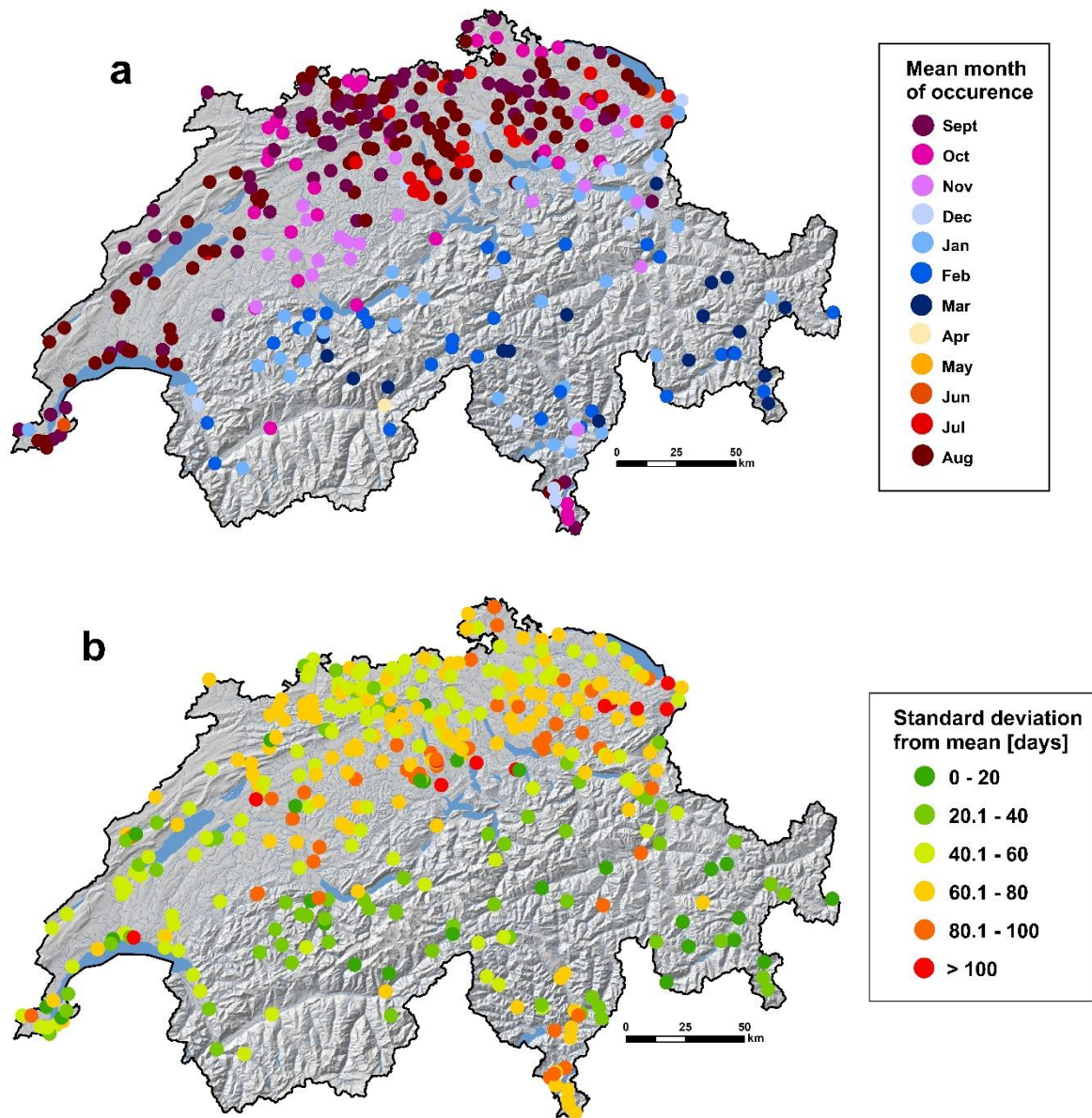


Abbildung 2: Durchschnittlicher Zeitpunkt des Auftretens des NM7q (a) und die Abweichung vom mittleren Auftreten im Zeitraum 2000 bis 2018 (b).

Bei Betrachtung des Auftretens von Niedrigwasserereignissen (NM7q) für jedes Jahr für die gesamte Schweiz (Abbildung 3) fällt auf, dass es in einzelnen Jahren grosse Unterschiede in der räumlichen Variabilität gibt. Generell finden sich Unterschiede zwischen Mittelland und alpinen

Einzugsgebieten. Doch auch innerhalb dieser beiden Teilregionen tritt das NM7q in manchen Jahren zu sehr unterschiedlichen Zeiten auf. z.B. in einigen Jahren ergaben sich über das gesamte Mittelland räumlich konsistente Muster (z. B. 2009, 2013, 2016), während das NM7q in anderen Jahren räumlich heterogener auftrat (z. B. 2000, 2002, 2004, 2010, 2017).

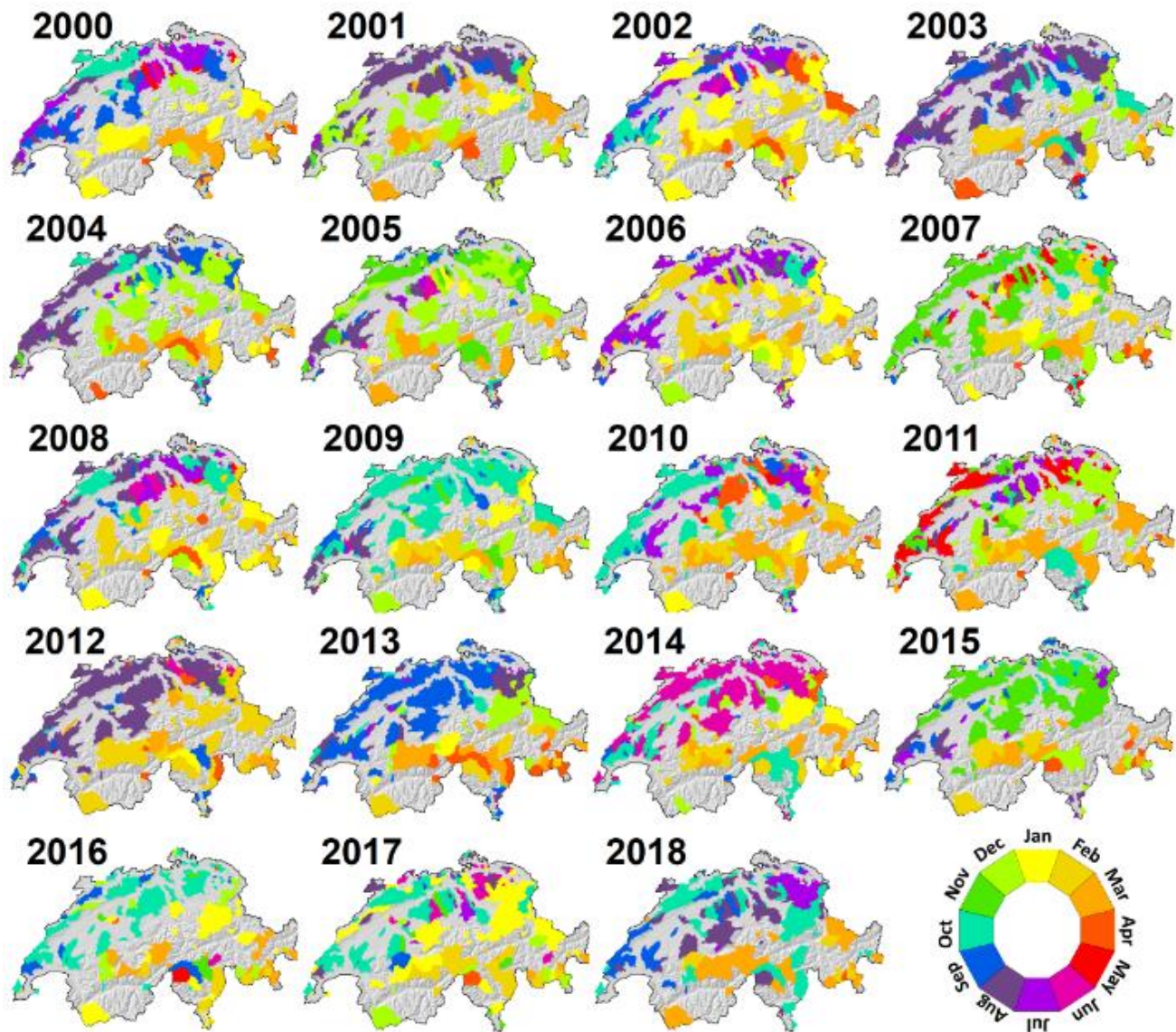
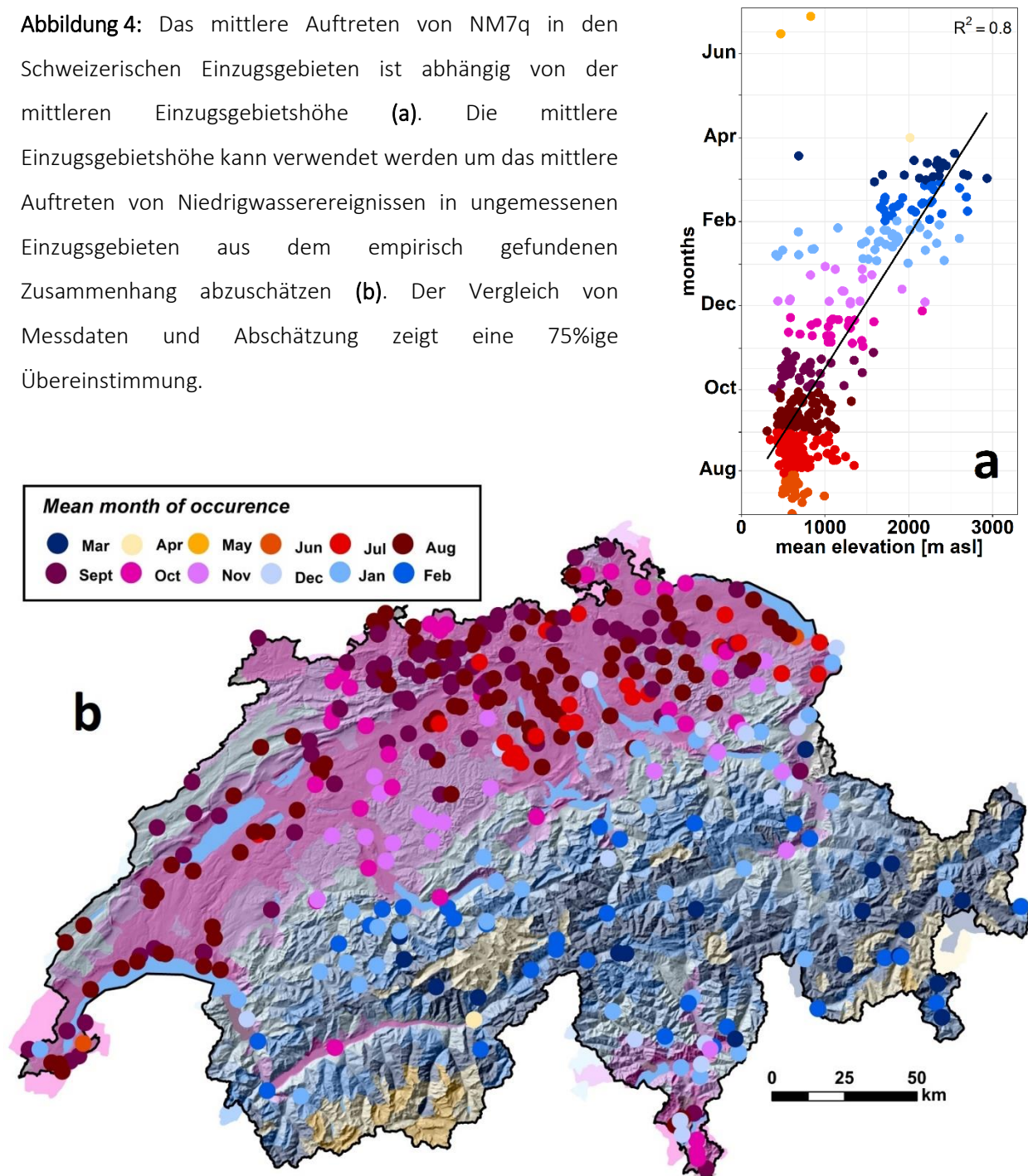


Abbildung 3: Zeitpunkt des Auftretens des NM7q in den ausgewählten Einzugsgebieten im Zeitraum 2000 bis 2018. In manchen Jahren traten die Niedrigwasserereignisse über weite Teile der Schweiz gleichzeitig auf, in manchen Jahren fanden wir grosse Unterschiede im Zeitpunkt des NM7q.

3.1.2 Prognose des Auftretens von Niedrigwasserereignissen

Mithilfe einer empirischen Beziehung von mittlerer Einzugsgebietshöhe und Auftreten des NM7q für die gemessenen Einzugsgebiete (Abbildung 4a) kann der wahrscheinlichste Zeitpunkt des Auftretens von Niedrigwasser flächendeckend abgeschätzt werden.

Abbildung 4: Das mittlere Auftreten von NM7q in den Schweizerischen Einzugsgebieten ist abhängig von der mittleren Einzugsgebietshöhe **(a)**. Die mittlere Einzugsgebietshöhe kann verwendet werden um das mittlere Auftreten von Niedrigwasserereignissen in ungemessenen Einzugsgebieten aus dem empirisch gefundenen Zusammenhang abzuschätzen **(b)**. Der Vergleich von Messdaten und Abschätzung zeigt eine 75%ige Übereinstimmung.



3.2 Klimatische Einflussfaktoren auf Niedrigwasserereignisse

3.2.1 Dominate Klimaeinflüsse

Um herauszufinden, welche klimatischen Bedingungen die Hauptursachen für das Auftreten des NM7q sind, haben wir den Zeitpunkt von Niedrigwasserereignissen mit dem Zeitpunkt des Auftretens potenzieller klimatischer Faktoren verglichen. Die Saisonalität der dominanten klimatischen Mechanismen (geringer Niederschlag, hohe Evapotranspiration und geringe Temperaturen) variiert regional (Abbildung 5), jedoch weitaus weniger als die Saisonalität des NM7q (Abbildung 2). In fast allen Einzugsgebieten fällt der geringste Jahresniederschlag zwischen Dezember und März (Abbildung 5a). In den alpinen Einzugsgebieten ist dieser Zeitpunkt zwischen den Jahren konsistenter als in der übrigen Schweiz, speziell jedoch in der Nordschweiz und im Jura.

Die 30 Tage mit dem grössten Überschuss von potenzieller Evapotranspiration minus Niederschlag ($EPET_{high}$) ist regional unterschiedlich (Abbildung 5b). In den Alpen tritt $EPET_{high}$ in der Regel im Juli auf, im Schweizer Mittelland im August und September. Diese Unterschiede zwischen den Regionen ergeben sich hauptsächlich aus regionalen Niederschlagsschwankungen, das Maximum der potenziellen Evapotranspiration tritt in der ganzen Schweiz im Juli auf. Die Konsistenz ist in allen Einzugsgebieten hoch, im Jura (Nordwesten) und in den voralpinen Einzugsgebieten in mittlerer Höhe am geringsten (Abbildung 5e).

Die niedrigsten Jahrestemperaturen treten mit wenigen Ausnahmen in der ganzen Schweiz im Februar auf (Abbildung 5c). Es gibt keine starken regionalen Unterschiede, die zeitliche Konsistenz von Jahr zu Jahr ist hoch (Abbildung 5f).

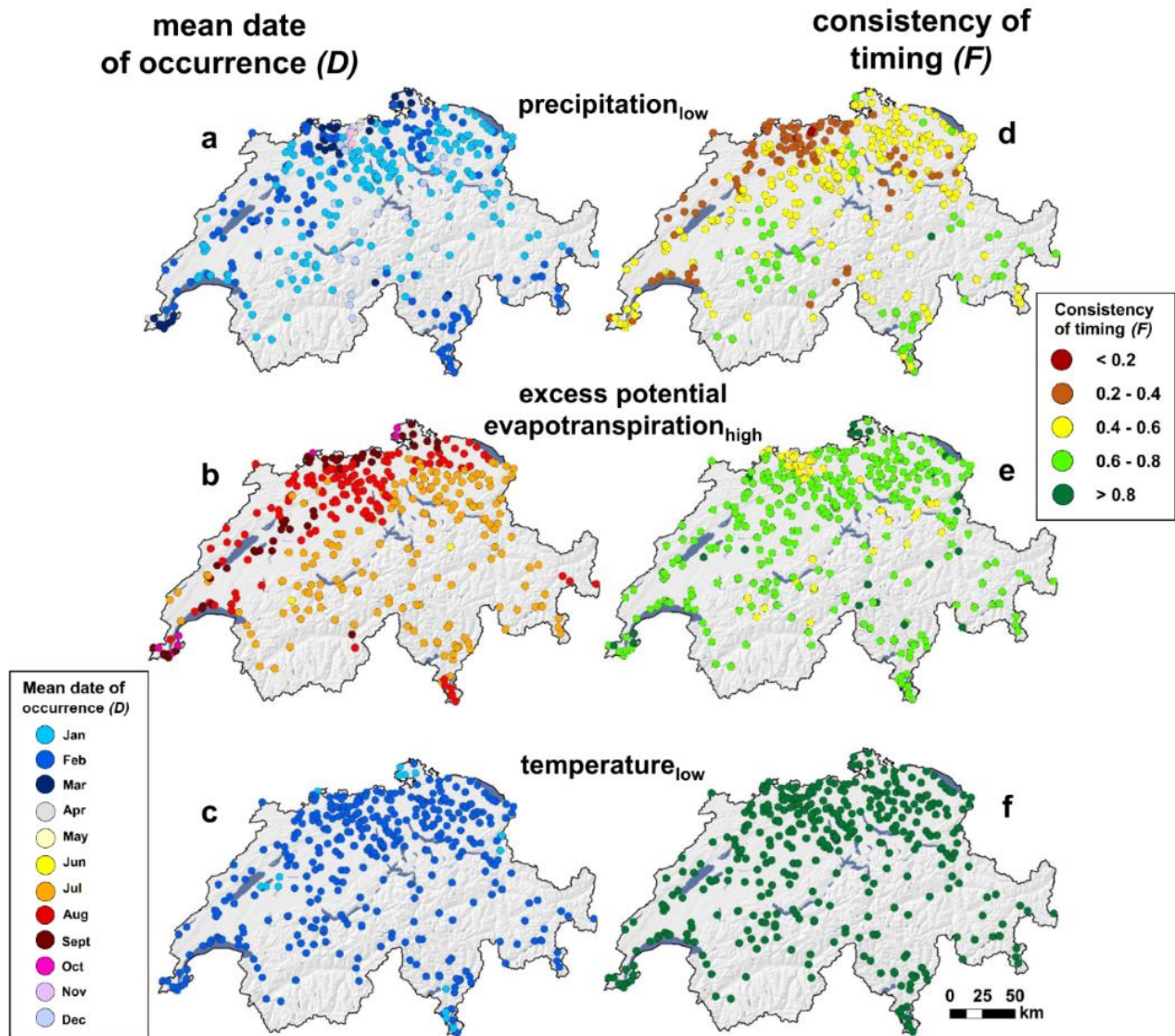
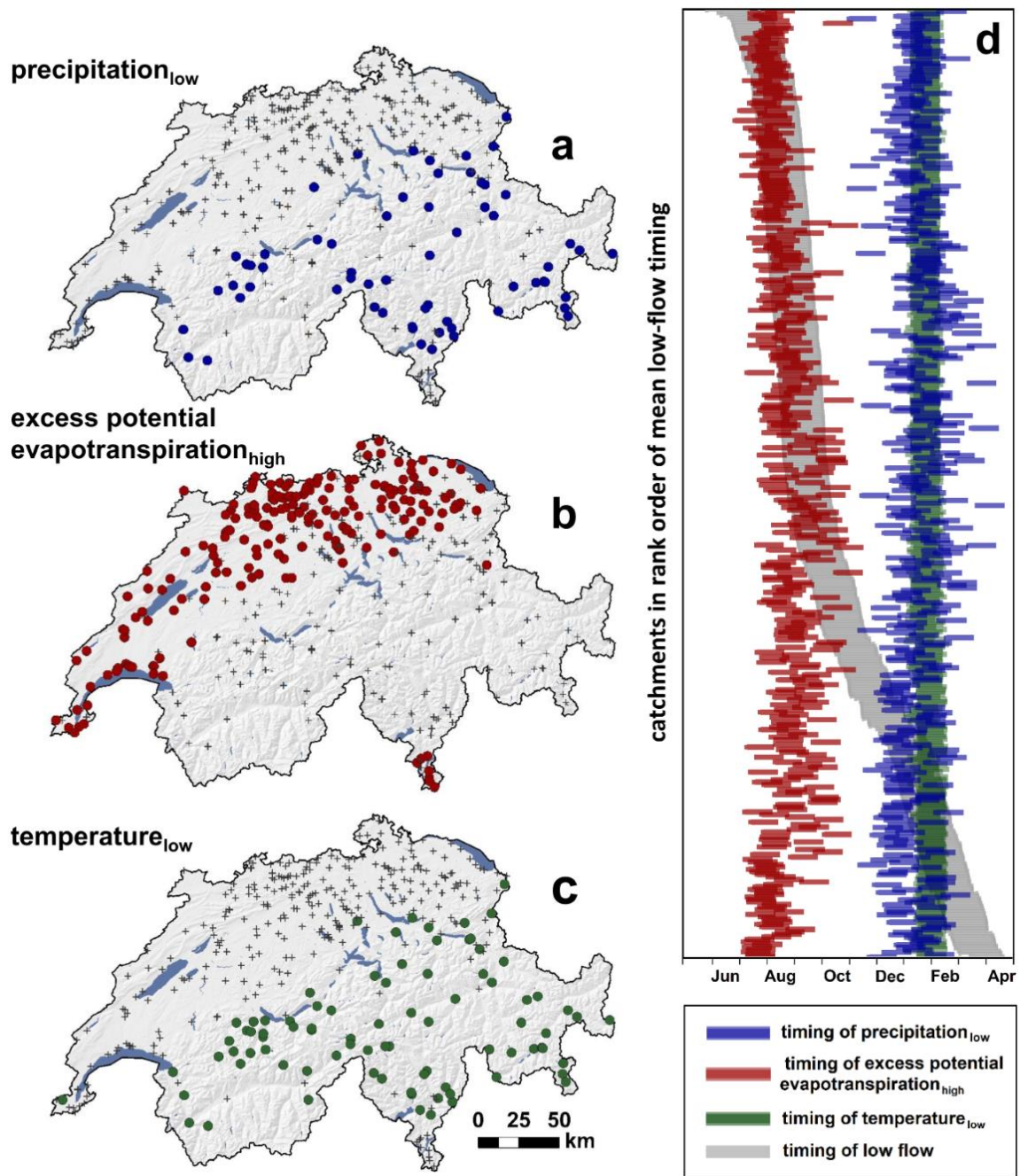


Abbildung 5: Die Saisonalität der potenziellen klimatischen Einflussfaktoren auf Niedrigwasserabflüsse variiert regional, sie variiert jedoch weniger als die Saisonalität der Niedrigwasserabflüsse. In der linken Spalte ist der mittlere Zeitpunkt des Auftretens der 30 Tage des minimalen Niederschlags (a), des maximalen potenziellen Verdunstungsüberschusses (b) und der tiefsten Temperatur (c) für die 380 Einzugsgebiete für die Jahre 2000 - 2016 angegeben. In der rechten Spalte ist die Abweichung vom mittleren Auftreten im Zeitraum 2000 bis 2016 angegeben (d, e, f).

Um die dominanten klimatischen Einflussfaktoren zu definieren, suchen wir nach einem zeitlichen Zusammenhang zwischen dem NM7q (Abbildung 2) und den klimatischen Einflüssen (Abbildung 5). In einigen Regionen stimmen der Zeitpunkt des Auftretens von Niedrigwasser und einem potentiellen klimatischen Einflussfaktor überein (Abbildung 6). Beispielsweise fallen in vielen alpinen Einzugsgebieten geringe Niederschläge und niedrige Temperaturen mit dem NM7q zusammen (Abbildung 6a und 6c). Der Zeitpunkt von $EPET_{high}$ stimmt mit dem Zeitpunkt des NM7q in vielen Einzugsgebieten des schweizerischen Mittellandes überein (Abbildung 6b). In über neunzig Prozent der schweizerischen Einzugsgebiete fallen der mittlere Zeitpunkt des NM7q und eines potentiellen klimatischen Einflussfaktors in einen Zeitraum von 45 Tagen, was darauf hindeutet, dass dieser klimatische Einflussfaktor eine wichtige Rolle für das Auftreten des NM7q spielt.

Abbildung 6: Ableitung der dominanten klimatischen Einflussfaktoren auf Niedrigwasserabflüsse anhand der zeitlichen Übereinstimmung des Auftretens von Niedrigwasserereignis und potentiell klimatischem Einflussfaktor. Farbige Symbole für geringen Niederschlag **(a)**, hohe Evapotranspiration **(b)** und niedrige Temperaturen **(c)** weisen darauf hin, dass der mittlere Zeitpunkt des Auftretens von NM7q und klimatischem Einflussfaktor innerhalb eines Zeitfensters von 45 Tagen liegen (in 346 von 380 Einzugsgebieten). In Einzugsgebieten, die mit einem schwarzen Kreuz markiert sind, überschneidet sich der Zeitpunkt von NM7q mit keinem der klimatischen Einflussfaktoren. Grundsätzlich ist das Auftreten der NM7q variabler als das Auftreten der potentiellen klimatischen Einflussfaktoren **(d)**. Die Breite der blauen, grünen und schwarzen Balken entspricht dem Mittelungszeitraum von 30 Tagen, und die Breite der grauen Balken entspricht dem Zeitraum von 45 Tagen, der zur Ermitteln der zeitlichen Überschneidung verwendet wird.

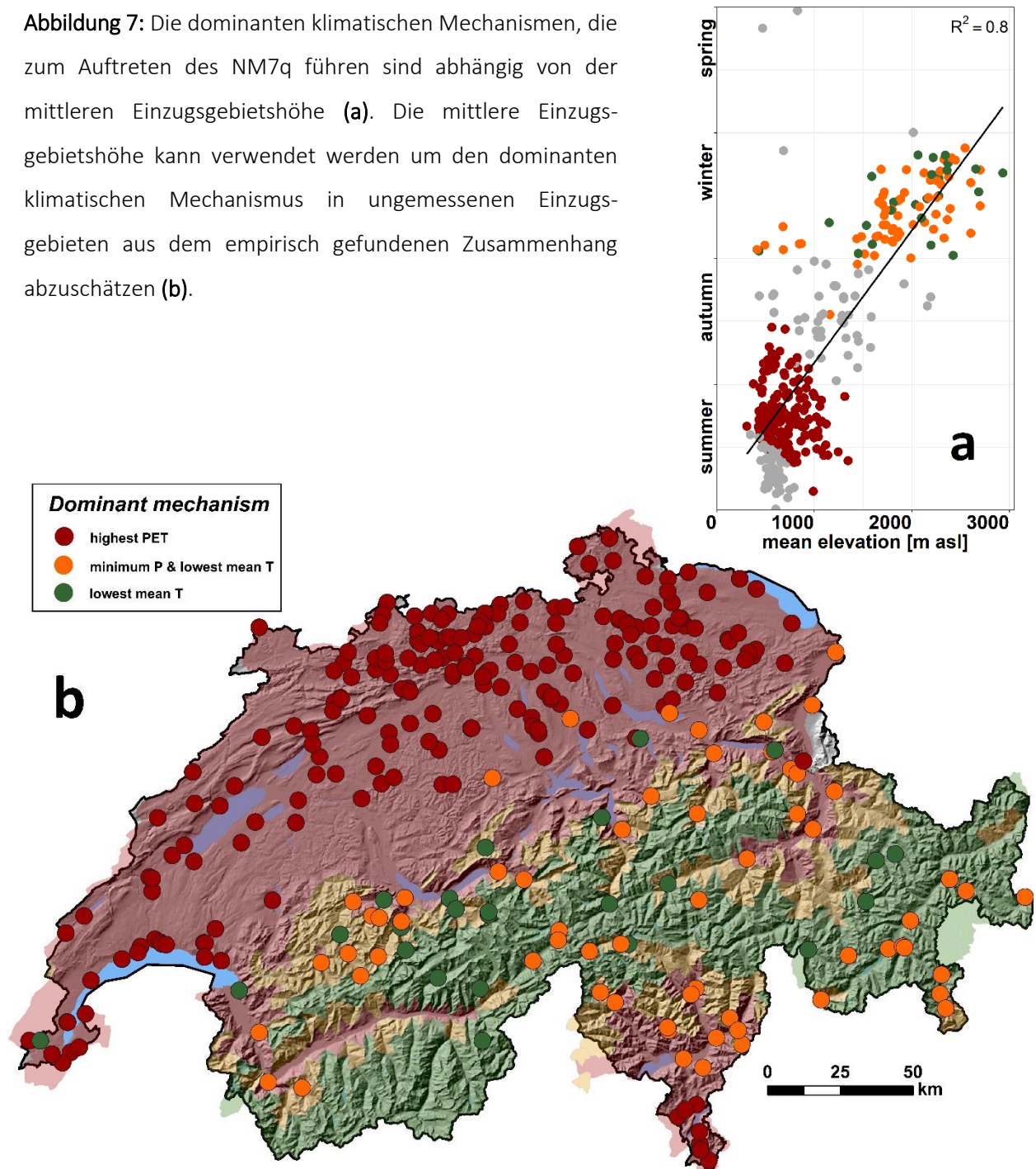


3.2.2 Prognose der dominanten Klimaeinflüsse auf Niedrigwasserereignisse

Wie das Auftreten des NM7q lässt sich auch der dominante klimatische Mechanismus mit einer empirischen Formel anhand der mittleren Einzugsgebietshöhe bestimmen. Dazu werden

Grenzen fixiert ab welchen der dominante Klimamechanismus sich ändert. Für den Vergleich von Abschätzung und tatsächlich ermitteltem Mechanismus ergibt sich so eine Übereinstimmung von 80%.

Abbildung 7: Die dominanten klimatischen Mechanismen, die zum Auftreten des NM7q führen sind abhängig von der mittleren Einzugsgebietshöhe **(a)**. Die mittlere Einzugsgebietshöhe kann verwendet werden um den dominanten klimatischen Mechanismus in ungemessenen Einzugsgebieten aus dem empirisch gefundenen Zusammenhang abzuschätzen **(b)**.



3.3 Klimaanomalien vor Niedrigwasserereignissen

3.3.1 Magnitude von Klimaanomalien

In einem weiteren Schritt haben wir die Klimaeinflüsse im Zeitraum direkt vor jedem Niedrigwasserevent untersucht, sogenannte „Klimaanomalien“ vor Niedrigwasserereignissen: Die meisten jährlichen NM7q s treten nach 30 Tagen von unterdurchschnittlichem Niederschlag (P) und überdurchschnittlicher potentieller Evapotranspiration auf (PET – Abbildung 8). In höheren Lagen (oberhalb 1200m ü.M., der horizontalen Linie in Abbildung 8) nimmt der Effekt von Anomalien jedoch ab. Niedrigwasserereignisse treten in diesen Einzugsgebieten aufgrund von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auf, die das Auffüllen der Speicher durch das Ausbleiben von flüssigem Niederschlag oder Schneeschmelze verhindern.

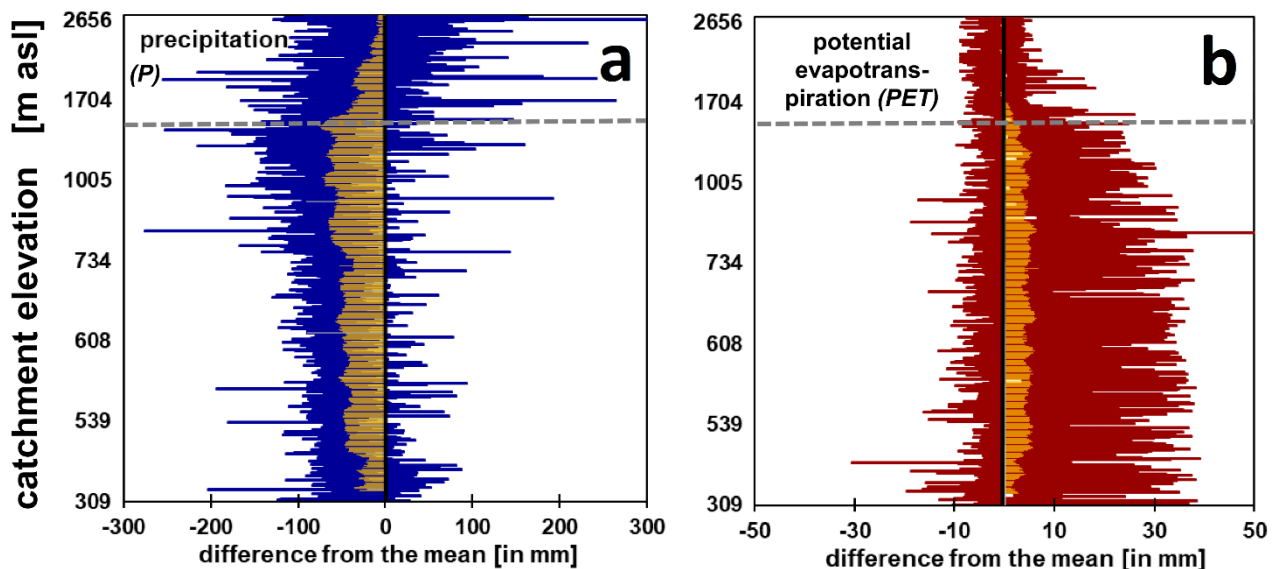


Abbildung 8: Der Einfluss der mittleren Einzugsgebietshöhe auf Niederschlagsanomalien (a) und Anomalien der potenziellen Evapotranspiration (b) im Zeitraum von 30 Tagen vor dem jährlichen NM7q. Blaue und rote horizontale Balken zeigen den Bereich zwischen den Minima und Maxima der Anomalien in jedem Einzugsgebiet in den 19 Jahren der Studie. Gelbe Balken zeigen den gleitenden Durchschnittswert über 10 Einzugsgebiete, geordnet nach Höhenlage. Die Höhenskala ist nicht linear.

Ab hier berichten wir vor allem über die Auswirkungen von Klimamechanismen auf Niedrigwasserereignisse die im Sommer und Herbst auftreten (zwischen Juli und November). In

Abbildung 9 vergleichen wir die Magnitude der Klimaanomalie und die Magnitude des NM7q. Mehr Niederschlag im Zeitraum 30 Tage vor dem Niedrigwasserereignis, führt zu höherem NM7q (positive Spearman Korrelation), eine höhere potentielle Evapotranspiration zu einer geringeren NM7q (negative Spearman Korrelation).

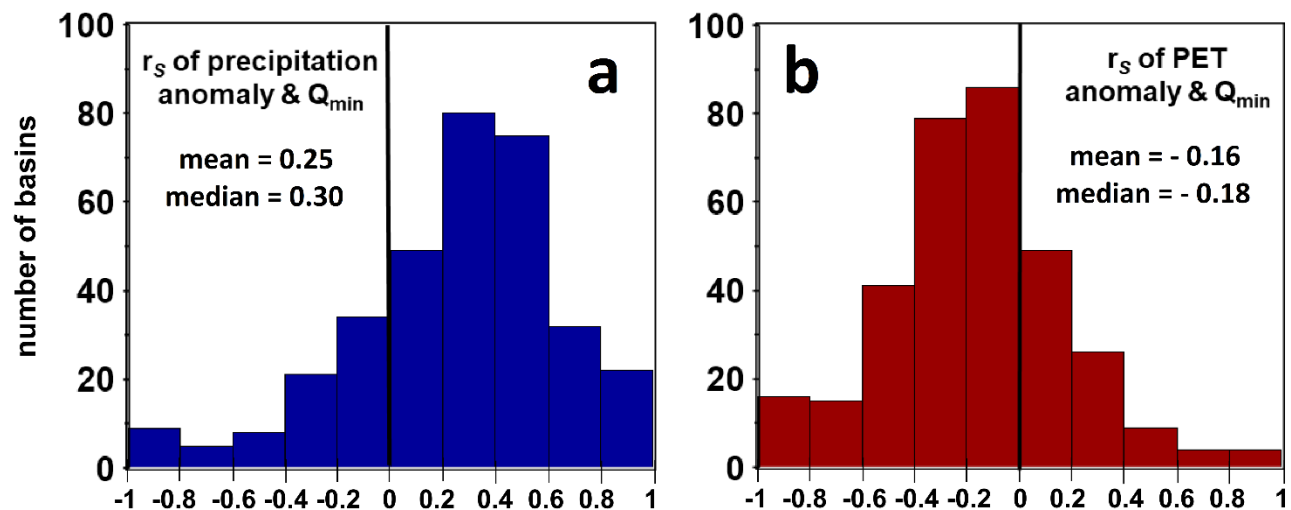


Abbildung 9: Histogramme der Spearman Korrelationen zwischen Klimaanomalien und NM7q für Spätsommer und Herbst (Juli bis November). Das NM7q in schweizerischen Einzugsgebieten ist tendenziell positiv mit Niederschlagsanomalien **(a)** und negativ mit PET-Anomalien **(b)** korreliert, jedoch mit beträchtlicher Variabilität in den untersuchten Einzugsgebieten.

3.3.2 Gleichzeitiges Auftreten von Klimaanomalien

Niedrigwasserereignisse, die von Juli bis November auftreten, sind häufig das Ergebnis einer Kombination aus unterdurchschnittlichem Niederschlag und überdurchschnittlicher potentieller Evapotranspiration (Abbildung 10). 70,1% aller NM7q zwischen 2000 und 2018 traten nach 30 Tagen von unterdurchschnittlichem Niederschlag und überdurchschnittlicher potentieller Evapotranspiration auf (oberer linker Bereich – Abbildung 10). 22,3% der NM7q traten nach unterdurchschnittlichem Niederschlag und unterdurchschnittlicher Evapotranspiration auf (Bereich links unten – Abbildung 10).

In extremen Jahren, zum Beispiel im Jahr 2003, ist dieser Effekt noch deutlicher (grüne Markierung in Abbildung 10). Dies ist nicht nur auf das Ereignis 2003 beschränkt, sondern ist auch

in anderen Jahren mit extrem niedrigen NM7q (Abbildung 11a) wie 2011, 2015 und 2018 (Abbildung 11b) in den meisten Einzugsgebieten ähnlich. Dies steht im Einklang mit früheren Studien, in denen berichtet wurde, dass Evapotranspiration ein Schlüsselfaktor für das Zustandekommen von Extremereignissen ist (z. B. Seneviratne et al., 2012; Teuling et al., 2013).

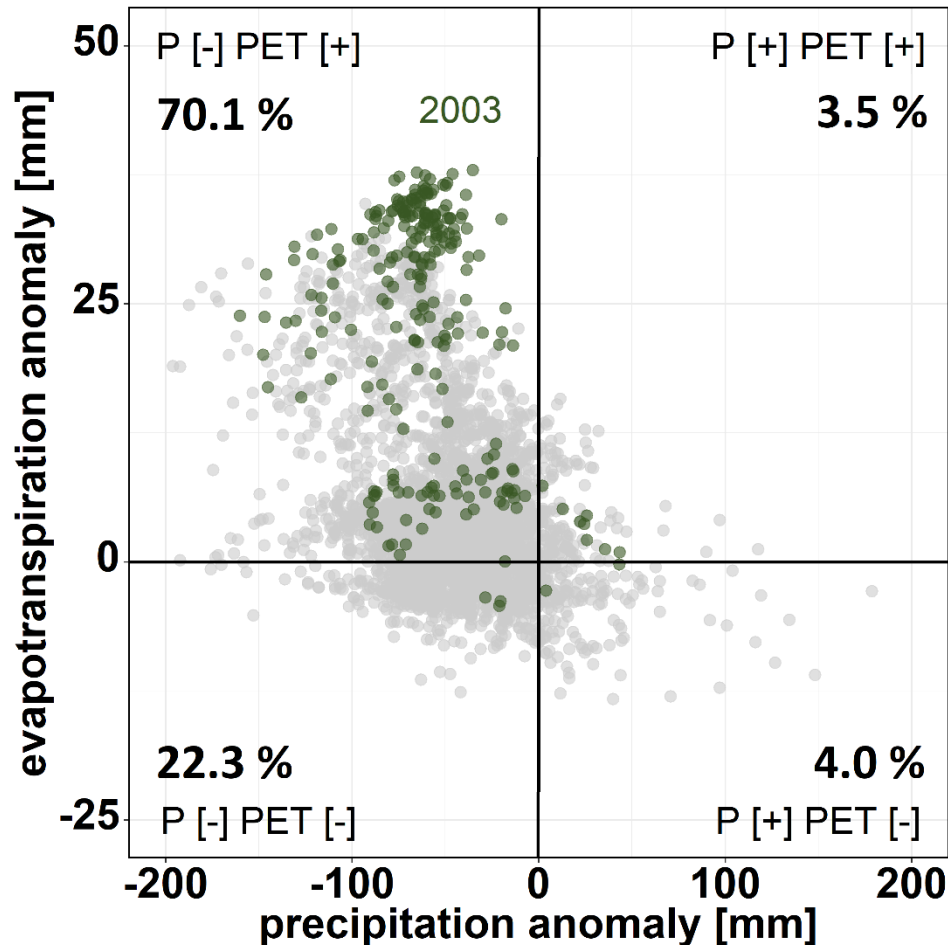


Abbildung 10: Anomalien von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration 30 Tage vor den NM7q im Spätsommer und Herbst (Juli bis November) in den 380 Einzugsgebieten. Das extremste Jahr im Untersuchungszeitraum (2003) ist grün hervorgehoben. Fast alle (92,4%) der jährlichen NM7q traten nach unterdurchschnittlichem Niederschlag auf (linke Hälfte der Abbildung), und zwei Drittel davon (oder 70,1% aller NM7q) traten nach einer Kombination von unterdurchschnittlichem Niederschlag und überdurchschnittlicher PET (oberer linker Quadrant der Abbildung).

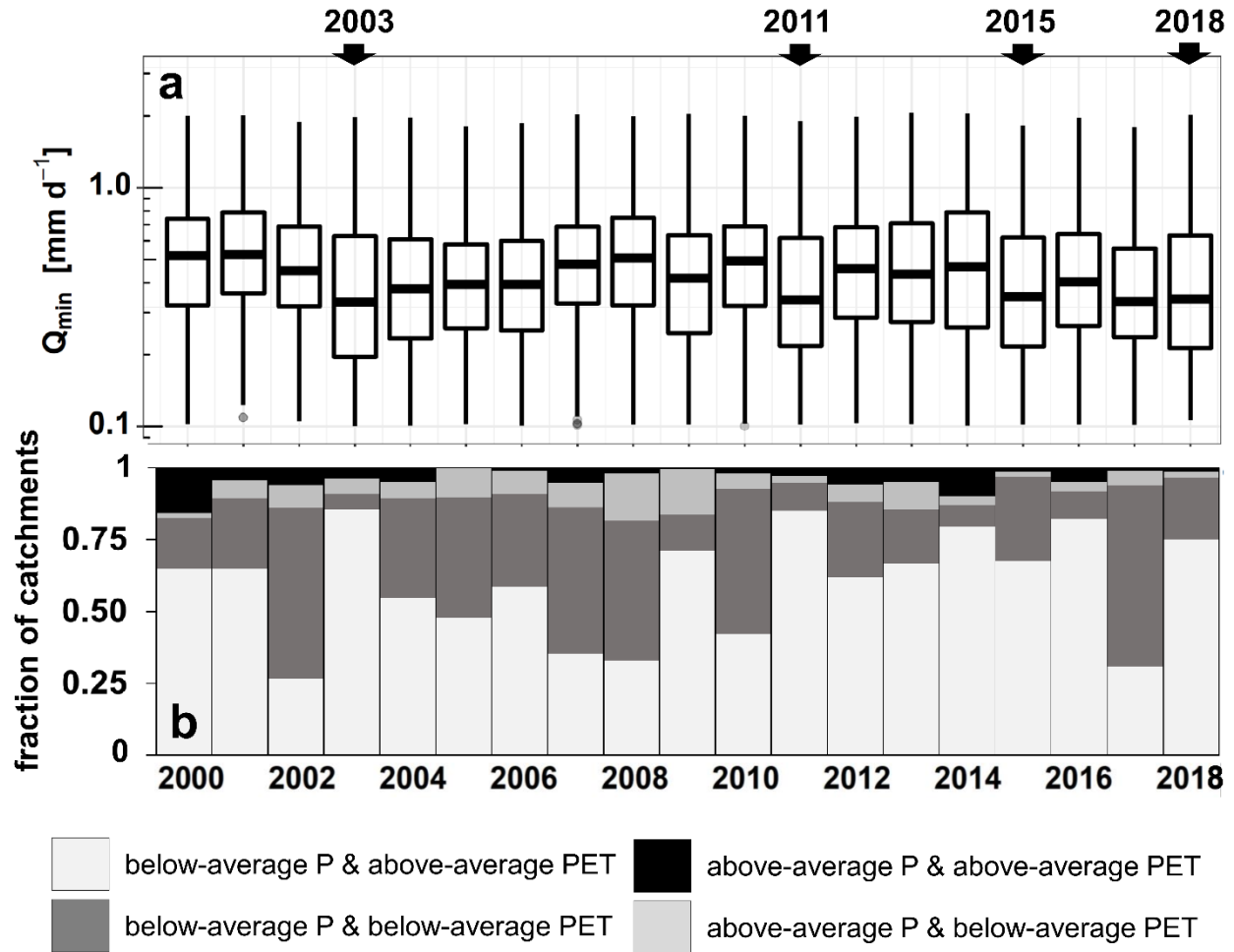


Abbildung 11: Boxplots der NM7q in den Jahren 2000 bis 2018 für die Schweizerischen Untersuchungsgebiete (a) und die Verteilung der Einzugsgebiete auf die Kombinationen der Niederschlags- und Evapotranspirationsanomalien vor dem jeweiligen NM7q (b). Die Niedrigwasserjahre - 2003, 2011, 2015, 2018 - waren in den meisten Einzugsgebieten durch negative Niederschlagsanomalien und positive PET-Anomalien gekennzeichnet. Das Auftreten des NM7q nach Perioden mit überdurchschnittlichem Niederschlag bzw. unterdurchschnittlicher Evapotranspiration könnte darauf zurückzuführen sein, dass es sich bei manchen NM7q zwar um das jährliche Abflussminimum handelt, diesem NM7q aber im Vergleich mit anderen Jahren klimatisch keine besonderen Anomalien vorhergehen.

3.3.3 Dauer von Klimaanomalien

Anomalien für Zeitfenster von einer Woche bis zu einem halben Jahr lassen darauf schließen, dass die meisten NM7q durch Anomalien von bis zu 60 Tagen hervorgerufen werden (Abbildung 12). Nach 60 Tagen verändert sich die Magnitude der Klimaanomalien nicht mehr so stark. Dies wird u.a. durch die Veränderung der graue Punktwolke sowie durch die mittleren Anomalien (gepunktete Linien in Abbildung 12 a-g) ersichtlich. Obwohl längere Niederschlagsanomalien natürlich zu geringeren Abflüssen führen, sind die meisten NM7q ein Resultat von Niederschlagsanomalien, die kürzer als 60 Tage dauern (gestrichelte Linie - Abbildung 8h). Im Gegensatz dazu ist für PET die Dauer der Anomalie ein wichtigerer Faktor als die absolute Größe. Vor allem die Niedrigwasserjahre 2003, 2011, 2015 und 2018 werden, zusätzlich zu einer Niederschlagsanomalie, vor allem durch eine lange Periode von hoher potenzieller Evapotranspiration verstärkt.

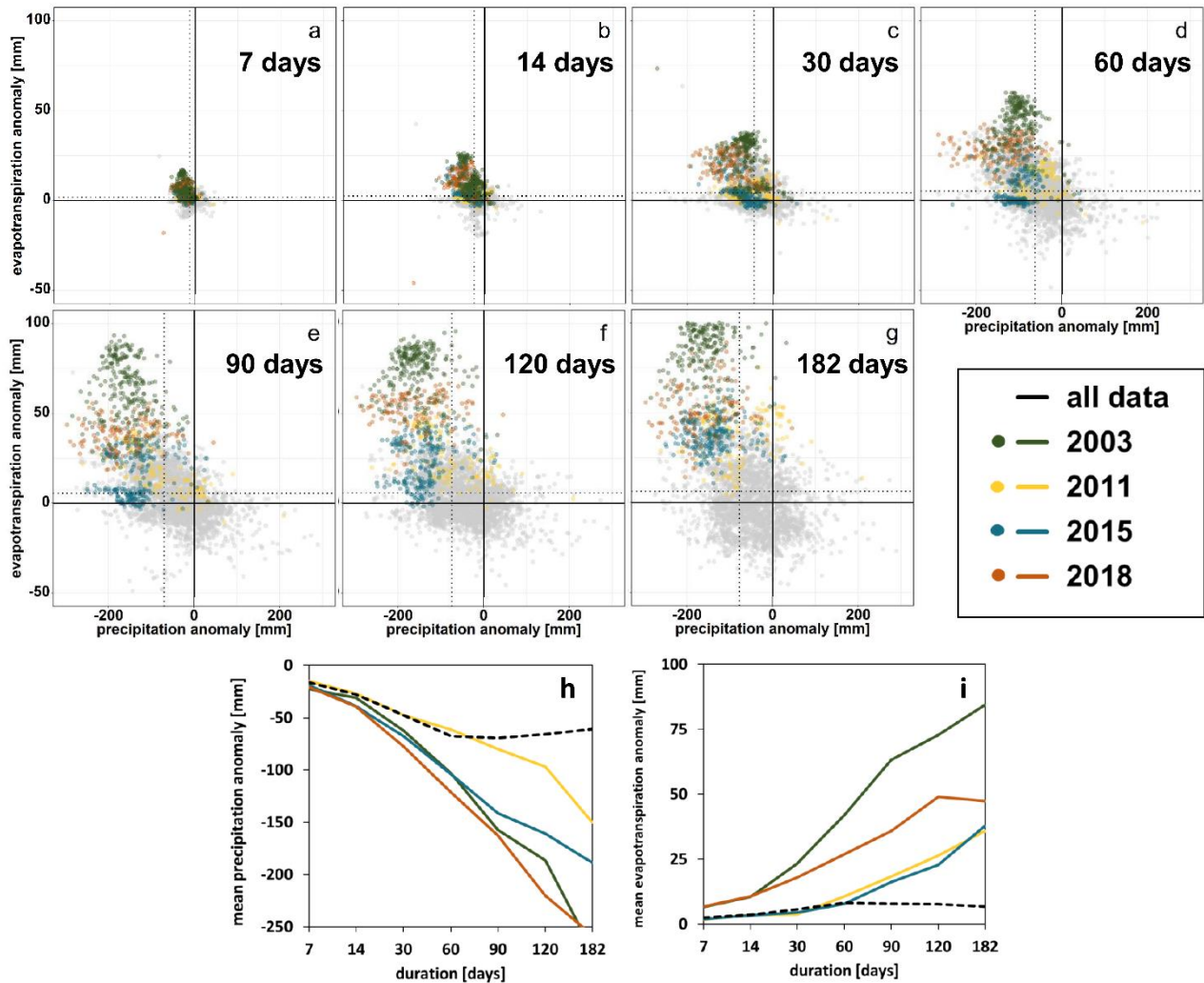


Abbildung 12: Anomalien von Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration für Zeitfenster von 7, 14, 30, 60, 90, 120 und 182 Tagen vor den NM7q im Spätsommer und Herbst (Juli bis November) **(a-g)** und die Veränderung der durchschnittlichen Anomalien über die verschiedenen Zeitfenster **(h & i)**. Jeder graue Punkt repräsentiert die Kombination von P- und PET-Anomalien vor einem NM7q. Anomalien in den Niedrigwasserjahren werden durch verschiedene Farben angezeigt (2003 in Grün, 2011 in Gelb, 2015 in Cyan und 2018 in Orange). Die gepunkteten Linien geben die mittleren P- und PET-Anomalien an.

3.4 Einfluss von Einzugsgebietseigenschaften auf Niedrigwasserereignissen

In Feldkampagnen während Niedrigwasser in den Jahren 2015 und 2016 konnten Landschaftselemente identifiziert werden, die massgeblich zu Niedrigwasserabflüssen beitragen. Beispielsweise stellten wir fest, dass die Sandsteinschichten der oberen Meeresmolasse (blaue Bereiche in Abbildung 13a) während Niedrigwasser einen überdurchschnittlichen Beitrag leisteten. Die meisten Untereinzugsgebiete im Sandsteingebiet haben ein $q > 0.6 \text{ mm d}^{-1}$, wohingegen die meisten Einzugsgebiete außerhalb dieses Gebiets ein $q < 0.6 \text{ mm d}^{-1}$ haben.

Ein weiterer wichtiger Faktor, für überdurchschnittliche Niedrigwasserbeiträge in der ganzen Schweiz, insbesondere aber in den alpinen Einzugsgebieten, ist die Anbindung der Speicher an das Gewässernetz. Die Konnektivität von Hangspeichern und Vorflutern in den Schweizer Alpen hängt zum einen mit dem Neigungswinkel zusammen, sodass steilere Hänge eher in den Vorfluter entwässern als flachere Hänge (Abbildung 13b). Während der Feldkampagnen fanden wir hohe Abflüsse in Abschnitten entlang steiler Hänge in der Nähe des Flussnetzes (siehe Abbildung 13b - unten). Ausserdem fanden wir heraus, dass der spezifische Abfluss in einigen Einzugsgebieten flussabwärts zunimmt, was darauf hindeutet, dass Wasser unterirdisch durch die hyporheische Zone fliesst und erst an einem bestimmten Punkt stromabwärts im Gewässer messbar ist. Wir fanden zahlreiche Gebiete wo die Abflüsse (flächengewichtet) flussabwärts überdurchschnittlich stark zunahmen und im Gegenzug die Abflüsse im Oberlauf vergleichsweise tief lagen (Abbildung 13b - oben).

Um den Einfluss von speziellen Landschaftselementen auf die Magnitude von Niedrigwasserabflüssen zu quantifizieren, verglichen wir in einem weiteren Schritt die Spearman Korrelationskoeffizienten (r_s) zwischen gemessenem spezifischen Abfluss und den Flächenanteilen spezifischer Landschaftselemente für alle im Rahmen der Feldkampagnen gemessenen Teileinzugsgebiete. Abbildung 14 zeigt die Kombinationen mit dem höchsten r_s für das Schweizerische Mittelland und die Alpenen Einzugsgebiete. Höher gelegene Einzugsgebiete hatten tendenziell einen geringeren Abfluss sowohl in den Einzugsgebieten des schweizerischen

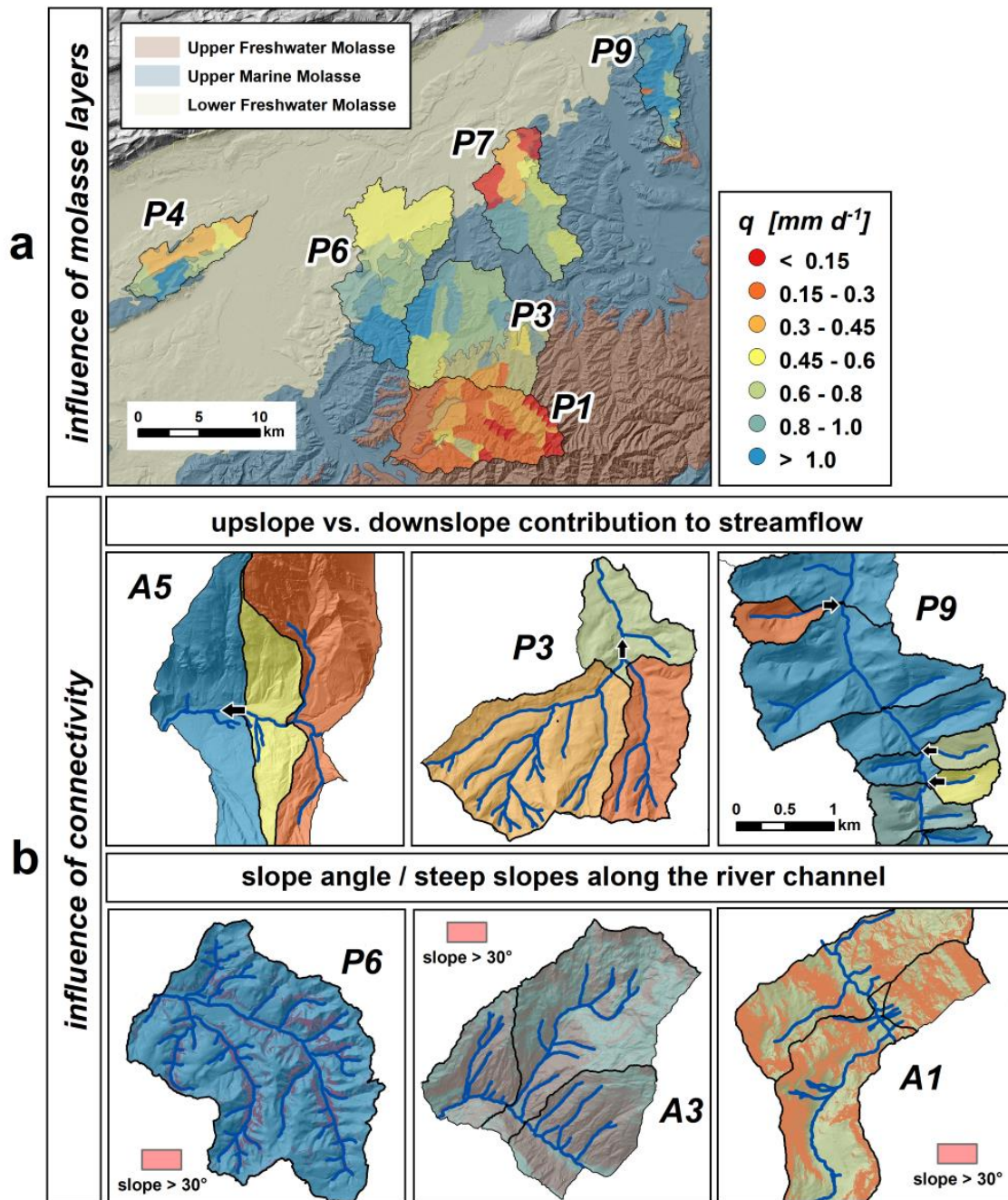
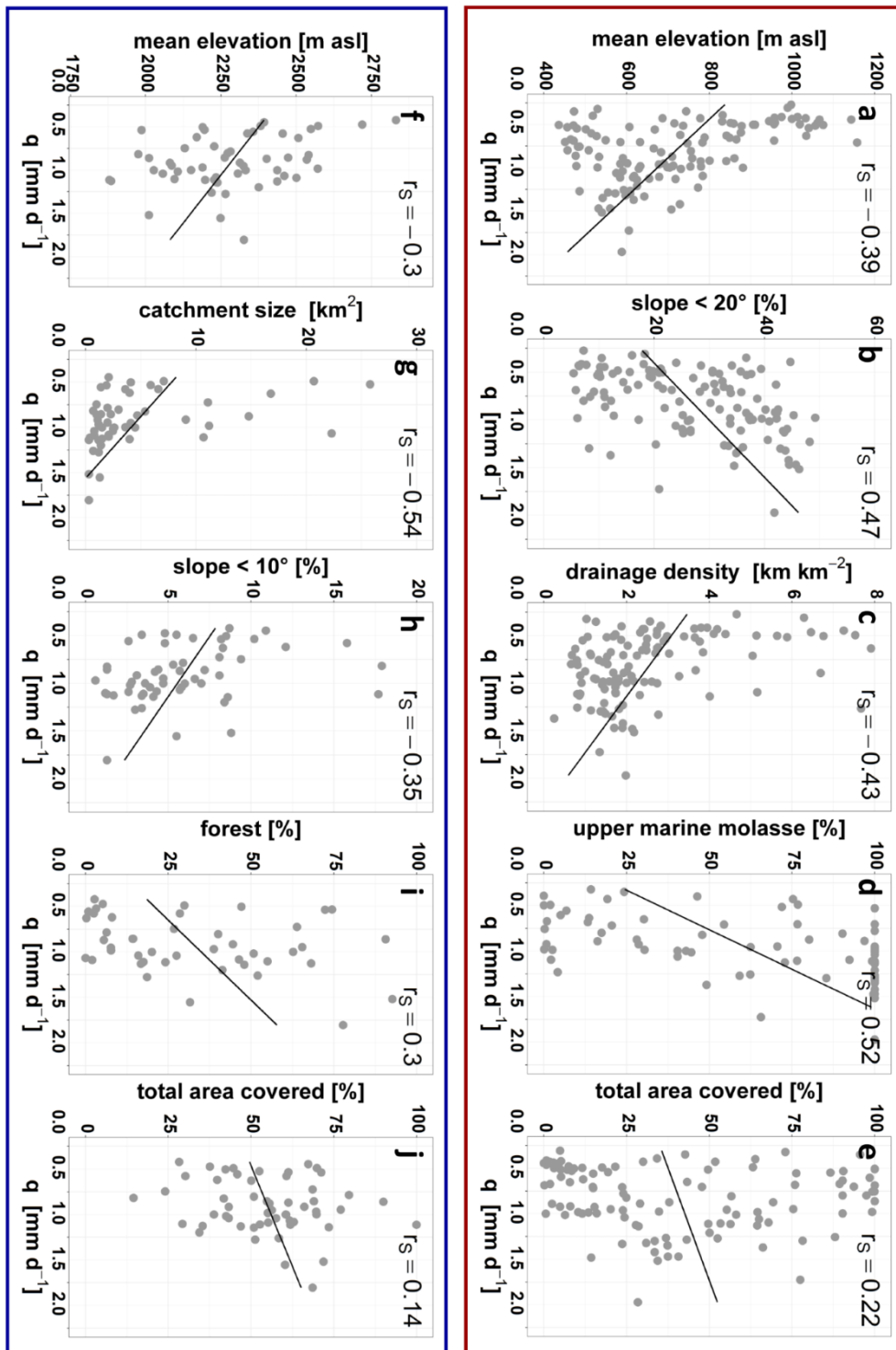


Abbildung 13: Verschiedene Schichten der mittelländischen Molasse **(a)** und die Anbindung des Hangspeichers an das Flussnetz **(b)** beeinflussten die Magnitude von Niedrigwasserabflüssen in Einzugsgebieten während Feldkampagnen in den Jahren 2015 und 2016. Untersuchungen zeigten einen positiven Effekt von Sandsteinen der oberen Meeresmolasse in den Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes **(a)**. In vielen Einzugsgebieten gab es deutliche Unterschiede zwischen flussaufwärts und flussabwärts gelegenen Gebieten. In Einzugsgebieten mit steilen Hängen entlang des Gewässernetzes (hier veranschaulicht für Steigungen über 30 °) konnten höhere Niedrigwasserabflüsse gemessen werden.

Synthesebericht – Charakterisierung von Niedrigwasserregimen

Mittellands als auch in den alpinen Einzugsgebieten (Abbildung 14a & f). In flachen Mittelland-Einzugsgebieten sind Niedrigwasserabflüsse tendenziell größer, in Einzugsgebieten mit höherer Entwässerungsdichte / einem dichteren Gewässernetz, tendenziell kleiner (Abbildung 14b und c). Wir stellten fest, dass in Einzugsgebieten aus Sandsteinen der oberen Meeresmolasse Niedrigwasserabflüsse höher sind, auch in Einzugsgebieten mit mehr Lockermaterial Bedeckung waren die Niedrigwasserabflüsse etwas erhöht (Abbildung 14d & e).

In alpinen Einzugsgebieten waren die Niedrigwasserabflüsse in kleineren Einzugsgebieten generell höher (Abbildung 14g). Im Gegensatz zu den Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes sind in flacheren alpinen Einzugsgebieten (unter 10° Neigung) die Abflüsse tendenziell geringer (Abbildung 14h). Einzugsgebiete mit höherem Waldanteil wiesen höhere Niedrigwasserabflüsse auf, und auch die prozentuale Fläche, die von Lockermaterial bedeckt war, wirkte sich etwas positiv aus (Abbildung 14i und j).



Abbildungen 14: Die Spearman-Korrelationen für Magnitude von gemessenen Niedrigwasserabflüssen und ausgewählte Landschaftsmerkmalen für das Schweizer Mittelland (rot) und die Schweizer Alpen (blau).

3.5 Modellierung von Niedrigwasserkennwerten

3.5.1 Übersicht über Niedrigwasserkennwerte in schweizerischen Einzugsgebieten

Die Abflussdaten aus den 380 ausgewählten Einzugsgebieten wurden auf ihre Qualität überprüft, und in die Regionen „Schweizerisches Mittelland“ und „Schweizerische Alpen“ unterteilt. Entfernt wurden dabei Einzugsgebiete mit gröberen Beeinflussungen im Abflussregime und Einzugsgebiete in der Grossregion Jura. Aus den Abflussdatenreihen 2000-2018 wurden NM7q, q_{95} und C (Masterrezessionskoeffizient) berechnet und Ausreisser nach der 3σ Regel entfernt. Der ursprüngliche Datensatz wurde dadurch auf 280 Einzugsgebiete reduziert.

Tabelle 3: Variabilität von den drei am häufigsten verwendeten Niedrigwassercharakteristika (NM7q, q_{95} und der Masterrezessionskoeffizient (C)) in den Einzugsgebieten (Mittelwert über die gesamte Periode = 1 Wert pro Einzugsgebiet) des schweizerischen Mittellandes und den schweizerischen Alpen, aufgezeigt durch die statistischen Kenngrössen Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und Schiefe der Wahrscheinlichkeitsverteilung.

	Mittelland EZG. [n = 192]			Alpine EZG [n = 88]		
	<i>NM7q</i>	<i>q₉₅</i>	<i>C</i>	<i>NM7q</i>	<i>q₉₅</i>	<i>C</i>
Mittelwert μ [mm d ⁻¹]	0.392	0.499	14.880	0.622	0.758	17.084
Standardabweichung σ [mm d ⁻¹]	0.281	0.505	7.398	0.327	0.521	8.425
Variationskoeffizient $\mu * \sigma^{-1}$	0.716	1.012	0.497	0.525	0.687	0.493
Schiefe	1.274	4.337	1.197	0.395	2.910	1.103

Das mittlere NM7q und q_{95} in den alpinen Einzugsgebieten ist bedeutend höher als in den Einzugsgebieten des schweizerischen Mittellands (0.622 vs. 0.392 mm d⁻¹ bzw. 0.758 vs. 0.499 mm d⁻¹), auch die mittlere Dauer der Rezession ist in den alpinen Einzugsgebieten länger (17.1 vs. 14.9 Tage) (Tabelle 3). In den Mittellandgebieten ist jedoch der Variationskoeffizient grösser als in den alpinen Einzugsgebieten. Abgesehen von Unterschieden zwischen Mittelland und Alpen gibt es keine Auffälligkeiten in der räumlichen Verteilung der verwendeten Niedrigwassercharakteristika NM7q, q_{95} und C (Abbildung 15).

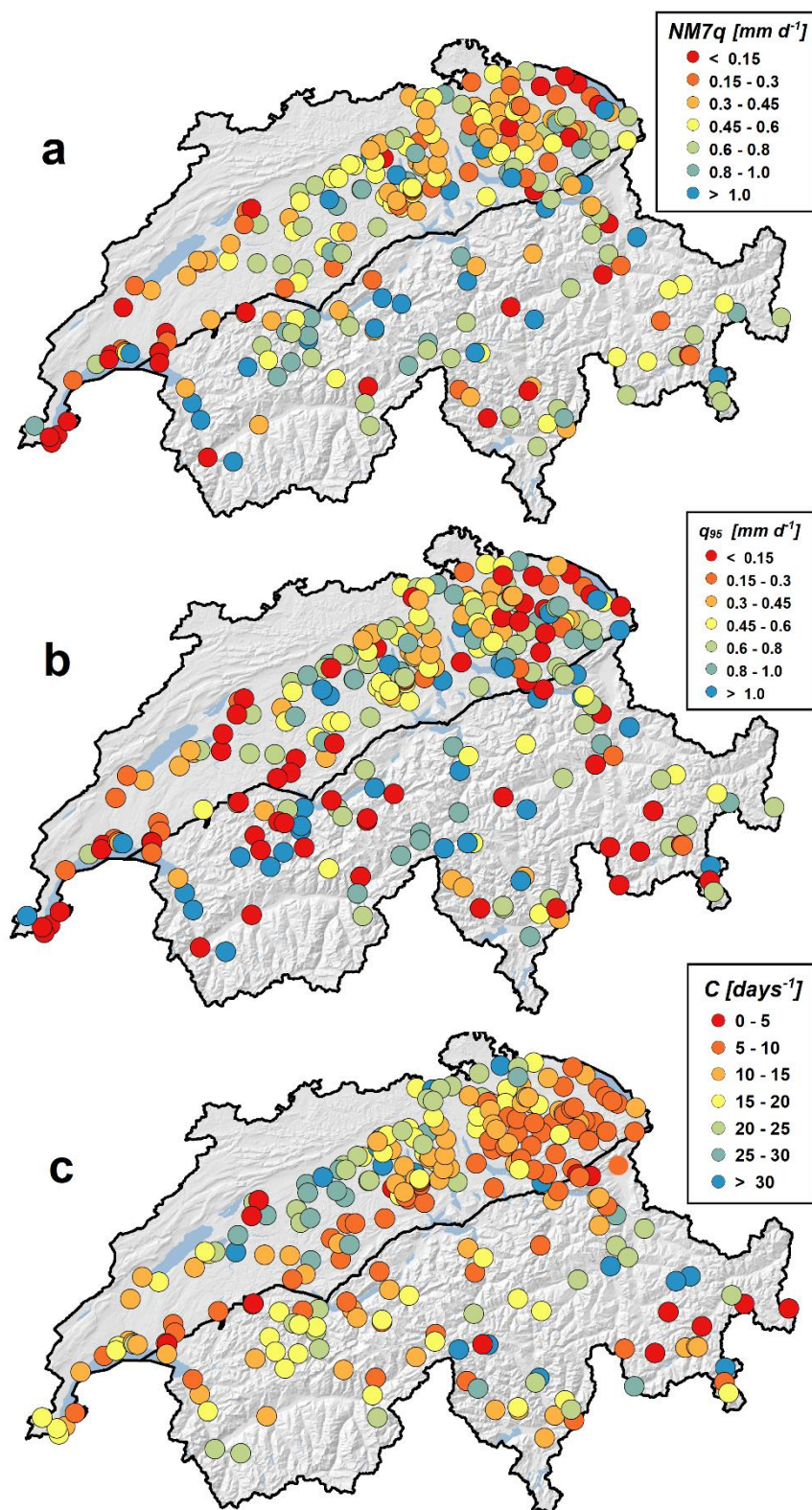


Abbildung 15: Räumliche Variabilität der Niedrigwasserkennzahlen NM7q, q₉₅ und C (Masterrezessionskoeffizient) für die 280 ausgewählten schweizerischen Einzugsgebiete.

3.5.2 Resultate der Regressionsanalysen

Mittels eines „Random-Forest“ Models wurde die relative Bedeutung von unterschiedlichen Gebietsparametern für die Magnitude von NM7q, q_{95} und C berechnet (Abbildung 16).

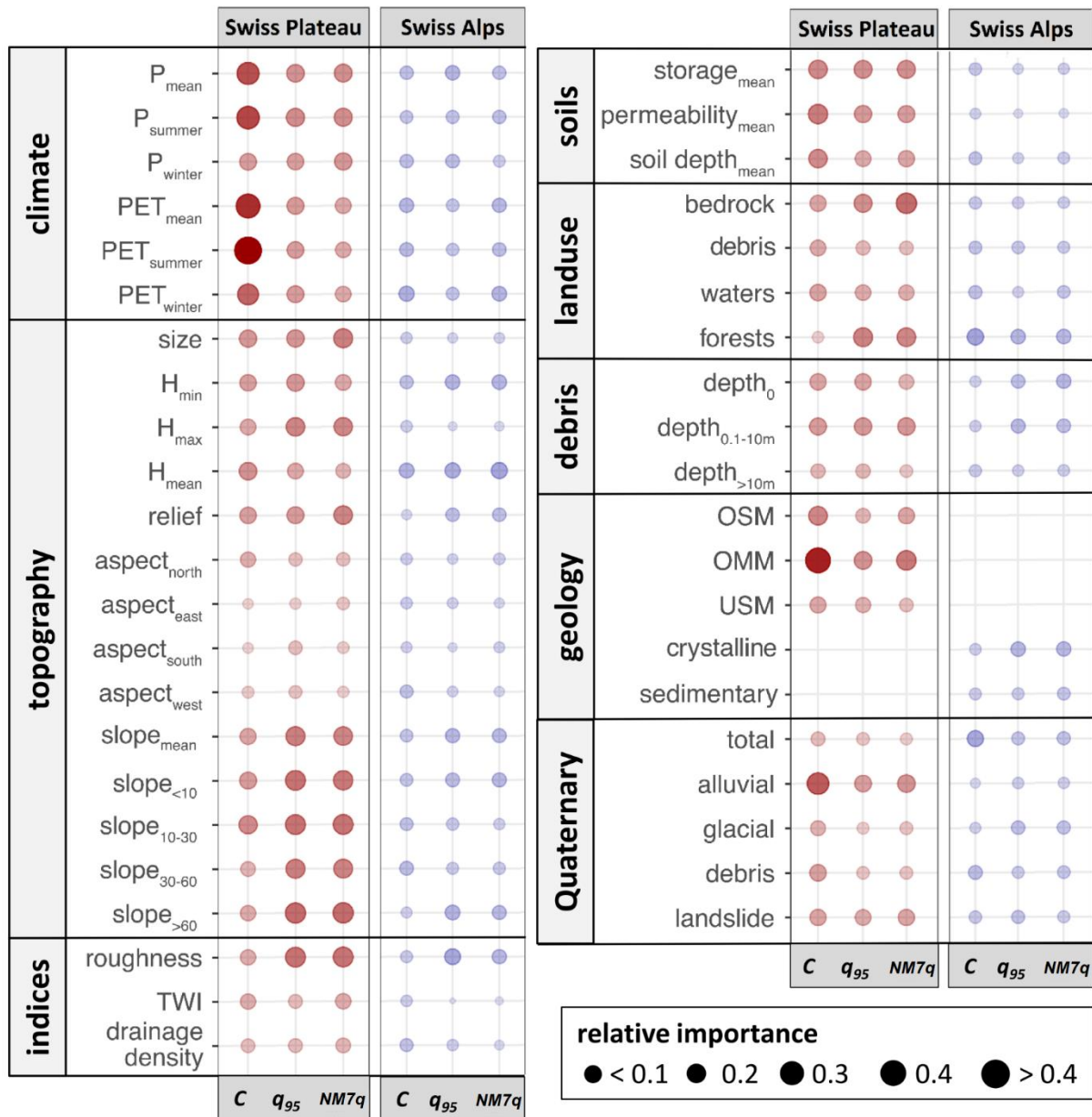


Abbildung 16: Relative Bedeutung von verschiedenen Gebietsparametern der Kategorien Klima, Topographie, Indizes, Böden, Landnutzung, Mächtigkeit des Lockermaterials, Geologie und Quartärlagerungen für die Bestimmung der Niedrigwassergrößen NM7q, q_{95} und C für Mittelland Einzugsgebiete (rot) und Alpine Einzugsgebiete (blau).

Wir haben die beiden Regressionsmodelle „Random Forest“ und „Lasso“ getestet und die Vorhersagen mit den beobachteten Werten verglichen (Abbildung 17). Die überzeugendsten Werte gab das „Random Forest“-Modell in den Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes (R^2 zwischen Simulationen und beobachteten Werten von 0.89 für NM7q, 0.88 für q_{95} und 0.93 für C) und das „Lasso“-Modell für die Einzugsgebiete der Schweizer Alpen (R^2 zwischen Simulationen und beobachteten Werten von 0.89 für NM7q, 0.87 für q_{95} und 0.8 für C). Sämtliche Inputdaten (Gebietseigenschaften und Niedrigwasserkenngrossen), sowie die Skripten zur Regressionsanalyse sind im Anhang zu diesem Synthesebericht verfügbar.

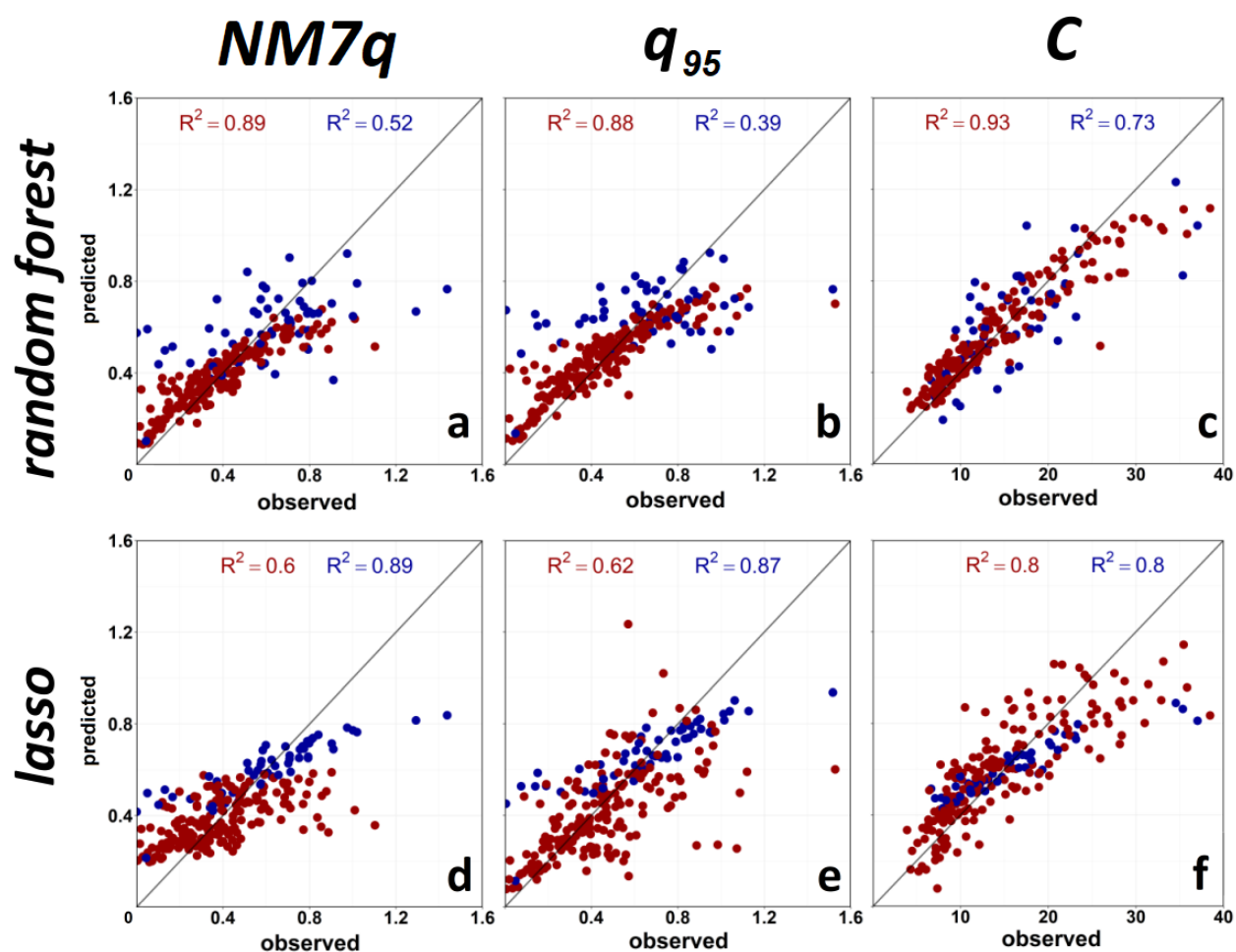


Abbildung 17: Vergleich von beobachteten und simulierten Niedrigwasserkenngrossen (NM7q, q_{95} und C) für die Einzugsgebiete des schweizerischen Mittellands und der schweizerischen Alpen für die zwei Regressionsmodelle „Random Forest“ (a, b, c) und „Lasso“ (d, e, f).

Die Residuen der Regressionsanalyse variieren regional in der Schweiz. Wir haben festgestellt, dass die Unsicherheiten zur Bestimmung von NM7q und q_{95} insbesondere im Nordosten (Thurgau, St.Gallen) und Westen der Schweiz (entlang des Lac Léman und Lac Neuchâtel) sehr gross sind (Abbildung 5.9 a, b, d, e). In den alpinen Einzugsgebieten waren die Unsicherheiten im südwestlichen Teil (Abbildung 18 a-f) und im zentralen Teil der Alpen (a, b, c, f) höher.

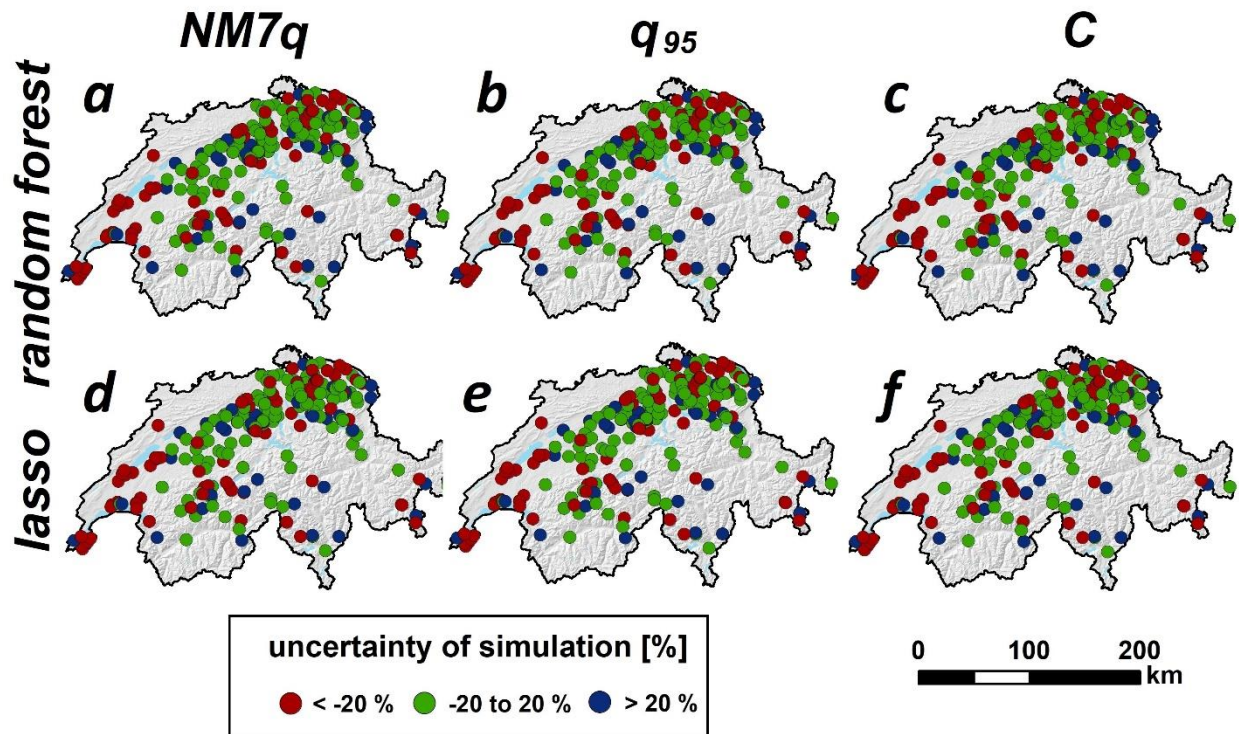


Abbildung 18: Die räumliche Verteilung der Residuen der Regressionsanalyse für die Variablen NM7q, q_{95} und C, abgeleitet aus den Modellen „Random Forest“ (a, b, c) und „Lasso“ (d, e, f), ausgedrückt als % der beobachteten Werte. Es gibt deutliche regionale Unterschiede in der Genauigkeit der entwickelten Regressionsansätze.

Beide Regressionsansätze zur Vorhersage von NM7q, q_{95} und C ergaben zufriedenstellende Ergebnisse (Abbildung 17), aber die Zuverlässigkeit und Robustheit der Regressionsansätze ist stark von der Qualität der hydrologischen Inputs abhängig. In der ganzen Schweiz und insbesondere im dicht besiedelten Schweizer Mittelland sind die meisten Flüsse von Wasserentnahme und / oder Zuleitungen betroffen. Um eine große Stichprobe von

Einzugsgebieten zu behalten, die zur Gewährleistung der Robustheit der Regressionsmethoden erforderlich sind, haben wir nur Einzugsgebiete entfernt, in denen der Abfluss offensichtlich und massgeblich beeinflusst ist. Die regionalen Muster in der Unsicherheit der Regressionsmodelle (Abbildung 18) lassen darauf schließen, dass regionale Unterschiede der beitragenden Niedrigwasserspeicher bzw. Unterschiede in den für Niedrigwasser entscheidenden Landschaftsmerkmalen die unsere Methodik möglicherweise nicht erfassen, dazu führen, dass die Regressionsmodelle schlechtere Ergebnisse liefern.

Die topographische Beschaffenheit eines Einzugsgebietes beeinflusst die Grössenordnung der Niedrigwasserabflüsse. U.a. zeigten wir auf, dass die mittlere Einzugsgebietshöhe und die mittlere Hangneigung des Einzugsgebiets mit der Magnitude von Niedrigwasserabflüssen (und den Kenngrössen $NM7q$, q_{95} und C) korrelieren. Unsere Untersuchungen zeigen, dass neben topografischen Faktoren auch unterschiedliche Speicherelemente und geologische Einflüsse massgebend für die Grösse von Niedrigwasserabflüssen sind. Um den Einfluss der Geologie für eine Vielzahl von Gebieten zu untersuchen, haben wir große Anstrengungen unternommen, um wichtige geologische Informationen zu homogenisieren und einen robusten Datenvergleich in grossem Massstab über eine Vielzahl von Einzugsgebieten durchführen zu können. Wir fanden u.a. heraus, dass Sandsteinschichten der oberen Meeresmolasse außergewöhnlich stark zu Niedrigwasserabflüssen im schweizer Mittelland beitragen (Abbildung 13) und daher für die Vorhersage von Niedrigwasserkenngrossen von grosser Bedeutung sind (Abbildung 14 und 16). Ähnliche Ergebnisse wurden in früheren Studien in der Schweiz (Naef et al., 2015; Carlier et al., 2018), aber auch in anderen Regionen der Welt (Jencso & McGlynn, 2011; Nippgen et al., 2011) aufgezeigt. Ausserdem, lassen unsere Ergebnisse darauf schliessen, dass die oberste Bodenschicht und die bodenphysikalischen Eigenschaften (Speicherkapazität, Permeabilität und Tiefe) keinen wesentlichen Einfluss auf die Magnitude von Niedrigwasser in der Schweiz haben. Dies ist nicht verwunderlich, da die Drainage aus der Bodenoberschicht nach längeren Trockenperioden sehr gering ist und nicht mehr zum Abfluss beiträgt.

Synthesebericht – Charakterisierung von Niedrigwasserregimen

Im Allgemeinen sind die Niedrigwasserabflüsse in den Schweizerischen Alpen höher, als im schweizerischen Mittelland (Tabelle 3, Abbildung 15), was auf ein höheres Speicherpotenzial in höheren Lagen hinweist. Dies wurde bereits in früheren Studien berichtet, jedoch gibt es Diskussion über die potentiellen Hintergründe dafür. Zum Beispiel argumentieren Staudinger et al. (2017) und Jasechko et al. (2016), dass das Speicherpotenzial mit dem Relief zunimmt und, dass mehr Relief in topographisch steileren Gebieten dazu führt, dass die Speicher eher an das Gewässernetz angeschlossen sind, die Konnektivität von Speicher und Vorfluter höher ist. Ausserdem fällt in höher gelegenen Einzugsgebieten mehr Niederschlag und die Evapotranspiration ist geringer. Unsere Ergebnisse legen nahe, dass die Konnektivität von Speichern und Gewässern tatsächlich wesentlich für die Bestimmung von Niedrigwasserereignissen ist und damit ein möglicher Erklärungsansatz für die hohe räumliche Variabilität von Niedrigwasserabflüssen wäre. In mehreren Einzugsgebieten waren die flächengewichteten Abflüsse flussabwärts grösser als im höher gelegenen Teil der Einzugsgebiete, was ebenfalls darauf hindeutet, dass die Konnektivität der Grundwasserspeicher für die Magnitude von Niedrigwasserereignissen wesentlich ist (Abbildung 13). In vielen Fällen fliesst das Wasser unter der Oberfläche und kommt erst an einem bestimmten Punkt ins Gewässer. Dieses Phänomen führt dazu, dass die Länge des Gewässernetzes eines Einzugsgebiets zwischen Niedrigwasserperioden und feuchteren Perioden sehr stark variieren kann (Godsey & Kirchner, 2014; van Meerveld et al., 2019), die Gewässer sind streckenweise trocken gefallen und führen (wenn überhaupt) nur unterirdisch Wasser. Es ist deshalb, speziell in Niedrigwasserperioden wesentlich, nicht nur die Oberflächenabflüsse zu betrachten, sondern auch die unterirdischen Wasserflüsse in hyporheischer Zone und Grundwasser mit einzubeziehen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Konnektivität ist der Neigungswinkel der Hänge direkt in der Nähe des Flussnetzes (Abbildung 13). Während der Feldkampagnen fanden wir überdurchschnittliche Beiträge von Strecken an steilen Hängen, was darauf hindeutet, dass steilere Hänge mit größerer Wahrscheinlichkeit an das Gewässernetz angebunden sind.

4. Vorschläge für weitere Untersuchungen

4.1. Schwerpunktkampagnen in Gebieten mit grösseren Unsicherheiten

Die Regressionsmodellierung führt im Grossteil der Schweizerischen Einzugsgebieten zu zufriedenstellenden Ergebnissen, jedoch gibt es einzelne Gebiete in denen die Ergebnisse durch weiterführende Annalysen verbessert werden könnten. Unsere Resultate haben gezeigt, dass das Einarbeiten von Resultaten aus gezielten Feldkampagnen zur Identifikation von regionsspezifischen Landschaftselementen die Regressionsanalysen entscheidend verbessern können. Wir schlagen aus diesem Grund für kritische Regionen (im speziellen die verkarsteten Juragebiete in Fribourg, Neuchâtel und Waadt sowie die Einzugsgebiete der nordöstlichen Schweiz in Zürich und Thurgau) folgende Massnahmen vor:

Überprüfung der Datengrundlage der Pegelstationen

Überprüfung der Pegel – Abfluss Beziehungen und der Flächenangaben der Einzugsgebiete. Vor allem in verkarsteten Gebieten, können bei der Ermittlung der Grösse von Einzugsgebieten nach topografischen Kriterien Unsicherheiten entstehen, diese könnten mit weiterführender Recherchen minimiert werden.

Messkampagnen zu Niedrigwasser zur Identifikation von Landschaftselementen

Der Grossteil der 2015 & 2016 durchgeführten Messkampagnen beschränkte sich auf das zentrale Mittelland. Zur besseren Abschätzung von Beiträgen aus spezifischen Landschaftselementen wären gezielte Messkampagnen (u.a. in Jura Einzugsgebieten, im Westen und Nordosten der Schweiz) notwendig um weitere Daten zur erheben. So könnten gezielt Geodatenätze aufbereitet werden mit speziellem Augenmerk auf die neu identifizierten Landschaftselemente für gezielte Regressionsanalysen.

4.2. Interaktion von Oberflächenabflüssen und Grundwasserspeichern

Während Niedrigwasserabflüssen spielt die Interaktion von Oberflächenabflüssen und unterirdischen Abflüssen in der hyporheischen Zone und in Aquiferen eine entscheidende Rolle. Ein wesentlicher Anteil des Wasserflusses in Trockenperioden fliesst im Untergrund und ist so an

Synthesebericht – Charakterisierung von Niedrigwasserregimen

den Pegelstationen nicht messbar. Andererseits kommt es dadurch an bestimmten Stellen zu Aufstössen dieser unterirdischen Wasserressourcen und daraus resultieren räumlich heterogenen Abflussbedingung. Die Konnektivität von Grundwasserspeichern und Gewässernetz spielt während Niedrigwasserereignissen also eine entscheidende Rolle und könnte im Rahmen der folgenden Massnahmen näher untersucht werden:

Datensynthese der schweizweiten Grundwasserdaten von BAFU und Kantonen

Vergleichbar mit der im Rahmen des Projekts durchgeführten Datensynthese der Abflussmessstationen sollten in weiterer Folge sämtlicher Grundwasserpegeldaten gesammelt und ausgewertet werden. Die Zeitpunkte von Grundwassertiefstständen sollte für die gesamte Schweiz mit den Zeitpunkten des NM7q und klimatischen Einflussfaktoren (Niederschlag und Evapotranspiration) gegenübergestellt werden. Ausserdem sollte analysiert werden in welchem Zeitrahmen sich die Grundwasserstände nach (extremen) Niedrigwasserereignissen wieder erholen und welche Wassermengen dazu benötigt werden. Eine spezielle Auswertung der extremen Trockenjahre gibt Aufschluss über die Speicherpotentiale in der ungesättigten Zone.

Vergleich von Grundwasserständen und Abflusspegeln

In einem weiteren Schritt sollten die Interaktion von Grundwasser und Oberflächenabflüssen untersucht werden. Dazu werden aus den gesammelten Grundwasserpegeldaten, jene ausgewählt die in der Nähe von Pegelstationen liegen. So können die Pegelstände verglichen werden, und analysiert werden in welche Richtung (Grundwasser zu Fluss vs. Fluss zu Grundwasser) und zu bzw. ab welchen Zeitpunkten Austauschprozesse stattfinden. Durch Gegenüberstellung dieser Resultate mit Gebietseigenschaften (Topographie, Lithologie sowie Mächtigkeit und Art der Lockermaterialablagerungen) kann herausgefunden werden, welche Bereiche besonders sensibel reagieren. Ausserdem könnten diese Informationen helfen um genauere Abschätzungen der Wasserbilanzen zu ermöglichen.

4.3. Gezielte Analysen der Mechanismen und Prozesse der Speicherentwässerung

Ein Grossteil des Abflusses in Niedrigwasserperioden kommt aus langsam entwässernden Grundwasserspeichern. Diese sind räumlich verteilt und können in gezielten Messkampagnen

identifiziert werden. Mit Hilfe von weiteren Auswertungen und Kampagnen könnten das Speicher und Drainageverhalten besser verstanden werden um so unser Prozessverständnis zu stärken:

Inventarisierung und Auswertung von Quellschüttungsdaten

Die Quellen von massgebenden, zu Niedrigwasser beitragenden, Grundwasserspeicher werden in vielen Fällen für Bewässerung oder zur kommunale Wassernutzung gefasst, vielerorts gibt es Daten zu Quellschüttungen. Diese Daten sind besonders wertvoll, da sie meist geringere Beeinflussungen (durch künstliche Zu und Ableitungen, anthropogene Einflüsse usw.) aufweisen und sollten deshalb gesammelt, und nach den wesentlichen Charakteristika der jeweiligen Grundwasserspeicher (e.g. Lithologie, Neigung und Exposition) zusammengefasst werden. Die Auswertung der Quelldaten gibt Auskunft über die Unterschiede in der Reaktion von verschiedenen Grundwasserspeichern auf Trockenereignisse (wie z.B. die extremen Jahre 2003 oder 2018) bezüglich Drainage, Speicherpotential, Grundwasserneubildungsraten aber auch über die Zeitspanne in dem sich solche Speicher von Extremereignissen erholen. Die Analyse von natürlichen Tracern und gezielte Altersdatierungen mit Tritium, CFCs und ^{14}C könnten helfen die Altersverteilung dieser Ressourcen und damit die unterirdischen Fliesswege besser zu verstehen.

Drainagemonitoring von Kleinst Einzugsgebieten bzw. einzelnen Hängen

An einzelnen Hängen oder in kleinen Einzugsgebieten, in denen die Wasserbilanz geschlossen werden kann und die Speicherelemente klar identifizierbar und abgrenzbar sind, sollten diese Speichersysteme gezielt untersucht werden. Zielführend wären das kleinräumige Monitoring von Oberflächenabflüssen und Grundwasserständen, erweitert durch Bodenfeuchtemessungen und Klimaparameter. Tracertests und die Analyse von natürlichen Tracern wie Ionen und stabile Isotope, sowie Altersdatierungen geben Auskunft über die Zeitspannen der Speicherung im Untergrund. Untergrunderkundungen durch Durchlässigkeitstests in Bohrlöchern, und geoelektrische Untersuchungen könnten Aufschluss über wesentliche physikalische Eigenschaften der Speichersysteme geben. Die gemessenen Speicher und Drainageeigenschaften können dann in einem physikalischen Modell umgesetzt werden und mit gezielten Sensitivitätssimulationen könnten Grenzbedingungen die potentielle langfristige Niedrigwasserspeicher aufweisen müssen, herausgefunden werden.

Analyse der Interaktionen von Bodenfeuchte und Evapotranspiration

Zusätzlich könnten kleine (hydrologisch geschlossene) Einzugsgebiete verwendet werden um die Interaktion von Bodenfeuchte und Evapotranspiration zu untersuchen. Obwohl der Grossteil des Abflusses in Trockenperioden aus Grundwasserspeichern kommt, spielt auch die Bodenfeuchte (vor allem bei längeren Ereignissen) eine wesentliche Rolle. Sobald der Boden kein kühlendes Wasser mehr beitragen kann erwärmt sich die Luft schneller. In diesen Fällen wäre das verfügbare Wasser begrenzt, was in weiterer Folge zur Überschätzung der potentiellen Evapotranspiration führt. Mit gezielten Messinstallationen könnten diese Prozesse aufgezeichnet und besser verstanden werden. U.a. könnte durch gezielte Messkampagnen von stabilen Isotopen in Niederschlag, Bodenwasser, Grundwasser, Oberflächenabfluss und in der Vegetation der Effekt der evaporativen Fraktionierung (ratio von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$) in den unterschlichen Wasserspeichern analysiert werden.

4.4. Möglichkeiten gezielter Prognosen von Niedrigwasserabflüssen

Die im Rahmen des Projekts ermittelten Einflüsse auf das Auftreten und die Magnitude von Niedrigwasserabflüssen von Klima und Landschaft können auch in einem gezielten Vorhersage-Rahmen genutzt bzw. in existierenden Werkzeugen implementiert werden:

Prognose bzw. Frühwarnsystem für das Auftreten von Niedrigwasserereignissen

Klimaanomalien von unterdurchschnittlichem Niederschlag und überdurchschnittlicher potentiellen Evapotranspiration für unterschiedliche Zeiträume vor dem NM7q geben Auskunft welche klimatischen Einflüsse das Auftreten des NM7q beeinflussen. In Kombination mit den 30 bzw. 60 Tage Wetterprognosen der Meteoswiss könnte so ein Warnsystem für potentielle Niedrigwasserperioden entwickelt werden. Dazu werden die Intensität der Klimaanomalien, Dauer und der Auftretenszeitpunkt der Klimaanomalien vergangener Niedrigwasserereignisse verwendet um aus den 30-60 Tage Prognosen die Auftretenswahrscheinlichkeit für gewisse Magnituden zu errechnen.

Flächendeckender Datensatz zu Niedrigwasser-Landschaftselementen

Die Erkenntnisse aus den Regressionsmodellen über die unterschiedlichen Beträge verschiedener Landschaftselemente zu Niedrigwasserabflüssen (idealerweise erweitert durch zusätzliche Ergebnisse aus Punkt 4.1.) können genutzt werden um einen flächendeckenden, schweizweiten Rasterlayer zu erstellen der in Modellen wie u.a. PREV. CAH, Topkapi-ETH implementiert, zur schweizweiten Abschätzung von Niedrigwasserabflüssen verwendet werden kann. So könnten die datenbasierten Abschätzungen, mit geringem Kalibrationsaufwand auch in existierenden, operationellen Modellansätzen verwendet werden.0

5. Conclusio

Anhand mehrerer Datensätze wurden systematisch die Einflüsse von Klima und Einzugsgebietseigenschaften auf Niedrigwasserereignisse in der Schweiz untersucht. Niedrigwasserabflüsse (in diesem Fall das NM7q) traten typischerweise im Spätsommer und Winter auf, wobei relativ wenige Einzugsgebiete Niedrigwasserabflüsse ausserhalb dieser Jahreszeiten haben. In den meisten Schweizer Einzugsgebieten unterhalb von einer mittleren Einzugsgebietshöhe von 1200m ü.M. kommt es im August und September zum NM7q in den alpinen Einzugsgebieten über 1200m ü.M. mittlerer Einzugsgebietshöhe im Winter (Abbildung 1 und Abbildung 2). Der typische Auftretenszeitpunkt des NM7q war im Zeitraum 2000 bis 2018 von Jahr zu Jahr relativ konstant (Abbildung 2), jedoch gibt es in manchen Jahren grosse regionale Unterschiede (Abbildung 3). Das Auftreten des NM7q fällt in 90% aller Einzugsgebiete mit klimatischen Einflüssen zusammen u.a. niedriger Niederschlag, hohe Evapotranspiration und niedrige Lufttemperaturen (Abbildung 5). Betrachtet man den Zeitpunkt des Auftretens, fällt auf, dass Niedrigwasserabflüsse im Schweizerischen Mittelland während der Phase mit der höchsten Evapotranspiration auftreten. Niedrigwasserabflüsse in Alpinen Einzugsgebieten treten während Phasen mit den tiefsten Temperaturen und den geringsten Niederschlägen auf (Abbildung 6). Der typische Zeitpunkt des Auftretens von Niedrigwasserereignissen und der dominante klimatische Mechanismus, der das Auftreten massgeblich beeinflusst, kann aus der mittleren Einzugsgebietshöhe ermittelt werden (Abbildung 4 und Abbildung 7).

Klimaanomalien (unterdurchschnittlicher Niederschlag und überdurchschnittliche potentielle Evapotranspiration), in unterschiedlichen Zeiträumen von sieben Tagen bis zu einem halben Jahr, beeinflussen das Auftreten und die Magnitude von Niedrigwasserereignissen im im Spätsommer und Herbst (Juli bis November). Grössere Anomalien führten grundsätzlich zu geringerem NM7q (Abbildung 9). Mehr als 90% aller jährlichen NM7q folgten einer 30 Tage-Periode von unterdurchschnittlichen Niederschlägen, die meisten folgten zusätzlich überdurchschnittlicher Evapotranspiration (Abbildung 10). Extreme Niedrigwasserabflüsse, wie in den Jahren 2003, 2011, 2015 und 2018, traten fast ausschließlich nach Perioden mit großen Anomalien von P als

auch PET auf (Abbildung 11). Die Dauer der Klima-anomalien spielte eine zentrale Rolle: längere Anomalien führen in der Regel zu geringerem NM7q (Abbildung 12), jedoch sind die meisten Ereignisse das Resultat von Anomalien von weniger als 60 Tagen. Nur die extremen Niedrigwasserereignisse waren das Resultat von starken und langen Anomalien von Niederschlag und insbesondere Evapotranspiration über Zeitfenster von bis zu sechs Monaten (Abbildung 13).

Die räumliche Variabilität der drei am weitesten verbreiteten Niedrigwassercharakteristika (NM7q, q_{95} und Rezessionskoeffizient C) ist gross. Generell sind Niedrigwasserabflüsse in den alpinen Einzugsgebieten im Vergleich zum Schweizer Mittelland tendenziell höher und räumlich variabler. Auch während Feldkampagnen im Sommer 2015 und im Winter 2016 waren die Abflüsse in den Teilgebieten räumlich sehr heterogen. Diese Messungen erlaubten es jedoch, spezifische Landschaftsmerkmale zu identifizieren, die zum Niedrigwasserabfluss beitragen bzw. diesen verringern. Diese Erkenntnisse ermöglichten es, spezifische Inputparameter für 280 Einzugsgebiete zu selektieren und die relative Wichtigkeit von unterschiedlichen Einzugsgebietscharakteristika zu bestimmen. Multivariate Regressionsanalysen, „Random Forest“ und „Lasso“ haben gezeigt, dass bestimmte Landschaftsmerkmale wesentlich für die Magnitude von Niedrigwasserabflüssen sind. Der Lasso-Ansatz schnitt in den alpinen Einzugsgebieten besser ab, das Random Forest-Modell in Einzugsgebieten des schweizerischen Mittellandes. Die umfassende Bewertung von Landschaftsmerkmalen, die zu Niedrigwasserabflüssen beitragen bzw. diese verringern, ist ein wertvoller Beitrag zur Vorhersagbarkeit und zum Management von Niedrigwasser in der Schweiz.

Literatur

- BFE. 2018. Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2017. Bundesamt für Energie BFE. Available at: Art.-Nr. 805.006.17 / 07.18 / 1500 / 860423571
- Blanc P, Schädler B. 2013. Das Wasser in der Schweiz – ein Überblick. Schweizerische Hydrologische Kommission. Available at: ISBN: 978-3-9524235-0-9
- Bradford MJ, Heinonen JS. 2008. Low Flows, Instream Flow Needs and Fish Ecology in Small Streams. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* **33** (2): 165–180 DOI: 10.4296/cwrj3302165
- Carlier C, Wirth SB, Cochand F, Hunkeler D, Brunner P. 2018. Geology controls streamflow dynamics. *Journal of Hydrology* **566**: 756–769 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.069
- EurAqua. 2004. Towards a European Drought Policy Available at: <http://www.euraqua.org>
- Godsey SE, Kirchner JW. 2014. Dynamic, discontinuous stream networks: hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order. *Hydrological Processes* **28** (23): 5791–5803 DOI: 10.1002/hyp.10310
- Jasechko S, Kirchner JW, Welker JM, McDonnell JJ. 2016. Substantial proportion of global streamflow less than three months old. *Nature Geoscience* **9**: 126
- Jencso KG, McGlynn BL. 2011. Hierarchical controls on runoff generation: Topographically driven hydrologic connectivity, geology, and vegetation. *Water Resources Research* **47** (11) DOI: 10.1029/2011WR010666
- Lake SP. 2003. Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater Biology* **48** (7): 1161–1172 DOI: 10.1046/j.1365-2427.2003.01086.x

- van Meerveld HJ, Kirchner JW, Vis MJP, Assendelft RS, Seibert J. 2019. Expansion and contraction of the flowing stream network changes hillslope flowpath lengths and the shape of the travel time distribution. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*: 1–18 DOI: 10.5194/hess-2019-218
- Munich Re; (2014) Das neue NatCatSERVICE-Analyse-Tool | Munich Re. *munichre.com* Available at: <https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/natural-catastrophies-natcat-service-analysis-tool.html> [Accessed 14 May 2019]
- Naef F, Margreth M, Floriancic MG. 2015. Festlegung von Restwassermengen: Q347, eine entscheidende, aber schwer zu fassende Grösse. *Wasser Energie Luft*
- Nippgen F, McGlynn BL, Marshall LA, Emanuel RE. 2011. Landscape structure and climate influences on hydrologic response. *Water Resources Research* **47** (12) DOI: 10.1029/2011WR011161
- Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromberg JC. 1997. The Natural Flow Regime. *BioScience* **47** (11): 769–784 DOI: 10.2307/1313099
- Rolls RJ, Leigh C, Sheldon F. 2012. Mechanistic effects of low-flow hydrology on riverine ecosystems: ecological principles and consequences of alteration. *Freshwater Science* **31** (4): 1163–1186 DOI: 10.1899/12-002.1
- Seneviratne SI, Lehner I, Gurtz J, Teuling AJ, Lang H, Moser U, Grebner D, Menzel L, Schrott K, Vitvar T, et al. 2012. Swiss prealpine Rietholzbach research catchment and lysimeter: 32 year time series and 2003 drought event: RIETHOLZBACH 32 YEAR SERIES AND 2003 DROUGHT. *Water Resources Research* **48** (6) DOI: 10.1029/2011WR011749

Stahl K, Weiler M, Seibert J, Vis M, Gerlinger K, Böhm M. 2016. The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change

Staudinger M, Stoelzle M, Seeger S, Seibert J, Weiler M, Stahl K. 2017. Catchment water storage variation with elevation. *Hydrological Processes* **31** (11): 2000–2015 DOI: 10.1002/hyp.11158

Teuling AJ, Van Loon AF, Seneviratne SI, Lehner I, Aubinet M, Heinesch B, Bernhofer C, Grünwald T, Prasse H, Spank U. 2013. Evapotranspiration amplifies European summer drought. *Geophysical Research Letters* **40** (10): 2071–2075 DOI: 10.1002/grl.50495

Viviroli D, Dürr H, Messerli B, Meybeck M, Weingartner R. 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research* **43** (7) DOI: 10.1029/2006WR005653

van Vliet MTH, Yearsley JR, Ludwig F, Vögele S, Lettenmaier DP, Kabat P. 2012. Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. *Nature Climate Change* **2**: 676