Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 2

Artikel: Neue Abschätzungsmodelle zur Bestimmung des Q347
Autor: Dups, Yanick / Pavia Santolamazza, Daniela / Staufer, Philipp
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1043748

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Neue Abschätzungsmodelle zur Bestimmung des Q_{347}

Yanick Dups, Daniela Pavia Santolamazza, Philipp Staufer, Henning Lebrenz

Zusammenfassung

Niedrigwasserperioden können mit dem Q_{347} (5-Prozent-Quantil) beschrieben werden. Die Unterschreitung dieses Schwellenwertes hat Auswirkungen auf die Planung und den Betrieb relevanter Infrastruktur, auch um die ökologischen Auswirkungen in den Fliessgewässern zu reduzieren. In dieser Studie werden für die gletscherfreien Einzugsgebiete des Untersuchungsgebiets um den Kanton Solothurn die zeitliche Variabilität der Unterschreitungsereignisse analysiert und neue Abschätzungsmodelle des Q_{347}-Wertes für unbeobachtete Einzugsgebiete vorgestellt.

In den letzten 30 Jahren ist ein vermehrtes Auftreten der Unterschreitungstage, bzw. eine systematische Abnahme der Q_{347}-Werte aufgrund von Klimawandel, zu beobachten. Auch ist die Eintrittswahrscheinlichkeit der Niedrigwasserperioden mit zunehmender Ereignisdauer für spätere Sommermonate am höchsten.

Des Weiteren schlagen wir neue Regressionsmethoden zur Abschätzung des Q_{347} für unbeobachtete Einzugsgebiete vor. Wir vergleichen drei Verfahren zur Auswahl von geeigneten Parametern und evaluieren drei Regressionsmodelle in Kombination mit zwei Anpassungsmethoden zur Ergänzung verkürzter Zeitreihen des gemessenen Abflusses. Die Validierung ergibt, dass die vorgeschlagenen Modelle kleinere Fehler und grössere, lineare Zusammenhänge zwischen Schätz- und beobachtetem Wert erzeugen als die Vergleichsmodelle. Die Anwendung auf die «Einzugsgebietsgliederung Schweiz» zeigt eine räumlich homogenere, aber EZG-spezifische Verteilung des Q_{347}. Diese sollte als Beitrag zur Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen in der Wasserwirtschaft angesehen werden.

Résumé

Les périodes d'étiage peuvent être décrites avec le Q_{347} (quantile de 5%). Le fait de passer en-dessous de ce seuil entraîne des conséquences sur la planification et l'exploitation des infrastructures pertinentes, notamment dans le but de réduire l'impact écologique sur les cours d'eau. Dans cette étude, la variabilité temporelle des événements de sous-dépassement est analysée pour les bassins versants sans glaciers de la zone d'étude autour du canton de Soleure et de nouveaux modèles d'estimation de la valeur Q_{347} sont présentés pour des bassins versants non observés.

Au cours des 30 dernières années, on observe une augmentation de l'occurrence des jours de sous-dépassement, voire une diminution systématique des valeurs Q_{347}, en raison du changement climatique. De même, la probabilité d'occurrence des périodes d'étiage est la plus élevée avec une durée d'événement croissante pour les derniers mois d'été.

Par ailleurs, nous proposons de nouvelles méthodes de régression pour estimer le Q_{347} dans des bassins versants non observés. Nous comparons trois méthodes de sélection des paramètres appropriés et évaluons trois modèles de régression en combinaison avec deux méthodes d'ajustement afin de compléter les séries temporelles raccourcies du débit mesuré. La validation montre que les modèles proposés génèrent des erreurs plus petites et des relations linéaires plus importantes entre la valeur estimée et la valeur observée que les modèles de comparaison. L'application à la « Division des bassins versants de la Suisse » montre une répartition du Q_{347} plus homogène dans l'espace, mais spécifique à chaque bassin versant. Cela devrait être considéré comme une contribution afin de surmonter les défis futurs de la gestion de l'eau.

1. Einleitung

Natürliche Fliessgewässer haben zeitliche Schwankungen des Abflusses Q als Reaktion des Einzugsgebiets (EZG) auf den eingehenden Niederschlag, die Temperatur und die Eigenschaften des EZG. Die Ganglinie des Abflusses, deren Mittelwert und Variabilität sind abhängig von den räumlichen und zeitlichen Verteilungen dieser Einflussfaktoren. Deshalb können auch Zeitperioden mit niedrigen Abflüssen entstehen. Für die Charakterisierung dieser «Niedrigwässer» wird in der Schweiz das Q_{347} als 95-Prozent-Überschreitungsquantil einer 10-jährigen Abflussganglinie verwendet (Gewässerschutzgesetz, GSchG, 1991). Die Unterschreitung dieses Schwellenwertes hat für gletscherfreie EZG gerade in den Sommermonaten Konsequenzen für die Wasserwirtschaft: tiefe Wasserstände und gleichzeitig erhöhte Temperaturen setzen die Ökologie der Fliessgewässer unter Stress. Bei auftretenden Starkniederschlägen leiten zudem zahllose Einleitstellen der Siedlungs- und Strassenentwässerung in kurzer Zeit grosse Wassermengen mit Schadstoffen ein. Um die ökologischen Folgen zu begrenzen, sieht die Gesetzgebung und das technische Regelwerk *(VSA, 2021)* vor, Abwassereinleitungen auf die Niedrigwasserabflüsse abzustimmen. Der ermittelte Schwellenwert Q_{347} erhält somit gesetzliche Bedeutung und dient als Grundlage für die Planung und den Betrieb relevanter Infrastruktur durch die kantonalen Gewässerschutzfachstellen. Vor allem die Gewässergüte der kleinen und mittleren EZG ist aufgrund des schlechten Verdünnungsverhältnisses besonders vulnerabel, wobei für jene Fliessgewässer meist keine langjährigen Messreihen vorliegen und der Schwellenwert Q_{347} mit Hilfe von Niederschlags-Abflussmodellen, geostatistischen

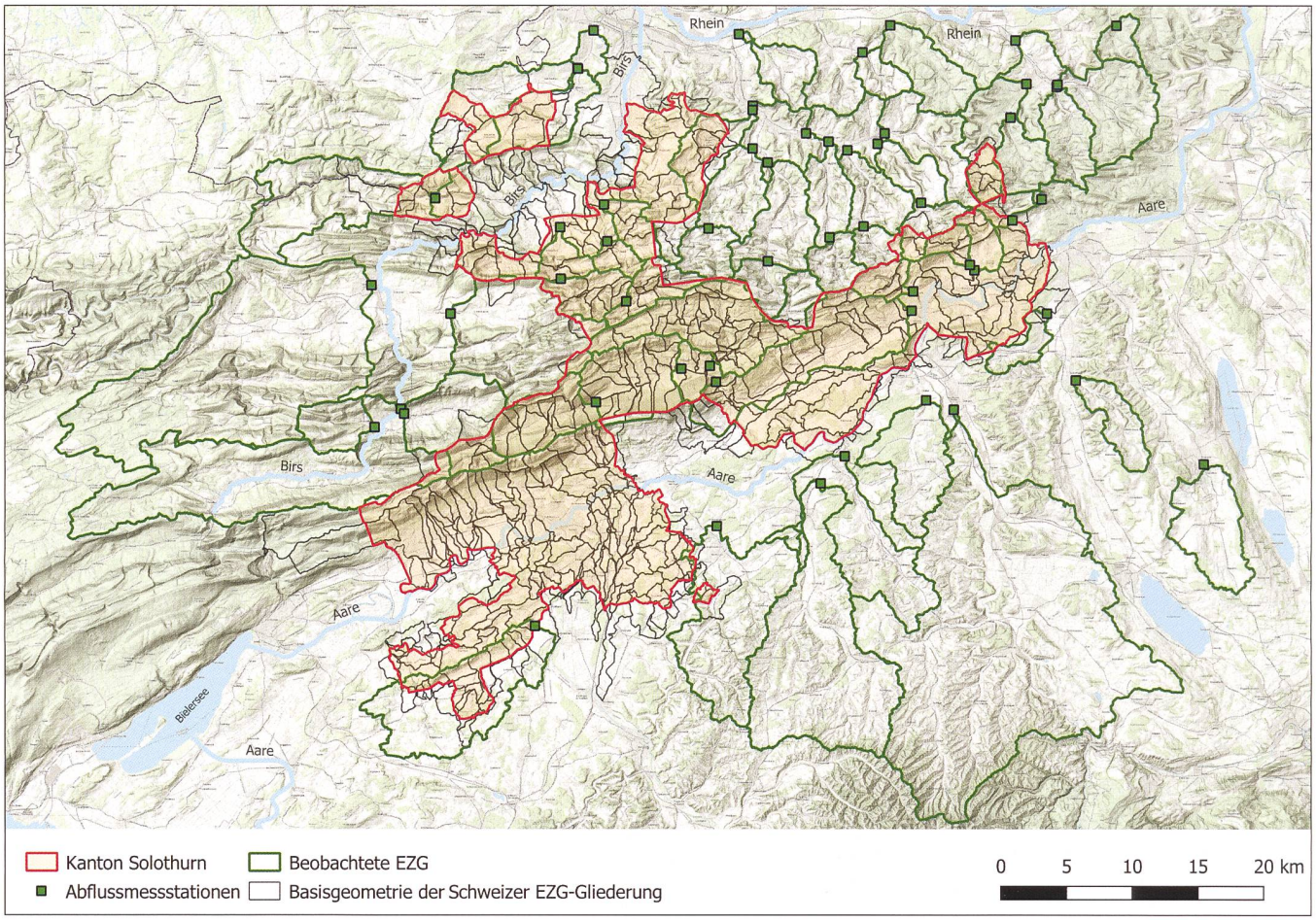

Bild 1: Untersuchungsgebiet, Abflussmessstationen und Einzugsgebiete.

oder Regressionsmodellen abgeschätzt werden muss.

In der Schweiz hat sich die «Multiple Lineare Regression» (MLR) etabliert, um den flächenspezifischen Abfluss Q_{347} mit charakterisierenden Parametern für jene unbeobachteten EZG abzuschätzen. Die Regressionskoeffizienten der MLR werden unter Fehlerquadratminimierung der Zielvariablen für beobachtete EZG bestimmt und dann auf unbeobachtete EZG übertragen. Dies impliziert eine Ähnlichkeit der EZG aufgrund der geographischen Nähe und ermittelt eine homoskedastische Fehlerverteilung für den Schätzwert des Q_{347}. Das Regressionsmodell wird in der Schweiz, differenziert nach fünf Regionen mit unterschiedlichen Regressionsparametern, angewendet *(Aschwanden H., Kan C., 1999)*. Diese regionale Übertragungsmethode ist aber mit grossen Unsicherheiten für den abgeschätzten Q_{347}-Wert verbunden *(Naef F., Margreth M., Floriancic M., 2015)*.

Die Ziele der vorgestellten Untersuchungen sind zusammenfassend:

- Beschreibung der zeitlichen Variabilität der Q_{347} -Ereignisse,
- Entwicklung und Anwendung von verbesserten Regressionsmodellen zur Abschätzung des Q_{347} für kleine und mittlere, unbeobachtete EZG für den Kanton Solothurn.

2. Untersuchungsgebiet und Datenaufbereitung

Als Grundlage dieser Untersuchungen für unbeobachtete EZG dient die BAFU-Einteilung der «Basisgeometrien» im Kanton Solothurn. Hierfür wurden tägliche Abflussmessungen (Q) der beobachteten EZG sowie die täglichen Punktmessungen von Niederschlag (P) und Lufttemperatur (T) in einem räumlich erweiterten Untersuchungsgebiet *(Bild 1)* gesammelt. Die Zeitreihen umfassen den 30-jährigen Untersuchungszeitraum vom 1.1.1990 bis 31.12.2019 und beinhalten maximal 10957 Tageswerte und 360 Monatswerte.

Einzugsgebiete

Die Zeitreihen der Abflussmessstationen wurden zunächst einer Qualitätskontrolle unterzogen, um fehlerhafte Messreihen oder einzelne Messwerte innerhalb der Zeitreihen zu identifizieren. Identifizierte Ausreisser, inkonsistente Daten oder systematische Fehler wurden aus dem Datensatz entfernt und durch «keine Angaben» ersetzt. Die Messstationen regulierter Fliessgewässer oder mit Einzugsgebietsflächen >500 km² wurden entfernt. Die verbliebenen 56 beobachteten EZG dienen zur Herleitung und Validation der neuen Abschätzungsmodelle. Die Regressionsmodelle wurden anschliessend für die (Teil-) EZG der «Einzugsgebietsgliederung Schweiz» («Basisgeometrien») innerhalb des Kantons Solothurn verwendet. Insgesamt sind dies 383 unbeobachtete EZG, die jeweils eine Fläche kleiner als 100 km² besitzen und nicht durch Stauhaltungen reguliert werden *(Bild 1)*.

Niederschlag

Die Zeitreihen von insgesamt 178 Niederschlagsstationen im Untersuchungsgebiet wurden zur Generierung der räumlichen Verteilung verwendet. Die Tageswerte des Niederschlags wurden mit dem geostatistischen Verfahren «Ordinary Kriging» *(Matheron G., 1965)*, die Monatswerte mit «Quantile Kriging» *(Lebrenz H., Bárdossy A., 2019)* auf eine räumliche Auflösung von 200 m x 200 m regionalisiert. Die entsprechende Zeitreihe mit 10957 Tages- bzw. 360 Monatswerten wurde für jedes EZG aus dem räumlichen Mittelwert der Regionalisierung bestimmt.

Nr.	Parameter	Kenncode	Einheit	Wertebereich
1	Fläche des Einzugsgebiets	area	m^2	[0,∞]
2	Längengrad des Flächenschwerpunkts	longitude	°	[0,180]
3	Breitengrad des Flächenschwerpunkts	latitude	°	[0,90]
4	Mittlere Höhe des EZG	Mean_Elevat	m ü. M	[0,∞]
5	Minimale Höhe im EZG	Min_Elevat	m ü. M	[0,∞]
6	Maximale Höhe im EZG	Max_Elevat	m ü. M	[0,∞]
7	Standardabweichung der Höhen im EZG	Std_Elevat	m ü. M	[0,∞]
8	Mittlere Neigung des EZG	Mean_Slope	°	[0,90]
9	Minimale Neigung im EZG	Min_Slope	°	[0,90]
10	Maximale Neigung im EZG	Max_Slope	°	[0,90]
11	Standardabweichung der Neigungen im EZG	Std_Slope	°	[0,90]
12	Mittlere Durchlässigkeit (kF-Wert)	mod_mean_ durchlaessigkeit	cm/s	[0,∞]
13	Anteil der Oberen Meeresmolasse	OMM	%	[0,1]
14	Anteil der Unteren Süsswassermolasse	USM	%	[0,1]
15	Waldfläche	Forest	%	[0,1]
16	Siedlungsfläche	Settlement	%	[0,1]
17	Landwirtschaftsfläche	Agriculture	%	[0,1]
18	Konzentrationszeit nach KIRPICH	Kirpich	min	[0,∞]
19	Entwässerungsdichte	Drainage_ density	km^{-1}	[0,∞]
20	Ausrichtung des EZG	Orientation	°	[0,360]
21	Karst-Grundwasserleiter	Karst_aquifer	%	[0,1]
22	Poren-Kluft-Grundwasserleiter	Poren-Kluft_acquifer	%	[0,1]
23	Lockergestein-Grundwasserleiter	Lockergesteins_aquifer	%	[0,1]
24	Bevölkerungszahl	Population	E	[0,∞]
25	Bevölkerungsdichte	Populationdensity	E/km^2	[0,∞]
26	Fliessgewässerlänge	Length_rivers	m	[0,∞]
27	Fliessgewässerlänge oberirdisch	Oberirdisch	m	[0,∞]
28	Fliessgewässerlänge unterirdisch bestimmt	Unterirdisch_bestimmt	m	[0,∞]
29	Fliessgewässerlänge unterirdisch unbest.	Unterirdisch_unbestimmt	m	[0,∞]
30	Länge Seeachse	Seeachse	m	[0,∞]
31	Mittlere Jahrestemperatur	mean_temp	°C	[-∞,∞]
32	Mittlere Temperatur im Sommerhalbjahr	mean_temp_summ	°C	[-∞,∞]
33	Mittlere Temperatur im Winterhalbjahr	mean_temp_wint	°C	[-∞,∞]
34	Mittlerer Jahresniederschlag	mean_percip_30y	mm	[0,∞]
35	Amplitude des Niederschlags	amplitude	mm	[0,∞]
36	Phasenverschiebung des Niederschlags	phase	a/2π	[0,2π]
37	Jährliche PET	mean_hvp	mm	[0,∞]
38	PET in den Sommermonaten	mean_hvp_summ	mm	[0,∞]
39	PET in den Wintermonaten	mean_hvp_wint	mm	[0,∞]

Tabelle 1: Parameter zur Beschreibung der EZG: 30 «statische» (1 – 30) und 9 «klimatische» Parameter (31 – 39).

Temperatur

Die Messreihen von 83 Temperaturstationen dienen als Grundlage für die Regionalisierung mit «External Drift Kriging» *(Ahmed S., de Marsily G., 1987)*, wobei die topographische Höhe als «external drift» verwendet wird. Auch für die Lufttemperatur wurden entsprechende Zeitreihen mit Tageswerten, bzw. Monatswerten, für jedes EZG analog zum Niederschlag hergeleitet.

Eigenschaften der Einzugsgebiete

Zur Beschreibung eines EZG wurden neben 30 «statischen» auch 9 «klimatische» Parameter definiert und berechnet. Die «statischen» Parameter beschreiben die Geometrie, Topografie, Geologie, Bodennutzung und die Entwässerung eines EZG, während die «klimatischen» Parameter die jeweiligen Temperaturen, Niederschlagsverteilungen und potenziellen Verdunstungen (PET) charakterisieren *(Tabelle 1)*.

3. Voruntersuchungen an beobachteten Einzugsgebieten

3.1 Zeitliche Variabilität des Q_{347}-Wertes

A. Variabilität über den Untersuchungszeitraum und die Dekaden

Zuerst wurde aus den Daten der 30 Jahre des gesamten Untersuchungszeitraums der Schwellenwert Q_{347} für jedes beobachtete EZG bestimmt, das Auftreten der Unterschreitungstage nach Kalenderjahren klassifiziert und ein gleitendes Mittel über 5 Jahre berechnet *(Bild 2)*.

Gemäss der Definition müssen 5 Prozent aller Tage im Durchschnitt einen Abfluss $Q \leq Q_{347}$ haben. Während die Jahre 2011 und 2015 relativ viele Unterschreitungstage haben, wurden die 56 EZG in der NW-

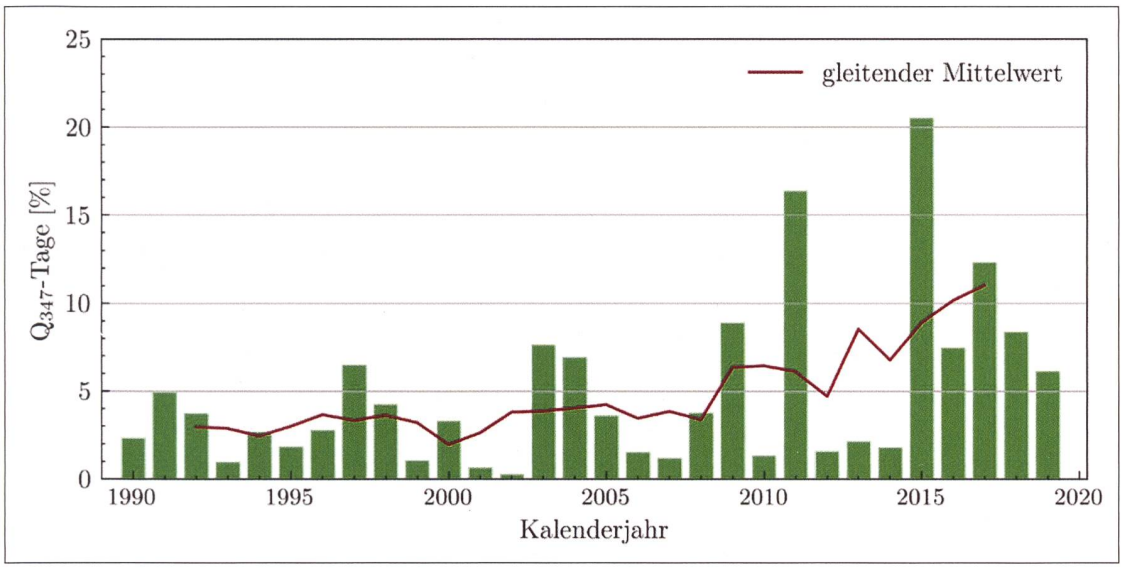

Bild 2: Prozentuale Verteilung der Q_{347} – Unterschreitungstage und der gleitende Mittelwert von 1990 bis 2019.

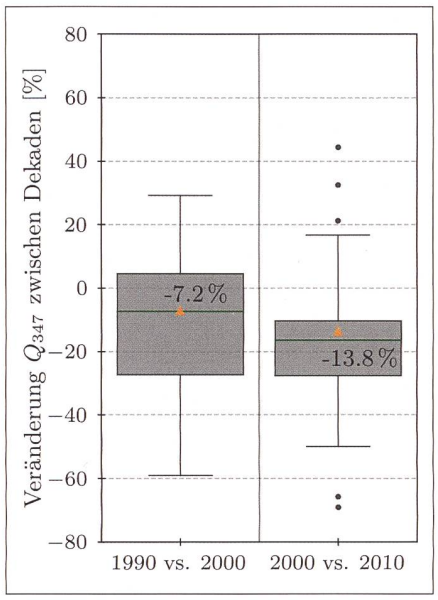

Bild 3: Boxplot der relativen Veränderung des Q_{347} über die drei Dekaden für die beobachteten EZG.

Schweiz durch den Hitzesommer 2003 weniger betroffen als andere Regionen in Europa *(Bild 2)*. Mit der vorliegenden Definition des Q_{347} lagen durchschnittlich 11 Prozent der Unterschreitungstage im Zeitraum zwischen den Jahren 2015 bis 2019. Aufgrund der systematischen Veränderungen des Inputs (d. h. Niederschlag und Temperatur) bzw. des EZG, ist über die letzten 30 Jahre keine gleichmässige Verteilung, sondern eine steigende Tendenz des vermehrten Auftretens von Niedrigwässern in der Schweiz erkennbar.

Als zweiten Schritt wurde nun der Q_{347}-Wert für die beobachteten EZG für alle drei Dekaden des gesamten Untersuchungszeitraumes, d.h. für die Jahrzehnte 1990 – 1999 (1990), 2000 – 2009 (2000) und 2010 – 2019 (2010), aus den jeweiligen Ganglinien und deren relativer Veränderung bestimmt *(Bild 3)*.

Der Vergleich im *Bild 3* zeigt, dass der Q_{347}-Wert während der zwei Jahrzehnte von 1990 bis 2009 für 68 Prozent der EZG gesunken ist, während für 32 Prozent der EZG ein höherer Wert für die erste Dekade ermittelt wurde. Im Durchschnitt sank der Q_{347}-Wert in dieser Periode um 7,2 Prozent. Dieser Negativtrend wird zwischen 2000 und 2019 weiter verstärkt: 89 Prozent (d. h. 9 von 10!) der EZG weisen in den Jahren 2010 – 2019 einen im Mittel 13,8 Prozent kleineren Q_{347}-Wert auf als in der Dekade davor. Diese Analyse unterstreicht die Notwendigkeit, dass für gletscherfreie EZG eine genaue, aktualisierte Bestimmung der Q_{347}-Werte, bzw. eine zuverlässige Prognose für die Planung und den Betrieb der Infrastrukturen, und somit für die Einhaltung der Gewässergütekriterien wichtig ist.

B. Variabilität der Unterschreitungsereignisse über die Kalendermonate

Die Tage des «Niedrigwassers» wurden weiter nach deren Dauer D, d. h. der Anzahl der konsekutiven Tage d mit $Q \leq Q_{347}$, in die 12 Kalendermonate gruppiert *(Bild 4)*.

Bild 4 zeigt, dass insgesamt 67 Prozent der Unterschreitungstage in den Kalendermonaten Juli bis Oktober vorkommen, wobei die Spitzenmonate August (17,8 Prozent) und September (18,3 Prozent) sind. Dagegen treten in den Monaten Februar und März nur ca. 1,2 Prozent der Niedrigwassertage in den EZG der NW-Schweiz auf. Diese Verteilung über die Kalendermonate ist charakteristisch für gletscherfreie Mittelgebirge in Zentraleuropa: neben ausbleibendem Niederschlag wird während der Sommermonate die hohe Temperatur (bzw. die resultierende Evapotranspiration) und im Winter die (sich verringernde) Schneeakkumulation als auslösender Faktor angesehen.

Die Differenzierung in unterschiedliche Ereignisdauern D *(Bild 4)* zeigt, das Niedrigwässer von einem Tag Dauer gleichmässig, d. h. zufällig, über das Jahr verteilt sind. Dagegen sind 41 Prozent der Unterschreitungstage mit einer Ereignisdauer von 2 – 5 Tagen assoziiert, deren maximale Häufigkeit in den Monaten Juni bis Oktober auftritt. Niedrigwasserperioden mit einer Dauer D = 6 – 10 Tage bilden 26 Prozent, mit einer Dauer D = 11 – 20 Tage 18 Prozent der Unterschreitungstage des Q_{347}-Wertes. Die maximale Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Niedrigwasserperioden wird, mit zunehmender Dauer, vom August in den Oktober verschoben.

3.2 Auswahl der Regressionsparameter

Zur Abschätzung des Q_{347}-Wertes für unbeobachtete EZG mit der MLR werden die sieben «besten» (von 39) Parameter ausgewählt. Hierfür wurde eine Kreuzvalidierung («leave-one-out») für die 56 beobachteten EZG mit drei verschiedenen Auswahlverfahren zur Parameterfindung angewendet: (a) «Vorwärtsselektion», (b) «Rückwärtselimination» und (c) «Random Forest». Als Zielfunktion (Qualitätskriterium der Abschätzung) diente der mittlere prozentuale Fehler (MPE) zwischen Schätzwert und Beobachtung. Hierbei zeigte die «Rückwärtselimination» das genaueste Ergebnis mit einem MPE = 53 Prozent, während die «Vorwärtsselektion» (MPE = 57 Prozent) und der «Random Forest» (MPE = 65 Prozent) einen durchschnittlich grösseren Fehler in der Abschätzung aufwiesen. Daher wird im Folgenden die «Rückwärtselimination» zur Bestimmung der jeweiligen sieben «besten» Regressionsparameter verwendet. Hierfür ist die prozentuale Verteilung der «besten» sieben Parameter für die 56 kreuzvalidierten EZG in *Bild 5* dargestellt.

Bild 5 zeigt die Zugehörigkeit einzelner Parameter (vgl. *Tabelle 1*) zum «besten» Parametersatz für die Beschreibung des Q_{347} aus der Kreuzvalidierung. Während die Verwendung des Parameters «OMM» in der

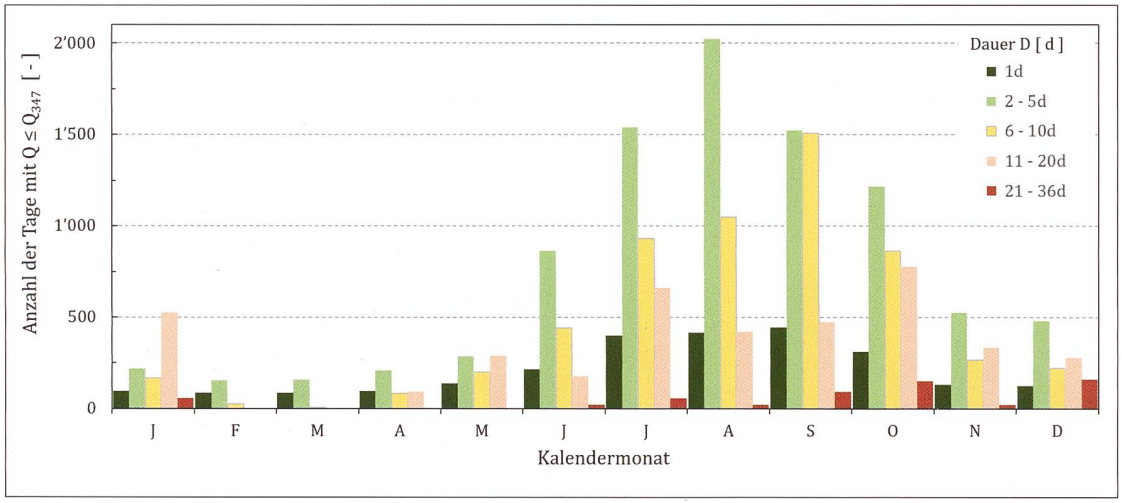

Bild 4: Verteilung der Ereignistage des Q_{347} für verschiedene Dauern D [d] und Kalendermonate.

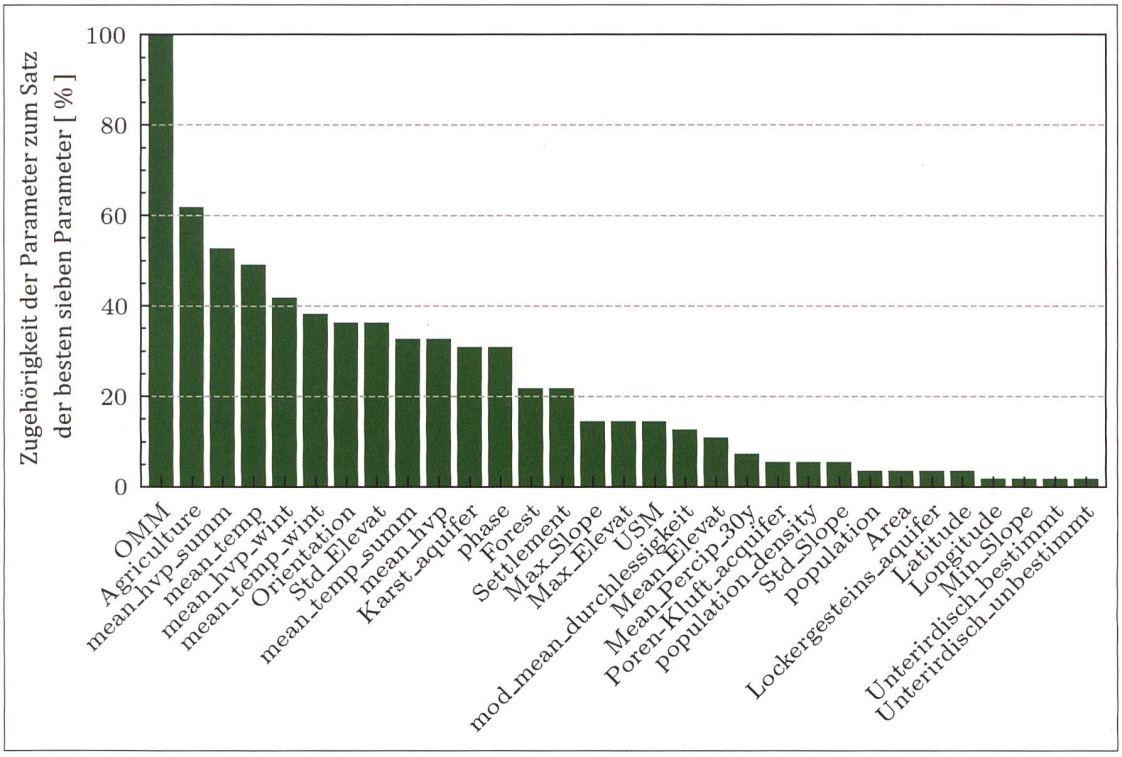

Bild 5: Zugehörigkeit zum Parametersatz der sieben «besten» Parameter.

MLR für alle EZG zu dem Satz der «besten» sieben Parameter gehört, sind auch Parameter der Landnutzung («Agriculture», «Forest», «Settlement»), der Temperatur («mean_temp», «mean_temp_winter») bzw. der potenziellen Evapotranspiration («mean_hvp_summ», «mean_hvp_winter») und weitere EZG-spezifische Parameter («orientation», «Std_Elevation» etc.) für die Abschätzung des Q_{347} mit MLR wichtig. Dagegen spielen viele Parameter (vgl. *Tabelle 1*) keine Rolle. Diese Parameterverteilung zeigt die Heterogenität der wichtigsten Einflussfaktoren für die Abschätzung des Q_{347}-Wertes auch innerhalb der räumlichen Nähe des Untersuchungsgebiets.

4. Regressionsmodelle zur Abschätzung des Q_{347} für unbeobachtete EZG

Für die Abschätzung des flächenbezogenen Q_{347} Wertes eines unbeobachteten EZG, werden drei MLR-Modelle (M1 – M3), in Kombination mit zwei Methoden zur Anpassung verkürzter Zeitreihen (plus keiner Anpassung) vorgeschlagen und mit den herkömmlichen Modellen verglichen. Die implizierte Methodik wird im Folgenden kurz beschrieben.

4.1 Vorgeschlagene Modelle der MLR

M1: «starke» lineare Regression

Bei der «starken» Regression wird ein lineares Regressionsmodell für alle beobachteten EZG mit den sieben «besten» Parametern bestimmt. Da auch dieses Modell Schätzfehler, d. h. Abweichungen der Beobachtungen von der Schätzlinie haben, können robustere Abschätzungen durch eine Simulation der linearen Regression unter Berücksichtigung der Variabilität der Beobachtungen erreicht werden *(Pavia D., 2022)*. Hierfür wird eine Anzahl dieser Schätzfehler zufällig ausgewählt, mit dem Schätzwert aufaddiert und ein «Ensemble» gebildet. Der Mittelwert der Aggregation der simulierten, «starken» Q_{347}-Werte ergibt die neue Abschätzung für das EZG.

M2: Übernahme der MLR vom beobachteten EZG

Das Modell mit den «besten» sieben Parametern und den hergeleiteten Regressionskoeffizienten der Abschätzung für das nächste, unterstromige und beobachtete EZG wird für die Abschätzung des unbeobachteten (Teil-) EZG übernommen. Dieses, auf eine Abflussmessstation bezogene Modell wird folglich für die Abschätzung aller ihm untergeordneten EZG angewendet. Existiert für das unbeobachtete EZG kein gemessenes EZG, so erfolgt die Schätzung mit dem «besten» Regressionsmodell des gesamten Untersuchungsgebietes.

M3: Clustering der EZG

Dieser Ansatz identifiziert «ähnliche» EZG im gesamten Untersuchungsgebiet anhand ihrer Eigenschaften mit der «Random Forest»-Methode *(Tyralis H, 2019)*. Die Ähnlichkeit der EZG anhand der 39 Parameter *(Tabelle 1)* wird mit einer Ähnlichkeitsmatrix bewertet, die an den Enden der Entscheidungsbäume erstellt wird. Sie ist eine Distanzmatrix und stellt die «räumliche» Nähe der Datenpunkte im Parameterraum dar. Dieser Parameterraum wird in drei Gruppen («Cluster») eingeteilt, damit eine ausreichende Anzahl von EZG in jedem «Cluster» sind. Für jeden «Cluster» wird nun ein Regressionsmodell mit den «besten» Parametern erstellt. Die unbeobachteten EZG werden aufgrund ihrer Ähnlichkeit einem der drei «Clustern» zugeteilt und das jeweilige Modell wird zur Abschätzung des Q_{347}-Wertes verwendet.

4.2. Zeitliche Anpassung für verkürzte Messreihen

Eine bedeutende Quelle der Unsicherheit zur Abschätzung des Q_{347}-Wertes sind die verkürzten Messreihen des Abflusses der beobachteten EZG. Das Problem wird in *Bild 6* dargestellt, wofür aus langjährigen Messreihen die Daten aus zufällig ausgewählten Jahren eliminiert, der Q_{347}-Wert erneut berechnet und der relative Fehler bestimmt wurde.

Bild 6 zeigt, dass die Anzahl der verwendeten Daten aus einer Messreihe einen starken Einfluss auf die Bestimmung des Q_{347}-Wertes für beobachtete EZG haben. Wenn die Zeitreihe verkürzt ist, dann wird tendenziell der Q_{347}-Wert überschätzt und der relative Fehler kann einer breiten Streuung unterliegen. Je länger die verwendete Zeitreihe allerdings ist, desto kleiner wird die Überschätzung und die Streuung.

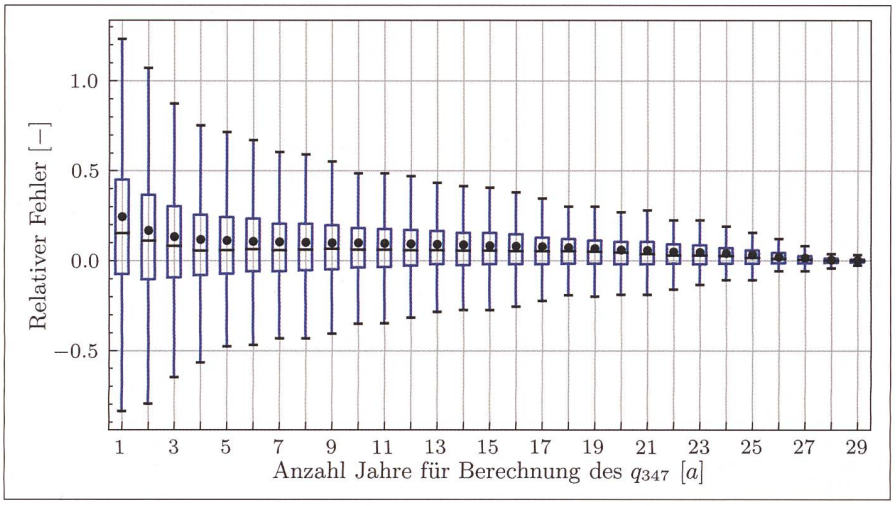

Bild 6: Relativer Fehler der Berechnung des Q_{347} in Abhängigkeit der verwendeten Jahresdaten.

Da viele Messstationen des Abflusses im Untersuchungsgebiet nur verkürzte Messreihen aufweisen, werden den drei Regressionsmodellen (M1 – M3) keine und zwei Methoden (API, HEZG) zur Anpassung der Messreihen des Abflusses vorgeschaltet.

API: Anpassung mit dem Vorregen

Diese Methode verwendet die Abschätzungen des Vorregens (API) um die Dauerkurven anzupassen und das geschätzte Q_{347} als 95-Prozent-Überschreitungsquantil zu korrigieren. Der Vorregen beschreibt hierbei das «Gedächtnis» des EZG und ist ein Indikator für die Wasserverfügbarkeit. Die Methode *(Ridolfi, E.; Kumar, H.; Bárdossy, A., 2020)* erweitert die Dauerlinie des Abflusses um die fehlenden Jahre, indem sie aus den bekannten Dauerlinien des Vorregens die Überschreitungswahrscheinlichkeit des entsprechenden Vorregens gleich der Überschreitungswahrscheinlichkeit des Abflusses der gemessenen Zeitperiode setzt. Der entsprechende Abflusswert wird dann dem Überschreitungsquantil des Vorregens des fehlenden Jahres zugeordnet *(Bild 7)*.

HEZG: Anpassung über die unterstromige Abflussmessstation

Die zweite Methode zur Anpassung verwendet die nächste unterstromige Messstation des Abflusses des Haupteinzugsgebietes (HEZG) als Referenz zur Korrektur des Q_{347} *(Laaha & Blösch, 2007)* des EZG mit gemessener, verkürzter Zeitreihe. Es multipliziert dabei den Quotienten des Q_{347} aus der gemessenen (gem.) mit der gesamten (tot.) Zeitperiode des HEZG mit dem gemessenen Q_{347}-Wert des EZG. Es gilt:

$$q_{347,\mathrm{tot.}}(\mathrm{EZG}) = q_{347,\mathrm{gem.}}(\mathrm{EZG}) \cdot \frac{q_{347,\mathrm{gem.}}(\mathrm{HEZG})}{q_{347,\mathrm{tot.}}(\mathrm{HEZG})}$$

Ein Nachteil dieser Anpassung ist das Vorhandensein eines HEZG mit Abflussmessungen über die gesamte Zeitperiode.

4.3 Vergleichsmodelle

Zum Vergleich der neuen, vorgeschlagenen Regressionsmethoden wurde das Regressionsmodell des «BAFU» *(Aschwanden H., Kan C., 1999)* mit der definierten Zonierung innerhalb der Schweiz und das einfache «1-2-3»-Modell (d. h. Zuordnung des Abflusses für «Siedlung» = $1^{L}/_{s \cdot km^2}$, «Landwirtschaft» = $2^{L}/_{s \cdot km^2}$, «Wald» = $3^{L}/_{s \cdot km^2}$) für die Abschätzung des Q_{347} verwendet.

5. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Genauigkeit der Abschätzung des Q_{347} der drei vorgeschlagenen Regressionsmodelle (in neun Kombinationen) und der zwei Vergleichsmodelle wurde zunächst für die beobachteten EZG evaluiert, und dann auf die unbeobachteten EZG der «Einzugsgebietsgliederung Schweiz» («Basisgeometrien») im Kanton Solothurn angewendet.

5.1 Validation der Modelle

Die untersuchten Modelle wurden an den 56 beobachteten EZG validiert: dazu wurden die Q_{347}-Werte jeweils für ein bestimmtes EZG abgeschätzt und mit dem beobachteten Wert verglichen. Die Abweichung (oder: Fehler) zwischen modellierten und beobachteten Werten wurde mit drei Zielfunktionen bewertet: dem linearen Korrelationskoeffizienten (Kor.), dem mittleren Fehler (ME) und dem mittleren prozentualen Fehler (MPE) *(Tabelle 2)*.

Die Validation zeigt gute Ergebnisse für die vorgeschlagenen Modelle «M1» – «M3», solange keine oder eine Anpassung mit dem API vorgenommen wird. Der MPE beträgt für diese Modelle zwischen 45 Prozent und 62 Prozent. Zudem können sie einen guten linearen Zusammenhang (Kor.) des Q_{347}-Wertes abbilden: ein hoher Q_{347}-Wert eines EZG wird auch als hoher Wert modelliert. Eine Anpassung mit dem unterstromigen HEZG zeigt hingegen sehr grosse Überschätzungen (ME), da die verkürzten Messreihen vieler EZG mit der regulierten und relativ kons-

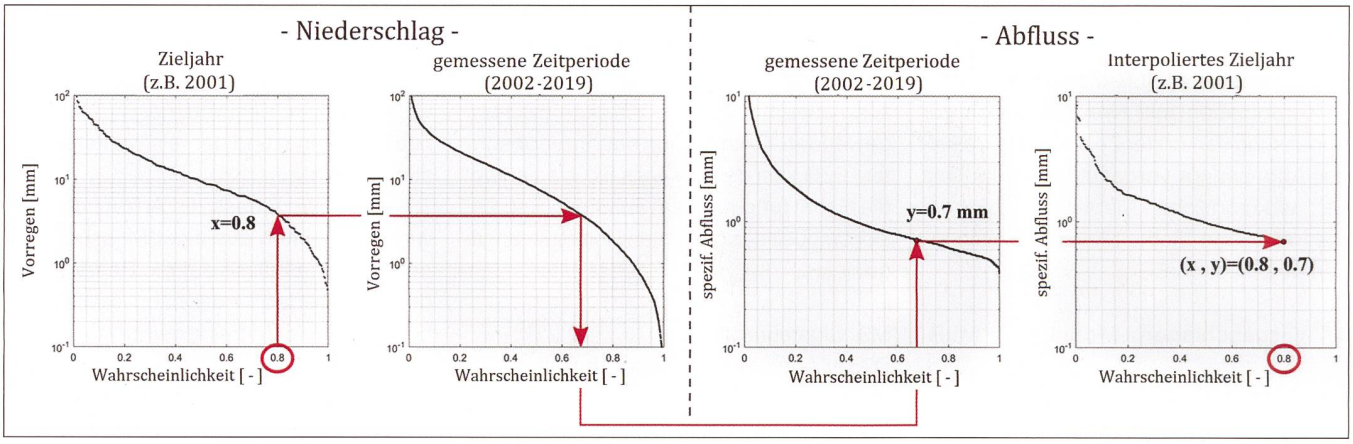

Bild 7: Systematik der Anpassung verkürzter Zeitreihen durch Vorregen (API) am Beispiel des 80-Prozent-Überschreitungsquantils (Quelle: Ridolfi et al., 2020).

Modelle:		M1			M2			M3			BAFU	1-2-3
Zielfunktion:		keine	API	HEZG	keine	API	HEZG	keine	API	HEZG	*Vergleich*	
Kor.	[-]	**0,77**	**0,73**	-0,24	0,61	**0,65**	-0,29	0,46	0,37	-0,13	0,16	-0,27
ME	[L/skm²]	**0,03**	0,08	12,50	-0,06	**-0,02**	12,52	**-0,03**	0,30	5,83	-0,23	-0,75
MPE	[%]	**45**	**47**	858	59	58	1045	**55**	62	416	109	58

Tabelle 2: Ergebnis der Validation an den beobachteten EZG (in Fett: «beste» drei Zielfunktionen).

tanten Abflussganglinie der unterstromigen grossen HEZG korrigiert wurden.

Die Vergleichsmodelle «BAFU» und «1-2-3» tendieren zu Unterschätzungen (ME) des Q_{347}-Wertes und können nur schwache lineare Zusammenhänge (Kor.) reproduzieren. Das «BAFU»-Modell hat einen hohen MPE = 109 Prozent, während das «1-2-3»-Modell nur einen mittleren Fehler von 58 Prozent aufweist. Allerdings reproduziert das einfache «1-2-3»-Modell nicht die Variabilität der Q_{347}-Werte.

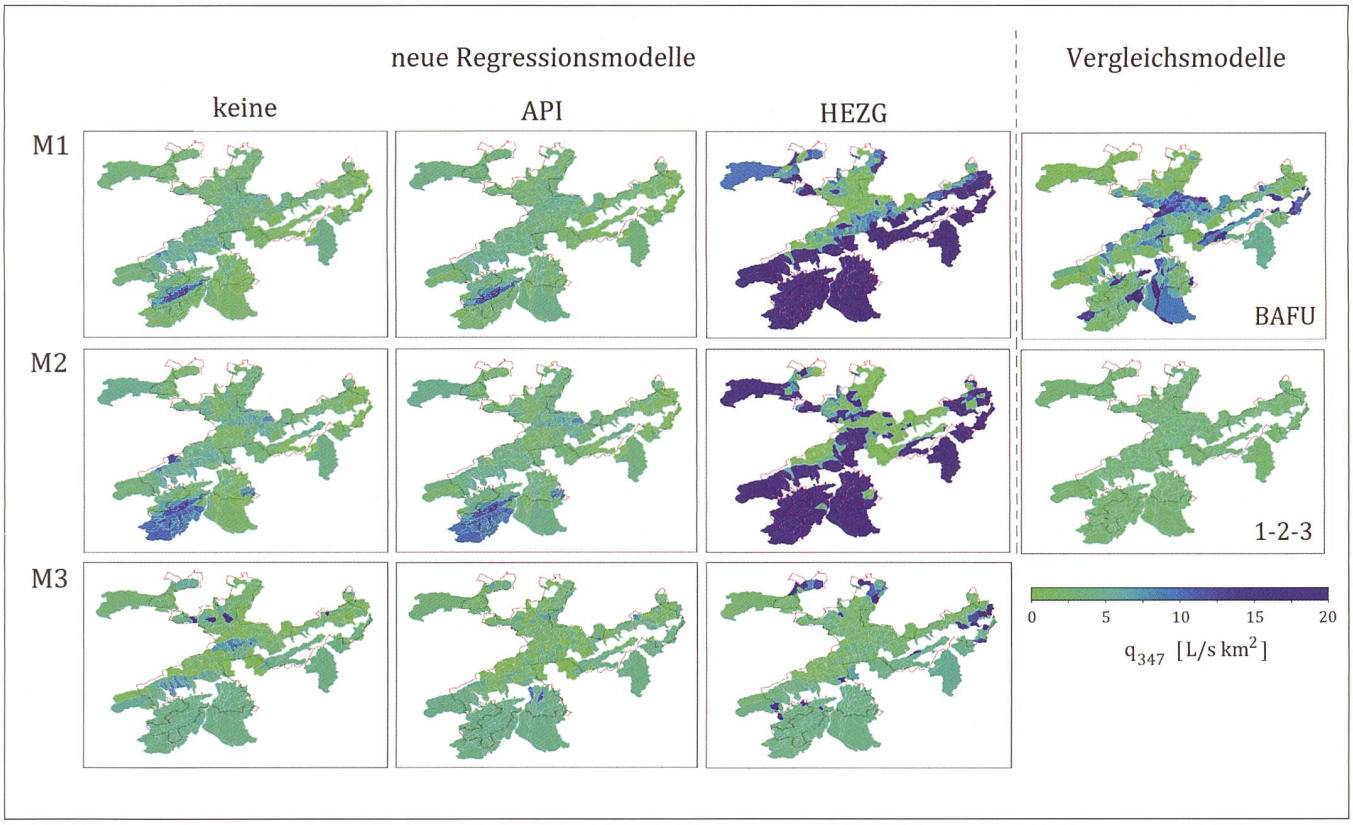

Bild 8: Räumliche Darstellung des Q_{347} -Wertes für die «Einzugsgebietsgliederung Schweiz» für neun vorgeschlagene und zwei Vergleichsmodelle. Weisse EZG bedeuten «nicht modelliert», weil reguliert oder Kanäle.

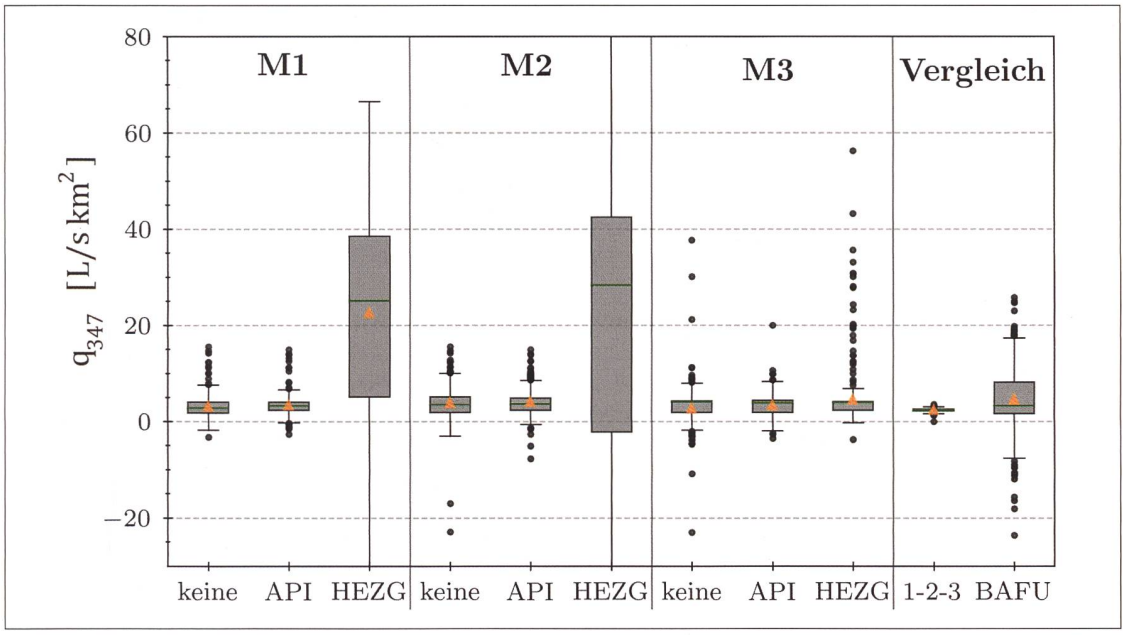

Bild 9: Verteilung der Q_{347}-Werte für die verschiedenen (Regressions-) Modelle.

5.2 Anwendung auf «Einzugsgebietsgliederung Schweiz»

Der Q_{347}-Wert der 383 unbeobachteten EZG der «Einzugsgebietsgliederung Schweiz» («Basisgeometrie») wurde für alle Modelle und Kombinationen berechnet. Die räumliche Verteilung der abgeschätzten Q_{347}-Werte ist in *Bild 8* und deren statistische Verteilung als jeweiliger Boxplot in *Bild 9* dargestellt.

Alle vorgeschlagenen Modelle mit «keiner» oder einer Anpassung mit «API» generieren eine ähnliche, räumlich gleichmässige Verteilung der Q_{347}-Werte, wobei im Südwesten des Untersuchungsgebietes, d.h. für die alpinen Fliessgewässer, tendenziell höhere Werte abgeschätzt werden *(Bild 8)*. Diese gleichmässigere Verteilung wird durch eine geringere Streuung in den jeweiligen Boxplots *(Bild 9)* widergespiegelt. Da die «M2»-Modelle die optimierten Parameter des jeweilig beobachteten EZG verwenden, ist diese zusätzliche kleinskalige Information in der räumlichen Verteilung zu erkennen. Auch modellieren diese Regressionsmodelle nur für relativ wenige EZG einen negativen Q_{347}-Wert, der anschliessend gleich Null gesetzt werden muss. Die «Cluster» der «M3»-Modelle können räumlich zu vereinzelten hohen Abschätzungen des Q_{347}-Wertes führen (siehe «M3-keine», *Bild 8*). Eine Anpassung der verkürzten Abflussmessreihen mit dem HEZG führt zu grossen Werten und Streuungen des Q_{347}. Die Stauhaltungen des unterstromigen HEZG der Aare führen zu «flacheren» Dauerlinien, einem überhöhtem Q_{347} und somit zu grossen Überschätzungen für das oberstromige EZG. Von einer weiteren Verwendung der Anpassung mit dem HEZG wird daher abgesehen.

Das Regressionsmodell des «BAFU» birgt eine grössere Streuung als die vorgeschlagenen Modelle («M1» bis «M3», jeweils mit «keiner» oder «API»-Anpassung), hat räumlich sehr heterogene Q_{347}-Werte und produziert relativ viele negative Werte. Dies erklärt sich daraus, dass das Untersuchungsgebiet drei der fünf Zonen (d.h. «Jura», «westliches» und «zentrales Mittelland»; siehe *Aschwanden H., 1999*) mit jeweils konstanten Parametern und Regressionskoeffizienten umschliesst. Diese grobe räumliche Einteilung lässt den Q_{347}-Wert aller EZG innerhalb einer Zone von den Werten der vorgegebenen Parameter innerhalb eines EZG abhängen und führt somit zu räumlicher Heterogenität und breiten Streuungen. Das «1-2-3»-Modell mit der fixen Zuteilung gemäss der Landnutzung hat eine sehr geringe (räumliche) Variabilität der Q_{347}-Werte, da es die hydrologischen und geologischen Einflussfaktoren nicht erfasst.

5.3 Schlussfolgerungen

Die Häufigkeit von Niedrigwasserereignissen unter einem definierten Schwellenwert nahm über die letzten 30 Jahre systematisch zu. Die Zunahme der Niedrigwassertage führt zu grossen Fehlern in der Abschätzung des Q_{347}-Wertes, vor allem wenn dessen Abschätzung auf verkürzten Zeitreihen basiert. Konsekutive Niedrigwassertage, d.h. Niedrigwasserperioden, haben in der Nordwestschweiz die grössten Eintrittswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit ihrer Dauer im immer späteren Sommer. Des Weiteren ist der 10-jährige Q_{347}-Wert in den gletscherfreien EZG des Untersuchungsgebietes über die letzten 30 Jahre systematisch gesunken. Da vor dem Hintergrund des stetigen Klimawandels weitere Veränderungen des Abflussverhaltens zu erwarten sind, könnte die Definition «Niedrigwasser» durch einen fixen Schwellenwert mit der Beschreibung der Ereignisdauer und der Unterschreitungsintensität erweitert werden, um diese auch gesetzlich relevanten Ereignisse zielgenauer zu charakterisieren.

Die vorgeschlagenen Regressionsmodelle «M1», «M2» und «M3» in Kombination mit «keiner» oder einer Anpassung der verkürzten Messreihen mit Informationen des Vorregens («API»), verbessern die Abschätzung des Q_{347}. Sie identifizieren EZG-spezifische, dominierende Parameter, reduzieren den Schätzfehler, die Streuung der Abschätzungen und führen zu gleichmässigeren räumlichen Verteilungen. Diese Vorteile resultieren aus der höheren räumlichen und EZG-charakteristischen Anpassung der Modelle und der zeitlichen Erweiterung durch Informationen aus dem Vorregen. Diese Abschätzungen können, in Kombination mit mobilen Messkampagnen während Niedrigwasserperioden, eine genauere Umsetzung der gesetzlichen Massnahmen für unbeobachtete EZG ermöglichen.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden finanziert vom Amt für Umwelt des Kantons Solothurn. Wir danken zusätzlich dem Bundesamt für Umwelt (BAFU), Meteoschweiz, Dept. Verkehr und Umwelt-Hydrometrie (AG), Bodenmessnetz NWCH, den kantonalen Fachstellen BL & BE, Agroscope, Universität Basel, Météo-France, GVBL, wunderground, Meteocentrale und Swiss Topo für die Bereitstellung der erforderlichen Daten.

Quellen:

Ahmed, S. und de Marsily, G.: «Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity», Water Resources Research (WRR), (23), S. 1717-1737, 1987.

Aschwanden, H. und Kan, C.: «Die Abflussmenge Q_{347} – Eine Standortbestimmung», Eidgenössisches Departement des Innern – Landeshydrologie und -geologie, Hydrologische Mitteilungen Nr. 27, Bern, 1999.

Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (GSchG): Art. 4h, 814.20, https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/de (Stand am 01.Januar 2022), zugegriffen am 04.Juli 2022, Schweiz, 1991.

Laaha, G. und Blöschl, G.: «A comparison of low flow regionalisation methods – catchment grouping», Journal of Hydrology (323), 193 – 214, 2005.

Lebrenz, H. und Bárdossy, A.: «Geostatistical interpolation by quantile kriging», Hydrology and Earth System Sciences (HESS), S. (23), 1633-1648, 2019.

Matheron, G.: «Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature», Ph.D. thesis, Université de Paris, Paris, 1965

Naef, F., Margreth, M. und Floriancic, M.: «Festlegung von Restwassermengen: Q_{347}, eine entscheidende, aber schwer zu fassende Grösse», Wasser Energie Luft, Jg. 107, 2015.

Pavia Santolamazza, D.: «Event-Based Flood Estimation using a Random Forest Algorithm for the Regionalization in Small Catchments», Ph.D. thesis, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, Eigenverlag, Heft 294, Stuttgart, 2022.

Ridolfi, E., Kumar, H., Bárdossy, A.: « A methodology to estimate flow duration curves at partially ungauged basins», Hydrological Earth Science System (HESS), 24, 2043-2060, https://doi.org/10.5194/hess-24-2043-2020, 2020.

Tyralis, H., Papacharalampous, G., Langousis, A.: «A Brief Review of Random Forests for Water Scientists and Practitioners and Their Recent History in Water Resources», Water, 11(5), 910, https://doi.org/10.3390/w11050910, 2019.

VSA, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute: «VSA-Richtlinie Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter», https://vsa.ch/fachbereiche-cc/siedlungsentwaesserung/regenwetter, Glattbrugg, Schweiz, 2021.

Autorinnen und Autoren:

Yanick Dups[1], Dr. Daniela Pavia Santolamazza[1], Dr. Philipp Staufer[2], Prof. Dr. Henning Lebrenz[1]

[1] Fachhochschule Nordwestschweiz, FB «Wasserbau und Wasserwirtschaft», IBAU, Hofackerstrasse 30, 4132 Muttenz

[2] Amt für Umwelt des Kanton Solothurn, Werkhofstrasse 5, 4500 Solothurn