

Simon Schick, Ole Rössler und Rolf Weingartner

Saisonale Abflussprognosen für mittelgroße Einzugsgebiete in der Schweiz – Möglichkeiten und Grenzen hydrologischer Persistenz

Seasonal runoff predictions for mesoscale catchments in Switzerland – Potentials and limitations of hydrologic persistence

Eine zuverlässige Prognose des Abflusses in saisonalen Zeiträumen verbessert die Planungssicherheit in Bereichen, die direkt von der Ressource Wasser abhängig sind. Aufgrund der heutzutage noch geringen Güte numerischer Niederschlags- und Temperaturvorhersagen für längerfristige Prognosehorizonte ist das Ziel dieser Studie, Grenzen und Möglichkeiten von saisonalen Abflussprognosen mittels eines Persistenzmodells zu evaluieren. Vorhersagen von Persistenzmodellen basieren auf dem Zustand des Einzugsgebietes zum Zeitpunkt der Prognoseausgabe und unter der Annahme einer hydrologischen Erhaltungsneigung, ohne dass Wetter- oder Klimavorhersagen berücksichtigt werden.

Um regionale und zeitliche Unterschiede der Prognosegüte zu analysieren, werden saisonale Vorhersagen für 18 repräsentative Einzugsgebiete der Schweiz und für 24 Prognosezeitpunkte innerhalb des Kalenderjahres ausgewertet. Saison ist dabei als Zeitraum von 91 Tagen definiert und die Prognosegüte für den saisonalen Mittelwert wird mittels Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) beurteilt. Positive NSE-Werte bedeuten, dass die Prognosen besser sind, als wenn die langjährigen saisonalen Mittelwerte für die Vorhersagen verwendet würden. Die Ergebnisse zeigen, dass a) alpine Einzugsgebiete aufgrund der Bedeutung der Kryosphäre für den Abfluss am häufigsten eine positive NSE aufweisen, b) neben dem Frühling und Frühsommer in vielen Einzugsgebieten auch im Frühwinter die NSE positiv ist und c) in den übrigen Jahreszeiten langjährige Mittelwerte oftmals die besseren Vorhersagen liefern (negative NSE).

Schlagwörter: Hydrologische Erhaltungsneigung, hydrologische Persistenz, Prognosegüte, saisonale Abflussprognosen, Schweiz

Credible runoff predictions at seasonal time scales enhance planning reliability in economic sectors dealing with water resources. Given that numerical forecasts of precipitation and temperature for longer-term prediction horizons still exhibit substantial uncertainties, the aim of this study is to evaluate potentials and limitations of seasonal runoff predictions generated by a persistence model. Predictions from persistence models are based on the catchment's condition at the time of the forecast and assume hydrological preservation without considering weather or climate forecasts.

Focusing on regional and temporal differences of prediction accuracy, seasonal runoff predictions are evaluated for 18 representative catchments in Switzerland as well as 24 prediction dates within the calendar year. The term season is defined as a period of 91 days, while prediction accuracy for seasonal mean values is assessed using the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Positive NSE values indicate that the model outperforms predictions solely based on long term seasonal mean values. The results show that a) alpine catchments most frequently display positive NSE values due to the cryosphere's impact on runoff, b) in addition to spring and early summer, NSE values in various catchments are also positive in early winter and c) in other seasons, long-term means often prove to be the better predictions (negative NSE).

Keywords: Hydrologic persistence, hydrological preservation, prediction accuracy, seasonal runoff prediction, Switzerland

1 Einleitung

Längerfristige Abflussprognosen (Monat, Saison, Jahr) können helfen, die verfügbaren Wasserressourcen abzuschätzen und zum Beispiel in der Elektrizitätswirtschaft oder Binnenschifffahrt entsprechend zu planen (BFG 2008). Bereits in den 1950er Jahren wurden für Einzugsgebiete in der Schweiz Langfristprognosen realisiert (z.B. VISCHER & JENSEN 1978, LANG et al. 1993). Diese beruhen auf linearen Regressionsmodellen unter der Annahme einer hydrologischen Erhaltungsneigung. Dabei wird – ausgehend von einer Abschätzung der vorhandenen Wasserreserven im Einzugsgebiet – eine Prognose erstellt, ohne Wetter- oder Klimaprognosen miteinzubeziehen (sog. Persistenzmodell, MAURER & LETTENMAIER 2003).

Nach einer Phase ohne nennenswerte Forschungsbemühungen sind längerfristige Abflussprognosen in der Schweiz erst in den letzten Jahren wieder aufgegriffen worden. FELDER & WEINGARTNER (2011) haben für den Rhein bei Basel gezeigt,

dass einem trockenen, warmen Frühling meist ein unterdurchschnittliches Abflussmittel im Sommer folgt. FUNDEL et al. (2013) haben für die Thur die Vorhersagbarkeit von Niedrigwasser analysiert: Während sich Dauer und kumuliertes Defizit bezüglich eines Schwellenwertes für einen Prognosehorizont von einem Monat oft eingrenzen lassen, ist die Vorhersage des Eintrittsdatums nach wie vor sehr schwierig.

Die methodischen Ansätze für saisonale Abflussprognosen lassen sich exemplarisch an der Entwicklung der Vorhersagepraxis in den USA nachvollziehen: Seit Mitte der 1930er Jahre werden auf der Basis von statistischen Modellen Vorhersagen der Abflussvolumina im Frühling und Sommer ausgegeben (PAGANO et al. 2014). In den 1990er Jahren sind im Rahmen des sogenannten Ensemble Streamflow Prediction-Ansatzes (ESP) hydrologische Simulationsmodelle eingeführt worden – bis heute der Prototyp vieler saisonaler Abflussvorhersagesysteme. Dabei wird ein hydrologisches Simulationsmodell in einem ersten Schritt bis zum Prognosezeitpunkt angetrieben, um den initialen hydrologi-

schen Zustand des Einzugsgebietes abzubilden. Ausgehend von diesem Zustand wird in einem zweiten Schritt das Modell mit einem Ensemble von meteorologischen Beobachtungsreihen weiter angetrieben und die resultierenden Abflussganglinien zu einer Prognose zusammengefasst. Bis heute werden beide Ansätze verwendet, denn statistische Modelle sind bezüglich Rechenzeit effizienter sowie einfacher in der Anwendung; Simulationsmodelle hingegen können mit kürzeren Zeitreihen kalibriert werden und sind flexibler in der Integration neuer Datenquellen wie etwa Satellitenbilder zur Abschätzung der Schneebedeckung (PAGANO et al. 2009, WOOD & LETTENMAIER 2006).

Gegenwärtig werden zudem hybride Ansätze (z.B. ROBERTSON et al. 2013) diskutiert, um die Vorteile beider Ansätze zu nutzen. Auch der Einbezug von saisonalen Klimavorhersagen ist eine prüfenswerte Option, da auf globaler Ebene große Fortschritte erzielt worden sind (GODDARD et al. 2001). Für Zentraleuropa sind die Prognosen jedoch noch mit großen Unsicherheiten behaftet (KIM et al. 2012a, KIM et al. 2012b, WEISHEIMER & PALMER 2014): Für die Temperatur, welche hinsichtlich saisonaler Abflussvorhersagen speziell in alpinen Einzugsgebieten während der Schneeeakkumulation und -schmelze eine wichtige Größe ist, wird zwar ein schwaches Prognosesignal erreicht; für den Niederschlag, der bezüglich Abflussprognosen auch in den schneefreien Jahreszeiten von zentraler Bedeutung ist, ist ein Prognosesignal aber kaum vorhanden.

In Anknüpfung an VISCHER & JENSEN (1978) sowie FELDER & WEINGARTNER (2011) konzentriert sich die vorliegende Studie auf die Frage, wo und wann in der Schweiz eine saisonale Abflussprognose mittels hydrologischer Persistenz möglich ist. Der Fokus liegt damit auf einer umfassenden Analyse von regionalen und zeitlichen Unterschieden in der Prognosegüte. Zu diesem Zweck werden mittelgroße Einzugsgebiete ausgewählt, welche das hydrologische Spektrum der Schweiz gut wiedergeben, und

die Prognosen systematisch über das ganze Kalenderjahr verteilt. Der Vorhersagezeitraum (im Folgenden „Zielsaison“) beträgt 91 Tage und die Zielgröße ist der Mittelwert des Abflusses während dieser 91 Tage.

Der Artikel gliedert sich folgendermaßen: In Kapitel 2 werden zuerst die Untersuchungsgebiete vorgestellt. Anschließend wird die Wahl des Datensatzes, die Modellierung sowie die Bestimmung der Prognosegüte erläutert (Kapitel 3). In Kapitel 4 werden wichtige Aspekte der Modellanpassung anhand zweier Fallbeispiele genauer betrachtet und die regionalen und zeitlichen Unterschiede der Prognosegüte in der Übersicht gezeigt. Kapitel 5 schließlich diskutiert die Resultate.

2 Untersuchungsgebiete

Die Wahl der Einzugsgebiete beruht auf den folgenden drei Kriterien:

1. Die Fläche beträgt zwischen 100 km² und 2.000 km²; die einzelnen Einzugsgebiete repräsentieren dabei typische Abflussregimes (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992), womit gewährleistet wird, dass das Modell für verschiedene hydrologische Verhältnisse getestet werden kann.
2. Der mittlere Jahresgang des Abflusses auf Monatsbasis ist natürlich oder naturnah (MARGOT et al. 1991).
3. Für den Zeitraum 1961–2010 ist eine Messreihe von täglichen Abflussmitteln vorhanden.

Abbildung 1 zeigt die 18 ausgewählten Einzugsgebiete, welche sich grob vier Regionen zuweisen lassen: Im Jura (rosa) finden sich ausgedehnte und ergiebige Karstgrundwasserkörper; es dominieren pluviale oder nivo-pluviale Abflussregimes. Einzugsgebiete im Mittelland (braun) sind hauptsächlich niederschlagsgesteuert (pluviale Abflussregimes) und es überwiegen Lockergestein- und Kluftgrundwasserleiter. In den Voralpen (violett) nimmt die Bedeutung der Schneekomponente zu und es treten nivo-pluviale oder nivale Abflussregimes auf; die Grundwasserkörper sind sehr heterogen aufgebaut: Lockergestein-, Kluft- und Karstgrundwasser. Die Einzugsgebiete im Alpenraum (blau) schließlich haben im Frühsommer aufgrund der Schneeschmelze ein ausgeprägtes Abflussmaximum – bis auf die Lütischine sind sie allerdings nicht oder lediglich gering vergletschert. Hier findet sich Kluft- und Karstgrundwasser (BAFU 2009, WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992). Einzugsgebiete auf der Alpensüdseite können nicht berücksichtigt werden, weil der Abfluss dort sehr stark anthropogen geprägt ist.

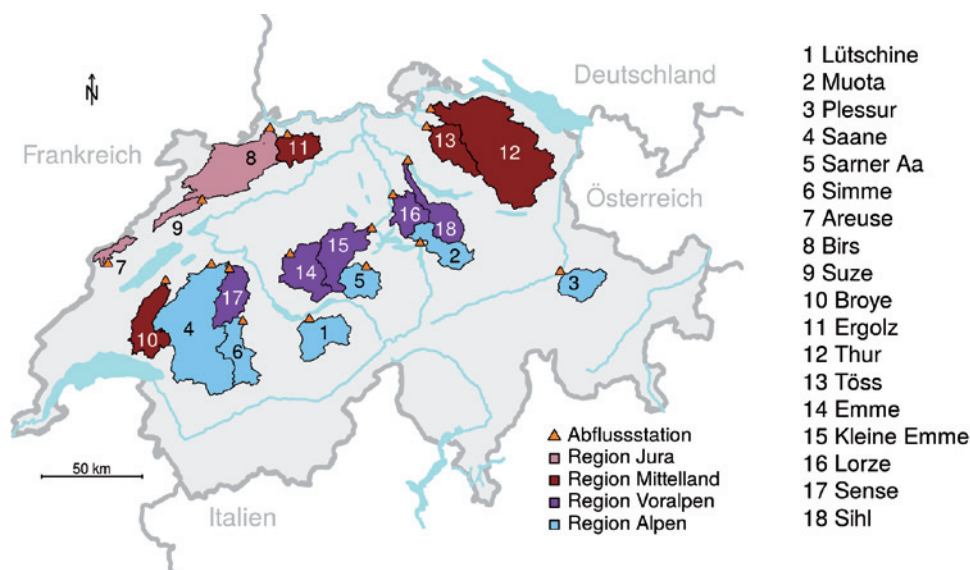


Abbildung 1

Ausgewählte Einzugsgebiete, geordnet nach den Regionen Jura (rosa), Mittelland (braun), Voralpen (violett) und Alpen (blau).
Selected catchments, classified according to the regions Jura (rose), plateau (brown), pre-alpine (purple) and alpine (blue).

3 Methode

Lineare Regressionsmodelle haben zwei attraktive Eigenschaften: Ihre Anpassung ist bezüglich

benötigter Rechenleistung effizient und die Regressionskoeffizienten sind mathematisch einfach zu interpretieren. Zwar sind hydrometeorologische Prozesse auf stündlicher oder täglicher Zeitskala oftmals nicht-linear, aber mit zunehmender Länge des betrachteten Zeitraums nimmt auch der Grad der Linearität zu (WANG 2006). Vor diesem Hintergrund sowie in Anlehnung an VISCHER & JENSEN (1978) und FELDER & WEINGARTNER (2011) wird in der vorliegenden Studie ein lineares Regressionsmodell verwendet, wobei die Regressionskoeffizienten nach dem Partial Least Squares-Ansatz (WOLD et al. 2001) bestimmt werden. Das Regressionsmodell wird sowohl für jedes Einzugsgebiet als auch für jede Zielsaison separat angepasst, wobei jeweils drei Fünftel des Datensatzes zur Modellanpassung verwendet werden, um mit den verbleibenden zwei Fünfteln die Prognosen zu validieren (JOLLIFFE & STEPHENSON 2012; S. 214).

3.1 Datensatz

Die Datengrundlage beschränkt sich je Einzugsgebiet auf Zeitreihen von Abfluss, Lufttemperatur und Niederschlag in täglicher Auflösung für die Periode 1961–2010. Andere Prediktoren wie zum Beispiel Schneewasseräquivalente oder Grundwasserpegel sind nicht für alle Einzugsgebiete verfügbar. Sie werden nicht miteinbezogen, um die regionale Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Abflussreihen stammen aus dem Stationsmessnetz des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), die Lufttemperatur- und Niederschlagsreihen aus den Rasterdatensätzen TabsD respektive RhiresD des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz). Für jedes Einzugsgebiet wird das Gebietsmittel der Lufttemperatur und die Summe des Gebietsniederschlags auf täglicher Basis berechnet.

Die verwendete Version von TabsD und RhiresD weist eine räumliche Auflösung von rund 2 Kilometer auf. Die methodischen Grundlagen für TabsD finden sich in FREI (2014) und für RhiresD in FREI & SCHÄR (1998) sowie FREI et al. (2006); für eine technische Produktspezifikation sei auf die entsprechende Internetseite der MeteoSchweiz verwiesen (METEOSCHWEIZ 2013a, 2013b). Wie MeteoSchweiz betont, können die Werte einzelner Gitterzellen aufgrund von Inhomogenitäten in den Messreihen oder aufgrund kleinräumiger Effekte, die vom Interpolationsalgorithmus nicht aufgelöst werden, von den tatsächlichen Werten abweichen. Mit zunehmender räumlicher Aggregation wird ein möglicher Fehler einzelner Gitterzellen jedoch ausgemittelt; zusätzlich findet in der vorliegenden Studie eine zeitliche Aggregation statt und ein systematisch additiver oder multiplikativer Fehler (Bias) ist im Falle von Regressionsmodellen unproblematisch, da dieser über die Regressionskoeffizienten kompensiert wird.

Wie bereits erwähnt, werden saisonale Klimaprognosen nicht berücksichtigt – zum einen sind deren Unsicherheiten für Europa groß, zum anderen ihre räumliche Auflösung für die vorliegenden mittelgroßen Untersuchungsgebiete nicht genügend.

3.2 Lineares Regressionsmodell

Persistenzmodelle bilden den initialen hydrologischen Zustand des Einzugsgebietes, das heisst Bodenfeuchte, Grundwasserstand, Eis- und Schneereserven, Fluss- sowie Seepiegel, zum Zeitpunkt der Prognoseausgabe ab und verwenden keine Wetter- oder Klimaprognosen. In der vorliegenden Studie wird der initiale hydrologische Zustand indirekt durch die hydrometeorologische Vorgeschichte parametrisiert und linear mit dem Abflussmittel der Zielsaison in Beziehung gesetzt:

$$Q_{\text{Zielsaison}} = b_0 + b_1 \cdot Q_{\text{Vorgeschichte}} + b_2 \cdot T_{\text{Vorgeschichte}} + b_3 \cdot P_{\text{Vorgeschichte}} + e \quad (1)$$

Q:	mittlerer Abfluss	[m³/s]
T:	mittlere Lufttemperatur	[°C]
P:	Summe Gebietsniederschlag	[mm]
b ₀ :	Achsenabschnitt	
b ₁ –b ₃ :	Regressionskoeffizienten	
e:	Residuum	[m³/s]

Für den Prediktanden $Q_{\text{Zielsaison}}$ beträgt der Aggregationszeitraum 91 Tage. Für die Prediktoren $Q_{\text{Vorgeschichte}}$, $T_{\text{Vorgeschichte}}$ und $P_{\text{Vorgeschichte}}$ wird die Länge der berücksichtigten Vorgeschichte, die im Folgenden „Aggregationsperiode“ genannt wird, mit einer Korrelationsanalyse bestimmt. Hierbei wird die Rangkorrelation nach Spearman für jeden Prediktor mit dem Prediktanden bestimmt, wobei die Aggregationsperioden von 10, 20, 30 etc. bis 360 Tage geprüft werden. Sowohl der Prediktand als auch die Prediktoren werden vor Bestimmung der Regressionskoeffizienten standardisiert. Einerseits werden die Prediktoren damit bei der Schätzung der Regressionskoeffizienten mittels Partial Least Squares gleich gewichtet (WOLD et al. 2001, S. 113), andererseits werden auch die Regressionskoeffizienten zwischen den verschiedenen Zielsaisons und Einzugsgebieten vergleichbar und der Achsenabschnitt b_0 in Gleichung (1) entfällt.

Sei X eine $n \times p$ Matrix bestehend aus n Beobachtungen und p Prediktoren und sei der $n \times 1$ Vektor y der Prediktand. Ähnlich der Hauptkomponentenanalyse wird nun gemäß Partial Least Squares X in latente Vektoren (Scores) zerlegt, allerdings unter gleichzeitiger Berücksichtigung von y . Dies geschieht in einem iterativen Verfahren: Der erste Score s_1 ist eine Linearkombination der Spaltenvektoren in X , wobei die Gewichte so gewählt werden, dass der quadrierte Korrelationskoeffizient von s_1 und y sowie die Varianz von s_1 maximiert werden (HASTIE et al. 2009, S. 81). Die nun von s_1 in y und X erklärte Varianz wird von y respektive X subtrahiert und für die so erhaltenen Residuen (der nicht erklärte Anteil Varianz in y und X) der zweite Score s_2 bestimmt. Analog werden die nächsten Scores berechnet, üblicherweise bis die Anzahl Scores der Anzahl Spalten in X entspricht.

Mittels Kreuzvalidierung wird entschieden, welche der ersten a Scores $s_{1,\dots,a}$ im Modell verbleiben. Sind diese bestimmt, lassen sich schließlich die Regressionskoeffizienten für die ursprünglichen Prediktoren in Gleichung (1) zurückrechnen. Werden alle Scores $s_{1,\dots,p}$ verwendet, entsprechen die Regressionskoeffizienten der Ordinary Least Squares Lösung. In der vorliegenden Studie ist festgesetzt, dass immer mindestens der erste Score s_1 im Modell enthalten ist. Der Partial Least Squares-Ansatz empfiehlt sich insbesondere, wenn zahlreiche, stark korrelierte und fehlerbehaftete (noisy) Prediktoren vorliegen. Die Robustheit des Ansatzes hat jedoch ihren Preis: Standardfehler und Konfidenzintervalle können im Gegensatz zum Ordinary Least Squares-Ansatz (noch) nicht analytisch hergeleitet werden (s. MEVIK & WEHRENS 2007 für eine praktische Einführung in die verwendete Software).

In der vorliegenden Studie ist festgesetzt, dass immer mindestens der erste Score s_1 im Modell enthalten ist – andernfalls würde sich die Vorhersage auf den Mittelwert des Prediktanden beschränken.

3.3 Bestimmung der Prognosegüte

Um die zeitliche Variation der Prognosegüte zu berücksichtigen, erfolgt die Prognoseausgabe jeweils für den 1. und 15. Tag jedes

Monats, womit sich 24 Zielsaisons innerhalb des Kalenderjahres ergeben. Für ein spezifisches Einzugsgebiet und eine spezifische Zielsaison gliedert sich die Validierung in drei Schritte:

1. Bestimmung der Aggregationsperioden und Regressionskoeffizienten mit den Daten der Jahre 1961–1990 (Trainingsset bestehend aus 30 Jahren).
2. Validierung der Prognosen für die Jahre 1991–2010 (Testset bestehend aus 20 Jahren) gemäß Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE, s. Gleichung (2)).
3. Wiederholung der Schritte 1 und 2, indem zufällig 30 Jahre der Periode 1961–2010 dem Trainingsset zugewiesen werden; die verbleibenden 20 Jahre dienen wiederum der Validierung („Jahr“ orientiert sich hier nicht zwingend an der Definition des Kalenderjahres, um die zeitliche Kontinuität von Prediktoren und Zielsaison zu gewährleisten).

Das Resampling in Schritt 3 wird insgesamt 50 mal wiederholt, womit für jedes Einzugsgebiet $24 \cdot (1+50) = 1.224$ Regressionsmodelle angepasst und validiert werden. Mit dem Resampling soll die Abhängigkeit der Modellanpassung und Prognosegüte von der Datengrundlage berücksichtigt werden, also zum Beispiel eine unterschiedliche Varianz des Prediktanden im Trainings- und Testset. Die Anzahl Wiederholungen des Resamplings ist dabei ein Erfahrungswert, da sich nach 50 Wiederholungen die Mediane von Aggregationsperioden, Regressionskoeffizienten sowie der Prognosegüte kaum mehr verändern. Mit einem Vorzeichentest (zweiseitig, $n = 51$, $\alpha = 0,05$) wird schließlich jeweils die Nullhypothese geprüft, ob der Median der 51 NSE-Werte einer Zielsaison gleich Null ist.

Die NSE ist für Beobachtungen o und entsprechende Vorhersagen p definiert als (NASH & SUTCLIFFE 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (2)$$

Die NSE kann Werte im Intervall $(-\infty, 1]$ annehmen, wobei $NSE=1$ fehlerlosen Vorhersagen entspricht. Eine $NSE=0$ wird erreicht, wenn repetitiv der Mittelwert der Beobachtungen (sog. Klimatologie) vorhergesagt wird – dies entspricht einer naiven Vorhersagestrategie und wird gemeinhin als Prüfmarke für die Prognosegüte eines Modells betrachtet. Folglich sind positive NSE-Werte erstrebenswert, da in diesem Falle das Modell Abweichungen von der Klimatologie zumindest in einigen Fällen mit dem korrekten Vorzeichen vorhersagen kann.

4 Resultate

Bevor mit dem in Kapitel 3.3 erläuterten Validierungsexperiment eine räumlich und zeitlich differenzierte Übersicht der Prognosegüte gezeigt wird (Kapitel 4.2), werden wichtige Aspekte der Modellanpassung und Vorhersagen anhand zweier Einzugsgebiete vorgestellt (Kapitel 4.1): Die Ergolz und Plessur sind bezüglich ihrer Fläche zwar sehr ähnlich (rund 260 km²), gehören aber unterschiedlichen Abflussregimes an – während die Ergolz pluvial geprägt ist, gilt die Plessur als nivales Einzugsgebiet.

Zur Vereinfachung wird im Folgenden die Notation JFM für die Zielsaison Januar bis März, mJFMMA für die Zielsaison Mitte

Januar bis Mitte April etc. verwendet. Für die nachfolgenden Boxplots gilt zudem, dass die Whisker maximal das 1,5-fache des Interquartilabstandes umfassen.

4.1 Fallbeispiel Ergolz und Plessur

Abbildung 2 zeigt die mittels Korrelationsanalyse bestimmten Aggregationsperioden der drei Prediktoren Abfluss (Q), Temperatur (T) und Niederschlag (P) für die 24 Zielsaisons. Lange Aggregationsperioden bedeuten dabei, dass die Prediktoren die klimatischen Bedingungen beschreiben, während kurze Aggregationsperioden eher den Momentanwert des Prediktors zum Zeitpunkt der Prognoseausgabe wiedergeben. Insbesondere für den Prediktor Temperatur lässt sich beobachten, dass die Aggregationsperioden meist stark streuen – die Whisker in Abbildung 2 umfassen oft den ganzen Wertebereich von 10 bis 360 Tagen. Dies legt den Schluss nahe, dass der Zusammenhang zwischen dem Prediktor Temperatur und dem Prediktanden eher schwach ist. Ausnahmen finden sich zum Beispiel für die Vorhersagen des Sommers bei der Plessur, für welche häufig das Temperaturmittel der letzten 300 bis 360 Tage verwendet wird. Neben einer geringeren Streuung haben die Prediktoren Abfluss und Niederschlag im Vergleich zur Temperatur auch einen ausgeprägteren Jahresverlauf.

Bei der Ergolz scheinen für die Frühjahrs- und Herbstprognose die Momentanwerte von Abfluss und Niederschlag die hydrologischen Initialbedingungen zu bestimmen, wohingegen im Sommer und Winter eher Jahresmittelwerte, also lange Aggregationsperioden, verwendet werden. Bei der Plessur können die frühlommerlichen und sommerlichen Abflüsse am besten durch die Aggregation von winterlichem Niederschlag und Temperatur erklärt werden – die konstant zunehmenden Aggregationsperioden

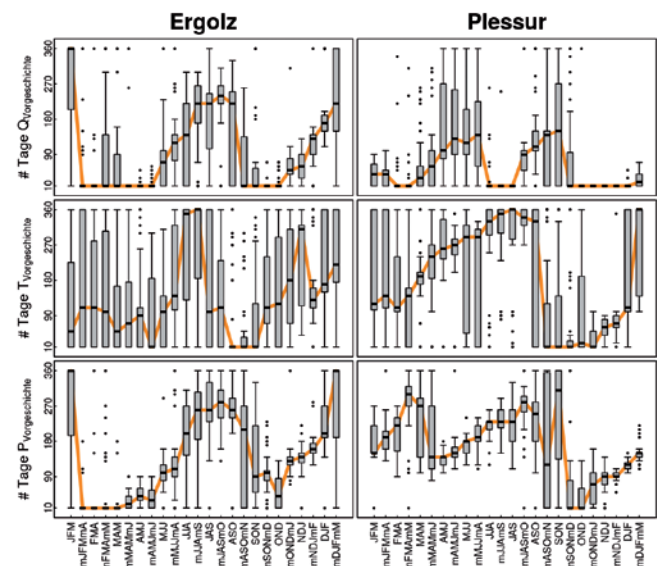


Abbildung 2

Aggregationsperioden in Anzahl Tagen pro Prediktor und Zielsaison (Q: Abfluss, T: Temperatur, P: Niederschlag). In orange sind die Mediane verbunden; $n=51$. Die Streuung der Aggregationsperioden ergibt sich aus dem Resampling.

Predictors underlying aggregation periods expressed in number of days for each target season (Q: runoff, T: temperature, P: precipitation). The orange line highlights the median; $n=51$. The aggregation periods vary due to resampling.

den sind ein Indiz hierfür. Im Spätherbst sind es wie bei der Ergolz hauptsächlich Momentanwerte, was wiederum auf den Einfluss des kurzfristigen Wettergeschehens hindeutet.

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, sind die Regressionskoeffizienten für die Prediktoren Abfluss und Niederschlag in der Regel positiv, wohingegen sie für den Prediktor Temperatur meist negativ sind. Im Allgemeinen streuen die Regressionskoeffizienten für den Prediktor Temperatur am stärksten um Null, was sich auch mit den großen Streuungen der Aggregationsperioden deckt (Abb. 2). Während sich für die Ergolz kaum ein jahreszeitlicher Verlauf der Regressionskoeffizienten findet, zeigen sich bei der Plessur Abhängigkeiten von der Zielsaison: Für Vorhersagen im Frühjahr erklären die Prediktoren Niederschlag und Temperatur mehr Varianz als in den übrigen Jahreszeiten. Der Prediktor Abfluss hingegen scheint tendenziell für die Vorhersage des Spätsommers und Frühwinters die höchste Erklärungskraft aufzuweisen.

Die Vorzeichen und der jahreszeitliche Verlauf der Regressionskoeffizienten sind physikalisch plausibel: Je größer die Wasserreserven im Einzugsgebiet zum Prognosezeitpunkt sind, desto mehr Abfluss ist in der Zielsaison zu erwarten. Die Niederschlagssumme sowie das Abflussmittel der Vorgeschichte sind damit ein Indikator für die Wasserreserven, das Temperaturmittel der Vorgeschichte ein Indikator für Schneeeakkumulation respektive -schmelze. Dies zeigt sich bei der alpinen und damit thermisch gesteuerten Plessur deutlicher als bei der pluvial geprägten Ergolz.

In Abbildung 4 werden die beobachteten und prognostizierten Mittelwerte der 24 Zielsaisons (und damit 24 verschiedene Modellanpassungen) verglichen, wenn als Trainingsset die Jahre 1961–1990 verwendet werden. Deutlich zu sehen sind die unterschiedlichen Abflussregimes der zwei Einzugsgebiete. Während die Plessur einen ausgeprägten jahreszeitlichen Verlauf aufweist, finden sich für die Ergolz große interannuale Unterschiede. Auffällig ist bei Betrachtung des prozentualen Fehlers, dass benachbarte Prognosen oft das gleiche Vorzeichen haben und der Fehler damit eine gewisse Erhaltungsneigung aufweist. Zudem werden bei der Ergolz hohe Werte tendenziell unterschätzt, tiefe Werte werden oft überschätzt; bei der Plessur wird die Variabilität der Beobachtungen besser abgedeckt.

Die Prognosegüte gemäß NSE zeigt Abbildung 5: Bei der Ergolz sind die Mediane meist negativ, lediglich für die Zielsaison mNDJmF findet sich ein signifikant positiver

Median. Anders bei der Plessur: Mit Ausnahme der Prognosen für Saisons im Herbst sind in der Regel positive Mediane zu beobachten; die höchsten Mediane sind in den Zielsaisons AMJ und DJF zu verzeichnen (0,52 respektive 0,62). Insgesamt ist die

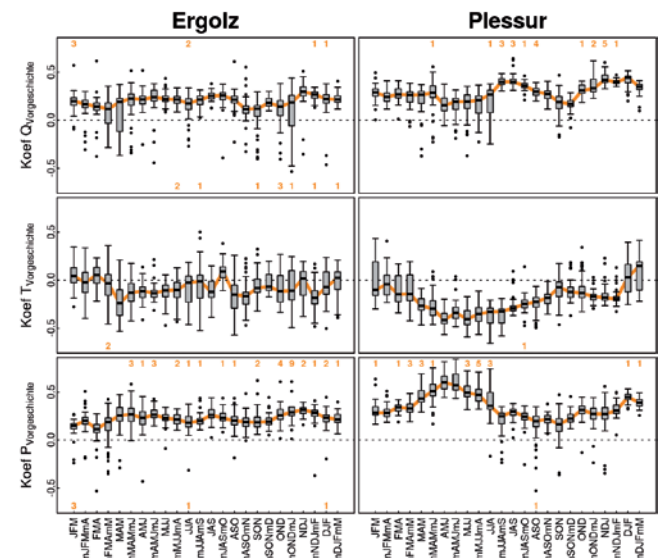


Abbildung 3

Regressionskoeffizienten pro Prediktor (Q: Abfluss, T: Temperatur, P: Niederschlag) und Zielsaison für standardisierte Modellvariablen. In orange sind die Mediane verbunden; $n = 51$. Die Ziffern bezeichnen die Anzahl nicht gezeigter Ausreißer, welche von $-1,3$ bis $1,7$ reichen.
Regression coefficients per predictor (Q: runoff, T: temperature, P: precipitation) and target season in case of standardized model variables. The orange line highlights the median; $n = 51$. The digits indicate the number of not shown outliers ranging from -1.3 to 1.7 .

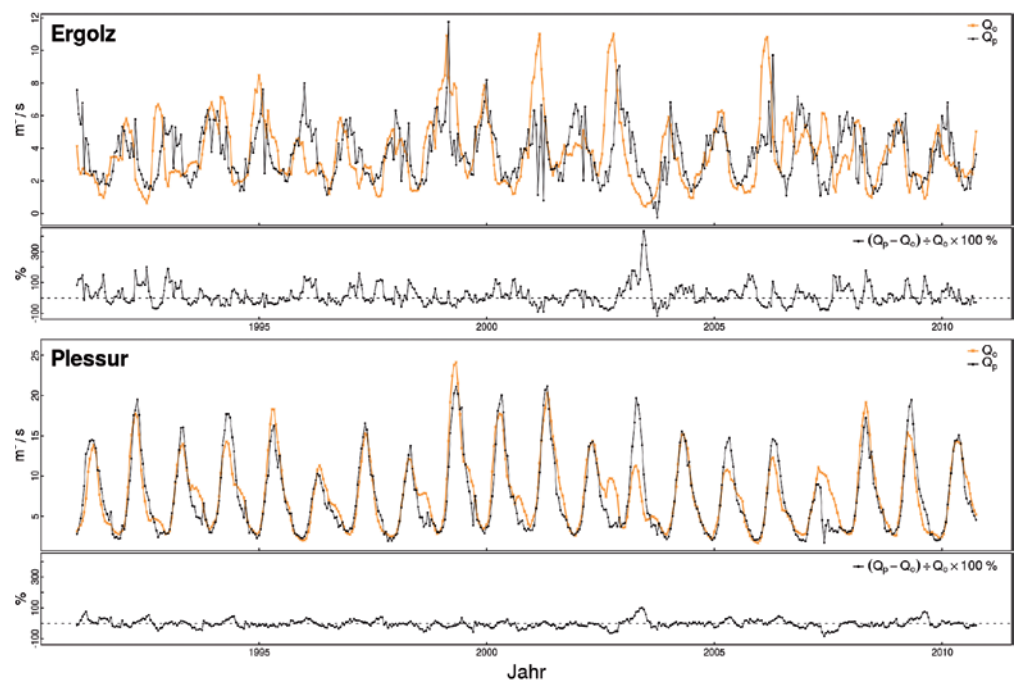


Abbildung 4

Beobachtete (Q_o) versus vorhergesagte (Q_p) saisonale Mittelwerte sowie prozentuale Fehler für die 24 verschiedenen Zielsaisons (und damit 24 Modellanpassungen); die Modelle sind mit Daten der Periode 1961–1990 angepasst.
Observed (Q_o) and predicted (Q_p) seasonal mean runoff as well as percent error for all 24 analyzed target seasons (hence 24 model fits); models are fitted with data from the period 1961–1990.

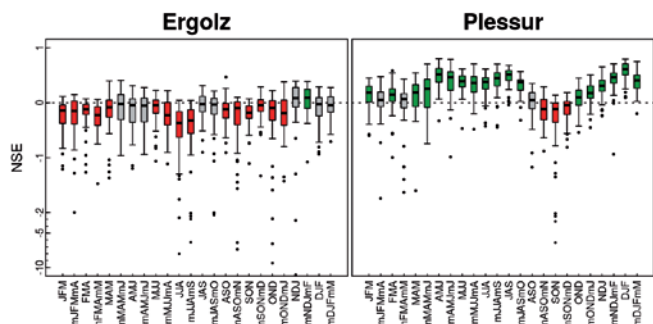


Abbildung 5

NSE-Werte pro Zielsaison. Grüne Boxen haben einen positiven, rote Boxen einen negativen Median; kann die Nullhypothese Median=0 mittels Vorzeichentest (zweiseitig, $n=51$, $\alpha=0,05$) nicht zurückgewiesen werden, ist die Box grau eingefärbt. Man beachte, dass die y-Achse zwei unterschiedliche Skalenbereiche aufweist.

NSE values per target season. Green boxes indicate a positive median, red boxes indicate a negative median; if the null hypothesis median=0 cannot be rejected by means of a sign test (two sided, $n=51$, $\alpha=0.05$), the box is coloured grey. Please note that the y-axis is partitioned into two different scales.

Vorhersagegüte bei der nival geprägten Plessur damit besser, als wenn die Klimatologie als Prognose verwendet würde. Dies gilt nicht für die pluvial gesteuerte Ergolz.

4.2 Zeitliche und regionale Differenzen der Prognosegüte

Die zeitlichen und regionalen Unterschiede der Prognosegüte in der Übersicht zeigt Abbildung 6. Eingetragen sind die Mediane der NSE-Werte aus dem Resampling für alle Zielsaisons und Einzugsgebiete. Die Spannweite der Mediane reicht von -0,39

Tabelle 1

Prozentuale Verteilung der Fälle 1) Einzugsgebiete mit signifikant positivem NSE-Median, 2) Einzugsgebiete mit signifikant negativem NSE-Median, zusammengefasst für die meteorologischen Saisons. *Percentage of cases 1) catchments with significant positive NSE-median, 2) catchments with significant negative NSE-median and 3) catchments with NSE-median not differing from zero, summarized for the meteorological seasons.*

	MAM	JJA	SON	DJF
1) Median > 0	50 %	27 %	6 %	17 %
2) Median < 0	17 %	56 %	94 %	72 %
3) Median = 0	33 %	17 %	0 %	11 %

(Areuse, Zielsaison DJF) bis 0,62 (Plessur, wiederum Zielsaison DJF). In der zeitlichen Abfolge der Prognosegüte lassen sich im Wesentlichen vier Phasen unterscheiden: Während der Schneeschmelze im Frühling und Frühsommer (MAM bis mMJmM, Abb. 6 erste Zeile) sowie im Frühwinter (NDJ und mNDJmF in der dritten Zeile) bieten die Prognosen einen Mehrwert gegenüber einer Prognose mittels Klimatologie. Dies gilt hingegen in der Regel nicht für die Prognosen vom Sommer in den Herbst (JJA bis mONDmJ) und vom Winter in den Frühling (DJF bis mFMAMm). Eine Ausnahme ist jedoch die Plessur, für welche in der Zielsaison DJF die höchste NSE zu verzeichnen ist.

Für die vier meteorologischen Saisons ist in Tabelle 1 die prozentuale Verteilung der Fälle 1) Median signifikant positiv, 2) Median signifikant negativ und 3) Median nicht von Null verschieden aus Abbildung 6 (erste Spalte) zusammengefasst. Während im Frühling für die Hälfte aller Einzugsgebiete eine positive NSE erreicht

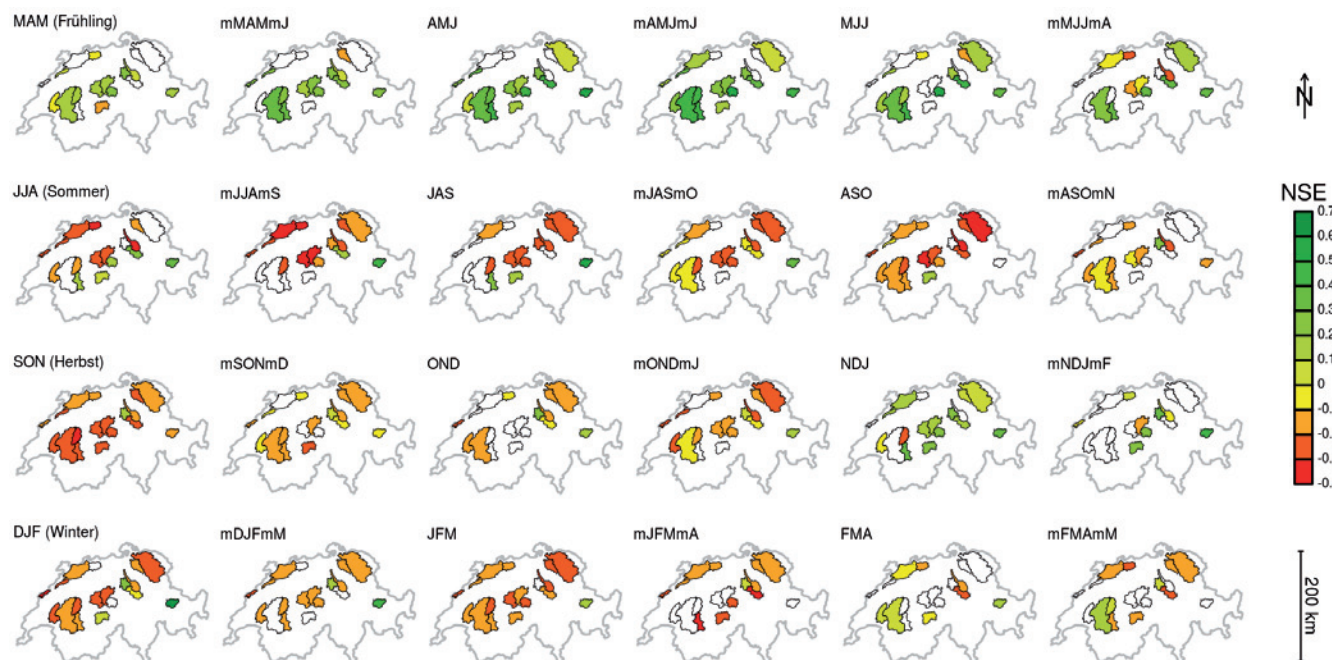


Abbildung 6

Median der 51 NSE-Werte pro Zielsaison und Einzugsgebiet. Kann die Nullhypothese Median=0 mittels Vorzeichentest (zweiseitig, $n=51$, $\alpha=0,05$) nicht zurückgewiesen werden, ist das Einzugsgebiet nicht eingefärbt.

Median of the 51 NSE values per target season and catchment. If the null hypothesis median=0 cannot be rejected by means of a sign test (two sided, $n=51$, $\alpha=0.05$), the catchment is left uncoloured.

Tabelle 2

Prozentuale Verteilung der Fälle 1) Zielsaison mit signifikant positivem NSE-Median, 2) Zielsaison mit signifikant negativem NSE-Median und 3) Zielsaison mit nicht von Null verschiedenem NSE-Median, zusammengefasst für die vier Regionen Jura, Mittelland, Voralpen und Alpen; n: Anzahl Einzugsgebiete pro Region
Percentage of cases 1) target seasons with significant positive NSE-median, 2) target seasons with significant negative NSE-median and 3) target seasons with NSE-median not differing from zero, summarized for the regions Jura, plateau, pre-alpine and alpine; n: number of catchments per region.

	Jura	Mittelland	Voralpen	Alpen
n	3	4	5	6
1) Median > 0	16 %	12 %	28 %	41 %
2) Median < 0	54 %	59 %	49 %	33 %
3) Median = 0	30 %	29 %	23 %	26 %

wird, verschwindet das Prognosesignal für den Herbst völlig. Im Sommer und Winter scheint zumindest für vereinzelte Einzugsgebiete eine Prognose möglich zu sein.

Die Unterschiede der Prognosegüte zwischen den vier Regionen sind weniger ausgeprägt als die zeitlichen Unterschiede. Muster sind in Abbildung 6 kaum erkennbar und selbst benachbarte Einzugsgebiete unterscheiden sich oftmals stark – die verschiedenen Grundwasserleiter und Abflussregimes (Kapitel 2) führen damit nicht zu einer offensichtlichen regionalen Differenzierung. Eine Ausnahme findet sich für die Zielsaisons JJA bis JAS, für welche einzig alpine Einzugsgebiete positive Mediane aufweisen. Die Einzugsgebiete Plessur und Lorze schließlich fallen durch eine überdurchschnittliche Prognosegüte auf: Die Anzahl signifikant positiver Mediane beträgt bei der Plessur 18 von 24 Zielsaisons, bei der Lorze 16.

Die Unterschiede zwischen den vier Regionen werden etwas deutlicher, wenn deren prozentuale Verteilung der Fälle 1) Median signifikant positiv, 2) Median signifikant negativ und 3) Median nicht von Null verschieden aus Abbildung 6 betrachtet wird (Tab. 2). Für Einzugsgebiete in den Voralpen und insbesondere Alpen sind die Prognosen vergleichsweise häufig (28 % respektive 41 %) besser als Vorhersagen mittels Klimatologie. In den Einzugsgebieten des Jura und Mittellandes ist durchschnittlich nur in 16 % respektive 12 % der 24 Zielsaisons eine Verwendung des Persistenzmodells sinnvoll. In rund 30 % der Fälle besteht kein signifikanter Unterschied zwischen dem Persistenzmodell und der simplen Mittelwertvorhersage, und zwar ungeachtet der Region.

5 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem gewählten Persistenzmodell im Durchschnitt in 75 % aller Zielsaisons keine signifikant besseren Vorhersagen erzielt werden als mittels Klimatologie ($NSE \leq 0$). Dieses Resultat ist auf zwei grundsätzliche Probleme von Persistenzmodellen zurückzuführen:

1. Einerseits kann die Parametrisierung des initialen hydrologischen Zustandes (hier mittels der Prediktoren Abfluss, Temperatur und Niederschlag) misslingen und
2. andererseits kann die hydrologische Erhaltungsneigung vom Klima während der Zielsaison überprägt werden.

ROBERTSON et al. (2013) betonen, dass eine Parametrisierung des initialen hydrologischen Zustandes mittels Beobachtungen von Abfluss oder Niederschlag in statistischen Modellen kritisch ist. Grundwasserkörper und Böden besitzen eine begrenzte Speicherkapazität – wird diese überschritten, sind Niederschlag und Abfluss ungeeignete Prediktoren, da dann die Vorfeuchte überschätzt wird. ROBERTSON et al. (2013) schlagen deshalb einen sogenannten hybriden Ansatz vor, in welchem der initiale hydrologische Zustand durch die Antreibung eines Simulationsmodells bis zur Prognoseausgabe abgebildet wird. Modellierter Bodenfeuchte oder Grundwasserstände können sodann als Prediktoren in statistischen Modellen verwendet werden.

Die Überprägung der hydrologischen Erhaltungsneigung wiederum ist nach Ansicht der Autoren im Vorzeichen des Vorhersagefehlers in Abbildung 4 beobachtbar: Sich folgende Prognosen haben oft das gleiche Vorzeichen im Fehler, obwohl das Modell für jeden Prognosezeitpunkt innerhalb des Kalenderjahres separat angepasst ist. Aus hydrologischer Sicht ergibt die gewählte Methodik insgesamt aber plausible Ergebnisse, wird doch der jahreszeitliche Abflussverlauf durch die Prognosen reproduziert (Abb. 4).

Wie bereits in anderen Studien (zum Beispiel PAGANO & GAREN 2004 für den Westen der Vereinigten Staaten oder ROHRER 1992 für alpine Einzugsgebiete in der Schweiz) zeigt sich auch im vorliegenden Artikel die Bedeutung von Schneeakkumulation im Winter und darauffolgender Schmelze im Frühjahr für die Güte von saisonalen Abflussprognosen. ROHRER (1992) weist aber darauf hin, dass sich durchaus auch alpine Einzugsgebiete in ihrer Eignung für saisonale Abflussprognosen unterscheiden können: Wichtige Faktoren sind das Verhältnis von Winter- zu Sommer-niederschlag, die Variabilität des Sommerniederschlags und der Grad der Vergletscherung.

Wird die Schneeschmelze in alpinen Einzugsgebieten während des Frühlings und Frühsommers ausgeklammert, sind saisonale Abflussprognosen mittels hydrologischer Persistenz wahrscheinlich nur zu einzelnen Zeitpunkten innerhalb des Kalenderjahres sinnvoll:

- Im Frühwinter wird die Abflusskonzentration verzögert, indem Niederschlag bereits häufig in Form von Schnee und Eis konserviert wird und damit die hydrometeorologische Vorgeschichte den darauffolgenden mittleren saisonalen Abfluss dominiert (Zielsaisons NDJ und mNDJmF in Abb. 6). WOOD & LETTENMAIER (2008) haben für ein schneedominiertes Einzugsgebiet einen ähnlichen Effekt beobachtet, weisen aber darauf hin, dass der Abfluss zu dieser Jahreszeit vergleichsweise tief ist und saisonale Prognosen für die Wasserwirtschaft damit von geringerem Nutzen sind.
- Die Grundwasserneubildung in Karst- und Kluft-Grundwasserleitern findet vornehmlich während intensiven Niederschlagsperioden im Winter und während der Schneeschmelze statt (BAFU 2009). Deshalb werden vermutlich für die Einzugsgebiete des Jura und Mittellandes in den Zielsaisons AMJ und mAMJmJ positive NSE-Werte erzielt (Abb. 6), obwohl die Schneeschmelze in diesen Regionen üblicherweise im April erfolgt oder bereits erfolgt ist (ROHRER et al. 1994). Analog kann für die positiven NSE-Werte alpiner Einzugsgebiete während den Zielsaisons JJA bis JAS argumentiert werden.
- Seen als träge Speicher in saisonalen Zeiträumen: Im Einzugsgebiet der Lorze befinden sich zwei relativ zur Einzugsgebietsfläche (259 km²) große Seen (38,3 km² und 7,2 km²).

Dies könnte die vergleichsweise hohe Prognosegüte bei der Lorze erklären, für welche selbst im Herbst positive NSE-Werte beobachtet werden können (Zielsaisons mASOMN bis OND in Abb. 6). In den übrigen Einzugsgebieten sind Seen (wenn überhaupt vorhanden) deutlich kleiner.

Gemäß MARGOT et al. (1991) werden die Sihl und die Sarner Aa unter den analysierten Einzugsgebieten am stärksten reguliert, gefolgt von der Muota, Saane und Lorze. Eine besonders tiefe Prognosegüte kann in diesen Einzugsgebieten allerdings nicht beobachtet werden – vermutlich werden damit regulative Eingriffe sowohl im Prediktor Abfluss als auch im Prediktanden durch die zeitliche Aggregation schlicht ausgemittelt.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

In der vorliegenden Studie wurden saisonale Abflussprognosen eines Persistenzmodells für 24 Zeitpunkte der Prognoseausgabe innerhalb des Kalenderjahres sowie 18 repräsentative Einzugsgebiete validiert. Während die Prognosen für den Frühling, Frühsommer sowie Frühwinter mehrheitlich besser sind als klimatologische Mittelwerte, gilt dies in den übrigen Jahreszeiten nur in Ausnahmefällen. Allgemein gelingen die Prognosen für alpine Einzugsgebiete am besten, da der jährliche Abflusszyklus zu weiten Teilen von Schnee dominiert ist. Interessanterweise ist der zeitliche Verlauf der Prognosegüte innerhalb des Kalenderjahres jedoch ausgeprägter als die Unterschiede zwischen den vier Regionen – das heisst, die Tendenz der Vorhersagbarkeit für einzelne Zielsaisons ist meist dieselbe ($NSE > 0$ versus $NSE < 0$). Neben einer akzentuierten Schneeakkumulation und -schmelze begünstigen vermutlich auch der Zeitpunkt der Grundwasserneubildung sowie (relativ zur Einzugsgebietsfläche) große Seen saisonale Abflussprognosen.

Solange saisonale Klimaprognosen für Europa noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind, ist die Abschätzung des initialen hydrologischen Zustandes des Einzugsgebietes unverzichtbar (BIERKENS & VAN BEEK 2009, SINGLA et al. 2012). In einer nächsten Studie werden die Autoren deshalb einerseits analysieren, wie die Parametrisierung des initialen hydrologischen Zustandes verbessert werden kann, und andererseits neue Modellkonzepte erarbeiten. Für die Prognose des Spätsommers, Herbstes und Spätwinters dürfte es aber schwierig bleiben, ohne zuverlässige saisonale Klimavorhersagen positive NSE-Werte zu erzielen.

Conclusion and Outlook

The present study has validated seasonal runoff predictions generated by a persistence model for 24 different dates of prediction within the calendar year and 18 representative catchments. While predictions for spring, early summer and early winter mostly outperform climatological means, the same applies to the remaining seasons in exceptional cases only. In general, predictions for alpine catchments are most successful as snow dominates large parts of the yearly runoff cycle. Interestingly, the temporal variation of prediction accuracy within the calendar year is more distinct than differences between the four regions, i.e. the tendency of predictability for specific target seasons is mostly the same ($NSE > 0$ versus $NSE < 0$). In addition to pronounced snow accumulation and melting, groundwater recharge date as well as (in relation to catchment area) big lakes presumably favour seasonal runoff predictions.

Whilst seasonal climate predictions have to deal with large uncertainties, estimating the initial hydrological condition of the catchment remains a crucial task (BIERKENS & VAN BEEK 2009, SINGLA et al. 2012). In a next study, the authors focus on how to improve the parametrization of the initial hydrological condition and also develop new model concepts. However, positive NSE values for predictions in late summer, autumn and late winter are likely to remain unachievable without reliable seasonal climate forecasts.

Hinweis: Anwendung der Methodik für Einzugsgebiete in der Schweiz unter www.sro.giub.unibe.ch.

Danksagung

Die meteorologischen Daten wurden von MeteoSchweiz, dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, und die hydrologischen Daten vom BAFU, dem Bundesamt für Umwelt, zur Verfügung gestellt.

Anschrift der Verfasser:

S. Schick
Dr. O. Rössler
Prof. Dr. R. Weingartner
Oeschger Zentrum für Klimafolgenforschung
Gruppe für Hydrologie
Geographisches Institut, Universität Bern
Hallerstrasse 12, 3012 Bern, Schweiz
simon.schick@giub.unibe.ch

Literaturverzeichnis

- BAFU (2009): Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004–2006. – Umwelt-Zustand Nr. 0903, Schweizerisches Bundesamt für Umwelt, Bern
- BFG (2008): Saisonale Vorhersagesysteme in Meteorologie und Hydrologie. Kolloquium am 10. Juni 2008 in Koblenz. – Bundesanstalt für Gewässerkunde, Veranstaltungen 4/2008; ISSN: 1866-220X
- BIERKENS, M.F.P. & L.P.H. VAN BEEK (2009): Seasonal Predictability of European Discharge: NAO and Hydrological Response Time. – *Journal of Hydrometeorology* 10 (4), 953–968; DOI: 10.1175/2009JHM1034.1
- FELDER, G. & R. WEINGARTNER (2011): Saisonale Abfluss-Prognose für den Rhein. – *Geosciences Actuel* 3, 8–13; ISSN: 1662-2480
- FREI, C. (2014): Interpolation of temperature in a mountainous region using nonlinear profiles and non-Euclidean distances. – *International Journal of Climatology* 34, 1585–1605; DOI: 10.1002/joc.3786
- FREI, C. & C. SCHÄR (1998): A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. – *International Journal of Climatology* 18, 873–900; DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(19980630)18:8<873::AID-JOC255>3.0.CO;2-9
- FREI, C., R. SCHÖLL, S. FUKUTOME, J. SCHMIDL & P.L. VIDALE (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. – *Journal of Geophysical Research* 111, D06105; DOI: 10.1029/2005JD005965
- FUNDEL, F., S. JÖRG-HESS & M. ZAPPA (2013): Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts

- and corresponding drought indices. – *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 395–407; DOI: 10.5194/hess-17-395-2013
- GODDARD, L., S.J. MASON, S.E. ZEBIAK, C.F. ROPELEWSKI, R. BASHER & M.A. CANE (2001): Current approaches to seasonal to interannual climate predictions. – *International Journal of Climatology* 21 (9), 1111–1152; DOI: 10.1002/joc.636
- HASTIE, T., R. TIBSHIRANI & J. FRIEDMAN (2009): *The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction.* – Springer Series in Statistics, 2nd edition; ISBN 978-0-387-84858-7
- JOLLIFFE, I.T. & D.B. STEPHENSON (2012): *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science.* – John Wiley & Sons Ltd., Chichester; ISBN: 978-0-470-66071-3
- KIM, H.-M., P.J. WEBSTER & J.A. CURRY (2012a): Seasonal prediction skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere Winter. – *Climate Dynamics* 39 (12), 2957–2973; DOI: 10.1007/s00382-012-1364-6
- KIM, H.-M., P.J. WEBSTER, J.A. CURRY & V.E. TOMA (2012b): Asian summer monsoon prediction in ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective seasonal forecasts. – *Climate Dynamics* 39 (12), 2975–2991; DOI: 10.1007/s00382-012-1470-5
- LANG, H., H. JENSEN, M.B. ROHRER, U. STEINEGGER & J.G. VIT (1993): 40 Jahre Zuflussprognosen für die Elektrizitätswirtschaft: Stand der Forschung und Ausblick. – *SEV/VSE Bulletin* 16, 11–16
- MARGOT, A., B. SCHÄDLER, R. SIGG & R. WEINGARTNER (1991): Beeinflussung der Fließgewässer durch Kraftwerke ($\geq 300\text{kW}$) und Seeregulierungen. – In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz, Ordner 2.* – Hrsg. von D. Bérod, M. Spreafico und R. Weingartner. – Schweizerisches Bundesamt für Umwelt; ISBN: 3-9520262-0-4
- MAURER, E.P., & D.P. LETTENMAIER (2003): Predictability of seasonal runoff in the Mississippi River basin. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (D16), 1–13; DOI: 10.1029/2002JD002555
- METEOSCHWEIZ (2013a): *Documentation of MeteoSwiss Grid-Data Products (TabsD).* – Stand: 6. Januar 2015; www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-temperatur/doc/ProdDoc_TabsD.pdf
- METEOSCHWEIZ (2013b): *Documentation of MeteoSwiss Grid-Data Products (RhiresD).* – Stand: 6. Januar 2015; www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-niederschlag/doc/ProdDoc_RhiresD.pdf
- MEVIK, B.-H. & R. WEHRENS (2007): The pls Package: Principal Component and Partial Least Squares Regression in R. – *Journal of Statistical Software* 18 (2), 1–24; ISSN: 1548-7660
- NASH, J.E. & J.V. SUTCLIFFE (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – a discussion of principles. – *Journal of Hydrology* 10, 282–290; DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- PAGANO, T. & D. GAREN (2004): Evaluation of Official Western U.S. Seasonal Water Supply Outlooks, 1922–2002. – *Journal of Hydrometeorology* 5, 896–909; DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0896:EOWUS>2.0.CO;2
- PAGANO, T.C., D.C. GAREN, T.R. PERKINS & P.A. PASTERIS (2009): Daily Updating of Operational Statistical Seasonal Water Supply Forecasts for the Western U.S. – *Journal of the American Water Resources Association* 45 (3), 767–778; DOI: 10.1111/j.1752-1688.2009.00321.x
- PAGANO, T., A. WOOD, K. WERNER & R. TAMA (2014): Western U.S. water supply forecasting: A tradition evolves. – *Eos, Transactions American Geophysical Union* 95 (3), 28–29; DOI: 10.1002/2014EO030007
- ROBERTSON, D.E., P. POKHREL & Q.J. WANG (2013): Improving statistical forecasts of seasonal streamflow using hydrological model output. – *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 579–593; DOI: 10.5194/hess-17-579-2013
- ROHRER, M.B. (1992): *Die Schneedecke im Schweizer Alpenraum und ihre Modellierung.* – Zürcher Geographische Schriften 49; ISBN: 3728119016
- ROHRER, M.B., U. STEINEGGER, A. FISCHER, H. JENSEN & H. LANG (1994): Räumlich-zeitliche Variation des Schneewasseräquivalentes der Schneedecke. – In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz, Ordner 1.* – Hrsg. von D. Bérod, M. Spreafico und R. Weingartner. – Schweizerisches Bundesamt für Umwelt; ISBN: 3-9520262-0-4
- SINGLA, S., J.-P. CÉRON, E. MARTIN, F. REGIMBEAU, M. DÉQUÉ, F. HABETS & J.-P. VIDAL (2012): Predictability of soil moisture and river flows over France for the spring season. – *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 201–216; DOI: 10.5194/hess-16-201-2012
- VISCHER, D. & H. JENSEN (1978): Langfristprognosen für den Rheinabfluss in Rheinfelden. – *Wasserwirtschaft* 68 (9), 259–264
- WANG, P. (2006): *Stochasticity, Nonlinearity and Forecasting of Streamflow Processes.* – Delft University Press; ISBN: 978-1-58603-621-8
- WEINGARTNER, R. & H. ASCHWANDEN (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. – In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz, Ordner 2.* – Hrsg. von D. Bérod, M. Spreafico und R. Weingartner. – Schweizerisches Bundesamt für Umwelt; ISBN: 3-9520262-0-4
- WEISHEIMER, A. & T.N. PALMER (2014): On the reliability of seasonal climate forecasts. – *Journal of the Royal Society* 11 (96), 1–10; DOI: 10.1098/rsif.2013.1162
- WOLD, S., M. SJÖSTRÖM & L. ERIKSSON (2001): PLS-regression: a basic tool of chemometrics. – *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 58, 109–130; DOI: 10.1016/S0169-7439(01)00155-1
- WOOD, A.W. & D.P. LETTENMAIER (2006): A test bed for new seasonal hydrologic forecasting approaches in the Western United States. – *Bulletin of the American Meteorological Society* 87 (12), 1699–1712; DOI: 10.1175/BAMS-87-12-1699
- WOOD, A.W. & D. P. LETTENMAIER (2008): An ensemble approach for attribution of hydrologic prediction uncertainty. – *Geophysical Research Letters* 35 (14), 1–5; DOI: 10.1029/2008GL034648