

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 96 (2004)
Heft: 1-2

Artikel: Trends in schweizerischen Abflussmessreihen
Autor: Birsan, Markus-Victor / Molnar, Peter / Pfaundler, Martin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939549>

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: 11.02.2026

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

Trends in schweizerischen Abflussmessreihen

Marius-Victor Birsan, Peter Molnar, Martin Pfaundler und Paolo Burlando

Zusammenfassung

Die mittleren täglichen Abflüsse jener schweizerischen Abflussmessstationen, deren Abflussregimes nicht durch wasserwirtschaftliche Massnahmen erheblich beeinflusst sind, wurden einer systematischen Trendanalyse unterzogen. Die in den Abflüssen festgestellten Trends wurden zum einen mit beobachteten Veränderungen des Niederschlags und der Temperatur verglichen, zum anderen mit Einzugsgebietscharakteristika in Beziehung gebracht. Die nach Jahreszeiten getrennt durchgeföhrten Analysen von Verschiebungen in den Verteilungen der Tagesabflüsse ergaben, dass sich das natürliche Abflussregime in der Schweiz seit 1961 merklich verändert hat. Dies liegt hauptsächlich an einem Anstieg des Jahresabflusses, der seinerseits seinen Ursprung in einem Anstieg der Abflüsse im Winter und Frühling hat, insbesondere mit einem Anstieg der winterlichen Maximalabflüsse (an etwa 60–70% der untersuchten Messstationen) und der mässigen bis niederen Abflüsse im Frühling. Ein eindeutiges räumliches Muster der Abfluss-trends konnte nicht beobachtet werden. Veränderungen im Niederschlag und der Temperatur – besonders hervorzuheben ist eine generelle Erwärmung mit einem deutlichen Anstieg der Anzahl Tage, welche eine Minimaltemperatur oberhalb der 0 °C-Grenze aufweisen – mögen in eine ursächliche Beziehung mit dem festgestellten Anstieg der Abflüsse im Winter und Frühling gebracht werden. Korrelationsanalysen deckten einen starken Zusammenhang zwischen den Abfluss-trends und der mittleren Einzugsgebiets-höhe, der Vergletscherung und dem Bedeckungsgrad mit Fels (positiv) und der mittleren Bodentiefe im Einzugsgebiet (negativ) auf. Dies lässt die Schlussfolge-rung zu, dass in Bezug auf Veränderungen des Abflussregimes alpine Einzugsge-biete am sensibelsten reagieren.

Résumé

L'article analyse de façon systématique les débits moyens journaliers d'un ensemble de stations mesures suisses, dont le régime hydrologique est peu influencé par des interventions conduites dans le cadre de la gestion des eaux. Les tendances identifiées dans les séries du débit ont été mises en relation avec les changements observés au niveau des précipitations et des températures. D'autre part, d'éventuelles relations entre les tendances du débit et les caractéristiques des bassins versants ont été explorées. L'analyse a été différenciée selon les saisons. Depuis 1961 le régime hydrologique naturel en Suisse a considérablement changé. Le débit annuel a connu une augmentation. Cette dernière est due à une croissance des écoulements en hiver et au printemps. Plus particulièrement cela se manifeste par une augmentation des débits maximaux en hiver (c'est le cas dans 60–70% des stations analysées) et des débits moyens faibles au printemps. Par contre, aucune structure spatiale cohérente des tendances du débit n'a pu être mise en évidence. L'hypothèse émise pour expliquer ces tendances est le changement des précipitations et des températures. Le fait le plus remarquable soutenant cette hypothèse est le réchauffement général, qui s'observe clairement à travers l'augmentation du nombre de jours dont la température minimale reste au-dessus de 0 °C. Des analyses de corrélation ont révélé l'existence d'une forte relation entre les tendances du débit et les caractéristiques suivantes des bassins versants: altitude moyenne, surface des glaciers, couverture des roches (effet positif), profondeur moyenne du sol (effet négatif). Par conséquent et en conclusion, les bassins versants alpins sont plus sujets aux changements du régime hydrologique.

Verhalten. Der Schwerpunkt in der Klimaforschung liegt dabei auf den ersten beiden Variablen. So zeigten beispielsweise Studien über Trends in beobachteten Tagesniederschlagsreihen, dass diese im Allgemeinen eine komplexe Funktion der klimatischen Umgebung, der Niederschlagsintensität und der Jahreszeit darstellen (siehe z.B. Karl und Knight, 1998; Osborn et al., 2000; Ventura et al., 2002). Im alpinen Umfeld der Schweiz gilt es als erwiesen, dass der Niederschlag – insbesondere der Winterniederschlag – im Verlaufe des letzten Jahrhunderts zugenommen hat (siehe z.B. Widmann und Schär, 1997; Frei und Schär, 2001). Unklar blieb jedoch, inwiefern diese Veränderungen das Abflussregime beeinflusst haben. Abfluss integriert quasi den Einfluss sämtlicher atmosphärischer Variablen über ein Einzugsgebiet hinweg. Somit besteht die berechtigte Annahme, dass bei konsistenten Veränderungen der Punktmessungen von Niederschlag und Lufttemperatur ein entsprechendes Signal auch im Abfluss auf der Einzugsgebietsebene erkennbar sein sollte. Als eine räumlich integrierende Variable stellt Abfluss für regionale Trendanalysen eigentlich eine attraktive Alternative zu den Punktmessungen des Niederschlages dar, welche eine hohe Variabilität in der räumlichen wie zeitlichen Dimension aufweisen. Umfassende Trendanalysen des Abflusses, welche in den USA (Lins und Slack, 1999; Groisman et al., 2001) und in Kanada (Zhang et al., 2001; Burn und Hag Elnur, 2002) durchgeführt wurden, zeigten, dass analog zum Niederschlag die Signifikanz von Trends in erheblichem Masse davon abhängt, welche Grösse des Abflusses und welche Jahreszeit betrachtet wird. Dabei wurden Verschiebungen in der Verteilung der Tagesabflüsse festgestellt, wobei je nach Quantil (Abflussbereich) unterschiedliches Verhalten in den unterschiedlichen Jahreszeiten gefunden wurde. Die Resultate dieser Studien zeigten klar, dass eine Analyse dieser Trends auf der Basis von Jahres- oder Monatsabflüssen nur ein sehr grobes, manchmal sogar irreführendes Bild ergibt. In den meisten Fällen hilft nur eine Überprüfung der Trends mittels einer höheren zeitlichen Auflösung von Tagesabflüssen, um die komplexen Veränderungen in den Abflussaufzeichnungen identifizieren zu können.

Einleitung

Einen Eckpfeiler der ganzen Klimavariabilitäts- und -veränderungsdiskussion bildet

die Untersuchung von Zeitreihen hydroklimatischer Messwerte wie z.B. Lufttemperatur, Niederschlag und Abfluss auf trendhaftes

Was die Interpretation von trendhaftem Verhalten in den Abflussdaten jedoch erschwert, ist der Einfluss des Einzugsgebietes. Landoberfläche und Untergrundeigenschaften (wie z.B. Vegetation, Gewässernetzdictheit, Bodenbedeckung, Geologie usw.) wirken sich auf den Transformationsprozess von Niederschlag zu Abfluss aus. Diese Zustandsgrößen des Einzugsgebietssystems vermögen etwaige Trends im Niederschlag zu verändern, sei es zu vergrössern oder abzuschwächen (Molnar und Ramirez, 2001). Überdies können sich Zustandsparameter wie Landnutzung, Waldbedeckung, Siedlungsflächen mit der Zeit verändern und somit eine zusätzliche Trendquelle für die Niederschlags-Abflussbeziehung darstellen. Aus diesem Blickwinkel leitet sich auch die Aufgabe ab, den Zusammenhang zwischen Einzugsgebietseigenschaften und beobachteten Abflusstrends zu untersuchen, da dies Einsicht auf die Empfindlichkeit eines Einzugsgebietes hinsichtlich Veränderungen des Abflussregimes eröffnen kann.

Die vorliegende Untersuchung berichtet über die Analyse von Datenreihen von 49 schweizerischen Einzugsgebieten. Dabei wurden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- 1) Identifikation von Trends in Abflussmessreihen und deren Vorkommen in Raum und Zeit;
- 2) Analyse der Zusammenhänge zwischen beobachteten Veränderungen in Abfluss, Niederschlag und Lufttemperatur;
- 3) Untersuchung auf Korrelation zwischen Abflusstrends und Einzugsgebietscharakteristika.

Diese Studie ergänzt andere für die Schweiz durchgeführte Trendanalysen wie jene für mesoskalige Niederschlagsvariabilität (Schmidli et al., 2002), Trends in Starkniederschlägen (Frei und Schär, 2001) und Trends in langfristigen Wasserhaushaltskomponenten (Schädler, 1987). Einen kurzen Einblick in die Methode wird im folgenden Abschnitt gegeben. Anschliessend werden die verwendeten Daten beschrieben, bevor im vierten Abschnitt die wichtigsten Ergebnisse dargelegt werden. Abgeschlossen wird die vorliegende Untersuchung mit einer Diskussion der gefundenen Resultate.

Methode

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Trendanalysen wurden mittels des parameterfreien Mann-Kendall (MK)-Tests durchgeführt (Helsel und Hirsch, 1992). Dieser Test fand breiten Einsatz für hydrologische Untersuchungen. Seine Vorteile sind seine Unabhängigkeit von irgendeiner Verteilungsannahme, Robustheit gegenüber Ausreisern, setzt nicht eine bestimmte Trendart (z.B. lin-

ear) voraus und, wie Vergleichsstudien gezeigt haben (z.B. Hess et al., 2001), weist eine höhere Aussagekraft als viele sonst gebräuchliche Trendtests auf. Für Details zum MK-Test und seiner Berechnung wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

Mit dem Ziel, Verschiebungen in der Verteilung der täglichen Abflüsse zu eruieren, wurde der MK-Test auf die Quantile der empirischen Verteilung für das ganze Jahr sowie für die einzelnen Jahreszeiten angewandt. Das Quantil x_p ist dabei der Wert der empirischen kumulativen Häufigkeitsverteilung $F_i(x_p)$ mit Unterschreitungswahrscheinlichkeit p , wobei F_i die jährliche bzw. saisonale nach Grösse geordnete Datenserie für $i = 1, \dots, n$ Jahre darstellt. Der MK-Test wurde für die jährlichen und saisonalen Quantile mit $p = 0,1; 0,2, \dots, 0,9$ sowie für den jährlichen wie saisonalen Mittelwert $x_{\text{Mittel}} = E_i(x)$, Minimum $x_{\text{Min}} = \min(F_i(x))$ und Maximum $x_{\text{Max}} = \max(F_i(x))$ durchgeführt. Die klimatologischen Jahreszeiten wurden wie folgt definiert und separat untersucht: Winter (Dezember–Februar), Frühling (März–Mai), Sommer (Juni–August), Herbst (September–November). Die Analysen wurden für Abfluss, Niederschlag sowie für die minimale und maximale tägliche Lufttemperatur durchgeführt. Für die Trendaussagen vorliegender Untersuchung wurde das Signifikanzniveau mit 10% ($\alpha = 0,1$) festgelegt. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Datenreihen auch auf Eigenkorrelation untersucht wurden und die Trendanalyse auch auf korrelationsbereinigte Datenreihen angewandt wurde. Da sich aber für die originalen wie für die bereinigten Daten im Wesentlichen die selben Resultate ergaben, wird hier nicht speziell darauf eingegangen und werden nur die auf den Originaldaten beruhenden Ergebnisse präsentiert.

Für die Untersuchung möglicher Ursachen für Abflusstrends wurden Korrela-

tionsanalysen mit Niederschlag und Temperatur sowie einer Reihe von Einzugsgebietsattributen durchgeführt. Für die Korrelationsanalyse wurde der parameterfreie, rangbasierte Spearmanische Korrelationskoeffizient verwendet (siehe dazu z.B. Helsel und Hirsch, 1992).

Daten

Die in dieser Studie verwendeten Abflussdaten sind die mittleren täglichen Aufzeichnungen von über die ganze Schweiz verteilten 49 Abflussmessstationen. Die drei Hauptkriterien für die Stationsauswahl sind:

- a) keine wesentliche Beeinflussung durch Wasserentnahmen, -speicherung oder -überleitungen für Wasserkraftzwecke;
 - b) räumliche Unabhängigkeit zwischen den Stationsaufzeichnungen;
 - c) durchgehende Aufzeichnungen
- (für mehr Details zu den Kriterien der Stationsauswahl siehe Pfandl, 2001). Die für die Studie berücksichtigten Abflussmessstationen werden alle vom Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) betrieben. Deren zugehörigen Einzugsgebiete sind in Bild 1 dargestellt. Die Analyse wurde für drei Untersuchungsperioden durchgeführt: 1971–2000 für 49 Stationen, 1961–2000 für 31 Stationen und 1931–2000 für 13 Stationen. Die weiteren analysierten hydroklimatischen Variablen schliessen den täglichen Niederschlag sowie die täglich minimalen und maximalen Lufttemperaturen, gemessen an den Stationen des MeteoSchweiz-Messnetzes, mit ein.

Tabelle 1 listet die Untersuchungsperioden zusammen mit der Anzahl an Messstationen auf. Tabelle 2 enthält die Wertebereiche ausgewählter Abflusskennwerte. Der mittlere jährliche Abfluss variiert zwischen 0,55 und 55 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ für die 49 Stationen, deren Einzugsgebietsgrößen zwischen 14,1 und 913 km^2 liegen.

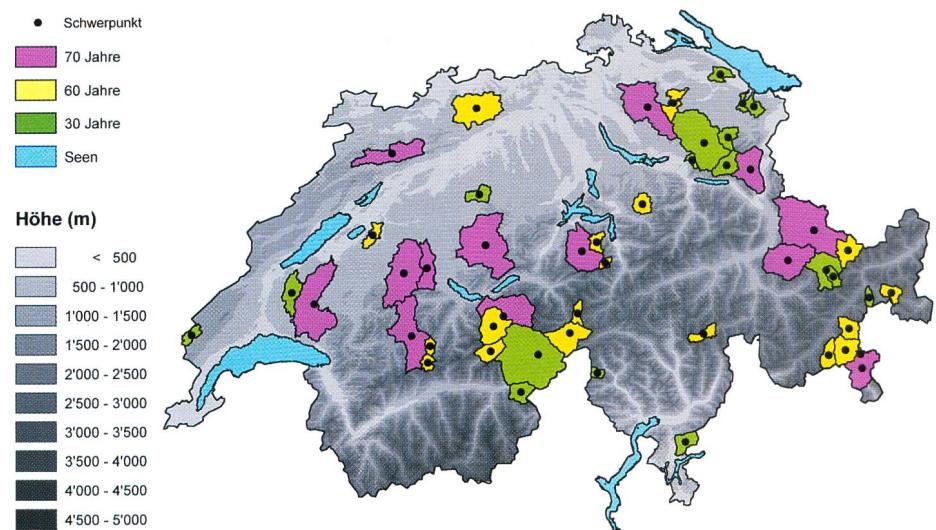


Bild 1. Ausgewählte Abflussmessstationen mit ihren Einzugsgebieten.

Untersuchungsperiode	Abfluss (BWG)	Niederschlag (MeteoSchweiz)	Temperatur (MeteoSchweiz)
1931–2000 (70 Jahre)	13	109	16
1961–2000 (40 Jahre)	31	109	26
1971–2000 (30 Jahre)	49	109	42

Tabelle 1. Untersuchungsperioden und Anzahl der für die Studie verwendeten Stationen (Datenquelle in Klammern). Als Daten wurden Tageswerte verwendet.

	Min – Max (Mittelwert)	Einheit	Datenquelle
<i>Kenngrößen des mittleren jährlichen Abflusses</i>			
Jahresmittel	0,55 – 42,2 (5,88)	$m^3 s^{-1}$	BWG
Jährliches Minimum	0,29 – 32,3 (3,91)	$m^3 s^{-1}$	BWG
Jährliches Maximum	0,81 – 55,7 (8,29)	$m^3 s^{-1}$	BWG
Variationskoeffizient	0,09 – 0,28 (0,18)	–	BWG
Schiefe	-0,42 – 1,17 (0,17)	–	BWG
Autokorrelation (1 Jahr)	-0,03 – 0,78 (0,17)	–	BWG
<i>Einzugsgebietseigenschaften:</i>			
Fläche	14,1 – 913 (161,3)	km^2	DGM25
mittlere Höhe	473 – 2710 (1618)	m	DGM25
mittlere Neigung	2,6 – 34,2 (21,4)	°	DGM25
Gebietsformfaktor (Gravelius)	1,5 – 2,8 (2,0)	–	DGM25
Gewässernetzdichte	523 – 4121 (1807)	$m km^{-2}$	Geostat
mittlere Bodenmächtigkeit	10 – 98 (42)	cm	Geostat
Felsbedeckung	0 – 57,6	%	Geostat
Vergletscherung	0 – 45,7	%	Geostat
mittlerer CN-Wert (SCS)	64 – 84 (73)	–	Pfaundler (2001)
mittl. jährlicher Niederschlag	816 – 2151 (1332)	mm	MeteoSchweiz
mittl. tägl. max. Niederschlag	45 – 124 (62)	mm	MeteoSchweiz

Tabelle 2. Wertebereiche einiger Abflusskenngrößen sowie von abgeleiteten Einzugsgebietseigenschaften für die in dieser Studie untersuchten 49 Messstationen.

Die Einzugsgebiete der Abflussmessstationen wurden auf der Basis eines digitalen Geländemodells (DGM) bestimmt und eine Reihe wichtiger Einzugsgebietsattribute für die weiteren Analysen davon abgeleitet (Pfaundler, 2001). Einzugsgebietsfläche, mittlere Höhe, mittlere Neigung und ein Formindex wurden vom DGM mit 25 m Auflösung der Swissstopo (DGM25) bestimmt. Die Gewässernetzdichte wurde nicht automatisch vom DGM abgeleitet, sondern auf der Grundlage der topografischen Karten der Schweiz 1:25 000. Mittlere Bodentiefe sowie Prozent-

satz von Fels- bzw. Gletscherbedeckung konnten mittels der digitalen Bodenkarte und geotechnischen Karte der Schweiz (GEOSTAT-Datensätze des Bundesamtes für Statistik) ermittelt werden. Das potenziell maximale Rückhaltevermögen des Bodens wurde mittels der SCS-Curve-Number(CN)-Werte (siehe z.B. Chow et al., 1988) ausgedrückt, welche sowohl Bodeneigenschaften als auch die Landnutzung berücksichtigen. Der mittlere CN-Wert für die Einzugsgebiete wurde von Pfaundler (2001) abgeschätzt. Der mittlere jährliche Niederschlag und der mittlere maxi-

male tägliche Niederschlag wurden mittels der Daten von MeteoSchweiz bestimmt. Die Wertebereiche der abgeleiteten Einzugsgebietsattribute sind in Tabelle 2 ersichtlich. Dabei gilt es zu beachten, dass mehrere der bestimmten Attribute untereinander korreliert sind. Insbesondere bestehen signifikante Korrelationen zwischen der Einzugsgebietsfläche und der Neigung, der Fels- und Gletscherbedeckung einerseits (positiv) und der mittleren Bodentiefe andererseits (negativ).

Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in drei Teilen präsentiert. Zuerst werden Trends in den Abflüssen für die einzelnen Jahreszeiten und Quantile analysiert und deren räumliche Verteilung dargestellt. Dann werden Trends in Niederschlag und Lufttemperatur überprüft und Zusammenhänge zu den Abflusstrends untersucht. Schliesslich werden die Beziehungen zwischen Abflusstrends und Einzugsgebietscharakteristika betrachtet.

Abflusstrends

Eine Zusammenfassung der Trendanalyse des mittleren jährlichen wie saisonalen Abflusses ist in Bild 2 dargestellt. Die Resultate weisen auf eine Dominanz ansteigender Trends im mittleren jährlichen Abfluss in der Zeit seit 1961 hin. Für die Periode 1931–2000 lässt sich, abgesehen von ansteigenden Trends im Winter, keine schlüssige Aussage machen. Die Ergebnisse machen deutlich, dass der Anstieg des jährlichen Abflusses seit 1961 hauptsächlich auf gestiegenen Abflussmengen im Winter und Frühling begründet ist. Im Sommer zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten, da sowohl ansteigende wie abfallende signifikante Trends in den Stationsdaten gefunden wurden. Bezuglich Abflussfrachten sind in den alpinen Regionen Frühling und Sommer die bedeutenden Jahreszeiten, in denen die Schne- und Eisschmelze zwischen den Monaten Mai bis August ihre Höchstwerte erreicht (siehe z.B. Aschwanden und Weingartner, 1985).

■ Abfallend ■ Ansteigend

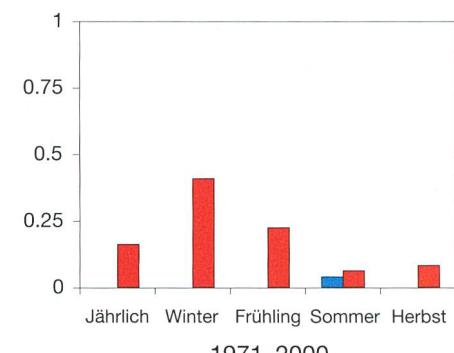
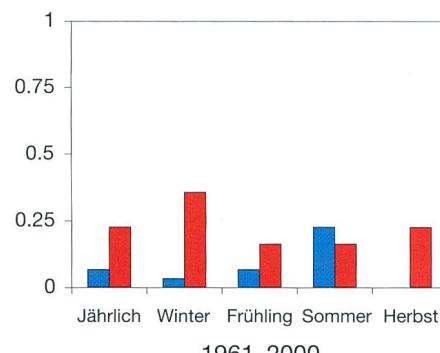
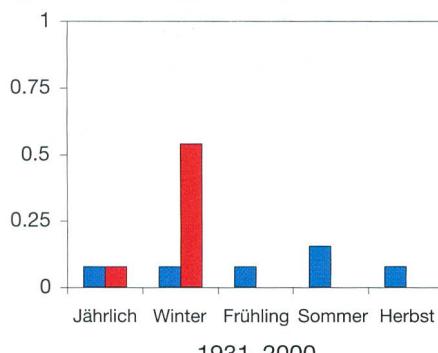


Bild 2. Relative Häufigkeit statistisch signifikanter Trends für den mittleren jährlichen und den saisonalen Abfluss für die drei Untersuchungsperioden.

■ Abfallend ■ Ansteigend

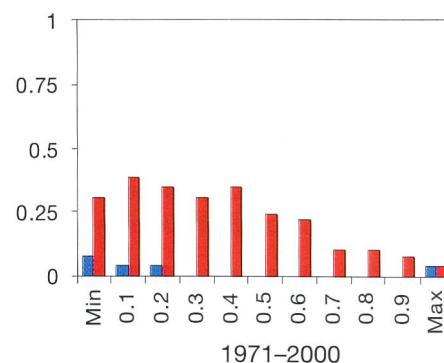
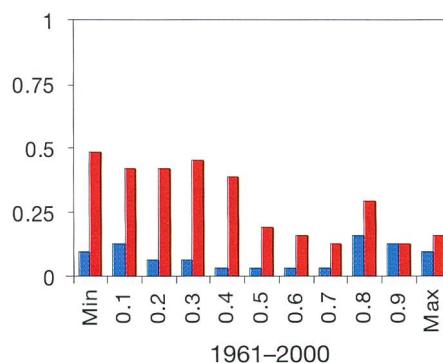
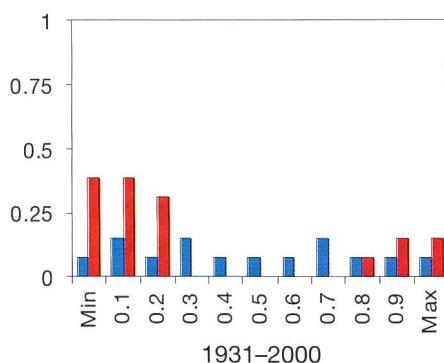


Bild 3. Relative Häufigkeit statistisch signifikanter Trends in den jährlichen Abflussquantilen für die drei Untersuchungsperioden.

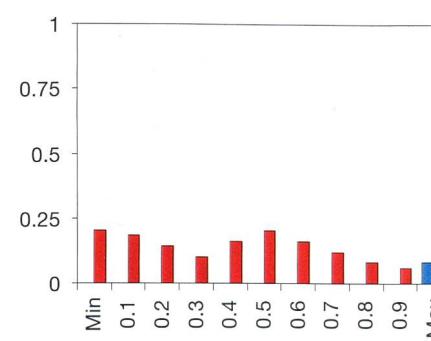
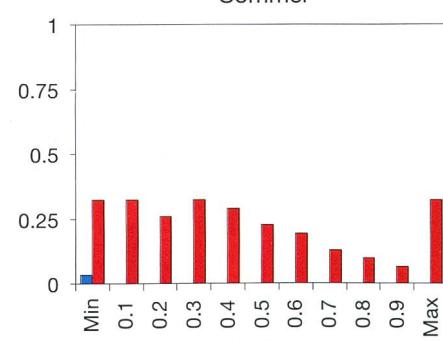
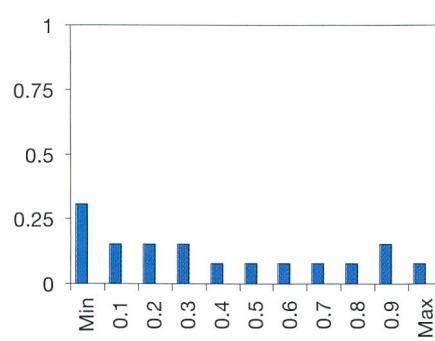
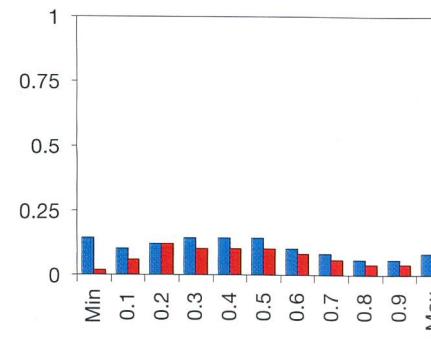
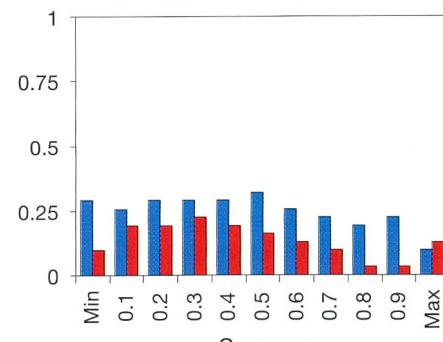
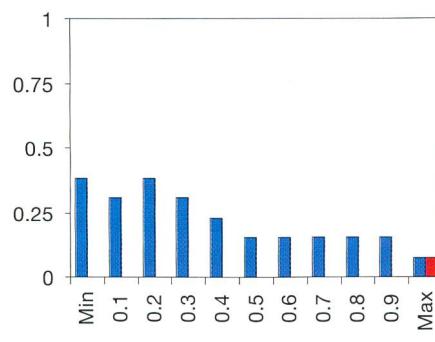
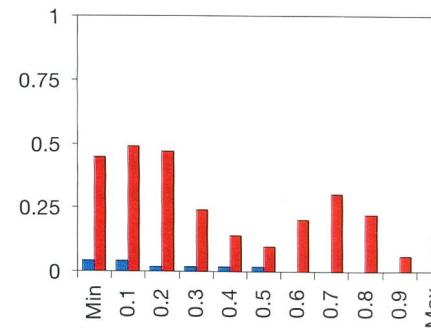
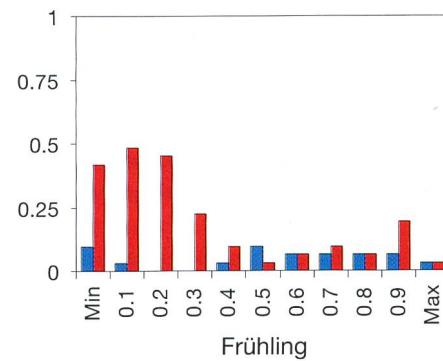
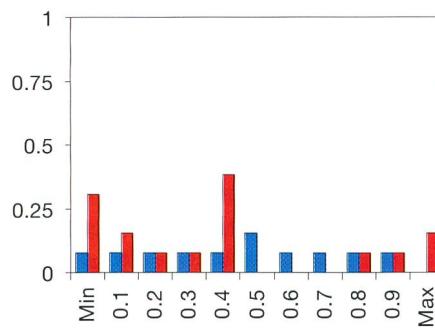
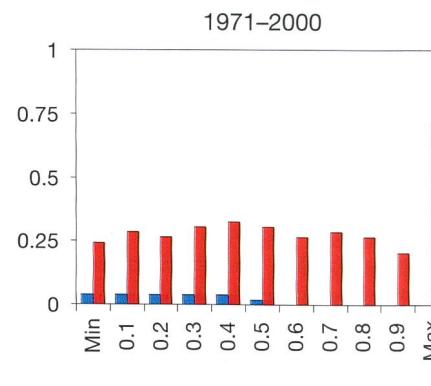
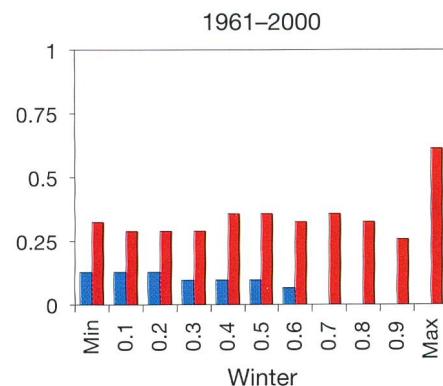
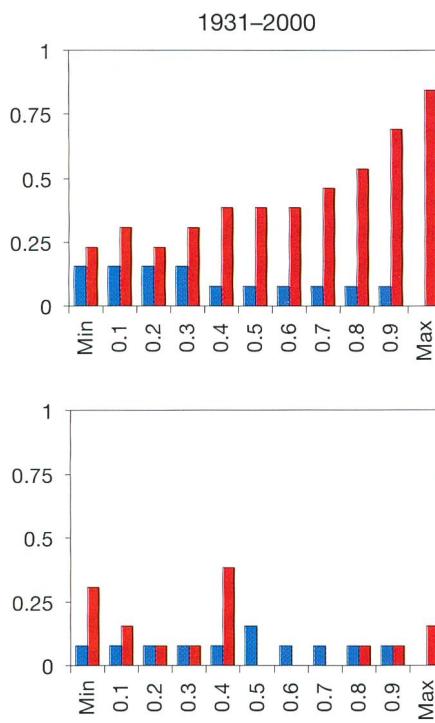


Bild 4. Relative Häufigkeit statistisch signifikanter Trends für die saisonalen Abflussquantile für die drei Untersuchungsperioden. Steigende Trends in Rot, fallende Trends in Blau dargestellt.

Neben den Unterschieden im saisonalen Trendverhalten interessiert auch, ob sich die jährliche Abflussverteilung geändert hat. Diesbezüglich zeigt Bild 3 den Anteil an Stationen mit statistisch signifikantem Trend für die jährlichen Quantile x_p sowie die jährlichen Minima und Maxima, x_{\min} und x_{\max} , für die drei untersuchten Perioden. Daraus ist ersichtlich, dass deutliche Verschiebungen stattgefunden haben. Demnach scheint die Zunahme im jährlichen Abfluss in der Periode nach 1961 hauptsächlich von einer Zunahme in den Abflussbereichen mässiger bis geringer Größenordnung ($p < 0,5$) zu stammen.

Ein Sachverhalt, der in den beiden Bildern 2 und 3 auffällt, ist, dass die Ergebnisse stark von der Wahl der Untersuchungsperiode abhängen. Dies unterstreicht die Bedeutung der Kenntnis, Untersuchung und Berücksichtigung allfälliger langfristiger Variabilität und Periodizität in Bezug auf hydroklimatische Daten.

Die aufschlussreichsten Resultate ergaben sich aus der Analyse der Abflussquantile in den saisonalen Verteilungen, deren Ergebnisse in Bild 4 gezeigt sind. Dabei stechen besonders die Trendunterschiede zwischen den Jahreszeiten hervor. Winterliche Abflüsse zeigen generell steigende Tendenz, besonders häufig die Wintermaxima (mind. 60–70% der analysierten Stationen zeigen einen statistisch signifikant steigenden Trend des winterlichen Maximas, x_{\max} , in allen drei Untersuchungsperioden an). Frühlings- und Herbstabflüsse zeigen ebenfalls einen steigenden Trend seit 1961, dies aber vornehmlich in den kleinen bis mässigen Quantilen x_p mit $p < 0,5$. Das Verhalten des sommerlichen Abflusses unterscheidet sich davon erheblich. Auch wenn fallende Trends etwas häufiger sind, lässt sich keine konsistente Trendrichtung ausmachen. Auch scheinen kleine bis mässige Abflussquantile stärker von Trends betroffen zu sein als das Sommermaximum. Interessant ist auch, dass im Gegensatz zu den anderen Jahreszeiten die Periode 1931–2000 für den Sommer die konsistenteste Veränderung in Richtung fallender Trends in den Abflussmengen zu verzeichnen hat (wiewohl zu bedenken ist, dass für diese Periode nur 13 Stationen der Analyse zugrunde lagen).

Bezüglich der räumlichen Verteilung der Stationen mit signifikantem Trend konnte keine kohärente Struktur gefunden werden. Dies überrascht ein wenig, wenn man die unterschiedlichen hydrologischen Abflussregimes (siehe z.B. Aschwanden und Weingartner, 1985; Schädler, 1987) in den Alpen sowie nördlich und südlich davon bedenkt. Als Beispiel sind in Bild 5 die Trendergebnisse für die saisonalen täglichen Abflussmaxima x_{\max} der

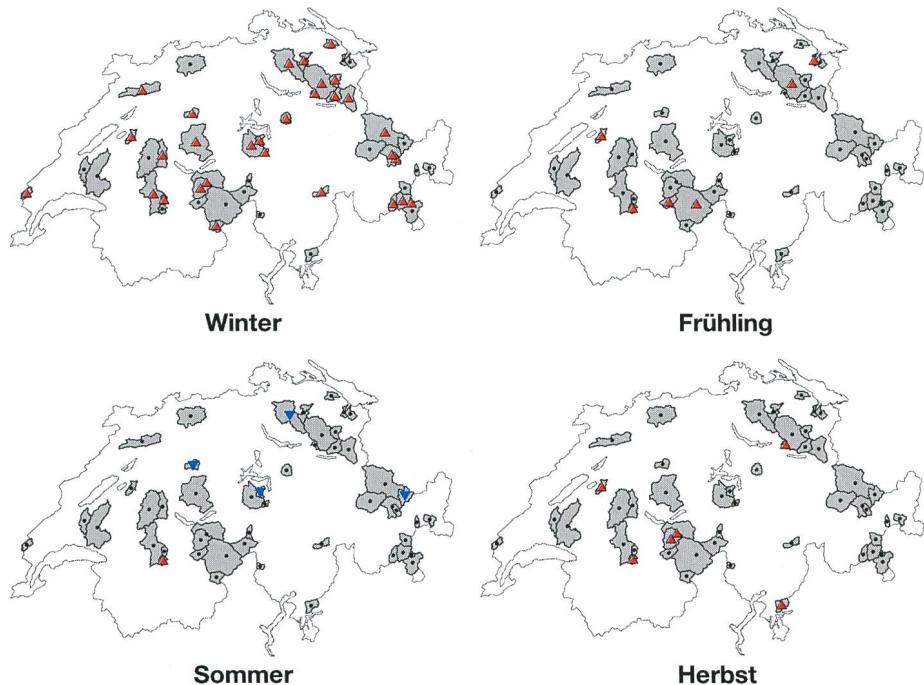


Bild 5. Räumliche Verteilung statistisch signifikanter Trends für die Periode 1971–2000 für den maximalen Tagesabfluss x_{\max} . Dreiecke sind im Schwerpunkt der Einzugsgebiete platziert und weisen auf die Trendrichtung hin (ansteigend oder fallend). Kein signifikanter Trend wird durch einen Punkt symbolisiert.

Periode 1971–2000 gezeigt. Dabei dominieren die positiven Trends im Winter, scheinen aber über die ganze Schweiz verteilt zu sein. Angesichts der mässigen räumlichen Abdeckung mit untersuchten Gebieten lässt sich aber keine schlüssige und abschliessende Aussage machen.

Trends in Niederschlag und Lufttemperatur

Als für die Abflussentstehung wesentliche Einflussgrößen, sollten Niederschlag und Lufttemperatur bis zu einem gewissen Masse die beobachteten Trends im Abfluss zu erklären vermögen. Bezüglich Niederschlag wurden nicht nur verschiedene Quantile der Niederschlagsverteilung auf Trendverhalten untersucht, sondern auch die Anzahl nasser Tage (Tage mit Niederschlag) und der Gesamtniederschlag wurden auf Änderungen hin geprüft. Für den direkten Vergleich zum Abfluss wurden dieselben Untersuchungsperioden herangezogen. Die Analyse der Quantile zeigte dabei keinen klaren Zusammenhang mit den Abflusstrends (verglichen wurde stets mit der dem Einzugsgebietsschwerpunkt am nächsten gelegenen Niederschlagsstation). Es wird vermutet, dass dies nicht zuletzt an der hohen räumlichen Variabilität des Niederschlags und der mangelnden Repräsentativität von Punktmessungen für die Abschätzung von Gebietsniederschlag liegt. Bild 6 zeigt die Anzahl statistisch signifikanter Trends im jährlichen und jahreszeitlichen Niederschlag,

insbesondere für die Niederschlagsmenge und die Anzahl an Tagen mit Niederschlag.

Signifikant steigende Trends hinsichtlich Anzahl nasser Tage und Niederschlagsmengen sind in der Periode 1931–2000 häufig, vor allem im Winter und Frühling. Diese Trends scheinen aber in den aktuelleren Perioden nicht mehr auf. Bemerkenswert ist, dass in den aktuellen Perioden nur wenige signifikante Trends hinsichtlich Niederschlagsmenge im Winter auftreten, ist dies doch die Periode mit den am meisten beobachteten steigenden Trends im Abfluss. Im Hinblick auf das Verhalten der Niederschlagsextreme resultierten nur für die Periode 1931–2000 für den maximalen Winterniederschlag eine erhebliche Anzahl signifikanter Trends. Diese Ergebnisse stimmen mit den Arbeiten von Frei und Schär (2001) überein, welche Starkniederschläge in der Schweiz für die Periode 1901–1994 untersuchten. Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass Änderungen im Niederschlag allein die beobachteten Veränderungen im Abfluss nach 1961 nicht zu erklären vermögen.

Lufttemperatur spielt wegen ihrer erheblichen Auswirkung auf das Auftreten von Schneefall und Schneeschmelze im alpinen Umfeld eine entscheidende Rolle im Wasserhaushalt. Da die substanziellsten Veränderungen, welche im Abfluss beobachtet wurden, im Winter und Frühling auftraten, ist es wahrscheinlich, dass Temperaturänderungen ihren Teil dazu beigetragen haben. Aus diesem Grund konzentrierte sich die Analyse der Tem-

peraturen auf die jährlichen und saisonalen Extrema (Minimum t_{\min} , Maximum t_{\max} und der tägliche Schwankungsbereich $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$) sowie die Anzahl an Tagen mit $t_{\min} > 0^\circ\text{C}$. Letzteres wird als Surrogat für die Wahrscheinlichkeit, dass Niederschlag als Regen fällt, angenommen. Im Allgemeinen zeigten die Ergebnisse einen Anstieg von t_{\min} für alle Jahreszeiten, was begleitet war von einem Abfall von t_{\max} für alle Jahreszeiten, den Winter ausgenommen. Zwischen den Untersuchungsperioden variierten die Resultate leicht, blieben aber im Kern konsistent. Als eine Folge daraus hat sich der Schwankungsbereich der Temperatur Δt bei den meisten Stationen signifikant verringert. Dies weist auf eine geringere Variabilität der Temperatur innerhalb eines Jahres in allen Untersuchungsperioden hin, trotz der allgemeinen Erwärmung. Diese Beobachtung wurde auch in anderen Regionen der Welt gemacht (siehe z.B. Michaels et al., 1998; Ventura et al., 2002).

Am auffälligsten waren die Trendresultate für die Anzahl Tage $t_{\min} > 0^\circ\text{C}$, welche

in Bild 7 zusammengefasst sind. Ansteigende Trends dominieren für alle Untersuchungsperioden auf Jahresbasis wie auch in den einzelnen Jahreszeiten (dabei sind die Resultate für den Sommer mit Vorsicht zu genießen, weil in einem Einzeljahr nur sehr wenige Tage mit $t_{\min} < 0^\circ\text{C}$ auftreten). Die Trendergebnisse zeichnen sich im Winter und Frühling durch besondere Konsistenz aus, wo ca. 50% aller Stationen für alle untersuchten Perioden einen statistisch signifikant steigenden Trend zeigen. Das weist darauf hin, dass im Winter und Frühling mehr Niederschlag in Form von Regen gefallen ist. Zusammen mit der Schneeschmelze aufgrund höherer Temperaturen mag dies zur Erklärung des beobachteten Anstiegs im Winter- und Frühlingsabfluss herangezogen werden.

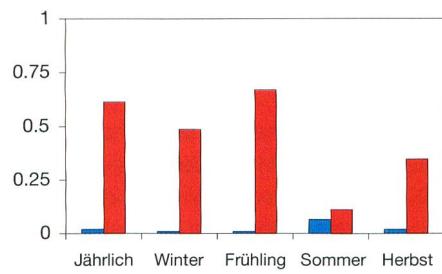
Korrelation der Abflusstrends mit Einzugsgebietsattributen

Die Korrelationsanalyse zwischen Abflusstrends und Einzugsgebietsattributen basiert auf der Annahme, dass die Anfälligkeit

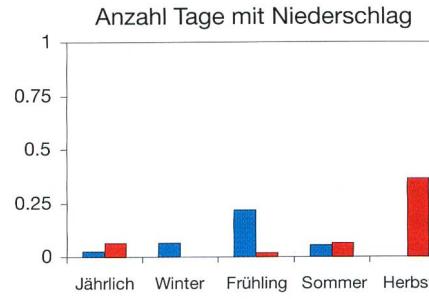
eines Einzugsgebietes für Veränderungen im Abflussregime von seinen physiographischen Attributen abhängt. Zur Berechnung des Spearmanischen Korrelationskoeffizienten wurden die Einzugsgebiets-eigenschaften mit den Trendergebnissen in Beziehung gebracht. Als Trendgrösse diente dabei die Variable Z des Mann-Kendall-Trendtests für die einzelnen Abflussquantile und Jahreszeiten, unabhängig ihrer statistischen Signifikanz. Für die Perioden seit 1961 sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sehr ähnlich und signifikant. Für die 70-jährige Periode seit 1931 ergaben sich weniger signifikante Korrelationen. Die signifikantesten einzelnen Korrelationen resultierten zwischen Abflusstrends und höhenbezogenen Attributen: mittlere Einzugsgebiets-höhe, Neigung, Bodentiefe sowie Gletscher- und Felsbedeckung. Praktisch keine Korrelation ergab sich mit den Charakteristika Einzugsgebietsgrösse und Formindex.

Eine Zusammenstellung der interessantesten Korrelationsergebnisse ist in Bild 8

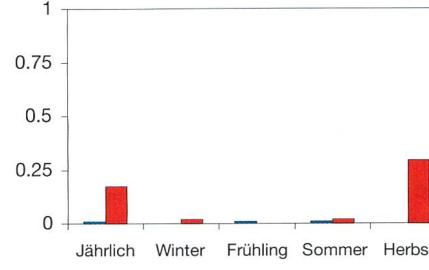
■ Abfallend ■ Ansteigend



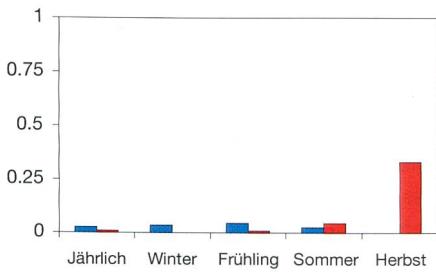
1931–2000



Niederschlagsmenge



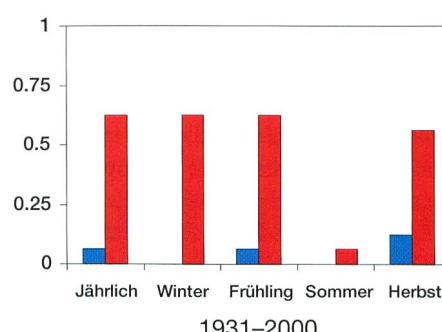
1961–2000



1971–2000

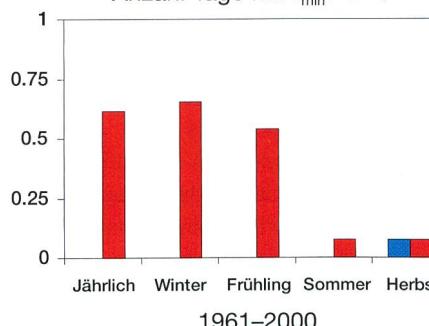
Bild 6. Relative Häufigkeit statistisch signifikanter Trends in der Anzahl an Tagen mit Niederschlag (oben) sowie der Niederschlagsmenge (unten) für das ganze Jahr und für die Jahreszeiten.

■ Abfallend ■ Ansteigend

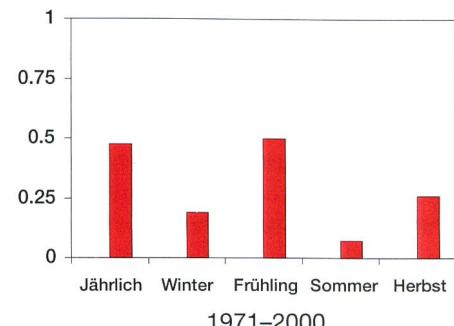


1931–2000

Anzahl Tage mit $t_{\min} > 0^\circ\text{C}$



1961–2000



1971–2000

Bild 7. Relative Häufigkeit statistisch signifikanter Trends in der Anzahl Tage mit $t_{\min} > 0^\circ\text{C}$.

dargestellt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Abflusstrends im Allgemeinen positiv korreliert sind mit der Einzugsgebietshöhe und dem Vergletscherungsgrad und negativ korreliert mit der mittleren Bodenmächtigkeit. Das bedeutet, dass mit steigender Gebiets- höhe und Vergletscherungsgrad das Trendausmass in der Untersuchungsperiode in der Regel zu-, mit der Bodentiefe abnahm.

Diese positive Korrelation zwischen Abflusstrends und höhenbezogenen Attributen zeigt eine grössere Anfälligkeit gebirgiger Einzugsgebiete für Veränderungen von Luft- temperatur und Niederschlag auf. Diese Schlussfolgerung wird auch durch die Tatsache unterstützt, dass die ausgeprägtesten Korrelationen im Winter und Frühling zu beobachten sind (speziell für die höheren Abfluss- quantile im Frühling), wenn im alpinen Raum der stärkste Einfluss der Temperatur auf die Abflussentstehung zu erwarten ist. Bild 9 zeigt, dass beinahe alle Einzugsgebiete mit Vergletscherung > 5% auch durch einen statistisch signifikant steigenden Trend im Abfluss gekennzeichnet sind. Bemerkenswert ist auch die starke Korrelation zwischen Abfluss- trend und Vergletscherungsgrad für geringe und mässige Abflüsse im Sommer, wenn andere Gebietsattribute (auch die mittlere Höhe) keine oder nur geringe Korrelation aufzeigen. Dies kann als Hinweis auf die sommerliche Eisschmelze der Gletscher, welche zu einem stetigen, aber nicht extremen Abfluss führt, interpretiert werden. Auch in anderen Unter- suchungen vergletscherter Gebiete in der Schweiz wurde diese Sensitivität gegenüber Temperaturveränderungen gefunden (siehe z.B. Collins, 1987; Chen und Funk, 1990).

Die negative Korrelation zwischen Abflusstrend und mittlerer Bodenmächtigkeit kann dahingehend interpretiert werden, dass die Abflussreaktion in Gebieten mit tiefen Böden durch das Wasserrückhaltevermögen der Bodenzone gedämpft wird. Die Ergebnisse zeigen, dass dieser Effekt im Winter und Frühling am ausgeprägtesten ist. Ein weiteres interessantes Ergebnis ist, dass der mittlere jährliche Niederschlag im Allgemeinen keine ausgeprägte Korrelation mit den Abflusstrends aufweist, was auf eine geringe Sensitivität dieser Variable für den komplexen Abflussentstehungsprozess schliessen lässt.

Bemerkenswert bei den Ergebnissen der jahresbezogenen Analyse in Bild 8 ist, dass die Einzugsgebietssattribute gut mit den Abflusstrends in den Bereichen mässiger Abflüsse ($0,3 < p < 0,7$) korrelieren. Diese Korrelationen sind für höhere Abflüsse deutlich geringer, wenn offenbar andere Faktoren als Einzugsgebietsscharakteristika eine entscheidendere Rolle in der Abflussentstehung spielen. Auch die saisonalen Maxima (z.B. Trends

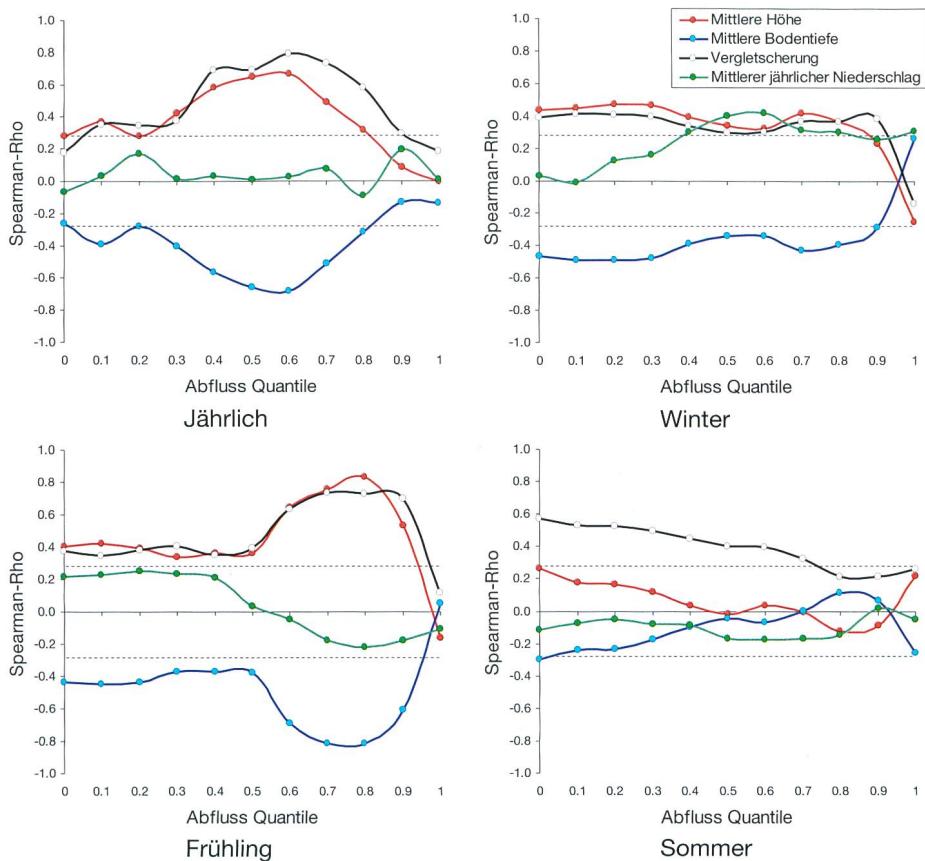


Bild 8. Spearman'scher Korrelationskoeffizient ρ berechnet zwischen ausgewählten Einzugsgebietssattributen und der Mann-Kendall-Trendgrösse Z der Periode 1971–2000 für die untersuchten Abflussquantile. Minimaler und maximaler Abfluss sind mit 0 und 1 bezeichnet. Statistisch signifikant sind die Korrelationen für $|\rho| > 0,28$ bei einem Signifikanzniveau von 10% ($\alpha = 0,1$).

in den extremen Ereignissen jedes Jahr) zeigen für alle untersuchten Jahreszeiten nur eine geringe Korrelation mit den Gebietsattributen.

Diskussion

Es sind im Wesentlichen zwei Fragen, auf welche die durchgeführte Studie eine Antwort geben will. Die erste Frage ist jene, ob die in den Abflussdatenreihen beobachteten Trends auf eine substanzielle Veränderung des natürlichen Abflussregimes in der Schweiz hinweisen. Als Zweites galt es, die Hypothese, dass sich die beobachteten Abflusstrends in Zusammenhang mit den klimatischen Bedingungen und/oder Einzugsgebietsscharakteristika bringen lassen, empirisch zu analysieren. Nachfolgend werden diese beiden Aspekte diskutiert.

Veränderungen im natürlichen Abflussregime

Die Resultate zeigen ein sehr komplexes Bild des Abflussregimes seit 1931. Es reicht jedenfalls nicht, nur Trends in den jährlichen Abflüssen zu untersuchen, da die Veränderungen zum einen je nach Jahreszeit unterschiedlich ausgeprägt sind und sich zum anderen auf bestimmte Abflussbereiche (Quantile) konzentrieren können. Deshalb

lassen sich die in den Daten vorhandenen «Trendsägnale» nur durch detaillierte Analysen jährlicher wie saisonaler Verteilungen der Abflussdaten mit der zeitlichen Auflösung täglicher Abflüsse herausarbeiten. Die Resultate deuten darauf hin, dass erhebliche Veränderungen im natürlichen Abflussregime der untersuchten ungestörten Einzugsgebiete stattgefunden haben. Am deutlichsten ist wohl der ansteigende Trend im Winter, hier besonders die Wintermaxima, und der Anstieg der Frühlingsabflüsse. Ebenso auffallend ist das Fehlen eines konsistenten Trendverhaltens im Sommer, mit grosser Variabilität und steigenden Trends genauso wie fallende Tendenz. Insgesamt konnte keine deutliche räumliche Struktur im Auftreten von Abflusstrends ausgemacht werden. Da den durchgeführten Analysen zumindest 30-jährige Datenserien zugrunde liegen, wird von einer gewissen Zuverlässigkeit ausgegangen, dass die festgestellten Trends nicht lediglich das Ergebnis kurzfristiger Variabilität im Abflussregime widerspiegeln.

Obwohl viele der festgestellten Trends statistisch signifikant sind, stellt sich natürlich die Frage, ob sie das auch vom wasserwirtschaftlichen Standpunkt aus sind und ob der Grund dafür nicht vielmehr anthropogenen

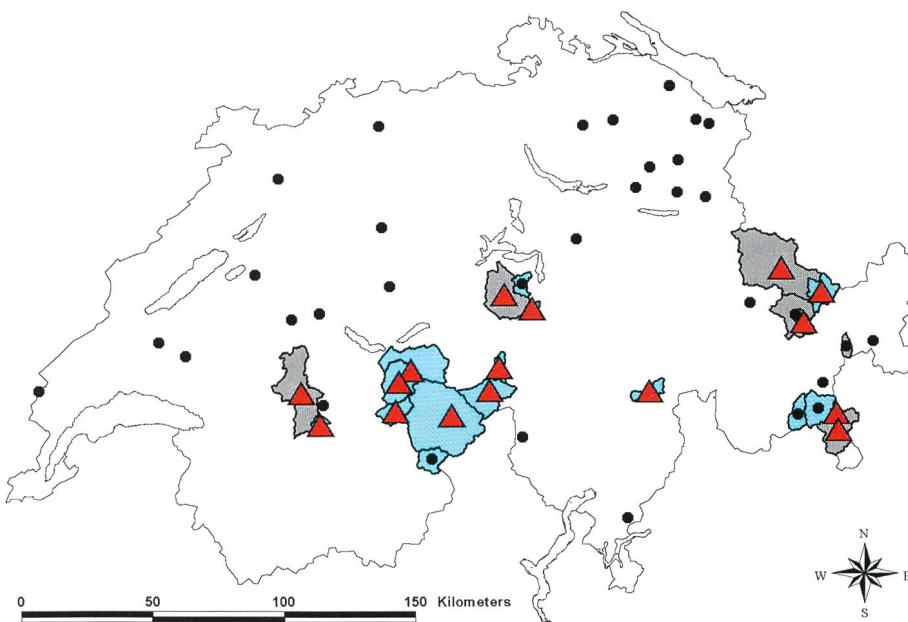


Bild 9. Trends in Winter- und Frühlingsabfluss (1971–2000) in Bezug zur Vergletscherung des Einzugsgebietes. Statistisch signifikante Trends sind als Dreiecke dargestellt, alle Trends sind ansteigend. Punkte symbolisieren Einzugsgebiete ohne signifikante Trends. Einzugsgebiete mit Vergletscherung (■<5%, □>5%) sind hervorgehoben.

denn klimatischen Ursprungs ist. Auf der einen Seite lässt sich dazu sagen, dass bei der Auswahl sorgfältig danach getrachtet wurde, erheblich anthropogen beeinflusste Messstationen auszuschliessen, insbesondere jene, welche durch Stauseen oder Wasserentnahmen für die Wasserkraftnutzung geprägt sind. Es ist aber auch klar, dass es kaum möglich ist, anthropogene Beeinflussung völlig auszuschliessen. So haben mit Sicherheit allmähliche Landnutzungs- und Bodenbedeckungsveränderungen in den analysierten Gebieten stattgefunden, welche auch Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben. So argumentiert z.B. Schädler (1987), dass in manchen Regionen der Schweiz eine Zunahme der Evapotranspiration durch menschliche Einflussnahme, darunter auch Intensivlandwirtschaft, stattgefunden hat. Collins (1987) führte an, dass die Veränderungen in der Vergletscherung einen Anteil an der beobachteten Variabilität des Abflusses haben. All diese schlechenden Veränderungen konnten in der durchgeföhrten Analyse nicht «herausgefiltert» und berücksichtigt werden. Aus der Perspektive der Wasserwirtschaft ist aber jeder anhaltende Trend im Abfluss wesentlich, insbesondere jene, welche Extrema betreffen. Vor diesem Hintergrund sind die beobachteten ansteigenden Trends in den winterlichen Abflussextrema besonders hervorzustreichen. Ob sich diese und andere Trends allerdings in der Zukunft fortsetzen, hängt von den jeweiligen Ursachen ab, welche noch nicht geklärt sind. Dies leitet deswegen zur zweiten Frage über die möglichen Gründe für die festgestellten Abflusstrends über.

Auswirkungen des Klimas und der Einzugsgebietseigenschaften

Es liegt nahe, Veränderungen im Niederschlag als erste Erklärung für die beobachteten Trends im Abfluss nachzugehen. Trendanalysen des täglichen Niederschlags wurden von Widmann und Schär (1997) und Frei und Schär (2001) für das gleiche Stationsnetz wie in der vorliegenden Studie, jedoch für längere Perioden durchgeführt. Für intensive Niederschläge (mittlere Wiederkehrperiode 30 Tage) wurden ansteigende Trends im Winter und Herbst, besonders im Norden der Schweiz, festgestellt. Dabei wurde argumentiert, dass die beobachteten Trends nicht auf eine geänderte Häufigkeit bestimmter Wettertypen, sondern auf eine gesteigerte Niederschlagsaktivität innerhalb eines bestimmten Wettertyps zurückzuführen sind (Widmann und Schär, 1997). Für Extremniederschläge (jährlicher Maximalniederschlag) sind die festgestellten Trends im Allgemeinen jedoch nicht sehr stark (Frei und Schär, 2001). Auch in der vorliegenden Studie wurden nicht viele signifikante und im Speziellen konsistente Trends in den Niederschlagsaufzeichnungen gefunden. Der einzige Zusammenhang zwischen steigendem Niederschlag und Abfluss scheint im Winter gegeben zu sein, wenn signifikante Anstiege im Abfluss, besonders die extremen Ereignisse, mit Anstiegen im Niederschlag zusammenfallen. Andere Zusammenhänge sind sehr schwach ausgeprägt, und die Veränderungen in den Niederschlagsdaten vermögen die Abflusstrends nur teilweise zu erklären, was speziell für die Periode seit 1961 gilt.

Veränderungen der Lufttemperatur liefern eine zusätzliche Information. Die dargelegten Resultate weisen auf einen stetigen Anstieg der minimalen Tagestemperaturen, während die maximalen Tagestemperaturen und die Temperaturamplitude in den Untersuchungsperioden signifikant sinken. Mit anderen Worten, das Klima hat sich im letzten Jahrhundert – was die Temperaturen angeht – in Richtung wärmerer, aber weniger variabler Zustände entwickelt (siehe dazu auch die Beobachtungen von Michaels et al., 1998; Ventura et al., 2002). In diesem Zusammenhang noch bedeutsamer für alpine Einzugsgebiete ist der stetige Anstieg der Anzahl an Tagen mit einer Minimaltemperatur über 0 °C (Bild 7). Das sollte sich seinerseits in mehr Regen im Winter und Schneeschmelze im Frühjahr bemerkbar machen, was ja auch dementspricht, was in den Abflusstypen gefunden wurde. Im Frühling wurde seit 1961 ein Anstieg im Bereich geringer bis mässiger Abflüsse beobachtet, begründet wahrscheinlich durch die in dieser Jahreszeit gestiegenen Temperaturen mit in der Folge zunehmender Schneeschmelze. Ein ähnlicher Zusammenhang konnte durch Korrelationsanalysen zwischen Abflusstrends und dem Nordatlantischen Oszillationsindex (NAO) festgestellt werden. Der NAO ist ein Index für grosskalige Klimaanomalien im Nordatlantik, der die Stärke von Westströmungen und Wettertypen in Europa, besonders im Winter, beeinflusst (siehe z.B. Hurrell, 1995; Rodwell et al., 1999; Wanner et al., 2001). Wir fanden starke Korrelationen zwischen Sommerabflüssen und dem NAO-Index des vorhergehenden Winters. Da der NAO-Index einen recht guten Indikator für grosskalige Feuchtigkeits- und Energieflüsse in den zentralen europäischen Raum darstellt, dürfte es zulässig sein, anzunehmen, dass winterliche Niederschläge und ihr Rückhalt in der Schneeschicht einen deutlichen Zusammenhang mit dem Abfluss in der darauf folgenden Schmelzperiode im Frühling und Sommer haben. Auch Schmidli et al. (2001) fanden nur für den Winter eine starke Korrelation zwischen NAO-Index und Niederschlag.

Für einige Einzugsgebieteattribute wurde eine deutliche Korrelation zu den Abflusstrends beobachtet (Bild 8). Auch hier zeigen sich die interessantesten Resultate für den Winter und für alpine Gebiete, d.h. solche in grösseren Höhen, mit Vergletscherung und erheblicher Felsbedeckung. Diese Faktoren scheinen Abflusstrends zu fördern. Auf der anderen Seite agiert der Boden offenbar als Puffer, da die Analyse eine konsistente negative Korrelation zwischen der mittleren Bodenmächtigkeit und dem Ausmass von Abflusstrends ergab. Zusammengenommen machen die Resultate die erhöhte Anfälligkeit

alpiner Einzugsgebiete für Änderungen des Abflussregimes deutlich. Dies aufgrund ihrer Gebietscharakteristika, welche einen schnellen Abfluss fördern und vor allem wegen deren besonderer Sensibilität bei Temperaturveränderungen, mit den Auswirkungen auf Regen und Schneefall sowie Schneeschmelze (siehe z.B. Collins, 1987). Eine der aus dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse ist, dass der beobachtete Anstieg in den Niederwasserabflüssen (im Winter und Frühjahr) auf Schnee- und Eisschmelze beruht (Bild 9). Diese Schlussfolgerung kann auch durch Beobachtungen des Rhonegletschers untermauert werden, dessen jährliche Massenbilanz durch Chen und Funk (1990) für die Periode 1883–1987 rekonstruiert wurde, und wo wir statistisch signifikante Anstiege des Winter- und Frühlingsabflusses gefunden haben. Für Jahreswerte wurde eine statistisch signifikante Korrelation zwischen Veränderung der Massenbilanz des Gletschers und den Niederwasserabflüssen für die Periode 1961–1987 festgestellt (signifikant bei $\alpha = 0,1$ für Quantile x_p mit $p < 0,3$ und bei $\alpha = 0,5$ für Quantile x_p mit $p < 0,2$). Dabei finden diese Niederwasserabflüsse im Winter und Frühling statt. Es ist daher nicht überraschend, dass der allmähliche Massenverlust des Rhonegletschers den steten Anstieg des Niederwassers in Winter und Frühling zu erklären vermag. Bei diesem Beispiel ist der Rückzug des Gletschers durch den Temperaturanstieg im letzten Jahrhundert begründet (Chen und Funk, 1990).

Die Resultate zeigen also einige Zusammenhänge zwischen den festgestellten Abflusstrends und Veränderungen atmosphärischer Einflussgrößen auf: Es soll damit aber nicht gesagt sein, dass darin allein die Variabilität in den Abflusstrends begründet liegt. Was unerklärt bleibt, sind Abflusstrends aufgrund kontinuierlicher Veränderungen anderer Gebietseigenschaften wie etwa die Landnutzung, die Vegetation, die geomorphologische Evolution des Gewässersystems usw. beziehungsweise auch Trends, die schlicht Teil der natürlichen Variabilität des hydrologischen Regimes sind. Obwohl bei der Auswahl der Stationen für die Studie danach getrachtet wurde, möglichst nur ungestörte Gebiete zu berücksichtigen, und auch weil die meisten (natürlichen) Veränderungen im Einzugsgebiet sich über weitaus längere Zeitskalen abspielen als die in dieser Studie betrachteten Zeiträume, müssen wir anerkennen, dass diese trotzdem einen Anteil an der natürlichen hydrologischen Variabilität haben.

Schlussfolgerungen

Eine der wesentlichen Schlussfolgerungen ist die Feststellung, dass die natürlichen Ab-

flussregimes in der Schweiz seit 1961 eine merkbare Veränderung erfahren haben. Beobachtet wurde ein Anstieg des Jahresabflusses, begründet hauptsächlich durch Anstiege im Winter- und Frühlingsabfluss. Die jährlichen Abflussanstiege konzentrieren sich dabei auf die Abflussbereiche niederer und mässiger Quantile seit 1961. Der Grossteil der beobachteten Veränderungen fand im Winter statt. Der Winterabfluss erfuhr über die ganze Verteilung einen Anstieg, besonders ausgeprägt für die maximalen Abflüsse: 60–70% der Messstationen zeigen einen statistisch signifikanten Anstieg im maximalen winterlichen Abfluss. In etwas geringerem Umfang wurde auch im Frühling eine Abflusszunahme festgestellt, welche sich im Wesentlichen im Quantilbereich niederer bis mässiger Abflüsse bemerkbar macht. Obwohl der Sommerabfluss am meisten zum Jahresabfluss beiträgt, wurden für diese Jahreszeit weniger signifikante Trends identifiziert und diese waren sehr variabel und nach Vorzeichen nicht konsistent.

Auf der anderen Seite sind die Trends im Niederschlag ab 1961 nicht besonders signifikant. Am deutlichsten sind diesbezüglich der Anstieg in der Anzahl Tage mit Niederschlag und jahreszeitliche Niederschlagsmengen für die Periode 1931–2000, nicht aber für die kürzeren, aktuelleren Perioden. Daraus wird gefolgt, dass der Niederschlag alleine zur Erklärung der wesentlich signifikanteren Trends in den Abflusstypen seit 1961 nicht ausreicht.

Zusätzliche Information liefern die beobachteten Trends in der Lufttemperatur, welche auf einen generellen Anstieg in den minimalen täglichen Temperaturen und eine Verringerung der maximalen täglichen Temperatur hinweisen, was folglich zu einer Abnahme des täglichen Temperaturschwankungsbereiches führt. Wahrscheinlich am wichtigsten ist der deutlich ansteigende Trend in der Anzahl Tage mit minimaler täglicher Temperatur $> 0^\circ\text{C}$ (bei bis zu 50% aller Stationen). Letztere treten nur im Winter und Frühling auf. Aus all diesen Resultaten vermuten wir, dass der Grund für den beobachteten Anstieg des winterlichen Abflusses über alle Quantile hinweg seine Ursache in vermehrtem Niederschlag und Schneeschmelze im Winter hat. In ähnlicher Weise dürfte der Anstieg in den niedrigen und mässigen Abflüssen im Frühling seinen Ursprung in einer früheren Schneeschmelze aufgrund der gestiegenen Lufttemperaturen haben. Die Korrelationsanalysen der Abflusstrends mit den Einzugsgebietscharakteristika zeigen deutliche Zusammenhänge zwischen Abfluss und mittlerer Gebietshöhe sowie Vergletscherung und Felsbedeckung (positiv) und mittlerer

Bodenmächtigkeit (negativ). Dies legt nahe, dass die alpinen Gebiete am anfälligsten für Änderungen im Abflussregime sind. Bemerkenswert ist dabei, dass diese Zusammenhänge am stärksten für die mässigen Abflussbereiche sind und mit zunehmender Extremheit des Abflusses abnehmen. Es scheint also, dass andere Faktoren und Prozesse als die Einzugsgebietscharakteristika die entscheidende Rolle beim Niederschlags-Abflussprozess für extreme Ereignisse spielen.

Danksagung

Abflusstypen wurden von der Landeshydrologie des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG), Bern, zur Verfügung gestellt. Niederschlags- und Temperaturdaten wurden auf der Basis einer Vereinbarung zwischen der ETH Zürich und MeteoSchweiz verwendet, physiographische Daten (Topografie, Boden, Geologie, Landnutzung und -bedeckung) fanden auf der Grundlage von Verträgen mit dem Bundesamt für Landestopografie und dem Bundesamt für Statistik Verwendung. Christoph Frei stellte freundlicherweise die Resultate einer Analyse der Niederschlagstrends in der Schweiz für Vergleichszwecke zur Verfügung. Diese Studie wurde von Marius-Victor Birsan im Rahmen seines Nachdiplomstudiums Hydrologie und Wasserwirtschaft – ein gemeinsames Nachdiplomstudium von EPF Lausanne und ETH Zürich – durchgeführt. Marius-Victor Birsan ist der Erich-Degen-Stiftung und der ETHZ/IHW für finanzielle Unterstützung und Herrn Prof. Musy (EPFL/ISTE/HYDRAM) für die guten Arbeitsbedingungen während der Durchführung des Projektes dankbar.

Literatur

- Aschwanden, H., Weingartner, R., 1985. Die Abflussregimes der Schweiz. Geografisches Institut der Universität Bern, Publ. Gewässerkunde Nr. 65.
- Burn, D. H., Hag Elnur, M. A., 2002. Detection of hydrologic trends and variability. *J. Hydrol.* 255, 107–122.
- Chen, J., Funk, M., 1990. Mass balance of Rhonegletscher during 1882/83–1986/87. *J. Glaciol.* 36(123), 199–209.
- Chiew, F. H. S., McMahon, T. A., 1996. Trends in historical streamflow records. *Regional Hydrological Response to Climate Change*, J. A. A. Jones (editor), Kluwer, 63–68.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., und Mays, L. W., 1998. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Collins, D. N., 1987. Climatic fluctuations and runoff from glacierised Alpine basins. *IAHS Publ.* no. 168, 77–89.
- Douglas, E. M., Vogel, R. M., Knoll, C. N., 2000. Trends in flood and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *J. Hydrol.* 240, 90–105.

- Frei, C., Schär, C., 2001. Detection probability of trend in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Climate* 14, 1568–1584.
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., Karl, T. R., 2001. Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: trends in the twentieth century. *Bull. Amer. Met. Soc.* 82(2), 219–246.
- Helsel, D. R., Hirsch, R. M., 1992. Statistical Methods in Water Resources, Elsevier, 522 pp.
- Hess, A., Iyer, H., Malm, W., 2001. Linear trend analysis: a comparison of methods. *Atmos. Environment* 35, 5211–5222.
- Hurrell, J. W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science* 269, 676–679.
- Karl, T. R., Knight, R. W., 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency and intensity in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 79, 231–241.
- Lins, H. F., Slack, J. R., 1999. Streamflow trends in the United States. *Geophys. Res. Lett.* 26(2), 227–230.
- Michaels, P. J., Balling, R. C., Vose, R. S., Kappenberger, P. C., 1998. Analysis of trends in the variability of daily and monthly historical temperature measurements. *Climate Resources* 10, 27–33.
- Molnar, P., Ramirez, J. A., 2001. Recent trends in precipitation and streamflow in the Rio Puerco Basin. *J. Climate* 14(10), 2317–2328.
- Osborn, T. J., Hulme, M., Jones, P. D., Basnett, T. A., 2000. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *Int. J. Climatol.* 20, 347–364.
- Pfaundler, M., 2001. Adapting, analysing and evaluating a flexible index flood regionalisation approach for heterogeneous geographical environments. Institute of Hydromechanics and Water Resources IHW Publ. 008, ETH Zurich, 189 pp.
- Rodwell, M. J., Rowell, D. P., Folland, C. K., 1999. Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, 398, 320–323.
- Schädler, B., 1987. Long water balance time series in the upper basins of four important rivers in Europe – indicators for climatic changes? IAHS Publ. no. 168, 209–219.
- Schmidli, J., Schmutz, C., Frei, C., Wanner, H., Schär, C., 2002. Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th Century. *Int. J. Climatol.* 22, 1049–1074.
- Ventura, F., Rossi Pisa, P., Ardizzone, E., 2002. Temperature and precipitation trends in Bologna (Italy) from 1952 to 1999. *Atmos. Res.* 61, 203–214.
- Wanner, H., Brönnimann, S., Casty, C., Gyalistras, D., Luterbacher, J., Schmutz, C., Stephenson, D. B., Xoplaki, E., 2001. North Atlantic Oscillation – concepts and studies. *Surv. Geophys.* 22, 321–382.
- Widmann, M., Schär, C., 1997. A principal component and long-term trend analysis of daily precipitation in Switzerland. *Int. J. Climatol.* 17, 1333–1356.
- Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D., Yuzyk, T. R., 2001. Trends in Canadian streamflow, *Water Resour. Res.* 37(4), 987–998.

Anschrift der Verfasser

Marius-Victor Birsan, Dr. Peter Molnar, Prof. Dr. Paolo Burlando, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETHZ Hönggerberg, CH-8093 Zürich (molnar@ihw.baug.ethz.ch).

Dr. Martin Pfaundler, Bundesamt für Wasser und Geologie, CH-3003 Bern-Ittigen (martin.pfaundler@bwg.admin.ch).

Dramix®



Tübbing aus Dramix®-Stahlfaserbeton

Senden Sie uns bitte Ihre Dokumentation

- Dramix® Tübbing
- Dramix® Stahldrahtfasern Tunnelbau, Tübbing, Hangsicherungen
- Duomix® Fire (M6) PP Fasern Brandschutz Beton

Firma _____

Name/Vorname _____

Adresse _____

PLZ/Ort _____

Tel. _____

Fax _____

Einsenden an: Bekaert (Schweiz) AG, Mellingerstrasse 1, 5400 Baden, Tel. 056 203 60 44, Fax 056 203 60 49
 Bekaert GmbH, Südstadtzentrum 4/1 C2, A-2346 Maria Enzersdorf-Südstadt, Tel. +43 2236 45180, Fax +43 2236 451 80 20
 Bekaert GmbH, Otto-Hahn-Strasse 20, D-61381 Friedrichsdorf Tel. +49 6175 7970 135, Fax +49 6175 7970 108