

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Hänggi, Pascal; Weingartner, Rolf**

## **Zur Veränderung der hydrologischen Rahmenbedingungen für die Wasserkraftnutzung im Rheineinzugsgebiet bis Basel 1808-2007**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103689>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hänggi, Pascal; Weingartner, Rolf (2009): Zur Veränderung der hydrologischen Rahmenbedingungen für die Wasserkraftnutzung im Rheineinzugsgebiet bis Basel 1808-2007. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 39. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 53-62.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## Zur Veränderung der hydrologischen Rahmenbedingungen für die Wasserkraftnutzung im Rheineinzugsgebiet bis Basel 1808-2007

Pascal Hänggi, Rolf Weingartner

Mit der Analyse der Abflüsse des Rheins bei Basel von 1808-2007 wie auch ausgewählter Zuflüsse liefert diese Studie einen Beitrag zum Verständnis der Veränderung der Abflussmenge und der interannuellen Variabilität. Die Resultate zeigen, dass der Anstieg der Abflussmengen im Winter und die Abnahme derselben im Sommer zu einem heute ausgeglicheneren Abflussregime des Rheins geführt haben. Ebenfalls abgenommen hat die interannuelle Variabilität. Zum andern konnten für die letzten vierzig Jahre regional differenzierte Veränderungen festgestellt werden, wobei die glazialen und nivalen Regimetypen den bedeutendsten Veränderungen unterlagen.

Changes in water quantity and interannual variability were examined using the hydrological time series of the Rhine River at Basel (1808-2007) and selected tributaries. The results show a significant increase in winter runoff and a decrease in summer, resulting in a more balanced discharge regime. At the same time the year-to-year variability decreased, too. The analysis of the tributaries has shown that the glacial and snow dominated streams underwent the most important modifications, especially during the last forty years.

### 1 Einleitung

In der Schweiz werden zwischen 50 und 60 % der Elektrizität durch die Wasserkraftnutzung gewonnen. Informationen über das Wasserdargebot und fundierte Angaben über mittel- bis langfristige Trends sind daher für die Wasserkraftbranche wesentlich und bilden eine Voraussetzung für die frühzeitige Planung von Maßnahmen. Retrospektive Zeitreihenanalysen sind für das Prozessverständnis unerlässlich und bilden eine wichtige Grundlage für Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des Abflussgeschehens, z. B. mit Hilfe von Modellberechnungen.

Mit der Analyse der 200-jährigen Abflusszeitreihe des Rheins bei Basel (1808-2007) wie auch ausgewählter Zuflüsse, welche die Vielfalt der schweizerischen Regimetypen repräsentieren, liefert diese Studie einen Beitrag zum Verständnis der Veränderung der Abflussmenge und der interannuellen Abflussvariabilität. Das Einzugsgebiet des Rheins bis Basel deckt 87 % der Gesamt-

fläche der Schweiz ab und ist damit ein räumlich integraler Indikator für die Änderungen im Abflussgeschehen auf der Alpennordseite. Die Betrachtung der Entwicklung in verschiedenen Teileinzugsgebieten, welche allerdings kürzere Zeitreihen umfassen, erlaubt zusätzlich eine regionale Differenzierung der Veränderungen.

## 2 Datengrundlage und Methodik

Neben der 200-jährigen Zeitreihe des Rheins bei Basel wurden 31 weitere Reihen aus Teileinzugsgebieten analysiert, welche folgende Auswahlkriterien erfüllen: (a) geringe Beeinflussung des Abflussgeschehens durch große Seen, durch Wasserentnahmen oder durch Kraftwerke; (b) möglichst lange, homogene und vollständige Zeitreihen; (c) repräsentativ für einen schweizerischen Regime-typ (Weingartner und Aschwanden 1992).

Aus den in monatlicher Auflösung vorliegenden Daten wurden zunächst die mittleren Winter-, Sommer- und Jahresabflussmengen - bezogen auf das hydrologische Jahr von Oktober bis September - berechnet. Der Winter umfasst die Monate Dezember bis Februar, der Sommer Juni bis August.

Die jährlichen und saisonalen Zeitreihen wurden anschließend mit Hilfe der Methode nach Theil (1950) und Sen (1968) auf Trends untersucht, wobei die mediane Steigung  $\beta_{TS}$  aller möglichen Steigungen zwischen den Wertepaaren einer Zeitreihe der Trendschätzung entspricht. Die Theil-Sen Geradengleichung berechnet sich demnach wie folgt:

$$\hat{y} = \beta_{TS}x + q$$

$$\text{mit} \quad \beta_{TS} = \text{Median}_{j>i} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right)$$

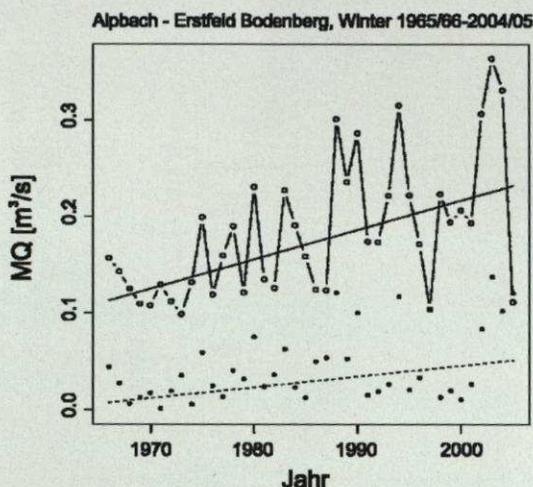
$$\text{und} \quad q = \text{Median}(y_{1,\dots,n}) - \beta_{TS} \cdot \text{Median}(x_{1,\dots,n})$$

wobei  $\hat{y}$  = y-Wert der Trendgerade,  $x, y$  = Werte der Zeitreihe, ( $j=2,\dots,n$ ), ( $i=1,\dots,n-1$ ) und  $n$  = Anzahl Werte der betrachteten Zeitreihe.

Die Trends wurden mit dem nicht-parametrischen Test nach Mann (1945) und Kendall (1975) auf ihre Signifikanz überprüft. Auf der Basis der 200-jährigen Zeitreihe des Rheins bei Basel wurden jährliche und saisonale Trends berechnet, und zwar für alle Zeitperioden mit mindestens 30 Jahren (siehe Trendmatrizen in Abbildungen 2 und 3). Bei den weiteren Zeitreihen wurde die Trendanalyse auf die Periode 1966-2005 angewandt.

Die Analyse der Veränderungen der interannuellen Variabilität, d. h. der Schwankungen der Abflussmengen von Jahr zu Jahr, basiert auf den Residuen zur oben genannten Trendgerade. Eine Häufung großer Residuenwerte ist ein Indikator für eine hohe interannuelle Variabilität. Die absoluten Beträge der Residuen wurden nach demselben Prinzip wie oben beschrieben auf Trends untersucht.

In Abbildung 1 ist die angewandte Methode exemplarisch dargestellt.

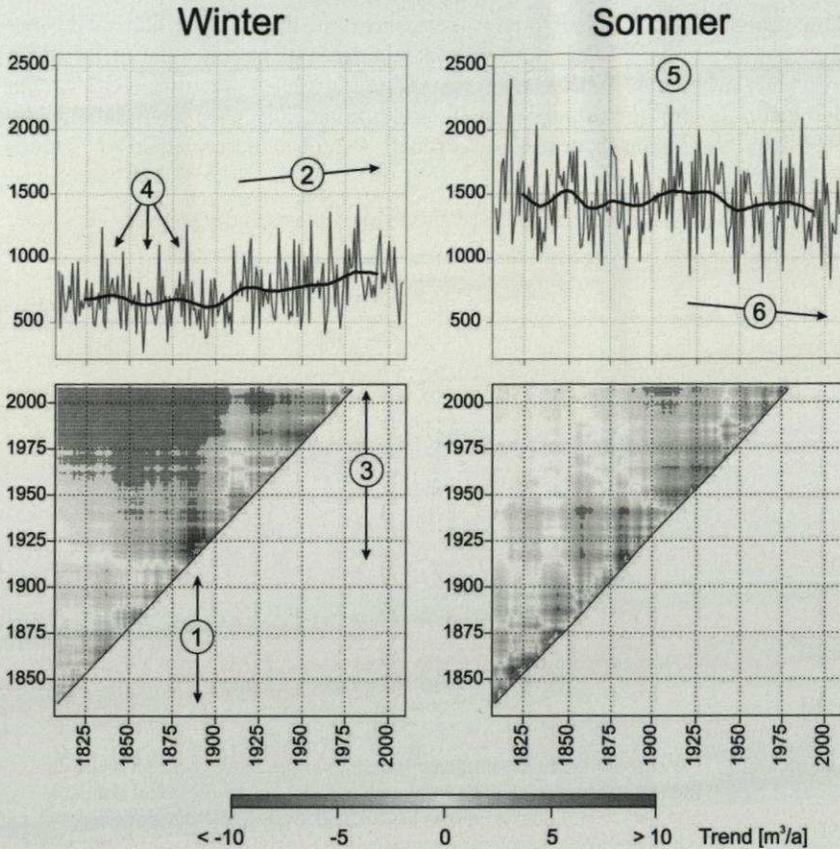


**Abbildung 1** Geschätzter Trend des mittleren Winterabflusses (obere Zeitreihe) und der interannuellen Variabilität (absolute Residuen; untere Zeitreihe) von 1965/66-2004/05 des Alpbachs bei Erstfeld. Sowohl die Zunahme der Abflussmenge als auch der interannuellen Variabilität ist signifikant (p-Wert MQ = 0.0006; interannuelle Variabilität = 0.0139).

### 3 Resultate und Diskussion

#### 3.1 Veränderungen des Rheinabflusses bei Basel 1808-2007

Die Veränderungen der mittleren Winter- und Sommerabflussmengen des Rheins bei Basel für die Periode 1808-2007 sind in Abbildung 2 dargestellt.



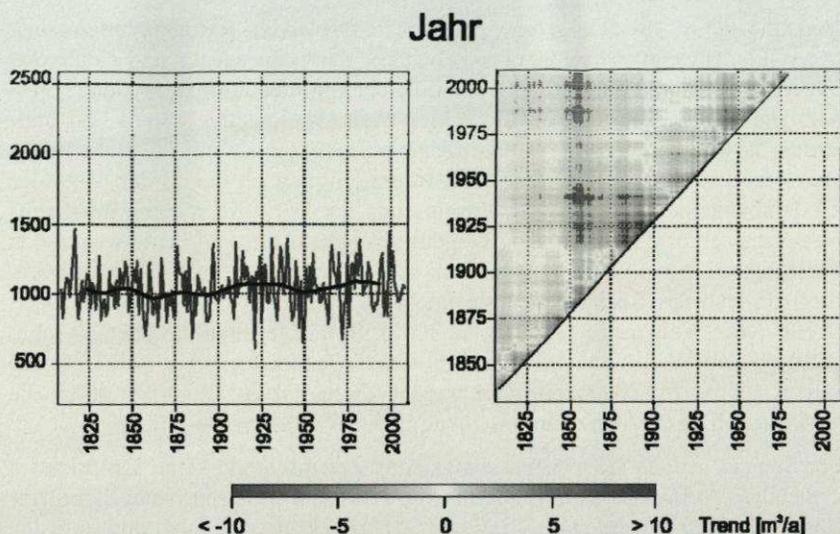
**Abbildung 2** Mittlere Abflussmengen [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] inklusive 30-jähriger Tiefpassfilterung nach Gauss (oben) und Trendmatrizen (unten) für den Winter und Sommerabfluss des Rheins bei Basel 1808-2007. Perioden mit positiven (negativen) Trends sind blau (orange) eingefärbt. Signifikante Trends sind schattiert ( $\alpha = 0.05$ ). Die Trendberechnungen wurden für Zeitreihen mit mindestens 30 Jahren durchgeführt. Lesebeispiel für die Trendmatrix: Der Winterabfluss zeigt in der Periode 1825-2000 (x-Achse = 1825, y-Achse = 2000) einen positiven Trend, welcher signifikant ist.

Bezüglich der Trends kann die Entwicklung des Winterabflusses grob in zwei Perioden unterteilt werden: In den Zeitabschnitten mit Startjahren zwischen 1808 und 1880 und Endjahren zwischen 1840 und 1910 zeigen sich mehrheitlich negative, nicht signifikante Trends oder gar keine Trends (siehe ①). Nach 1910 nimmt der Winterabfluss kontinuierlich zu ②. Diese Zunahme scheint abrupt verlaufen zu sein. Weingartner und Pfister (2007) begründen die rasche Abfluss-

zunahme mit einem zum selben Zeitpunkt auftretenden sprunghaften Anstieg der Wintertemperatur, was zu einer Abnahme der Schneedecke und damit verbundenen Verminderung der Zwischenspeicherung des Abflusses führte. Deshalb weisen alle Zeitreihen mit Endjahren nach 1910 positive Trends, mit Endjahren nach 1960 sogar meist signifikant positive Trends auf ③. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass neben dem Klima auch die ab der Mitte des 20. Jahrhunderts einsetzende Bewirtschaftung der Wasserressourcen im Rheineinzugsgebiet zu diesem Anstieg beigetragen haben: So wird heute wegen den Entleerungen der alpinen Speicherseen zur Stromproduktion die mittlere Abflusszunahme des Rheins bei Basel im Winter auf rund 60-70 m<sup>3</sup>/s geschätzt (KHR 2008, Weingartner und Pfister 2007). Betrachtet man die über 30 Jahre gefilterte Zeitreihe, so fallen Zyklen mit einer Wiederkehrperiode von 35 bis 40 Jahren auf ④. Im 20. Jahrhundert werden diese Zyklen allerdings durch die starke Zunahme der Winterabflüsse überprägt.

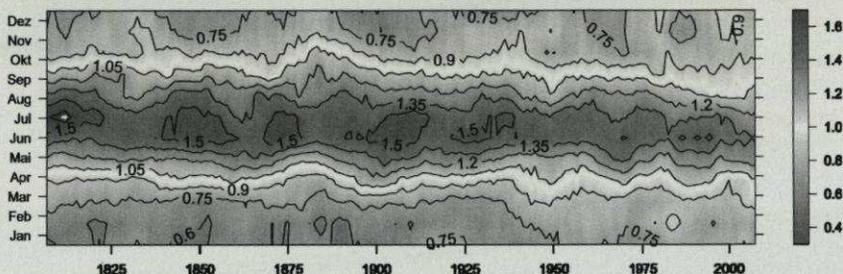
Für Sommer zeigen die meisten analysierten Zeitabschnitte keine signifikanten Trends an. Auffallend sind wiederum die Jahre um 1910, in denen hohe Abflüsse verzeichnet wurden ⑤. Die Periode 1884-1916 weist dabei den stärksten Trend mit einer Abflusszunahme von 11.5 m<sup>3</sup>/a auf. Im Gegensatz zum Winter nimmt aber der Abfluss ab den 1920er Jahren stetig ab ⑥, resultierend in leicht negativen Trends für beinahe alle Zeitperioden. Die abnehmende Tendenz ist besonders in den letzten zehn Jahren sichtbar. Schädler und Weingartner (2007) zeigten, dass seit 1901 die Verdunstungsraten stark angestiegen sind, so dass der Sommerabfluss in den Einzugsgebieten des Rheins, Inns, Ticinos und der Rhône abgenommen hat. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Füllungen der alpinen Speicherseen beim Pegel des Rheins bei Basel gering, da die Sommerabflüsse im Verhältnis zur zurückgehaltenen Wassermenge viel höher sind.

Über das Jahr gesehen führte der Rhein bei Basel in den Jahren 1910-1940 am meisten Wasser (Abbildung 3). Im Gegensatz dazu waren die Abflüsse im 19. Jahrhundert geringer, da sowohl im Winter wie auch im Sommer geringere Abflüsse auftraten.



**Abbildung 3** Wie Abbildung 2, jedoch für den Jahresabfluss (Oktober bis September) des Rheins bei Basel 1808-2007.

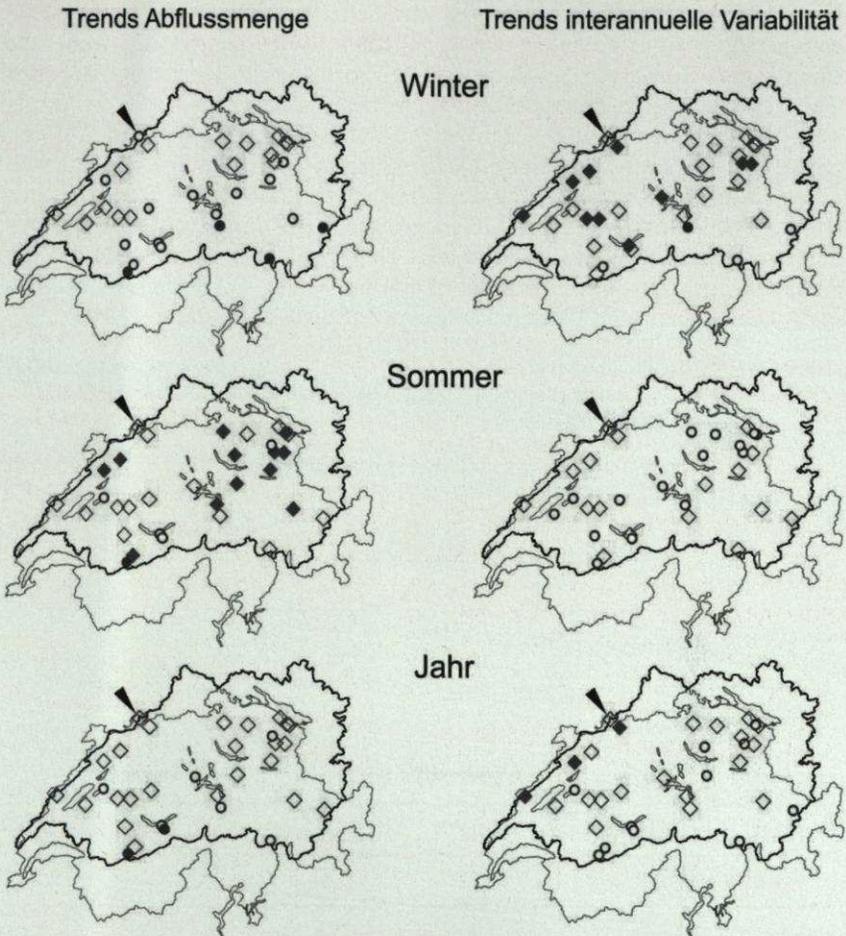
Ansonsten führten die oben diskutierten winterlichen und sommerlichen Schwankungen des Abflusses zu keinen signifikanten Veränderungen der jährlichen Abflussmengen (Kompensationseffekte). Jedoch kann eine deutliche Veränderung im saisonalen Verlauf festgestellt werden. Abbildung 4 zeigt, dass sich die winterlichen Pardé-Koeffizienten im Laufe der Zeit erhöht haben, während die sommerlichen Pardé-Koeffizienten abgenommen haben.



**Abbildung 4** Pardé-Koeffizienten des Rheins bei Basel, 1808-2007 (10-jährige gleitende Mittelwerte). Der Pardé-Koeffizient ist definiert als das Verhältnis des jeweils mittleren Monatsabflusses zum mittleren Jahresabfluss.

### 3.2 Veränderungen in Zuflussgebieten des Rheins bis Basel 1966-2005

Zur räumlichen Differenzierung innerhalb des Rheineinzugsgebietes wurden 31 Teileinzugsgebiete betrachtet.



**Abbildung 5** Trends der mittleren Winter-, Sommer- und Jahresabflüsse (links) und interannuellen Variabilitäten (rechts) ausgewählter Zuflüsse des Rheins bis Basel 1966-2005 (Einzugsgebiet schwarz markiert). Blaue Kreise: positive Trends, rote Vierecke: negative Trends. Bei signifikanten Trends sind die Symbole gefüllt ( $\alpha = 0.05$ ). Das Pegelsymbol markiert den Standort Basel.

Auf Grund der viel kürzeren zur Verfügung stehenden Zeitreihen konnte lediglich die Periode 1966-2005 analysiert werden. Dabei handelt es sich aus klimatischer Sicht um einen Zeitraum mit großen Veränderungen. Beispielsweise stieg die mittlere Jahrestemperatur in der Schweiz vorwiegend seit den 1980er Jahren an (Bader und Bantle 2004).

Wie Abbildung 5 verdeutlicht, weisen vor allem nival und glazial geprägte Einzugsgebiete positive Trends in den winterlichen Abflussmengen auf, wobei die signifikanten Zunahmen ausschließlich bei hochalpinen, stark vergletscherten Gebieten (glaziale Regimes, siehe Weingartner und Aschwanden 1992) festgestellt werden konnten. Vor allem bei den tiefer gelegenen pluvialen Abflussregimes, bei welchen der flüssige Niederschlag auch im Winter einen entscheidenden Einfluss auf das Abflussverhalten ausübt, haben die Wassermengen abgenommen. Aus der Sicht der interannuellen Variabilität weisen die meisten untersuchten Gebiete einen negativen Trend auf; die Schwankungen der Abflussmengen von Jahr zu Jahr haben also im Winter abgenommen. Lediglich in einigen hochalpinen Gebieten wurde eine Zunahme festgestellt.

**Tabelle 1** Nach Regimetyyp geordnete Übersicht über Trends in der Abflussmenge (MQ) und der interannuellen Variabilität (Var) ausgewählter Zuflüsse des Rheins bis Basel 1966-2005. Die in Klammern gesetzten Werte geben die Anzahl signifikanter Trends an.

Zuflüsse nach Regimetyypen	Winter				Sommer				Jahr			
	MQ		Var		MQ		Var		MQ		Var	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
glazial, glazio-nival	6 (4)	- (-)	3 (1)	3 (1)	3 (1)	3 (-)	2 (-)	4 (-)	5 (2)	1 (-)	5 (-)	1 (-)
nival	7 (-)	- (-)	1 (-)	6 (1)	- (-)	7 (6)	2 (-)	5 (-)	- (-)	7 (-)	2 (-)	5 (-)
nivo-pluvial	3 (-)	4 (-)	- (-)	7 (6)	- (-)	7 (3)	3 (-)	4 (-)	1 (-)	6 (-)	1 (-)	6 (2)
pluvial	- (-)	11 (-)	- (-)	11 (2)	2 (-)	9 (3)	8 (-)	3 (-)	2 (-)	9 (-)	3 (-)	8 (1)
Total	16 (4)	15 (-)	4 (1)	27 (10)	5 (1)	26 (12)	15 (-)	16 (-)	8 (2)	23 (-)	11 (-)	20 (3)
Rhein Basel	1 (-)	- (-)	- (-)	1 (-)	- (-)	1 (-)	- (-)	1 (-)	- (-)	1 (-)	- (-)	1 (-)

Im Sommer zeigen die untersuchten Zeitreihen größtenteils negative Trends. Signifikant sind vor allem die Abnahmen bei den nivalen, also von der Schneeschmelze geprägten Gebieten. Einzig bei Einzugsgebieten im Berner Oberland sind positive Trends erkennbar. Bei der Entwicklung der interannuellen Variabilität sind räumlich keine klaren Muster sichtbar.

Die beobachteten saisonalen Veränderungen in den verschiedenen Regionen der Schweiz wirken sich auch auf das jährliche Verhalten aus: Die Zunahme der Abflüsse aus glazialen Gebieten sowohl im Winter wie auch im Sommer resultiert in höheren Jahresabflüssen in diesen Gebieten. In den meisten anderen Regionen überwiegen die sommerlichen Abnahmen, was insgesamt zu verminderten Jahresabflüssen führt. Allerdings sind die wenigsten Trends signifikant.

Die Veränderungen des Abflussverhaltens im Rheineinzugsgebiet bis Basel sind in Tabelle 1 übersichtsmäßig dargestellt.

#### **4 Schlussfolgerungen**

Der Rhein in Basel verfügt mit einer Zeitreihe ab 1808 über eine der längsten Messreihen Europas. Sie erlaubt insbesondere auch Einblicke in das Abflussgeschehen des 19. Jahrhunderts. Die wichtigsten Erkenntnisse unserer Analysen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der Anstieg der Abflussmengen im Winter bei gleichzeitiger Abnahme im Sommer führte dazu, dass der Rhein heute ein ausgeglicheneres Abflussregime aufweist. Wobei die mittleren Jahresabflussmengen sich zwischen 1808 und 2007 nicht signifikant verändert haben.

Räumlich gesehen und bezogen auf den Zeitraum der letzten vierzig Jahre unterliegen die mittleren bis hoch gelegenen nivalen und glazialen Gebiete mehrheitlich signifikanten Veränderungen, charakterisiert durch generell höhere Abflüsse im Winter und tiefere im Sommer (Tabelle 1).

Gebiete in tieferen Lagen weisen vor allem im Sommer signifikant geringere Abflussmengen auf. Unter anderem verantwortlich dafür sind die höheren Lufttemperaturen und die damit zusammenhängenden größeren Verdunstungsraten.

#### **Literatur**

- Bader, S. & Bantle, H. 2004: Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001. MeteoSchweiz. Zürich.
- Kendall, M. 1975: Rank Correlation Measures. Charles Griffin, London 202.
- KHR 2007: Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert. Analyse, Veränderungen, Trends. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes KHR. Lelystad. (Bericht der KHR, I-22).

- Mann, H. B. 1945: Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13 (3), 245-259.
- Schädler, B. & Weingartner, R. 2007: Impact of 20th Century Climate Change on Water Resources in Mountainous Regions of Switzerland. In: Heinonen, M. (Hg.): *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, 411-416.
- Sen, P. 1968: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63 (324), 1379-1389.
- Theil, H. 1950: A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis (Parts 1-3). *Nederlandse Akademie Wetenschappen Series A* 53, 386-392.
- Weingartner, R. & Aschwanden, H. 1992: Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz (Tafel 5.2)*. Bern.
- Weingartner, R. & Pfister, Ch. 2007: Wie außerordentlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/06? - Eine hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Jg. 51, H. 1, 22-26.

**Autoren:**

Dipl. Geogr. Pascal Hänggi  
Prof. Dr. Rolf Weingartner  
Gruppe für Hydrologie  
Geographisches Institut  
Oeschger Zentrum für Klimaforschung  
Universität Bern  
Hallerstrasse 12  
CH-3012 Bern  
Tel. +41 (0)31 631 80 15  
Fax. +41 (0)31 631 85 11  
pascal.haenggi@giub.unibe.ch  
wein@giub.unibe.ch