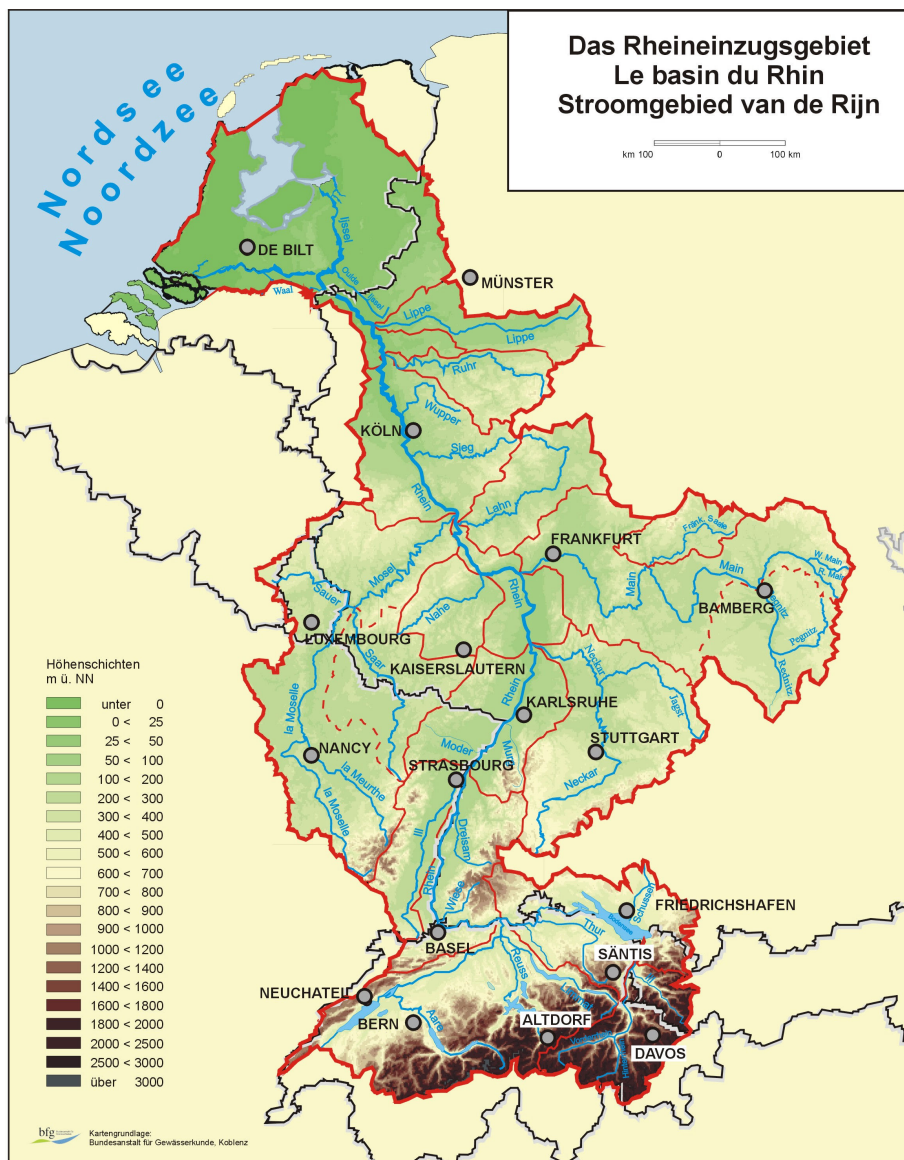


## Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert Analyse, Veränderungen, Trends

*In einer ausführlichen internationalen Studie sind klare Änderungen im Abflussregime des Rheins im 20. Jahrhundert festgestellt worden. Im Alpen-, Hoch- und Oberrhein besteht diese Änderung hauptsächlich aus einer saisonalen Verschiebung des Regimes, im nördlichen Bereich des Einzugsgebietes, unterhalb der Mainmündung, hauptsächlich aus einer Zunahme des winterlichen Abflusses. Signale der Auswirkung von Klimaänderungen sind also bereits im hydrologischen Verhalten im vergangenen Jahrhundert erkennbar, obwohl in vielen Fällen ergänzt und verstärkt durch anthropogene Einflüsse.*



**Abb.1 Rheingebiet**

### Die Aufgabenstellung

Der Rhein ist einer der bedeutendsten Flüsse Europas. Sein 185 000 km<sup>2</sup> großes Einzugsgebiet, in dem etwa 60 Millionen Menschen leben, erfasst neun Staaten: Beginnend mit einem Zipfel italienischen Territoriums nördlich von Chiavenna sind es

die Schweiz, Liechtenstein, Österreich, Deutschland, Frankreich, Belgien, Luxemburg und die Niederlande.

Vom 1320 km langen Flusslauf sind rund 800 km von Rotterdam bis Basel schiffbar. Auf dieser Strecke ist der Rhein eine der meistbefahrenen Wasserstraßen der Erde und spielt für die Anrainer eine herausragende Rolle im Güterverkehr. Die Schweiz beispielsweise wickelt mengenmäßig 15% ihres Außenhandels über den Rhein ab, bei Mineralölprodukten sind es sogar 35%.

Der Hauptstrom und die Nebenflüsse versorgen unzählige Industriebetriebe mit Brauchwasser und liefern zudem Kühlwasser für zahlreiche Wärmekraftwerke, atomare wie fossile. Die Kraft des strömenden Wassers erzeugt in Laufwasserkraftwerken oder in Kraftwerken an Talsperren aber auch selbst beträchtliche Strommengen.

Zudem ist der Rhein ein wichtiger Lieferant von Trink- und Brauchwasser. Stuttgart und weitere Kommunen im Neckargebiet beziehen es über Leitungen aus dem Bodensee, zahlreiche andere Städte und Gemeinden werden mit Uferfiltrat versorgt. Und am Ende muss der Fluss auch alle Abwässer, obschon gereinigt, wieder aufnehmen. Trotz dieser zivilisatorischen Beanspruchung zieht der „romantische Rhein“ nach wie vor Touristen aus aller Welt an.

Aus all diesen Gründen ist es eminent wichtig zu wissen, ob und wie sich die Wasserführung des Rheins in Zukunft verändern wird. Fundierte Prognosen lassen sich aber nur stellen, wenn die Prozesse im Flusssystem verstanden werden. Die Grundlage dafür ist wiederum eine eingehende Kenntnis von der Entwicklung der hydrologischen Kenngrößen in der Vergangenheit.

Deshalb hat die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets (KHR) eine fünfzehnköpfige Arbeitsgruppe eingesetzt, die detailliert analysiert hat, welche Veränderungen die Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im Verlauf des 20. Jahrhunderts erfahren haben und welche Ursachen gegebenenfalls dafür in Frage kommen: natürliche Klimaschwankungen, anthropogener Klimawandel, sowie direkte menschliche Eingriffe wie Flussbegradigungen und Eindeichungen, Staustufen, Talsperren, Wasserüberleitungen und Änderungen in der Landnutzung.

Die Ergebnisse der von 2003 bis 2007 erstellten Studie sind in dieser Broschüre in knapper Form zusammengestellt. Der Gesamtbericht wurde in Heft I-22 der KHR-Berichte veröffentlicht und kann beim IHP/HWRP-Sekretariat angefordert werden (0261-1306 5421; [strigel@bafg.de](mailto:strigel@bafg.de))

### **Der Rhein und seine Nebenflüsse – Ein Überblick**

Der Rhein durchfließt auf seinem Weg von den Alpen zur Nordsee verschiedene Landschaften und Klimazonen, was jeweils prägenden Einfluss auf die Wasserführung hat. Die beiden Hauptquellflüsse, der Vorder- und der Hinterrhein, entspringen in den Bergen des schweizerischen Kantons Graubünden und vereinigen sich oberhalb von Chur zum **Alpenrhein**, der westlich von Bregenz in den Bodensee mündet. Der Bodensee wirkt als effektives Ausgleichsbecken.

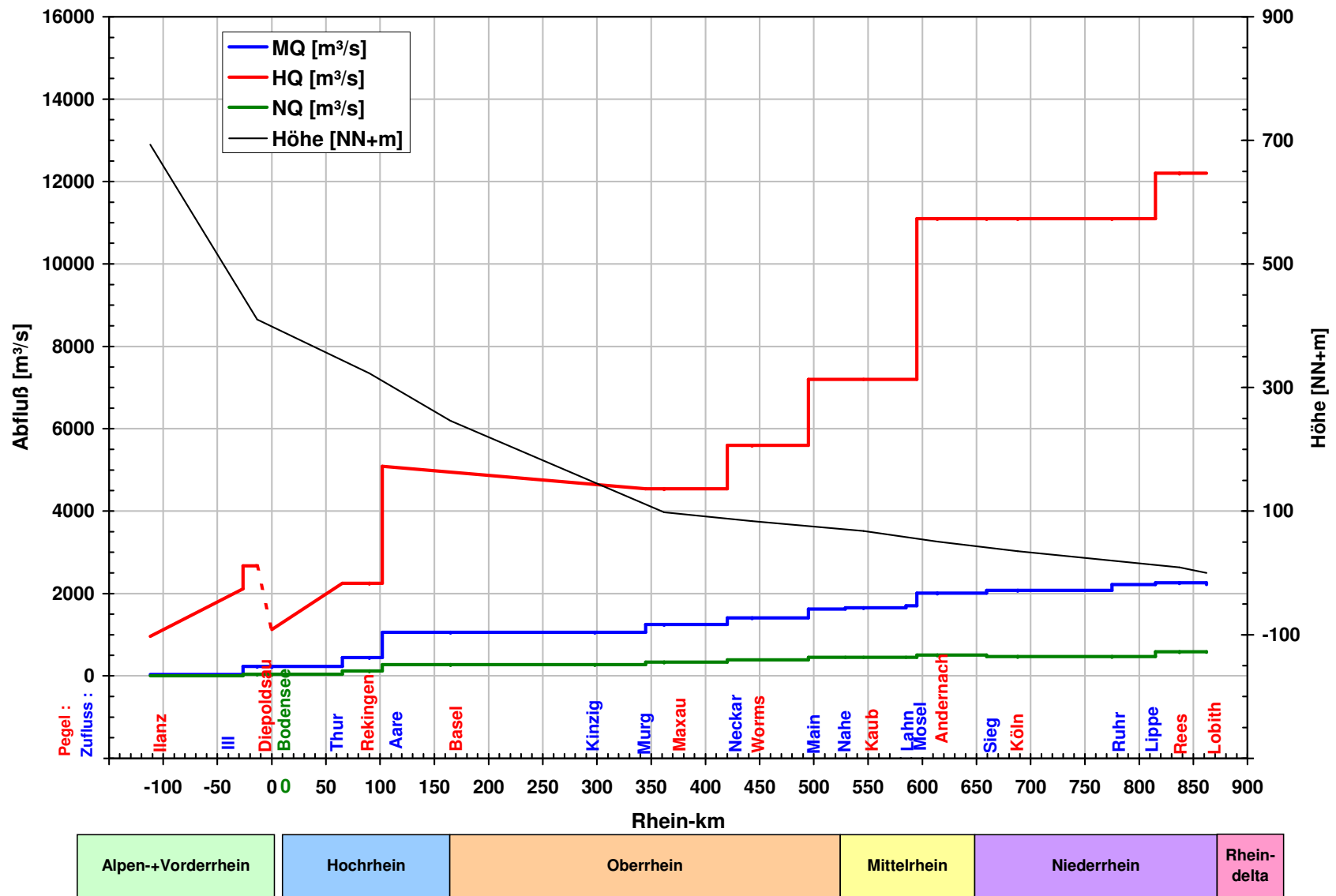


Abb. 2 Hydrologisches Längsprofil des Rheins

Während vor dem See Hochwasserscheitel bis zu  $2500 \text{ m}^3/\text{s}$  auftreten können, liegen die Spitzenwerte beim Ausfluss aus dem See nur knapp über  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Der Abschnitt bis Basel wird als **Hochrhein** bezeichnet. Auf dieser Strecke mündet beim schweizerischen Koblenz die Aare ein, die hydrologisch gesehen allerdings der bedeutendere Fluss ist; denn der mittlere Abfluss ist mit  $560 \text{ m}^3/\text{s}$  um ein Viertel höher als der des Rheins ( $440 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Rekingen). Obwohl das kombinierte Einzugsgebiet von Aare und Rhein am Zusammenfluss nur ein Fünftel des Einzugsgebietes am Pegel Lobith an der deutsch-niederländischen Grenze ausmacht, erreicht der mittlere Abfluss mit  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  schon fast die Hälfte des Wertes von Lobith. Das zeigt die Bedeutung der Alpen für die Wasserführung des Rheins.

Ab Basel beginnt der **Oberrhein**. Die Zuflüsse aus dem Schwarzwald und den Vogesen erhöhen in der Summe den mittleren Abfluss um  $190 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die mit Abstand wichtigsten Nebenflüsse auf der weiteren Strecke bis Bingen sind der Neckar und der Main, die im Mittel  $135 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $210 \text{ m}^3/\text{s}$  beisteuern.

Von Bingen bis Bonn durchbricht der **Mittelrhein** in einem bis zu  $200 \text{ m}$  tief eingeschnittenen Tal das Rheinische Schiefergebirge. Beim deutschen Koblenz mündet die Mosel ein, die mit durchschnittlich  $315 \text{ m}^3/\text{s}$  den mittleren Abfluss am Pegel Andernach auf  $2010 \text{ m}^3/\text{s}$  anhebt.

In Bonn beginnt der **Niederrhein**. Die Nebenflüsse erhöhen hier den mittleren Abfluss bis Lobith um weitere  $210 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $2220 \text{ m}^3/\text{s}$ . Danach erhält der Rhein keine Zuflüsse mehr und verzweigt sich in die Arme des Deltas.

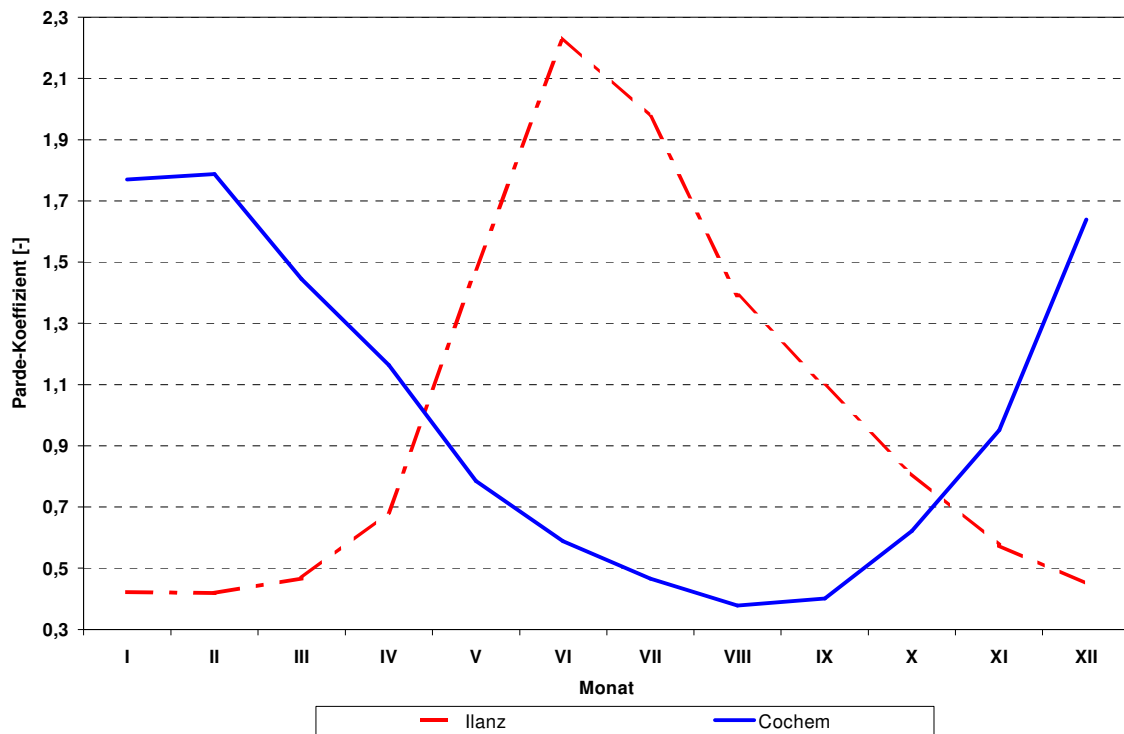
### **Das Abflussregime des Rheins**

Die Wasserführung eines Wasserlaufs – vom Bach bis zum großen Strom – wird stark durch den Niederschlag im Einzugsgebiet bestimmt. Zum Abfluss kommt letztlich die Wassermenge, die nicht durch Verdunstung oder mittels Transpiration durch Pflanzen verloren geht; Schwankungen im Abfluss werden durch die zeitliche Verteilung von Niederschlag und Verdunstung gesteuert. Fällt Niederschlag als Schnee, wird er erst verzögert beim Abschmelzen freigesetzt oder über noch längere Zeiträume als Eis in Gletschern gespeichert.

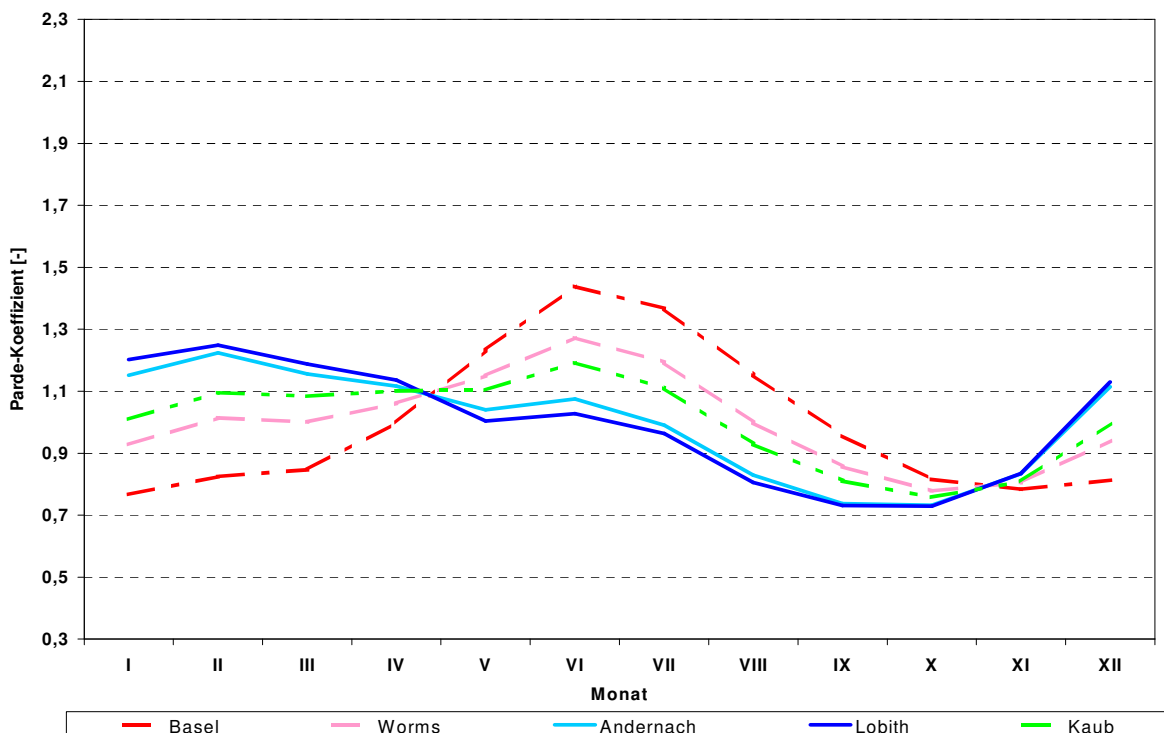
Unter "Abflussregime" versteht man, vereinfacht gesagt, den regulär zu erwartenden innerjährlichen Abflussgang eines Fließgewässers. Zur Beschreibung der Abflussschwankungen als Charakteristikum eines Abflussregimes hat sich ein Verfahren eingebürgert, das auf den französischen Hydrologen Pardé (1893 – 1973) zurückgeht. Dabei wird aus dem Verhältnis von monatlichem Abfluss zum Jahresabfluss eines Einzugsgebietes (jeweils gemittelt über viele Jahre) der sogenannte Pardé-Koeffizient gebildet. Die graphische Darstellung liefert eine charakteristische Kurve. Da der Pardé-Koeffizient dimensionslos ist, lassen sich so Wasserläufe unterschiedlich großer Abflussvolumina miteinander vergleichen. Im Einzugsgebiet des Rheins treten hauptsächlich folgende Typen von Abflussregimen auf (vgl. Abb. 3):

In den Alpen dominiert in extremer Ausprägung das durch Schneefall und Schneeschmelze geprägte **nivale Regime** (Bsp.: Pegel Ilanz) mit einer steilen

Abflussspitze im Frühsommer und sehr niedrigen Werten im Winter. Die Aare weist ebenfalls ein nivales Regime auf, das allerdings im Unterlauf unter anderem durch den Einfluss der Seen im Schweizer Mittelland stark gedämpft ist.



**Abb. 3** Charakteristische Abflussregimetypen im Rheingebiet: Pegel Illanz (nival / Vorderrhein), und Cochem (pluvial / Mosel)



**Abb. 4** Einzugsgebietsbedingte Veränderung des Abflussregimes des Rheins im Stromverlauf am Beispiel der Pegel Basel (Oberrhein), Maxau (Oberrhein), Laub (Mittelrhein), Andernach (Mittelrhein) und Lobith (Niederrhein)

Die großen Nebenflüsse in Deutschland, Neckar, Main und Mosel (Bsp.: Pegel Cochem), weisen durchweg ein **pluviales Regime** auf. Bedingt durch die Verteilung der Regenfälle und die jahreszeitlich unterschiedliche Verdunstungsintensität erreichen die mittleren Abflüsse ihr Maximum in den Wintermonaten und den Tiefstand im August und September.

Der Rheinpegel Basel (vgl. Abb. 4) weist durch den dominierenden alpinen Einfluss noch ein typisches nivales Regime auf, das stromabwärts durch die Nebenflüsse mit pluvialem Charakter überlagert. Da diese Nebenflüsse aber deutlich weniger Wasser führen als der Rhein selbst, bleibt die nivale Grundprägung des Rheinregimes noch bis zur Mainmündung erhalten. Erst beim Mittelrhein bewirken letztlich Main und Mosel durchgreifende Änderungen: Ab dem Pegel Andernach überwiegen die pluvialen Elemente. Die höchsten Abflüsse treten nun im Februar auf, die niedrigsten im September.

Das Abflussregime spiegelt das Wirkungsgefüge aller den Abfluss bestimmenden Faktoren wider. Neben den natürlichen Faktoren wird das Abflussregime von Flüssen auch zunehmend durch menschliche Maßnahmen beeinflusst. Das prominenteste Beispiel ist der Assuan-Stausee, der den Abfluss des Nils völlig verändert hat. Derart radikale Eingriffe hat es am Rhein nicht gegeben, aber die Wirkung von Talsperren, besonders in den Alpen, ist durchaus zu spüren.

### **Datenerhebung und Datenanalyse**

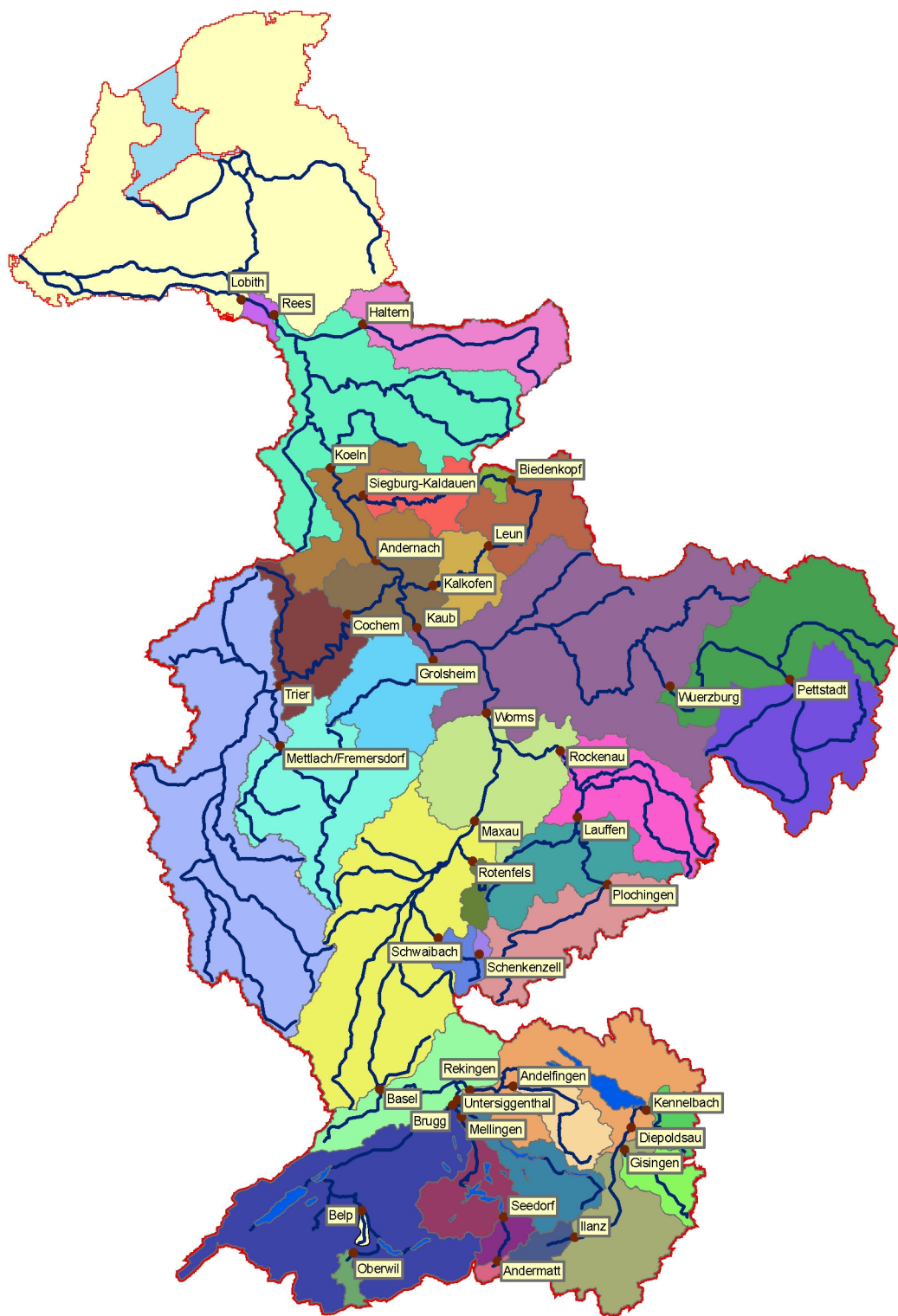
Um die Heterogenität im Einzugsgebiet des Rheins zu erfassen, wurde es in 38 Teileinzugsgebiete unterteilt, die jeweils durch einen Pegel repräsentiert werden, an dem mindestens seit 1951 fortlaufend die Tagesmittel des Abflusses registriert worden sind. Für 16 sogenannte Hauptpegel am Rhein und an wichtigen Nebenflüssen stehen diese Werte bereits seit 1901 bzw. 1904 zur Verfügung.

Die Zeitreihen liegen geprüft vor, gleichwohl ergab eine Durchsicht Unstimmigkeiten. Für acht der Hauptpegel - Maxau, Worms, Kaub, Andernach und Köln am Rhein, Würzburg am Main, sowie Trier und Cochem an der Mosel - konnten die festgestellten Inkonsistenzen nach einer eingehenden Analyse der Daten bereinigt werden .

Für die 38 Einzugsgebiete wurden analog zum Abfluss aus Daten von Wetterstationen tageweise die Gebietsniederschläge ermittelt und zu Monats-, Halbjahres-, Jahres- und Dekadenwerten aggregiert.

Die hydrologischen und meteorologischen Kenngrößen wurden in eine Datenbank eingegeben und daraus für jedes Einzugsgebiet folgende Reihen gebildet:

- Tagesmittelwerte des Abflusses;
- Mittlere monatliche, halbjährliche und jährliche Abflüsse;
- Niedrigste arithmetische Mittel des Abflusses von 7 bzw. 21 aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines Jahres oder Halbjahres;
- Hochwasserscheitel nach Jahren und Halbjahren;
- Hochwasserfüllen, d.h. die Jahres- bzw. Halbjahressummen aller Hochwasserereignisse, die einen bestimmten Schwellenwert überschreiten;
- Niederschläge auf Monats-, Halbjahres-, Jahres- und Dekadenbasis;
- Maximale monatliche Niederschläge.

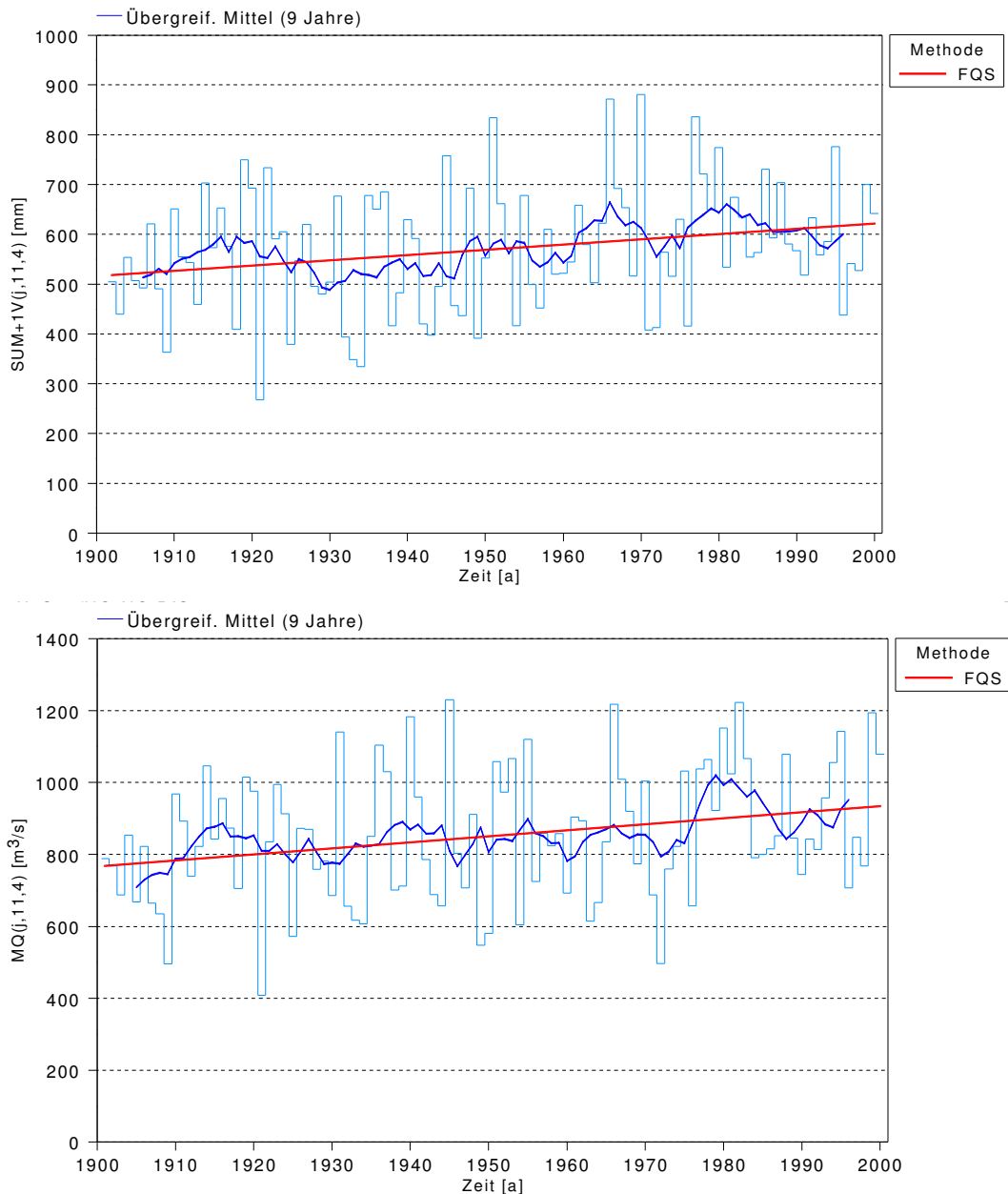


**Abb. 5 Die 38 Teileinzugsgebiete der Studie**

Ergänzend dazu wurden für 7 größere Teilregionen die halbjährlichen, jährlichen und dekadischen Mittel der Lufttemperatur sowie die jährlichen und dekadischen potentiellen Verdunstungshöhen erhoben.

Um Entwicklungen in den Zeitreihen sichtbar zu machen, wurden sie mit statistischen Methoden analysiert. Von besonderer Bedeutung dabei waren zur Identifizierung

vorhandener Entwicklungen die Sprung- und vor allem die Trendanalyse (Beispiele hierzu vgl. Abb. 6).



**Abb. 6 Beispiele für durchgeführte Trendanalysen: Entwicklung der winterhalbjährlichen Gebietsniederschlagssummen (oben) und MQ/mittleren Abflüsse (unten) im Teileinzugsgebiet bis Basel**

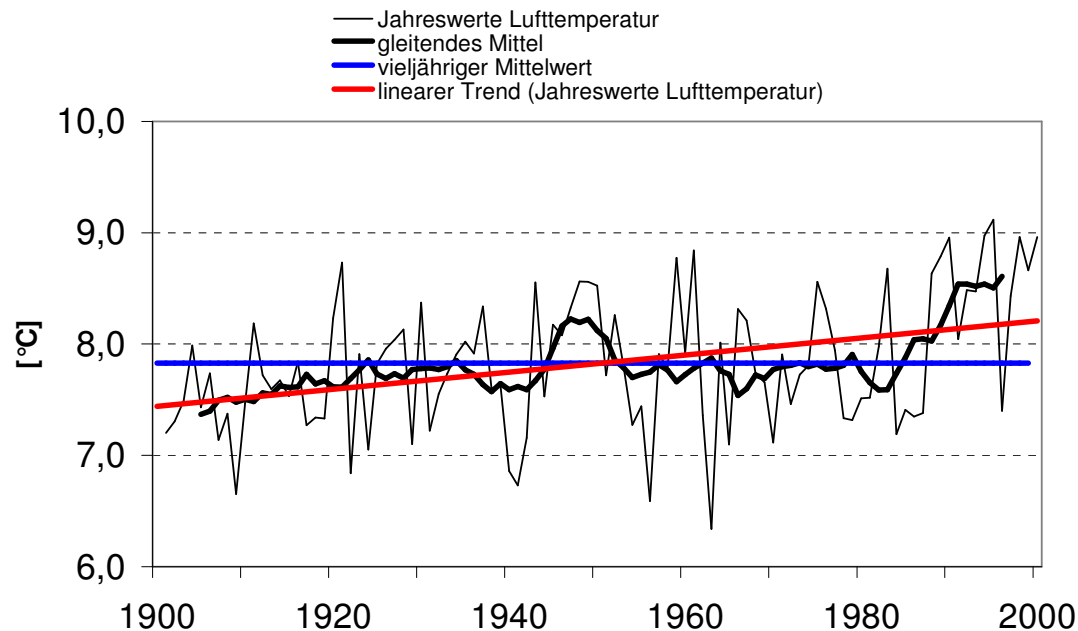
Angesichts unterschiedlicher Signifikanz der Trendergebnisse wurden diese nach drei Stufen klassifiziert:

- Tendenz, eine statistisch noch nicht abgesicherte Entwicklung
- Trend, eine statisch abgesicherte Entwicklung (mindestens 80% Signifikanz)
- Starker Trend, eine statistisch gut abgesicherte Entwicklung (mindestens 95% Signifikanz)



## Das Klima im 20. Jahrhundert Temperatur

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts nahm die Temperatur im Jahresmittel im Rheingebiet um 0,8 °C zu. Der Anstieg war dabei im hydrologischen Winterhalbjahr

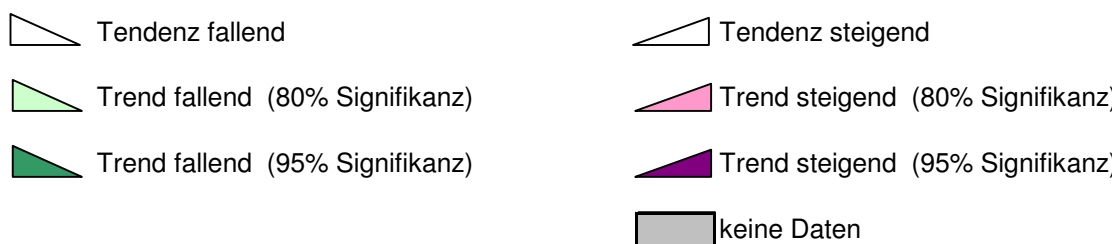
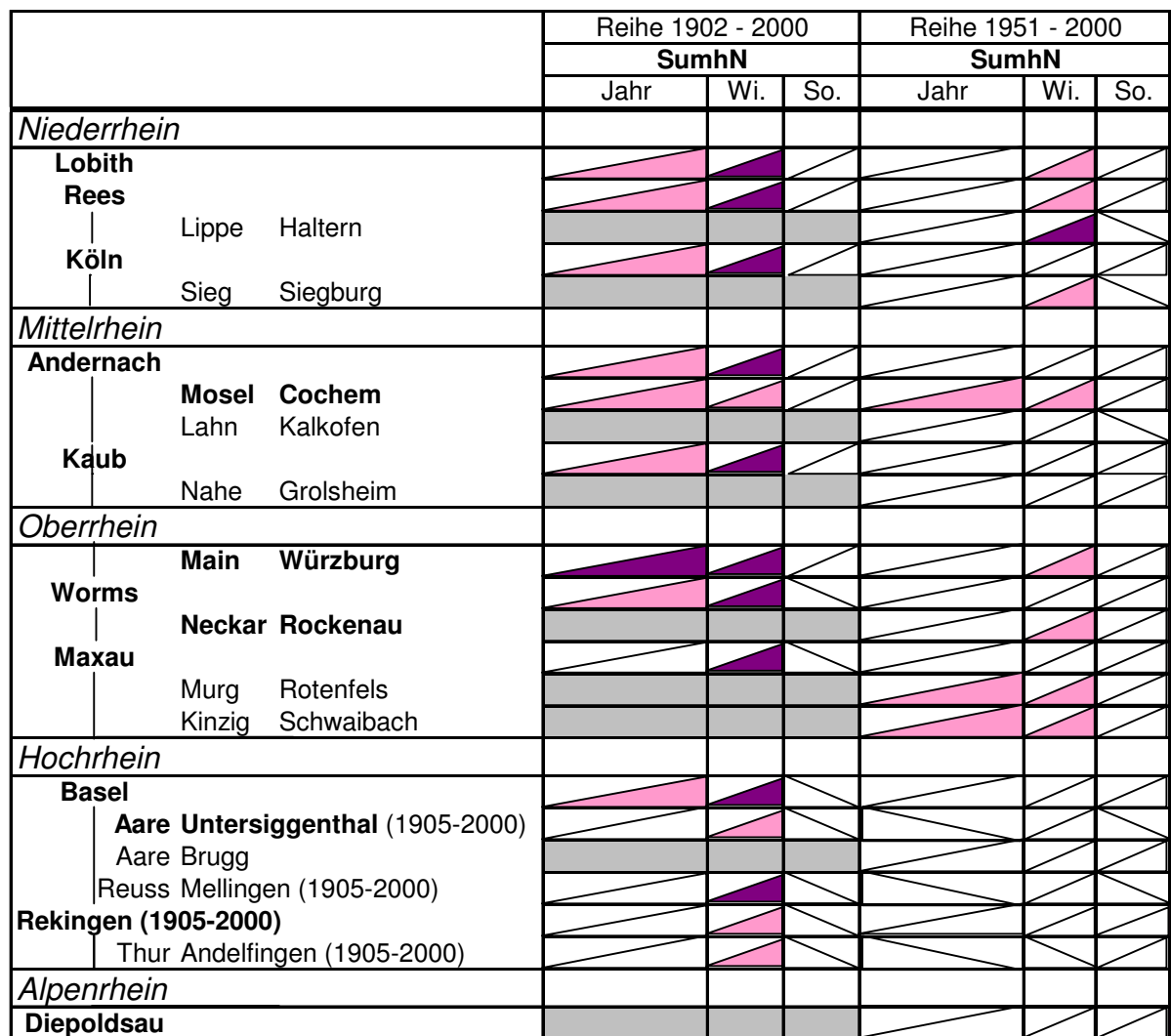


**Abb. 7 Lufttemperatur von 1901 – 2000 im Rheingebiet**

(November – April) höher als im Sommerhalbjahr (Mai – Oktober), nämlich 0,9 °C gegenüber 0,7 °C (vgl. Abb. 7). Im Einklang mit der weltweiten Entwicklung waren die Jahre von 1990 bis 2000 im Rheingebiet die wärmsten des 20. Jahrhunderts.

Eine detaillierte Analyse offenbart, dass der Temperaturanstieg im Winter höhenabhängig ist und auch nach Monaten differiert. Am stärksten fällt er in Höhen bis zu 500 Meter aus; dagegen sind in den Hochlagen, insbesondere im Februar und März, nur noch geringe Zunahmen zu verzeichnen. Im Sommer weist der August den stärksten Temperaturanstieg auf, wobei sich die gleiche Höhenabhängigkeit wie im Winter zeigt.

Die höheren Wintertemperaturen beeinflussen naturgemäß die Schneebedeckung. So wurde festgestellt, dass sich gegen Ende des 20. Jahrhunderts in der Schweiz unterhalb von 1300 m die Anzahl der Tage mit durchgehender Schneebedeckung verringert hat.



**Abb. 8 Trends und Tendenzen des Niederschlags für Teileinzugsgebiete**

### Niederschlag

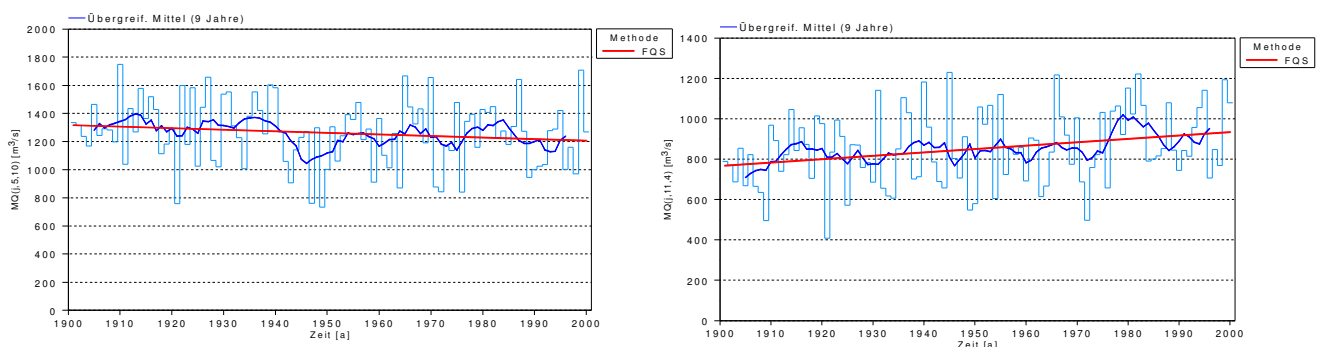
Im Rheingebiet als Ganzem hat der Niederschlag von 1901 bis 2000 zugenommen. Dies ist in erster Linie höheren Niederschlägen im Winter geschuldet. Von Basel bis Lobith ist für alle diejenigen Teileinzugsgebiete, die durch Rheinpegel repräsentiert werden, ein starker Anstiegstrend vorhanden. Ähnliche Entwicklungen manifestieren sich auch an den Nebenflüssen. Im Sommer hingegen sind kaum Änderungen festzustellen (vgl. Abb.8).

Die Entwicklungen stehen in Zusammenhang mit Änderungen der Großwetterlagen. So haben in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts im Winter und Frühjahr sogenannte „Westwetterlagen“ zugenommen, bei denen feuchte Atlantikluft herangeführt wird. Auch im Sommer hat sich das Wetter in diese Richtung verändert. Niederschlagsarme Hochdrucklagen treten dagegen seit 1950 deutlich weniger auf.

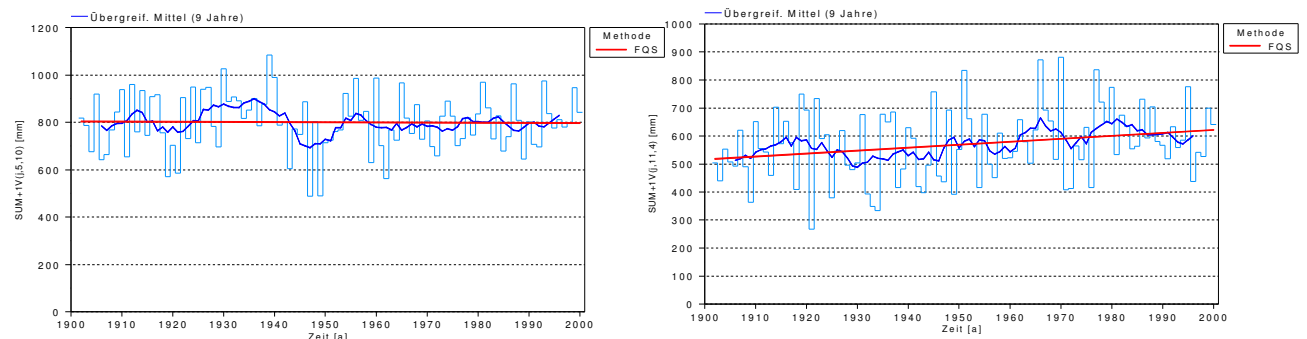
als in den Jahrzehnten zuvor. Aber da sich die Niederschlagsentstehung in dieser Jahreszeit komplexer gestaltet als im Winter, ist kein eindeutiger Einfluss auf die Niederschlagsentwicklung zu erkennen; viele dieser Prozesse sind noch Gegenstand der Klimaforschung.

## Die Entwicklung der mittleren Abflüsse Alpen- und Hochrhein

In den 14 Teileinzugsgebieten am Alpen- und Hochrhein zeigen, abgesehen von einem Fall, die Jahreswerte der mittleren Abflüsse keine gerichtete Entwicklung. Erst die getrennte Betrachtung nach hydrologischem Sommer- und Winterhalbjahr offenbart Veränderungen. Die winterlichen Abflüsse nehmen in sieben Gebieten zu, gleichzeitig gehen die sommerlichen Abflüsse in fünf Gebieten zurück. Am Pegel Basel tritt das für die jeweilige Periode deutlich als Trend zu Tage.



**Abb. 9a, b:** Entwicklung der mittleren Abflüsse (MQ) des Rheins bei Basel im Zeitraum 1901-2000 im Sommer- (links) und Winterhalbjahr (rechts)



**Abb. 9c, d:** Niederschlagsentwicklung im Rheingebiet bis Basel im Zeitraum 1901-2000 im Sommer- (links) und Winterhalbjahr (rechts)

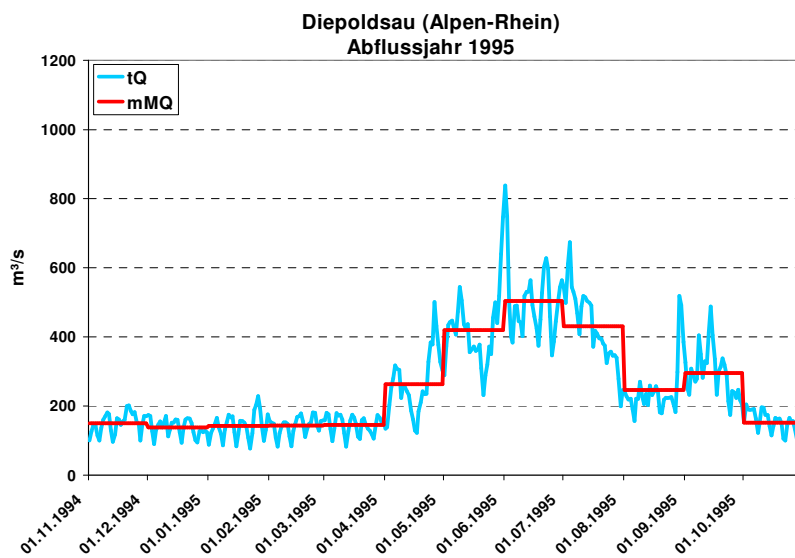
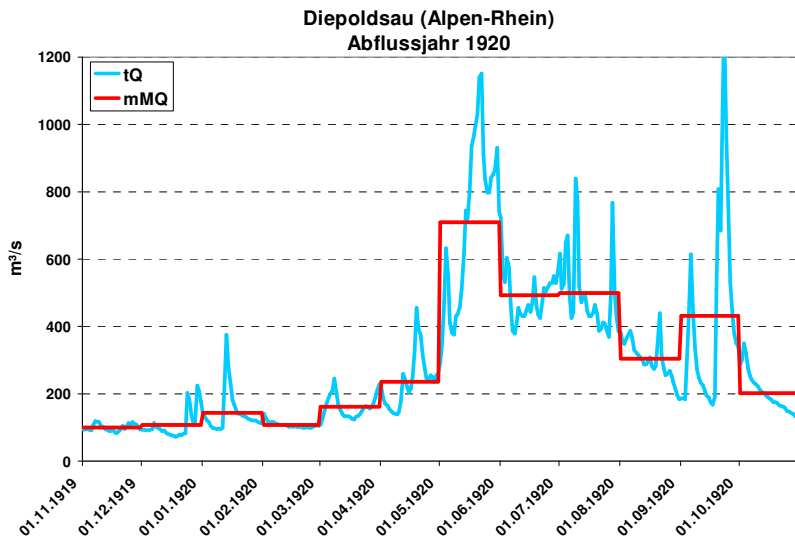
Der Anstieg der winterlichen Abflüsse geht einher mit einer Zunahme der Niederschläge; den abnehmenden Abflüssen im Sommer steht aber keine gleichgerichtete Abnahme der Niederschläge gegenüber. Sie sind konstant geblieben.

**Tab. 1 Speicherseen im Rheingebiet**

Rheinabschnitt bzw. Nebenfluss	Volumen [hm <sup>3</sup> ]	Summe d. Volumens [hm <sup>3</sup> ]
Vorderrhein	253,14	253,14
Hinterrhein	289,36	542,50
Tamina	38,50	581,00
Ill (A)	183,40	764,40
Bregenzerach	8,40	772,80
Bodensee	1,40	774,20
Thur	0,60	774,80
Hochrhein (CH)	7,26	782,06
Aare	496,95	1279,01
Reuss	153,19	1432,20
Limmat	314,86	1747,06
Hochrhein (D)	112,85	1859,91
Oberrhein	27,63	1887,54
Ill (F)	24,29	1911,83
Neckar	37,99	1949,82
Main	59,64	2009,46
Nahe	14,05	2023,51
Lahn	6,63	2030,14
Moselle	103,58	2133,72
Mosel	50,53	2184,25
Sauer	71,40	2255,65
Wied	4,45	2260,10
Ahr	0,73	2260,83
Sieg	123,10	2383,93
Wupper	140,43	2524,36
Erfurt	51,00	2575,36
Ruhr	496,06	3071,42
Lippe	50,01	3121,43

Demnach lassen sich die Veränderungen im Abfluss nicht allein mit der Niederschlagsentwicklung erklären, sondern es müssen noch andere Effekte wirksam sein: Bedingt durch den Temperaturanstieg im Winter fällt Niederschlag vermehrt als Regen anstatt als Schnee, wird also nicht zwischengespeichert, sondern fließt unmittelbar ab. Ebenso kommt durch Tauwetter immer wieder Schmelzwasser zum Abfluss. Im Winter fließt damit mehr Oberflächenwasser ab, das dann im folgenden Frühsommer nicht mehr zur Verfügung steht. Hinzu kommen aber noch anthropogene Einwirkungen.

Im Einzugsgebiet oberhalb von Basel sind im Laufe der Zeit, vorwiegend im alpinen Raum, Talsperren mit einem Stauraum von insgesamt 1,9 Mrd. m<sup>3</sup> entstanden. Die Speicher werden vorwiegend für die Stromproduktion genutzt, was eine typische einheitliche Bewirtschaftung zur Folge hat: Im Frühsommer, zu Zeiten hoher Wasserführung der Zuflüsse, werden die Stauseen gefüllt, um im Winter, bei Niedrigwasser, mit den Vorräten die Turbinen betreiben zu können.



**Abb. 10** Abflussgang am Pegel Diepoldsau im Vergleich der Jahre 1920 und 1995

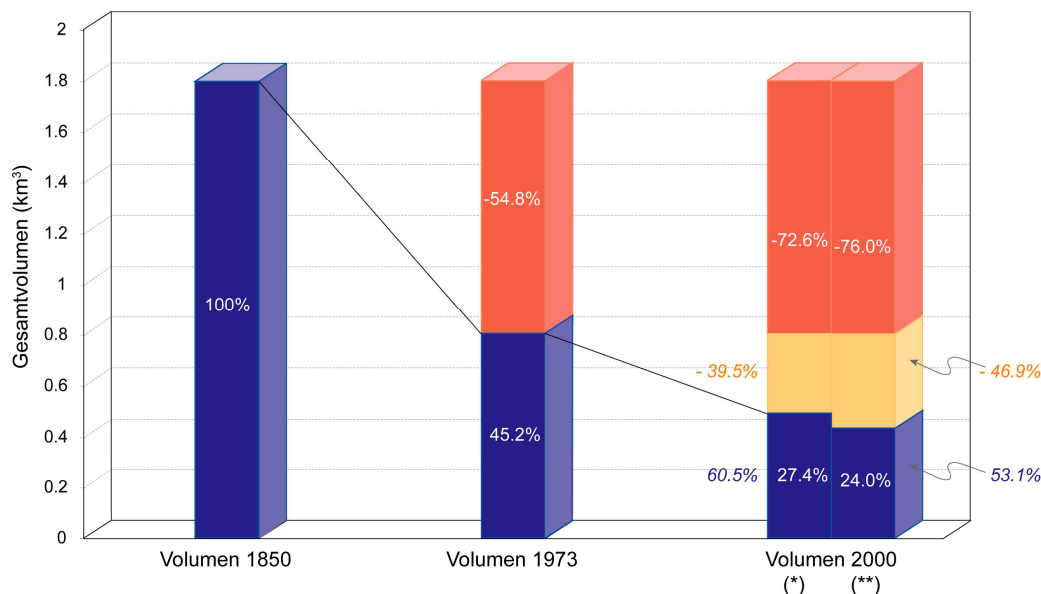
Ohne Kenntnis der jeweiligen Bewirtschaftungspläne lässt sich die Verschiebung der Wasserabflüsse nicht exakt quantifizieren, aber eine grobe Abschätzung kann die Größenordnung deutlich machen. Unter der vorsichtigen Annahme, dass die Hälfte des Stauvolumens von 1,9 Mrd.  $\text{m}^3$  in den sechs Wintermonaten abfließt, ergibt sich in diesem Zeitraum am Pegel Basel eine Abflusssteigerung um  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  und eine entsprechende Verringerung im Sommer.

Gut belegen lässt sich der Effekt durch den Vergleich der Abflussganglinien am Pegel Diepoldsau am Alpenrhein der Jahre 1920 und 1995. Im Jahr 1920 gab es im Einzugsgebiet noch keine größere Talsperre, bis 1995 war ein Speicherraum von 764 Mio.  $\text{m}^3$  entstanden. Obwohl die ausgewählten Jahre ähnliche Witterung aufweisen, unterscheiden sich die Ganglinien deutlich. Das winterliche Niedrigwasser ist angehoben, die Sommerabflüsse reduziert, der Abfluss gleichmäßiger übers Jahr verteilt.

Zusätzlich bestätigt wird der Einfluss der Speicherbewirtschaftung durch eine in der Studie ebenfalls angestellte Betrachtung von Einzugsgebieten ohne Talsperren: In

diesen Fällen ist die Umverteilung zwischen Sommer und Winter nur schwach ausgeprägt.

Um den Einfluss des **Gletscherschwundes** zu erfassen, ist exemplarisch das Einzugsgebiet oberhalb des Pegels Ilanz detailliert untersucht worden. Dort ist die Gletscherfläche von 1850 bis 2000 von 68,5 km<sup>2</sup> auf 21 km<sup>2</sup> geschrumpft, woraus sich unter bestimmten Annahmen eine Verringerung des Volumens von 1,8 km<sup>3</sup> auf 0,45 km<sup>3</sup> errechnen lässt. Damit sind in etwa Wasserreserven von insgesamt 1,16 km<sup>3</sup> freigesetzt worden, was in den vier Monaten Juni bis September, in denen die Gletscherschmelze überwiegend stattfindet, einen zusätzlichen Abfluss von 0,75 m<sup>3</sup>/s erzeugt. Überträgt man die Ergebnisse von Ilanz auf das gesamte Einzugsgebiet oberhalb von Basel mit einer zwanzigfach höheren Gletscherfläche, ist in diesem Zeitraum eine Abflusssteigerung um 15 m<sup>3</sup>/s zu erwarten. Das sind lediglich 1,2% des mittleren Abflusses im August. Die Zahl macht deutlich, dass der sogenannte „Gletscherschwund“ nur einen marginalen Einfluss auf die Wasserführung des Rheins hat.



**Abb. 11 Teileinzugsgebiet Ilanz - Entwicklung des Gletschervolumens, Periode 1850-2000**

### Oberrhein

Die Abflüsse im Oberrhein werden durch die Vorgaben vom Hochrhein her bestimmt. Die Talsperrenbewirtschaftung, die bis Basel eine Umverteilung von Abflüssen vom Sommer in den Winter bewirkt, spielt hier keine Rolle; denn das gesamte diesem Flussabschnitt zugeordnete Speichervolumen beträgt lediglich 150 Mio m<sup>3</sup>.

Die Zuflüsse aus dem Schwarzwald und den Vogesen sowie der Neckar und der Main sind dem pluvialen Typ zuzuordnen. Infolge höherer Niederschläge im Winter steigen ihre mittleren Abflüsse in dieser Saison deutlich an, was auch im Rhein zu einer weiteren Zunahme der Abflüsse führt.

Obwohl im Neckar- und Maingebiet die Niederschläge im Sommer stagnieren, nehmen die Abflüsse zu. Die Ursache dafür sind Überleitungen aus anderen Einzugsgebieten. Ab Mitte des 20. Jahrhunderts wird für den Ballungsraum zwischen Stuttgart und Heilbronn vom Bodensee, der Donau und dem westlichen Schwarzwald

Wasser zugeführt, das als Abwasser letztendlich dem Neckar zugute kommt. Seit den achtziger Jahren beträgt dieser Wassertransfer um die 200 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr. In ähnlicher Größenordnung bewegen sich die Zugewinne des Mains. Jährlich werden 125 Mio. m<sup>3</sup> Wasser von der Donau über die Schleusentreppe im Main-Donau-Kanal und weitere 25 Mio. m<sup>3</sup> von der Altmühl ins Einzugsgebiet des Mains übergeleitet. Die sommerlichen Abflusssteigerungen in Neckar und Main führen dazu, dass der noch bei Maxau zu beobachtende leichte Rückgang der sommerlichen Abflüsse sich in eine leichte Zunahme umkehrt (vgl. Tab. 2).

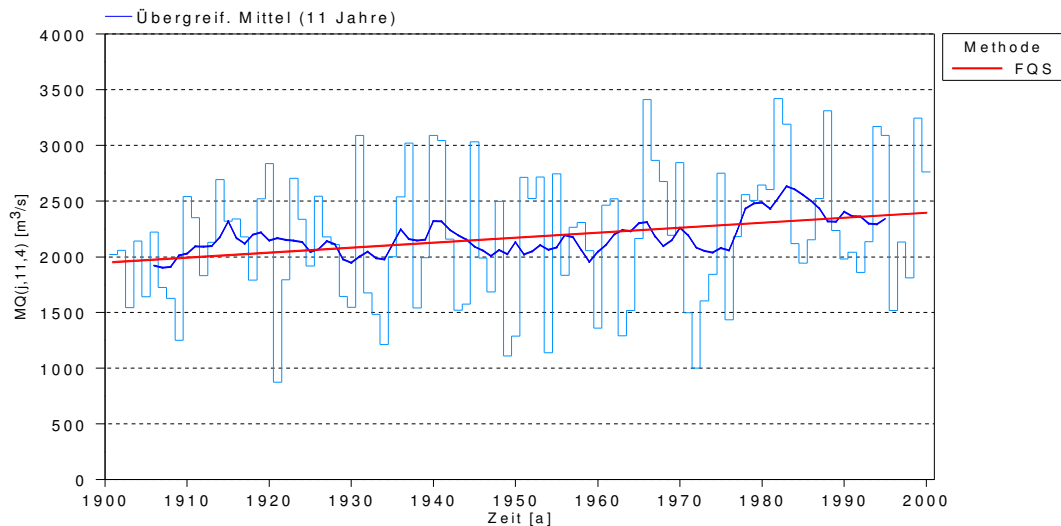
**Tab. 2 Veränderungen der mittleren Abflüsse (MQ) an ausgewählten Pegeln im Rheingebiet**

	Veränd. MQ <sub>Jahr</sub>		Veränd. MQ <sub>Sommer</sub>		Veränd. MQ <sub>Winter</sub>	
	%	m <sup>3</sup> /s	%	m <sup>3</sup> /s	%	m <sup>3</sup> /s
Maxau (Rhein)	7,0	87,6	-0,5	-10,3	16,5	176,0
Rockenau (Neckar)	23,0	27,8	24,0	20,8	22,5	34,9
Worms (Rhein)	7,5	104,0	1,5	22,1	14,5	186,0
Würzburg (Main)	31,5	31,8	25,5	16,9	38,5	46,9
Kaub (Rhein)	9,5	152,0	2,5	44,2	16,5	261,0

### **Mittel- und Niederrhein**

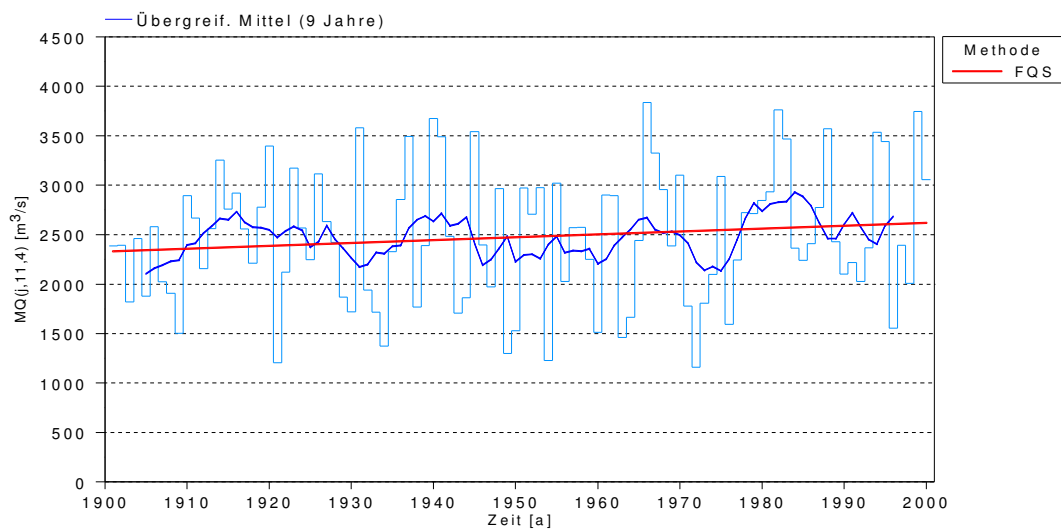
Unterhalb der Mainmündung beginnt bei Bingen der Mittelrhein. Unter den hiesigen Nebenflüssen den stärksten Einfluss übt die Mosel aus, in deren Einzugsgebiet maritimes Klima herrscht. Die Niederschläge liegen im Mittel bei 900 mm, am Westabhang der Vogesen werden sogar Spitzenwerte von 1800 mm erreicht. Im Winterhalbjahr haben im gesamten Moselgebiet die Niederschläge zugenommen, was sich am Pegel Cochem in einer Erhöhung des mittleren Abflusses von 420 auf 500 m<sup>3</sup>/s ausdrückt. Im Sommer hingegen sind nur geringe Veränderungen festzustellen.

Ähnliches gilt auch für die meisten anderen Nebenflüsse des Mittelrheins. Eine entsprechende Entwicklung zeigt sich auch für den Rhein, so zum Beispiel am Pegel Andernach unterhalb der Moselmündung (vgl. Abb. 12).



**Abb. 12 Pegel Andernach/Rhein - Mittlere Abflüsse (MQ) der Winterhalbjahre, Periode 1901-2000**

Bis zum Pegel Lobith an der deutsch-niederländischen Grenze (vgl. Abb. 13) empfängt der Rhein noch eine Reihe von Nebenflüssen, die durch menschliche Eingriffe stark verändert sind. So ist an Ruhr (500 Mio. m<sup>3</sup>), Sieg, Wupper und Erft mit insgesamt 810 Mio. m<sup>3</sup> nach den Alpen der meiste Speicherraum im Rheingebiet konzentriert. Aber die Talsperren werden vorrangig nicht zur Stromproduktion genutzt, sondern sind multifunktional und dienen mehreren Zwecken wie Trinkwasserversorgung, Niedrigwassererhöhung, Hochwasserschutz und Wassersport. Das führt zu Bewirtschaftungsplänen, deren hydrologische Folgen in unterschiedliche Richtungen wirken und sich so im Endeffekt egalisieren.

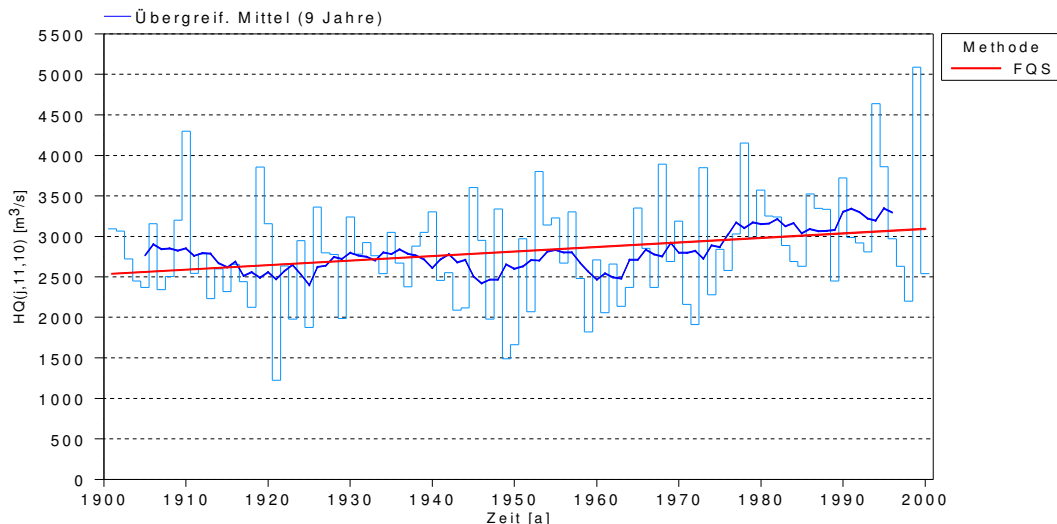


**Abb. 13 Pegel Lobith/Rhein - Mittlere Abflüsse (MQ) der Winterhalbjahre, Periode 1901-2000**



## Hochwasser

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts haben die Hochwasserscheitel im alpinen und präalpinen Rheingebiet (mit der durch Talsperrenbau und -betrieb bedingten Ausnahme Ilanz) zugenommen. Über den Pegel Basel (Abb. 14) hinaus pflanzt sich diese Entwicklung in den Oberrhein fort. An den Pegeln Maxau und Worms sind ähnliche Veränderungen wie in Basel festzustellen.



**Abb. 14** Pegel Basel/Rhein – jährliche Hochwasser-Scheitelabflüsse (HQ), Periode 1901-2000

Zusätzlich spielen aber noch Flussbaumaßnahmen eine Rolle: Im Zusammenhang mit dem Bau des linksrheinischen Grand Canal d'Alsace nach dem I. Weltkrieg und der Kanalisierung des Rheins bis zur Staustufe Iffezheim (1977) rückten die Deiche zum Hochwasserschutz näher an den Fluss heran, wodurch sich die Überschwemmungsflächen von 220 auf 90 km<sup>2</sup> verkleinerten. Außerdem laufen durch den begrädigten Fluss Hochwasserwellen schneller ab, so dass sie sich in ungünstigen Fällen mit denen aus Nebenflüssen, insbesondere aus dem Neckar, überlagern können. Dadurch könnten sich die Scheitelabflüsse von Hochwassern mit 200-jährlicher Wiederkehr unterhalb der Neckarmündung von 6000 auf 6700 m<sup>3</sup>/s erhöhen.

Die Deiche sind jedoch nur auf einen maximalen Durchfluss von 6000 m<sup>3</sup>/s ausgelegt. Die zur Bearbeitung des Problems eingesetzte Hochwasserstudienkommission für den Rhein (HSK) empfahl jedoch seinerzeit keine Erhöhung der Deiche, sondern eine Reihe von Maßnahmen, um die Hochwasserscheitel wieder auf den Stand vor dem Ausbau zu drücken.

1. Bei Hochwasser wird ein Teil der normalerweise über die Kanalstrecken abfließenden Wassermenge in das natürliche Rheinbett umgeleitet.
2. Bau von Retentionswehren im Flussbett.
3. Anlage von Poldern

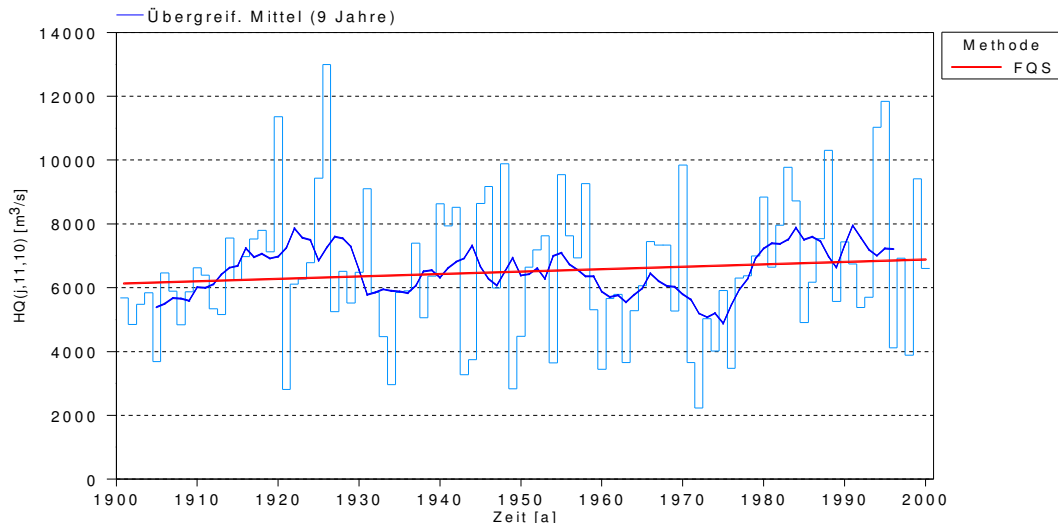
Zur Wiederherstellung des Hochwasserschutzes für ein 200-jährliches Ereignis ist ein Retentionsvolumen von 290 Mio. m<sup>3</sup> erforderlich. Die Maßnahmen 1 und 2 sind einsatzbereit und können im Hochwasserfall 82 Mio. m<sup>3</sup> zur Verfügung stellen. Der Bau von Poldern ist langwieriger. Das Retentionsvolumen der bislang fertiggestellten Anlagen summiert sich auf 62 Mio. m<sup>3</sup>, so dass insgesamt noch ein Fehlbetrag von

146 Mio. m<sup>3</sup> verbleibt. Doch die bereits realisierten Maßnahmen versprechen schon deutliche Wirkungen. Nach Modellrechnungen lassen sich dadurch in bestimmten Extremfällen die Hochwasserscheitel im Oberrhein um ca. 30 Zentimeter kappen; diese Wirkung verringert sich allerdings im Stromverlauf bis Köln auf unter 10 cm.

Am Mittel- und Niederrhein kommt es zu Extremhochwasser, wenn gleichzeitig mit einer Hochwasserwelle vom Oberrhein in den Einzugsgebieten der Nebenflüsse anhaltende Starkregen, unter Umständen gekoppelt mit Schneeschmelze, niedergehen. Sie sind im Laufe des 20. Jahrhunderts im Winterhalbjahr intensiver geworden. Im Sommer dagegen sind kaum Änderungen festzustellen.

Vor allem die Mosel ist in diesem Zusammenhang von Bedeutung. Weil im Einzugsgebiet wenig durchlässige Gesteine mit geringer Speicherfähigkeit vorherrschen, können sich Hochwasserwellen mit Spitzenabflüssen bis zu 4200 m<sup>3</sup>/s bilden, die damit das Maximum aller anderen Nebenflüsse weit übertreffen (zum Vergleich: Aare 2600 m<sup>3</sup>/s, Main bei Würzburg 1200 m<sup>3</sup>/s).

Der Pegel Lobith am Niederrhein spiegelt die Entwicklung für das Rheingebiet im Ganzen wider (Abb. 15). Hochwasserzeit ist hier fast durchweg der Winter. Deutlich zu erkennen ist, dass die Hochwasserscheitel-Zunahme vor allem einem steilen Anstieg in den letzten drei Dekaden des 20. Jahrhunderts geschuldet ist. Die Jahre 1920 bis 1930 waren allerdings ähnlich hochwasserreich. In dieser Periode trat auch das größte Hochwasser des Jahrhunderts auf (rd. 13000 m<sup>3</sup>/s im Januar 1926).



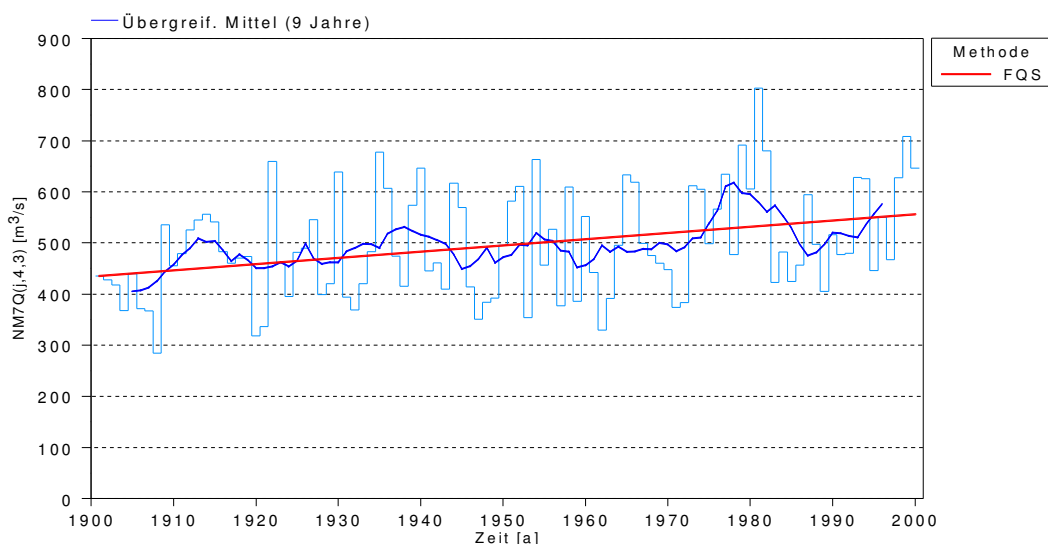
**Abb. 15 Pegel Lobith/Rhein – Hochwasser-Scheitelabflüsse (HQ) der Winterhalbjahre, Periode 1901-2000**

Die Maßnahmen zur Hochwasserdämpfung am Oberrhein machen sich auch am Niederrhein bemerkbar. Schon die bereits realisierten Projekte lassen Senkungen von einigen Zentimetern erwarten. Zur weiteren Risikominderung ist durch Deichrückverlegungen ein Retentionsvolumen von 68 Mio. m<sup>3</sup> geschaffen worden. In den Niederlanden soll durch das Programm „Raum für den Fluss“ eine Fläche von zusätzlich 17 km<sup>2</sup> für Ausuferungen entstehen.

## Niedrigwasser

Wenn auch weniger spektakulär als Hochwasser, so sind Perioden von Niedrigwasser nicht nur ökologisch, sondern auch sozio-ökonomisch, vor allem wegen Behinderungen der Schifffahrt, des Fehlens von Kühlwasser für die Wärmekraftwerke und verminderter Stromproduktion in den Wasserkraftwerken, nicht minder gravierend. Im Gegensatz zum Scheitelpunkt einer Hochwasserwelle gibt es bei Niedrigwasser keinen ähnlich ausgeprägten Tiefpunkt, sondern einen ausgedehnten Trog. Als Kenngrößen für derartige Extremsituationen werden die niedrigsten arithmetischen Mittel von 7 bzw. 21 aufeinanderfolgenden Tagen verwendet (NM7Q und NM21Q). Die typische Niedrigwasserzeit fällt je nach Abflussregime in unterschiedliche Jahreszeiten.

Bis Basel, also nivalen Regime, liegt sie im Winter. Dort ist eine Abmilderung der Niedrigwasserabflüsse zu beobachten (vgl. Abb. 16). Verantwortlich dafür ist die schon geschilderte Umverteilung von Abflüssen vom Sommer zum Winter aufgrund eines milderen Klimas sowie der gleichgerichtete Effekt aus der Bewirtschaftung der Talsperren.



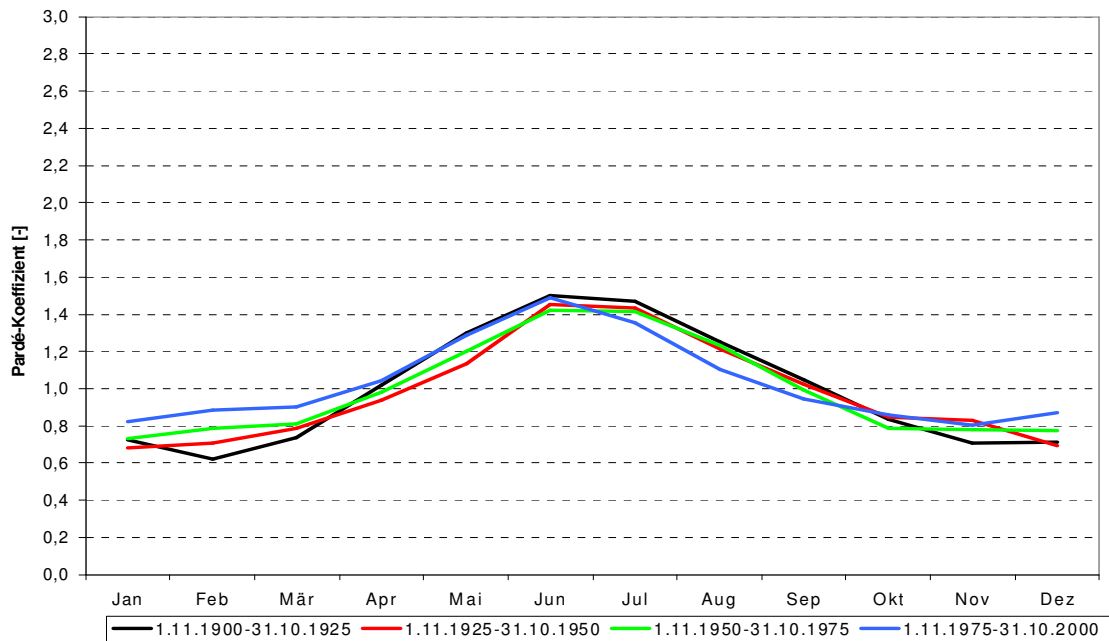
**Abb. 16** Pegel Basel/Rhein – winterhalbjährliche Niedrigwasserextreme (als NM7Q), Periode 1901-2000

Diese Entwicklung setzt sich in den Oberrhein fort, zumal auch an Neckar und Main im Winter aufgrund vermehrter Regenfälle Niedrigwasserperioden abgemildert sind. Im Sommer machen sich bei sehr geringen Niedrigwasserabflüssen die Wasserüberleitungen vom Bodensee bzw. vom Donaugebiet bemerkbar. So ist am Pegel Würzburg eine Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse von 35 auf 48 m<sup>3</sup>/s festzustellen.

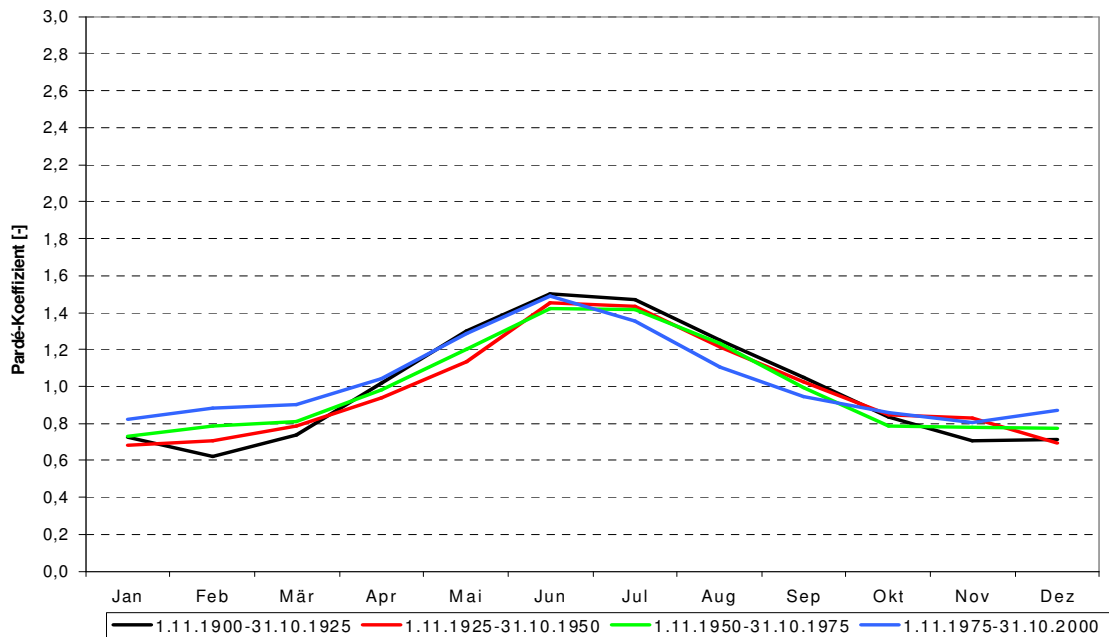
Bis Köln sind die Niedrigwasserabflüsse im Winter leicht angehoben worden, danach ist aber kein Trend mehr festzustellen. Extrem niedrige Abflüsse von unter 800 m<sup>3</sup>/s bis hinab zu 600 m<sup>3</sup>/s, wie sie bis 1960 gelegentlich auftraten, sind im 20. Jahrhundert nicht mehr beobachtet worden.

## Resümee

Mit der vorliegenden Studie ist erstmals die Entwicklung eines bedeutenden Stromgebiets über ein komplettes Jahrhundert dokumentiert und quantitativ-hydrologisch analysiert worden. Festgestellt wurde, dass sich überall im Einzugsgebiet Änderungen ergeben haben, sie fallen jedoch räumlich wie saisonal unterschiedlich aus.



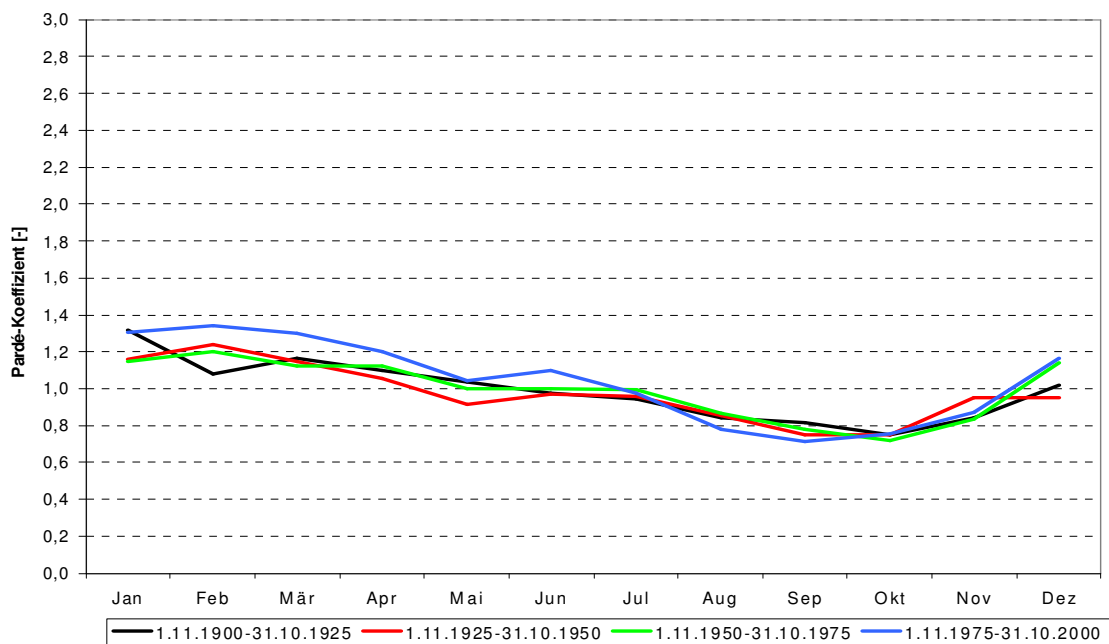
**Abb. 17** Pegel Basel/Rhein – Entwicklung des Abflussregimes (Pardé) im 20. Jahrhundert anhand des Jahrgangs der mittleren Monatsabflüsse (mMQ)



**Abb. 18** Pegel Worms/Rhein – Entwicklung des Abflussregimes (Pardé) im 20. Jahrhundert anhand des Jahrgangs der mittleren Monatsabflüsse (mMQ)

Im alpinen und voralpinen Gebiet, erfasst durch den Pegel Basel (vgl. Abb. 17), haben sich Abflüsse vom Sommer- ins Winterhalbjahr verlagert. Bedingt durch den

Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert fällt im Winter mehr Niederschlag als Regen anstatt als Schnee, wird also nicht zwischengespeichert, sondern fließt unmittelbar ab. Zudem kommt es infolge von Tauwetterperioden schon im Winter zu Abflüssen von Schmelzwasser, die dann im Frühsommer ausbleiben. Verstärkt wird der Wassertransfer zwischen den Jahreszeiten durch die gleichgerichtet wirkende Bewirtschaftung der Talsperren. Die im Sommer gespeicherten Wasserüberschüsse werden im Winter zur Stromproduktion abgegeben. Übers Jahr gesehen ergibt sich eine marginale Erhöhung des Abflusses, weil die Niederschläge im Winter zunehmen.



**Abb. 19 Pegel Lobith/Rhein – Entwicklung des Abflussregimes (Pardé) im 20. Jahrhundert anhand des Jahrgangs der mittleren Monatsabflüsse (mMQ)**

Im weiteren Verlauf lassen deutliche Abflusssteigerungen in den Nebenflüssen auch den Abfluss im Rhein ansteigen. Bedingt durch die Niederschlagsentwicklung geschieht das vornehmlich im Winter, in geringerem Maße aber auch im Sommer. Am Pegel Lobith hat sich der mittlere Abfluss im Laufe des 20. Jahrhunderts um ca. 11% erhöht. Parallel dazu sind auch die Hochwasserscheitel angestiegen. Durch eine Betrachtung der Abflussregime an verschiedenen Rheinpegeln im Abstand von Vierteljahrhunderten lässt sich das Bild noch verfeinern. Am Pegel Basel wird durch die gegenläufige Entwicklung im Sommer und Winter der Abfluss ausgeglichener. Dieses Muster pflanzt sich in den Oberrhein fort (Abb. 18). Die Abflussspitze im Juni bleibt dabei erhalten. Ab dem Mittelrhein, sehr deutlich ab dem Pegel Andernach, gewinnt im Laufe des Jahrhunderts jedoch das pluviale Element die Oberhand. Die zunehmenden Winterniederschläge im Einzugsgebiet der Nebenflüsse bewirken derartige Abflusssteigerungen, dass auch im Rhein selbst der mittlere Abfluss sein Maximum im Februar erreicht. Die Niedrigwasserabflüsse von August bis September sind hingegen kaum verändert. Dieses Muster bleibt bis zum Pegel Lobith (Abb. 19) erhalten.

Im Rheingebiet ist ein Bestand von hydrologischen und meteorologischen Daten vorhanden, wie er sonst weltweit wahrscheinlich kein zweites Mal vorliegt. Diesen

Schatz gilt es zu bewahren und zu pflegen. Dabei geht es nicht allein darum, weiterhin eine möglichst große Menge an Daten zu erheben, sondern es sollte noch konsequenter als bisher schon auf die Qualität geachtet werden. Nur möglichst fehlerfreie Daten in ausreichender räumlicher und zeitlicher Repräsentanz erlauben fundierte wissenschaftliche Aussagen. Ohne diese Grundlage stünde die hydrologische Praxis auf tönernen Füßen, ein Zustand, den sich die Gesellschaft bei einem Fluss von der Bedeutung des Rheins nicht leisten kann.