

5

5 Überprüfung der Hochwasserbemessungsgrundlagen für den Rhein in NRW

Im 1767 erlassenen Clever Deichreglement (Kapitel 4.2.2) wurde festgelegt, dass alle Banndeiche ... wenigstens einen rheinländischen Fuß höher als das höchste Wasser ... gebaut werden sollten. Die hinter dieser Aussage stehende Philosophie, Bemessungshochwasser aus höchsten bekannten Wasserständen zu ermitteln, ist bis weit in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts hinein gültig geblieben. So wurde im Jahre 1977 erstmals das aus dem Extremereignis von 1926 abgeleitete Bemessungshochwasser für den Rhein unterhalb von Köln aufgrund von Wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen neu festgelegt.

Ein besonderes Problem hinsichtlich der zu ermittelnden Abflüsse bestimmter Jährlichkeiten ist neben der Auswahl geeigneter theoretischer Verteilungsfunktionen und Anpassungstests die Zusammenstellung der Wertekollektive.

- Es sind die gemessenen Wasserstände zu prüfen und zu vereinheitlichen (Nullpunktkorrekturen, Bereinigung von Stauwirkungen z.B. Eis τ -Umrechnungen wegen Lageveränderungen der Pegel etc.).
- Es sind abgesicherte Wasserstand-Abflussbeziehungen zu schaffen und deren zeitliche Gültigkeitsintervalle festzulegen.
- Gegebenenfalls sind die Daten zu homogenisieren, d. h. anthropogene Einflüsse auf das Abflussverhalten zu eliminieren.

Im Rahmen der Untersuchungen, die zu den hiermit vorgelegten Ergebnissen geführt haben, wurde der Versuch unternommen, Grundlagenmaterial für eine bestmöglich abgesicherte Ermittlung von Bemessungshochwassern bereitzustellen.

Dies erfolgte in zwei Schritten:

- Zunächst wurden Hochwasserscheitelabflüsse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten aus historischen Hochwasserscheitelwerten ermittelt (Kapitel 5.1).
- Es folgten in einem zweiten Schritt Untersuchungen zu den Auswirkungen des Gewässerausbaus und der Hochwasserschutz- und Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf im Rhein (Kapitel 5.2) sowie auf die Hochwasserabflüsse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten (Kapitel 5.3 und 5.4).

5.1 Ermittlung von Hochwasserscheitelabflüssen (HQ) bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten (T) aus historischen Hochwasserscheitelwerten

HQ_T ist derjenige Scheitelabfluss, der in einer längeren Reihe von n aufeinander folgenden Jahren in der Zeitspanne von T Jahren einmal, somit insgesamt n/T mal, erreicht oder überschritten wird.

Der Wert HQ_T kann auch für Halbjahre (Winter und Sommer) gebildet werden; für Monate ist dies im Allgemeinen nicht sinnvoll. Bei der Ermittlung von HQ_T werden nur unabhängige Hochwasserscheitelwerte berücksichtigt. Dabei muss der Abfluss bzw. Durchfluss zwischen zwei benachbarten Hochwasserscheiteln mindestens bis auf die halbe Höhe des kleineren Scheitelwertes –bezogen auf das MQ der be-

trachteten Jahresreihe –abgesunken sein. Von dieser Bedingung kann abgewichen werden, wenn die benachbarten Scheitelwerte einen Abstand von mindestens sieben Tagen haben (Abbildung 5.1.1). Diese Bedingung ist eine notwendige Festlegung, die eine einheitliche Ermittlung gewährleisten soll. Sie dokumentiert nicht in jedem Fall die hydrologische Unabhängigkeit der einzelnen Hochwasserscheitelwerte voneinander. Es können partielle Serien oder/und Jahresreihen zugrunde gelegt werden. Bekannte historische Ereignisse außerhalb der verwendeten Zeitreihen sind bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Die Stichprobe ist auf Repräsentanz, Konsistenz und Homogenität zu prüfen [Länderarbeitsgemeinschaft (LAWA) und Bundesministerium für Verkehr (BMV), 1997].

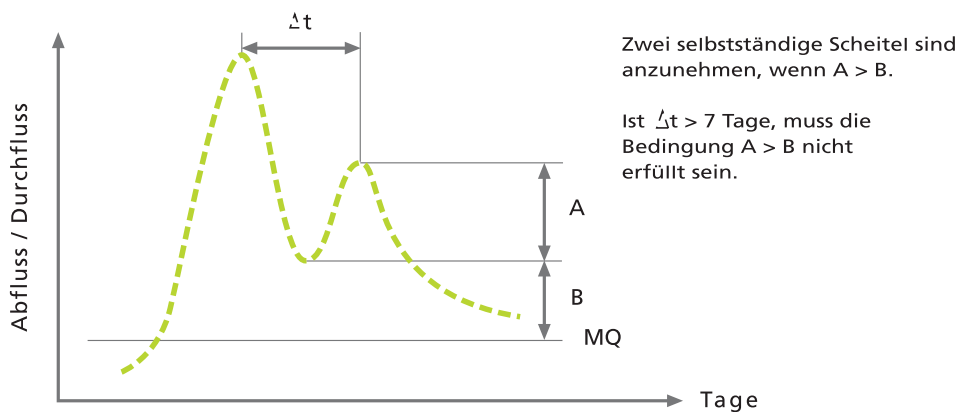


Abbildung 5.1.1: Kriterien für hydrologisch unabhängige Hochwasserscheitelwerte

5.1.1 Verfahrensweise

In Deutschland gibt es eingeführte Verfahren zur Berechnung von HQ_T . Sie finden vor allem durch Schriften des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK, 1979 und 1999) in der Fachwelt Anwendung. Neben einer umfangreichen Auswahl unter theoretischen Verteilungen werden dort Verfahren zur Parameterschätzung und Tests zur Prüfung der Anpassung der Verteilungsfunktionen an die verschiedenen Stichproben angeboten. Für die Wahl der Stichproben selbst werden prinzipiell zwei Möglichkeiten genannt:

- jährliche Serien (a)
- partielle Serien (b)

a) Jährliche Serien umfassen als Stichproben je einen Wert pro Jahr. In der Regel handelt es sich dabei um die jeweils höchsten Scheitelabflüsse pro Einzeljahr, es können jedoch auch die Jahreshöchstwerte, behaftet mit einem besonderen Merkmal (Winter, Sommer, Schneeschmelze usw.) sein.

b) Partielle Serien bestehen in aller Regel aus mehr Werten als die Anzahl der Jahre, denen sie entstammen. Üblicherweise wird ein Schwellenwert festgelegt, über dem alle unabhängigen Scheitel Berücksichtigung finden.

Im Rahmen der Aktivitäten der HSK wurde Anfang der 70er Jahre eine davon abweichende Methode der Datengewinnung für die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten vereinbart und allen entsprechenden HSK-Untersuchungen zugrunde gelegt. Die BfG hat für die Pegel der WSV diese Methode übernommen.

Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- Ermittlung der je zwei höchsten Abflussscheitel für die Winter- und Sommerhalbjahre des Abflussjahres gemäß Pegelvorschrift (LAWA und BMV, 1997).
- Bildung von partiellen HQ-Serien für Winter, Sommer und Jahr für **n Jahre**.
- Alle Werte der jeweiligen Reihe ($n \times 2$ Scheitel für Winter und Sommer, $n \times 4$ Scheitel für Jahr) werden der Größe nach geordnet.
- Die n größten Werte der Reihe bilden die Kollektive für die Berechnung der Verteilungsfunktionen.
- Ermittlung der Abflüsse ausgewählter Jährlichkeiten (Tabelle für $T = 2$ Jahre bis 1.000 Jahre) unter Verwendung von neun theoretischen Verteilungsfunktionen.
- Auswahl der Werte durch Prüfung der theoretisch erreichten Anpassung und Vergleich der Kurven mit den Plotting Positions, mit T , ermittelt über die empirische Formel nach Cunnane ($T = \frac{N + 0,2}{R - 0,4}$), worin N die Werteanzahl und R der Rang der Werte in der Reihe ist.
- In der Regel zeigt sich die Verteilung gemäß LOG Pearson III als die für WSV-Pegel am Besten angepasste.

Zwar ergeben die Berechnungen Scheitelabflüsse bis zur Jährlichkeit $T = 1.000$ Jahre, doch ist zu berücksichtigen, dass Extrapolationen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen um so weniger sicher sind, je größer die ermittelte Wiederholungszeitspanne gegenüber der Beobachtungszeitspanne wird. Die doppelte bis höchstens zweieinhalbfache Länge der Beobachtungszeitspanne sollte die Obergrenze der Extrapolation darstellen. Höhere Jährlichkeiten haben nur noch die Qualität von Abschätzungen und sind als solche zu kennzeichnen.

Üblicherweise werden die Ergebnisse für die **hydrologischen Jahre** für Bemessungszwecke benutzt. Die Ergebnisse für die Halbjahre dienen im Allgemeinen lediglich als Grundlage für Sonderuntersuchungen und spezielle Bewertungen. Es ist möglich, die Jahresverteilung direkt aus den Kollektiven der Jahreshöchstwerte zu ermitteln oder als kombinierte Verteilung aus den Halbjahresergebnissen $P_{UK} = 1 - \{(1 - P_{UWI}) + (1 - P_{USO}) + (1 - P_{UWI}) \cdot (1 - P_{USO})\}$ zu berechnen.

Die Berechnungen der HQ_T für die Niederrheinstrecke von Bonn bis Rees, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden, wurden im April 1996 in der BfG durchgeführt. Grundlage waren die vier Jahreshöchstwerte.

5.1.2 Berechnete Hochwasserscheitelabflüsse ausgewählter Eintrittswahrscheinlichkeiten

Unterhalb der Moselmündung liegen an der deutschen Rheinstrecke vier Pegel (Andernach, Köln, Düsseldorf und Rees), für die seit vielen Jahrzehnten Abflüsse ermittelt werden. Zwischen diesen Pegeln sind weitere Messstellen eingeschoben, für die offiziell nur Wasserstände erhoben werden. Abflussmessungen

aus der Nachkriegszeit ermöglichen es jedoch, inzwischen auch hier Durchflüsse anzugeben.

Eine Zusammenstellung der Scheitelabflüsse, mit dem Ziel Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu bestimmen, erfordert die Plausibilisierung zeitlich aufeinander folgender Abflusskurven an den einzelnen Pegeln und der Abflusskurven benachbarter Pegel. Eine Abstimmung der Datenreihen ab 1901 erschien aussichtsreich, weshalb einheitlich das Scheitelabfluss-Kollektiv 1901 bis 1995 als Grundlage für die HQ-Berechnungen angestrebt und hinsichtlich der vier oben genannten Hauptpegel auch ohne größere Probleme möglich war.

Eine verlässliche Abflussermittlung am Pegel Bonn war nicht möglich. Für die Pegel Ruhrort, Wesel und Emmerich ergaben sich Schwierigkeiten, die für Ruhrort letztlich ausräumbar waren, für die Pegel Wesel und Emmerich jedoch hinsichtlich der Zeitreihe 1901 bis 1945 bestehen blieben. Es ergaben sich wie folgt ausreichend plausible Datenkollektive:

1901 bis 1995: Andernach, Köln, Düsseldorf, Ruhrort, Rees

1946 bis 1995: Wesel, Emmerich

Diesen Datenkollektiven entsprechend waren die HQ_T für fünf Pegel aus Werten einer 95er-Jahresreihe und für zwei Pegel aus Werten einer 50er-Jahresreihe ermittelbar. Um die Ergebnisse für alle Pegel vergleichbar zu machen, wurden die HQ_T für die Pegel mit den langen Reihen auch aus verkürzten Kollektiven (1946 bis 1995) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1.2.1 für ausgewählte Jährlichkeiten zusammengestellt. Da aus Wahrscheinlichkeitsberechnungen nur sinnvolle Ergebnisse zu erwarten sind, wenn die

5

berechneten Jährlichkeiten maximal die doppelte Länge der Datenreihe erreichen, können die Abflüsse für 200 Jahre (Reihe 1946 bis 1995) bzw. für 500 Jahre (Reihe 1901 bis 1995) jeweils nur als grobe Anhaltswerte betrachtet werden. Die entsprechenden Daten sind deshalb kursiv gedruckt. -Zur Veranschaulichung der Ergebnisse sind diese in Abbildung 5.1.2.1 entlang des Rheins Pegel für Pegel aufgetragen.

Aus der Grafik lässt sich erkennen, dass die Abflüsse gleicher Jährlichkeiten in Ruhrort bzw. Wesel die Maxima erreichen und dass sich in Düsseldorf systematisch niedrigere Werte als in Köln ergeben.

Das rheinabwärts unsystematische Schwanken der HQ-Werte gleicher Jährlichkeiten findet seine Entsprechung in der stromab unsystematischen Zu- oder Abnahme der Abflussscheitel.

Die Scheitelwerte von Hochwasserereignissen sind eine Funktion der Abflussfülle, der Weiterleitung durch die örtliche Geometrie und des Retentionsvermögens einzelner Gewässerabschnitte. Zwischen den Pegeln am Niederrhein können einerseits erhebliche Retentionseinflüsse wirksam sein; seitliche Zuflüsse bedingen andererseits nur unter bestimmten Voraussetzungen merkbare Scheiterhöhungen. -Dementsprechend kann nicht erwartet werden, dass Scheitelwerte desselben Hochwasserereignisses stromab grundsätzlich zunehmen oder zumindest gleich bleiben.

Tabelle 5.1.2.1:
Abflüsse [m³/s] ausgewählter Jährlichkeiten [Jahre] für sieben Pegel am Rhein zwischen Moselmündung und deutsch-niederländischer Grenze, ermittelt aus den Zeitreihen 1901 bis 1995 bzw. 1946 bis 1995

1) Für eine gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug. Deshalb sind die angegebenen Werte nur als Anhaltswerte zu verstehen.

HQ _T [m³/s]								
Zeitreihe	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95
Jährlichkeit	2		5		10		20	
Andernach	6600	7100	7860	8270	8740	9050	9620	9800
Köln	6770	7270	8020	8440	8900	9230	9770	10000
Düsseldorf	6820	7310	8050	8460	8900	9210	9710	9930
Ruhrort	6960	7410	8270	8630	9200	9470	10130	10290
Wesel		7320		8570		9450		10320
Rees	7010	7390	8270	8590	9160	9410	10050	10220
Emmerich		7350		8550		9380		10210

HQ _T [m³/s]								
Zeitreihe	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95	1901 – 95	1946 – 95 ¹⁾	1901 – 95 ¹⁾	1946 – 95
Jährlichkeit	50		100		200		500	
Andernach	10800	10790	11730	11550	12700	12320	14050	–
Köln	10950	11020	11880	11810	12840	12610	14180	–
Düsseldorf	10820	10870	11670	11590	12550	12310	13770	–
Ruhrort	11400	11380	12400	12220	13450	13100	14930	–
Wesel		11500		12420		13390		–
Rees	11260	11300	12220	12150	13230	13010	14630	–
Emmerich		11310		12170		13060		–

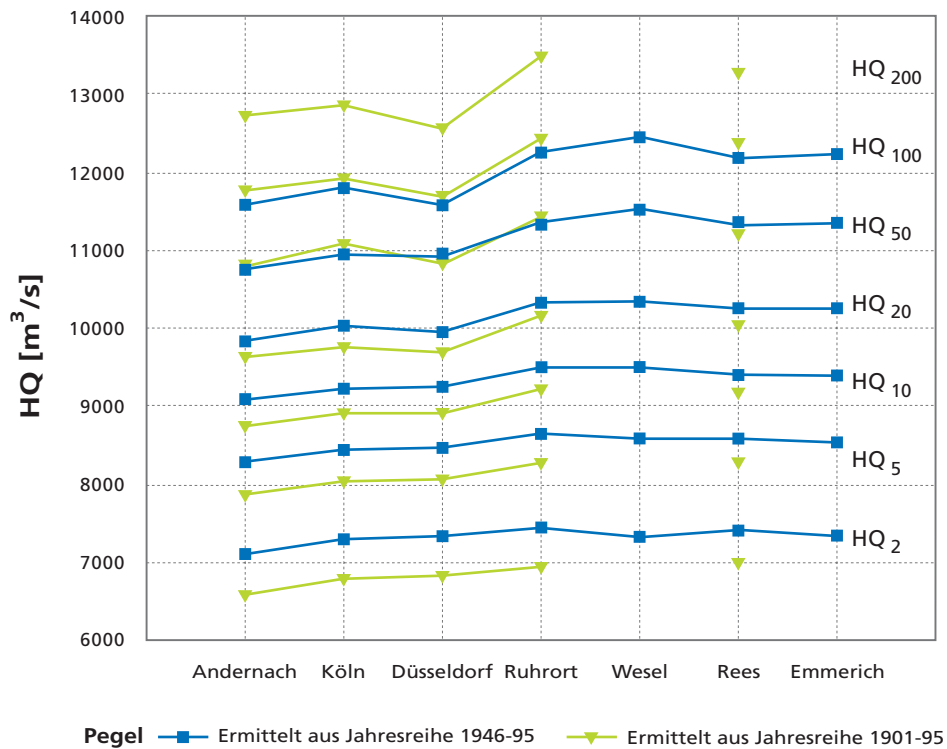


Abbildung 5.1.2.1:
Entwicklung der Abflüsse
ausgewählter Jährlichkeiten
entlang des Niederrheins
zwischen Andernach und
Emmerich

Darüber hinaus wird aus Abbildung 5.1.2.1 ersichtlich, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus den kurzen Reihen gegenüber denen aus den langen Reihen um das HQ_{50} als Drehpunkt verkippt sind. Dies bedeutet, die Abflüsse $< HQ_{50}$ zeigen bei den langen Reihen eine Tendenz zu kleineren Werten als die der kurzen Reihen; die Abflüsse $> HQ_{50}$ liegen für die langen Reihen dementsprechend tendenziell über denen aus den kurzen Reihen.

Ergänzende Berechnungen zeigen, dass die Mittelwerte der Scheitelabflüsse 1946 bis 1995 höher liegen als die Mittelwerte der Scheitelabflüsse 1901 bis 1950. Gleiches gilt für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen

der Reihe 1946 bis 1995 gegenüber 1901 bis 1950. Ein Vergleich der Scheitelwert-Kollektive ergibt zudem, dass die kleinsten in den Reihen 1946 bis 1995 enthaltenen Scheitelabflüsse um 220 bis 460 m^3/s größer sind als die minimalen Scheitelabflüsse in den Kollektiven 1901 bis 1995 und um 530 bis 820 m^3/s größer als die minimalen Scheitelabflüsse in den Kollektiven 1901 bis 1950. In Tabelle 5.1.2.2 sind die Ergebnisse der ergänzenden Berechnungen zusammengestellt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse werden aus anderen Untersuchungen gestützt, nach denen in den letzten 100 Jahren die Abflüsse an allen Rheinpegeln sowohl im Mittel als auch in den Extremen Tendenzen des Anstiegs zeigen.

5.1.3 Vorschlag für HQ_T -Werte als Grundlage für die Festlegung eines Bemessungshochwassers

Ziel der Extremwertstatistik ist es, zu Bemessungsabflüssen zu gelangen, die in den nächsten Jahren als gültige Richtwerte bei allen Planungen und Baumaßnahmen zugrunde gelegt werden können. Einerseits sollten die verwendeten Datenkollektive für derartige Statistiken im Sinne ausreichender Stabilität möglichst lange Zeiträume umfassen. Andererseits ist von den Daten eine möglichst weitgehende Homogenität zu verlangen. Der Konflikt aus beiden Forderungen vergrößert sich mit zunehmender Länge der Datenreihen.

Während sich die Inhomogenitäten infolge Veränderungen der Bettverhältnisse des Rheins und einiger großer Nebenflüsse durch Einsatz mathematischer Modelle noch herausrechnen lassen, ist das für die Veränderungen an allen anderen Gewässern und im Einzugsgebiet insgesamt nicht möglich.

Hochwasserablaufberechnungen an Rhein, Mosel und Saar lassen erwarten, dass langfristig von den Flussbaumaßnahmen an diesen Gewässern Wirkungen im Bereich der kleineren Hochwasser verbleiben werden, während die großen Hochwasser statistisch nach Größe und Häufigkeit kaum Änderungen erfahren. Insofern treffen die 50-Jahres-Kollektive der historischen Scheitelabflüsse (1946 bis 1995) tendenziell die derzeitigen Verhältnisse eher als die Daten aus den langen Reihen.

Da wegen der verbleibenden Unsicherheit der statistischen Verfahren und anderer möglicher Fehlerquellen die Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten nie exakt berechnet werden können, ist in jedem Fall eine abschließende Festlegung auf bestimmte Werte erforderlich. Diese muss auf sorgfältigen hydrologischen Überlegungen basieren und durch Diskussion mit allem beteiligten Sachverständigen abgesichert sein.

Tabelle 5.1.2.2:
Gegenüberstellung von HQ_T
und Kennwerten, ermittelt aus
den beiden Teilreihen 1901 bis
1950 und 1946 bis 1995

Pegel	Scheitelabflüsse [m³/s] der Jährlichkeiten [Jahre]												Mittel der Scheitelabflüsse [m³/s]			Niedrigste Scheitelabflüsse [m³/s]		
	2		5		10		20		50		100		im Kollektiv			im Kollektiv		
	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	01/50	46/95	Δ Q	01/50	46/95	Δ Q
Andernach	6000	7100	7290	8270	8260	9050	9290	9800	10760	10790	11970	11550	6380	7334	954	4950	5700	750
Köln	6140	7270	7420	8440	8380	9230	9380	10000	10800	11020	11970	11810	6511	7518	1007	5070	5890	820
Düsseldorf	6420	7310	7500	8466	8430	9210	9370	9930	10700	10870	11770	11590	6585	7525	940	5150	5860	710
Ruhrort	6410	7410	7780	8630	8810	9470	11060	10290	11450	11380	12730	12220	6817	7679	862	5250	6050	800
Wesel	--	7320	--	8570	--	9450	--	10320	--	11500	--	12420	--	7620	--	--	6030	--
Rees	6539	7390	7850	8590	8820	9410	9820	10220	11220	11300	12360	12150	6904	7660	756	5410	5940	530
Emmerich	--	7350	--	8550	--	9380	--	10210	--	11310	--	12170	--	7623	--	--	5940	--

Was die Tatsache anbetrifft, dass die Abflüsse gleicher Jährlichkeiten in Ruhrort bzw. Wesel ihr Maximum erreichen, so wurde es seinerzeit für schwierig gehalten, eine Abnahme der Abflüsse gleicher Jährlichkeiten den Betroffenen stromab verständlich zu machen. Ein erster Vorschlag enthielt HQ_T für Jährlichkeiten zwischen 10 und 500 Jahren. Als Maximum wurde ein Abfluss zwischen den Rechenwerten für Ruhrort und Wesel gewählt und ab Ruhrort für die Reststrecke konstant gehalten. Die Werte für Andernach bzw. Köln sollten jeweils auch für Bonn bzw. Düsseldorf gelten.

Die HSG NRW hat auf Grundlage der beschriebenen Untersuchungen und nach intensiver Diskussion hydrologisch begründete Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten erarbeitet. Diese sind in Tabelle 5.1.3.1 aufgeführt. Die Werte des Pegels Bonn wurden mit Bezug zum Pegel Andernach statistisch ermittelt und gelten bereits ab der Landesgrenze. Der Inhalt der Tabelle 5.1.3.1 wurde im August 1996 durch das Landesumweltamt NRW offiziell bekannt gemacht und ist eine hydrologische Grundlage auch für die noch festzulegenden Bemessungsabflüsse für den Rhein in NRW.

Pegel	Jährlichkeit [Jahre]	Durchfluss [m^3/s]
Bonn	100	11.700
	200	12.600
	500	14.000 ¹⁾
Köln	100	12.000
	200	12.900
	500	14.200 ¹⁾
Düsseldorf	100	12.000
	200	12.900
	500	14.200 ¹⁾
Ruhrort	100	12.400
	200	13.400 ¹⁾
	500	14.900 ¹⁾
Wesel ²⁾	100	12.400
	200	13.400
	500	14.900 ¹⁾
Rees	100	12.300
	200	13.300 ¹⁾
	500	14.800 ¹⁾
Emmerich ²⁾	100	12.200
	200	13.100
	500	14.600 ¹⁾

Tabelle 5.1.3.1:
Von der HSG NRW erarbeitete HQ_T für die Rheinpegel Bonn bis Emmerich.

¹⁾ Für gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug, deshalb nur Anhaltswerte.

²⁾ Nur Jahresreihe 1946 bis 1995; vor 1946 keine gesicherten Werte.

5.2 Einfluss des Gewässerausbaus und der Hochwasserschutz- und Rückhaltemaßnahmen auf historische Abflusswellen

Der Bau der Staustufen am Oberrhein, zwischen 1955 und 1977 sowie die ausgleichenden Retentionsmaßnahmen, die seit den 80er Jahren sukzessive realisiert werden, haben das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen verändert und werden es weiter verändern. Diese Einflüsse waren in den im Kapitel 5.1 dargestellten Untersuchungen unberücksichtigt geblieben. Im Folgenden werden die Auswirkungen unterschiedlicher Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf mittels numerischer Simulation untersucht.

5.2.1 Berechnung des Wellenablaufs ausgewählter Hochwasser mit mathematischen Modellierungen

In der BfG werden zur Untersuchung der großräumigen Auswirkung von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf den Hochwasserablauf am Rhein zurzeit zwei Modelle eingesetzt:

- das hydrologische Wellenablaufmodell **SYNHP** und
- das hydraulische Wellenablaufmodell **SOBEK**.

Im Rahmen der hier dargelegten Untersuchungen wurde das Modell SYNHP zur Wellenablaufberechnung im Rhein von Basel bis Andernach und das Modell SOBEK für die Rheinstrecke Andernach bis Lobith genutzt.

5.2.1.1 Das hydrologische Modell SYNHP

Das synoptische Hochwasserablaufmodell SYNHP wurde in der Landesanstalt für Umweltschutz (LFU) Baden-Württemberg zu Beginn der 80er Jahre auf Grundlage eines im Rahmen

der HSK von der BfG entwickelten und für die Kommission betriebenen Modells zur Simulation der Hochwasserhältnisse am Oberrhein entwickelt und zur Ermittlung von Steuerreglements für die Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein eingesetzt (HOMAGK, 1985). Dieses für den Zustand 1977 sowie unterschiedliche Retentionsszenarien gültige Modell wurde später auch für den Zustand 1955 (vor Oberrheinausbau mit Staustufen) erstellt und auf die Rheinstrecken Worms bis Köln ausgeweitet (BERG et al., 1990; BUSCH et al., 1993).

Das Modell SYNHP wie auch das Vorgängermodell gehören zur Familie der hydrologischen Modelle, bei denen die Bewegungsgleichung durch den Ansatz linearer Einzelspeicher ersetzt wird. Für jeden Speicher der Flussstrecke wird bei der Kalibrierung des Modells eine Volumen-Abfluss-Beziehung ermittelt. Zusammen mit der Kontinuitätsgleichung kann bei gegebenen Zuflüssen der Abfluss am unteren Ende eines jeden Flussabschnittes berechnet werden. Im obersten Flussabschnitt wird der Zufluss durch eine Zuflussganglinie (z. B. Messdaten) definiert, die Zuflüsse in den unteren Flussabschnitten ergeben sich aus den berechneten Abflüssen am unteren Ende des nächst höher gelegenen Flussabschnittes. Zuflüsse aus Nebengewässern werden als Abflussganglinien (z. B. Messdaten) dem Modell zur Verfügung gestellt. Neben der Translation von Durchflusswellen und deren Verformung durch unterschiedliche Gerinnegeometrien ermöglicht das Modell die Berechnung von gesteuerten und nicht gesteuerten Retentionsvorgängen oberhalb von Wehren und in Poldern sowie die Simulation der so genannten Manöver (Schließung und Wiederöffnung der Turbinen der Rheinkraftwerke).

5.2.1.2 Das hydraulische Modell SOBEK

Das eindimensionale, numerische Abflussmodell SOBEK ist eine Entwicklung von Delft Hydraulics und dem Ministerie van Verkeer en Waterstaat in den Niederlanden. Die Abflussberechnungen von SOBEK beruhen auf dem De Saint Venant'schen Gleichungssystem, bestehend aus der Kontinuitätsgleichung und der Bewegungsgleichung. Letzere berücksichtigt die lokale und konvektive Beschleunigung, das Wasserspiegelgefälle, Dichteunterschiede im Wasser sowie Energieverluste durch die Rauheit der Gewässer- sohle, durch Windeffekte (optional) und durch weitere lokal beschränkte Einflussfaktoren (optional). Die numerische Lösung erfolgt über die finite Differenzenmethode nach dem Preissmann-box-Verfahren (DELFT HYDRAULICS AND THE MINISTRY OF TRANSPORT, PUBLIC WORKS AND WATER MANAGEMENT, 1997). Neben der Berechnung von Abflüssen, Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten ist es auch möglich, Salzintrusionsvorgänge sowie die Gewässergüte und den Sedimenttransport zu berechnen.

Wichtige Eingabegrößen stellen die Querprofilaten dar. SOBEK unterscheidet dabei in Hauptgerinne, Überflutungsraum 1 und Überflutungsraum 2, so dass Bühnenfelder und Vorländer einschließlich Sommerdeich und Polder ebenso berücksichtigt werden können wie andere Bauwerke (Wehre, Schleusen, Pumpen etc.).

Bei der Kalibrierung des SOBEK-Modells Andernach bis Lobith zeigte sich, dass eine Anpassung simulierter an gemessene Ganglinien entweder nicht oder nur durch die Wahl physikalisch unrealistischer Rauheiten erfolgen kann (BARNEVELD UND MEIJER, 1997). Schon durch den Vergleich gemessener Durchflussganglinien zweier benachbarter

Pegel wird deutlich, dass auch unter Berücksichtigung seitlicher Zuflüsse im ansteigenden Ast von Hochwasserwellen negative Wasserbilanzen und im absteigenden Ast positive Wasserbilanzen auftreten. Die Erklärung dieses Phänomens liegt darin, dass beim Wellenanlauf Wasser vom Fluss in das Grundwasser infiltriert und bei ablaufender Welle wieder in den Fluss zurückfließt. Deshalb wurde SOBEK zur Modellierung von Hochwasserwellen am Niederrhein mit einem einfachen, auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhenden Grundwassermodell gekoppelt. Ausgehend von dem Gesetz nach Darcy und unter Einhaltung der Kontinuitätsbedingungen für das im Grundwasser gespeicherte Wasservolumen werden in Abhängigkeit vom Wasserstand im Fließgewässer der Austausch zwischen Flusswasser und Grundwasser sowie die Grundwasserstände für jeden Flussabschnitt berechnet. Den geologischen Verhältnissen am Niederrhein entsprechend gehen Infiltrationskoeffizienten, effektive Porositäten des Grundwasserleiters sowie die Breite des am Austauschvorgang beteiligten Grundwasserleiters entlang des Gewässers als Modellparameter ein. Durch eine einmonatige Vorlaufzeit für die Berechnung der Grundwasserhältnisse werden die Niederschläge und Flusswasserstände vor dem Hochwasser, die die Grundwasserstände zu Beginn der Hochwasserwelle maßgeblich beeinflussen, berücksichtigt.

5.2.1.3 Abflussganglinien ausgewählter Hochwasser

Das hier gewählte Verfahren zur Berechnung des Wellenablaufs im Rhein setzt voraus, dass die Zuflussganglinien an den Modellrändern bekannt sind. Deshalb müssen zunächst wichtige Hochwasserzeiträume ausgewählt und anschließend für jeden dieser Zeiträume die Abflussganglinien des Rheins bei Basel sowie aller relevanten Nebengewässer zusammengestellt werden.

Auswahl der historischen Hochwasserereignisse

Die für die Quantifizierung der Auswirkung der Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein ausgesuchten Hochwasser umfassen ein Kollektiv von 35 historischen Ereignissen. Dieses Kollektiv basiert auf 30 Hochwassern des Zeitraums 1882 bis 1980, die bereits Gegenstand der Untersuchungen der HSG für die Rheinstrecke Worms bis Kaub (1985) waren. Bei der Auswahl dieser Hochwasser war angestrebt worden, die bezogen auf den Pegel Kaub 30 größten Hochwasser seit der Korrektur des Oberrheins durch TULLA zu erfassen. Dabei konnten die Hochwasser vom November 1944 und Februar 1945 aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden. Statt dieser wurden zwei weniger große Hochwasser ausgewählt.

Bei späteren Untersuchungen der BfG (BUSCH und ENGEL, 1987) wurden diesem Datenkollektiv vier weitere Ereignisse aus den Jahren 1981 bis 1985 und im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchungen die vier großen Hochwasser seit 1987 hinzugefügt. Aufgrund fehlender Ganglinien der Nebenflüsse am Niederrhein vor 1900 wurde schließlich auf die drei ältesten Hochwasser verzichtet. Tabelle 5.2.1.3.1 gibt einen Überblick über die gewählten

Hochwasserereignisse und stellt sie dem Hochwasserkollektiv älterer Untersuchungen gegenüber.

Aus der Rangordnung der ausgesuchten Hochwasserereignisse über den Zeitraum 1901 bis 1997 für den Pegel Köln wird ersichtlich, dass außer vier Hochwassern alle Ereignisse bis Rang 30 vertreten sind (Tabelle 5.2.1.3.1). Die nicht berücksichtigten Hochwasser vom November 1944 und Februar 1945 belegen die Ränge 22 und 25. Aufgrund des erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwandes für die Bereitstellung des kompletten Datensatzes für die Wellenablaufberechnungen von Basel bis Köln wurde auch auf die Hochwasser vom Dezember 1981 (Rang 28) und März 1997 (Rang 29) verzichtet. Im Datenkollektiv befinden sich statt dessen bezüglich des Pegels Köln eine Reihe mittlerer und kleinerer Hochwasser, die am Pegel Kaub zu den 30 größten Hochwassern zählen. Ein Vergleich mit den Ereignissen, die von der HSG NRW für den Zeitraum 1873 bis 1972 zusammengestellt wurden und die seinerzeit zehn größten Hochwasser bei Worms und neun größten Hochwasser bei Maxau umfassten, zeigt, dass sich ein großer Teil der damals ausgewählten Oberrheinhochwasser im heutigen Hochwasserkollektiv wiederfindet.

Abflussganglinien

Grundlage der Modellierung des Wellenablaufs historischer Hochwasser von Basel bis Lobith ist die Bereitstellung der Abflussganglinien des Rheins bei Basel sowie der entsprechenden Ganglinien der Nebenflüsse des Rheins zwischen Basel und Lobith. Eine Aufstellung aller Nebenflüsse, die berücksichtigt wurden, ist dem Bericht 1221 der BfG (LAMMERSEN et al., 1999) zu entnehmen.

Zur Festlegung der Zuflüsse aus den Nebengewässern wurden die Abflüsse an den Pegeln herangezogen, die jeweils

der Mündung in den Rhein am nächsten liegen und von denen ausreichend Beobachtungsdaten verfügbar sind. Die berücksichtigten Pegel sowie deren Entfernung zur Mündung des entsprechenden Nebenflusses sind ebenfalls im Bericht 1221 der BfG (LAMMERSEN et al., 1999) zusammengefasst. Die Entfernung der Pegel zur Nebenflussumündung wird dem Modell als Laufzeit (ts) zur Verfügung gestellt und durch Verschiebung der Ganglinie um diesen Zeitschritt berücksichtigt.

Bei der Zusammenstellung der Ganglinien für die ausgewählten Hochwasserereignisse (Tabelle 5.2.1.3.1) konnte auf umfangreiches Material zurückgegriffen werden, das im Laufe der letzten 25 Jahre im Rahmen unterschiedlicher Untersuchungen zusammengetragen worden war (HSK, 1978; HSG für die Rheinstrecke Worms bis Kaub, 1985; BUSCH und ENGEL, 1985 und HSG für die Rheinstrecke Kaub bis Rolandswerth, 1993). Diese wurden um die beiden Hochwasser 1993/1994 und Januar 1995 sowie um die Nebenflüsse am Rhein ab Andernach ergänzt (LAMMERSEN et al., 1999).

Außer den Zuflüssen aus dem Hochrhein in Basel und den genannten Nebenflüssen erhält der Rhein auch Zuflüsse aus anderen, meist kleineren, nicht durch Pegel erfassten Gebieten, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

Im Modell SYNHP, d. h. bei der Modellierung bis Andernach werden diese Gebiete als „Resteinzugsgebiete“ behandelt. Hier gehen alle Gebiete ein, für die keine Ganglinien bekannt sind. Im Einzelfall können dies auch größere Nebenflüsse oder der Unterlauf größerer Nebengewässer sein, für die keine Daten vorhanden sind oder das Datenmaterial Lücken aufweist.

Auf der Strecke Basel bis Andernach werden die folgenden vier Resteinzugsgebiete unterschieden:

1. Resteinzugsgebiet Basel bis Maxau
2. Resteinzugsgebiet Maxau bis Worms
3. Resteinzugsgebiet Worms bis Kaub
4. Resteinzugsgebiet Kaub bis Andernach

Zur Ermittlung der Abflüsse aus den Resteinzugsgebieten wurden zunächst Abflusssummen aus den vorhandenen Abflussganglinien an den Rhein- und Rheinzufusspegeln berechnet. Für jeden der vier Teilabschnitte des Rheins wurden daraus die Bilanzen einander zeitlich zugeordneter Abflussfüllen ermittelt. Aus den so gewonnenen Abflussvolumina wurde schließlich je Einzugsgebiet der über den jeweiligen Hochwasserzeitraum gemittelte Abfluss berechnet und dem Modell als konstanter Zufluss zur Verfügung gestellt.

In einigen Fällen wurden Zuflüsse aus Rest- bzw. Zwischeneinzugsgebieten aber auch als Abflussganglinien berücksichtigt. Nähere Erläuterungen zur Zusammenstellung auch dieser Daten sind vor allem dem Bericht der HSG für die Rheinstrecke Kaub bis Rolandswerth (1993) zu entnehmen.

Im Modell SOBEK, d. h. bei der Modellierung der Strecke Andernach bis Lobith, wurde eine andere Methode der Berücksichtigung von Resteinzugsgebieten gewählt. Das Teileinzugsgebiet eines Nebenflusses unterhalb des Pegels wurde berücksichtigt, indem die Ganglinie mit Hilfe eines Faktors vergrößert wurde. Dabei berücksichtigt der Faktor das Verhältnis zwischen der gesamten Fläche des Einzugsgebietes und der durch den Pegel erfassten Teilfläche. Aufgrund des starken Austausches zwischen Fluss- und Grundwasser ist es am Niederrhein nicht möglich, über Bilanzrechnungen weitere Resteinzugsgebiete zu berücksichtigen.

5

Ereignis			HSK	HSG	BfG	HSG	Aktuelle Untersuchung
Nr.	Name	Zeitraum	(1978)	Worms-Kaub (1985)	(Busch, N. und Engel, H., 1987)	Kaub-Rolands-werth (1993)	[Rang in der Hochwasserstatistik Köln 1901 – 1997]
	Nov/Dez 1882	22.11.82-05.12.82					
	1882/1883	23.12.82-20.01.83					
	Mrz 1896	04.03.96-30.03.96					
1	1918/1919	21.12.18-14.01.19					57
2	1919/1920	21.12.19-10.01.20					12
3	Jan 1920	10.01.20-30.01.20					4
4	Apr/Mai 1924	28.04.24-20.05.24					53
5	Okt/Nov 1924	30.10.24-17.11.24					10
6	1925/1926	20.12.25-15.01.26					1
	Mai 1930						
7	Nov/Dez 1930	16.11.30-09.12.30					16
8	Feb/März 1937	17.02.37-08.03.37					41
9	Jan/Febr 1941	20.01.41-09.02.41					20
10	Mrz 1942	10.03.42-02.04.42					17
	Juni 1946	21.06.46-08.07.46					
11	1947/1948	26.12.47-13.01.48					8
12	Jan 1948	13.01.48-29.01.48					19
	Juli 1948						
13	Mrz/Apr 1952	19.03.52-12.04.52					39
14	1952/1953	15.12.52-04.01.53					27
	Juni/Juli 1953						
15	Jan 1955	10.01.55-30.01.55					11
16	Mrz 1956	01.03.56-17.03.56					34
17	Feb/Mrz 1957	25.02.57-12.03.57					45
18	Feb 1958	05.02.58-22.02.58					24
19	Feb/Mrz 1958	22.02.58-10.03.58					14
	Juni 1965						
20	Dez 1965	03.12.65-25.12.65					30
	Sept 1968						
21	Feb 1970	02.02.70-20.02.70					32
22	Feb/Mrz 1970	19.02.70-08.03.70					6
23	Mai 1970	08.05.70-26.05.70					23
	Nov 1972						
24	Feb 1977	05.02.77-18.02.77					76
25	Feb/Mrz 1977	19.02.77-08.03.77					47
26	Mai/Juni 1978	20.05.78-05.06.78					56
27	Feb 1980	31.01.80-20.02.80					13
28	1981/1982	29.12.81-21.01.82					18
29	Apr 1983	04.04.83-25.04.83					7
30	Mai/Juni 1983	20.05.83-08.06.83					5
31	Feb 1984	29.01.84-18.02.84					15
32	Mrz/Apr 1988	11.03.88-10.04.88					9
33	Feb 1990	11.02.90-28.02.90					26
34	1993/1994	01.12.93-31.01.94					3 + 21
35	Jan 1995	11.01.95-01.03.95					2

Weitere Hochwasser:

5 zwischen 1946 und 1955

9 zwischen 1980 und 1986

Tabelle 5.2.1.3.1:
Auswahl historischer Hochwasser

5.2.1.4 Berücksichtigte Ausbauzustände und Retentionsmaßnahmen

Zur Wirkungsabschätzung von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen mittels Modellrechnung müssen zunächst Zustände im Flusssystem definiert werden, die untersucht werden sollen. Im Zusammenhang mit der Homogenisierung eines vorliegenden Datenkollektivs müssen dabei möglichst alle relevanten Zustände, die im Laufe des betrachteten Zeitraums geherrscht haben, erfasst werden.

Unter Vernachlässigung von Übergangsphasen lassen sich, den Ausführungen in Kapitel 4 folgend, für den Rhein bis Andernach seit 1900 drei (historische) Ausbauzustände festlegen, die durch den Ausbau des Oberrheins geprägt sind. Ein vierter Zustand kommt hinzu, um die Wirkung der geplanten Retentionsmaßnahmen am Oberrhein zu untersuchen. Die berücksichtigten Ausbauzustände sind in Tabelle 5.2.1.4.1 zusammengefasst.

Bezeichnung des Ausbauzustandes	Beschreibung des Ausbauzustandes	
	am Oberrhein	am Niederrhein
<i>Zustand 1955</i>	Zustände vor Ausbau des Oberrheins mit Staustufen	heutiger Zustand am Niederrhein
<i>Zustand 1977</i>	Zustände nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, ohne Retentionsmaßnahmen	
<i>Zustand heute</i>	Zustände nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, mit Teilmaßnahmen zur Retention am Oberrhein	
<i>Zustand geplant</i>	Zustände nach Ausbau des Oberrheins mit Staustufen, mit allen am Oberrhein geplanten, d. h. hinsichtlich ihrer Wirkung vertraglich vereinbarten Retentionsmaßnahmen	Zustand mit geplanten Retentionsmaßnahmen am Niederrhein

Tabelle 5.2.1.4.1:
Bei der Modellierung betrachtete Zustände

Die Berücksichtigung des *Zustandes 1955* und des *Zustandes 1977* erfolgt im Modell SYNHP durch veränderte Speicherkoeffizienten (Abfluss-Volumen-Beziehungen), mit deren Hilfe die Veränderungen der Geometrie des Gerinnes charakterisiert werden. Der im *Zustand heute* und *Zustand geplant* zur Verfügung stehende Retentionsraum wird als Speichervolumen berücksichtigt, das nach vorgegebenen Steuerkriterien gefüllt oder geleert wird. Dabei werden im *Zustand heute* 116,3 Mio. m³ und im *geplanten Zustand* 263 Mio. m³

Speicherkapazität berücksichtigt. Einzelheiten zu diesen Retentionsmaßnahmen und die Steuerkriterien sind dem Bericht der BfG (LAMMERSEN et al., 1999) zu entnehmen.

Für den Rheinabschnitt Andernach bis Lobith kann nur zwischen zwei Zuständen unterschieden werden, dem Zustand bis heute und dem geplanten Zustand, d.h. *Zustand 1955*, *Zustand 1977* und *Zustand heute* werden am Niederrhein als identisch angesehen (vgl. Tabelle 5.2.1.4.1).

Der Unterschied zwischen dem geplanten Zustand gegenüber dem heutigen Zustand besteht in einer Vergrößerung des Retentionsraumes. In das Modell SOBEK wird diese in Form veränderter Querprofile eingeführt. Auf der Grundlage des Erkenntnisstandes werden insgesamt neun Rückhaltemaßnahmen berücksichtigt, von denen zwei (Köln Langel und Worringer Bruch) als gesteuerter Polder (Taschenpolder) und die übrigen sieben Maßnahmen als Flutpolder (Deichrückverlegungen) geführt werden (Tabelle 5.2.1.4.2). Gemäß den noch wenig detaillierten Unterlagen sind die bei der Modellierung berücksichtigten Flächen deutlich kleiner als die 1990 und 1991 in den Generalplänen zum Hochwasserschutz am Niederrhein und

zum Hochwasserschutz am Rhein im Regierungsbezirk Köln dargestellt. Zu den hier beschriebenen Untersuchungen wird in Absprache mit den zuständigen Wasserbehörden jedoch bewusst eine Variante gewählt, die zum Zeitpunkt der Modellerstellung Flächen, die als Polder genutzt werden könnten, berücksichtigt und somit Chancen zu ihrer Realisierbarkeit aufwies. Dabei handelt es sich um ein Minimal-Szenario mit nur geringen Auswirkungen auf Hochwasserscheitel in Rees und Lobith (VAN HASELEN, 1999). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit fortlaufender Planung und Umsetzung der vorbeugenden Hochwasserschutzmaßnahmen am Niederrhein mehr Retentionsvolumen mit einer größeren Wirkung zur Verfügung stehen wird.

Tabelle 5.2.1.4.2:
Die im Modell SOBEK
berücksichtigten geplanten
Retentionsmaßnahmen am
Niederrhein

	Überflutungsfläche/ Speichervolumen (Deutsche Kommission zum Schutze des Rheins, 1997)	Sobek-Profile		
		Flusskilometer Profilname	berücksichtigte Überflutungsfläche	Berechnet als Taschenpolder (TP) oder Flutpolder (FP)
Bylerward	720 ha / 30 Mio m ³	848,5 -849,5 Dornick	231 ha	FP
Lohrwardt	500 ha / 20 Mio m ³	832,5 -833,5 Niedermörmter	300 ha	FP
Bislicher Insel	1100 ha / 50 Mio m ³	818,5 -819,5 Flüren	50 ha	FP
Orsoy Land	220 ha / 10 Mio m ³	802,5 -803,5 Mehrum	202 ha	FP
Mündelheim	150 ha / 5 Mio m ³	765,5 -766,5 Hohenbudberg	92 ha	FP
Ilvericher Bruch	600 ha / 25 Mio m ³	750,0 -754,0	-	-
Itter-Himmelsgeist	60 ha / 2 Mio m ³	726,5 -727,5 Uedesheim	50 ha	FP
Monheim	200 ha / 8 Mio m ³	712,5 -713,5 Monheim	200 ha	FP
Worringer Bruch	600 ha / 13 Mio m ³	705,5 -706,5 Hitdorf	245 ha	TP
Köln-Langel	500 ha / 10 Mio m ³	669,5 -670,5 Wesseling	408 ha	TP
Niederkassel	35 ha / 1 Mio m ³	669,0 -672,0	-	-
Summe	4685 ha / 174 Mio m ³		1778 ha	

5.2.2 Simulationsergebnisse

Als Ergebnis der Simulation liegt für jeden der drei Pegel Köln, Rees und Lobith eine Serie von 35 Hochwasserganglinien je Zustand vor. Tabelle 5.2.2.1 zeigt die Scheitelwerte dieser Hochwasserganglinien für den Pegel Rees. Die Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Abflussscheitel zeigen sich in den Differenzwerten zwischen den Zuständen, wobei positive Werte Abflussverschärfungen und negative Werte Verminderungen der Abflussscheitel anzeigen. Im Mittel ergibt sich für den Pegel Rees eine Abflussverschärfung um $243 \text{ m}^3/\text{s}$, die durch den Ausbau des Oberrheins mit Staustufen hervorgerufen wird. Durch die Retentionsmaßnahmen am Oberrhein, wie sie heute schon eingesetzt werden, und durch die geplanten Retentionsmaßnahmen am Ober- und Niederrhein wird diese Situation im Mittel um $23 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $72 \text{ m}^3/\text{s}$ verbessert. Gegenüber dem ursprünglichen Zustand (vor Ausbau des Oberrheins) verbleibt auch bei Einsatz aller geplanten Maßnahmen eine mittlere Abflussverschärfung um $171 \text{ m}^3/\text{s}$.

Eine nähere Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die Wirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen jedoch stark vom Einzelereignis abhängt. Dabei ist der Einfluss der Retentionsmaßnahmen auf die Abflussscheitel unabhängig vom Ausgangswert. So ist beispielsweise die Wirkung der Retentionsmaßnahmen des heutigen Zustandes auf das Hochwasserereignis Januar 1955 mit $246 \text{ m}^3/\text{s}$ relativ hoch, während das Hochwasser vom Januar 1995 bei einem höheren Scheitelabfluss (bezogen auf den Zustand 1955) fast unbeeinflusst bleibt. Vergleichbares gilt für die Wirkung der geplanten Maßnahmen.

Ursache hierfür ist die Tatsache, dass die Retentionsmaßnahmen am Oberrhein nur die Hochwasser beeinflussen können, die durch den Abfluss des Rheins bei Basel und die Oberrheinzuflüsse (mit-) verursacht werden. Hochwasser am Niederrhein, die vor allem durch stark angeschwollene Nebenflüsse an Mittel- und Niederrhein hervorgerufen werden, können (wegen zu kurzer Vorhersagezeiten und wegen teilweise nur bei Hochwasser vor Ort funktionierender Rückhaltmaßnahmen) durch Retention am Oberrhein nicht oder kaum gedämpft werden. Die Hochwassergenese mit ihrer ausgeprägten Regionalität im Rheineinzugsgebiet ist hier der entscheidende Faktor.

Vereinzelt kann es zu geringen Verschärfungen der Abflussscheitelwerte durch Retentionsmaßnahmen (z. B. Februar 1977, April/Mai 1924) kommen. Solche Phänomene treten auf, wenn die Vorentleerung der aus ökologischen Gründen gefluteten Polder oder Flusstauräume am Oberrhein oder deren planmäßige Entleerung bei anlaufender Hochwasserscheitel so erfolgt, dass die dadurch hervorgerufene Abflusserhöhung rheinabwärts auf die Hochwasserscheitel größerer Nebenflüsse trifft.

Die Verkürzung der Laufzeit der Hochwasserwellen im Oberrhein als Folge des beim Oberrheinausbau verloren gegangenen Retentionsraums ist die Hauptursache für die Hochwasserverschärfung (HSK, 1978). Die Hochwasserscheitel des Rheins treffen heute häufiger mit den Hochwasserscheiteln aus den Nebenflüssen Neckar, Main und Mosel zusammen als früher. Diese Tatsache muss auch als Hauptgrund für die nach Einsatz aller geplanten Retentionsmaßnahmen verbleibende Restverschärfung angesehen werden, da diese

Maßnahmen überwiegend nur Scheitel dämpfend, nicht aber verzögernd auf den Wellenablauf im Hauptstrom wirken.

Die Ergebnisse für den Pegel Köln und den Pegel Lobith sind in den Tabellen 5.2.2.2 und 5.2.2.3 zusammengefasst. Die dort wiedergegebenen Abflussscheitel verhalten sich ähnlich wie die am Pegel Rees. Auf weitere Erläuterungen wird deshalb an dieser Stelle verzichtet.

Tabelle 5.2.2.1:
Gemessene und für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für den Pegel Rees

Rees	Datum	Messung	Simulation				Differenzen zwischen den Zuständen			
		Zustand 1955	Zustand 1977	Zustand heute	Zustand geplant	1977 - 1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955	
		Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	
HW [Bezeichnung]	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(2 - 1)	(3 - 2)	(4 - 2)	(4 - 1)	
1918/1919	04.01.19	6880	6703	6980	6997	6960	277	17	-20	257
1919/1920	02.01.20	9600	9530	9641	9556	9498	111	-85	-143	-32
Jan 1920	18.01.20	10500	11136	11436	11444	11345	300	8	-91	209
Apr/Mai 1924	07.05.24	6790	6827	6980	6992	6937	153	12	-43	110
Okt/Nov 1924	07.11.24	9260	9700	9879	9879	9803	179	0	-76	103
1925/1926	03.01.26	12200	11562	11779	11779	11725	217	0	-54	163
Nov/Dez 1930	27.11.30	8740	8895	9040	9040	9002	145	0	-38	107
Feb/Mrz 1937	27.02.37	7290	7439	7600	7600	7541	161	0	-59	102
Jan/Feb 1941	29.01.41	7970	7691	7814	7814	7785	123	0	-29	94
Mrz 1942	22.03.42	8790	8494	8500	8500	8487	6	0	-13	-7
1947/1948	03.01.48	9320	9791	10342	10334	10233	551	-8	-109	442
Jan 1948	18.01.48	8310	8154	8155	8155	8133	1	0	-22	-21
Mrz/Apr 1952	03.04.52	7420	7189	7162	7162	7159	-27	0	-3	-30
1952/1953	26.12.52	8000	7910	8026	8026	7967	116	0	-59	57
Jan 1955	20.01.55	9500	10013	10413	10167	10130	400	-246	-283	117
Mrz 1956	08.03.56	7620	7665	8137	8137	8084	472	0	-53	419
Feb/Mrz 1957	02.03.57	6950	7181	7856	7773	7741	675	-83	-115	560
Feb 1958	14.02.58	7560	7833	8125	8125	8059	292	0	-66	226
Feb/Mrz 1958	01.03.58	9140	9325	9436	9443	9407	111	7	-29	82
Dez 1965	09.12.65	7560	7759	7772	7772	7729	13	0	-43	-30
Feb 1970	13.02.70	7420	7432	7475	7475	7475	43	0	0	43
Feb/Mrz 1970	26.02.70	9950	10529	10791	10771	10710	262	-20	-81	181
Mai 1970	16.05.70	7590	7517	7804	7804	7783	287	0	-21	266
Feb 1977	15.02.77	5930	5952	6284	6301	6321	332	17	37	369
Feb/Mrz 1977	24.02.77	6600	7073	7041	7041	7027	-32	0	-14	-46
Mai/Juni 1978	28.05.78	6360	6295	6691	6645	6596	396	-46	-95	301
Feb 1980	09.02.80	8780	9312	9677	9677	9617	365	0	-60	305
1981/1982	10.01.82	7850	8053	8154	8154	8114	101	0	-40	61
Apr 1983	14.04.83	9490	9445	9918	9811	9741	473	-107	-177	296
Mai/Juni 1983	31.05.83	9900	9527	10085	9964	9850	558	-121	-235	323
Feb 1984	11.02.84	8600	8713	8862	8862	8813	149	0	-49	100
Mrz/Apr 1988	30.03.88	10200	10592	10878	10781	10741	286	-97	-137	149
Feb 1990	20.02.90	7310	7578	8266	8224	8083	688	-42	-183	505
1993/1994	25.12.93	11020	11230	11421	11421	11340	191	0	-81	110
Jan 1995	31.01.95	11600	11883	12005	12001	11962	122	-4	-43	79
Mittelwert							243	-23	-72	171

Köln	Datum	Messung Q [m³/s]	Simulation				Differenzen zwischen den Zuständen			
			Zustand 1955	Zustand 1977	Zustand heute	Zustand geplant	1977 - 1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
HW [Bezeichnung]		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ Q [m³/s]
1918/1919	03.01.19	6370	6425	6748	6718	6681	323	-30	-67	256
1919/1920	01.01.20	8980	9018	9337	9243	9145	319	-94	-192	127
Jan 1920	16.01.20	10700	10641	10951	10958	10847	310	7	-104	206
Apr/Mai 1924	06.05.24	6550	6412	6603	6630	6558	191	27	-45	146
Okt/Nov 1924	05.11.24	9570	9603	9797	9797	9728	194	0	-69	125
1925/1926	01.01.26	11100	10789	11021	11021	10990	232	0	-31	201
Nov/Dez 1930	25.11.30	8380	8482	8581	8581	8543	99	0	-38	61
Feb/Mrz 1937	25.02.37	7070	7162	7372	7372	7323	210	0	-49	161
Jan/Feb 1941	28.01.41	7890	7826	7918	7918	7901	92	0	-17	75
Mrz 1942	21.03.42	8050	8198	8239	8239	8229	41	0	-10	31
1947/1948	02.01.48	9600	9569	10265	10252	10136	696	-13	-129	567
Jan 1948	17.01.48	7900	7732	7720	7720	7710	-12	0	-10	-22
Mrz/Apr 1952	01.04.52	7160	7130	7102	7102	7101	-28	0	-1	-29
1952/1953	24.12.52	7620	7613	7645	7645	7608	32	0	-37	-5
Jan 1955	19.01.55	9550	9881	10324	10009	9964	443	-315	-360	83
Mrz 1956	06.03.56	7350	7238	7764	7764	7713	526	0	-51	475
Feb/Mrz 1957	28.02.57	6810	6812	7580	7504	7490	768	-76	-90	678
Feb 1958	12.02.58	7720	7789	8141	8141	8080	352	0	-61	291
Feb/Mrz 1958	27.02.58	8690	8764	8902	8910	8889	138	8	-13	125
Dez 1965	08.12.65	7490	7445	7423	7423	7398	-22	0	-25	-47
Feb 1970	12.02.70	7460	7308	7378	7377	7377	70	-1	-1	69
Feb/Mrz 1970	25.02.70	9740	9778	10137	10120	10064	359	-17	-73	286
Mai 1970	15.05.70	7730	7430	7740	7740	7730	310	0	-10	300
Feb 1977	14.02.77	5890	5787	6161	6183	6233	374	22	72	446
Feb/Mrz 1977	23.02.77	6760	6914	6861	6861	6856	-53	0	-5	-58
Mai/Juni 1978	26.05.78	6370	6078	6401	6355	6315	323	-46	-86	237
Feb 1980	08.02.80	8820	8614	9084	9082	9043	470	-2	-41	429
1981/1982	08.01.82	8030	7620	7745	7745	7707	125	0	-38	87
Apr 1983	14.04.83	9690	9345	9888	9765	9707	543	-123	-181	362
Mai/Juni 1983	29.05.83	9910	9357	9953	9827	9743	596	-126	-210	386
Feb 1984	10.02.84	8500	8345	8589	8589	8532	244	0	-57	187
Mrz/Apr 1988	29.03.88	9580	9710	10022	9907	9888	312	-115	-134	178
Feb 1990	18.02.90	7670	7723	8336	8285	8177	613	-51	-159	454
1993/1994	24.12.93	10800	10792	10988	10988	10911	196	0	-77	119
Jan 1995	30.01.95	10940	10761	10852	10841	10815	91	-11	-37	54
Mittelwert						271	-27	-70	201	

Tabelle 5.2.2.2:
Gemessene und für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasserscheitelabflüsse für den Pegel Köln

5

Tabelle 5.2.2.3:
Gemessene und für unterschiedliche Zustände in Ober- und Niederrhein simulierte Hochwasser-scheitelabflüsse für den Pegel Lobith

Lobith	Datum	Messung	Simulation				Differenzen zwischen den Zuständen			
		Q	Zustand 1955	Zustand 1977	Zustand heute	Zustand geplant	1977 - 1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
		[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	Δ Q	Δ Q	Δ Q	Δ Q
[Bezeichnung]		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(2 - 1)	(3 - 2)	(4 - 2)	(4 - 1)
1918/1919	04.01.19	7075	6664	6896	6911	6883	232	15	-13	219
1919/1920	02.01.20	10000	9449	9577	9495	9420	128	-82	-157	-29
Jan 1920	18.01.20	11365	11093	11394	11402	11299	301	8	-95	206
Apr/Mai 1924	08.05.24	6715	6770	6898	6906	6860	128	8	-38	90
Okt/Nov 1924	07.11.24	9300	9637	9812	9812	9735	175	0	-77	98
1925/1926	04.01.26	12280	11473	11694	11694	11634	221	0	-60	161
Nov/Dez 1930	27.11.30	9075	8858	9005	9005	8964	147	0	-41	106
Feb/Mrz 1937	28.02.37	7365	7354	7557	7557	7497	203	0	-60	143
Jan/Feb 1941	30.01.41	7940	7612	7735	7735	7705	123	0	-30	93
Mrz 1942	23.03.42	8475	8427	8431	8430	8416	4	-1	-15	-11
1947/1948	04.01.48	9785	9702	10231	10224	10117	529	-7	-114	415
Jan 1948	18.01.48	~	8100	8104	8104	8079	4	0	-25	-21
Mrz/Apr 1952	03.04.52	7165	7040	7019	7019	7015	-21	0	-4	-25
1952/1953	27.12.52	7605	7858	7987	7987	7927	129	0	-60	69
Jan 1955	21.01.55	9510	9927	10328	10088	10048	401	-240	-280	121
Mrz 1956	08.03.56	7610	7617	8060	8060	8007	443	0	-53	390
Feb/Mrz 1957	03.03.57	6905	7079	7807	7729	7695	728	-78	-112	616
Feb 1958	14.02.58	~	7765	8024	8024	7959	259	0	-65	194
Feb/Mrz 1958	01.03.58	9120	9256	9370	9378	9338	114	8	-32	82
Dez 1965	09.12.65	7108	7706	7732	7732	7687	26	0	-45	-19
Feb 1970	13.02.70	~	7360	7390	7388	7388	30	-2	-2	28
Feb/Mrz 1970	27.02.70	9850	10522	10780	10759	10697	258	-21	-83	175
Mai 1970	17.05.70	7328	7499	7775	7775	7753	276	0	-22	254
Feb 1977	15.02.77	~	5926	6249	6266	6282	323	17	33	356
Feb/Mrz 1977	24.02.77	6279	6946	6940	6940	6924	-6	0	-16	-22
Mai/Juni 1978	29.05.78	6341	6264	6656	6610	6561	392	-46	-95	297
Feb 1980	09.02.80	8811	9262	9630	9629	9569	368	-1	-61	307
1981/1982	10.01.82	7931	8018	8122	8123	8081	104	1	-41	63
Apr 1983	15.04.83	9323	9359	9817	9713	9641	458	-104	-176	282
Mai/Juni 1983	31.05.83	9707	9495	10043	9920	9798	548	-123	-245	303
Feb 1984	11.02.84	8697	8655	8803	8803	8753	148	0	-50	98
Mrz/Apr 1988	30.03.88	10274	10572	10852	10758	10716	280	-94	-136	144
Feb 1990	20.02.90	7028	7418	8156	8117	7973	738	-39	-183	555
1993/1994	25.12.93	11039	11098	11284	11284	11202	186	0	-82	104
Jan 1995	31.01.95	11885	11847	11934	11930	11891	87	-4	-43	44
Mittelwert							242	-22	-74	168

~ es liegen keine Werte vor

5.3 Hochwasserscheitelabflüsse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeiten aus homogenisierten Hochwasserscheitelwerten

Grundlage der Festlegung eines Bemessungsabflusses zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen ist die Ermittlung von Scheitelabflüssen unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeiten. Aufgrund der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein sind die zur Durchführung der Hochwasserstatistik herangezogenen Zeitreihen der historischen Scheitelabflüsse inhomogen. Durch eine Homogenisierung der Datenreihen und der statistischen Auswertung der homogenisierten Datenreihen kann der Einfluss der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf die Scheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten festgestellt werden.

5.3.1 Untersuchungsmethode

Die Berechnung des Wellenablaufs der 35 ausgewählten Hochwasser mit den Modellen SYNHP und SOBEK liefert für

jeden Pegel bezüglich der vier untersuchten Zustände ein Kollektiv von 35 Scheitelabflüssen. Zur Quantifizierung der Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen werden die Hochwasserscheitel der unterschiedlichen Zustände miteinander verglichen und mittels Korrelationsanalysen zueinander in Bezug gesetzt.

Die Gleichung der Regression zwischen den Scheitelwerten des *Zustandes 1955* und denen des *Zustandes 1977* (Regression [1] für die Pegel Köln, Rees und Lobith in Tabelle 5.3.1.1) gilt als Maß für die Auswirkungen des Oberrheinausbaus mit Staustufen auf den Hochwasserwellenablauf. Da alle Hochwasserereignisse vom Oberrheinausbau beeinflusst werden, werden alle 35 ausgewählten Hochwasserereignisse in die Korrelationsbetrachtungen mit einbezogen. Die Hochwassergenese kann dabei nicht berücksichtigt werden, d. h. die im mittleren und nördlichen Rheineinzugsgebiet entstehenden Hochwasser werden genauso behandelt wie diejenigen, die im Oberrheingebiet entstehen.

Köln			
Regression	Zustand	Regressionsgleichung	R ²
[1]	1977	$Q_{1977} = 1,0168 * Q_{1955} + 131,38$	0,9784
[2]	heute	$Q_{heute} = 0,9785 * Q_{1977} + 112,40$	0,9954
[3]	geplant	$Q_{geplant} = 0,9727 * Q_{1977} + 163,94$	0,9977
Rees			
Regression	Zustand	Regressionsgleichung	R ²
[1]	1977	$Q_{1977} = 1,0043 * Q_{1955} + 205,42$	0,9852
[2]	heute	$Q_{heute} = 0,9892 * Q_{1977} + 33,163$	0,9975
[3]	geplant	$Q_{geplant} = 0,9807 * Q_{1977} + 98,821$	0,9985
Lobith			
Regression	Zustand	Regressionsgleichung	R ²
[1]	1977	$Q_{1977} = 1,002 * Q_{1955} + 224,28$	0,9847
[2]	heute	$Q_{heute} = 0,9894 * Q_{1977} + 31,761$	0,9976
[3]	geplant	$Q_{geplant} = 0,9801 * Q_{1977} + 101,91$	0,9985

Tabelle 5.3.1.1: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den Simulationsergebnissen der unterschiedlichen Zustände

Die Regression zwischen den simulierten Hochwasserscheiteln des *Zustandes 1977* und den entsprechenden Abflüssen des *Zustandes heute* gilt als Maß der Veränderungen, wie sie heute schon gegenüber dem Zustand nach Ausbau zu beobachten sind (Regression [2] in Tabelle 5.3.1.1). In diese Analyse gehen jedoch nur die Hochwasser ein, bei denen im Oberrheingebiet die Retentionsmaßnahmen anspringen würden, da nur diese Hochwasserereignisse von den Retentionsmaßnahmen am Oberrhein beeinflusst werden. Als Kriterium gilt das Überschreiten des Abflusses von $3.800 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Maxau. Alle anderen Hochwasser finden in die Korrelationsanalyse keinen Eingang. Hier wird die Hochwassergenese in eingeschränktem Umfang berücksichtigt.

Entsprechend gilt der regressive Zusammenhang zwischen dem *Zustand 1977* und dem *geplanten Zustand* als Maß der Veränderungen, wie sie bei Einsatz aller bis 2010 geplanten Retentionsmaßnahmen zu erwarten sind (Regression [3] in Tabelle 5.3.1.1). Hierbei werden alle Ereignisse mit in die Korrelationsbetrachtungen eingeschlossen, weil die Maßnahmen am Niederrhein nicht nur die Hochwasser beeinflussen, die am Pegel Maxau den Schwellenwert von $3.800 \text{ m}^3/\text{s}$ erreichen bzw. überschreiten. Die durch Regionalität geprägte Genese der Hochwasser kann auch hier nicht berücksichtigt werden.

Mit Hilfe der durch die Korrelationsanalyse ermittelten Regressionsgleichungen wird schließlich für jeden Pegel das gesamte Kollektiv der Hochwasserextremwerte seit 1900, das in die Hochwasserstatistik eingeht, in die unterschiedlichen Zustände umgerechnet, d. h. auf die entsprechenden Zustände homogenisiert.

Zunächst wird die historische Datenreihe auf den *Zustand 1977* homogenisiert. Dabei wird berücksichtigt, dass die Werte der Datenreihe von 1977 bis 1997 dem *Zustand 1977* entsprechen. Hier können also die historischen Daten beibehalten werden. Eine Ausnahme stellen die Hochwasser März/April 1988 und Februar 1990 dar. Hier wurden erstmals Retentionsmaßnahmen am Oberrhein eingesetzt, während dies bei den Hochwassern 1993/1994 und Januar/Februar 1995 nicht geschah, weil die Kriterien dazu nicht erfüllt waren. Bei der Homogenisierung werden deshalb die historischen Daten durch Anwendung der Regressionsgleichung [2] (Zusammenhang zwischen *Zustand 1977* und *Zustand heute*) umgerechnet in den *Zustand 1977*. Zur Umrechnung der historischen Daten bis 1955 in den *Zustand 1977* wird die Regressionsgleichung [1] (Zusammenhang zwischen *Zustand 1955* und *Zustand 1977*) herangezogen. Für den Zeitraum 1955 bis 1977, der die Phase des Oberrheinausbaus mit den sechs Staustufen zwischen Marckolsheim und Iffezheim darstellt, muss eine Übergangsrechnung durchgeführt werden. Dabei wird angenommen, dass der Übergang zwischen dem *Zustand 1955* und *1977* linear erfolgte. Diese Annahme ist insofern realistisch, als die Staustufen in regelmäßigen Zeitabständen fertiggestellt wurden. Tabelle 5.3.1.2 fasst die wesentlichen Schritte der Homogenisierung auf den *Zustand 1977* zusammen.

Analog dem Vorgehen zur Homogenisierung für den *Zustand 1977* wird die Homogenisierung auch für die anderen drei Zustände durchgeführt. Grundlage hierfür sind jedoch nicht die historischen, sondern die auf den *Zustand 1977* homogenisierten Reihen. Details sind in Tabelle 5.3.1.3 zusammengefasst.

Zeitraum	Bezeichnung der Zustände	Vorgang der Homogenisierung
Bis 1955	<i>Zustand 1955</i>	Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der Regressionsgleichung [1] ¹⁾
1956 bis 1977	Übergang zwischen <i>Zustand 1955</i> und <i>Zustand 1977</i>	<i>Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der Regressionsgleichung [1] unter Berücksichtigung des linearen Übergangs zwischen Zustand 1955 und Zustand 1977¹⁾</i>
1977 bis 1997 außer Hochwasser März 1988 und Februar 1990	<i>Zustand 1977</i>	Historische Daten (außer für die Hochwasser März 1988 und Februar 1990)
Hochwasser März 1988 und Februar 1990	<i>Ca. Zustand heute</i>	Errechnet aus historischen Daten durch Anwendung der nach <i>Zustand 1977</i> aufgelösten Regressionsgleichung [2] ¹⁾

Tabelle 5.3.1.2:
Homogenisierung auf den Zustand 1977 (Vorgehen)

1) Die Umrechnung erfolgt nur für den Gültigkeitsbereich der Regressionsgleichung, d. h. nur für den Bereich der Gleichung, bei dem die berechneten Abflüsse größer sind als die historischen Daten.

Zeitraum	Vorgang der Homogenisierung
Homogenisierung auf den <i>Zustand heute</i>	
Bis 1955	Errechnet aus dem auf den <i>Zustand 1977</i> homogenisierten Datensatz durch Anwendung der Regressionsgleichung [2] ¹⁾ .
1956 bis 1977	
1977 bis 1997 außer Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand heute</i> erfolgt nur für die Werte, bei denen in Maxau ein Abfluss von 3.800 m ³ /s erreicht bzw. überschritten wird, da nur die Hochwasser, bei denen in Maxau ein Abfluss von 3.800 m ³ /s erreicht bzw. überschritten wird, einen veränderten Wellenablauf aufweisen können.
Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Historische Daten
Homogenisierung auf den <i>Zustand geplant</i>	
Bis 1955	Errechnet aus dem auf den <i>Zustand 1977</i> homogenisierten Datensatz durch Anwendung der Regressionsgleichung [3] ¹⁾ .
1956 bis 1977	
1977 bis 1997 auch Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand geplant</i> erfolgt für alle Werte, da die Maßnahmen am Niederrhein nicht nur die Hochwasser beeinflussen, die am Pegel Worms den Schwellenwert von 3.800 m ³ /s erreichen, sondern auch solche, die am Oberrhein kein Hochwasser erzeugt haben.
Homogenisierung auf den <i>Zustand 1955</i>	
Bis 1955	Historische Daten
1956 bis 1977	Errechnet aus dem auf den <i>Zustand 1977</i> homogenisierten Datensatz durch Anwendung der (nach <i>Zustand 1955</i> aufgelösten) Regressionsgleichung [1] ¹⁾
1977 bis 1997 Hochwasser März 1988 und Februar 1990	Die Umrechnung zur homogenisierten Reihe <i>Zustand 1955</i> erfolgt auch für alle Werte.

Tabelle 5.3.1.3:
Homogenisierung auf die Zustände heute, geplant und 1955 (Vorgehen)

1) Die Umrechnung erfolgt nur für den Gültigkeitsbereich der Regressionsgleichung, d. h. nur für den Bereich der Gleichung, bei dem die berechneten Abflüsse kleiner sind als die für den Zustand 1977.

Für jeden Pegel ergeben sich vier bezüglich der vier Zustände homogene Datenreihen, die nun dem üblichen Verfahren der Hochwasserstatistik unterzogen werden können. Für die Pegel Köln und Rees erfolgt dies nach der im Bereich der WSV üblichen Methode (Kapitel 5.1). Die Statistik für den Pegel Lobith wird nach den in den Niederlanden üblichen Verfahren durchgeführt. Die Beschreibung der Methode und der Ergebnisse ist Gegenstand von Kapitel 6.

5.3.2 Ergebnisse für die Pegel Köln und Rees

Tabelle 5.3.2.1 fasst die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Hochwasserscheitelabflüsse der homogenisierten Datenreihen für den Pegel Rees und den Pegel Köln zusammen. Daraus geht zunächst hervor, dass für beide Pegel die Werte für die historische

Datenreihe gegenüber dem *Zustand 1955* höher liegen und gegenüber dem *Zustand 1977* niedriger. Dies ist insofern plausibel, als die Zustände im Gewässer, die den historischen Datenreihen zugrunde liegen, zum Teil dem *Zustand 1955* und zum Teil dem *Zustand 1977* entsprechen.

Erwartungsgemäß ist auch die Tatsache, dass bei beiden Pegeln für alle Jährlichkeiten die Abflussscheitelwerte des *Zustandes 1955* am niedrigsten sind, die des *Zustand 1977* am höchsten und die des *Zustandes heute* und des *Zustandes geplant* dazwischen liegen. Dabei sind die Abflussscheitelwerte für den *Zustand heute* wiederum höher als für den *Zustand geplant*. Dies ergibt sich auch bei der Betrachtung der Differenzen der Abflussscheitel nach Einsatz der verschiedenen Maßnahmen (Tabelle 5.3.2.2). Hier wird augenscheinlich, dass der Aus-

Tabelle 5.3.2.1:
Hochwasserscheitelabflüsse
(berechnete Ergebnisse) unterschiedlicher Jährlichkeiten für die Ausbaustände 1955, 1977, heute und geplant an den Pegeln Köln und Rees

1) Für gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug, deshalb nur Anhaltswerte

Ergebnisse der Hochwasserstatistik – Berechnete Werte –										
Jährlichkeit [Jahre]	Historische Datenreihe Q [m³/s]	Pegel Köln Homogenisierte Reihe				Historische Datenreihe Q [m³/s]	Pegel Rees Homogenisierte Reihe			
		Zustand 1955 Q [m³/s]	Zustand 1977 Q [m³/s]	Zustand heute Q [m³/s]	Zustand geplant Q [m³/s]		Zustand 1955 Q [m³/s]	Zustand 1977 Q [m³/s]	Zustand heute Q [m³/s]	Zustand geplant Q [m³/s]
		2	6757	6623	6866		6860	6842	6991	6898
2.5	7086	6949	7198	7190	7166	7317	7225	7462	7455	7418
3.33	7483	7342	7598	7586	7557	7713	7621	7860	7850	7808
5	8013	7869	8133	8117	8078	8247	8154	8396	8381	8334
10	8886	8735	9014	8988	8934	9133	9038	9283	9260	9203
20	9752	9597	9888	9852	9782	10022	9923	10169	10138	10072
25	10034	9877	10172	10133	10058	10312	10212	10458	10424	10354
40	10633	10473	10777	10730	10643	10932	10829	11075	11034	10959
50	10922	10760	11068	11017	10925	11231	11127	11373	11329	11250
100	11838	11674	11993	11929	11819	12187	12077	12322	12266	12178
200	12791	12623	12955	12876	12747	13185	13069	13312	13244	13146
500 ¹⁾	14115	13945	14291	14191	14034	14582	14457	14694	14607	14496
1000 ¹⁾	15173	15001	15358	15240	15060	15704	15571	15802	15699	15577

Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse – berechnete Werte –								
Jährlichkeit [Jahre]	Pegel Köln				Pegel Rees			
	Differenz der Abflussscheitel				Differenz der Abflussscheitel			
	Zustand 1977 -1955	Zustand heute -1977	Zustand geplant -1977	Zustand geplant -1955	Zustand 1977 -1955	Zustand heute -1977	Zustand geplant -1977	Zustand geplant -1955
	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]	ΔQ [m³/s]
2	243	-6	-24	219	236	-6	-39	197
2,5	249	-8	-32	217	237	-7	-44	193
3,33	256	-12	-41	215	239	-10	-52	187
5	264	-16	-55	209	242	-15	-62	180
10	279	-26	-80	199	245	-23	-80	165
20	291	-36	-106	185	246	-31	-97	149
25	295	-39	-114	181	246	-34	-104	142
40	304	-47	-134	170	246	-41	-116	130
50	308	-51	-143	165	246	-44	-123	123
100	319	-64	-174	145	245	-56	-144	101
200	332	-79	-208	124	243	-68	-166	77
500 ¹⁾	346	-100	-257	89	237	-87	-198	39
1000 ¹⁾	357	-118	-298	59	231	-103	-225	6

Tabelle 5.3.2.2:
Verschärfung bzw. Reduzierung der Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten für die Ausbaustände 1977, heute und geplant gegenüber Zustand 1955 bzw. 1977 an den Pegeln Köln und Rees

1) Für gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug, deshalb nur Anhaltswerte.

bau des Oberrheins durch Staustufen für alle Jährlichkeiten eine Verschärfung der Abflussscheitelwerte (positive Differenzen) bedeutet, während die heute schon durchgeführten Retentionsmaßnahmen sowie die geplanten Maßnahmen zu einer Reduzierung der Hochwasserscheitel führen. Wie bei der Betrachtung der Simulationswerte zeigt sich auch hier, dass trotz Einsatz aller geplanten Retentionsmaßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem Zustand vor Ausbau verbleibt. Dabei ist die verbleibende Restverschärfung am Pegel Köln etwas höher als am Pegel Rees. Bei beiden Pegeln nimmt die Restverschärfung mit zunehmender Jährlichkeit ab.

5.4 Einfluss des Gewässerausbaus und der Hochwasserschutz- und Rückhaltmaßnahmen auf Modellhochwasserwellen

Die Basis für die Hochwasserstatistik für die Pegel Köln und Rees ist ein Abflussdatenkollektiv aus dem Zeitraum 1901 bis 1997. Die daraus ermittelten Abflüsse

verschiedener Jährlichkeiten können deshalb bis zu einer Jährlichkeit von 100 Jahren als abgesichert angesehen werden, während alle Jährlichkeiten größer 100 Jahre Extrapolationen darstellen. Inwieweit das Gewässersystem des Rheins bei Hochwasserabflüssen von Jährlichkeiten zwischen 200 bis 1000 bzw. 1250 Jahren wie bei kleineren Abflüssen reagiert und ob die Retentionsmaßnahmen bei allen Abflüssen die gleichen Wirkungen zeigen, wie sie die Hochwasserstatistik widerspiegelt, ist zunächst unklar.

Die Entwicklung und Verwendung von Modellhochwassern, bei denen Abflussscheitel der extremen Jährlichkeiten von 200, 500, 1000 und 1250 Jahren erreicht werden, bietet die Möglichkeit, die Wirksamkeit von Ausbau- und Retentionsmaßnahmen bei extremen Abflüssen zu untersuchen.

5.4.1 Untersuchungsmethode

Zur Entwicklung von Modellhochwassern wurde der Einsatz der folgenden Möglichkeiten überprüft:

- Niederschlag-Abfluss-Modellierung in Zusammenhang mit extremen Niederschlagsereignissen;
- zeitliche Verschiebung historischer Hochwasserganglinien der Nebenflüsse, so dass ihre Abflussscheitel so zusammentreffen, dass extrem hohe Abflüsse im Rhein entstehen;
- Erhöhung historischer Hochwasserganglinien der Nebenflüsse durch einen Faktor. Das zeitliche Zusammentreffen der Ganglinien bleibt dabei erhalten.

Eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung des gesamten Rheineinzugsgebietes in Kopplung mit Untersuchungen zur Wirkung der Ausbaumaßnahmen und Retentionsmaßnahmen im Gewässer ist zurzeit nicht möglich, da Niederschlag-Abfluss-Modelle gekoppelt mit Wellenablaufmodellen für das ganze Rheingebiet noch nicht vorliegen. Zudem stehen auch noch keine Aussagen über mögliche großräumige meteorologische

Extremsituationen zur Verfügung. Letzteres wäre nötig, um Modellhochwasser durch eine zeitliche Verschiebung historischer Nebenflussganglinien zu entwickeln, weshalb auch auf dieses Verfahren verzichtet wird. Stattdessen werden Modellhochwasser durch Vergrößerung der Ganglinien erzeugt. Dabei werden alle Abflussganglinien der Nebenflüsse des Rheins sowie die Abflussganglinie des Rheins bei Basel durch einen pro Ereignis für alle Nebenflüsse einheitlichen Faktor so erhöht, dass der Scheitelabfluss des jeweils ausgesuchten Hochwassers am Pegel Rees den Scheitelwert HQ_{200} , HQ_{500} bzw. HQ_{1000} erreicht. Dabei wird jeweils eine spezifische Grundlast der Größe des kleinsten Abflusses jeder Ganglinie von der Abflusserhöhung ausgenommen. Da es sich hierbei nicht unbedingt um den Basisabfluss im hydrologischen Sinne handelt, wird dieser Begriff bewusst vermieden. Zusätzlich werden bekannte Maxima der Nebenflüsse bzw. des Rheins bei Basel im Sinne möglicher Abflussgrenzen berücksichtigt (vgl. LAMMERSEN et al., 1999), d. h. bei Erreichen dieser Abflüsse wird die Vergrößerung der betroffenen Gewässer beendet.

Abbildung 5.4.1.1:
Entwicklung von Modellhochwassern durch Erhöhung der Nebenflussganglinien ohne deren zeitliche Verschiebung

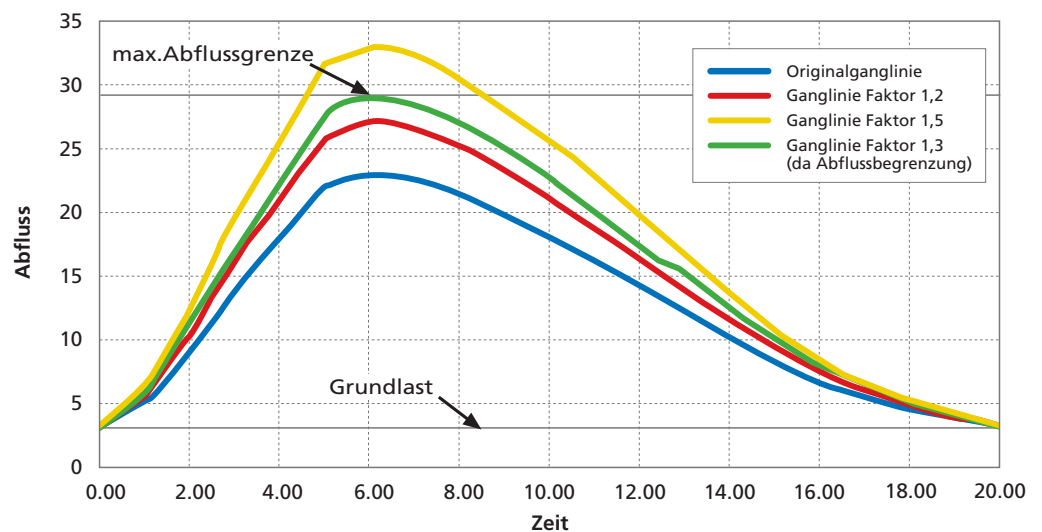


Abbildung 5.4.1.1 macht das angewandte Verfahren der Modellhochwasserentwicklung deutlich.

Als Grundlage der Modellhochwasserentwicklung werden historische Hochwasserganglinien gewählt, die ein großes Spektrum möglicher Hochwasserereignissen im Rheineinzugsgebiet abdecken:

- Das Hochwasser vom Januar 1955, das vor allem im Einzugsgebiet des Oberrheins entstanden ist,
- das Hochwasser vom März 1988, das durch starke Niederschläge sowohl im Oberrheingebiet als auch im Einzugsgebiet des Mittelrheins hervorgerufen wurde sowie
- das Hochwasser vom Januar 1995, das entscheidend durch die Zuflüsse zu Mittel- und Niederrhein aufgebaut wurde.

Die Modellhochwasser werden stets auf einen ausgewählten Pegel hin entwickelt. Im Rahmen dieser Studie ist dies der Pegel Rees. Für jedes der drei genannten historischen Hochwasser werden die Nebenflussganglinien nach dem oben beschriebenen Verfahren so

lange vergrößert, bis am Pegel Rees Scheitelabflüsse von $HQ_{200} = 13.300 \text{ m}^3/\text{s}$, $HQ_{500} = 14.700 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $HQ_{1000} = 15.800 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht werden. Alle Modellhochwasser werden im *Zustand 1977* entwickelt. Es wird also davon ausgegangen, dass der Oberrhein mit Staustufen ausgebaut ist und Retentionsmaßnahmen nicht eingeleitet werden. Zur Erläuterung der wichtigsten Parameter der Modellhochwasser und die zur Berechnung der Modellhochwasser benutzten Faktoren siehe LAMMERSEN et al., 1999.

Bei der Ermittlung des Faktors, mit dem die Nebenflussganglinien und die Ganglinie des Rheins bei Basel multipliziert werden müssen, um den gewünschten Wert in Rees zu erreichen, handelt es sich um einen iterativen Vorgang. Abbildung 5.4.1.2 stellt die Abhängigkeit des Scheitelabflusses bei Rees von den gewählten Faktoren dar. Es wird deutlich, dass über große Bereiche ein linearer Zusammenhang besteht. Erst bei höheren Faktoren bzw. Abflüssen knickt die Kurve deutlich ab. Diese Abweichung des Zusammenhanges von der Linearität wird dadurch hervorgerufen, dass bei

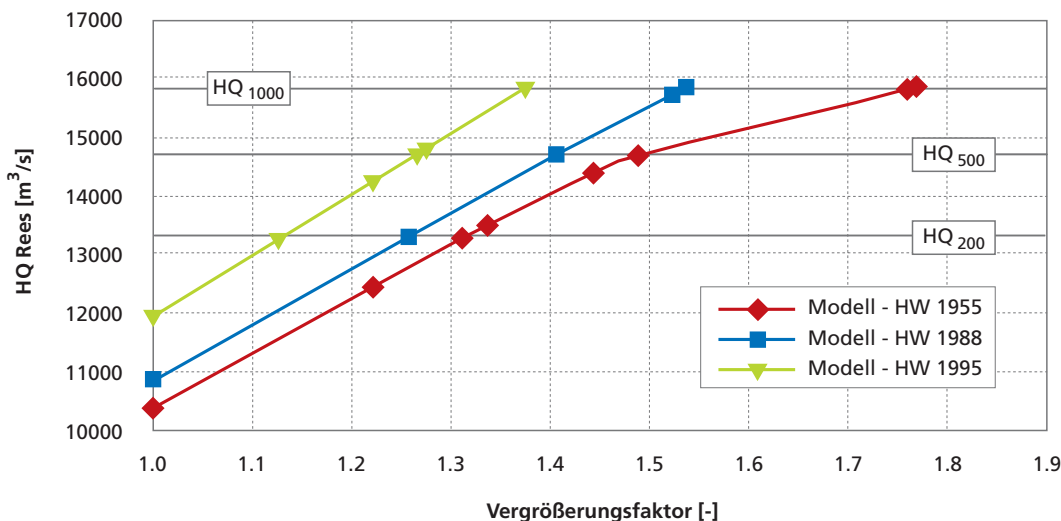


Abbildung 5.4.1.2: Abhängigkeit der Scheitelabflüsse in Rees von den gewählten Faktoren zur Vergrößerung der Zuflussganglinien

einem oder mehreren Nebenflüssen der maximal mögliche Abfluss erreicht ist, noch bevor sich der gewünschte Scheitel am Zielpegel einstellen kann. In diesen Fällen erhöhen sich bei weiteren Iterationsschritten nur noch die Faktoren für die Nebenflüsse, bei denen der maximal mögliche Abfluss noch nicht erreicht wurde. Bei den anderen Nebenflüssen bleibt der Faktor konstant. Dies führt dazu, dass in diesen Fällen schließlich unterschiedliche Faktoren für die einzelnen Zuflüsse gelten. Besonders die Abflussbegrenzung der Mosel, die nur beim Modellhochwasser 1955 auftritt, führt zu einer deutlichen Abweichung des Zusammenhanges zwischen gewähltem Vergrößerungsfaktor und Scheitelabfluss von der Linearität am Pegel Rees.

Zur Untersuchung der Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein werden mit Hilfe der Modellhochwasser Simulationen für den *Zustand 1955*, *Zustand 1977*, *Zustand heute* und *Zustand geplant* durchgeführt. Zunächst wird angenommen, dass es an keiner Stelle entlang des Rheins zu Deichüberflutungen kommt. In einer weiteren Serie von Berechnungen werden Szenarien angenommen, bei denen zwischen Iffezheim und Neckarmündung bei Abflüssen über $5.400 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Maxau und zwischen Neckar- und Mainmündung bei $6.300 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Worms zu Deichüberflutungen kommt. Dabei wird die Ganglinie beim Überschreiten dieser Werte gekappt.

5.4.2 Ergebnis

Tabelle 5.4.2.1 zeigt die für den Pegel Rees berechneten Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten von 200, 500 und 1000 Jahren ohne Deichüberflutung. Demnach wirken sich auch bei extremen Hochwassern die Ausbau-

maßnahmen (Differenz *Zustand 1977 bis 1955*) verschärfend auf die Scheitelwerte aus. Ebenso ist die Hochwasserscheitel dämpfende Wirkung der heute schon realisierten Retentionsmaßnahmen (Differenz *Zustand heute bis 1977*) und die der geplanten Retentionsmaßnahmen (Differenz *Zustand geplant bis 1977*), bei den hier simulierten extremen Hochwassersituationen zu beobachten. Die Effekte auf die Modellhochwasser 1955 und 1988 sind deutlich größer als die auf das Modellhochwasser 1995.

Die Erklärung hierfür liegt im Unterschied der Hochwassergenese dieser drei Hochwasser: Sowohl 1955 als auch 1988 waren die Zuflüsse des Oberrheins (einschließlich des Rheins bei Basel) maßgeblich beteiligt, während das Hochwasser 1995 vor allem im nördlichen Rheingebiet hervorgerufen wurde.

Die durch die unterschiedlichen Regionalitäten geprägten Genesen der Hochwasser werden auch bei der Betrachtung des jeweils in Anspruch genommenen Retentionsraums am Oberrhein deutlich (Tabelle 5.4.2.2). Während bei dem Modellhochwasser 1955 die Retentionsräume am Oberrhein (bis Worms) mit einem Gesamtvolumen von rd. 120 Mio. m^3 bzw. 260 Mio. m^3 vollständig und bei dem Modellhochwasser 1988 weitestgehend ausgeschöpft werden, kommt bei dem Modellhochwasser 1995 der größte Teil der Rückhaltevolumina nicht zum Einsatz.

Deichüberflutungen führen zu einer Reduzierung der Hochwasserscheitel. Dies zeigen die Ergebnisse in Tabelle 5.4.2.3 (Differenzen zwischen den Hochwasserscheiteln der Simulationen mit Deichüberflutungen und denen ohne Deichüberflutung). Besonders deutlich wird dies bei den Berechnungen mit den Modellhochwassern 1955. In allen zwölf

Modellhochwasser 1955									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung					Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung				
Modell- HW 1955	Zustand				Modell- HW 1955	Differenzen			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
HQ 200	12538	13300	12888	12368	HQ 200	762	-412	-932	-170
HQ 500	13888	14698	14422	13858	HQ 500	810	-275	-839	-29
HQ1000	14953	15791	15557	14993	HQ1000	839	-234	-799	40

Modellhochwasser 1988									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung					Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung				
Modell- HW 1988	Zustand				Modell- HW 1988	Differenzen			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
HQ 200	12674	13301	12948	12679	HQ 200	627	-353	-621	6
HQ 500	13935	14701	14348	14298	HQ 500	766	-353	-402	363
HQ1000	14977	15811	15501	15005	HQ1000	834	-311	-807	27

Modellhochwasser 1995									
Berechnete Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung					Auswirkung der Ausbau- und Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasserscheitel [m³/s] am Pegel Rees Varianten ohne Deichüberflutung				
Modell- HW 1995	Zustand				Modell- HW 1995	Differenzen			
	1955	1977	heute	geplant		1977 -1955	heute - 1977	geplant - 1977	geplant - 1955
HQ 200	13173	13297	13292	13272	HQ 200	124	-5	-25	100
HQ 500	14421	14697	14611	14593	HQ 500	276	-87	-104	171
HQ1000	15527	15812	15821	15795	HQ1000	285	9	-17	268

Tabelle 5.4.2.1:
Berechnete Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel Rees; Varianten ohne Deichüberflutung am Oberrhein

	Modell-HW 1955 Zustand		Modell-HW 1988 Zustand		Modell-HW 1995 Zustand	
	heute	geplant	heute	geplant	heute	geplant
HQ 200	117,61	236,98	95,74	141,88	17,22	31,87
HQ 500	119,42	256,54	113,83	207,20	30,14	54,93
HQ1000	120,75	259,68	97,22	226,95	27,82	72,73

Tabelle 5.4.2.2:
Die während der Modellhochwasserereignisse in Anspruch genommenen Retentionsvolumina am Oberrhein [Angaben in Mio. m³]

Fällen kommt es zu Deichüberflutungen mit zum Teil erheblichen Auswirkungen auf den Abflussscheitelwert bei Rees. Auch bei den Modellhochwassern 1988 führen in einigen Fällen Deichüberflutungen zu einer Reduktion der Scheitelwerte. In anderen Fällen bleibt

der Abfluss bei Maxau und Worms jedoch innerhalb der Abflusskapazität zwischen den Deichen, so dass es zu keiner weiteren Scheitelabflachung kommt. Bei allen Berechnungen mit den Modellhochwassern 1995 tritt keine Deichüberflutung ein.

5

Tabelle 5.4.2.3:
Deichüberflutungen am
Oberrhein und deren Aus-
wirkungen auf die Hoch-
wasserscheitel am Pegel Rees
(Differenz mit – ohne
Deichüberflutung); Modell-
hochwasser 1955, 1988 und
1995 mit den Jährlichkeiten
von 200, 500 und 1000 Jahren
am Pegel Rees

Überflutete Deiche am Oberrhein (M= bei Maxau; W=bei Worms)					Auswirkung der Deichüberflutung auf die Hochwasserscheitel [m ³ /s] am Pegel Rees Differenz mit – ohne Deichüberflutung				
Modellhochwasser 1955									
	<i>Zustand</i>					<i>Zustand</i>			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
HQ 200	W	M/W	M/W	M/W	HQ 200	-305	-642	-404	-176
HQ 500	M/W	M/W	M/W	M/W	HQ 500	-896	-1359	-1192	-826
HQ1000	M/W	M/W	M/W	M/W	HQ1000	-1390	-1998	-1825	-1392
Modellhochwasser 1988									
	<i>Zustand</i>					<i>Zustand</i>			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
HQ 200	nein	W	nein	nein	HQ 200	0	-44	0	0
HQ 500	nein	M/W	W	W	HQ 500	0	-512	-215	-302
HQ1000	W	M/W	M/W	W	HQ1000	-133	-920	-634	-222
Modellhochwasser 1995									
	<i>Zustand</i>					<i>Zustand</i>			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
HQ 200	nein	nein	nein	nein	HQ 200	0	0	0	0
HQ 500	nein	nein	nein	nein	HQ 500	0	0	0	0
HQ1000	nein	nein	nein	nein	HQ1000	0	0	0	0

Zusammenfassend ergibt sich:

- Sowohl die geplanten als auch die bereits durchführbaren Retentionsmaßnahmen haben bei extremen Hochwassern Einfluss auf die Hochwasserscheitel am Pegel Rees.
- Der Einfluss ist abhängig von der Hochwassergenese: Deutlich entschärfend wirken die Maßnahmen auf Hochwasser, deren Entstehung im Oberrheingebiet liegt. Weniger deutlich bis vernachlässigbar sind die Effekte bei Hochwassern, die im Wesentlichen dem nördlichen und mittleren Einzugsgebiet entstammen.
- In allen Fällen bleibt auch bei Einsatz aller Maßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem *Zustand 1955*.
- Diese Restverschärfung ist größer als die, die aus der statistischen Analyse folgt. Dies gilt vor allem für die im nördlichen und mittleren Einzugsgebiet des Rheins entstandenen Hochwasser, für die die Hochwassergenese nicht berücksichtigt wird und damit auch nicht die spezifische Effektivität der Maßnahmen bei extremen Abflüssen.

5.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus Kapitel 5.1 bis 5.4 für die Bemessungsgrundlagen

Das Bemessungshochwasser (BHQ) ist nach dem Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK, 1989) das Ereignis, das der Dimensionierung einer Hochwasserschutzanlage dient. Als Grundlage zur Festlegung von Bemessungshochwassern wird heute die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten bzw. Wiederholungszeitspannen der Hochwasserabflüsse herangezogen. Die 1990 durch das jetzige MUNLV NRW gegründete HSG NRW hat für die Hauptpegel am Rhein zwischen Andernach und Emmerich Abflüsse zu den Jährlichkeiten 100, 200 und 500 Jahren erarbeitet und abgestimmt (Tabelle 5.1.3.1), die als Grundlage der Neufestlegung des Bemessungshochwassers am Niederrhein dienen können (vgl. Kapitel 5.1).

Die bis 1996 hierfür von der HSG NRW durchgeführten Studien ließen mögliche Auswirkungen anthropogener Eingriffe im Rheineinzugsgebiet unberücksichtigt. Mit den Untersuchungen gemäß Kapitel 5.2 bis 5.4 wurden die Hochwasserscheitelabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrzeiten für die auf vier Ausbauzustände homogenisierten Datenreihen untersucht (Kapitel 5.3). Tabelle 5.5.1 fasst die ermittelten Hochwasserscheitelabflüsse ausgewählter Jährlichkeiten zusammen. Angegeben sind auf drei Ziffern gerundete Werte.

Wie in Kapitel 5.2 anhand berechneter (nicht gerundeter) Werte erläutert, wird auch für gerundete Hochwasserscheitelwerte deutlich,

- dass der Ausbau des Oberrheins mit Staustufen für alle Jährlichkeiten an den Pegeln Köln und Rees eine Verschärfung der Abflussscheitelwerte hervorruft,
- dass die heute schon durchgeführten sowie die geplanten Retentionsmaßnahmen zu einer Reduzierung der Hochwasserscheitel führen und
- dass bei Einführung aller geplanten Retentionsmaßnahmen eine Restverschärfung gegenüber dem Zustand vor Ausbau bestehen bleibt.

5

Tabelle 5.5.1:
Hochwasserscheitelabflüsse
unterschiedlicher Jährlich-
keiten für die Ausbaustände
1955, 1977, heute und geplant
an den Pegeln Köln und Rees
(gerundete Werte)

1) Für gesicherte Extrapolation
ist die Beobachtungsreihe
nicht lang genug, deshalb
nur Anhaltswerte.

Jähr- lichkeit [Jahre]	Pegel Köln					Pegel Rees				
	Histori- sche Daten- reihe	1901 bis 1997				Histori- sche Daten- reihe	1901 bis 1997			
		Homogenisierte Reihe					Homogenisierte Reihe			
	Zustand 1955 Q [m³/s]	Zustand 1977 Q [m³/s]	Zustand heute Q [m³/s]	Zustand geplant Q [m³/s]		Zustand 1955 Q [m³/s]	Zustand 1977 Q [m³/s]	Zustand heute Q [m³/s]	Zustand geplant Q [m³/s]	
2	6760	6620	6870	6860	6840	6990	6900	7130	7130	7100
5	8010	7870	8130	8120	8080	8250	8150	8400	8380	8330
10	8890	8740	9010	8990	8930	9130	9040	9280	9260	9200
50	10900	10800	11100	11000	10900	11200	11100	11400	11300	11200
100	11800	11700	12000	11900	11800	12200	12100	12300	12300	12200
200	12800	12600	13000	12900	12700	13200	13100	13300	13200	13100
500 ¹⁾	14100	13900	14300	14200	14000	14600	14500	14700	14600	14500
1000 ¹⁾	15200	15000	15400	15200	15100	15700	15600	15800	15700	15600

Die Datenbasis für die Hochwasser-
statistik ist eine 97-jährige Datenreihe.
Daraus ermittelte Abflüsse ver-
schiedener Jährlichkeiten können
deshalb bis zu einer Jährlichkeit von
100 Jahren als abgesichert angesehen
werden. Die Werte für die Jährlich-
keiten größer 100 Jahre sind extrapo-
liert. Durch Berechnungen mit Modell-

hochwassern der Jährlichkeiten 200,
500 und 1000 Jahre wird am Beispiel
des Pegels Rees gezeigt, dass auch bei
extrem hohen Hochwassern mit
Wirkungen der Retentionsmaß-
nahmen gerechnet werden kann.
Die Wirkungen hängen jedoch stark
von der Genese der Hochwasser ab
(vgl. Kapitel 5.4).

Pegel Rees		Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten mit Deichüberflutung			
HQ ₂₀₀ [m³/s]	Zustand				HQ ₂₀₀ [m³/s]	Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
Mod-HQ 1955	12500	13300	12900	12400	Mod-HQ 1955	12200	12700	12500	12200
Mod-HQ 1988	12700	13300	12900	12700	Mod-HQ 1988	12700	13300	12900	12700
Mod-HQ 1995	13200	13300	13300	13300	Mod-HQ 1995	13200	13300	13300	13300
HQ ₂₀₀ aus Statistik	13100	13300	13200	13100					

Pegel Rees		Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten mit Deichüberflutung			
HQ ₅₀₀ [m³/s]	Zustand				HQ ₅₀₀ [m³/s]	Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
Mod-HQ 1955	13900	14700	14400	13900	Mod-HQ 1955	13000	13300	13200	13000
Mod-HQ 1988	13900	14700	14300	14300	Mod-HQ 1988	14000	14200	14100	14000
Mod-HQ 1995	14400	14700	14600	14600	Mod-HQ 1995	14400	14700	14600	14600
HQ ₅₀₀ aus Statistik	14500	14700	14600	14500					

Pegel Rees		Varianten ohne Deichüberflutung				Varianten mit Deichüberflutung			
HQ ₁₀₀₀ [m³/s]	Zustand				HQ ₁₀₀₀ [m³/s]	Zustand			
	1955	1977	heute	geplant		1955	1977	heute	geplant
Mod-HQ 1955	15000	15800	15600	15000	Mod-HQ 1955	13600	13800	13700	13600
Mod-HQ 1988	15000	15800	15500	15000	Mod-HQ 1988	14800	14900	14900	14800
Mod-HQ 1995	15500	15800	15800	15800	Mod-HQ 1995	15500	15800	15800	15800
HQ ₁₀₀₀ aus Statistik	15600	15800	15700	15600					

Tabelle 5.5.2: Hochwasserscheitel der Modellhochwasser 1955, 1988 und 1995 mit den Jährlichkeiten von 200, 500 und 1000 Jahren am Pegel Rees im Vergleich zu den entsprechenden statistisch ermittelten Scheitelabflüssen

- HQ kleinster Wert der Modellhochwasserberechnungen je Zustand und Modellhochwasser
- HQ größter Wert der Modellhochwasserberechnungen je Zustand und Modellhochwasser
- HQ Wert aus der Statistik
- HQ größter Wert in der Jährlichkeits-Matrix

In Tabelle 5.5.2 werden die Ergebnisse der Modellhochwasserberechnungen (gerundete Werte) den entsprechenden aus der Hochwasserstatistik entnommenen (gerundeten) Werten gegenübergestellt. Abweichungen der mit Hilfe der Modellhochwasser berechneten Scheitelabflüsse von den statistisch ermittelten Werten um bis zu 2.000 m³/s nach unten treten vor allem bei den Varianten „mit Deichüberflutungen“ auf. Abweichungen nach oben sind

eher selten und erreichen Werte bis zu 200 m³/s.

In allen in Tabelle 5.5.2 dargestellten Fällen ist der aus der Hochwasserstatistik entnommene Scheitelwert für den Zustand 1977 der höchste.

Je nach Hochwassergenese kann er jedoch auch bei den Modellhochwasserberechnungen erreicht werden, nämlich dann, wenn wie beim Hochwasser 1995 der Einfluss der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein gering ist.

5

Tabelle 5.5.3 stellt die bereits 1996 vorgeschlagenen Abflüsse gegebener Jährlichkeiten den entsprechenden Werten der neueren Untersuchungen mit homogenisierten Datenreihen gegenüber. Hieraus wird ersichtlich, dass die Statistik unter Verwendung der homogenisierten Daten für die beiden untersuchten Hauptpegel Köln und Rees für den *heutigen Zustand* etwa die 1996 vorgeschlagenen Werte ergibt. Für den *geplanten Zustand* sind sie etwas kleiner. – Die Berechnungen

unter Verwendung von drei modellhaften Hochwassern, die auf den Einzelereignissen 1955, 1988 und 1995 beruhen, bestätigen die statistisch ermittelten Tendenzen. Abweichungen zeigen die Ergebnisse für das ausgeprägt moselbezogene Modellereignis 1995, wenn es auf 200 bzw. 1000-jährliche Scheitel in Rees vergrößert wird. Auch wenn die meteorologische Sinnhaftigkeit einer derart mosellastigen Vergrößerung der Abflüsse derzeit nicht zu verifizieren ist, scheint es dennoch

Tabelle 5.5.3:
HQ_T für die Rheinpegel
Köln und Rees

Pegel	Jährlichkeit	HSG NRW 1996 (Tabelle 5.1.3.1)	aus Statistik mit homogenisierter Datenreihe (Tabelle 5.5.1)			Empfehlung 2000
			<i>Zustand</i>			
			1977	heute	geplant	
	Jahre	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Köln	100	12.000	12.000	11.900	11.800	12.000
	200	12.900	13.000	12.900	12.700	12.900
	500	14.200	14.300	14.200	14.000	14.200
Rees	100	12.300	12.300	12.300	12.200	12.300
	200	13.300	13.300	13.200	13.100	13.300
	500	14.800	14.700	14.600	14.500	14.700

nicht sinnvoll, die aus den Berechnungen sich ergebenden niedrigsten Werte (gemäß „Zustand geplant“) für die nächsten Jahre als HQ_T festzuschreiben. Es wird vielmehr vorgeschlagen, auf der sicheren Seite zu verbleiben und das Kollektiv der 1996 vorgeschlagenen HQ_T weitgehend zu belassen, das rechnerisch den Werten des „Zustandes heute“ entspricht. Lediglich der Abfluss für HQ_{500} in Rees ist zu ermäßigen, da die HQ_{500} sich an diesem Pegel für alle Zustände der

aktuellen Berechnungen geringer ergeben als 1996. Vorgeschlagen wird $HQ_{500} = 14.700 \text{ m}^3/\text{s}$ in Rees. Das entspricht einem Abflusssprung von $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ von HQ_{200} auf HQ_{500} . Diese Differenz ist korrigierend auch für Ruhrort, Wesel und Emmerich angesetzt.

Die für die Zuordnung von Hochwasserscheitelabflüssen zu vorgegebenen Jährlichkeiten empfohlenen Werte sind in der Tabelle 5.5.4 zusammengestellt.

Pegel	Jährlichkeit T in Jahren	Scheitelabflüsse in m^3/s	
		Vorschlag HSG NRW 1996	Empfehlung 2000
Bonn	100	11.700	11.700
	200	12.600	12.600
	500	14.000	14.000
Köln	100	12.000	12.000
	200	12.900	12.900
	500	14.200	14.200
Düsseldorf	100	12.000	12.000
	200	12.900	12.900
	500	14.200	14.200
Ruhrort	100	12.400	12.400
	200	13.400	13.400
	500	14.900	14.800 ¹⁾
Wesel	100	12.400	12.400
	200	13.400	13.400
	500	14.900	14.800 ¹⁾
Rees	100	12.300	12.300
	200	13.300	13.300
	500	14.800	14.700 ¹⁾
Emmerich	100	12.200	12.200
	200	13.100	13.100
	500	14.600	14.500 ¹⁾

Tabelle 5.5.4:
*HQ_T für die Rheinpegel
Bonn bis Emmerich
(Vorschlag der HSG NRW
1996 und Empfehlung 2000)*

1) Werte wurden gegen-
über 1996 geändert.