



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
Commission Internationale pour la Protection du Rhin
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

Abschlussbericht

Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur
Minderung der Hochwasserstände im Rhein infolge
Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser bis 2005

IKSR-Expertengruppe Hval
Juni 2006



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
Commission Internationale pour la Protection du Rhin
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

IKSR-Expertengruppe Hval

Dr. G. Brahmer,	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Dr. M. Braun,	Sekretariat der IKSR
Dr. M. Bremicker,	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Ir. H. Buiteveld,	Rijkswaterstaat - RIZA
Dipl.-Met. N. Busch,	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Dipl.-Ing. H. Engel,	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Dipl.-Ing. M. Hammer,	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Dipl.-Ing. H. Hodel,	Bundesamt für Umwelt, Schweiz
Dipl.-Ing. P. Junod,	Service de la Navigation de Strasbourg, Strasbourg
Dipl.-Ing. B. Kammer,	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Dipl.-Ing. B. Mehlig,	Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Dipl.-Ing. D. Meißner,	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Dr. A. Meuser, (Vorsitzender)	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
Dr. A. Petrascheck	Bundesamt für Umwelt, Schweiz
Dr. A. Vogelbacher	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz

Der vorliegende Abschlussbericht der IKSR-Expertengruppe Hval basiert auf einem von der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, erstellten zusammenfassenden Gesamtentwurf sowie auf Untersuchungen der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	V
VERWENDETE ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE	VI
ZUSAMMENFASSUNG.....	VIII
1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG.....	1
2 HOCHWASSERGENESE IM RHEINGEBIET	3
3 VERWENDETE HOCHWASSEREREIGNISSE UND ZIELPEGEL	5
4 VORGEHENSWEISE	7
4.1 MODELLINSTRUMENTARIEN UND RANDBEDINGUNGEN	7
4.1.1 Das hydrologische Modell SYNHP	8
4.1.2 Das hydraulische Modell SOBEK	9
4.1.3 Randbedingungen des Rückgratmodells.....	9
4.2 GENERIERUNG VON MODELLHOCHWASSERN	10
4.3 MAßNAHMENKATEGORIEN UND REALISIERTE MAßNAHMEN (1995 – 2005) GEMÄß AKTIONSPLAN HOCHWASSER	12
4.3.1 Rückhaltemaßnahmen zwischen Basel und Nordsee.....	13
4.4 ABSCHÄTZUNG DER WIRKSAMKEIT VON ZWISCHEN 1977 UND 2005 REALISIERTEN WASSERSTANDSSENKENDEN MAßNAHMEN AM OBERRHEIN	21
5 BERECHNUNGSVARIANTEN	22
6 BERECHNUNGSERGEBNISSE	26
6.1 MINDERUNG DER HOCHWASSERABFLÜSSE UND HOCHWASSERSTÄNDE.....	26
6.2 ABSCHÄTZUNG DER ÄNDERUNG DER JÄHRLICHKEITEN AN ZIELPEGELN.....	32
LITERATUR.....	36
GLOSSAR.....	38
Anhang 1: Festlegung des Begriffs "Extremes Hochwasser" im Zusammenhang mit den Wirkungen der Maßnahmen des APH	
Anhang 2: Wirkung der von 1995 bis 2005 umgesetzten Maßnahmen der Ka- tegorie 1 „Wasserrückhalt im Einzugsgebiet“	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Mittlere monatliche Abflüsse (1931 / 1990) für verschiedene Rheinabschnitte.....	4
Abbildung 2:	Gewässerstrecken des Rückgratmodells im Rheineinzugsgebiet	8
Abbildung 3:	Entwicklung von Modellhochwassern	11
Abbildung 4:	Übersicht der bis 2005 realisierten Maßnahmen im Rheineinzugsgebiet ...	15
Abbildung 5:	Wirkung der Maßnahme Bad Kreuznach anhand der Ganglinien am Nahepegel Grolsheim	19
Abbildung 6:	Wirkung der Maßnahme an der oberen Lahn und am Kleebach.....	20
Abbildung 7:	Nomenklatur der Hval-Rechenläufe.....	23
Abbildung 8:	Abflussganglinien an den Pegeln Kaub und Worms.....	27
Abbildung 9:	Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Maxau	28
Abbildung 10:	Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Worms	28
Abbildung 11:	Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Kaub	29
Abbildung 12:	Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Köln.....	29
Abbildung 13:	Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Lobith	30
Abbildung 14:	Beispiel für die graphische Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsänderung an einem Pegel infolge einer Abflussminderung	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Scheitelbezogene Auswirkungen der wasserstandsmindernden Maßnahmen im Zustand 2005 gegenüber 1995	VIII
Tabelle 2:	Die neun größten Scheitelabflüsse am Pegel Köln seit 1926 und die Abflussfüllen dieser Wellen oberhalb der jeweiligen Basisabflüsse	5
Tabelle 3:	Retentionsmaßnahmen am Rhein zwischen Basel und der Nordsee.....	13
Tabelle 4:	Retentionsmaßnahmen im Einzugsgebiet des Kleebachs und der Lahn oberhalb des Pegels Gießen.....	20
Tabelle 5:	Scheitelbezogene Auswirkungen der wasserstandsmindernden Maßnahmen im Zustand 2005 gegenüber 1977	22
Tabelle 6:	Matrix der 41 Berechnungsvarianten bzw. 82 Berechnungsläufe	25
Tabelle 7:	Übersicht der Berechnungsergebnisse	31
Tabelle 8:	Änderung der Jährlichkeit, gegliedert nach HW-Bereiche an den Zielpegeln (scheitelwertbezogen).....	34

Verwendete Abkürzungen und Symbole

APH	Aktionsplan Hochwasser
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BW	Baden-Württemberg
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
HQ	Hochwasserabfluss [m^3/s]
HQ _T	Scheitelabfluss, der in einer längeren Reihe von aufeinander folgenden Jahren in der Zeitspanne von T Jahren einmal erreicht oder überschritten wird
Hiri	Expertengruppe der IKSR zur Erarbeitung einer Methodik zum „Nachweis der Reduzierung von Schadensrisiken“
HKV	Niederländisches Ingenieurbüro für Wasserwirtschaft und Hydrologie
HSG	Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Kaub- Rolandswerth
HSK	Hochwasser-Studienkommission für den Rhein
Hval	Expertengruppe der IKSR: „Validierung der Berechnungen zu den Nachweisinstrumenten für die Wirksamkeit der Maßnahmen zur Reduzierung der Extremhochwasserstände“
HW	Hochwasserereignis
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
KHR	Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
LfW	Landesamt für Wasserwirtschaft
LUA	Landesumweltamt
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (vormals LfU: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg)
LUWG	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
NAXOS	Name des für die Maßnahmen im Einzugsgebiet der Lahn eingesetzten, konzeptionellen Niederschlag - Abfluss - Modells des Leichtweiß-Instituts der Universität Braunschweig
NRW	Nordrhein-Westfalen
RWS-RIZA	Rijkswaterstaat - Staatliches Amt für Integralverwaltung der Binnengewässer und für Abwasserreinigung
SOBEK	Name des eingesetzten eindimensionalen, hydrodynamisch - numerischen Simulationsmodells

SYNHP	Name des eingesetzten, synoptischen Wellenablaufprogramms
Q	Abfluss [m^3/s]
T	Wiederholungszeitspanne (Jährlichkeit)
W	Wasserstand [cm, m + NN]
Z	Zustand

Zusammenfassung

Gemäß Aktionsplan Hochwasser der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins sind die Wirkungen realisierter Rückhaltemaßnahmen auf Hochwasserstände des Rheins regelmäßig zu evaluieren. Die Untersuchungen zur Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein bis 2005 wurde in der Bundesanstalt für Gewässerkunde und in der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg im Rahmen der IKS-R Expertengruppe Hval mit mathematischen Abflussmodellen (SYNHYP, SOBEK) durchgeführt. Hierbei wurden Modellhochwasser auf Grundlage der historischen Ereignisse 1978, 1983, 1988, 1995 und 1999 verwendet. Diese Modellhochwasser (5 HW am Oberrhein, 3 HW an Mittel- und Niederrhein) bilden unterschiedliche Hochwassergenesen im Rheineinzugsgebiet ab. Modellhochwasser wurden dem Ziel der Untersuchung (HQ_{Extrem}) entsprechend generiert und anschließend der Einsatz der Maßnahmen simuliert.

Zwischen den Bezugshorizonten 1995 und 2005 wurden neben den wasserstandsmindernden Maßnahmen im Einzugsgebiet, 18 direkt am Rhein gelegene Maßnahmen einsatzbereit fertig gestellt, bzw. bestehende Maßnahmen modifiziert. Hierbei entfallen auf Frankreich eine Maßnahme mit 7.8 Mio. m^3 Rückhalteraum, auf Baden-Württemberg eine Maßnahme mit 12.0 Mio. m^3 Rückhalteraum, Rheinland-Pfalz stellte sieben Maßnahmen mit 14.3 Mio. m^3 Rückhalteraum bereit, Nordrhein-Westfalen zwei Maßnahmen mit 18 Mio. m^3 Rückhalteraum. Die Niederlande aktivierten durch Deichverlegungen und Vorlandvertiefungen rund 17 km^2 zusätzliche Fläche zur Senkung der Hochwasserstände. Für den Zielpegel Lobith wirken allerdings nur Maßnahmen im Umfang von rund 2 km^2 . Die restlichen Maßnahmen liegen unterhalb von Lobith und zeigen dort lokale Wirkungen. Das Land Hessen und der Bund sind entsprechend bestehender Verträge anteilig an der Finanzierung von Rückhaltemaßnahmen in Frankreich, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz beteiligt. Das zusätzlich im Vergleich zum Referenzzustand 1995 zur Verfügung gestellte Retentionsvolumen im Jahre 2005 beläuft sich somit auf gut 55 Mio. m^3 , davon 34 Mio. m^3 zusätzliches Volumen am Oberrhein und 21 Mio. m^3 zusätzliches Volumen am Niederrhein.

Bei der Beurteilung der Wirkung der Maßnahmen bis 2005 sollte die Abschätzung der Wirksamkeit von zwischen 1977 und 1995 realisierten Maßnahmen beachtet werden, da bereits im Bezugsjahr 1995 rund 110 Mio. m^3 Retentionsvolumen einsatzbereit am Oberrhein und 50 Mio. m^3 am Niederrhein zur Verfügung standen. Modellrechnungen zeigen, dass durch die zwischen 1977 und 2005 geschaffenen Retentionsmaßnahmen zur Wiederherstellung des Hochwasserschutzes am Oberrhein, wie er vor dem Staustufenbau vorhanden war, der 200-jährliche Scheitelwasserstand am Pegel Maxau um etwa 50 cm bis 60 cm gemindert wird, am Pegel Lobith um mehr als 10 cm. Diese sehr deutlichen Wasserstandsminderungen beziehen sich allerdings nicht auf den im Aktionsplan genannten Bezugszeitraum zwischen 1995 und 2005.

Nach dem Aktionsplan Hochwasser sollen Wasserstandsreduzierungen um bis zu 30 cm bis 2005 gegenüber dem Zustand von 1995 erreicht werden. Bei den untersuchten Modellhochwassern stellen sich **maximale Abminderungen der Hochwasserscheitel** um bis zu **31 cm** im Bereich des Pegels **Maxau** ein. Am Pegel **Worms** werden bis zu 29 cm niedrigere Hochwasserscheitel durch den Einsatz der Maßnahmen erreicht, allerdings bei einem für die Deichstrecke unkritischen Hochwasser. Bei einem 200-jährlichen Hochwasser, auf das die Deiche bemessen sind, werden nur noch Scheitelreduzierungen von bis zu **17 cm** berechnet. Der Wasserstand bei **Kaub** wird um bis zu **12 cm** im Scheitel abgesenkt, im Bereich des Pegels **Köln** werden noch bis zu **11 cm** Absenkung erreicht. An der deutsch-niederländischen Grenze, am Pegel **Lobith**, wird der Hochwasserscheitel der berechneten Variante, die ein extremes Hochwasser repräsentiert um bis zu 7 cm abgesenkt, beim 1000-jährlichen Abfluss ergibt sich nur eine Abminderung von **3 cm** (zusätzliche Angaben enthält Tabelle 1).

Tabelle 1: Scheitelbezogene Auswirkungen der wasserstandsmindernden Maßnahmen im Zustand 2005 gegenüber 1995

Pegel	minimale / maximale Scheitelwasserstandsänderungen [cm] im Zustand 2005 gegenüber dem Zustand 1995 für die untersuchten Hval-Modellhochwasser					
	um HQ ₁₀₀		um HQ ₂₀₀		um HQ ₁₀₀₀	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Maxau	-7	-20	1	-31	keine Hval-Variante	
Worms	-5	-13	-4	-17	keine Hval-Variante	
Kaub	0	-12	2	-12	keine Hval-Variante	
Köln	0	-8	-6	-9	-6	-11
Lobith	-1	-7	-2	-7	1	-3

Erzielte Scheitelminderungen werden ausschließlich von realisierten Maßnahmen unmittelbar am Rhein verursacht, die Gegenstand dieser Untersuchungen waren. Ein Großteil der im APH aufgeführten Maßnahmen im Einzugsgebiet (Renaturierungen, Extensivierung der Landwirtschaft, Naturentwicklung, Aufforstungen und Entsiegelungen) dienen nicht primär dem Hochwasserschutz für den Rhein, sondern entfalten vor allem lokale Wirkungen bei kleineren Hochwasserereignissen in den Nebengewässern bzw. erfüllen wichtige Zielvorgaben in anderen Politikbereichen.

Die einzigen Maßnahmenkategorien im Einzugsgebiet, die eine, wenn auch geringe, hochwasserreduzierende Wirkung im Rhein ausüben könnten, sind Reaktivierungen von Überschwemmungsgebieten sowie technische Rückhaltungen. Reaktivierte Überschwemmungsgebiete können allerdings nur dann eine Auswirkung auf den Scheitelabfluss im Rhein haben, wenn die rückgewonnene Fläche am Nebengewässer ein im Vergleich zum betrachteten Rheinhochwasser bedeutendes Volumen bereitstellt und darüber hinaus zeitlich so überflutet wird, dass sich nach dem Zufluss des Nebengewässers in den Rhein eine abflussreduzierende Wirkung im Scheitel des Rheinhochwassers einstellt. Diese Verhältnisse sind jedoch im Rheingebiet nicht gegeben, da die seitlichen Zuflüsse dem Rheinhochwasser in aller Regel zeitlich vorgelagert sind. Auch technische Hochwasserrückhaltung an den Rheinzufüssen können den Hochwasserabfluss im Rhein nicht merkbar verringern. Auf den Nachweis von Maßnahmen in der Fläche wurde aus den genannten Gründen bis auf wenige Ausnahmefälle verzichtet, da diese keinen wesentlichen Beitrag zur Minderung extremer Rheinhochwasserstände leisten können und ein aufwendiger, modelltechnischer Nachweis weder vertretbar noch erforderlich ist.

Die vorliegende Untersuchung bezieht sich auf Abminderungen der Hochwasserscheitel, wobei noch größere Abminderungen vor oder nach dem Erreichen der Scheitel eintreten können.

Obwohl eine Abminderung des Scheitels in der Regel das wichtigste Ziel darstellt, sind die positiven Wirkungen von Abminderungen der Wasserstände sowohl vor- als auch nach dem Scheitel nicht zu vernachlässigen. Eine Abminderung von Wasserständen im steigenden Ast einer Hochwasserwelle, kann die Geschwindigkeit des Wasserstandsanstiegs verringern. Dadurch wird die Vorwarnzeit verlängert und eine ungünstige Wellenüberlagerung von Rhein und Nebengewässer kann wasserstandsmindernd beeinflusst werden. Eine Wasserstandsabsenkung im fallenden Ast einer Hochwasserwelle wird zu einer früheren Entlastung von Schutzbauwerken führen, und die Zeit „kritischer Wasserstände“ kann verringert werden.

Bei dem knappen Angebot verfügbarer Retentionsvolumina sollte im Hinblick auf die im Aktionsplan Hochwasser angestrebte Hochwasserscheitelreduzierung bis 2020 ergänzend berücksichtigt werden, dass steuerbare Maßnahmen bei gleichem Volumen gegenüber ungesteuerten Maßnahmen deutlich größere Wirkungen vor Ort erreichen.

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse der Nachweis-Untersuchungen sind folgende Fakten zu berücksichtigen:

- Aus naturräumlichen Gründen liegen die Hochwasserrückhaltemaßnahmen am Rhein in nennenswertem Umfang nur in zwei Streckenabschnitten:
 - am Oberrhein zwischen Basel und Bingen
 - am Niederrhein unterhalb von Köln
- Die Rückhaltungen am Oberrhein dienen entsprechend den deutsch-französischen Verträgen zum weit überwiegenden Teil dem Ziel, den vor dem Staustufenbau im Oberrhein gegebenen Hochwasserschutz wieder herzustellen. Zielpunkte der Steuerung sind die Pegel Maxau und Worms, für die die Wirkungen der Rückhaltungen optimiert sind.
- Eine Maßnahme zur Minderung von Hochwasserscheiteln kann immer nur in einem begrenzten Bereich ihre maximale Wirkung entfalten. Diese begrenzte Reichweite ist abhängig vom Volumen des Retentionsraumes und der Fülle des Hochwasserereignisses. Dieser begrenzte Wirkungsbereich kann allerdings mit steuerbaren Maßnahmen ausgeprägter gestaltet werden.
- Die Wirkungsweise der gesteuerten Maßnahmen am Oberrhein besteht in einer Abminderung des Scheitelbereichs der Oberrheinwelle mit Rückgabe des zurückgehaltenen Wasservolumens nach dem Scheiteldurchlauf. Diese Abflussumverteilung ist stromab am gesamten Rhein nachweisbar, wobei das Volumen im Scheitelbereich stromab zunehmend zeitlich gestreckt und dadurch die maximalen Abflussdifferenzen gemindert werden. Die größten Abminderungen durch die im Zeitraum 1995 bis 2005 hinzugekommenen Rückhaltemaßnahmen liegen in Maxau/Worms in der Größenordnung von 250 m³/s - 400 m³/s und gehen aus dem oben genannten Grund bis zur deutsch-niederländischen Grenze auf Werte um 100-200 m³/s zurück. Hinzu kommt, dass bei einer zunehmenden Flussbreite, wie dies im Niederrhein gegenüber dem Oberrhein der Fall ist, eine gleichgroße Abflussminderung zu einer geringeren Wasserstandsminderung führt. Dies verdeutlicht, dass die Maßnahmen am Oberrhein nur eine begrenzte Reichweite aufweisen können und daher nur einen Teil des insgesamt erforderlichen Hochwasserrückhalt für die Rheinstrecke bis in die Nordsee leisten können.

Als Fazit der Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die angestrebte Reduzierung der Rheinhochwasserstände von bis zu 30 cm durch die zwischen 1995 bis 2005 erstellten Hochwasserrückhaltungen am Oberrhein erreicht wird. Am Mittelrhein beträgt die Reduzierung bis circa 10 cm. Am Niederrhein ergeben die Berechnungen für den Bereich Köln ebenfalls Abminderungen bis circa 10 cm, für den Bereich der deutsch-niederländischen Grenze bis zu 7 cm, bzw. bei Bemessungshochwasser 3 cm. Diese Abminderungen werden nicht in jedem untersuchten Fall erreicht. Je nach Hochwasserentstehung wird in einzelnen Fällen praktisch keine Abminderung der Scheitelwasserstände nachgewiesen.

Einleitung und Aufgabenstellung

Der von der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) vorgelegte Aktionsplan Hochwasser (APH) für den Rhein wurde von der 12. Rhein-Ministerkonferenz in Rotterdam am 22. Januar 1998 beschlossen (IKSR, 1998).

Der APH unterstützt somit die Zielsetzungen zur Verbesserung der Hochwassersituation im Rhein flussabwärts von Iffezheim, die bereits in den deutsch-französischen Verträgen von 1969/1982 formuliert wurden. Im APH wird in vier Handlungszielen formuliert, wie bezüglich der Verhältnisse des Jahres 1995 eine Verbesserung der Hochwassersituation am Rhein durch verschiedenartige Maßnahmen erreicht werden soll. Aufgrund der konkreten Benennung von Zielen, Maßnahmen, Kosten, Zielhorizonten, Umsetzungsstrategien usw. ist dieser Aktionsplan für den Rhein wegweisend und hat seither für zahlreiche Aktionspläne für Flüsse innerhalb und außerhalb des Rheineinzugsgebiets Pate gestanden. Die im Handlungsziel 2 des APH geforderte „Minderung der Hochwasserstände“ durch vorbeugende Rückhaltemaßnahmen am Rhein und in seinem Einzugsgebiet bzw. die Bilanz der Auswirkung der Maßnahmen 2005, ist Gegenstand dieses Berichts. Angestrebt war die „Minderung der Extremwasserstände unterhalb des staugeregelten Bereichs um bis zu 30 cm bis zum Jahr 2005...“ (IKSR, 1998).

Zur Realisierung der Ziele wurde die lange Laufzeit des Aktionsplans bis zum Jahr 2020 sowie die Realisierung der Handlungsziele in den Zeithorizonten der Jahre 2000, 2005 und 2020 vereinbart. Hierdurch wird eine Erfolgskontrolle auf dem Wege zum Ziel ermöglicht. Eine erste Bilanz des Erreichten legte die IKSR im Jahre 2001 vor (IKSR, 2001). In der ersten Bilanz wurde aus der Aufsummierung der geschaffenen Rückhalteräume seit 1995 geschlossen, dass „...die angestrebte Wasserstands-minderung von 5 cm erreicht“ (IKSR, 2001) wurde. In der hier vorliegenden Bilanzierung stützt sich die Erfolgskontrolle auf Ergebnisse von Simulationsberechnungen mit mathematischen Abflussmodellen. Der Nachweis der Wirksamkeit realisierter Maßnahmen soll dabei auf einem Kollektiv von Modellhochwassern basieren, die das Hochwasserverhalten im Rheineinzugsgebiet beispielhaft nachbilden.

Zur Begleitung der erforderlichen Untersuchungen hat die Arbeitsgruppe Hochwasser der IKSR die Expertengruppe Hval eingerichtet. Durch ihr Mandat ist diese Gruppe u. a. beauftragt, „die Komponenten [des einzusetzenden] Rückgratmodells abzunehmen, zu bestätigen und den Einsatz sowie die Leistungsfähigkeit der Methodik zu prüfen“.

Gemäß den Beschlüssen der IKSR werden die Untersuchungen für die Rheinstrecke von Basel bis Worms von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) mit dem Modell SYNHP durchgeführt. Mit der Untersuchung der Rheinstrecke flussabwärts von Worms mit dem Modell SOBEK und für eine Gesamtschau der Berechnungen wurde die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) beauftragt. Das von Rijkswaterstaat RIZA erstellte SOBEK-Modell für die niederländischen Rheinarme ist im SOBEK-Modell der BfG integriert. Dies gewährleistet auch die Evaluierung von durchgeführten Maßnahmen in den Niederlanden.

Die Kombination der Modelle SYNHP und SOBEK erfüllt als gekoppeltes Gesamtmodell (Rückgratmodell) die Anforderungen des Leistungsprofils bzgl. des Gesamtmodells, mit dem die Maßnahmen des APH simuliert werden können. Gemäß seinem Aufbau sind in dem Gesamtmodell hinreichend viele Knoten (= Nebenflüsse) implementiert, so dass die Ergebnisse von Nachweisuntersuchungen, die die Länder ggf. mit ihren regionalen Modellen vornehmen, als obere und seitliche Randbedingungen in das Rückgratmodell Eingang finden können.

Die mit Vertretern aus vier verschiedenen Rheinanliegerstaaten (Schweiz, Frankreich, Deutschland und Niederlande), sechs deutschen Bundesländern (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Nordrhein-Westfalen) sowie der BfG und IKSR besetzte Expertengruppe Hval hat den Untersuchungsrahmen und die hydrologisch-hydraulischen Randbedingungen für die Modellberechnungen festgelegt. Sie wählte fünf historische Rheinhochwasser aus, die unterschiedliche Hochwassergenesen in den verschiedenen Regionen des Rheingebiets beschreiben. Für diese Regionen wurden insgesamt fünf Zielpegel ausgewählt sowie dort geltende maximale Abflüsse definiert, die im Zuge der Generierung von extremen Modellhochwassern nicht überschritten werden sollen.

Der vorliegende, von der BfG im Entwurf verfasste und durch die Expertengruppe Hval überarbeitete Bericht enthält im Kapitel 0 die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen zur Evaluierung der im Handlungsziel „Minderung der Hochwasserstände“ für den Zeithorizont 2005 genannten Wasserstandsreduzierung, die sich als Auswirkung der zwischen 1995 und 2005 am Rhein und in seinem Einzugsgebiet realisierten Rückhaltemaßnahmen ergibt. Ebenfalls enthalten ist eine Abschätzung zur Umsetzung der ermittelten Wasserstandssenkungen in Änderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten.

Hochwassergenerese im Rheingebiet

Hochwasser in Fließgewässern können in Sonderfällen aus Flutwellen entstehen, als Folgen des Bruches von Dämmen oder Eisbarrieren. Einengungen der Fließquerschnitte durch Eis, Havarien, Hangrutschungen oder Geschiebeablagerungen können Stauwasserstände erzeugen, die von der Entwicklung der Abflüsse vorübergehend abgekoppelt sind. Üblicherweise haben Hochwasser jedoch ihre Ursachen in starken Niederschlägen (gegebenenfalls in Verbindung mit einer Schneeschmelze) und deren räumlicher und zeitlicher Verteilung. Darüber hinaus sind Regimefaktoren der Einzugsgebiete und der Gewässer von Bedeutung.

Im gesamten Rheingebiet herrschen ganzjährig westliche Winde vor. Mit ihnen überqueren atlantische feuchte Luftmassen aus Südwesten bis Norden Mitteleuropa. Insbesondere beim Auftreten von Westwetterlagen im Winter fallen verbreitet überdurchschnittliche Niederschlagsmengen. Besonders bei Luftströmungen aus Südwesten können vor allem im südwestlichen Bereich des Rheingebietes infolge der staubedingten Niederschläge Hochwasser auftreten. In den Alpen ergeben sich dann in den höheren Lagen dauerhafte Schneedecken.

Der sehr unterschiedliche Wettercharakter von zyklonalen Großwetterlagen lässt im Rheingebiet nur äußerst selten einheitliche Witterungen aufkommen. Eine Folge dieses Sachverhaltes ist beispielsweise die Tatsache, dass sich in der langen Kette hydrologischer Aufzeichnungen seit 1000 nach Christus kein außergewöhnliches Hochwasserereignis findet (KHR, 1995), das gleichzeitig und in vergleichbarer Größe in allen Teileinzugsgebieten des Rheins aufgetreten ist. Verantwortlich dafür sind auch die sehr unterschiedlichen Abflussregimes, die das Rheingebiet prägen.

Im glazialen (von Gletschern dominierten) Regime hängen die Abflüsse von den jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur ab: Minimum im Winter, Maximum im Sommer. Beim nivalen Regime wird während der Wintermonate der Niederschlag als Schnee zurückgehalten und im Frühjahr und Sommer bei der Schneeschmelze wieder abgegeben. Je nach Anteil der Gletscher treten die größten mittleren Tagesabflüsse im alpinen Bereich von Mai bis August auf. Mit zunehmender Größe des Rheineinzugsgebiets gewinnen die Flächen mit pluvialen Regime an Bedeutung, die nicht mehr dem Hochgebirge zuzurechnen sind und auch während der kalten Jahreszeit vom direkten Abfluss aus Niederschlägen beherrscht werden. Dominanz des pluvialen Regimes bedeutet, dass die Mittelwerte des Winters diejenigen des Sommers übersteigen.

Der Pegel Rheinfelden/ Hochrhein spiegelt das Abflussverhalten des Hochgebirges wider. Der Jahresgang dieses Pegels besteht hauptsächlich aus dem sehr ausgeglichenen Ausflussgang aus dem Bodensee sowie der durch die Alpenrandseen beeinflussten Abflussgang der Aare. Die Summe dieser Abflüsse ergibt ein ausgeprägtes Maximum im Sommer, in den Monaten Juni und Juli und niedrige Abflüsse von Oktober bis März. Die Jahresgänge der Mittelgebirgsflüsse zeigen eine von Juni bis Oktober sich hinziehende Periode niedriger Abflüsse. Im November beginnt ein deutlicher Anstieg der Wasserstände. Von Dezember bis März bleiben die Abflüsse auf hohem Niveau.

Die Änderung des Abflussregimes längs des Rheinlaufes ist an den mittleren monatlichen Abflüssen für kennzeichnende Rheinabschnitte (Abbildung 1) ablesbar. Es wird deutlich, zu welchen Jahreszeiten hauptsächlich mit Hochwasser zu rechnen ist: Im Einflussbereich der Alpen im Sommer, weiter stromab im Winter. Die Umstellung des sommerbestimmten Regimes zu demjenigen mit dem Hauptmaximum im Winter vollzieht sich am Mittelrhein. Nähere Betrachtungen des Hochwasserregimes zeigen allerdings, dass dieses in seinem Schwerpunkt schon weiter südlich vom Sommer zum Winter-Halbjahr verschoben wird als das Regime der mittleren Abflüsse. Das Hochwasserregime wird bereits am Oberrhein bei Maxau überwiegend durch die Hochwasser im Winterhalbjahr geprägt.

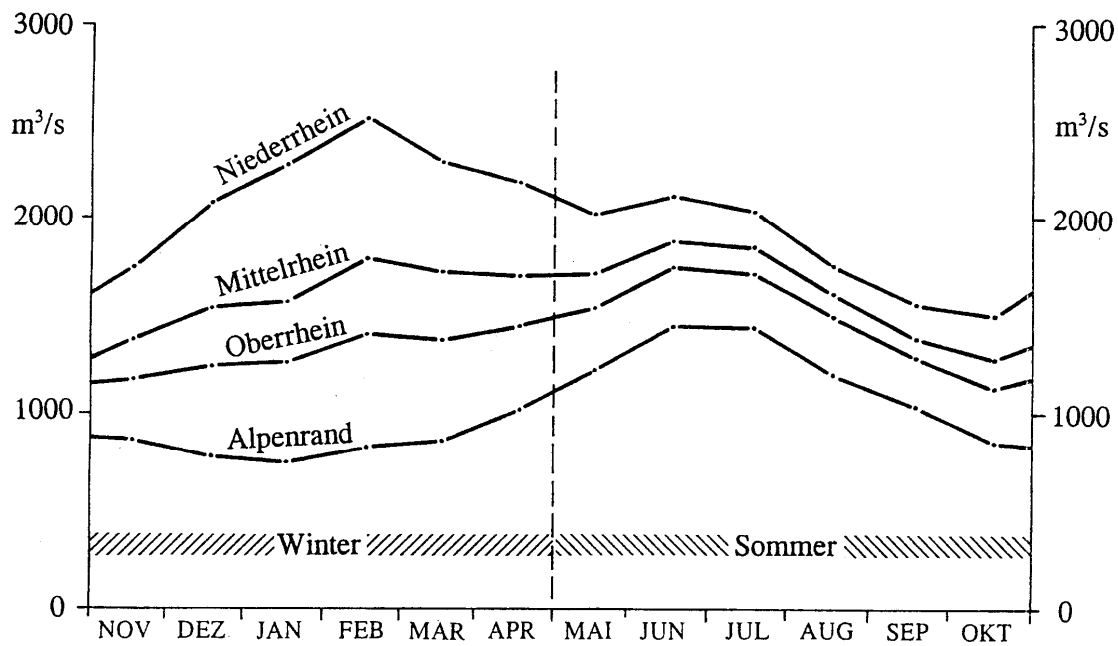


Abbildung 1: Mittlere monatliche Abflüsse (1931/1990) für verschiedene Rheinabschnitte

Das Einzugsgebiet des Rheins ist hydrologisch-großräumig mehrfach unterteilbar:

- das Gebiet von Alpen- und Hochrhein mit den glazial-nivalen Regime-Komponenten des Hochgebirges;
- die drei Gebiete von Neckar, Main und Mosel mit dem pluvialen Regime der Mittelgebirge.

Die unterschiedlichen Gebietsreaktionen und die heterogenen meteorologischen Bedingungen lassen Rheinhochwasser immer regional auftreten, wobei mehrere Regionen in sich ergänzender Weise betroffen sein müssen, um im Rhein weiträumig außergewöhnliche Ereignisse zu produzieren. Dies zeigt die Analyse aktueller Hochwasser wie auch das Studium von Berichten über Hochwasser früherer Jahrzehnte und Jahrhunderte.

Extremhochwasser am Hoahrhein finden üblicherweise von Mai bis Juli statt. Dann liefern die Mittelgebirge keine flächenhaften Hochwasserabflüsse, weshalb solche Sommerwellen in aller Regel nur am südlichen Oberrhein bis zur Neckarmündung außergewöhnlich hoch sind und stromab zumeist ohne Bedeutung bleiben. Eine seltene Ausnahme war das Hochwasser zur Jahreswende 1882/83, das im gesamten Oberrhein ab Basel die höchsten bekannten Abflüsse erreicht und umfangreiche Deichbrüche erzeugt hat. Trotz der daraus entstandenen Entlastungen findet sich dieses Ereignis bis zum Niederrhein unter den zehn größten seit 1870.

Ab dem mittleren Oberrhein und weiter nordwärts ereignen sich Extrem-Hochwasser üblicherweise im Winterhalbjahr, unterschiedlich gespeist von den Einzugsgebieten der Nebengewässer Neckar, Main und Mosel. Dabei erzeugen Neckar und Mosel eher kurze, steile Wellen, während der Main üblicherweise lang gezogene Wellen liefert, mit weniger hohen Scheiteln. Die Wellenausprägungen entsprechen den zugehörigen Niederschlagsfeldern. An Neckar und Mosel bewegen diese sich allgemein synchron mit dem Lauf der jeweiligen Welle, am Main dagegen in entgegengesetzter Richtung, was im einen Fall zu stetiger Wellenaufhöhung, im anderen Fall zu stetiger Wellenverlängerung führt. Insofern können die Scheitel von Neckar und Mosel die Rheinscheitel verfehlen,

wohingegen sich die Scheitel von Main und Rhein in der Regel überlagern. Eine Ausnahme ist gegeben, wenn das Maingebiet massiv von Osten her überregnet wird, etwa durch eine weit nach Westen reichende V b – Wetterlage. In einem solchen Fall sind die Niederschlagsperioden lang anhaltend stationär und intensiv und führen zu Extremhochwasser – allerdings im Sommer (wie z. B. im Jahr 1342 geschehen), wenn Überlagerungen mit Hochwassern von Rhein und Mosel eher unwahrscheinlich sind.

Die Beiträge der einzelnen Teileinzugsgebiete zu den Wellenfüllen sind erwartungsgemäß sehr unterschiedlich. Sie liegen allerdings bei Winterereignissen prozentual oft innerhalb bestimmter Grenzen. So bewegt sich der Anteil der Mosel am Wellenvolumen in Köln zwischen 35 und 50%, der des alpinen Einzugsgebiets ziemlich konstant bei 20%. Dagegen besteht keine systematischer Zusammenhang zwischen Wellenfülle und Scheitelhöhe.

In Tabelle 2 sind die neun in Köln seit 1925 größten Hochwasser mit ihren Scheitelabflüssen sowie den Füllen über den Basisabflüssen zusammengestellt. Aus den Daten lässt sich ableiten, dass die größte Hochwasserfülle in Köln im Jahre 1988 nur zum achtgrößten Scheitelabfluss geführt hat, während das Hochwasser mit dem höchsten Scheitelabfluss (1925/26) füllenbezogen nur Rang 3 erreicht. Die hochwasserrelevante Abflusssumme lag 1988 um 15% über der von 1925/26 und sogar 35% über der von 1995.

Die beschriebenen Verhältnisse haben zur Folge, dass jedes Hochwasser ein Individuum darstellt, was z. B. den Einsatz von Rückhaltemaßnahmen nach einem in jedem Fall geeigneten Schema unmöglich macht bzw. die Wirksamkeit solcher Maßnahmen je nach Hochwassergenese unterschiedlich sein lässt.

Tabelle 2: Die neun größten Scheitelabflüsse am Pegel Köln seit 1926 und die Abflussfüllen dieser Wellen oberhalb der jeweiligen Basisabflüsse*

Ereignis	Scheitelabfluss		Fülle	
	in m ³ /s	Rang	in Mrd. m ³	Rang
1925/26	11100	1	9,4	3
1995	11000	2	8,0	4
1993/94	10800	3	7,4	5
1947/48	9950	4	10,3	2
1983 (5)	9910	5	3,5	9
1970	9740	6	4,2	8
1983 (4)	9690	7	4,2	7
1988	9580	8	10,8	1
1955	9550	9	6,9	6

* Basisabfluss = Teil des Abflusses, der auch ohne Hochwasser abgeflossen wäre

Verwendete Hochwasserereignisse und Zielpegel

Das angewendete Verfahren zum Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Reduzierung der Extremhochwasserstände im Rhein 2005 beruht auf Wellenablaufberechnungen mit zwei mathematischen Abflussmodellen für den Rhein und seine größten Nebengewässer (siehe Kapitel 0). Diese Modelle setzen voraus, dass die Zuflussganglinien an sämtlichen Modellrändern für jedes zu simulierende Hochwasserereignis bekannt sind. Es wurde diesbezüglich auf ein Kollektiv historischer Rheinhochwasser zurückgegriffen, wobei im Rahmen der Ereignisauswahl der in Kapitel 0 dargestellten Gebietsabhängigkeit und Saisonalität der Rheinhochwasserereignisse grundsätzlich Rechnung getragen wurde. Nach Festlegung durch die IKSR-Expertengruppe Hval wurden folgende historische Hochwasserereignisse im Rahmen der Nachweisberechnungen verwendet:

Rheinabschnitt Basel – Nordsee:

- | | | |
|--------------------|------|--|
| ▪ Mai / Juni | 1983 | (Berechnungszeitraum: 22.05.83 – 06.06.83) |
| ▪ März / April | 1988 | (Berechnungszeitraum: 10.03.88 – 10.04.88) |
| ▪ Januar / Februar | 1995 | (Berechnungszeitraum: 21.01.95 – 06.02.95) |

Für den Oberrheinabschnitt Basel – Worms wurde die Untersuchung zusätzlich um zwei für diesen Bereich bedeutende Ereignisse erweitert:

Rheinabschnitt Basel – Worms (zusätzlich):

- | | | |
|--------------|------|--|
| ▪ Mai / Juni | 1978 | (Berechnungszeitraum: 22.05.78 – 04.06.78) |
| ▪ Mai | 1999 | (Berechnungszeitraum: 10.05.99 – 30.05.99) |

Mit den drei bzw. fünf ausgewählten Ereignissen werden unterschiedliche Hochwassergenese im Rheingebiet abgebildet. Während die Ereignisse 1978 und 1999 am Oberrhein zu ausgeprägten Hochwasserereignissen führten, war das Ereignis 1988 für den Mittelrhein von großer Bedeutung. Das Hochwasser 1983 verteilte sich relativ gleichmäßig über das Rheingebiet und hatte keine für einen bestimmten Abschnitt ausgewiesene Besonderheit. Das Ereignis 1995 betraf hauptsächlich den nördlichen Teil des Rheineinzugsgebiets, hier vor allem Mosel und Sieg.

Aufgrund der auf extreme bzw. auf das HQ_{200} ausgerichteten Steuerung und Wirksamkeit der Maßnahmen sind im Rahmen der Nachweisberechnungen Ereignisse zu verwenden, welche möglichst im gesamten Rheineinzugsgebiet extreme Abflüsse liefern. Auch das Handlungsziel 2 des APH (IKSR, 1998) bezieht sich auf Hochwasser im Bereich von Wiederkehrzeiten jenseits von 100 Jahren (zur Begriffsdefinition „Extremes Hochwasser“ siehe Anhang 1). Solche Extrema wurden im Rhein kaum (und nur streckenweise) gemessen und können somit durch die oben genannten Hochwasserereignisse nicht repräsentiert werden. Hinzu kommt, dass der Nachweis 2005 analytisch mittels instationärer, mathematischer Abflusssimulationen durchgeführt werden soll. Die Vorgabe statistisch ermittelter, singulärer Hochwasserscheitelabflüsse (z. B. HQ_{200}) an Pegelstandorten genügt daher nicht, um solche Berechnungen durchzuführen. Es sind kontinuierliche Hochwasserganglinien erforderlich. Vor diesem Hintergrund wurden als Grundlage der Nachweisberechnungen zunächst sog. Modellhochwasser generiert, deren Entwicklungsmethode in Kapitel 2 näher erläutert ist.

Obwohl der Ablauf von Hochwasserwellen entlang eines Gewässers einen kontinuierlichen Prozess darstellt, bedarf es zum Zweck der Ergebnisauswertung einer überschaubaren Zahl diskreter Stützstellen, im Weiteren als Zielpegel bezeichnet.

Die IKSR-Expertengruppe Hval hat folgende, jeweils für einen Rheinabschnitt repräsentative, fünf hydrologische Rheinpegel zur Ergebnisauswertung gewählt:

Oberrhein:

- Pegel Maxau [Rhein-km 362,3] (oberstrom der Neckarmündung)
- Pegel Worms [Rhein-km 443,4] (zwischen Neckar- und Mainmündung)

Mittlerrhein:

- Pegel Kaub [Rhein-km 546,2] (zwischen Main- und Moselmündung)

Niederrhein:

- Pegel Köln [Rhein-km 688,0] (unterstrom der Moselmündung)
- Pegel Lobith [Rhein-km 862,2] (oberstrom der niederländischen Rheinzweige)

Eine zusätzliche Bedeutung besitzen die genannten Zielpiegel im Rahmen der Entwicklung von Modellhochwassern (Kapitel 2).

Vorgehensweise

1. Modellinstrumentarien und Randbedingungen

Im Rahmen des Nachweises der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Reduzierung der Extremhochwasserstände im Rhein 2005 wurden gemäß Empfehlung der 70. Plenarsitzung der IKSR vom 8./9. Juli 2004 (IKSR, 2004) zwei Wellenablaufmodelle als Rückgratmodell eingesetzt.

Das **hydrologische Wellenablaufmodell SYNHP** berechnet den Wellenablauf zwischen den Pegeln Basel (Rhein-km 165) und Worms (Rhein-km 443), auf einer Strecke von ca. 280 km Länge. In diesem Modell werden bedeutende Nebenflüsse, zusätzliche Überschwemmungsflächen, steuerbare Retentionsmaßnahmen und der Sonderbetrieb der Rheinkraftwerke (die so genannten Manöver) berücksichtigt. Die mit SYNHP berechnete Abflussganglinie bei Worms stellt die obere Randbedingung für das hydrodynamische Modell SOBEK (Worms – Niederlande) dar. Der Wirkungsnachweis für die Strecke von Basel bis Worms wurde von der LUBW durchgeführt.

Die Wellenablaufberechnung von Worms bis in die Niederlande wurde mit dem **hydrodynamischen Modell SOBEK** durch die BfG durchgeführt. Im SOBEK-Modell werden der Rhein und wichtige Nebenflüsse, insgesamt mehr als 1500 km Flussstrecke, simuliert. Die Gesamtstrecke teilt sich auf in 419 km Rhein, 378 km Main, 141 km Lahn, 242 km Mosel, 124 km Nederrijn/Lek, 119 km IJssel und 92 km Waal. Die 90 km lange Saar-Strecke, als Zufluss der Mosel im SOBEK-Modell berücksichtigt, wurde nicht mit dem SYNHP-Modell der BfG simuliert. Stattdessen wurden im Mosel-Modell die Abflussganglinien des mündungsnächsten Saarpegels verwendet. Im SOBEK-Modell werden instationäre Effekte von Retentionsmaßnahmen (steuerbar / nicht steuerbar) und Rückstauinflüsse der Nebengewässer (Main, Lahn, Mosel) abgebildet.

Die jeweiligen Modellstrecken sind in Abbildung 2 dargestellt. Sowohl SYNHP als auch SOBEK stellen gute und leistungsfähige Modellinstrumentarien zur Hochwassersimulation im Rhein dar. Signifikante Abweichungen bzw. Unsicherheiten beziehen sich nahezu ausschließlich auf Scheitelwerte (nicht auf die Wellenform) und liegen im Bereich der Messunsicherheit. Entscheidend für die Bewertung der Aussagekraft ist, dass für den Nachweis der Wirksamkeit wasserstandsreduzierender Maßnahmen mit den Modellen jeweils berechnete IST- und SOLL-Zustände verglichen werden. Bei einer solchen Differenzbetrachtung spielen die Unsicherheiten zwischen Simulation und historischer Aufzeichnung grundsätzlich eine untergeordnete Rolle.

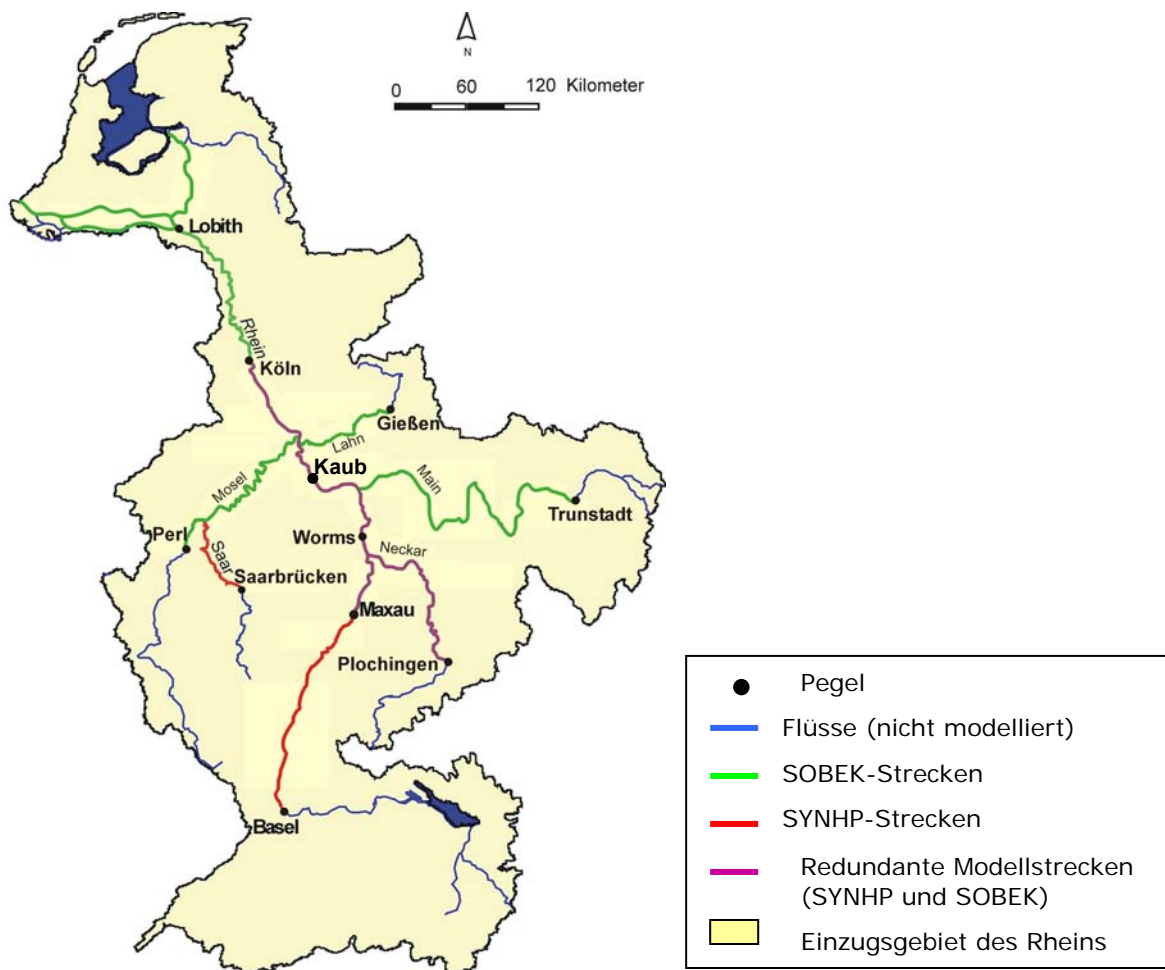


Abbildung 2: Gewässerstrecken des Rückgratmodells im Rheineinzugsgebiet

Das hydrologische Modell SYNHP

Das synoptische Hochwasserablaufmodell SYNHP wurde in der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg zu Beginn der 1980er Jahre für den Oberrhein entwickelt (Homagk, 1995). Später folgte der Aufbau weiterer SYNHP-Modelle für Bundeswasserstraßen in der BfG.

SYNHP ist ein sog. hydrologisches Modell, bei welchem die Bewegungsgleichung durch den Ansatz von quasi-linearen Einzelspeichern ersetzt wird. Die Speicher entsprechen hierbei einzelnen Flussabschnitten. Für jeden Speicher werden im Zuge der Modellerstellung abflussabhängige Volumen-Abfluss-Beziehungen ermittelt. SYNHP benötigt als Input Abflüsse und berechnet daraus zeitschrittweise (synoptisch) Abflüsse beliebiger Gewässerstrecken. Das Speicherkaskaden-Modell SYNHP (Basel – Worms) wird zur Untersuchung von Veränderungen des Hochwasserablaufs aufgrund des Einsatzes von Rückhaltemaßnahmen verwendet. So können zurzeit vorhandene und zukünftige bzw. geplante Retentionsmaßnahmen berücksichtigt werden. Es ist das maßgebliche Modell der Ständigen Kommission für den Ausbau des Oberrheins zur Ermittlung von Steuerreglements, das von der LUBW betrieben wird. Falls die Abflüsse einer Welle über die Randbedingung "Leistungsfähigkeit des Rheins zwischen den Dämmen" hinausgeht, bietet das Modell die Möglichkeit zur Begrenzung des Durchflusses.

Das hydraulische Modell SOBEK

Das eindimensionale, hydrodynamische Abflussmodell SOBEK ist eine Entwicklung von WL | Delft Hydraulics und dem Rijkswaterstaat-RIZA (RWS-RIZA).

Im Modell SOBEK werden die vollständigen Saint-Venant-Gleichungen gelöst. In diesen partiellen Differentialgleichungen zur Ermittlung der Spiegellinie werden Kontinuitätsgleichung und Bewegungsgleichung numerisch gelöst. In SOBEK wird die finite Differenzenmethode nach dem Preissmann-box-Verfahren (WL | Delft Hydraulics, 2001) verwendet. Die Berechnung der Unbekannten erfolgt implizit. Mit SOBEK können Abflüsse, Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten ermittelt werden. Die Berücksichtigung hochwassermindernder Maßnahmen kann über ein internes Retentionsmodul erfolgen. Hierbei werden instationäre Veränderungen des Wellenablaufs, beispielsweise verursacht durch die Füllung eines Retentionspolders, berechnet. Ein Grundwassermodul für die Berücksichtigung von Austauschvorgängen zwischen Fluss- und Grundwasser steht ebenfalls zur Verfügung. Das eingesetzte SOBEK-Modell für die Rheinstrecke Worms – Niederlande wird hier als gekoppeltes Modell des Rheins, der Teilmodelle von Main, Lahn, Mosel und der niederländischen Fließgewässer (Nederrijn, Lek, IJssel und Waal) betrieben.

Randbedingungen des Rückgratmodells

Bei den Randbedingungen wird sowohl für das SYNHP- als auch das SOBEK-Modell zwischen oberen und seitlichen (lateralen) Bedingungen unterschieden, wobei diese für die hier durchzuführenden, instationären Berechnungen als Abflussganglinien zu spezifizieren sind. Als untere Randbedingung muss im SOBEK-Modell eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung (Abflusstafel) vorgegeben werden.

Laterale Randbedingungen stellen Zu- und Abflüsse dar, welche dem Rückgratmodell punktuell und / oder zusätzlich diffus (d. h. als Abflussspende pro lfd. Meter Fließstrecke) seitlich zu- bzw. abgeführt werden. Hierbei handelt es sich um Zuflüsse aus Nebengewässern (Knotengewässer; punktuelle Berücksichtigung), Zuflüsse von Oberflächenwasser (Zwischeneinzugsgebiete; i. d. R. diffuse Einleitung) und den in einem eigenen Berechnungsbaustein berücksichtigten Wasseraustausch mit dem Grundwasser (diffuse Berücksichtigung).

Die Abflussganglinien der Nebenflüsse bzw. Zuflussknoten werden über deren mündungsnächste Pegel (Referenzpegel), sofern hierfür Daten verfügbar sind, ermittelt. Die räumliche Entfernung des Pegels von der Mündung in das Modellgewässer wird, sofern als relevant betrachtet, als Laufzeitverschiebung unter der Annahme einer mittleren Wellengeschwindigkeit von 1,5 – 2,0 m/s berücksichtigt. Zusätzlich kann das vom Referenzpegel nicht erfasste Einzugsgebiet eines Nebengewässers zwischen Pegelstandort und Mündung berücksichtigt werden (z.B. über einen Vergrößerungsfaktor). Weitere Zuflüsse aus nicht über Pegel erfassten Nebengewässern und abflusswirksamen Flächen werden über sog. Zwischeneinzugsgebiete in das Modell eingebracht. Um auch hierfür Abflussganglinien bereitstellen zu können, werden z.B. gemessene Ganglinien charakteristischer, räumlich benachbarter Pegel als Verteilungs- / Form-Grundlage verwendet. Der Austausch mit dem Grundwasser hat sich für den Modellabschnitt zwischen den Pegeln Andernach und Lobith als im Hochwasserfall nicht vernachlässigbar herausgestellt, weshalb dieser als zusätzliche Randbedingung im Rückgratmodell Berücksichtigung findet (interner Grundwasserbaustein von SOBEK).

Die Daten an sämtlichen Zuflussknoten stammen von den gewässerkundlichen Dienststellen der jeweiligen Bundesländern, sowie Frankreichs und der Schweiz. Sie wurden der LUBW und der BfG in unterschiedlichen Dateiformaten und zeitlichen Auflösungen zugeliefert. Für die verwendeten Hochwasserereignisse vor 1995 lagen die Daten teilweise, insbesondere für die kleineren Zuflussgewässer, lediglich als

Tagesmittelwerte vor. Um den Einfluss hochwassermindernder Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf adäquat im Rückgratmodell berücksichtigen zu können, ist eine hohe Auflösung (mindestens stündlich) erforderlich. Aus diesem Grund wurden sämtliche als Tagesmittelwerte vorliegenden Abflussdaten vor der Eingabe in das Modell zu Stundenwerten disaggregiert.

2. Generierung von Modellhochwassern

Die Modellhochwasser waren im Vorlauf der eigentlichen Nachweisberechnungen festzulegen, um eine ausreichend große Zahl extremer Rheinhochwasser synthetisch zu erzeugen. Grundlage der Modellhochwassergenerierung bildeten die in Kapitel 0 genannten historischen Hochwasser. Im Zuge der Generierung wurden für jedes Ereignis sämtliche historischen Abflussganglinien der Nebenflüsse des Rückgratmodells sowie die Abflussganglinien an den oberen Modellrändern durch einen pro Ereignis einheitlichen Faktor vergrößert, so dass der Scheitelabfluss des jeweiligen Hochwassers an einer definierten Gewässerstation (Zielpegel) einen geforderten Scheitelwert erreichte. Das zeitliche Zusammentreffen der verschiedenen Ganglinien bleibt bei dieser iterativen Methode unverändert. Folgende an den vorhandenen Hochwasserschutzzielen orientierte Scheitelwerte galt es an den fünf Zielpegeln zu erreichen:

- Pegel Maxau $Q = 5200 \text{ m}^3/\text{s}$
- Pegel Worms $Q = 6200 \text{ m}^3/\text{s}$
- Pegel Kaub $Q = 8090 \text{ m}^3/\text{s}$
- Pegel Köln $Q = 12900 \text{ m}^3/\text{s}$ (zusätzlich $HQ_{100} = 12000 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Pegel Lobith $Q = 16000 \text{ m}^3/\text{s}$

Um keine hydrologisch und hydraulisch unsinnigen Konstellationen zu erzeugen, waren einige zusätzliche Randbedingungen zu beachten. Unterhalb des Pegels Worms wurden die jeweils kleinsten Abflüsse der jeweiligen Ganglinie als spezifische Grundlast (bzw. Abflussbasis) von der Vergrößerung des Abflusses ausgenommen, um keine unrealistisch großen Abflussfüllen zu erzeugen. Zusätzlich wurden zur sinnvollen Abflussbegrenzung Schwellenwerte festgelegt. Dies bedeutet, dass im Rahmen der Generierung eines Modellhochwassers beim Erreichen dieser maximalen Abflussgrenze die Vergrößerung des historischen Abflusses für das betroffene Gewässer beendet wird (Abbildung 3). Sofern in diesem Iterationsschritt der erforderliche Scheitelwert am Zielpegel noch nicht erreicht ist, werden daraufhin lediglich die Faktoren der Gewässer weiter erhöht, deren maximal für möglich gehaltener Abfluss noch nicht erreicht ist. Bei den übrigen Gewässern verbleibt der Faktor konstant auf dem maximal möglichen Wert.

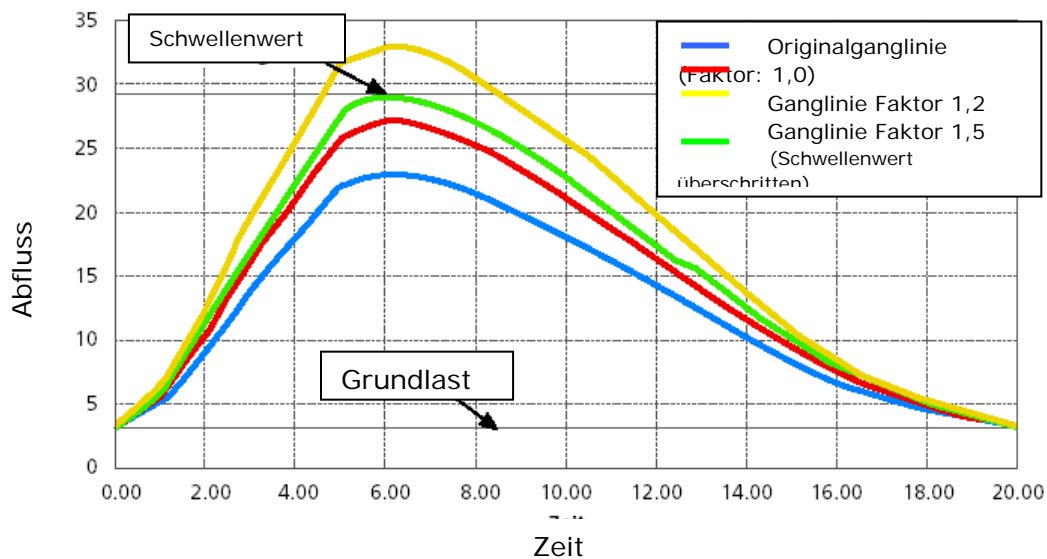


Abbildung 3: Entwicklung von Modellhochwassern

Die Modellhochwasser bzw. Vergrößerungsfaktoren wurden für den Referenzzustand 1995, d.h. unter Berücksichtigung aller gemäß Vorgabe der Expertengruppe Hval zu diesem Zeitpunkt realisierten Rückhaltmaßnahmen ermittelt. Aus diesen Berechnungen hervorgegangene Faktoren gelten unverändert auch für den Zustand 2005.

Für den Bereich der niederländischen Rheinarme wurden die lateralen Zuflüsse der einzelnen Modellhochwasser nicht auf Basis konstanter Vergrößerungsfaktoren ermittelt, sondern es wurde eine vom RIZA entwickelte Berechnungsmethode angewendet. Sie basiert auf der Ganglinie am Pegel Lobith und zielt insbesondere darauf ab, eine hydrologisch / hydraulisch sinnvolle Abflussaufteilung in den Flussarmen zu gewährleisten. Die Methode (van der Veen et al., 2002; Schutte, 2001) umfasst drei wesentliche Schritte:

- Bestimmung der beiden wichtigsten lateralen Zuflüsse (Oude IJssel und Twentekanaal) auf Grundlage des historisch belegten Zusammenhangs mit dem Abfluss bei Lobith,
- Bestimmung der übrigen lateralen Zuflüsse auf Grundlage der Flächen ihrer Teileinzugsgebiete in Relation zur Fläche der Flussgebiete von Oude IJssel und Twentekanaal,
- Abschätzung der Einleitungs- und Entnahmekapazität auf Grundlage des Abflusses bei Lobith für die verschiedenen lateralen Entnahmekapazitäten.

Die auf diese Weise ermittelten Zuflussganglinien der niederländischen Knotengewässer repräsentieren durchschnittliche hydrologische Zustände für den niederländischen Abschnitt des Rheins. Die Berechnungen wurden vom RIZA durchgeführt und nach Übergabe an die BfG für die verschiedenen Modellhochwasser in das Rückgratmodell übernommen.

Die Simulationsberechnungen zur Generierung der Modellhochwasser wurden vollständig, d.h. auch für die SYNHP-Modellstrecke Basel – Worms, durch die BfG vorgenommen. Das verwendete SYNHP-Modell im Zustand 1995 wurde von der LUBW erstellt und dem LUWG Rheinland-Pfalz sowie der BfG übergeben.

3. Maßnahmenkategorien und realisierte Maßnahmen (1995 – 2005) gemäß Aktionsplan Hochwasser

Im Rahmen der Nachweisberechnungen sind folgende Kategorien, sofern deren Wirkungen auf den Hochwasserabfluss im Rhein quantifizierbar sind, zu berücksichtigen:

1. Wasserrückhalt im Rheineinzugsgebiet (Renaturierungen, Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten, Extensivierung der Landwirtschaft, Naturentwicklung und Aufforstungen, Entsiegelungen, technische Hochwasserrückhaltungen)
2. Wasserrückhalt am und im Rhein (Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten, technische Hochwasserrückhaltungen)

Das Rückgratmodell kann unmittelbar nur Maßnahmen der Kategorie 2 berücksichtigen. Die Wirkung der Maßnahmen aus Kategorie 1 müssen zunächst die Länder, z. B. mit Hilfe gegebenenfalls dort vorhandener Einzugsgebietsmodelle, feststellen. Diese entsprechend beeinflussten Ganglinien werden an den Knoten wieder als Randbedingungen dem Rückgratmodell zur Verfügung gestellt. Somit können letztlich beide Kategorien in ihrer Wirksamkeit auf den Hochwasserwellenablauf im Rhein nachgewiesen werden.

Die BfG stellte den Ländern die zunächst unbeeinflussten (Zustand 1995) Ganglinien an den jeweiligen Knoten des Modells zur Verfügung. Die Länder verwendeten diese Ganglinien, um den Einfluss der nicht im Rückgratmodell enthaltenen Gewässer bzw. im Einzugsgebiete gelegene Maßnahmen nachzuweisen. Diese durch Maßnahmen beeinflussten Ganglinien wurden daraufhin nach der Rück-Lieferung durch die Länder wieder in das Rückgratmodell übernommen, um auch die Wirkung dieser Maßnahmen berücksichtigen zu können.

Für den Großteil der Maßnahmenkategorie 1 zuzurechnenden Maßnahmen haben die Auswertungen einer auf Initiative der beteiligten Bundesländer gegründeten Unterarbeitsgruppe ergeben, dass diese keinen wesentlichen Beitrag zur Minderung extremer Rheinhochwasserstände leisten können und ein aufwendiger, modelltechnischer Nachweis weder vertretbar noch erforderlich ist (vgl. Anhang 2). Insbesondere die Maßnahmen zur Renaturierung, Extensivierung der Landwirtschaft, Naturentwicklung / Aufforstung und Entsiegelung bewirken, wie zahlreiche wissenschaftliche Studien (KHR, 2003, IKSR, 2005) belegen, lediglich geringe hochwassermindernde Wirkungen im Nahbereich kleinerer Fließgewässer. Dies stützt auch die Einschätzung im Aktionsplan Hochwasser, der der Maßnahmenkategorie „Wasserrückhalt im Rheineinzugsgebiet“ eine eher geringe Hochwasserstand reduzierende Wirkung hinsichtlich des Rheins zuspricht (IKSR, 1999). Für die beiden Maßnahmenkategorien im Einzugsgebiet „Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten“ und „Technische Rückhaltungen“ wurde im Fall größerer Maßnahmen an bedeutenden Rheinzuläufen ein rechnerischer Nachweis von den Ländern angestrebt. Insgesamt wurden die im folgenden Kapitel 4.3.1 aufgeführten Rückhaltmaßnahmen zwischen 1995 und 2005 rechnerisch berücksichtigt.

Rückhaltmaßnahmen zwischen Basel und Nordsee

Für die Rheinstrecke zwischen Basel und der Nordsee wurden die in Tabelle 3 und Abbildung 4 aufgeführten Retentionsmaßnahmen in den Berechnungen mit dem Rückgratmodell berücksichtigt. Hierbei handelt es sich sowohl um steuerbare Maßnahmen (Polder, „Manöver“ der Kraftwerke- bzw. Verteilung des Abflusses über Rhein- und Seitenkanäle und durch optimierte Wehrsteuerung erreichte Rückhaltung im Stauraum) als auch um ungesteuerte Maßnahmen (Deichrückverlegung, Deichkronenabsenkung), die in Abhängigkeit vom Wasserstand im Rhein zu Füllung und Entleerung von Rückhalteräumen führen.

Tabelle 3: Retentionsmaßnahmen am Rhein zwischen Basel und der Nordsee

Nr	Rhein -km	Bereich	Land	Maßnahme	Maßnahmenart	Einsatzbereites Volumen [Mio. m ³]	
						1995	2005
1	174,0	Oberrhein	F	Rheinseitenkanal	Sonderbetrieb Rheinkraftwerke	45	45
	234 - 274		F	Schlinge 1 bis 3	Sonderbetrieb Rheinkraftwerke		
2	276,0		F	Erstein	Retentionspolder		7,8
3	278,4		D-BW	Altenheim	Retentionspolder	17,6	17,6
4	290,3		D-BW	Kulturwehr Straßburg/Kehl	Kulturwehr	13,0 / 37,0 ₁₎	37,0
5	317,4		D-BW	Söllingen/Greffern	Retentionspolder		12,0
6	330,0		F	Moder	Retentionspolder	5,6	5,6
7	357,5		D-RP	Daxlander Au	Retentionspolder	5,1	5,1
8	379,6		D-RP	Sondernheim	Deichrückverlegung		0,3
9	392,6		D-RP	Flotzgrün	Retentionspolder		5,0
10	403,2		D-RP	Speyer	Deichrückverlegung		0,5
11	409,9		D-RP	Kollerinsel	Retentionspolder		6,1
12	440,2		D-RP	Worms Bürgerweide	Deichrückverlegung		2,0
13	453,3		D-RP	Rheindürkheim	Deichrückverlegung		0,01
14	467,3	D-RP	Eich	Deichrückverlegung		0,41	
15	707,5	Niederrhein	D- NRW	Monheim	Deichrückverlegung		8,0
16	797,5		D- NRW	Orsoy Land	Deichrückverlegung		10,0
17	818,5		D- NRW	Bislicher Insel	Deichrückverlegung	50,0 ²⁾	50,0
18- 23			NL	insg. rund 2 km ² Flussbett verbreiternde Maßnahmen ³⁾	Deichrückverlegun- en, Vorlandvertiefungen		~ 3
SUMME						136 / 160 ¹⁾	215
¹⁾ Kulturwehr Kehl: bis 2002 regulär 13 Mio. m ³ einsetzbar, weitere 24 Mio. m ³ nur in außergewöhnlichen Fällen einsetzbar ²⁾ Die Bislicher Insel war bereits vor Fertigstellung der Maßnahme ein Überflutungsbereich bei Rheinhochwasser ³⁾ Weitere Maßnahmen im Umfang von rund 15 km ² dienen vorrangig der Erhöhung der Abflusskapazität im Rheindelta und haben keine Auswirkungen auf den Zielpegel Lobith; sie werden daher bei der Gesamtsumme des Rückhaltevolumens nicht mitgerechnet.							

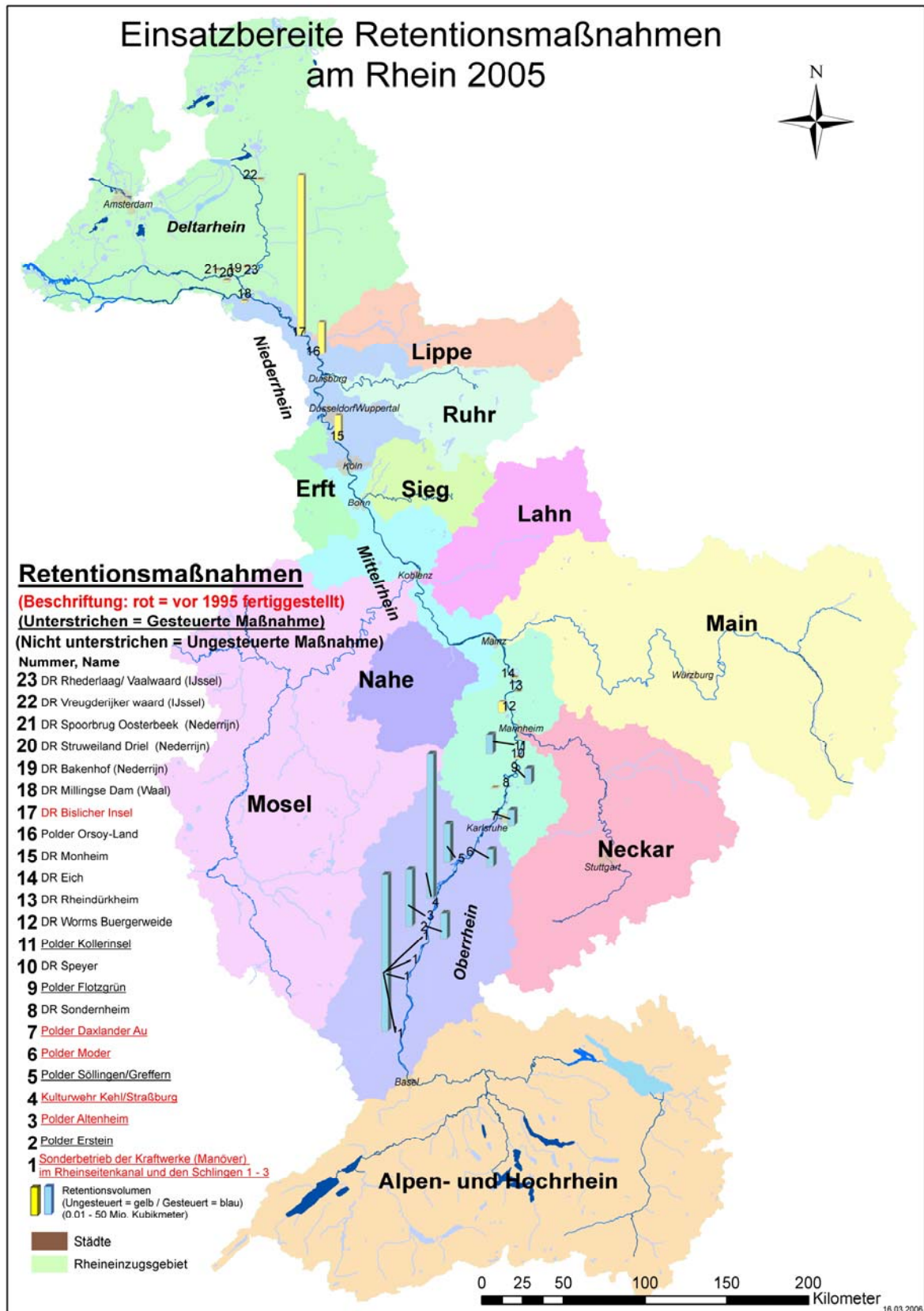


Abbildung 4: Übersicht der bis 2005 realisierten Hochwasserrückhaltemaßnahmen am Rhein

Im Fall von gesteuerten Maßnahmen erfolgte die Steuerung im SYNHP-Modell gemäß dem jeweils gültigen, international vereinbarten Reglement in der Fertigung der Jahre 1995 bzw. 2005 (LUBW, 2005, Homagk, 2000). Die Implementierung der Reglements und Maßnahmen erfolgte durch die LUBW in Abstimmung mit den beteiligten Ländern. Durch sie wurde auch die Auswertung der in Kapitel 0 dargestellten Wasserstands-minderung auf dem Rheinabschnitt von Basel bis Worms vorgenommen. Entsprechend veränderte Ganglinien für den Zustand 2005 wurden am Pegel Worms als obere Randbedingung des SOBEK-Modells übergeben und verwendet.

Maßnahmen am Rhein

Auf dem Rheinabschnitt zwischen dem Pegel Basel und der Nordsee wurden die im Folgenden, teilweise kurz beschriebenen, seit 1995 fertig gestellten Retentionsmaßnahmen in das Rückgratmodell implementiert.

Polder Erstein:

Ende 2004 wurde der auf französischem Gebiet südlich von Straßburg bei Rhein-km 276 liegende Polder Erstein seiner Bestimmung übergeben. Der Polder erstreckt sich über die französischen Gemeinden Erstein, Plobsheim und Nordhouse und ist rund 600 ha groß. Er hat ein Rückhaltevolumen von 7,8 Mio. m³. Die Flutung des Polders erfolgt gesteuert, ökologische Flutungen sind möglich.

Kulturwehr Kehl:

Das in Baden-Württemberg gelegene Kulturwehr Kehl wurde bereits im Jahr 1988 in Betrieb genommen und ist mit einem Rückhaltevolumen von 37,0 Mio. m³ die größte Einzelmaßnahme am Oberrhein zur gesteuerten Hochwasserrückhaltung. Bis zum Jahr 2002 waren im regulären Einsatzfall von diesem Volumen nur 13,0 Mio. m³ für die Hochwasserrückhaltung einsetzbar, die restlichen 24,0 Mio. m³ konnten bis zum Jahr 2002 nach dem damals gültigen deutsch-französischen Reglement ausschließlich im Falle von extremen Hochwasserabflüssen eingesetzt werden. Da die Hval-Modellhochwasser für die Varianten am Pegel Maxau diesen Kriterien entsprechen, wurde bei den Hval-Untersuchungen daher auch im Zustand 1995 ein Rückhaltevolumen von 37,0 Mio. m³ für das Kulturwehr Kehl angesetzt. Die vorgenommenen Berechnungen liegen somit auf der deutlich sicheren Seite. Infolge von baulichen Anpassungsmaßnahmen auf der französischen Seite kann das Kulturwehr Kehl seit dem Jahr 2002 im Einsatzfall mit dem gesamten Rückhaltevolumen eingesetzt werden.

Polder Söllingen/Greffern:

Auf einer Fläche von 580 ha wurde zwischen Rhein-km 317,4 und 329,5 ein Rückhaltevolumen von 12,0 Mio. m³ geschaffen. Die wesentlichen Teilmaßnahmen bestehen aus vier Einlassbauwerken vom Rhein in den Polderraum und aus drei Schöpfwerken. Insgesamt sind rund 100 verschiedene Baumaßnahmen, Brücken, Dämme sowie eine Steuerzentrale für den Betrieb des Polders neu entstanden. Der Polder wurde im November 2005 seiner Bestimmung übergeben. Ein gesteuerter Retentionseinsatz des Polders erfolgt bei großen Hochwasserereignissen, außerdem erfolgen bei erhöhten Rheinabflüssen so genannte "ökologische (regelmäßige) Flutungen".

Deichrückverlegung bei Sondernheim (Rhein-km 379,6):

Im Rahmen der Verstärkung der Rheinhauptdeiche bot sich bei Sondernheim eine Deichrückverlegung an. Der rückwärtige Deich wurde auf einer Länge von ca. 0,6 km errichtet. Der bestehende Deich wurde auf einer Länge von ca. 250 m abgetragen. Der Retentionsraumgewinn beträgt rund 290.000 m³.

Polder Flotzgrün:

Der Rückhalteraum liegt auf einer Insel, die infolge der Tulla´schen Rheinkorrektion entstand. Er liegt südlich von Speyer bei Rhein-km 392. Der Rückhalteraum wurde im September 2002 seiner Bestimmung übergeben. Mit einem Volumen von 5.0 Mio. m³ ist er Bestandteil der vertraglich vereinbarten Maßnahmen zur Wiederherstellung des Hochwasserschutzes vor Ausbau des Oberrheins. Die Flutung des Retentionsraumes erfolgt über zwei von einander unabhängigen Einlassbauwerke im Norden und Süden der Insel. Der Betrieb erfolgt mit dauerhaft geöffneten Bauwerken, so dass der Polder mit der abklingenden Hochwasserwelle wieder entleert wird.

Deichrückverlegung bei Speyer (Rhein-km 403,2):

Im Norden von Speyer erfolgte eine Deichrückverlegung, die an den Damm der Autobahn A 61 anschließt. Der neue Deich hat eine Länge von ca 1.1 km. Die Fläche der Rückverlegung beträgt ca 22 ha mit einem Retentionsraumgewinn von rund 450.000 m³.

Polder Kollerinsel:

Der Rückhalteraum liegt auf einer Insel, die infolge der Tulla´schen Rheinkorrektion entstand. Er liegt südlich von Altrip bei Rhein-km 410. Der Rückhalteraum wurde im Juli 2005 seiner Bestimmung übergeben. Mit einem Volumen von 6,1 Mio. m³ ist er Bestandteil der vertraglich vereinbarten Maßnahmen zur Wiederherstellung des Hochwasserschutzes vor Ausbau des Oberrhein. Die Flutung des Retentionsraumes erfolgt gesteuert über ein doppelzүgiges Einlassbauwerk. Der Betrieb erfolgt mit dauerhaft geöffneten Bauwerken, so dass der Polder mit der abklingenden Hochwasserwelle wieder entleert wird. Die tiefliegenden Teile der Kollerinsel können durch ökologische Flutungen mehrmals im Jahr flach überschwemmt werden.

Deichrückverlegung Worms-Bürgerweide (Rhein-km 440,5):

Im Rahmen der Hochwasserschutzmaßnahmen bei Worms wurde im Süden eine Deichrückverlegung vorgenommen. Der Deich wurde auf einer Länge von rund 1,2 km geöffnet und durch einen ca. 3 km langen rückverlegten Deich ersetzt. Der Retentionsraumgewinn beträgt rund 2 Mio. m³.

Deichanpassungen bei Rheindürkheim (Rhein-km 453,3):

Der Rheinhauptdeich wurde in Ortsbereich Ibersheim über eine Länge von ca. 1,2 km in Richtung Fluss verlegt. Der Retentionsraumverlust (51.000 m³) durch die Deichvorverlegung wird durch den Gewinn von 63.000 m³ durch eine stromaufwärts gelegene 620 m lange Deichrückverlegung aufgehoben und es stellt sich ein Retentionsraumgewinn von ca. 12.000 m³ ein.

Deichkronenabsenkung bei Eich (Rhein-km 467,3):

Die bestehende Rheinhauptdeichkrone wurde auf einer Länge von rund 50 m (im Bereich Rhein-km 467) auf Sommerdeichniveau (ca. 88,10 m + NN) abgetragen. Dadurch erfolgt ein Volumengewinn von 410.000 m³.

Deichanpassung bei Monheim (Rhein-km 707,5):

Im Bereich Monheim (Rhein-km 707,5 – Rhein-km 711,5) wurde der alte Banndeich als Leitdeich mit einer Kronenhöhe von 42,77 m + NN umgebaut. Ab Rhein-km 711,5 – Rhein-km 713,5 wurde der ursprüngliche Banndeich abgetragen. Das Wasser strömt nun im Bereich des abgetragenen Leitdeichs bereits ab einer Höhe von ca. 37,30 m + NN von unten in den 185 ha großen Retentionsraum (ca. 8 Mio. m³) ein. Bei Erreichen eines Wasserstands von 42,77 m + NN bei Rhein-km 708,5 (oberstrom der Maßnahme Monheim) wird als zusätzlicher hydraulischer Prozess der neue Leitdeich zusätzlich über- und damit das komplette Gebiet durchströmt.

Deichrückverlegung Orsoy Land (Rhein-km 797,5):

Im Bereich der Rheinschleife bei Orsoy wurde der bestehende Winterdeich zwischen Rhein-km 797,5 und Rhein-km 803,5 zurückverlegt. Ein Leitdeich mit definierten Ein-/Ausströmbereichen blieb erhalten. Der gewonnene Retentionsraum wird in Abhängigkeit vom Rheinwasserstand gefüllt und entleert.

Maßnahmen in den niederländischen Rheinzweigen:

Im Anschluss an das Hochwasserereignis 1995 wurde der Deltaplan Grote Rivieren (Deltaplan Große Flüsse) mit dem Ziel erstellt, die Deiche zu ertüchtigen und das Schutzniveau anzupassen. Ein Teil der Maßnahmen wurde als Deichverlegung durchgeführt. Nur die Maßnahmen mit dem Ziel das Flussbett zu verbreitern in der Gegend von Lobith sind im Auftrag des RIZA in das SOBEK-Modell der Rheinzweige implementiert (HKV, 2005) und in den Berechnungen berücksichtigt. Bei den implementierten Maßnahmen in den Niederlanden handelt es sich um Deichrückverlegungen, Vorlandvertiefungen und Verbreiterungen des Durchflussprofils. Die Maßnahmen wurden sämtlich in Form von veränderten Querprofilen berücksichtigt.

Maßnahmen im Einzugsgebiet

Im baden-württembergischen Einzugsgebiet des Oberrheins wurden im Zeitraum von 1995 bis 2005 mit dem Rückhaltebecken Mittleres Kinzigtal (RMK) eine Maßnahme fertiggestellt, von der ein, wenn auch geringer, Einfluss auf den Hochwasserscheitel im Rhein erwartet werden kann. Die Analyse des Hochwasserkollektivs (Kapitel 0) zeigte jedoch, dass in keinem Fall ein Kinzighochwasser eingetreten war, das zu einem Einstau des RMK geführt hätte. Seitens des Landes Baden-Württemberg werden daher keine quantitativen Änderungen an den Zuflussganglinien der Knotengewässer des Rückgratmodells aufgrund von Maßnahmen der Kategorie 1 vorgenommen.

Auch von der Schweiz, Frankreich, Rheinland-Pfalz und Hessen wurden im Bereich bis Worms keine hochwassermindernden Maßnahmen in der Fläche gemeldet, die nachweisbaren Einfluss auf den Hochwasserablauf im Rhein ausüben. Die Ganglinien der Knotengewässer im Zustand 1995 sind daher im Bereich oberhalb Worms identisch mit denjenigen des Zustands 2005.

Nahe:

Vom Land Rheinland-Pfalz wurde eine größere Maßnahme an der Nahe (Mündung bei Rhein-km 529,1) gemeldet. Hierbei handelt es sich um die Hochwasserschutzmaßnahme der Stadt Bad Kreuznach (ca. 20 km oberhalb der Mündung in den Rhein gelegen), in deren Zuge zwischen 1995 und 2005 im Wesentlichen hydraulische Umgestaltungen des Naheabflussprofils und Anpassungen von Hochwasserschutzmauern erfolgten (Fertigstellung 2004). Die realisierten Maßnahmen bewirken, dass die Stadt bis zu einem Abfluss von rund 1000 m³/s hochwasserfrei bleibt. Abflüsse, die diesen Schwellenwert übersteigen, fließen jedoch weiterhin in den "Retentionsraum Stadt Bad Kreuznach".

Um die hydraulische Wirkung auf die Hochwasserganglinien der Nahe im Zustand 2005 zu ermitteln, hat das LUWG ein quasi nicht-lineares Speichermodell von Bad Kreuznach bis zum Referenzpegel Grolsheim aufgestellt, in dem das oben genannte Systemverhalten vor und nach Ausbau berücksichtigt wurde. Zur Ermittlung der Naheganglinie an der Mündung wurde der Zustand 1995 vom Pegel Grolsheim rückwärts bis Bad Kreuznach simuliert. Anschließend wurde von Bad Kreuznach mit geänderten Systemparametern wieder bis zum Pegel Grolsheim gerechnet, um die Ganglinien für den Zustand 2005 zu erhalten. Den Berechnungen zufolge bewirkt die Maßnahme „Hochwasserschutz Bad Kreuznach“ im Hinblick auf den Rhein, dass es durch den Verlust an „Retentionsraum“ zwischen 650 m³/s und 1000 m³/s zu einer leichten Wellenbeschleunigung und Abflusserhöhung in der Nahe (< 5 m³/s im Scheitel) kommt.

Abflüsse über 1000 m³/s werden hingegen wieder in geringem Umfang (maximal 3 m³/s im Scheitel) gedämpft.

Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 5 die Wirkungen der Maßnahme Bad Kreuznach anhand der Abflussganglinien am Nahepegel Grolsheim sowie die Differenzganglinie zwischen den beiden Zuständen dargestellt (Modellhochwasservariante Hw83_KB_A).

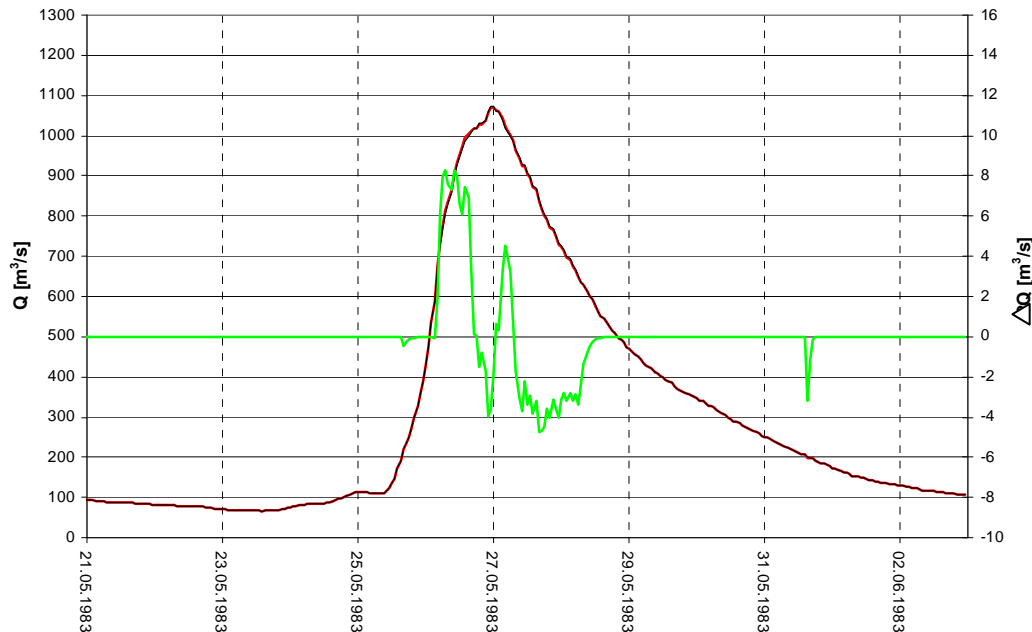


Abbildung 5: Wirkung der Maßnahme Bad Kreuznach anhand der Ganglinien am Nahepegel Grolsheim (schwarz: Zustand 1995, rot: Zustand 2005, grün: Differenzganglinie des Abflusses ; Hw83_KB_A)

Obere Lahn und Kleebach

Die vom Land Hessen gemeldeten Maßnahmen im Einzugsgebiet der oberen Lahn (oberhalb des Pegels Gießen) und am Lahnnebenfluss Kleebach (Mündung ca. 3 km unterstrom des Pegels Gießen) wurden im Rahmen des Lahnprojekts ab 1998 realisiert (Tönsmann, Lang, 2002).

Im Einzugsgebiet des Kleebachs entstand ein Retentionsvolumen von rund 287.000 m³ durch den Bau eines Rückhaltebeckens im Bereich der Ortschaft Allendorf, das im September 2001 fertig gestellt wurde. Es fasst mit einem Einzugsgebiet von 161 km² nahezu das gesamte Einzugsgebiet des Kleebachs (165 km²). Parallel zur Verbesserung der Hochwassersituation wurde der betroffene Gewässerabschnitt renaturiert und ökologisch aufgewertet. An der oberen Lahn wurden die in der Tabelle 4 aufgeführten fünf Maßnahmen zwischen 1995 und 2005 realisiert.

Mit Ausnahme der Maßnahme Nr. 3 (Anlage von Retentionsräumen im Einzugsgebiet der Lumda) sind sämtliche Projekte unmittelbar an die Lahn angebunden. Hierbei handelt es sich insbesondere um die Reaktivierung von Altarmen sowie Deichrückverlegungen, welche die Speicherwirkung des Gewässers vergrößern. Bei der Maßnahme an der Lumda handelt es sich, vergleichbar dem Kleebach, um den Bau von Kleinerückhalten. In der Summe wurden oberhalb des Pegels Gießen etwa 680.000 m³ Rückhaltevolumen im Vergleich zum Zustand 1995 geschaffen.

Tabelle 4: Retentionsmaßnahmen im Einzugsgebiet des Kleebachs und der Lahn oberhalb des Pegels Gießen

Lfd. Nr.	Maßnahmenträger	Beschreibung	Retentionsvolumen
1	Gemeinde Lahntal	Renaturierung der linksseitigen Lahnaue zwischen Sterzhausen und Caldern durch Reaktivierung des Hochflutsystems	200.000 m ³
2	Gemeinde Fronhausen	Anbindung des Lahntarms bei Belnhausen an die Lahn	10.000 m ³
3	Wasserverband Lumda	Anlage von Retentionsräumen im Einzugsgebiet der Lumda	134.000 m ³
4	Stadt Marburg	Rückverlegung der Lahndeiche bei Wehrda	160.000 m ³
5	Gemeinde Fronhausen	Deichrückverlegung und Wiederanbindung des Lahntarms „Schenkenwäldchen“ an das Gewässersystem der Lahn	176.000 m ³
			Σ 680.000 m³

Um die hydraulische Wirksamkeit der genannten Maßnahmen (Fertigstellung in den Jahren 2001 / 2002) am Pegel Gießen bzw. der Kleebachmündung in die Lahn zu evaluieren, wurden für die Modellhochwasser auf Basis des Hochwassers 1995 im Auftrag des HLUG vom Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig mit dem dort vorhandenen Flussgebietsmodell der Lahn (Niederschlag-Abfluss-Modell NAXOS) vergleichende Berechnungen für den Zustand 1995 und 2005 vorgenommen. Die Berechnungen lieferten für die 8 Modellhochwasser 5 unterschiedliche Ganglinienpaare (1995 – 2005), da für einige Modellhochwasser die Kleebach- und Lahnganglinien jeweils identisch waren. Exemplarisch zeigt die Abbildung 6 die Berechnungsergebnisse des Leichtweiss-Instituts für das Modellhochwasser auf Basis des HW 1995, vergrößert auf den Zielpegel Lobith.

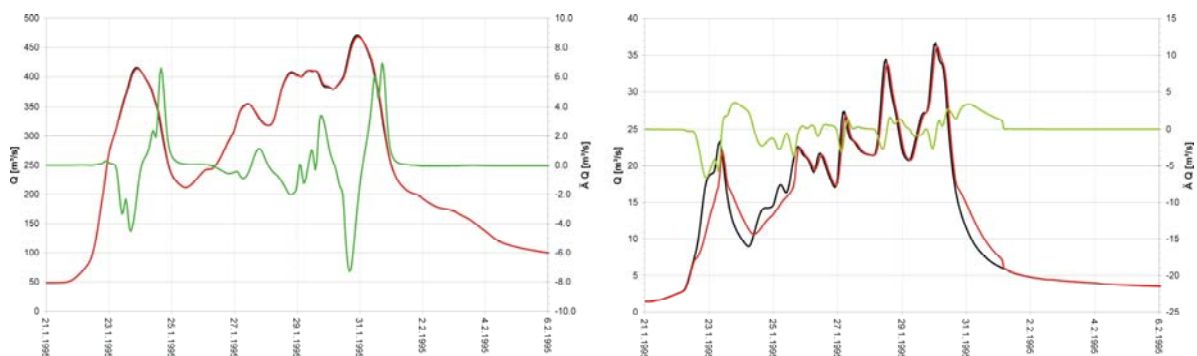


Abbildung 6: Wirkung der Maßnahme an der oberen Lahn (links) und am Kleebach (rechts) (Schwarz: Zustand 1995, Rot: Zustand 2005, Grün: Differenzganglinie des Wasserstandes ; HW95_LOB)

Für die Modellhochwasser auf Basis der Hochwasser 1983 und 1988 konnten in Ermangelung von Niederschlagsdaten vom Leichtweiss-Institut keine Modellberechnungen durchgeführt werden. Hier wurde von der BfG in Abstimmung mit dem HLUG eine Vorgehensweise erarbeitet, um basierend auf den Berechnungsergebnissen des 95er Ereignisses die Maßnahmenwirkungen für die Modell-

Hochwasser 1983 und 1988 vereinfacht abzuschätzen. Diese Vorgehensweise beruht im Wesentlichen auf Analogieschlüssen und Korrelationsbeziehungen hinsichtlich Scheitelabflussminderung, Hochwasserfülle und zeitlicher Verzögerung der Eintrittszeiten der Abflussscheitel.

Von den Ländern Schweiz, Frankreich, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Saarland, Hessen, Bayern, und Nordrhein-Westfalen sowie den Niederlanden wurden keine weiteren als die hier angegebenen hochwassermindernden Maßnahmen in der Fläche mit nachweisbarem Einfluss auf den Hochwasserablauf im Rhein gemeldet, die im Zeitraum 1995 bis 2005 fertiggestellt wurden. Die Ganglinien der Knotengewässer im Zustand 1995 sind bis auf die genannten Ausnahmen daher identisch mit denjenigen des Zustands 2005.

4. Abschätzung der Wirksamkeit von zwischen 1977 und 2005 realisierten wasserstandssenkenden Maßnahmen am Oberrhein

Obwohl der APH hinsichtlich der vier Handlungsziele das Jahr 1995 als Bezugsjahr nennt (IKSR, 1998), ist festzuhalten, dass zwischen 1977 (Beendigung des Oberrheinausbaus, noch ohne Retentionsmaßnahmen) und 1995 bereits hochwassermindernde Maßnahmen am Oberrhein realisiert worden sind. Erstmals wurden Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein im Verlauf des Hochwassers im März 1988 erfolgreich eingesetzt. Bereits 1995 waren drei Viertel des 2005 bis Worms zur Verfügung stehenden Retentionsvolumens einsatzbereit (siehe Tabelle 3). Diese Maßnahmen, welche bereits 1995 im Einsatz waren, bleiben im Rahmen einer Differenzbetrachtung zwischen den Zuständen 1995 und 2005, wie sie in den vorliegenden Untersuchungen vorgenommen wurde, zwangsläufig unberücksichtigt.

Entsprechend dieser nicht zu vernachlässigenden Tatsache wurde anhand ausgewählter Modellhochwasser abgeschätzt, wie groß die Wirkung der bereits vor 1995 realisierten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Minderung extremer Rheinhochwasserstände ist. Die LUBW berechnete hierzu den Zustand 1977 durch das nicht Berücksichtigen bzw. Ausschalten sämtlicher Maßnahmen im SYNHP-Modell Basel – Worms. Der Zustand 1995 im SOBEK-Modell (Worms- Niederlande) kann weitgehend dem Zustand 1977 gleichgesetzt werden, da unterhalb Worms zwischen 1977 und 1995, mit Ausnahme der "Bislicher Insel", keine weiteren Maßnahmen mit deutlichen Auswirkungen fertig gestellt wurden.

Die zwecks Kontinuität weiter zu verwendenden Modellhochwasser können für den Zustand 1977 (keine wasserstandsmindernden Maßnahmen) zu einer Überschreitung der von Hval festgelegten Schwellenwerte führen. Hinsichtlich der Ergebnisinterpretation ist deshalb zu beachten, dass keine vollständig homogenisierten Verhältnisse für den Vergleich zu Grunde gelegt wurden. Allerdings können die genannten Einschränkungen im Rahmen der hier vorgenommenen "Abschätzung" vernachlässigt werden.

Zwischen 1977 und 1995 wurden rund 110 Mio. m³ Rückhaltevolumen am Oberrhein geschaffen, in den 10 Jahren zwischen 1995 und 2005 kamen weitere 34 Mio. m³ Rückhaltevolumen hinzu. Die LUBW hat mit dem SYNHP-Modell Berechnungen für den Oberrheinabschnitt Basel – Worms für den Zustand 1977, d. h. ohne Retentionsmaßnahmen durchgeführt. Ein Vergleich zwischen 1977 und 2005 zeigt, dass die Gesamtwirkung aller bis 2005 realisierten Retentionsmaßnahmen den Hochwasserscheitel am Pegel Maxau um bis zu 61 cm, am Pegel Worms um bis zu 40 cm abmindern kann (siehe Tabelle 5).

Für den Bereich des Mittel- und Niederrheins wurde für 6 Modellhochwasser (Varianten Maxau_A und Worms_A der Hochwasser 1983, 1988, 1995) der Wellenablauf mit dem

SOBEK-Modell berechnet. Die Berechnungen ergeben, dass die zwischen 1977 und 2005 am Oberrhein realisierten Maßnahmen entsprechende Auswirkungen bis zum Niederrhein haben. So werden 2005 maximale Wasserstandsabsenkungen um bis zu 56 cm am Pegel Kaub, bis zu 36 cm am Pegel Köln und bis zu 13 cm am Pegel Lobith gegenüber den Verhältnissen von 1977 erreicht.

Tabelle 5: Scheitelbezogene Auswirkungen der wasserstandsmindernden Maßnahmen im Zustand 2005 gegenüber 1977

Pegel	minimale / maximale Scheitelwasserstandsänderungen [cm] im Zustand 2005 gegenüber dem Zustand 1977 für die untersuchten Hval-Modellhochwasser					
	Um HQ ₁₀₀		um HQ ₂₀₀		um HQ ₁₀₀₀	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Maxau	-25	-61	-49	-56	keine Hval-Variante	
Worms	-30	-40	-23	-40	keine Hval-Variante	
Kaub	-52	-56	-26	-33	keine Hval-Variante	
Köln	-21	-36	-20	-20	keine Hval-Variante	
Lobith	keine Hval-Variante		-13	-13	keine Hval-Variante	

Berechnungsvarianten

Die Nachweisberechnungen zur Evaluierung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Reduzierung der Extremhochwasserstände im Rhein beruhen, wie in Kapitel 2 dargelegt, auf der Verwendung sog. Modellhochwasser. Folgende Berechnungsvarianten wurden durch die IKSR-Expertengruppe Hval festgelegt:

Die Hochwasserereignisse 1983, 1988, 1995 werden über das gesamte Untersuchungsgebiet vom Pegel Basel bis zur Nordsee betrachtet. Dies führt gemäß der beschriebenen Methode zu einer Ereignisschar von 15 Modellhochwassern (3 Ereignisse (1983, 1988, 1995) x 5 Zielpegel (Maxau, Worms, Kaub, Köln, Lobith)). Die Hochwasser sollten darüber hinaus gemäß ihrem historischen Ablauf (d. h. ohne Vergrößerung) Eingang in die Nachweisberechnungen finden (3 zusätzliche Varianten). Um auch für den Mittelrheinabschnitt belastbare Aussagen zu erhalten, wurde beschlossen, für den Zielpegel Köln zusätzlich das HQ₁₀₀ (12000 m³/s) als eine weitere Berechnungsvariante heranzuziehen. Hintergrund ist, dass die Stadt Neuwied seit 1931 mit einem Hochwasserschutz ausgestattet ist, der im Bereich einer Jährlichkeit von 100 Jahren liegt, so dass bei selteneren Ereignissen der dortige Schutz versagen würde. Dies führt zu 3 weiteren Berechnungsvarianten (1 Variante je Ereignis). Des Weiteren wurde beschlossen, grundsätzlich zwei Modellhochwasservarianten zu unterscheiden: Eine Variante A, bei der die Vergrößerung der Zuflüsse lediglich bis zum Zielpegel erfolgt und sämtliche stromabwärtigen Zuflüsse gemäß ihren historischer Ganglinien in das Modell einfließen, und eine Variante B mit einem für sämtliche Modellzuflüsse (auch stromabwärts des Zielpegels) konstanten Vergrößerungsfaktor. Diese Differenzierung entfiel für den Scheitelabfluss HQ₁₀₀ am Pegel Köln (hier interessiert lediglich der oberstrom gelegene Mittelrheinabschnitt) und den untersten Zielpegel Lobith, womit sich die Variantenzahl um 12 (3 Ereignisse x 4 Zielpegel (Maxau, Worms, Kaub, Köln)) erhöhte.

Für den Oberrhein zwischen den Pegeln Basel und Worms wurden zusätzlich die Hochwasserereignisse 1978 und 1999 berücksichtigt. Dies zog analog zu den obigen Ausführungen 6 weitere Berechnungsvarianten nach sich (2 Ereignisse x 2 Zielpegel (Maxau, Worms) + 2 historische Ereignisse). Auch hier wurde, mit Ausnahme des untersten Zielpegels Worms eine Unterscheidung in Variante A und B vorgenommen, was

die Variantenanzahl um 2 (2 Ereignisse x 1 Zielpegel (Maxau)) erhöhte. Insgesamt ergaben sich damit **41 Berechnungsvarianten**. Für jedes dieser Hochwasser wird von der BfG bzw. LUBW der rechnerische Vergleich zwischen dem Referenzzustand 1995 und dem Zustand 2005 erstellt, was **82 Berechnungsläufe** erforderlich machte.

Um diese große Anzahl von Rechenläufen und damit verbundenen Ergebnisse besser handhaben und nachhaltig dokumentieren zu können, wurde die in Abbildung 7 dargestellte Nomenklatur erarbeitet. Diese bezeichnet eindeutig die unterschiedlichen Berechnungsvarianten bzw. Berechnungsläufe.



Abbildung 7: Nomenklatur der Hval-Rechenläufe

Die IKSR-Expertengruppe Hval hat grundsätzlich entschieden, auf die modelltechnische Berücksichtigung der Effekte von Deichüberströmungen im Rahmen der Nachweisberechnungen zu verzichten. Durch die Einhaltung Schwellenwerte auch an den fünf Zielpegeln wird für die hier vorgenommenen Nachweisberechnungen davon ausgegangen, dass auch auf der dazwischen liegenden Strecke der Abfluss zwischen den Deichen (sofern vorhanden) abgeführt werden kann. Im Fall von einsetzendem Deichüberströmen bzw. deutlicher Überschreitung der Schwellenwerte an einem der Zielpegel wurde entschieden, diese Berechnungsvariante nicht zur Auswertung der Wirksamkeit wasserstandsreduzierender Maßnahmen heranzuziehen. Tritt ein solcher Katastrophenfall der Deichüberströmung ein, lassen sich prinzipiell die Retentionseffekte aus dem Deichüberströmen nicht von den planmäßigen, hochwassermindernden Wirkungen separieren. Letzteres war jedoch genau das Ziel der durchgeführten Untersuchungen.

Einen Sonderfall stellt der Pegel Köln dar. Um technisch überhaupt den angestrebten Abfluss von 16000 m³/s am Pegel Lobith (Lammersen, 2004) erreichen zu können, wurde für diese Modellvarianten der tatsächliche Schwellenwert am Pegel Köln von 12900 m³/s theoretisch (hierzu ist als Ausnahme die Randbedingung umgangen worden, den Schwellenwert am Pegel nicht zu überschreiten) auf 15000 m³/s vergrößert. Sofern der Abfluss-Schwellenwert an einzelnen Zielpegeln überschritten wurde, ist dieser (in der Tabelle 7) rot markiert und die Variante wurde nicht weiter zum Wirksamkeitsnachweis herangezogen.

Von einer expliziten Aufschlüsselung der Wirksamkeit der wasserstandsreduzierenden Maßnahmen in die Kategorien „im Rheineinzugsgebiet“ und „am Rhein“, wie sie im APH genannt sind, wurde abgesehen. Zwischen Basel und Worms wurden keinerlei Maßnahmen im Einzugsgebiet, deren Wirkungen rechnerisch nachweisbar wären, von den Ländern gemeldet (Kapitel 3) - Ausnahme ist das Rückhaltebecken Kinzigtal welches jedoch bei den Randbedingungen der Modellhochwasser nicht zum Einsatz kommt. Auch die gemeldeten und in den Modellberechnungen berücksichtigten Maßnahmen an den drei Fließgewässern (Modellknoten) Nahe, Lahn / Pegel Gießen und Kleebach (Kapitel 3) sind hinsichtlich ihrer Wirksamkeit auf den Wasserstand im Rhein als gering einzuschätzen. Tabelle 6 stellt die in Hval vereinbarte, vollständige Matrix der Berechnungsvarianten dar. Hierin sind die einzelnen Rechenläufe der BfG und der LUBW gemäß der festgelegten Nomenklatur aufgeführt.

Tabelle 6: Matrix der 41 Berechnungsvarianten bzw. 82 Berechnungsläufe

	Zielpegel	historisch	Maxau		Worms		Kaub		Köln			Lobith
Hochwasser		keine Vergrößerung	Vergrößerung bis zum Zielpegel (Var. A)	Vergrößerung im Gesamtmodell (Var. B)	Vergrößerung bis zum Zielpegel (Var. A)	Vergrößerung im Gesamtmodell (Var. B)	Vergrößerung bis zum Zielpegel (Var. A)	Vergrößerung im Gesamtmodell (Var. B)	Vergrößerung bis zum Zielpegel (Var. A)	Vergrößerung im Gesamtmodell (Var. B)	Vergrößerung auf HQ ₁₀₀ am Zielpegel	Vergrößerung auf Zielpegel
HW 1983	Zustand 1995	HW83_HIS_Z95	HW83_MAX_Z95_A	HW83_MAX_Z95_B	HW83_WO_Z95_A	HW83_WO_Z95_B	HW83_KB_Z95_A	HW83_KB_Z95_B	HW83_K_Z95_A	HW83_K_Z95_B	HW83_K_Z95_HQ100	HW83_LOB_Z95
	Zustand 2005	HW83_HIS_Z05	HW83_MAX_Z05_A	HW83_MAX_Z05_B	HW83_WO_Z05_A	HW83_WO_Z05_B	HW83_KB_Z05_A	HW83_KB_Z05_B	HW83_K_Z05_A	HW83_K_Z05_B	HW83_K_Z05_HQ100	HW83_LOB_Z05
HW 1988	Zustand 1995	HW88_HIS_Z95	HW88_MAX_Z95_A	HW88_MAX_Z95_B	HW88_WO_Z95_A	HW88_WO_Z95_B	HW88_KB_Z95_A	HW88_KB_Z95_B	HW88_K_Z95_A	HW88_K_Z95_B	HW88_K_Z95_HQ100	HW88_LOB_Z95
	Zustand 2005	HW88_HIS_Z05	HW88_MAX_Z05_A	HW88_MAX_Z05_B	HW88_WO_Z05_A	HW88_WO_Z05_B	HW88_KB_Z05_A	HW88_KB_Z05_B	HW88_K_Z05_A	HW88_K_Z05_B	HW88_K_Z05_HQ100	HW88_LOB_Z05
HW 1995	Zustand 1995	HW95_HIS_Z95	HW95_MAX_Z95_A	HW95_MAX_Z95_B	HW95_WO_Z95_A	HW95_WO_Z95_B	HW95_KB_Z95_A	HW95_KB_Z95_B	HW95_K_Z95_A	HW95_K_Z95_B	HW95_K_Z95_HQ100	HW95_LOB_Z95
	Zustand 2005	HW95_HIS_Z05	HW95_MAX_Z05_A	HW95_MAX_Z05_B	HW95_WO_Z05_A	HW95_WO_Z05_B	HW95_KB_Z05_A	HW95_KB_Z05_B	HW95_K_Z05_A	HW95_K_Z05_B	HW95_K_Z05_HQ100	HW95_LOB_Z05
HW 1978	Zustand 1995	HW78_HIS_Z95	HW78_MAX_Z95_A	HW78_MAX_Z95_B	HW78_WO_Z95	-	-	-	-	-	-	-
	Zustand 2005	HW78_HIS_Z05	HW78_MAX_Z05_A	HW78_MAX_Z05_B	HW78_WO_Z05	-	-	-	-	-	-	-
HW 1999	Zustand 1995	HW99_HIS_Z95	HW99_MAX_Z95_A	HW99_MAX_Z95_B	HW99_WO_Z95	-	-	-	-	-	-	-
	Zustand 2005	HW99_HIS_Z05	HW99_MAX_Z05_A	HW99_MAX_Z05_B	HW99_WO_Z05	-	-	-	-	-	-	-

Berechnungsergebnisse

5. Minderung der Hochwasserabflüsse und Hochwasserstände

Während die Abflüsse für sämtliche Zielpegel unmittelbar den Berechnungsergebnissen der beiden verwendeten mathematischen Abflussmodelle (SYNH, SOBEK) entsprechen, ist dies für die daraus resultierenden Wasserstände nicht durchgängig der Fall. Ursache hierfür ist die differierende Modelltechnik. Hydrologische Modelle, wie das für den Oberrheinabschnitt Basel – Worms verwendete SYNHP-Modell, berechnen grundsätzlich Abflussganglinien, jedoch keine Wasserstände. Berechnete Abflüsse sind daher bei Verwendung dieses Modelltyps in einem zweiten Bearbeitungsschritt anhand von Abflusskurven an Pegeln in Wasserstände umzurechnen. Dies betrifft im Rahmen dieser Untersuchungen die beiden Oberrheinpegel Maxau und Worms und wurde von der LUBW vorgenommen. Für den Pegel Maxau wurde die Abflusskurve 16 verwendet, da diese einen Abflussbereich bis 5500 m³/s abdeckt. Für den Pegel Worms wurde die Abflusskurve von 1991 verwendet, die den erforderlichen Abflussbereich bis 6500 m³/s abdeckt. Für Abflüsse oberhalb von 6500 m³/s wurde die Abflusskurve extrapoliert. (LUBW, 2005). Für die Zielpegel Kaub, Köln und Lobith stammen auch die Angaben zu den Wasserständen aus dem hydrodynamisch-numerischen Modell SOBEK, das im Gegensatz zu den Abflusskurven auch die sog. Hysterese (Wasserstände im anlaufenden Wellenabschnitt fallen bei gleichem Abfluss geringer aus als im ablaufenden Ast) abbildet. Die zwischen 1995 und 2005 realisierten Maßnahmen zur Minderung extremer Rheinhochwasserstände reduzieren die Hochwasserscheitel an den Zielpegeln Maxau, Worms, Kaub, Köln und Lobith. Dabei zeigen sich regional und in Abhängigkeit von der Hochwassergenese (Modellhochwasser bzw. Berechnungsvariante) stark unterschiedliche Wirkungen.

Betragsmäßig größte Wasserstandsänderungen werden, analog zu der räumlichen Verteilung und Charakteristik (steuerbar / nicht steuerbar) der Retentionsvolumina, erwartungsgemäß am Pegel Maxau erreicht und nehmen von dort nach unterstrom in der Regel kontinuierlich ab. Die Scheitel der Modellhochwasser werden bei Maxau um bis zu 423 m³/s bzw. 31 cm verringert. Am Pegel Worms stellen sich Minderungen um bis zu 334 m³/s bzw. 29 cm ein. Im Bereich des Pegels Kaub werden die Scheitel um bis zu 147 m³/s bzw. 12 cm verringert, bei Köln um bis zu 189 m³/s bzw. 11 cm und letztlich bei Lobith ergibt sich die Verringerung zu 171 m³/s bzw. 7 cm. Tabelle 7 macht ebenfalls deutlich, dass nicht ausschließlich eine positive Beeinflussung (Abminderung) von Abfluss und Wasserstand durch die Maßnahmen auftritt, sondern sich auch eine negative (Erhöhung) ergeben kann. Eine Vergrößerung des Abflusses bzw. Wasserstands wird z. B. für den Pegel Kaub ermittelt, wo negative Auswirkungen der Maßnahmen im ungünstigsten Fall einen bis zu 2 cm erhöhten Wasserstand verursachen. Gegenüber dem Zustand 1977 sind jedoch ausschließlich positive Beeinflussungen (Abminderungen) der HW-Scheitel durch die Retentionsmaßnahmen ermittelt worden (Kap. 4.4).

Die Tatsache, dass der Einsatz von Retentionsmaßnahmen auch Wasserstandsaufhöhungen hervorrufen kann, wird exemplarisch an den Simulationsergebnissen des Hochwassers 1995, Variante Kaub_A, dargestellt.

Der Main hat die Hochwasserwelle 1995 im Rhein entscheidend beeinflusst. Am Pegel Worms (oberhalb der Main-Mündung) wurde noch eine Minderung des Scheitelwasserstands um 9 cm (124 m³/s) erreicht und auch die Maßnahmen bei Rheindürkheim und Eich beeinflussen den Scheitel nicht negativ. Das oberhalb Worms zurückgehaltene Wasservolumen fließt zeitlich verzögert ab und erhöht die Abflüsse im abfallenden Ast der Rheinwelle (Wiederentleerung). Der Main prägt dem Rhein einen neuen Hochwasserscheitel auf, der über dem ursprünglich abfallenden, erhöhten Wellenast liegt. Der am Pegel Worms vorhandene positive Effekt ist in Kaub im

ansteigenden Ast der Hochwasserwelle erkennbar, erreicht jedoch nicht den Scheitel. Abbildung 8 zeigt den durch die Überlagerung von Rhein- und Mainwelle entstandenen Hochwasserablauf am Pegel Kaub und die sich hierfür ergebenden maßnahmenbedingten Veränderungen. Weiter stromabwärts des Pegels Kaub liefert der Vergleich der Zustände 1995 und 2005 wieder positivere Effekte im Scheitel (Köln: $-5 \text{ m}^3/\text{s}$, Lobith: $-19 \text{ m}^3/\text{s}$).

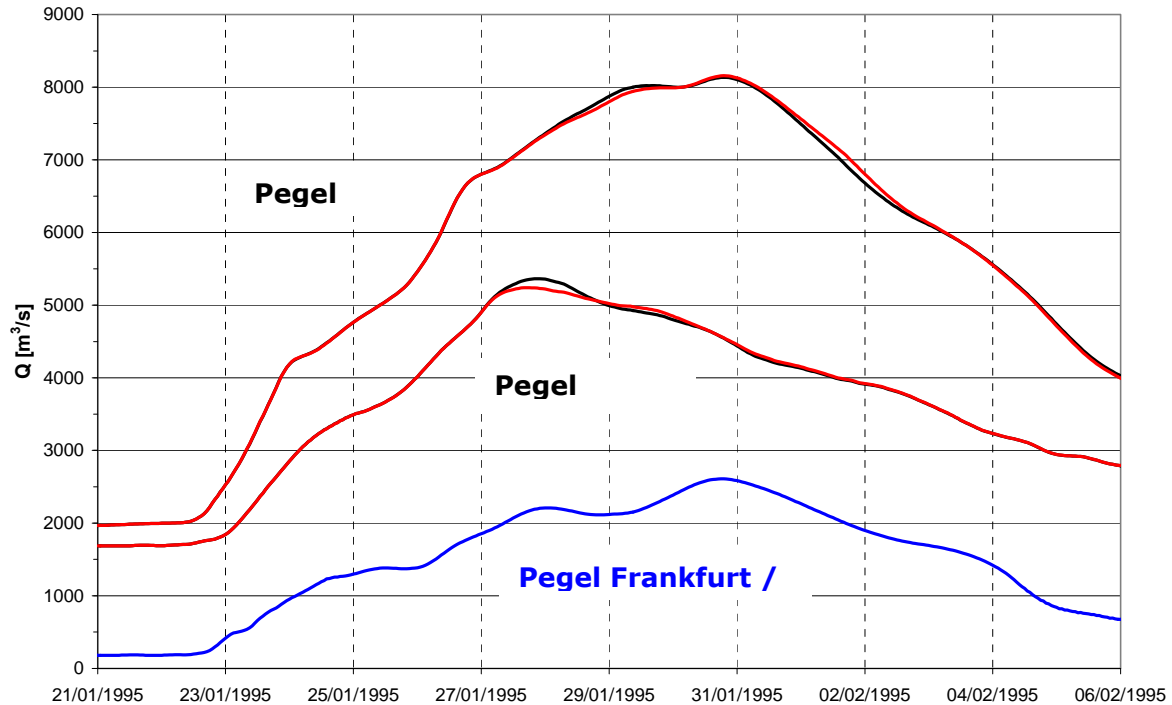


Abbildung 8: Abflussganglinien an den Pegeln Kaub und Worms (Zustand 1995: schwarz; Zustand 2005: rot), sowie am Main-Pegel Frankfurt (blau)

Grundsätzlich sollte nicht nur der Scheitel, sondern die gesamte Welle betrachtet werden. Die im Scheitel positiven, im ablaufenden Ast im weiteren Hochwasserablauf möglicherweise negativen Auswirkungen können anhand der Ganglinien nachvollzogen werden.

Nachfolgend werden in den Abbildungen 9 – 13 getrennt für sämtliche Zielpegel und Berechnungsvarianten die Wirkungen der zwischen 1995 und 2005 umgesetzten Maßnahmen gezeigt. Die Grafiken sind identisch aufgebaut und enthalten für jedes Modellhochwasser Angaben zu drei Parametern:

- dem Scheitelabfluss am Pegel (dunkelrote Säule)
- der Wasserstandsdifferenz im Wellenscheitel (türkise Säule) und
- der maximalen Wasserstandsdifferenz im gesamten Wellenverlauf (dunkelblaue Punkte).

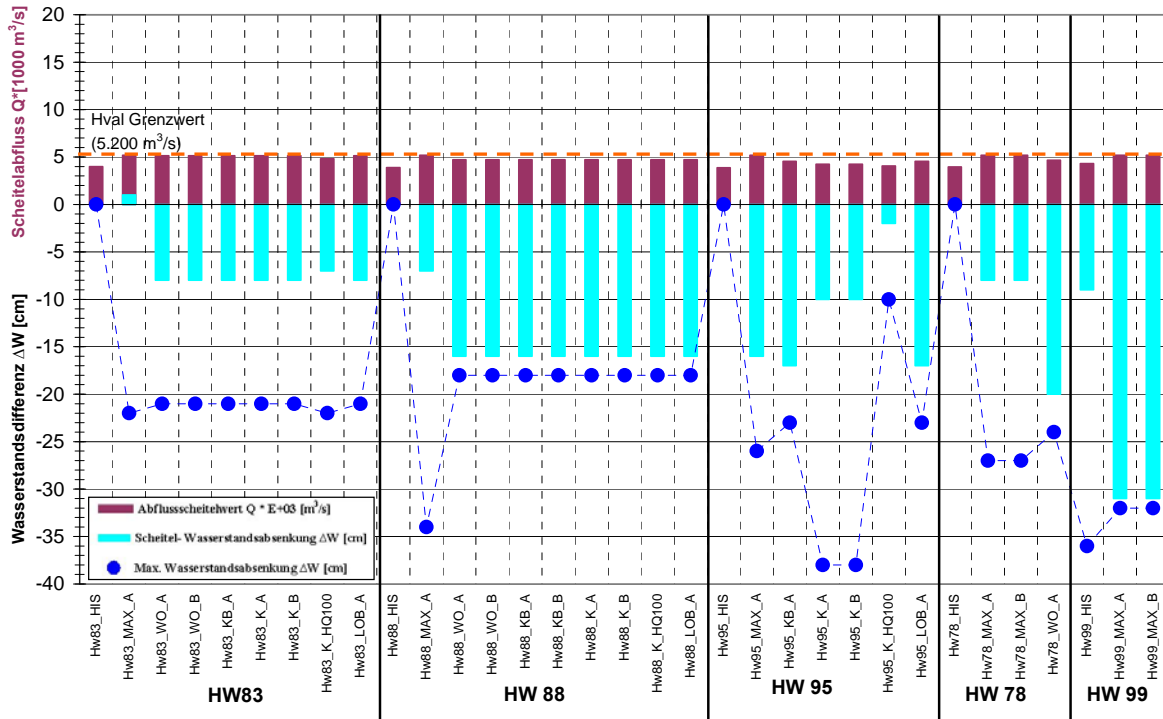


Abbildung 9: Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Maxau

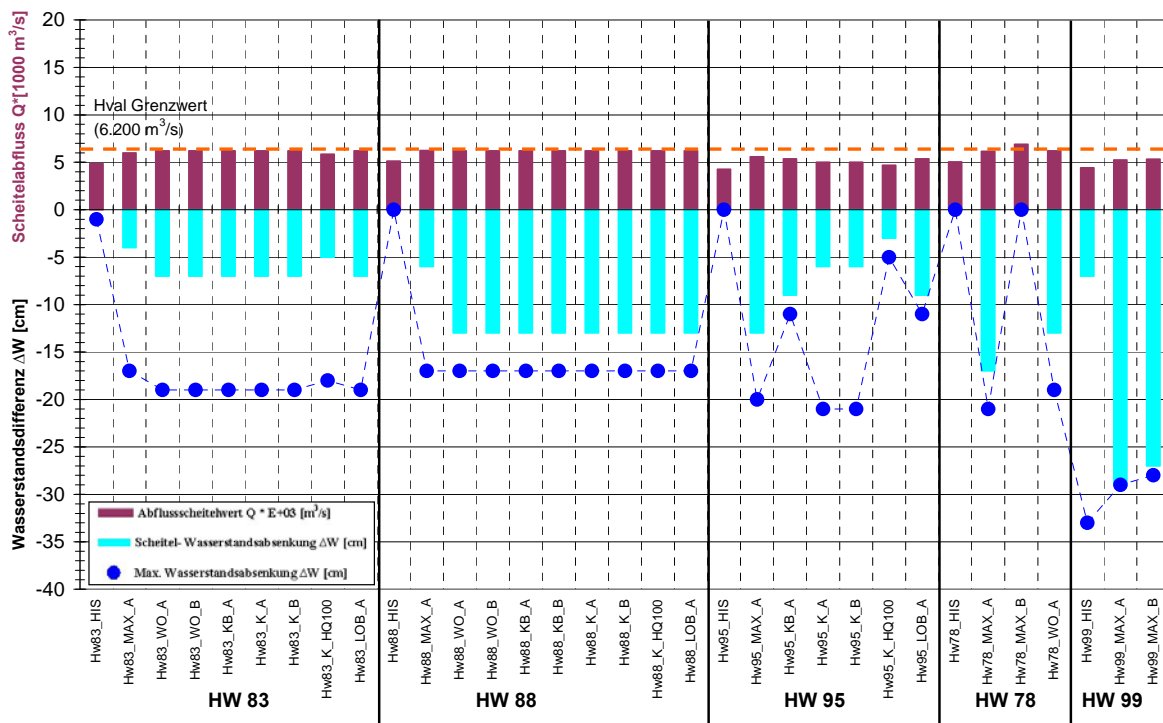


Abbildung 10 Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Worms

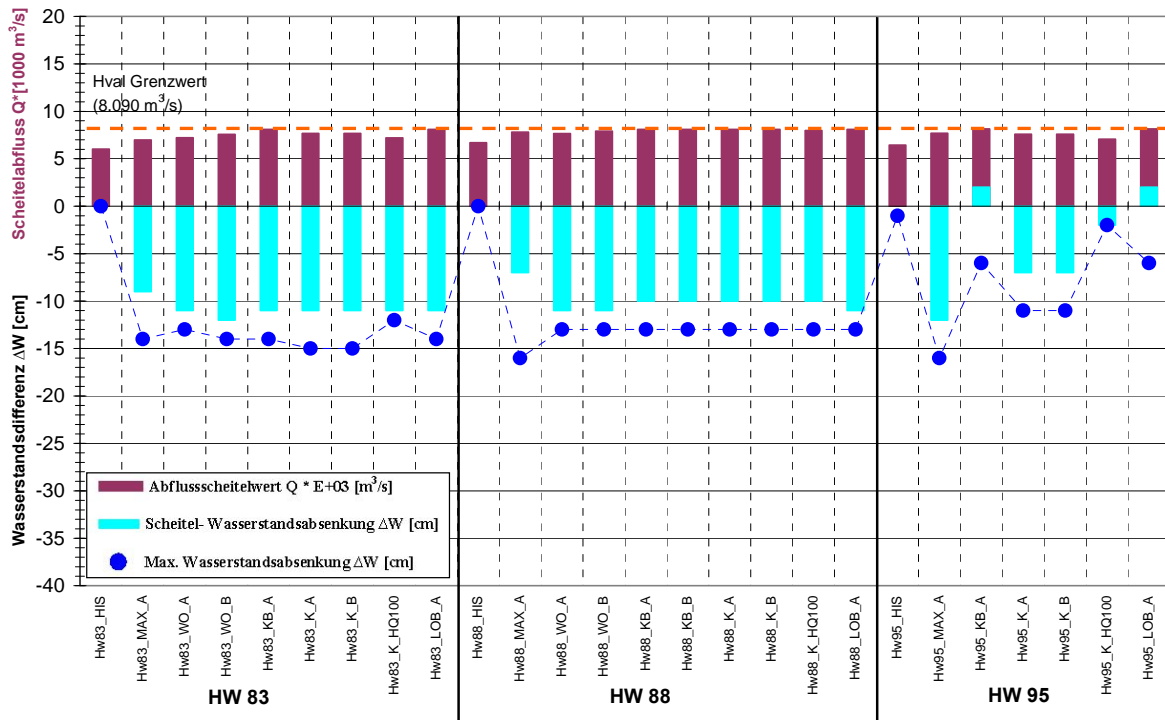


Abbildung 11: Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Kaub

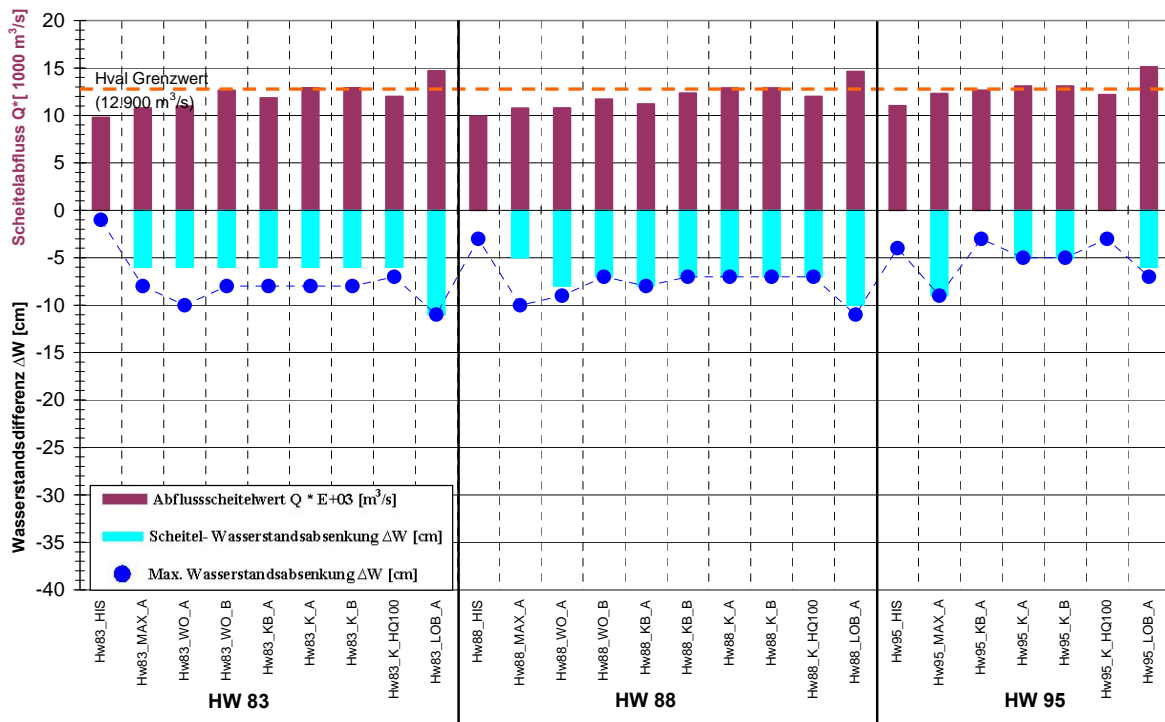


Abbildung 12: Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Köln

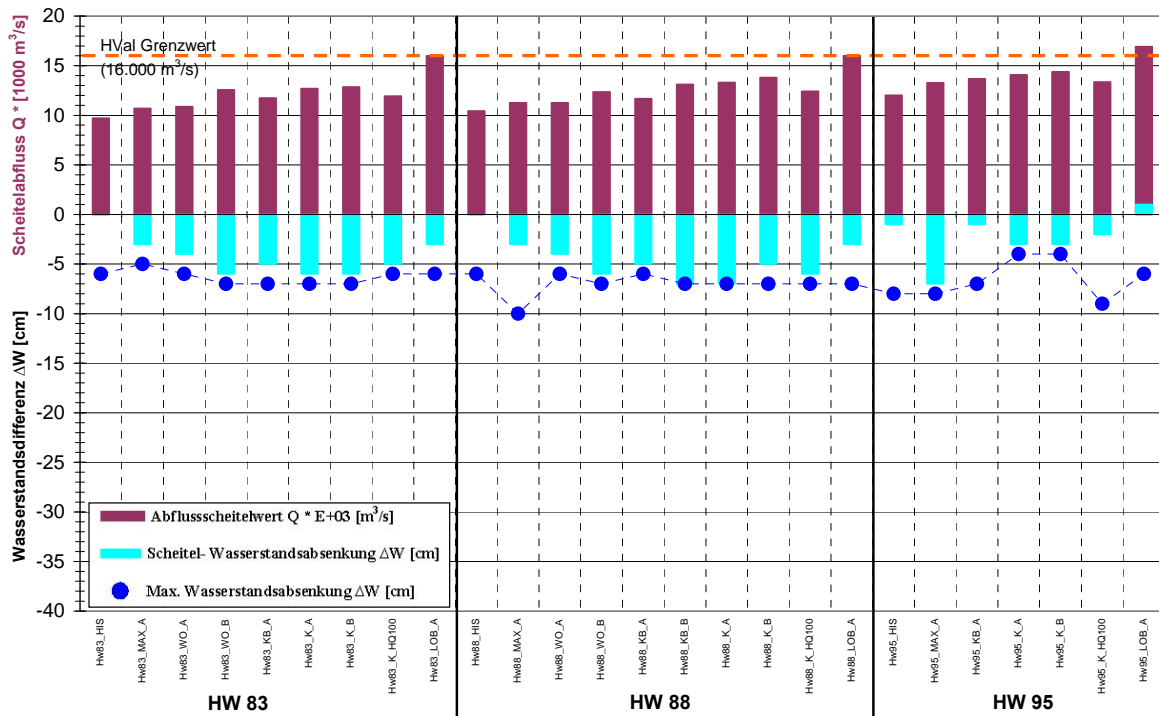


Abbildung 13: Wasserstandsbezogene Auswertung sämtlicher Modellhochwasser am Pegel Lobith

Die Abbildungen 9 bis 13 veranschaulichen zunächst noch einmal die sehr unterschiedliche Wirkungen der Rückhaltemaßnahmen in Abhängigkeit vom Ort, der Hochwassergenese und Abflussgröße. Feststellen lässt sich, dass in Maxau und Worms die größten Wasserstandsabminderungen nicht immer im Scheitel eintreten. An den Pegeln Kaub, Köln und Lobith hingegen kommt die größte Wasserstandsabminderung vermehrt den Scheiteln nahe.

Tabelle 7 enthält die rein zahlenmäßige Übersicht der Berechnungsergebnisse, wobei sich sämtliche Angaben zu Abfluss- und Wasserstandsdifferenzen auf den Scheitelwert der jeweiligen Hochwasserwelle beziehen.

An den für den Oberrhein charakteristischen Pegeln Maxau und Worms stellen sich maximale Wasserstandsminderungen im Hochwasserwellenscheitel von 31 cm bzw. 29 cm ein. Die maximalen Wasserstandsminderungen liegen mit 38 cm bzw. 33 cm noch über der 30 cm – Marke. Unterhalb Worms für den Bereich von Mittel- und Niederrhein ist jedoch festzustellen, dass die bis 2005 realisierten Maßnahmen lediglich Scheitel - Reduzierungen im Bereich von ca. 10 cm bzw. darunter bewirken. Minderungen ergeben sich auch hier noch durch die Rückhaltungen am Oberrhein, wobei die ungesteuerten Maßnahmen am Niederrhein zusätzlich nachweisbar positive Effekte hervorrufen.

Tabelle 7: Übersicht der Berechnungsergebnisse (bezogen auf den Hochwasserscheitel; X* = Aufgrund Schwellenwertüberschreitung nicht verwendet)

Hochwasserereignis	Berechnungsvariante										Berechnungsergebnisse																
	Hist.	Maxau		Worms		Kaub		Köln		Lobith	Maxau [5200 m³/s]			Worms [6200 m³/s]			Kaub [8090 m³/s]			Köln [12900 m³/s]			Lobith [16000 m³/s]				
		-	A	B	A	B	A	B	A	B	HQ100	A	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]
HW 1983	x											4003	0	0	4863	0	0	6010	-4	0	9809	-3	0	9702	-6	0	
		x										5201	7	1	5998	-57	-4	6982	-113	-9	10787	-105	-6	10683	-97	-3	
			x*									5201	7	1	6388	-	-	8091	-	-	14647	-	-	16001	-	-	
				x								5124	-113	-8	6204	-103	-7	7220	-138	-11	11006	-123	-6	10875	-112	-4	
					x							5124	-113	-8	6204	-103	-7	7580	-144	-12	12640	-124	-6	12561	-113	-6	
						x						5124	-113	-8	6204	-103	-7	8099	-140	-11	11870	-129	-6	11726	-115	-5	
							x*					5124	-103	-8	6204	-103	-7	8099	-	-	13559	-	-	13650	-	-	
								x				5124	-113	-8	6204	-103	-7	7677	-143	-11	12905	-127	-6	12707	-116	-6	
HW 1988											x	4814	-96	-7	5856	-80	-5	7188	-132	-11	12004	-117	-6	11929	-101	-5	
	x											5124	-113	-8	6204	-103	-7	8099	-140	-11	14697	-143	-11	16009	-133	-3	
		x										5198	-99	-7	6255	-88	-6	7796	-91	-7	10764	-96	-5	11250	-94	-3	
			x*									5198	-99	-7	6663	-	-	8583	-	-	12605	-	-	13311	-	-	
				x								4706	-208	-16	6201	-201	-13	7652	-139	-11	10781	-146	-8	11252	-124	-4	
					x							4706	-208	-16	6201	-201	-13	7900	-129	-11	11717	-147	-7	12349	-123	-6	
						x						4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-125	-10	11219	-150	-8	11684	-130	-5	
							x					4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-124	-10	12362	-148	-7	13110	-127	-7	
HW 1995												4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-125	-10	12901	-148	-7	13291	-130	-7	
											x	4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-125	-10	12901	-148	-7	13810	-140	-5	
	x											4706	-208	-16	6201	-201	-13	7981	-126	-10	11999	-148	-7	12416	-124	-6	
		x										x	4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-124	-11	14647	-138	-10	16001	-126	-3
													3868	0	0	4279	-1	0	6435	0	0	11018	0	0	12022	0	-1
													5204	-223	-16	5583	-176	-13	7706	-147	-12	12297	-189	-9	13280	-171	-8*
			x*									5203	-223	-16	6250	-219	-14	9217	-	-	16173	-	-	18011	-	-	
				x*								5182	-235	-17	6203	-225	-14	8234	-	-	12812	-	-	13819	-	-	
HW 1978												5182	-235	-17	6203	-225	-14	9175	-	-	16091	-	-	17918	-	-	
												4553	-218	-17	5365	-124	-9	8136	22	2	12669	-5	0	13673	-19	-1	
												4553	-218	-17	5365	-124	-9	8136	-	-	13988	-	-	15389	-	-	
												4252	-120	-10	5006	-61	-6	7599	-87	-7	13110	-109	-5	14086	-92	-3	
												4252	-120	-10	5006	-61	-6	7599	-87	-7	13110	-109	-5	14374	-90	-3	
												4055	-30	-2	4693	-40	-3	7057	-20	-2	12197	-9	0	13368	-15	-2	
												x	4553	-218	-17	5365	-124	-9	8136	22	2	15116	-1	-6	16936	-12	1
		x											3964	0	0	5047	-3	0									
HW 1999												5203	-121	-8	6162	-282	-17										
												5203	-121	-8	6908	-	-										
												4674	-261	-20	6204	-202	-13										
	x										4309	-116	-9	4416	-77	-7											
		x									5203	-423	-31	5229	-334	-29											
			x								5203	-423	-31	5325	-334	-27											
				x*							5680	-	-	6205	-	-											
maximale Reduzierung der Abfluss- / Wasserstandsscheitel												-423	-31	-334	-29	-147	-12	-189	-11	-171	-7						

* Der Wert für den Wasserstand am Pegel Lobith der Berechnungsvariante HW1995 Max_A wird wegen Unplausibilitäten in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

6. Abschätzung der Änderung der Jährlichkeiten an Zielpegeln

Um der IKSR-Expertengruppe Hiri Datengrundlagen zur Berechnung von Schadensrisiken in potentiellen Überflutungsflächen entlang des Rheins bereitzustellen, waren die von Hval ermittelten Wasserstands- und Abflussminderungen in Anhaltswerte für die Änderung von Hochwasserjährlichkeiten an den Zielpegeln umzurechnen.

Für die Aussagen zu den Wahrscheinlichkeitsänderungen bzw. Veränderungen der Jährlichkeiten wurden für die Zielpegel Maxau und Worms die Statistiken für den Ausbauzustand des Oberrheins nach 1977 verwendet, in der die hochwasserverschärfende Wirkung des Oberrheinausbaus zwischen 1955 und 1977 und der damit verbundene Verlust von Retentionsflächen berücksichtigt ist. Für die Erstellung dieser Statistik wurden von der deutsch-französischen Arbeitsgruppe Statistik historische Hochwasser des Oberrheins zwischen 1901 bis 1977 auf den heutigen Ausbauzustand des Oberrheins umgerechnet und zusammen mit Hochwassern im heutigen Ausbauzustand des Rheins der Zeitreihe von 1978 bis 1999 statistisch analysiert (AG Statistik, 2001).

Für die Pegel flussabwärts von Worms verringert sich der hochwasserverschärfende Einfluss des Oberrheinausbaus zunehmend, so dass hier im Rahmen der Untersuchungen die Hochwasserwahrscheinlichkeit vereinfachend aus den historischen Hochwasserscheiteln berechnet wurde, ohne eine Homogenisierung der Messwerte im Hinblick auf den Ausbauzustand des Rheins bzw. auf den Einsatz von Retentionsmaßnahmen vorzunehmen. Hierzu wurden von der BfG für die Pegel Kaub und Köln jeweils eine Extremwertstatistik aus den gemessenen Scheitelabflüssen von 1900 bis 2003 erstellt. Für den Pegel Lobith stellte RWS-RIZA die maßgebliche Statistik zur Verfügung.

In Anlehnung an eine von der IKSR-Expertengruppe Hiri (2005) vorgeschlagene, stark vereinfachende Vorgehensweise wurden auf Basis dieser Hochwasserstatistiken und auf Grundlage der von Hval berechneten Abflussänderungen (Tabelle 7) graphisch die resultierenden Änderungen der Hochwasserwahrscheinlichkeiten für die Hval-Pegel ermittelt. Die Vorgehensweise hierfür ist in Abbildung 14 dargestellt: Zuerst wird die berechnete Abflussminderung für den betrachteten Hochwasserbereich (hier im Beispiel für 100-jährliche Hochwasser an einem fiktiven Pegel) von den Werten der Hochwasserstatistik abgezogen (1., vertikaler Pfeil). Im nächsten Schritt wird die daraus resultierende Jährlichkeitsänderung als Differenz zwischen den Werten der Hochwasserstatistik und dem Endpunkt der abgeminderten Hochwasserwerte graphisch ermittelt (2., horizontale Linie).

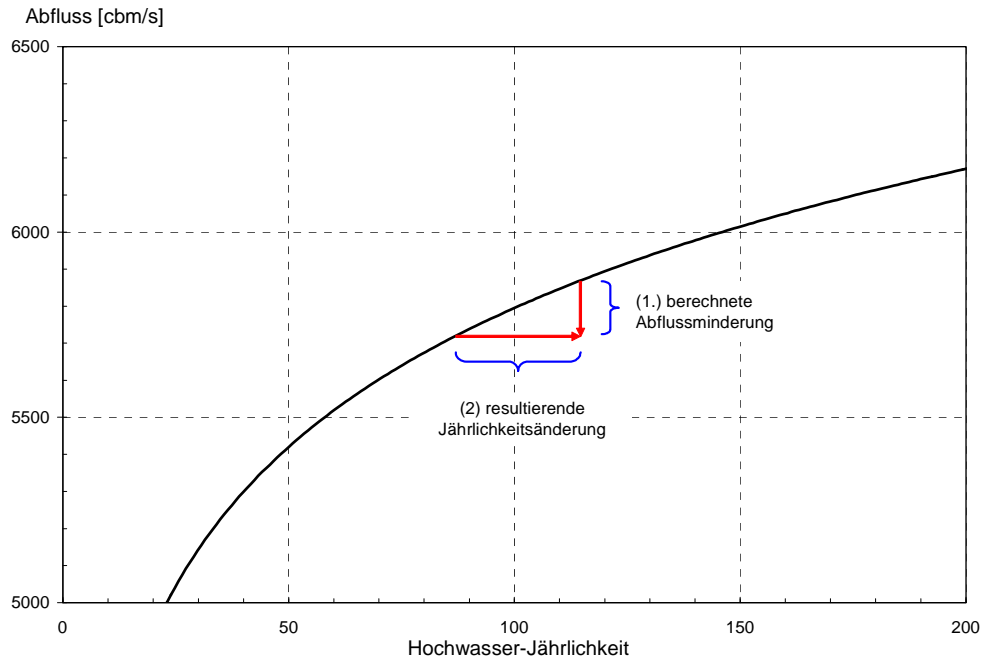


Abbildung 14: Beispiel für die graphische Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsänderung an einem Pegel infolge einer Abflussminderung

Da die berechneten Abflussminderungen je nach Modellhochwasser unterschiedliche Größen annehmen, ist es bei einer Anzahl von nur drei bzw. fünf Modellhochwasser statistisch nicht möglich, auch nur annähernd abgesicherte Aussagen für die mittlere zu erwartende Jährlichkeitsänderung an den Pegel anzugeben. Aus diesem Grunde werden Bandbreiten für mögliche Jährlichkeitsänderungen ermittelt, die sich aus den minimalen bzw. den maximalen Wasserstands- und Abflussminderungen ergaben.

Auch die so erarbeiteten Bandbreiten der Wahrscheinlichkeitsänderungen geben nur einen ersten Überblick. Es ist festzuhalten, dass diese Ergebnisse statistisch wenig belastbar sind. Angezeigt wäre es gewesen, für alle behandelten Pegel Homogenisierungen auf bestimmte Ausbaustände des Rheins einerseits sowie andererseits im Hinblick auf die verschiedenen Realisierungszustände von Retentionsmaßnahmen vorzunehmen. Dies erfordert aber erstens deutlich mehr als nur die betrachteten drei bzw. fünf Hochwasser und zudem waren Homogenisierungen im Hval-Mandat nicht vorgesehen. Die hierzu geeignete Vorgehensweise wird u.a. im Schlussbericht der Hochwasser-Studienkommission für den Rhein (HSK, 1978) bzw. der Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Kaub – Rolandswerth (HSG Kaub – Rolandswerth, 1993) ausgeführt. Für eventuelle spätere Evaluierungen sollten aber entsprechende Vorgehensweisen eingeplant bzw. ausführlich erörtert werden. Die graphischen Ermittlungen ergeben folgende Bandbreiten für die Jährlichkeitsänderungen bei etwa 200-jährlichen Hochwasserscheiteln:

Am Pegel Maxau wird die Auftretenswahrscheinlichkeit eines etwa 200-jährlichen Hochwasserereignisses je nach Hval-Variante um minimal 0 Jahre bis maximal 130 Jahre verändert. Am Pegel Worms beträgt die Veränderung minimal 20 Jahre bis maximal 80 Jahre. Am Pegel Kaub werden minimal 5 und maximal 15 Jahre Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit erreicht. Am Pegel Köln wird die Eintrittswahrscheinlichkeit minimal 0 Jahre bis maximal 20 Jahre verändert. Am Pegel Lobith verändert sich die Eintrittswahrscheinlichkeit eines etwa 200-jährlichen Hochwasserereignisses um minimal

0 bis maximal 20 Jahre. Die Änderungen der Jährlichkeiten für weitere Hochwasserbereiche können der Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 8: Änderung der Jährlichkeit, gegliedert nach HW-Bereiche an den Zielpegeln (scheitelwertbezogen)

Pegel		Q/T-Änderungen (Zustand 2005 - 1995) nach HW-Bereich			
		HQ 10	HQ 100	HQ 200	HQ 1000 / HQ 1250
Maxau	Minima	+/- 0	+ 15	+/- 0	-
	Maxima	+ 2	+ 45	+ 130	-
Worms	Minima	+/- 0	+ 10	+ 20	-
	Maxima	+ 5	+ 30	+ 80	-
Kaub	Minima	+/- 0	+/- 0	- 5	-
	Maxima	+/- 0	+ 15	+ 15	-
Köln	Minima	+/- 0	+/- 0	+/- 0	+/- 0
	Maxima	+/- 0	+ 10	+ 20	+ 35
Lobith	Minima	+/- 0	+/- 0	+/- 0	+/- 0
	Maxima	+/- 0	+ 10	+ 20	+ 120

Die aufgeführten Jährlichkeitsänderungen an den Zielpegeln können in folgender vereinfachter Form auf unterschiedliche Teilstrecken des Rheins übertragen werden:

Bodensee – Basel:	Keine Änderung der Jährlichkeiten.
Basel – Iffezheim:	Keine Änderung der Jährlichkeiten.
Iffezheim – Neckarmündung:	Die Jährlichkeitsänderungen sollten aus den Angaben zum Pegel Maxau abgeleitet werden.
Neckarmündung – Mainmündung:	Die Jährlichkeitsänderungen sollten aus den Angaben zum Pegel Worms abgeleitet werden.
Mainmündung – Moselmündung:	Die Jährlichkeitsänderungen sollten aus den Angaben zum Pegel Kaub abgeleitet werden.
Moselmündung – Ruhrmündung:	Die Jährlichkeitsänderungen sollten aus den Angaben zum Pegel Köln abgeleitet werden.
Ruhrmündung – Nordsee:	Die Jährlichkeitsänderungen sollten aus den Angaben zum Pegel Lobith abgeleitet werden.

Die angegebenen Wahrscheinlichkeitsänderungen aufgrund der zwischen 1995 und 2005 fertiggestellten Maßnahmen im Rheingebiet müssen unter Beachtung nachfolgender Randbedingungen bewertet werden:

- Eine statistische Aussage, welche als Grundgesamtheit 3 bzw. 5 historische und 26 abgeleitete Ereignisse beinhaltet, wird aufgrund statistischer Gesetze keine allgemein gültige Aussage über Jährlichkeiten im Bereich 200 leisten können.
- Die Änderungen basieren trotz ihrer Ermittlung unter Beachtung von historischen Ereignissen und Genesen auf *Modell*/hochwassern. Die Extremwertstatistik im gebräuchlichen Sinne bezieht sich ausschließlich auf historische und ggf. homogenisierte Pegelaufzeichnungen. Insofern können und sollen die in der Untersuchung abgeschätzten Jährlichkeitsänderungen nicht zu einer Änderung vorhandener Extremwertstatistiken verwendet werden.

Literatur

AG Statistik, 2001:

Ausschuss der Ständigen Kommission, AG Manöver, Unterarbeitsgruppe Statistik: Hochwasserabflüsse ausgewählter Jährlichkeiten an den Rheinpegeln Maxau und Worms, ermittelt aus Scheitelabflüssen der Winterhalbjahre 1901 bis 1999, homogenisiert auf den Gerinnezustand des Rheins „1977 ohne Retention“. Mainz, 2001.

HKV, 2005:

SOBEK-model evaluatie actieplan Rijn – Onderzoek effect van zes uiterwaardprojecten, 2005

Homagk, 1995:

Simulation des Hochwassergeschehens am Oberrhein. Wasserbauminteilungen der TU Darmstadt Nr. 40, 1995

Homagk, 2000:

Das integrierte Rheinprogramm in Baden-Württemberg und die Vor- und Nachteile von gesteuerter Hochwasserrückhaltung. 3. Internationales Rheinsymposium Köln, IKSR, Hochwassernotgemeinschaft e.V. und Stadt Köln, 15.-17. Juni 2000.

HSK, 1978:

Schlussbericht der Hochwasser-Studienkommission für den Rhein / Rapport Final de Commission d' Etude des Crues du Rhin, 1978.

HSG Kaub-Rolandswerth, 1993:

Der Einfluß des Oberrheinausbaus und der am Oberrhein vorgesehenen Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasser am Mittelrhein von Kaub bis Köln – Auswirkungen der Rückhaltmaßnahmen am Oberrhein nach dem deutsch-französischen Vertrag von 1982

IKSR, 1998:

Aktionsplan Hochwasser. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, 1998

IKSR, 1999:

Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, 1999

IKSR, 2001:

Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser bis 2000. Kommission zum Schutz des Rheins, 2001

IKSR, 2004:

Empfehlung zu den Nachweisinstrumenten für die Wirksamkeit der Maßnahmen zur Reduzierung der Extremhochwasserstände. IKSR-Bericht Nr. 145, 2004

IKSR, 2005

Wirkung der von 1995 bis 2005 umgesetzten Maßnahmen der Kategorie 1 „Wasserrückhalt im Einzugsgebiet“, Hval 17-05, 2005

- KHR, 1995:
Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. Bis heute anhand historischer Ereignisse – Bericht Nr. II-9 der KHR, 1995
- KHR, 2003:
Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet – Bericht Nr. II-18 der KHR, 2003
- Lammersen, 2004:
Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Abschlussbericht, 2004
- LUBW, 2005:
Untersuchungen zur Minderung der Hochwasserstände im Oberrhein zwischen Iffezheim und Worms durch die zwischen 1995 und 2005 zusätzlich geschaffenen Retentionsmaßnahmen. Hval 25-05, 2005
- Schutte, 2001:
RIJNLAT, Preprocessing ten behoeve van SOBEK. RIZA-Arbeitsdokument 2001.106.X, 2001
- Tönsmann, Lang, 2002:
Handbuch Vorbeugender Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der hessischen Lahn, Kasseler Wasserbau-Forschungs-berichte und –materialien, 2002
- van der Veen et al., 2002:
Bouw en calibratie SOBEK-rijn: Version 2000.1 t/m 2000.3. RIZA-Bericht 2002.039, 2002
- WL | Delft Hydraulics, 2001:
SOBEK River/Estuary, Technical Reference Manual, 2001

Glossar

Abflusskurve

Bezugskurve zwischen den Wasserständen und den zugehörigen Abflüssen bzw. Durchflüssen für einen bestimmten Gewässerquerschnitt (erstellt üblicherweise für Pegel), auch als W-Q-Beziehung / W-Q-Kurve bezeichnet. Die Abflusskurve basiert auf periodischen Abflussmessungen bei unterschiedlichen Abflusszuständen.

Abflussregime

Charakteristischer Gang des Abflusses eines Gewässers, bedingt durch die maßgebenden Regimefaktoren (klimatische Gegebenheiten und charakteristische Gebietsmerkmale des Einzugsgebiets)

Extremhochwasser

gemäß Definition der IKSR-Expertengruppe Hval ist für den Rhein ein *Hochwasser*, dessen Scheitelabfluss das HQ_{100} (s. *Jährlichkeit*) mindestens um etwa 10 % bis 30 % überschreitet, als extrem zu bezeichnen.

Hochwasser

Zustand in einem oberirdischen Gewässer, bei dem der Wasserstand oder Durchfluss einen bestimmten Wert (Schwellenwert) erreicht oder überschritten hat.

Hydraulisches Modell

mathematisches Abflussmodell, das auf den hydrodynamischen Grundgleichungen (Massenbilanz, Impulsbilanz) basiert und diese mit Hilfe numerischer Lösungsverfahren löst, daher auch als hydrodynamisch-numerisches Modell bezeichnet. Auf Grund der weitergehenden mathematischen Beschreibung besitzt ein hydraulisches Modell einen stärker konzeptionellen Charakter als ein *hydrologisches Modell*.

Hydrologisches Modell

mathematisches Abflussmodell, in dessen mathematischer Beschreibung die Impulsgleichung vernachlässigt wird. Stattdessen wird neben der Massenbilanz eine vereinfachte Volumen-Abfluss-Beziehung für Gewässerabschnitte verwendet.

Hydrologischer Pegel

Einrichtung zum Messen des Wasserstands oberirdischer Gewässer. Daten hydrologischer Pegel werden einer gewässerkundlichen Statistik unterzogen und besitzen für die hydrologische Charakterisierung des jeweiligen Gewässers eine signifikante Bedeutung.

Jährlichkeit

mittlere Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert entweder einmal erreicht oder überschreitet bzw. einmal erreicht oder unterschreitet. Die *Jährlichkeit* wird auch als Wiederholungszeitspanne oder Wiederkehrintervall bezeichnet.

Knotengewässer

Zuflussgewässer der im *Rückgratmodell der IKSR* modellierten Gewässer. An der Mündung dieser lateralen Zuflüsse (Modellknoten) können mit regionalen Modellen berechnete Abflussveränderungen infolge dezentraler, wasserstandsmindernder Maßnahmen in das Rückgratmodell importiert und hinsichtlich ihrer großräumigen Wirksamkeit auf die Rheinwasserstände bewertet werden.

Mathematisches Abflussmodell

vereinfachendes, aber die wesentlichen Merkmale bewahrendes Abbild eines realen Systems und der in diesem ablaufenden Prozesse (Abflussverhalten in offenen Gewässern) auf der Basis mathematischer Gleichungen. Mathematische Modelle lassen sich weitergehend differenzieren basierend auf der Art der Lösungsverfahren, der Berücksichtigung des zeitlichen Systemverhaltens etc.

Modellhochwasser

synthetisch generierte *Hochwasser*, deren Scheitelabflüsse in der Regel extremen Jährlichkeiten entsprechen. Modellhochwasser bieten die Möglichkeit, auf der Basis von Simulationsberechnungen mit mathematischen Abflussmodellen z. B. die Wirkung von Ausbau- und / oder Retentionsmaßnahmen im Bereich bis dato nicht gemessener Abflussverhältnisse abzuschätzen.

Rückgratmodell für den Rhein

mathematisches Abflussmodell des Rheins und seiner wichtigsten Nebengewässer (Neckar, Main, Mosel, Saar, Lahn) zwischen dem Pegel Basel und der Nordsee mit dessen Hilfe die Erreichung des Handlungsziels 2, Aktionsplan Hochwasser für das Jahr 2005 evaluiert wird. Es setzt sich aus den beiden Modellsystemen SYNHP (hydrologisches *Modell*; Basel – Worms) und SOBEK (*hydraulisches Modell*, Worms – Nordsee) zusammen und wird derzeit bei der LUBW (SYNHP) und der BfG und RIZA (SOBEK) vorgehalten und betrieben.

Rückhaltmaßnahmen

künstliche Maßnahme oder natürliche Gegebenheit zur Abflusshemmung und Abflussverzögerung; unterschieden werden kann in:

- Überströmung bestehender Sommerdeiche (ungesteuerter Rückhalt)
- Rückverlegung / Beseitigung bestehender Deiche (ungesteuerter Rückhalt)
- Umwandlung von Bann- in Sommerdeiche und deren Überströmung (ungesteuerter Rückhalt)
- Landnutzungsänderung, Gewässerrenaturierung, Versickerungen (ungesteuerter Rückhalt)
- Polder (je nach Ausgestaltung des Einlassbauwerks ungesteuerter oder gesteuerter Rückhalt)
- Hochwasserrückhaltebecken, Stauseen (gesteuerter Rückhalt)
- Flusswehre, z. B. Kulturwehr Kehl/Straßburg (gesteuerter Rückhalt)
- Steuerung des Durchflusses in Seitenkanälen, z. B. Manöver / Sonderbetrieb der Rheinkraftwerke (gesteuerter Rückhalt)

Zielpegel

ausgewählte Pegelstandorte, die für definierte Rheinabschnitte repräsentativ sind. Sie dienen der detaillierten Auswertung und Untersuchung der Abfluss- und Wasserstandsreduzierung im Rahmen der Evaluierung des Handlungsziels 2 gemäß APH der IKSR sowie der Generierung extremer *Modellhochwasser* in sofern, als dass diese jeweils auf einen Zielpegel hin entwickelt werden. Dabei wird ein historisches Hochwasser so lange vergrößert, bis an dem zugehörigen Zielpegel ein definierter Scheitelabfluss (z.B. HQ₂₀₀) erreicht wird.

Zuflussknoten

auch Modellknoten; siehe Knotengewässer

Zwischeneinzugsgebiet

Fläche, deren Abfluss nicht unmittelbar durch einen Pegel erfasst wird. Es kann in *mathematischen Modellen* berücksichtigt werden. Die Abflusscharakteristik wird hierbei im Regelfall durch Übertragung eines örtlich benachbarten, charakteristischen Pegels bestimmt. Der Zufluss erfolgt hierbei zumeist diffus, d.h. pro laufenden Meter Flussabschnitt.

Teile der Definitionen sind den folgenden Veröffentlichungen entnommen:

- DIN: DIN-Taschenbuch 211 – Wasserwesen, Begriffe, 3. Auflage, 1996
- DVWK: DVWK-Schriften 127 – Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, 1999
- Patt, H.: Hochwasserhandbuch – Auswirkungen und Schutz, 2001

Anhang 1: Festlegung des Begriffs "Extremes Hochwasser" im Zusammenhang mit den Wirkungen der Maßnahmen des APH (entnommen aus: Dokument Hval 15-05d rev.30.05.05)

Einleitung und Anlass

Die AG H hat Hval in ihrer Sitzung vom 25.02.05 gebeten, den Begriff "Extremes Hochwasser" im Zusammenhang mit den Wirkungen der APH-Maßnahmen zu präzisieren.

Das auf die Umsetzung der Maßnahmen bis 2005 bezogene 2. APH-Handlungsziel lautet:

- **Minderung der Hochwasserstände** – Minderung der Extremhochwasserstände unterhalb des staugeregelten Bereichs um bis zu 30 cm bis zum Jahr 2005.

In der dieser Aussage zugrunde liegenden „Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins“ (IKSR 1999) ist im 1. Kapitel ausgeführt:

„Eine kumulative Berücksichtigung aller hier genannten Möglichkeiten führt nach derzeitigem Kenntnisstand unter Beachtung aller Randbedingungen sowie unter der Annahme politischer Durchsetzbarkeit auf mittlere Reduktionen sehr extremer Wasserstände im gesamten Rhein in der Größenordnung von:

- **80 cm am Oberrhein**
- **100 cm ab der Mainmündung bis Lobith (z.B. in Köln 12 m entspricht HQ280 statt 13 m am Pegel entspricht HQ₁₀₀₀).**“

Die Erläuterung im zweiten Anstrich gibt einen Hinweis auf die seinerzeit angenommene statistische Einordnung von Extremhochwasserständen.

Präzisierung des Begriffes „Extremes Hochwasser“

Aufgrund der heute zur Verfügung stehenden Zeitreihen der Pegelaufzeichnungen für den Rhein ist eine zuverlässige statistische Ableitung von Ereignissen mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren möglich. Aus hydrologischer Sicht können Hochwasser, die diese Größenordnung überschreiten, als Extremhochwasser eingestuft werden, insbesondere vor dem Hintergrund, dass aus der Vergangenheit einige wenige größere Hochwasserereignisse bekannt sind.

Extreme Hochwasserereignisse haben aber immer auch einen Bezug zur menschlichen Nutzung, zur Toleranz von Schäden durch Hochwasser. So haben die Menschen am Ober- und Niederrhein, zu einem geringen Teil aber auch am Mittelrhein Deiche geschaffen, die ihnen die Nutzung der Rheinauen mit einer gewissen Sicherheit gestatten. Die Bemessung der Deichhöhen bezog sich in der Regel auf das jeweils letzte größte bekannte Hochwasser, zuzüglich eines Sicherheitsmaßes. In jüngerer Zeit wurden den Deichhöhen nachträglich Wiederkehrintervalle zugeordnet. Diese Werte unterscheiden sich regional deutlich. Die so festgelegten Bemessungswasserstände bieten in der Regel mindestens einen Schutz vor einem 100-jährlichen, normalerweise aber vor einem weit darüber liegenden Hochwasser.

Unter einem Extremhochwasser für den Rhein ist **(bei Berücksichtigung dieser Präzisierung)** ein Hochwasser zu verstehen, dessen Scheitelabfluss das HQ₁₀₀ mindestens um etwa 10 bis 30 Prozent überschreitet.

Die Hval-Mitglieder empfehlen, diese Definition des Begriffes „Extremes Hochwasser“ im Zusammenhang mit den Wirkungen der Maßnahmen des APH zu übernehmen.

Literatur zu Anhang 1

- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (1998): Aktionsplan Hochwasser, Koblenz
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (1999): Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins, Koblenz

Anhang 2: Wirkung der von 1995 bis 2005 umgesetzten Maßnahmen der Kategorie 1 „Wasserrückhalt im Einzugsgebiet“

(entnommen aus: Dokument Hval 17-05d)

erarbeitet von der HVal-Unterarbeitsgruppe „Länder“, Stand: 11.04.2005

Mitglieder der HVal-Unterarbeitsgruppe „Länder“:

Dr. G. Brahmer,	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Dr. M. Bremicker,	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Dipl.-Ing. B. Mehlig,	Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Dr. A. Meuser,	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz

Im „Aktionsplan Hochwasser“ für den Rhein werden fünf Maßnahmenkategorien zur Verbesserung der Hochwassersituation am Rhein genannt. Zwei der fünf Maßnahmenkategorien unterstützen das Handlungsziel „Minderung der Hochwasserstände“ im Rhein. Hierbei handelt es sich um die

- Maßnahmenkategorie 1: Wasserrückhalt im Rheineinzugsgebiet und
- Maßnahmenkategorie 2: Wasserrückhalt am Rhein.

Bereits im „Aktionsplan Hochwasser“ wird der Maßnahmenkategorie „Wasserrückhalt im Rheineinzugsgebiet“ im Gegensatz zu der Kategorie „Wasserrückhalt am Rhein“ nur eine sehr geringe Hochwasserstand reduzierende Wirkung im Rhein zugesprochen. Von den dort aufgeführten Maßnahmen haben die Maßnahmenkategorien

- 1a Renaturierungen
- 1c Extensivierung der Landwirtschaft
- 1d Naturentwicklung, Aufforstungen
- 1e Entsiegelungen

nur geringe Wirkungen im Nahbereich und reduzieren die Wasserstände im Rhein nicht (IKSR 1998). Lediglich für die Maßnahmenkategorien

- 1b Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten und die
- 1f Technische Rückhaltungen

werden geringe Hochwasser reduzierende Wirkungen auch im Rhein erwartet. Auch in dem 1999 von der IKSR herausgegebenen Bericht „Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins“ werden detailliertere zumeist qualitative Abschätzungen der Wirkung dieser Maßnahmenkategorie in gleicher Richtung gegeben.

Es zeigt sich, dass eine genaue Quantifizierung (der Maßnahmenkategorie 1) selbst bei exakten Lage- und Wirkungsangaben nur mit hohem zeitlichen und finanziellen Aufwand durchzuführen ist. Weiterhin liegen derartige Berechnungen teilweise jenseits des Grenzbereichs einer zuverlässigen und verifizierbaren Modellanwendung.

Aus Sicht der Länder ist daher eine exakte Quantifizierung der im Nahbereich wirksamen Maßnahmen z.Z. nicht möglich und im Hinblick auf die momentan nicht nachweisbare Wirkung hinsichtlich der Reduzierung der Wasserstände im Rhein auch nicht erforderlich. Lediglich die „Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten“ und die „technischen Rückhaltungen“ könnten eine - wenn auch geringe - Wirkung im Rhein bewirken. Sofern größere Maßnahmen dieser Art in den Einzugsgebieten der Nebengewässer des Rheins durchgeführt sind, sollen diese, soweit mit vertretbarem Aufwand möglich, quantifiziert werden.

Auf den folgenden Seiten ist für alle im Aktionsplan aufgeführten Einzelmaßnahmen für den Wasserrückhalt im Einzugsgebiet ausgeführt, ob jeweils

- ein detaillierter modelltechnischer Nachweis der entsprechenden Auswirkung für die Hochwasserverhältnisse im Rhein sinnvoll oder
- eine qualitative Beschreibung der entsprechenden Auswirkungen ausreichend ist.

Maßnahmenkategorie 1 a: Renaturierungen

Wie in IKSR (1999) festgehalten wird, wirken Gewässerrenaturierungen durch Laufverlängerungen (insbesondere Anlage von Mäandern) gefällereduzierend und damit für die direkt unterliegende Gewässerstrecke tendenziell Scheitel reduzierend. Es ist aber zu berücksichtigen, dass das Gewässer bei Hochwasser ggf. wieder das vor der Renaturierung vorhandene Gewässerbett als Fließweg nutzt. In aller Regel sind die renaturierten Gewässerstrecken rauer - auch im Ausuferungsbereich - und wirken dadurch ebenfalls Wasser rückhaltend. Bei der Einmündung in das nächste übergeordnete Flusssystem bedeutet dies eine zeitliche Verzögerung des Hochwasserscheitels. Vor allem bei Gewässerrenaturierungen, die das gesamte System eines Nebengewässers betreffen, kann es zu Scheitelminderungen in merklichem Ausmaß kommen. Hiermit verbunden ist allerdings eine Zeitverzögerung. Da z.B. am Mittelrhein die Nebenflusswellen häufig der Rheinwelle vorweg laufen (MINISTERIUM FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ 1993), kann es unter den oben genannten Bedingungen zu einer tendenziellen Erhöhung der Rheinwelle kommen. Dies dürfte sich aber kaum auf den Scheitelbereich auswirken.

Mittlerweile gibt es eine Reihe von Untersuchungen, die sich mit den Veränderungen der Abflüsse infolge von Renaturierungsmaßnahmen befassen. LEICHTFUSS & KIVUMBI (1995) quantifizieren mittels eines systemhydrologischen Modells den Einfluss von Renaturierungen in einem Einzugsgebiet der Nahe (587 km² am Pegel Eschenau). Hierbei wurde angenommen, dass sämtliche Gewässer renaturiert werden, und dabei die Gerinnelänge um 30 % zunimmt. Die Rauigkeit wurde durch Veränderung der Stricklerwerte um fünf Punkte erhöht. Ergebnis dieser Untersuchung war, dass sich bei den betrachteten Hochwassern Wasserstandsreduzierungen von bis zu vier Zentimetern im Scheitelbereich am Pegel Eschenau ergaben.

MARENBACH (2002) quantifiziert für die zwei Mittelgebirgseinzugsgebiete der Nahe (4066 km²) und der Rems (583 km²) die Wirkung von Revitalisierungsmaßnahmen (=Renaturierung). Auch hier werden Rauigkeit und Fließwege im Modell verändert, jedoch nur für Gewässerbereiche, die nach Kartenstudium renaturierbar erscheinen (z.B. geradlinig verlaufende Fließstrecken). Für das Nahegebiet werden diese an den Oberläufen von Nahe und Glan sowie an allen Nebengewässern angesetzt. Erzielbare Scheitelabminderungen bei HQ 100 liegen bei gut 6 % im Unterlauf der Nahe (das bedeutet etwa 10 cm Wasserstandsreduzierung am Pegel Grolsheim/Nahe); an der Rems können in Kombination mit Kleintrückhalten bis zu 5 % Scheitelminderung erwartet werden. Die Untersuchung zeigt jedoch auch, dass es je nach Gebietsstruktur bereichsweise auch zu Scheitelerhöhungen kommen kann. Werden beispielsweise Revitalisierungsmaßnahmen nur im unteren Nahegebiet durchgeführt, so ergeben sich dadurch an der Nahemündung geringfügige Scheitelerhöhungen auf Grund der Überlagerungen der Wellen aus den verschiedenen Teileinzugsgebieten. Von der im Naheinzugsgebiet rund 5 bis 6000 km langen Gewässerstrecke befinden sich schätzungsweise noch bis zu 1000 km in einem (bedingt) naturnahen Zustand. Seit 1995 wurden über 300 km Gewässerrandstreifen erworben; etwa 25 km wurden bei Gewässerrückbauprojekten renaturiert. Der Effekt der zwischen 1995 und 2005 erfolgten Renaturierungen an der Mündung in den Rhein dürfte somit rechnerisch kaum nachweisbar sein.

Für das Einzugsgebiet der Lahn untersuchten LANG und TÖNSMANN (2002) die Wirkung von Renaturierungsmaßnahmen unter Verwendung der Strukturgütekartierung. Hierdurch konnte das Renaturierungspotential einigermaßen realitätsnah abgeschätzt werden, so dass z.B. keine pauschalen Fließwegverlängerungen angenommen werden mussten. Für HQ1 bis HQ 100 werden Scheitelminderungen zwischen 6 % und 17 % errechnet. Die Scheitelabminderungen in den Nebenflüssen der Lahn führen zwar zu einer Abflachung, aber gleichzeitig auch zu einer zeitlichen Ausdehnung der Hochwasserwellen. Dies hat zur Folge, dass mit zunehmendem Einzugsgebiet die eigentliche Wirkung der Renaturierung auf Grund von Überlagerungen der Wellen abgeschwächt wird. An der Landesgrenze zu Rheinland-Pfalz ergeben sich aber noch rechnerische Reduzierungen des Scheitelabflusses zwischen 2,5 % und 5,5 %. Auch diese Untersuchung bezieht sich auf das potentiell Machbare.

Die o.g. Untersuchungen legen somit den Schluss nahe, dass durch die im Aktionsplan Hochwasser bis 2005 angestrebten Renaturierungen von 3.500 km Rheinzufüssen kein wesentlicher Beitrag zur Verringerung extremer Hochwasser im Rheingebiet erzielbar ist. Auch im Aktionsplan Hochwasser werden durch diese Renaturierungen nur geringe hochwassermindernde Wirkungen im Nahbereich kleinerer Flüsse erwartet, jedoch keine hochwassermindernden Wirkungen für große Rheinhochwasser.

Aus diesem Grunde ist ein weiterer modelltechnischer Nachweis für die Abminderung des Hochwasserscheitels im Rhein aufgrund von Renaturierungen an Nebenflüssen des Rheins im Rahmen des Aktionsplans Hochwasser nicht erforderlich.

Maßnahmenkategorie 1 b: Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten

Streng genommen ist die Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten Bestandteil der Renaturierungen. Es wird daher hier zunächst auf die Wirkung der Retention eingegangen (NAEF et al. 1999):

Eine Retention erfolgt im Gerinne, als fließende Retention und stehende Retention auf Überflutungsflächen. Für die Retention im Gerinne gilt, dass sie vor allem bei flachen Flussläufen mit Sohlgefälle unter 1 % Effekte zeigt, bei kurzen Hochwassern mit hoher Abflussspitze (= geringes Abflussvolumen). Die Dämpfung der Hochwasserspitze durch Überflutung der Vorländer kann wesentlich größer sein als die Retention im Gerinne. Fließende Retention in den Vorländern tritt bei gegliederten Querschnitten auf und entsteht durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten im Hauptgerinne und Vorland. Im Vergleich zum Hauptgerinne fließt das Wasser auf Grund der geringeren Wassertiefe und der erhöhten Reibung im Vorland langsamer. Wenn die Verzögerung der Welle im Vorland so groß ist, dass sich am Ende des Gerinneabschnittes die Welle im Vorland und im Hauptgerinne nicht mehr überlagern, resultiert eine wesentliche Dämpfung der Welle. Ist der Unterschied zwischen den Fließgeschwindigkeiten klein, muss entweder die Fließstrecke lang oder die Dauer des Hochwassers kurz sein, um eine deutliche Änderung der Ganglinien zu bewirken. Beträgt z.B. der Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten 1 m/s, muss bei einer Fließstrecke von 10 km das Hochwasser weniger als drei Stunden dauern, damit fließende Retention wesentlich wirkt. Stehende Retention tritt auf, wenn Wasser auf das Vorland gelangt und dort zurückgehalten wird oder mit einer vernachlässigbaren Geschwindigkeit fließt. Entscheidend für die Wirkung der stehenden Retention ist der Zeitpunkt der Überflutung der Vorländer. Ist die Gerinnekapazität so klein, dass bereits zu Beginn des Hochwassers Überflutungen auftreten, sind die Speicher je nach Größe bereits vor Erreichen der Hochwasserspitze gefüllt und es findet keine Dämpfung des Scheitels statt. Neben dem Beginn der Überflutungen ist auch das Verhältnis zwischen Volumen des Rückhalterums und dem Volumen des Wassers, das auf das Vorland fließt, wichtig. Ist das Rückhaltevolumen größer als das Volumen des austretenden Wassers, wird die Abflussspitze stark gedämpft.

Die Reaktivierung von Überschwemmungsflächen an den Nebenflüssen des Rheins betrifft im Wesentlichen ausgedeichte Flächen. Diese kommen meist an den Unterläufen der Flüsse vor, ggf. in einigen Fällen auch in den Mittelläufen, sofern diese Bereiche ein geringes Sohlgefälle haben, wie z.B. die Lahn. Die Deichlängen umfassen meist mehrere Kilometer, der hinter den Deichen liegende, geschützte Bereich ist bis zu mehreren hundert Metern breit. Im Allgemeinen werden die Deiche sicher nicht vollends aufgegeben. Für eine überschlägige Volumenabschätzung sei angenommen, dass auf 500 Metern Länge der Deich zurückgelegt wird und damit ein zusätzlicher Retentionsraum von 100 Metern Breite und 2 Metern Höhe erschlossen wird. Somit könnten 100000 m³ zusätzlicher Rückhalteraum geschaffen werden. Nimmt man an, es handele sich um mehr oder weniger stehende Retention, so würde das Wasser der Welle entzogen. Ordnet man dieses Volumen (unzulässigerweise) allein dem Scheitelbereich zu, so ergäbe sich beispielsweise für das Hochwasser Dezember 1993 am mündungsnahen Pegel Grolsheim/Nahe eine Scheitelminderung um knapp 10 cm. Da der Speicherungsprozess allerdings mit der Ausuferung beginnt, ist der Hochwasser dämpfende Effekt beim Scheiteldurchgang nicht mehr vorhanden. Mit ablaufender Welle wird dieses gespeicherte Volumen wieder abge-

geben und erhöht die Welle entsprechend. Tendenziell kann es dadurch leichte - Abflusserhöhungen im Rhein geben. In aller Regel wäre aber dort der Scheitelbereich nicht betroffen. Nach einer Studie der ETH – Zürich (1998) wurde für einen rund 10 km langen Abschnitt an der mittleren Nahe, bei dem Ausuferungsmöglichkeiten beidseitig von etwa 200 Metern bestehen, der Effekt der Vorlandretention und deren Wirkung auf den Abfluss mit einem zwei-dimensionalen Strömungsmodell berechnet. Hierfür wurden das Hochwasser Dezember 1993 und Januar 1995 (für diesen Abschnitt der Nahe das größte dokumentierte Hochwasser) herangezogen. Um den Effekt der Vorlandüberflutung zu quantifizieren, wurden rechnerisch Deiche in unmittelbarer Flussnähe angenommen, so dass es nicht mehr zu einer Ausuferung kommt. Die resultierenden Ganglinien wurden mit den historischen verglichen. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass aufgrund der fließenden Retention für große Hochwasser in der Nahe in diesem Abschnitt nicht mit einer nennenswerten Abflussminderung (am Pegel Grolsheim zwischen null und zwei Prozent) zu rechnen ist, lediglich mit einer Wellenverschiebung von einigen Stunden. Größere Hochwasserdämpfungen sind nur bei kleineren Hochwassern zu erwarten, die nicht die Ausprägung der Hochwasser wie 1993 und 1995 haben. Ausuferungen in der Nähe des Scheitelbereiches bewirken spürbare Wellenabflachungen.

Rückgewonnene Überschwemmungsgebiete können nur dann eine Auswirkung auf den Scheitelabfluss im Rhein haben, wenn die rückgewinnbare Fläche in einem Nebengewässer ein im Vergleich zur betrachteten HW-Welle bedeutendes Volumen bereitstellt oder aber eine Ausuferung bzw. Inanspruchnahme der rückgewonnenen Fläche erst bei höheren Wasserständen kurz vor dem HW-Scheitel erfolgt.

Der Aktionsplan spricht der Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten nur eine geringe (scheitelmindernde) Wirkung für den Rhein zu. Bei größeren Reaktivierungen von Überschwemmungsgebieten bedeutender Rheinzuläufe ist ein rechnerischer Nachweis anzustreben.

Maßnahmenkategorie 1c: Extensivierung Landwirtschaft/infiltrationsfördernde Landwirtschaftsformen

Besondere landwirtschaftliche Bewirtschaftungsverfahren, namentlich eine Umstellung von der Pflugbewirtschaftung auf das Mulchsaatverfahren, können zu einer erhöhten Infiltrationsfähigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden beitragen. Erhöhte Infiltrationsraten führen hier allerdings nicht zu einer proportionalen Hochwasserminderung im Gewässer, da ein maßgeblicher Anteil des Hochwasserabflusses durch schnell reagierende unterirdische Abflussprozesse gebildet wird (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK 1997; PIK 2001).

Die Hochwasserbildung in Einzugsgebieten, die z.B. landwirtschaftlich oder forstlich genutzt werden, ist eine komplexe Überlagerung verschiedenster Teilprozesse. Wie diese einzelnen Abflussbildungsprozesse im größeren Maßstab der mikro- oder mesoskaligen Einzugsgebiete zusammenwirken und den gefallenen Niederschlag in die Fließgewässer transportieren, ist nur summarisch bekannt, kann jedoch quantitativ nicht zuverlässig den einzelnen unterirdischen und ggf. oberirdischen Fließwegen in der Fläche zugeordnet werden (PIK 2001). Demzufolge können die vorhandenen Simulationsmodelle die Hochwasserentstehung nicht ausreichend prozessgenau abbilden, um den Einfluss landwirtschaftlicher Maßnahmen zuverlässig zu quantifizieren. Hier besteht sowohl im Prozessverständnis als auch in der Modelltechnik weiterhin Forschungsbedarf.

Es ist daher nur qualitativ abschätzbar, welchen Beitrag eine Extensivierung der Landwirtschaft auf den Hochwasserabfluss im Rhein leisten kann. Hierzu dienen die folgenden Ausführungen:

Während extreme Hochwasser in sehr kleinen Einzugsgebieten meist durch äußerst intensive, relativ kurz andauernde und kleinräumige Gewitterniederschläge gebildet werden, sind die Vorraussetzung für die Entstehung großer Rheinhochwasser längeranhaltende und großflächige Starkniederschlagsfelder, zu denen ggf. noch der Einfluss einer zeitgleichen Schneeschmelze hinzukommt.

Der für Rheinhochwasser maßgebliche frontale Niederschlagstyp löst jedoch in nicht versiegelten Einzugsgebieten fast ausschließlich unterirdisch dominierte Abflussprozesse aus (z.B. NIEHOFF & BRONSTERT 2002), so dass hier eine erhöhte Infiltrationsfähigkeit kaum hochwasserdämpfend wirken kann.

Die im Rahmen des LAHoR-Projektes (KHR 2003) durchgeführten Untersuchungen des PIK zeigen selbst für die Skala kleiner Einzugsgebiete am Beispiel der Lein nur „äußerst geringe Auswirkungen der durch Mulchung veränderten Boden- und Landnutzungsparameter auf die Hochwassersituation“ (PIK 2001, S. 171-172), obwohl im untersuchten Szenario rund 23% der Einzugsgebietsfläche mit Mulchsaat bewirtschaftet wurden. Die im Rahmen des LAHoR-Vorhabens durchgeführten aufwendigen Modellrechnungen legen somit den Schluss nahe, dass durch eine infiltrationsfördernde Landbewirtschaftung auf rund 1% der Einzugsgebietsfläche (Ziel des Aktionsplans für das Jahr 2005) bzw. auf rund 2% der Gesamtfläche (Ziel 2020) kein Beitrag zur Verringerung extremer Hochwasser im Rheingebiet erzielbar ist.

Auch im Aktionsplan Hochwasser werden durch eine infiltrationsfördernde Landbewirtschaftung nur geringe hochwassermindernde Wirkungen im Nahbereich kleinerer Flüsse erwartet, jedoch keine hochwassermindernden Wirkungen für große Rheinhochwasser.

Aus diesem Grunde ist ein modelltechnischer Nachweis für die Abminderung des Hochwasserscheitels im Rhein aufgrund infiltrationsfördernder Landbewirtschaftung im Rahmen des Aktionsplans Hochwasser nicht erforderlich.

Maßnahmenkategorie 1d: Naturentwicklung, Aufforstungen

Eine denkbare Maßnahme zur Hochwasserdämpfung liegt in der Änderung der Landnutzung von bewirtschafteten Ackerflächen oder Grünland in Waldnutzung.

Auswirkungen einer Änderung von Forst- und Mischgebieten hin zu einer natürlichen Entwicklung oder Übergang zu einer naturnahen Forstwirtschaft lassen sich insbesondere in den Prozessen der Abflussbildung erwarten. Die jeweilige korrekte Zuordnung der Abflussbildungsprozesse und deren Quantifizierung ist jedoch Gegenstand der Forschung und derzeit nicht darstellbar (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK 1997). Wald wirkt aufgrund seiner erhöhten Transpiration, hoher Interzeption im Kronenraum und in der Streuschicht auf dem Boden sowie aufgrund der hohen Versickerungsleistung der Grobporen und der oft hohen Speicherleistung von Waldböden (Oberflächenabfluss unter Wald ist so gut wie nicht bekannt) in Hinblick auf Hochwasserfülle und Scheitel hochwasserdämpfend.

Die hochwassermindernde Wirkung von Wald wurde vielfach anhand von Untersuchungen kleiner benachbarter Vergleichsgebiete mit deutlich unterschiedlicher Landnutzung belegt (MENDEL 2000). Hinsichtlich der Wirkung von Aufforstungen in mittleren und größeren Einzugsgebieten lassen sich überwiegend Modelluntersuchungen mit einem hypothetischen Szenario „komplett ent- oder bewaldetes Gebiet“ oder konzeptionelle „Waldanteilswirkungen“ finden. Einheitlich sind alle in der folgenden Tabelle zusammengestellten Wirkungsabschätzungen auf Zunahme der Waldanteile (absoluter Prozentanteil am Einzugsgebiet) umgestellt und umgerechnet:

Studie	Einzugsgebiet	Größe [km ²]	Waldanteil Ist [%]	Waldanteil Szenario [%]	Scheitelabnahme (ΔQ) [%]	Δ Scheitel pro Δ -% Waldanteil [% / %]	Ereignis
LAHoR *	Nahe	4013	48	100	14	0,27	Dez-91
LAHoR*	Lippe	4783	21,5	100	29	0,37	Mai-83
LANG & TÖNSMANN(2002)	Lahn	5964	41,83	45,99	2,3	0,55	HQ100
MÜLLER(1987)	Dreisam	257	0	55	50	0,91	Mai-83
LAHoR (KHR, 2003)	Körsch	127	12	18	n.n.	n.n.	Dez-93
KOEHLER (1993)	Oberrhein/ Worms	68827	0	37	17	0,46	4 Tage
LAHoR*	Rhein/Worms	68827	37	100	7	0,11	1988
LAHoR*	Rhein/Worms	68827	37	100	20	0,32	1993

Die relativen Abnahmen der Hochwasserscheitelabflüsse pro prozentualer Zunahme des Waldanteils im Einzugsgebiet liegen für Rheinnebengewässer zw. 0,27 und 0,9 % und für das Rheingebiet bis zum Pegel Worms zw. 0,11 und 0,45 %. Solche Aussagen aus der Annahme einer flächendeckenden Bewaldung oder eines völligen Waldverlustes können allerdings nicht sinnvoll auf realistische Veränderungen der Waldanteile übertragen werden, zumal die in kleinräumigen Parzellen veränderten Infiltrationsbedingungen vor dem Hintergrund der übrigen unveränderten Verhältnisse wohl eher eine untergeordnete Rolle im Hochwasserabflussgeschehen spielen. Für die Lahn wurde für eine Zunahme des Waldanteils von 41,8 auf 46 % durch einfache Berücksichtigung eines Anfangsverlustes eine Scheitelabnahme von 2,3 % ermittelt, für die Körsch hingegen ergab sich unter Heranziehung eines realistischen Aufforstungsszenarios von 12 auf 18 % Waldanteil keine erkennbare Hochwasserscheitelminderung. Die Auswirkungen im Rheingebiet z.B. bis zum Pegel Worms liegen zw. 0,11 und 0,45 % Scheitelminderung je Prozent Waldzunahme. Letztlich hängen die ermittelten Ergebnisse von dem gewählten (vereinfachten) Konzept der Berücksichtigung der Abflussbildungsprozesse unter Wald ab, da der eigentliche Abflussbildungsprozess in den Modellen nicht physikalisch abgebildet und derzeit nicht befriedigend modellierbar ist.

Im Aktionsplan Hochwasser Rhein werden für die Schweiz und Deutschland bis 2020 Naturentwicklungen und ergänzende Aufforstungsmaßnahmen mit einer Gesamtfläche von 1600 km² angesetzt. Diese Fläche entspricht am Pegel Rees (159300 km²) einer Zunahme des Waldanteils im Einzugsgebiet um 1 %. Die Wirkung dieser verstreut anzunehmenden Maßnahmen lässt sich modelltechnisch nicht zielführend abbilden. Unter Anhalten der (unsicheren) Größenordnung der aus obiger Tabelle abgeleiteten Scheitelminderungsprozente ergäbe sich für den Rhein z.B. eine maximale Minderung von etwa 0,1 bis 0,4 % des Scheitelabflusses. Neben den zu erwartenden positiven Effekten im Nahbereich und für ökologische Belange kann aus dieser Abschätzung zumindest abgeleitet werden, dass diese Wirkung in den Bereich einer Scheitelminderung von etwa 1 cm führen kann. Für den Maßnahmenzeitraum bis 2005 im Aktionsplan Hochwasser sind für Naturentwicklungen und Aufforstungen 1200 km² vorgesehen. Somit ist ein noch geringerer Effekt auf die Scheitelminderung zu erwarten. Aus den oben angegebenen Gründen ist ein modelltechnischer Nachweis nicht zielführend.

Maßnahmenkategorie 1e: Entsiegelungen

Siedlungs- und Verkehrsflächen bedecken im Rheingebiet ca. 15 % der Landesfläche (KHR 2003). Auf rund 65 % dieser Flächen findet aber nach wie vor die Versickerung von Regenwasser statt, beispielsweise in den städtischen Grünflächen. Somit fällt der Regen im Rheingebiet nur auf 5% versiegelte Flächen und von diesen 5 % versickert ein Teil des Abflusses letztlich doch, z.B. entlang von Landstraßen. Es lässt sich festhalten, dass die Niederschläge bzw. der Schneeschmelzabfluss in mindestens 95% des Rheingebietes auf unversiegelte Flächen fallen.

Extreme Hochwasser mit überregionaler Bedeutung sind daher nahezu ausschließlich vom Abflussverhalten der unversiegelten Flächenanteile geprägt. Da extreme Rheinhochwasser nach langen Vorregen bzw. längeranhaltenden frontalen Niederschlägen entstehen, sind dann auch diese unversiegelten Teile des Einzugsgebietes so wassergesättigt, dass sie kaum noch weiteres Wasser speichern können und daher - ebenso wie versiegelte Flächen - hohe Abflusskoeffizienten aufweisen.

Eine Quantifizierung der Auswirkungen von Flächenentsiegelung auf den Hochwasserabfluss ist beim derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik im Grenzbereich einer zuverlässigen und verifizierbaren hydrologischen Modellanwendung. Gerade im Hinblick auf das Abflussverhalten von wassergesättigten natürlichen Flächen besteht noch Forschungsbedarf und die verfügbaren Modelle bilden diese hochwasserrelevanten Prozesse nur sehr vereinfacht ab.

Dennoch zeigen auch Untersuchungen mit einer vereinfachten Prozessabbildung die vernachlässigbare Relevanz von realistisch erzielbaren Flächenentsiegelungen für den Hochwasserabfluss in großen Flüssen.

So wurde im Rahmen des LAHoR-Vorhabens u.a. der Einfluss unterschiedlicher Landnutzungen auf den Hochwasserabfluss im Rheingebiet untersucht (KHR 2003). Die dabei betrachteten großen Winterhochwasser im Rhein blieben durch die (fiktive) Entsiegelung einer Fläche von 2.500 km² im Rheingebiet (= Ziel im Aktionsplan Hochwasser für das Jahr 2020) „mehr oder weniger unbeeinflusst“ (KHR 2003, S. 57). Rein rechnerisch führten die bis zum Jahr 2020 im Aktionsplan beabsichtigten Entsiegelungsmaßnahmen zu einer Hochwasserabminderung um 0 cm am Pegel Lobith bei den untersuchten Winterhochwassern (KHR 2003, Tab. 6.8, Vergleich der Varianten D1 und D2 am Pegel Lobith). Im Mittel aller untersuchten Pegel und Hochwasser führte die rechnerische Wirkung der beabsichtigten Flächenentsiegelung zu einer Hochwasserverminderung um 0,5 cm im Jahr 2020. Für die bis zum Jahr 2005 angestrebte Entsiegelung von 700 km² im Einzugsgebiet des Rheinpegels Lobith ergibt sich dementsprechend rechnerisch eine mittlere Scheitelminderung im Rhein von 0,1 Zentimeter gegenüber dem Zustand ohne Flächenentsiegelung. Alle genannten Berechnungsergebnisse liegen dabei um ein mehrfaches unterhalb der modelltechnischen Unsicherheit hydrologischer Modelle.

Die Flächenentsiegelungen im Einzugsgebiet des Rheins liefern somit keinen relevanten Beitrag zur Verringerung extremer Hochwasser im Rheingebiet. Ein weiterer modelltechnischer Nachweis für die Abminderung des Hochwasserscheitels im Rhein aufgrund von Flächenentsiegelungen ist daher im Rahmen des Aktionsplan Hochwasser nicht erforderlich.

Maßnahmenkategorie 1f: Technische Rückhaltungen

Für den örtlichen Hochwasserschutz stellt die Anlage von technischen Rückhaltungen wie Hochwasserrückhaltebecken grundsätzlich eine wirkungsvolle Maßnahme zur Hochwasserminderung dar.

Die Wirkung von technischen Rückhalten auf Scheitelabflüsse sind stark von der Scheitelhöhe und der Ganglinienform des jeweils betrachteten Hochwassers abhängig. Das Maß einer möglichen Scheitelreduzierung wird auch durch die Größe des Polders im Vergleich zur Scheitelfülle der HW-Ganglinie bestimmt. Retentionspolder entfalten ihre Wirkung dann optimal, wenn der Hochwasserwelle das Poldervolumen genau im oberen Scheitelvolumen (Scheitelkalotte) entnommen wird. Deshalb muss das Schutzziel für einen Einsatz von Retentionsmaßnahmen genau definiert und durch bauliche Maßnahmen, z.B. Ausprägung der Ein- und Auslaufbauwerke oder Steuerung, umgesetzt werden (D-NL-AG Hochwasser 2004).

Die tatsächliche Ausnutzung eines Rückhaltebeckens zur Scheitelabsenkung ist bedingt durch Steuerungsparametrisierung (Zeitpunkt des Füllens, Dauer des Öffnens, etc.) auch bei Kenntnis der Wellenform nur zu etwa 80-90 % möglich. Im operativen Einsatz auf Basis einer Vorhersage reduziert sich der Anteil des Rückhaltevolumens, der zur Scheitelabsenkung genutzt wird, weiter auf bestenfalls 40-60 %. Es ist daher nur bedingt zulässig, zur Abschätzung einer hochwassersenkenden Wirkung das zur Verfügung stehende bzw. geplante Rückhaltevolumen in die Scheitelkalotte einer Welle zu projizieren.

Hochwasserrückhaltebecken entfalten ihre Wirkung vor allem nach unterhalb. Des weiteren verschiebt sich der Scheitel geringfügig nach hinten, und der ablaufende Wellenast zeigt etwas höhere Abflüsse (D-NL-AG Hochwasser 2004). Dadurch ist es denkbar, dass bei Verbesserungen unterhalb von Retentionsräumen eines Nebengewässers sich die Situation im Hauptgewässer verschärft. Ursache dafür kann sein, dass höhere Abflüsse des absteigenden Astes des Nebengewässers auf den Scheitel des Vorfluters treffen.

Bei Einströmmungen in Rückhalteräume, die einen nennenswerten Anteil aus der HW-Welle entnehmen, kann durch die Veränderung des hydraulischen Gefälles auch eine Wirkung nach oberhalb entstehen.

Die Wirkung technischer Rückhaltungen kann durchaus über den örtlichen Bereich hinausgehen, nimmt aber in seinem Ausmaß im gesamten Verlauf stromab deutlich ab. KOEHLER (1993) kommt nach verschiedenen Untersuchungen zu der Aussage, „dass sich die Hochwasserabflüsse im Rhein durch Rückhaltungen an den Nebengewässern unter realistischen Bedingungen nicht wirkungsvoll verringern lassen“. Gründe dafür sind die nicht vorhandenen sehr großen erforderlichen Speicherräume, die zudem entgegen den vor Ort erforderlichen Belangen gesteuert werden müssten.

Im Rahmen der Lahn-Studie (LANG & TÖNSMANN 2002) wurden u.a. Rückhaltungen in den Nebentälern untersucht. Hierbei wurden insgesamt 47 fiktive Hochwasserrückhaltebecken im Modell an den Übergängen vom Mittellauf zum Unterlauf des Gewässers mit einem Gesamtvolumen von 13 bis 19 Mio m³ simuliert. Die Regelabgaben wurden im Bereich zw. HQ2 und HQ50 angesetzt und damit wurden größte Scheitelminderungen ab einem HQ10 direkt unterhalb der Maßnahmen in Höhe von bis zu 17 % erreicht. Im weiteren Verlauf verliert sich diese Wirkung jedoch rasch und führt teilweise aufgrund ungünstiger Überlagerung mit der Lahnwelle zu geringen Scheitelerhöhungen um ca. 1 % in der Lahn selbst.

Im Rahmen der Lahn-Studie wurden 8 Hochwasserschutzmaßnahmen umgesetzt und in ihren Auswirkungen gegenüber dem Ausgangszustand verglichen. Bei den Maßnahmen handelt es sich um die Anlage, die Anschließung und die Aktivierung von Retentionsräumen in der Lahnaue oder an größeren Nebengewässern mit einem Retentionsvolumen von insgesamt 1,2 Mio m³, die sich überwiegend im oberen Drittel des Lahneinzugsgebietes befinden. Mit diesen Maßnahmen wurde für ein HQ100 für den Lahnmittellauf eine Scheitelreduzierung von 4 % erreicht, die an der Lahnmündung noch etwa 2,3 % ausmacht. Aber auch hier hängt die überörtliche Wirkung insbesondere von der Überlagerung von Teilwellen ab, so dass die Wirkung bei einem anderen genetischen Ereignis wesentlich geringer ausfallen kann.

Bei der Untersuchung eines Ausführungsvorschlags zum Hochwasserschutz im Lahnggebiet (Maßnahmen in der Fläche, in Gewässer und Talau und Rückhaltungen mit einer Scheitelreduzierung an der Lahnmündung von etwa 12% bei HQ100) auf die weitere Wirkung am Rhein zeigt sich, dass die Wirkungen der Abflussveringerung i.d.R. im ansteigenden Ast der Rheinwelle eintreten und im Rheinscheitel selbst eher gering ausfallen.

Da sich größere technische Rückhaltemaßnahmen im Einzugsgebiet (wenn auch im geringen Umfang) auf den Hochwasserscheitel im Rhein auswirken können, ist im Einzelfall deren Berücksichtigung im Rahmen der Hval-Untersuchungen anzustreben.

Schlussfolgerung für die Vorgehensweise im Rahmen der Wirksamkeitsuntersuchungen

Um die Scheitel reduzierende Wirkung des Wasserrückhalts im Einzugsgebiet für den Rhein beurteilen zu können, dürfen nicht die angestrebten Wirkungen in den Nebengewässern bzw. deren Bemessungsereignissen herangezogen werden. Maßgebend sind vielmehr die ausgewählten Ereignisse für den Rhein und deren zugehörige Ganglinien der Nebengewässer. Für diese Ganglinien ist der Wasserrückhalt im Einzugsgebiet zu ermitteln und dann im korrekten Zeitbezug mit der Ganglinie im Rhein zu überlagern. Dies gilt aber nur für die Maßnahmen, bei denen eine überregionale Wirkung zu erwarten ist. Dies sind - wie oben ausgeführt – einzelne Maßnahmen aus den Kategorien 1b (Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten) und 1f (Technische Rückhaltungen).

Literatur zu Anhang 2:

D-NL-AG Hochwasser (2004): Projektstudie „Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein“.

ETH – Zürich (1998): Die Wirkung der Retention auf den Abfluss der Nahe bei extremen Hochwassern. Bericht Nr. A 006, Zürich.

IKSR (1998): Aktionsplan Hochwasser. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins. 30 Seiten, Koblenz.

IKSR (1999): Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins. 39 Seiten, Koblenz.

KHR (2003): Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Bericht Nr. II-18: LAHOR - Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. 77 Seiten und CD.

KOEHLER, G. (1993): Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrheingebiet. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein, Heft 4 , 113 S. und Anlagen, Ministerium für Umwelt Rheinland-Pfalz, Mainz.

LANG, T. und TÖNSMANN, F. (2002): Vorbeugender Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der hessischen Lahn. Teil 1 Zusammenfassender Bericht – Handbuch – 278 Seiten plus Anhang, Kassel.

LEIBUNDGUT, Ch. & UHLENBROOK,S. (1997): Abflussbildung bei Hochwasser. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein, Heft 5, 81 Seiten, Ministerium für Umwelt und Forsten, Rheinland-Pfalz, Mainz.

LEICHTFUSS, A. und KIVUMBI, D. (1995): Quantifizierung von Vermeidungs- und Ausgleichsmaßnahmen. Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 46 Seiten plus Anhang.

MARENBACH, B. (2002): Der Beitrag naturnaher Retentionsmaßnahmen in den Talauen zur Hochwasserdämpfung. Bericht 13 Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kaiserslautern. 183 Seiten.

MENDEL, H. G. (2000): Elemente des Wasserkreislaufs - eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung. 244 Seiten, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Analytica Berlin.

MINISTERIUM FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ (1993): Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Kaub – Rolandswerth; Der Einfluss des Oberrheinausbaus und der am Oberrhein vorgesehenen Retentionsmaßnahmen für die Hochwasser am Mittelrhein von Kaub bis Köln. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein, Heft 3, 74 Seiten plus Anhang, Mainz.

MÜLLER, N. (1987): Wie stark beeinflussen Umweltveränderungen den Hochwasserabfluß? Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität Freiburg.

NAEF, F.; KULL, D. und THOMA, C. (1999): Retentionswirkung von Vorlandüberflutungen. 40 Seiten, Zürich.

NIEHOFF, D. & BRONSTERT, A. (2002): Landnutzung und Hochwasserentstehung: Modellierung anhand dreier mesoskaliger Einzugsgebiete. Wasser & Boden, 54/10, S. 20 - 28.

PIK (2001): Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. Final report des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Enthalten in der CD zu KHR, 2003: Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet.

7.