

5 Berechnungsszenarien

Ein wesentlicher Teil der Aufgabenstellung des LAHoR-Projekts besteht darin, die Wirkung von Landnutzung und Rückhaltemaßnahmen und deren Kombination auf das Hochwasser im Rheingebiet zu quantifizieren, wobei unterschiedliche Hochwassersituationen im Gesamteinzugsgebiet sowie in großen Teilgebieten betrachtet werden. Zu diesem Zweck wurden die Niederschlag-Abfluss-Simulationen für die Einzugsgebiete des Rheins mit Wellenablaufberechnungen im Rhein und seinen Hauptnebenflüssen Neckar, Main und Mosel miteinander gekoppelt. Dabei mussten nicht nur die Landnutzungsszenarien für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung und die Szenarien unterschiedlicher Retentionsmaßnahmen festgelegt werden, sondern es mussten auch geeignete Niederschlagsszenarien als Input für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung definiert werden. Diese Niederschlagsszenarien und die mit ihnen erzeugten Hochwasserereignisse werden im Folgenden Modellhochwasser genannt.

5.1 Modellhochwasser

Aus den historisch abgelaufenen Hochwassern Mai 1983, März 1988, Dezember 1993, und Januar 1995 wurden zunächst die Modellhochwasser M83, M88, M93 und M95 abgeleitet. Dabei wurden die gemessenen Niederschlagsdaten, die diesen Hochwassern zuzordnen sind, dem Niederschlag-Abfluss-Modell als obere Randbedingung übergeben. Durch die Wahl dieser Hochwasser wird ein typisches Spektrum der im Rheineinzugsgebiet auftretenden Hochwassergenese abgedeckt. So liegen die Entstehungsschwerpunkte der Hochwasser 1988 im Einzugsgebiet von Ober- und Mittelrhein, 1993 im Einzugsgebiet von Mittelrhein und Mosel und 1995 im Einzugsgebiet von Mittelrhein, Mosel und Niederrhein. Das Hochwasser 1983 entstand dagegen durch relativ gleichmäßig über das gesamte Rheineinzugsgebiet verteilte Niederschläge. Allen vier Hochwassern ist gemeinsam, dass sie in der betrachteten Rheinstrecke von Maxau bis Lobith zu den größten Hochwassern des 20. Jahrhunderts gehören.

Darüber hinaus wurden zwei Extremereignisse (M95+ und M95++) generiert, die beide aus der Wetterlage des historischen Hochwassers von Januar 1995 abgeleitet wurden: Beim Modellhochwasser M95+ wurden die historisch gemessenen Niederschläge um 20 % erhöht. Bei dem Modellhochwasser M95++ wurden die erhöhten Niederschläge zusätzlich mit einer während des Hochwassers abschmelzenden Schneedecke mit einem Wasseräquivalent von 20 mm überlagert.

5.2 Landnutzungsszenarien

Für die Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Prozesses wurden fünf Landnutzungsszenarien entwickelt: IST92, LN1, LN2, LN100 und LNW (siehe Tab. 5.1).

Landnutzungsszenario IST92 basiert auf dem Zustand der Landnutzungen im Jahr 1992. Dieser Zustand liegt dem Datensatz der KHR zur Beschreibung der Landnutzung im Rheineinzugsgebiet zugrunde. Dieser Datensatz basiert auf den „Daten zur Bodenbedeckung“ (CORINE land cover, 1997), enthält acht verschiedene Landnutzungsklassen und wird als Rasterdatensatz mit der Zellengröße $1 \times 1 \text{ km}^2$ vorgehalten.

Das Landnutzungsszenario LN1 stellt ein Szenario dar, in dem für das Rheingebiet eine Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen von durchschnittlich 18 % im Jahr 1996 auf 20 % im Jahr 2010 angenommen wird. Diese Annahme beruht auf dem Ergebnis einer Untersuchung von Dosch und Beckmann (1999), bei der die Siedlungsflächenentwicklung bis zum Jahr 2010

prognostiziert wird, wobei die Prognose auf einer Extrapolation der Flächennutzungsdaten der Landkreise und einer entsprechenden Bevölkerungsentwicklung beruht. Hinsichtlich ihrer Siedlungsstruktur wurden neun Kreistypen definiert. Für jeden Kreistyp wurden charakteristische Zuwachsraten der Siedlungsflächen bestimmt. Jeder Kreis wiederum wurde einem bestimmten Kreistyp zugeordnet. In jedem Teileinzugsgebiet wurden zusätzlich die Siedlungs- und Verkehrsflächen auf Kosten der landwirtschaftlich genutzten Flächen um 2 % erhöht. Der Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen wurde mit 35,0 % beibehalten.

Landnutzungsszenario LN2 baut auf dem Szenario LN1 auf und berücksichtigt zusätzlich die im Aktionsplan Hochwasser der IKSr festgelegte Zielsetzung, die Wirkung der Versiegelung auf das Hochwasser durch dezentrale Versickerung von Oberflächenwasser abzumindern (IKSR, 1998b). Nach diesem Plan soll die Versiegelungsfläche, die zu einem direkten Abfluss von Oberflächenwasser führt, im Zeitraum von 1998 bis 2020 um rd. 2500 km² verringert werden, was einer Flächenreduzierung um 1,32 % der Einzugsgebietsfläche des Rheins (185000 km²) entspricht (IKSR, 1997). Ausgehend von einem durchschnittlichen Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen von 35 % und bezogen auf den für 2010 prognostizierten Siedlungs- und Verkehrsflächenanteil von rd. 20 % wären dann bei gleichbleibendem Versiegelungsgrad rd. 7 % der Einzugsgebietsfläche versiegelt und an die Kanalisation angeschlossen. Diese Fläche ist in Zukunft zu rd. einem Fünftel durch Oberflächenwasser-Versickerung zu entwässern, um das Ziel des Aktionsplans zu erreichen. Der Versiegelungsgrad verringert sich dadurch. Aus diesen Überlegungen ergeben sich die Werte für das Szenario LN2.

Zur Erstellung des Landnutzungsszenarios LN100 wurden die Siedlungs- und Verkehrsflächen im Vergleich zu IST92 verdoppelt. Der Versiegelungsgrad vom Zustand 1992 wird beibehalten.

Beim Landnutzungsszenario LNw ist das gesamte Einzugsgebiet bewaldet.

Für die einzelnen Szenarien ergeben sich die folgenden prozentualen Aufteilungen der Landnutzung:

Tab. 5-1: Prozentuale Flächenanteile der Landnutzung und Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen für verschiedene Szenarien.

		Landnutzungsszenario				
		IST92	LN1	LN2	LN100	LNw
Flächenanteile Landnutzung						
Wald	[% von Gesamtfläche]	37,38	37,64	37,64	37,64	100,00
Wasser	[% von Gesamtfläche]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,00
Landwirtschaft	[% von Gesamtfläche]	43,91	41,83	41,83	25,51	0,00
Siedlung und Verkehr	[% von Gesamtfläche]	18,14	19,96	19,96	36,28	0,00
Versiegelungsgrad						
Versiegelungsgrad	[% von Siedlungs- und Verkehrsfläche]	35,00	35,00	27,03	35,00	0,00
Versiegelte Fläche	[% von Gesamtfläche]	6,35	6,99	5,40	12,70	0,00

Weitere Informationen finden sich bei Hundecha (2002).

5.3 Retentionsszenarien

In die Oberrheinebene zwischen Basel und Bingen hat der Rhein in Jahrtausenden ein bis zu 4 km breites Überflutungsgebiet eingegraben, in dem das Wasser im südlichen Teil in einem Netzwerk von Stromarmen und im nördlichen Bereich in weiten Mäandern abgeführt wurde.

Nördlich des Rheinischen Schiefergebirges (etwa von Bonn ab) existierte ebenfalls eine ausgedehnte Flusslandschaft, in der allein bis zur heutigen deutsch-niederländischen Grenze ein Überflutungsgebiet von ca. 1800 km² zur Verfügung stand. Beginnend im Mittelalter und verstärkt ab Mitte des 19. Jahrhunderts wurden geschlossene Deichlinien errichtet. Hinter diesen Deichlinien gibt es sowohl flutbare Sommerpolder, die nur in den Sommermonaten trocken gehalten werden, als auch ständig geschützte Polder. Hier sind gesteuerte wie ungesteuerte Rückhaltungen zur Minderung der Hochwassergefahren möglich.

Im Zuge der Maßnahmen zur Verringerung der durch den Staustufenbau vergrößerten Hochwassergefahr sind am Oberrhein derzeit Retentionsmaßnahmen mit einem Gesamtvolumen von 288 Mio. m³ (IKSR, 1997) vorgesehen. Davon liegen rd. 208 Mio. m³ oberhalb von Maxau. Die unterhalb gelegenen rd. 80 Mio. m³ werden in den Wellenablaufmodellen abgebildet. Weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Hochwassersituation folgen am Niederrhein ab Köln. Sie erreichen derzeit ein Gesamtvolumen in der Größenordnung von 65 Mio. m³.

Bei den für das LAHoR-Projekt zu simulierenden Rückhaltungen handelt es sich um steuerbare Becken (in derzeitigen Poldern) neben dem Rhein und um mittels Deichrückverlegungen zu reaktivierende ehemalige Überflutungsflächen. In Tab. 5-2 sind die im Modell berücksichtigten Maßnahmen nach Lage, Größe und Betriebsart zusammengestellt. Die Auswahl der Maßnahmen und deren Größe (bei Maßnahmen mit mehreren Varianten) erfolgte nach Rücksprache mit den jeweils zuständigen Wasserwirtschaftsbehörden in Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg. Die dabei verwendeten Planungsunterlagen sind Anl. 3.1 zu entnehmen. Anl. 3.2 gibt einen Überblick über die Lage der verschiedenen Maßnahmen.

Tab. 5-2: Im Modell berücksichtigte Rückhaltemaßnahmen am Rhein unterhalb des Pegels Maxau

Rückhalteraum		Betriebsart	Volumen [10 ⁶ m ³]
Name	Lage (Rhein-km)		
Oberrhein			
Wörth/Jockgrim/ Neupotz	368	Deichrückverlegung und Retentionspolder*	16,2 (12 +4,2)
Elisabethenwört	381,3 - 383,0	Retentionspolder*	11,9
Mechtersheim	388,4	Retentionspolder*	7,4
Rheinschanzinsel	390,4	Retentionspolder*	6,2
Flotzgrün	392,6	Retentionspolder*	5,0
Kollerinsel	409,9	Retentionspolder*	6,1
Waldsee/Altrip/Neu- hofen	411,5	Deichrückverlegung und Retentionspolder*	9,1 (7,9 +1,2)
Petersau/Bannen	436	Deichrückverlegung	1,4
Worms Bürgerweide	438	Deichrückverlegung	3,4
Mittlerer Busch	440	Deichrückverlegung	2,3
Bodenheim/Lauben- heim	490	Retentionspolder*	6,4
Ingelheim	517	Retentionspolder	3,8
Summe Oberrhein unterhalb Pegel Maxau			79,2
Niederrhein			
Köln-Langel	668,5 - 673,5	Retentionspolder	4,5
Worringer Bruch	705,5 - 708,5	Retentionspolder	8
Monheim	707,5 - 713,5	Deichrückverlegung	6,9
Itter-Himmelgeist	723,5 - 727,5	Deichrückverlegung	2
Ilvericher Bruch	750,5 - 754,5	Retentionspolder	8,1
Mündelheim	760,5 - 769,5	Deichrückverlegung	3
Orsoy Land	797,5 - 803,5	Deichrückverlegung	10
Bislicher Insel	818,5 - 823,5	Deicherhöhung	-
Lohrwardt	832,5 - 833,5	Deichrückverlegung und Retentionspolder	12,9 (10,3 +1,6)
Grietherbusch	837,5 - 847,5	Deichanpassung	-
Bylerward	845,5 - 854,5	Retentionspolder*	10
Summe Niederrhein			65,4
Gesamtvolumen der im Modell berücksichtigten Maßnahmen			rd. 145
Gesamtvolumen der Retentionspolder			rd. 108
*) gesteuerter Retentionspolder			

Zwischen Ober- und Niederrhein bestehen in den Steuerungen der Retentionspolder grundsätzliche Unterschiede.

Am Oberrhein werden die Polder erst ab einem bestimmten Abfluss im Rhein durch Betätigen einer Klappe oder eines Schützes geöffnet. Durch den dann aufgebauten Wasserdruck (Klappenhöhen/Schützöffnung 3 m) ist eine schnelle Füllung der Polder zu erreichen. Der Retentionspolder Ingelheim bildet hiervon eine Ausnahme.

Die Steuerkriterien von $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ am Ort der Retentionsmaßnahme und $5200 \text{ m}^3/\text{s}$ im Rhein unmittelbar unterhalb der Neckarmündung gelten für die Retentionspolder Wörth/Jockgrim/Neupotz, Elisabethenwört, Rheinschanzinsel, Flotzgrün, Kollerinsel und Waldsee/Altrip/Neuhofen. Mechtersheim wird ab einem Abfluss von $5300 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Worms und $5200 \text{ m}^3/\text{s}$ an der Neckarmündung eingesetzt. Der Polder Bodenheim/Laubenheim wird ab $4700 \text{ m}^3/\text{s}$ vor Ort aktiviert. Die Entleerung ist bei den Retentionspoldern Elisabethenwört und Rheinschanzinsel auf $3900 \text{ m}^3/\text{s}$ vor Ort und $5200 \text{ m}^3/\text{s}$ an der Neckarmündung gesteuert. Bei den restlichen Retentionspoldern sind die Entleerungsbauwerke geöffnet, so dass eine Entleerung parallel zum Wasserspiegel des Rheins stattfindet (siehe auch Anl. 3.3).

Am Niederrhein werden die Flutungsräume meist über Überlaufschwellen befüllt (Köln-Langel, Worringer Bruch, Ilvericher Bruch, Lohrwardt). Es wird kein Wasserdruck vor dem Bauwerk aufgebaut, der die Befüllung beschleunigt. Lediglich Bylerward wird über den Abfluss von $11880 \text{ m}^3/\text{s}$ am Ort der Retentionsmaßnahme gesteuert. Die Befüllung ist bei den Flutungsräumen Ilvericher Bruch (32 m ü. NN), Lohrwardt (19,5 m ü. NN) und Bylerward (15,5 m ü. NN) über den Füllstand im Becken gesteuert, so dass ab einem bestimmten Wasserstand der Zufluss abgeriegelt wird (siehe Anl. 3.3).

5.3.1 Deichrückverlegungen in SOBEK

Deichrückverlegungen werden in SOBEK durch Änderungen der Querprofile berücksichtigt. Dies erfolgt mit Hilfe der ArcInfo Application BASELINE. Die neuen Situationen (neue Deichlinien, Wasserflächen, Sommerdeichhöhen, durchströmte und nicht durchströmte Vorlandbereiche etc.) wurden zunächst digitalisiert und in die vorhandenen Basisdaten eingefügt. Mit Hilfe dieser neuen Informationen (Grenzen der Polder, Höhendaten) konnten dann mit BASELINE neue Querprofile berechnet und in SOBEK eingelesen werden. Eine ausführliche Dokumentation findet sich in Bommel und Rabbers (2001).

5.3.2 Retentionspolder in SOBEK

Für die Berechnung von Retentionspoldern steht in SOBEK ein spezielles Modul zur Verfügung. Zunächst erfolgten die Angaben über die Art der Bauwerke, ihre Lage am Rhein und ihre Abmessungen wie z.B. Beckenbodenhöhe und -breite oder Schwellenhöhe und -breite. Die Maße hierfür stammen aus Vorstudien, Empfehlungen und Berechnungen, die von den jeweils zuständigen Wasserwirtschaftsbehörden zur Verfügung gestellt wurden (Anl. 3.1). Es werden sowohl Einlass- als auch Auslassbauwerke unterschieden. Bei Retentionspoldern, bei denen mehrere Bauwerke vorhanden sind, wurden Ein- und Auslass an die gleiche Stelle und in etwa in die Mitte der Retentionsfläche gesetzt. Teilweise lagen noch keine genauen Angaben zu den Bauwerken und deren Abmessungen vor, oder diese Angaben fehlen infolge der noch nicht abgeschlossenen Bauwerksplanung. In diesem Fall wurden als wahrscheinlich geltende Annahmen getroffen. Das betrifft hauptsächlich die Maßnahme Bylerward. Eine weitere Vereinfachung

stellt die Annahme dar, dass es sich bei Retentionspoldern um Rechteckbeckenformen handelt und nicht wie in der Realität um mehr oder weniger unregelmäßige Überflutungsflächen.

Handelt es sich um einen gesteuerten Retentionspolder, erfolgte in einem weiteren Schritt die Angabe der Steuermechanismen der Bauwerke. Je nach Vorgabe in den Planungsunterlagen schließt oder öffnet sich ein Einlass- oder Auslassbauwerk bei einem bestimmten Wasserstand oder Abfluss im Fluss oder im Becken. Diese Steuerung wurde in das Modell integriert. Steuerungs- und Bauwerksdaten finden sich in Anl. 3.3.

5.4 Berechnungsvarianten

Um die Wirkung von Landnutzungsänderungen und Retentionsmassnahmen sowohl als Einzeleffekte als auch in Kombination miteinander betrachten zu können, wurden die Ergebnisse der N-A-Modellierung für verschiedene Landnutzungsszenarien als Randbedingungen für SOBEK genutzt. Dabei wurden SOBEK-Berechnungen sowohl ohne als auch mit Retentionsmaßnahmen durchgeführt. Tab. 5-3 gibt einen Überblick über die berechneten Hochwasserszenarien.

Tab. 5-3: Übersicht über die mit Wellenablaufberechnungen durchgespielten Hochwasserszenarien

Hochwasser	Landnutzungsszenarien									
	IST92		LN1		LN2		LN100		LNW	
	oR	mR	oR	mR	oR	mR	oR	mR	oR	mR
M 83	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
M 88	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
M 93	x	-	x	-	x	-	x	-	x	-
M 95	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
M 1995 +	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
M 1995 ++	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<div><div><div>oR: ohne Retention</div><div>mR: mit Retention im und am Rhein</div><div>x: untersucht</div><div>-: nicht untersucht</div></div><div><div>IST92: Referenzszenario Zustand 1992</div><div>LN1: Urbanisierung nach Dosch und Beckmann, 1999, (bezogen auf das Jahr 2010)</div><div>LN2: wie LN1, ermäßigt gemäss Aktionsplan der IKS (bez. auf 2020)</div><div>LN100: IST92 + 100 % zusätzlicher Versiegelung (bez. auf 1992)</div><div>LNW: Alle Landflächen werden als bewaldet angenommen.</div></div></div>										
Die Modellwellen sind aus Niederschlagsverteilungen gewonnen, wie sie für die historischen Ereignisse ermittelt wurden.										
– Die Modellwellen ohne Pluszeichen wurden mit den für die historischen Ereignisse ermittelten Niederschlags-Intensitäten angenommen.										
– Für M 95+ wurden die historischen Niederschläge von 1995 um 20 % erhöht										
– Für M 95++ wurde zusätzlich zu M95+ noch ein flächendeckendes Schneeäquivalent von 20 mm angesetzt.										

Hieraus wird deutlich, dass alle Berechnungen mit Retentionsmaßnahmen auf dem historischen Hochwasserereignis 1995 basierend durchgeführt wurden. Dies liegt darin begründet, dass die Steuerkriterien erst ab einem bestimmten Abfluss oder Wasserstand im Fluss greifen. Da die Retentionsmaßnahmen bei geringeren Abflüssen, wie sie die Modellhochwasser M 83, M 88 und M 93 liefern, nicht zum Einsatz kommen, wurde auf eine Untersuchung dieser Hochwasser verzichtet.

6 Ergebnisse

Wie in Kap. 5 erläutert, wurde die Auswirkung unterschiedlicher Landnutzung auf den Wellenablauf an folgenden sechs Modellhochwassern untersucht:

Modellwelle Bezugereignis

M83	Hochwasser 1983
M88	Hochwasser 1988
M93	Hochwasser 1993/1994
M95	Hochwasser 1995
M95+	Hochwasser 1995, Erhöhung der Niederschläge um 20 %
M95++	Hochwasser 1995, Erhöhung der Niederschläge um 20 %, Schneeschmelze mit einem Wasseräquivalent von 20 mm

Um den Einfluss der verschiedenen Landnutzungs- und Retentionsszenarien auf Form und Volumen der Hochwasserwellen analysieren zu können, wurden die charakteristischen Wellenparameter der Tab. 6-1 und deren Veränderungen berechnet.

Tab. 6-1: Auswahl der zu berechnenden charakteristischen Wellenparameter
(Anmerkung: MHQ = Mittleres jährliches Hochwasser; HSW2 = Höchster schiffbarer Wasserstand)

Form der Hochwasserwelle	Volumen der Hochwasserwelle
Absolute Scheiteldifferenzen (Abfluss und Wasserstand)	Differenz in der Abflussfülle, bezogen auf 8 Wochen Dauer (Gesamtabflussvolumen)
Differenzen, bezogen auf den Zeitpunkt des Scheitels von IST92 (Abfluss und Wasserstand)	Abflussfülle innerhalb der Überschreitungsdauer oberhalb der Grenzwerte W_{MHQ} , W_{MHQ+1m} , W_{MHQ+2m} , W_{MHQ+3m} und HSW2 (bei mehreren Überschreitungen getrennt für jeden einzelnen Scheitel)
Scheitelverschiebungen	
Überschreitungsdauer der Grenzwerte W_{MHQ} , W_{MHQ+1m} , W_{MHQ+2m} , W_{MHQ+3m} und HSW2 (bei mehreren Überschreitungen getrennt für jeden einzelnen Scheitel)	

6.1 Einfluss der Landnutzung auf die Abflussentstehung und Abflusskonzentration in den Teileinzugsgebieten

Für die in Tab. 5-3 angegebenen Landnutzungsszenarien wurden alle 95 Teileinzugsgebiete für die Zeitreihe 1980 bis 1998 kontinuierlich mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell IWS-HBV simuliert.

6.1.1 Landnutzungsszenario LN1

Das Szenario „Entwicklung der Siedlungsflächen vom Ist-Zustand zum Zustand 2010“ (LN1) beinhaltet, dass die Siedlungs- und Verkehrsflächen - bezogen auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes - von durchschnittlich 18% auf 20% ansteigen werden. Die Waldfläche wurde hierbei nicht verändert, während die Ackerfläche entsprechend dem Zuwachs der Siedlungsflächen reduziert wurde.

Aufgrund des Zuwachses der Siedlungsflächen wurde im Modell kein nennenswerter Anstieg im Scheitelabfluss festgestellt. Besonders die Winterereignisse wurden nicht beeinflusst. Das N/A-Modell berechnete allerdings einen geringen Anstieg in den Sommerscheiteln.

6.1.2 Landnutzungsszenario LN2

Gemäß dem „Aktionsplan Hochwasser Rhein“ soll künftig das dem Rhein bisher direkt zugeführte Oberflächenwasser einer Entwässerungsfläche von rd. 2500 km² im Boden versickert werden. Diese Maßnahme soll sich auf das gesamte Rheineinzugsgebiet erstrecken und soll in den Jahren 1998 bis 2020 umgesetzt werden. In ihrer Wirkung auf den Abfluss im Rhein entspricht die Bodenversickerung einer Entsiegelung der Landschaft. Bei der Modellierung dieser Maßnahme wurde von einer gleichmäßigen Verteilung der „entsiegelten“ Flächen im Rheineinzugsgebiet (rd. 185000 km²) ausgegangen. Hiervon betroffen sind 1,32 % des Gesamtgebietes. Für jedes Teileinzugsgebiet wurde das Landnutzungsszenario für das Jahr 2010 benutzt und der Prozentsatz der versiegelten Flächen um jeweils 1,32 % vermindert. Dadurch verringert sich der prozentuale Anteil der versiegelten Flächen am Gesamtgebiet von 6,99 % (LN1) auf 5,40 % (LN2) (siehe Tab.5-1).

Die „Entsiegelung“ führte zu einer Abnahme der kleineren Sommerscheitel. Die Winterscheitel blieben dagegen von dieser Maßnahme mehr oder weniger unbeeinflusst.

6.1.3 Landnutzungsszenario LN100

Um den Einfluss veränderter Siedlungsflächen auf die Abflussentstehung und -konzentration abzuschätzen, wurde das Modell auf das Landnutzungsszenario „Verdoppelung der Siedlungsfläche“ (LN100) angewendet. Für jeden Bereich der Teileinzugsgebiete wurde der Anteil der Waldflächen beibehalten, und die Zunahme der Siedlungsflächen erfolgte auf Kosten der landwirtschaftlichen Flächen.

Das Simulationsergebnis zeigte deutlich, dass ein starker Zuwachs der Besiedlung einen merklichen Effekt auf die Zunahme des Scheitelabflusses hat. Obwohl der Scheitelabfluss für alle Niederschlagsereignisse ansteigt, ist das Ausmaß der Steigerung im Sommer höher als im Winter.

Die insgesamt höhere Sensitivität der Landnutzungsänderungen bei sommerlichen Hochwasserereignissen kann darauf zurückgeführt werden, dass im Sommer die potenzielle Evapotranspiration auf landwirtschaftlichen Flächen höher als auf Siedlungsflächen ist und daher die Änderung von Land- in Siedlungsflächen zu einer leichten Erhöhung des Abflusses führt. Außerdem werden Hochwasserereignisse im Sommer gewöhnlich von trockenen Bodenbedingungen begleitet, wodurch ein höheres Potenzial für die Infiltration als im Winter gegeben ist. Das trifft vor allem auf die frühe Phase des Hochwasserereignisses zu. Der Zuwachs von Siedlungsflächen auf Kosten der landwirtschaftlichen Flächen führt zu geringeren Infiltrationsmöglichkeiten und daher zu einem Anstieg des Abflusses.

Den unterschiedlichen Einfluss einer starken Zunahme der Siedlungsflächen (Szenario LN100) auf die Hochwasserwelle bei einem Winter- und Sommerereignis veranschaulicht Abb. 6-1.

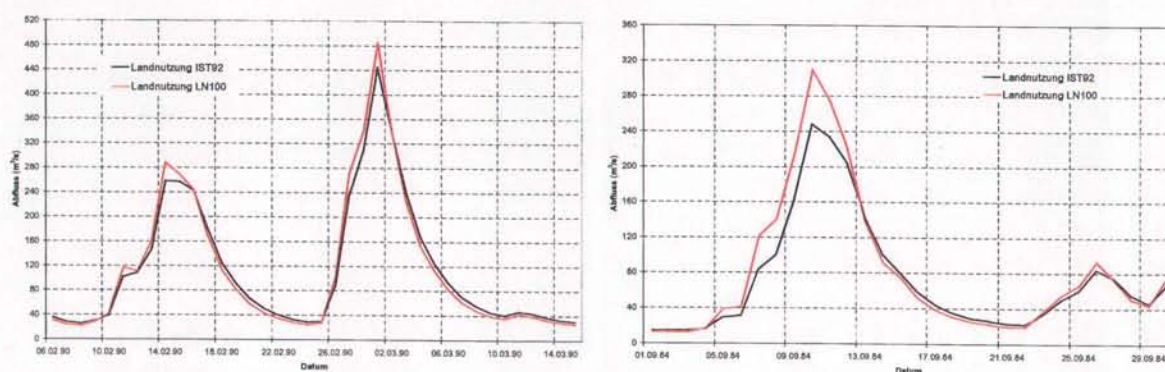


Abb. 6-1: Vergleich der simulierten Ganglinien bei intensiver Besiedlung (Szenario LN100) zwischen einem Winter- und einem Sommerhochwasser am Pegel Menden/Sieg (Bronstert et al., 2002)

6.1.4 Landnutzungsszenario LNW

Ein viertes Szenario sollte den Einfluss von Aufforstungsmaßnahmen auf die Modellergebnisse abschätzen. Hierbei wurde angenommen, dass das gesamte Einzugsgebiet von Wald bedeckt ist (LNW).

Dieses Szenario führt zu einer starken Reduktion des Scheitelabflusses während aller Jahreszeiten. Zusätzlich ist das Wasservolumen, das zum Abfluss gelangt, bis zu 7 % kleiner als im Ist-Zustand. Eine Reihe von Gründen erklärt dieses Phänomen:

- Versiegelte Flächen, von denen ein Oberflächenabfluss schneller generiert wird, sind nicht vorhanden. Das trägt deutlich zu einer Verminderung der Scheitelabflüsse aus Starkregenereignissen oder Schneeschmelze bei. Konsequenterweise wird die Tiefenversickerung zunehmen und daher ein Anstieg im Basisabfluss nach Niederschlagsereignissen auftreten.

- Der Interzeptionsspeicher in Waldflächen ist viel größer als bei anderen Landnutzungen. Er variiert von 2,7 mm im Winter bis zu 4,1 mm im Sommer, während für landwirtschaftliche Flächen die Interzeption zwischen 0,5 und 1,6 mm schwankt. Das von den Blättern aufgefangene Wasser wird verdunstet und erreicht daher nicht den Boden. Das vermindert das für den Abfluss zur Verfügung stehende Wasservolumen.
- Die höhere potenzielle Evapotranspiration in Wäldern führt ebenfalls zu einer Reduktion des Abflussvolumens. Diese ist vor allem im Sommer gegeben.

6.2 Einfluss der Landnutzung auf den Wellenablauf im Rhein

Bei der Betrachtung des Einflusses der Landnutzung auf den Wellenablauf im Rhein und in seinen bedeutenden Nebenflüssen wurden die Szenarien LN1 (Urbanisierung 2010), LN2 (Aktionsplan Hochwasser 2020), LN100 (Verdoppelung der Siedlungsflächen) und LNw (Wald) jeweils mit dem Ausgangszustand IST92 (Zustand 1992) verglichen. Unabhängig von den Hochwasserereignissen lässt sich zusammenfassend feststellen, dass für den ansteigenden Ast und den Scheitel der Hochwasserwelle das Szenario LN100 eine abflussverschärfende und das Szenario LNw eine sehr stark abflussmindernde Wirkung hat. Die beiden anderen Szenarien LN1 und LN2 üben dagegen nur einen sehr geringen Einfluss aus.

In den folgenden Unterkapiteln wird nach einer kurzen Charakterisierung der untersuchten Hochwasser der Einfluss der Landnutzung auf den Wellenablauf exemplarisch diskutiert. Eine vollständige Übersicht über die untersuchten Pegel Worms, Mainz, Kaub, Andernach, Köln, Rees und Lobith liegt in digitaler Form als CD-ROM vor.

6.2.1 Charakteristika der Modellhochwasser

Das Hochwasser 1983 war durch eine ausgeglichene Wasserführung mit annähernd gleicher Jährlichkeit im Untersuchungsgebiet gekennzeichnet.

Aufgrund extremer Abflüsse von Main und Nahe produzierte das Hochwasser 1988 im Mittelrheingebiet hohe Scheitelabflüsse. Zudem war die Fülle der Welle, die sich aus zwei Wellenscheiteln zusammensetzte, durch den über lange Zeiträume hohen Zufluss des Mains außerordentlich groß.

Das Hochwasser 1993/1994 war im Niederrheingebiet infolge extremer Abflüsse der Mosel durch Scheitelabflüsse mit hohen Jährlichkeiten gekennzeichnet. Aber auch am nördlichen Oberrhein und am Mittelrhein wuchsen die Scheitel durch starke Neckar- und Mainzuflüsse auf ein 20- bis 30jähriges Wiederkehrintervall an. Auch hier erreichte die Fülle der zweigipfeligen Welle einen außergewöhnlich hohen Wert.

Das Hochwasser 1995 wurde wegen besonders starker Abflüsse des Mains und der Mosel im Mittel- und Niederrheingebiet zu einem Extremereignis. Der Main erreichte noch höhere Abflüsse als bei dem Hochwasser 1993/1994, während das Moselhochwasser durch eine sehr große Fülle gekennzeichnet war.

Die gerundeten Jährlichkeiten der gemessenen Hochwasserscheitel (Zeitreihe 1901 bis 2000) an den ausgewerteten Rheinpegeln gibt Tab. 6-2 wieder. Für die Modellhochwasser der Extremszenarien M95+ (Erhöhung der historischen Niederschläge von 1995 um 20 %) bzw. M95++ (Simulation eines flächendeckenden Schneeäquivalents von 20 mm zusätzlich zu M95+) ergaben sich die Jährlichkeiten aus den Simulationen des Niederschlag-Abfluss-Modells, das mit dem Wellenablaufmodell gekoppelt wurde (Zustand: IST92).

Tab. 6-2: Jährlichkeiten der historischen Hochwasser 1983, 1988, 1993 und 1995 bzw. abgeleitete Jährlichkeiten der Modellhochwasser M95+ und M95++ für ausgesuchte Rheinpegel (Zeitreihe 1901 - 2000), Zustand Ist 92

Hochwasser	Maxau	Worms	Kaub	Andernach	Köln	Rees
1983	20	50	20	20	25	25
1988	10	50	100	20	20	40
1993	2	20	30	50	50	70
1995	10	5	40	40	50	80
M95+	10	40	400	300	400	600
M95++	10	70	500	400	500	800

Anhand der berechneten Hochwasser (Modellhochwasser) wurden die Überschreitungsdauern - bezogen auf das mittlere jährliche Hochwasser (MHQ) - ermittelt. Tab. 6-3 gibt die entsprechenden Überschreitungsdauern in Tagen wieder.

Tab. 6-3: Überschreitungsdauern (in Tagen) der Modellhochwasser M83, M88, M93, M95, M95+ und M95++, bezogen auf das mittlere jährliche Hochwasser (MHQ)

Hochwasser	Maxau	Worms	Kaub	Andernach	Köln	Rees
M83	5,2	7,6	7,2	6,4	6,3	
M88	6,6	18,9	22,7	17,8	17,9	
M93	0,0	5,7	12,4	14,2	14,6	
M95	2,3	7,1	10,0	11,2	11,2	
M95+	2,3	8,2	11,8	11,9	11,9	
M95++	2,3	9,1	12,9	12,7	12,7	

6.2.2 Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserscheitel

Der Einfluss der Landnutzung auf den Hochwasserscheitel ist aus Tab. 6-4 ersichtlich. Er liegt bei den Modellhochwassern 1983, 1988 und 1995 für alle Pegel in der gleichen Größenordnung. Man erkennt deutlich, dass nur das Szenario LN100 einen schwach verstärkenden und das Szenario LNW einen stark reduzierenden Einfluss auf die Hochwasserscheitel ausüben.

Der Einfluss der Landnutzung ist bei dem Modellhochwasser M93 sehr bedeutsam im Vergleich zu den Modellhochwassern M83, M88 und M95. Durch die ungünstige Überlagerung der Wellenscheitel von Neckar und Rhein bewirkt das Siedlungsszenario LN100 beim Modellhochwasser M93 am Pegel Worms einen Anstieg des Wellenscheitels um 32 cm. Dieser Anstieg schwächt sich flussabwärts bis auf 8 cm am Pegel Lobith ab. Das Waldszenario LNW ergibt für M93 größere Änderungen als bei den anderen Modellhochwassern. Die Scheitelermäßigung erreicht in Andernach ihr Maximum von 145 cm bei annähernd gleich bleibender Reduktion des Abflusses an den Pegeln Andernach bis Lobith.

In den Abb. 6-2, 6-3, 6-4 und 6-5 sind am Beispiel des Pegels Köln die Abflussganglinien und die zugehörigen Differenzganglinien - jeweils bezogen auf den Ausgangszustand IST92 - für die einzelnen Modellhochwasser M83, M88, M93 und M95 in Abhängigkeit von den verschiedenen Landnutzungsszenarien dargestellt.

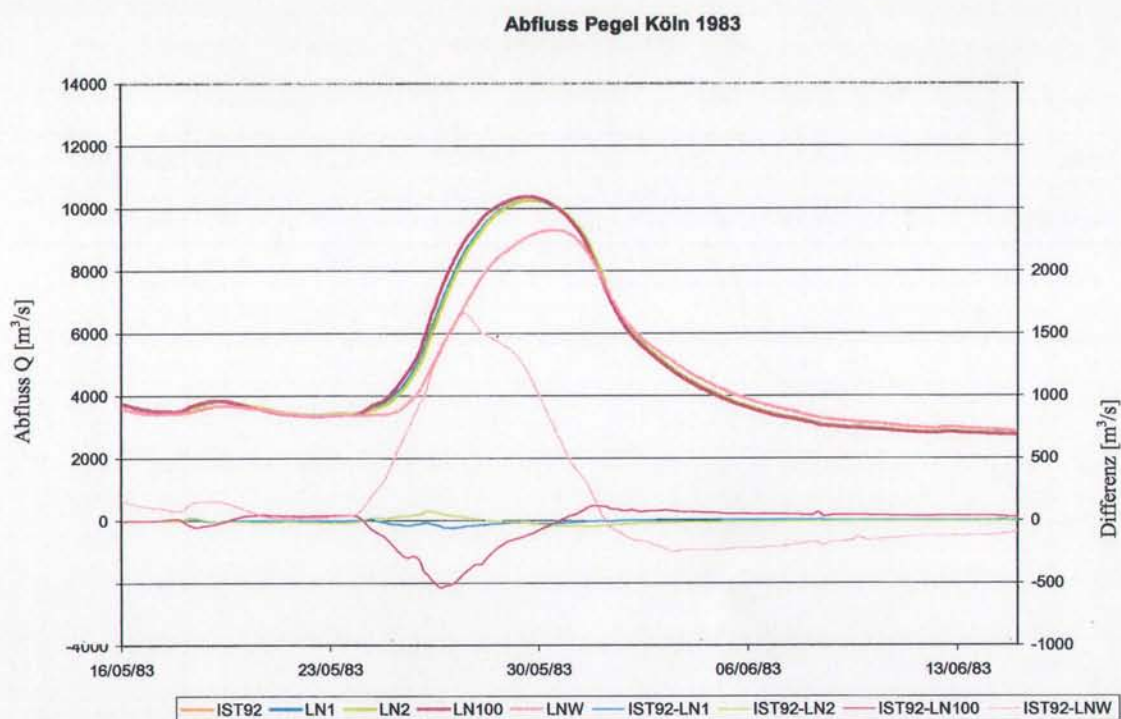


Abb. 6-2: Abflussganglinie und Differenzganglinie für verschiedene Landnutzungsszenarien am Pegel Köln (Modellhochwasser M83)

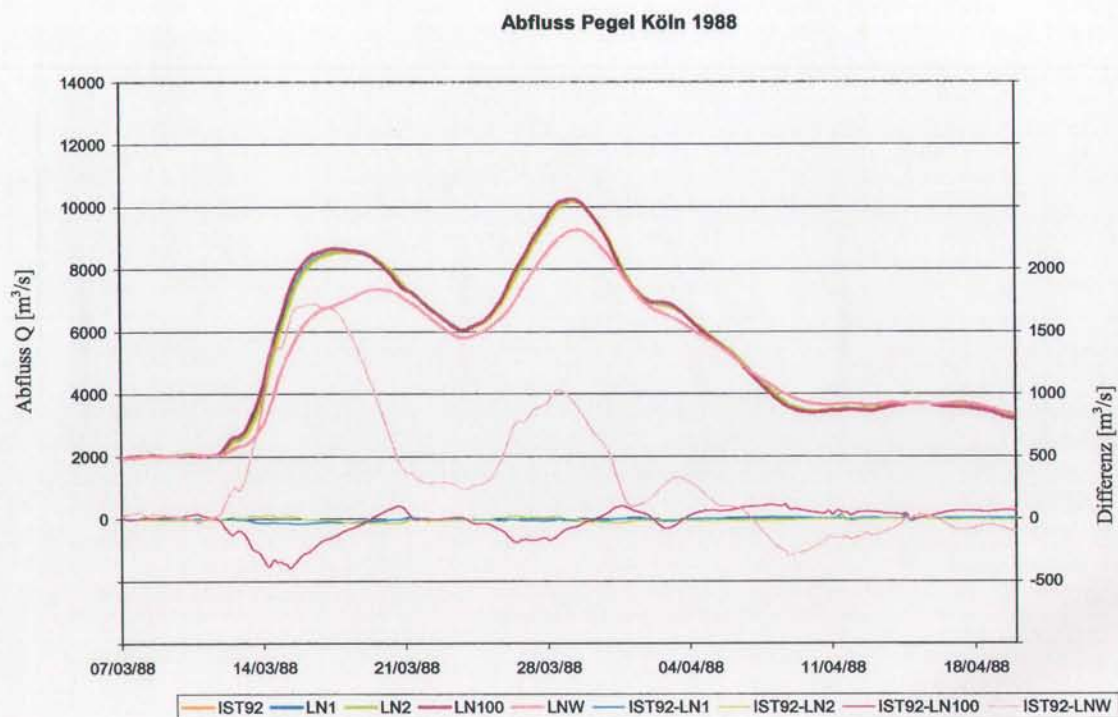


Abb. 6-3: Abflussganglinie und Differenzganglinie für verschiedene Landnutzungsszenarien am Pegel Köln (Modellhochwasser M88)

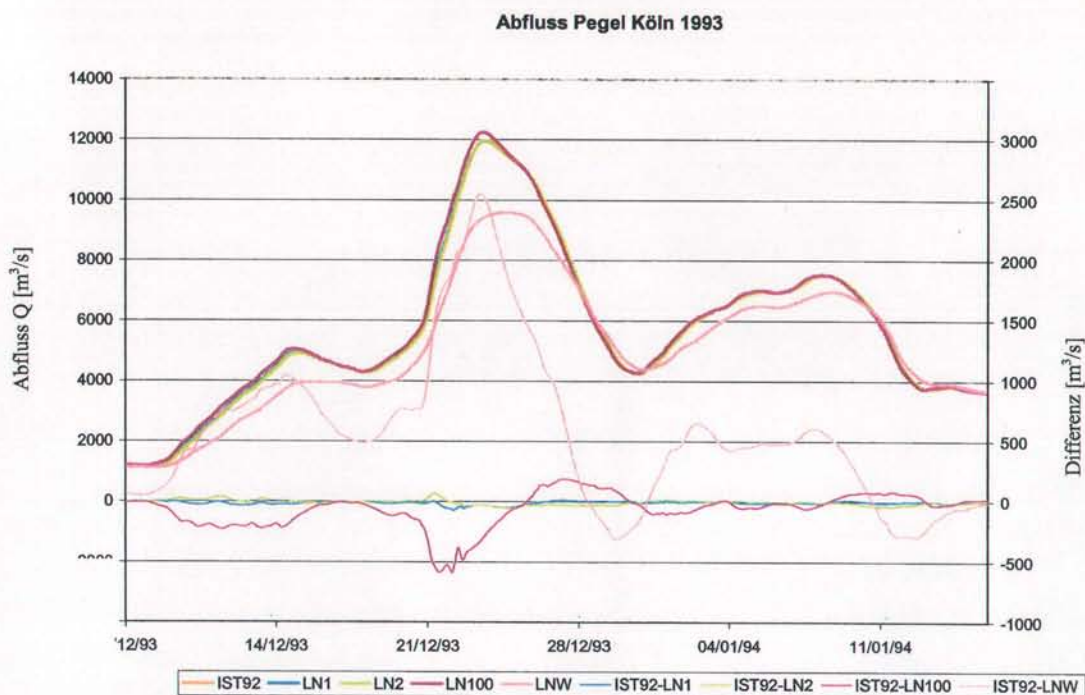


Abb. 6-4: Abflussganglinie und Differenzganglinie für verschiedene Landnutzungsszenarien am Pegel Köln (Modellhochwasser M93)

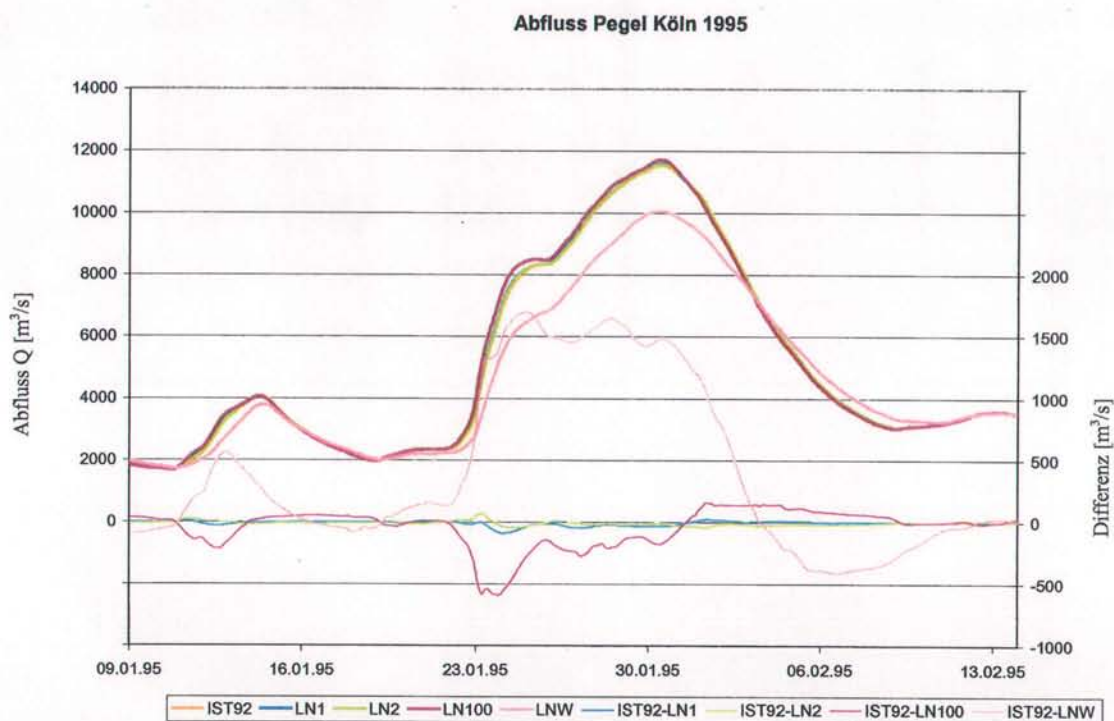


Abb. 6-5: Abflussganglinie und Differenzganglinie für verschiedene Landnutzungsszenarien am Pegel Köln (Modellhochwasser M95)

Für das Szenario M95+ ist auffällig, dass die Scheitelreduktionen für LNW deutlich kleiner sind als beim Modellhochwasser M95. Daraus lässt sich folgern, dass die verzögerte Wasserabgabe von Waldböden bei extrem hohen Niederschlägen aufgrund der Wassersättigung des Bodens teilweise aufgehoben wird. Für das Szenario LN100 liegen die Werte in der gleichen Größenordnung wie beim Modellhochwasser 1995.

Im Vergleich zu dem Ereignis M95++ liegen die Werte bei M95+ für das Szenario LNW etwas tiefer, da bei M95+ kein Schneeeinfluss vorhanden ist (Schneesmelze, Schneeinterzeption).

Tab. 6-4: Wasserstandsänderungen im Hochwasserscheitel gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in cm aufgrund verschiedener Landnutzungen (negative Werte bedeuten Verringerung des Wasserstandes)

Pegel	Landnutzungsszenario	M83	M88	M93	M95	M95+	M95++
Worms	LN1	0	1	5	0	0	0
	LN2	0	0	2	-1	0	1
	LN100	2	3	32	1	-1	1
	LNW	-38	-38	-51	-23	-14	-23
Kaub	LN1	1	1	4	1	1	2
	LN2	1	0	2	1	1	1
	LN100	7	3	23	7	6	9
	LNW	-54	-50	-116	-77	-41	-54
Andernach	LN1	1	1	2	1	1	1
	LN2	1	0	2	0	1	1
	LN100	6	4	17	7	5	6
	LNW	-54	-57	-145	-89	-37	-47
Köln	LN1	1	1	1	2	1	2
	LN2	1	0	1	0	1	1
	LN100	7	4	15	9	7	9
	LNW	-60	-57	-138	-88	-37	-45
Lobith	LN1	1	0	1	1	1	1
	LN2	1	0	1	1	1	1
	LN100	3	2	8	5	6	8
	LNW	-41	-41	-84	-61	-26	-32

Die verringernde oder vergrößernde Wirkung der verschiedenen Landnutzungen auf den Abfluss im Hochwasserscheitel ist aus Tab. 6-5 zu ersehen.

Tab. 6-5: Abflussänderungen im Hochwasserscheitel gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in m³/s aufgrund verschiedener Landnutzungen (negative Werte bedeuten Verringerung des Abflusses)

Pegel	Differenz zu IST92	M83	M88	M93	M95	M95+	M95++
Worms	LN1	4	6	42	0	-2	0
	LN2	7	3	17	5	4	5
	LN100	27	43	278	3	-13	1
	LNW	-392	-365	-962	-298	-113	-182
Kaub	LN1	15	8	49	16	14	22
	LN2	10	5	18	7	10	16
	LN100	92	40	281	89	75	115
	LNW	-658	-628	-1353	-942	-513	-694
Andermach	LN1	20	14	24	23	18	25
	LN2	21	8	24	8	10	15
	LN100	107	70	290	112	89	105
	LNW	-932	-877	-2327	-1349	-645	-831
Köln	LN1	20	12	26	29	24	36
	LN2	21	6	26	8	14	19
	LN100	111	66	290	172	139	188
	LNW	-954	-909	-2359	-1487	-717	-879
Lobith	LN1	22	14	38	38	32	46
	LN2	28	6	34	18	20	24
	LN100	85	61	244	151	180	267
	LNW	-985	-1077	-2326	-1805	-834	-1030

6.2.3 Einfluss der Landnutzung auf den ansteigenden Ast der Hochwasserwelle

Der Einfluss der Landnutzung auf den ansteigenden Ast der Hochwasserwelle ist aus den Abb. 6-2, 6-3, 6-4 und 6-5 ersichtlich. Die maximalen Reduktionen und Verstärkungen im ansteigenden Ast der Hochwasserwelle lassen sich für die Wasserstandsänderungen aus Tab. 6-6 und für die Abflussänderungen aus Tab. 6-7 ablesen. Wie der Vergleich der Werte mit Tab. 6-4 und 6-5 zeigt, liegen die maximalen Änderungen im Anlauf der Hochwasserwelle in der Regel um das zwei- bis fünffache höher als die entsprechenden Scheiteländerungen. Bei dem Modellhochwasser M93, welches zu den maximalen Reduktionen der Scheitelabflüsse führt, ist dieser Effekt noch am geringsten ausgeprägt. In diesem Fall ist die maximale Reduktion des Abflusses im ansteigenden Ast der Hochwasserwelle gleichwohl etwa doppelt so groß wie im Scheitel. Im abfallenden Ast der Hochwasserwelle sind die Unterschiede aufgrund der verschiedenen Landnutzungen stets deutlich geringer als im Scheitelbereich.

Tab. 6-6: Maximale Wasserstandsänderungen gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in cm im ansteigenden Ast der Hochwasserwellen aufgrund verschiedener Landnutzungen (negative Werte bedeuten Verringerung der Wasserstände)

Pegel	Differenz zu IST92	M83	M88	M93	M95	M95+	M95++
Worms	LN1	5	6	5	5	5	7
	LN2	-2	-2	-2	-3	-3	-3
	LN100	35	38	33	36	34	45
	LNW	-84	-107	-97	-70	-59	-72
Kaub	LN1	7	5	7	6	7	9
	LN2	-3	-3	-2	-3	-3	-3
	LN100	46	36	43	43	41	62
	LNW	-128	-136	-140	-100	-76	-92
Andernach	LN1	4	5	5	7	8	10
	LN2	-10	-4	-6	-10	-4	-5
	LN100	41	39	42	53	49	65
	LNW	-124	-140	-162	-132	-92	-106
Köln	LN1	4	3	4	6	7	10
	LN2	-10	-3	-5	-6	-4	-5
	LN100	41	33	37	49	48	61
	LNW	-124	-134	-151	-126	-86	-100
Lobith	LN1	3	3	4	4	6	8
	LN2	-5	-3	-4	-5	-3	-4
	LN100	29	29	36	39	39	51
	LNW	-98	-116	-119	-112	-76	-77

Tab. 6-7: Maximale Abflussänderungen gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in m³/s im ansteigenden Ast der Hochwasserwellen aufgrund verschiedener Landnutzungen (negative Werte bedeuten Verringerung des Abflusses)

Pegel	Differenz zu IST92	M83	M88	M93	M95	M95+	M95++
Worms	LN1	46	51	67	30	38	66
	LN2	-21	-16	-9	-16	-16	-17
	LN100	314	311	410	212	221	361
	LNW	-827	-852	-1050	-518	-397	-485
Kaub	LN1	66	49	64	60	57	79
	LN2	-27	-19	-19	-18	-19	-22
	LN100	433	321	409	381	372	543
	LNW	-1183	-1251	-1576	-999	-664	-838
Andernach	LN1	57	59	64	83	99	131
	LN2	-163	-50	-82	-106	-53	-54
	LN100	522	418	561	588	590	874
	LNW	-1624	-1687	-2530	-1673	-1111	-1454
Köln	LN1	57	36	67	88	100	146
	LN2	-163	-37	-70	-74	-36	-41
	LN100	522	390	585	587	658	951
	LNW	-1624	-1727	-2556	-1700	-1158	-1445
Lobith	LN1	59	44	70	87	106	208
	LN2	-61	-30	-37	-44	-27	-31
	LN100	519	346	633	574	687	1278
	LNW	-1685	-1796	-2846	-2076	-1230	-1862

6.2.4 Einfluss der Landnutzung auf die Überschreitungsdauer des Wasserstandes des mittleren Hochwassers W_{MHQ} plus 1 Meter

Die Verlängerung bzw. Verkürzung der Überschreitungsdauern im Vergleich zum Szenario IST92 lässt sich aus Tab. 6-8 ablesen. Es wird deutlich, dass sich nur für die Szenarien LN100 und LNW nennenswerte Änderungen ergeben. Die größten Werte ergeben sich bei dem zweigipfeligen Hochwasser M88. Hier kann die Verlängerung der Überschreitungsdauer bei LN100 bis zu sieben Stunden betragen, während bei LNW eine Verringerung der Überschreitungsdauer um bis zu 200 Stunden möglich ist.

Eine deutliche Verkürzung der Überschreitungsdauer kann wirtschaftlich von hoher Bedeutung sein, wenn dadurch die Pumpeneinsätze für Polderentwässerungen reduziert werden. Zudem führt sie zu einer Verringerung der Durchfeuchtung der Deiche und erhöht damit deren Standfestigkeit.

Tab. 6-8: Änderungen der Überschreitungsdauern für den Wasserstand W_{MHQ} plus 1 Meter gegenüber dem Ausgangszustand IST92 an ausgesuchten Rheinpegeln in h aufgrund verschiedener Landnutzungen (negative Werte bedeuten Verringerung der Überschreitungsdauer)

Pegel	Differenz zu IST92	M83	M88	M93	M95	M95+	M95++
Worms	LN1	0,8	-0,2	0,6	0,3	0,3	0,1
	LN2	0,1	0,7	0,4	0,2	0,3	0,3
	LN100	6,3	4,3	-0,1	2,3	1,3	0,4
	LNW	-15,6	-69,2	-74,9	-22,8	-19,7	-11,8
Kaub	LN1	1,0	1,0	0,2	0,0	-0,4	0,6
	LN2	0,2	0,7	0,3	0,2	0,3	0,7
	LN100	5,5	5,8	2,5	0,6	-1,6	4,3
	LNW	-24,2	-199,4	-39,1	-47,9	-8,1	-46,1
Ander- nach	LN1	0,7	0,5	-0,1	1,1	0,2	0,3
	LN2	-0,1	1,2	-0,3	0,9	0,3	0,4
	LN100	4,5	6,7	1,6	4,3	1,2	0,4
	LNW	-20,9	-140,0	-25,1	-61,8	-7,7	-8,8
Köln	LN1	0,7	1,0	-0,1	1,3	0,3	0,1
	LN2	-0,1	0,7	-0,1	0,9	0,3	0,4
	LN100	4,5	5,0	1,5	5,4	1,6	-0,1
	LNW	-22,6	-136,2	-27,0	-63,6	-8,1	-7,9
Rees	LN1	0,7	1,2	0,1	1,2	0,2	0,0
	LN2	-0,1	1,2	0,1	0,9	0,3	0,4
	LN100	4,7	3,6	1,3	5,0	0,9	-0,3
	LNW	-30,3	-125,0	-31,3	-68,9	-6,9	-5,3

6.3 Einfluss der Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf

6.3.1 Einfluss der Retentionsmaßnahmen südlich von Maxau

Als unmittelbare Folge des zwischen 1928 und 1977 durchgeführten Oberrheinausbaus mit Staustufen ist die Hochwassersicherheit für den stromab folgenden Rheinabschnitt vermindert worden. Die 1968 gegründete internationale Hochwasser-Studienkommission für den Rhein (HSK) hat aufgrund detaillierter Untersuchungen diese Feststellung treffen und die Effekte quantifizieren können. Darüber hinaus hat sie auftragsgemäß Empfehlungen erarbeitet „für Maßnahmen gegen die durch die Ausbaumaßnahmen vergrößerte Hochwassergefahr“.

Betrachtet wurden dabei nur Hochwasserscheitel, die kleiner oder gleich den 200-jährlichen Abflüssen bleiben, aber heute die Höhe der Banndeiche übersteigen würden, welche bis 1955 die 200-jährlichen Abflüsse schadlos abführen konnten.

Zur Dämpfung der Hochwasserscheitel hat die HSK die Kombination von drei verschiedenen Retentionsmaßnahmen empfohlen:

- Beim Sonderbetrieb der Rheinkraftwerke von Kembs bis Straßburg werden die üblicherweise über den Rheinseitenkanal bzw. die nachfolgenden Kanalschlingen abfließenden Wassermengen in das natürliche Rheinbett verlagert, was zu einem zeitverzögerten und durch Retention im Flusslauf verminderten Abfluss führt.
- Durch den Aufstau des Rheins hinter Retentionswehren im Flussbett wird der Abfluss im Rahmen des abflussabhängig verfügbaren Stauvolumens steuerbar verringert.
- Durch Überstau von zur Zeit hochwasserfreien Poldern werden alte Ausuferungsgebiete reaktiviert; ihre Flutung erfolgt über steuerbare Einlassbauwerke.

Alle drei Retentionsmaßnahmen sind nur in der Staustufenstrecke bis Iffezheim möglich. Am freifließenden Rhein können lediglich seitliche Rückhaltebecken zum Einsatz kommen.

Abb. 6-6 zeigt schematisch die durch den Staustufenbau am Oberrhein erzeugte Wellenveränderung und die vorgesehene Wirkung der Retentionsmaßnahmen am Beispiel des Pegels Maxau.

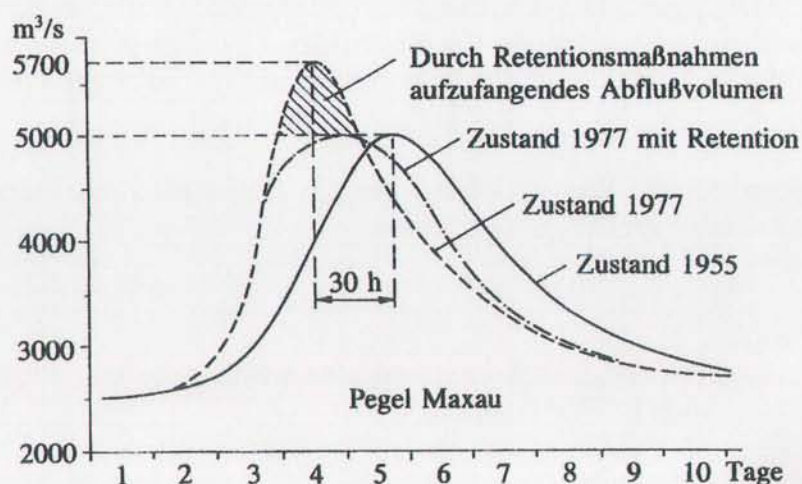


Abb. 6-6: Veränderungen des Wellenablaufs im Rhein und Wirkung der vorgeschlagenen Retentionsmaßnahmen (schematisch)

Die HSK hat 1978 Maßnahmengruppen mit einem maximalen Rückhaltevolumen von ca. 220 Mio. m³ vorgeschlagen. 1982 wurde ein Konzept mit einem Rückhaltevolumen von 226 Mio. m³ vertraglich vereinbart. Verzögerungen in der Realisierung und neue Gesichtspunkte haben einige Maßnahmen verändert, andere mussten ganz verworfen werden.

Hochwasserschutzmaßnahmen zur Wiederherstellung der Hochwassersicherheit des Jahres 1955, die ökologisch ausgerichtet sein sollten, führten zu neuen Vorschlägen, die im Vergleich zum früheren Konzept allerdings größere Überflutungsflächen bzw. Retentionsvolumina erforderten. Weitere Verbesserungen zur Hochwasserrückhaltung wurden in einer besseren Nutzung der vorhandenen oder einer Reaktivierung ehemaliger Überflutungsflächen gesehen. Hierbei wurde z.B. an steuerbare Polder, Deichrückverlegungen und Auenzüge gedacht.

Die Realisierung der Vorschläge und Planungen umfasst bis heute etwa die Hälfte des derzeit vorgesehenen Maßnahmenpaketes mit einem Rückhaltevolumen von rd. 290 Mio. m³.

Die Steuerstrategien für die Rückhaltemaßnahmen müssen grundsätzlich den Forderungen genügen,

- schadenbringende Hochwasser effizient zu vermindern,
- ökologische Schäden zu vermeiden bzw. die ökologische Gesamtsituation am Rhein und in den Poldern zu verbessern,
- nach Rückhaltung die Retentionsbereitschaft für mögliche Folgehochwasser wiederherzustellen.

In der Staustufenstrecke wird zusätzlich gefordert:

- Minimierung der bei Hochwasser-Rückhaltung eintretenden Energieproduktionsverluste der Flusskraftwerke
- Vermeidung von Schifffahrtsbehinderungen schon im Vorfeld der Hochwasser oder nach Durchlauf derselben

Die Regeln für den Einsatz der Rückhaltemaßnahmen sind das Ergebnis intensiver Simulationsrechnungen mit mathematischen Wellenablaufmodellen sowie bilateraler Festlegungen zwischen Frankreich und Deutschland. Dabei hat das nach Fertigstellung aller geplanten Retentionsmaßnahmen am Oberrhein zu beachtende Reglement das Ziel, 200-jährliche Hochwasser in ihren Scheiteln um 700 m³/s auf 5000 m³/s in Maxau bzw. um 800 m³/s auf 6000 m³/s in Worms zu reduzieren.

Für Abschätzungen der aus den Rückhaltungen am Oberrhein resultierenden Wirkungen auf Rheinhochwasser wurden drei Wege beschritten:

1. Es gibt historische Hochwasser, bei denen schon einsatzfähige Rückhaltemaßnahmen eingeleitet wurden.
Modellrechnungen für den Zustand ohne Maßnahmen lassen im Vergleich mit den Istwellen die erzielten Effekte erkennen.
2. Auf historische Extremhochwasser wurden die vorgesehenen Maßnahmen insgesamt angewendet.
3. Aus einer großen Anzahl historischer Ereignisse wurden Modellwellen mit 200-jährlichen Scheitelabflüssen in Maxau und Worms erzeugt und wie unter 2. mit allen vorgesehenen Maßnahmen gemäß festgelegter Steuerung beeinflusst.

Zu 1.: Es gibt inzwischen aus den Jahren 1988, 1990, 1999(Feb.) und 1999(Mai) vier historische Ereignisse, bei denen zwischen 25 und 70 Mio. m³ Retentionsvolumen eingesetzt wurden, was am Pegel Maxau die Hochwasserscheitel 1988 um 240 m³/s, 1990 um 230 m³/s, 1999(Feb.) um 290 m³/s und 1999(Mai) um 430 m³/s reduziert hat. Das entspricht Wasserstandsermäßigungen zwischen 20 und 34 cm, von denen am Niederrhein in Köln zwischen 2 und 12 cm als Scheitelreduktion nachweisbar waren. Mit Ausnahme des Ereignisses 1988 waren die genannten Hochwasser nur regional an Hoch- und Oberrhein bedeutsam, und die nur wenigen schon verfügbaren Maßnahmen sind gezielt auf Maxau eingesetzt worden. Insofern sind diese Wellen für den Gesamtrhein nicht repräsentativ; die erzielten Ergebnisse geben daher eher wichtige Hinweise. So zeigt sich z.B. die beachtliche Wirksamkeit gesteuerter Retention, die vor allem unmittelbar unterhalb der Staustufenstrecke des Rheins entfaltet wird. Durch die Rückhaltungen konnten wesentlich kurzzeitigere Deichbelastungen erreicht werden, wobei neben den direkt erkennbaren Scheitelsenkungen eine deutliche Verkürzung der Pumplaufzeiten und Verringerung der Pumphöhen zur Entwässerung des Hinterlandes erzielt werden konnten.

Zu 2.: Im Rahmen einer Untersuchung der IKSR (1999) wurden als Beispiele für große historische Hochwasser die Ereignisse Mai 1983, März 1988 und Januar 1995 ausgewählt. Das Ereignis Mai 1983 steht für ein Hochwasser, das vom Ober- bis Niederrhein Jährlichkeiten zwischen 20 und 25 Jahren aufweist. Im März 1988 sind im Mittelrhein mit knapp 100-jährlichen Scheitelabflüssen die höchsten dort historisch gemessenen Wellen abgelaufen. Unterhalb der Moselmündung ergaben sich jedoch nur weniger bedeutende Scheitel (Köln ca. HQ15). Im Januar 1995 ist am Niederrhein das bedeutendste Hochwasser des 20. Jahrhunderts eingetreten (in Köln zwischen HQ45 und HQ70), welches aber am Oberrhein mit Jährlichkeiten von 5 bis 15 Jahren sehr klein war.

Die Beeinflussung dieser Wellen durch die Gesamtmaßnahmen führt zu sehr unterschiedlichen Resultaten.

Das auch am Oberrhein mit 20-jährlichem Scheitelabfluss große Ereignis 1983 wird in Köln noch mit 75 % des am Pegel Worms erreichten Betrages abgemindert. Das erst unterhalb der Moselmündung sehr große Ereignis 1995 wird in Köln dagegen nur noch mit 20 % des Reduktionsbetrages in Worms gedämpft. Die Ergebnisse des HW 1988 wiederum liegen in ihrer Wertung dazwischen (Tab. 6-9).

Tab. 6-9: Rechnerische Scheiteldifferenzen infolge Reduktion durch Rückhaltungen am südlichen Oberrhein bezogen auf drei extreme historische HW unterschiedlicher Genese

Pegel	Ereignis	Differenzen der Scheitel (ohne/mit Maßnahmen)	
		$\Delta Q \text{ m}^3/\text{s}$	$\Delta W \text{ cm}$
Worms	Mai 1983	250	21
	März 1988	170	13
	Jan 1995	60	6
Köln	Mai 1983	190	12
	März 1988	100	6
	Jan 1995	50	3

Zu einem ähnlichen Ergebnis kam eine Studie der BfG (Lammersen et al., 1999). Hier wurde eine Serie von 35 historischen Hochwassern untersucht. Bei einer mittleren Schei-

telreduktion von $72 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Köln schwankte die Wirkung der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein auf die Abflüsse bei Köln zwischen 0 und $283 \text{ m}^3/\text{s}$. Auch hier wurde deutlich, dass die Wirkung sehr stark von der Hochwassergenese im Einzugsgebiet abhängt.

Zu 3.: Simulationsrechnungen mit Modellhochwassern 200-jährlicher Scheitelhöhen in Maxau und Worms (IKSR, 1999) zeigen nach Einsatz aller Rückhaltemaßnahmen zwischen Basel und Maxau Reduzierungen der Wellen längs der kompletten Rheinstrecke. Diese sind entsprechend der unterschiedlichen Abflussentwicklung stromabwärts allerdings mit großer Streuung behaftet.

Bei 200-jährlichen Ereignissen am Oberrhein sind für die Hochwasserscheitel am Pegel Kaub Abflussreduzierungen von maximal $1210 \text{ m}^3/\text{s}$ (entsprechend ca. 100 cm), minimal $660 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Mittel $890 \text{ m}^3/\text{s}$ möglich. Für den Niederrhein (Pegel Köln) betragen die Abflussreduzierungen maximal $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, minimal $520 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Mittel $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Dies entspricht maximalen Wasserstandssenkungen um ca. 60 cm in Köln und ca. 40 cm in Lobith (im Mittel 45 bzw. 30 cm).

Die Vergleichswerte für den Pegel Worms, der stellvertretend für das Oberrheinregime herangezogen werden kann, betragen $1230 \text{ m}^3/\text{s}$ als Maximum, $670 \text{ m}^3/\text{s}$ als minimale Abminderung und im Mittel $890 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vergleichbare Untersuchungen der BfG mit Modellhochwassern für den Niederrhein, bei denen 200-, 500- und 1000-jährliche Scheitelhöhen bei Rees am Niederrhein erreicht wurden, zeigen, dass auch bei diesen extremen Hochwassern die Wirkung der Maßnahmen am Oberrhein sehr stark von der Hochwassergenese abhängt. Die Spannweite reicht von deutlichen Verminderungen (z.T. über $1000 \text{ m}^3/\text{s}$) bei Hochwassern aus dem Oberrheingebiet bis zu keinerlei Auswirkungen für Hochwasser, die vor allem im Einzugsgebiet unterhalb des Mains entstehen (Lammersen et al., 1999).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei großen Rheinhochwassern, sofern deren Scheitel vom Oberrhein bestimmt werden, rund 80 % der am Oberrhein erzielten Scheitelreduktion auch am Niederrhein wirksam sind. Dagegen werden besonders niederrheinlastige Hochwasser (Entstehung vor allem im Moselgebiet) durch die Steuerungsvorgaben mit Rückhaltungen am Oberrhein kaum abgemindert (siehe HW 1995). Die Scheitel von Hochwassern, die nicht hauptsächlich am Oberrhein entstehen, werden zudem häufig durch die stromabwärts folgenden Nebenflüsse bestimmt. D.h., die Scheitel können vor oder nach dem Oberrheinscheitel liegen und damit vor oder nach dem durch Maßnahmen verringerten Ganglinienbereich. Dadurch können die scheitelwirksamen Reduktionen für den Mittel- und Niederrhein prozentual erheblich kleiner ausfallen als vorstehend angegeben. Ob also die Reduktionsmaßnahmen zu bestimmten Anteilen scheitelwirksam werden, hängt von der Hochwassergenese ab, d.h. von dem Zusammenspiel der verschiedenen Teileinzugsgebiete des Rheins.

6.3.2 Einfluss der Retentionsmaßnahmen nördlich von Maxau

Die Wirkung der Retentionsmaßnahmen wurde an den folgenden drei Modellhochwassern untersucht:

- M95 Extremereignis
- M95+ Extremereignis basierend auf M95 mit 20 % mehr Niederschlag
- M95++ Extremereignis wie M95+ mit Schneerücklage

Eine Beschreibung der Modellhochwasser findet sich in Kap. 5.1.

Zur Bewertung des Retentionseinflusses wird jeweils ermittelt, welche der berücksichtigten Maßnahmen zum Einsatz kommen, welche Wirkung diese an einzelnen Pegeln haben und welche Volumina insgesamt zurückgehalten werden. Darüber hinaus werden anhand des MHQ Änderungen im Scheitelsbereich der Welle betrachtet, insbesondere ob sich die Überschreitungsdauer für MHQ verkürzt/verlängert hat und ob die Wasservolumina über diesem Schwellenwert reduziert/erhöht werden. Eine Reduzierung hat positive Auswirkungen auf die Einsatzdauer von Pumpen der Polderentwässerung und die Beanspruchung der Deiche.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Landnutzungsszenarien sind gering, so dass im Folgenden der Grundzustand (IST92) dargestellt wird.

Zum Einfluss der Retention auf unterschiedliche Landnutzungsszenarien siehe Kap. 6.4.

Tab. 6-10 gibt einen Überblick über die Wirkung an allen ausgewählten Rheinpegeln.

Tab. 6-10: Einfluss der Retentionsmaßnahmen - Übersicht aller Pegel

Pegel	Maximale Abflussreduzierung	Maximale Wasserstandsreduzierung	Scheiteldifferenzen			Grenzwertbetrachtung MHQ	
			Q	W	Zeitdifferenz	Volumenreduzierung	Veränderung der Dauer
	[m³/s]	[cm]	[m³/s]	[cm]	[h]	[Mio. m³]	[Min.]
M95/IST92							
Worms	24	1	5	0	-1	0.78	-10 (kürzer)
Mainz	15	1	0	0	-1	0.79	-21 (kürzer)
Kaub	22	2	21	2	1	2	8 (länger)
Andernach	21	1	21	1	0	3	20 (länger)
Köln	76	5	21	1	0	3	20 (länger)
Rees	137	7	52	4	0	13	90 (länger)
Lobith	277	10	95	3	-5	-	-
M95+/IST92							
Worms	194	18	79	10	5	30.8	-12 (kürzer)
Mainz	142	7	129	8	5	20.2	0
Kaub	130	10	118	9	2	21.4	16 (länger)
Andernach	123	7	110	6	-1	21.6	0
Köln	122	6	114	6	-1	21.8	0
Rees	228	9	101	3	-1	33.5	86 (länger)
Lobith	300	10	101	3	-1	-	-
M95++/IST92							
Worms	183	19	150	17	6	30	32 (länger)
Mainz	150	8	145	7	-2	16.8	-22 (kürzer)
Kaub	144	11	142	11	-3	17.9	-5 (kürzer)
Andernach	139	8	139	8	0	17.8	-4 (kürzer)
Köln	139	7	115	6	-1	17.9	-4 (kürzer)
Rees	248	12	94	3	-2	30	82 (länger)
Lobith	428	15	93	3	-2	-	-

Anmerkung: Eine negative Zeitdifferenz bedeutet ein späteres Eintreffen der Welle am Pegel.

6.3.2.1 Modellhochwasser M95

Bedingt durch die zu wenig extremen Scheitelhöhen ($< 4500 \text{ m}^3/\text{s}$ oberhalb der Neckarmündung, $< 4800 \text{ m}^3/\text{s}$ unterhalb der Neckarmündung) kommen die Retentionspolder am Oberrhein nicht zum Einsatz. Lediglich die Deichrückverlegungen reduzieren die Hochwasserwelle im ansteigenden Ast um bis zu $15 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Mainz (siehe Tab. 6-10). Dies entspricht einer Wasserstandserniedrigung um 1 cm . Die Dauer der Überschreitung von $\text{MHQ} = 4040 \text{ m}^3/\text{s}$ ist um 21 Minuten verkürzt, die Fülle um $0,79 \text{ Mio. m}^3$ verringert, der Scheitel der Welle am Pegel Mainz trifft 1 Stunde später ein.

Abb. 6-7 zeigt den Wellenverlauf in Mainz mit und ohne Retention. Es ist zu beachten, dass die Wellen infolge des großen Maßstabes optisch zur Deckung gelangen. Zur Verdeutlichung der Situation sind die Differenzbeträge (IST92: ohne - mit) gesondert als Ganglinie aufgetragen.

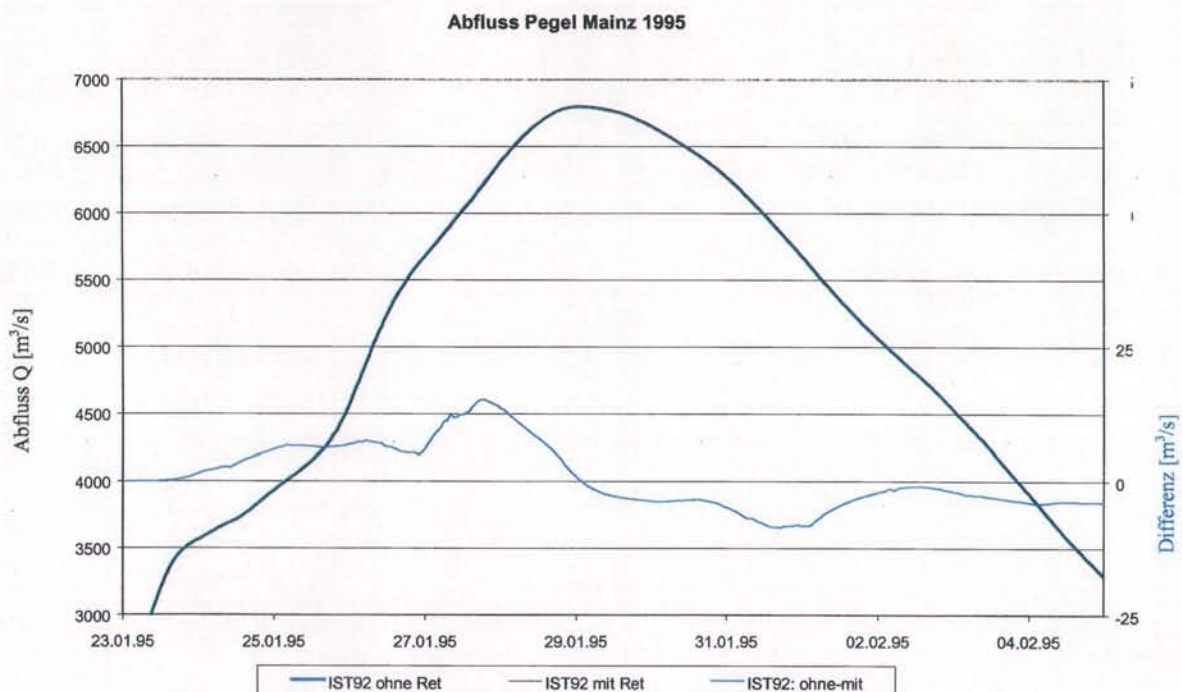


Abb. 6-7: Abfluss am Pegel Mainz mit und ohne Retentionsmaßnahmen (nur Deichrückverlegungen)

Der unterhalb von Mainz gelegene Polder Ingelheim hält $2,8 \text{ Mio. m}^3$ zurück, das Gesamtvolumen der Hochwasserwelle am Pegel Mainz beträgt 14 Mrd. m^3 .

Am Niederrhein zeigen neben den Deichrückverlegungen alle Retentionspolder (Köln-Langel, Köln-Worringen, Lohrwardt, Ilverich und Bylerward) eine Wirkung. Insgesamt wird in den Retentionspoldern zwischen Maxau und Lobith ein Volumen von 35 Mio. m^3 zurückgehalten, so dass vom zur Verfügung stehenden Retentionsvolumen nur 32% beansprucht wurden. Nach Ablauf der Welle verbleiben noch $1,6 \text{ Mio. m}^3$ in den Polderräumen.

In Rees kann durch den Einsatz der Retentionsmaßnahmen das Wasservolumen über MHQ um 13 Mio. m^3 reduziert werden, wobei sich die Überschreitung von MHQ um 1,5 Stunden verlängert.

Die Gesamtwirkung aller Maßnahmen zwischen Maxau und der deutsch-niederländischen Grenze ist in Abb. 6-8 für den Pegel Lobith dargestellt (für Lobith liegen keine MHQ-Werte vor).

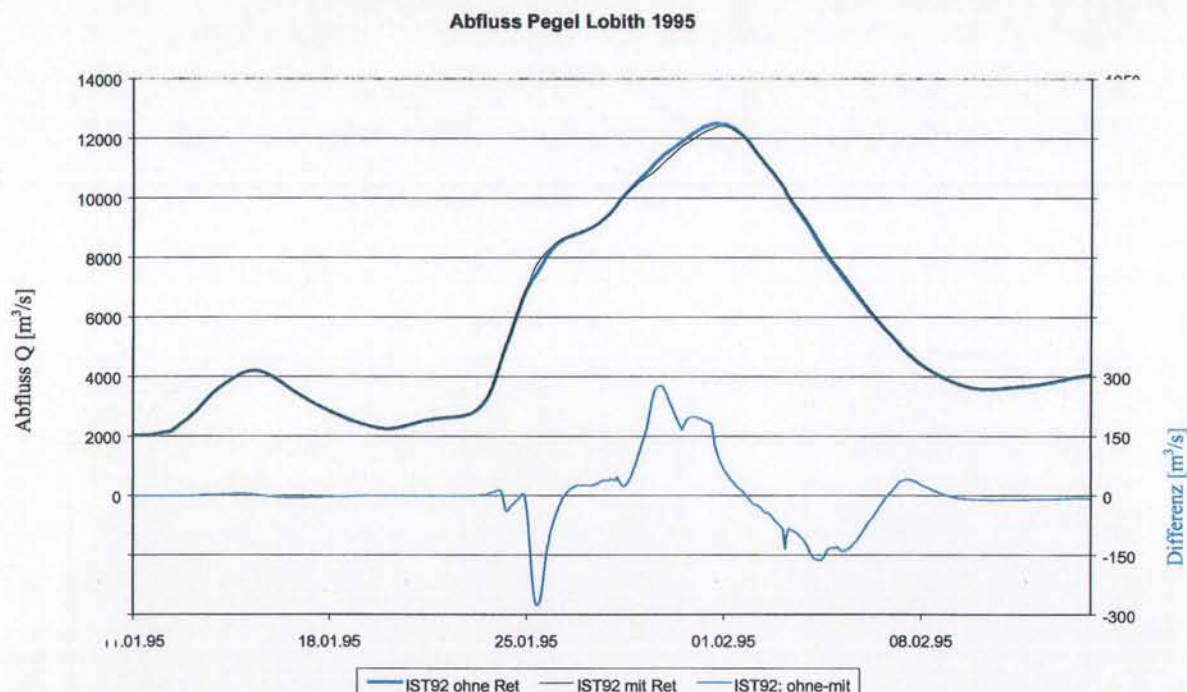


Abb. 6-8: Abfluss am Pegel Lobith mit und ohne Retentionsmaßnahmen

Die maximale Reduktion beträgt $277 \text{ m}^3/\text{s}$, im Scheitel sind es $95 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Scheitel trifft durch den Einsatz der Retentionsmaßnahmen fünf Stunden später in Lobith ein. Die maximale Wasserstandsreduktion in Lobith beträgt im ansteigenden Ast der Welle 10 cm, im Scheitel 3cm.

6.3.2.2 Modellhochwasser M95++ - Extremereignis mit Schneerücklage

Im Vergleich zu dem Modellhochwasser M95 werden die Scheitelwerte an den einzelnen Pegeln deutlich erhöht. Dies hat zur Folge, dass alle Maßnahmen, die - mit Ausnahme des Polders Bodenheimer-Laubenheim - im Modell berücksichtigt sind, zum Einsatz kommen.

Abb. 6-9 zeigt die Wirkung der Retentionsmaßnahmen am nördlichen Oberrhein auf den Abfluss am Pegel Kaub. Dieser Pegel wurde ausgewählt, da stromab bis Köln keine weiteren Maßnahmen mehr folgen und somit die Wirkung aller betrachteten Oberrhein-Maßnahmen dargestellt werden kann.

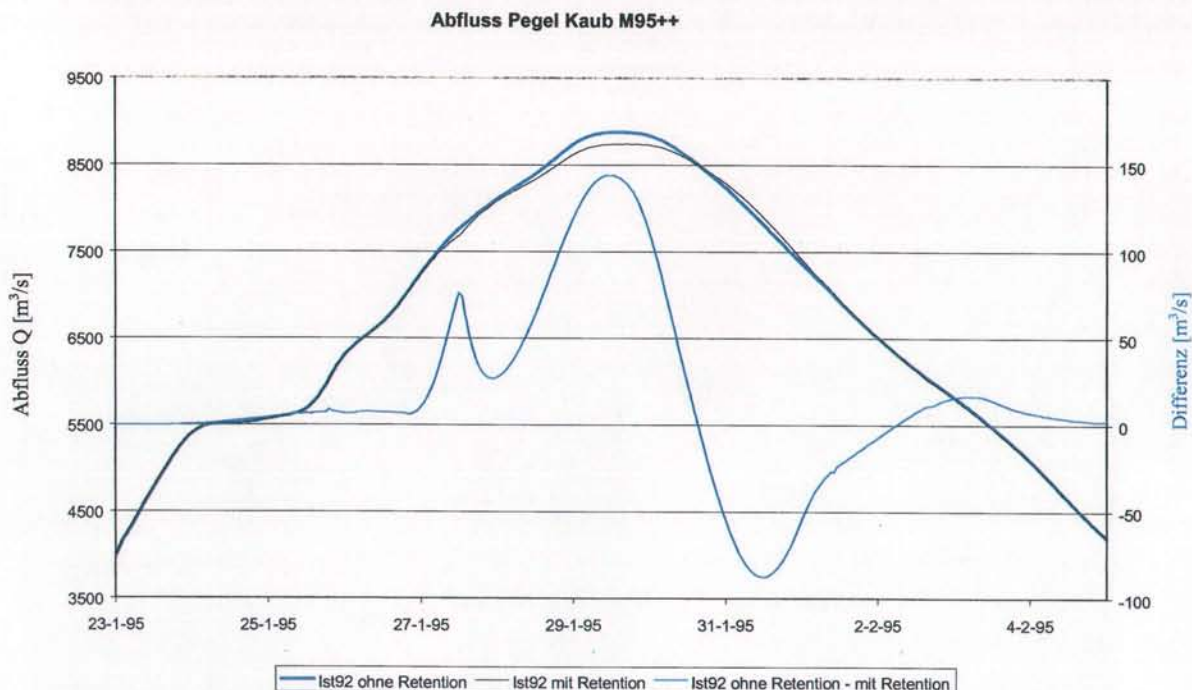


Abb. 6-9: Wirkung der Retentionsmaßnahmen am nördlichen Oberrhein (M 95 ++), Abfluss am Pegel Kaub mit und ohne Retentionsmaßnahmen

Tab. 6-11 gibt für die Pegel Kaub und Lobith einen Überblick über die Wirkung der Retentionsmaßnahmen.

Tab. 6-11: Wirkung der Retentionsmaßnahmen (M 95++)

	Kaub	Lobith
Maximalwerte		
Maximale Reduzierung im Abfluss [m^3/s]	144	428
Maximale Reduzierung im Wasserstand [cm]	11	15
Scheiteldifferenzen		
Q [m^3/s]	142	93
W [cm]	11	3
Zeitdifferenz [h]	3	2
Retentionsvolumen		
Retentionsvolumen der Polder [Mio. m^3]	45	88
Restvolumen im Polder [Mio. m^3]	21	20
Schwellenwert MHQ		
Volumenreduzierung über MHQ [Mio. m^3]	18	-
Veränderung der Dauer [Min.]	4	-

Bei dem Vergleich der Scheiteldifferenzen und der maximalen Differenzen am Pegel Kaub wird deutlich, dass die Wirkung sehr genau auf den Scheitel der Hochwasserwelle trifft.

Wie bereits in Kap. 5.4 beschrieben, bestehen zwischen den Einsatzkriterien der Maßnahmen an Ober- und Niederrhein wesentliche Unterschiede.

Am Oberrhein werden die Regelungsorgane (Schütze, Klappen) erst ab einem festgelegten Abfluss aktiviert. Bedingt durch die aufgebaute Druckhöhe wird ein rasches Einströmen des Wassers möglich. Die Maßnahmen sind so aufeinander abgestimmt, dass sich ihre Wirkung überlagert. Bei dem hier betrachteten Ereignis wirken sich die Maßnahmen direkt auf den Wellenscheitel aus, wobei sich die erreichte Reduzierung bis in die Niederlande bemerkbar macht. Die Rückhaltemöglichkeiten werden am Oberrhein aber nicht vollständig genutzt.

Am Niederrhein sind die Maßnahmen in ihrer Wirkung dagegen nicht auf den Scheitel beschränkt. Sie setzen früher ein und dauern auch über den Scheitelbereich hinaus. Die Becken am Niederrhein kommen vollständig zum Einsatz.

Die Wirkung aller Retentionsmaßnahmen in der untersuchten Modellstrecke soll am Pegel Lobith gezeigt werden, wobei die unterschiedlichen Maßstäbe zu beachten sind (Abb. 6-10).

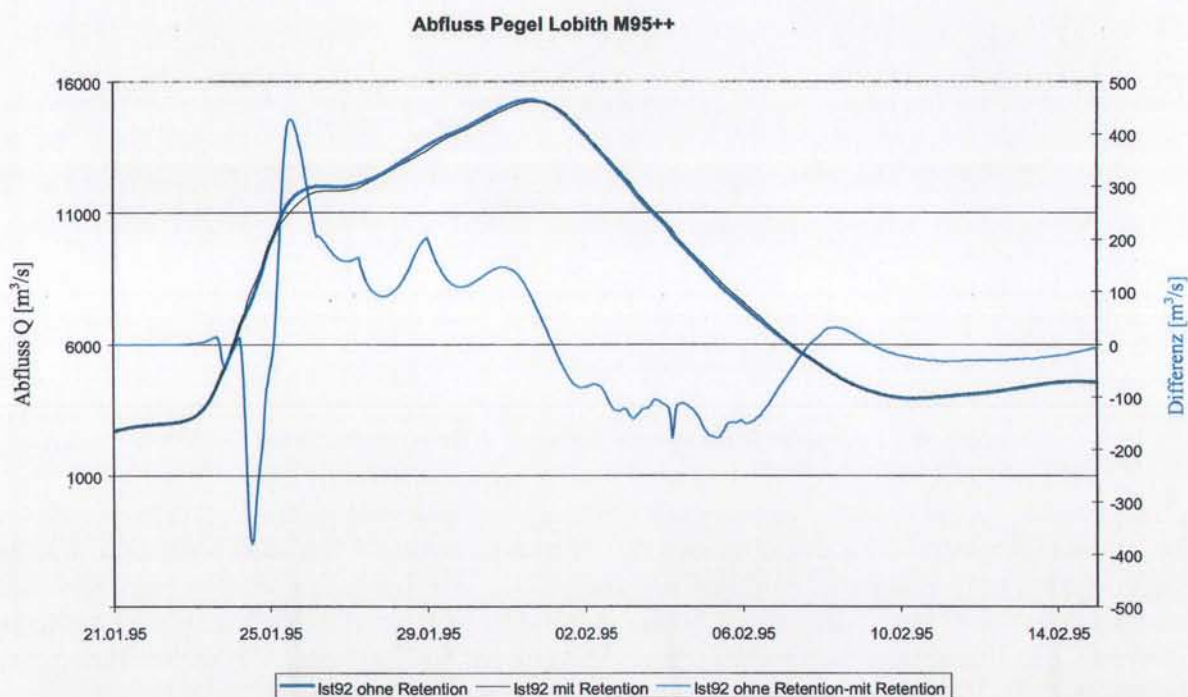


Abb. 6-10: Wirkung aller Retentionsmaßnahmen (M95 ++) am Pegel Lobith

Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes sollen im Folgenden die einzelnen Polder differenzierter betrachtet werden.

Während der Polder Bodenheimer- und Laubheimer nicht zum Einsatz kommen, werden die Rückhaltemöglichkeiten oberhalb der Neckarmündung (Wörth/Jockgrim/Neupotz, Elisabethenwört, Rhein-schanzinsel, Flotzgrün, Kollerinsel, Waldsee/Altrip/Neuhofen) nur teilweise genutzt. Bei diesen Becken wird das Startkriterium (Abfluss an der Neckarmündung $> 5200 \text{ m}^3/\text{s}$) lediglich für kurze Zeit überschritten. Der Abfluss im Gewässer direkt am Zuflussort zur Rückhaltemöglichkeit (Polder), der gleichfalls ein Startkriterium ist, liegt überall unterhalb $4500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Abb. 6-11 verdeutlicht dies am Beispiel des Polders Rheinschanzinsel. Bei einem - nur im ersten Augenblick größter Druckhöhe auftretenden - Abfluss von $67 \text{ m}^3/\text{s}$ würde der Polder innerhalb von 25 h vollständig gefüllt sein. In Wirklichkeit geht der Füllvorgang jedoch wesentlich langsamer vor sich. Bei einem mittleren Abfluss von $25 \text{ m}^3/\text{s}$ würde eine vollständige Beckenfüllung $68 \text{ h} = 2,8 \text{ Tagen}$ benötigen. Der festgelegte Schwellenwert von $5200 \text{ m}^3/\text{s}$ an der Neckarmündung wird aber lediglich für 23 h überschritten. Eine vollständige Polderfüllung ist deshalb unter diesen Voraussetzungen nicht möglich.

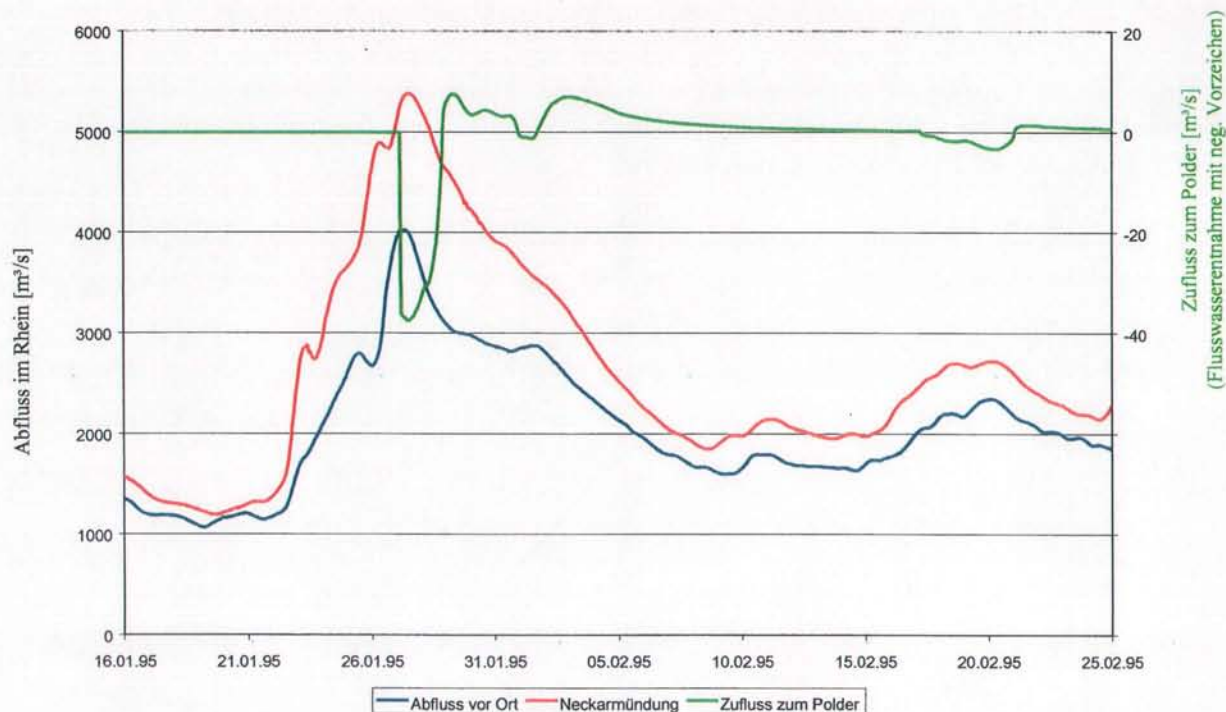


Abb. 6-11: Polderfüllung am Beispiel Rheinschanzinsel (M95++)

Der Polder Mechtersheim, der oberhalb der Neckarmündung liegt, aber über den Abfluss am Pegel Worms gesteuert wird, wird vollständig gefüllt. Wie bei dem Ereignis M95 wird der Polder Ingelheim ebenfalls vollständig gefüllt. Grund hierfür ist der Neckar; dieser bewirkt eine Erhöhung des Ereignisses von HQ10 (Pegel Maxau) auf HQ70 (Pegel Worms), mit den weiteren Zuflüssen (z.B. Main) bewirkt dies ein Anspringen dieser Maßnahme.

Im Vergleich zu Modellrechnungen, basierend auf Hochwassereignissen mit Jährlichkeiten von 200 Jahren (Schieder, 2001) am Pegel Andernach, fallen die geringeren Reduzierungen am Pegel Lobith auf (Abb. 6-8). Der Grund hierfür liegt darin, dass die Becken am Niederrhein schon gefüllt sind, obwohl die Welle noch nicht ihr Maximum erreicht hat. Am Beispiel des Polders Bylerward soll dies verdeutlicht werden (Abb. 6-12).

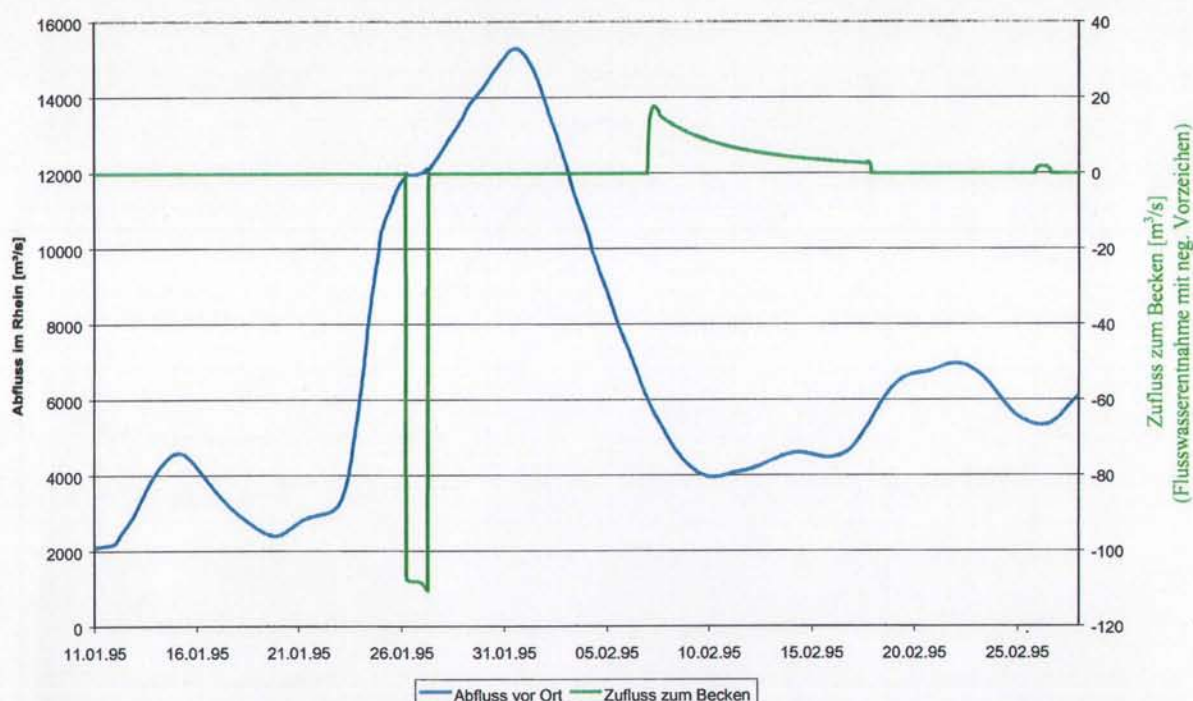


Abb. 6-12: Polderfüllung am Beispiel des Polders Bylerward (M95++)

6.3.2.3 Modellhochwasser M95+ - Extremereignis ohne Schneerücklage

Da bei diesem Ereignis weniger Abfluss als bei M95++ an den einzelnen Pegeln auftritt, wird auch weniger Retentionsraum in Anspruch genommen.

Grundsätzlich treffen jedoch auch hier die Feststellungen zum Modellhochwasser M95++ zu, weshalb sich die Auswertung auf den Pegel Lobith beschränken kann.

Die Wirkungen der Maßnahmen sind in Tab. 6-12 und Abb. 6-13 dargestellt.

Tab. 6-12: Wirkung der Retentionsmaßnahmen, Pegel Lobith (M95+)

Maximale Reduzierung	Q	300 m ³ /s
	W	10 cm
Scheiteldifferenz	Q	101 m ³ /s
	W	3 cm
Zeitdifferenz		1 h (Welle trifft später ein)
Retentionsvolumen der Polder		83 Mio. m ³ (= 75% des zur Verfügung stehenden Volumens)

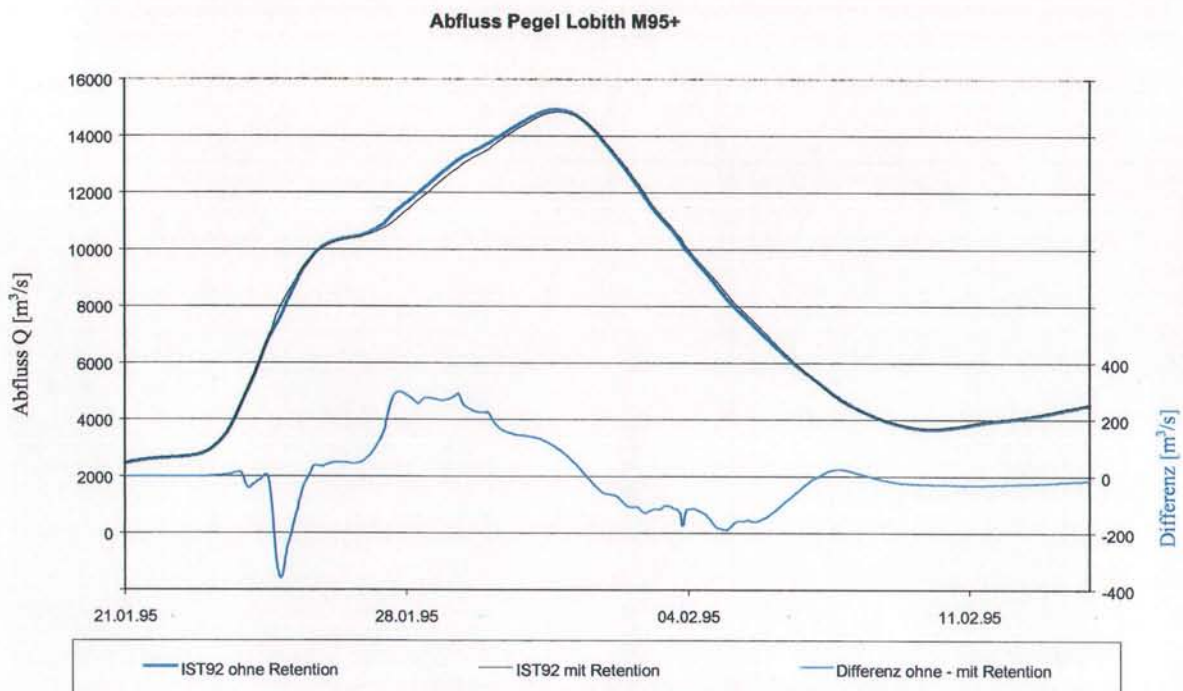


Abb. 6-13: Retentionsmaßnahmen Pegel Lobith (M95+)

6.4 Einfluss der Landnutzung und der Retentionsmaßnahmen auf den Wellenablauf

Um die kombinierte Wirkung der unterschiedlichen Landnutzung und der Retentionsmaßnahmen zu quantifizieren und mit den Einzelwirkungen vergleichen zu können, wurden folgende Kombinationen untersucht:

Modellhochwasser M95 in Kombination mit
Szenario „Ohne Retentionsmaßnahmen mit der Landnutzung IST92“ verglichen mit den
Szenarien „Berücksichtigte Retentionsmaßnahmen mit der Landnutzung LN1, LN2,
LN100 und LNW“.

Extremereignis ohne Schneeschmelze (M95+) in Kombination mit
Szenario „Ohne Retentionsmaßnahmen mit der Landnutzung IST92“ verglichen mit den
Szenarien „Berücksichtigte Retentionsmaßnahmen mit der Landnutzung LN1, LN2,
LN100 und LNW“.

Extremereignis mit Schneeschmelze (M95++) in Kombination mit
Szenario „Ohne Retentionsmaßnahmen mit der Landnutzung IST92“ verglichen mit den
Szenarien „Berücksichtigte Retentionsmaßnahmen mit der Landnutzung LN1, LN2,
LN100 und LNW“.

Das Ergebnis der Kombinationsszenarien „Landnutzungsänderungen plus Retention“ ist, dass sich die Auswirkungen der Einzelmaßnahmen linear überlagern lassen.

In allen Fällen konnten die kombinierten Auswirkungen auf den Hochwasserscheitel durch einfache Addition der Differenzen, die jeweils einzeln durch die Landnutzungsänderungen und durch die Retentionsmaßnahmen hervorgerufen wurden, ermittelt werden. Diese Superposition ist allerdings nur möglich, weil die Landnutzungsänderungen LN1, LN2 und LN100 keine sehr großen Veränderungen in Form und Volumen der Hochwasserwellen bewirkt haben, so dass die Retentionsmaßnahmen praktisch identisch reagieren konnten. Bei dem stark scheitelreduzierenden Landnutzungsszenario LNW (völlige Bewaldung) wäre es denkbar gewesen, dass sich die Einflüsse nicht linear überlagern. Da jedoch bei diesem Szenario die Retentionsmaßnahmen nur einen sehr geringen Effekt auf den Scheitel ausüben, ist auch hier eine Addition der Werte möglich.

Der kombinierte Einfluss von Retention und Landnutzung auf den Wellenscheitel hinsichtlich Wasserstands- bzw. Abflussänderung wird in Tab. 6-13 und Tab. 6-14 für die drei oben angegebenen Hochwasserszenarien dokumentiert. In Klammern stehen jeweils die Werte, die sich aus den Einzelrechnungen „Landnutzungsänderungen“ und „Retentionsmaßnahmen“ ergeben haben.

Tab. 6-13: Wasserstandsänderungen des Hochwasserscheitels in cm aufgrund des kombinierten Einflusses von verschiedener Landnutzung und Retention für ausgesuchte Rheinpegel (negative Werte bedeuten geringere Wasserstände als beim Ausgangszustand IST92)

(Die Werte in Klammern beziehen sich auf die Einzelwirkungen **Landnutzung** und **Retention**)

Pegel	Differenz zu IST92	M95	M95+	M95++
Worms	LN1	0 (0 / 0)	-10 (0 / -10)	-16 (0 / -16)
	LN2	0 (-1 / 0)	-9 (0 / -10)	-16 (1 / -17)
	LN100	0 (1 / -1)	-10 (-1 / -9)	-15 (1 / -16)
	LNW	-23 (-23 / -1)	-16 (-14 / -1)	-34 (-23 / -11)
Kaub	LN1	-1 (1 / -2)	-8 (1 / -9)	-9 (2 / -11)
	LN2	-1 (1 / -2)	-8 (1 / -9)	-9 (1 / -11)
	LN100	5 (7 / -3)	-3 (6 / -8)	-3 (9 / -11)
	LNW	-77 (-77 / 0)	-42 (-41 / -1)	-63 (-54 / -10)
Ander- nach	LN1	0 (1 / -1)	-5 (1 / -6)	-6 (1 / -8)
	LN2	-1 (0 / -1)	-6 (1 / -6)	-7 (1 / -8)
	LN100	5 (7 / -2)	-1 (5 / -6)	-2 (6 / -8)
	LNW	-89 (-89 / 0)	-38 (-37 / -1)	-54 (-47 / -7)
Köln	LN1	0 (2 / -1)	-5 (1 / -6)	-4 (2 / -6)
	LN2	-1 (0 / -1)	-5 (1 / -6)	-5 (1 / -6)
	LN100	8 (9 / -2)	1 (7 / -6)	3 (9 / -7)
	LNW	-88 (-88 / 0)	-38 (-37 / -1)	-51 (-45 / -6)
Lobith	LN1	-2 (1 / -3)	-2 (1 / -3)	-2 (1 / -3)
	LN2	-2 (1 / -3)	-3 (1 / -3)	-2 (1 / -3)
	LN100	1 (5 / -3)	2 (6 / -3)	5 (8 / -3)
	LNW	-62 (-61 / -1)	-27 (-26 / -1)	-35 (-32 / -3)

Tab. 6-14: Abflussänderungen des Hochwasserscheitels in m^3/s aufgrund des kombinierten Einflusses von verschiedener Landnutzung und Retention für ausgesuchte Rheinpegel (negative Werte bedeuten geringere Abflüsse als beim Ausgangszustand IST92)

Pegel	Differenz zu IST92	M95	M95+	M95++
Worms	LN1	-5	-80	-149
	LN2	-2	-75	-145
	LN100	-3	-84	-147
	LNW	-303	-127	-281
Kaub	LN1	-6	-103	-120
	LN2	-15	-109	-126
	LN100	59	-34	-36
	LNW	-945	-531	-818
Ander- nach	LN1	1	-93	-114
	LN2	-14	-101	-124
	LN100	81	-24	-41
	LNW	-1350	-659	-948
Köln	LN1	7	-90	-80
	LN2	-12	-100	-97
	LN100	149	22	65
	LNW	-1486	-734	-988
Lobith	LN1	-58	-71	-49
	LN2	-74	-82	-70
	LN100	46	71	160
	LNW	-1833	-856	-1114

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Hochwasser und Überschwemmungen sind Naturereignisse, die aus einer Überlagerung meteorologischer, hydrologischer und gewässerhydraulischer Prozesse entstehen. Von entscheidender Bedeutung sind hierbei:

- die Zuführung von Luftmassen mit hohem Wassergehalt
- sehr starke Niederschläge
- die Art der Abflussentstehung im Einzugsgebiet
- die Überlagerung der Wellen aus den Teileinzugsgebieten im Hauptfluss
- der Wellenablauf im Fluss
- die Überschwemmung der Vorländer und flussnahen Bereiche

Das Hauptziel des LAHoR-Projekts lag in einer wissenschaftlich fundierten Abschätzung der Einflüsse von Landnutzungsänderungen und Ausbaumaßnahmen an den Gewässern auf die Hochwasserbedingungen im Einzugsgebiet des Rheins. Dabei wurden jedoch nicht spezifisch meteorologische und klimatologische Schwerpunkte sowie detailliertes Überschwemmungsverhalten untersucht.

Die Untersuchungen erfolgten auf drei Maßstabsebenen:

1. Untere Mesoskala

Detaillierte Modellierung der Prozesse der Abflussentstehung bei Starkniederschlagsperioden: Wie viel Wasser erreicht das Flusssystem in ausgesuchten Einzugsgebieten?

2. Untere bis obere Mesoskala

Vereinfachte Modellierung der Abflussentstehung und der Abflusskonzentration: Wie viel Wasser fließt mit welchem Konzentrationsverhalten dem Flusssystem in allen betrachteten Teileinzugsgebieten des Rheins zu?

3. Makroskala (Gesamtgebiet des Rheins zwischen Maxau und Lobith)

Verknüpfen der Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten und Modellierung des Wellenablaufs: Wie ist das Ablaufverhalten von Hochwasserwellen im Rhein und seinen großen Nebenflüssen, und welchen Einfluss haben darauf Ausbaumaßnahmen im und am Fluss?

Die dritte Maßstabsebene war Gegenstand der Untersuchungen der gekoppelten N-A- und Wellenablaufmodellierung für das Rheineinzugsgebiet nördlich von Maxau und ist damit Hauptanliegen dieses Berichtes.

Diese Verknüpfung der Gebietsabflüsse über Wellenablaufmodelle der wesentlichen Gewässer des Rheingebiets nördlich von Maxau zeigt:

- (1) Im Regelfall wirken sich die Abflussvergrößerungen bei Versiegelungszunahme und die Abflussverringerungen bei Entsiegelung/Bewaldung auf den Anstieg der Rheinhochwasser aus, wobei die Maximalwirkungen deutlich vor den Wellenscheiteln eintreten.

- (2) Bei den realistischen Landnutzungsänderungen sind geringe Effekte auf die Hochwasserscheitel in der Größenordnung von 1 bis 5 cm nachweisbar.
- (3) Aus dem Extremszenario mit Annahme völliger Bewaldung des Rheingebiets (Steigerung von derzeit 30 auf 100 %) ergibt sich für die eingesetzten Modellergebnisse im Hochwasseranstieg eine maximale Wellenreduktion in Lobith um 1 m. Der Scheitel wird im Mittel um ca. 1/2 m reduziert. Dieser starke Einfluss ist etwa jeweils zur Hälfte auf die erhöhte Verdunstungsleistung des Waldes (Austrocknung des Bodenspeichers) und die Nichtexistenz von Urbanflächen zurückzuführen. Daraus lässt sich allerdings keine Abschätzung der Hochwasserentwicklung für eine realistische Bewaldungszunahme (z.B. 30 auf 40 %) herleiten.
- (4) Der Reduktionseffekt aus der Bewaldung auf die Hochwasserwelle vermindert sich bei extremen Niederschlägen.
- (5) Bei höheren Niederschlägen verliert die Versiegelung für die Abflussbildung an Bedeutung.
- (6) Werden Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein eingesetzt, so ergeben sich unter den gegebenen Randbedingungen positive Wirkungen längs des Rheins bis nach Lobith. Die Scheitelminderungen betragen für die simulierten Ereignisse und Gebietszustände am Oberrhein bei Worms zwischen 0 und 16 cm, für den Mittelrhein bis zu 11 cm und im Niederrhein zwischen 1 und 6 cm.
- (7) Die Untersuchungen hinsichtlich der Retentionsmaßnahmen haben gezeigt, dass abgestimmte Steuerungen von Rückhaltungen z.B. am Oberrhein die Dämpfungseffekte auf die Hochwasserscheitel erheblich steigern können.

Anhand der Ergebnisse des LAHoR-Projekts können folgende Aussagen und Empfehlungen getroffen werden:

- (1) Das hier vorgestellte und in dieser Form erstmals eingesetzte Modellsystem eignet sich mit seinem interdisziplinären und skalen-spezifischen Ansatz gut für die Untersuchung der Wirkung von Landnutzungsänderungen und Ausbaumaßnahmen auf die Hochwassersituation im Rheingebiet.
- (2) Landnutzungsänderungen haben vor allem Auswirkungen auf die Entstehung kleinräumiger Hochwasser. Sie zeigen dagegen bei Maßnahmen realistischer Größenordnung im gesamten Rheineinzugsgebiet großräumig kaum Effekte. Von der Niederschlagsversickerung fördernden Maßnahmen der Landnutzung darf daher keine bedeutende Minderung des Hochwasserrisikos am Rhein und an seinen großen Nebenflüssen erwartet werden. Diese sollten aber begleitend zum lokalen Hochwasserschutz eingesetzt werden, insbesondere zur Minderung der Auswirkungen sommerlicher Gewitter. Die weiter zunehmende Urbanisierung, die sich vor allem bei heftigen Konvektionsniederschlägen räumlich begrenzt hochwasserverschärfend auswirkt, kann in ihrer Wirkung durch umfassende dezentrale Niederschlagsversickerung teilweise kompensiert werden.
- (3) Die Nutzung der vorhandenen und geplanten Retentionsstauräume sollte nach abgestimmten Einsatzvorschriften erfolgen, die fortlaufend zu aktualisieren sind.
- (4) Im Sinne eines Nachweisinstrumentariums für jedwede hochwasserbeeinflussende Maßnahme ist es wichtig, die Methoden zur Generierung typischer Modellhochwasser weiterzuentwickeln.

In diesem Sinne besteht Bedarf an weiteren Untersuchungen zu folgenden Themen:

- (1) Die Parametrisierung der Landnutzung in der oberen Mesoskala und Makroskala bzw. die Regionalisierung von experimentellen Erkenntnissen und von Modellansätzen aus der unteren Mesoskala.
- (2) Die Bedeutung der langfristigen Verdunstung für die Vorfeuchtebedingungen von Hochwasserereignissen unter Einbeziehung der Transpirationseigenschaften der Pflanzendecke.
- (3) Quantifizierung der mit dem interdisziplinären und skalenbezogenen Modellierungsansatz verbundenen Unsicherheiten.
- (4) Optimierung der Wellenablaufmodelle im Hinblick auf Grundwassereinflüsse.
- (5) Ermittlung genauer Abflusskapazitäten zwischen den Deichen.
- (6) Verfahrensoptimierung für die Generierung extremer Niederschläge.

Es hat sich einmal mehr die hohe Bedeutung von Messdaten und deren Zuverlässigkeit gezeigt. Es wird daher eindringlich auf den Bedarf und die Verfügbarkeit

- (1) räumlich hochaufgelöster physiographischer Gebietsdaten von großräumigen Szenarien der Landnutzungsentwicklung und von raumzeitlich hochaufgelösten meteorologischen Daten,
- (2) von physiographischen Daten der Talauen und
- (3) von Abfluss- und Wasserstandsdaten

hingewiesen.

Die bestehenden Messnetze müssen vom Grundsatz her unbedingt erhalten, z. T. auch ausgebaut werden.

8 Literaturverzeichnis

- Bardossy, D.; Bronstert, A.; Buiteveld, H.; Disse, M.; Engel, H.; Fritsch, U.; Hundecha, Y.; Lammersen, R.; Niehoff, D. und Ritter, N. (2001):** LAHoR -Quantification of the influence of land-cover and river training measures on the flood conditions at the Rhine river basin. Abschlussbericht eines Projektes im Rahmen der Interreg Rhein-Maas-Aktivitäten - IRMA- Förderkennziffer IRMA-Code3/DU/1/002, in englischer Sprache, Potsdam
- Bardossy, D.; Bronstert, A.; Buiteveld, H.; Disse, M.; Engel, H.; Fritsch, U.; Hundecha, Y.; Lammersen, R.; Niehoff, D. und Ritter, N. (2002):** LAHoR , Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. (Abschlussbericht eines Projektes im Rahmen der Interreg Rhein-Maas-Aktivitäten - IRMA- Förderkennziffer IRMA-Code3/DU/1/002), Bericht Nr. II-18 der Kommission für die Hydrologie des Rheineinzugsgebietes (Ed.), Lelystad
- Barneveld, H. J. und Meijer, D. G. (1997):** SOBEK-Model Andernach-Lobith, Model construction, calibration and verification, Final report of a cooperative project RIZA-BfG; 46S., Anlagen
- Bemmel, M.S. van und Rabbers, H.H. (2001):** Dike Realignments along the River Rhine. GIS schematizations in BASELINE for SOBEK modelling. Report 10033.1 Meander , Maarsen
- Bemmel, M.S. van und Meijer, D.G. (2001):** SOBEK model of the River Mosel from Cochem to the River Rhine. Model construction and calibration. Report 10036.1 - 99 15 183 01/3/NL/1/164, Meander, Maarssen
- Bergström, S. (1995):** The HBV-model. In: Computer Models of Watershed Hydrology (ed. by V.P. Singh), S. 443-476. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA
- Bronstert, A., Fritsch, U. und Katzenmaier, D. (2001):** Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten unter Berücksichtigung der aktuellen Bodenbearbeitung, des Zustandes der Vegetationsdecke und möglicher Klimaänderungen (Abschlussbericht eines Projektes im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 297 24 508), Potsdam
- Busch, N. (1995):** Auswirkungen des Mainausbaus zwischen Würzburg und Bamberg auf den Hochwasserablauf im Main, BfG-Bericht Nr. 1073, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Busch, N. und Engel, H. (1990):** Erstellung eines Mathematischen Modells zur Simulation von Hochwasserabläufen in der Mosel für die Zustände vor und nach Ausbau der Mosel zur Großschifffahrtsstraße, Bericht M1a/434.4/1990 vom 27. April 1990, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Busch, N., Chojetzki, U., Engel, H. und Gundert, P.J. (1994):** Wasserspiegellagenberechnungen am Rhein vom Pegel Köln bis zur deutsch-niederländischen Grenze, BfG-Bericht Nr. 862, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

- Busch, N., Chojetzki, U. und Engel, H. (1997):** Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnungen am Rhein vom Pegel Köln bis zur deutsch-niederländischen Grenze, Ergänzung zum BfG-Bericht Nr. 862, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Busch, N. und Rost, W. (2000):** Aktualisierte Bemessungswasserspiegellagen mit gewässerkundlichen Grundlagen für den Main in Hessen (Main-km 0 bis 77,1), BfG-Bericht Nr. 1261, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- CORINE Land cover (1997):** European Topic center on Land cover, Kiruna, Sweden
CSO-Adviesbureau voor Milieuonderzoek(1999): Baseline 3.1, Technische documentatie, rapport nummer 99340, 22 september 1999
- Delft Hydraulics and the Ministry of Transport, Public Works and Water Management (1997):** SOBEK, Technical Reference Manual
- Disse, M. und Hammer, M. (2000):** Zweidimensionale Abfluss- und Strömungsberechnung der Saar im Bereich des Wiltinger Bogens und in der Stauhaltung Schoden zur Festlegung der Überschwemmungsgrenzen an der Saar; Teil I: Hochwasserschutz der Ortschaft Schoden, BfG-Bericht Nr. 1277, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Disse, M. (2000):** Zweidimensionale Abfluss- und Strömungsberechnung der Saar im Bereich des Wiltinger Bogens und in der Stauhaltung Schoden zur Festlegung der Überschwemmungsgrenzen an der Saar; Teil II: Hochwasserschutz der Stadt Saarburg, BfG-Bericht Nr. 1278, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Dosch, F. und Beckmann, G. (1999):** Trends und Szenarien der Siedlungsflächenentwicklung bis 2010. In: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (ED.): Perspektiven der zukünftigen Raum- und Siedlungsentwicklung, 11, Berlin, S. 827-842
- Fioole, A. (1999):** De Achtergronden van het computerprogramma SURFIS. Deel d: SURFIS 40. RIZA werkdocument 98.123x (d) concept rapport
- Fritsch, U. (2002):** Entwicklung von Landnutzungsszenarien für die ökologische Modellierung (Dissertation an der Universität Potsdam), Brandenburgische Umweltberichte Heft 12, 150 S., Potsdam
- Giebel, H. und Hommes, A. (1994):** Zum Austauschvorgang zwischen Fluss- und Grundwasser - Fortführung der Auswertungen im Neuwieder Becken -; Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 38. Jg. Heft 1/2 S. 2-10, Koblenz
- Hoefsloot F., Immerzeel W.W., Pakes U. en Veen R.v.d. (1999):** GIS and Sobek Modelling, A manual for constructing Schematizations, RIZA-Werkdocument 99.121X
- Hoffmann, F. (1990):** Aufstellung eines Hochwasserablaufmodells für den deutschen Flussabschnitt der Saar im Zustand vor und nach Ausbau zur Schifffahrtsstrasse, interner Bericht der BfG

- Homagk, P. (1985):** Ermittlung von Steuerreglements für die Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein mit Hilfe von mathematischen Modellen. In: 1. Wissenschaftliche Tagung „Hydrologie und Wasserwirtschaft, Planung und Betrieb wasserwirtschaftlicher Maßnahmen“, 18. - 20. März 1985. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW) Universität Karlsruhe. S. H6-1 - H6-10
- IKSR (1997):** Hochwasserschutz am Rhein, Bestandsaufnahme, Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, Koblenz
- IKSR (1998a):** Rhein-Atlas, Ökologie und Hochwasserschutz, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz
- IKSR (1998b):** Aktionsplan Hochwasser, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz
- IKSR (1999):** Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz
- Ilse, J. (2001):** Instationäres Simulationsmodell Mainz-Andernach, Internes Arbeitspapier der BfG, Koblenz
- Immerzeel W. (2000):** Interpolation of cross-section elevation data, Main, Rhine and Neckar. Geodan Geodesie bv Amsterdam, project no. G0053
- Jablonski, A. (2001):** Aufbau, Kalibrierung und Validierung eines eindimensionalen hydrodynamisch - numerischen Wellenablaufmodells am Beispiel des Neckars, Diplomarbeit, Fachhochschule Koblenz
- KHR (1993):** Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen - Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft; Bericht Nr. I-11 der Kommission für die Hydrologie des Rheineinzugsgebietes (Ed.), Lelystad
- Lammersen, R.; Busch, N. und Engel, H. (1999):** Einfluss der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein; BfG-Bericht-1221, 36 S.; Anlagen, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Ludwig, K. (1996):** Wasserspiegellage und Strömungsgeschwindigkeit im Rhein zwischen Ifezheim und Mainz, Dr.-Ing. Karl Ludwig - Beratende Ingenieure Wasserwirtschaft-Wasserbau. Herausgeber: Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz
- Meijer, D.G., Overmars, K.P., Rabbers, H.H. and Weidema, P. (2000a):** Sobek Model of the River Main. Phase 1: Preparation of the model data and model construction. Project report no 1.011.1Meander and research, Maarssen
- Meijer, D.G., Overmars, K.P. and Weidema, P. (2000b):** Sobek Model of the River Main. Phase 2. Calibration and verification of the model. Project report no 1.011.1Meander and research, Maarssen
- Meijer D.G. and Weidema, P. (2001):** BASELINE and SOBEK support BfG. Summarizing report 10032.1- 38549/WSR. Meander, Maarssen

- Meijer, D.G., Overmars, K.P., and Weidema, P. (2001a):** Sobek Model of the River Main. Phase 3. Calibration and verification of the model. Project report no 1.011.1 Meander and research, Maarssen
- Meijer, D.G., Overmars, K.P., Rabbers, H.H. and Weidema, P. (2001b):** Sobek Model of the River Main from Würzburg to the River Rhein, Model construction, calibration and verification. Project report Meander and research, Final Report, report 10011.2. Meander, Maarssen
- Niehoff, D. (2002):** Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala (Dissertation an der Universität Potsdam), Brandenburgische Umweltberichte Heft 11, 144 S., Potsdam
- Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee (1999):** User's Guide WAQUA, Simona-Report 92-10. Arnheim
- Schieder, T. (2001):** Auswirkungen der Hochwasserrückhaltemaßnahmen am Niederrhein auf den Wellenablauf im Rhein zwischen Andernach und Lobith, Kalibrierung und Anwendung eines hydrodynamischen Modells. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- Weiland, M. (2001):** Aufbau, Kalibrierung und Validierung eines eindimensionalen hydrodynamisch - numerischen Wellenablaufmodells beispielhaft für den Rhein zwischen Maxau und Mainz, Diplomarbeit, Fachhochschule Koblenz
- Weidema P. (2000):** BASELINE support for LAHoR , Activities and findings. Meander, 1.018.1 Meander, Maarssen
- WWV (1997):** Verlauf des Rheins von Mainz bis Rolandswerth, Rhein-km 496 bis 632, Übersichtsdarstellung der Überschwemmungsgebiete im Maßstab 1:25000, Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Hessen und Rheinlandpfalz (Ed.)
- WWV und WSV (1994):** Verlauf des Rheins von Basel bis Mainz, Rhein-km 170 bis 500. Übersichtsdarstellung mit Hochwasserschutzsystemen im Maßstab 1:25000, Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg, Hessen und Rheinlandpfalz, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Ed.)