



**Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt
im Einzugsgebiet des Rheins**

**Estimation de l'impact de la rétention
des eaux dans le bassin du Rhin**



**Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
Commission Internationale pour la Protection du Rhin**

Impressum

Herausgeber/
Editeur: Internationale Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR)
Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR)
Postfach 20 02 53
D - 56002 Koblenz
Tel.: (49)-261-1 24 95
Fax: (49)-261-3 65 72
E-mail: iksr@rz-online.de <http://www.iksr.org>

Erscheinungsdatum/
Date de publication: März 1999
mars 1999

Projektgruppe Aktionsplan Hochwasser / Groupe de projet 'Plan d'action contre les inondations'

Beteiligte Dienststellen / Avec le concours des services suivants:

Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel; Direction Régionale de l'Environnement de Lorraine, Metz; Service de la Navigation de Strasbourg, Strasbourg; Direction Régionale de l'Environnement d'Alsace, SEMA, Horbourg-Wihr; Services Techniques de l'Agriculture, Luxembourg; Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn; Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz; Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart; Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf; Bundesministerium für Verkehr, Bonn; Rijkswaterstaat, Hoofddirectie van de Waterstaat, Den Haag; Rijkswaterstaat (RIZA), Lelystad; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directie Gelderland, Arnhem; Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag

Personen des Expertenkreises für die Ausarbeitung dieses Berichtes /

Membres du cercle d'experts ayant contribué à la rédaction de ce rapport:

Heinz Engel (Vorsitz/président), Martial Gerlinger, Dr. Andreas Meuser, Dr. Armin Petrascheck, Wim Silva, Dr. Anne Schulte-Wülwer-Leidig (Sekretariat/secrétariat)

VORWORT

Der Aktionsplan Hochwasser der IKSR sieht in den Rheinanliegerstaaten die Realisierung von Maßnahmen bis zum Jahr 2020 vor, um durch Hochwasserereignisse bedingte Schäden am Rhein deutlich zu reduzieren. Dieser Aktionsplan zielt speziell auf eine deutliche Minderung der Schadensrisiken und der Hochwasserstände ab. Die Verstärkung des Hochwasserbewußtseins und die Verbesserung des Hochwassermeldesystems stellen weitere wichtige Ziele der Hochwasservorsorge dar. Der vorliegende Bericht analysiert erstmals umfassend das Spektrum möglicher Verbesserungsmaßnahmen im äußerst wichtigen Teilbereich „Minderung der Hochwasserstände“ und bewertet dieses gebündelt in der „Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins“.

Bereits in ihren „Grundlagen und Strategien zum Aktionsplan Hochwasser“ vom Dezember 1995 weist die IKSR eine Reihe von Möglichkeiten aus, die geeignet sind, Hochwasserereignisse zu dämpfen. Diese Maßnahmen unterschiedlichen Charakters reichen von den Möglichkeiten des flächenhaften Wasserrückhaltes, des Rückhaltes im Gewässer und der Talaue bis hin zu dem technischen Hochwasserschutz mittels Rückhaltebecken und Talsperren. In ihren Leitsätzen zur Schadensbegrenzung bei Hochwasser erwartet die IKSR, dass alle diese Möglichkeiten im gesamten Rheineinzugsgebiet auch genutzt und ausgeschöpft werden.

Für den Aktionsplan Hochwasser der IKSR reichte diese qualitative Aneinanderreihung zu ergreifender Maßnahmen allerdings nicht aus. Vielmehr sollte darüber hinaus das Ziel, Hochwasserereignisse zu dämpfen, quantifiziert, d.h. mit konkreten Zahlenangaben untersetzt werden. Hierzu trug eine international zusammengesetzte Expertengruppe unter Leitung der Bundesanstalt für Gewässerkunde die verfügbaren Erkenntnisse über die Wirkung der verschiedenartigen Hochwasservorsorgemaßnahmen zusammen, wertete dieses Wissen für das Rheineinzugsgebiet aus und stellte diese Erkenntnisse für den gesamten Rheinlauf abschnittsweise systematisch zusammen. Damit betrat die IKSR Neuland. Erstmals konnte mit dieser Wirkungsabschätzung der komplexe Zusammenhang verschiedenartiger Maßnahmenbündel für das Abflussregime eines großen Stromes übersichtlich dargestellt werden, wobei die Machbarkeit zunächst unberücksichtigt blieb. Dabei wurde deutlich, dass die mit Abstand wirksamsten Maßnahmen zur Absenkung des Wasserspiegels bei Hochwasser in der Wiedergewinnung ehemals vorhandener Überschwemmungsgebiete in der Rheinaue bestehen. Darüber hinaus dürfen jedoch die vielfältigen abflusssdämpfenden und verzögernden Maßnahmen in der Fläche, die vornehmlich zur Verbesserung des Naturhaushaltes und der Landschaftspflege anzustreben sind, keinesfalls vernachlässigt werden.

Die vorliegende Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins wird mit der Zunahme der Erkenntnisse in der Wissenschaft und beim Vollzug des Aktionsplans Hochwasser der IKSR fortzuschreiben sein. Sie dient heute schon als wesentliche Grundlage für das wichtige Handlungsziel „Minderung der Hochwasserstände“ des Aktionsplans Hochwasser. Den Mitarbeitern in der Expertengruppe sei an dieser Stelle besonders gedankt.

PREFACE

Le Plan d'action contre les inondations élaboré par la CIPR prévoit la mise en œuvre de mesures jusqu'en 2020 dans les Etats riverains du Rhin, l'objectif étant de réduire sensiblement les dommages occasionnés par les inondations sur le Rhin. Au travers de ce plan d'action, on entend notamment limiter fortement les risques de dommages et les niveaux de crue. On peut également citer comme autres objectifs importants de prévention des crues ceux consistant à renforcer la prise de conscience face au risque d'inondation et à améliorer le système d'annonce des crues. Le présent rapport entreprend dans un premier temps une analyse générale de l'éventail des mesures d'amélioration envisageables dans le domaine particulièrement important de la « réduction des niveaux de crue » et procède dans un deuxième temps à une évaluation groupée de ces mesures dans un volet relatif à « l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin ».

Dans son document intitulé „Constat et stratégie pour le Plan d'action contre les inondations" de décembre 1995, la CIPR liste déjà une série de mesures susceptibles d'atténuer les inondations. Ces mesures très diversifiées vont de la rétention des eaux en surface aux mesures techniques de protection contre les inondations au moyen de bassins de rétention et de barrages, en passant par la rétention des eaux dans le cours d'eau même et dans la plaine alluviale. Dans ses principes directeurs visant à limiter les dommages dus aux inondations, la CIPR en appelle à tous pour que ces possibilités soient largement prises en compte sur l'ensemble du bassin du Rhin.

Cette énumération qualitative de mesures à prendre ne suffisait cependant pas pour le Plan d'action contre les inondations de la CIPR. L'objectif visé, à savoir atténuer les inondations, devait être quantifié, c'est-à-dire étayé par des chiffres concrets. Un groupe composé d'experts internationaux sous la direction de la Bundesanstalt für Gewässerkunde a donc rassemblé les connaissances disponibles sur les effets des différentes mesures de prévention des crues, les a évaluées pour le bassin du Rhin et exposées systématiquement pour chaque tronçon. La CIPR s'est engagée ici sur un nouveau terrain. Cette estimation de l'impact des mesures de rétention a permis pour la première fois de présenter clairement les relations complexes entre les mesures agissant sur le régime hydrologique d'un grand fleuve, sans toutefois aborder l'éventuelle faisabilité de ces mesures. Il s'est avéré que les mesures les plus efficaces pour abaisser le niveau des eaux en cas de crue étaient celles visant à reconquérir les anciennes surfaces inondables dans la plaine alluviale du Rhin. Il ne faut toutefois en aucun cas négliger les différentes mesures s'appliquant sur les surfaces et qui ont pour effet de réduire et de retarder les débits tout en contribuant également à améliorer l'équilibre naturel et l'aménagement du paysage.

Le présent document sur l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin devra être actualisé au fil des connaissances supplémentaires que l'on pourra acquérir au niveau scientifique et dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action contre les inondations de la CIPR. Il constitue dès à présent une base essentielle pour atteindre l'un des principaux objectifs opérationnels, à savoir celui d'„abaisser les niveaux de crues". Nous adressons tous nos remerciements aux experts réunis au sein de ce groupe.

VORWORT

PREFACE

Gliederung / Structure

	Seite / page
I Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	6
◆ Grafiken zur Hochwassergenese (Umschlagrückseite)	
◆ Matrix zur Wirkungsabschätzung von Maßnahmenbündeln	
◆ Forschungsbedarf	
I bis Résultats de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin	11
◆ Graphiques sur la genèse des crues (dernière page de la couverture)	
◆ Recherches à engager	
II Wirkungsabschätzung	15
1. Retention im Einzugsgebiet	15
1.1 Bewuchs	15
1.2 Boden	16
1.3 Gelände	18
1.4 Gewässernetz	20
2. Retention am und im Rhein	24
2.1 Bodensee und Hochrhein	24
2.2 Oberrhein	25
2.3 Mittelrhein	28
2.4 Niederrhein	28
2.5 Deltarhein	28
2.6 Rückhaltung, gesteuert und ungesteuert - eine Bewertung	32
3. Wirkungsabschätzung von Retentionsmaßnahmen im Rheingebiet, bezogen auf die drei Hochwasser Mai 1983, März 1988 und Januar 1995	33

I Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der untersuchten Hochwasservorsorgemaßnahmen stellen aus heutiger Sicht das Spektrum der Möglichkeiten dar. Spezielle Maßnahmen müssen zu gegebener Gelegenheit auf ihre Wirksamkeit untersucht werden. Die hier zusammengestellten Ergebnisse werden sich jedoch nicht grundsätzlich ändern.

1. Das Hochwasserregime des Rheins ist geprägt von außergewöhnlicher Heterogenität. Dies bedeutet, dass außergewöhnliche Hochwasser immer nur in Teilen des Einzugsgebietes auftreten (vgl. Grafik).
2. Die Scheitel vieler Nebenflüsse (des Rheins) laufen den zugeordneten Rheinscheiteln in der Regel vorweg. Bei Verzögerung der Abflüsse von Nebenwellen kann es daher zu ungünstigen Überlagerungen mit der Rheinwelle kommen.¹
3. Maßnahmen, die Wasser während der gesamten Dauer eines Hochwassers längs des Gewässers zurückhalten (z.B. in Seen, Poldern), wirken abflussmindernd im Neben- und Hauptgewässer.
4. Maßnahmen im Einzugsgebiet (Bewuchs, Boden, Gelände, Gewässernetz) wirken abflussdämpfend, abflussverzögernd und aus vielfältigen ökologischen Gründen positiv. Deutlicher Forschungsbedarf besteht jedoch derzeit bei der Quantifizierung des Wasserrückhalts auf der Fläche und in Nebengewässern (wieviel, wo, unter welchen Bedingungen, wie lange).
5. Technische Rückhaltungen können hinsichtlich klar definierter Schutzziele Hochwasserscheitel besonders reduzieren. Ihre Wirkung verringert sich mit zunehmender Entfernung zum Schutzobjekt.
6. Dämpfungsmaßnahmen sind zumeist² nur möglich, wenn am Ort der Maßnahme ebenfalls Hochwasser stattfindet.

¹ Für die Nebenflüsse Main und Mosel halten sich Verschärfung bzw. Abminderung der Rheinscheitel die Waage. Für den Neckar ist dies nicht festzustellen. Durch die vertraglich festgelegten Hochwasserrückhaltemaßnahmen erscheint eine Entzerrung von Rhein- und Neckarscheitel möglich, so dass ungünstige Überlagerungen durch Maßnahmen in der Fläche des Neckars weitgehend vermieden werden.

² Gezielter Einsatz von Rückhaltmaßnahmen (für entfernt liegende Schutzobjekte), die auch ohne Hochwasser vor Ort technisch betrieben werden könnten, ist wegen zu kurzer Vorhersagespannen (erforderlich 4 bis 5 Tage, möglich 1 bis 1,5 Tage) derzeit nicht möglich.

VORWORT

Der Aktionsplan Hochwasser der IKSR sieht in den Rheinanliegerstaaten die Realisierung von Maßnahmen bis zum Jahr 2020 vor, um durch Hochwasserereignisse bedingte Schäden am Rhein deutlich zu reduzieren. Dieser Aktionsplan zielt speziell auf eine deutliche Minderung der Schadensrisiken und der Hochwasserstände ab. Die Verstärkung des Hochwasserbewußtseins und die Verbesserung des Hochwassermeldesystems stellen weitere wichtige Ziele der Hochwasservorsorge dar. Der vorliegende Bericht analysiert erstmals umfassend das Spektrum möglicher Verbesserungsmaßnahmen im äußerst wichtigen Teilbereich „Minderung der Hochwasserstände“ und bewertet dieses gebündelt in der „Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins“.

Bereits in ihren „Grundlagen und Strategien zum Aktionsplan Hochwasser“ vom Dezember 1995 weist die IKSR eine Reihe von Möglichkeiten aus, die geeignet sind, Hochwasserereignisse zu dämpfen. Diese Maßnahmen unterschiedlichen Charakters reichen von den Möglichkeiten des flächenhaften Wasserrückhaltes, des Rückhaltes im Gewässer und der Talauie bis hin zu dem technischen Hochwasserschutz mittels Rückhaltebecken und Talsperren. In ihren Leitsätzen zur Schadensbegrenzung bei Hochwasser erwartet die IKSR, dass alle diese Möglichkeiten im gesamten Rheineinzugsgebiet auch genutzt und ausgeschöpft werden.

Für den Aktionsplan Hochwasser der IKSR reichte diese qualitative Aneinanderreihung zu ergreifender Maßnahmen allerdings nicht aus. Vielmehr sollte darüber hinaus das Ziel, Hochwasserereignisse zu dämpfen, quantifiziert, d.h. mit konkreten Zahlenangaben untersetzt werden. Hierzu trug eine international zusammengesetzte Expertengruppe unter Leitung der Bundesanstalt für Gewässerkunde die verfügbaren Erkenntnisse über die Wirkung der verschiedenartigen Hochwasservorsorgemaßnahmen zusammen, wertete dieses Wissen für das Rheineinzugsgebiet aus und stellte diese Erkenntnisse für den gesamten Rheinlauf abschnittsweise systematisch zusammen. Damit betrat die IKSR Neuland. Erstmals konnte mit dieser Wirkungsabschätzung der komplexe Zusammenhang verschiedenartiger Maßnahmenbündel für das Abflussregime eines großen Stromes übersichtlich dargestellt werden, wobei die Machbarkeit zunächst unberücksichtigt blieb. Dabei wurde deutlich, dass die mit Abstand wirksamsten Maßnahmen zur Absenkung des Wasserspiegels bei Hochwasser in der Wiedergewinnung ehemals vorhandener Überschwemmungsgebiete in der Rheinaue bestehen. Darüber hinaus dürfen jedoch die vielfältigen abflussschwächenden und verzögernden Maßnahmen in der Fläche, die vornehmlich zur Verbesserung des Naturhaushaltes und der Landschaftspflege anzustreben sind, keinesfalls vernachlässigt werden.

Die vorliegende Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins wird mit der Zunahme der Erkenntnisse in der Wissenschaft und beim Vollzug des Aktionsplans Hochwasser der IKSR fortzuschreiben sein. Sie dient heute schon als wesentliche Grundlage für das wichtige Handlungsziel „Minderung der Hochwasserstände“ des Aktionsplans Hochwasser. Den Mitarbeitern in der Expertengruppe sei an dieser Stelle besonders gedankt.

PREFACE

Le Plan d'action contre les inondations élaboré par la CIPR prévoit la mise en œuvre de mesures jusqu'en 2020 dans les Etats riverains du Rhin, l'objectif étant de réduire sensiblement les dommages occasionnés par les inondations sur le Rhin. Au travers de ce plan d'action, on entend notamment limiter fortement les risques de dommages et les niveaux de crue. On peut également citer comme autres objectifs importants de prévention des crues ceux consistant à renforcer la prise de conscience face au risque d'inondation et à améliorer le système d'annonce des crues. Le présent rapport entreprend dans un premier temps une analyse générale de l'éventail des mesures d'amélioration envisageables dans le domaine particulièrement important de la « réduction des niveaux de crue » et procède dans un deuxième temps à une évaluation groupée de ces mesures dans un volet relatif à « l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin ».

Dans son document intitulé „Constat et stratégie pour le Plan d'action contre les inondations“ de décembre 1995, la CIPR liste déjà une série de mesures susceptibles d'atténuer les inondations. Ces mesures très diversifiées vont de la rétention des eaux en surface aux mesures techniques de protection contre les inondations au moyen de bassins de rétention et de barrages, en passant par la rétention des eaux dans le cours d'eau même et dans la plaine alluviale. Dans ses principes directeurs visant à limiter les dommages dus aux inondations, la CIPR en appelle à tous pour que ces possibilités soient largement prises en compte sur l'ensemble du bassin du Rhin.

Cette énumération qualitative de mesures à prendre ne suffisait cependant pas pour le Plan d'action contre les inondations de la CIPR. L'objectif visé, à savoir atténuer les inondations, devait être quantifié, c'est-à-dire étayé par des chiffres concrets. Un groupe composé d'experts internationaux sous la direction de la Bundesanstalt für Gewässerkunde a donc rassemblé les connaissances disponibles sur les effets des différentes mesures de prévention des crues, les a évaluées pour le bassin du Rhin et exposées systématiquement pour chaque tronçon. La CIPR s'est engagée ici sur un nouveau terrain. Cette estimation de l'impact des mesures de rétention a permis pour la première fois de présenter clairement les relations complexes entre les mesures agissant sur le régime hydrologique d'un grand fleuve, sans toutefois aborder l'éventuelle faisabilité de ces mesures. Il s'est avéré que les mesures les plus efficaces pour abaisser le niveau des eaux en cas de crue étaient celles visant à reconquérir les anciennes surfaces inondables dans la plaine alluviale du Rhin. Il ne faut toutefois en aucun cas négliger les différentes mesures s'appliquant sur les surfaces et qui ont pour effet de réduire et de retarder les débits tout en contribuant également à améliorer l'équilibre naturel et l'aménagement du paysage.

Le présent document sur l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin devra être actualisé au fil des connaissances supplémentaires que l'on pourra acquérir au niveau scientifique et dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action contre les inondations de la CIPR. Il constitue dès à présent une base essentielle pour atteindre l'un des principaux objectifs opérationnels, à savoir celui d'„abaisser les niveaux de crues“. Nous adressons tous nos remerciements aux experts réunis au sein de ce groupe.

VORWORT

PREFACE

Gliederung / Structure

	Seite / page
I Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	6
◆ Grafiken zur Hochwassergenese (Umschlagrückseite)	
◆ Matrix zur Wirkungsabschätzung von Maßnahmenbündeln	
◆ Forschungsbedarf	
I bis Résultats de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin	11
◆ Graphiques sur la genèse des crues (dernière page de la couverture)	
◆ Recherches à engager	
II Wirkungsabschätzung	15
1. Retention im Einzugsgebiet	15
1.1 Bewuchs	15
1.2 Boden	16
1.3 Gelände	18
1.4 Gewässernetz	20
2. Retention am und im Rhein	24
2.1 Bodensee und Hochrhein	24
2.2 Oberrhein	25
2.3 Mittelrhein	28
2.4 Niederrhein	28
2.5 Deltarhein	28
2.6 Rückhaltung, gesteuert und ungesteuert - eine Bewertung	32
3. Wirkungsabschätzung von Retentionsmaßnahmen im Rheingebiet, bezogen auf die drei Hochwasser Mai 1983, März 1988 und Januar 1995	33

I Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der untersuchten Hochwasservorsorgemaßnahmen stellen aus heutiger Sicht das Spektrum der Möglichkeiten dar. Spezielle Maßnahmen müssen zu gegebener Gelegenheit auf ihre Wirksamkeit untersucht werden. Die hier zusammengestellten Ergebnisse werden sich jedoch nicht grundsätzlich ändern.

1. Das Hochwasserregime des Rheins ist geprägt von außergewöhnlicher Heterogenität. Dies bedeutet, dass außergewöhnliche Hochwasser immer nur in Teilen des Einzugsgebietes auftreten (vgl. Grafik).
2. Die Scheitel vieler Nebenflüsse (des Rheins) laufen den zugeordneten Rheinscheiteln in der Regel vorweg. Bei Verzögerung der Abflüsse von Nebenwellen kann es daher zu ungünstigen Überlagerungen mit der Rheinwelle kommen.¹
3. Maßnahmen, die Wasser während der gesamten Dauer eines Hochwassers längs des Gewässers zurückhalten (z.B. in Seen, Poldern), wirken abflussmindernd im Neben- und Hauptgewässer.
4. Maßnahmen im Einzugsgebiet (Bewuchs, Boden, Gelände, Gewässernetz) wirken abflussdämpfend, abflussverzögernd und aus vielfältigen ökologischen Gründen positiv. Deutlicher Forschungsbedarf besteht jedoch derzeit bei der Quantifizierung des Wasserrückhalts auf der Fläche und in Nebengewässern (wieviel, wo, unter welchen Bedingungen, wie lange).
5. Technische Rückhaltungen können hinsichtlich klar definierter Schutzziele Hochwasserscheitel besonders reduzieren. Ihre Wirkung verringert sich mit zunehmender Entfernung zum Schutzobjekt.
6. Dämpfungsmaßnahmen sind zumeist² nur möglich, wenn am Ort der Maßnahme ebenfalls Hochwasser stattfindet.

¹ Für die Nebenflüsse Main und Mosel halten sich Verschärfung bzw. Abminderung der Rheinscheitel die Waage. Für den Neckar ist dies nicht festzustellen. Durch die vertraglich festgelegten Hochwasserrückhaltungsmaßnahmen erscheint eine Entzerrung von Rhein- und Neckarscheitel möglich, so dass ungünstige Überlagerungen durch Maßnahmen in der Fläche des Neckars weitgehend vermieden werden.

² Gezielter Einsatz von Rückhaltungsmaßnahmen (für entfernt liegende Schutzobjekte), die auch ohne Hochwasser vor Ort technisch betrieben werden könnten, ist wegen zu kurzer Vorhersagespannen (erforderlich 4 bis 5 Tage, möglich 1 bis 1,5 Tage) derzeit nicht möglich.

7. Gezielte Entlastung in Überflutungsräume kann vor Katastrophenschäden bewahren.
8. Wenige örtlich begrenzte Hochwasserschutzmaßnahmen an Mosel und Mittelrhein binden wenig Volumen und haben auf die Unterlieger keine schädliche Auswirkung.³
9. Erweiterungen der Durchflussquerschnitte wirken lokal wasserspiegelsenkend. Sie haben keine Fernwirkung.⁴
10. Eine blinde Wirkungsaddition von Hochwasserschutzmaßnahmen ist nicht möglich.

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 HQ 280 statt 13 m am Pegel entspricht HQ 1000).**

In den niederländischen Rheinarmen ist durch Erhöhung der Abflussleistung der Flussprofile, unabhängig von der anteiligen Reduktion der Zuflüsse von oberstrom eine Senkung der Wasserspiegel möglich, die noch in Lobith mit **40-80 cm** wirksam werden kann.

Im einzelnen ergibt sich folgendes Bild:

- Der durch Extremsituationen vor Ort (HQ200) ausgelöste Einsatz aller Retentionsmaßnahmen am südlichen Oberrhein (vgl. Anlage 5 in "Hochwasserschutz am Rhein - Bestandsaufnahme" S. 27) wird im statistischen Mittel Reduktionen erbringen von
 - ⇒ *ca. 60 cm zwischen Neckar- und Mainmündung (Worms)*
 - ⇒ *ca. 65 cm im Mittelrhein (Kaub)*
 - ⇒ *ca. 45 cm im Niederrhein (Köln)*
 - ⇒ *ca. 30 cm an der deutsch-niederländischen Grenze (Lobith)*

³ Die verschärfenden Auswirkungen des Retentionsraumverlustes auf den Abfluss von Mosel und Mittelrhein sind insbesondere bei beginnender Ausuferung am größten, so dass die Wellenscheitel in aller Regel nicht betroffen sind. Würde man alle Ortschaften an Mosel oder Mittelrhein durch örtliche Maßnahmen schützen, so lägen die mittleren Scheitelabflussverschärfungen in der maximalen Größenordnung von 10 m³/s.

⁴ Wegen der Lage im unteren Teil des Einzugsgebietes und der begrenzten Möglichkeiten für technische Rückhaltungen und für Maßnahmen in der Fläche ist im Rheindelta die Erhöhung der Abflusskapazität der richtige Weg zur Reduzierung von Hochwasserständen. Beispiele von Maßnahmen sind Rückgewinnung früherer Überschwemmungsgebiete, Tieferlegung von Vorländern und Zurückverlegung von Deichen.

- Werden ebenfalls bei HQ200 am Oberrhein zusätzlich 80 Mio. m³ zwischen Neckar- und Mainmündung eingesetzt, so können damit nochmals Reduktionen erzielt werden um im Mittel
 - ⇒ *ca. 20 cm rheinabwärts bis Köln und*
 - ⇒ *ca. 15 cm am Pegel Lobith.*

- Werden die für den nordrhein-westfälischen Bereich als realisierbar angesehenen 3 Polder im Bereich Köln und 8 Polder im Bereich Düsseldorf (rd. 174 Mio. m³ Retentionsraum) eingesetzt, so ergibt sich bei Annahme geeigneter Steuerung eine weitere Scheitelreduktion um
 - ⇒ *ca. 30 cm für den Pegel Lobith.*

- Für die niederländischen Rheinarme ist ein Paket von Maßnahmen denkbar, das die Abflusskapazität erhöht, wodurch pro Maßnahme bezogen auf HQ1250 Absenkungen zwischen 5 cm und drei bis vier Dezimetern möglich sind. Kumulativ ermitteln sich Beträge
 - ⇒ *in der Größenordnung von 40-80 cm (bei gleicher Bodennutzung in den Vorländern) abnehmend auf 0 cm im Einflussbereich der Nordsee und des IJsselmeers.*

(Diese Ermäßigung entsteht in voller Höhe erst bei besonders extremen Ereignissen).

- Für den Deltarhein könnten überdies durch Retention in den Niederlanden
 - ⇒ *ca. 10 bis 20 cm Wasserspiegelsenkung erzielt werden.*

- Das zeitliche Zusammentreffen von Hochwasser am Bodensee und am Mittel- und Niederrhein ist in der Regel nicht gegeben, weshalb trotz der großen Speichervolumina im Bodensee nur ein Rückhalt von etwa 100 bis 200 m³/s über die gesamte Dauer des Hochwassers denkbar wäre, was einer Reduktion der Hochwasserstände um 5 bis 15 cm entspräche. Die Verwirklichung einer entsprechenden Regulierung ist wegen der erforderlichen langen Vorhersagezeiten (5 bis 10 Tage) und der Widerstände in allen Anrainerstaaten in absehbarer Zeit nicht möglich.

- Maßnahmen zur Retention an Nebengewässern des Rheins in Deutschland werden nicht grundsätzlich für den Rhein positiv sein. In Einzelfällen können
 - ⇒ *Reduktionen um ca. 10 cm erwartet werden.*

(Zielkonflikte stehen dem Einsatz solcher Maßnahmen hinsichtlich des Bedarfs im Rhein entgegen.)

- Rückhaltungen in der Fläche durch Bodennutzungsänderungen, Versickerungen, Entsiegelungen usw. können bisher kaum quantifiziert werden. Der hilfswise Ansatz eines Dauerrückhalts von 1 mm Niederschlag über dem gesamten Einzugsgebiet des Rheins führt zu Reduktionen des Rheinscheitels um
 - ⇒ *ca. 5 cm in Köln.*

Wirkungsabschätzung von Rückhaltung im Einzugsgebiet des Rheins auf Hochwasser	Wirkung in																
	Nahbereich auf							Fernbereich (Rhein)									
	kleine			große				kleine			große						
	Hochwasser																
Wirkung von:	Laufzeit	Fülle	Höhe	Dauer	Laufzeit	Fülle	Höhe	Dauer	Laufzeit	Fülle	Höhe	Dauer	Laufzeit	Fülle	Höhe	Dauer	
Bewuchs		-	-	-	-												
Wald / Brachland / Wiese																	
intensive Beweidung / Acker		(+)	+	-	(-)												
Boden																	
Versiegelte und verdichtete Flächen		+	+	-	(-)												
Frost		+	+	-	(-)												
Gelände																	
ökologische Bewirtschaftung																	
Bestädung		+	+	-	(-)												
Waldsterben (flächhaft)		+	+	+	+												
Gewässernetz																	
Entsiegelung / Regenwasserversickerung		+	+	-	(-)												
kleine Rückhaltungen																	
Renaturierung		+	-	+	(+)												
örtlicher HW-Schutz		-	(+)	(-)	(-)												
Verbreiterung von Gewässerquerschnitten																	
Technische Rückhaltung an Nebengewässern	(+)	(-)	(-)		(+)	(-)											(+)
Deichrückverlegung: - Winterdeich - Sommerdeich	(+)		(-)		(+)												
Sommerpolder																	
Technische Rückhaltung (Wehre und Rückhalteräume)		(+)	-	(+)	(+)	(-)											(+)
Tieferlegung von Bühnen																	
Entfernen örtlicher Engpässe; Anlage von Nebenrinnen																	
Vergrößerung der Vorländer																	
Tieferlegung der Vorländer																	

+ verstärkend, verlängernd, erhöhend
 (-) unter bestimmten Bedingungen
 - verkürzend, vermindern
 ! Risiko besonders beachten
 leeres Kästchen: keine oder keine eindeutige Wirkung
 Verbesserung der Hochwassersituation

◆ **Forschungsbedarf**

- Untersuchungen **des Einflusses** der Rauigkeit des Bewuchses auf den Oberflächenabfluss
- Untersuchungen zur **quantitativen** Erfassung flächenhaften Rückhalts im Gelände (Mulden, Geländevertiefungen, Entwässerungssysteme)
- Abschätzung der Erhöhung des Wasserrückhalts durch Gewässerrenaturierungen
- Entwicklung von Modellhochwassern für die quantitative Erfolgskontrolle (hydraulisches Modellinstrumentarium für das gesamte Einzugsgebiet)
- Quantifizierung des dauernden und temporären Rückhalts bei entsprechender Bodenbewirtschaftung
- Untersuchung der morphologischen Folgen von Hochwasservorsorgemaßnahmen im Rhein

I. Résultats de l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin

Les résultats de l'estimation de l'impact des mesures de prévention des crues examinées se présentent sous forme d'un éventail des possibilités actuellement envisageables. Le degré d'efficacité de mesures particulières reste à analyser en temps et lieu. Cependant, les résultats rassemblés dans le présent document ne connaîtront pas de modifications fondamentales.

1. Le régime de crue du Rhin est caractérisé par une extrême hétérogénéité. Par conséquent, les crues exceptionnelles ne surviennent toujours que dans des parties du bassin versant (cf. graphique).
2. En règle générale, les pointes de crue de nombreux affluents (du Rhin) précèdent les pointes de crues du Rhin qui leur sont subordonnées. Un ralentissement de l'écoulement des ondes des affluents peut donc entraîner une superposition défavorable avec l'onde du Rhin.⁵
3. Les mesures permettant de retenir les eaux le long du fleuve pendant toute la durée d'une crue (p.ex. rétention dans les lacs, les polders) ont pour effet de réduire le débit dans les affluents et les cours d'eau supérieurs.
4. Les mesures prises dans le bassin (végétation, sol, terrain, réseau hydrographique) ont pour effet d'atténuer et de retarder le débit et ont un impact écologique positif multiple. A l'heure actuelle, les efforts en matière de recherche doivent porter notamment sur la quantification de la rétention des eaux en surface et dans les affluents (quel doit être le volume de rétention, à quel endroit, à quelles conditions, pendant combien de temps ?).
5. Les mesures techniques de rétention peuvent réduire sensiblement les pointes de crues lorsque les objectifs de protection sont clairement définis. Leur impact s'atténue à mesure que l'on s'éloigne de l'objet de protection.
6. Les mesures visant à atténuer les crues ne sont le plus souvent⁶ possibles que si une crue survient également à l'endroit où ces mesures sont prises.

⁵ Dans le cas du Main et de la Moselle, l'effet d'aggravation et l'effet d'atténuation sur les pointes de crue du Rhin se contrebalancent. Cette constatation ne vaut pas pour le Neckar. Les mesures contractuelles de rétention des crues semblent pouvoir décaler les pointes de crue du Rhin et du Neckar. Une superposition défavorable peut ainsi être en grande partie évitée au travers de mesures prises dans le bassin du Neckar.

⁶ En raison d'échéances de prévision trop courtes (échéance de 4 à 5 jours souhaitée, échéance de 1 jour à 1 jour et demi réalisable), on ne peut actuellement mettre en action, en dehors de situation de crues, des dispositifs de rétention techniquement manoeuvrables (pour satisfaire des objectifs précis de protection éloignés).

7. En atténuant l'impact des crues par une gestion ciblée des espaces submersibles, on peut prévenir des dommages de grande ampleur.
8. Pour autant qu'elles soient en nombre restreint, les mesures de protection contre les inondations limitées à la protection locale sur la Moselle et le Rhin moyen ne mobilisent que des volumes réduits et n'ont pas d'impact négatif sur les riverains d'aval.⁷
9. Les élargissements de la section transversale d'écoulement permettent d'abaisser localement le niveau des eaux. Il n'ont aucun effet à distance.⁸
10. On ne peut obtenir la somme des effets en additionnant purement et simplement les effets distincts des différentes mesures de protection contre les inondations.

Dans l'état actuel des connaissances, de toutes les conditions externes et de l'hypothèse que les possibilités mentionnées dans le présent document soient politiquement réalisables, on obtient, en cumulant toutes, des réductions moyennes de niveaux d'eau extrêmes sur l'ensemble du Rhin d'env.

⇒ **80 cm sur le Rhin supérieur**

⇒ **100 cm de l'embouchure du Main jusqu'à Lobith (p.ex. 12 m à l'échelle de Cologne = HQ 280 au lieu de 13 m = HQ 1000).**

En augmentant la capacité d'écoulement du profil fluvial et indépendamment du pourcentage de réduction apporté par les affluents d'amont, on peut obtenir dans les bras néerlandais du Rhin une baisse de niveau pouvant se traduire par un abaissement de 40 à 80 cm à Lobith.

En détail, l'impact serait le suivant:

- Dans le cas de crues extrêmes sur place (HQ 200), la moyenne statistique des réductions qu'entraînerait la mise en œuvre de toutes les mesures de rétention sur le Rhin supérieur méridional (voir annexe 5 de la publication "Protection contre les inondations sur le Rhin - inventaire" p. 27) serait de l'ordre de
 - ⇒ **60 cm env. entre l'embouchure du Neckar et celle du Main (Worms)**
 - ⇒ **65 cm env. dans le Rhin moyen (Kaub)**
 - ⇒ **45 cm env. dans le Rhin inférieur (Cologne)**
 - ⇒ **30 cm env. à hauteur de la frontière germano-néerlandaise (Lobith)**

⁷ Les aggravations de débit de la Moselle et du Rhin moyen, imputables à la perte d'espaces de rétention, se font le plus sentir lorsque les eaux commencent à déborder, de sorte qu'elles n'ont généralement aucune incidence sur les pointes des ondes de crue. Si l'on protégeait toutes les localités riveraines de la Moselle ou du Rhin moyen par des mesures locales, on obtiendrait une aggravation moyenne du débit de pointe de l'ordre de 10 m³/s au maximum.

⁸ En raison des conditions en présence dans la partie aval du bassin versant et des possibilités limitées de rétention technique et de prise de mesures en surface, un renforcement de la capacité d'écoulement dans le Rhin deltaïque apparaît comme le moyen adéquat pour réduire les niveaux de crue. A titre d'exemple, on peut citer les mesures visant à reconquérir d'anciennes zones inondables, à décaisser l'ancien lit majeur et à repousser les digues vers les terres.

- Si, partant d'un HQ 200, il est en outre possible de retenir 80 millions de m³ supplémentaires entre l'embouchure du Neckar et celle du Main, les réductions pourraient augmenter en moyenne de
 - ⇒ 20 cm env. en aval jusqu'à Cologne et de
 - ⇒ 15 cm env. à l'échelle de Lobith.
- Si, sur le territoire de Rhénanie-du-Nord-Westphalie, les trois polders à hauteur de Cologne et les huit polders à hauteur de Düsseldorf jugés réalisables (env. 174 millions de m³ de volume de rétention) sont mis en œuvre et en supposant qu'ils soient manœuvrés de manière appropriée, on obtiendra une réduction supplémentaire du niveau des eaux en débit de pointe de
 - ⇒ 30 cm env. à l'échelle de Lobith.
- On peut envisager pour les bras néerlandais du Rhin d'appliquer un ensemble de mesures susceptibles d'augmenter la capacité d'écoulement, chaque mesure rapportée au HQ1250 permettant d'abaisser le niveau des eaux de cinq cm à trois à quatre décimètres selon les cas. En cumulant ces effets, on obtient un total de réduction
 - ⇒ de l'ordre de 40 à 80 cm (avec le même usage des surfaces dans le lit majeur), diminuant progressivement jusqu'à 0 cm dans la zone influencée par la mer du Nord et l'IJsselmeer.
 (Cette réduction n'est intégralement obtenue que si l'on est en présence de crues extrêmes).
- Pour le Rhin deltaïque, une rétention des eaux aux Pays-Bas permettrait d'atteindre
 - ⇒ un abaissement supplémentaire de 10 à 20 cm.
- En règle générale, il n'y a pas concomitance entre les crues du lac de Constance et celles du Rhin moyen et du Rhin inférieur. Ceci explique pourquoi, malgré le volume important d'emmagasinement du lac de Constance, la rétention des eaux ne serait que de l'ordre de 100 à 200 m³/s pendant toute la période de crue. Ceci correspondrait à une réduction des niveaux de crue de l'ordre de 5 à 15 cm. En raison des échéances importantes (5 à 10 jours) des prévisions requises et d'une forte opposition dans tous les Etats riverains, la régulation du lac de Constance n'est pas réalisable dans un avenir proche.
- Les mesures de rétention prévues en Allemagne dans les affluents du Rhin n'ont pas systématiquement un impact positif sur le Rhin. Dans certains cas, on peut envisager
 - ⇒ des réductions de l'ordre de 10 cm.
 (Des conflits d'intérêt concernant l'objectif de protection à choisir empêchent la mise en œuvre de ces mesures selon les besoins en présence sur le Rhin.)
- Il est quasiment impossible de quantifier les volumes de rétention obtenus sur place en modifiant l'usage des sols, laissant s'infiltrer les eaux, désimperméabilisant les surfaces etc. En partant, pour les besoins de l'estimation, d'une rétention prolongée d'1 mm de précipitations sur l'ensemble du bassin du Rhin, on obtient une réduction de la pointe de crue du Rhin de l'ordre de
 - ⇒ 5 cm env. à Cologne.

◆ **Recherches à engager**

- Etude de l'impact de l'aspérité végétale sur l'écoulement de surface
- Etudes sur le recensement quantitatif de la rétention en surface sur le terrain (cuvettes, creusements de terrain, systèmes de drainage)
- Estimation de l'augmentation du volume de rétention par le biais de mesures de renaturation
- Mise au point de crues-modèles aux fins de suivi quantitatif des résultats (modélisation hydraulique de l'ensemble du bassin versant)
- Quantification de la rétention prolongée et temporaire en fonction du type de gestion des sols
- Etude de l'impact morphologique de mesures de prévention des crues sur le Rhin.

II Wirkungsabschätzung

Die nachfolgend untersuchten Hochwasservorsorgemaßnahmen stellen aus heutiger Sicht das Spektrum der Möglichkeiten dar. Spezielle Maßnahmen müssen zu gegebener Gelegenheit auf ihre Wirksamkeit untersucht werden. Die hier zusammengestellten Ergebnisse werden sich jedoch nicht grundsätzlich ändern.

1. Retention im Einzugsgebiet

Maßgebend für die Höhe des Hochwassers sind neben der zeitlichen und räumlichen Verteilung des Niederschlags die Speicherwirkungen von Bewuchs, Boden, Gelände und Gewässernetz des Einzugsgebietes.

1.1 Bewuchs

Bewuchs hat vielfachen Einfluss auf die Abflussvorgänge. Durch die lebenden und abgestorbenen oberirdischen Organe wirkt er über die Interzeption verdunstungserhöhend und damit prinzipiell abflussreduzierend. Durch intensive Durchwurzelung des Bodens wirkt der Bewuchs in entscheidendem Maße auf die Infiltrationsfähigkeit. Darüber hinaus verändert der Bewuchs die Rauigkeit der Oberfläche. Er bremst und reduziert damit den Oberflächenabfluss.

Interzeption (vorübergehendes Speichern von gefallenem und abgesetztem Niederschlag auf (Pflanzen)Oberflächen) ist bei höherwüchsigen Vegetationsformen besonders ausgeprägt und erlangt vor allem bei immergrünen Arten ganzjährig hohe Bedeutung. Bei landwirtschaftlichen Kulturen spielt Interzeption nur in der Vegetationszeit eine größere Rolle.

Für Wald kann eine mittlere Interzeptionsrate von etwa 25 % des Jahresfreilandniederschlags angenommen werden. Für immergrüne Bestände (z.B. Fichte) sind Größenordnungen zwischen 30 % und 50 % anzusetzen, für laubabwerfende Arten (z.B. Buche) dagegen etwa 15 % - 20 %. Buschbestände verhalten sich ähnlich wie Laubwald. Bei landwirtschaftlichen Kulturen erreichen die mittleren jährlichen Interzeptionsraten Größenordnungen von immerhin 10 % des Freilandniederschlags. *Dies bedeutet, daß die Größenordnung der Interzeption zwischen 0,5 und etwa 5 mm Niederschlagshöhe/Ereignis liegt.* Die Interzeptionskapazitäten der Streuschicht unter Wald liegen im Mittel bei 2 mm.

Aus den genannten Werten ist abzuleiten, dass die Interzeption bei großen Hochwassern nur eine relativ geringe Rückhaltewirkung hat. Für kleinere und mittlere Hochwasser ist jedoch der kumulative Effekt der Interzeption zu berücksichtigen. Bei stark interzeptierenden Beständen (z.B. Fichte) wird die Auffüllung des sommerlichen Bodenwasserdefizites im Vergleich zu niederwüchsigen Vegetationsformen (z.B. Wiese) um bis zu 2 Monate verzögert. Das bedeutet, dass der Boden dann in der Lage ist, noch Niederschläge der Größenordnung von etwa 50 mm zu speichern und nicht zum Abfluss gelangen zu lassen.

Der Bewuchs steuert durch seine **Durchwurzelung** auch die **Infiltrationsfähigkeit** in den Boden. Im Allgemeinen werden unter Wald sehr hohe bis mittlere Infiltrationsraten beobachtet. Mittlere Raten ergeben sich für intensiv genutztes Grünland, während bei Acker sehr geringe bis sehr hohe Raten möglich sind - je nach Bearbeitungszustand.

Je höher die **Rauhigkeit** des Bewuchses ist, desto mehr wird Oberflächenabfluss verlangsamt bzw. zurückgehalten. Prinzipiell gilt hierbei: je dichter und je heterogener die Vegetation, desto mehr Wasser wird zurückgehalten. Wald verhindert die Entstehung von Oberflächenabfluss fast vollständig. Die Streuschicht, die günstige Oberbodenstruktur und der beachtliche Anteil an Makroporen begünstigen dort die Infiltration. Ähnlich günstige, Oberflächenabfluss verhindernde Bedingungen findet man auch auf vergrasteten und verkrauteten oder verbuschten Sozialbracheflächen.

Auf Wirtschaftsgrünland können dagegen beträchtliche Oberflächenabflussraten auftreten, abhängig vom Ausmaß der Tritt- und/oder Fahrverdichtungen. Interessant erscheint die Tatsache, dass im Frühjahr - noch bevor das Vieh erstmalig auf die Weide gelangt - kaum oder nur relativ geringer Oberflächenabfluss auftritt, Schneeschmelze und/oder Regen auf gefrorenem Boden ausgenommen. Dies ist eine Folge der mehrere Monate andauernden Bodenruhe, in der sich für die Infiltration günstige Voraussetzungen einstellen.

Noch stärkerer Oberflächenabfluss kann auf Ackerflächen entstehen. Doch gibt es große Unterschiede zwischen verschiedenen Kulturen und deren Entwicklungsstadien. Der höchste Oberflächenabfluss wird kurz nach der Ernte bei durch Befahren verdichteten Böden beobachtet.

1.2 Boden

Der Einfluss des Bodens auf die Wirkung von Hochwasservorsorgemaßnahmen wird oft erheblich unterschätzt.

Eine der wesentlichen hochwasserreduzierenden Prozesse im Boden wird durch die Verdunstung insbesondere durch die Transpirationsleistung der Pflanzen bewirkt. Das sommerliche Bodenwasserdefizit führt dazu, dass auch größere Mengen an Niederschlag aufgenommen und gegen die Schwerkraft gespeichert werden können. Das Risiko von Sommerhochwassern im gesamten Rhein wird da-

mit minimiert. *Die Größenordnung des Bodenspeichers liegt zwischen 100 mm und 300 mm Niederschlag, je nach Bodentyp und -art.*

Der genannte Prozess ist ausschlaggebend dafür, dass hohe Rheinabflüsse in den Monaten Juni bis September in aller Regel im Wesentlichen nur von der Schneeschmelze in den Alpen herrühren. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Abflüsse in aller Regel begleitet werden von ergiebigen Niederschlägen auch in den Mittelgebirgslagen, der Beitrag der Mittelgebirgsflüsse zum Rheinabfluss aber unerheblich ist. Das bedeutet nicht, dass extreme Hochwasser im Sommerhalbjahr nicht auftreten können; die Eintrittswahrscheinlichkeit ist allerdings sehr gering (vgl. Julihochwasser 1342).

Entscheidend für die Ausnutzung des Bodenspeichers ist, ob der Niederschlag in den Boden eindringen kann, oder ob es sehr schnell zu Oberflächenabfluss kommt. Unter Wald ist auf Grund der optimalen Bedingungen für die **Infiltration** kaum mit Oberflächenabfluss zu rechnen. Hingegen ist auf versiegelten Flächen im Grundsatz nur Oberflächenabfluss zu erwarten. Landwirtschaftlich genutzte Flächen nehmen eine Zwischenstellung ein.

Insbesondere grobe Bodenporen beschleunigen die Infiltration, was auch für die Absickerung aus dem Wurzelraum von besonderer Bedeutung sein kann. In hängigen Lagen (Mittelgebirge) kann die Weiterleitung des infiltrierten Wassers durch laterales Fließen erheblich zur beschleunigten Hochwasserbildung beitragen. Die Fließgeschwindigkeiten sind jedoch um Zehnerpotenzen geringer als bei reinem Oberflächenabfluss.

Ackerflächen sind bzgl. Infiltration besonders labil. Ein wesentlicher Faktor, der auf Ackerflächen die Infiltrationsfähigkeit und damit den Oberflächenabfluss bestimmt, ist die **Gefügestabilität**. Eine hohe Gefügestabilität verhindert eine Verschlammung und Zerstörung der Grobporen im Oberboden. Sie ist u.a. vom Humusgehalt abhängig. So üben die Unterschiede der Gefügestabilität einen stärkeren Einfluss auf die Oberflächenabflusswerte aus als Vorneuboden oder Pflanzenbestand.

Frost wirkt in der Regel bzgl. des Abflussverhaltens von Böden "oberflächenversiegelnd". Die Bezeichnung der "quasi Versiegelung" bei hohen Bodenfeuchten (ohne Frost) beschreibt die tatsächlichen Verhältnisse bei Hochwasser allerdings nicht. Selbst bei hohen Bodenfeuchten (gesättigter Zustand) infiltriert Wasser über das Makro- und Mikroporensystem den Boden. Es erfolgt eine Weiterleitung und Speicherung in den Makroporen. Die hohen Abflussbeiwerte der Hochwasser 1993 und 1995 sind daher nicht ausschließlich auf Oberflächenabfluss zurückzuführen, sondern auf direkten Abfluss. Das bedeutet, dass ein großer Teil der abgeflossenen Welle den Boden passiert hat. Bei einer echten flächenhaften Oberflächenversiegelung (beispielsweise durch extrem verschlammte gefügelabile Böden) wäre der Niederschlag noch schneller zum Abfluss gelangt.

1.3 Gelände

Die Wirkung der Retention durch das Gelände entspricht insbesondere den Einflussfaktoren Bewuchs und Boden bei der Übertragung auf die Fläche. *Das flächenhaft in kleinen und kleinsten Geländevertiefungen und Geländemulden zurückgehaltene Wasser wird auf eine Größenordnung von etwa 10 mm geschätzt.* Sicher erscheint, dass die Werte nutzungsbedingt eine große Variabilität aufweisen.

Sofern **nutzungsbedingte Einflüsse** auf den Hochwasserabfluss isoliert darstellbar sind, lassen sich folgende benennen:

- Nutzungsstruktur einer Landschaft, d.h. Anteile und Verteilung von Kulturarten wie Forst, Grünland, Acker
- Zuschnitt von landwirtschaftlichen Nutzflächen, z.T. von Wege- und Grabensystemen vorgegeben oder zusammen mit deren Anlage vorgenommen
- Lage von Nutzflächen zum Gewässer
- Erschließung der Landschaft durch (insbesondere befestigte und versiegelte) Wege. Wenn diese ein starkes Längsgefälle haben ohne ausreichende Möglichkeiten für Querabflüsse (und deren anschließender Versickerung), werden Oberflächenabflüsse weitergeleitet und wird die Entstehung zusätzlicher Oberflächenabflüsse begünstigt.
- Grabendichte und Verlauf von Gräben im Hinblick auf deren Funktion beim Weitertransport von Oberflächenabfluss.

Diese allgemein gehaltenen Einflüsse können für ackerbaulich und als Grünland genutzte Flächen wie folgt ergänzt werden:

- Lange abflusswirksame Hangflächen ohne abflussmindernde Zwischenstreifen
- Bewirtschaftung in Gefällerichtung
- Nutzung oder fehlerhafte Nutzung von hangabwärts geöffneten Mulden in denen Oberflächenabflüsse konvergieren können; Mulden können bei Ackernutzung insbesondere dann oberflächenabflusswirksam werden, wenn sie nicht ihrer Kontur entsprechend bewirtschaftet werden.
- Stark beanspruchte Fahrspuren in Gefällerichtung
- Gefügezerstörende Art der Bodenbearbeitung, humusmindernde Bewirtschaftungsweise
- Bodenverdichtungen (Pflugsohlenverdichtungen, Fahrverdichtungen, Fahrspuren)
- Geringer Bedeckungsgrad durch Nutzpflanzen in niederschlagsreichen Perioden bzw. in Perioden mit hohen Niederschlagsintensitäten
- Überwinterung von Ackerflächen ohne Bearbeitung (= Schwarzbrache).

Auf Grünland

- Verdichtungen durch Tritt der Weidetiere
- Fahrverdichtungen (bei Düngung, Mahd, Heuwerbung etc.)
- Stark genutzte Grünlandzufahrt an stärker geneigten Stellen.

Auch die Form eines Einzugsgebietes hat bei gleichzeitiger gleichmäßiger Beregnung einen Einfluss auf den Ablauf der Hochwasserwellen. So entstehen in langgestreckten Einzugsgebieten abgeflachte Hochwasser, da die Wellen der Teilgebiete nacheinander im Hauptgewässer eintreffen und ablaufen. Im Falle von mehr oder weniger runden Gebieten treffen die Teilwellen etwa gleichzeitig ein und addieren sich. Extrema ergeben sich bei Koinzidenz von Zugrichtung der Niederschlagsfront und Wellenablauf.

Der Effekt der **Versiegelung** des Bodens durch Siedlungen und Verkehrswege lässt sich kaum mittels statistischer Analysen von Hochwasserabflüssen an den Pegeln quantifizieren. Beim Vergleich eines fiktiven Zustandes ganz ohne Siedlungsflächen mit dem Zustand von 1985 ergaben sich über Modellrechnungen folgende Erhöhungen der Scheitelabflüsse im Rhein: *Für Ereignisse mit einer Regendauer von 4 Tagen Erhöhungen um + 8 %, für Ereignisse mit einer Regendauer von einem Tag Erhöhungen um +12 %*. Für die Zeit von 1951 bis 1985 kann man näherungsweise die Hälfte der Erhöhungen annehmen, weil 1951 bereits etwa die Hälfte der Bebauung von 1985 vorhanden war. Die größten prozentualen Erhöhungen ergeben sich für die Ereignisse mit kleinen Hochwasserscheiteln im Rhein. Die Ballungsgebiete haben an diesen Erhöhungen nur einen relativ geringen Anteil (im Mittel 1,3 %), der überwiegende Anteil stammt von der im Gebiet verteilten Bebauung, die fast 80 % der Gesamtbebauung ausmacht.

Zu den Auswirkungen des flächenhaften **Waldsterbens** auf die Hochwasserabflüsse gibt es kaum gesicherte Erkenntnisse. *Berechnungen mit einem Flussgebietsmodell ergaben bei vollständiger Entwaldung Erhöhungen der Scheitelabflüsse im Oberrhein um im Mittel +17 % bei einer Regendauer von 4 Tagen, um im Mittel +28 % bei einer Regendauer von einem Tag.*

Die **Niederschlagswasserversickerung** ist Teil des Konzeptes zur Hochwasserrückhaltung. Ähnlich wie bei vielen Maßnahmen des natürlichen Rückhaltes ist hierbei die Unterstützung des natürlichen Wasserrückhaltes nicht als isoliertes Ziel des Hochwasserschutzes anzusehen, sondern als Teil eines fachübergreifenden Flächen- und Gewässermanagements zur Bewahrung und Verbesserung der Umwelt insgesamt.

Die Realisierung der dezentralen Versickerung von Niederschlagswasser kann in kleinen, dichtbesiedelten Einzugsgebieten grundsätzlich wirkungsvoll sein, ist aber ein Langzeitprogramm. Bei Neubaugebieten sowie beim Ausbau überlasteter oder erneuerungsbedürftiger Anlagen könnte sie jedoch unmittelbar zum Einsatz kommen. Die Anwendung von z.B. Mulden-Rigolen-Systemen kann nutzbare Speicherkapazität schaffen, wobei besonders bemerkenswert ist, dass die Anteile auch bei frostversiegelten und damit undurchlässig gemachten Bodenflächen nicht zum oberirdischen Abfluss hinzurechnen sind. Zu bedenken ist, dass das mittelfristige Entsiegelungspotential im Rheingebiet bei maximal 1 % der Einzugsgebietsfläche liegt. Für große Hochwasser im Rhein ist der abflussmindernde Effekt somit minimal.

1.4 Gewässernetz

Die Speicherung im Gewässer oder Flussnetz wirkt in einem Flussabschnitt als Abflachung und Zeitverschiebung einer ablaufenden Hochwasserwelle. Ein dichtes **Flussnetz** bei hohem Gefälle bewirkt einen raschen Abfluss aus dem Einzugsgebiet. Umgekehrt kann bei geringem Gefälle der raschere Abfluss durch die größere Speicherung in den Fließgerinnen ausgeglichen werden. Flussbegradigungen führen zu einer Beschleunigung von Hochwasserwellen. Da in einem Einzugsgebiet die Hochwasserwellen der flussabwärts gelegenen Seiteneinzugsgebiete zuerst zum Abfluss kommen, bewirken flussbegradigende Maßnahmen im Oberlauf tendenziell eine Überlagerung der Hochwasserwellen und können damit zu einer Erhöhung der Welle führen. Unter bestimmten Bedingungen sind auch Entzerrungen (Ermäßigung der Scheitelabflüsse) möglich.

Hochwasserrückhaltungen in Seiteneinzugsgebieten des Rheins verzögern deren Wellenablauf und können dadurch tendenziell die Hochwasserscheitel des Hauptflusses erhöhen. Technische Rückhaltemaßnahmen zum Hochwasserschutz sind im Allgemeinen auf bestimmte gefährdete Orte innerhalb dieser Einzugsgebiete ausgerichtet. Die für den Einsatz der Rückhaltesysteme maßgebenden Hochwasservorhersagezeiten betragen allenfalls 6-12 Stunden. An diesen entsprechend kurzen Zeitraum ist auch eine technische Steuerung der Rückhalteräume gebunden. Das heißt, dass nach einer Füllung der Rückhalteräume diese möglichst schnell wieder geleert werden müssen, da praktisch jederzeit mit einem erneuten schadensbringenden Hochwasserabfluss gerechnet werden muss.

Um die Auswirkungen derartiger Rückhalteräume in Seiteneinzugsgebieten des Rheins auf Hochwasserwellen im Rhein abschätzen zu können, wurden für die Nahe (rund 4000 km² Einzugsgebietsfläche) entsprechende Berechnungen durchgeführt. Es wurde ein Rückhalteraum von ca. 20 Mio. m³ zum Schutz von Bad Kreuznach angenommen, da es hier bereits ab einem Abfluss von rund 600 m³/s - 700 m³/s zu schadenbringenden Hochwasserabflüssen kommt. Die Auswirkungen der Rückhaltungen auf den Hochwasserabfluss im Rhein wurden modellmäßig mit Hochwasserwellen ermittelt, die in Köln z.T. erhebliche Überflutungen zur Folge hatten.

Bedingt durch die Hochwassergenese in den Seiteneinzugsgebieten sind die Auswirkungen auf die Unterliegerpegel im Rhein, also auf das übergeordnete Flusssystem, uneinheitlich. Die Berechnungen ergaben sowohl Reduzierungen der Hochwasserscheitel im Rhein als auch Abflussverschärfungen. Der Einsatz der Rückhaltungen zeigte in einigen Fällen aber auch keine Wirkungen im Scheitelbereich des Rheinabflusses. Dieses Ergebnis wird gestützt durch entsprechende Berechnungen für die Lahn (Retentionsvolumen 14,9 Mio. m³). *Die Reduzierungen durch den Einsatz von Rückhaltungen ähnlicher Größenordnung wie für die Nahe genannt sowie die Abflussverschärfungen durch deren Entleerung können in den Größenordnungen von bis zu 10 cm an den jeweiligen Rheinpegeln liegen (z.B. infolge von Rückhaltungen an der Lahn 7 cm am Pegel Köln bei Hochwasser im Februar 1984).*

Aus den Untersuchungsergebnissen lässt sich folgender allgemeiner Schluss ziehen:

Technische Rückhaltemaßnahmen wirken eindeutig hochwasserreduzierend, jedoch immer nur sektoral für das jeweilige vorgesehene Schutzziel. Auswirkungen im nächst übergeordneten Flusssystem sind zwar vorhanden, aber entsprechend dem im Verhältnis zur Fülle der Hochwasserwellen kleinen Rückhaltevolumen gering. Je nach Genese des Hochwassers kann der Einsatz der Rückhaltungen im übergeordneten System zu Scheitelabflusserhöhungen oder -reduzierungen führen oder wirkungslos bleiben.

Untersuchungen zur Auswirkung von Rückhaltebecken an Nebengewässern wurden exemplarisch für je ein Rückhaltebecken an einem unmittelbaren Rheinzufluss (Kinzig), am Neckar oberhalb der Fils- mündung und an zwei Neckarzufüssen (Kocher und Jagst), durchgeführt. Die mittlere Abminderung der Scheitelabflüsse entlang des Rheines beträgt in allen Fällen weniger als 5 %. Voraussetzung ist, dass schon bei kleinen Abflüssen am jeweiligen Gewässer mit dem Einstau begonnen wird und sehr große Volumina zur Verfügung stehen. Der Einstau erfolgt damit bei Ereignissen, die für das betroffene Gewässer selbst gar nicht kritisch sind, aber für den Rhein zu größeren Hochwasserabflüssen führen. Dieser Einsatz steht im Gegensatz zu den Zielen des örtlichen Hochwasserschutzes, für die solche Rückhaltebecken ja in erster Linie gebaut werden. Bei weiterer Abflusserhöhung geht die Wirkung der Becken auf die Hochwasserabflüsse im Rhein fast auf Null zurück.

Es wird immer wieder auf Möglichkeiten hingewiesen, in den **Stauhaltungen Wasser zurück-zuhalten**. Immerhin umfassen die staugeregelten Strecken allein der Bundeswasserstraßen eine Gesamtlänge von rund 1.200 km. Die Forderungen sind dahingehend, die vorhandenen Wehre der Flusstautufen vor Hochwasserbeginn abzusenken, die Stauhaltungen also zu entleeren und im Hochwasseranlauf die Wehre wieder aufzurichten. Das heißt, die Stauhaltungen als Auffangbecken zu benutzen.

Überschlägliche Ermittlungen ergeben vorgefüllte Volumina im Bereich des zwei- bis dreifachen Mittelwasserabflusses (MQ) für Neckar, Main und Mosel von je ca. 70 bis 80 Mio m³. Für Lahn und Saar werden 15 bis 20 Mio m³ erreicht. Die Verfügbarmachung dieser Stauräume würde alle Wellen in ihrer Anfangsphase in Abhängigkeit von den Anstiegsgradienten der Durchflüsse mehr oder weniger verlangsamen. Die Verlangsamung würde bis zu Abflüssen wirksam sein, bei denen auch im gegenwärtigen Zustand schon die Querschnitte vollständig freigegeben werden. Im Falle der Mosel würde die genannte Volumennutzung den Wellenanlauf je nach Größe des Abflusses am Wellenfuß und Steilheit des Wellenanstiegs um 12 bis 24 h verlangsamen. Bei Abflüssen >2.500 m³/s geht dieser Effekt auf Null zurück. An der Saar ergibt sich ein solcher Effekt nur im Bereich weniger Stunden.

Um die genannten Wellenverlangsamungen Realität werden zu lassen, wären Entleerungen der Haltungen (Wehrabsenkungen) im Vorfeld von Hochwassern erforderlich. Sie müssten bei Erreichen der im statistischen Mittel gegebenen Hochwasser-Basisabflüsse abgeschlossen sein. Um sicher zu gehen, daß die Vorabsenkungen keine unzulässigen Wellenhöhen flußab erzeugen, müssten die Entleerungen mit relativ geringen Abflüssen erfolgen. Dies führt zu erheblichen Entleerungsdauern. Eine

Entleerung mit z.B. 100 m³/s würde in Neckar, Mosel oder Main 190 bis 220 h in Anspruch nehmen und durchlaufend Erhöhungen an den jeweiligen Flussmündungen von 20 bis 30 cm erzeugen. In solchen Zeitabschnitten sind die Abflüsse längst weit über die Bezugsgrößen angestiegen, d.h. die verfügbaren Volumina durch Zuflüsse schon teilweise wieder verbraucht. Weil sie damit nur reduziert verfügbar wären, verkürzte sich zwar auch die Entleerungszeit, sie läge trotzdem in der Größenordnung mehrerer Tage.

Damit würden Vorentleerungen Vorhersagen in der Größenordnung mehrerer Tage erforderlich machen, was selbst für den Rhein zurzeit nicht möglich ist. Für Rheinnebenflüsse liegen alle Vorhersagezeiten unter 24 h.

Geänderte Stauregelungen in den Bundeswasserstraßen Neckar, Main, Lahn und Mosel würden somit keinen zusätzlichen Hochwasserschutz bereitstellen.

In Oberrhein und Saar werden die Wehre der Staustufen nicht vollständig gelegt, d.h. es steht immer ein steuerbares Retentionspotential zur Verfügung.

Am Oberrhein werden die Flussvolumina genutzt. Es geschieht im Rahmen des Sonderbetriebs der Rheinkraftwerke, wo Durchflussumleitungen von den Kanalstrecken in den alten Rheinlauf das Volumen des Flusses nutzen und beim Betrieb der Kulturwehre zur Hochwasserretention. Die zum Schutz der Anlieger erforderlichen Seitendämme wurden speziell angelegt bzw. ertüchtigt.

Anders ist die Situation an der Saar. Hier wären Vorabsenkungen der Wehre denkbar, die zu einer Bereitstellung von ca. 20 Mio m³ Retentionsraum führen könnten. Dieses Volumen ergibt sich aus dem ständig gehaltenen Stau. Erhöhungen der Stauziele über die gemäß Ausbauplanung vorgesehenen würden ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen die Saaranlieger treffen, was mit gleicher Begründung wie für Mosel, Neckar und Main nicht durchführbar ist. Ganz abgesehen davon, dass auch die Wehranlagen in der Saar nicht auf höhere Staue bei Hochwasser ausgelegt sind.

Die Veränderungen der Rheinscheitel infolge von **Dauerrückhalt in den Einzugsgebieten von Neckar, Main und Mosel** wurden anhand eines Kollektivs von Hochwassern, die dem Ausbauzustand des Rheins 1977 zuzuordnen sind, ermittelt. Es wurde angenommen, dass es in diesen Einzugsgebieten infolge von Hochwasservorsorgemaßnahmen in der Fläche zu einem zusätzlichen *Dauerrückhalt von jeweils 1 mm (Randbedingungen s.u.) über das gesamte Hochwasserereignis der Nebenflüsse käme. Die Wirkungen auf die Rheinscheitel würden im Mittel zwischen ca. 10 und 40 m³/s betragen. Ein kumulativer Effekt auf die jeweils unterhalb liegende Rheinstrecke wäre ebenfalls zu erwarten; die Größenordnung an den Pegeln Andernach und Köln könnte im Mittel rund 90 m³/s (entspricht 5 cm) erreichen.*

Auf den ersten Blick erscheint der abflussmindernde Effekt durch einen Dauerrückhalt während einer Hochwasserwelle in den Nebenflüssen von nur insgesamt 1 mm effektivem Niederschlag relativ groß.

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich um einen Dauerrückhalt handeln soll. Um diesen für 1 mm über die gesamte Hochwasserwelle zu erreichen, bedarf es jedoch eines erheblichen Rückhaltevolumens. Unter der Annahme, dass der Dauerrückhalt durch ökologische Landbewirtschaftung erreicht würde, bedeutet dies, dass bei etwa 50 % landwirtschaftlicher Fläche und einem Anteil von etwa 1/3 verdichteter Ackerfläche ein Dauerrückhalt von 6 mm auf dieser Fläche erzielt werden muss. Da aber bei einer solchen Bewirtschaftungsweise im Prinzip ein temporärer Rückhalt bereitgestellt wird, muss dieser ein Vielfaches der 6 mm betragen. Der bereitgestellte Rückhalteraum wird sich nur zu Beginn der Hochwasserwelle in seiner vollen Höhe auswirken können. Es kann daher abgeschätzt werden, dass für die Erlangung eines Dauerrückhaltes von 6 mm auf der ökologisch zu bewirtschaftenden Fläche über die gesamte Dauer der Hochwasserwelle (mehrere Tage) mindestens das Zehn- bis Zwanzigfache an Rückhaltefähigkeit zur Verfügung gestellt werden muss. Aus den Untersuchungen ist weiterhin allgemein zu schließen, dass durch Dauerrückhalt im Einzugsgebiet von Nebenflüssen des Rheins bei relativ kurzen und steilen Hochwasserereignissen keine oder nur geringe abflussmindernde Wirkungen auf die Rheinhochwasser zu erwarten sind.

Gewässerrenaturierungen wirken durch Laufverlängerungen (Mäandrierungen) gefällereduzierend und abflussverlangsamend sowie tendenziell hochwasserrückhaltend. Ab der Ausuferung kommt ein weiterer Rückhalt (Bewuchs) im Überflutungsgebiet hinzu. Das bedeutet für den unterhalb liegenden Gewässerabschnitt eine tendenzielle Entlastung. Für die Einmündung in das nächste übergeordnete Flusssystem bedeutet dies eine Verzögerung. Der wesentliche Aspekt für Gewässerrenaturierungen ist gesamtheitlich ökologisch. Zur Wirkungsabschätzung von Gewässerrenaturierungen bzw. über die Retentionswirkungen des Vorlandes gibt es nur wenige Untersuchungen. Wesentlich für die hochwasserdämpfende Wirkung der Vorlandretention ist, dass das Wasser im Vorland zwischengespeichert wird.

Der dämpfende Effekt der Vorlandüberflutungen entlang der Nahe wurde quantifiziert. Vorlandüberflutungen bei großen Hochwassern wie im Dezember 1993 und Januar 1995 hätten nur eine vernachlässigbare Dämpfung der Scheitelabflüsse bewirkt. Grund hierfür sind die großen Abflussvolumina und das Fehlen von stehender Retention auf den Vorländern. Die Untersuchungen wurden u.a. mit einer zweidimensionalen Strömungsberechnung durchgeführt. Grundsätzlich gilt, dass die Dämpfung der Scheitelabflüsse jeweils nur solange wirksam ist, wie eine wesentliche Ausweitung der benetzten Vorländer durch die Ausuferung stattfindet.

Die **Retention im niederländischen Einzugsgebiet** ist im Vergleich zu den Oberliegern recht gering. Der seitliche Zufluss zu Waal und Neder-Rijn betrug beispielsweise beim Hochwasserereignis 1995 nur 45 bzw. 20 m³/s. Das ist in beiden Fällen weniger als 1 % des Scheitelabflusses dieser Rheinarme. Die Auswirkungen von Maßnahmen in regionalen Einzugsgebieten auf die Wasserstände dieser Flüsse sind damit ebenfalls sehr gering. Nur im Fall der IJssel gibt es durch seitlichen Zufluss einen signifikanten Einfluss auf den Abfluss: Beim Hochwasserereignis 1995 wurde dadurch der Scheitel um 10 % (160 m³/s) erhöht.

Eine Untersuchung zeigt, dass in Teileinzugsgebieten der IJssel mit Maßnahmen im Bereich der Gebietsnutzung und an Wasserläufen eine Abnahme von etwa 25 % des 100jährigen Hochwasserabflusses erzielt werden kann. Zu den in Frage kommenden Maßnahmen gehören: Umgestaltung von landwirtschaftlich genutzten Gebieten in Feuchtgebiete, Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten entlang von Bächen und die Beseitigung versiegelter Flächen in Gebieten mit künstlicher Entwässerung. Die Wirkung dieser Art wasserrückhaltender Maßnahmen auf seltene Hochwasser läßt sich quantitativ schwer einschätzen, wird aber geringer sein.

Noch schwieriger lassen sich die Wirkungen rückhaltender Maßnahmen in Teileinzugsgebieten für die Hochwasserstände der IJssel darstellen. Von entscheidender Bedeutung ist das eventuelle Zusammentreffen von Wellenscheiteln des Hauptstroms mit denen der Nebengewässer. Die Scheitel der Nebenflüsse laufen zumeist dem Abflussscheitel der IJssel voraus. Wenn die Maßnahmen in den Teileinzugsgebieten zur Verzögerung der Scheitelabflüsse führen, vergrößert sich die Wahrscheinlichkeit, dass sie mit den Höchstwasserständen der IJssel zusammenfallen. Die wasserrückhaltenden Maßnahmen in den Teileinzugsgebieten können dann sogar eine gewisse negative Wirkung auf die Hochwassersituation in der IJssel haben.

Eindeutig positive Auswirkungen sind bei seitlichen Zuflüssen der IJssel zu erwarten, eventuell in Kombination mit steuerbaren Rückhaltemaßnahmen, beispielsweise durch Stilllegung von Schöpfwerken oder Einstellung der Entwässerung der Seitengewässer. Für diese Maßnahmen ist es erforderlich, dass hinter dem Deich Raum für die zeitweise Rückhaltung von Wasser vorgehalten wird. *Eine Berechnung zeigt, dass unter solchen Umständen mit diesem Maßnahmentyp eine wasserstandssenkende Wirkung um etwa 10 cm in der IJssel, die einer Abflußminderung um etwa 100 m³/s entspricht, zu erwarten ist.*

2. Retention am und im Rhein

Vom ehemaligen Überschwemmungsgebiet am Rhein stehen heute nur noch Reste zur Verfügung. Daraus ergeben sich Hochwasserverschärfungen. Zur Verbesserung der Hochwassersituation können Erweiterungen der Flussretention sowie Rückhaltungen neben dem Fluss beitragen. Die naturräumlichen Gegebenheiten der einzelnen Rheinabschnitte lassen jeweils nur bestimmte Maßnahmen zu. Die gesamte Rheinstrecke ist auf Möglichkeiten der Retention zu überprüfen.

2.1 Bodensee und Hoahrhein

Im Bodensee steht ein Rückhaltepotential von 5 Mio. m³ pro Zentimeter Wasserstandsänderung zur Verfügung. Vorbehaltlich geeigneter Vorhersagen könnte im Winterhalbjahr in der Regel eine See-

spiegelschwankung in der Größenordnung von 100 cm genutzt werden. Die Wirkung der Rückhaltung hängt vom Seezufluss der durchschnittlich etwa 10tägigen Hochwasserperioden und dem einzuhaltenen Mindestabfluss am Ausgang des Bodensees ab. Dies kann am Beispiel des Weihnachtshochwassers 1993 erläutert werden:

Der mittlere Seeabfluss betrug während der 10 für Köln kritischen Tage 325 m³/s. Eine Reduktion auf 260 m³/s, was dem mittleren monatlichen Dezemberabfluss entspricht, hätte eine Anhebung des Bodenseespiegels um 10 cm und für Köln eine Reduktion des Scheitelabflusses um 60 m³/s bzw. des Pegelstandes um 4 cm ergeben. Eine Drosselung des Seeabflusses um 200 m³/s auf 120 m³/s ergäbe einen Seespiegelanstieg um 35 cm und eine Pegelreduktion in Köln um etwa 12 cm. Wegen der langen Fließzeiten muß die Drosselung der Seeabflüsse mindestens 5 Tage vor Erreichen des Scheitels in Köln beginnen.

2.2 Oberrhein

Von ehemals 1.400 km² Überschwemmungsgebiet am Oberrhein stehen heute noch ca. 450 km² zur Verfügung. Letztmals wurde in den Jahren 1955 bis 1977 durch Ausbau des südlichen Oberrheins mit Staustufen eine Fläche von 130 km² ausgedeicht. Die sich daraus ergebenden Hochwasserverschärfungen sollen durch Rückhaltungen im Flussbett und in Poldern neben dem Strom ausgeglichen werden. Der ursprüngliche Retentionsbedarf wurde 1978 mit etwa 220 Mio. m³ ermittelt (deutsch-französischer Vertrag vom 6.12.1982).

Die Änderung des Konzeptes unter Beachtung ökologischer Randbedingungen wie Begrenzung von Wassertiefen und Vermeidung von Standzeiten in Poldern hat das erforderliche Rückhaltevolumen auf zurzeit 290 Mio. m³ erhöht. Neben den Aktivitäten zum Ausgleich der Hochwasserverschärfungen aus dem Staustufenbau im Rhein wurden auch die Möglichkeiten zur Rückgewinnung weiterer stromab ausgedeichter Auenbereiche untersucht. Dabei ist das Ziel, die Hochwassersituation für die Unterlieger allgemein zu verbessern, was mit den vorgenannten Maßnahmen südlich der Neckarmündung nur zufallsweise gelingen kann.

Seit 1988 stehen Teile der Maßnahmen am südlichen Oberrhein zur Verfügung. Sie sind entsprechend internationaler Vereinbarungen nach festen Vorgaben einzusetzen und müssen eine Überflutung der Deiche unterhalb der Staustufenstrecke verhindern. Bei einem Hochwasser im März 1988 wurden erstmals 25 Mio. m³ Rückhaltevolumen eingesetzt. Modelltechnische Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass die auf den Pegel Maxau ausgerichtete Wirkung auch alle Scheitelwerte stromab günstig beeinflusst hat. Allerdings verminderten sich die Scheitelreduktionen von 265 m³/s in Maxau (entspricht 23 cm) auf 100 m³/s in Andernach (entspricht 6 cm). In Köln betrug die Scheitelreduktion etwa 3 bis 5 cm und hat damit gerade die Überflutung der mobilen Schutzwand vor der Kölner Altstadt verhindert.

Nach Fertigstellung aller geplanten Retentionsmaßnahmen am Oberrhein müssen bei 200jährigen Hochwassern Scheitelreduktionen um 700 m³/s auf 5000 m³/s in Maxau bzw. um 800 m³/s auf 6000 m³/s in Worms erreicht werden. Das Beispiel 1988 hat deutlich gemacht, daß die bereichsweise Verminderung von Abflüssen eines Hochwassers beim Ablauf der Welle längs der Flussachse erhebliche Veränderungen erfährt. Dabei sind zwei Aspekte von Bedeutung: Einerseits die Wellenabflachung, d.h. auch die Abnahme des Abminderungseffektes stromab; andererseits die durch die Ereignisregionalität bewirkte Scheitelverschiebung, vor allem infolge Wellenüberlagerung mit den Nebenflüssen.

Technische (gesteuerte) Rückhaltungen werden immer mit ganz bestimmter Zielsetzung betrieben. Sie wirken damit sektoral auf bestimmte Orte. Die technischen Rückhaltungen am Oberrhein haben aber auch Wirkungen auf den Niederrhein. *Bei 200jährigen Ereignissen am Oberrhein sind für Hochwasser am Pegel Kaub maximale Abflussreduzierungen von 1.210 m³/s (entspricht ca. 100 cm), minimal 660 m³/s und im Mittel 890 m³/s möglich. Für den Niederrhein (Pegel Köln) ergeben sich geringere Werte. Die Abflussreduzierungen betragen maximal 1.000 m³/s, minimal 520 m³/s und im Mittel 800 m³/s. Dies entspricht maximalen Wasserstandssenkungen von 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 1.230 m³/s als Maximum, 670 m³/s als minimale Abminderung und im Mittel 890 m³/s. Diese Ergebnisse wurden mit Modellrechnungen ermittelt.

Es zeigt sich, dass bei großen Rheinhochwassern, sofern deren Scheitel durchweg vom Oberrhein bestimmt werden, rund 80 % der am Oberrhein erzielten Scheitelreduktion auch am Niederrhein wirksam sind.

Die Scheitel von Hochwassern, die nicht hauptsächlich am Oberrhein entstehen, werden stromab häufig durch die nachfolgenden 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 Mittel- und Niederrhein erheblich kleiner ausfallen als oben angegeben. *Ob diese Werte jeweils scheitelwirksam werden und mit welchen Anteilen hängt von der Hochwassergenese, d.h. dem Zusammenspiel der verschiedenen Teileinzugsgebiete des Rheins ab.*

Untersuchungen theoretischer Rückhaltmaßnahmen im Rheinabschnitt zwischen Neckar- und Mainmündung haben gezeigt, daß hier noch umfangreiche ehemalige Überflutungsflächen zu Rückhaltzwecken wieder zurückgewonnen werden könnten. Um ein Gefühl für deren Wirkung nach unterstrom zu erhalten, wurden Hochwasserablaufberechnungen unter Einsatz steuerbarer Großpolder kurz oberhalb der Mainmündung durchgeführt. Insgesamt wurde ein Volumen von 80 Mio. m³ angesetzt und nach unterschiedlichen Kriterien zur Retention herangezogen.

Ziel der Steuerung war es, alle für den Rhein denkbaren Scheitelbereiche, also einen möglichst langen Wellenabschnitt möglichst gleichmäßig zu beeinflussen, weshalb die Summe der Poldereinlaufmen-

gen mit maximal rund 400 m³/s gewählt wurde. Die Füllungen wurden nach dem vor-Ort-Abfluss des Rheins gesteuert. Im Optimalfall lag der Beginn bei $Q_{\text{Rhein}} = 5000$ bis 5300 m³/s. Das entspricht einem HQ₃₀ bis HQ₅₀ am Bezugspegel Worms. Das Ergebnis ist eine Abminderung aller Scheitelhöhen von 13 Modellhochwassern (mit 200-jährlichen Scheitelabflüssen in Worms) rheinabwärts um Beträge, die rund 95 % der Ausgangsabminderungen auch noch am Niederrhein erreichen. Dabei erstreckt sich die Beeinflussungsdauer über 3 bis 4 Tage, weshalb mit diesen Maßnahmen vermutlich auch Hochwasser, die hauptsächlich der Mosel zuzuschreiben wären, noch beeinflusst werden könnten, vorausgesetzt, die Abflüsse wären auch oberhalb der Mainmündung entsprechend groß. *Mit den hier angenommenen 80 Mio. m³ Retentionsvolumen unmittelbar oberhalb der Mainmündung wären somit in günstigen Fällen bei 200jährlichem Scheitelabfluss in Worms zusätzliche Wasserspiegelsenkungen von 20 bis 25 cm im Mittelrhein und im Raum Köln erzielbar (im Mittel 20 cm bis Köln und 15 cm in Lobith).*

Der Einsatz temporärer Rückhaltungen bedeutet immer Abflussumverteilungen während des Hochwassers. Dies heißt, dass die zur Erzielung einer Abminderung des Hochwasserscheitels am Ort der Maßnahme zurückgehaltenen Volumina (möglichst frühzeitig) wieder abzugeben sind. In Einzelfällen wird zur Erhöhung der Effizienz solcher Maßnahmen auch Retentionsraum vorentleert. Alle Entleerungen führen zur Erhöhung der Wasserstände stromabwärts. Es besteht die Gefahr, dass diese Erhöhungen flussabwärts sensible Wasserstandsbereiche treffen.

Am Oberrhein existieren **Sommerdeichsysteme**. Zwischen der Neckarmündung und Bingen umfassen diese einen geschätzten Rückhalteraum von 70 Mio. m³. Die Sommerpolder können mittlere Hochwasser gegenüber den Hauptdeichen - im Mittel ca. 1 m geringere Deichhöhe - deutlich reduzieren. So wäre der am Pegel Kaub etwa 15jährige bzw. am Pegel Andernach ca. 20jährige Hochwasserscheitel von Mai/Juni 1983 um etwa 150 m³/s höher aufgelaufen, wenn die Sommerdeiche zwischen Worms und Bingen nicht bestanden hätten.

Die Änderung der Scheitelabflüsse am Pegel Kaub infolge Aufgabe sämtlicher Sommerdeiche zugunsten natürlicher Ausuferungsflächen wurde anhand von 120 Modellhochwassern quantifiziert. Die Berechnungen machen deutlich, dass sich die *abflussreduzierende Wirkung der zwischen Worms und Bingen liegenden Sommerpolder auf einen weiten Bereich der Hochwasserscheitel auswirkt. Sie beginnt im Mittel bereits bei Hochwasserscheiteln mit einem Wiederkehrintervall am Pegel Kaub von etwa 10 Jahren, und das Optimum kann bei Wiederkehrintervallen des Scheitelabflusses von rund 20 bis 25 Jahren mit im Mittel rund 100 m³/s (entspricht ca. 10 cm) angegeben werden.*

Die große Streuung ist bedingt durch den jeweils unterschiedlich hohen Mainzufluss. Unterhalb der Moselmündung wird die Wirkung der Sommerpolder durch das zeitliche Zusammentreffen von Rhein und Moselscheitel beeinflusst. Die Sommerpolder bewirken aber auch unterhalb der Moselmündung noch eine deutliche Reduzierung der Rheinscheitel.

Im französischen Bereich des Oberrheins sind bisher nicht genannte Möglichkeiten zur Hochwasserrückhaltung mit einem Gesamtvolumen von rund 16 Mio. m³ denkbar. Bei entsprechender Steuerung könnten damit ca. 90 m³/s über 2 Tage zurückgehalten werden. Dies entspräche einer Scheitelabminderung um knapp 10 cm am Oberrhein.

2.3 Mittelrhein

Der Mittelrhein durchfließt ein enges Durchbruchstal des Rheinischen Schiefergebirges. Hier existieren keine weiträumigen Überschwemmungsbereiche; Deiche sind die Ausnahme.

Aus den Untersuchungen zum Gesamtkonzept für den örtlichen Hochwasserschutz an Mosel und Mittelrhein ergibt sich, dass die Auswirkungen auf die Scheitelabflüsse von Hochwasser außerordentlich gering sind und nahe bei Null liegen.

Generell lässt sich feststellen, dass, sofern die Hochwasser kleiner bzw. gleich dem gewählten Hochwasserschutz sind, sich allgemein eine geringe Verschärfung des Abflusses einstellt. Übersteigen die Hochwasser den gewählten Hochwasserschutz, so ergibt sich eine Abminderung. Dies ist die Folge einer Verringerung der Retentionsräume bis zum Bemessungsziel. Bei Übersteigen des Bemessungswasserstandes werden die dahinter liegenden Überflutungsflächen wieder mit Speicherwirkung bis zur Höhe des Bemessungszieles geflutet. Bei weiter ansteigendem Hochwasser gehen die Abflussdifferenzen wieder gegen Null. *Die Auswirkungen auf die Scheitel sind außerordentlich gering.*

2.4 Niederrhein

In Nordrhein-Westfalen werden 3 Polder im Bereich Köln und 8 Polder im Bereich Düsseldorf (rund 174 Mio. m³ Retentionsraum) als realisierbar angesehen. *Dadurch wird sich für sehr extreme Hochwasser bei Annahme geeigneter Steuerungen eine weitere Scheitelreduktion von ca. 30 cm für den Pegel Lobith ergeben.* Sollten nur 4 Maßnahmen als Taschenpolder realisiert werden, so vermindert sich die Reduktion auf ca. 10 cm.

2.5 Deltarhein

Derzeit gibt es in den Niederlanden keine Möglichkeit zur zeitweisen Speicherung von Rheinwasser beim Durchfluss einer Hochwasserwelle. Städte, Dörfer und intensive Bebauung in den eingedeichten Gebieten am Fluss bilden wichtige begrenzende Faktoren. Eine Untersuchung zeigt, dass Möglichkeiten für die Schaffung von Rückhalteräumen von etwa 3000 ha bestehen. *Modellberechnungen zeigen, dass eine Scheitelreduzierung um etwa 10 bis 20 cm möglich ist.* Die gesamte Wassermenge, die zeitweise in Rückhalteräumen gespeichert werden kann, beträgt 100 bis 150 Mio. m³. Das entspricht

einer Scheitelabflussreduzierung von 500 bis 750 m³/s bei dem heutigen 1/1250-jährlichen Bemessungsabfluss von 15.000 m³/s bei Lobith. Der Einsatz von Rückhalteräumen wäre, unter dem Gesichtspunkt des Hochwasserschutzes eine sehr wirkungsvolle Maßnahme, die aber eine sorgfältige Abstimmung mit anderen Nutzungen erfordert.

Als Unterlieger am Rhein und wegen der begrenzten Retentionsmöglichkeiten im Einzugsgebiet und am Strom nützt den Niederlanden vor allem eine Erhöhung der Abflusskapazität. Bestimmende Faktoren dafür sind die Größe des Durchflussquerschnitts und der Fließwiderstand des Flussbettes. Verschiedene Maßnahmen sind zur **Erhöhung der Durchflusskapazität** denkbar. Im April 1997 startete der Rijkswaterstaat eine Studie über den Ausbau des Rheins, die das Projekt "Integrale Verkenning inrichting Rijntakken" fortführt. Diese Studie "Ruimte voor de Rijntakken" soll bis zum Ende des Jahres 2000 die Effekte der möglichen Maßnahmenkombinationen abschätzen und die Durchsetzbarkeit verschiedener Maßnahmenpakete prüfen, mit denen im Zeitraum bis 2010 bei zunehmenden Abflussmengen der heutige Hochwasserschutz gewährleistet und eine Deicherhöhung möglichst vermieden werden kann. Es wird von einem Bemessungsabfluss von 16.000 m³/s bei Lobith ausgegangen; der derzeitige Bemessungsabfluss liegt bei 15.000 m³/s. *Die Abflusszunahme, die auf der Basis der letzten Hochwasserereignisse 1993 und 1995 angenommen wird, führt bei einem unveränderten Flussbett zu 10 bis 30 cm höheren Wasserständen in den Rheinarmen.* Auch wird ein Szenario betrachtet, bei dem der Rheinabfluss noch weiter ansteigt.

Im weiteren folgen in beliebiger Reihenfolge mögliche querschnittserweiternde Maßnahmen und die potentiellen wasserstandssenkenden Wirkungen, die bei **vollständiger Umsetzung** dieser Maßnahmen in den Rheinarmen erreicht werden könnten. Bei lokaler Umsetzung ist die Wirkung wesentlich geringer.⁹

Maßnahmen im untersten Bereich des Deltarheins sind für die Wasserstände von relativ geringer Bedeutung, da die Wasserstände stromabwärts von Krimpen aan de Lek (Lek), Dordrecht (Waal/Merwede) und Kampen (IJssel) zum großen Teil durch Meereseinflüsse bestimmt werden.

Durch die Sohlensenkung des Niedrigwasserbettes liegen die Buhnen, die zwischen 1860 und 1920 gebaut wurden, höher als morphologisch unbedingt notwendig. Ohne den Wirkungsgrad zu reduzieren, können die **Buhnenrücken abgesenkt** werden, eine Maßnahme, die mit hohen Investitionen verbunden ist. Die Erniedrigung hat vor allem zur Folge, dass der Strömungswiderstand der Buhnen abnimmt. *Die Erniedrigung der Buhnen um 0,5 und 1 m würde zu einer mittleren Senkung der Hochwasserstände zwischen 5 und 10 cm führen.*

Zufahrten für (Eisenbahn-)Brücken und Zufahrtstraßen zu Fähren und bebauten Gebieten bedeuten im Vorlandbereich bei Hochwasser Abflusshindernisse und haben Stauwirkung. Durchlässe oder Pfeiler würden die stauende Wirkung reduzieren.

⁹ Wasserstandssenkungen wirken sich vor Ort und nach oberstrom aus. Die Effekte mehrerer Maßnahmen können sich auch überlagern. Die kumulierende Wirkung aller nachfolgend genannten Maßnahmen kann zu einer Wasserstandsabsenkung von 40-80 cm in Lobith führen. Voraussetzung ist, dass die heutige Bodennutzung erhalten bleibt; Renaturierungen würden die Wirkung verringern.

Eine Abschätzung zeigt, dass solche Infrastrukturen vor allem am Neder-Rijn zwischen Arnheim und Rhenen vorhanden sind. Entlang der IJssel finden sich keine besonderen **hydraulischen Engpässe**: der zu erzielende Gewinn in Bezug auf die Wasserstandsabnahme ist geringer als 5 cm. Die Stauwirkung von Brücken und Fährstegen an der Waal ist von geringer Bedeutung. An allen Rheinarmen befinden sich in größerem oder geringerem Ausmaß hydraulische Engpässe wie z.B. Eisenbahnbrücken. Anpassungen erzielen hier keine Wirkung in Bezug auf den dominierenden Einfluss von Deich-einschnürungen. *Entlang der Rheinarme befinden sich wenige oder keine wichtigen hydraulischen Engpässe. Eine Ausnahme ist der Neder-Rijn zwischen Arnheim und Rhenen. Vollständige Beseitigung dieser Engpässe ergäbe eine Senkung der Hochwasserstände zwischen 10 und 20 cm.*

In den Vorlandbereichen existieren an mehreren Stellen **höhergelegene hochwasserfreie Gebiete**. Der Anteil an der gesamten Fläche der Vorlandbereiche beträgt etwa 3 %. Diese Flächen sind verhältnismäßig gut über die Rheinarme verteilt. Die Gebiete sind zum größeren Teil bebaut worden, insbesondere mit Ziegeleien, die meistens außer Betrieb sind.

Die Stauwirkung dieser hochwasserfreien Gebiete und damit die wasserstandsreduzierende Wirkung bei Beseitigung dieses Zustandes hängt stark vom Standort im Vorlandbereich und vom Strömungsbild des Flusses vor Ort ab. In diesem Sinne ist das Abgraben (Tieferlegung) bisher hochwasserfreier Gebiete im engen, relativ schnell durchflossenen Flussbett bei Arnheim wirkungsvoller als dieselbe Maßnahme bei geringer Strömung in einem breiteren Flussabschnitt. *Das Abgraben (Tieferlegung) bisher hochwasserfreier Gebiete an den Rheinarmen wäre beim Bemessungsabfluss mit einer beschränkten Wasserstandsabnahme von 5 bis 10 cm verbunden. Örtlich sind größere Auswirkungen zu erreichen.*

Im Laufe der Zeit ist in den Vorlandbereichen ein komplexes System von Deichen entstanden. Die **Sommerdeiche am Niedrigwasserbett** fungieren in erster Linie als Schutzanlagen der landwirtschaftlich genutzten Vorlandbereiche gegen hohe Abflüsse. Des weiteren fungieren die Sommerdeiche als Stromleitwerke, die große Abflussunterschiede zwischen Niedrigwasserbett und Vorländern vermeiden helfen. Dies ist für die Sohlentwicklung des Niedrigwasserbettes von Bedeutung. Deiche um Tümpel und Längs- und Querdämme haben eine vergleichbare Funktion. Weiterhin gibt es Deiche, die Zugang zu landwirtschaftlichen Parzellen, Häusern und Ziegeleien bieten. Das Deichsystem bestimmt in der heutigen Situation wesentlich den Strömungswiderstand, den ein Vorlandbereich mit landwirtschaftlicher Nutzung bei Hochwasser bietet. *Insbesondere im niederländischen Deltabereich hätte die Beseitigung von Sommerdeichen eine wasserstandssenkende Wirkung um insgesamt 5 bis 10 cm. Die Unterschiede entlang des Flusses sind relativ groß. Das Abgraben sämtlicher Deiche in den Vorlandbereichen würde zu einem höheren Ergebnis führen. Solche Beseitigungen wurden Anfang des 19. Jahrhunderts u.a. an der IJssel durchgeführt, um den Fluss so auszubauen, dass er sich für die Hochwasser- und Eisabfuhr eignete. Das Beispiel einer Strecke des Midden-Waal zeigt, dass damit eine Wasserstandssenkung von 15 cm erreicht werden könnte.*

Nebenrinnen sind in der heutigen Flusslandschaft verschwunden. Die Zielsetzung, "eine stabile Hauptrinne", ließ sich nicht mit einem System von Nebenrinnen verbinden, die (natürlich) durch Aufsandung, Verlandung und Erosion regelmäßig ihre Lage verändern. In reduzierter Form und in Kombi-

nation mit einem sorgfältigen Entwurf gibt es allerdings Möglichkeiten. Zu beachtende Punkte sind: Gestaltung des Einlasses, Stabilität von Außenkurven und Abstand zum Deich. In einigen Bereichen der Rheinarme wird die Anlage von Nebenrinnen zurzeit vorbereitet. Nebenrinnen erweitern den Durchflussquerschnitt des Flussbettes. Für die Rinnenbreite ist ein Viertel der Niedrigwasserbettbreite beibehalten worden. Weiterhin wurde vorausgesetzt, dass die Nebenrinnen an einer der beiden Flussseiten angelegt sind. *Die Anlage von Nebenrinnen über die vollständige Länge der Rheinarme würde eine Senkung der Hochwasserstände um etwa 5 bis 10 cm bedeuten. Relativ starke Unterschiede treten entlang des Flusses auf.*

Nachdem die Vorländer eingedeicht waren, wurden diese im Laufe der Jahrhunderte durch Auflandung immer mehr erhöht. Der Prozess hält immer noch an. Allerdings verlangsamt er sich. Der Höhenunterschied zwischen dem vor und hinter dem Deich befindlichen Gebiet ist das sichtbare Ergebnis. Bei extremen Hochwassern steigt das Wasser hoch über das Gebiet, das hinter den Deichen liegt. Entlang der Waal sind Niveauunterschiede von 6 m keine Ausnahme. Durch die Auflandung der Vorlandbereiche hat der Fließquerschnitt in diesem Teil des Flussbettes abgenommen. Wiederherstellung ist dadurch möglich, dass der aus dem Schlamm entstandene Lehm beseitigt wird; durchschnittlich wird die Sohle dadurch etwa um 30 cm erniedrigt. Vielleicht muss man aber einen Schritt weitergehen und den darunter liegenden Sand oberflächlich abgraben, um letztendlich eine höhere Wasserstandsreduzierung zu erreichen. *Durch Tieferlegung sämtlicher Vorländer um 50 cm erreichen die Bemessungshochwasserstände ein Niveau, das etwa 20 cm unter dem jetzigen liegt. Eine doppelt so tiefe Lage würde eine zweifach höhere Wirkung erzielen.*

Um ein genaues Bild der wasserstandsreduzierenden Wirkung der **Tieferlegung von Vorländern** zu erhalten, wird - wie in den Berechnungen für die sonstigen Maßnahmen - die heutige Abflussverteilung an den Teilungspunkten der Rheinarme beibehalten. Dazu wären Stromleitwerke im Umkreis der Teilungspunkte anzulegen, beispielsweise in Form von Längs- und Querdämmen. Wäre dies nicht möglich oder kann die beabsichtigte Wirkung nicht erreicht werden, so wäre beispielsweise die Differenzierung der Vorlandtieferlegung pro Rheinarm eine Lösung.

Durch Eindeichung wurde die ursprüngliche Überflutungsfläche des Flusses von einigen dutzend Kilometern bis zu einigen hundert Metern an manchen Stellen stark eingeschränkt. Im Gegenzug jedoch hat der Fluss eine enge, aber tiefe Hauptrinne erhalten. Dieses System ist für verschiedene Nutzungszwecke zufriedenstellend. Deichüberströmungen sind schon lange nicht mehr aufgetreten. Die Deiche wurden von Zeit zu Zeit erhöht, wenn sich herausstellte, daß der Fluss mehr Raum brauchte. Ein Beispiel ist die heutige Deichverstärkungsrunde. Aber möglicherweise ist in Zukunft bei steigenden Abflüssen als Alternative zur Deicherhöhung und nach Prüfung aller sonstigen Möglichkeiten eine Maßnahme, die wie keine andere dem Fluss (wieder) Raum gibt, unvermeidlich: **Vergrößerung der Vorländer** durch landseitige Rückverlegung der Deiche. Vergrößerung der Vorländer ist im wasserwirtschaftlichen Sinne eine attraktive Maßnahme dort, wo die Vorlandbereiche relativ schmal sind und eingeschnürt zwischen den Winterdeichen liegen. Oft sind dies jedoch Gebiete mit unmittelbar an den Fluss grenzenden Städten und Dörfern. Rückverlegung der Hochwasserschutzanlagen ist dort keine

Option. Wenn man einen begrenzten Prozentsatz an Bebauung als Kriterium zugrunde legt, so sind solche Maßnahmen nicht im voraus ausgeschlossen, insbesondere wenn sie allmählich durchgeführt werden. Eine Abschätzung zeigt, dass über das Flussgebiet verteilt etwa 90 km Flussdeiche diesem Kriterium entsprechen würden. Der Abstand, über den der Deich möglicherweise landeinwärts zurückverlegt werden kann, beträgt durchschnittlich etwa 400 m. *Den Erwartungen entsprechend ist die Rückverlegung von Winterdeichen, womit der Raum für den Fluss stark erweitert wird, eine wirkungsvolle Maßnahme. Diese Maßnahme würde Perspektiven für Flussstrecken mit geringer Besiedlung hinter dem Deich bieten. Sie wäre über das Flussgebiet verteilt. Die Strecken wären im allgemeinen kurz. Trotzdem zeigen orientierende Berechnungen eine relativ große Wirkung: eine Wasserstandsabnahme von 20 bis 40 cm.*

2.6 Retention, gesteuert oder ungesteuert - eine Bewertung

Zur Wirkung der **Reaktivierung ehemaliger Überschwemmungsgebiete** wurden zahlreiche Modellberechnungen durchgeführt. Grundsätzlich gilt für **ungesteuerte Retention**, dass gegenüber **gesteuerter Rückhaltung** ein Vielfaches an Volumen (Fläche) für die Erzielung gleicher Wirkung erforderlich ist. Für die Wirkung im Einzelnen sind verschiedene Gegebenheiten wie z.B. die Dynamik der Wellen und die örtlichen Bedingungen entscheidend.

Für die Rückhaltungen am Oberrhein bis Worms wurde ein Faktor ermittelt, der zwischen 1 und 8, im Mittel zwischen 3 und 4 lag. In Einzelfällen wurden Faktoren ermittelt, die weit über 20 lagen. Berechnungen mit Poldern am Niederrhein führten zu gleichen Ergebnissen.

Zur Wirkung von **Deichrückverlegungen** für eine ungesteuerte Retention wurden beispielsweise für den Raum Hördt (Rhein-km 327) verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Hierzu kam auch ein zweidimensionales mathematisches Strömungsmodell zum Einsatz.

Bei der Berechnung wurde ein Rückhalteraum von gut 20 Mio. m³ zugrunde gelegt. Die Auswirkungen der Rückverlegung auf den Wasserspiegelverlauf zeigen sich in Form einer Absenkung des Rheinwasserstandes gegenüber dem Istzustand in einer Größenordnung von 10 - 30 cm. Dieser Wert gilt nur für den lokalen Bereich der Deichrückverlegung. Die Wirkung stromab ist wesentlich geringer. *Für das 200jährige Bemessungshochwasser in Worms ist eine mittlere Reduzierung der Scheitel um ca. 30 m³/s (entspricht ca. 2 cm) errechnet worden. Für ein Kollektiv von ca. 70 Hochwassern ergibt sich für den Pegel Kaub (Mittelrhein) eine mittlere Scheitelreduzierung um ca. 15 m³/s (entspricht ca. 2 cm). Der Mittelwert für Hochwasser mit mehr als 5.000 m³/s beträgt dort ca. 20 m³/s (entspricht ca. 2 cm). Je nach Hochwassertyp ist mit einer erheblichen Streuung der erreichbaren Abminderungen zu rechnen.*

3. Wirkungsabschätzung von Retentionsmaßnahmen im Rheingebiet, bezogen auf die drei Hochwasser Mai 1983, März 1988 und Januar 1995

Um die nachfolgend ermittelten Zahlenwerte besser einordnen zu können, sind in Tabelle 1 die historisch eingetretenen Scheitelabflüsse der genannten Hochwasser und deren Jährlichkeiten zusammengestellt.

Tabelle 1: Scheitelabflüsse und deren Jährlichkeiten der Hochwasser Mai 1983, März 1988 und Januar 1995 an ausgewählten Pegeln

Ereignis	Pegel							
	Maxau		Worms		Kaub		Köln	
	HQ in m³/s	Jährlichkeit in Jahren						
Mai '83	4.260	20	5.250	50 - 25	6.110	20 - 15	9.910	22 - 15
März '88	4.090	15	5.270	50 - 25	7.200	95 - 65	9.580	18 - 12
Jan. '95	4.080	15	4.290	7 - 5	6.670	38 - 29	10.900	70 - 45

Die Jährlichkeiten sind aus historischen Scheitelkollektiven berechnet; bei Nennung von zwei Jährlichkeiten fußt die zweite auf Scheitelabflüssen, umgerechnet auf den heutigen Zustand.

Es erfolgt eine Wirkungsabschätzung der auch im Hauptbericht betrachteten Maßnahmen:

- Regelung des Bodensees (1)
- Bereitstellung aller derzeit in Erfüllung der vertraglichen Verpflichtungen vorgesehenen Retentionsmaßnahmen am südlichen Oberrhein (Steuerung F39) (2)
- Bereitstellung von zusätzlich 80 Mio. m³ Ret.-Raum zwischen Neckar- und Mainmündung (3)
- Bereitstellung der für NRW geplanten Polder (4)
- Berücksichtigung eines Maßnahmenpakets im Bereich der niederländischen Rheinarme (5)
- Berücksichtigung von Maßnahmen am Deltarhein (6)
- Berücksichtigung von Retentionsmöglichkeiten an Nebengewässern des Rheins (7)

Einrechnung von Rückhaltungen in der Fläche des Rheingebiets (8)

(1) Auswirkungen einer Rückhaltung im Bodensee

Um die Auswirkungen der Regulierung des Bodensees zugunsten des Hochwasserschutzes am Ober- und Mittelrhein im Rahmen der natürlichen Schwankungen zu halten, werden für den konkreten Einsatz folgende Randbedingungen gesetzt:

- Der Seeabfluss in Konstanz soll durch die Retention nicht geringer werden als der für den Hochwassermonat geltenden vieljährige mittlere Abfluss (MQ).
- Der Seespiegel soll infolge der Retention das größte vieljährige Monatsmaximum (MHW) nicht überschreiten.

Wie angesichts der erforderlichen langen Vorhersagezeiten von 5 bis 10 Tagen der konkrete Einsatz zu steuern ist und wie die Rückführung auf das unregulierte Niveau zu erfolgen hat, wird nicht untersucht. Angesichts der bestehenden politischen Widerstände der Anrainerstaaten wird die Durchsetzbarkeit ausdrücklich nicht diskutiert, sondern nur die mögliche Wirkung unter optimalen Betriebsbedingungen aufgezeigt.

A) HW Mai 1983

Für Konstanz gilt: $MQ_{\text{Mai}} = 345 \text{ m}^3/\text{s}$

$MHW_{\text{Juli}} (1974/83) = 456 \text{ cm a.P.}$

Im Maximum der 10-tägigen Hochwasserperiode wird MQ um **245 m³/s** überschritten. Setzt man diesen Betrag als Rückhaltung über 10 Tage ein, so ergibt sich eine Seespiegelanhebung um **42 cm**, d.h. auf maximal 452 cm a.P. (< MHW_{Juli})

B) HW März 1988

Für Konstanz gilt: $MQ_{\text{März}} = 220 \text{ m}^3/\text{s}$

$MHW_{\text{Juli}} (1979/88) = 460 \text{ cm a.P.}$

Im Maximum der 10-tägigen Hochwasserperiode wird MQ um **125 m³/s** überschritten. Dieser Abfluss 10 Tage lang zurückgehalten ergibt eine Seespiegelanhebung um **22 cm**, d.h. auf max. 377 cm a.P. (< MHW_{Juli})

C) HW Januar 1995

Für Konstanz gilt: $MQ_{\text{Jan.}} = 210 \text{ m}^3/\text{s}$

$MHW_{\text{Juli}} (1986/95) = 445 \text{ cm a.P.}$

Im Maximum der 10-tägigen Hochwasserperiode wird MQ um **70 m³/s** überschritten. Dieser Abfluss 10 Tage lang zurückgehalten ergibt eine Seespiegelanhebung um **12 cm**, d.h. auf max. 334 cm a.P. (< MHW_{Juli})

Im Mittel hätten nach der vorstehenden Ermittlung

1983	ca. 300 m ³ /s
1988	ca. 200 m ³ /s
1995	ca. 50 m ³ /s

über 10 Tage zurückgehalten werden können. Wegen der langen Dauer der Retention ist die Wirkung stationär, d.h. überall am Rhein in voller Höhe wirksam.

(2)(3) Auswirkungen von Retentionen am Oberrhein

Die Berechnungen wurden im Nov. 1997 mit der zu diesem Zeitpunkt für die volle Maßnahmenrealisierung gültigen Steuerung F39 durchgeführt.

Ausgehend von den gemessenen Wellen in Basel wurden die Beeinflussungen infolge der Steuerung F39 bis Köln ermittelt. Die Unterschiede ergeben sich aus Vergleichen gerechneter Wellen (Zustände ohne und mit Retention). Die Steuerung der Polder am nördlichen Oberrhein ist wie F39 für den Maximalfall HQ₂₀₀ optimiert und bringt dementsprechend geringe Wirkungen für die ausgewählten Hochwasser. Die zwischen Neckar- und Mainmündung angenommenen 80 Mio. m³ Retentionsraum werden bei Abflüssen von $Q_{\text{Rhein}} = 5000$ bis 5300 m³/s (vor Ort) aktiviert. Diese Werte sind durch Retention oberhalb bereits unterschritten. Die angesetzte Steuerung würde den Retentionsraum unterhalb der Neckarmündung deshalb nicht aktivieren. Die Ergebnisse der Berechnungen für die drei Pegel Worms, Kaub und Köln finden sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Rechnerische Scheiteldifferenzen in m³/s und cm

Pegel	Ereignis	Differenzen aus Rechnung ohne Maßnahmen und					
		Rechnung mit Maßn. F 39		Rechnung mit Maßn. F39 und nördl. Neckar		Rechnung mit Maßn. nördl. Neckar	
		ΔQ m³/s	ΔW cm	ΔQ m³/s	ΔW cm	ΔQ m³/s	ΔW cm
Worms	Mai 1983	250	21	-	-	-	-
	März 1988	170	13	-	-	-	-
	Januar 1995	60	6	-	-	-	-
Kaub	Mai 1983	130	11	130	11	40	3
	März 1988	270	20	320	23	210	16
	Januar 1995	60	5	60	5	0	0
Köln	Mai 1983	190	12	190	12	50	3
	März 1988	100	6	140	8	110	7
	Januar 1995	50	3	50	3	0	0

Während des Hochwassers im März 1988 waren am Oberrhein Teile der Polder Altenheim und des Volumens hinter dem Kulturwehr Kehl mit insgesamt 25 Mio. m³ Retentionsraum eingesetzt. Dadurch wurden die Scheitelabflüsse in Worms um 140 m³/s, in Kaub um 120 m³/s und in Köln um 60 m³/s reduziert.

(4) Wirkung der NRW-Polder

In einer Untersuchung des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe vom Dezember 1996 wurde die Wirkung der am Rhein in NRW in Diskussion stehenden Rückhaltemaßnahmen untersucht. Insgesamt wurden, wie auch unter 2.4 angegeben, 11 Polderstandorte betrachtet. Die Berechnungen wurden in mehreren Alternativen durchgeführt, wobei die Variante mit 7 Flut- und 4 Taschenpoldern die wahrscheinlichste ist. Nicht mehr aktuell sind die von der Universität Karlsruhe angenommenen Volumina: Insgesamt stehen sie zur Zeit bei 161 Mio. m³ gegenüber 184 Mio. m³ in der Studie. Verändert wurden die Volumina aller Taschenpolder insgesamt um -11 % oder von 78 Mio. m³ auf 70 Mio. m³, im Einzelnen ergibt sich jedoch neben drei Verringerungen auch eine erhebliche Vergrößerung. Bei den Deichrückverlegungen wird ein Volumen halbiert, wodurch sich insgesamt eine Reduktion der Rückhaltung um 14 % (von 106 Mio. m³ auf 91 Mio. m³) ergibt. Demgegenüber steht ein Sommerpolder mit 25 Mio. m³, dessen Wirkung auf höhere Hochwasserabflüsse als bisher verschoben wird. Insgesamt können die für die ausgewählten Hochwasser ermittelten Abminderungen näherungsweise auch für die geänderte Konzeption gelten.

Damit ergeben sich in Lobith folgende Wellenabminderungen:

Ereignis	ΔQ m ³ /s	ΔW cm
Mai 1983	135	6
März 1988	140	6
Januar 1995	85	4

Ein großer Vorteil ergibt sich dadurch, dass sich das Eintreffen der Hochwasserscheitel um 12 Stunden verzögert.

(5)(6) Wirkung von Maßnahmen in den Niederlanden

Die kumulierte Wirkung der Maßnahmen an den niederländischen Rheinarmen sowie am Deltarhein hätte in Lobith für die HW 1983 und 1988 20-40 cm Reduktion bringen können (bei gleicher Bodennutzung in den Vorländern), zurückgehend auf 0 cm am Einflussgebiet von Nordsee und IJsselmeer; für das HW 1995 lassen sich 30 bis 50 cm abschätzen.

(7) Wirkung denkbarer Maßnahmen an Nebengewässern des Rheins

Infolge von Hochwasserrückhaltemaßnahmen in den Einzugsgebieten der großen Nebenflüsse des Rheins (Neckar, Main und Mosel) kann es zu Scheitelreduzierungen in Verbindung mit einem späteren Eintritt des Hochwasserscheitelzeitpunktes kommen. Hierbei sind tendenzielle Abflusserhöhungen der Rheinscheitel nicht auszuschließen. Dies ist für jedes Hochwasser gesondert zu betrachten. Die gesamten Abflüsse sind Richtwerte, die unter der Annahme jeweils ähnlicher Rückhaltungsmöglichkeiten in den Nebengewässern ermittelt wurden.

- A) HW Mai 1983: Verschärfungen der Rheinscheitel an Ober- und Mittelrhein um 55 m³/s sowie am Niederrhein um 40 m³/s sind denkbar.
- B) HW März 1988: Hier hätten geringe Verschärfungen für den Oberrhein mit 10 m³/s und am Mittelrhein mit 5 m³/s eintreten können. In Köln dagegen ermittelt sich eine Scheitelreduzierung um 10 m³/s.
- C) HW Januar 1995: Abschätzungen ergeben für dieses Hochwasser durchweg Verschärfungen der Rheinscheitel: 60 m³/s für den Oberrhein, 40 m³/s für den Mittelrhein und ca. 15 m³/s für den Niederrhein.

(8) Wirkungen aus Rückhaltungen in der Fläche

Bodennutzungsänderungen, Versickerung, Entsiegelung usw. werden durch den hilfswisen Ansatz eines Dauerrückhalts von 1 mm Niederschlag über den entsprechend überregneten Gebietsanteilen berücksichtigt.

- A) HW Mai 1983/HW Jan. 1995: Bei beiden Ereignissen ist eine Wirkung für den Oberrhein kaum wahrscheinlich. In Mittel- und Niederrhein ergeben sich aus Schätzungen Abminderungen von 65 und 105 m³/s (1983) bzw. 30 und 55 m³/s (1995).
- B) HW März 1988: Abminderungen der Abflussscheitel zwischen 35 m³/s am Oberrhein und 95 m³/s am Niederrhein wären vorstellbar.

Abschätzung der aus den Einzelergebnissen ableitbaren kumulierten Wirkungen

Die Rückhaltungen im Bodensee wirken auf die jeweilige Gesamtwelle und senken alle Abflüsse um gleiche Beträge. Damit beeinflussen sie die Einsatzzeitpunkte aller anderen Maßnahmen am Oberrhein. Gegebenenfalls werden die Einsätze dadurch verhindert. In die Modelle wurden jedoch Ganglinien ohne Abminderungen durch Bodenseeretention eingegeben, weshalb die kumulierte Wirkung aller anderen Maßnahmen abzuschätzen ist. Wirkungen der geplanten Maßnahmen in NRW konnten

nicht einbezogen werden.

Die bedeutendste Wirkung auf die Gesamtwelle hätte eine Bodenseeregulierung. Sie wäre das herrschende Element bei einer Wellenbeeinflussung 1983 und 1988 gewesen. Eine Abschätzung der kumulierten Wirkungen ergibt dementsprechend 1983 und 1988 große Rückhaltungen vom Bodensee. Dadurch werden die Wellen so sehr gedämpft, daß die Oberrheinmaßnahmen nicht mehr angesprungen wären. 1995 gilt das gleiche, jedoch auf niedrigerem Niveau.

- A) HW Mai 1983: Reduktionen zwischen 350 m³/s (Oberrhein) bis 450 m³/s (Niederrhein)
- B) HW März 1988: Reduktionen von gut 200 m³/s am Oberrhein, ca. 380 m³/s am Mittelrhein und rund 300 m³/s am Niederrhein
- C) HW Januar 1995: Reduktionen zwischen 0 und 50 m³/s

Umgesetzt in Wasserstände wären Ermäßigungen gemäß Tabelle 3 möglich gewesen. Dabei sind für den Pegel Lobith zusätzliche Absenkungen aus Querschnittsänderungen in den Niederlanden (5,6) berücksichtigt.

Tabelle 3: Rechnerische Abschätzung der möglichen kumulierten Scheitelabsenkungen in cm

Ereignis	Scheitelabsenkungen in cm an den Pegeln			
	Worms	Kaub	Köln	Lobith
Mai 1983	29	30	28	40-60
März 1988	19	28	19	35-55
Januar 1995	0-5	4	3	35-55

Aus den hier ermittelten Ergebnissen ist erkennbar, dass Reduktionen, die auf Oberrhein-Hochwasser wirken, in der Regel auf den Niederrhein durchschlagen. Von den drei betrachteten Ereignissen war die Welle Mai '83 schon südlich der Neckarmündung sehr bedeutsam. Dies führte in diesem Bereich und stromab zur höchsten Scheitelabminderung unter den drei Ereignissen. 1988 baute sich die Welle erst unterhalb des Neckars auf und 1995 erst unterhalb des Mains, was entsprechend geringere Abminderungen aus Oberrheinmaßnahmen zur Folge gehabt hätte. Außerdem wird klar, daß in den Niederlanden die bedeutendsten Effekte vor Ort erzielbar sind. Weiterhin ist ableitbar, dass die am Oberrhein für außergewöhnlich extreme Hochwasser (HQ₂₀₀) erarbeiteten Regelungen zukünftig schon bei vergleichsweise geringen Scheitelabflüssen im Oberrhein (HQ₁₀ bis < HQ₅₀) 25 bis 35 % (am Oberrhein) und 20 bis 30 % (stromab) der vollen Wirkung aller denkbaren Maßnahmen erwarten lassen.

Hochwasserentwicklung (Scheitelabfluß und Fülle) in Bezug auf die Größe der Teileinzugsgebiete des Rhein zwischen Rheinfelden und Lobith

