

Auftraggeber: Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser

Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein

Abschlussbericht

Juli 2004

Impressum

Der vorliegende Bericht wurde erstellt im Auftrag der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser mit finanzieller Unterstützung des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, des Ministerie van Verkeer en Waterstaat in den Niederlanden, der Provincie Gelderland in den Niederlanden und der Europäischen Union (Interreg IIIB NWE).

- Herausgeber:** Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Schwannstraße 3
40476 Düsseldorf
- Provincie Gelderland
Postbus 9090
6800 GX Arnhem
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland
Postbus 9070
6800 ED Arnhem
- Autor:** Dr.-Ing. R. Lammersen
- Mitglieder der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser:** Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Staatskanzlei Nordrhein-Westfalen
Bezirksregierung Düsseldorf
Staatliches Umweltamt Krefeld
Arbeitskreis der Deichpflichtigen im Regierungsbezirk Düsseldorf
Provincie Gelderland
Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Waterschap Rivierenland
Vereniging Nederlandse Riviergemeenten
- ISBN:** 9036956382
- Informationsdienste:** <http://www.munlv.nrw.de>
<http://www.gelderland.nl>
<http://www.minvenw.nl>
- Vertrieb:** Exemplare sind erhältlich von den obengenannten Herausgebern. Von diesem Bericht gibt es auch eine Niederländische Ausgabe mit dem Titel:
Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Nederrijn (ISBN 9036956390).

Inhaltsangabe

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	9
1.1 Veranlassung	9
1.2 Zielsetzung	10
1.3 Projektansatz	11
1.4 Projektorganisation	13
2 Untersuchungsgebiet	15
2.1 Definition Untersuchungsgebiet - Studiengebiet	15
2.2 Hydrologie	16
2.3 Hochwasserschutz und Abflusskapazität	19
2.3.1 Definition Bemessungsabfluss, Leistungsfähigkeit und Abflusskapazität	19
2.3.2 Heutiger Zustand im Untersuchungsgebiet, ein Überblick	19
2.3.3 Heutiger und zukünftiger Zustand im Studiengebiet	21
2.3.4 Zukünftiger Zustand im Untersuchungsgebiet oberhalb von NRW	25
2.4 Hochwasservermindernde Maßnahmen	26
2.4.1 Hochwasservermindernde Maßnahmen im Einzugsgebiet bis Andernach	26
2.4.2 Hochwasservermindernde Maßnahmen am Niederrhein	27
2.4.3 Hochwasservermindernde Maßnahmen in den Niederlanden	28
3 Methode	31
3.1 Modellierung extremer Abflüsse aus dem Rheineinzugsgebiet	31
3.2 Auswahl geeigneter Ganglinien	33
3.3 Überflutungen am Niederrhein	34
3.3.1 2D-Modellierung von Überflutungen am Niederrhein	34
3.3.2 Darstellung der Überflutungen am Niederrhein im 1D-Modell	36
3.4 1D-Modellierung des Wellenablaufs im Studiengebiet unter Berücksichtigung von Überflutungen und Hochwasser reduzierenden Maßnahmen	38
4 Extreme Abflüsse aus dem Rheineinzugsgebiet	41
4.1 Extreme Niederschläge führen zu extremen Abflüssen	41
4.2 Wirkung von Deichüberströmen und Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein	42
4.3 Auswahl geeigneter Ganglinien	44
4.4 Wie extrem sind die extremen Hochwasser?	46
5 Überflutungen am Niederrhein und in Gelderland	49
5.1 Überflutungsszenarien	49
5.2 Von den Überflutungen am Niederrhein betroffene Gebiete	50
5.2.1 Ergebnisse der 2D-Berechnungen	50
5.2.2 Ergebnisse 1D-Berechnungen	51
5.3 Dynamik der Überflutungen	53
6 Auswirkung der Überflutungen und Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf Scheitelabflüsse und Scheitelwasserstände im Rhein	57
6.1 Einleitung	57
6.2 Entwicklung der Scheitelabflüsse im Rhein	57
6.2.1 Wirkung der Überflutungen auf den Abfluss im Rhein	57
6.2.2 Wirkung der Überflutungen und der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf den Abfluss im Rhein bei unterschiedlichen Hochwassern	60

6.3	Auswirkung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf die Wasserstände im Rhein	64
6.3.1	Einleitung	64
6.3.2	Wirkung bereits realisierter Maßnahmen (Zustand 2002)	64
6.3.3	Wirkung der in NRW geplanten Maßnahmen (ohne Maßnahmen NL)	65
6.3.4	Optimalisierung der in NRW geplanten Maßnahmen („NRWMAX-Variante“)	67
6.3.5	Wirkung der niederländischen Maßnahmen	68
6.3.6	Grenzüberschreitende Wirkung aller geplanten Maßnahmen (NRW und NL)	68
6.4	Bezug zum Aktionsplan Hochwasser der IKS	70
6.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	72
7	Ganglinienform und Dauer des Hochwassers	75
8	Gespeicherte Wasservolumina	77
9	Was geschieht, wenn der Abfluss aus dem Rheineinzugsgebiet noch extremer wird?	81
9.1	Einleitung	81
9.2	Auswirkung möglicher Klimaänderungen auf den Abfluss aus dem Rheineinzugsgebiet	81
9.2.1	Globale Klimaänderung	81
9.2.2	Bereits beobachtete Variabilität hydrometeorologischer und hydrologischer Größen im Rheineinzugsgebiet	82
9.2.3	Auswirkung globaler Klimaänderungen auf das Rheineinzugsgebiet	83
9.3	Überflutungen am Niederrhein bei noch extremeren Abflüssen	85
9.4	Abflussscheitelwerte bei noch extremeren Abflüssen	87
10	Abflusskapazität und kritischer Abfluss	89
11	Genauigkeit der Ergebnisse	91
11.1	Vorbemerkung	91
11.2	Genauigkeit der berechneten Abflüsse bei Andernach	91
11.2.1	Gebrauch unterschiedlicher Modelle	91
11.2.2	Vereinfachter Ansatz zur Berechnung von Überflutungen am Oberrhein	92
11.3	Wirkung Variierung der Abflüsse bei Andernach auf die weiteren Ergebnisse für den Niederrhein und die Rheinzweige	93
11.4	Wirkung Variierung der Zuflüsse aus den Nebenflüssen	93
11.5	Vernachlässigung des Grundwassers	93
11.6	Auswirkung eines möglichen Anstiegs des Meeresspiegels.	94
11.7	Auswirkung morphologischer Entwicklung des Rheinhauptgerinnes	94
11.8	Wirkung der Annahme Deichüberströmen mit oder ohne Deichbruch	95
11.8.1	Umfang der Überflutungen	95
11.8.2	Abflüsse im Rhein	97
11.9	Vergleich der Scheitelabflüsse im Rhein (2D- und 1D-Berechnungen)	98
11.10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	99
12	Schlussfolgerungen und Ausblick	101
12.1	Schlussfolgerungen	101
12.2	Ausblick	103
13	Literatur	105
	Anlagen	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Projektansatz.....	11
Abbildung 2-1: Untersuchungsgebiet und Studiengebiet (nach LUA, 2002).....	15
Abbildung 2-2: Hochwassergenese am Rhein zwischen Rheinfeldern und Lobith.	18
Abbildung 2-3: Hochwasserschutz entlang des Rheins heute; Stand 1993 (nach Eberle et al., 2004). (Definition Leistungsfähigkeit s. Text)	20
Abbildung 2-4: Maßnahmentypen für „Raum für den Fluss“ in den Niederlanden (aus Silva et al., 2001).....	29
Abbildung 3-1: Vorgehensweise zur Abschätzung extremer Abflüsse aus dem Einzugsgebiet.....	31
Abbildung 3-2: 2D-Überflutungsmodell Delft-FLS, Lage und Höhenmodell (aus Gudden, 2004).	35
Abbildung 3-3: Gliederung der Überflutungsgebiete hinter den Deichen und Punkte, an denen Überströmen der Hochwasserschutzanlagen bzw. Deichbruch berechnet wurden (nach Gudden, 2004).	37
Abbildung 4-1: Häufigkeitsverteilung der maximalen 10-Tagessummen des Winterniederschlages für gemessene und generierte Niederschläge (Mittelwert der Niederschläge von 34 Stationen im Rheingebiet) (aus: Eberle et al., 2004).....	41
Abbildung 4-2: Jahresmaximum von tausend Jahre simuliertem Abfluss am Pegel Andernach/Rhein.....	42
Abbildung 4-3: Wellenformen der ausgewählten Ganglinien bei Andernach (Systemzustand OR-2002 mit).....	45
Abbildung 4-4: Genesen der ausgewählten extremen Ereignisse (nach Eberle et al., 2004).	45
Abbildung 4-5: Vergleich von Hochwasserscheitelwerten mit statistischen Größen.	47
Abbildung 5-1: Gebiete entlang des Niederrheins, in denen bei den genannten Hochwassern Überflutungen auftreten können, Ergebnisse DSS, Szenario 1995_M und 2020_M.....	52
Abbildung 5-2: Fließwege hinter den Hochwasserschutzanlagen, Szenario 1995_DB HW824mitDueb, qualitative Angaben.	54
Abbildung 5-3: Fließwege hinter den Hochwasserschutzanlagen, Szenario 2020_DB HW824mitDueb, qualitative Angaben.	55
Abbildung 6-1: Scheitelabflüsse im Rhein: oben: Zustand 1995/2002 ohne Hochwasser reduzierende Maßnahmen unten: Zustand 2020 ohne Hochwasser reduzierende Maßnahmen.....	59
Abbildung 6-2: Vergleich von Hochwasserscheitelwerten mit statistischen Größen.	63
Abbildung 6-3: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, heutiger Zustand (Differenz Szenario 2002_NRW_M – 1995_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).	64
Abbildung 6-4: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, geplanter Zustand 2020 nur NRW (Differenz Szenario 2020_NRW_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).	66
Abbildung 6-5: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, optimierter Zustand 2020 nur NRW (Differenz Szenario 2020_NRWMAX_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).	67
Abbildung 6-6: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, geplante Maßnahmen in den Niederlanden (Differenz Szenario 2020_NL_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).....	68

Abbildung 6-7: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, geplanter Zustand 2020 NRW und NL (Differenz Szenario 2020_NRW_NL_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).....	69
Abbildung 6-8: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, optimierter Zustand 2020 NRW und NL (Differenz Szenario 2020_NRWMAX_NL_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).....	69
Abbildung 6-9: Deichhöhe und Scheitelwasserstände im grenznahen Bereich, HW824.....	70
Abbildung 6-10: Veränderung der Scheitelwasserstände im Längsprofil geplanter Zustand NRW gegenüber Zustand 1995 (Differenz Szenario 2020_NRW_M – 1995_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).....	72
Abbildung 7-1: Einfluss der Überflutungen und Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf die Abflussganglinie (HW824).....	76
Abbildung 8-1: Hinter den Deichen und in Retentionspoldern gespeichertes sowie insgesamt zur Verfügung stehendes Volumen, Szenario 2020-NRW_NL_M, bei den fünf höchsten Hochwassern HW841, HW719 HW036, HW158 und HW824 (s. auch Abbildung 8-1 Fortsetzung).	77
Abbildung 9-1: Vorhergesagte Trends der Lufttemperatur basierend auf verschiedenen Emissionsszenarien (Abbildung rechts) und Berechnungen mit unterschiedlichen GCMs (IPCC, 2001).....	82
Abbildung 9-2: Änderung der Abflussregime entlang des Rheins bei einer um 2°C erhöhten Temperatur - Ist-Zustand in blau, Szenario in rot (Kleinn, 2002).....	84
Abbildung 9-3: Fließwege hinter den Hochwasserschutzanlagen, Szenario 2020_DB HW158ohneDueb, qualitative Angaben.	86
Abbildung 9-4: Entwicklung der Scheitelabflüsse entlang des Rheins, noch extremeres Extremhochwasser HW158ohneDueb.....	88
Abbildung 10-1: Kritische Abflüsse und aus den Bemessungsabflüssen geschätzte Abflusskapazität (Zustand 2020).	90
Abbildung 11-1: Morphologische Entwicklung des Rheinhauptgerinnes (aus: Silva et al., 2001).	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wichtige Nebenflüsse des Rheins sowie einige Kennwerte zu den Pegeln (aus Eberle et al., 2004).	16
Tabelle 2-2: Mittlere vieljährige Hochwasserabflüsse (MHQ) für Winter- und Sommerhalbjahre an den Pegeln des Rheins (aus LUA, 2002).....	17
Tabelle 2-3: Bemessungsabflüsse in NRW und Gelderland, geplanter Zustand 2020 (nach MUNLV-NRW, 2003).....	22
Tabelle 2-4: Global geschätzte Abflusskapazitäten in NRW und Gelderland, heutiger Zustand 2002; theoretische Werte unter der Annahme der durchgängigen Realisierung des BHO ₇₇ mit den genannten Freibordmaßen.....	25
Tabelle 2-5: Global geschätzte Abflusskapazitäten in NRW und Gelderland, geplanter Zustand 2020, theoretische Werte nach Realisierung des angestrebten Schutzniveaus mit den angegebenen Freibordmaßen.	25
Tabelle 2-6: Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein (vgl. auch Anlage 2- 1 und Anlage 2- 2) (nach Eberle et al., 2004).	26
Tabelle 2-7: Rückhaltemaßnahmen am Niederrhein (vgl. auch Anlage 2- 3) (nach Van der Veen et al., 2004a und Mehlig, 2004).....	27
Tabelle 3-1: Berechnete Systemzustände am Oberrhein.....	32
Tabelle 3-2: Der zur Wahl der Ganglinien angenommene Wirkungsbereich der wasserstandsreduzierenden Maßnahmen.	33
Tabelle 3-3: Systemzustände am Niederrhein zur Berechnung der Überflutungen.	34
Tabelle 3-4: Szenarien der 2D-Überflutungsberechnungen Niederrhein.	36
Tabelle 3-5: Szenarien der Berechnungen DSS (bzw. 1D-SOBEK).....	40
Tabelle 4-1: Abflussscheitelwerte der 16 höchsten generierten Hochwasser. Alle Berechnungen beinhalten kein Deichüberströmen am Niederrhein.	43
Tabelle 4-2: Wirkung von Deichüberströmen und Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein auf die Abflussscheitel der extremen Hochwasser bei Andernach und Lobith. Alle Berechnungen beinhalten kein Deichüberströmen am Niederrhein.	44
Tabelle 4-3: Ausgewählte Abflussganglinien (aus Van der Veen et al., 2004a). Das Hochwasser MET95 ist das historische Hochwasser Januar 1995.	44
Tabelle 5-1: Chronologie der Überflutung einzelner Gebiete, HW824, Szenario 1995_DB und Szenario 2020_DB (nach Gudden, 2004).	53
Tabelle 9-1: Scheitelwerte noch extremerer Abflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins.....	87
Tabelle 11-1: Unterschiedliche Ergebnisse durch unterschiedliche Modelle. Alle Berechnungen ohne Deichüberströmen am Oberrhein und Niederrhein.	92
Tabelle 11-2: Scheitelwerte der Abflüsse zwischen den Deichen; Berechnungen Delft-FLS mit und ohne Deichbruch als Folge von Deichüberströmen am Niederrhein (aus Gudden, 2004).....	98
Tabelle 11-3: Scheitelwerte der Abflüsse zwischen den Deichen, Berechnungen Delft-FLS und SOBEK/DSS.	98

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Deichhöhen und Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten im Studiengebiet	109
Anlage 2: Wasserstandsvermindernde Maßnahmen	119
Anlage 3: Schematisierung des Gebietes hinter den Deichen	123
Anlage 4: Ergebnisse Überflutungsberechnungen	127
Anlage 5: Längsprofile Scheitelabflüsse	149
Anlage 6: Scheitelabflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins	155

Zusammenfassung

Zielsetzung

Im Auftrag der *Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser* ist von 2002 – 2004 von der Provinz Gelderland, dem Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), dem Landesumweltamt NRW (LUA NRW) sowie der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) die Studie „Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein“ erarbeitet worden.

Kernfragen dieser Untersuchungen waren:

- Wie viel Abfluss kann unter extremen Bedingungen aus dem Einzugsgebiet des Rheins erwartet werden?
- Wie viel Abfluss kann zwischen den Deichen am Niederrhein und in den Rheinseitenarmen abgeführt werden? Welche Deichbereiche werden überströmt und wie wirkt sich das auf die Hochwasserwellen aus?
- Was geschieht, wenn der Abfluss nicht zwischen den Deichen abgeführt werden kann? Welche Gebiete hinter den Deichen werden überflutet? Sind grenzüberschreitende Überflutungen möglich?
- Welche Auswirkungen haben Hochwasser reduzierende Maßnahmen?

Berücksichtigt werden sollten:

- Die heutigen (1995, 2002) sowie die im Zuge der zur Zeit laufenden Deichsanierungen in NRW für 2020 geplanten Deichhöhen.
- Die vorhandenen bzw. geplanten Maßnahmen zur Hochwasserreduzierung am Oberrhein, am Niederrhein und in den niederländischen Rheinseitenarmen für die Zustände 2002 und 2020.
- Das heutige Klima sowie die Auswirkung möglicher Klimaänderungen.

Methodik

Im Wesentlichen wurden die folgenden Arbeitsschritte verfolgt:

- Ermittlung extremer Abflüsse aus dem Rheineinzugsgebiet bis Andernach.
- Überflutungsberechnungen für den Niederrhein und Gelderland.
- Erfassung der Wirkungen des Deichüberströmens und der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen.
- Das heutige Klima sowie Auswirkung von Klimaänderungen.

1. Ermittlung extremer Abflüsse aus dem Rheineinzugsgebiet bis Andernach

Auf der Basis einer 30-jährigen Zeitreihe von meteorologischen Daten aus dem Rheineinzugsgebiet wurden mit Hilfe einer Resampling-Technik Niederschlags- und Temperaturzeitreihen für einen Zeitraum von 1000 Jahren mit vergleichbaren statistischen Eigenschaften ermittelt.

Unter Anwendung eines Niederschlag-Abflussmodells wurden diese Niederschläge in 1000-jährige Abflusszeitreihen für die Rheinpegel transformiert. Hieraus wurden die 16 höchsten Hochwasser am Niederrhein zur weiteren Bearbeitung im Projekt ausgewählt.

Für diese extremen Hochwasserabflüsse wurden für den Rhein ab Basel bis Andernach unter Einbeziehung der Nebenflüsse eindimensionale

Wellenablaufberechnungen durchgeführt. Zunächst wurden Berechnungen durchgeführt, bei denen Deichüberströmen vernachlässigt wurde. Diese Ergebnisse sagen etwas über das mögliche Wasserdargebot aus, das am Pegel Andernach aus dem Einzugsgebiet bereitgestellt werden kann, nichts jedoch darüber, ob das bestehende hydraulische System diese Wassermengen auch abführen kann. Danach erfolgten Berechnungen, bei denen Deichüberströmungen sowie Rückhaltmaßnahmen zur Reduzierung der Hochwasserstände am Oberrhein berücksichtigt wurden, um eine realistische Verformung der Hochwasserwellen bei Andernach zu erfassen.

2. Überflutungsberechnungen für den Niederrhein und Gelderland

Die nach dieser Methode berechneten zwei extremsten Ganglinien am Pegel Andernach sowie die dazugehörigen Ganglinien der Rhein Nebenflüsse wurden genutzt, um mit dem zweidimensionalen Überflutungsmodell Delft-FLS Überflutungsberechnungen für den Rhein ab Rhein-km 642 (Nonnenwerth bei Bad Honnef) durchzuführen. Dieser Arbeitsschritt erlaubt Aussagen über den Ort, die Menge und die Dauer des Überströmens der Hochwasserschutzanlagen sowie über das Fließverhalten des Wassers hinter den Deichen.

Bei den Modellberechnungen wurde prinzipiell von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Es kommt erst zu Überflutungen, wenn der Wasserstand im Fluss die Kronenhöhe der Hochwasserschutzanlagen übersteigt.
- In dem Moment, bei dem die Kronenhöhe überschritten wird, wird ein Versagen der Deiche angenommen. Andere Hochwasserschutzanlagen bleiben stehen und werden nur überströmt.
- Andere Mechanismen des Deichversagens wurden nicht berücksichtigt.

3. Erfassung der Wirkungen des Deichüberströmens und der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen

Des Weiteren wurden für den Rhein ab Pegel Andernach bis in die niederländischen Rheinarme Berechnungen mit dem eindimensionalen Modell SOBEK durchgeführt. Aus den oben genannten 16 Hochwassern wurden die zwei höchsten sowie sechs weitere Ganglinien ausgewählt, die alle größer sind als das Hochwasser 1995, deren Scheitel im Einsatzbereich der Rückhaltmaßnahmen liegen bzw. im Bereich der am Niederrhein und in den Niederlanden geltenden Bemessungsabflüsse.

Ziel war es die Wirkung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen in Nordrhein-Westfalen und in Gelderland zusammen mit der Wirkung der Überflutungen auf Wasserstand und Abfluss zu ermitteln. Hierzu wurden die aus den Berechnungen mit Delft-FLS gewonnenen Erkenntnisse über die Wassermengen, die als Folge der Überflutungen dem Fluss entzogen und wieder zurückgeführt werden, sowie die Überflutungsvolumina auf das eindimensionale Modell SOBEK übertragen. Dabei wurden die überfluteten Flächen und Überflutungsvolumina im Modell als Retentionsbecken dargestellt.

Darüber hinaus wurden Berechnungen durchgeführt, bei denen die Wirkung des Deichüberströmens vernachlässigt wurden. Dies ermöglicht die Erfassung des möglichen Wasserdargebotes aus dem Einzugsgebiet für den Pegel Lobith.

Zum besseren Management der zu berechnenden Maßnahmenvarianten wurde nicht die für das Modell SOBEK übliche Benutzeroberfläche, sondern die Oberfläche des Decision Support System DSS-large rivers benutzt.

4. Auswirkung von Klimaänderungen

Im vorgegebenen Projektzeitraum konnte eine konkrete Berechnung der Abflüsse auf der Grundlage von Klimaszenarien nicht durchgeführt werden. Deshalb wurden die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf den Abfluss aus dem Rheineinzugsgebiet qualitativ betrachtet. Nach einhelliger Fachmeinung muss demnach künftig mit größeren Abflüssen gerechnet werden. Um eine Aussage treffen zu können, in wie weit sich noch höherer Abflüsse auf das Überflutungsgeschehen am Niederrhein auswirken, wurde exemplarisch eine Ganglinie mit noch höheren Abflüssen betrachtet.

Ergebnisse

1. Extreme Abflüsse

Wasserdargebot unter Vernachlässigung des Deichüberströmens

Im Rheineinzugsgebiet sind Niederschlagssituationen möglich, die bei Vernachlässigung möglicher Deichüberströmungen am Ober- und Niederrhein am Pegel Andernach zu einem Scheitelwert von rund 17800 m³/s und am Pegel Lobith zu einem Scheitelwert von 18700 m³/s führen. Diese Werte sagen lediglich etwas über das mögliche Wasserdargebot aus, das aus dem Einzugsgebiet als Folge starker Niederschläge bereitgestellt werden kann, nichts jedoch darüber, ob das bestehende hydraulische System diese Wassermengen auch abführen kann.

Abflusswerte mit Berücksichtigung des Deichüberströmens

Bei den betrachteten extremen Hochwassern finden am Oberrhein Überflutungen statt. Dadurch wird der Scheitelabfluss am Pegel Andernach auf rund 15300 m³/s gedämpft. Ohne Überflutungen am Niederrhein könnten dann 16700 m³/s am Pegel Lobith auftreten.

Da bei diesen extremen Abflussverhältnissen jedoch auch am Niederrhein Deiche überflutet werden, wird die Abflusswelle weiter gedämpft, so dass am Pegel Lobith noch mit rund 15500 m³/s gerechnet werden muss.

Die Hochwasser reduzierenden Maßnahmen, die bis 2020 am Oberrhein, in NRW und in den niederländischen Rheinzeigen vorgesehen sind, sowie die laufenden Deichsanierungen in NRW haben keinen wesentlichen Einfluss auf die beschriebene dämpfende Wirkung des Deichüberströmens und damit auch nicht auf die Abflüsse bei Andernach bzw. Lobith.

2. Überflutungen am Niederrhein

Im heutigen Zustand kommt es bei den untersuchten extremen Hochwassern am Niederrhein in einem Abflussbereich zwischen 11000 bis 16000 m³/s zu großräumigen Überflutungen. Hierbei ist der südliche Niederrhein (Großraum Köln/Bonn bis ca. Düsseldorf/Dormagen) zuerst betroffen. Mit zunehmender Höhe der Hochwasserscheitel wird auch der mittlere Teil (Düsseldorf/Dormagen bis etwa zur Einmündung der Ruhr) überflutet.

Im nördlichen Teil (Einmündung der Ruhr bis in die Niederlande) findet bei reiner Höhenbetrachtung der Wasserspiegellagen und der Deichlinien kein Deichüberströmen statt, allerdings nur bei erheblicher Inanspruchnahme des Freibordes. Diese Strecke wäre erst gefährdet, wenn z.B. durch Klimaänderungen noch höhere Abflüsse eintreten.

Lediglich in Emmerich muss noch bis zum Abschluss der Sanierungsmaßnahmen an der dortigen Hochwassermauer mit einer Überflutungsgefahr ab einem Abfluss von rund 14000 m³/s gerechnet werden.

Durch die derzeit laufenden Deichsanierungen in NRW wird an einigen Stellen das Schutzniveau deutlich angehoben. Bei den untersuchten extremen Hochwassern, die den Bemessungsabfluss erheblich übersteigen, ändert sich die Situation im südlichen und mittleren Bereich des Niederrheins lediglich dahingegen, dass die Gebiete später überflutet werden. Eine Überflutung kann jedoch nicht verhindert werden.

Im nördlichen Bereich wird durch die Deichsanierung in Zukunft eine Überflutung des Gebietes beiderseits der Grenze bis zu einem Abfluss von ca. 16000 m³/s auch da verhindert, wo z.B. bei Hochwassermauern ein geringeres Freibord als bei Deichen angesetzt wird. Diese Abflusskapazität entspricht dem Bemessungsabfluss in den Niederlanden. In den deutschen Deichstrecken ist die Kapazität höher.

Bei Überflutungen finden hinter den Deichen rheinparallele Strömungen statt. Dadurch können auch Gebiete überflutet werden, die eigentlich durch Hochwasserschutzanlagen mit einem höheren Schutzniveau geschützt sind. Ein Teil der rheinparallelen Wasserströme fließt auch wieder in den Rhein zurück.

3. Wirkung der Überflutungen auf Hochwasserscheitel und Wellenform

Überflutungen führen zu Wasserverlusten im Fluss und damit zur Reduzierung der Scheitelabflüsse. Die abfluss- und wasserstandssenkende Wirkung des Deichüberströmens ist im Projekt größer als die der berücksichtigten Hochwasser reduzierenden Maßnahmen. Ursache hierfür ist, dass die durch die Überflutungen eingenommenen Flächen hinter den Deichen deutlich größer sind, als die Flächen, die für gezielte Rückhaltmaßnahmen zur Verfügung stehen.

Durch die Überflutungen im Großraum Köln/Bonn bis etwa Duisburg/Krefeld werden die Ganglinien deutlich abgeflacht. Gleichzeitig werden sie im abfallenden Ast um ca. ½ Tag verlängert. Qualitativ gleich wirken auch die Hochwasser reduzierenden Maßnahmen; das Ausmaß der Wirkungen ist jedoch vergleichsweise gering.

Bei der derzeit laufenden Deichsanierung in NRW werden die Hochwasserschutzanlagen an das Bemessungshochwasser angepasst. Dies bedeutet in Teilbereichen eine Erhöhung bzw. eine Lückenschließung der Deichlinie, vor allem im Bereich von Köln/Bonn bis Düsseldorf/Krefeld. Damit wird lokal ein höheres Schutzniveau hergestellt. Ein Überströmen der Deiche bei Extremhochwasser (> BHQ) findet später statt, d.h. näher am Hochwasserscheitel, womit je nach Hochwasser die scheitelreduzierende Wirkung des Überströmens geringfügig zunehmen kann.

4. Wirkung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf Abfluss und Wasserstand

Die Wirkung von Retentionspoldern auf Scheitelabflüsse ist stark von der Scheitelhöhe und der Ganglinienform des jeweils betrachteten Hochwassers abhängig. Deshalb muss das Schutzziel für ihren Einsatz genau definiert und durch bauliche Maßnahmen, z.B. Ausprägung der Ein- und Auslaufbauwerke oder Steuerung, umgesetzt werden.

Deichrückverlegungen wirken vor allem lokal und nach oberstrom. Bei Erweiterung des durchströmten Querschnitts kommt es bei kaum veränderten Abflüssen zu Wasserstandssenkungen. Unmittelbar unterhalb kann es zu kleineren Wasserstandserhöhungen kommen, wenn der Übergang zur vorhandenen Deichlinie zu einer deutlichen Verengung des Profils führt. Dies sollte beim Anlegen solcher Maßnahmen unbedingt beachtet werden.

Das System an Hochwasser reduzierenden Maßnahmen am Niederrhein zeigt in der derzeitigen Planung seine besten Wirkungen bei Ereignissen der Größenordnung des Hochwassers 1995. Durch einen zielgerichteten Einsatz der Maßnahmen, vor allem der Retentionspolder, kann ihre scheitelreduzierende Wirkung auf Hochwasser im Bereich der Bemessungsabflüsse gesteigert werden.

Im derzeitigen Planungszustand beträgt die hochwassersenkende Wirkung der Maßnahmen in NRW auf Ganglinien mit Scheiteln im Bereich des Bemessungshochwassers im Raum Bislich, ca. 40 km oberhalb der Grenze, 15 bis 20 cm bzw. an der Grenze selbst 1 cm.

Durch eine Steuerungsoptimierung auf das Bemessungshochwasser kann die hochwassersenkende Wirkung verbessert werden, so dass beispielsweise im Bereich Bislich Wasserstandsreduktionen von bis zu 25 bis 30 cm bzw. an der Grenze bis zu 6 cm erreicht werden können.

Die Hochwasser reduzierenden Maßnahmen in den Niederlanden sollen dafür sorgen, dass ohne Deicherhöhungen statt heute 15000 m³/s in Zukunft 16000 m³/s sicher abgeführt werden können. Die daraus resultierende Wasserstandssenkung von etwa 30 cm an der Grenze wirkt sich in abnehmender Stärke noch bis ca. 50 km stromauf aus.

Durch die Kombination der Wirkungen der geplanten Maßnahmen in den Niederlanden und der Maßnahmen in NRW können nach heutigem Planungsstand für Extremhochwasser, die über das Bemessungshochwasser hinaus gehen, Wasserstandsabsenkungen um bis zu 30 cm an der Grenze und bis zu 25 cm im Raum Bislich/Lohrwardt erreicht werden. Werden die derzeit geplanten Maßnahmen in NRW sowie einige zusätzliche Maßnahmen, z.B. zur Beseitigung von Abflusshindernissen, auf den Bemessungshochwasserabfluss abgestimmt, können in Kombination mit den Maßnahmen in den Niederlanden sogar Wasserstandsabsenkungen von bis zu 40 cm an der Grenze und im Raum Bislich/Lohrwardt erreicht werden. An anderen Stellen ist die Reduzierung des Wasserstandes geringer.

Damit wird deutlich, dass sich die Maßnahmen in NRW und in den Niederlanden gegenseitig ergänzen. Dadurch kann z.B. einem frühen Überströmen der Hochwassermauer in Emmerich entgegen gewirkt werden. Ein Überströmen der Hochwassermauer bei Emmerich beträfe auch niederländisches Gebiet.

Dieser Sachverhalt macht den gegenseitigen Nutzen grenzüberschreitender Bemühungen im Hochwasserschutz und die Erforderlichkeit einer grenzüberschreitenden Abstimmung von hochwasserrelevanten Planungen und Maßnahmen deutlich.

5. Klimawandel

Nach dem heutigen Kenntnisstand geht man davon aus, dass im Laufe der nächsten 100 Jahre die globale Temperatur zunimmt. Je nach CO₂-Emissions-Szenario werden Temperaturzunahmen von 1,4 bis 5,8 °C genannt.

Aussagen, in wie weit sich dies auf extreme Abflüsse im Rheineinzugsgebiet auswirkt, lassen sich zur Zeit nur qualitativ treffen:

- Durch den Klimawandel kann von einer allgemeinen Zunahme der Abflüsse des Rheins im Winterhalbjahr ausgegangen werden.
- Eine Abnahme der Abflüsse im Sommer scheint nicht unwahrscheinlich, da viele Szenarien für die Sommermonate von verminderten Niederschlägen ausgehen und höhere Temperaturen die Verdunstung verstärken.
- Insbesondere für Extremereignisse sind die Unsicherheiten bei der Abschätzung von Abflussänderungen infolge einer Klimaänderung extrem hoch. Eindeutig ist jedoch, dass mit einer zunehmenden Häufigkeit von langandauernden niederschlagsreichen Perioden gerechnet werden muss. Dies stützt die These, dass auch von einer Zunahme der Häufigkeit von extremen Hochwasserereignissen ausgegangen werden muss. In welcher Größenordnung sich diese Zunahme auf extreme Abflussscheitelwerte in Andernach auswirkt, kann noch nicht exakt angegeben werden.

Um dennoch eine Aussage darüber treffen zu können, was passiert, wenn sich die Abflüsse aus dem Einzugsgebiet erhöhen sollten, wurden Berechnungen mit einer Ganglinie am Pegel Andernach durchgeführt, deren Scheitelwert bei 17800 m³/s liegt. Ob dieser Scheitelabfluss überhaupt auftreten kann, bleibt bei dieser Untersuchung unberücksichtigt.

Durch die Überflutungen am Niederrhein wird dieser Scheitelwert auf rund 16500 m³/s am Pegel Lobith gedämpft.

Diese Dämpfung wird wie bei den anderen Berechnungen durch Deichüberströmen im Bereich bis Krefeld hervorgerufen. Die Überflutungen hinter den Deichen nehmen noch größeren Umfang an. Wasser kann bei diesem Szenario hinter den Deichen an Xanten vorbei bis nach Kleve strömen. Ein Abfluss in das Einzugsgebiet der Niers und damit in Richtung Maas ist dabei nicht aufgetreten. Die Berechnungen zeigen jedoch, dass der Wasserstand der überfluteten Flächen an der Wasserscheide nur geringfügig steigen muss bis es zu einem Übertritt von einem zum anderen Stromgebiet kommt.

Deichüberströmungen unterhalb von Krefeld finden nicht statt. In diesem Rheinabschnitt treten jedoch lokal vor allem an Hochwassermauern wie bei Emmerich und Rees Wasserstände auf Kronenniveau auf.

6. Genauigkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchung basieren auf Berechnungen mit nacheinander geschalteten und miteinander gekoppelten statistischen und numerischen Modellen. Die Ergebnisse eines jeden Modells weisen eine Genauigkeit auf, die durch die gewählten Modellparameter und Randbedingungen bestimmt werden (z.B. Ansatz zur Berechnung der Überströmungen, Genauigkeit der Abflüsse aus den Nebenflüssen und dem Rhein bis Andernach, Vernachlässigung der morphologischen Entwicklung des Rheins, etc.). Eine Wertung aller Faktoren lässt den Schluss zu, dass bei der Beurteilung der Untersuchungsergebnisse von einer Schwankungsbreite der Abflüsse von ca. $\pm 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgegangen werden kann.

Abschlussbemerkung und Ausblick

Alle Ergebnisse dieser Studie gelten nur für die Situationen am Niederrhein und den Rheinzweigen, wie sie in den Modellen berücksichtigt wurden. Insbesondere Änderungen der Deichhöhen können große Auswirkungen auf die Ergebnisse haben. Da das hydraulische System des Niederrheins einschließlich des Gebietes hinter den Deichen sehr komplex ist, ist es unmöglich vorherzusagen, wie groß die Wirkung einer solchen Änderung ist, ohne eine erneute Modellierung durchzuführen. Entsprechende Veränderungen müssen deshalb stets im Modell detailliert berücksichtigt werden.

Dies macht deutlich, dass auch in Zukunft eine enge Zusammenarbeit zwischen Ober- und Unterlieger notwendig ist. Dies betrifft das Austauschen von Daten und Informationen ebenso wie die Abstimmung von Maßnahmen auf dem Gebiet des Hochwasserschutzes. Auch die Beantwortung weiterführender Fragen auf dem Gebiet der Klimafolgenforschung, der Auswirkungen von Eingriffen in das bestehende System, der Weiterentwicklung von Methoden beispielsweise zur Erstellung der Hochwasserstatistik sowie der Hochwasservorhersage sollten gemeinsam verfolgt werden.

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Hochwasser entlang des Rheins sind seit Jahrhunderten bekannte Naturereignisse. Zunächst begann der Mensch sich durch lokale Maßnahmen vor hohen Wasserständen zu schützen. Daraus entwickelten sich im Laufe der Jahrhunderte Schutzsysteme größeren Umfanges, die schließlich über große Strecken zu zusammenhängenden Hochwasserschutzanlagen führten. Auf Grund ihrer geschichtlichen Entwicklung und unterschiedlicher, häufig politisch-kulturell motivierter Vorgaben, sind diese Anlagen jedoch nicht einheitlich. So ist beispielsweise Entwurf und Aufbau der Deiche sowie die Festlegung der Deichhöhe in den Niederlanden eine andere als in Deutschland. Dies führt unweigerlich zur Frage, wie es in einem hydrologisch/hydraulisch zusammenhängenden Gebiet mit dem Schutzniveau an der Grenze zweier solcher Systeme bestellt ist und was das für Folgen hat.

Die Tatsache, dass während des Hochwassers 1995 im deutsch-niederländischen Grenzgebiet Rheindeiche zu brechen drohten, rückte die Erkenntnis in das Bewusstsein der Öffentlichkeit, dass Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit und zur Minderung von Schäden durch Hochwasser grenzüberschreitend ergriffen werden müssen. Um dies zu fördern unterzeichneten die Provinz Gelderland, Rijkswaterstaat und das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen (heute: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) im November 1997 eine *Gemeinsame Erklärung für die Zusammenarbeit im nachhaltigen Hochwasserschutz*. Die Vertragspartner sprechen sich in der Erklärung dafür aus, Untersuchungen und Entwicklungen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes aufeinander abzustimmen. Wichtigstes Organ dieser Zusammenarbeit ist die *Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser*.

Im Laufe der sich intensivierenden Zusammenarbeit zwischen Nordrhein-Westfalen (NRW), der Provinz Gelderland und Rijkswaterstaat wurde deutlich, dass das Gesamtsystem *deutscher Niederrhein / niederländische Rheinzweige* noch nicht vollständig verstanden wird, obwohl aus der Geschichte bekannt ist, dass Überflutungen grenzüberschreitend vorgekommen sind. Details darüber, ob das heute noch möglich ist, bei welchen Hochwassern dies vorkommen kann, wie und wo die Überflutungen statt finden würden, welche Auswirkungen das andernorts haben könnte, welche Auswirkungen die noch laufenden Deichsanierungsmaßnahmen und der Einsatz Hochwasser reduzierender Maßnahmen beiderseits der Grenze haben würden, schienen aber die Basis zu sein für das weitere, abgestimmte Vorgehen im grenzüberschreitenden Hochwasserschutz.

Darüber hinaus ist auch das Eigeninteresse für jeden der betroffenen Vertragspartner mehr über das Funktionieren des Gesamtsystems *deutscher Niederrhein / niederländische Rheinzweige* unter Einbeziehung des gesamten Rheineinzugsgebietes zu verstehen groß. Die laufenden Deichsanierungen in NRW, die Maßnahmen zur Erhöhung der Abflusskapazität in den Niederlanden im Rahmen des Projektes Raum für den Fluss, die Diskussion über eine Kammerung von vor Hochwasser geschützten Poldern vor allem in Deutschland, die Überlegungen zur Einrichtung von Notfallpoldern in den Niederlanden sowie die Frage nach den Bemessungsabflüssen zur

Dimensionierung der Hochwasserschutzanlagen machen das Bedürfnis einer besseren Systemkenntnis deutlich.

Um die nötige Kenntnis zum weiteren Vorgehen im grenzüberschreitenden Hochwasserschutz zu gewinnen, rief die *Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser* schließlich das Projekt „Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein“ ins Leben. In enger Abstimmung mit der Arbeitsgruppe wurde das Projekt unter der Leitung des RIZA ausgeführt durch die Provinz Gelderland, das Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), das Landesumweltamt (LUA) in Düsseldorf sowie die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz.

Dieses Projekt wurde durch die EU im Rahmen von INTERREG IIIB NWE gefördert unter dem Namen „Extreme Floods and Flood Protection along the Rhine (FAR)“, Projektnummer B025 FAR. Die Abwicklung des Projektes gegenüber der EU erfolgte durch die Provinz Gelderland.

1.2 Zielsetzung

Die Aufgabenstellung des Projektes lässt sich im Wesentlichen durch die folgenden Kernfragen zusammenfassen:

Kernfrage 1: Wie viel Abfluss kann unter extremen Bedingungen aus dem Einzugsgebiet des Rheins (oberhalb des Systems *deutscher Niederrhein/niederländische Rheinzweige*) erwartet werden?

Zu berücksichtigen sind hier sowohl die heutigen als auch die zukünftigen Bedingungen bezüglich der Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein und möglicher Klimaänderung.

Kernfrage 2: Wie viel Abfluss kann zwischen den Deichen am Niederrhein und in den Rheinzweigen abgeführt werden, welche Deichbereiche sind besonders gefährdet überströmt zu werden und wie wirkt sich das auf die Abflusswelle aus?

Zu berücksichtigen sind hier der heutige Zustand der Hochwasserschutzanlagen sowie der Zustand nach Abschluss der gegenwärtig durchgeführten Deichsanierungen in NRW bzw. der Maßnahmen zur Vergrößerung der Abflusskapazität in den Niederlanden (Projekt Raum für den Fluss).

Kernfrage 3: Was geschieht, wenn der Abfluss nicht zwischen den Deichen abgeführt werden kann, welche Gebiete werden zuerst überflutet, sind grenzüberschreitende Überflutungen möglich?

Auch hier sind der heutige Zustand sowie der zukünftige Zustand der Hochwasserschutzanlagen zu berücksichtigen.

Kernfrage 4: Welche Auswirkungen haben Hochwasser reduzierende Maßnahmen?

Hier sind sowohl die Wirkung der bereits vorhandenen Maßnahmen, die Wirkung geplanter Maßnahmen als auch weitere mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der Wasserstände zu berücksichtigen.

Zur Verwirklichung dieses Projektes sollte möglichst auf vorhandenes Untersuchungsinstrumentarium (Modelle) zurückgegriffen werden.

1.3 Projektansatz

Einen Überblick über den allgemeinen Projektansatz gibt Abbildung 1-1:

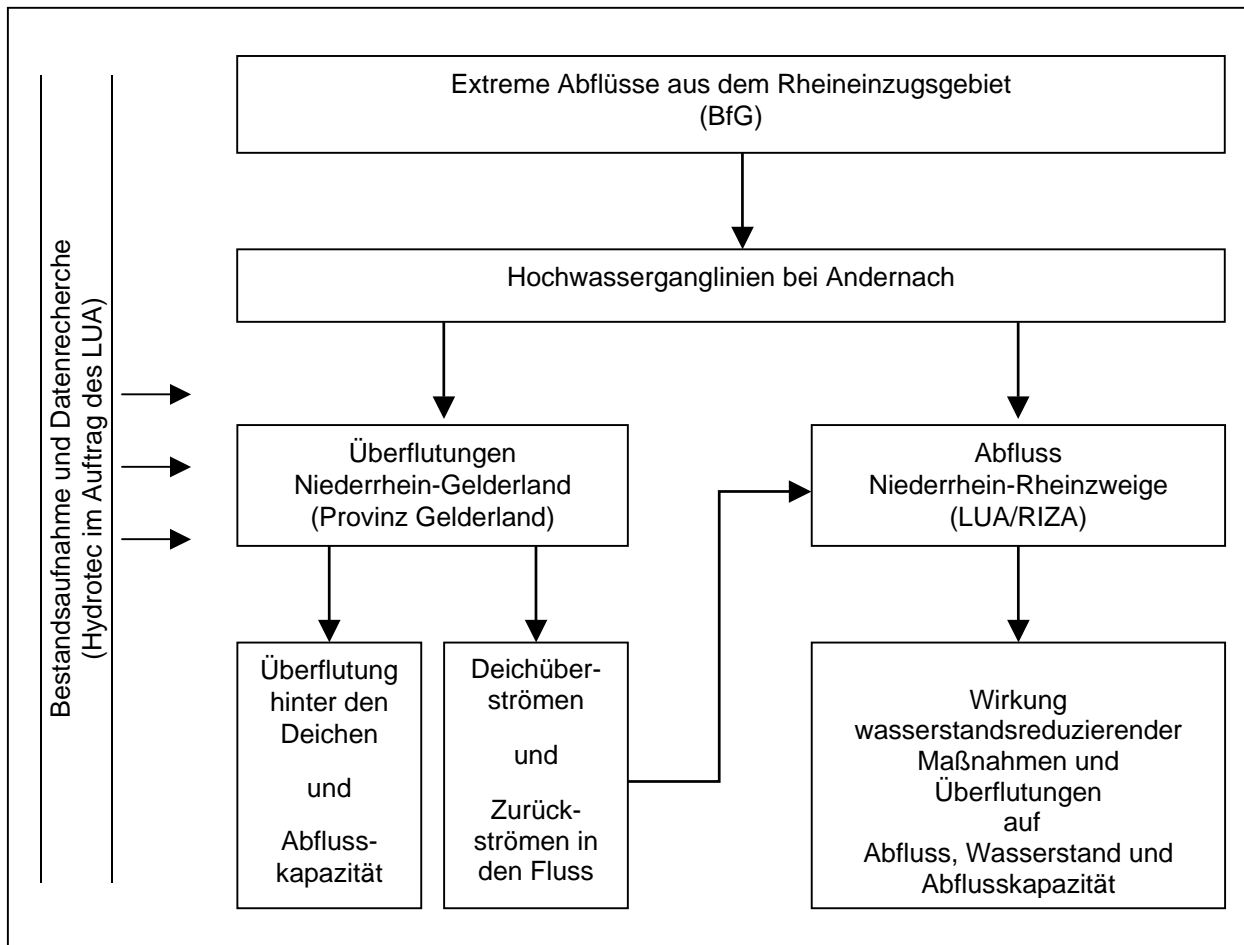


Abbildung 1-1: Projektansatz.

Zunächst wurden für das gesamte Rheineinzugsgebiet mittels eines Niederschlagsgenerators 1000 Jahre Niederschlag und Temperatur generiert und unter Anwendung eines Niederschlag-Abflussmodells 1000 Jahre Abfluss berechnet. Die berechneten Abflüsse für die Rhein Nebenflüsse ab Basel sowie den Rhein selbst bei Basel wiederum dienten als Eingabegröße für eine eindimensionale Berechnung des Wellenablaufes extremer Ereignisse im Rhein zwischen Basel und Andernach (Lobith). Hierbei wurden Deichüberströmungen an Ober- und Mittelrhein sowie Rückhaltmaßnahmen zur Reduzierung der Wasserstände bei Hochwasser am Oberrhein berücksichtigt.

Diese Arbeiten wurden in der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz (BfG) durchgeführt. Auf die Methodik und die Ergebnisse wird in den Kapiteln 3.1 bzw. 4 und 9.2 eingegangen. Hierüber liegt auch ein detaillierter Bericht der BfG vor (Eberle et al., 2004).

Auf der Basis der durch die BfG berechneten extremen Ganglinien bei Andernach sowie die dazugehörenden Ganglinien der Rhein Nebenflüsse wurden mit dem zweidimensionalen Überflutungsmodell Delft-FLS Überflutungsberechnungen für den Rhein ab Rhein-km 642 (Nonnenwerth bei

Bad Honnef) durchgeführt. Dies erlaubt Aussagen über Ort und Zeit von Überströmungen von Hochwasserschutzanlagen, Deichbrüche als Folge davon sowie Überflutungen und wieder Zurückströmen von Wasser in den Fluss. Diese Arbeiten wurden durch die Provinz Gelderland durchgeführt und sind bei Gudden (2004) beschrieben. Eine Dokumentation der Kalibrierung des Modells findet sich bei Van Mierlo et al. (2003). Einen Überblick über Methodik und die wichtigsten Ergebnisse geben die Kapitel 3.3, Kapitel 5 und Kapitel 9.3.

Ebenfalls basierend auf den durch die BfG berechneten Hochwasserwellen wurde mit dem eindimensionalen Modell SOBEK der Wellenablauf im Rhein von Andernach bis in die niederländischen Rheinarme berechnet. Zum besseren Management der zu berechnenden Maßnahmenvarianten wurde das Decision Support System DSS-large rivers (auf Niederländisch BOS-Inrichting Rivieren – BOS-IR) benutzt.

Zunächst wurden die aus den Berechnungen mit Delft-FLS gewonnenen Erkenntnisse über das Deichüberströmen und wieder Zurückströmen in den Fluss sowie die Überflutungsvolumina auf das SOBEK-Modell übertragen. Dabei wurden die überfluteten Flächen und Überflutungsvolumina im SOBEK-Modell als Retentionsbecken dargestellt. Durch Kalibrierung der Parameter, die die Zu- und Abflüsse zum bzw. vom Retentionsbecken und die Wasserstände im Rückhalteraum beeinflussen, wurde das eindimensionale Wellenablaufmodell SOBEK an die Ergebnisse des zweidimensionalen Überflutungsmodells Delft-FLS (zeitlicher Verlauf der Zu- und Abflussganglinien zu den Überflutungsflächen, Verlauf der Abflussganglinie im Fluss) angepasst. Diese Arbeiten wurden in intensiver Kooperation zwischen dem RIZA und der Provinz Gelderland durchgeführt. Zur Festlegung dieser „Kopplung der Modelle Delft-FLS und SOBEK/DSS“ genannten Prozedur wurde im Auftrag des RIZA ein Drehbuch geschrieben (Hartman, 2002). Eine Dokumentation der Kalibrierung selbst findet sich in Van der Veen et al. (2004a). Die zur Beschreibung der Überflutungen definierten Retentionsbecken wurden schließlich in das DSS eingebaut. Einen Überblick gibt Kapitel 3.3.2.

In einem zweiten Schritt wurden die Hochwasser reduzierenden Maßnahmen in NRW und den Niederlanden im DSS bereitgestellt. Eine Dokumentation hierüber findet sich in Van der Veen et al. (2004a) und Mehlig (2004). Die Ergebnisse der Berechnungen mit dem DSS bezüglich der Wirkung der Maßnahmen und der Überflutungen auf den Wellenablauf (Scheitelwerte Wasserstand und Abfluss sowie Laufzeit) findet sich bei Van der Veen et al. (2004b) und Mehlig (2004). Diese Arbeiten wurden beim RIZA und beim LUA durchgeführt. Vor allem im Kapitel 6 wird auf diese Ergebnisse eingegangen. Die Methodik und die berechneten Szenarien sind Gegenstand von Kapitel 3.4.

Im Rahmen einer Vorstudie wurden zu Beginn des Projektes erkundende Berechnungen mit dem DSS durchgeführt, um das aus zwei gekoppelten SOBEK-Modellen bestehende DSS sowie die Software zu testen. Darüber hinaus konnten erste allgemeine Erkenntnisse über das hydraulische Funktionieren des Systems „Niederrhein-Rheinarme“ gewonnen werden. Diese Arbeiten wurden beim RIZA und beim LUA durchgeführt und sind bei Kroekenstoel et al. (2003) dokumentiert.

Zur Bearbeitung des Projektes war eine umfangreiche Bestandsaufnahme und Datenrecherche nötig. Diese diente der Bereitstellung der Basisdaten (Höhenmodell, Deichlinien und -höhen, wasserstandsvermindernde Maßnahmen), beinhaltet jedoch auch eine Bestandsaufnahme von Projekten mit artverwandter Thematik sowie von Modellen des Rheins und des

Rheineinzugsgebietes und einen Überblick über historisch belegte Überflutungen. Diese Arbeiten sind dokumentiert in Landesumweltamt NRW (2003).

1.4 Projektorganisation

Zur besseren Organisation des Projektes wurde in vier Teilprojekten gearbeitet:

Teilprojekt 1:

Bestandsaufnahme und Datenrecherche,
Ausführende Hydrotec, Ingenieursgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH,
Aachen, im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Teilprojekt 2:

Abfluss im Rheingebiet oberhalb Andernach, Ausführende waren die folgenden Mitarbeiter der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz:
Frau Eberle, Herr Hammer, Herr Busch, Herr Engel, Herr Krahe und Herr Dr. Wilke.

Teilprojekt 3:

Abfluss im Rheingebiet unterhalb Andernach.
Ausführende waren die folgenden Mitarbeiter des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen in Düsseldorf und des RIZA in Arnhem:
Herr Mehlig (LUA), Herr Brinkmann (LUA), Frau Dr. Lammersen (RIZA), Herr van der Veen (RIZA), Herr Kroekenstoel (RIZA), Herr Schutte (RIZA) und Herr van Essen (RIZA).

Teilprojekt 4:

Überflutungen in Nordrhein-Westfalen und Gelderland. Ausführender war Herr Gudden von der Provinz Gelderland.

Die Projektleitung lag bei Frau Dr. Lammersen, RIZA.

Insgesamt war eine intensive Zusammenarbeit und Absprache zwischen den direkt an den Untersuchungen beteiligten Mitarbeitern ebenso nötig wie die Expertise der Fachleute des Staatlichen Umweltamtes Krefeld (Herr Buschhüter, Herr Nebelung, Herr Isselhorst), des Staatlichen Umweltamtes Köln (Herr Schaa) sowie des Wasser- und Schifffahrtsamtes Duisburg-Rhein (Herr Abel), die vor allem zur Datenbeschaffung und Validierung der Ergebnisse beigetragen haben.

Tragendes Element der Zusammenarbeit waren drei Workshops, bei denen neben den Projektmitarbeitern die Mitglieder der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser eingeladen waren. Auf diese Art konnten wichtige Absprachen über die technische Durchführung des Projektes gemacht werden, was einen allgemeinen Konsens beispielsweise über die Modellannahmen und damit auch über die Ergebnisse gewährleistet.

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Definition Untersuchungsgebiet - Studiengebiet

Das Untersuchungsgebiet deckt im Wesentlichen das gesamte Einzugsgebiet des Rheins einschließlich der niederländischen Rheinzweige ab (Abbildung 2-1).

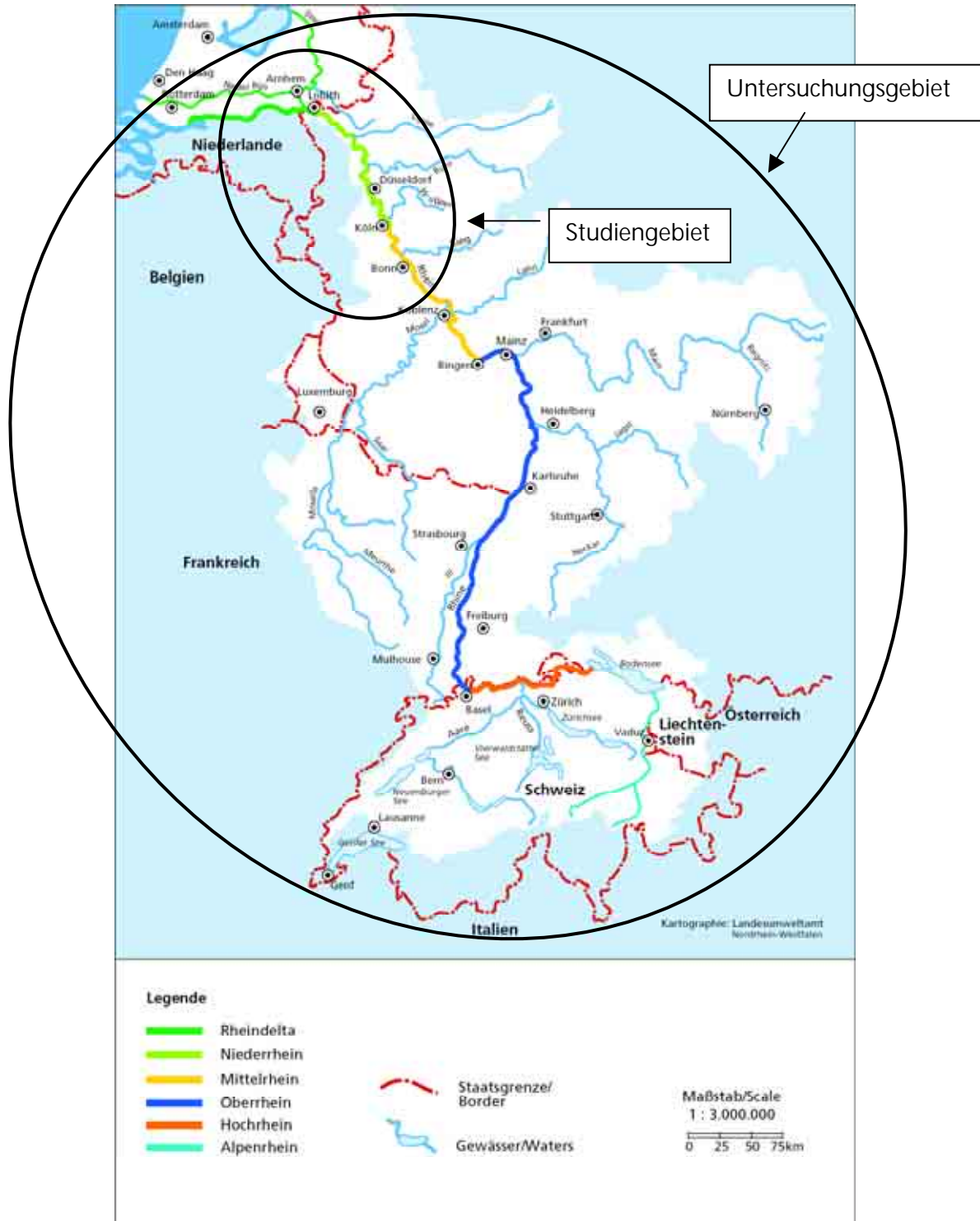


Abbildung 2-1: Untersuchungsgebiet und Studiengebiet (nach LUA, 2002).

Je nach Fragestellung und Detailliertheit der Betrachtung wird jedoch das gesamte Gebiet oder nur ein Teilgebiet betrachtet:

Schwerpunkt der Untersuchung ist der Rhein in Nordrhein-Westfalen und in Gelderland. Dieses Gebiet wird im Folgenden *Studiengebiet* genannt. Es umfasst den Bereich des Rheins ab ca. Bonn und die niederländischen Rheinarme und berücksichtigt auch das Umland entlang dieses Rheinabschnittes und damit das potentiell überflutungsgefährdete Gebiet.

Das Hochwassergeschehen im Studiengebiet ist vom Wasserdargebot und vom Wellenablauf im gesamten Einzugsgebiet abhängig. Dabei können Details eher vernachlässigt werden. Deshalb wurde das gesamte Einzugsgebiet mit in die Untersuchungen einbezogen. Im Folgenden soll dieses Gebiet *Untersuchungsgebiet* (im eigentlichen Sinn) genannt werden.

2.2 Hydrologie

Das *Untersuchungsgebiet* umfasst das gesamte Einzugsgebiet des Rheins bis zur Mündung der *IJssel* in das *IJsselmeer*, *Krimpen aan de Lek* am *Lek* und *Werkendam* an der *Waal / Boven - Merwede* mit einer Einzugsgebietsgröße von 166200 km². Hiervon entfallen rund 160800 km² auf das Einzugsgebiet des Rheins bis Lobith unmittelbar oberhalb des ersten Verzweigungspunktes bei Pannerden, und rund 5400 km² auf das Gebiet der Rheinarme.

Der Rheinlauf wird in der Regel in 6 Teilstrecken unterteilt: den Alpenrhein, Hoahrhein, Oberrhein, Mittelrhein, Niederrhein und das Rheindelta (Abbildung 2-1). In Tabelle 2-1 sind die wichtigsten Nebenflüsse mit hydrologischen Kenngrößen zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Wichtige Nebenflüsse des Rheins sowie einige Kennwerte zu den Pegeln (aus Eberle et al., 2004).

Fluss	Pegel	A _{Eo} [km ²]	MQ [m ³ /s]	MHQ [m ³ /s]	HQ [m ³ /s]	Bezugsperiode MQ, MHQ, HQ
Rhein	Basel	35929	1060	2880	5090	1931-1999
Neckar	Rockenau	12710	135	1180	2690	1951-1999
Main	Raunheim	(24764)	(190)	(941)	(2010)	1966-1998
Nahe	Grolsheim	4013	31,2	457	1000	1973-1998
Lahn	Kalkofen	5304	46,6	385	840	1936-1998
Mosel	Cochem	27088	312	2080	4170	1931-1998
Sieg	Menden	2825	52,0	562	1050	1965-1998
Ruhr	Hattingen	4118	69,4	563	907	1968-1998
Lippe	Schermbeck	4783	44,5	243	361	1965-1998

() Pegel Frankfurt für Raunheim

A_{Eo} Einzugsgebiet des Pegels

MQ mittlerer Abfluss der Bezugsperiode

MHQ Mittelwert der Jahresmaxima der Bezugsperiode

HQ maximaler Abfluss der Bezugsperiode

Quelle: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ

Quelle: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ

Quelle: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ

Quelle: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ

Typisch für das Hochwassergeschehen im Rhein ist, dass sich das Verhältnis der mittleren Hochwasserabflüsse (MHQ) für Sommer- und Winterhalbjahre verschiebt (Tabelle 2-2). Treten am Hochrhein (Rheinfelden) und am südlichen Oberrhein (Maxau) die größten Hochwasserabflüsse im Sommer auf, so beginnt sich am nördlichen Oberrhein zwischen Worms und Mainz das Verhältnis umzukehren. Am Niederrhein und im Rheindelta sind dagegen die Winterhochwasser maßgebend. Sommerhochwasser können am Niederrhein jedoch nicht völlig ausgeschlossen werden.

Tabelle 2-2: Mittlere vieljährige Hochwasserabflüsse (MHQ) für Winter- und Sommerhalbjahre an den Pegeln des Rheins (aus LUA, 2002).

Pegel	Einzugsgebiet [km ²]	Wi MHQ [m ³ /s]	So MHQ [m ³ /s]	Wi MHQ : So MHQ
Rheinfelden	34550	2220	2590	0,86 : 1,0
Maxau	50196	2650	2690	1,0 : 1,0
Worms	68827	3060	2720	1,1 : 1,0
Mainz	98206	3880	2980	1,3 : 1,0
Köln	144232	6300	3810	1,7 : 1,0
Rees	159300	6530	3940	1,7 : 1,0

Entscheidend für das Entstehen von Hochwasser im Rheineinzugsgebiet ist nicht nur das Auftreten größerer Niederschläge sondern auch die Überlagerung der Wellen aus den Teileinzugsgebieten im Rhein selber. So kann der Anteil der Wellen aus den Nebengewässern je nach Hochwasser sehr unterschiedlich ausfallen (Abbildung 2-2).

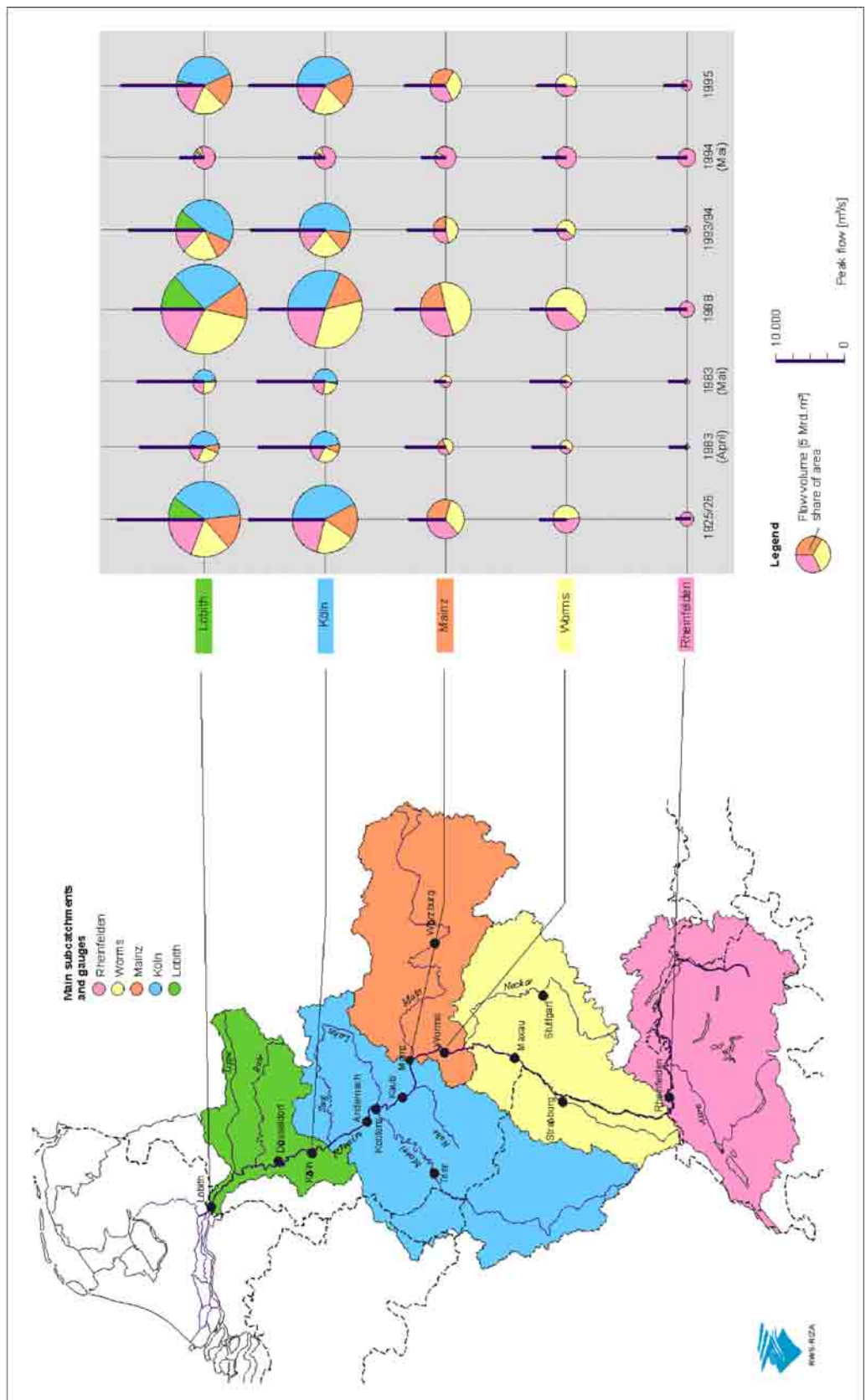


Abbildung 2-2: Hochwassergenease am Rhein zwischen Rheinfelden und Lobith.

2.3 Hochwasserschutz und Abflusskapazität

2.3.1 Definition Bemessungsabfluss, Leistungsfähigkeit und Abflusskapazität

Bemessungsabfluss, Leistungsfähigkeit und Abflusskapazität sind Begriffe, die herangezogen werden, um Aussagen über die Wassermenge zu treffen, die an einer Hochwasserschutzanlage vorbei geleitet werden können. Lediglich für den Bemessungsabfluss besteht jedoch eine eindeutige Definition, bezogen auf Hochwasserschutzanlagen sollen deshalb die Begriffe Leistungsfähigkeit und Abflusskapazität zunächst definiert werden, bevor sie im folgenden verwendet werden.

Das *Bemessungshochwasser* ist definiert als das Ereignis, das zur Dimensionierung einer Hochwasserschutzanlage herangezogen wird. Sowohl in den Niederlanden als auch in Deutschland wird hierfür der Abfluss einer vorgegebenen Wiederkehrwahrscheinlichkeit zugrunde gelegt. Die Höhe der Hochwasserschutzanlage ergibt sich anschließend aus dem zugehörigen Wasserstand zuzüglich Freibord. Letzterer soll eine zusätzliche Sicherheit gegen andere den Wasserstand beeinflussende Größen wie Wellenschlag, Windeinfluss etc. bieten. In den Niederlanden beträgt das Freibord 0,5 m. Gemäss DIN 19712 wird in Deutschland ein Freibord von 0,5 bis 1 m bei Deichen und bei Hochwassermauern 0,1 – 0,5 m als Regelfall empfohlen. Im Einzelfall kann davon jedoch auch abgewichen werden.

Unter *Leistungsfähigkeit* soll im folgenden die Wassermenge in m^3/s verstanden werden, die abgeführt werden kann, wenn der Wasserstand im Fluss eine Höhe erreicht, die der Höhe der Deichkrone abzüglich Freibord entspricht. Bei Hochwasserschutzanlagen, deren Höhe dem Bemessungshochwasser entspricht, ist die Leistungsfähigkeit identisch mit dem Bemessungsabfluss. Dies muss jedoch nicht immer so sein. Beispielsweise beträgt die Leistungsfähigkeit des Rheins in den Niederlanden zur Zeit vielerorts $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ obwohl der Bemessungsabfluss $16000 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt, weil die Deiche dem seit 2001 geltenden neuen Bemessungsabfluss noch nicht angepasst sind. Anderenorts kann die Leistungsfähigkeit auch höher sein als der Bemessungsabfluss, beispielsweise weil sich der Bemessungsabfluss verringert hat und die Deiche noch nach der alten Bemessungsgröße gebaut wurden oder der Fluss bei gleichem Wasserstand mehr Abfluss ableiten kann.

Die *Abflusskapazität* ergibt sich aus der Leistungsfähigkeit erhöht um den Abfluss, der zusätzlich im Bereich des Freibords abgeleitet werden kann.

2.3.2 Heutiger Zustand im Untersuchungsgebiet, ein Überblick

Im allgemeinen nimmt der Abfluss entlang des Rheins von der Quelle bis zu seinem ersten Verzweigungspunkt bei Pannerden zu. Dies gilt auch für die Scheitelabflüsse eines Hochwassers. Wollte man sich auf der gesamten Strecke entlang des Rheins in gleichem Maße, d.h. mit dem gleichen Schutzniveau (im allgemeinen ausgedrückt als Abfluss bzw. Wasserstand mit einer vorgegebenen Eintretenswahrscheinlichkeit), vor Hochwasser schützen, so müsste sich die *Leistungsfähigkeit* zwischen den Dämmen in Fließrichtung erhöhen. Abbildung 2-3 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Abflussleistungsfähigkeit entlang des Rheins. Es wird deutlich, dass die Leistungsfähigkeit entlang des Rheins nicht immer zunimmt. So vergrößert sich die Leistungsfähigkeit vom Bodensee bis Iffezheim von $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $7500 \text{ m}^3/\text{s}$, um unterhalb des staugeregelten Abschnittes bei Iffezheim auf $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ zurückzugehen und bis

zum Eintreten des Flusses in die Mittelrheinstrecke (Rhein-km 529) erneut auf 7300 m³/s anzuwachsen. Am Niederrhein variiert die Leistungsfähigkeit zwischen zunächst 6500 m³/s bei Bad Honnef (Rhein-km 640) und 12900 m³/s im Raum Köln, um in den Niederlanden schließlich 15000 m³/s zu erreichen.

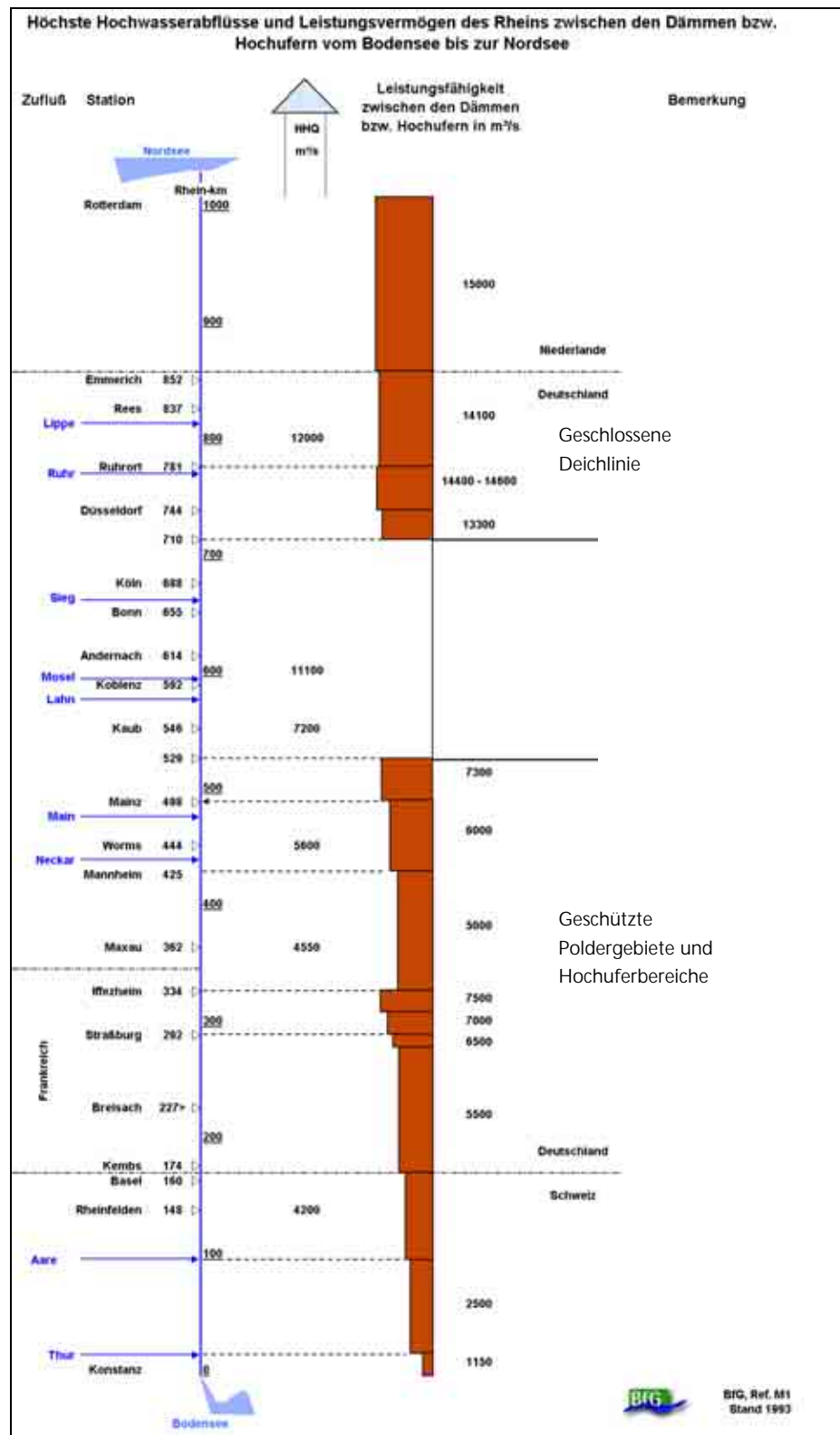


Abbildung 2-3: Hochwasserschutz entlang des Rheins heute; Stand 1993 (nach Eberle et al., 2004). (Definition Leistungsfähigkeit s. Text)

Ordnet man den mit der Leistungsfähigkeit korrespondierenden Abflüssen Wahrscheinlichkeiten ihres Auftretens zu, so zeigt sich, dass auch diese variieren von 1/1000 Jahren und 1/110 Jahren am Oberrhein sowie von weniger als 1/100 über 1/200 bis 1/500 am Niederrhein. In den Niederlanden entspricht die gegenwärtige Leistungsfähigkeit von 15000 m³/s einer Jährlichkeit von 1/585. Erst nach Verwirklichung der wasserstandsvermindernden Maßnahmen im Rahmen des Projektes Raum für den Fluss wird mit einer Leistungsfähigkeit von 16000 m³/s der geforderte Schutz vor Hochwassern mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 1/1250 Jahren erreicht.

Die maximale *Abflusskapazität* ergibt sich aus der Leistungsfähigkeit erhöht um den Abfluss, der zusätzlich im Bereich des Freibords abgeleitet werden kann. In Abhängigkeit von der lokalen Geometrie des Flusses ist der zusätzliche Abfluss unterschiedlich. Für den Oberrhein unterhalb von Iffezheim geht man im allgemeinen von einem zusätzlichen Abfluss von 300 m³/s aus (Eberle et al., 2004). Am Niederrhein nimmt dieser zusätzliche Abfluss pro 1 m Freibord von ca. 1900 m³/s bei Köln über ca. 2000 m³/s bei Düsseldorf, ca. 2300 m³/s bei Ruhrort, ca. 2700 m³/s bei Wesel bis auf ca. 3000 m³/s im deutsch-niederländischen Grenzgebiet bei Rees bis Lobith zu.

Während in Deutschland die Hochwasserschutzanlagen daraufhin ausgelegt werden, noch standsicher zu sein, wenn der Wasserstand die Kronenhöhe erreicht, geht man in den Niederlanden davon aus, dass die Hochwasserschutzanlagen bereits bei Erreichen des Bemessungswasserstandes versagen können. Dies spiegelt sich im Aufbau der Deiche wieder. Dieser Unterschied bleibt in der vorliegenden Studie jedoch unberücksichtigt, d.h. es wird davon ausgegangen, dass es sowohl in Deutschland als auch in den Niederlanden erst zum Deichbruch kommt, wenn der Wasserstand die Deichkrone überströmt.

2.3.3 Heutiger und zukünftiger Zustand im Studiengebiet

In Nordrhein-Westfalen schützen ca. 330 km Hochwasserschutzanlagen eine Fläche von rd. 1500 km² mit ca. 1,4 Mio. Menschen, Industrie, Infrastruktur und landwirtschaftlich genutzten Flächen. Dabei handelt es sich um Deiche, Hochwasserschutzmauern, Spundwände und mobile Schutzanlagen. Eine Übersicht gibt Anlage 1-1.

Verantwortlich für den Hochwasserschutz in NRW sind die Deichverbände und Kommunen, welche in Selbstverwaltung diese Aufgabe übernehmen. Die Aufgabe des Landes besteht darin, Empfehlungen für die Bemessung von Hochwasserschutzanlagen zu geben, die Deichpflichtigen zu beaufsichtigen, diese bei Planung und Bau der Anlagen zu beraten und finanzielle Unterstützung zu geben. Letztere wird in der Praxis dann gewährt, wenn die Empfehlungen eingehalten werden.

Bemessung der Hochwasserschutzanlagen entlang des Rheins in NRW

Im Regierungsbezirk Köln gilt zur Zeit der 1963 erarbeitete „Rahmenplan für den Hochwasserschutz“ als Grundlage zur Bemessung der Hochwasserschutzanlagen. Hier wurde der Ausbauwasserstand als 1 m über dem Hochwasserstand 1925/1926 festgesetzt. Dies entspricht am Pegel Köln einem Abfluss von 13300 m³/s, dem seinerzeit statistischen Analysen zur Folge eine Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 1/1000 Jahren zugeordnet wurde (Schneider, 1996). Als Freibord wurde nach diesem Plan bei Deichen in der

Regel 0,50 m gewählt, häufig jedoch nicht realisiert (mündliche Mitteilung von Herrn Schaa, Staatliches Umweltamt Köln).

Im Regierungsbezirk Düsseldorf ist zur Zeit noch das 1977 festgesetzte Bemessungshochwasser BHQ_{77} zur Bemessung der Hochwasserschutzanlagen (Schneider, 1996). Dabei wurden an den Hauptpegeln entlang des Niederrheins die folgenden Abflüsse zugeordnet:

Köln und Düsseldorf	13300 m ³ /s
Ruhrort	14400 m ³ /s
Wesel	14600 m ³ /s
Rees	14200 m ³ /s
Emmerich	14100 m ³ /s

Basierend auf mehreren statistischen Analysen ging man seinerzeit davon aus, dass der für die Pegel Köln und Düsseldorf genannte Abfluss einer Wahrscheinlichkeit von 1/1000 Jahren entspricht. Da die Zeitreihen, die den heutigen statistischen Analysen zugrunde liegen auch die Hochwasser 1993 und 1995 enthalten, entspricht der genannte Abfluss heute einer Jährlichkeit von 300 Jahren. Gleichzeitig beträgt er das 1,2-fache des Scheitelabflusses des Hochwassers 1925/1926. Für den unteren Niederrhein zeigten die damaligen Untersuchungen jedoch Unstimmigkeiten in den Abflusskurven, sodass hier als Bemessungswassermenge generell der Scheitelabfluss des Hochwassers 1925/1926 erhöht um 20% angesetzt wurde. Im Rahmen des Deichsanierungsprogrammes wird den Hochwasserschutzpflichtigen das vom Staatlichen Umweltamt Krefeld entwickelte Regelprofil empfohlen. Dieses sieht ein Freibordmaß von 1 m vor. Derzeit ist dieses Maß noch nicht durchgehend vorhanden.

Im September 2003 hat das MUNLV-NRW in Düsseldorf den Bezirksregierungen in Düsseldorf und Köln einen Vorschlag zur Neufestsetzung des *Bemessungshochwasser für den Rhein in NRW neu* unterbreitet (MUNLV-NRW, 2003). Demnach sollen die Hochwasserschutzanlagen *in Zukunft* auf der Grundlage der in Tabelle 2-3 dargelegten Bemessungsabflüsse für die Pegel Bonn bis Emmerich festgelegt werden. Der Wechsel zwischen einem 200 jährlichen und einem 500 jährlichen Hochwasserschutz soll im Bereich von Rhein-km 771 (Duisburg/Krefeld) liegen.

Tabelle 2-3: Bemessungsabflüsse in NRW und Gelderland, geplanter Zustand 2020 (nach MUNLV-NRW, 2003).

Pegel	Jährlichkeit [Jahre]	Q [m ³ /s]	Gültig für Flussstrecke [Rhein-km]	
			von	bis
Bonn	200 ^D	12000	639,3	659,3
Köln	200 ^D	12900	659,3	703,3
Düsseldorf	200 ^D	12900	703,3	Ca. 771
	500 ^D	14200	Ca. 771	780,1
Ruhrort	500 ^D	14800	780,1	797,7
Wesel	500 ^D	14800	797,7	814,4
Rees	500 ^D	14700	814,4	Ca. 823
			Ca. 823	844,4
Emmerich	500 ^D	14500	844,4	865,5/857,7
Lobith	1250 ^{NL}	16000	865,5/857,7	

Grundlage für die Ermittlung der maßgeblichen Wasserstände sollen die Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnungen am Rhein in NRW gemäß den Berechnungen der BfG (Busch et al., 1994) sein. Als Freibord bei Erddeichen ist grundsätzlich 1,0 m anzusetzen, bei Deichen, die durch Bergsenkung direkt betroffen sind 1,5 m (MUNLV-NRW, 2003). Nicht explizit genannt, aber gängige Praxis ist die Einhaltung eines Freibordes von 0,1 bis 0,5 m bei Hochwassermauern.

In den Niederlanden ist seit 1977 für die niederländischen Rheinarme gesetzlich ein Schutzniveau von 1/1250 Jahren festgelegt. Seit 2001 entspricht dies einem Abfluss von 16000 m³/s bei Lobith. Davor waren es 15000 m³/s. Die erforderliche Erhöhung der Leistungsfähigkeit soll nicht durch Deicherhöhungen, sondern durch wasserstandsvermindernde Maßnahmen (Vorlandvertiefungen, Deichrückverlegungen etc. im Rahmen des Projektes Raum für den Fluss) und Rückhaltemaßnahmen erreicht werden. Die Höhe der Deiche soll gleich bleiben. Der Freibord beträgt 0,5 m.

Die auf dieser Basis festgelegten *Wasserstände zur Bemessung der Hochwasserschutzanlagen* sind in der Anlage 1- 3 dargestellt. Ihnen gegenüber gestellt ist die *Höhe der Hochwasserschutzanlagen* sowie die Höhe der Schutzanlagen abzüglich gefordertem Freibord jeweils für den heutigen Zustand sowie den Zustand nach Sanierung der Hochwasserschutzanlagen.

Für den ersten Abschnitt bis ca. Rhein-km 715 wird aus Anlage 1- 3 ersichtlich, dass im heutigen Zustand keine durchgängige Hochwasserschutzanlage vorliegt, was zum großen Teil im größeren Relief mit einem engeren Tal begründet ist (Hochuferbereiche). Zum anderen wird prinzipiell auch für die geschützten Gebiete (bezogen auf Freibordniveau) ein niedrigeres Schutzniveau geboten als in den weiter unterhalb gelegenen Rheinabschnitten. Es liegt in der Regel unter HQ₁₀₀.

Im Gegensatz zur heutigen Situation erhöht sich nach Durchführung der geplanten Deichsanierung der allgemeine Schutz deutlich. Der Umfang der geschützten Bereiche nimmt zu (z.B. geschlossene Schutzlinie am linken Ufer ab Rhein-km 673). An vielen Stellen werden die Deiche bzw. Schutzmauern angepasst bzw. Lücken geschlossen. Dennoch bleibt das Schutzniveau bezogen auf ein Freibordniveau von 1 m bzw. 0,5 m mit HQ₇₀ bis HQ₁₅₀ deutlich unter dem Niveau des am Niederrhein weiter unterhalb realisierten bzw. geplanten Schutzes. Unter der Annahme des im Regierungsbezirk Köln häufig gehandhabten Freibords von 10 bis 20 cm bei Hochwassermauern kann man von einem Hochwasserschutz von 1/100 bis 1/200 sprechen.

Im zweiten Abschnitt (Anlage 1- 3, Rhein-km 715 bis ca. 768) beginnt linksrheinisch ab ca. Rhein-km 705 bzw. rechtsrheinisch ab ca. Rhein-km 722 die geschlossene Deichlinie in NRW, die nur in Ausnahmefällen durch Hochuferbereiche unterbrochen wird.

Bereits im heutigen Zustand erfüllt ein großer Teil dieses Abschnittes die zukünftigen Anforderungen an die Höhen der Hochwasserschutzanlagen. In andere Bereichen (vor allem linksrheinisch sowie rechtsrheinisch km 723 – 727) wird unter Berücksichtigung eines Freibords von 1 m für Deiche und 0,5 m für Hochwassermauern das angestrebte Schutzniveau von HQ₂₀₀ heute noch nicht erreicht, die Deichkrone liegt jedoch durchgängig im Bereich der Wasserspiegellagen HQ₂₀₀ und HQ₅₀₀.

Durch die Deichsanierungsmaßnahmen linksrheinisch in Düsseldorf (ca. Rhein-km 745 bis 768) und rechtsrheinisch oberhalb Düsseldorf (ca. Rhein-km 723 – 727) wird auch in diesem Bereich das angestrebte Schutzniveau auch unter Einhaltung eines Freibords von 1 bzw. 0,5 m erreicht. Andere Bereiche vor

allem linksrheinisch ca. Rhein-km 727 bis 745 behalten ihr niedrigeres Schutzniveau, die Deichkrone liegt aber über HQ_{200} .

Im heutigen Zustand ist linksrheinisch bei ca. Rhein-km 768 eine deutliche Erhöhung der Deichkrone zu erkennen. Ab hier bis ca. Rhein-km 820 liegen die Hochwasserschutzanlagen auch abzüglich eines Freibords von 1 m für Deiche und 0,5 m für Mauern sowohl rechts- als auch linksrheinisch im Wesentlichen über der Wasserspiegellage des HQ_{500} . Auffällig ist der unruhige Verlauf der Krone der Hochwasserschutzanlagen in diesem zum Teil durch Bergsenkung betroffenen Gebiet.

Im Zustand 2020 ist der Höhenverlauf der Deichkrone deutlich ausgeglichener. Neben Deichsanierungsmaßnahmen ist dies darauf zurückzuführen, dass bis zum Jahr 2020 die heute noch überhöhten Deichhöhen in den durch Bergsenkung betroffenen Teilstrecken die angestrebte Höhe erreichen werden. Sowohl rechts- als auch linksrheinisch wird im gesamten Rheinabschnitt Rhein-km 768 bis 810 auch unter Berücksichtigung eines erhöhten Freibordes von 1,5 m das angestrebte Schutzniveau von HQ_{500} erreicht.

Im letzten Abschnitt ab Rhein-km 810 bis zur deutsch-niederländischen Grenze wird das angestrebte Schutzniveau von 1/500 heute streckenweise nur mit Freibordmaßen unterhalb 1 m bzw. 0,5 m erreicht.

Durch die zur Zeit laufenden Maßnahmen der Deichsanierung kann in Zukunft der gewünschte Schutz vor Hochwasser gewährleistet werden. Einzige Ausnahme bildet Emmerich, wo für die dortige Schutzmauer nur ein Freibord von 40 cm berücksichtigt wird. Bei der Bemessung dieser Hochwasserschutzanlage wird davon ausgegangen, dass die Eintiefung des Rheins durch Erosion in diesem Flussabschnitt zu einer Wasserspiegelabsenkung um mindestens 10 cm bis 2020 führen wird.

In den Niederlanden können die Hochwasserschutzanlagen im grenznahen Bereich das angestrebte Bemessungshochwasser bereits heute schon mit Einhaltung des gewünschten Freibords abführen. Um dies auch auf der gesamten Länge der Rheinarme zu gewährleisten, sollen bis 2015 nicht die Deiche erhöht, sondern die hydraulische Leistungsfähigkeit des Flusses erhöht werden.

Auf der Grundlage der Bemessungsabflüsse und der an den jeweiligen Pegeln gültigen Abflusskapazitäten je Meter Wasserstand im oberen Bereich der Abflusskurve kann eine *erste Abschätzung der Gesamtabflusskapazität* sowohl für den heutigen Zustand 2002 (Tabelle 2-4) als auch für den zukünftigen Zustand 2020 (Tabelle 2-5) erfolgen. Wie die Anlage 1- 3 sowie die obigen Erläuterungen zeigen, weichen die Deichhöhen lokal jedoch deutlich von diesen Vorgaben ab, sodass es sich vor allem für den Zustand 2002 um theoretische Werte zur globalen Abschätzung der Abflusskapazität handelt. Eine der wesentlichen Aufgaben des Projektes ist es, die Abflusskapazität im Studiengebiet näher zu untersuchen.

Tabelle 2-4: Global geschätzte Abflusskapazitäten in NRW und Gelderland, heutiger Zustand 2002; theoretische Werte unter der Annahme der durchgängigen Realisierung des BHQ₇₇ mit den genannten Freibordmaßen.

Pegel	Bemessungsabfluss entsprechend BHQ [m ³ /s]	Zusätzliche Kapazität durch 1 m Freibord [m ³ /s]	Gesamtkapazität bei	
			0,5 m Freibord [m ³ /s]	1 m Freibord [m ³ /s]
Köln	13300	1900	14250	15200
Düsseldorf	13300	2000	14300	15300
Ruhrort	14400	2300	15550	16700
Wesel	14600	2700	15950	17300
Rees	14200	3000	15700	17200
Emmerich	14100	3000	15600	17100
Lobith	15000	3000	16500	--- ¹⁾
¹⁾ nicht von Bedeutung				

Tabelle 2-5: Global geschätzte Abflusskapazitäten in NRW und Gelderland, geplanter Zustand 2020, theoretische Werte nach Realisierung des angestrebten Schutzniveaus mit den angegebenen Freibordmaßen.

Pegel	Bemessungsabfluss		Zusätzliche Kapazität durch 1 m Freibord [m ³ /s]	Gesamtkapazität bei		
	Jährlich- keit [Jahren]	Abfluss [Q]		0,5 m Freibord [m ³ /s]	1 m Freibord [m ³ /s]	1,5 m Freibord [m ³ /s]
Bonn	200 ^D	12600	1900	13550	14500	--- ¹⁾
Köln	200 ^D	12900	1900	13850	14800	--- ¹⁾
Düsseldorf	200 ^D	12900	2000	13900	14900	--- ¹⁾
	500 ^D	14200	2000	15200	16200	17200
Ruhrort	500 ^D	14800	2300	15950	17100	18250
Wesel	500 ^D	14800	2700	16150	17500	18850
Rees	500 ^D	14700	3000	16200	17700	19200
Emmerich	500 ^D	14500	3000	16000	17500	--- ¹⁾
Lobith	1250 ^{NL}	16000	3000	17500	--- ¹⁾	--- ¹⁾
D = deutsche Statistik NL = niederländische Statistik				¹⁾ nicht von Bedeutung		

2.3.4 Zukünftiger Zustand im Untersuchungsgebiet oberhalb von NRW

In der hier vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass sich im Einzugsgebiet des Rheins oberhalb von NRW die Deichhöhen und damit auch die Abflussleistungsfähigkeiten und –kapazitäten nicht verändern. Durch die Verwirklichung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen am Oberrhein wird sich die Eintretenswahrscheinlichkeit der für den Bereich unterhalb Iffezheim (Rhein-km 334 bis 529) genannten Leistungsfähigkeiten bis 2020 auf 1/200 Jahre verringern.

2.4 Hochwasservermindernde Maßnahmen

2.4.1 Hochwasservermindernde Maßnahmen im Einzugsgebiet bis Andernach

Im gesamten Einzugsgebiet des Rheins bis Andernach werden seit geraumer Zeit zunehmend Maßnahmen zur Reduzierung der Wasserstände bei Hochwasser getroffen. Von diesen Maßnahmen werden im Rahmen dieser Studie lediglich die Maßnahmen am Oberrhein explizit berücksichtigt. Ziel dieser Maßnahmen ist es, die Auswirkungen des Ausbaus des Oberrheins mit Staustufen auf die Hochwasserscheitelwerte so zu kompensieren, dass ein 200-jährliches Hochwasser unterhalb der Ausbaustrecke bis zum Neckar wieder mit einem Abfluss von 5000 m³/s bzw. zwischen Neckar- und Mainmündung einem Scheitelabfluss von 6000 m³/s abläuft. Tabelle 2-6 gibt einen Überblick über die Maßnahmen.

Tabelle 2-6: Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein (vgl. auch Anlage 2- 1 und Anlage 2- 2) (nach Eberle et al., 2004).

Rhein- km	Maßnahme [Name]	Maßnahme [Typ]	Speicher- volumen [Mio. m ³]	Bearbeitungsstand Sommer 2002	Maßnahme Berechnungen Systemzustand	
					2002	2020
174 – 274	Sonderbetrieb Rheinkraftwerke ¹⁾	Rheinseitenkanal und 3 (von 4) Schlingen	~12-45	in Betrieb	X	X
220,0	südl. Kulturwehr Breisach	Wehr oder VL	25,0	Vor- Planung		X
225,0	Kulturwehr Breisach	Wehr	9,3	Vor- Planung		X
235,0	Breisach/Burkheim	RP St	6,5	Vor- Planung		X
246,0	Wyhl/Weisweil	RP St	7,7	Vor- Planung		X
253,5	Elzmündung	RP St	5,3	Vor- Planung		X
275,0	Erstein	RP St	7,8	im Bau		X
276,0	Ichenheim/Meisenheim	RP St	5,8	Vor- Planung		X
280,0	Altenheim	RP St	17,6	in Betrieb	X	X
285,0	Kulturwehr Straßburg/Kehl ²⁾	Wehr	37,0	in Betrieb	X	X
308,0	Freistett	RP St	9,0	Vor- Planung		X
321,0	Söllingen/Greffern	RP St	12,0	im Bau		X
330,0	Moder	RP St	5,6	in Betrieb	X	X
345,5	Bellenkopf/Rappenwörth	RP St	14,0	Vor- Planung		
359,0	Daxlander Au	RP St	5,1	in Betrieb	X	X
368,0	Neupotzh/Wörth	DRV und RP St	16,2 (12 + 4,2)	Planfeststellungsverfahren		X
381,3	Elisabethenwörth	RP St	11,9	Planfeststellungsverfahren		X
388,4	Meckersheim	RP St	7,4	Vor- Planung		X
390,4	Rheinschanzinsel	RP St	6,2	Planfeststellungsverfahren		X
392,6	Flotzgrün	RP St	5,0	in Betrieb	X	X
409,9	Kollerinsel	RP St	6,1	in Betrieb	X	X
411,5	Waldsee/Altrip/Neuhofen	DRV und RP St	9,1 (7,9 + 1,2)	Vor- Planung		X
436,0	Petersau/Bannen	DRV	1,4	Vor- Planung		X
438,0	Worms Bürgerweide	DRV	3,4	In Betrieb	X	X
440,0	Worms Mittlerer Busch	DRV	2,3	im Bau		X
490,0	Bodenheim/Laubenheim	RP St	6,4	Vor- Planung		X
517,0	Ingelheim	RP St	3,8	Vor- Planung		X
VL = Vorlandvertiefung		1) Maximalvolumen, eingesetztes Volumen ist abhängig vom Abfluss im Rhein.				
DRV = Deichrückverlegung		2) zur Zeit (2002) nur ca. 12 Mio. m ³ verfügbar. Im Katastrophenfall kann jedoch das				
RP St = Retentionspolder gesteuert		Maximalvolumen eingesetzt werden.				

2.4.2 Hochwasservermindernde Maßnahmen am Niederrhein

Auch am Niederrhein wurde und wird in wasserstandsreduzierende Maßnahmen investiert. Neben Deichrückverlegungen und Entfernungen von hydraulischen Engpässen im kleineren Umfang sind die folgenden 11 Maßnahmen geplant oder bereits realisiert.

Tabelle 2-7: Rückhaltemaßnahmen am Niederrhein (vgl. auch Anlage 2- 3) (nach Van der Veen et al., 2004a und Mehlig, 2004).

Name	Km oben	Km unten	Seite	Variante	Typ	Einstaufläche [ha]	Einstauvolumen [Mio. m ³]	Maßnahme berücksichtigt bei den Berechnungen Systemzustand ¹⁾	
								2002	2020
Köln-Langel	669,2	672,5	R	PFV	RP U	158	4,53	X ³⁾	X
Worringer Bruch	705,5	708,5	L	PV-V1	RP U	710	29,5		
				PV-V2	RP U	250	8,3		
				PV-V3 ²⁾	RP ST	637	12,2	X	X
				PV-V4	RP ST	250	8,3		
Monheim	711,5	713,5	R	AV	DRV-LD	185	8		X
Itter-Himmelgeist	723,5	729,5	R	PV-2A	DRV	58	-		X
				PV-3A	DRV	113	-		
Ilvericher Bruch	750	754,5	L	PV-A	RP ST	270	7,5		
				PV-AA	RP ST	290	8,1		
				PV-B1	RP ST	450	10,4		
				PV-B2	RP ST	275	10,07		X
Mündelheim	761,5	768,5	R	PV-V4	DRV	64	-	X ³⁾	X
Orsoy Land	797,5	803,5	L	AV	DRV-LD	215	-	X	X
Bislicher Insel	818,5	823,5	L	AV	RP U	960	50	X ³⁾	X
Lohrwardt	827,8	834,8	R	PFV	RP U	295	17,35	X	X
Griether Busch	837,5	847,5	R	PV	RP U	1200	25		X
Bylerward	845,5	854,5	L	PV-A1	DRV	235	8		
				PV-A1/C	DRV VL	235	8		
				PV-A2	DRV	60	2		
				PV-B1	RP ST	870	10		
				PV-B1A	RP ST	1110	21		
				PV-B2	RP ST	1150	51		
				PV-B3	RP ST	1200	52		X
				PV-B4	RP ST	1430	62		
				PV-C	VL	392	8		
PV: Planungsvariante (ggf. mit Variantenname aus den Planungsunterlagen) PFV: Planfeststellungsvariante AV: Ausführungsvariante					RP ST: Retentionspolder gesteuert RP U: Retentionspolder ungesteuert DRV: Deichrückverlegung DRV LD: Deichrückverlegung mit Leitdeich VL: Vorlandvertiefung				
¹⁾ Bei mehreren angegebenen (Planungs-) Varianten einer Maßnahme, ist dies die Variante, die im DSS im Szenario „NRW“ modelliert ist.									
²⁾ Gem. Auskunft StUA Köln aktualisierte Geometrie der Variante V3.									
³⁾ Aufgrund guten Bau- bzw. Planungsfortschrittes ist die Wirkung im Szenario 2002 bereits als vorhanden berücksichtigt.									

Durch die Wasser- und Schifffahrtverwaltung der Bundesrepublik Deutschland bzw. das Land NRW sind darüber hinaus weitere Maßnahmen zur Reduzierung des Wasserstandes (Flussbettauerweiterung, Entfernung von hydraulischen Engpässen, kleinere Deichrückverlegungen) geplant, unter anderem:

- *Reeser Schanz* (Rhein-km 834 – 838, Entfernung des Flügeldeiches gegenüber Obermömter und Schaffung einer Flutmulde),
- Verbreiterung Durchflussprofil der *Brücke von Wesel* (Rhein-km 813 – 814),
- Entfernung *hydraulischer Engpass Bislicher Insel*
 - Entfernung zweier Querriegel linksrheinisch, Rhein-km 820,8 und 821,7
 - Entfernung Postdeich, rechtsrheinisch Rhein-km 821,4
 - Entfernung Rampe Wirtshaus Rose, rechtsrheinisch Rhein-km 820,8 und
 - Beseitigung Querriegel Melkstatt, rechtsrheinisch Rhein-km 824,8.

Diese Maßnahmen sind in Tabelle 2-7 nicht genannt, sollen im Rahmen dieser Untersuchung jedoch als zusätzliche Maßnahmen berücksichtigt werden. Desgleichen gilt für den Retentionspolder Orsoyer Bogen bei Rhein-km 802 bis 804,8, für den bisher keinerlei Planungen vorliegen.

2.4.3 Hochwasservermindernde Maßnahmen in den Niederlanden

Zur Zeit kann in den niederländischen Rheinweisen ein Abfluss von 15000 m³/s bei Lobith sicher abgeführt werden. Im Jahre 2001 wurde der Bemessungsabfluss als Folge der Hochwasserereignisse 1993 und 1995 auf 16000 m³/s erhöht. Es ist erklärtes Ziel, diese zusätzliche Abflusskapazität möglichst nicht durch eine Erhöhung der Deiche zu erreichen, sondern durch wasserstandsvermindernde Maßnahmen. In den Jahren 1997 bis 2004 wurden deshalb umfangreiche Untersuchungen durchgeführt um mögliche Maßnahmen und deren Wirkung festzulegen. Im Wesentlichen geht es dabei um die in Abbildung 2-4 dargestellten Maßnahmentypen. Die Maßnahmen 5 bis 7 sollen vor allem eingesetzt werden, falls noch höhere Abflüsse als 16000 m³/s beispielsweise als Folge von Klimaänderung auftreten sollten.

Im Rahmen des Projektes Raum für den Fluss läuft zur Zeit die Phase der Planung und Umsetzung konkreter Maßnahmen. Um diesen Prozess und die begleitenden Diskussionen zu unterstützen, wurde ein Visualisierungsinstrument geschaffen, das alle potentiellen Maßnahmen inklusive ihrer Wirkungen als Bausteine beinhaltet. Mit Hilfe dieser Bausteine (ca. 600 Stück) lassen sich die unterschiedlichen Maßnahmen mit ihrer Wirkung kombinieren, weshalb dieses Instrument auch die Bausteinkiste („Blokkenkiste“) genannt wird.

Deshalb ist in den Niederlanden die angestrebte Gesamtwirkung bekannt, die durch wasserstandsvermindernde Maßnahmen erreicht werden soll; die Maßnahmen selbst jedoch sind noch nicht festgelegt.

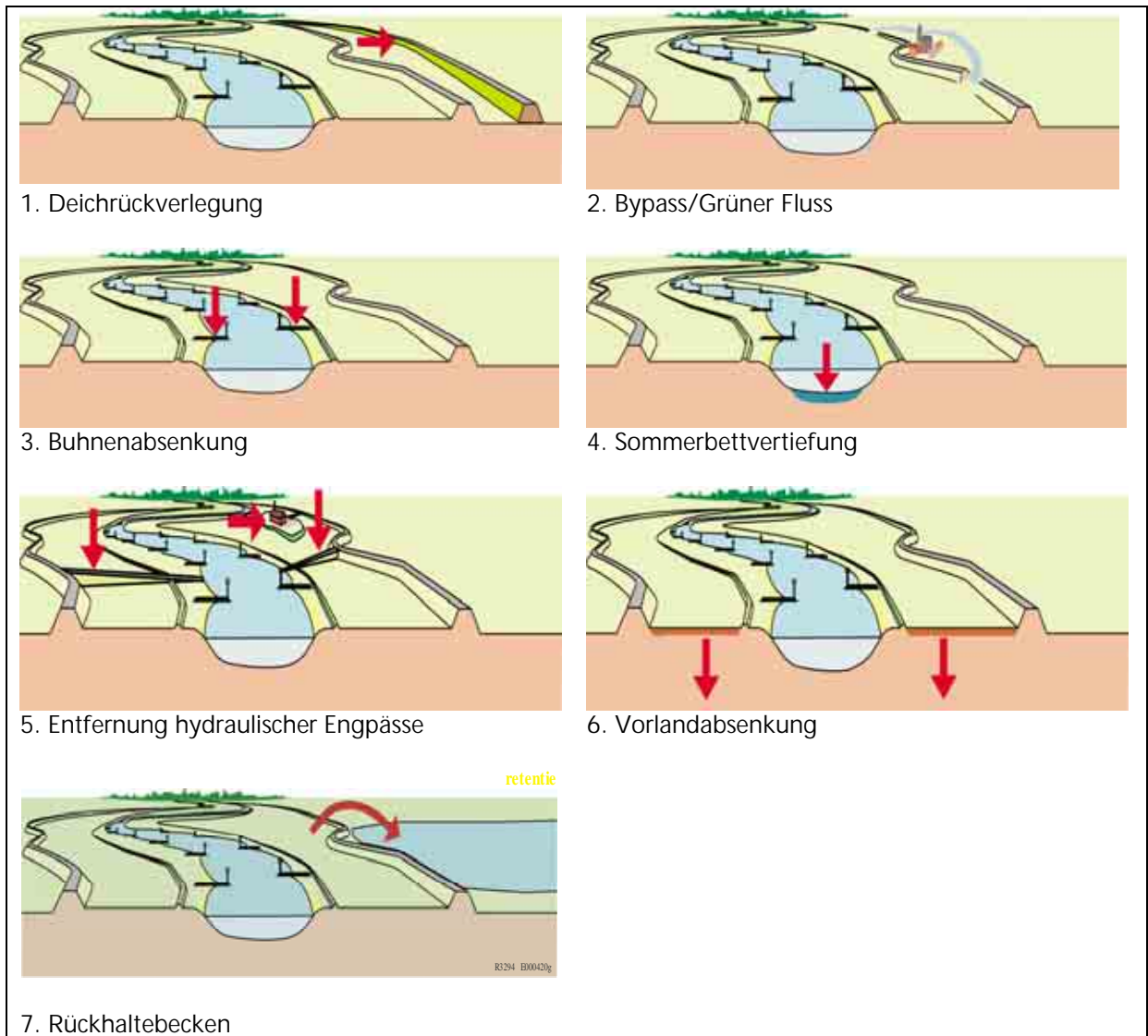


Abbildung 2-4: Maßnahmentypen für „Raum für den Fluss“ in den Niederlanden (aus Silva et al., 2001).

3 Methode

3.1 Modellierung extremer Abflüsse aus dem Rheineinzugsgebiet

Die Erfahrung zeigt, dass immer wieder Hochwasser im Rheineinzugsgebiet auftreten. Der Mensch hat hierauf mit dem Bau von Hochwasserschutzanlagen reagiert. Dabei stellt sich die Frage, auf welche Abflüsse und Wasserstände man sich einstellen muss.

Deshalb sollte geklärt werden, wie viel Abfluss unter extremen Bedingungen aus dem Einzugsgebiet des Rheins oberhalb des Systems deutscher Niederrhein/niederländische Rheinarme erwartet werden kann. Zu berücksichtigen waren sowohl die heutigen als auch die zukünftigen Bedingungen bezüglich der Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein sowie mögliche Klimaänderungen.

Die *Abschätzung von Extremszenarien unter den gegebenen klimatischen Bedingungen* ist auf folgenden Komponenten basiert (siehe auch Abbildung 3-1):

1. einem Niederschlagsgenerator,
2. einem Niederschlag-Abfluss-Modell für das Rheingebiet,
3. Wellenablaufmodellen für den Rhein ab Basel sowie die Unterläufe wichtiger Nebenflüsse.

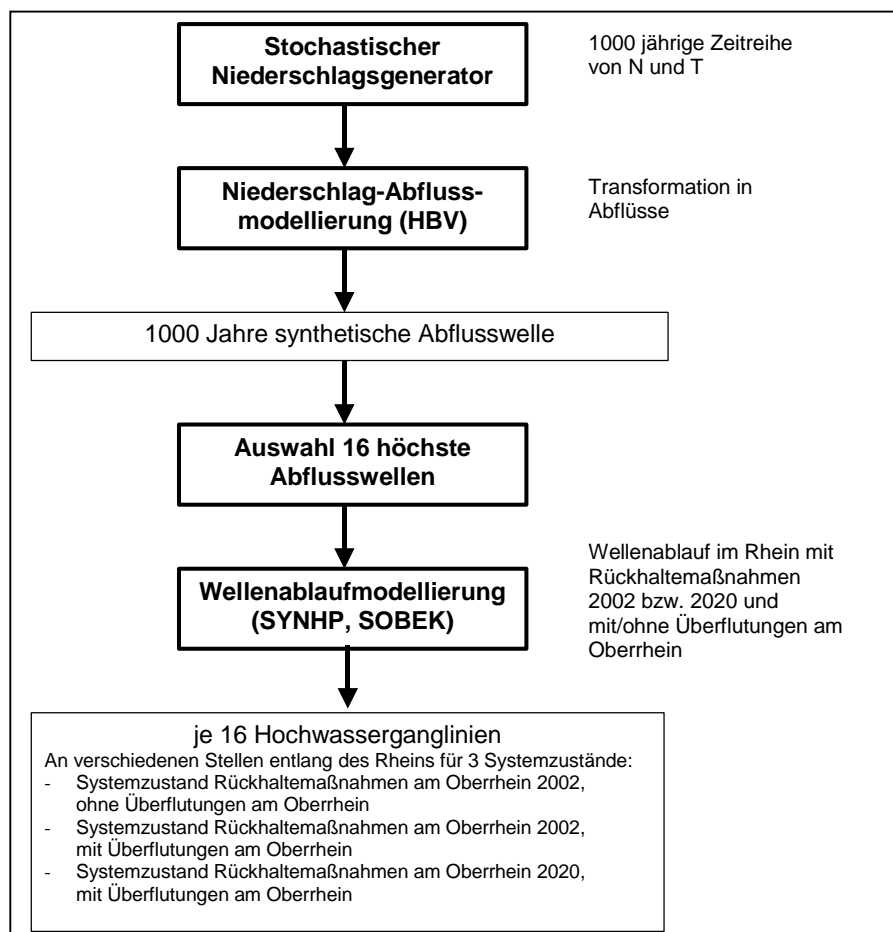


Abbildung 3-1: Vorgehensweise zur Abschätzung extremer Abflüsse aus dem Einzugsgebiet.

Der stochastische Niederschlagsgenerator dient der Erzeugung extremer meteorologischer Situationen. Mit seiner Hilfe lassen sich beliebig lange Zeitreihen von Niederschlag und Temperatur im Rheingebiet generieren, die statistisch den historischen Daten entsprechen.

Die generierten Zeitreihen bilden die Eingangswerte für ein Niederschlag-Abfluss-Modell des Rheingebiets auf Tageswertbasis. Mit diesem Modell wird der Abfluss infolge der generierten Niederschläge in den Nebenflüssen und im Rhein bei Basel berechnet.

Mit den Wellenablaufmodellen SYNHP und SOBEK werden aus den simulierten Abflüssen die resultierenden Abflüsse im Rhein bei Andernach berechnet. Hierbei werden Rückhaltemaßnahmen und das Überströmen von Deichen berücksichtigt.

Da die Wellenablaufmodelle auf Stundenwertbasis arbeiten und nicht für kontinuierliche Simulationen über lange Zeitabschnitte ausgelegt sind, wurden Abflüsse im Rhein zunächst mit einem einfachen Ansatz für den Wellenablauf grob abgeschätzt. Aus den so ermittelten Ganglinien wurden die 16 Ereignisse ausgewählt, die bei Andernach die höchsten Abflussscheitelwerte ergaben. Diese Ereignisse ergaben auch die höchsten Scheitelwerte bei Lobith. Nur diese Ereignisse wurden mit den komplexen Wellenablaufmodellen und unter Einschaltung von Retentionsmaßnahmen und Deichüberströmen berechnet.

Nähere Ausführungen finden sich bei Eberle et al. (2004).

Berechnungen erfolgten für das Rheineinzugsgebiet und den Rhein bis Lobith. Rückhaltemaßnahmen und Überflutungen wurden jedoch nur für den Oberrhein berücksichtigt, da für die weiteren Berechnungen die Ergebnisse bei Andernach maßgeblich sind. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die berechneten Systemzustände. Die berücksichtigten Rückhaltemaßnahmen sind der Tabelle 2-6 zu entnehmen.

Tabelle 3-1: Berechnete Systemzustände am Oberrhein.

Systemzustand Oberrhein	Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein	Überflutungen am Oberrhein
OR-2002 ohne	Zustand 2002	ohne
OR-2002 mit	Zustand 2002	mit
OR-2020 mit	Zustand 2020	mit

3.2 Auswahl geeigneter Ganglinien

Für die nähere Untersuchung der Abflusskapazität am Niederrhein, möglicher Überflutungen am Niederrhein bei deren Überschreitung sowie der Wirkung von wasserstandsvermindernden Maßnahmen wurden in einem nächsten Schritt aus den 16 extremsten Ganglinien acht ausgewählt, die die folgenden Kriterien erfüllen:

1. Zur Untersuchung der Auswirkungen von Überflutungen als Folge von Deichversagen werden Abflussganglinien benötigt, bei denen eine oder mehrere Hochwasserschutzanlagen am Niederrhein überströmt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird immer davon ausgegangen, dass eine Hochwasserschutzanlage nur dann versagt, wenn sie überströmt wird. Andere Versagensmechanismen werden nicht berücksichtigt.
2. Zur Bestimmung der Abflusskapazität (welcher Abfluss kann noch abgeleitet werden, ohne dass es zum Überströmen eines Deiches kommt) werden Ganglinien benötigt, deren Scheitelwerte zwischen dem Niveau des Bemessungswasserstandes und dem Überströmungsniveau liegen.
3. Zur Bestimmung der Abflusskapazität sind darüber hinaus Ganglinien nötig, die etwas unterhalb des Bemessungsniveaus liegen.
4. Zur Bestimmung der Wirkung der geplanten und der seit 1995 bereits fertiggestellten Maßnahmen zur Hochwasserverminderung sind schließlich noch Ganglinien nötig, deren Abflussscheitel im Wirkungsbereich dieser Maßnahmen liegen.
5. Insgesamt sollten die Ganglinien das gesamte Spektrum an Scheitelwerten zwischen dem historischen Hochwasser 1995 (nach dem Hochwasser 1925/26 das höchste Hochwasser am Niederrhein seit 1901) und dem höchsten der 16 generierten Hochwasser umfassen.

Bei der Wahl der Abflussganglinien wurden deshalb die heutigen und zukünftigen Bemessungsabflüsse herangezogen und auf ihrer Grundlage die Abflusskapazitäten global abgeschätzt (Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5). Darüber hinaus wurde der aus den Planungsunterlagen abgeschätzte Wirkungsbereich der wasserstandsvermindernden Maßnahmen berücksichtigt (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Der zur Wahl der Ganglinien angenommene Wirkungsbereich der wasserstandsreduzierenden Maßnahmen.

Gewässerabschnitt	Maßnahmen	Zuordnung zu Pegel	Wirkungsbereich [m ³ /s] ¹⁾	
			Untergrenze	Obergrenze
Niederrhein	Köln-Langel	Köln	10700	11000
	Köln-Worringen	Köln	9700	10000
	Monheim	Köln	<i>5700</i>	<i>>5700</i>
	Itter-Himmelgeist	Düsseldorf	<i>6200</i>	<i>>6200</i>
	Ilvericher Bruch	Düsseldorf	11000	12000
	Mündelheim	Ruhrort	<i>5000</i>	<i>>5000</i>
	Orsoy	Wesel	<i>3800</i>	<i>>3800</i>
	Bislicher Insel	Wesel	<i>9000</i>	<i>>9000</i>
	Lohrwardt	Rees	10000	11000
	Griether Busch	Rees	<i>10000</i>	<i>> 10000</i>
Boven-Rijn/Waal	Bylerward	Lobith	10400	12200
	Rijnstrangen	Lobith	12200	16200
	Ooijpolder	Lobith	14000	15000

¹⁾ kursive und linksbündig gedruckte Zahlen sind Wirkungsbereiche von Maßnahmen wie z.B. Deichrückverlegungen, durchströmte Poldergebiete etc., für die keine Obergrenze angegeben werden kann.

3.3 Überflutungen am Niederrhein

3.3.1 2D-Modellierung von Überflutungen am Niederrhein

Abflüsse, die die Abflusskapazität im Rhein überschreiten, können an einem Punkt oder mehreren Stellen Überflutungen verursachen. Diesbezüglich stellen sich die folgenden Fragen:

- Wo liegen die kritischsten Punkte möglichen Versagens von Hochwasserschutzanlagen entlang des Niederrheins und in Gelderland als Folge von Überströmungen, möglicherweise mit Deichbruch als Folgeerscheinung?
- Welche Gebiete werden dabei unter Wasser gesetzt, wie schnell geschieht dies und wie tief steht das Wasser?
- Wie strömt das Wasser hinter den Deichen?
- Wie viel Wasser strömt aus dem Fluss in das Gebiet hinter dem Deich?
- Strömt das Wasser auch wieder zurück und wenn ja, wo und wie viel?
- Welche Auswirkung hat dies auf den Abfluss im Rhein?

Deshalb wurde bei der Provinz Gelderland ein zweidimensionales Überflutungsmodell für den Niederrhein und die niederländischen Rheinarme ab Rhein-km 642 (12 km oberhalb von Bonn) bis Brummen an der IJssel (IJssel-km 918), Wehr Driel im Nederrijn (Nederrijn-km 891) und Ewijk an der Waal (Waal-km 893) erstellt (Abbildung 3-2). Im Modell werden die Nebenflüsse Sieg, Wupper, Erft, Ruhr, Emscher, Lippe und Oude IJssel berücksichtigt. Das Modell basiert auf einem 100 m X 100 m Raster. Dieses Raster stellt die Geländehöhe dar. Auch Linienelemente wie Deiche, Hochwassermauern, erhöhte Straßen etc. müssen in dieses Raster so eingebaut werden, dass ihre Wirkung auf das Strömungsverhalten gut wiedergegeben wird. Ausführliche Informationen finden sich bei Gudden (2004) und Van Mierlo et al. (2003).

Bei den Überflutungsberechnungen mit Delft-FLS wurde prinzipiell von zwei Systemzuständen ausgegangen: Zustand 1995 und Zustand 2020. Sie sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Systemzustände am Niederrhein zur Berechnung der Überflutungen.

Systemzustand Niederrhein	Flussgeometrie und Rückhaltemaßnahmen am Niederrhein	Deichhöhen
1995	Zustand 1995 ¹⁾	Zustand 2002
2020	Zustand 1995	Zustand 2020 ²⁾

¹⁾ Identisch mit Zustand 2002 ohne die im Jahre 2002 bereits realisierten wasserstandsvermindernden Maßnahmen am Niederrhein (vgl. auch Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5).

²⁾ Für den Zustand 2020 wurden nur die Deichhöhen aus der Datenbank in das Modell eingebaut, die höher bzw. gleich denen im Zustand 2002 sind. sind die Werte für Zustand 2020 niedriger als für 2002, wurden die Werte für den Zustand 2002 auch für 2020 genommen. Nachträgliche Testberechnungen mit den für den Zustand 2020 in der Datenbank angegebenen Deichhöhen ergaben, dass dies keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatte (mündliche Mitteilung Gudden, Provinz Gelderland im April 2004).

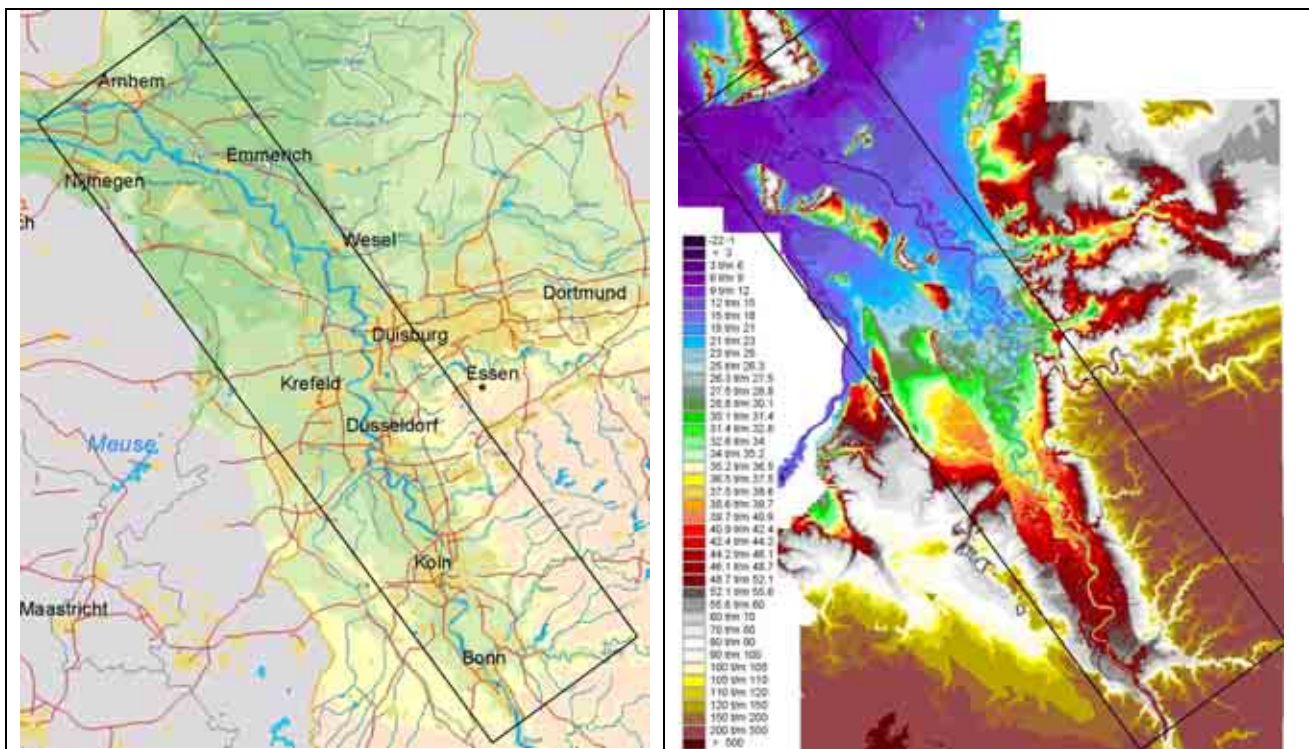


Abbildung 3-2: 2D-Überflutungsmodell Delft-FLS, Lage und Höhenmodell (aus Gudden, 2004).

Zur Durchführung der Berechnungen wurden die zwei Abflussganglinien von der BfG ausgesucht, die die höchsten Scheitelabflüsse bei Andernach für den Systemzustand 2002 mit Deichüberströmen am Oberrhein (OR-2002 mit) aufwies. Dies waren auch die zwei größten Hochwasser bei Lobith. Mit Hilfe dieser beiden Ganglinien HW158mitDueb und HW824mitDueb wurden Berechnungen für die Systemzustände 1995 und 2020 am Niederrhein durchgeführt (vergleiche hierzu auch Tabelle 3-4). Dabei mussten aus technischen Gründen die Berechnungen zunächst unter der Annahme erfolgen, dass alle Deiche nur überströmt werden also nicht brechen. Danach musste sukzessive an den Stellen, an denen es zum Überströmen der Deiche kommt ein Deichbruch initiiert werden. An anderen Hochwasserschutzeinrichtungen (v.a. Hochwassermauern) und hochliegende Gebiete wurde immer von einem Überströmen ausgegangen.

Ein Deichbruch wird in Delft-FLS wie folgt definiert:

- Ist der Wasserstand im Fluss höher oder gleich der Deichhöhe, dann bricht der Deich.
- Zu Beginn des Deichbruchs ist die Deichbruchstelle 35 m breit.
- Innerhalb von zwei Stunden senkt sich zunächst nur die Schwellenhöhe der Deichbruchstelle von der Deichkronenhöhe bis auf die lokale Geländehöhe ab.
- Danach erhöht sich die Breschenbreite innerhalb von 28 Stunden von 35 m auf 200 m nach der folgenden Rechenvorschrift: Breschenbreite [m] = $44.65 \cdot t^{0.45}$. t ist hierbei die Zeit in Stunden gezählt ab dem Zeitpunkt, an dem die Schwellenhöhe auf lokaler Geländehöhe angelangt war.

Darüber hinaus wurden auch Berechnungen mit der Ganglinie HW158 ohne Deichüberströmen am Oberrhein (HW158ohneDueb) und mit der historischen Hochwasserwelle von 1995 (MET95) durchgeführt. Einen Überblick gibt Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Szenarien der 2D-Überflutungsberechnungen Niederrhein.

Szenario			Durchgeführte Berechnungen 2D Delft-FLS				
2D Delft-FLS		1D SOBEK/DSS	Hochwasserganglinie			code Delft-FLS	
Name	Erläuterung		Name	Name	Erläuterung		Name
	Systemzustand Niederrhein	DÜ/DB ¹⁾			Systemzustand Oberrhein	HW-Ganglinie	
1995_DB	1995	DB	1995_M	HW158mit Dueb	OR-2002 mit	HW158	N49
				HW824 mitDueb	OR-2002 mit	HW824	P29
			---	<i>HW158 ohneDueb</i>	<i>OR-2002 ohne</i>	<i>HW158</i>	<i>M79</i>
2020_DB	2020	DB	2020_M	HW158 mitDueb	OR-2002 mit	HW158	N32
				HW824 mitDueb	OR-2002 mit	HW824	P32
			---	<i>HW158 ohneDueb</i>	<i>OR-2002 ohne</i>	<i>HW158</i>	<i>M52</i>
1995_DÜ	1995	DÜ	---	HW158 mitDueb	OR-2002 mit	HW158	N09
				HW824 mitDueb	OR-2002 mit	HW824	P09
				MET95 mitDueb	OR-2002 mit	HW1995	Z09
				<i>HW158 ohneDueb</i>	<i>OR-2002 ohne</i>	<i>HW158</i>	<i>M09</i>
2020_DÜ	2020	DÜ	---	HW158 mitDueb	OR-2002 mit	HW158	N02
				HW824 mitDueb	OR-2002 mit	HW824	P02
				<i>HW158 ohneDueb</i>	<i>OR-2002 ohne</i>	<i>HW158</i>	<i>M02</i>
¹⁾ DÜ = mit Deichüberströmen am Niederrhein DB = mit Deichbruch am Niederrhein				fett = realistische Szenarien kursiv = Szenarien mit noch extremeren Abflüssen mitDueb bzw. ohneDueb = mit bzw. ohne Deichüberströmen am Oberrhein (vgl. Tabelle 3-1)			

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Berechnungen wurde darüber hinaus das Gebiet hinter den Deichen für SOBEK und das DSS schematisiert. Dies ermöglichte schließlich eine gekoppelte Modellierung von Deichüberströmen/Deichbruch und Wellenablauf unter Berücksichtigung von wasserstandsvermindernden Maßnahmen. Weitere Details finden sich bei Gudden (2004).

3.3.2 Darstellung der Überflutungen am Niederrhein im 1D-Modell (Kopplung 1D-SOBEK/DSS-Modell mit 2D-Delft-FLS-Modell)

Das SOBEK-Modell (und damit auch das DSS) beschreibt nur den Fluss und sein Vorland zwischen den Deichen. In der vorliegenden Untersuchung sollte jedoch die Wirkung von Rückhaltemaßnahmen untersucht werden bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Überflutungen des Hinterlandes. Deshalb wurde die hydraulische Charakteristik der Deichüberströmungen bzw. Deichbrüche aus

der 2D-Überflutungsberechnung quantifiziert und auf das 1D-Modell übertragen. Dabei wird das Gebiet hinter den Deichen als Retentionsraum betrachtet, der über eine Überlaufschwelle gefüllt und entleert wird. Schwellenhöhe und -länge werden so festgelegt und zeitlich verändert, dass die mit SOBEK berechnete Zufluss- bzw. Abflussganglinie mit der entsprechenden Ganglinie in Delft-FLS übereinstimmt. Auch der zeitliche Verlauf des Wasserstandes und des gespeicherten Wasservolumens im Rückhalteraum sollte in beiden Modellen möglichst gleich sein.

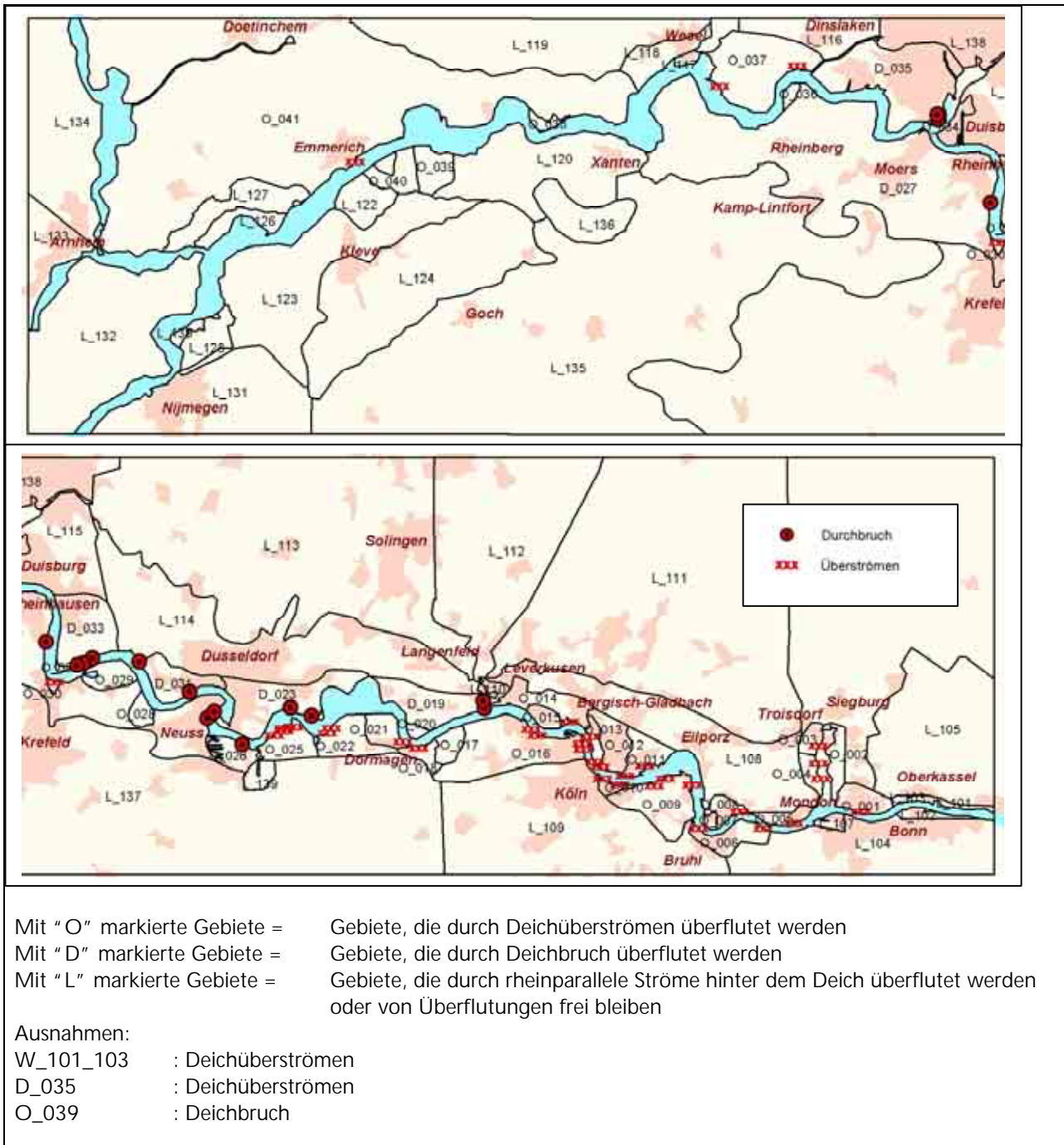


Abbildung 3-3: Gliederung der Überflutungsgebiete hinter den Deichen und Punkte, an denen Überströmen der Hochwasserschutzeinrichtungen bzw. Deichbruch berechnet wurden (nach Gudden, 2004).

Deshalb mussten zunächst in Delft-FLS sowohl für den heutigen Zustand der Deiche (1995/2002) als auch für den zukünftigen Zustand (2020) die Stellen bestimmt werden, wo ein Überströmen der Hochwasserschutzanlage, ggf. auch ein Deichbruch stattfindet. Jeder dieser Stellen wurde ein Rückhaltebecken zugeordnet, dessen Volumen ebenfalls auf der Grundlage der Delft-FLS-Berechnungen festgelegt wurde. Für Gebiete hinter den Deichen, die in der Überflutungssituation stark durchströmt werden, wurde dieses Durchströmen in SOBEK durch zusätzlichen seitlichen Wasserentzug bzw. seitliche Wasserrückführung simuliert. Einige Gebiete, die für die wasserstandsvermindernden Maßnahmen gebraucht werden, wurden ausgenommen. Abbildung 3-3 gibt eine Übersicht über die Gebietseinteilung sowie die Punkte, an denen Überströmen der Hochwasserschutzanlagen bzw. Deichbruch stattfindet. Weitere Details zur Darstellung der Überflutungen im 1D-Modell sind der Anlage 3- 1 zu entnehmen sowie den Ausführungen von Van der Veen et al. (2004a).

3.4 1D-Modellierung des Wellenablaufs im Studiengebiet unter Berücksichtigung von Überflutungen und Hochwasser reduzierenden Maßnahmen

Eine der Kernfragen dieser Untersuchung ist die Frage nach der Wirkung Hochwasser reduzierender Maßnahmen. Da eine Vielzahl von Varianten berechnet werden sollte, wurden die Berechnungen mit dem Decision Support System (DSS) Large Rivers durchgeführt. Dieses DSS ist auf dem Rechenkern des 1D-Modells SOBEK basiert. Kennzeichnend für das DSS ist eine andere Benutzeroberfläche, die ein besseres Management der Berechnungsszenarien und der Ergebnisse sowie deren Visualisierung ermöglicht.

Das Modell erfasst den Flussschlauch und die Vorländer des Rheins bis zu den Deichen und deckt den Rhein ab von Andernach bis Lobith und die niederländischen Rheinarme bis zur Mündung der IJssel in das IJsselmeer, Krimpen aan de Lek am Lek und Werkendam an der Waal / Boven - Merwede. Die Berechnungen werden auf der Basis von Querprofilen durchgeführt, die für die Strecke Andernach-Lobith im 1000 m und für die Rheinarme im 500 m Abstand aneinander gereiht sind. Es berücksichtigt die Nebenflüsse Ahr, Sieg, Wupper, Erft, Ruhr, Emscher, Lippe, Oude IJssel, Twentekanaal und mehrere kleinere Nebenflüsse sowie den Wasseraustausch zwischen Fluss- und Grundwasser.

In Tabelle 3-5 ist ein Überblick über die berechneten Szenarien wiedergegeben. Alle Szenarien treten einmal als Szenario ohne und einmal mit Überflutungen am Niederrhein auf, wobei davon ausgegangen wird, dass ein Deich bricht, wenn er überströmt wird. Alle anderen Typen von Hochwasserschutzanlagen bleiben stehen. Am Szenariennamen ist dies am angehängten „_M“ bzw. „_O“ sichtbar.

Im Projekt wird mit drei Bezugsjahren gearbeitet: *Bezugsjahr 1995* (als Referenzsituation Aktionsplan Hochwasser der IKSR), *Bezugsjahr 2002* (den Zustand 2002 repräsentierend) und *Bezugsjahr 2020* (den Zustand 2020 repräsentierend).

Dem *Bezugsjahr 1995* sind nur die Szenarien 1995_M und 1995_O zugeordnet. In diesem Szenario sind sowohl in NRW als auch in den Niederlanden keine wasserstandsvermindernden Maßnahmen realisiert, der Zustand zwischen den Deichen entspricht dem des Jahres 1995. Als

Deichhöhen wurden jedoch diejenigen des Jahres 2002 angenommen. Dieses Szenario kann als Referenzsituation herangezogen werden, wenn es darum geht zum Beispiel im Rahmen des Aktionsplans Hochwasser der IKSR Änderungen seit 1995 festzustellen. Veränderungen in der Deichhöhe, die zwischen 1995 und 2002 vorgenommen wurden, werden dabei jedoch vernachlässigt.

Dem *Bezugsjahr 2002*, das den Zustand 2002 repräsentiert, werden die Szenarien 2002_NRW_M und 2002_NRW_O zugeordnet. Hier sind alle wasserstandsvermindernden Maßnahmen in NRW sowie die Deichhöhen wiedergegeben, die bis heute (2002) realisiert sind. Da in den Niederlanden bis heute keine wasserstandsvermindernden Maßnahmen durchgeführt werden, finden sich in diesem Szenario keine Maßnahmen in den Niederlanden. Die Szenarien 1995_M bzw. 1995_O können hier als Referenzszenarien herangezogen werden, wenn es darum geht die Wirkung der Maßnahmen in NRW zu untersuchen, weil hier bereits eine Deichhöhe im Zustand des Jahres 2002 angenommen wird.

Das *Bezugsjahr 2020* soll einen möglichen Zustand im Jahr 2020 repräsentieren. Da es sich hier jedoch um einen zukünftigen Zeitpunkt handelt, wurde mit mehreren Szenarien gearbeitet:

- den Szenarien 2020_NRW_NL_M bzw. Szenarien 2020_NRW_NL_ O mit den Maßnahmen, wie sie zur Zeit in NRW und NL geplant sind, und
- den Szenarien 2020_NRWMAX_NL_M bzw. 2020_NRWMAX_NL_O, bei denen in NRW einige der geplanten Maßnahmen in ihrer Wirkung bezüglich Wasserständen so verändert werden, dass sie effektiver sind im Bereich der Bemessungswasserstände.

In allen genannten Szenarien werden die niederländischen Maßnahmen, die im Rahmen des Projektes „Raum für den Fluss“ geplant sind, integral in ihrer wasserstandsvermindernden Wirkung berücksichtigt. Als Deichhöhe wird die für 2020 geplante Deichhöhe angenommen.

Um auch eine Aussage über die Wirkung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen treffen zu können, wurden darüber hinaus noch die Szenarien 2020_M bzw. 2020_O (jeweils mit und ohne Deichüberströmen/Deichbruch) berechnet. Zur Bestimmung der Veränderungen seit 1995 sollte jedoch auch hier das Szenario 1995_M bzw. 1995_O herangezogen werden.

Zur Untersuchung, welche Wirkungen erzielt werden, wenn nur ein Teil der wasserstandsvermindernden Maßnahmen eingesetzt wird, (nur Maßnahmen in den Niederlanden, nur Maßnahmen in Deutschland) wurden die Szenarien 2020_NRW_M bzw. 2020_NRW_O, 2020_NL_M bzw. 2020_NL_O sowie 2020_NRWMAX_M bzw. 2020_NRWMAX_O berechnet.

Die PLUS-Szenarien geben Einsicht in die Wirkung von zusätzlichen Retentionspoldern im grenznahen Gebiet auf niederländischer Seite.

Alle Berechnungen mit den PLUS-Szenarien sowie die mit den Teilmaßnahmen haben rein analytischen Charakter und werden auch im Folgenden nur als solche betrachtet.

Alle Berechnungen erfolgten mit den neun ausgewählten Hochwasserereignissen für Andernach und die Nebenflüsse des Niederrheins (vgl. Kapitel 3.2), die mit Hilfe des Niederschlagsgenerators erzeugt und bei denen Deichüberströmen am Oberrhein berücksichtigt worden waren.

Tabelle 3-5 gibt einen Überblick über die mit dem DSS berechneten Szenarien.

Tabelle 3-5: Szenarien der Berechnungen DSS (bzw. 1D-SOBEK).

			1995_O	1995_M	1995_PLUS_O	1995_PLUS_M	2002_NRW_O	2002_NRW_M	2002_NRW_PLUS_O	2002_NRW_PLUS_M	2020_O	2020_M	2020_NRW_NL_O	2020_NRW_NL_M	2020_NRW_O	2020_NRW_M	2020_NL_O	2020_NL_M	2020_NRW_NL_PLUS_O	2020_NRW_NL_PLUS_M	2020_NRWMAX_NL_O	2020_NRWMAX_NL_M	2020_NRWMAX_O	2020_NRWMAX_M		
Deichhöhe (falls mit Deichüberströmen)			2002										2020													
Systemzustand Oberrhein			OR-2002mit										OR-2020mit													
Wasserstandsvermindernde Maßnahme in NRW																										
Name	Planungsvariante	Typ																								
Köln-Langel	PFV ¹⁾	RP UD				X	X	X	X				X	X	X	X			X	X	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾		
Worringer Bruch	PV-V3 ¹⁾	RP ST											X	X	X	X			X	X	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾		
Monheim	AV	DRV LD				X	X	X	X				X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		
Itter-Himmelgeist	PV-2A	DRV											X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		
Ilvericher Bruch	PV-B2	RP ST											X	X	X	X			X	X	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾		
Mündelheim	PV-V4	DRV				X	X	X	X				X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		
Orsoy Land	AV	DRV LD				X	X	X	X				X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		
Bislicher Insel	AV	RP U	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Lohrwardt	PFV	RP UD				X	X	X	X				X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		
Griether Busch	PV	RP U											X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		
Bylerward	PV-B3	RP ST											X	X	X	X			X	X	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾		
Orsoyer Bogen ¹⁾	--	RP ST																			X	X	X	X		
Brücke bei Wesel ³⁾	--	E																			X	X	X	X		
Bislicher Insel 2020 ³⁾	--	E																			X	X	X	X		
Reeser Schanz ⁴⁾	--	FM																			X	X	X	X		
Wasserstandsvermindernde Maßnahme in NL																										
Wirkung der Maßnahmen PKB Raum für den Fluss													X	X					X	X	X	X	X	X		
Zusätzliche Wasserstandsvermindernde Maßnahme in NL																										
Ooijpolder					X	X			X	X									X	X						
Rijnstrangen					X	X			X	X									X	X						
PV: Planungsvariante PVV: Planfeststellungsvariante AV: Ausführungsvariante DRV: Deichrückverlegung DRV LD: Deichrückverlegung mit Leitdeich E: Entfernung hydraulischer Engpässe FM: Flutmulde VL: Vorlandvertiefung RP ST: Retentionspolder gesteuert RP U: Retentionspolder ungesteuert RP UD: RP U im oberen Abflussbereich durchströmt																										
1) neuste Unterlagen vom STUA Köln berücksichtigt 2) Zu- und Ablaufbauwerk im Modell so verändert, dass die Maßnahme auf den Bemessungsabfluss abgestimmt ist. 3) zusätzliche geplante Maßnahme zur Entfernung von hydraulischen Engpässen 4) zusätzlicher, bisher noch nicht in Planung genommener Retentionspolder																										

Weitere Details finden sich bei Mehlig (2004) und Van der Veen et al. (2004a und 2004b).

4 Extreme Abflüsse aus dem Rheineinzugsgebiet

4.1 Extreme Niederschläge führen zu extremen Abflüssen

Unter Verwendung eines stochastischen Niederschlagsgenerators wurden extreme meteorologische Situationen erzeugt. Das zu Grunde liegende Prinzip ist das *"Nearest-Neighbour Resampling"*: Die historischen Tage mit den zugehörigen gemessenen Niederschlags- und Temperaturwerten werden in einer neuen zeitlichen Abfolge aneinandergesetzt, wobei jedoch nur solche Tage auf einen Tag folgen können, die in der historischen Reihe auf einen ähnlichen Tag gefolgt sind. Ein historischer Tag kann hierbei mehrmals vorkommen, so dass eine beliebig lange Reihe erzeugt werden kann. Eingangsdaten für den Rhein-Niederschlagsgenerator sind Tageswerte von Temperatur und Niederschlag für den Zeitraum 1961-1995 an 36 über das Rheingebiet verteilten Stationen. Das Ergebnis ist eine realistische Abfolge von historischen Tagen/Daten. Da für diese Tage auch weitere Informationen (z.B. Gebietsniederschläge und Daten weiterer Stationen) vorliegen, kann man auch diese Werte in derselben Abfolge anordnen.

Wie aus Abbildung 4-1 ersichtlich wird, stimmen die statistischen Eigenschaften der simulierten Zeitreihen mit denen der historischen Reihe sehr gut überein. Bedingt durch die Methode können keine höheren Niederschläge für einen einzelnen Tag simuliert werden, als in der historischen Reihe aufgetreten sind. Allerdings treten in einer Simulation für 1000 Jahre durchaus deutlich höhere 10-Tages-Summen als in den Eingangsdaten auf.

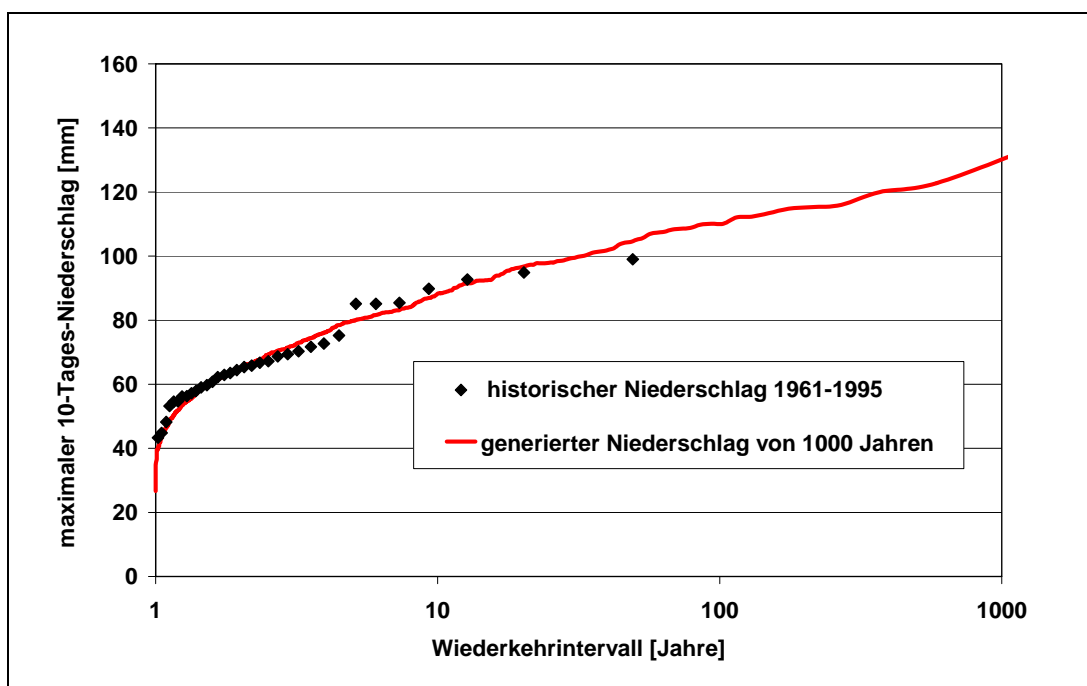


Abbildung 4-1: Häufigkeitsverteilung der maximalen 10-Tagessummen des Winterniederschlages für gemessene und generierte Niederschläge (Mittelwert der Niederschläge von 34 Stationen im Rheingebiet) (aus: Eberle et al., 2004).

Basierend auf den durch den Niederschlagsgenerator erzeugten meteorologischen Größen wurden 1000 Jahre Abfluss für die Rheinebenflüsse und wichtige Pegel im Rhein berechnet. Abbildung 4-2 zeigt die berechneten Jahresmaxima für den Pegel Andernach. Als Vergleichsgröße ist der größte gemessene Abfluss der Zeitreihe 1931 bis 1997 eingezeichnet, der am 23.12.1993 auftrat.

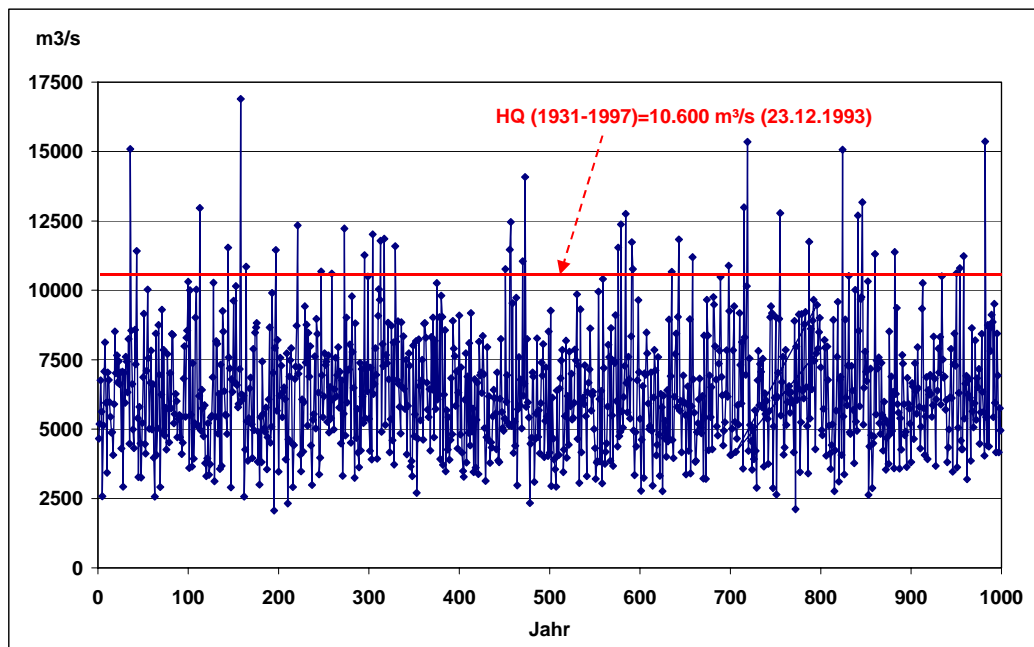


Abbildung 4-2: Jahresmaximum von tausend Jahre simuliertem Abfluss am Pegel Andernach/Rhein.

4.2 Wirkung von Deichüberströmen und Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein

Auf dieser Datenbasis wurden die 16 Ganglinien ausgewählt, die bei Andernach die höchsten Abflussscheitelwerte aufwiesen. Für diese Ganglinien wurden die Berechnungen noch einmal mit den Wellenablaufmodellen SYNHP und SOBEK durchgeführt, wobei die mit dem Niederschlag-Abflussmodell berechneten Ganglinien für die Nebenflüsse sowie den Rhein bei Basel als Inputgrößen dienten. Dabei wurden die drei in Tabelle 3-1 dargestellten Systemzustände (Zustand 2002 ohne Deichüberströmen, Zustand 2002 mit Deichüberströmen, und 2020 mit Deichüberströmen) berechnet. Die berechneten Scheitelwerte finden sich in Tabelle 4-1. Hieraus wird deutlich, dass ohne Berücksichtigung von Deichüberströmen an Ober- und Niederrhein ein Abfluss von 17800 m³/s bei Andernach bzw. 19200 m³/s bei Lobith möglich erscheint (HW158). Das heißt, prinzipiell sind im Rheineinzugsgebiet meteorologisch-hydrologische Situationen denkbar, die zu den genannten extremen Abflüssen führen können.

Tabelle 4-1: Abflussscheitelwerte der 16 höchsten generierten Hochwasser. Alle Berechnungen beinhalten kein Deichüberströmen am Niederrhein.

Modell- hochwasser	Scheitelwerte hydrologisch/hydraulische Modellierung BfG ¹⁾ [m ³ /s]					
	Zustand OR-2002 ohne		Zustand OR-2002 mit		Zustand OR-2020 mit	
	Andernach	Lobith	Andernach	Lobith	Andernach	Lobith
HW036	15956	17703	14406	15998	14416	16057
HW113	14430	15283	12409	13620	12402	13607
HW158	17822	19200	15323	16706	15361	16766
HW221	13123	14358	12003	13338	12007	13343
HW329	12362	14177	12230	14083	12226	14072
HW457	14157	15033	11442	12725	11450	12727
HW473	15201	15640	12614	13346	12479	13055
HW579	13627	15258	12085	13990	12083	13985
HW584	13046	13876	12067	13057	12071	13061
HW715	14749	15715	12086	13537	12077	13537
HW719	16135	16754	13883	14658	13888	14664
HW755	13116	14235	12435	13739	12436	13738
HW824	15757	17266	15121	16627	15121	16624
HW841	13677	14906	12412	13886	12410	13884
HW846	14176	15433	12413	14131	12414	14138
HW982	16022	17175	14049	14965	14036	14952

¹⁾ Für Lobith können die durch die BfG berechneten Ergebnisse von denen abweichen, die später mit den anderen Modellen (Delft-FLS, SOBEK/DSS) berechnet wurden (vgl. hierzu Kapitel 11)

Berücksichtigt man mögliche Deichüberströmungen und gesteuerte Rückhaltmaßnahmen am Oberrhein, aber keine Deichüberströmungen am Niederrhein, so reduzieren sich die Scheitelabflüsse für den heutigen Zustand 2002 z.T. deutlich auf rund 15300 m³/s bei Andernach bzw. 16700 m³/s bei Lobith. In Prozenten ausgedrückt schwankt die Reduktion der Scheitelabflüsse je nach Hochwassergenese und Hochwasserhöhe zwischen 1 und 19% (Tabelle 4-2). Dies ist vor allem auf das Deichüberströmen zurückzuführen. Die Wirkung der Rückhaltmaßnahmen am Oberrhein dagegen ist gering. Diese werden eingesetzt, bevor es zum Deichüberströmen kommt, und sind in den meisten Fällen bereits gefüllt, wenn der Abflussscheitel die Rückhaltmaßnahme passiert bzw. wenn es zum Deichüberströmen kommt. Darüber hinaus ist das durch die Überflutungen eingenommene Speichervolumen deutlich höher als das der Rückhalteräume.

Tabelle 4-2: Wirkung von Deichüberströmen und Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein auf die Abflussscheitel der extremen Hochwasser bei Andernach und Lobith. Alle Berechnungen beinhalten kein Deichüberströmen am Niederrhein.

Modell- hochwasser	Wirkung Deichüberströmen Oberrhein ¹⁾ (Zustand OR-2002 mit- Zustand OR-2002 ohne)				Wirkung Maßnahmen 2002 – 2020 ¹⁾ (Zustand OR-2002 mit - Zustand OR-2020 mit)			
	Andernach [m ³ /s]	Andernach [%]	Lobith [m ³ /s]	Lobith [%]	Andernach [m ³ /s]	Andernach [%]	Lobith [m ³ /s]	Lobith [%]
HW036	-1550	-10	-1705	-10	-10	-0,1	-59	-0,4
HW113	-2022	-14	-1663	-11	7	0,1	13	0,1
HW158	-2498	-14	-2494	-13	-37	-0,2	-60	-0,4
HW221	-1120	-9	-1020	-7	-3	0,0	-6	0,0
HW329	-132	-1	-94	-1	4	0,0	11	0,1
HW457	-2715	-19	-2309	-15	-9	-0,1	-2	0,0
HW473	-2588	-17	-2294	-15	135	1,1	291	2,2
HW579	-1542	-11	-1268	-8	3	0,0	5	0,0
HW584	-979	-8	-820	-6	-4	0,0	-5	0,0
HW715	-2663	-18	-2178	-14	9	0,1	0	0,0
HW719	-2252	-14	-2096	-13	-5	0,0	-6	0,0
HW755	-680	-5	-497	-3	-1	0,0	0	0,0
HW824	-636	-4	-638	-4	0	0,0	4	0,0
HW841	-1265	-9	-1020	-7	2	0,0	2	0,0
HW846	-1763	-12	-1302	-8	0	0,0	-7	0,0
HW982	-1973	-12	-2210	-13	13	0,1	13	0,1

¹⁾ Für Lobith können die hier dargestellten, durch die BfG berechneten Ergebnisse von denen abweichen, die später mit den anderen Modellen (Delft-FLS, SOBEK/DSS) berechnet wurden (vgl. hierzu Kapitel 11).

4.3 Auswahl geeigneter Ganglinien

Auf der Basis der in Kapitel 3.2 dargelegten Kriterien wurden acht Ganglinien ausgewählt. Diese sind nach Größe des Scheitelabflusses sortiert in Tabelle 4-3 wiedergegeben. Weitere Ausführungen zur Auswahl der Ganglinien finden sich bei Van der Veen et al. (2004a). Neben den genannten Kriterien (Kapitel 3.2) wird mit den Ganglinien auch ein breites Spektrum an Wellenformen und Hochwassergenesen abgedeckt (Abbildung 4-4). Ausführlicher wird hierauf bei Eberle et al. (2004) eingegangen.

Tabelle 4-3: Ausgewählte Abflussganglinien (aus Van der Veen et al., 2004a). Das Hochwasser MET95 ist das historische Hochwasser Januar 1995.

Modell- hochwasser	OR-2002 mit (Deichüberströmen am Oberrhein, kein Deichüberströmen am Niederrhein)			Kriterium
	Andernach [m ³ /s]	Lobith ¹⁾ [m ³ /s]	Lobith ²⁾ [m ³ /s]	
MET95	10257	11960	11958	5
HW457	11442	12725	12628	4
HW329	12230	13886	13862	3
HW841	12412	14083	13500	3
HW846	12413	14131	13760	3
HW719	13883	14658	14867	2
HW036	14406	15998	15685	2
HW824	15121	16627	16708	1
HW158	15323	16706	16283	5

1) Ergebnisse Berechnungen BfG bis Lobith
2) Ergebnisse Berechnungen mit SOBEK/DSS

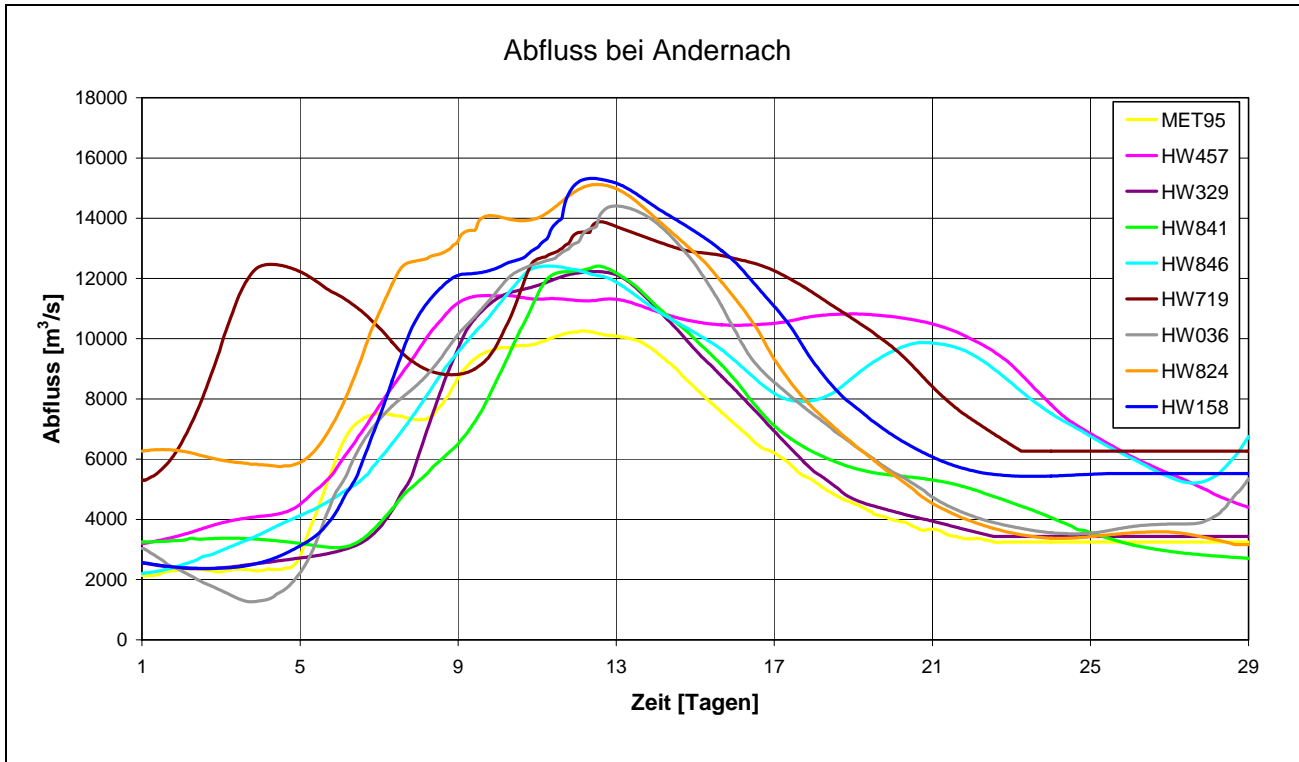


Abbildung 4-3: Wellenformen der ausgewählten Ganglinien bei Andernach (Systemzustand OR-2002 mit).

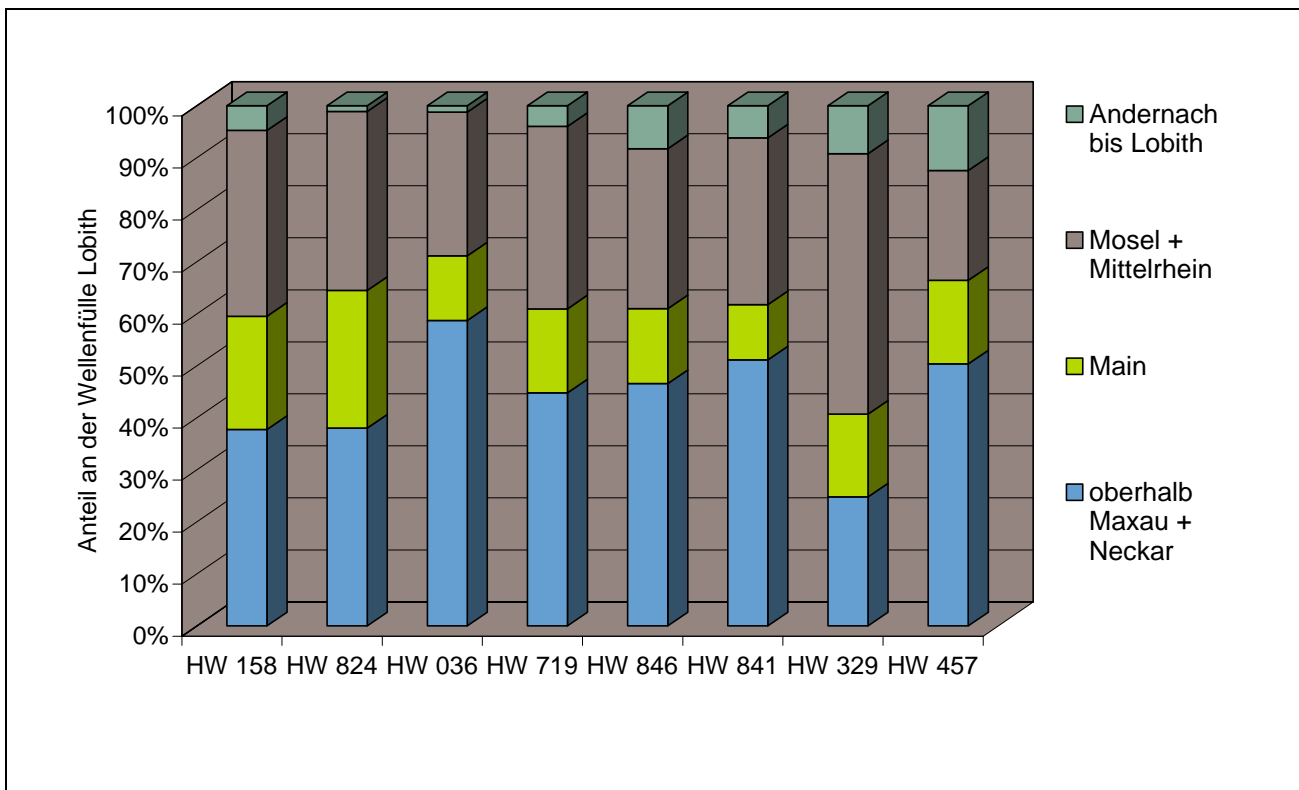


Abbildung 4-4: Genesen der ausgewählten extremen Ereignisse (nach Eberle et al., 2004).

4.4 Wie extrem sind die extremen Hochwasser?

Um eine Aussage dafür zu bekommen, wie hoch die berechneten Hochwasserscheitel im Vergleich zu bisher gehandelten Zahlen sind, wurden die Scheitelwerte den Abflüssen mit den Wiederkehrzeiten 100 Jahre, 200 Jahre, 500 Jahre und 1000 Jahre bzw. 1250 Jahren gegenübergestellt. Abbildung 4-5 zeigt die Ergebnisse sowohl für die Szenarien mit als auch ohne Deichüberströmen am Oberrhein (jedoch jeweils ohne Deichüberströmen/Deichbruch am Niederrhein). Hierbei stellen die Szenarien „ohne Deichüberströmen am Oberrhein und ohne Deichüberströmen am Niederrhein“ theoretische Szenarien dar. Die Szenarien „mit Deichüberströmen am Oberrhein und ohne Deichüberströmen am Niederrhein“ dagegen stellen für den Oberrhein und damit für die Ergebnisse bei Andernach realistische Szenarien, für den Niederrhein und damit für die Ergebnisse bei Lobith theoretische Szenarien dar. Sie können jedoch dazu herangezogen werden, einen Eindruck zu bekommen, welche Auswirkungen nur die Überflutungen am Oberrhein haben.

Insgesamt wird ein Dilemma deutlich, wenn es darum geht diese Scheitelwerte eindeutig einer Jährlichkeit zuzuordnen. Gilt die Jährlichkeit für das Szenario ohne Deichüberströmen, d.h. bezieht sie sich auf die Wiederkehrwahrscheinlichkeit des Ereignisses, wenn man es aus rein hydrologischen Gesichtspunkten (eben ohne Deichüberströmen) betrachtet, oder muss die Jährlichkeit auf den Scheitelwert für das Szenario mit Deichüberströmen bezogen werden? An dieser Stelle stellt sich die Frage, welche Situationen die Hochwasserstatistik eigentlich widerspiegelt. Hochwasserstatistiken sind auf gemessenen Wasserständen/Abflüssen der letzten 50 bis 100 Jahre basiert, wobei in der Regel keine Überströmungen der Banndeiche stattgefunden haben. Zur Bestimmung von Abflüssen mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 1/200, 1/500, 1/1000 oder noch kleiner muss in einen extremen Bereich extrapoliert werden, bei dem nicht mehr bekannt ist, was im Einzugsgebiet hydrologisch und hydraulisch wirklich passiert. Zumindest ist davon auszugehen (und wird durch die vorliegende Untersuchung gestützt), dass Phänomene wie Deichüberströmungen bei diesen extremen Abflüssen stattfinden und große Wirkungen auf die Abflussscheitelwerte haben.

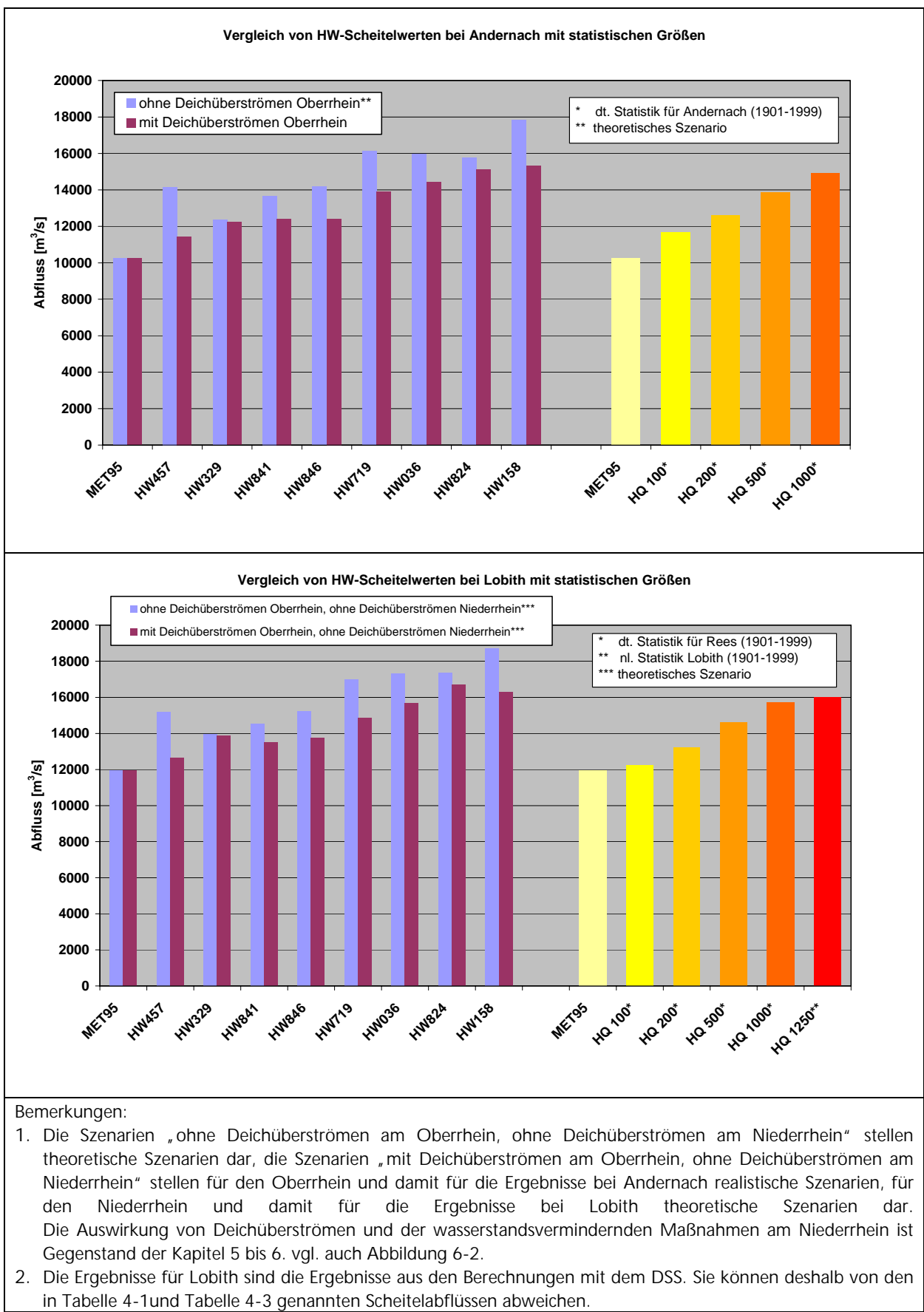


Abbildung 4-5: Vergleich von Hochwasserscheitelwerten mit statistischen Größen.

5 Überflutungen am Niederrhein und in Gelderland

5.1 Überflutungsszenarien

Die wesentlichen Aussagen über Überflutungen am Niederrhein und in Gelderland lassen sich auf der Basis der Ergebnisse der Überflutungsberechnungen mit dem 2D-Überflutungsmodell Delft-FLS treffen (vgl. Kapitel 3.3). Hierbei wurde prinzipiell von zwei Systemzuständen ausgegangen (vgl. Tabelle 3-3):

- Zustand 1995, mit der Flussgeometrie aus dem Jahre 1995 (d.h. ohne wasserstandsvermindernde Maßnahmen am Niederrhein) und der Deichhöhe von 2002, und
- Zustand 2020, mit der Flussgeometrie für das Jahr 1995 (d.h. ohne wasserstandsvermindernde Maßnahmen am Niederrhein) und der Deichhöhe von 2020.

D.h. alle Berechnungen mit Delft-FLS sind ohne wasserstandsvermindernde Maßnahmen durchgeführt worden und entsprechen den Szenarien 1995_M bzw. 2020_M der 1D-Berechnungen.

Einen Überblick aller mit Delft-FLS durchgeführten Berechnungen gibt Tabelle 3-4. Hierbei können die Berechnungen für die Szenarien 1995_DB und 2020_DB mit den zwei höchsten Hochwassern HW158 und HW824 jeweils mit Überflutungen am Oberrhein (HW158mitDueb und HW824mitDueb) als realistische Szenarien eingestuft werden (Tabelle 3-4). Nur hierauf soll in diesem Kapitel (Kapitel 5) ausführlich eingegangen werden.

Erkenntnisse, welche der Gebiete bei den gleichen Szenarien aber bei den anderen Hochwassern durch Überflutungen getroffen werden, können der 1D-Berechnung entnommen werden und sollen ebenfalls in diesem Kapitel (Kapitel 5) dargestellt werden.

Aus den 1D-Berechnungen kann auch entnommen werden, welche Gebiete bei den Szenarien mit Rückhaltemaßnahmen betroffen sind. Auch dies wird Gegenstand der Erläuterungen in Kapitel 5 sein.

Erst zu einem späteren Zeitpunkt soll die Frage diskutiert werden, was geschieht, wenn noch mehr Wasser aus dem Einzugsgebiet des Rheins beispielsweise als Folge von Klimaänderungen oder Veränderungen im Einzugsgebiet, herangeführt wird (Kapitel 9.3).

Der Frage, in wie weit die Ergebnisse beeinflusst werden durch die Annahme, dass Deiche brechen, wenn sie überströmt werden, wird im Kapitel 11.8 nachgegangen.

Eine ausführliche Darstellung der Untersuchungen bezüglich der Überflutungen bei extremen Hochwassern am Niederrhein und in Gelderland findet sich bei Gudden (2004).

5.2 Von den Überflutungen am Niederrhein betroffene Gebiete

5.2.1 Ergebnisse der 2D-Berechnungen

Die wesentlichen Aussagen über Überflutungen am Niederrhein und in Gelderland lassen sich auf der Basis der Ergebnisse der Überflutungsberechnungen mit dem 2D-Überflutungsmodell Delft-FLS treffen. An dieser Stelle soll dies exemplarisch für das Hochwasser HW824 mit Dueb erfolgen, bei dem unter Berücksichtigung von Überflutungen am Niederrhein die höchsten Abflüsse bei Lobith auftreten. Dargelegt werden die Ergebnisse sowohl für den heutigen Zustand (Szenario 1995_DB) als auch für den zukünftigen Zustand (Szenario 2020_DB). Weitere Ausführungen finden sich bei Gudden (2004) und erschließen sich bei der Betrachtung der Überflutungsfilme, die auf Basis der Berechnungen erstellt wurden.

Zur Unterstützung der Textverständlichkeit bietet Abbildung 3-3 eine räumliche Orientierung.

Es wird im folgenden immer von Hochwasserereignissen ausgegangen, bei denen eine Überflutung am Oberrhein berücksichtigt wird.

➤ Situationsbeschreibung am Beispiel HW824 (mit Dueb)

- **Heutige Situation (Szenario 1995_DB)**

Welche Gebiete unter realistischen Annahmen (Überflutungen am Oberrhein, Deichbruch als Folge von Deichüberströmungen am Niederrhein) in der *heutigen Situation* (Szenario 1995_DB) von Überflutungen betroffen sind, zeigt Anlage 4- 1 oben für das HW824. Es wird deutlich, dass vor allem die südlich gelegenen Gebiete rechtsrheinisch bis Düsseldorf und linksrheinisch bis ca. Kamp-Lintfort betroffen sind. Diese Überflutungen werden vor allem durch das Überströmen von Hochuferbereichen und Hochwasserschutzmauern verursacht. Nur in vier Fällen (rechtsrheinisch an der Wuppermündung - Gebiet D_019 - und bei Himmelgeist-Itter oberhalb von Düsseldorf - Gebiet D_023 - sowie linksrheinisch bei Neuß-Gnadental - Gebiet D_026 - und in Heerd-Oberkassel gegenüber von Düsseldorf - Gebiet D_027 -) sind Deiche betroffen, für die in diesem Szenario Deichbruch als Folge von Deichüberströmen angenommen wurde.

Darüber hinaus wird in Emmerich die Hochwassermauer überströmt, so dass das Wasser in Richtung Oude IJssel und IJssel über die deutsch-niederländische Grenze strömt (Gebiet O_041).

- **Zukünftige Situation (Szenario 2020_DB)**

Ein Blick auf Anlage 4- 1 unten zeigt, dass sich auch nach den Deichsanierungsmaßnahmen in NRW an der Überflutungssituation nichts maßgebliches verändert. Lediglich bei Emmerich wird die Hochwassermauer soeben nicht mehr überflutet, so dass auch keine grenzüberschreitenden Überflutungen mehr auftreten.

- **Veränderungen als Folge der Deichsanierungsmaßnahmen**

Detailliertere Informationen über die Veränderungen als Folge der Deichsanierungsmaßnahmen werden auch in Anlage 4- 2 deutlich. Neben einem Wasserstandsunterschied im deutsch-niederländischen Grenzgebiet von bis zu 3 m als Folge der nicht mehr stattfindenden Überflutung in diesem Gebiet, treten die größten Wasserstandsunterschiede linksrheinisch im Gebiet zwischen Köln und Dormagen, bei Dormagen und bei Krefeld sowie rechtsrheinisch bei Düsseldorf auf. In diesen Gebieten können Überflutungen

nicht verhindert werden, die auftretenden maximalen Wassertiefen sind jedoch mit 0,2 bis 1 m in 2020 geringer. Im Wesentlichen sind hierfür die Erhöhungen der Hochwasserschutzanlagen verantwortlich (vgl. Anlage 1- 3 und Anlage 1- 4). In einigen Fällen treten jedoch auch Wasserstandserhöhungen auf. Betroffen sind vor allem der südlichste Teil. Linksrheinisch treten bei Brühl (Gebiet O_006) und rechtsrheinisch bei Köln Niederkassel-Langel (Gebiet O_008) höhere Wasserstände in 2020 auf weil in den stromabwärts gelegenen Teilen dieser Gebiete die Hochwasserschutzanlagen erhöht werden, was dazu führt, dass das Wasser nicht mehr in den Rhein zurückfließen kann und deshalb das Wasser höher aufstaut. Bei Bergisch Gladbach (Gebiet O_013) und bei Leverkusen (Gebiet O_014) treten in 2020 höhere Wasserstände hinter den Deichen auf als in der Situation 1995_DB, weil das auf der anderen Rheinseite liegende Gebiet Köln/Riehl-Worringen (Gebiet O_016) durch Verbesserung des Hochwasserschutzes später und weniger überflutet wird und der daraus resultierende höhere Wasserstand im Rhein zu einer stärkeren Überflutung der Gebiete bei Leverkusen und Bergisch Gladbach (Gebiete O_014 und O_013) führt.

➤ **Situationsbeschreibung am Beispiel HW158 (mitDueb)**

Prinzipiell vergleichbares gilt für HW158 (vgl. Anlage 4- 3 und Anlage 4- 4). Das HW158 hat bei Andernach zwar einen etwas höheren Scheitel als das zuvor genannte HW824, durch seine geringere Fülle sind die Abflussdämpfenden Effekte im Scheitelbereich deutlicher als beim Hochwasser HW824, so dass es für die untere Niederrheinstrecke das zweithöchste im Projekt betrachtete Hochwasser darstellt.

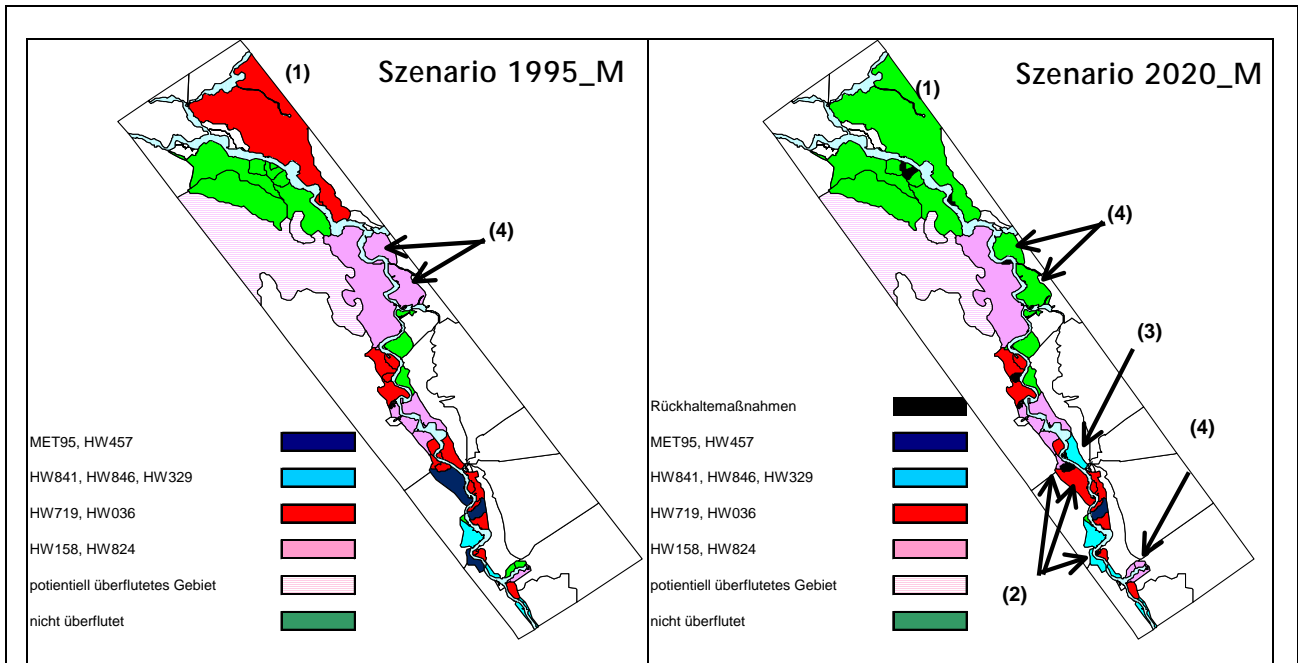
5.2.2 Ergebnisse 1D-Berechnungen

Aus den Ergebnissen der eindimensionalen Berechnungen, bei denen *alle neun ausgewählten Hochwasserereignisse* betrachtet wurden, wird ersichtlich, welche der zur Kopplung der Modelle Delft-FLS und SOBEK/DSS definierten Überflutungsgebiete auch bei den anderen – im Vergleich zu den zuvor genannten HW824 und HW158 meist kleineren - Extremhochwassern betroffen wären (Abbildung 5-1). Hieraus geht hervor, dass beim *Szenario 1995_M*, das heißt bei heutiger Deichhöhe aber ohne Berücksichtigung der wasserstandsvermindernden Maßnahmen, zunächst bei den kleineren Extremhochwassern nur die südlichen Gebiete betroffen sind, und mit größer werdenden Hochwassern weitere Gebiete im mittleren Bereich. Lediglich bei Emmerich (mit (1) markiertes Gebiete in Abbildung 5-1) strömt über die Hochwassermauer bereits beim Hochwasser HW719 Wasser in den dahinter liegenden grenzüberschreitenden Polder.

An dieser Stelle muss jedoch betont werden, dass wenn in der Abbildung 5-1 ein Abschnitt als „von Überflutungen betroffen“ angegeben wird, nicht unbedingt das gesamte dahinter liegende Gebiet betroffen ist. Hierüber können letzten Endes nur die 2D-Berechnungen Auskunft geben (vgl. Anlage 4- 1 und Anlage 4- 3).

Nach Abschluss der geplanten Deichsanierungsmaßnahmen in NRW (*Szenario 2020_M*) ändert sich das Bild zwar nicht grundlegend, wie die 2D-Berechnungen zeigen verbessert sich die Situation jedoch lokal betrachtet deutlich (u.a. auch wegen der bereits genannten geringeren Einstauhöhen nach Überflutungen). In diesem Szenario sind weiterhin zunächst die südlich gelegenen Gebiete betroffen. Dies gilt vor allem für mehrere linksrheinische Gebiete im Kölner Raum, die erst bei größeren Hochwassern von

Überflutungen betroffen sind als im Szenario 1995_M (mit (2) markierte Gebiete in Abbildung 5-1). Hier wird über eine lange Strecke der Hochwasserschutz verbessert (vgl. Anlage 1- 3). Dies hat jedoch auf der gleichen Strecke zur Folge, dass auf der rechten Rheinseite ein Gebiet eher von Überflutungen betroffen wird als beim Szenario 1995_M (mit (3) markiertes Gebiete in Abbildung 5-1). Deutlich sind auch die Folgen des verbesserten Hochwasserschutzes in Emmerich (mit (1) markiertes Gebiet in Abbildung 5-1). Die mit (4) markierten Gebiete sind Gebiete, bei denen es nur zu äußerst geringen Überflutungen kommt.



Anmerkungen:

- Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe ihres Scheitelabflusses nach geordnet und klassifiziert. Die Gebiete, die bei den kleineren Hochwassern betroffen sein können, sind auch bei den größeren betroffen.
- Wenn für ein Gebiet angegeben wird, dass Überflutungen auftreten können, ist nicht unbedingt das gesamte Gebiet betroffen. Hierüber können nur die 2D-Berechnungen Auskunft geben, weitere Erläuterungen siehe Text.
- Die als potentiell überfluteten Gebiete angegebenen Flächen waren ebenso wie die weißen Flächen nicht Gegenstand der 1D-Berechnungen. Die 2D-Berechnungen zeigen jedoch, dass hier keine Überflutungen stattfinden
- (1), (2), (3), (4) s. Erläuterungen im Text.

Abbildung 5-1: Gebiete entlang des Niederrheins, in denen bei den genannten Hochwassern Überflutungen auftreten können, Ergebnisse DSS, Szenario 1995_M und 2020_M.

Die *Einrichtung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen* in NRW und in den Niederlanden haben keinen nennenswerten Einfluss darauf, ob die Gebiete bei den jeweiligen Hochwassern überflutet werden oder nicht, jedoch verbessert sich die Situation durch geringe Einstauhöhen nach Deichüberströmen. Nur sehr vereinzelt kann erreicht werden, dass ein Gebiet erst bei einem höheren Ereignis überflutet wird. An dieser Stelle soll deshalb auf eine weitere Darstellung verzichtet werden (Van der Veen et al., 2004b).

5.3 Dynamik der Überflutungen

Das Überflutungsgeschehen ist ein sowohl räumlich als auch zeitlich gesehen dynamischer Prozess. Hierüber geben die von der Provinz Gelderland erstellten Überflutungsfilme umfassend Auskunft. Im folgenden sollen die grundlegenden Prozesse dieser Dynamik (zeitliche Abfolge der von den Überflutungen betroffenen Gebiete und Fließwege) dargestellt werden.

Eine *zeitliche Überflutungsdynamik* lässt sich bereits aus der Abbildung 5-1 erschließen. So ist zu erwarten, dass bei einem Hochwasser zunächst die Gebiete von Überflutungen betroffen sind, die auch bei den kleineren Extremereignissen betroffen waren, also im südlichen Bereich des Niederrheins sowie im heutigen Zustand (1995) der grenzüberschreitende Polder bei Emmerich, und erst später weitere Polder im mittleren Bereich. Diese erste Einschätzung wird sehr eindrucksvoll in den Überflutungsfilmen demonstriert, die die Ergebnisse der zweidimensionalen Berechnungen mit Delft-FLS in ihrer Zeitlichen abfolge darstellen. Tabelle 5-1 gibt Auskunft darüber, wann welches Gebiet beginnt überflutet zu werden.

Tabelle 5-1: Chronologie der Überflutung einzelner Gebiete, HW824, Szenario 1995_DB und Szenario 2020_DB (nach Gudden, 2004).

Szenario 1995_DB		Szenario 2020_DB	
Gebiet	Beginn der Überflutung [h nach Rechenstart]	Gebiet	Beginn der Überflutung [h nach Rechenstart]
O_012	152	O_009	154
O_006	153	O_011	154
O_011	153	O_012	154
O_009	154	O_006	159
O_016	154	O_014	160
O_014	160	O_013	165
O_013	167	D_019	169
O_005	168	O_005	180
O_041	169	O_001	182
D_019	176	O_008	186
O_001	187	O_020	187
O_017	187	O_016	192
O_008	190	O_007	202
O_018	193	O_021	225
O_020	197	D_027	239
O_007	201	O_028	247
O_021	202	O_018	248
O_015	225	O_015	255
O_025	227	D_023	257
D_027	246	O_022	258
O_022	250	O_024	259
O_028	251	O_025	260
D_023	252	O_029	262
O_024	253	O_017	264
O_029	260	O_002	265
O_002	265	O_030	276
O_030	279	D_026	281
D_026	284		

Einen Überblick über *Fließwege* hinter den Hochwasserschutzanlagen für das Szenario 1995_DB und Hochwasser HW824 zeigt Abbildung 5-2. Hier wird deutlich, dass große Wassermengen rheinparallel hinter den Hochwasserschutzanlagen fließen. Zum Teil fließen sie weiter unterhalb wieder zurück in den Rhein, zum Teil füllen sie weiter unterhalb gelegene Polder ohne den Rhein wieder zu erreichen. Ein Vergleich mit Abbildung 5-3 zeigt qualitativ nur kleine Veränderungen nach den Deichsanierungsmaßnahmen 2020.

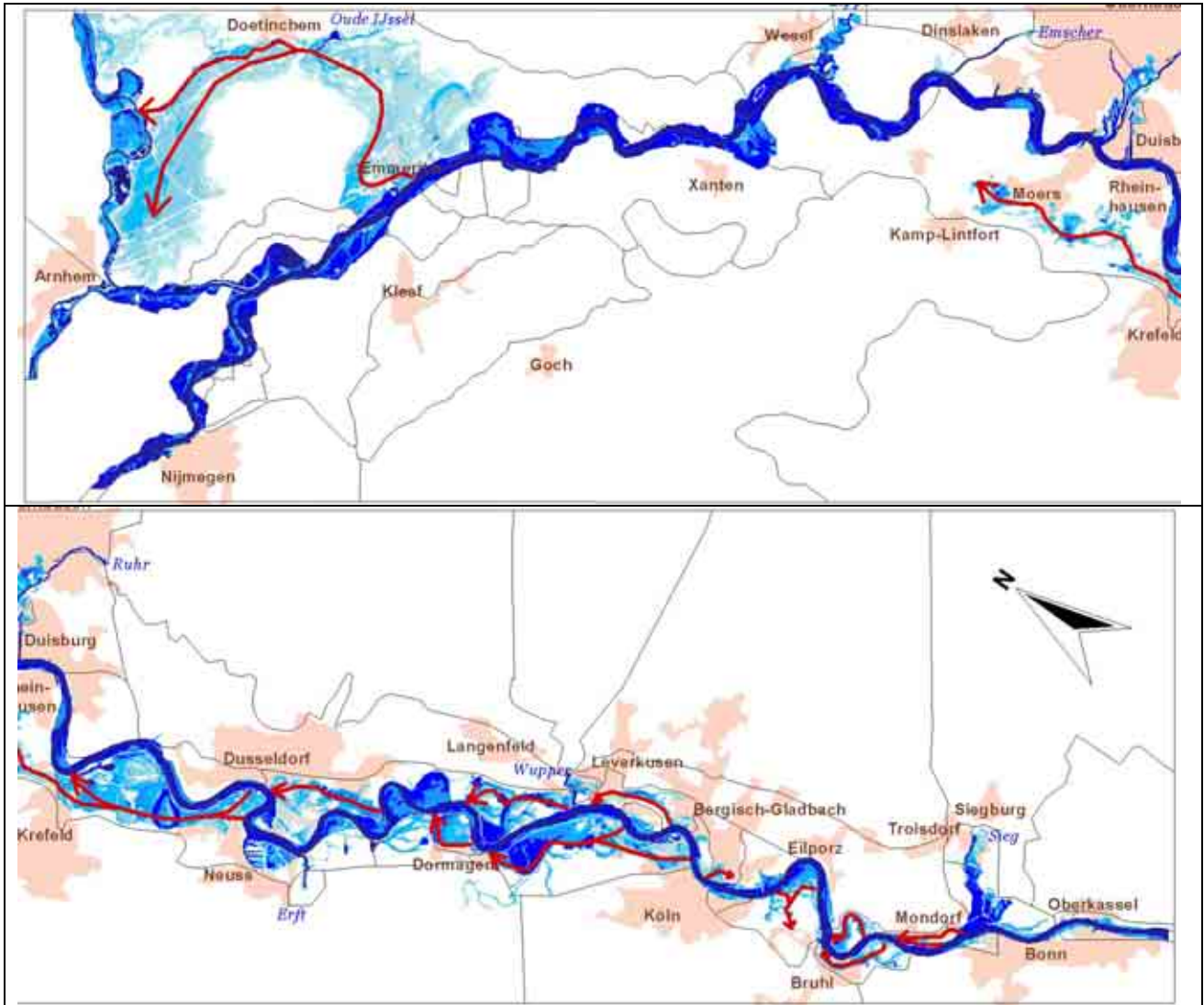


Abbildung 5-2: Fließwege hinter den Hochwasserschutzanlagen, Szenario 1995_DB HW824 mit Dueb, qualitative Angaben.

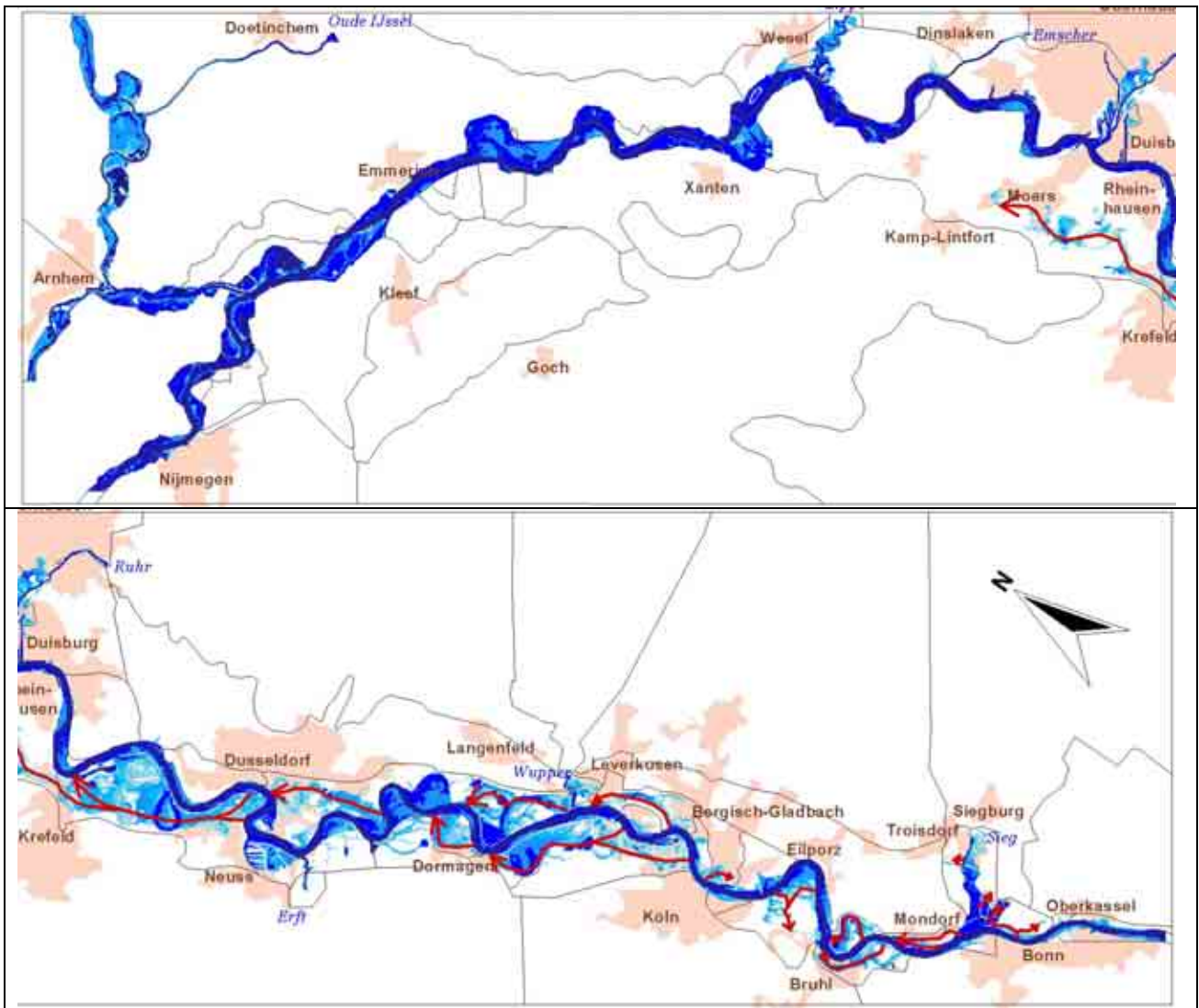


Abbildung 5-3: Fließwege hinter den Hochwasserschutzanlagen, Szenario 2020_DB HW824mitDueb, qualitative Angaben.

Quantitativ zeigen sich jedoch zwischen der Situation 1995 und 2020 sehr wohl deutliche Unterschiede bei den Scheitelabflüssen der rheinparallelen Strömungen hinter den Hochwasserschutzanlagen, die wieder in den Rhein zurück fließen (Anlage 4- 5 und Anlage 4- 6).

6 Auswirkung der Überflutungen und Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf Scheitelabflüsse und Scheitelwasserstände im Rhein

6.1 Einleitung

Eine der wesentlichen Zielsetzungen des Projektes ist die Erfassung der Wirkung der wasserstandsvermindernden Maßnahmen am Niederrhein und in den niederländischen Rheinzweigen. Im Laufe des Projektes stellte sich heraus, dass diese Wirkungen sehr stark durch die Auswirkungen der Überflutungen auf den Abfluss im Rhein überlagert werden und beide Phänomene sich gegenseitig beeinflussen. Deshalb soll im folgenden auf die Wirkung beider Vorgänge eingegangen werden.

Zunächst einmal sollen die Auswirkungen von Überflutungen und Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf den (Scheitel-)Abfluss im Rhein dargestellt werden (Kapitel 6.2). Hierzu werden sowohl die Abflüsse betrachtet, die im Flussschlauch zwischen den Deichen abgeführt werden als auch die Summe der im Flussschlauch und hinter den Deichen rheinparallel abgeführten Wassermengen.

Kapitel 6.3 beschäftigt sich mit den Wirkungen der Überflutungen und wasserstandsreduzierenden Maßnahmen auf die Wasserstände am Niederrhein und in den niederländischen Rheinzweigen.

In Kapitel 6.4 wird der Bezug zum Aktionsplan Hochwasser der IKSR hergestellt.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung in Kapitel 6.5.

Weitergehendere Ausführungen finden sich bei Mehlig (2004) und Van der Veen et al. (2004b).

6.2 Entwicklung der Scheitelabflüsse im Rhein

6.2.1 Wirkung der Überflutungen auf den Abfluss im Rhein

Abbildung 6-1 zeigt die Entwicklung der Scheitelabflüsse entlang des Niederrheins für den Zustand 1995 (oben) und 2020 (unten) jeweils ohne Hochwasser reduzierende Maßnahmen. Dargestellt sind hier wie auch in den in **Anlage 5** wiedergegebenen Abbildungen die Scheitelwerte der instationären Berechnungen im Längsprofil. Für beide Zustände 1995 und 2020 sind in Abbildung 6-1 jeweils drei Abflusstypen dargestellt:

- Der Abfluss im Rhein Q_g , wie er berechnet wird, wenn davon ausgegangen wird, dass der gesamte Abfluss zwischen den Deichen abgeführt werden kann (1995_O_ Q_g bzw. 2020_O_ Q_g),
- Der Abfluss im Rhein Q_f , der zwischen den Deichen (im Flussschlauch) abgeleitet wird, wenn Überflutungen berücksichtigt werden (1995_M_ Q_f bzw. 2020_M_ Q_f) sowie

-
- der Gesamtabfluss Q_g aus dem Teilstrom, der zwischen den Deichen verbleibt und dem, der sich rheinparallel hinter den Deichen bewegt und wieder zurückströmt (1995_M_ Q_g bzw. 2020_M_ Q_g).

Zunächst einmal wird deutlich, dass erwartungsgemäß die Abflüsse bei Vernachlässigung der Effekte der Überflutungen deutlich höher sind als wenn die Verluste an Wasser durch das Überströmen von Hochwasserschutzanlagen berücksichtigt werden. Ebenfalls ist zu erkennen, dass in je drei Bereichen der rheinparallele Abfluss hinter den Deichen eine wichtige Rolle spielt (Unterschied 1995_M_ Q_g und 1995_M_ Q_f bzw. 2020_M_ Q_g und 2020_M_ Q_f). In den Flussabschnitten dazwischen werden die Scheitel durch Überflutungen gedämpft ohne dass stromparallele Abflüsse auftreten, die in den Rhein wieder zurückgeführt werden. Ab der Ruhrmündung findet praktisch kein zusätzlicher Wasserverlust durch Überströmungen statt, die einzige Ausnahme bildet im Zustand 1995 die Reduzierung des Scheitelabflusses bei Emmerich (Rhein-km 845).

Die Deichsanierungsmaßnahmen bis 2020 beeinflussen beim Hochwasser HW824 sowohl den Gesamtabfluss Q_g als auch den Abfluss im Flussschlauch Q_f sowie die Verteilung zwischen diesen Teilströmen:

Die Parallelströme hinter den Deichen sind in 2020 in allen drei relevanten Bereichen geringer. Dies ist eine Verbesserung gegenüber 1995, weil damit vermutlich auch eine geringere Strömungsdynamik verbunden ist.

Der Gesamtabfluss ist ab Siegmündung geringer bei höherem Anteil des Abflusses im Flussschlauch in den drei Bereichen mit Deichhinterströmung. Dies wird dadurch verursacht, dass die Deichsanierung und Lückenschließung vor allem im Bereich Köln-Düsseldorf zu einer späteren Überströmung der Hochwasserschutzanlagen führen. Dadurch finden diese näher am Abflussscheitel statt, was im Sinne der Scheitelreduzierung effektiver ist.

Im Bezugsjahr 1995 führen die Überflutungen in Emmerich zu einer deutlichen Scheitelabflussverminderung bei Lobith. Durch die Sanierung und Lückenschließung der Hochwasserschutzanlagen im Gebiet Emmerich finden hier keine Überströmungen und somit keine Scheiteldämpfungen mehr statt. Der Scheitelabfluss in Lobith verändert sich für das Bezugsjahr 2020 gegenüber 1995 jedoch kaum, da das Hochwasser mit bereits stärker reduziertem Scheitel aus dem Gebiet oberhalb Emmerich ankommt.

Die Deichsanierungen und Lückenschließungen am Niederrhein in NRW führen daher im Bezugsjahr 2020 beim Hochwasser HW824 zu:

- einer Verbesserung des lokalen Hochwasserschutzes
- einer Verringerung der Ströme hinter den Deichen bei Überflutungen
- einer Reduzierung der Scheitelwerte entlang der Niederrheinstrecke ab der Siegmündung.

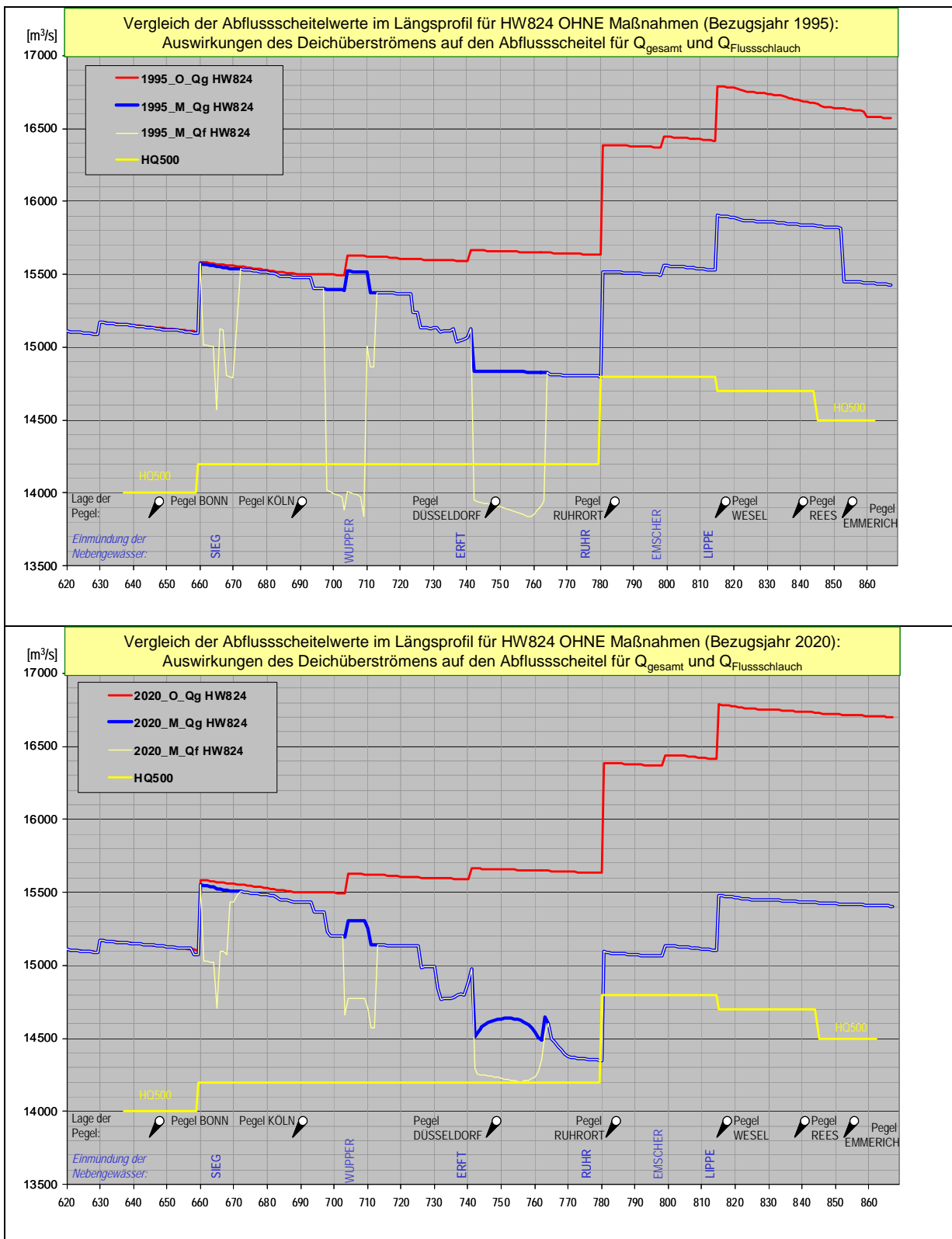


Abbildung 6-1: Scheitelabflüsse im Rhein:
oben: Zustand 1995/2002 ohne Hochwasser reduzierende Maßnahmen
unten: Zustand 2020 ohne Hochwasser reduzierende Maßnahmen.

6.2.2 Wirkung der Überflutungen und der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf den Abfluss im Rhein bei unterschiedlichen Hochwassern

Wie sieht die Wirkung der Überflutungen auf die Hochwasserscheitel bei anderen Hochwassern aus und welchen Einfluss haben die hochwasservermindernden Maßnahmen?

Aus der Fülle der Ergebnisse soll zur Klärung dieser Fragen anhand ausgewählter Hochwasser ein Überblick über die Entwicklung der Scheitelwerte der Gesamtabflüsse entlang des Niederrheins gegeben werden. Neben den Scheitelwerten des Hochwassers vom Januar 1995 (MET95) werden drei synthetische Hochwasser dargestellt, die sich etwa im Bereich von HQ_{100} (Hochwasser HW457), HQ_{200} (Hochwasser HW846) und HQ_{500} (Hochwasser HW036) bewegen, sowie die Ganglinie mit dem höchsten Abfluss am unteren Niederrhein (HW824). Dargestellt werden nur Ergebnisse der Berechnungen mit Deichüberströmen/Deichbruch. Sie finden sich in Anlage 5-1 bis Anlage 5-5 wieder. Zu sehen sind die Scheitelwerte der Gesamtabflüsse (oben) und die Abflussscheitelwerte im Flussschlauch (unten).

Bei der Betrachtung der Abbildungen wird zunächst deutlich, dass bei den zwei kleineren Hochwassern (MET95, Anlage 5-1 und HW457, Anlage 5-2) kein Unterschied zwischen den Scheitelwerten der Gesamtabflüsse und denen der Abflüsse im Flussschlauch zu erkennen ist. Erst beim Hochwasser HW846 und noch stärker bei HW036 und HW824 sind die Unterschiede beträchtlich.

Bei den kleineren Hochwassern (Anlage 5-1 und Anlage 5-2) nehmen sowohl die Gesamtabflüsse als auch die Scheitelwerte im Flussschlauch zwischen den Nebenflüssen allmählich ab. Ursache hierfür ist neben dem Abströmen von Flusswasser in den Grundwasserkörper vor allem die Wellenverformung durch die Gerinneretention.

Mit zunehmender Größe der Hochwasser ist vor allem im Bereich bis Rhein-km 770 eine eher gestufte Abnahme der Scheitel der Gesamtabflüsse zu beobachten (Anlage 5-3 bis Anlage 5-5). Hier ist die Ursache in den zunehmenden Überflutungen von hochwassergeschützten Gebieten und damit Wasserverlusten im Fluss zu finden. Bei den Scheitelwerten der Abflüsse im Flussschlauch sind die bereits erwähnten „Werteeinbrüche“ zu erkennen, weil ein beträchtlicher Teil des Abflusses hinter den Deichen stattfindet.

Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass sich die Szenarien 1995_M und 2002_NRW_M sehr ähnlich verhalten, sowie die Szenarien 2020_M, 2020_NRW_NL_M und 2020_NRWMAX_M. Das heißt, die Szenarien mit der gleichen Deichhöhe verhalten sich, untereinander verglichen, relativ ähnlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Deichhöhe und damit Deichüberströmen/Deichbruch bezüglich der Scheitelabflüsse den dominierenden Faktor darstellt, und die Wirkung der wasserstandsvermindernden Maßnahmen auf den Abfluss deutlich geringer ist. Bei den vier „kleineren“ Extremhochwassern im Bereich des Hochwassers 1995 bis HQ_{500} (Anlage 5-1 bis Anlage 5-4) wird der Scheitelabfluss nach den Deichsanierungen höher, beim größten der betrachteten Hochwasser (HW824, Anlage 5-5) jedoch kleiner. Durch das Anpassen der Hochwasserschutzanlagen auf das geforderte Schutzniveau wird der Scheitel höherer Extremhochwasser effektiver abgemindert.

Besonders ausgeprägt sind die Erniedrigungen der Scheitelabflüsse durch Deichüberströmen/Deichbruch bei den zwei größeren der dargestellten Hochwassern HW036 und HW824 (Anlage 5-4 und Anlage 5-5). Im Bereich bis Düsseldorf ist eine treppenförmige Abnahme der Scheitelabflüsse bei allen Szenarien zu beobachten. Bei den Abflüssen im Flussschlauch sind diese durch die bereits erwähnten Einbrüche der Werte unterbrochen. Dabei treten im Längsprofil vor allem zwischen Rhein-km 710 bis 770 Phänomene auf, die sich nur durch das komplizierte Wechselspiel zwischen den Überflutungen der hinter den Deichen liegenden Einzelpolder erklären. Beispielsweise tritt beim Hochwasser HW036 bei Rhein-km 738 bei den Szenarien 2020_NRW_NL_M und 2020_NRWMAX_NL_M ein Deichbruch auf. Durch die durch die Deichbruchstelle abgeleitete Wassermenge senkt sich lokal der Wasserstand. Das dadurch hervorgerufene höhere Energieliniengefälle führt zu einem erhöhten Abfluss im Rhein oberhalb der Deichbruchstelle (Anlage 5-4). Die Folge dieses Deichbruches ist es, dass bei Rhein-km 741 kein Deichbruch mehr stattfindet. Die beim Hochwasser HW824 zwischen Rhein-km 741 bis 780 auftretenden, ungewöhnlichen Verläufe der Scheitelwerte des Gesamtabflusses im Längsprofil lassen sich durch das bei den Überflutungen auftretende komplizierte Strömungsverhalten hinter den Deichen erklären. Bei den Abflüssen im Flussschlauch sind diese ungewöhnlichen Verläufe nicht wieder zu finden.

Im unteren Bereich des Gewässerlängsschnittes treten bei den beiden höchsten Hochwassern (Anlage 5-4 und Anlage 5-5) darüber hinaus noch im Bereich Emmerich (Rhein-km 851) Überflutungen auf, die zu deutlichen Verminderungen der Abflüsse zwischen den Deichen führen. Diese sind jedoch nur auf die Szenarien 1995_M und 2002_NRW_M beschränkt. Nach dem Bau der Hochwassermauer bei Emmerich (Szenarien 2020_NRW_NL_M und 2020_NRWMAX_NL_M) treten diese nicht mehr auf.

In einigen Fällen lässt sich auch die Wirkung einzelner Rückhaltmaßnahmen erkennen:

- So wirkt die Retentionsmaßnahme Worringen, so wie sie heute geplant ist, auf das Hochwasser 1995 scheidelverringend (Anlage 5-1, Szenario 2020_NRW_NL_M, Rhein-km 710). In einer auf den Bemessungsabfluss besser abgestimmten Variante (Szenario 2020_NRWMAX_NL_M) ist keine Wirkung zu erkennen.
- Auf das Hochwasser HW846 (im Bereich des HQ_{200}) hingegen wirkt die Maßnahme Worringen scheidelabflussverringend aus den oben genannten Gründen nur im Szenario 2020_NRWMAX_NL_M, während sie in der Ausführung, wie sie heute geplant ist, bereits gefüllt ist, bevor der Scheitel erreicht wird (Anlage 5-3).
- Dass die Wirkung von Retentionsmaßnahmen auf den Scheitelabfluss sehr von der Ganglinie abhängt, zeigt auch das Beispiel Ilvericher Bruch (Rhein-km 752). Keine der dargestellten Hochwasser werden in ihren Scheitelwerten durch diese Maßnahme beeinflusst, weil sie entweder zu hoch oder zu niedrig liegen.
- Bei dem Hochwasser HW036 im Bereich von HQ_{500} zeigt sich die Wirkung der auf diesen Abfluss abgestimmte Maßnahme „Orsoyer Bogen“ bei Rhein-km 800 im Szenario 2020_NRWMAX_NL_M (Anlage 5-4).
- Beim höchsten der betrachteten Hochwasser, dem HW824, zeigt sich im Szenario 2020_NRWMAX_NL_M die Wirkung von Bylerward (Anlage 5-5). Hier zeigt sich auch das Phänomen, dass in der Phase des Befüllens eines Retentionsraumes flussaufwärts zeitweise eine Erhöhung des Abflusses (nicht der Wasserstände!) auftreten kann, was auch zu einer Erhöhung der Scheitelabflüsse führen kann.

-
- Bei kleineren Extremabflüssen (MET95 und HW846) wirken die Maßnahmen Griether Busch und Lohrwardt (Rhein-km 835 bis 848) abflussscheitelvermindernd (Anlage 5-1 und Anlage 5-2).
 - Maßnahmen, die den Durchflussquerschnitt vergrößern, wirken sich nicht oder in nur sehr eingeschränktem Maße auf den Scheitelabfluss aus, aber können durch die vergrößerte durchströmte Querschnittsfläche die Wasserstände lokal absenken.

Einen Überblick über die berechneten Scheitelabflüsse an den Hauptpegeln entlang des Niederrheins für die wichtigsten fünf Szenarien 1995, 2002_NRW, 2020, 2020_NRW_NL und 2020_NRWMAX_NL jeweils Berechnungen ohne und mit Deichüberströmen am Niederrhein, geben die Anlage 6- 1 bis Anlage 6- 5. Hieraus wird erneut ersichtlich, dass die größeren Extremhochwasser stark durch das Deichüberströmen im Gebiet bis Düsseldorf/Krefeld beeinflusst werden. Die Scheitelwerte der Berechnungen mit Deichüberströmen steigen jedoch mit größer werdendem Hochwasser weiter an. Es ist nicht erkennbar, dass sie beispielsweise für Lobith einem Grenzwert zustreben, der nicht überschritten werden kann. Auf ein physisches Maximum kann auf Basis dieser Berechnungen nicht geschlossen werden.

Der wesentliche Grund hierfür liegt darin, dass ein großer Teil des über die Deiche oberhalb von Düsseldorf strömenden Wassers wieder zurückströmt. Letzteres führt für den Pegel Düsseldorf dazu, dass der Abfluss Q_f im Rhein, der zwischen den Deichen, also im Flussschlauch, abgeleitet wird, kleiner ist, als der Gesamtabfluss Q_g aus dem Teilstrom, der zwischen den Deichen abgeleitet wird und dem der rheinparallel hinter den Deichen strömt.

Um einen Überblick zu geben, wie extrem die „extremen“ Hochwasser sind, sind analog zu Kapitel 4.4 die berechneten Hochwasserscheitelwerte für Lobith statistischen Abflussgrößen gegenüber gestellt, hier nun mit den Werten für „mit Deichüberströmen Oberrhein UND mit Deichüberströmen Niederrhein“.

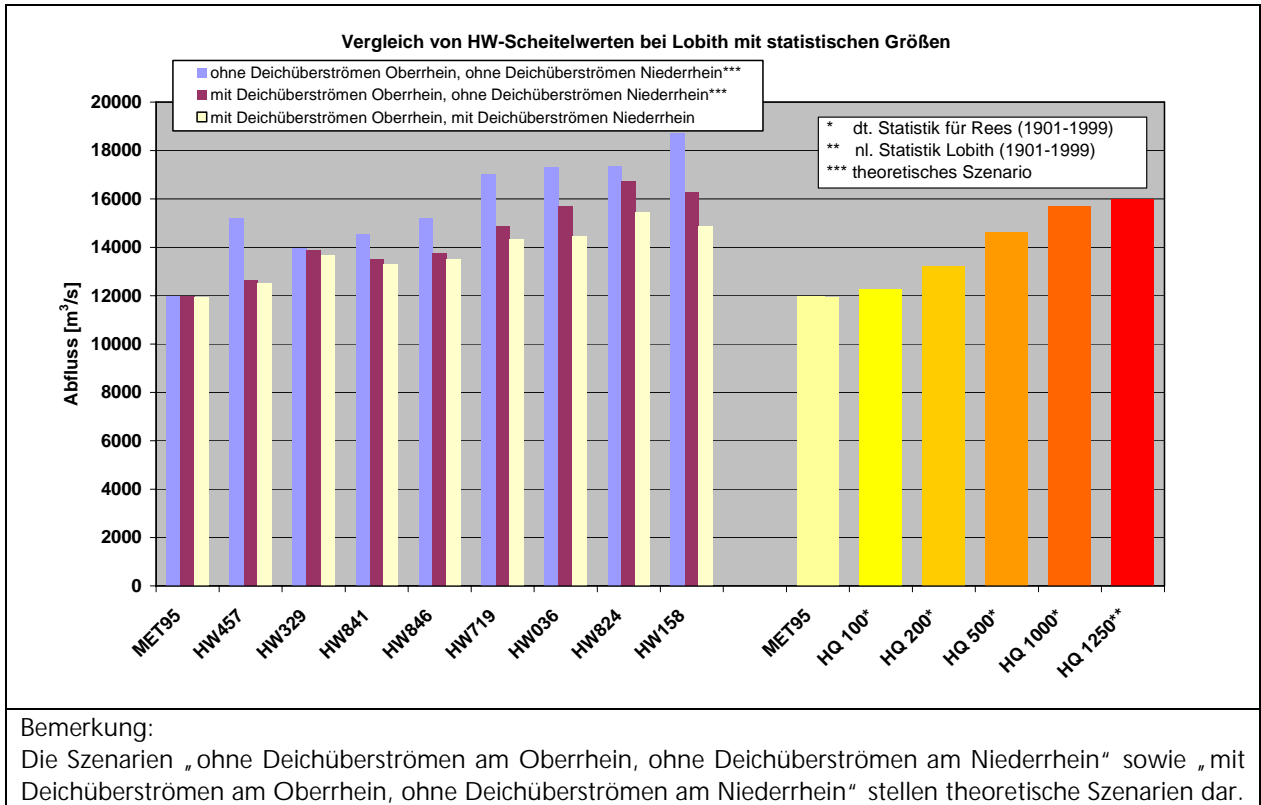


Abbildung 6-2: Vergleich von Hochwasserscheitelwerten mit statistischen Größen.

6.3 Auswirkung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf die Wasserstände im Rhein

6.3.1 Einleitung

Wichtigstes Ziel von Hochwasser reduzierenden Maßnahmen ist die Absenkung des Wasserstandes vor allem im Scheitelbereich. Deshalb soll die Wirkung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf die Scheitelwasserstände entlang des Niederrheins dargestellt werden. Hierzu wurden die für jedes Profil im 1D-Modell (DSS/SOBEK) berechneten maximalen Wasserstände eines Szenarios mit Maßnahmen in Bezug gesetzt zum Szenario des entsprechenden Bezugsjahres ohne Maßnahmen. Zur Darstellung der Wirkung der Maßnahmen wurden beispielsweise die Scheitelwasserstände des Szenarios 1995_M, bei dem keine wasserstandsverringenden Maßnahmen berücksichtigt wurden, aber die Deichhöhe von 2002, von denen des Szenarios 2002_NRW_M subtrahiert. Negative Größen drücken eine wasserstandsreduzierende Wirkung aus, positive Größen eine Wasserstandserhöhung.

Entsprechend wurde mit den Szenarien 2020_NRW_NL_M und 2020_NRWMAX_NL_M (ggf. auch Varianten davon) verfahren. Hier findet der Vergleich jedoch mit den Ergebnissen des Szenarios 2020_M statt, das, wie bei allen 2020-er-Szenarien die Deichhöhen im Jahre 2020 wiedergibt, jedoch keine wasserstandsvermindernden Maßnahmen.

6.3.2 Wirkung bereits realisierter Maßnahmen (Zustand 2002)

Die Wirkung der in 2002 bereits realisierten Maßnahmen wird in Abbildung 6-3 dargestellt.

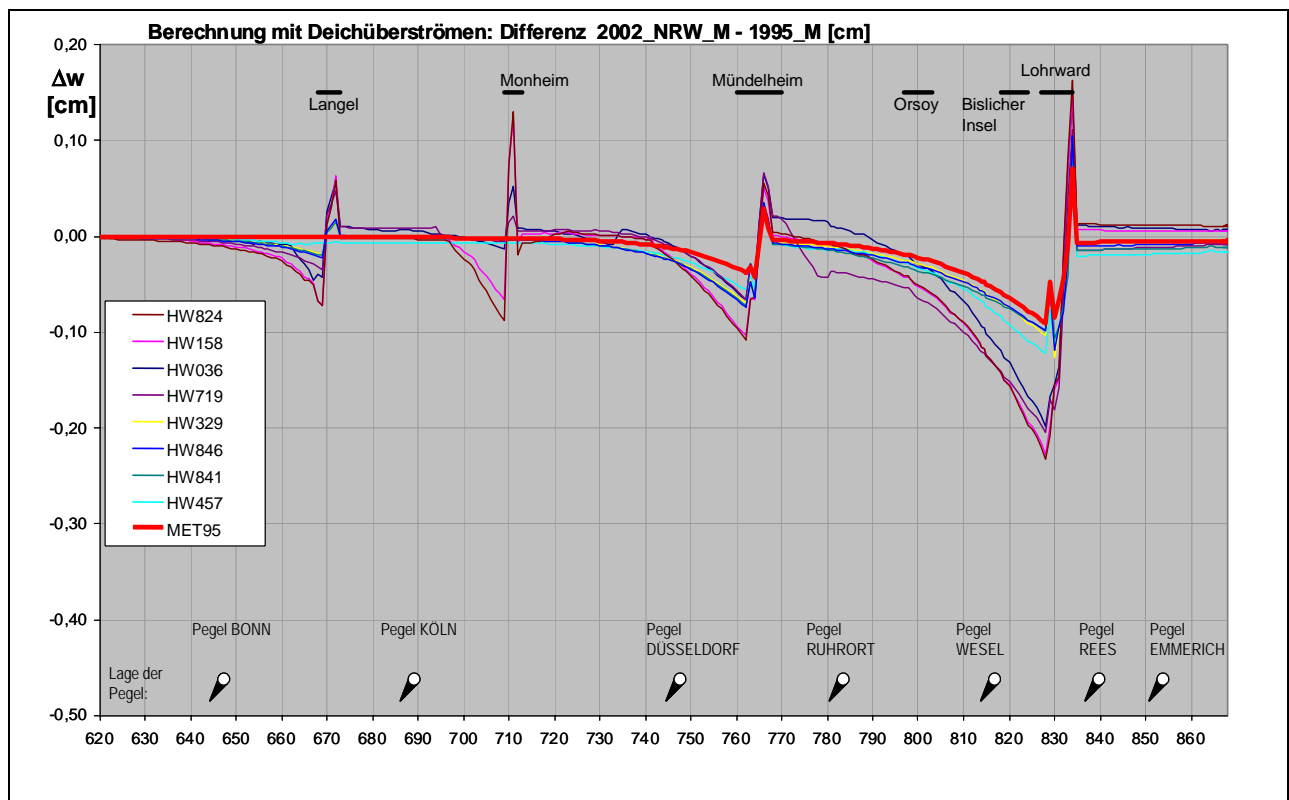


Abbildung 6-3: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, heutiger Zustand (Differenz Szenario 2002_NRW_M – 1995_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).

Sechs wasserstandsvermindernde Maßnahmen sind bereits realisiert, bzw. stehen kurz vor der Realisierung und werden deshalb in den Berechnungen „Zustand 2002“ als bereits realisiert berücksichtigt (vergleiche auch Tabelle 3-5):

- die *Deichrückverlegungen* Monheim, Mündelheim und Orsoy Land.
- Köln-Langel und Lohrwardt, die beide im unteren Abflussbereich als *ungesteuerte Retentionspolder* wirken, bei weiter ansteigenden Wasserständen bzw. Abflüssen jedoch *durchflossen* werden und somit einen erhöhten Durchfluss ermöglichen.
- Bislicher Insel, eine Deichrückverlegung, bei der der angepasste alte Banndeich dafür sorgt, dass das System faktisch als ungesteuerter Retentionspolder funktioniert.

Deutlich erkennbar ist die maximale wasserstandsreduzierende Wirkung der einzelnen Maßnahmen im Bereich der Maßnahmen selbst sowie das stetige Anwachsen der Wirkung von oberhalb zur Maßnahme hin. Ursache hierfür ist die Vergrößerung des Abflussquerschnittes im Bereich der Maßnahme, die bei gleichen (oder höheren) Durchflüssen zu niedrigeren Wasserständen führen. Eine Wasserstandsreduzierung bewirkt nach oberhalb ein höheres Energieliniengefälle, welches wiederum erhöhte Fließgeschwindigkeit bewirken kann. Auch dieser Effekt führt dazu, dass bei gleichen oder sogar etwas höheren Abflüssen eine Wasserstandsreduzierung eintritt.

Lokale Vergrößerungen des Durchflussprofils z.B. durch Deichrückverlegungen bewirken häufig - in Fließrichtung betrachtet - zum Ende der Maßnahme eine Verengung des Profils. Im Übergang zur vorhandenen Deichlinie kann es dabei zu einem kleinen Aufstau kommen. Dies führt dazu, dass es unmittelbar unterhalb der Maßnahmen Köln-Langel, Monheim, Mündelheim und Lohrwardt zu höheren Wasserständen kommt.

Alle Maßnahmen entfalten ihre größte Wirkung bei den größeren Hochwassern.

Alle Maßnahmen zeigen ihre Wirkung auf die Scheitelwasserstände im gesamten Spektrum der untersuchten Hochwasser. Einzige Ausnahme ist die Maßnahme Monheim. Hier bewirkt der relativ hohe Leitdeich, dass erst bei höheren Abflüssen der geschaffene Retentionsraum auch durchflossen wird und erst dann zu einer deutlichen Wasserstandsreduzierung führt.

Wirkungen der Maßnahmen Orsoy Land und Bislicher Insel sind nicht eindeutig zu erkennen, da sie relativ klein sind und sich stark mit der der Maßnahme Lohrwardt überlappen.

Die grenzüberschreitende Wirkung der wasserstandsreduzierenden Maßnahmen in NRW im heutigen Zustand (2002) ist äußerst gering, Maßnahmen in den Niederlanden sind noch nicht verwirklicht.

6.3.3 Wirkung der in NRW geplanten Maßnahmen (ohne Maßnahmen NL)

Die Wirkung der Maßnahmen, die in NRW bis 2020 realisiert werden sollen ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Nicht berücksichtigt sind die geplanten Maßnahmen in den Niederlanden.

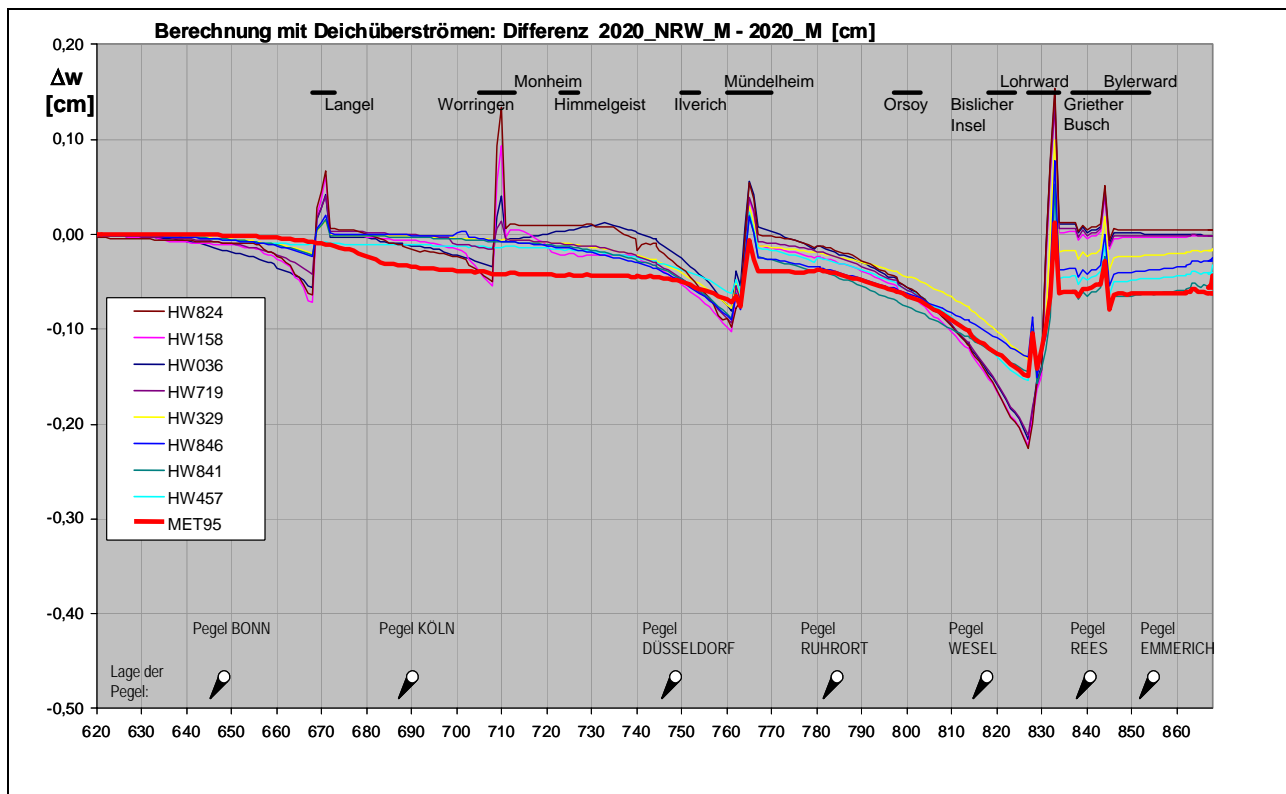


Abbildung 6-4: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, geplanter Zustand 2020 nur NRW (Differenz Szenario 2020_NRW_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).

Insgesamt sollen bis 2020 11 Hochwasser reduzierende Maßnahmen realisiert sein (kleinere, sehr lokale Maßnahmen werden hier nicht mitgezählt):

- Die *Deichrückverlegungen* Monheim, Mündelheim, Orsoy Land, und Itter-Himmelgeist.
- Die gesteuerten aber nicht durchströmten *Rückhaltepolder* Worringer Bruch, Ilvericher Bruch und Bylerward.
- Die Maßnahmen Köln-Langel und Lohrwardt, die beide im unteren Abflussbereich als *ungesteuerter Retentionspolder* wirken, bei weiter ansteigenden Wasserständen bzw. Abflüssen jedoch *durchflossen* werden und somit einen erhöhten Durchfluss ermöglichen.
- Die beiden Maßnahmen Bislicher Insel und Griether Busch, die faktisch wie *ungesteuerte Retentionspolder* wirken.

(vgl. auch Tabelle 3-5).

Zunächst fällt auf, dass sich die Wirkungen der Einzelmaßnahmen so stark überschneiden, dass ihre Einzelwirkungen kaum noch zu erkennen sind. Lediglich die Maßnahmen Köln-Langel, Monheim, Mündelheim, Lohrwardt und Griether Busch sind wegen ihres aufstauenden Effektes unmittelbar unterhalb der Maßnahmen als Folge der Verengung des Durchflussprofils zu erkennen.

Die Maßnahmen, die vor allem durch Vergrößerung des durchflossenen Profils wirken (Lohrwardt, Mündelheim, Monheim und Köln-Langel) beeinflussen wie bereits im heutigen Zustand die größeren Extremhochwasser HW824 und HW158 mehr als die kleineren. Die Einzelwirkung der anderen Maßnahmen ist kaum erkennbar. Ein Vergleich der Abbildung 6-4 mit Abbildung 6-3 deutet jedoch darauf hin, dass die Maßnahmen Worringen, Ilvericher Bruch, Griether Busch und Bylerward vor allem die kleineren Hochwasser (MET95, HW457)

beeinflussen. Insgesamt zeigt das System der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen am Niederrhein in der derzeitigen Planung seine beste Gesamtwirkung bei Ereignissen der Größenordnung des Hochwassers 1995.

6.3.4 Optimalisierung der in NRW geplanten Maßnahmen („NRWMAX-Variante“)

Zusätzlich zum heutigen Zustand und geplanten Zustand in NRW wurde eine weitere Variante von wasserstandsvermindernden Maßnahmen in NRW berechnet. Neben der Berücksichtigung zusätzlicher Maßnahmen wurden bei diesem Szenario die Maßnahmen Köln-Langel, Worringer Bruch, Ilvericher Bruch und Bylerward so eingesetzt, dass sie Hochwasser im Bereich der Bemessungsabflüsse effektiver reduzieren können (vgl. Tabelle 3-5).

Abbildung 6-5 zeigt, dass allein durch das spätere Füllen der Retentionspolder Köln-Langel, Worringer Bruch, Ilvericher Bruch und Bylerward sowie den Einsatz eines weiteren Retentionspolders bei Orsoy und der gezielten Entfernung hydraulischer Engpässe im Bereich Bislicher Insel (vgl. auch Tabelle 3-5), eine effektivere Reduzierung der Scheitelwasserstände der größeren Hochwasser erreicht werden kann. Für die kleineren Hochwasser bedeutet dies jedoch eine Verringerung der Wirkung.

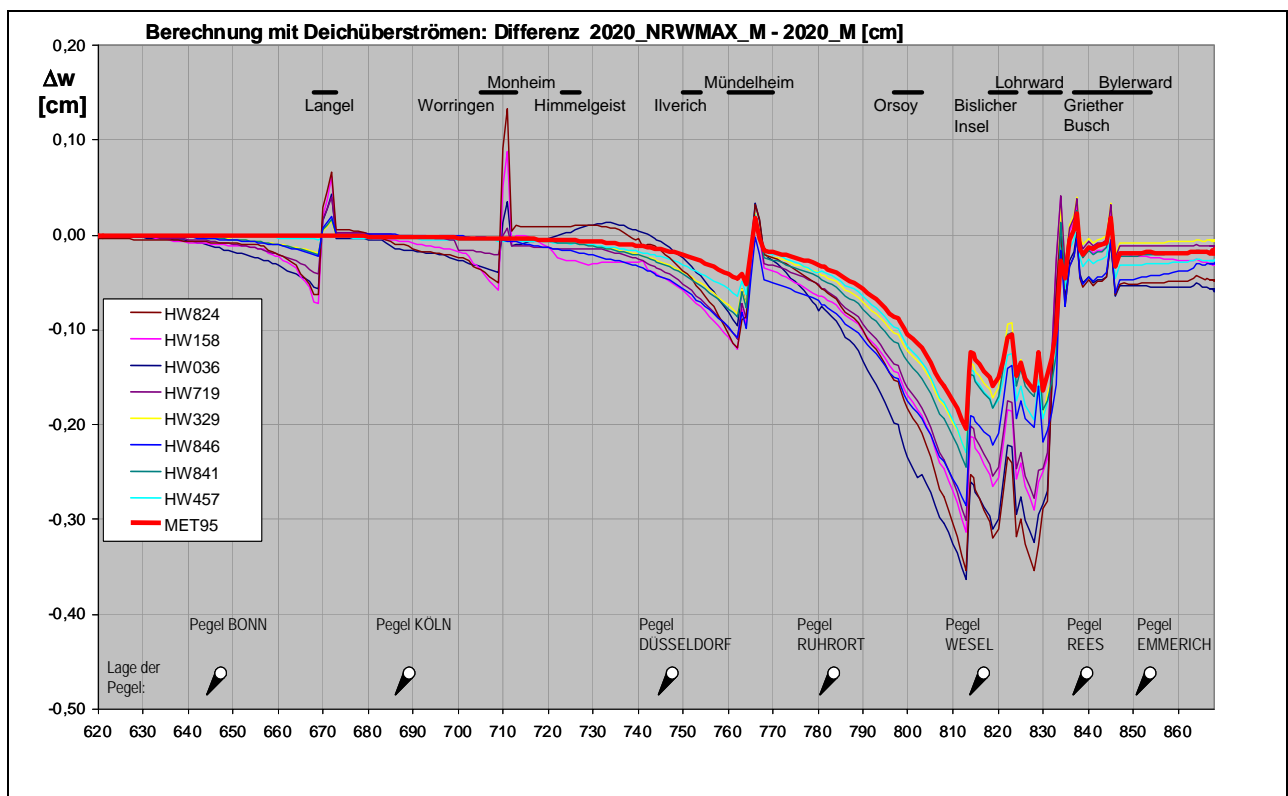


Abbildung 6-5: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, optimierter Zustand 2020 nur NRW (Differenz Szenario 2020_NRWMAX_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).

Wie aus Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 ersichtlich wird, wirken sich die Maßnahmen in NRW mit bis zu 6 cm Reduzierung des Scheitelwasserstandes an der Grenze auch auf die Wasserstände in den Niederlanden aus.

6.3.5 Wirkung der niederländischen Maßnahmen

In den Niederlanden soll in Zukunft ein Abfluss von 1000 m³/s mehr abgeleitet werden können als dies zur Zeit möglich ist. Ziel ist es, dies durch wasserstandsreduzierenden Maßnahmen zu erreichen, ohne die Deiche zu erhöhen. Diese Maßnahmen beeinflussen auch die Scheitelwasserstände in Deutschland (Abbildung 6-6). Mit Verringerungen des Wasserstandes um ca. 30 cm an der Grenze nimmt diese Wirkung allmählich stromauf ab, und lässt sich bei Rhein-km 810 nicht mehr nachweisen.

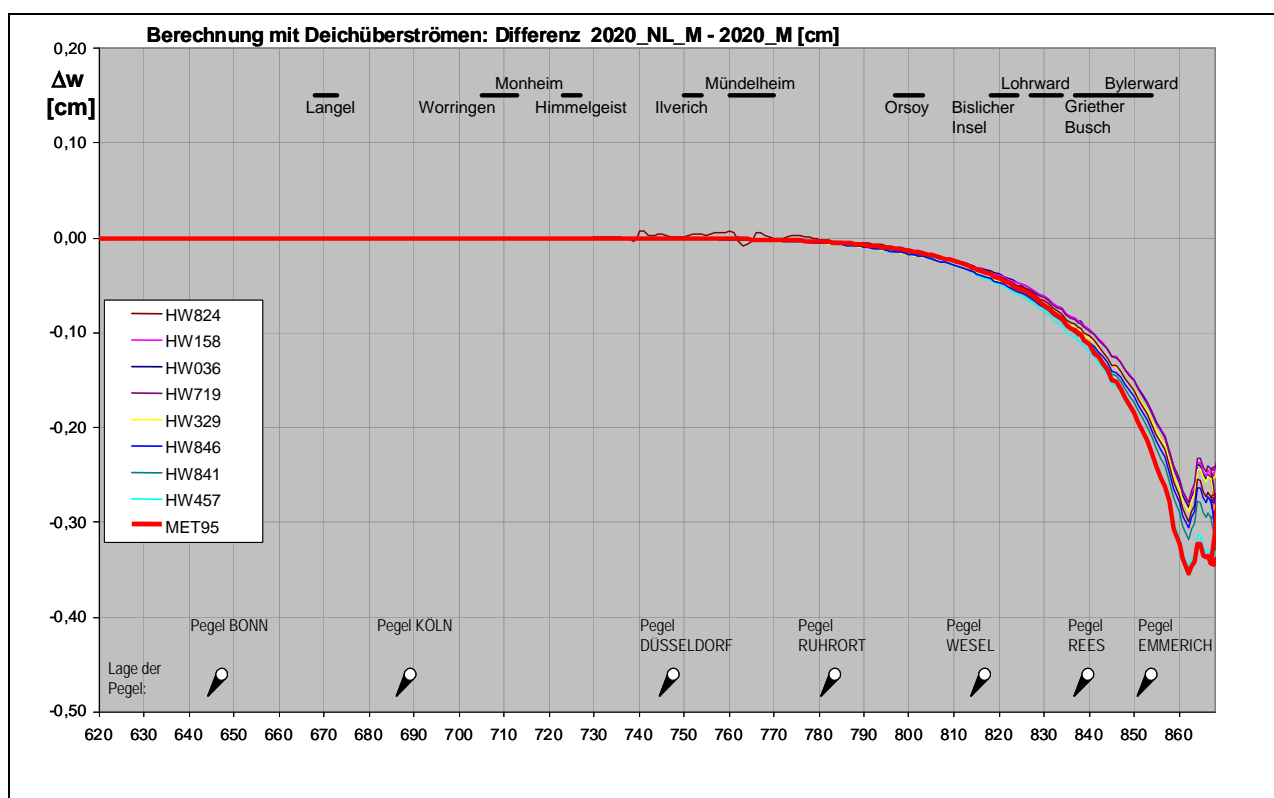


Abbildung 6-6: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, geplante Maßnahmen in den Niederlanden (Differenz Szenario 2020_NL_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).

6.3.6 Grenzüberschreitende Wirkung aller geplanten Maßnahmen (NRW und NL)

In Kombination mit der Wirkung der Maßnahmen in NRW, so wie sie heute geplant sind, können für die größeren der Extremhochwasser Wasserstandsverringerungen um bis zu 30 cm an der Grenze und bis zu 25 cm im Raum Bislich/Lohrwardt erreicht werden (Abbildung 6-7). Bei einer auf den Bemessungsabfluss abgestimmten Variante der Maßnahmen in NRW sowie einiger zusätzlicher Maßnahmen bei Orsoy und Bislich (NRWMAX-Variante), wären sogar Wasserstandsabsenkungen von bis zu 40 cm an der Grenze und im Raum Bislich/Lohrwardt zu erreichen (Abbildung 6-8).

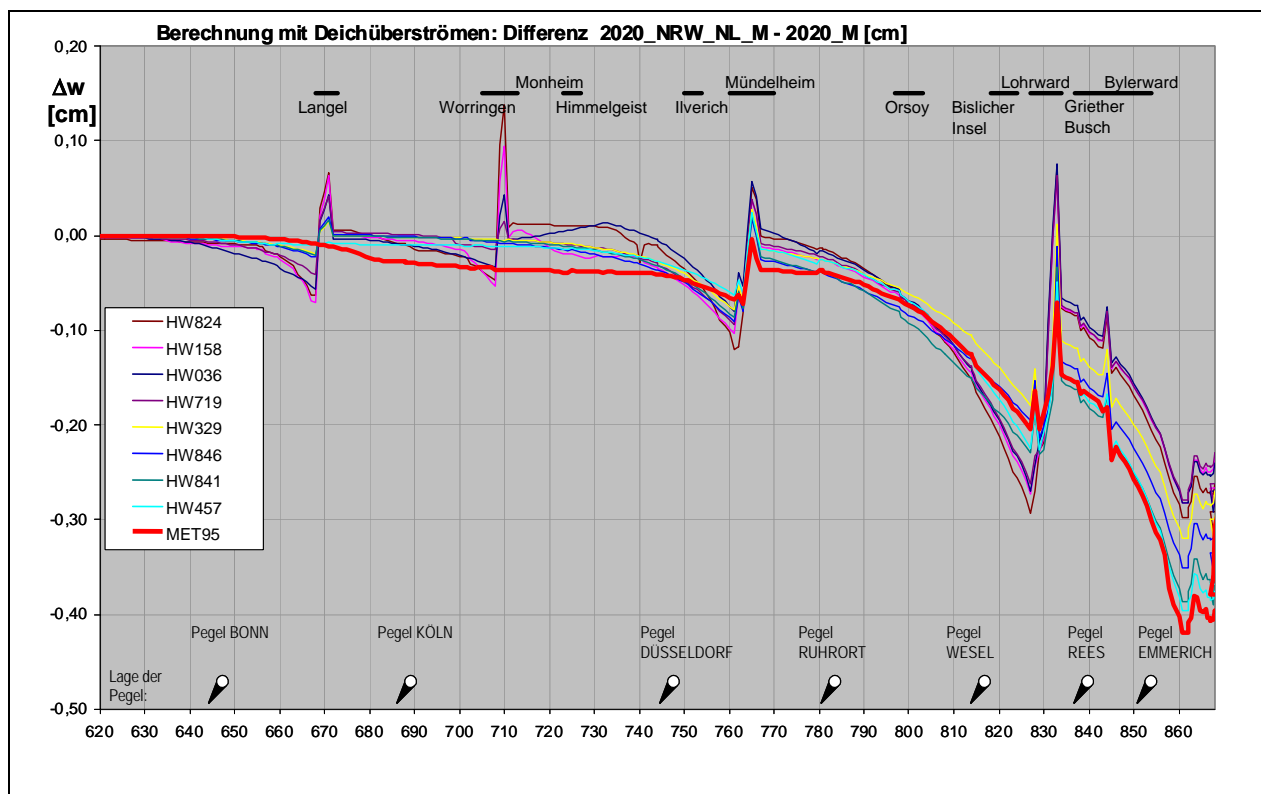


Abbildung 6-7: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, geplanter Zustand 2020 NRW und NL (Differenz Szenario 2020_NRW_NL_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).

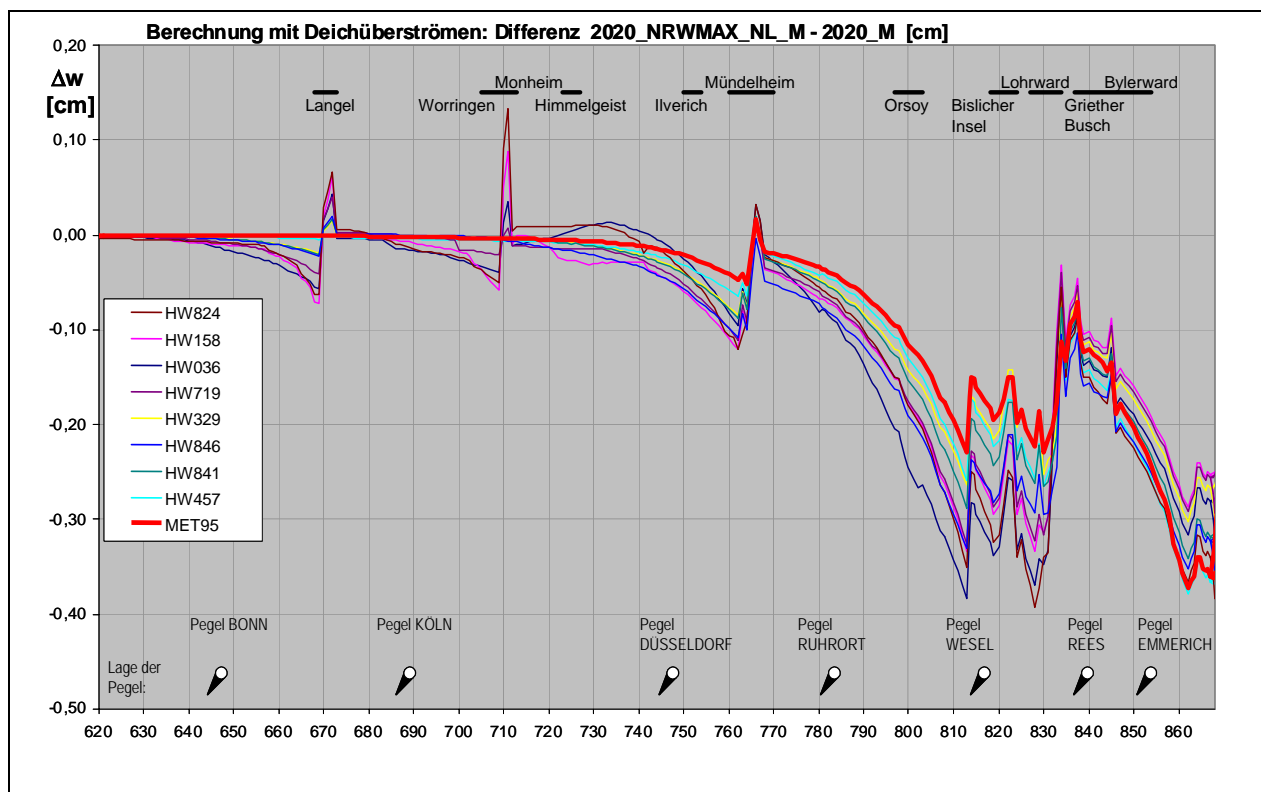


Abbildung 6-8: Wirkung der Maßnahmen auf Scheitelwasserstände, optimierter Zustand 2020 NRW und NL (Differenz Szenario 2020_NRWMAX_NL_M - 2020_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).

Auch der Einsatz zusätzlicher Rückhaltemaßnahmen unmittelbar unterhalb der Grenze auf niederländischem Gebiet (Ooijpolder und Rijnstrangen) lässt sich stromaufwärts bis zu Rhein-km 810 zurückverfolgen (Mehlig, 2004; Van der Veen et al., 2004b). Diese würden die Wirkung der wasserstandsreduzierenden Maßnahmen um bis zu 20 weitere cm im grenznahen Raum erhöhen.

Welche Relevanz dieser grenzüberschreitende Effekt der Maßnahmen in NRW und den Niederlanden hat, zeigt Abbildung 6-9. Hier wird deutlich, dass nicht nur die Maßnahmen in NRW mit einigen cm sondern besonders auch diejenigen in den Niederlanden mit 20 bis 30 cm Reduzierung des Scheitelwasserstandes einen wichtigen Beitrag liefern, um ein Überströmen der Hochwassermauer in Emmerich zu verhindern. Bei zusätzlichem Einsatz grenznaher Rückhaltemaßnahmen in den Niederlanden („PLUS-Szenarien“, vgl. Tabelle 3-5) ist mit einer weiteren Reduzierung der Scheitelwasserstände von 1- bis 20 cm zu rechnen. Maßnahmen in den Niederlanden können also auch einen Beitrag liefern, grenzüberschreitende Überflutungen hinter den Deichen zu verhindern.

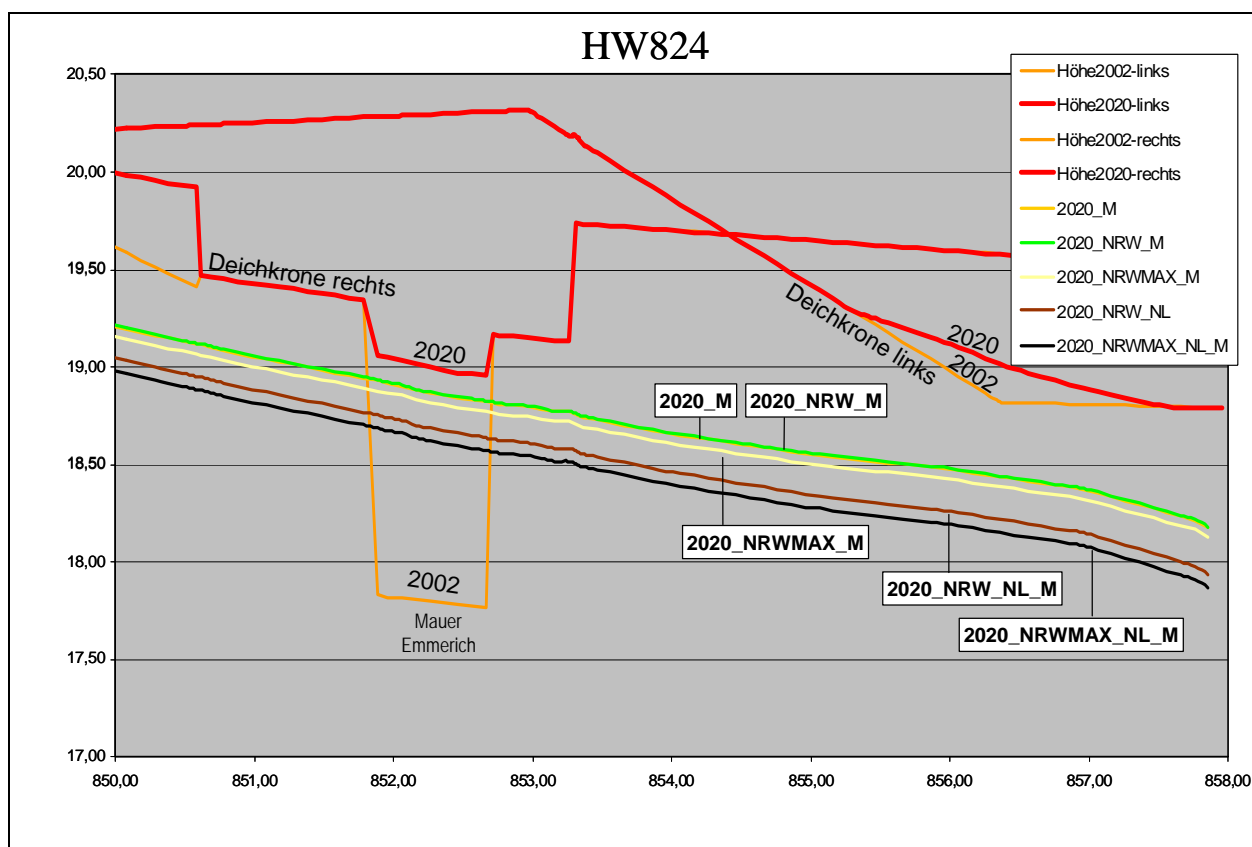


Abbildung 6-9: Deichhöhe und Scheitelwasserstände im grenznahen Bereich, HW824.

6.4 Bezug zum Aktionsplan Hochwasser der IKSR

Im Januar 1998 wurde von der 12. Rheinministerkonferenz der Aktionsplan Hochwasser der IKSR verabschiedet (IKSR, 1998). Eine der vier Zielsetzungen dieses Aktionsplans ist die Reduzierung der Hochwasserstände bei extremen Abflüssen um bis zu 70 cm. „Maßstab sind die hochwasser- und schadensmindernden Wirkungen für ein Spektrum von häufigen und seltenen

Hochwassern. Der Nachweis der Wirksamkeit der eingeleiteten und realisierten Schutz- und Vorsorgemaßnahmen erfolgt durch ein Kollektiv von Modellhochwassern, die das Hochwasserverhalten im Rheineinzugsgebiet nachbilden.“ (IKSR, 1998). Nicht näher erläutert wird, wo am Rhein die Wasserstandsreduzierung um bis zu 70 cm erreicht werden soll. Die Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins (IKSR, 1999), die dem Aktionsplan zu Grunde liegt, lässt den Schluss zu, dass diese Zahl für den Pegel Lobith gelten soll. Dabei wird zugrunde gelegt, dass Maßnahmen entlang des Niederrheins einen Beitrag von 10 bis 30 cm Wasserstandsreduzierung liefern können und Maßnahmen in den Niederlanden 10 bis 20 cm (IKSR, 1999).

Die in dieser Studie ermittelte grenzüberschreitende Gesamtwirkung von wasserstandsreduzierenden Maßnahmen in NRW und den Niederlanden erreicht mit bis zu 40 cm Werte, die auch in der Wirkungsabschätzung genannt werden.

Der im Aktionsplan Hochwasser genannte Vergleichshorizont ist das Jahr 1995. Deshalb müsste man streng genommen die Maßnahmenszenarien mit dem Szenario von 1995 (1995_M) vergleichen. Hierbei werden beim Vergleich mit dem Szenario 2020_NRW_M vor allem die unterschiedlichen Auswirkungen des Deichüberströmens sichtbar (Abbildung 6-10). Ursache sind die Deichverstärkungen und Lückenschließungen. Die Auswirkungen der Retentionsmaßnahmen selbst sind nicht erkennbar oder über diesen Weg separat nachzuweisen. Wegen der im Sinne einer Wasserstandsreduzierung besseren Wirkung der (noch nicht sanierten) Deiche im Bezugsjahr 1995 zeigt ein solcher Vergleich mit dem Bezugsjahr 2020 über weite Strecken eine Verschlechterung der Wasserstände. Die Wirkung der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen ist nicht mehr von denen der Überflutungen zu unterscheiden.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche der Szenarien man miteinander vergleichen muss, um den Nachweis der Wirksamkeit der Maßnahmen zu führen. Es muss sogar gefragt werden, ob der Effekt von Deichüberströmen/Deichbruch überhaupt berücksichtigt werden muss oder darf, oder ob nicht, wie bei den bisherigen Studien üblich, Berechnungen ohne Deichüberströmungen durchgeführt werden müssen. Dies würde jedoch zu Fehlinterpretationen bezüglich der Effektivität einzelner Polder führen: So ist ein für die örtlichen Belange gut eingerichteter Retentionspolder (z.B. um möglichst lange den Abfluss bzw. Wasserstand in einem bestimmten Gewässerabschnitt unter Bemessungsmaß zu halten) bei einer Berechnung ohne Überflutungen oberhalb u.U. „scheinbar“ unterdimensioniert, weil er bei Eintreten des Scheitelwertes eines extremen Hochwassers bereits voll ist. In der Wirklichkeit wird das Hochwasser jedoch durch Überflutungen oberhalb gekappt bzw. stark gedämpft und der Retentionspolder kann seine Wirkung doch noch entfalten.

Zum Nachweis der Wirksamkeit von wasserstandsreduzierenden Maßnahmen auf Einzugsgebieteniveau ist deshalb (unter anderem) zunächst einmal fest zu legen:

- Was ist ein „Kollektiv von Modellhochwassern mit einem Spektrum von häufigen und seltenen Hochwassern“?
- Was ist der Zeithorizont der Vergleichsbasis?
- Darf die Wirkung von Maßnahmen beschrieben werden, ohne Deichüberströmen zu berücksichtigen?
- Wie ist grundsätzlich mit möglichen Überflutungen und deren Wirkung auf Wasserstand und Abfluss umzugehen?

Das uneinheitliche Schutzniveau entlang des Rheins macht eine Beantwortung dieser Fragen schwierig.

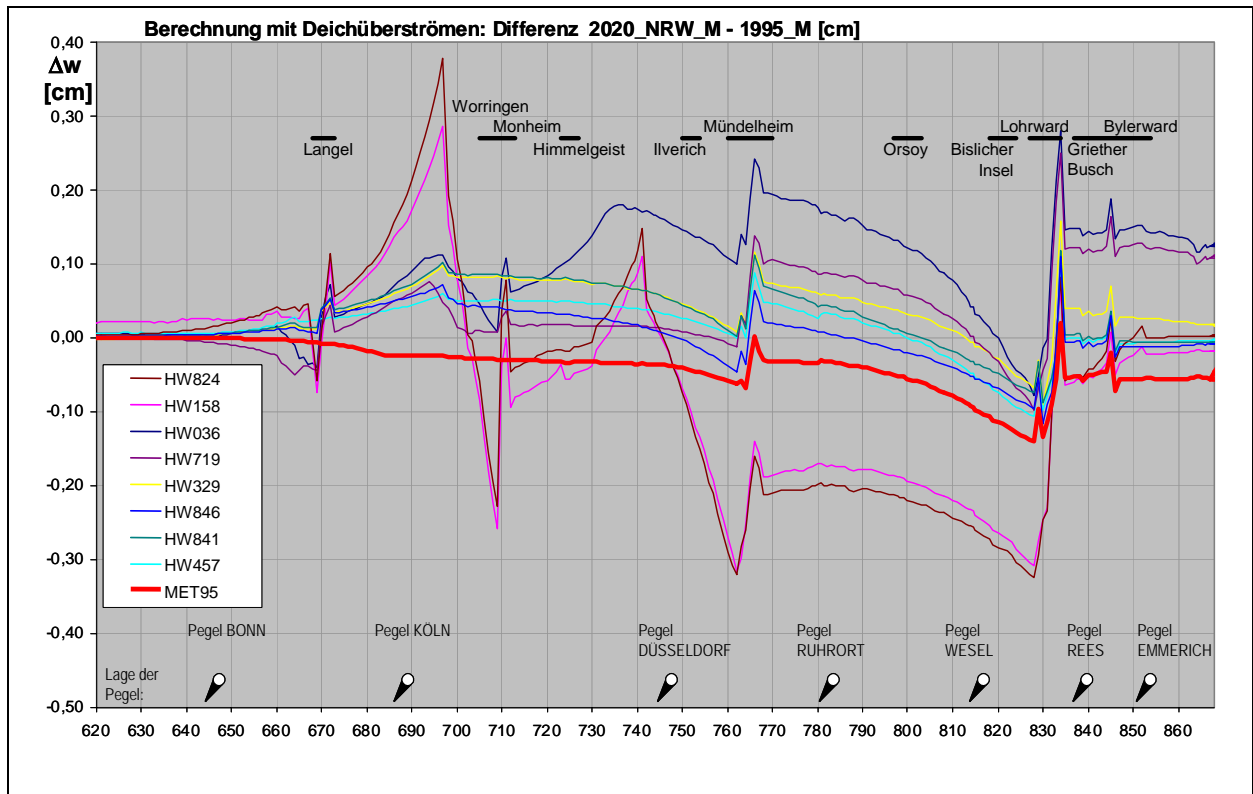


Abbildung 6-10: Veränderung der Scheitelwasserstände im Längsprofil geplanter Zustand NRW gegenüber Zustand 1995 (Differenz Szenario 2020_NRW_M – 1995_M). Die in der Legende genannten Hochwasser sind der Größe nach geordnet (nach Mehlig, 2004).

6.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Wirkung von Überflutungen

- Die Wirkung der Überflutungen auf Abflüsse und Wasserstände entlang des Niederrheins und der niederländischen Rheinbranche ist größer als die der Hochwasser reduzierenden Maßnahmen.
- Mit zunehmender Größe der Hochwasser nehmen die Überflutungen von "hochwassergeschützten" Gebieten zu. Dies führt zu immer größeren Wasserverlusten im Fluss und zur Reduzierung der Scheitelabflüsse.
- Durch die Anpassung der Hochwasserschutzanlagen auf das geforderte Schutzniveau, vor allem im Bereich bis Düsseldorf/Krefeld, werden die Scheitel höherer Extremhochwasser ($> HQ_{500}$) durch Überflutungen effektiver abgemindert als vor den Deichsanierungsmaßnahmen.

Wirkung Hochwasser reduzierender Maßnahmen auf Abflüsse und Wasserstände

- Die Wirkungen von Retentionspoldern auf Scheitelabflüsse sind stark vom Hochwasser abhängig. Deshalb muss die Zielsetzung ihrer Einsätze gut definiert werden und durch bauliche Maßnahmen (Ausprägung der Ein- und Auslaufbauwerke, Steuerung) dafür gesorgt werden, dass dieses Ziel erreicht werden kann.
- Deichrückverlegungen mit Erweiterung der Abflussquerschnitte bzw. durchströmte Polder mit eigenem Abflussanteil wirken sich durch die Vergrößerung der Fließquerschnitte vor allem vor Ort und nach oberhalb wasserstandsreduzierend aus. Unmittelbar unterhalb kann es sogar zu kleineren Wasserstandserhöhungen kommen, wenn der Übergang zur vorhandenen Deichlinie zu einer deutlichen Verengung des Profils führt. Dies sollte beim Anlegen solcher Maßnahmen unbedingt beachtet werden. Deichrückverlegungen ohne Erweiterungen der Abflussquerschnitte sind dagegen nur sehr lokal wirksam.
- Das System von Hochwasser reduzierenden Maßnahmen am Niederrhein zeigt nach der derzeitigen Planung seine größte Wirkung auf Hochwasser der Größenordnung des Ereignisses 1995. Durch eine zielgerichtete Abstimmung der Maßnahmen (vor allem der Retentionspolder) kann eine bessere Wirkung auf Hochwasser im Bereich der Bemessungsabflüsse erreicht werden.
- Die Kombination der Wirkung der geplanten Maßnahmen in den Niederlanden mit den Maßnahmen in NRW kann nach heutigem Planungsstand für die größeren der Extremhochwasser Wasserstandsverringerungen von bis zu 30 cm an der Grenze und bis zu 25 cm im Raum Bislich/Lohrwardt bewirken. Bei einer auf den Bemessungsabfluss abgestimmten Variante der Maßnahmen in NRW sowie einiger zusätzlichen Maßnahmen bei Orsoy und Bislich, wären sogar Wasserstandsabsenkungen von bis zu 40 cm an der Grenze und im Raum Bislich/Lohrwardt zu erreichen. An anderen Stellen ist die Reduzierung des Wasserstandes geringer.
- Die sich gegenseitig verstärkenden Wirkungen von Maßnahmen im Grenzbereich sind äußerst wichtig, um dem Überströmen der Hochwassermauer bei Emmerich bei Hochwassern im Bereich der Bemessungsabflüsse entgegen zu wirken. Da bei einem Überströmen dieser Hochwassermauer auch niederländisches Gebiet von Überflutungen betroffen wäre, macht dieses Beispiel den gegenseitigen Nutzen grenzüberschreitender Bemühungen im Hochwasserschutz deutlich.
- Wegen der grenzüberschreitenden Wirkung von wasserstandsvermindernden Maßnahmen ist eine Abstimmung zwischen den Planungen in NRW und in den Niederlanden für beide Seiten von Nutzen und sollte verstärkt Grundlage der gemeinsamen Anstrengungen auf dem Gebiet des Hochwasserschutzes sein.

7 Ganglinienform und Dauer des Hochwassers

Im allgemeinen wird davon ausgegangen, dass sich die Dauer eines Hochwasserereignisses durch gezielte Rückhaltemaßnahmen und (ungewollte) Überflutungen verlängert. Dies ist besonders wichtig in Bezug auf die Belastung der Deiche durch hohe Wasserstände.

Abbildung 7-1 zeigt unterschiedliche Ganglinien für unterschiedliche Szenarien. Die Ganglinien werden durch das Deichüberströmen deutlich abgeflacht und im abfallenden Ast verlängert. Je nach Abflussniveau verlängert sich das Hochwasser um bis zu einem halben Tag, maximal einen Tag. Ursache hierfür ist, dass durch die Überflutungen Wasser erst verzögert wieder in den Rhein gelangt. Die Abbildungen zeigen jedoch auch, dass deutlich mehr Volumen im Scheitelpunkt entzogen wird, als im ablaufenden Ast wieder hinzukommt. Dies ist dadurch zu erklären, dass ein großer Teil des Wassers nicht mehr in den Fluss zurückströmt, sondern hinter den Deichen verbleibt. In der Realität müsste man dieses Wasser durch gezielte Eingriffe in das System nach Ablauf des Hochwassers wieder dem Rhein zurückführen. Da dies aber erst nach Ablauf des Hochwassers geschehen würde, ist mit keiner weiteren Verlängerung der Hochwasserganglinie zu rechnen.

Die Hochwasser reduzierenden Maßnahmen haben einen vergleichbar geringen Einfluss auf die Ganglinien und spielen in Bezug auf die Verlängerung des Hochwassers keine Rolle.

Insgesamt ist die durch die Hochwasser reduzierenden Maßnahmen und vor allem durch die Überflutungen verursachte Verlängerung der Hochwasserwellen gering.

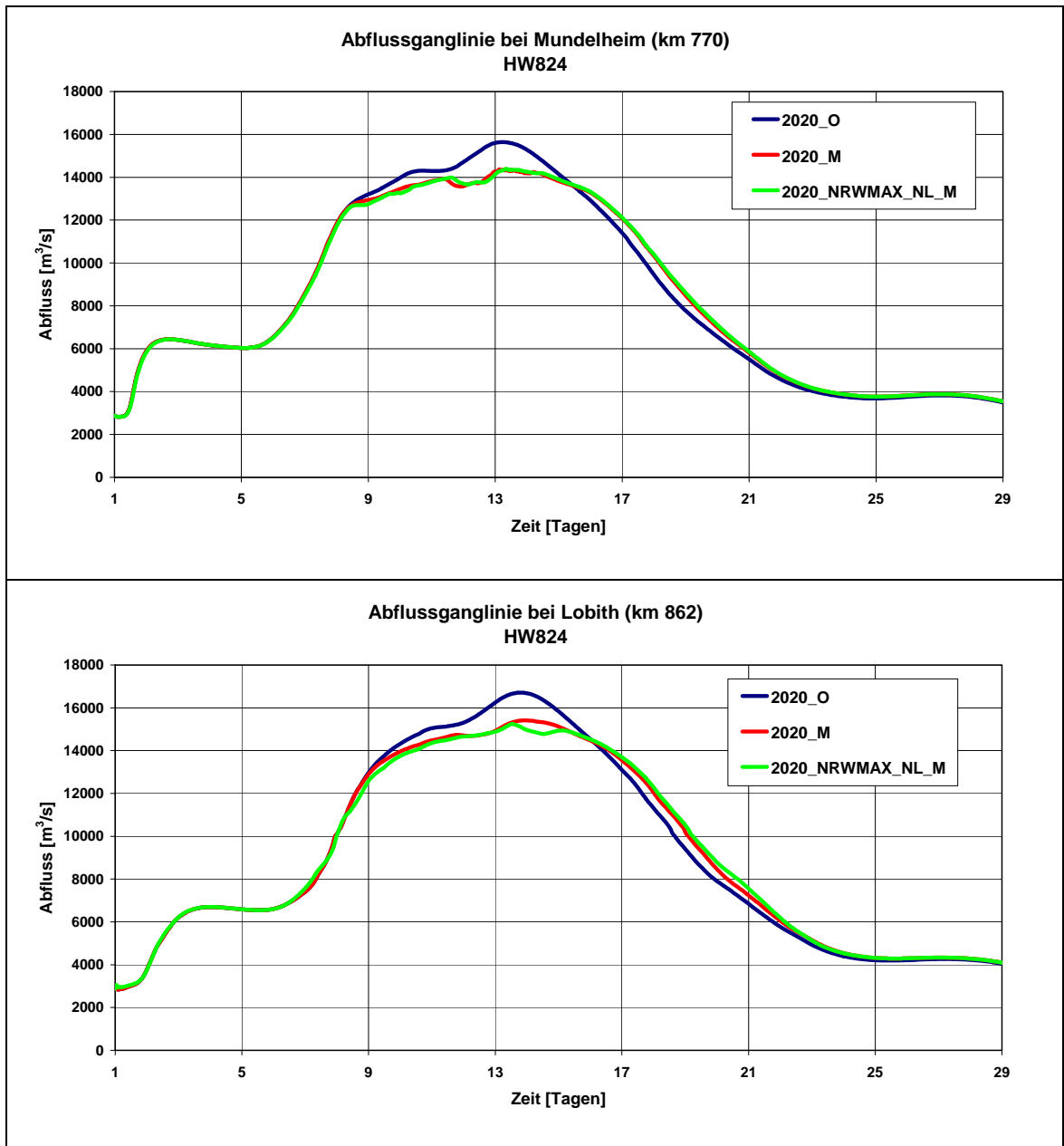


Abbildung 7-1: Einfluss der Überflutungen und Hochwasser reduzierenden Maßnahmen auf die Abflussganglinie (HW824).

8 Gespeicherte Wasservolumina

Einen Eindruck über die im Studiengebiet zur Verfügung stehenden Volumina hinter den Deichen und in den Retentionspoldern sowie bei den Berechnungen für den geplanten Zustand 2020 (Szenario 2020_NRW_NL_M) in Anspruch genommenen Volumina gibt Abbildung 8-1. Bei den hier dargestellten fünf größten Hochwassern wird erkennbar, dass mit steigenden Abflüssen auch zunehmend Wasser zurückgehalten wird.

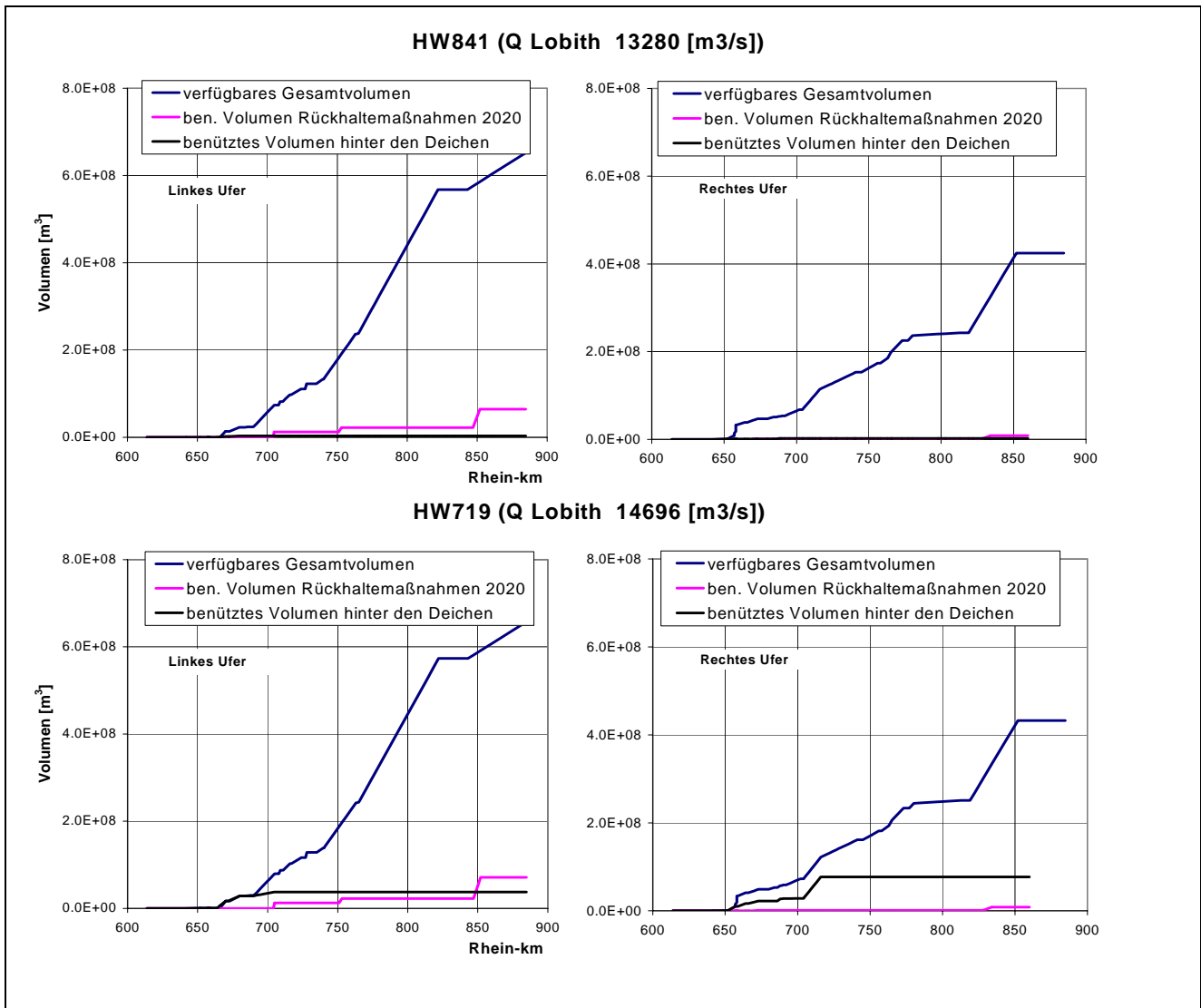


Abbildung 8-1: Hinter den Deichen und in Retentionspoldern gespeichertes sowie insgesamt zur Verfügung stehendes Volumen, Szenario 2020-NRW_NL_M, bei den fünf höchsten Hochwassern HW841, HW719, HW036, HW158 und HW824 (s. auch Abbildung 8-1 Fortsetzung).

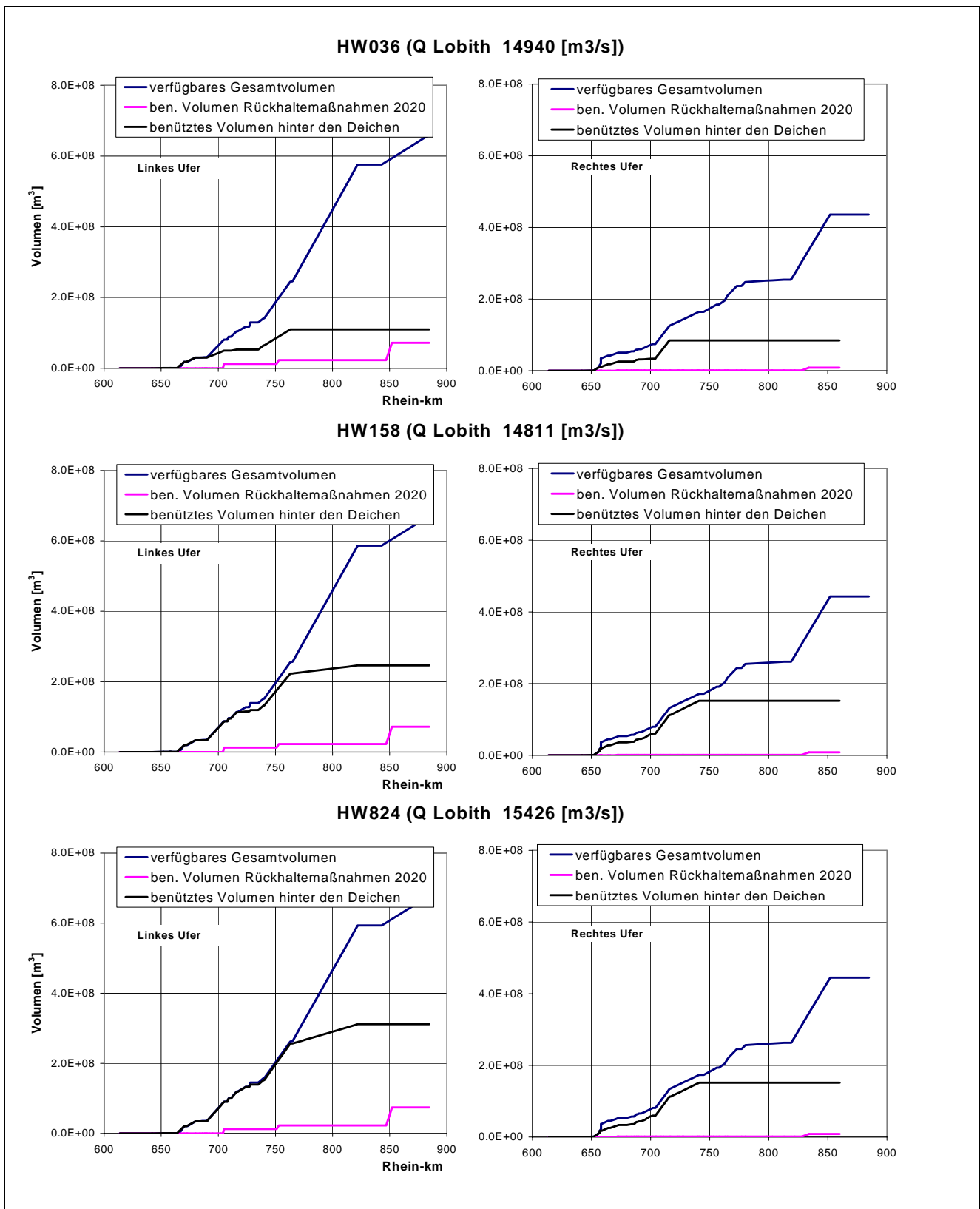


Abbildung 8-1 (Fortsetzung): Hinter den Deichen und in Retentionspoldern gespeichertes sowie insgesamt zur Verfügung stehendes Volumen, Szenario 2020-NRW_NL_M bei den fünf höchsten Hochwassern HW841, HW719 HW036, HW158 und HW824.

Bereits beim Hochwasser HW719 ist das Speichervolumen der Retentionspolder sowohl rechts- als auch linksrheinisch komplett gefüllt. Bei steigendem Hochwasser füllt sich auch das Volumen hinter den Deichen, zunächst im südlichen Bereich, später auch im mittleren Bereich. Bei Hochwasser HW824 ist linksrheinisch bis ca. Rhein-km 770 das Speichervolumen aufgebraucht, rechtsrheinisch bleibt jedoch im gesamten Bereich entlang des Niederrheins ein Restvolumen übrig.

Insgesamt ist das Volumen der Rückhaltemaßnahmen klein verglichen mit dem Rückhaltevolumen hinter den Deichen. Dies macht deutlich, dass es kaum möglich ist, Speichervolumen, das hinter den Deichen liegend dem Fluss als Überflutungsraum entzogen wurde durch gezielte Retentionsmaßnahmen zu kompensieren.

9 Was geschieht, wenn der Abfluss aus dem Rheineinzugsgebiet noch extremer wird?

9.1 Einleitung

Immer wieder wird gefragt, was passiert, wenn sich die Abflüsse aus dem Einzugsgebiet erhöhen sollten. Solche Abflusserhöhungen könnten die Folge von Klimaänderung sein aber auch durch andere Veränderungen im Einzugsgebiet (z.B. Erhöhung der Deiche am Oberrhein) verursacht werden.

Zunächst sollte geklärt werden, mit welchen Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf den Abfluss aus dem Rheineinzugsgebiet zu rechnen ist (Kapitel 9.2). Diese Frage konnte aus zeitlichen und methodischen Gründen jedoch nur qualitativ beantwortet werden. Ganglinien zur weiteren Berechnung der Auswirkungen auf den Abfluss und möglicher Überflutungen am Niederrhein und in den niederländischen Rheinweisen konnten nicht bereit gestellt werden.

Um dennoch eine Aussage über die Auswirkungen von noch höheren Abflüssen auf mögliches Überflutungsgeschehen am Niederrhein zu treffen, wurden die Berechnungsergebnisse für das noch extremere Hochwasser HW158 ohne Überflutungen am Oberrhein (HW158OhneDueb) eingehender analysiert. Die Auswirkungen auf das Überflutungsgeschehen werden in Kapitel 9.3 diskutiert, die Auswirkungen auf mögliche Abflussscheitelwerte sind in Kapitel 9.4 wiedergegeben.

9.2 Auswirkung möglicher Klimaänderungen auf den Abfluss aus dem Rheineinzugsgebiet

9.2.1 Globale Klimaänderung

Die seit geraumer Zeit beobachtete weltweite Erwärmung der bodennahen Luftschicht zeigt, dass wir uns in einer Phase globaler Klimaänderungen befinden. Statistische Analysen der Temperaturreihen aus den letzten 120 Jahren ergeben, dass der anthropogene Treibhauseffekt global gesehen wahrscheinlich eine Temperaturerhöhung von 0,6°C bis 0,8°C bewirkt hat (IPCC, 2001).

Basiert auf den Ergebnissen verschiedener GCMs (General Circulation Models) wird im dritten "Assessment Report" des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) folgendes prognostiziert (IPCC, 2001):

- Bei allen IPCC-Szenarien wird ein Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur sowie des Meeresspiegels erwartet.
- Im 21. Jahrhundert sind höhere Maximaltemperaturen und eine größere Anzahl heißer Tage über nahezu der gesamten Landfläche wahrscheinlich, weiterhin zunehmende kontinentale Trockenheit im Sommer. Damit verbunden sind ein höheres Dürrierisiko für die meisten kontinentalen Gebiete in den mittleren Breiten. Außerdem sind Niederschlagsereignisse mit größeren Intensitäten zu erwarten.
- Nach dem Jahr 2050 beginnen die GCMs unterschiedliche Klimatrends für die verschiedenen Szenarien anzuzeigen (Abbildung 9-1). Dies liegt u.a. darin begründet, dass den unterschiedlichen Szenarien unterschiedliche

Annahmen zugrunde liegen, wie die Menschheit den globalen Wandel bewältigen wird (unterschiedliche Szenarien von CO₂-Emissionen etc.).

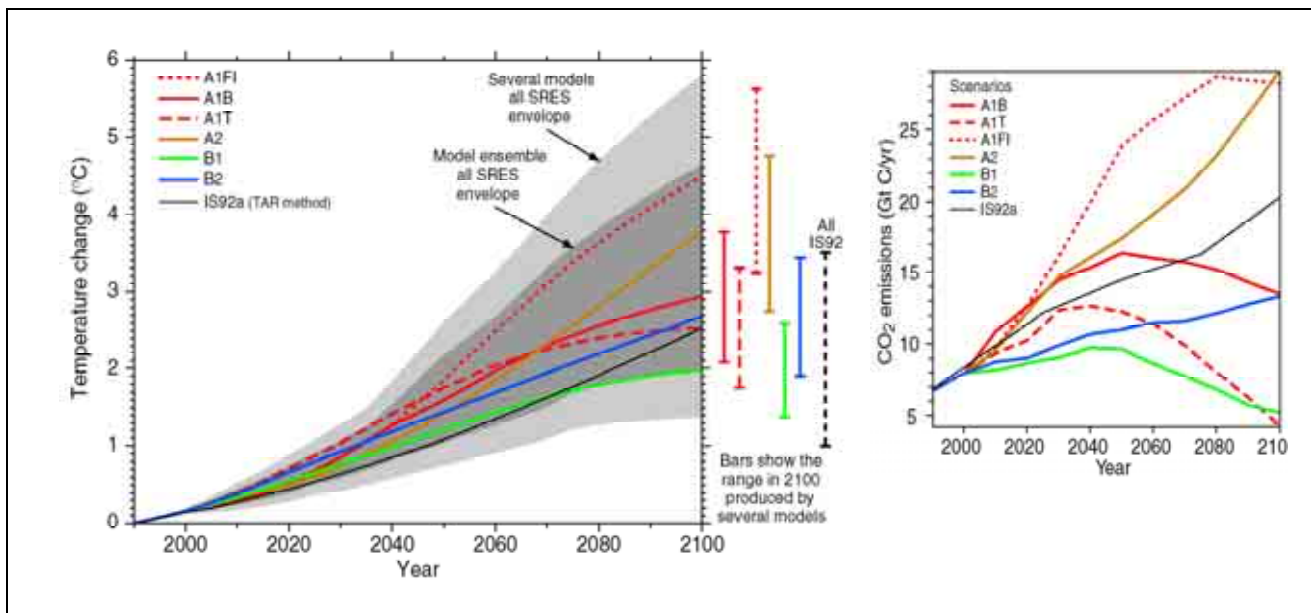


Abbildung 9-1: Vorhergesagte Trends der Lufttemperatur basierend auf verschiedenen Emissionsszenarien (Abbildung rechts) und Berechnungen mit unterschiedlichen GCMs (IPCC, 2001).

9.2.2 Bereits beobachtete Variabilität hydrometeorologischer und hydrologischer Größen im Rheineinzugsgebiet

Die Diskussion über mögliche Klimaänderungen war Anlass zu untersuchen, in wie weit sich Klimaänderungen bereits heute in hydrometeorologischen und hydrologischen Messreihen widerspiegeln. Der Kenntnisstand auf diesem Gebiet wurde auf einem von der internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) veranstalteten Workshop (Krahe, 2003) zusammengetragen. Die Ergebnisse für das Rheineinzugsgebiet lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Beobachtete Variabilität hydrometeorologischer Größen

- Deutliche Zunahme der Niederschlagshöhen im hydrologischen Winterhalbjahr.
- Zunahme der Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen im Winterhalbjahr und den Nassperioden.
- Stärkerer Anstieg der extremen Niederschläge als der Mittelwerte.
- Zunahme der Minimum-Lufttemperatur im Winter.
- Zunahme der Jahresmitteltemperaturen und der Monatsmitteltemperaturen, wobei die Monate August und Dezember besonders in Erscheinung treten.
- Moderate Zunahme der Anzahl der niederschlagsfreien Tage im Sommer.

Die im Winter (Monate Dezember bis Februar) bzw. im hydrologischen Winterhalbjahr festgestellten Temperaturzunahmen haben Konsequenzen für die Schneedeckenentwicklung und damit auf den Abfluss im Winterhalbjahr.

b) Abfluss

- Veränderung im Abflussverhalten der Flüsse mit natürlichem Abflussregime in den letzten Dekaden, insbesondere ist eine Zunahme der Abflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr zu verzeichnen.
- Änderungen in den Niederschlagshöhen sind in den Einzugsgebieten ohne signifikanten Speicheranteil hauptsächlich für die festgestellten Veränderungen im Abflussregime verantwortlich.
- In den Alpinen und Mittelgebirgseinzugsgebieten reagiert der Abfluss besonders empfindlich auf die Temperatur- und Niederschlagsänderungen.

9.2.3 Auswirkung globaler Klimaänderungen auf das Rheineinzugsgebiet

Regionale Klimaszenarien

Regionale Klimaszenarien werden aus den Ergebnissen der GCMs abgeleitet. Hierbei kommen verschiedene statistische Verfahren zum Einsatz oder höher aufgelöste regionale meteorologische Modelle, bei denen die Ergebnisse der GCMs als Randbedingungen aufgelegt werden.

Die wichtigsten Ergebnisse der Szenariorechnungen sind:

- Im Winter: eine Zunahme des Niederschlags über Nord- und Zentraleuropa.
- Im Sommer: eine Zunahme von Starkregenereignissen. Bezüglich des mittleren Niederschlags gibt es jedoch unterschiedliche Ergebnisse. Infolge der im Mittel höheren Temperaturen ist mit erhöhter Verdunstung und größerem Dürreerisiko zu rechnen.

Abflussszenarien

Für die Erstellung von Abflussszenarien werden die unter Annahme einer Klimaänderung simulierten Niederschläge als Eingangsdaten für hydrologische Modelle verwendet. Bei Verwendung von Ergebnissen regionaler Klimamodelle sind bisher häufig noch Korrekturen nötig, wenn die regionalen meteorologischen Verhältnisse nicht ausreichend genau modelliert werden können. Auch bei den hydrologischen Modellen muss man, insbesondere was die Modellierung von Extremereignissen angeht, mit größeren Unsicherheiten umgehen. Besser abgesichert sind Untersuchungen zu *Änderungen des mittleren Wasserdargebots oder des Abflussregimes* z.B. auf der Basis von Monatswerten (Kwadijk, 1993; Kleinn, 2002).

Von Kleinn (2002) wurde mit einem zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Klimamodell und anschließender hydrologischer Modellierung eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei wurde eine Temperaturzunahme von 2°C für die Antriebsfelder der regionalen Klimamodelle CHRM56 und CHRM14 angenommen. Abbildung 9-2 zeigt die resultierende Verschiebung des Abflussregimes des Rheins für einen 5-jährigen Simulationszeitraum. Die eingetretenen Veränderungen sind größtenteils durch geänderte Verhältnisse im Winterhalbjahr, mit insgesamt höheren Niederschlägen und einer durch die Temperaturzunahme bedingten geringeren Bindung von Niederschlag in der Schneedecke, begründet.

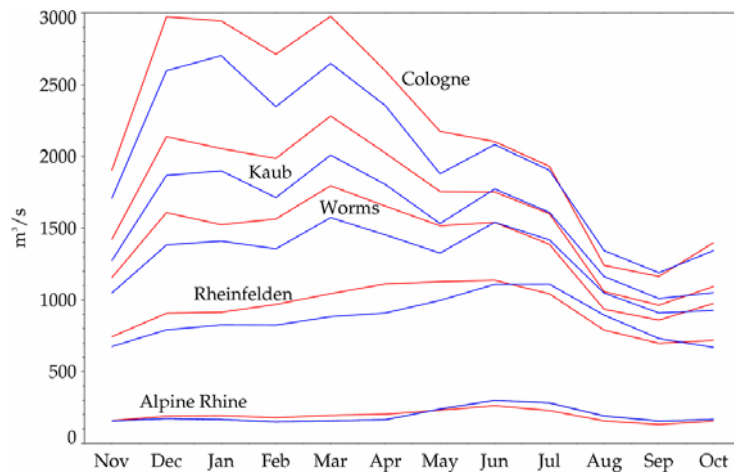


Abbildung 9-2: Änderung der Abflussregime entlang des Rheins bei einer um 2°C erhöhten Temperatur - Ist-Zustand in blau, Szenario in rot (Kleinn, 2002).

Die Antwort auf die Frage nach den Auswirkungen der Klimaänderungen auf die hydrologischen Extremereignisse und hier insbesondere auf Hochwasser stellt ein spezielles Problem dar und kann derzeit noch nicht gegeben werden. Als ein erster Schritt zur Klärung dieser Frage wurden im Rahmen des Projektes „Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein“ durch die BfG zunächst Gebietniederschläge für den Pegel Andernach untersucht, die als Ergebnisse des regionalen Klimamodells REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg vorlagen (Eberle et al., 2004). Analysiert wurden sowohl für das heutige Klima als auch für ein zukünftiges Klimaszenario die Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauerstufen und der jeweilige Vorregenindex API für je 30 Jahre. Die Häufigkeitsanalyse dieser Modellergebnisse zeigt deutlich, dass eine zunehmende Häufigkeit von langandauernden niederschlagsreichen Perioden erwartet werden muss.

Dass damit auch mit einer größeren Häufigkeit von Hochwasserereignissen zu rechnen ist, stützen die Regressionsanalysen der BfG. Hierbei wurde für die generierten Extremereignisse (vgl. Kapitel 4) der Zusammenhang zwischen Parametern des Gebietsniederschlags und der Scheitelhöhe des Abflusses untersucht (Eberle et al. 2004). Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Gebietsniederschlagshöhen verschiedener Dauerstufen und den Hochwasserscheiteln am Pegel Andernach sowie den Vorregenindizes der Gebietsniederschläge und den Hochwasserscheiteln bei Andernach.

Eine Aussage zu extremen Scheitelwerten in Folge einer Klimaänderung ist auf Basis der mit dem Modell REMO generierten 30 Jahresreihe Niederschlag unter veränderten Klimaverhältnissen nicht direkt möglich. Zur Beantwortung dieser Fragestellung müsste die Generierung extremer Ereignisse zumindest auch auf der Basis des Klimaszenarios abgearbeitet werden, also zunächst die Extrapolation auf 1000 Jahre mittels Niederschlagsgenerator, dann die Niederschlag-Abfluss-Modellierung und schließlich die Wellenablaufmodellierung mit Berücksichtigung von Deichüberströmungen.

Die Ergebnisse bezüglich der Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Abfluss im Rhein lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine Zunahme der Abflüsse des Rheins durch den Klimawandel im Winterhalbjahr ist zu erwarten.
- Für das Sommerhalbjahr sind die Ergebnisse weniger eindeutig. Eine Abnahme der Abflüsse scheint nicht unwahrscheinlich, da viele Szenarien von verminderten Niederschlägen ausgehen und höhere Temperaturen die Verdunstung verstärken.
- Insbesondere für Extremereignisse sind die Unsicherheiten bei der Abschätzung von Abflussänderungen infolge einer Klimaänderung extrem hoch. Eindeutig ist jedoch, dass mit einer zunehmenden Häufigkeit von langandauernden niederschlagsreichen Perioden gerechnet werden muss. Dies stützt die These, dass auch von einer Zunahme der Häufigkeit von extremen Hochwasserereignissen ausgegangen werden muss. Ob sich hierbei ein höherer extremer Abflussscheitelwert in Andernach ergibt als bisher, muss noch näher untersucht werden.

9.3 Überflutungen am Niederrhein bei noch extremeren Abflüssen

Aus methodischen Gründen konnte die Frage der Auswirkung möglicher Klimaänderungen auf die Abflüsse im Rheineinzugsgebiet nur qualitativ beantwortet werden (Kapitel 9.2). Um dennoch eine Aussage über die Auswirkungen von noch höheren Abflüssen auf mögliches Überflutungsgeschehen am Niederrhein zu treffen, wurden die Berechnungsergebnisse für das extreme Hochwasser HW158 ohne Überflutungen am Oberrhein (HW158ohneDueb) eingehender analysiert. Anlage 4- 7 zeigt die berechneten maximalen Wassertiefen für dieses extreme Ereignis. Im Vergleich zu den realistischeren Szenarien mit Überflutungen am Oberrhein (HW158mitDueb und HW824mitDueb) sind auf der gesamten Länge des Niederrheins deutlich mehr Gebiete betroffen (vgl. Anlage 4- 7 mit Anlage 4- 3). Im Zustand 1995_DB macht sich dies bis in den Raum Düsseldorf/Krefeld als deutlich breiteres Band von überfluteten Flächen beiderseits des Rheins bemerkbar. Ab Krefeld wird beim Extremhochwasser HW158ohneDueb linksrheinisch das gesamte durch Bergsenkung betroffene Gebiet bei Moers/Kamp-Lintfort bis Xanten durch Überflutungen heimgesucht. Das Wasser strömt rheinparallel sogar an Xanten vorbei bis in den Klever Raum und wird erst durch den alten Schlafdeich bei Kleve-Kellen daran gehindert, weiter bis in die Niederlande zu strömen. Der Banndeich verhindert schließlich ein Zurückströmen in den Rhein. Ein kleiner Wasserstrom bewegt sich auch in Richtung Niers, kann jedoch im berechneten Szenario die Wasserscheide ins Maaseinzugsgebiet nicht überschreiten. Auch die grenzüberschreitenden Überflutungen als Folge des Überströmens der Hochwassermauer bei Emmerich sind bei dem Hochwasser HW158ohneDueb ausgebreiteter und führen zu größeren Wassertiefen.

Im Zustand 2020_DB reichen die Überflutungen nur bis nach Xanten. Ein Weiterströmen bis in den Raum Kleve erfolgt nicht mehr. Auch der Abstrom in Richtung Niers ist weniger ausgeprägt. Ursache hierfür sind die Deicherhöhungen im Bereich der Deichbruchstellen oberhalb und bei Krefeld. Der Deich bricht später als im Zustand 1995_DB, weniger Wasser strömt ein und kann nicht wie im Zustand 1995_DB über Xanten hinaus in den Raum Kleve strömen. Im Zustand 2020_DB treten beim HW158ohneDueb in Emmerich sehr begrenzte Überflutungen auf. Hier wird die Hochwassermauer soeben überströmt.

Abbildung 9-3 gibt qualitativ einen Überblick über die Strömungsverhältnisse hinter den Hochwasserschutzanlagen.

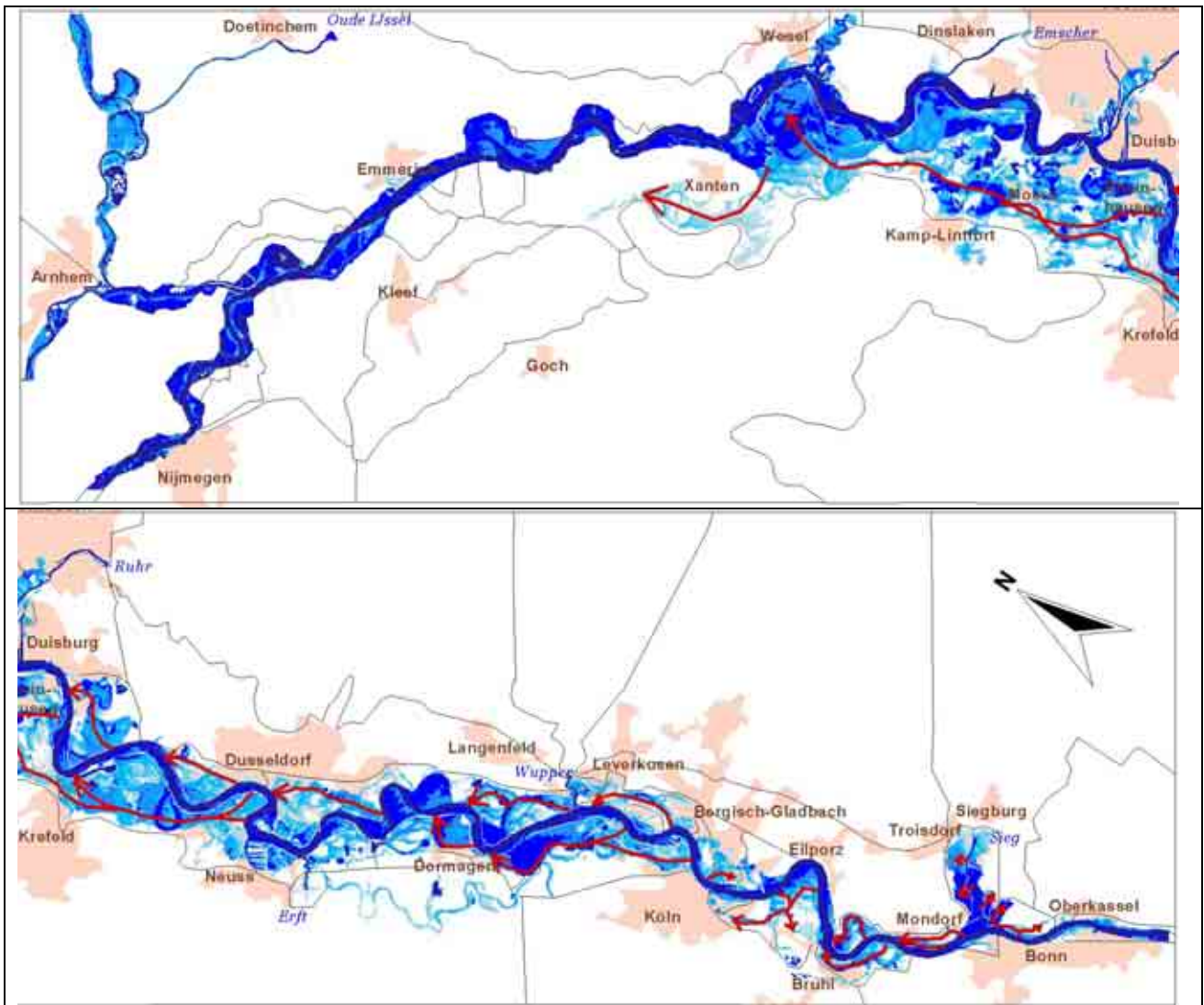


Abbildung 9-3: Fließwege hinter den Hochwasserschutzanlagen, Szenario 2020_DB HW158ohneDueb, qualitative Angaben.

9.4 Abflussscheitelwerte bei noch extremeren Abflüssen

Abflussscheitelwerte für noch extremere Abflüsse stehen aus den Berechnungen mit dem Hochwasser HW158ohneDueb sowohl für die 1D-Modellierung (SOBEK/DSS) als auch für die 2D-Berechnungen (Delft-FLS) zur Verfügung.

Abbildung 9-4 zeigt die durch SOBEK errechneten Scheitelabflüsse im Rhein (Abfluss im Flussschlauch zwischen den Deichen sowie Gesamtabfluss resultierend aus Abfluss im Flussschlauch und jene Abflüsse hinter den Deichen, die wieder in den Rhein zurück strömen). Gegenüber den Hochwassern mit Deichüberströmen am Oberrhein hat der Umfang der rheinparallelen Abflüsse, die wieder in den Rhein zurück fließen, zugenommen. Auch ist die davon betroffene Flussstrecke deutlich größer geworden. Insgesamt hat sich von Andernach bis nach Lobith trotz Zuflüssen aus den Nebenflüssen der Scheitelabfluss als Folge der Überflutungen verringert. Im Zustand 1995 liegt dieser Abfluss bei Rees bei 16300 m³/s und wird durch die Überflutungen bei Emmerich auf 15800 m³/s gedämpft. Im Zustand 2020 erreicht der Scheitelwert bei Rees 16600 m³/s und wird bis Lobith nicht weiter gedämpft.

Weitere Scheitelwerte sind der Tabelle 9-1 zu entnehmen. Hier sind auch die entsprechenden Ergebnisse von Delft-FLS wiedergegeben. Sie liegen in der gleichen Größenordnung.

Tabelle 9-1: Scheitelwerte noch extremerer Abflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins.

Station	SOBEK		Delft-FLS	
	Qf (Qg falls von Qf verschieden)		Q (entspricht Qf in SOBEK)	
	1995_M	2020_M	1995_DB	2020_DB
Andernach	17822	17822		
Bonn	17848	17848		
Köln	18049	18019	18146	18117
Düsseldorf	14765 (16431)	15347 (16876)	15331	15286
Ruhrort	16258	16729	16171	16215
Wesel	16113	16547	16387	16371
Rees	16304	16671		
Emmerich	16291	16641		
Lobith	15812	16571	15787	16318

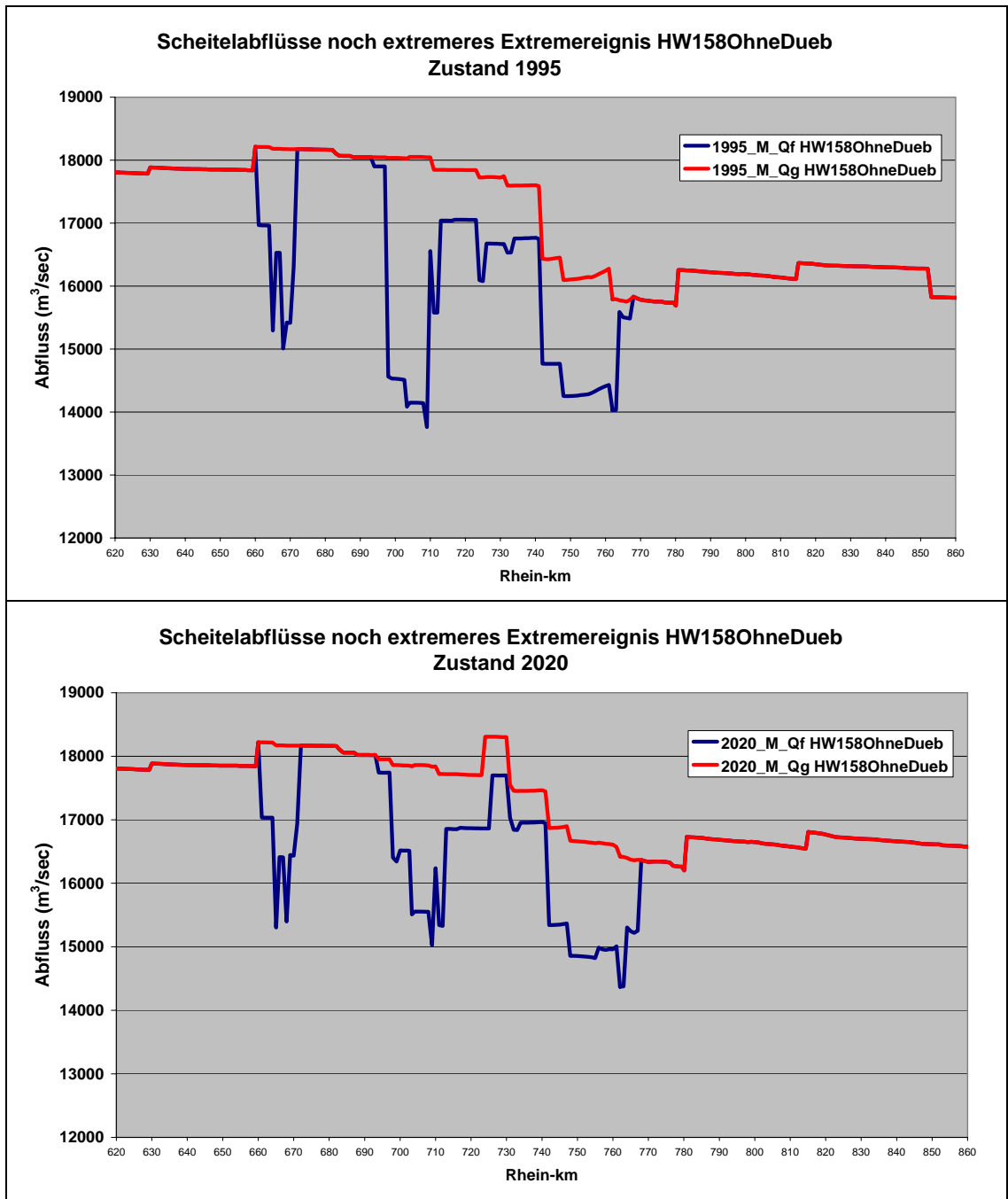


Abbildung 9-4: Entwicklung der Scheitelabflüsse entlang des Rheins, noch extremeres Extremhochwasser HW158ohneDueb.

10 Abflusskapazität und kritischer Abfluss

Auf der Grundlage des Bemessungsabflusses und zusätzlicher Abflüsse im Freibordbereich erfolgte in Kapitel 2.3 eine Abschätzung der Abflusskapazitäten des Rheins im Studiengebiet sowohl für die heutige als auch die zukünftige Höhe der Hochwasserschutzanlagen (Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5).

Die Ergebnisse der in dieser Studie durchgeführten Berechnungen ermöglichen es nicht, über die gesamte Flussstrecke eine Abflusskapazität anzugeben. Dies liegt darin begründet, dass bei Überströmen einer Schutzanlage der Abflussscheitel so gedämpft werden kann, dass weiter unterhalb die Abflusskapazität nicht mehr erreicht wird. Als Ergebnis der Berechnungen kann jedoch punktuell angegeben werden, bei welchen Abflüssen es zum Überströmen der Hochwasserschutzanlagen gekommen ist. Im folgenden soll deshalb indikativ geschaut werden, inwieweit diese im folgenden „kritische Abflüsse“ genannten Abflüsse von den Schätzungen der Abflusskapazität in Kapitel 2.3 abweichen.

Abbildung 10-1 zeigt die durch die Modelle Delft-FLS und SOBEK/DSS bei unterschiedlichen Szenarien ermittelten kritischen Abflüsse und die aus den Bemessungsabflüssen abgeschätzten Abflusskapazitäten (Zustand 2020). Es zeigt sich eine Punktwolke, die sowohl für 1995 als auch für 2020 vor allem im Bereich bis Rhein-km 710 deutlich von den geschätzten Kapazitäten abweicht. Ursache hierfür ist, dass es sich hier zum Teil um Überströmungen von höher gelegenem Gebiet handelt sowie um Hochwasserschutzanlagen (meist Mauern und mobile Einheiten) mit einem Freibord von 10 bis 20 cm. Da bei den Schätzungen in Kapitel 2.3 davon ausgegangen wird, dass bei Mauern ein Freibord von 50 cm eingehalten wird, ist diese häufig zu hoch angesetzt. Im darauf folgenden Flussabschnitt zwischen ca. Rhein-km 720 bis 770 liegen die kritischen Abflüsse zwischen den geschätzten Abflusskapazitäten unter Einhaltung eines Freibords von 0,5 m bzw. 1 m. Betrachtet man die in Anlage 1- 3 abgebildeten Deichhöhen für diese Strecke, so wird deutlich, dass die Höhe der Hochwasserschutzanlagen (minus Freibord) in diesem Bereich im heutigen Zustand das angestrebte Schutzniveau von HQ_{200} über große Strecken unterschreitet. In Zukunft (Situation 2020) wird ein Teil der Anlagen auf das angestrebte Schutzniveau angehoben. Dies spiegelt sich z.T. in den kritischen Abflüssen in Abbildung 10-1 darin wieder, dass diese in 2020 höher sind als 1995/2002.

Die beiden im Bereich Rhein-km 770 bis 780 eingetragenen kritischen Abflüsse treten an Deichbruchstellen im Bereich der Ruhrmündung auf. Bei dem kritischen Abfluss bei Rhein-km 802 handelt es sich um Hochuferbereiche (Anlage 1-1).

Im letzten Abschnitt schließlich begannen bei den Berechnungen mit dem Extremhochwasser HW158 mit Dueb für den Zustand 1995 bei Rhein-km 840 bis 850 auf der linken Flussseite 2 kleinere Deichüberflutungen. Durch die Deichsanierungsmaßnahmen sind die kritischen Abflüsse jedoch so hoch, dass Überflutungen nicht mehr berechnet wurden. Schließlich wird deutlich, dass sich auch die kritischen Abflüsse bei Emmerich durch den Bau der dortigen Hochwassermauer im Zustand 2020 auf das gewünschte Maß erhöhen.

Vergleicht man die lokal auftretenden kritischen Abflüsse verschiedener Szenarien miteinander, so zeigt sich, dass die hochwasservermindernden Maßnahmen z.T. auch die kritischen Abflüsse beeinflussen. Am deutlichsten wird dies für das Bezugsjahr 2020 bei Emmerich. So sind die kritischen Abflüsse

für alle Szenarien mit Maßnahmen in den Niederlanden deutlich höher als die entsprechenden Szenarien ohne Maßnahmen.

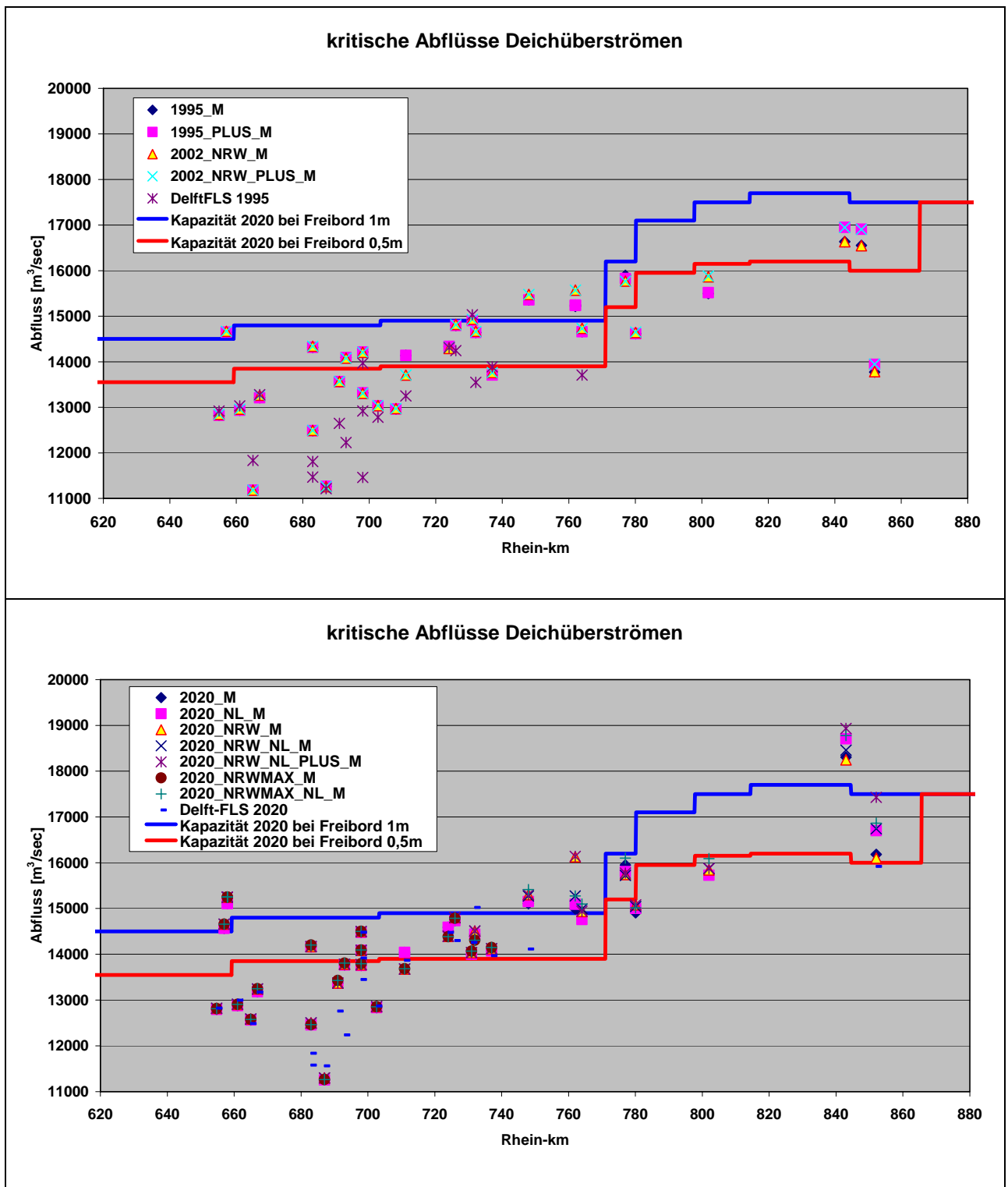


Abbildung 10-1: Kritische Abflüsse und aus den Bemessungsabflüssen geschätzte Abflusskapazität (Zustand 2020).

11 Genauigkeit der Ergebnisse

11.1 Vorbemerkung

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchung sind auf Berechnungen mit nacheinander geschalteten und miteinander gekoppelten statistischen und numerischen Modellen basiert:

- Niederschlagsgenerator
- Niederschlag-Abflussmodell HBV
- Wellenablaufmodell SYNHP bis Maxau
- Wellenablaufmodell SOBEK bis Andernach (Lobith)
- Überflutungsmodell Delft-FLS
- Wellenablauf SOBEK/DSS

Die Ergebnisse eines jeden Modells weisen eine Genauigkeit auf, die durch die gewählten Modellparameter und Randbedingungen bestimmt wird. Im folgenden soll auf einige Aspekte eingegangen werden, um einzuschätzen, mit welcher Bandbreite von Genauigkeit die Ergebnisse betrachtet werden müssen.

Zunächst geht es um die Ergebnisse bei Andernach (Kapitel 11.2). Hierbei ist zunächst zu berücksichtigen, dass zur Ermittlung der Abflüsse bei Andernach eine Modellkette von vier Einzelmodellen zum Einsatz kam: Niederschlagsgenerator, Niederschlag-Abflussmodell und zwei Wellenablaufmodelle. Darüber hinaus wurde mit einem vereinfachten Ansatz zur Berücksichtigung von Überflutungen als Folge von Deichüberströmen gerechnet.

Danach wird der Einfluss der für die Modellierung gewählten Randbedingungen (Abfluss bei Andernach, Zuflüsse aus den Nebenflüssen, Einfluss des Grundwassers, Anstieg des Meeresspiegels, morphologische Entwicklung des Flussbettes) diskutiert und abgeschätzt (Kapitel 11.3 bis 11.7). Für den Einfluss der Modellparameter auf die Ergebnisse der 1D-Berechnungen sei auf Van der Veen et al. (2004b) verwiesen.

Auch die Entscheidung, ob es beim Überströmen von Deichen zu Deichbruch kommt oder nicht, hat Einfluss auf die Ergebnisse. Dies ist Gegenstand von Kapitel 11.8.

Abschließend werden für ausgesuchte Punkte am Niederrhein die vom 2D-Modell Delft-FLS berechneten Scheitelwerte der Abflüsse zwischen den Deichen verglichen mit denen des 1D-Modells SOBEK (Kapitel 11.9).

Kapitel 11.10 fasst die wichtigsten Punkte des Kapitels 11 zusammen.

11.2 Genauigkeit der berechneten Abflüsse bei Andernach

11.2.1 Gebrauch unterschiedlicher Modelle

Zur Ermittlung der extremen Abflüsse bei Andernach durch die BfG kamen vier Modelle zum Einsatz: Niederschlagsgenerator, Niederschlag-Abflussmodell und zwei Wellenablaufmodelle. Erste Ergebnisse für Andernach ergeben sich zunächst aus der Kopplung von Niederschlagsgenerator und Niederschlag-Abfluss-Modellierung, im folgenden „hydrologische Modellierung HBV“ genannt. Bei diesen Berechnungen kann der Einfluss von

Rückhaltemaßnahmen und Deichüberströmungen am Oberrhein nicht berücksichtigt werden, so dass in einem weiteren Schritt das Niederschlag-Abflussmodell mit den zwei Wellenablaufmodellen SYNHP und SOBEK gekoppelte wurden. Dies wird im folgenden „hydrologisch/hydraulische Modellierung“ genannt. Wie Tabelle 11-1 zeigt, ergibt die Modellkopplung der BfG aus hydrologischem und hydraulischem Modell 4 bis 14% höhere Abflussscheitel als die alleinige hydrologische Modellierung. Untersuchungen der BfG ergaben anhand historischer Abflussganglinien, dass die hydrologisch/hydraulische Modellkopplung tendenziell zu höheren Abflüssen führt, als aus den Niederschlagsfeldern zu erwarten ist (Eberle et al., 2004). Für die prinzipielle Untersuchung, was geschieht, wenn extreme Abflüsse am Niederrhein auftreten, kann diese Unsicherheit in Kauf genommen werden. Es kann jedoch die Wiederkehrwahrscheinlichkeit der untersuchten Hochwasser nicht eindeutig bestimmt werden. Insgesamt ist mit einer Überschätzung der Abflüsse bei Andernach zu rechnen.

Tabelle 11-1: Unterschiedliche Ergebnisse durch unterschiedliche Modelle. Alle Berechnungen ohne Deichüberströmen am Oberrhein und Niederrhein.

Modell- hoch- wasser	Hydrologische und hydrologisch-hydraulische Modellierung BfG		
	Scheitelabfluss Hydrologische Modellierung HBV (BfG) [m ³ /s]	Scheitelabfluss Hydrologische / hydraulische Modellierung (BfG) [m ³ /s]	Scheitelabfluss Differenz [%]
	Andernach	Andernach	Andernach
HW036	15087	15956	5,8
HW158	16894	17822	5,5
HW329	11590	12362	6,7
HW457	12461	14157	13,6
HW719	15354	16135	5,1
HW824	15071	15757	4,5
HW841	12691	13677	7,8
HW846	13173	14176	7,6

11.2.2 Vereinfachter Ansatz zur Berechnung von Überflutungen am Oberrhein

Im Gegensatz zu den Berechnungen am Niederrhein wurden für den Oberrhein mögliche Überflutungen sehr vereinfacht dargestellt. So können Phänomene wie Deichbruch als Folge von Deichüberströmen und flussparalleles Fließen hinter dem Deich nicht berücksichtigt werden. Ob dies zu einer Über- oder Unterschätzung des Abflusses bei Andernach führt, ist nicht bestimmbar (vgl. hierzu auch Kapitel 5 und 11.8).

Darüber hinaus wurde angenommen, dass der Freibord am gesamten Ober- und Mittelrhein 1 m beträgt und dadurch ein Abfluss von 300 m³/s mehr als der Bemessungsabfluss abgeführt werden kann (vgl. Kapitel 2.3.1, Eberle et al., 2004). Nach Dijkman et al. (2003) dürfte örtlichen Abflusskurven folgend die zusätzliche Abflussmenge vielerorts bei 1000 m³/s liegen, sodass die 300 m³/s eine Untergrenze darstellen. Wie sich eine Erhöhung der Abflusskapazität jedoch auswirkt, ist schwierig zu sagen, da diese dazu führen könnte, dass mehr Wasser nach Andernach gelangt. Es kann aber auch bedeuten, dass Abflussscheitel effektiver gekappt und somit die Scheitelwerte bei Andernach niedriger werden, Effekte, die in Kapitel 5 und 11.8 auch für den Niederrhein beschrieben werden.

11.3 Wirkung Variierung der Abflüsse bei Andernach auf die weiteren Ergebnisse für den Niederrhein und die Rheinzweige

Zur Abschätzung, wie sich veränderte Abflüsse bei Andernach auf die Abflüsse am Niederrhein auswirken, wurden für den Zustand 1995_O mit SOBEK Berechnungen durchgeführt, bei denen die neun Abflüsse der Extremhochwasser (Zustand OR-2002 mit Deichüberströmen am Oberrhein) um 5% erniedrigt, um 5% erhöht, um 100% gestaut bzw. um 100% gestreckt wurden (d.h. die gesamten Hochwasser liefen in der Hälfte der Zeit bzw. über einen doppelt so langen Zeitraum ab und wurden damit steiler bzw. flacher).

Insgesamt kommt dem Abfluss bei Andernach eine hohe Bedeutung bei der Abschätzung extremer Abflüsse am Niederrhein zu. 5% mehr oder weniger Abfluss bei Andernach führt zu 500 bis 750 m³/s mehr oder weniger Abfluss am Niederrhein. Steile Ganglinien werden dabei stärker abgeflacht als flache. Weitere Ausführungen finden sich bei Van der Veen et al. (2004b).

11.4 Wirkung Variierung der Zuflüsse aus den Nebenflüssen

Ähnlich wie für die Abflüsse bei Andernach wurden mit SOBEK für den Zustand 1995_O Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Zuflüsse der Nebenflüsse nur in Deutschland, nur in den Niederlanden und sowohl in Deutschland als auch in den Niederlanden verändert wurden (Van der Veen et al., 2004b). Hierbei wurden die Abflüsse der Nebenflüsse um 10% vermindert, um 10% erhöht sowie die Originalganglinien um 24 Stunden zeitlich nach vorne bzw. nach hinten verschoben, so dass die Scheitel der Nebenflüsse um einen Tag eher bzw. später eintreffen.

Die Veränderungen der Abflüsse der niederländischen Rheinnebenflüsse sind vernachlässigbar klein, während die Veränderungen für die Abflüsse aus den deutschen Nebenflüssen deutlich größer sind und grob ein Drittel der Effekte ausmachen, die durch die 5% Abflusserhöhung bzw. -erniedrigung bei Andernach erzielt werden.

Ein früheres Eintreffen der Hochwasserwellen aus den Nebenflüssen führt im Mittel zu einer Erniedrigung der Scheitelwerte im Rhein, eine Verzögerung zu einer Erhöhung der Scheitelwerte. Das liegt darin begründet, dass die Hochwasserscheitel der Nebenflüsse am Niederrhein um 2-3 Tage vor dem Scheitelwert im Rhein auftreten. Eine Verzögerung des Hochwasserablaufs in den Nebenflüssen etwa durch Rückhaltmaßnahmen könnte demnach auch negative Folgen für die Hochwasser im Rhein haben. Da solche Maßnahmen sich jedoch meist auch dämpfend auf die Scheitelwerte auswirken, dürften mögliche negative Effekte für den Scheitel im Rhein durch Wellenverzögerung durch diese positiven Effekte kompensiert werden. Je nach Hochwasser werden hierbei Wirkungen von bis zu 40% der Wirkung erreicht, die mit einer 5% Erhöhung bzw. Erniedrigung der Abflüsse bei Andernach erzielt wurden.

Insgesamt ist eine gute Abschätzung der Abflüsse bei Andernach von größerer Bedeutung als die der Nebenflüsse am Niederrhein und in den Niederlanden.

11.5 Vernachlässigung des Grundwassers

Bei der Berechnung mit SOBEK bzw. mit dem DSS wird der Austausch von Wasser zwischen dem Fluss und dem Grundwasserkörper berücksichtigt. Van

der Veen et al. (2004b) zeigen, dass dies nötig ist, da sonst die Abflussscheitel überschätzt werden.

11.6 Auswirkung eines möglichen Anstiegs des Meeresspiegels.

Eine mögliche Veränderung des Meeresspiegels beispielsweise als Folge einer Klimaänderung wurde durch Variierung des unteren Modellrandes von SOBEK untersucht. Anstiege des Meeresspiegels von bis zu 75 cm haben demnach keinen Einfluss auf die Scheitelwerte im Studiengebiet (Van der Veen et al., 2004b).

11.7 Auswirkung morphologischer Entwicklung des Rheinhauptgerinnes

Sowohl das 2D als auch das 1D-Modell verwenden den Gerinnezustand des Rheins von 1995. Durch die Vorgänge der Erosion und Sedimentation unterliegt das Hauptgerinne des Rheins jedoch einer morphologischen Entwicklung, die in den Modellen nicht berücksichtigt wird. Aus Abbildung 11-1 geht hervor, dass sich der Rhein im Studiengebiet über große Bereiche eintieft.

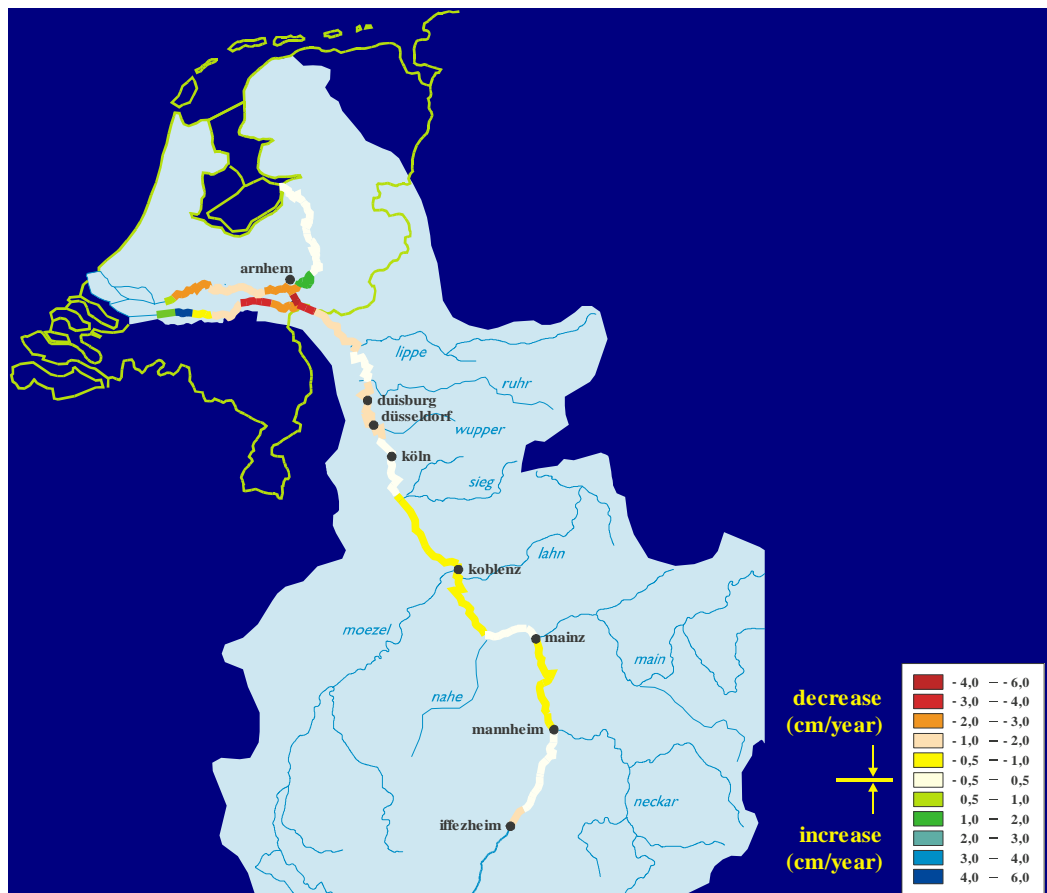


Abbildung 11-1: Morphologische Entwicklung des Rheinhauptgerinnes (aus: Silva et al., 2001).

Da die Erosion im Waal geringer ist als im Pannerdensch Kanaal, wirkt sich dies nach Van der Veen et al. (2004b) auf die Abflussverteilung zu Ungunsten des Waal aus. Die größten Veränderungen im Wasserstand sind in den Bereich unterhalb Köln bis zu die Rheinzweigen zu beobachten. Bei Düsseldorf können sich beispielsweise innerhalb von 25 Jahren Wasserstandssenkungen von 16 bis 32 cm ergeben, was einer Erhöhung der Abflusskapazität um 300 bis 600 m³/s entspricht. Bis 2020 kann sich demnach alleine durch die Vorgänge der Erosion im Sommerbett die Abflusskapazität zwischen den Deichen erhöhen. Dies sollte bei der Beurteilung der Modellgenauigkeit berücksichtigt werden.

11.8 Wirkung der Annahme Deichüberströmen mit oder ohne Deichbruch

11.8.1 Umfang der Überflutungen

Wichtige Annahme bei den Berechnungen ist, dass Deiche brechen, wenn sie überströmt werden. Eine Einschätzung, welchen Einfluss diese Annahme auf die Ergebnisse hat, kann durch den direkten Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen mit Deichbruch (Szenario 1995_DB bzw. 2020_DB) mit den Berechnungen unter Annahme von Deichüberströmen (Szenario 1995_DÜ bzw. 2020_DÜ) erfolgen.

- **Realistische Extremhochwasser (mit Deichüberströmen am Oberrhein)**

Anlage 4- 9 ermöglicht einen solchen Vergleich für das HW824 und den Zustand 1995. Hieraus geht hervor, dass bis in den Bereich Dormagen der Umfang der betroffenen Gebiete gleich bleibt. Dies liegt daran, dass in diesem Bereich keine Deichbrüche stattfinden, da nur Hochwassermauern und Hochuferbereiche überströmt werden. Ab Düsseldorf/Neuß jedoch sind im Szenario 1995_DÜ die Gebiete, die durch Überflutungen betroffen sind, kleiner als bei den Berechnungen mit Deichbruch (Szenario 1995_DB). Ursache hierfür ist die Tatsache, dass im Falle eines Deichbruches deutlich mehr Wasser in die durch Deiche geschützten Polder einströmen kann. Besonders deutlich wird dies im Bereich Krefeld/Moers/Kamp-Lintfort. Erst im Szenario mit Deichbruch kann Wasser bei Krefeld vorbei nach Moers und Kamp-Lintfort strömen, während dieser Bereich im Falle, dass die Deiche stehen bleiben, von Überflutungen verschont bleibt.

Welche Auswirkungen dies auf die erreichten Wassertiefen der überfluteten Gebiete hat, zeigt Anlage 4- 10. Bis in die Höhe von Leverkusen/Dormagen ändert sich praktisch nichts, während sich linksrheinisch ab Neuß und rechtsrheinisch oberhalb von Düsseldorf im Szenario mit Deichbruch als Folge von Deichüberströmen aus den bereits genannten Gründen deutlich höhere Wassertiefen einstellen. Es gibt jedoch auch Bereiche wie beispielsweise bei Dormagen (Gebiete O_021 und O_022), wo die Wassertiefe im Szenario mit Deichbruch kleiner ist, obwohl in diesen Bereichen kein Deichbruch vorkommt. Dies wird dadurch hervorgerufen, dass sich der Wasserspiegel im Rhein durch die Deichbrüche weiter unterhalb absenkt und als Folge davon weniger Wasser in die hochwassergeschützten Bereiche (O_021 und O_022) einströmt.

Qualitativ die gleichen Aussagen lassen sich für das HW824 für den Zustand 2020 (Szenarien 2020_DÜ und 2020_DB) und für das HW158 für den Zustand 1995 (Szenarien 1995_DÜ und 1995_DB) sowie den Zustand 2020 (Szenarien 2020_DÜ und 2020_DB) machen (vgl. Anlage 4- 11 bis Anlage 4- 16).

- **Noch extremere Extremhochwasser (ohne Deichüberströmen am Oberrhein)**

Auch für das noch extremere Hochwasser HW158 ohne Deichüberströmen am Oberrhein (HW158ohneDueb), gelten die oben gemachten Aussagen. Nur sind die Auswirkungen noch extremer. Für den Zustand 1995 beispielsweise (Anlage 4- 17) reichen die Überflutungen als Folge von Deichbruch durch Deichüberströmungen (Szenario 1995_DB) linksrheinisch im Raum Düsseldorf/Krefeld bis in den Raum Kleve hinein. Auch in Richtung Niers erstrecken sich die Überflutungen, ohne jedoch die Wasserscheide zu überschreiten. Wird angenommen, dass die Deiche stehen bleiben (Szenario 1995_DÜ), reicht der von Überflutungen betroffene Bereich noch nicht einmal bis Xanten. Überflutungen zwischen Xanten und Kleve bzw. in Richtung Niers treten nicht mehr auf. Auch der Raum zwischen Krefeld und Kamp-Lintfort/Moers ist bei dem Szenario mit Deichbruch deutlich mehr durch Überflutungen betroffen als beim Szenario ohne Deichbruch. Geht man davon aus, dass Deiche im Falle ihres Überströmens nicht brechen, können auch ganz andere Gebiete betroffen werden. Aus Anlage 4- 17 wird auch ersichtlich, dass beispielsweise rechtrheinisch Gebiete zwischen Dinslaken und Wesel von Überflutungen betroffen sind, die sonst weitestgehend überflutungsfrei bleiben. Durch die höhere Wasserzufuhr bei Emmerich als Folge, dass die Deiche nicht brechen, sind auch die Überflutungen bei Emmerich beim Szenario 1995_DÜ größer.

All diese Aussagen spiegeln sich auch in den Wassertiefendifferenzen der Szenarien mit und ohne Deichbruch als Folge von Deichüberströmen wider (Anlage 4- 18). Im Szenario ohne Deichbruch (1995_DÜ) treten geringere Wassertiefen vor allem im linksrheinischen Bereich ab Krefeld auf (ab Gebiet D_027 stromab) sowie rechtsrheinisch gegenüber Krefeld zwischen Düsseldorf und Duisburg (Gebiet D_033) und weniger stark ausgeprägt rechtrheinisch im Raum Düsseldorf (Gebiete D_031 und D_023). Größere Wassertiefen ergibt das Szenario ohne Deichbruch als Folge von Deichüberströmen im grenzüberschreitenden Polder bei Emmerich sowie im linksrheinischen Bereich zwischen Köln und Krefeld. In beiden Fällen handelt es sich um Gebiete, in denen kein Deichbruch stattfindet, weil es sich bei den Hochwasserschutzanlagen um Mauern handelt oder um Hochuferbereiche. Bei Emmerich ist die Ursache darin zu suchen, dass im Szenario ohne Deichbruch als Folge von Deichüberströmen der Abfluss bei Emmerich höher ist als im Szenario mit Deichbruch. Ursache für die höheren Wassertiefen im Bereich Köln bis Krefeld ist die durch die Deichbrüche bei Krefeld bedingten Wasserspiegelabsenkungen im Rhein weiter oberhalb sowie die stärkere Parallelströmung hinter den Deichen.

Prinzipiell lassen sich diese Aussagen auch auf die Szenarien 2020_DB und 2020_DÜ übertragen (Anlage 4- 19 und Anlage 4- 20), die durch Überflutungen betroffenen Gebiet sind jedoch deutlich kleiner und sollen hier im Detail nicht weiter diskutiert werden.

11.8.2 Abflüsse im Rhein

Obwohl man zunächst einmal erwarten würde, dass bei Annahme von Deichbruch als Folge von Deichüberströmen mehr Wasser in das Gebiet hinter den Deichen einströmt und dass dadurch der Abfluss und Wasserstand im Rhein niedriger sein wird, ist dies jedoch nicht immer der Fall. Wird der Deich beispielsweise bereits deutlich vor Erreichen des Scheitelabflusses im Rhein überströmt, so könnte der dahinter liegende Polder im Falle der Annahme eines Deichbruches als Folge von Deichüberströmen bereits gefüllt sein, wenn der Hochwasserscheitel die Bruchstelle passiert. Der Scheitel könnte also nicht mehr gekappt werden. Unter der Annahme, dass kein Deichbruch bei Deichüberströmen stattfindet, füllt sich der Polder bei der gleichen Ganglinie langsamer. Weist er zum Zeitpunkt des Passierens des Hochwasserscheitels noch Speicherkapazität auf, so wird sich die Überflutung durch Deichüberströmen ohne Deichbruch dämpfend auf den Scheitel auswirken. In diesem Fall wäre weiter unterhalb der Hochwasserscheitel niedriger als im Falle mit Deichbruch als Folge von Deichüberströmen. Dies könnte zur Folge haben, dass eine Hochwasserschutzanlage gerade nicht überströmt wird, an dieser Stelle der Hochwasserscheitel also nicht gekappt wird, was wiederum zur Folge haben könnte, dass noch weiter unterhalb der Scheitelwert wieder höher ist als im Szenario mit Deichbruch als Folge von Überströmungen. Die Kombination all dieser Faktoren macht es äußerst schwierig, eine allgemeine Regel aufzustellen, ob die Annahme von Deichbruch als Folge von Deichüberströmungen zu höheren oder niedrigeren Abflüssen im Rhein führt, als die Annahme, dass die Deiche bei Überströmen stehen bleiben.

Bei den Berechnungen zeigte sich jedoch der folgende Trend:

Für die „realistischen“ Extremhochwasser HW824mitDueb und HW158mitDueb (jeweils mit Überflutungen am Oberrhein) ist für die Situation 1995 der Wasserstand/Abfluss im Fluss im Szenario mit Deichbruch als Folge von Deichüberströmen ab ca. Krefeld höher als im Szenario ohne Deichbruch (Anlage 4- 10 und Anlage 4- 14). Die scheideldämpfende Wirkung von Überflutungen ist in diesem Fall größer, wenn der Deich stehen bleibt. Im Bereich zwischen Düsseldorf und Krefeld ist sie jedoch größer, wenn es zum Deichbruch kommt. Die wasserstandsabsenkende Wirkung des Deichbruches sowie die stärkere Parallelströmung hinter den Deichen bewirken dieses Phänomen. Gleiches gilt für die Situation 2020 (Anlage 4- 12 und Anlage 4- 16).

Anders sieht es aus bei dem noch extremeren Extremhochwasser HW158ohneDueb (ohne Überflutungen am Oberrhein). Sowohl für den Zustand 1995 als auch 2020 führen die Deichbrüche vor allem bei Krefeld dazu, dass der Hochwasserscheitel gleich bleibt bzw. abgedämpft wird (Anlage 4- 18 und Anlage 4- 20). Das Hochwasser HW158ohneDueb ist so groß, dass der obere Bereich des Polders D_027 rasch gefüllt ist und es zu einem enormen, rheinparallelen Strom, vorbei an Krefeld/Moers/Xanten bis in den Raum Kleve kommt. Dieser Wasserstrom führt schließlich zur stärkeren Dämpfung des Hochwasserscheitels, wenn angenommen wird, dass der Deich bricht sollte er überströmt werden, als wenn der Deich stehen bleibt und sich diese extreme Strömung gar nicht ausbildet.

Tabelle 11-2 gibt einen Überblick über alle Scheitelwerte für die Szenarien mit und ohne Deichbruch als Folge von Deichüberströmen. Die Unterschiede liegen mit rund 400 bis 700 m³/s niedrigeren Abflüssen bei den Szenarien mit Deichbruch als Folge von Deichüberströmen in Düsseldorf am höchsten. Bei Lobith führen die Deichbrüche beim extremsten Hochwasser HW158ohneDueb zu 300 bis 400 m³/s niedrigeren Abflüssen als wenn die Deiche stehen bleiben.

Bei den realistischeren Hochwassern HW158mitDueb und HW824mitDueb ist der Abfluss bei Lobith mit 50 bis 150 m³/s sogar geringfügig höher, wenn davon ausgegangen wird, dass die Deiche brechen.

Tabelle 11-2: Scheitelwerte der Abflüsse zwischen den Deichen; Berechnungen Delft-FLS mit und ohne Deichbruch als Folge von Deichüberströmen am Niederrhein (aus Gudden, 2004).

Szenario	Hochwasser	KÖLN	DÜSSELDORF	RUHRORT	WESEL	LOBITH
1995_DÜ	HW158ohneDueb	18144	15748	16637	16844	16154
1995_DB	HW158ohneDueb	18146	15331	16171	16387	15787
2020_DÜ	HW158ohneDueb	18117	15722	16490	16695	16649
2020_DB	HW158ohneDueb	18117	15286	16215	16371	16318
1995_DÜ	HW158mitDueb	15641	14673	15201	15399	15047
1995_DB	HW158mitDueb	15641	14045	15473	15635	15195
2020_DÜ	HW158mitDueb	15584	14650	15197	15416	15377
2020_DB	HW158mitDueb	15587	14230	15178	15401	15344
1995_DÜ	HW824mitDueb	15461	14741	15436	15858	15420
1995_DB	HW824mitDueb	15461	13966	15765	16194	15641
2020_DÜ	HW824mitDueb	15468	14752	15436	15869	15860
2020_DB	HW824mitDueb	15462	14286	15576	15989	15944

11.9 Vergleich der Scheitelabflüsse im Rhein (2D- und 1D-Berechnungen)

In Tabelle 11-3 sind Scheitelwerte der Abflüsse für ausgewählte Stationen entlang des Rheins wiedergegeben. Es zeigt sich, dass mit Unterschieden in den Ergebnissen zwischen den Modellen Delft-FLS und SOBEK von bis zu 500 m³/s, in Einzelwerten auch darüber gerechnet werden muss.

Tabelle 11-3: Scheitelwerte der Abflüsse zwischen den Deichen, Berechnungen Delft-FLS und SOBEK/DSS.

Szenario	Modell	Hochwasser	KÖLN	DÜSSELDORF	RUHRORT	WESEL	LOBITH
1995_M	SOBEK/DSS	HW158ohneDueb	18049	14765	16258	16113	15812
1995_DB	Delft-FLS	HW158ohneDueb	18146	15331	16171	16387	15787
2020_M	SOBEK/DSS	HW158ohneDueb	18019	15347	16729	16547	16571
2020_DB	Delft-FLS	HW158ohneDueb	18117	15286	16215	16371	16318
1995_M	SOBEK/DSS	HW158mitDueb	15513	13955	15051	14929	14873
1995_DB	Delft-FLS	HW158mitDueb	15641	14045	15473	15635	15195
2020_M	SOBEK/DSS	HW158mitDueb	15460	14208	14688	14593	14807
2020_DB	Delft-FLS	HW158mitDueb	15587	14230	15178	15401	15344
1995_M	SOBEK/DSS	HW824mitDueb	15479	13934	15518	15528	15437
1995_DB	Delft-FLS	HW824mitDueb	15461	13966	15765	16194	15641
2020_M	SOBEK/DSS	HW824mitDueb	15432	14251	15093	15104	15412
2020_DB	Delft-FLS	HW824mitDueb	15462	14286	15576	15989	15944

11.10 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Die Modellkette aus Niederschlagsgenerator, Niederschlag-Abflussmodell und Wellenablaufmodell zur Berechnung extremer Abflüsse bei Andernach liefert wahrscheinlich tendenziell höhere Abflüsse, als aus den Niederschlagsfeldern zu erwarten ist. Für die prinzipielle Untersuchung, was geschieht, wenn extreme Abflüsse am Niederrhein auftreten, kann diese Unsicherheit in Kauf genommen werden. Es kann jedoch die Wiederkehrwahrscheinlichkeit nicht eindeutig bestimmt werden.
- Die Berechnungen der Überflutungen am Oberrhein wurden mit einem einfacheren Ansatz durchgeführt als für die Berechnungen am Niederrhein (pauschale Annahme bezüglich Deichhöhe bzw. Abflusskapazität, nur Deichüberströmen aber kein Deichbruch, kein deichparalleles Strömen hinter dem Deich und wieder Zurückströmen weiter unterhalb). Dies kann sowohl zu Über- als auch Unterschätzung der Abflüsse bei Andernach führen, vermutlich ist dies bei verschiedenen Hochwassern unterschiedlich.
- Dem Abfluss bei Andernach kommt eine hohe Bedeutung bei der Abschätzung extremer Abflüsse am Niederrhein zu. 5% mehr oder weniger Abfluss bei Andernach führt zu 500 bis 750 m³/s mehr oder weniger Abfluss am Niederrhein.
- Die Veränderungen der Abflüsse der niederländischen Rhein Nebenflüsse sind vernachlässigbar klein, während die Veränderungen für die Abflüsse aus den deutschen Nebenflüssen deutlich größer sind und grob ein Drittel der Effekte ausmachen, die durch die 5%ige Abflusserhöhung bzw. –Erniedrigung bei Andernach erzielt werden. Insgesamt ist eine gute Abschätzung der Abflüsse bei Andernach von größerer Bedeutung als die der Nebenflüsse am Niederrhein und in den Niederlanden.
- Anstiege des Meeresspiegels von bis zu 75 cm beispielsweise als Folge einer Klimaänderung haben keinen Einfluss auf die Scheitelwerte im Studiengebiet.
- Die im Studiengebiet zu beobachtenden Erosionsvorgänge im Rhein vergrößern die Abflusskapazität z.T. deutlich (im Raum Düsseldorf beispielsweise um 300 bis 600 m³/s innerhalb von 25 Jahren).
- Es gibt keine allgemeine Regel, die eine Prognose darüber erlaubt ob die Überflutungen geringer oder größer werden, wenn angenommen wird, dass Deiche stehen bleiben wenn sie überströmt werden. Bis in den Raum Dormagen treten kein Unterschiede auf, da hier nur Mauern und höherliegende Gebiete überflutet werden. In den Gebieten weiter unterhalb werden bei der Annahme, dass die Deiche stehen bleiben weniger Gebiete überflutet zum Teil jedoch dafür auch ganz andere Gebiete, die sonst trocken blieben weil überhaupt kein Deichüberströmen statt gefunden hat.

-
- Unter der Annahme, dass Deiche stehen bleiben, wenn sie überströmt werden, würden bei Düsseldorf um 400 bis 700 m³/s höhere Scheitelabflüsse auftreten, weil weniger Wasser rheinparallel hinter dem Deich strömt. Weiter stromabwärts würden bei dem extremsten Hochwasser HW158ohneDueb noch 300 bis 400 m³/s höhere Scheitelabflüsse auftreten. Bei den realistischeren Hochwassern (mit Deichüberströmen am Oberrhein) drehen sich die Verhältnisse sogar um. Hier würden bei Lobith um 50 bis 150 m³/s kleinere Scheitelabflüsse auftreten.
 - Die Abweichungen der Scheitelabflüsse, berechnet mit SOBEK/DSS von denen, die mit Delft-FLS berechnet wurden, können Werte von bis zu 500 m³/s erreichen, in Einzelwerten können sie auch darüber liegen.

Insgesamt macht eine Genauigkeitsanalyse deutlich, dass bei der Beurteilung und Verwendung der Untersuchungsergebnisse mit einer Unschärfbandbreite der Abflussergebnisse von ca. +/- 500 m³/s ausgegangen werden muss.

12 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Auftrag der *Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser* ist von 2002 – 2004 von der Provinz Gelderland, dem Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), dem Landesumweltamt NRW (LUA NRW) sowie der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) die Studie „Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein“ erarbeitet worden.

Kernfragen dieser Untersuchungen waren:

- Wie viel Abfluss kann unter extremen Bedingungen aus dem Einzugsgebiet des Rheins erwartet werden?
- Wie viel Abfluss kann zwischen den Deichen am Niederrhein und in den Rheinseiten abgeführt werden? Welche Deichbereiche werden überströmt und wie wirkt sich das auf die Hochwasserwellen aus?
- Was geschieht, wenn der Abfluss nicht zwischen den Deichen abgeführt werden kann? Welche Gebiete hinter den Deichen werden überflutet? Sind grenzüberschreitende Überflutungen möglich?
- Welche Auswirkungen haben Hochwasser reduzierende Maßnahmen?

12.1 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen machen deutlich, dass im Rheineinzugsgebiet Niederschlagsituationen möglich sind, die deutlich über den Bemessungsabflüssen in NRW liegen können. So können bei Vernachlässigung möglicher Deichüberströmungen am Oberrhein am Pegel Andernach Scheitelwerte von bis zu 17800 m³/s auftreten. Bei den betrachteten extremen Hochwassern finden am Oberrhein Überflutungen statt. Dadurch wird der Scheitelabfluss am Pegel Andernach auf rund 15300 m³/s gedämpft.

Vernachlässigt man das Deichüberströmen an Ober- und Niederrhein, können die Niederschläge zu einem Scheitelwert von 18700 m³/s am Pegel Lobith führen. Durch die bei diesen Abflüssen auftretenden Überflutungen an Ober- und Niederrhein tritt eine starke Scheiteldämpfung auf, so dass am Pegel Lobith noch mit rund 15500 m³/s gerechnet werden muss.

Im heutigen Zustand kommt es bei den untersuchten extremen Hochwassern am Niederrhein ab einem Abflussbereich zwischen 11000 bis 16000 m³/s zu großräumigen Überflutungen. Hierbei ist der südliche Niederrhein (Großraum Köln/Bonn bis ca. Düsseldorf/Dormagen) zuerst betroffen. Mit zunehmender Höhe der Hochwasserscheitel wird auch der mittlere Teil (Düsseldorf/Dormagen bis etwa zur Einmündung der Ruhr) überflutet.

Im nördlichen Teil (Einmündung der Ruhr bis in die Niederlande) findet kein Deichüberströmen statt, allerdings nur bei erheblicher Inanspruchnahme des Freibordes. Diese Strecke wäre erst gefährdet, wenn z.B. durch Klimaänderungen noch höhere Abflüsse eintreten. Lediglich in Emmerich muss noch bis zum Abschluss der Sanierungsmaßnahmen an der dortigen Hochwassermauer mit einer Überflutungsgefahr ab einem Abfluss von rund 14000 m³/s gerechnet werden.

Durch die derzeit laufenden Deichsanierungen in NRW wird an einigen Stellen das Schutzniveau deutlich angehoben. Bei den untersuchten extremen Hochwassern, die den Bemessungsabfluss erheblich übersteigen, ändert sich die

Situation im südlichen und mittleren Bereich des Niederrheins lediglich dahingegen, dass die Gebiete später überflutet werden. Eine Überflutung kann jedoch nicht verhindert werden.

Im nördlichen Bereich wird durch die Deichsanierung in Zukunft eine Überflutung des Gebietes beiderseits der Grenze bis zu einem Abfluss von ca. 16000 m³/s auch da verhindert, wo z.B. bei Hochwassermauern ein geringeres Freibord als bei Deichen angesetzt wird. In den deutschen Deichstrecken ist die Kapazität höher.

Bei Überflutungen finden hinter den Deichen rheinparallele Strömungen statt. Dadurch können auch Gebiete überflutet werden, die eigentlich durch Hochwasserschutzanlagen mit einem höheren Schutzniveau geschützt sind. Ein Teil der rheinparallelen Wasserströme fließt auch wieder in den Rhein zurück.

Die Wirkung von Retentionspoldern auf Scheitelabflüsse sind stark von der Scheitelhöhe und der Ganglinienform des jeweils betrachteten Hochwassers abhängig.

Das System an Hochwasser reduzierenden Maßnahmen am Niederrhein in NRW zeigt in der derzeitigen Planung seine besten Wirkungen bei Ereignissen der Größenordnung des Hochwassers 1995. Durch einen zielgerichteten Einsatz der Maßnahmen, vor allem der Retentionspolder, kann ihre scheitelreduzierende Wirkung auf Hochwasser im Bereich der Bemessungsabflüsse gesteigert werden.

Durch die Kombination der Wirkungen der geplanten Maßnahmen in den Niederlanden und der Maßnahmen in NRW können nach heutigem Planungsstand für Extremhochwasser, die über das Bemessungshochwasser hinaus gehen, Wasserstandsabsenkungen um bis zu 30 cm an der Grenze und bis zu 25 cm im Raum Bislich/Lohrwardt erreicht werden. Werden die derzeit geplanten Maßnahmen in NRW sowie einige zusätzliche Maßnahmen, z.B. zur Beseitigung von Abflusshindernissen, auf den Bemessungshochwasserabfluss abgestimmt, können in Kombination mit den Maßnahmen in den Niederlanden sogar Wasserstandsabsenkungen von bis zu 40 cm an der Grenze und im Raum Bislich/Lohrwardt erreicht werden. An anderen Stellen ist die Reduzierung des Wasserstandes geringer.

Aussagen, in wie weit sich die prognostizierte Klimaveränderung auf die extremen Abflüsse im Rheineinzugsgebiet auswirken, lassen sich zur Zeit nur qualitativ treffen. Allgemein wird jedoch davon ausgegangen, dass extreme Hochwasser sowohl in Abflusshöhe als auch in ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit in Zukunft zunehmen werden.

Um dennoch eine Aussage darüber treffen zu können, was passiert, wenn sich die Abflüsse aus dem Einzugsgebiet erhöhen sollten, wurden Berechnungen mit einer Ganglinie am Pegel Andernach durchgeführt, deren Scheitelwert bei 17800 m³/s liegt. Durch die Überflutungen am Niederrhein wird dieser Scheitelwert auf rund 16500 m³/s am Pegel Lobith gedämpft. Diese Dämpfung wird wie bei den anderen Berechnungen durch Deichüberströmen im Bereich bis Krefeld hervorgerufen. Die Überflutungen hinter den Deichen nehmen noch größeren Umfang an. Wasser kann bei diesem Szenario hinter den Deichen an Xanten vorbei bis nach Kleve strömen. Ein Abfluss in das Einzugsgebiet der Niers und damit in Richtung Maas ist dabei nicht aufgetreten.

12.2 Ausblick

Die Studie zeigt, dass viele der genannten Fragen nur grenzüberschreitend beantwortet werden können und dass auch eine enge Zusammenarbeit zwischen Ober- und Unterlieger notwendig ist. Dies betrifft das Austauschen von Daten und Informationen ebenso wie die Abstimmung von Maßnahmen auf dem Gebiet des Hochwasserschutzes.

Auch die Beantwortung weiterführender Fragen wie,

- In wie weit können die generierten Niederschlagsfelder typischen Wetterlagen zugeordnet werden?
- Wie groß sind die Auswirkungen von Klimaänderungen auf extreme Hochwasserabflüsse?
- Wie sensibel reagiert das System auf Veränderungen der Deichhöhen und -linien?
- Wo können mit eher kleinen Veränderungen an den Hochwasserschutzanlagen Überflutungen minimiert werden?
- Wie reagiert das System auf Kammerung des Gebietes hinter den Deichen?
- Wie lassen sich den im Rahmen der Untersuchungen ermittelten Scheitelabflüssen Wiederkehrzeiten zuordnen?
- Welche Auswirkung haben die Ergebnisse dieser Untersuchung auf die zukünftige Ermittlung von Bemessungsabflüssen?
- Welche Konsequenzen haben die Ergebnisse für die Hochwasservorhersage?

sollten weiterhin gemeinsam verfolgt werden.

13 Literatur

13.1 Teilberichte

Im Rahmen des Projektes "Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein" wurden die folgenden Teilberichte erstellt:

Eberle, M.; Hammer, M.; Busch, N.; Engel, H.; Krahe, P. und Wilke, K. (2004): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Teilbericht Extreme Abflüsse aus dem Rheineinzugsgebiet; ISBN 9036956501. (Liegt auch in niederländischer Sprache vor unter ISBN 9036956684).

Gudden, J.J. (2004): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Teilbericht Überflutungen in Nordrhein-Westfalen und Gelderland; ISBN 9036956641. (Liegt auch in niederländischer Sprache vor unter ISBN 9036956692).

Hartman, M.R. (2002): Drehbuch Abstimmung von BOS-IR auf Delft-FLS. HKV-lijn in water, Auftraggeber Rijkswaterstaat RIZA, Oktober 2002. (Liegt auch in niederländischer Sprache vor)

Kroekenstoel, D.F.; Veen, R. van der und Brinkmann, M. (2003): Studie afvoercapaciteit Niederrhein, Verkennende berekeningen met het BOS Inrichting Rivieren. RIZA-werkdocument 2003.27X.

Landesumweltamt NRW (2003): Bestandsaufnahme und Datenrecherche zur Studie "Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein"; Bericht und Anlagen. Bearbeitet durch Buchholz, O.; Friedeheim, S.; Wegelein, D. und Bangel, H. der Hydrotec, Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen.

Mehlig, B. (2004): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Teilbericht Rückhaltmaßnahmen in NRW und den Niederlanden; ISBN 9036956665. (Liegt auch in niederländischer Sprache vor unter ISBN 9036956706).

Mierlo, M.C.L.M. van; Gudden, J.J. und Overmars, J.M.S. (2003): Calibratie Delft-FLS model, NoordRijn Westfalen en Gelderland. Rapport juni 2003, WL | Delft Hydraulics. Auftraggeber Provinz Gelderland (nl.).

Veen, R. van der; Lammersen, R.; Kroekenstoel, D.F. und Brinkmann, M. (2004a): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Teilbericht Eingabedaten für das DSS Niederrhein-Rheinzweige; ISBN 9036956668. (Liegt auch in niederländischer Sprache vor unter ISBN 9036956714).

Veen, R. van der; Kroekenstoel, D.F. und Brinkmann, M. (2004b): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Teilbericht Berechnungsergebnisse DSS Niederrhein-Rheinzweige; ISBN 9036956676. (Liegt auch in niederländischer Sprache vor unter ISBN 9036956722).

13.2 Andere Literatur

Busch, N.; Chojetzki, U.; Engel, H. und Gundert, P.J. (1994): Wasserspiegellagenberechnungen am Rhein vom Pegel Köln bis zur deutsch/niederländischen Grenze, BfG-Bericht Nr. 862, 29 S., 9 Anlagen.

Dijkman, J.P.M.; Ogink, H.J.M.; Klijn, F.; van der Most, H. und andere (2003): Toelichting aanvullend deskundigenoordeel noodoverloopgebieden, WL | Delft Hydraulics, im Auftrag von Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat Generaal Water, augustus 2003.

IKSR (Ed.) (1998): Aktionsplan Hochwasser, Koblenz.

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

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001. Deutsche Übersetzung von <http://www.ipcc.ch/pub/nonun.htm>.

Kleinn, J. (2002): Climate Change and Runoff Statistics in the Rhine Basin: A Process Study with a Coupled Climate - Runoff Model. PhD thesis. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Dissertation No. 14663. Zürich.

Krahe, P. (2003): Klimaänderungen und ihre Auswirkungen auf Hydrologie und Wasserwirtschaft im Rheingebiet. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Oktober 2003. Koblenz.

Kwadijk, J.C.J. (1993): The impact of climate change on the discharge of the river Rhine. Dissertation Universität Utrecht. KNAG/NGS publication 171.

LUA [Ed.], (2002): Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten HQ_T an den Pegel des Rheins. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA), Essen 2002, ISSN 1610-9619.

MUNLV-NRW (2003): Neufestsetzung des Bemessungshochwassers für den Rhein, Schreiben des Ministeriums für Umweltschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen an die Bezirksregierung Düsseldorf und die Bezirksregierung Köln vom 18. September 2003.

Schneider, G. (1996): Das Bemessungshochwasser, Ermittlung gestern und heute (unveröffentlicht; persönliche Mitteilung).

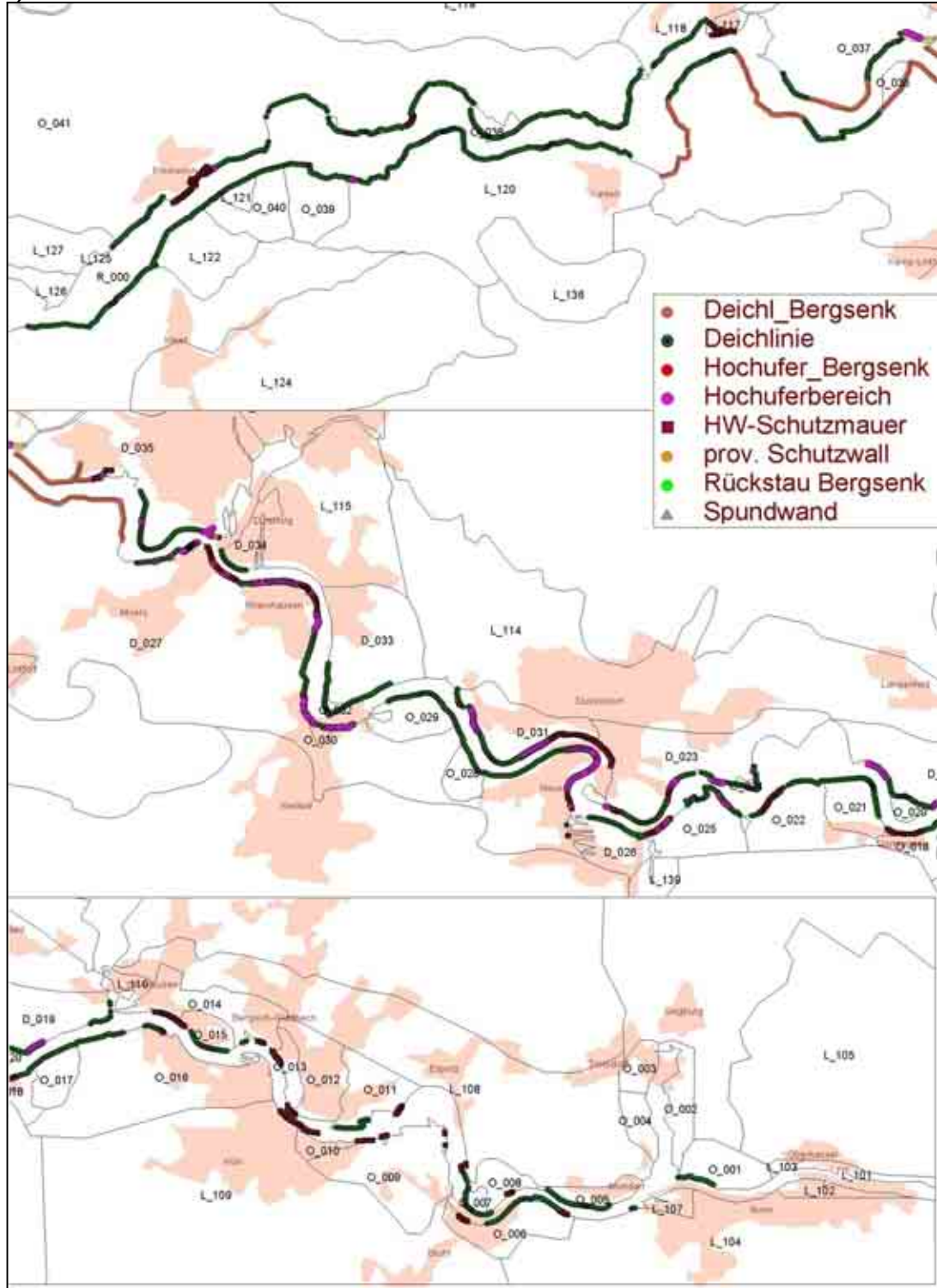
Silva, W.; Dijkman, J. und Klijn, F. (2001): Room for the Rhine Branches in the Netherlands, What the research has taught us, RIZA-report 2001.031 und WL-rapport R3294, ISBN 9036953855.

Anlagen

Anlage 1: Deichhöhen und Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten im Studiengebiet

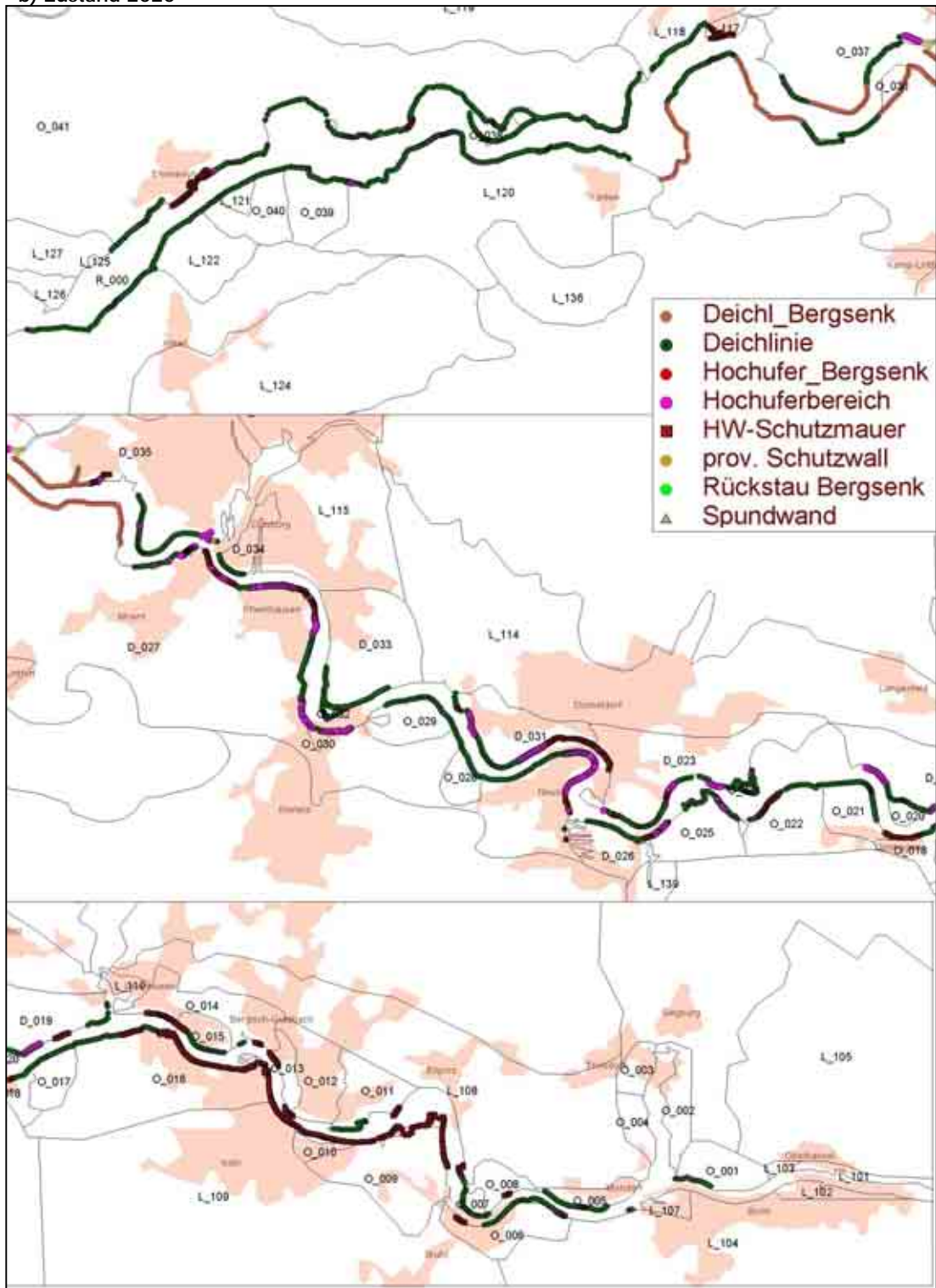
Anlage 1-1: Typisierung der Hochwasserschutzanlagen in NRW nach Informationssystem Deichsicherheit/Hochwasserschutz (aus: Gudden, 2004).

a) Zustand 1995/2002



Anlage 1-1: Typisierung der Hochwasserschutzanlagen in NRW nach Informationssystem Deichsicherheit/Hochwasserschutz (aus: Gudden, 2004). (Fortsetzung).

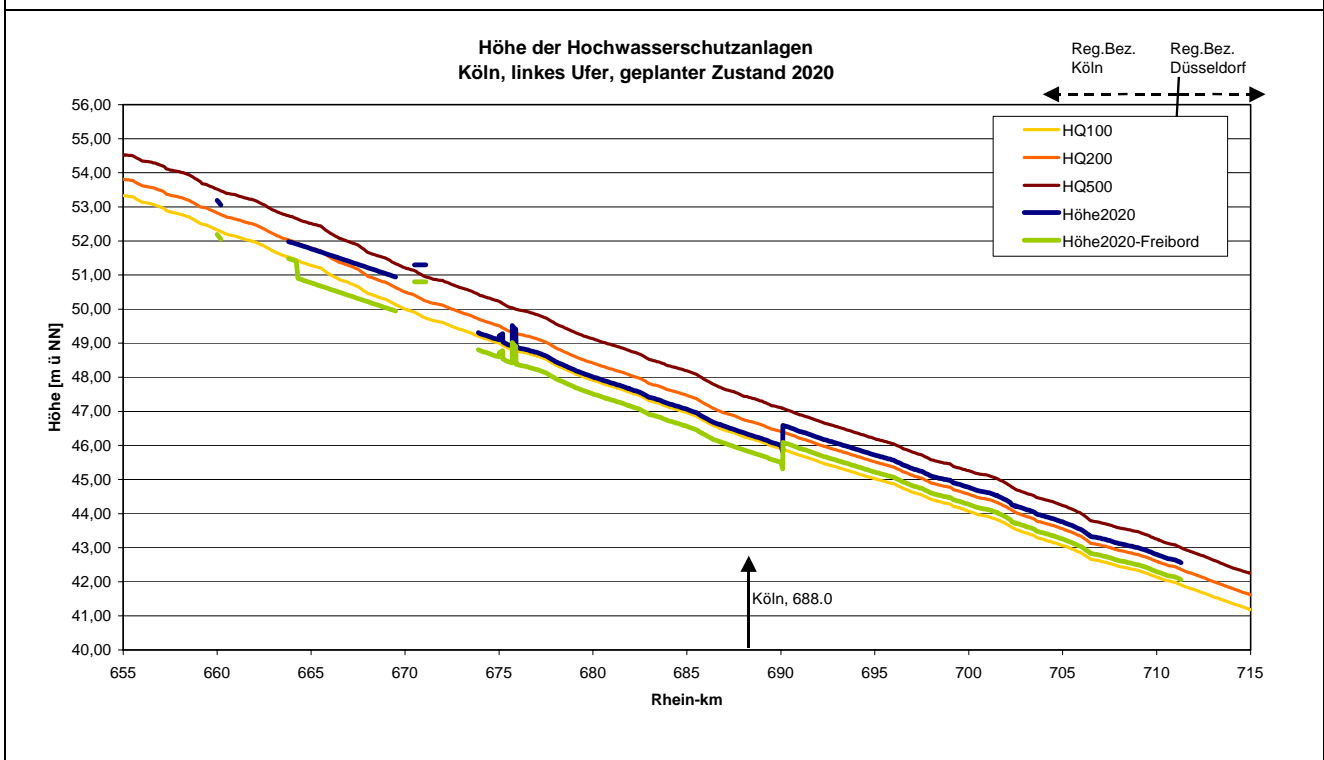
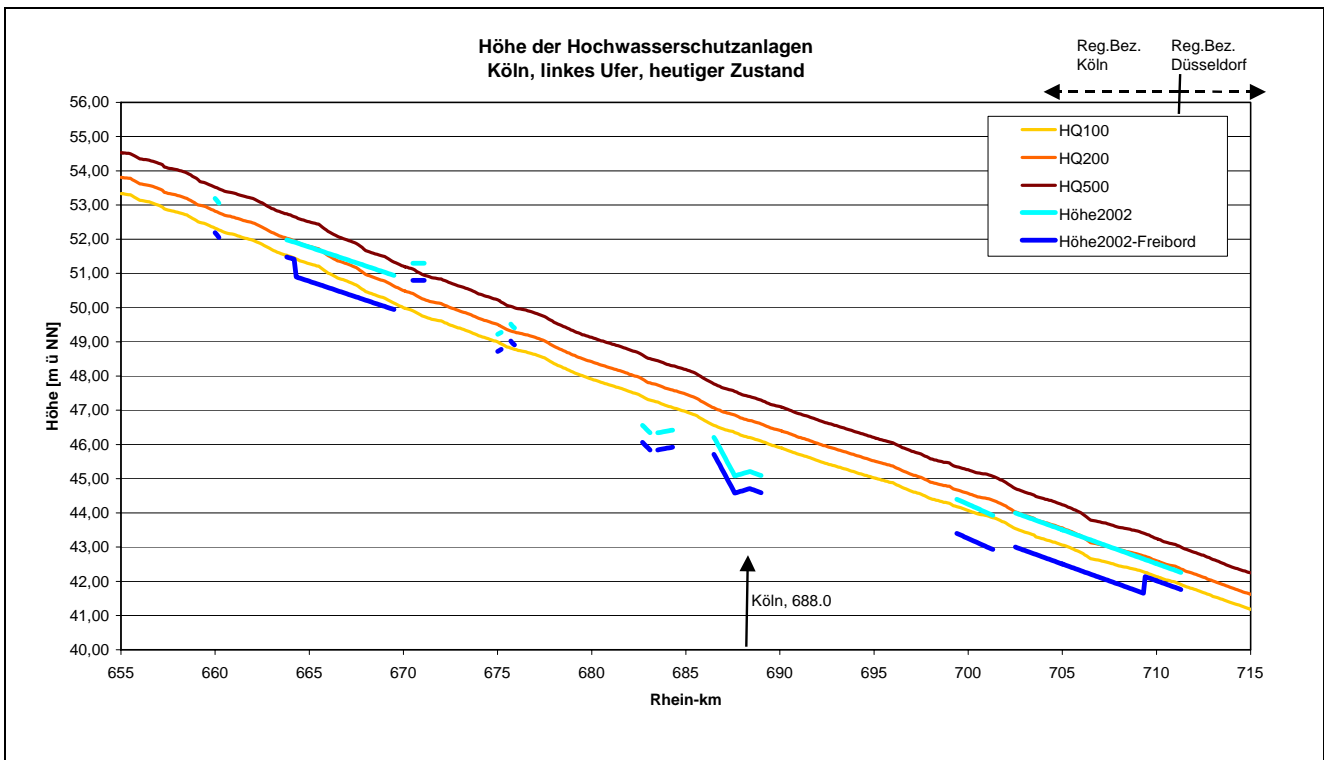
b) Zustand 2020



Anlage 1- 2: Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten im Studiengebiet (aus: LUA, 2002).

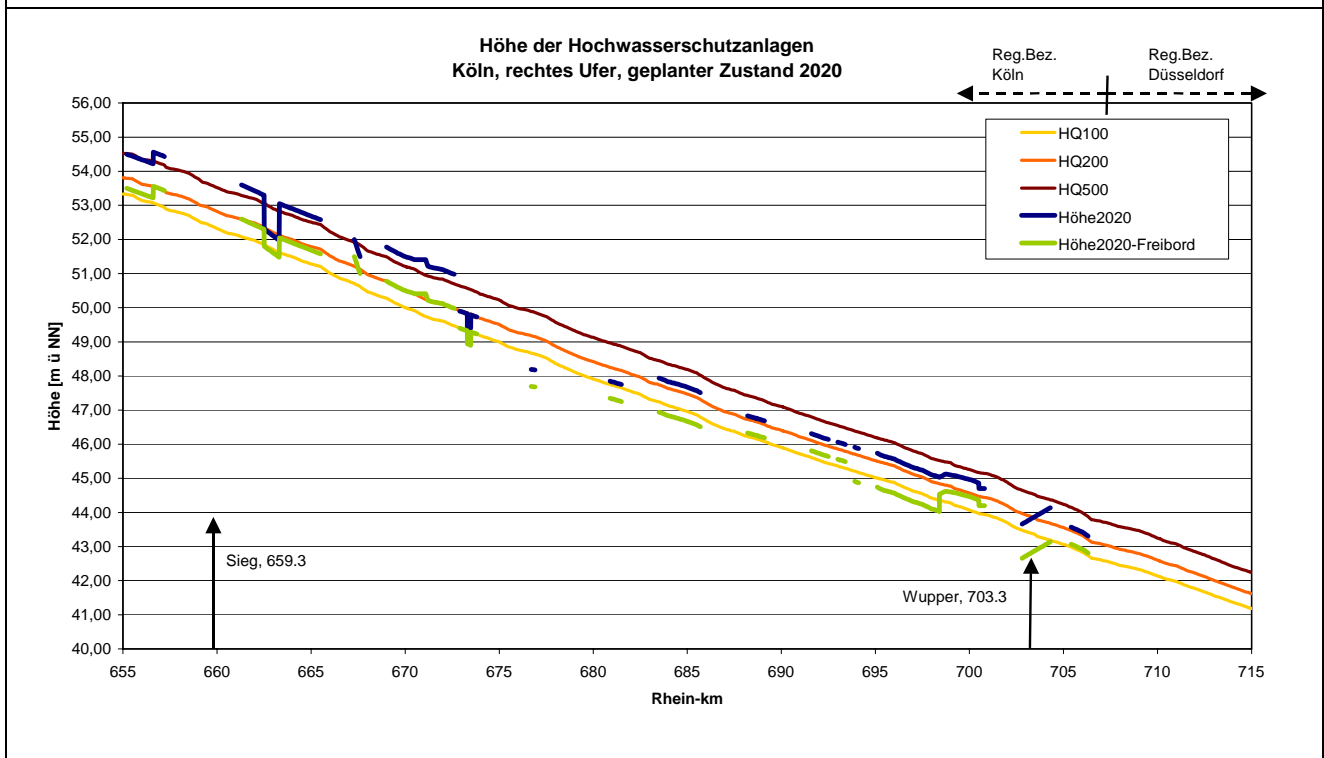
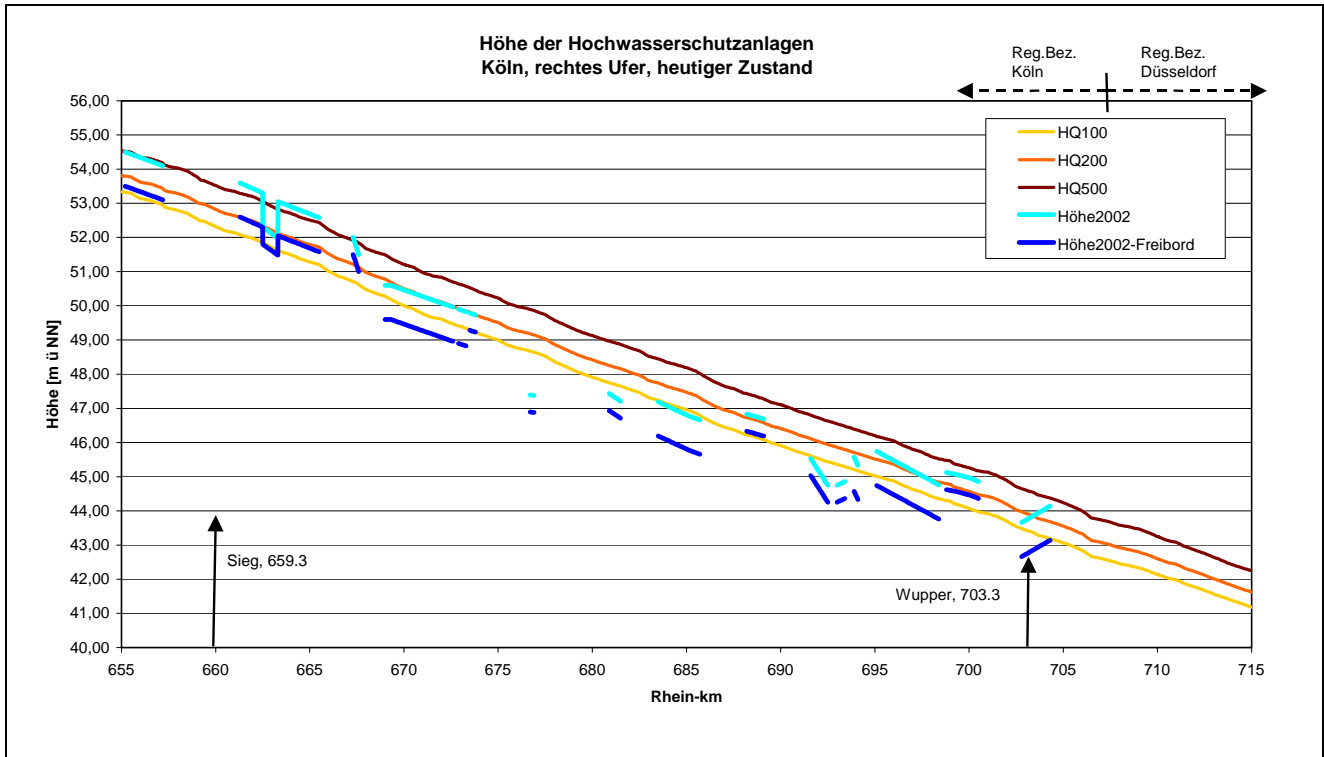
Pegel	Jährlichkeit [Jahren]	Durchfluss [m ³ /s]
Bonn ^D	100	11700
	200	12600
	500	14000 ¹⁾
Köln ^D	100	12000
	200	12900
	500	14200 ¹⁾
Düsseldorf ^D	100	12000
	200	12900
	500	14200 ¹⁾
Ruhrort ^D	100	12400
	200	13400
	500	14800 ¹⁾
Wesel ^D	100	12400
	200	13000 ²⁾
	500	14800 ¹⁾
Rees ^D	100	12300
	200	13300
	500	14700 ¹⁾
Emmerich ^D	100	12200
	200	13000 ²⁾
	500	14500 ¹⁾
Lobith ^{NL}	1250	16000
D: deutsche Statistik NL: niederländische Statistik	1) Für gesicherte Extrapolation ist die Beobachtungsreihe nicht lang genug, deshalb nur Anhaltswerte 2) Nur Jahresreihe 1946 bis 1995; vor 1946 keine gesicherten Werte	

Anlage 1- 3: Heutige und zukünftige Deichhöhen im Studiengebiet.



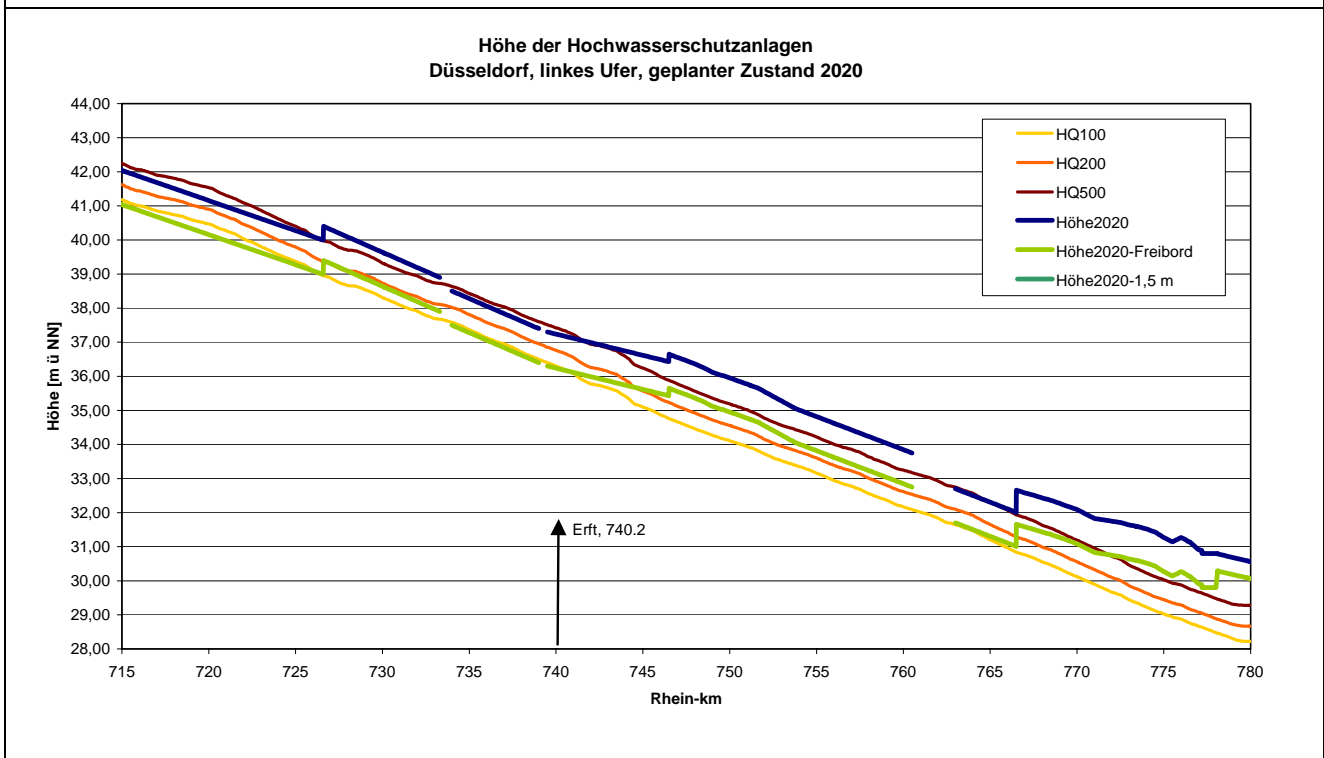
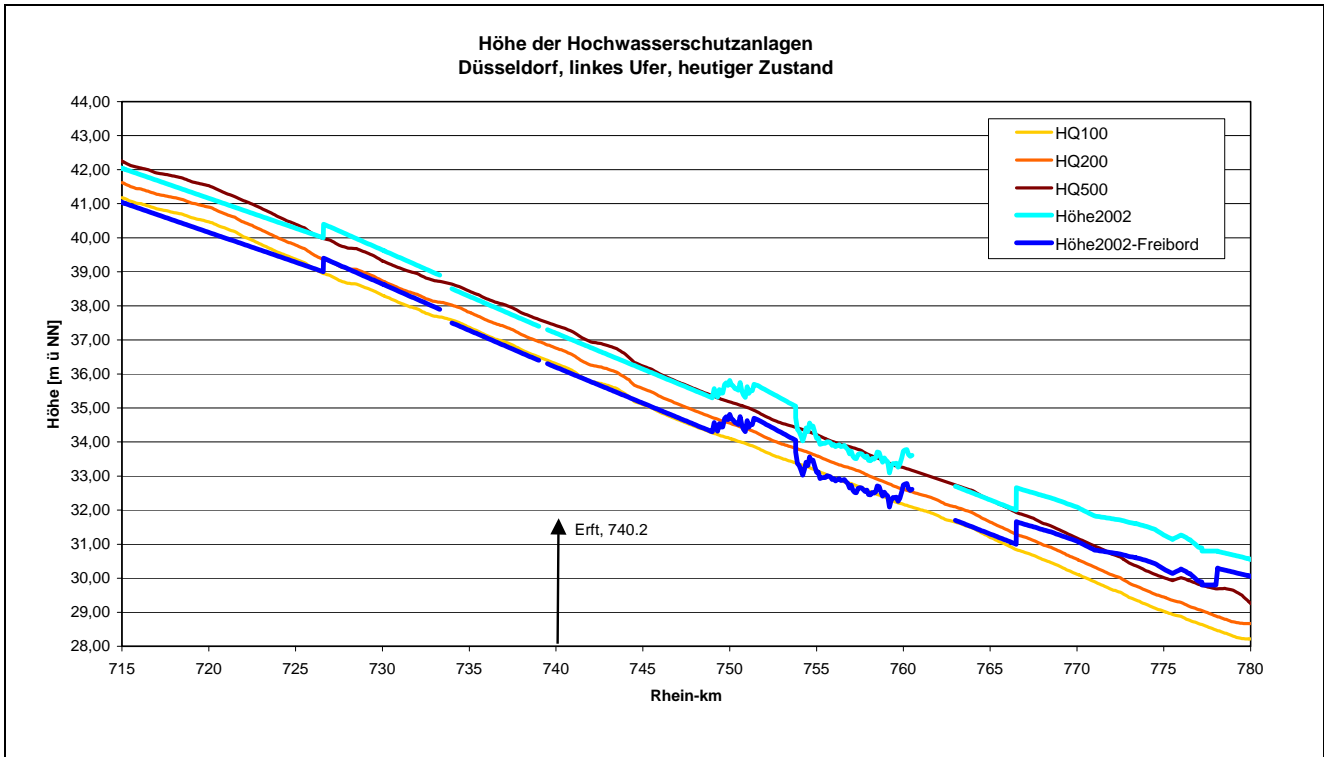
*) Freibord hier angenommen mit 0.5 m bei Mauern und 1 m bei Deichen

Anlage 1- 3: Heutige und zukünftige Deichhöhen im Studiengebiet
(Fortsetzung 1).



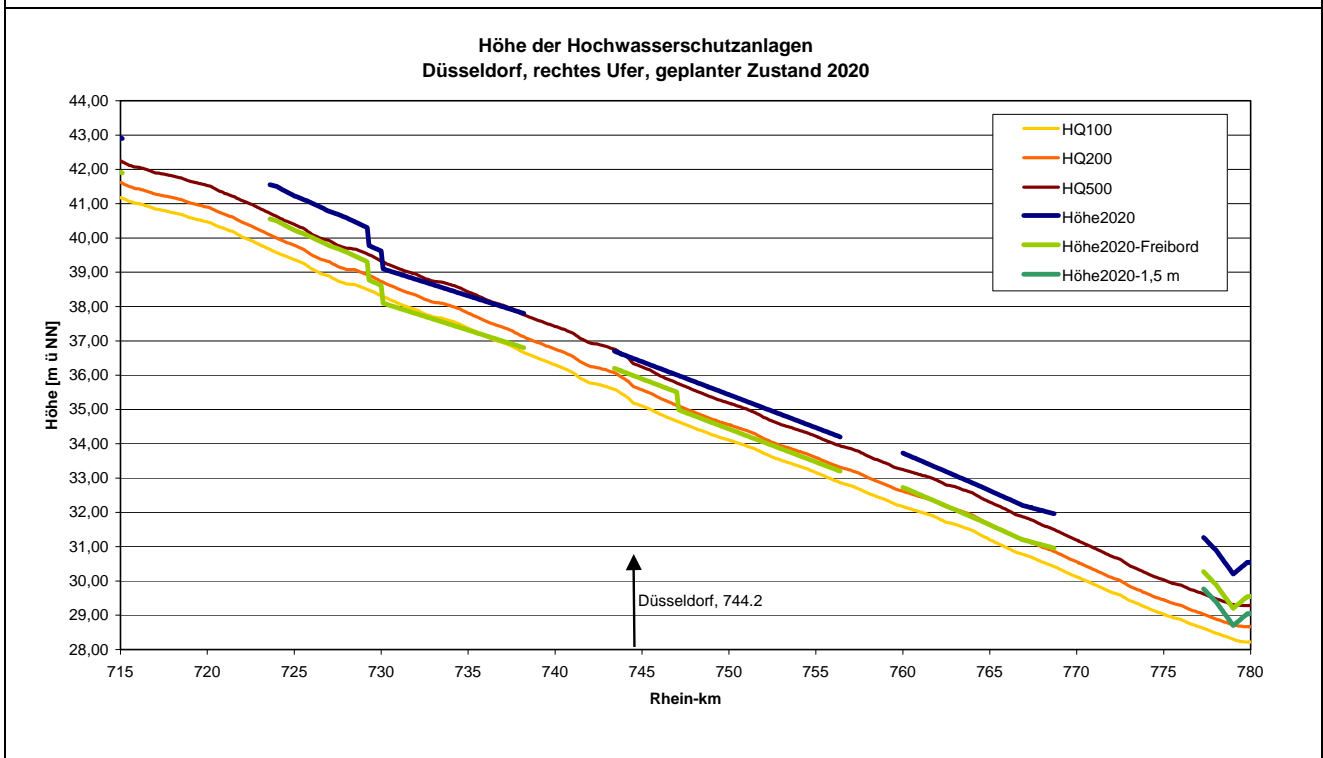
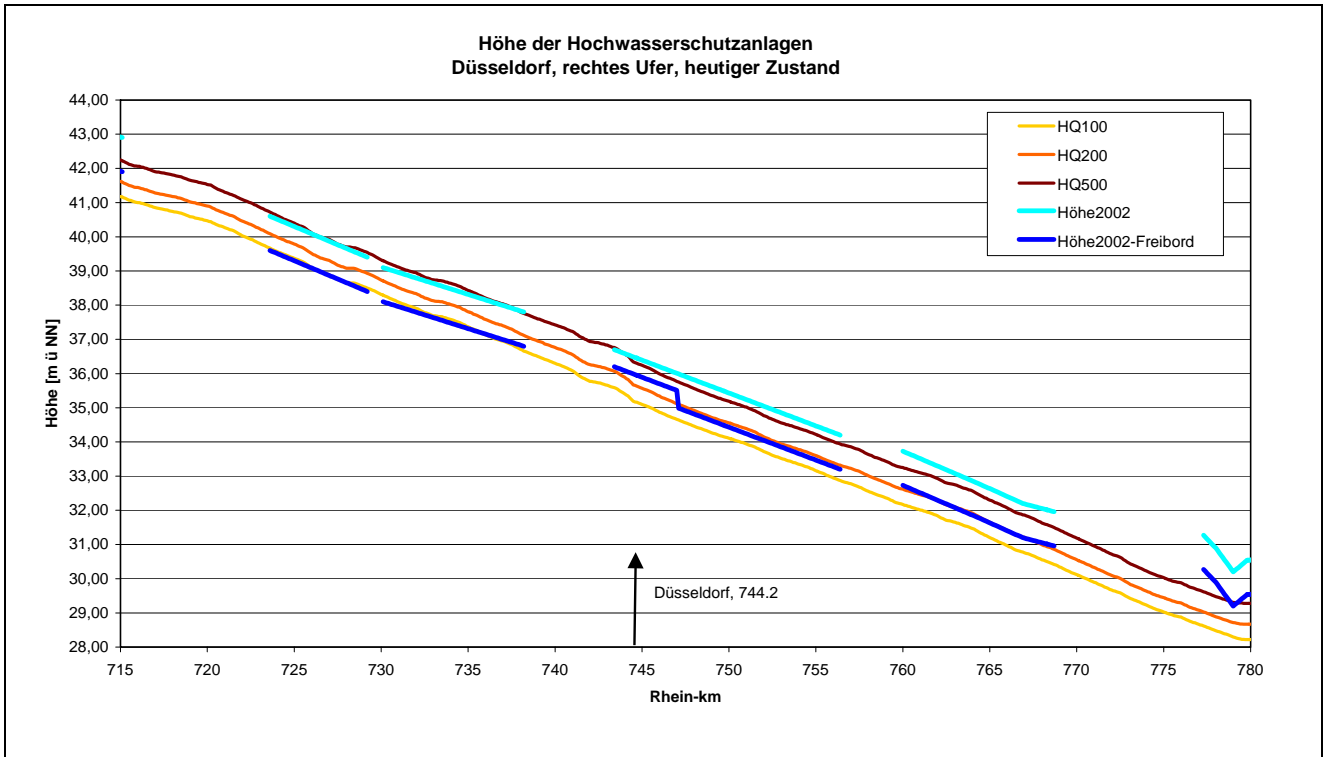
*) Freibord hier angenommen mit 0.5 m bei Mauern und 1 m bei Deichen

Anlage 1- 3: Heutige und zukünftige Deichhöhen im Studiengebiet
(Fortsetzung 2).



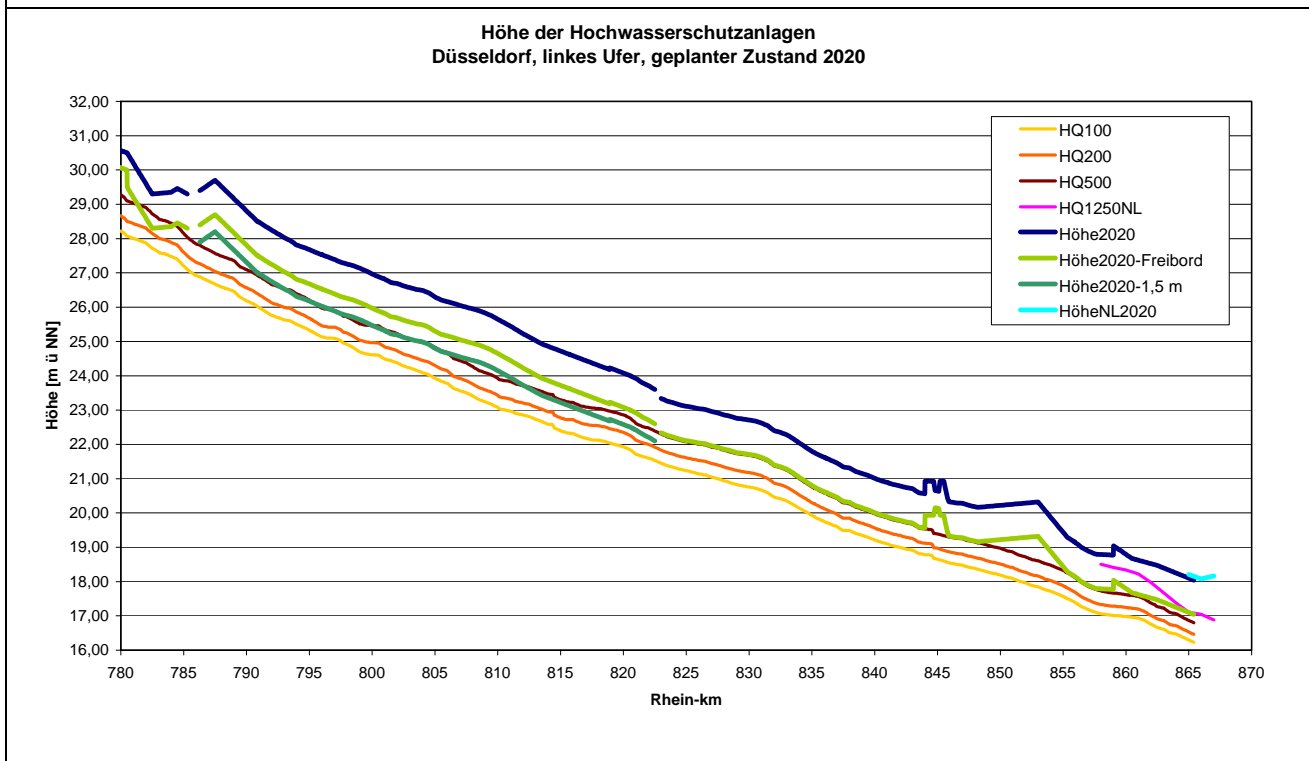
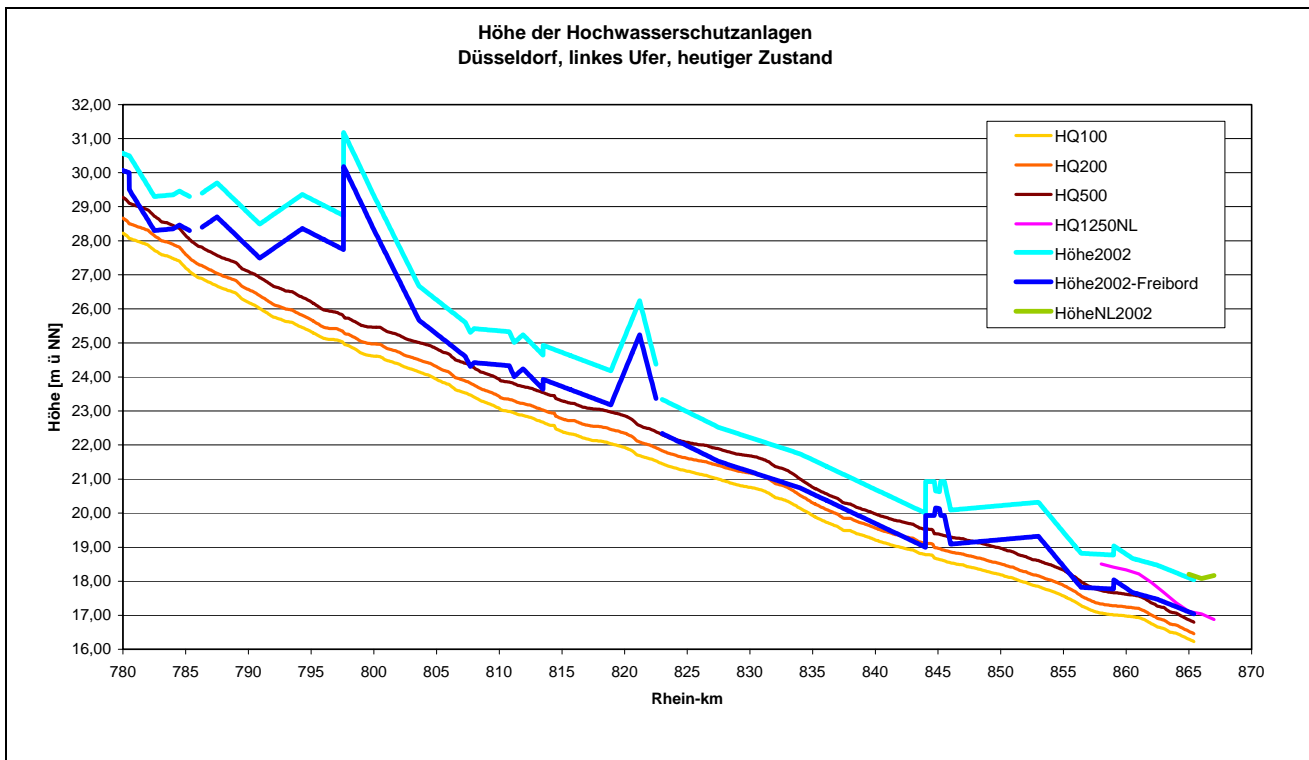
*) Freibord hier angenommen mit 0.5 m bei Mauern und 1 m bei Deichen

Anlage 1- 3: Heutige und zukünftige Deichhöhen im Studiengebiet
(Fortsetzung 3).



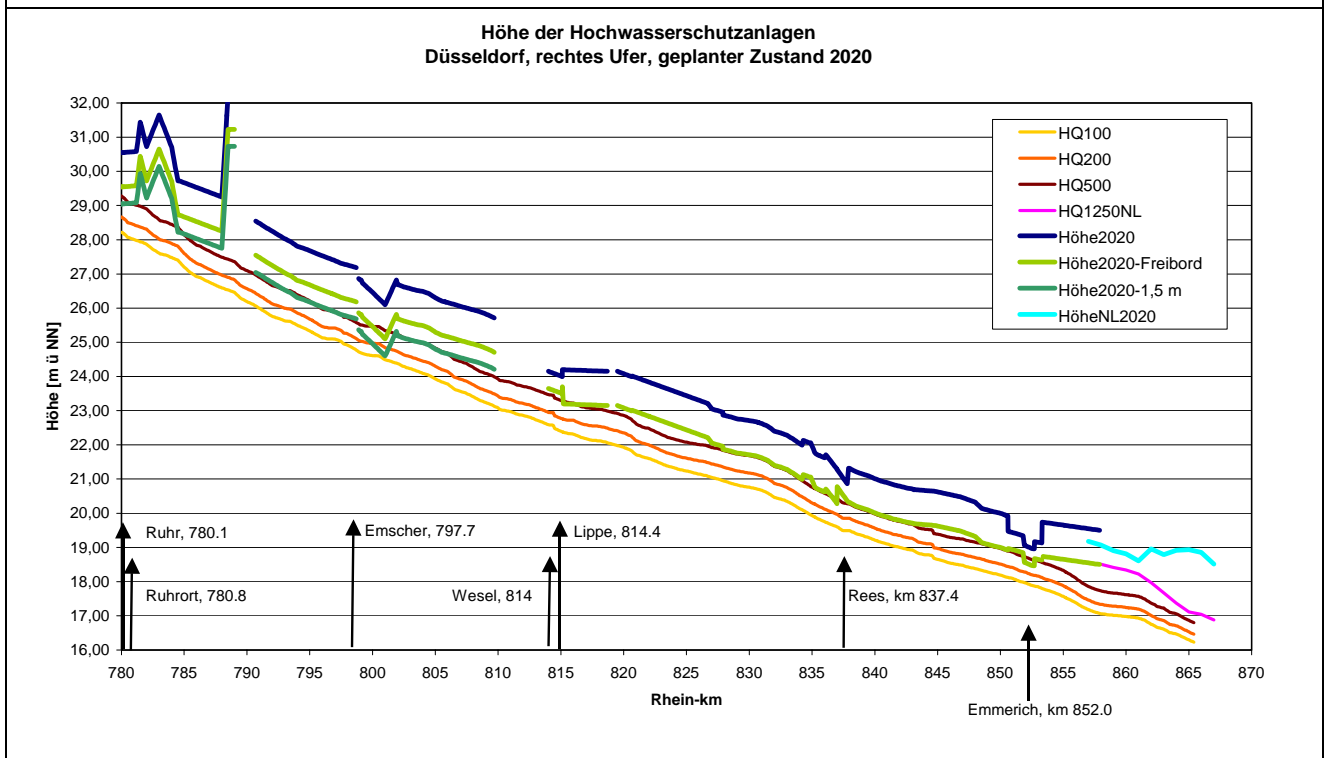
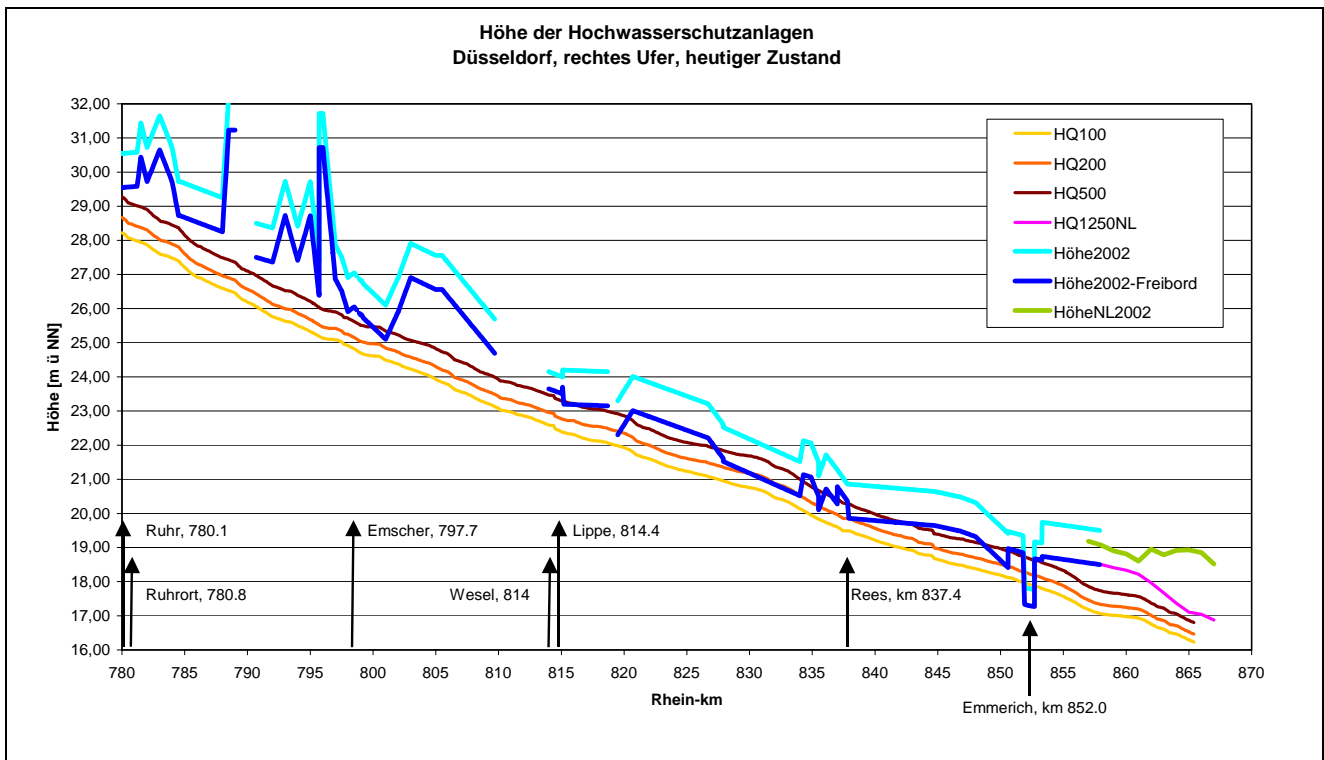
*) Freibord hier angenommen mit 0.5 m bei Mauern und 1 m bei Deichen

Anlage 1- 3: Heutige und zukünftige Deichhöhen im Studiengebiet
(Fortsetzung 4).



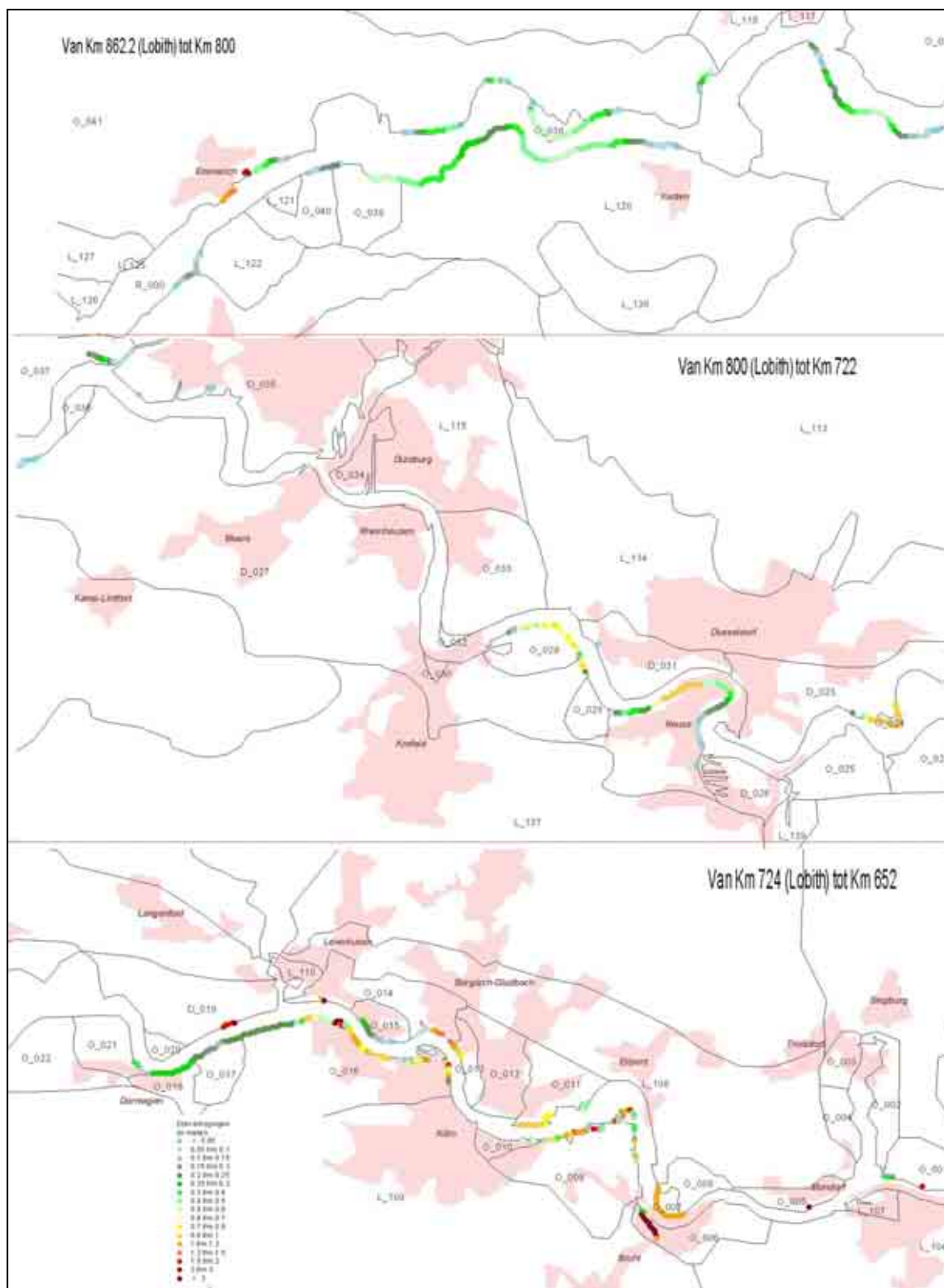
*) Freibord hier angenommen mit 0.5 m bei Mauern und 1 m bei Deichen

Anlage 1- 3: Heutige und zukünftige Deichhöhen im Studiengebiet
(Fortsetzung 5).



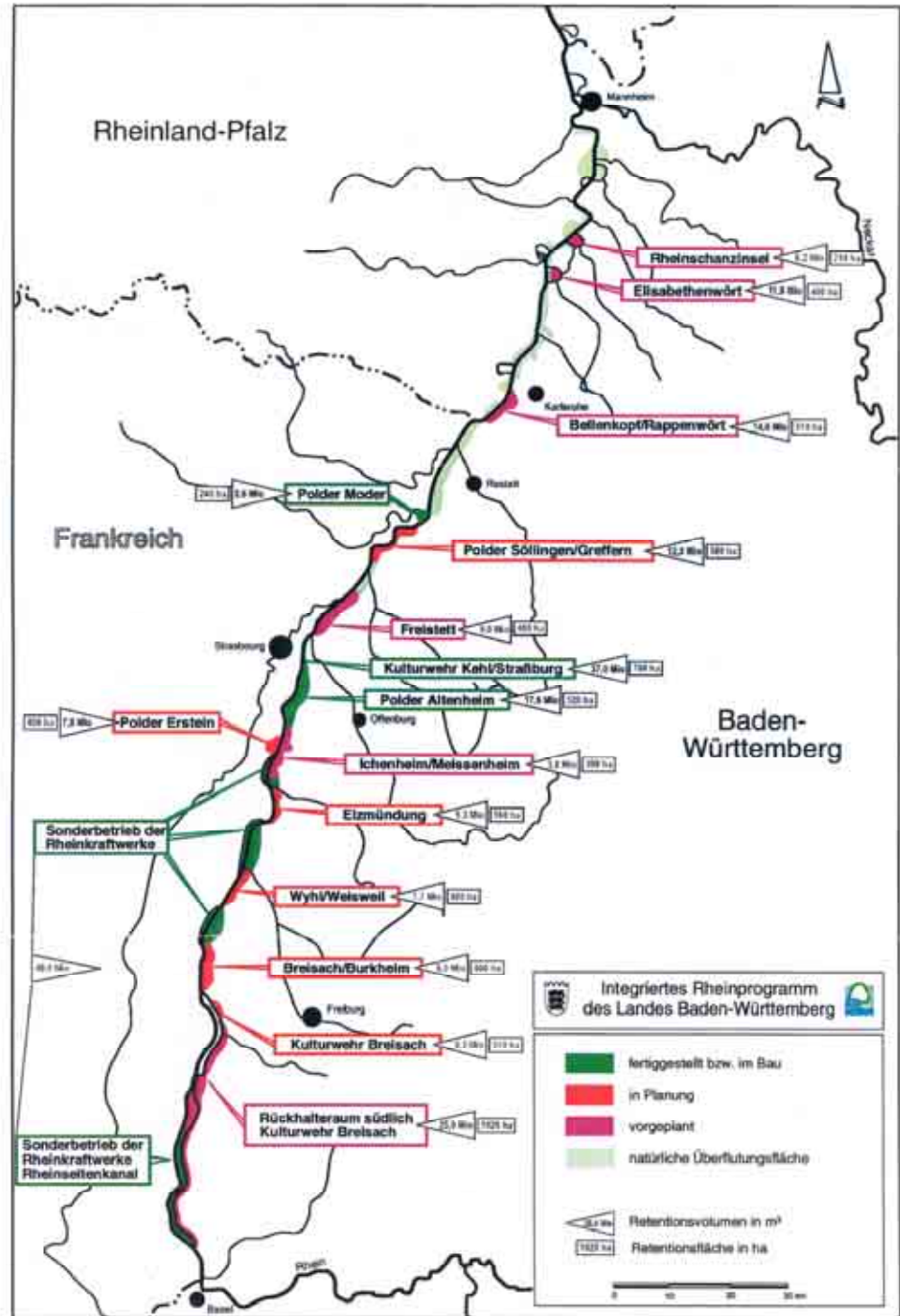
*) Freibord hier angenommen mit 0.5 m bei Mauern und 1 m bei Deichen

Anlage 1- 4: Differenz der Deichhöhen (in Delft-FLS) heutige Situation (1995/2002) und zukünftige Situation (2020) (aus Gudden, 2004).

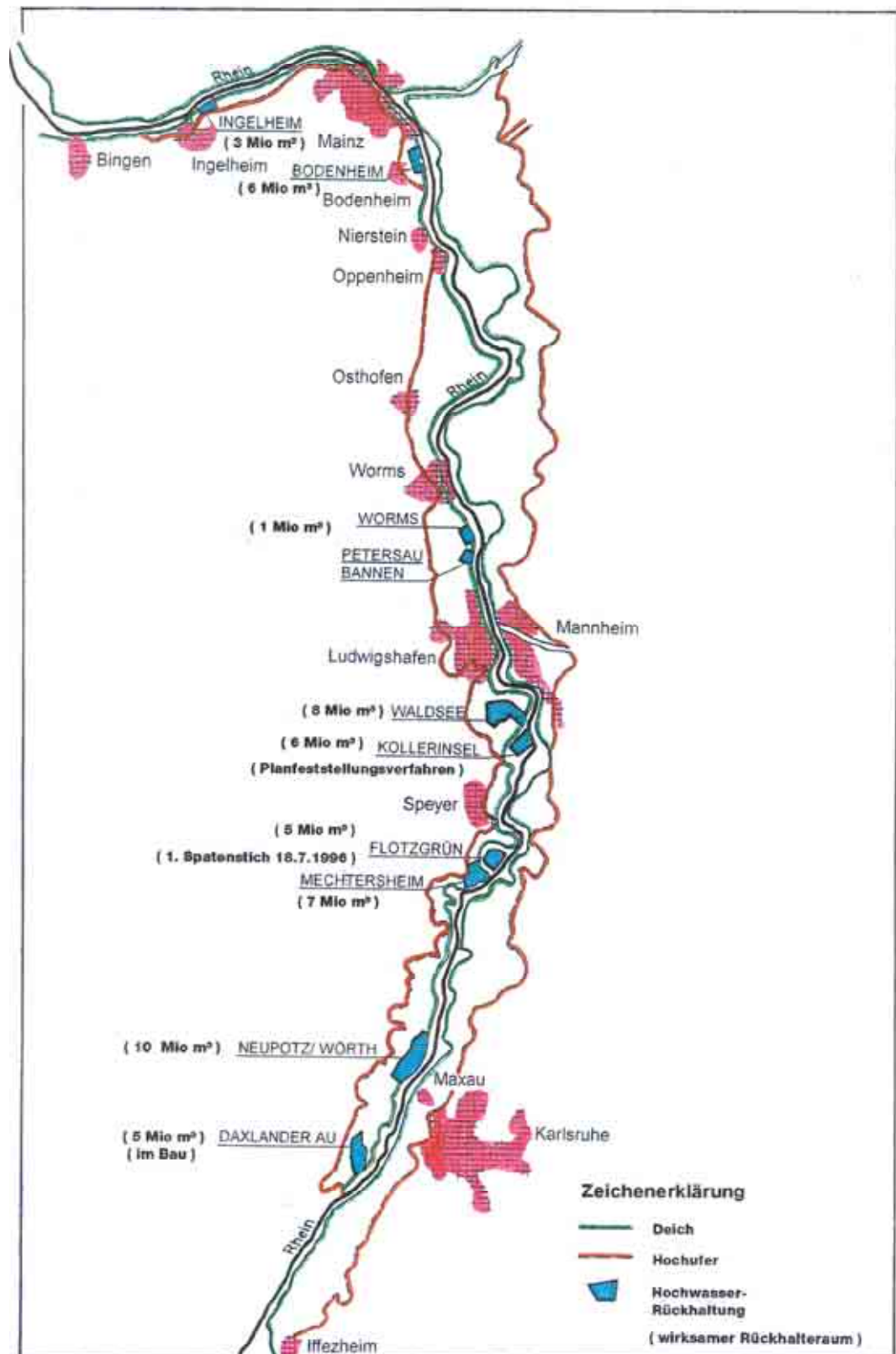


Anlage 2: Wasserstandsvermindernde Maßnahmen

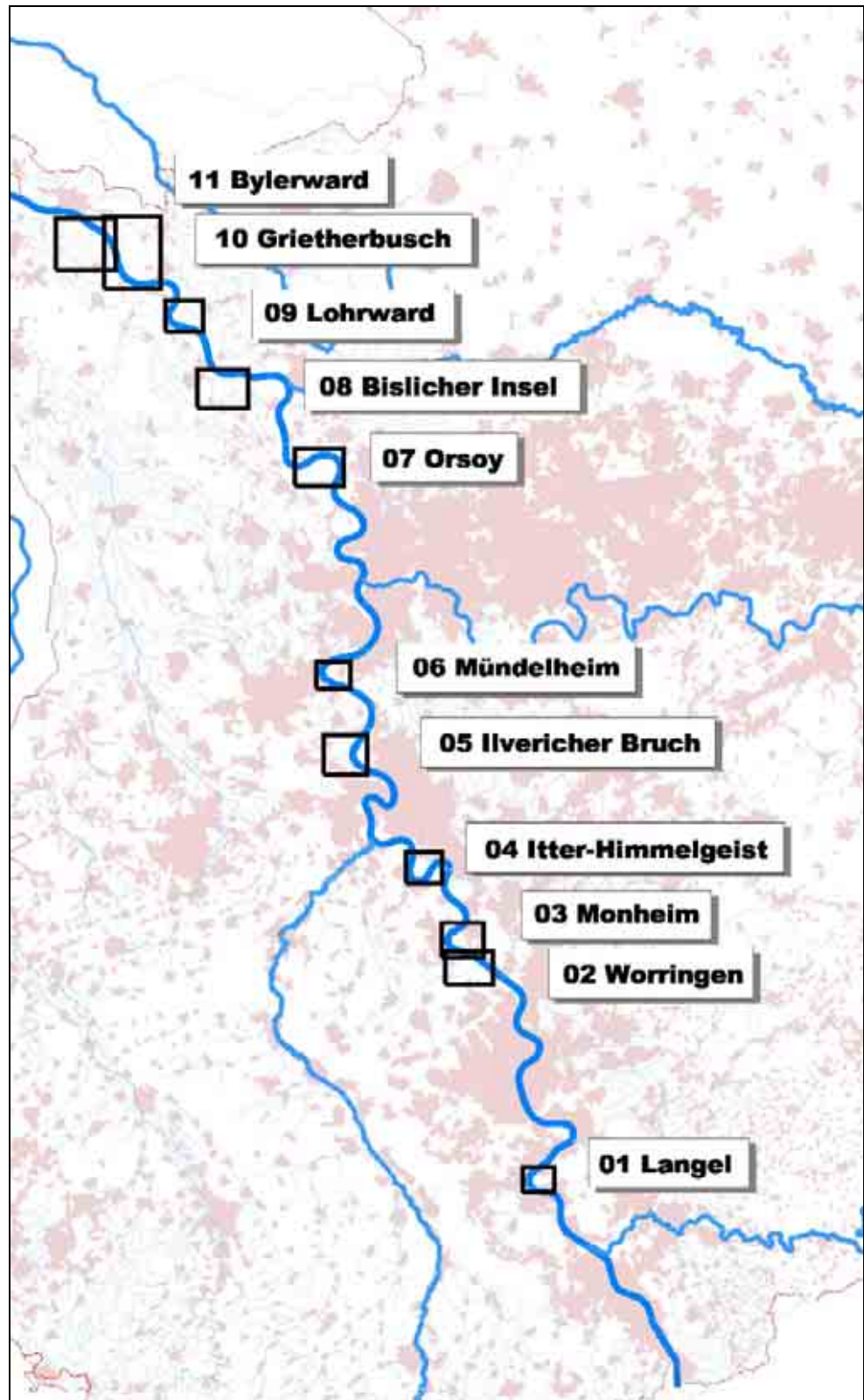
Anlage 2- 1: Wasserstandsvermindernde Maßnahmen am südlichen Oberrhein.
(aus Eberle et al., 2004)



Anlage 2- 2: Wasserstandsvermindernde Maßnahmen am nördlichen Oberrhein und Mittelrhein (aus Eberle et al., 2004).



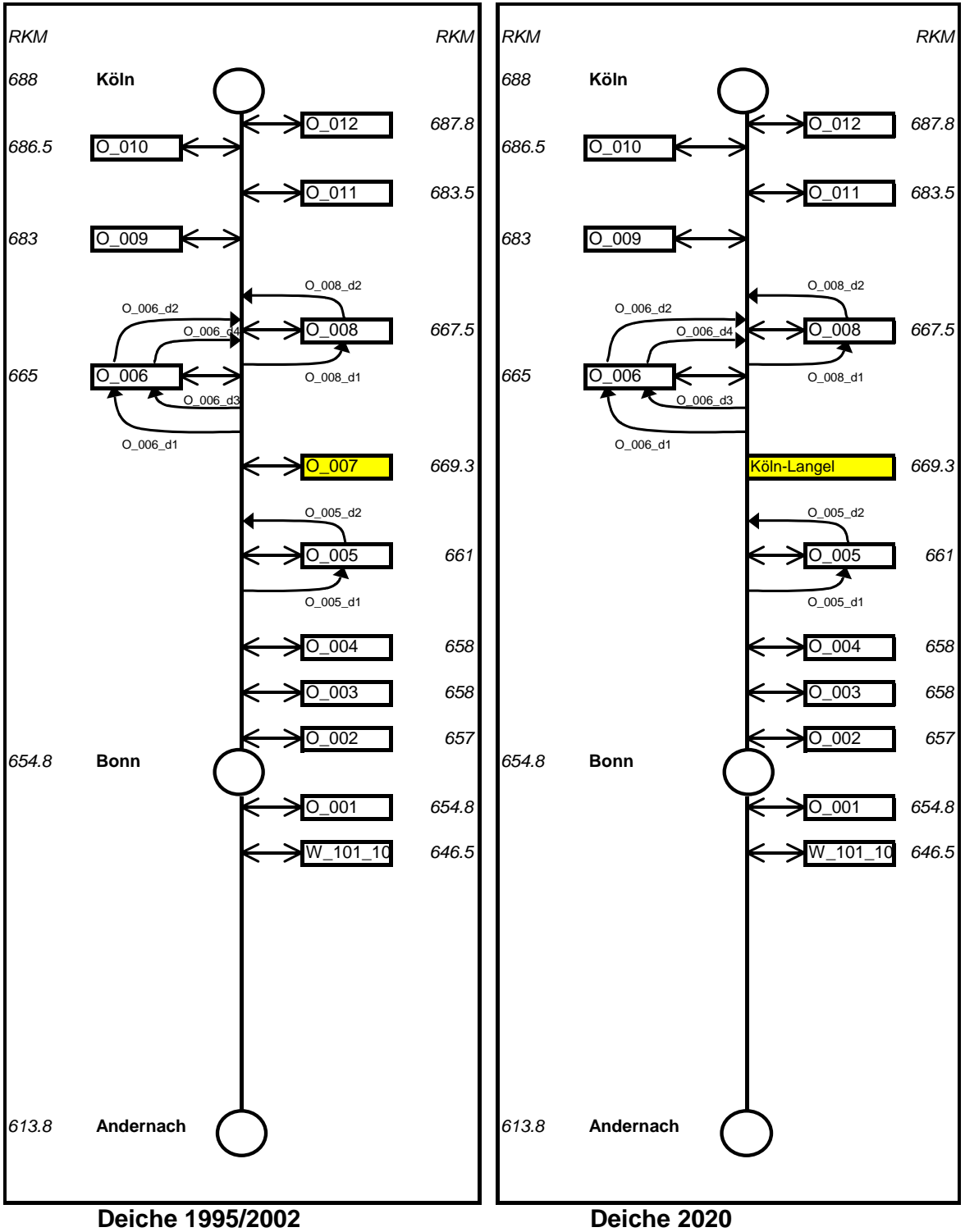
Anlage 2- 3: Wasserstandsvermindernde Maßnahmen am Niederrhein.
(aus Landesumweltamt NRW, 2003)



Anlage 3: Schematisierung des Gebietes hinter den Deichen in SOBEK/DSS.

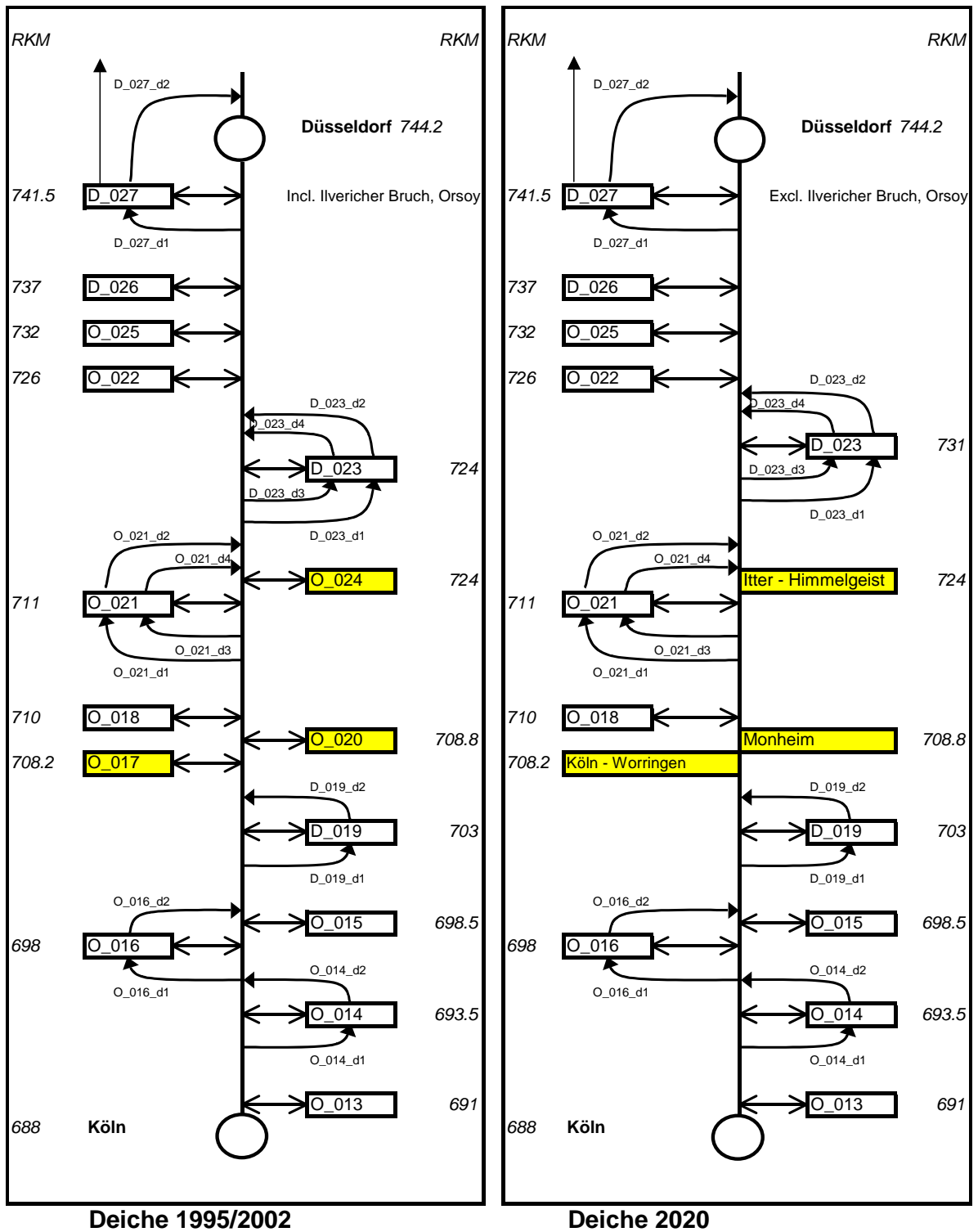
Anlage 3- 1: Systemskizze Deichüberströmungs- und Deichbruchgebiete 1D-Sicht (aus Van der Veen et al., 2004a).

Bereich Andernach - Köln



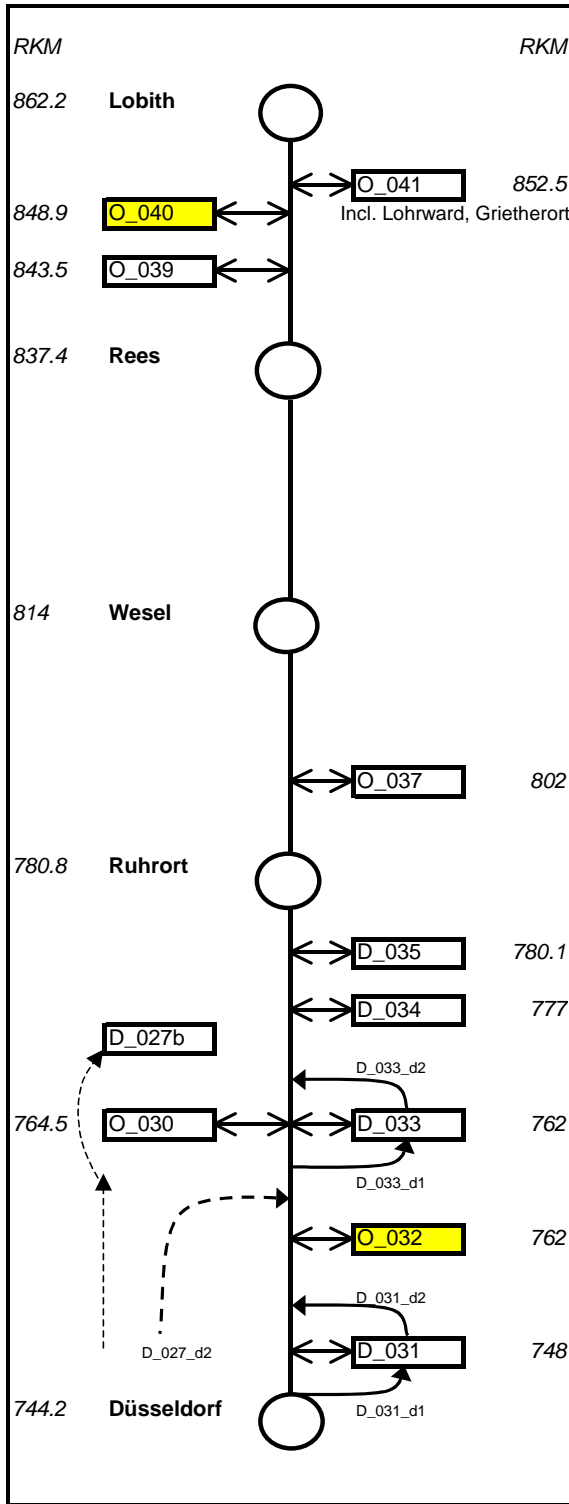
Anlage 3- 1: Systemskizze Deichüberströmungs- und Deichbruchgebiete
 1D-Sicht (aus Van der Veen et al., 2004a) (Fortsetzung 1).

Bereich Köln - Düsseldorf

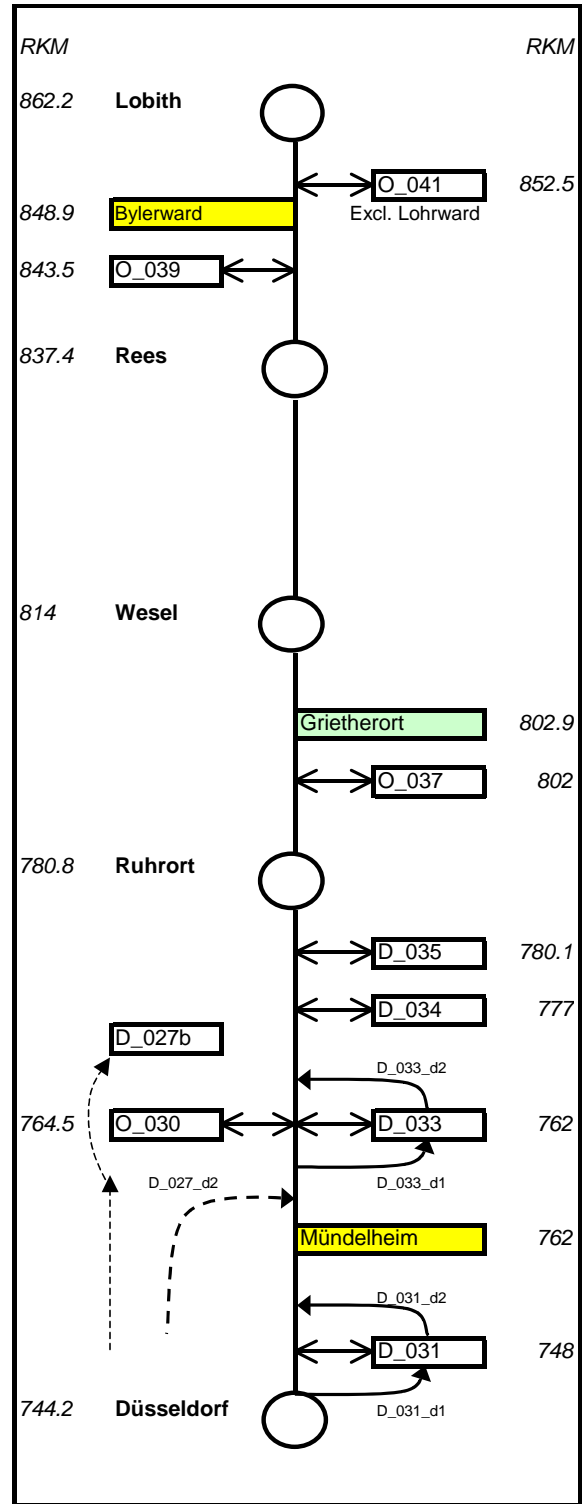


Anlage 3- 1: Systemskizze Deichüberströmungs- und Deichbruchgebiete
 1D-Sicht (aus Van der Veen et al., 2004a) (Fortsetzung 2).

Bereich Düsseldorf - Lobith



Deiche 1995/2002



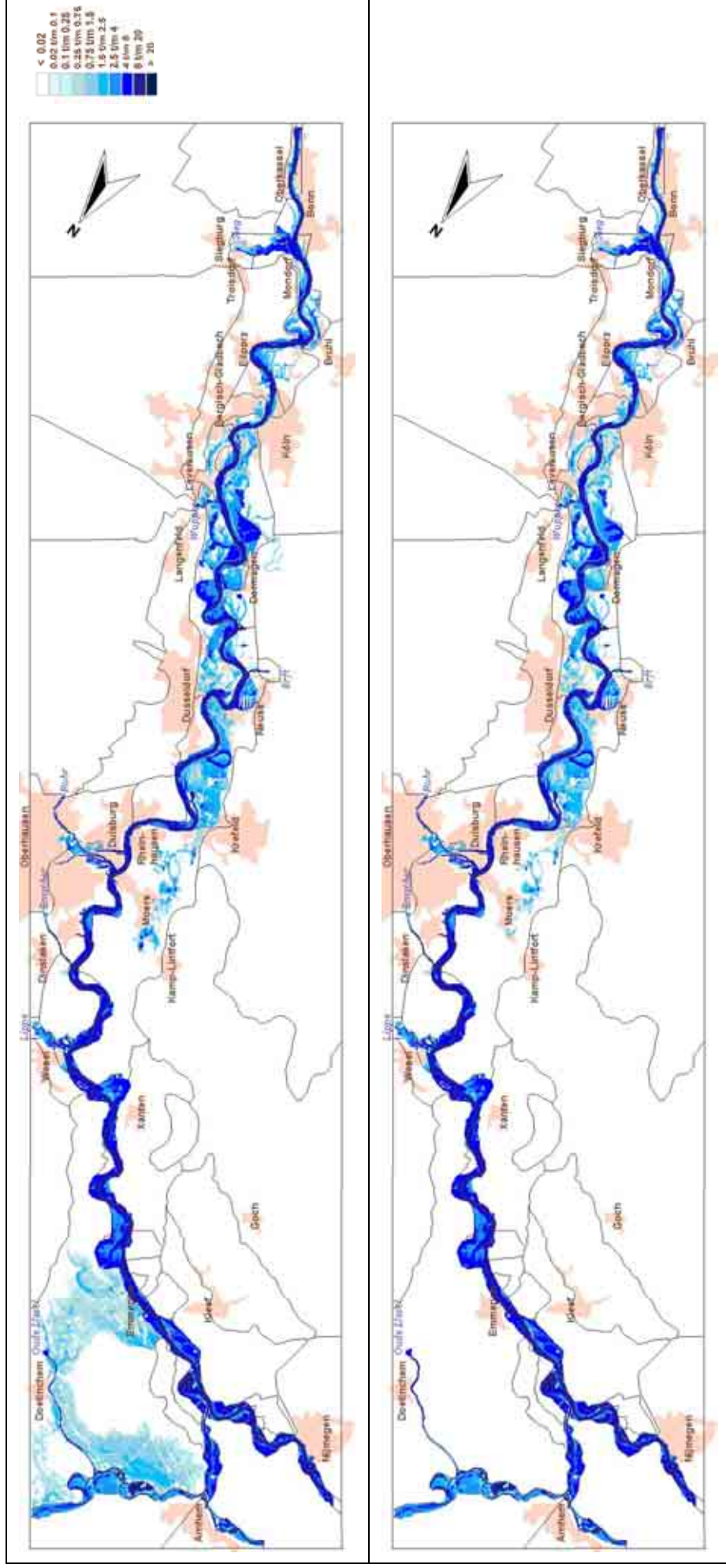
Deiche 2020

Anlage 4: Ergebnisse Überflutungsberechnungen.

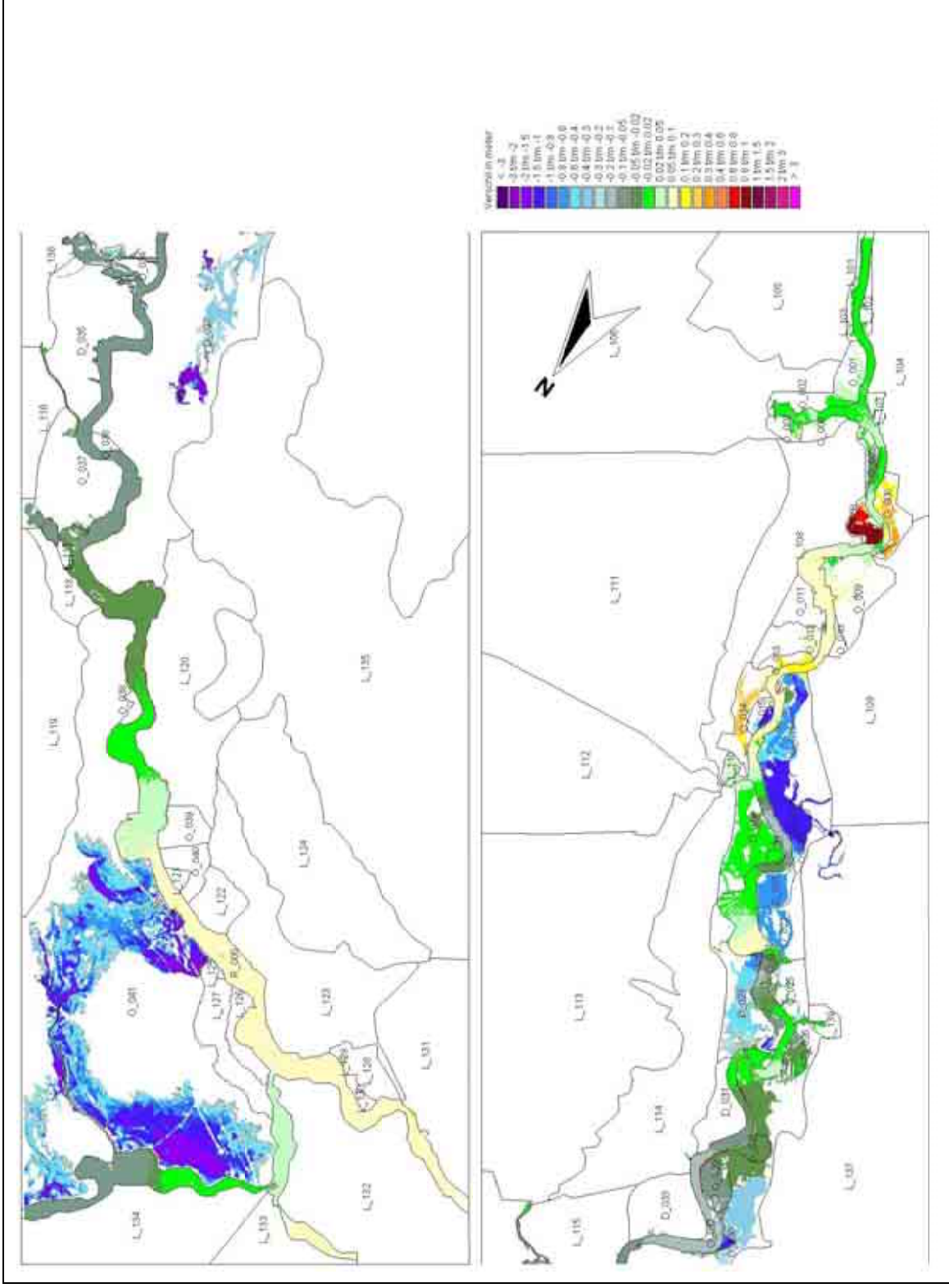
Anlage 4- 1: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW824mitDueb (aus Gudden, 2004).

- oben: Zustand 1995_DB

- unten: Zustand 2020_DB



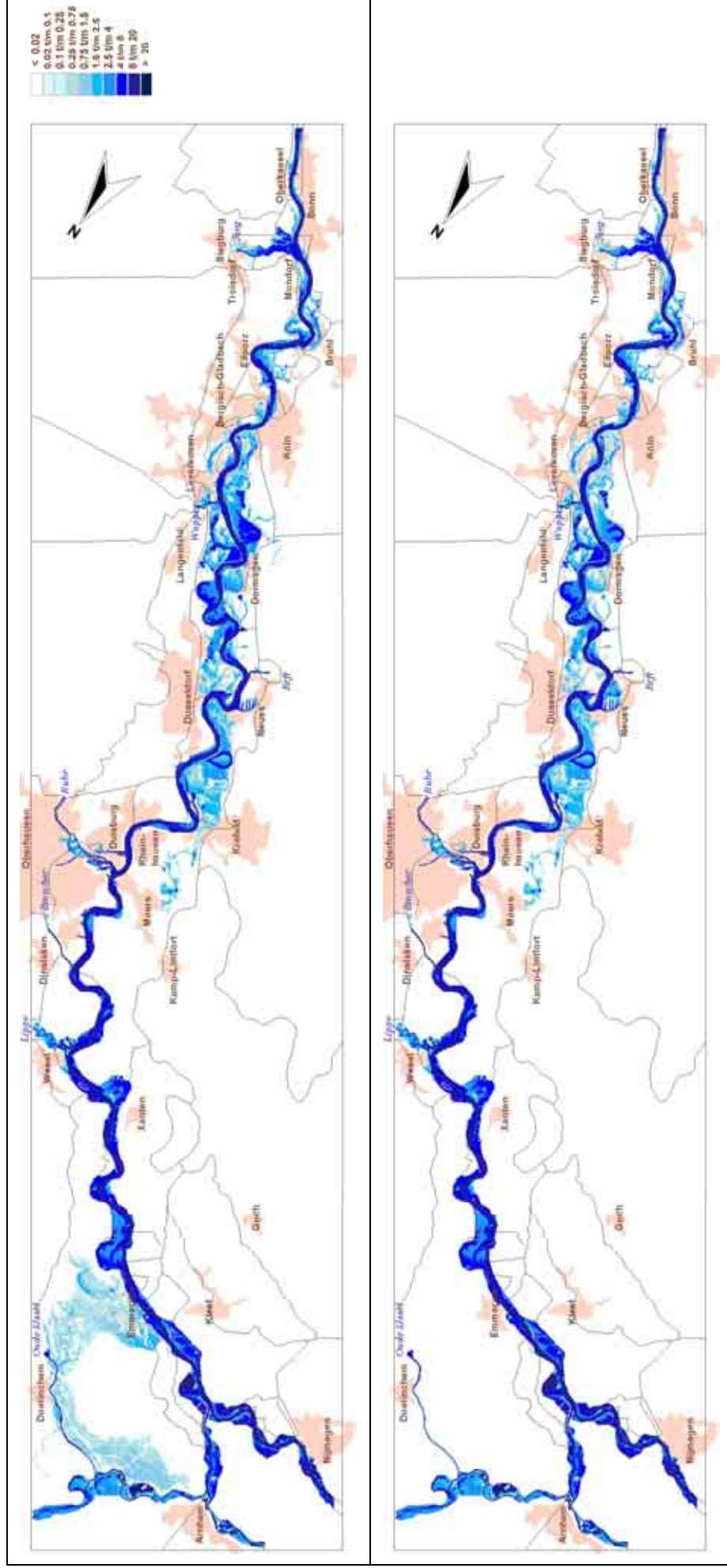
Anlage 4- 2: Wasserstandsdifferenzen zwischen den Berechnungsszenarien 1995_DB und 2020_DB, HW824mitDueb (aus Gudden, 2004).



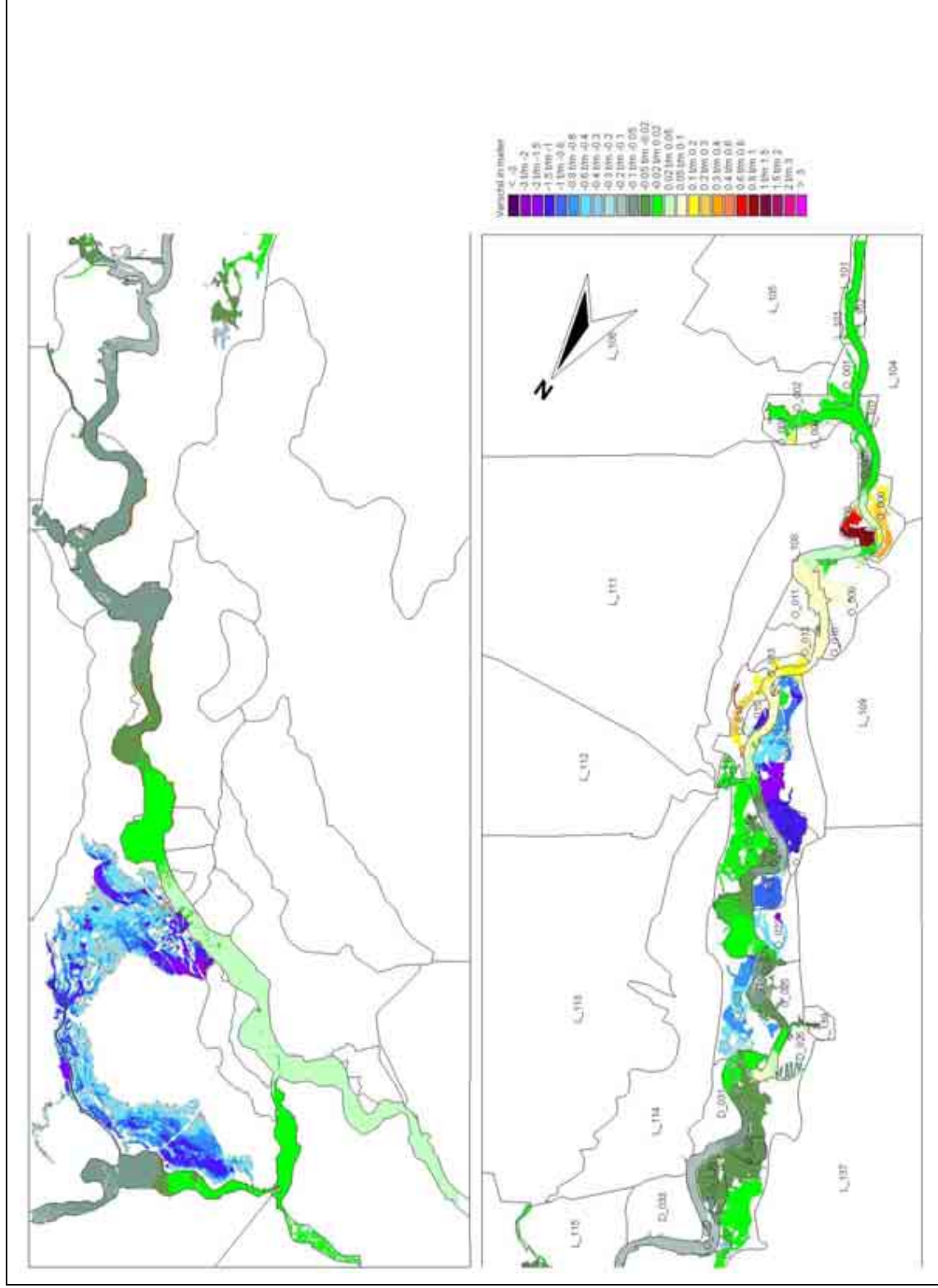
Anlage 4- 3: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW158mitDueb (aus Gudden, 2004).

- oben: Zustand 1995_DB

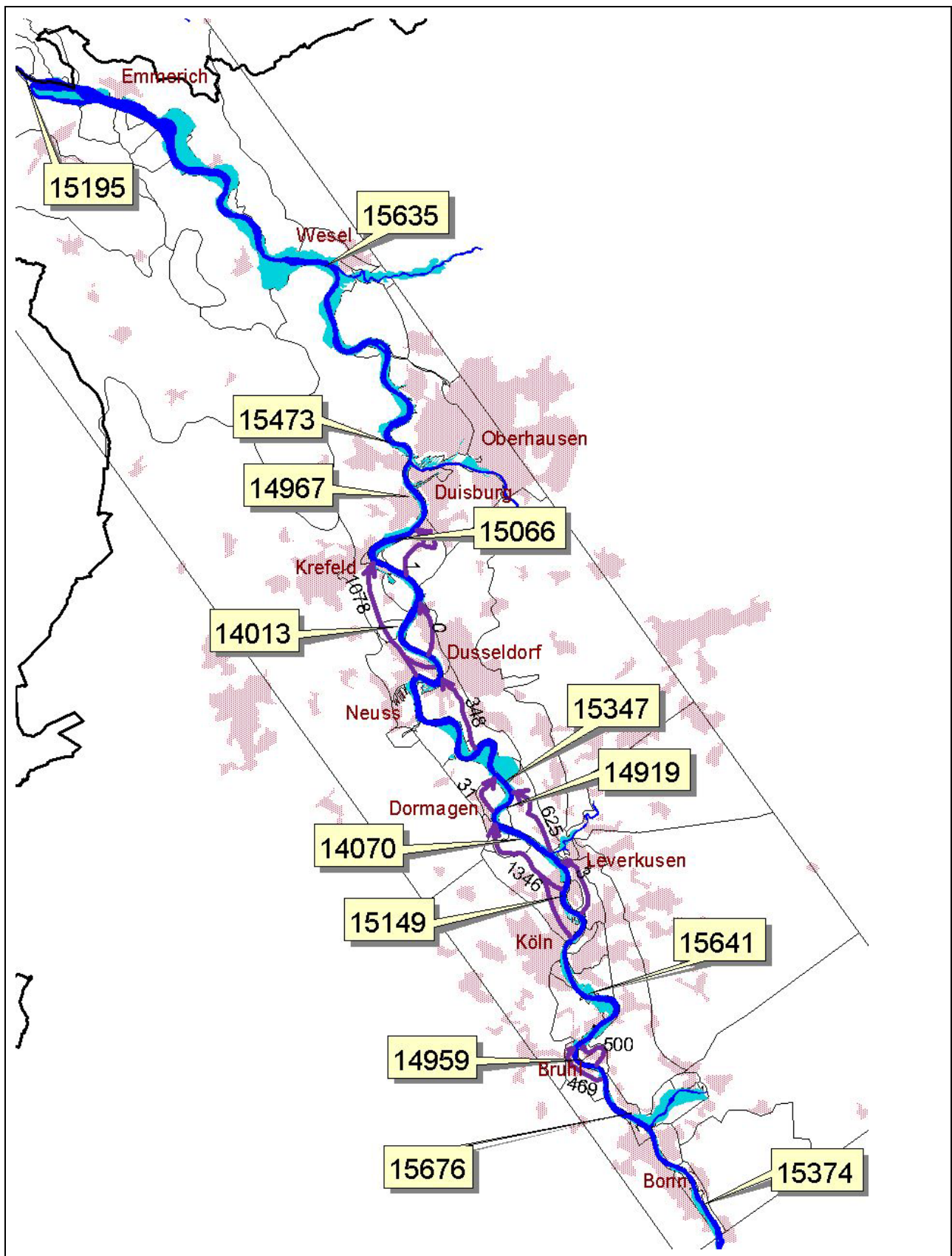
- unten: Zustand 2020_DB



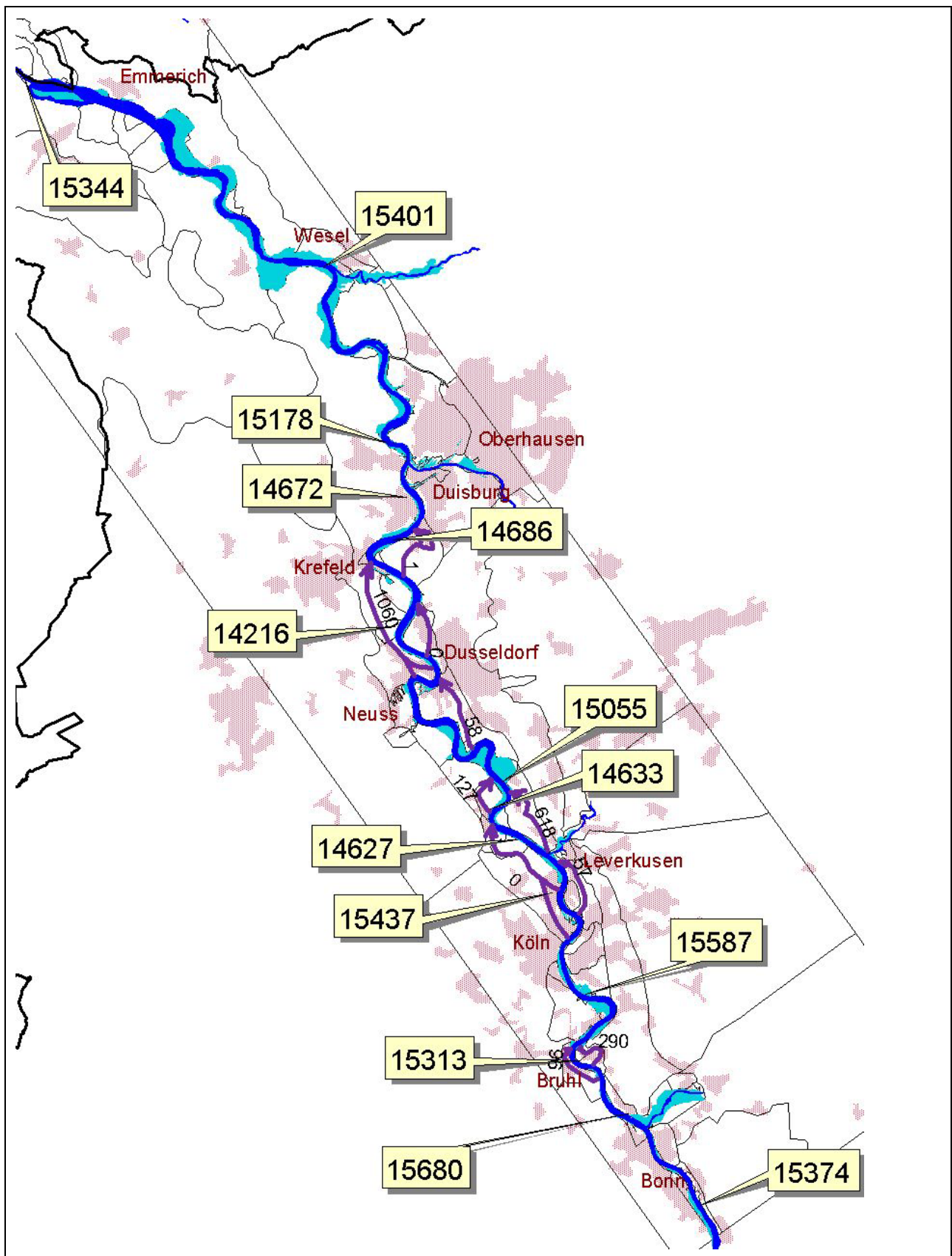
Anlage 4- 4: Wasserstandsdifferenzen zwischen den Berechnungsszenarien 1995_DB und 2020_DB, HW158mitDueb (aus Gudden, 2004).



Anlage 4- 5: Parallelströme hinter den Hochwasserschutzanlagen, Szenario 1995_DB, HW158mitDueb (nach Gudden, 2004).



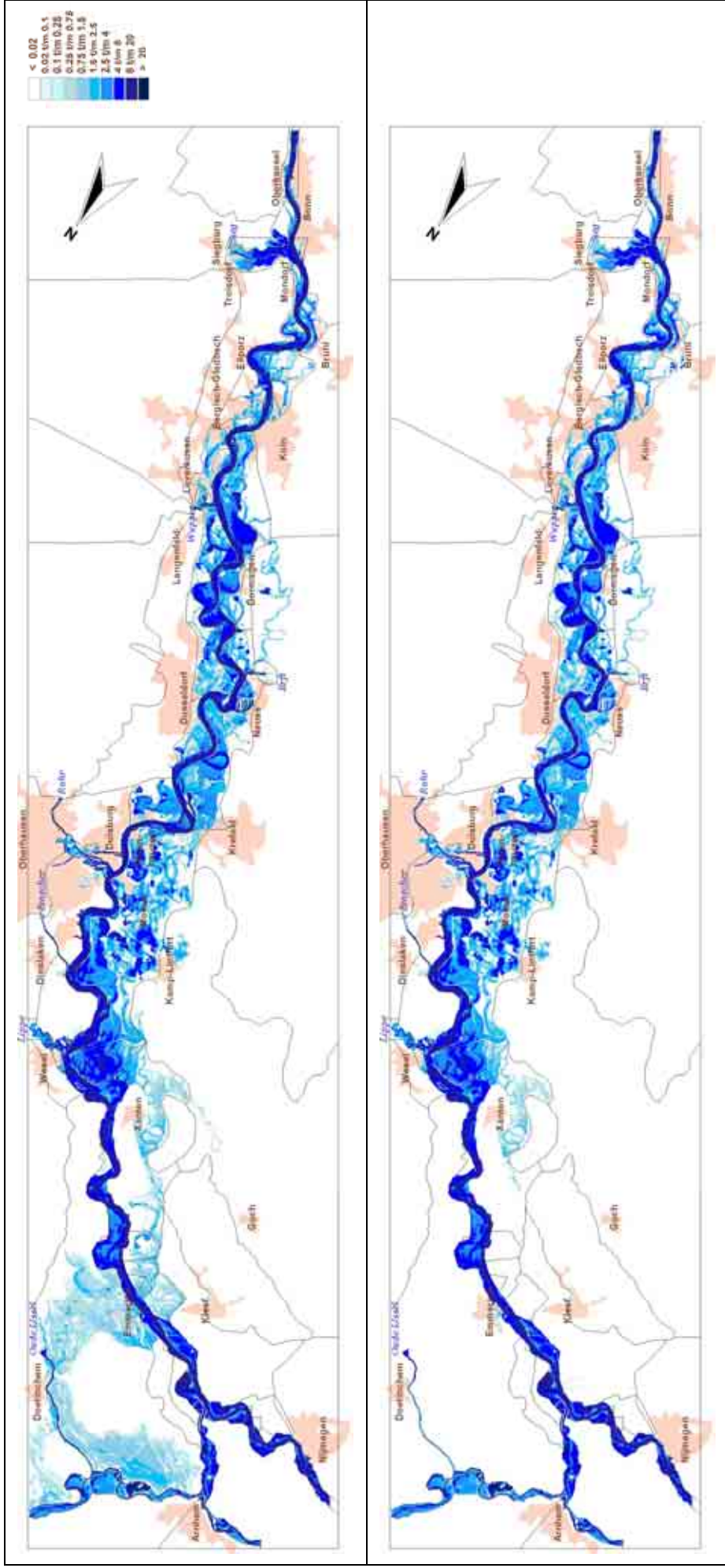
Anlage 4- 6: Parallelströme hinter den Hochwasserschutzanlagen, Szenario 2020_DB, HW158mitDueb (nach Gudden, 2004).



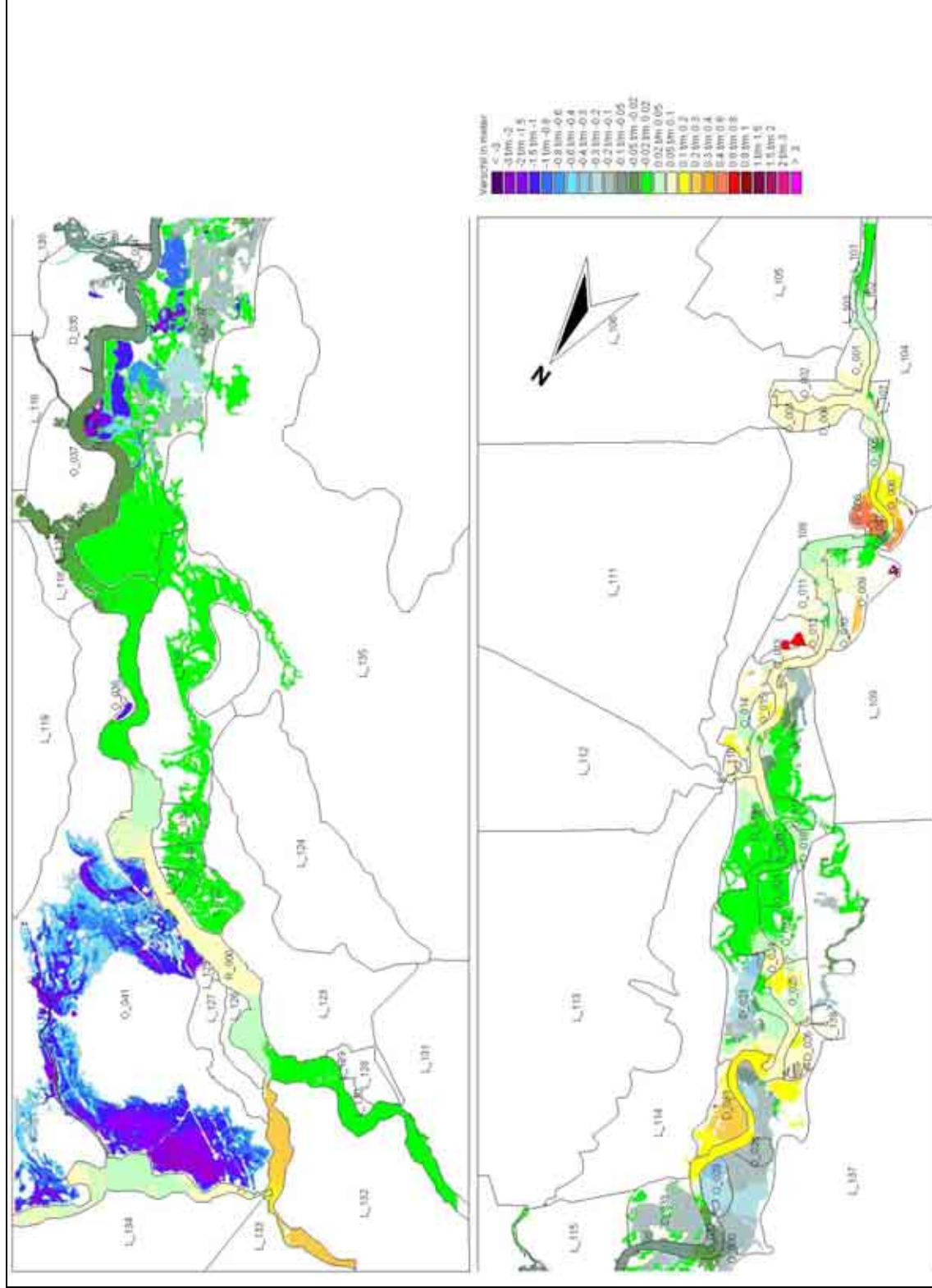
Anlage 4- 7: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW158ohneDueb (aus Gudden, 2004).

- oben: Zustand 1995_DB

- unten: Zustand 2020_DB



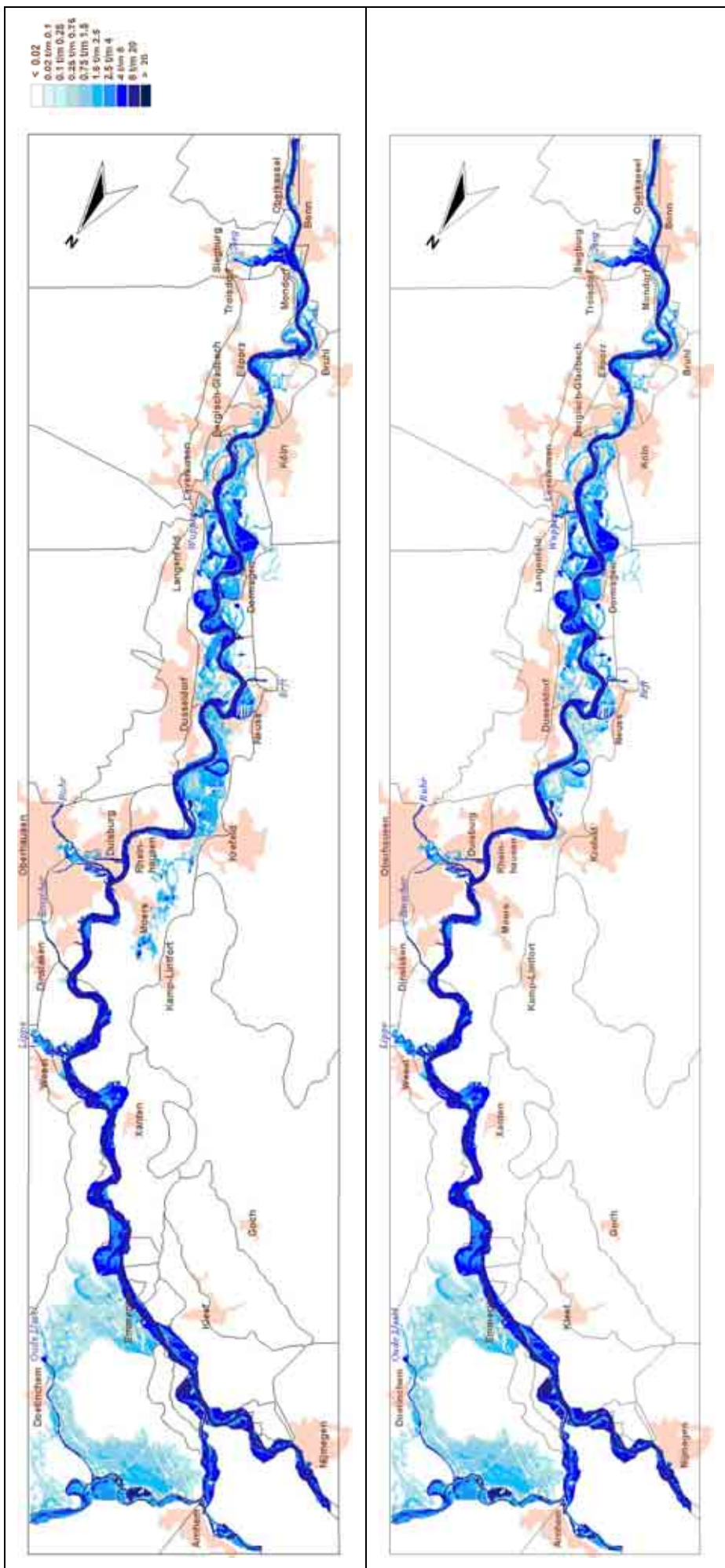
Anlage 4- 8: Wasserstandsdifferenzen zwischen den Berechnungsszenarien 1995_DB und 2020_DB, HW158ohneDueb (aus Gudden, 2004).



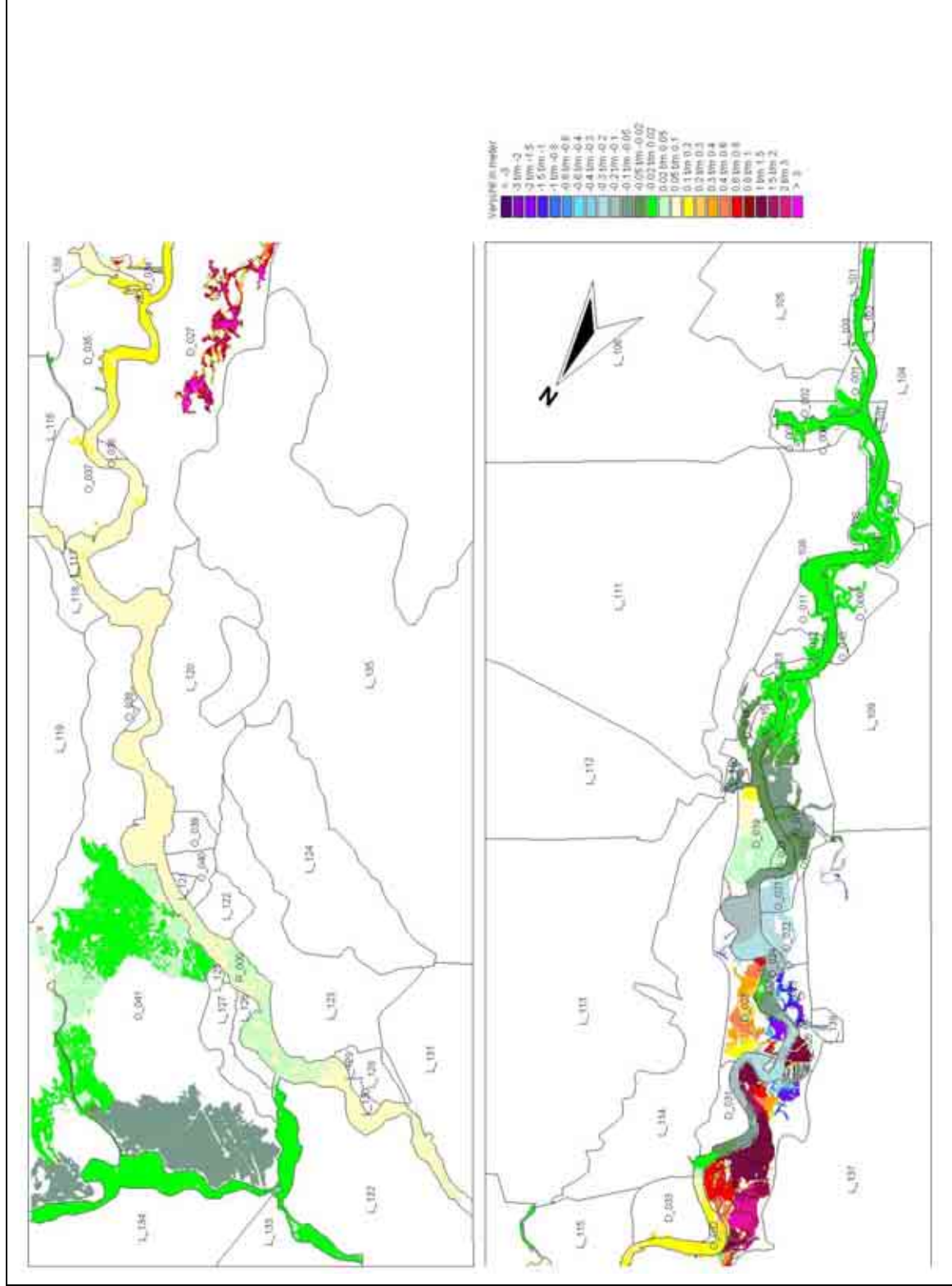
Anlage 4- 9: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW824mitDueb (aus Gudden, 2004).

- oben: Szenario 1995_DB

- unten: Szenario 1995_DÜ



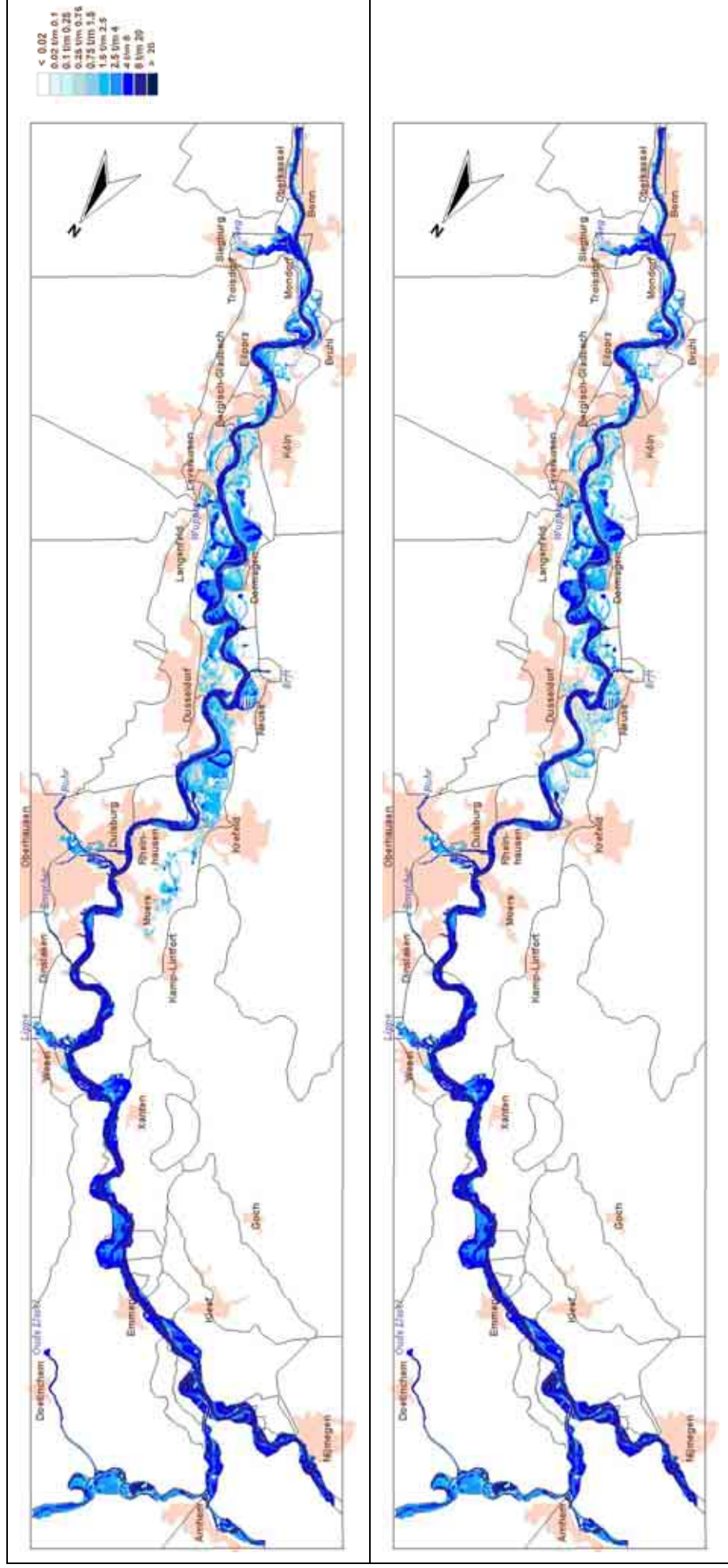
Anlage 4- 10: Wasserstandsunterschiede zwischen den Berechnungsszenarien 1995_DB und 1995_DÜ, HW824mitDueb (aus Gudden, 2004).



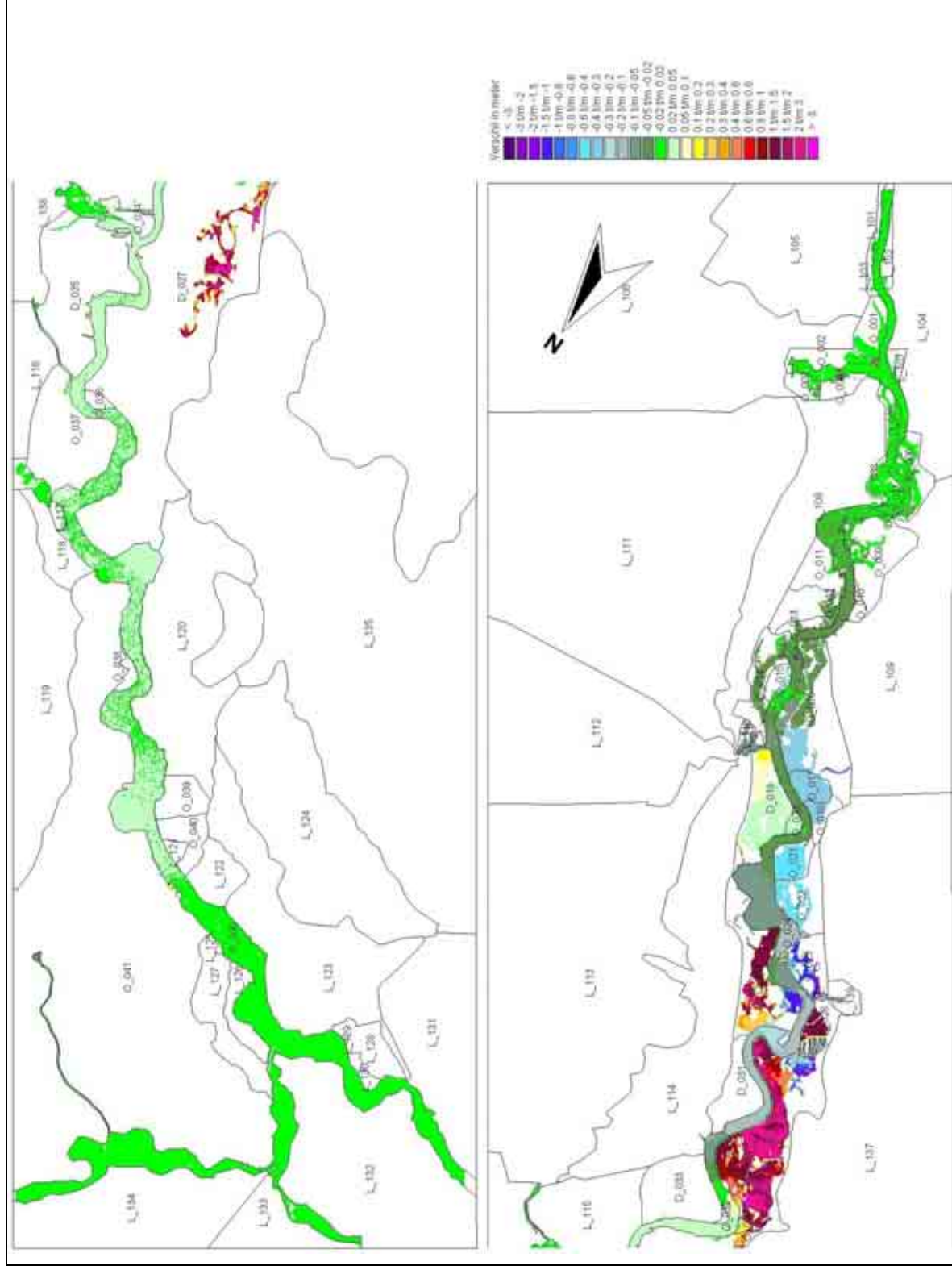
Anlage 4- 11: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW824mitDueb (aus Gudden, 2004).

- oben: Szenario 2020_DB

- unten: Szenario 2020_DÜ



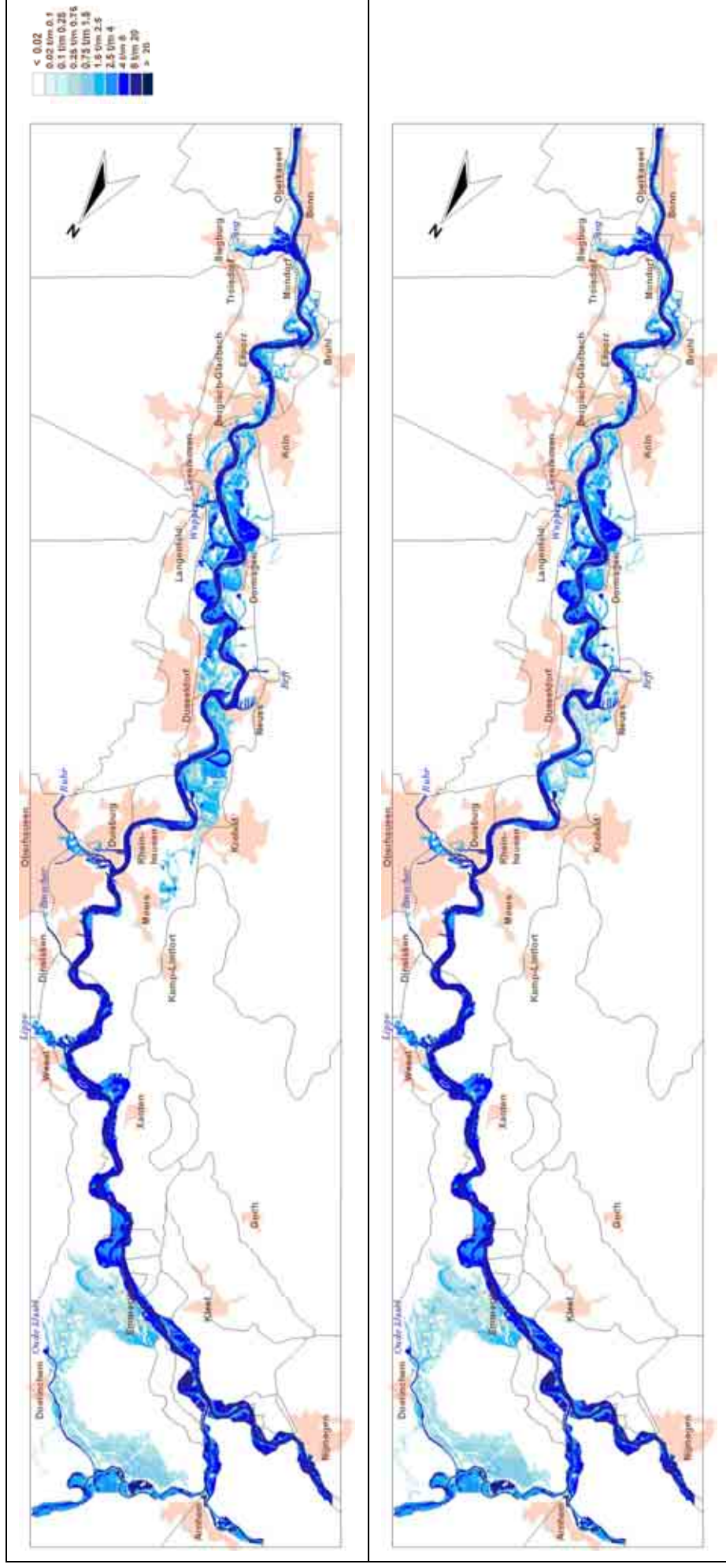
Anlage 4- 12: Wasserstandsunterschieden zwischen den Berechnungsszenarien 2020_DB und 2020_DÜ, HW824mitDueb (aus Gudden, 2004).



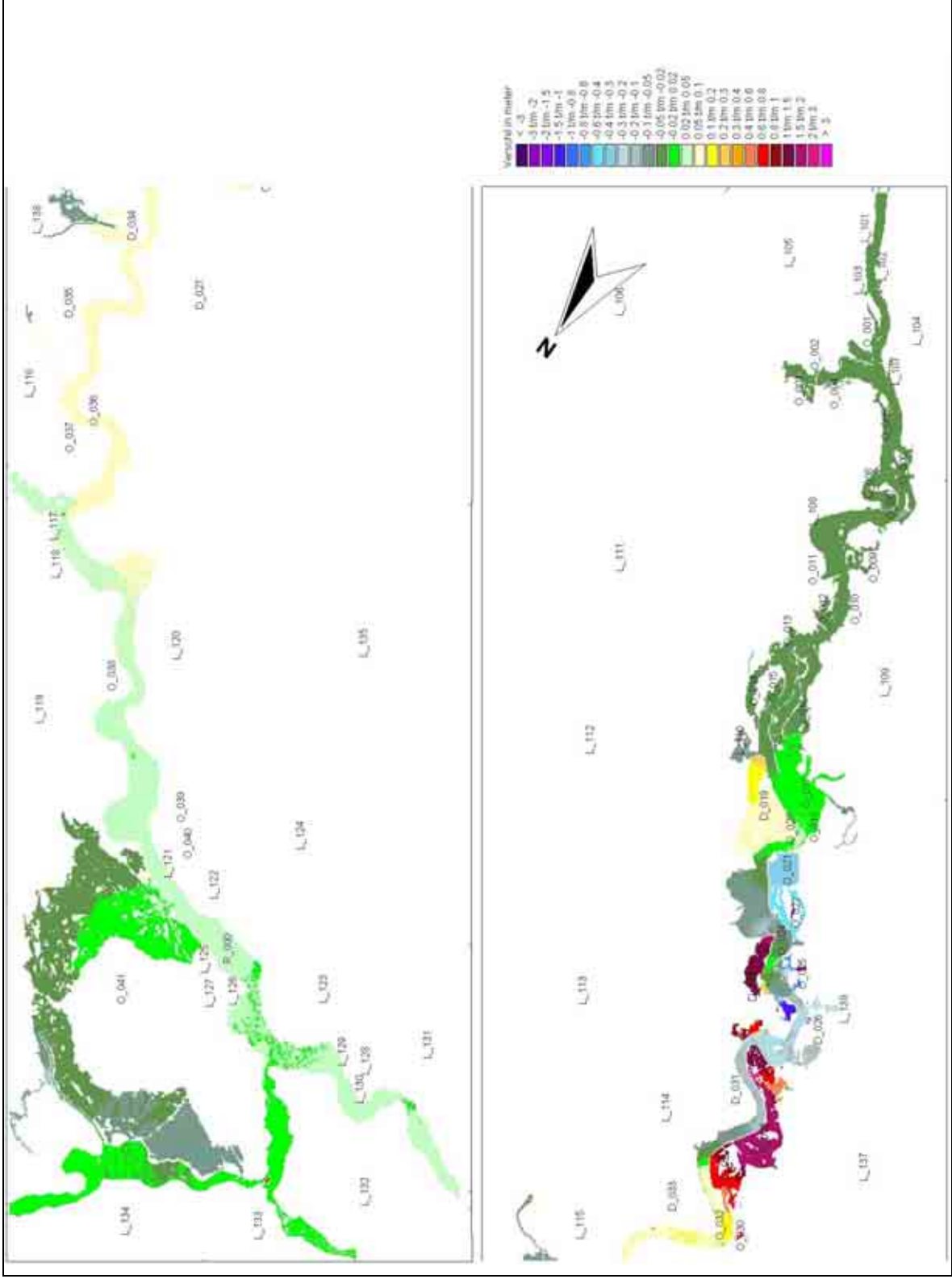
Anlage 4 - 13: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW158mitDueb (aus Gudden, 2004).

- oben: Szenario 1995_DB

- unten: Szenario 1995_DÜ



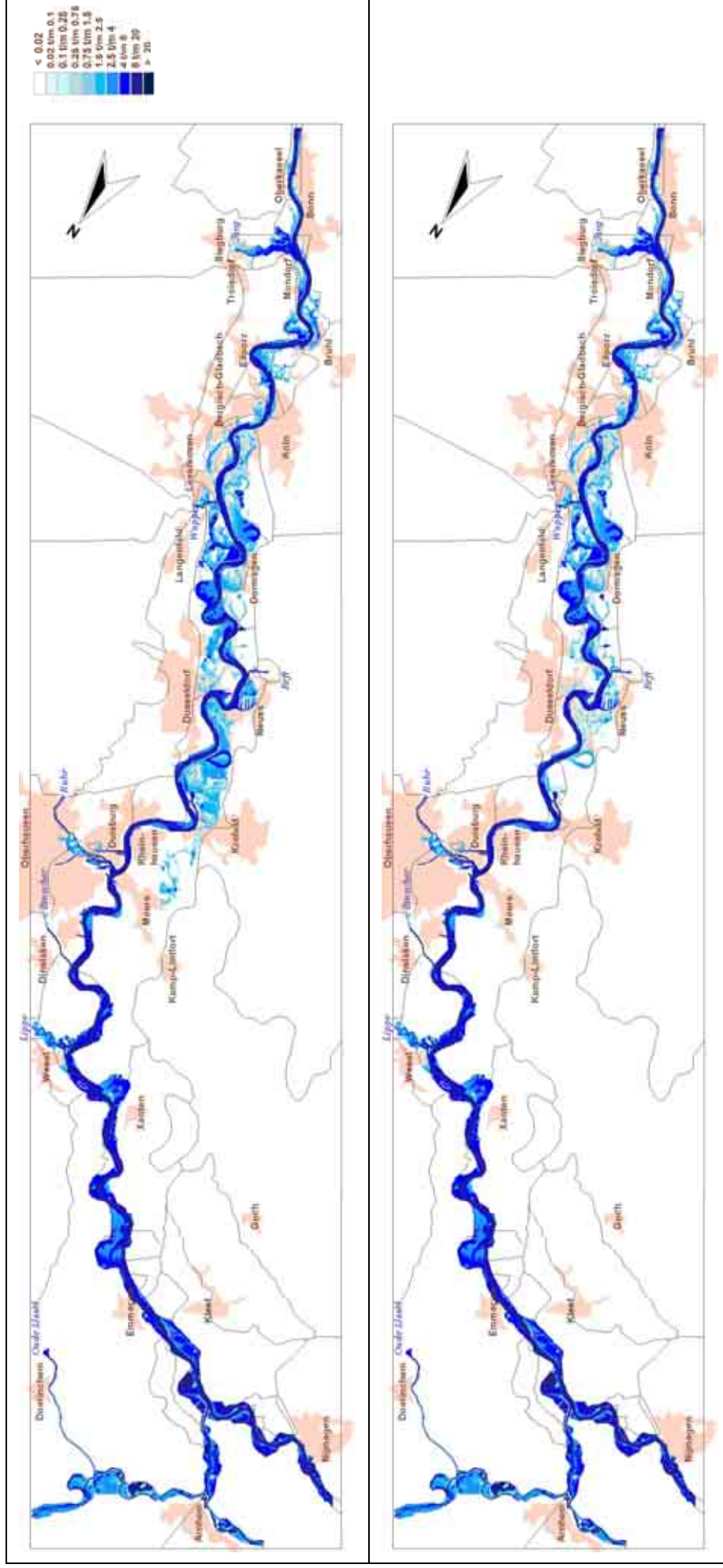
Anlage 4- 14: Wasserstandsunterschiede zwischen den Berechnungsszenarien 1995_DB und 1995_DÜ, HW158mitDueb (aus Gudden, 2004).



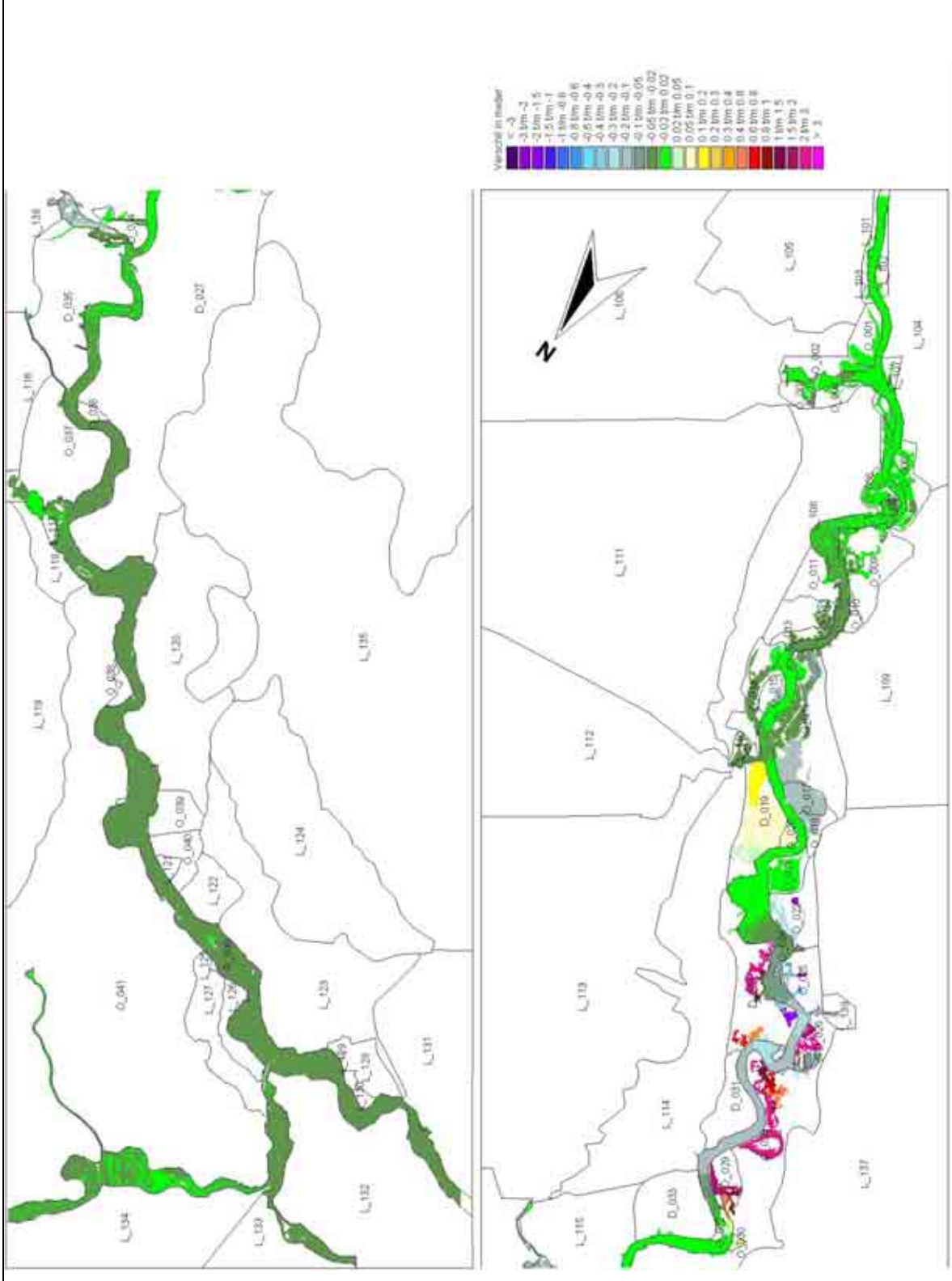
Anlage 4- 15: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW158mitDueb (aus Gudden, 2004).

- oben: Szenario 2020_DB

- unten: Szenario 2020_DÜ



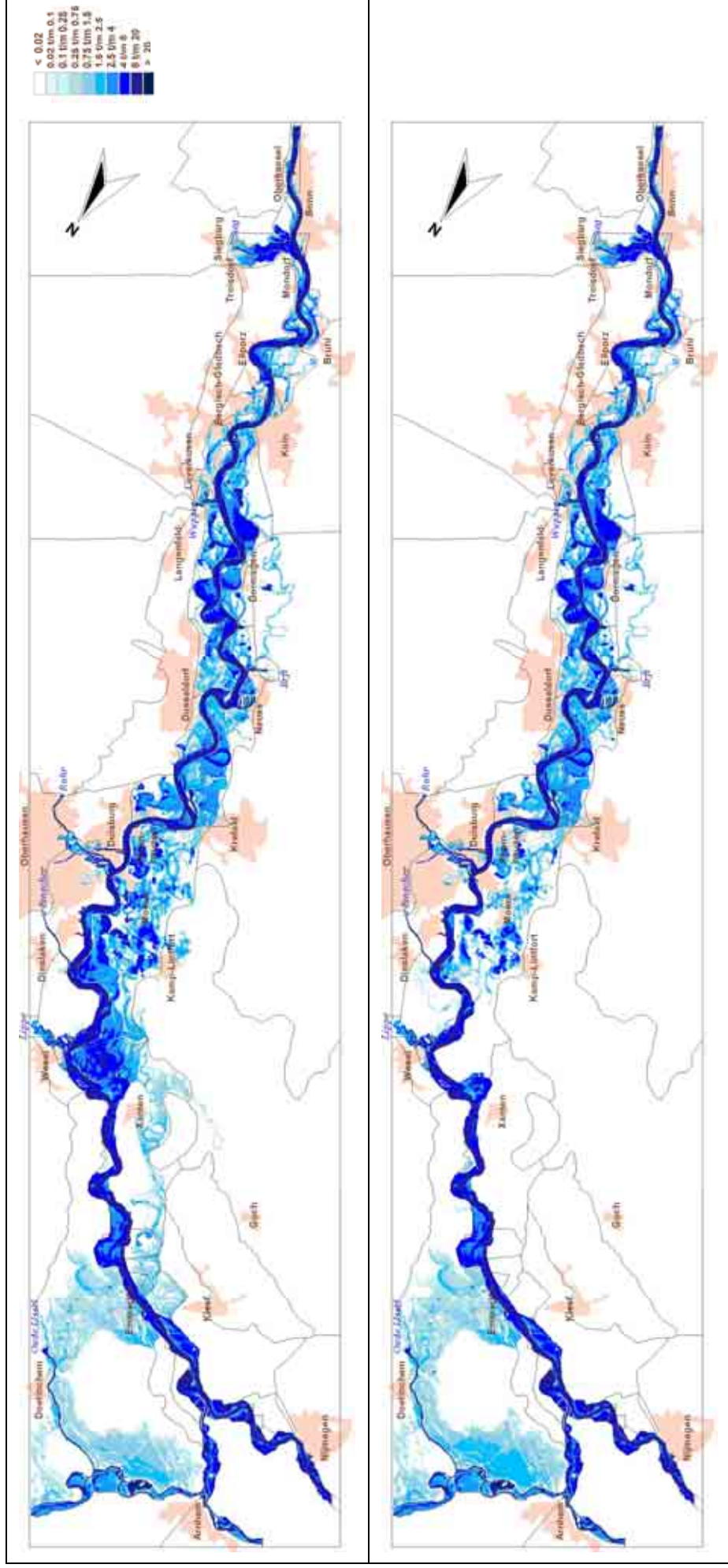
Anlage 4- 16: Wasserstandsunterschieden zwischen den Berechnungsszenarien 2020_DB und 2020_DÜ, HW158mitDueb (aus Gudden, 2004).



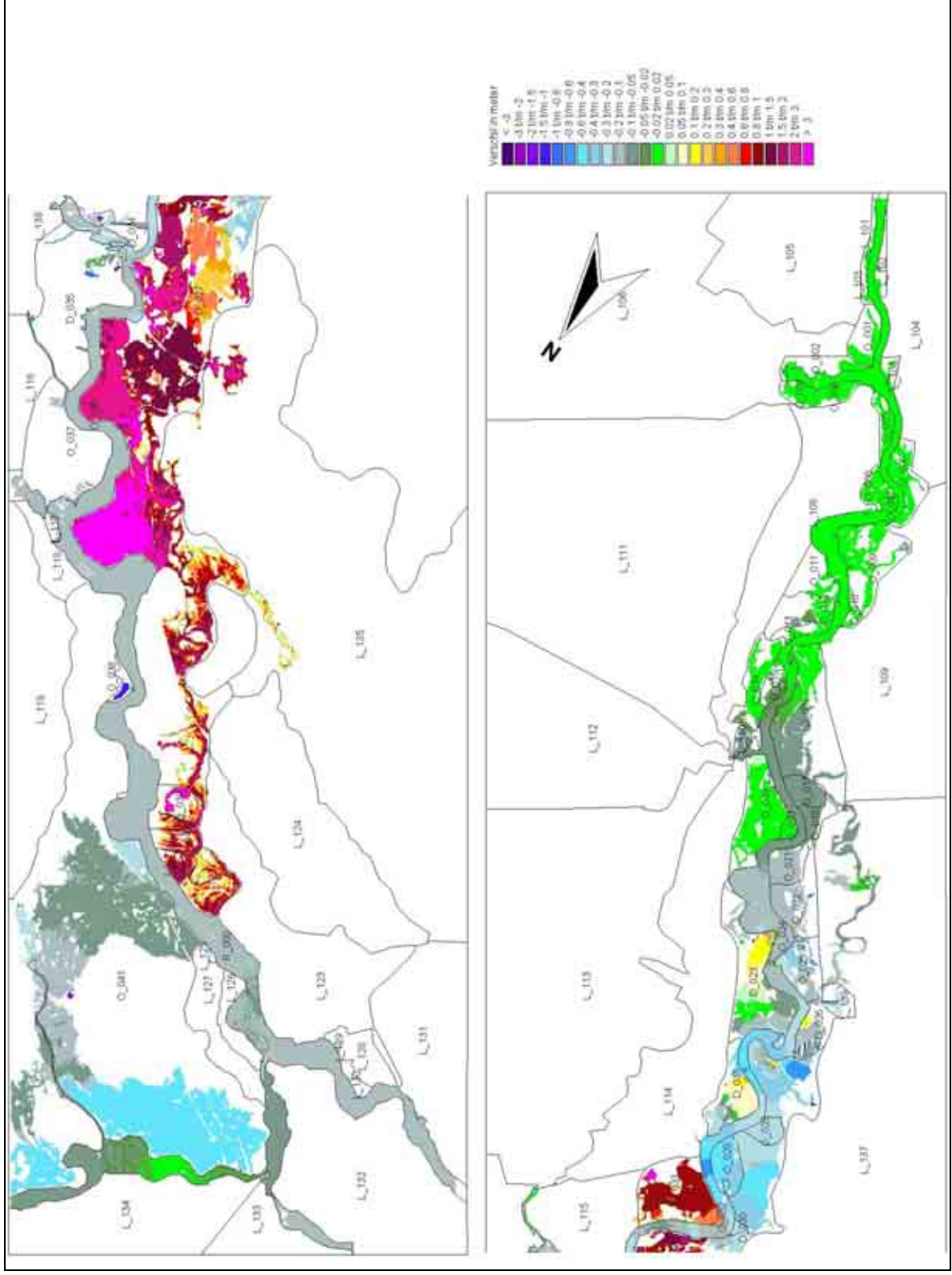
Anlage 4- 17: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW158ohneDueb (aus Gudde, 2004).

- oben: Szenario 1995_DB

- unten: Szenario 1995_DÜ



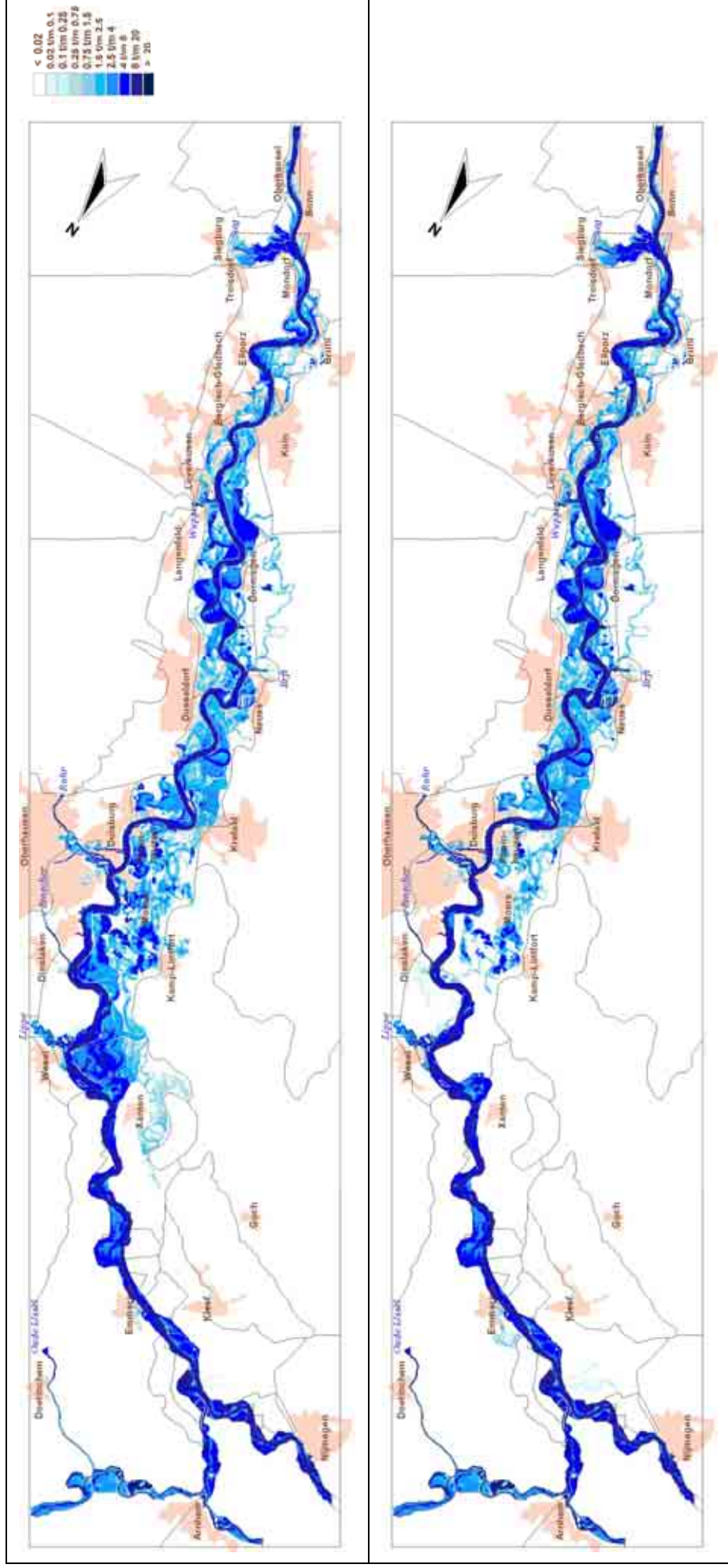
Anlage 4- 18: Wasserstandsunterschieden zwischen den Berechnungsszenarien 1995_DB und 1995_DÜ, HW158ohneDueb (aus Gudden, 2004).



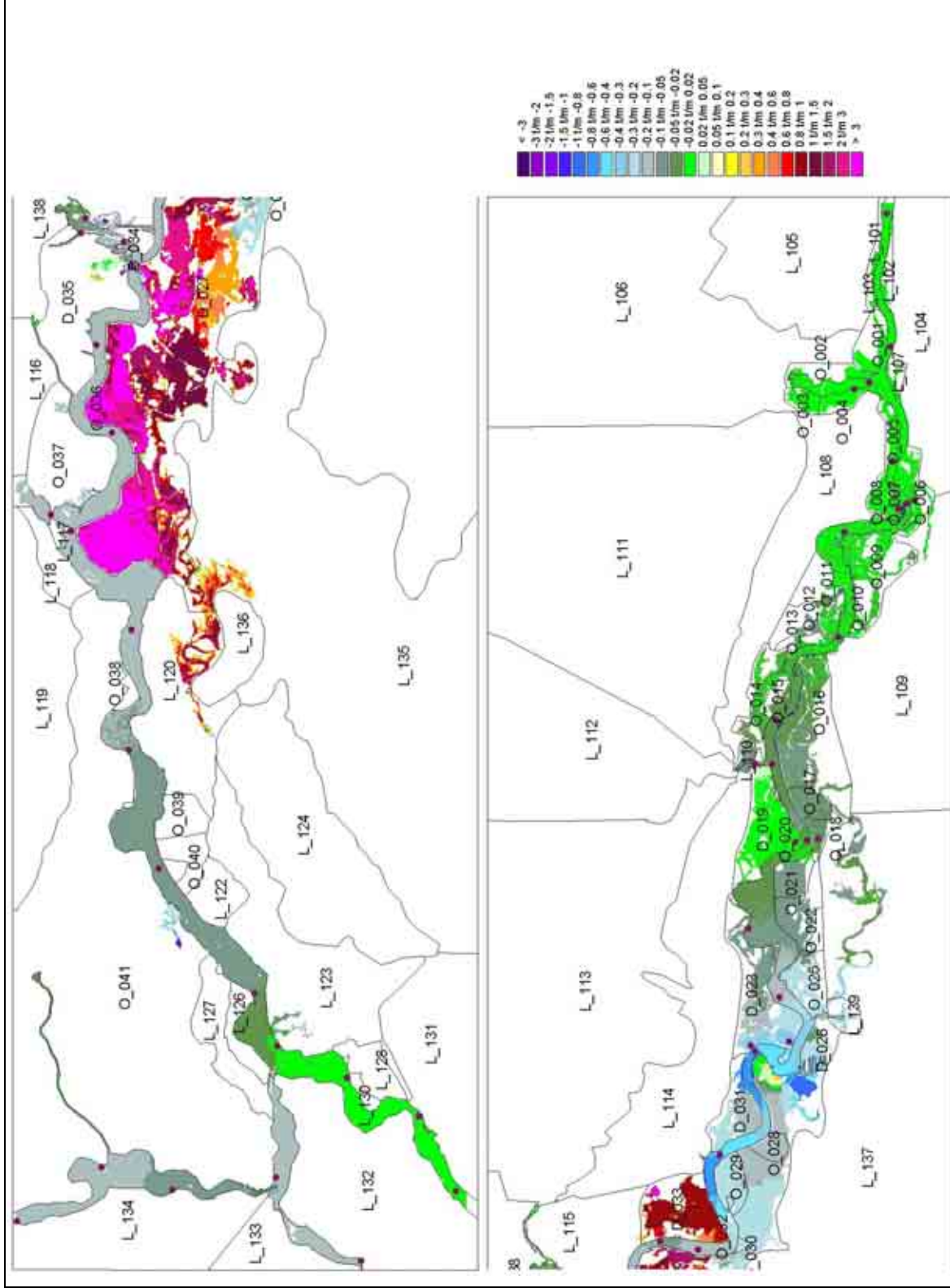
Anlage 4- 19: Maximale Wassertiefe bei Überflutungen am Niederrhein, HW158ohneDueb (aus Gudde, 2004).

- oben: Szenario 2020_DB

- unten: Szenario 2020_DÜ

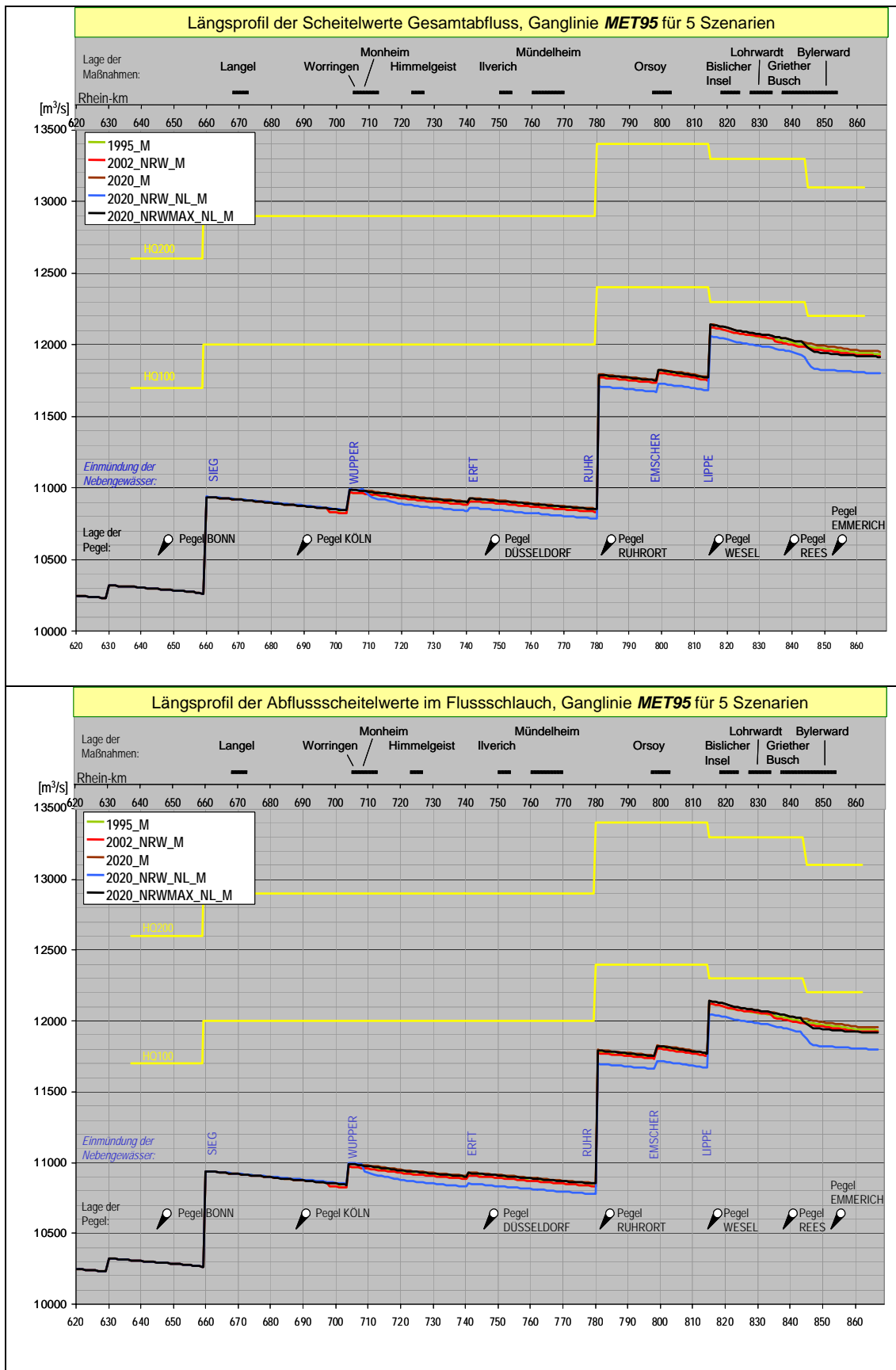


Anlage 4- 20: Wasserstandsunterschieden zwischen den Berechnungsszenarien 2020_DB und 2020_DÜ, HW158ohneDueb (aus Gudden, 2004).

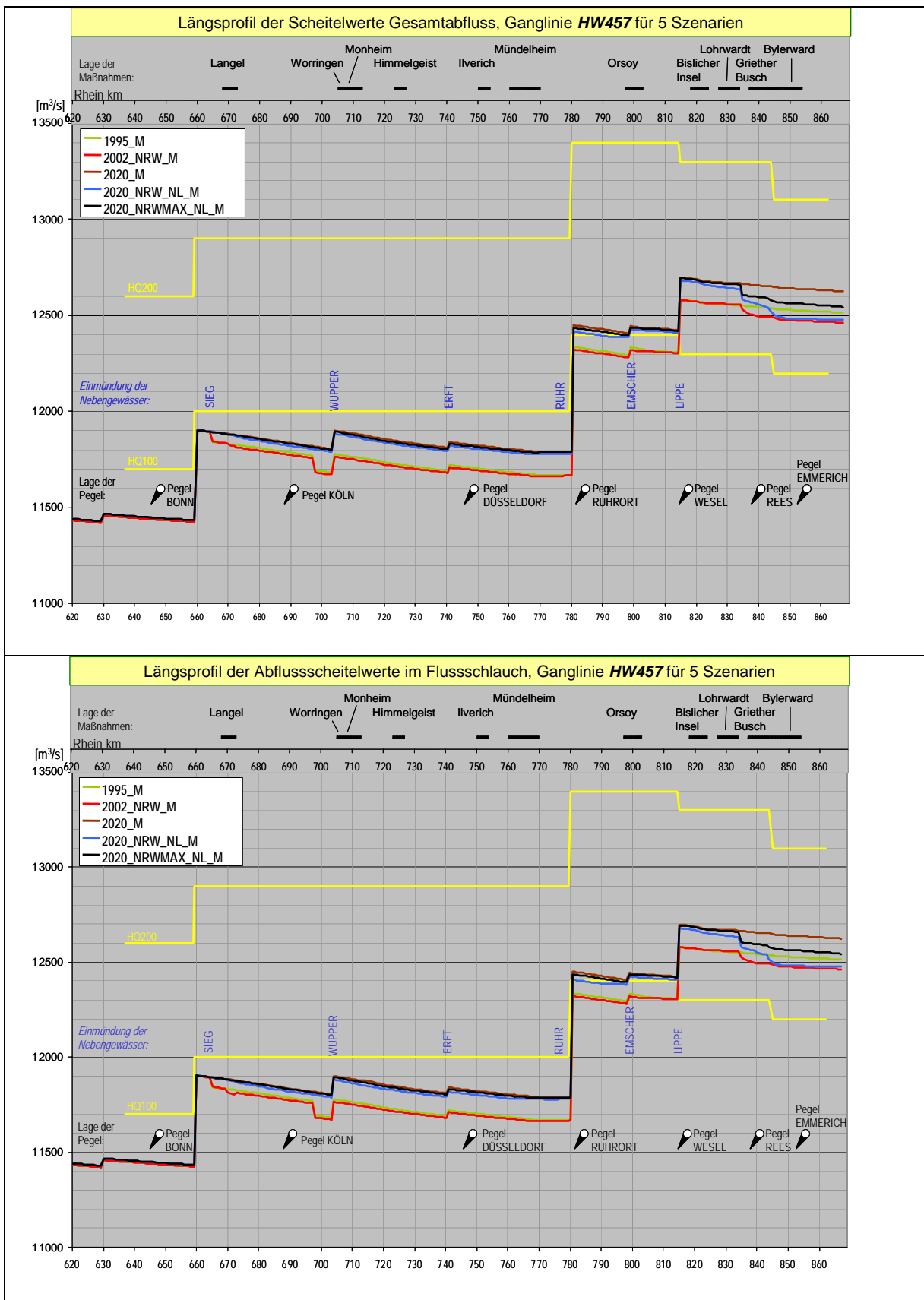


Anlage 5: Längsprofile Scheitelabflüsse

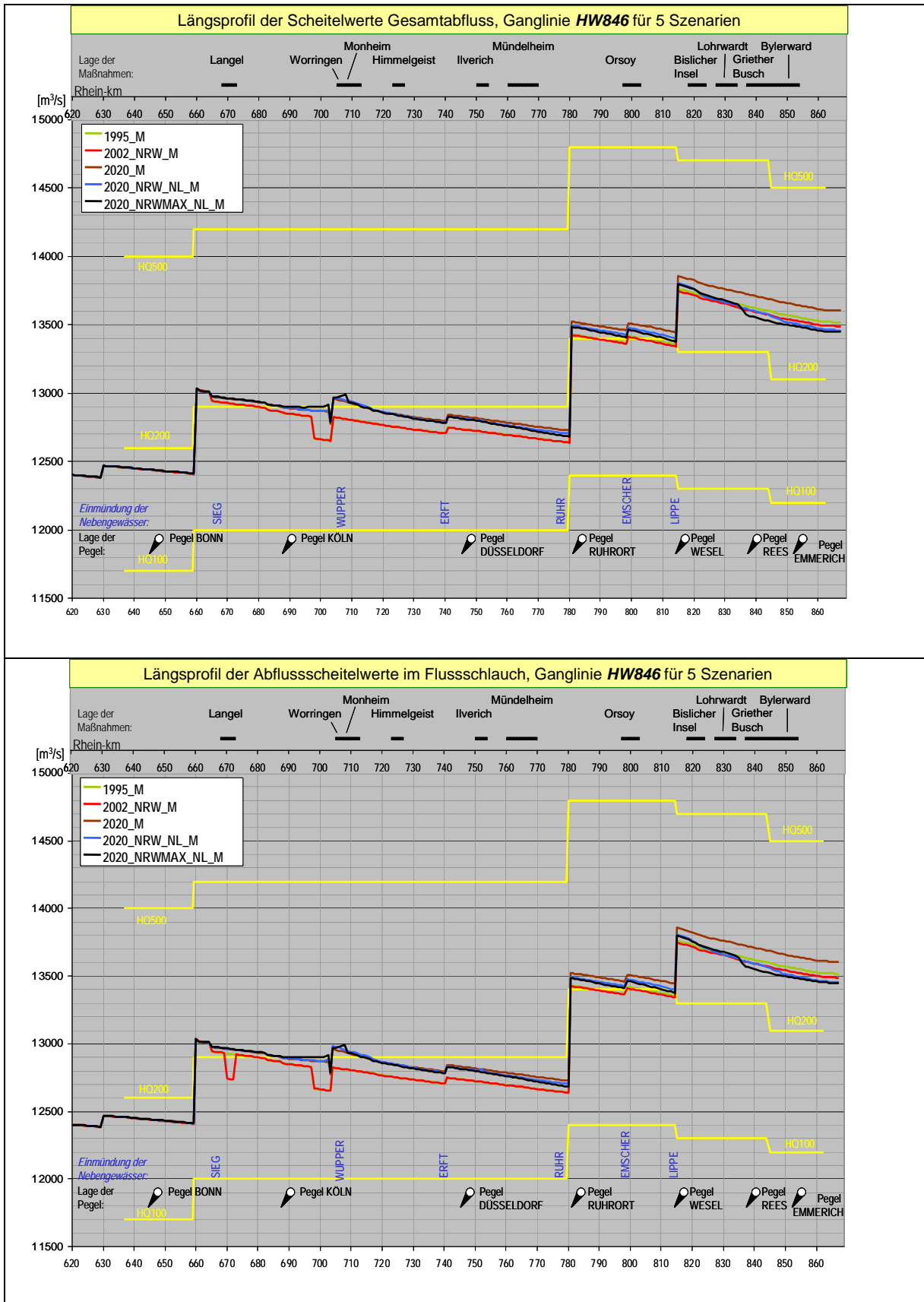
Anlage 5- 1: Entwicklung der Scheitelabflüsse entlang des Rheins, Hochwasser Januar 1995 (MET95).
 Oben: Gesamtabfluss; unten Abfluss im Flussschlauch (= zwischen den Deichen).



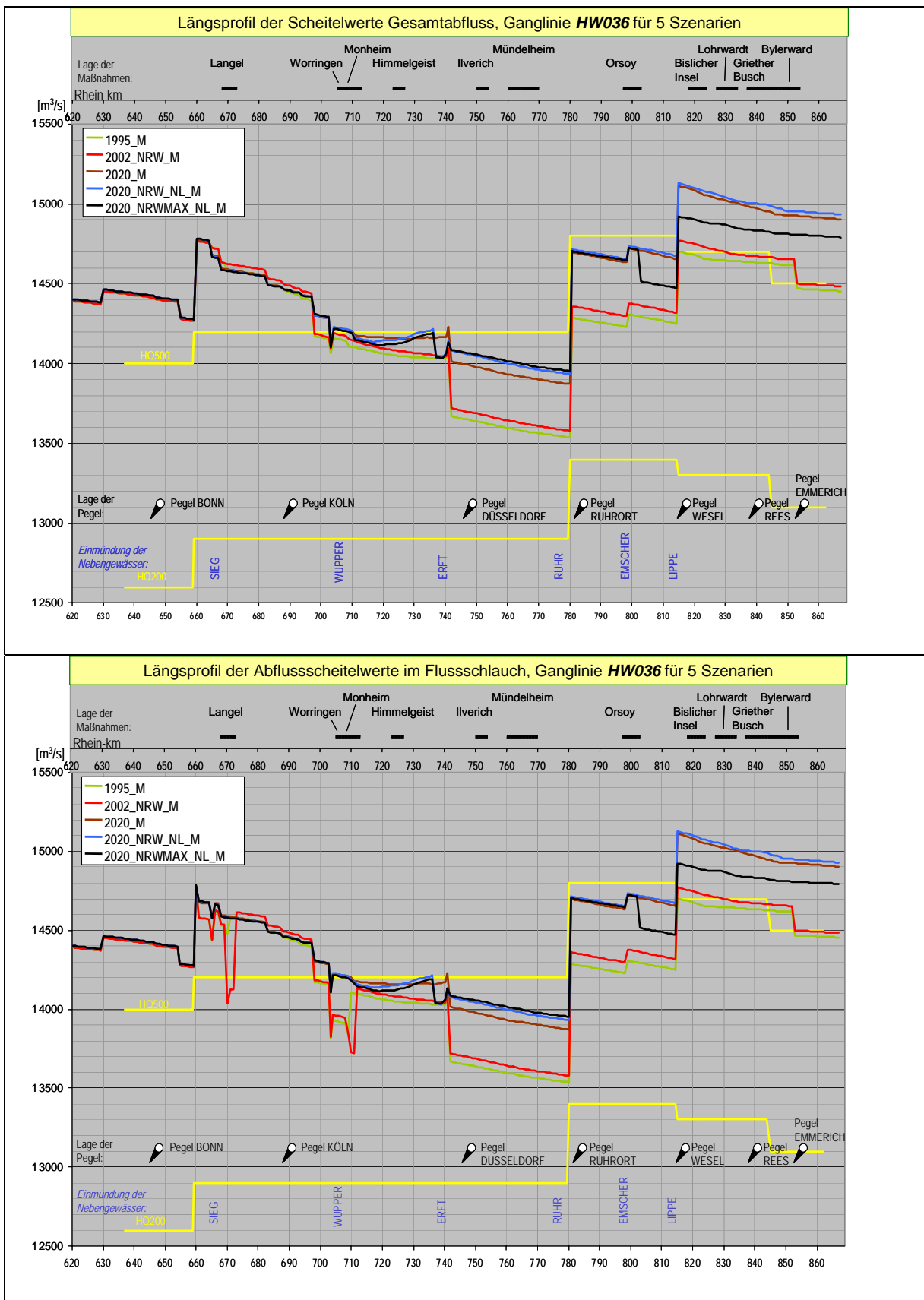
Anlage 5- 2: Entwicklung der Scheitelabflüsse entlang des Rheins, Hochwasser im Bereich HQ₁₀₀ (HW457).
 Oben: Gesamtabfluss; unten Abfluss im Flussschlauch (= zwischen den Deichen).



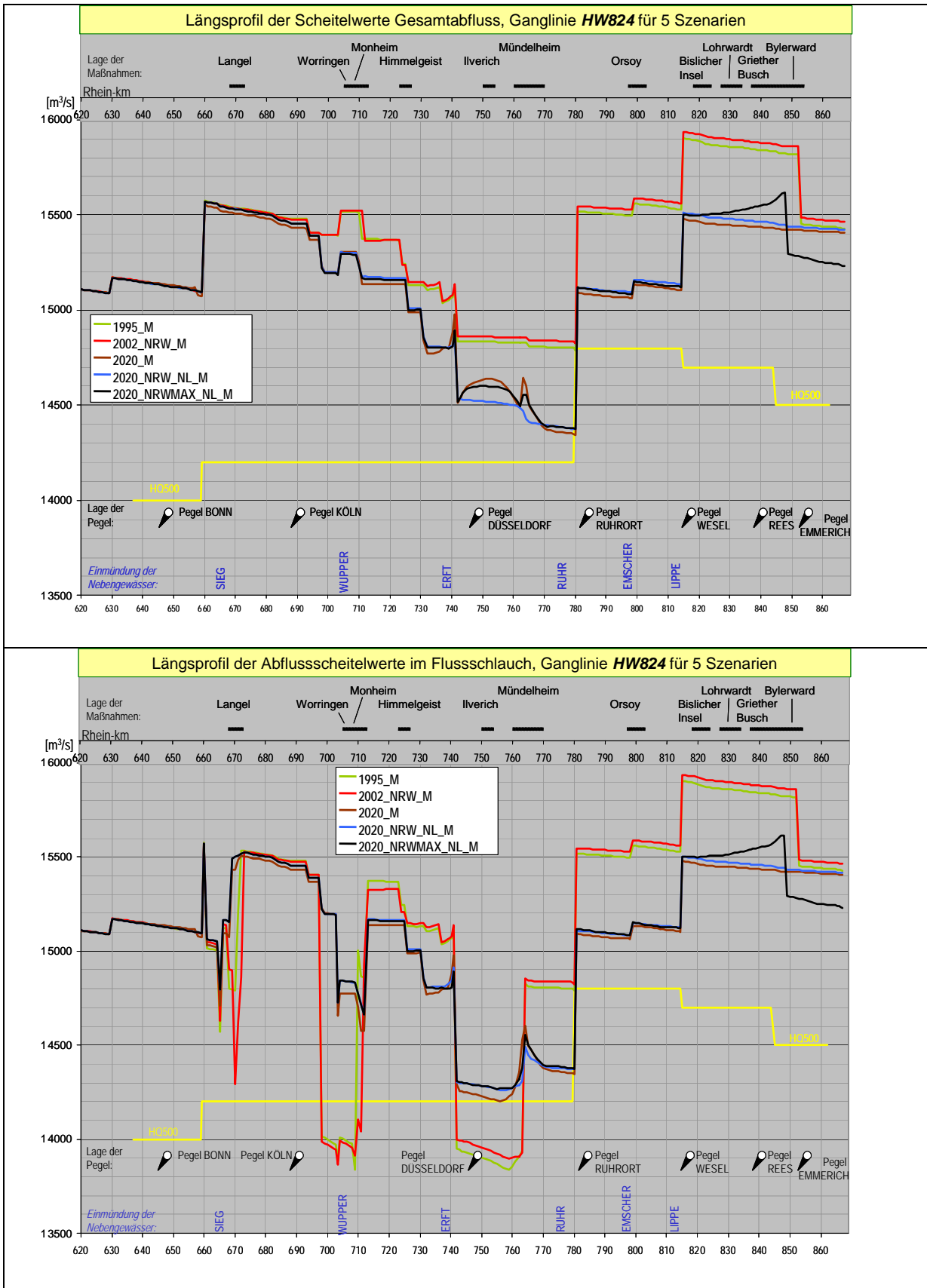
Anlage 5- 3: Entwicklung der Scheitelabflüsse entlang des Rheins, Hochwasser im Bereich HQ₂₀₀ (HW846).
 Oben: Gesamtabfluss; unten Abfluss im Flussschlauch (= zwischen den Deichen).



Anlage 5- 4: Entwicklung der Scheitelabflüsse entlang des Rheins, Hochwasser im Bereich HQ₅₀₀ (HW036).
 Oben: Gesamtabfluss; unten Abfluss im Flussschlauch (= zwischen den Deichen).

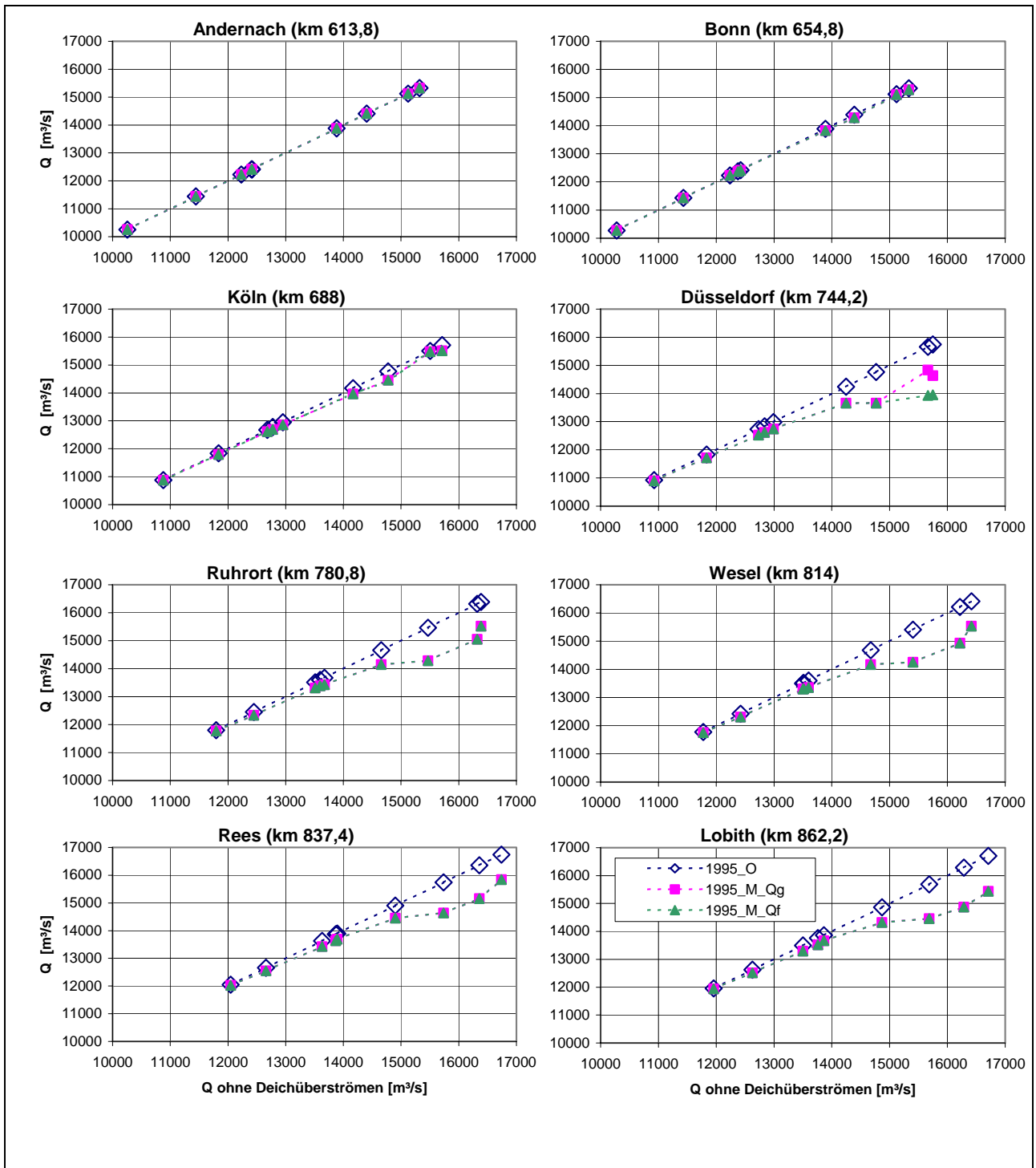


Anlage 5- 5: Entwicklung der Scheitelabflüsse entlang des Rheins, höchstes der betrachteten Hochwasser (HW824). Oben: Gesamtabfluss; unten Abfluss im Flussschlauch (= zwischen den Deichen).

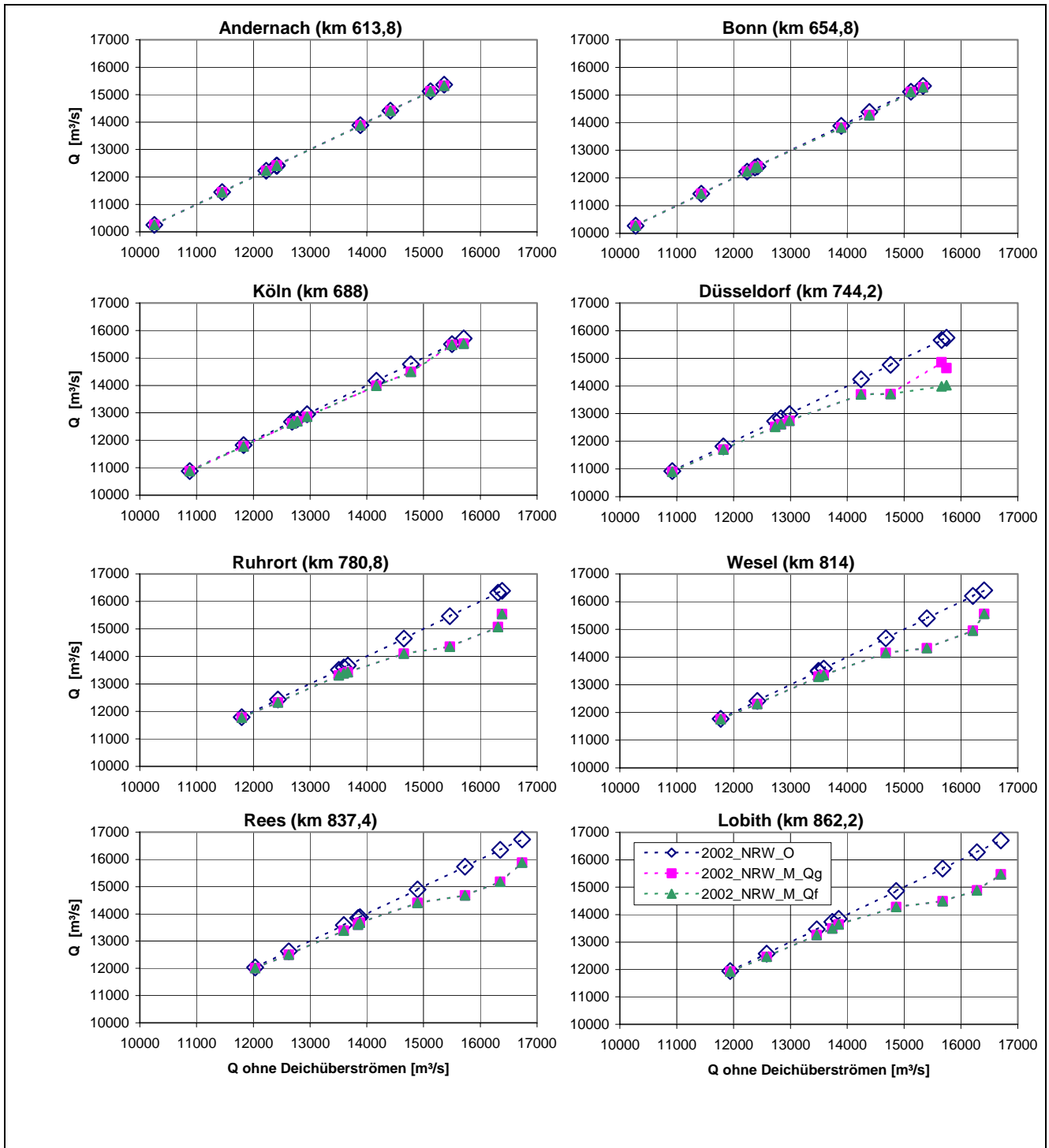


Anlage 6: Scheitelabflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins.

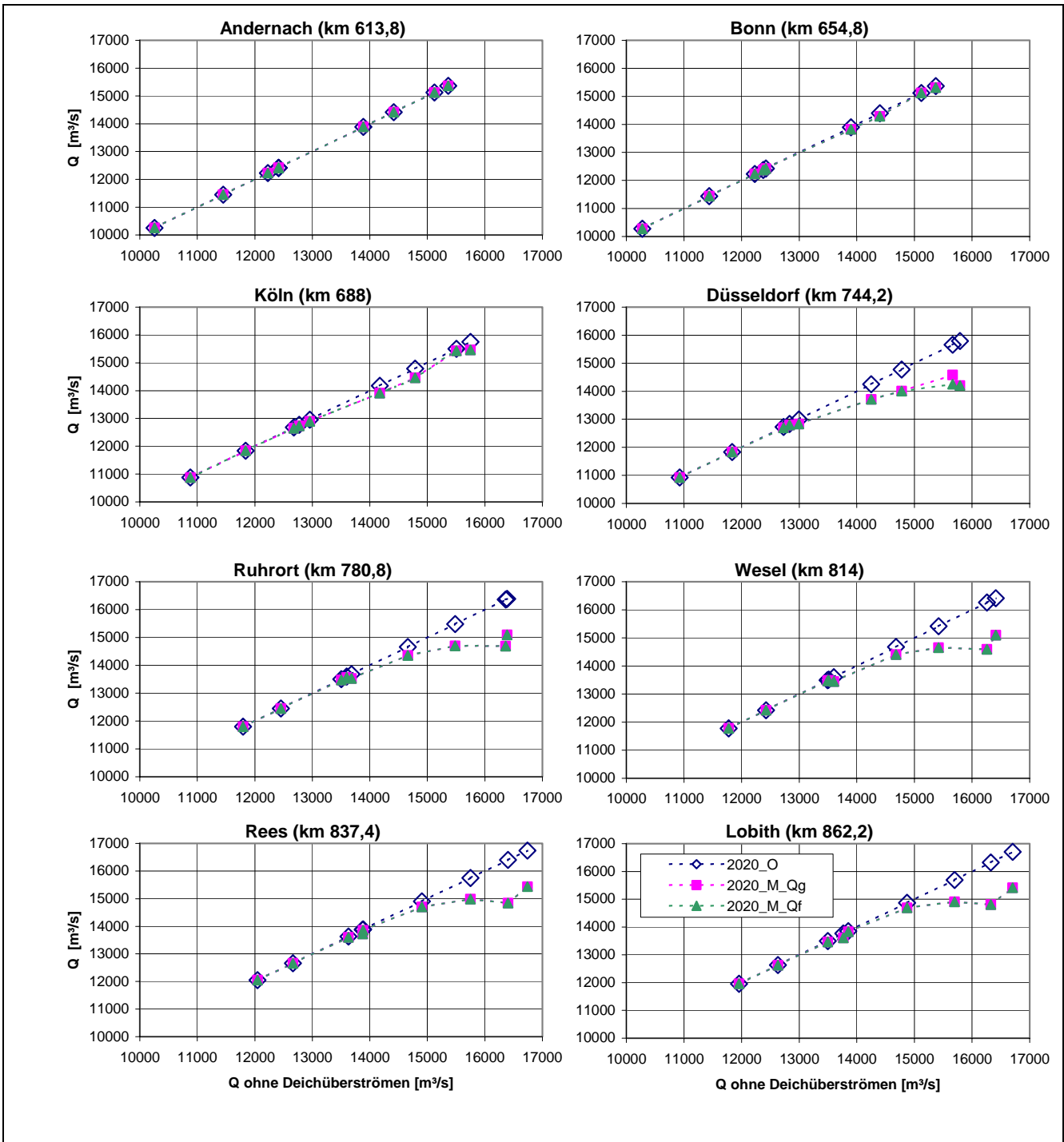
Anlage 6- 1: Scheitelabflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins, Szenario 1995.



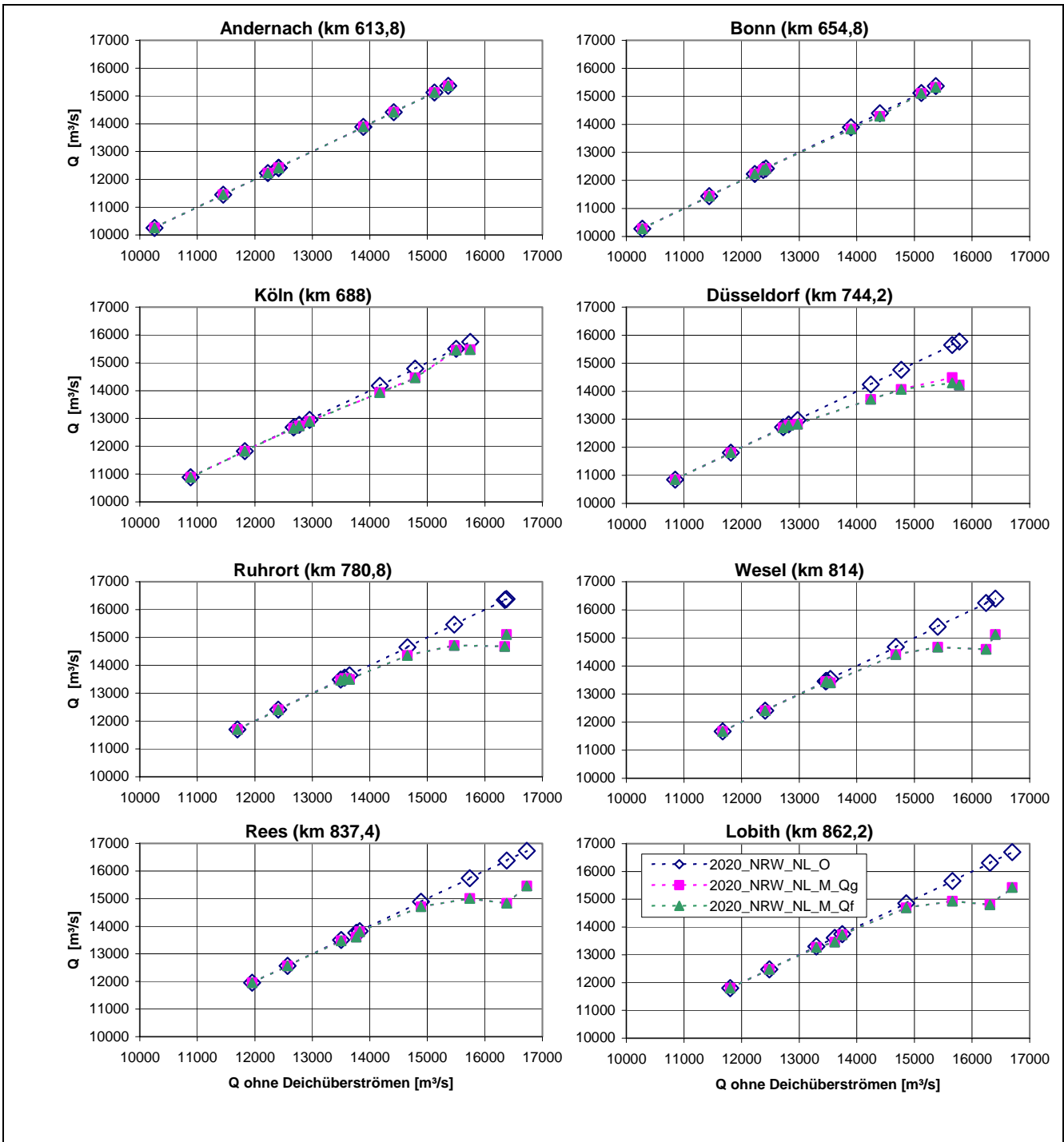
Anlage 6- 2: Scheitelabflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins, Szenario 2002_NRW.



Anlage 6- 3: Scheitelabflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins, Szenario 2020.



Anlage 6- 4: Scheitelabflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins, Szenario 2020_NRW_NL.



Anlage 6- 5: Scheitelabflüsse an den Pegeln entlang des Niederrheins, Szenario 2020_NRWMAX_NL.

