Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein

Abschlussbericht

Auftraggeber

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Waterschap Rijn en IJssel

Waterschap Rivierenland

provincie Gelderland

Auftraggeber: Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser

Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein

Abschlussbericht

Autoren
Bob Maaskant
Hermjan Barneveld
Kees Vermeer

PR3112
juni 2019

Die Studie 'Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein' wurde im Auftrag der Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser durchgeführt.

Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving fungierte als delegierter Auftraggeber und war für die zentrale Koordination und Führung der Studie verantwortlich. Die inhaltlichen Arbeiten dieser Studie wurden vom Ingenieurbüro HKV$_{\text{lijn in water}}$ (unter Mitarbeit von Antea) und vom Ingenieurbüro RoyalhaskoningDHV durchgeführt und sind in diesem Abschlussbericht sowie mehreren Hintergrundberichten von RoyalhaskoningDHV oder HKV aufgezeichnet.

Synthese der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser

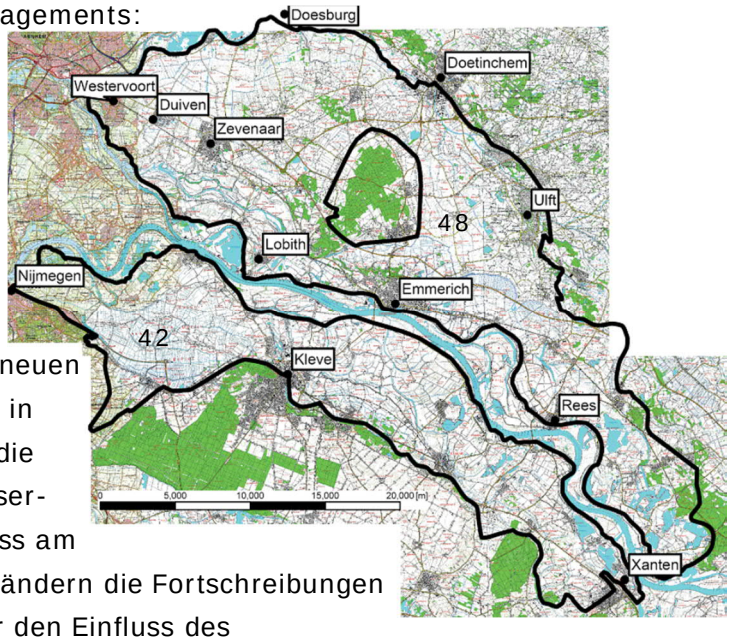
anlässlich der Studie

„Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“

1. Anlass und Zweck der Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“

Die grenzüberschreitenden Deichgebiete am Niederrhein bestehen linksrheinisch aus dem Deichring 42 und rechtsrheinisch aus dem Deichring 48. Die Überflutungsrisiken in diesem Grenzgebiet sind daher innerhalb der Deichringe nicht unabhängig voneinander: Ein Deichbruch in einem der beiden Länder kann Folgen für das andere Land haben.

In den vergangenen Jahren gab es in den Niederlanden und in Nordrhein-Westfalen Entwicklungen im Bereich des Hochwasserrisikomanagements: In den Niederlanden der Abschluss der niederländischen Studie VNK2 („Inventarisierung Hochwassersicherheit Niederlande“) und der Wechsel zu einer neuen risikobasierten Norm; in Nordrhein-Westfalen die Prüfung der Hochwasser-statistik für den Abfluss am Rhein und in beiden Ländern die Fortschreibungen der Erkenntnisse über den Einfluss des Klimawandels auf den Abfluss im Rheineinzugsgebiet.



Vor diesem Hintergrund hat die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser[1] im Rahmen der langjährigen konstruktiven Zusammenarbeit in den Jahren 2015 bis 2019 die Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“ durchgeführt.

Basierend auf der niederländischen, in der VNK2-Studie entwickelten Methode gibt diese Studie einen Überblick über die aktuellen Hochwasserrisiken im Grenzgebiet (Zustand 2015) und die voraussichtlichen Hochwasserrisiken im Jahr 2025 nach Umsetzung von Maßnahmen, u.a. des „Fahrplan Deichsanierung Nordrhein-Westfalen“.

Auch für den Zeithorizont 2050 wird eine Risikoanalyse durchgeführt, wobei unter Berücksichtigung eines „nassen“ Szenarios der mögliche Einfluss des Klimawandels auf den Abfluss des Rheins in die Risikobetrachtung mit einbezogen wird. Hierbei werden stets verschiedene Versagensmechanismen in der Risikobewertung berücksichtigt, z.B. die Wahrscheinlichkeit eines hydraulischen Grundbuchs und Pipings (Untergrunderosion).

Darüber hinaus wurde das neue Vorgehen der niederländischen, auf Überflutungsrisiken basierenden Norm, für die beiden grenzüberschreitenden Deichringe angewendet.

2. Unterschiedliches Strategie- und Normensystem Niederlande - Nordrhein-Westfalen

Bis 2016 definierten die „Bemessungsabflüsse“, die dazugehörigen Wasserstände und die Einhaltung der konstruktiven Vorgaben des technischen Regelwerks sowohl in den Niederlanden wie auch in Deutschland den Hochwasserschutzstandard. Für das Grenzgebiet ergaben sich zwei unterschiedliche Bemessungsabflüsse (mit Wiederkehrzeiten von 1/1.250 Jahren in den Niederlanden und 1/500 Jahren in Deutschland). Durch einen unterschiedlichen Freibord der Deiche (ca. 0,5 m in den Niederlanden und 1 m in Deutschland) wurde dieser Unterschied kompensiert. Dadurch sind die Deiche in der Praxis gleich hoch.

[1] Seit mehr als 20 Jahren arbeiten das Umweltministerium Nordrhein-Westfalen, die Bezirksregierung Düsseldorf, das LANUV Nordrhein-Westfalen, das niederländische Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat, die Provincie Gelderland, die Deichverbände beiderseits der Grenze und weitere Akteure im Rahmen der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser zusammen, um durch Informationsaustausch, Öffentlichkeitsarbeit, gemeinsame Studien und Abstimmung von Aktivitäten zu einem verbesserten Hochwasserschutz in der Grenzregion zu kommen.

Nordrhein-Westfalen verfolgt fachlich begründet diesen Ansatz von Bemessungshochwasser und dazugehörigem technischem Regelwerk weiterhin.

In den Niederlanden bestehen seit dem 1. Januar 2017 neue Standards, die ausgedrückt werden in „Überflutungswahrscheinlichkeit je Abschnitt der Deichlinie“ - die so genannte „Norm“[2]. Bei der Bestimmung der Norm werden die möglichen Folgen einer Überflutung berücksichtigt. So soll für jeden Einzelnen ein minimales Schutzniveau, die so genannte Grundsicherung, erreicht werden. Ergänzend wird ein zusätzlicher Schutz für Orte mit potentiell großen Opfergruppen und/oder großen wirtschaftlichen Schäden und/oder schweren Schäden durch den Verlust lebenswichtiger und gefährdeter Infrastrukturen von nationaler Bedeutung vorgesehen.

In den Niederlanden müssen infolge der niederländischen Gesetzgebung bis zum Jahr 2050 für alle Hochwasserschutzanlagen erster Ordnung diese neuen Normen unter Berücksichtigung sich möglicherweise verändernden Faktoren – z.B. Auswirkungen des Klimawandels und wirtschaftliche Entwicklung – umgesetzt sein.

Der wesentliche Unterschied der beiden Länderansätze für den Hochwasserschutz ist somit die Berücksichtigung des „Überflutungsrisikos“ in den Niederlanden einerseits und die Nutzung der „Überschreitungswahrscheinlichkeit“ von Wasserständen in Nordrhein-Westfalen bzw. Deutschland andererseits.

Die Hochwasserschutzpolitik Nordrhein-Westfalens und der Niederlande folgt gleichwohl in vielen Bereichen gleichen Grundsätzen und nutzt ähnliche, teils auch gleiche Instrumente und Daten.

3. Erkenntnisse aus der Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“

Die vorliegende Studie trägt durch die exemplarische Anwendung des niederländischen Verfahrens auf die deutschen Teile der grenzüberschreitenden Deichringe dazu bei, die Unterschiede der Nachweisverfahren aufzuzeigen und zu verstehen. Die Studie bestätigt, dass im Grenzgebiet das Hochwasserrisiko in beiden Ländern nicht unabhängig voneinander betrachtet werden kann. Daher ist die

[2] Hinweis:
Der niederländische Begriff ”Norm”, wie er hier im Zusammenhang mit Hochwasserschutz verwendet wird, beschreibt in den Niederlanden den Maßstab, der an Deiche angelegt wird um das zu akzeptierende Hochwasserrisiko zu erreichen. Dieser Begriff steht somit in keiner Verbindung mit der deutschen Verwendung von „Norm“, z.B. im Sinne einer technischen Regel (DIN-Norm o.ä.)

Fortsetzung der konstruktiven Zusammenarbeit im Grenzgebiet von großer Bedeutung.

Zeithorizont 2025

Die Studie zeigt, dass sich die Sicherheit im Grenzgebiet auf beiden Seiten durch die voraussichtlich bis 2025 laufenden und geplanten Deichsanierungen in Nordrhein-Westfalen deutlich verbessern wird. Nach Abschluss des „Fahrplan Deichsanierung Nordrhein-Westfalen“ ist das Sicherheitsniveau auf beiden Seiten der Grenze trotz unterschiedlicher Hochwasserschutzstandards und Nachweisverfahren vergleichbar.

Zeithorizont 2050

In der Periode 2025 bis 2050 werden die Niederlande weitere Anstrengungen unternehmen, um die für die Hochwasserschutzanlagen erster Ordnung gesetzlich geltende neue Norm bis 2050 zu erfüllen. In die für diesen Zeithorizont berechneten Überflutungsrisiken und – wahrscheinlichkeiten geht neben der wirtschaftlichen Entwicklung auch der mögliche Einfluss des Klimawandels (hier: „nasses“ Szenario) auf die Abflussverhältnisse des Rheins ein.

In Nordrhein-Westfalen wird der „Fahrplan Deichsanierung Nordrhein-Westfalen“ nach Abschluss der vorgesehenen Maßnahmen eine Verstetigung erfahren, um im Rahmen der Deichüberwachung und der Unterhaltung der Hochwasserschutzeinrichtungen sowie der Anlagen in und am Deich den Hochwasserschutz dauerhaft sicherzustellen. Im Weiteren erfolgt in Nordrhein-Westfalen regelmäßig eine Überprüfung der Grundlagen für den Bemessungshochwasserabfluss, in dem sich Einflüsse des Klimawandels abbilden.

Die Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“ zeigt für den Zeithorizont 2050, dass das Risiko im Grenzgebiet – trotz der in beiden Ländern getroffenen Maßnahmen - in Zukunft durch Wirtschaftswachstum und Klimawandel voraussichtlich steigen wird. Weiter zeigt die Studie, dass, unter Berücksichtigung der heutigen Erkenntnisse und ausgehend von den verwendeten Prinzipien und Annahmen, wie z.B. in den Bereichen Klimawandel und Evakuierung, auch nach ergänzenden Deichertüchtigungen in den Niederlanden, die grundlegende Sicherheit (politisches Ziel der niederländischen Norm) in der Grenzregion in 2050 nicht überall erreicht werden kann. Zudem bleibt das ökonomische Risiko hoch.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie führen aber auch zu einer Reihe von offenen fachlichen Fragen.

4. Fragen aus der Studie

Die vorliegende Studie zeigt, dass einige Faktoren die Ergebnisse weitgehend bestimmen. Im Vorhaben besprachen die Projektpartner daher die gewählten Ausgangspunkte und Berechnungsmethoden vor allem bzgl. dieser Faktoren:

1. Die Annahmen, Grundlagen und Berechnungsmethoden für den Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping

Aus den Analysen geht der Hydraulische Grundbruch und Piping als wichtigster Versagensmechanismus hervor. Berechnungen zu diesem Versagensmechanismus sind jedoch schwierig und es ist nicht gänzlich geklärt, ob bzw. in wie weit das niederländische Berechnungsverfahren für Hydraulischen Grundbruch und Piping für die deutschen Drei-Zonen-Deiche, wie in der Studie angenommen, aufgrund des in Deutschland vorherrschenden Untergrund ohne weiteres anwendbar ist. Deswegen sind hier die Modellierungsgrundlagen genauer zu untersuchen.

2. Die angenommene Anzahl der Personen, die aus dem Gebiet evakuiert werden können

Die unterschiedlichen Evakuierungsansätze (Nordrhein-Westfalen: 100%, Niederlande deutlich geringer) sind zu prüfen. Fragen sind z.B.: Welches Mindestmaß an Evakuierung ist erforderlich, um die grundlegende Sicherheit in den Niederlanden zu erreichen und welche Maßnahmen sind im Rahmen des Krisenmanagements denkbar? Was ist hierbei realisierbar?

3. Die Folgen der zukünftigen Entwicklung des Rheinabflusses

In der Studie wurde für den Zeithorizont 2050 ein Klimaszenario verwendet, das, wie in den Niederlanden üblich, den oberen Bereich der Bandbreite der Konsequenzen für den Rheinabfluss angibt. Wie sehen die Ergebnisse aus, wenn ein moderateres Klimaszenario in die Berechnung eingeht?

4. Datenverfügbarkeit (wo sind Daten vorhanden und wo sind Annahmen zu treffen?)

Neben den drei oben genannten fachlichen Aspekten spielte in der Studie auch die Frage der Datenverfügbarkeit, insbesondere zu den Materialkennwerten des Untergrundes und der bestehenden Hochwasserschutzanlagen, eine sehr wesentliche Rolle. Für zukünftige Arbeiten ist die Datenverfügbarkeit weiter zu verbessern.

5. Empfehlungen

Angesichts der Ergebnisse der Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“ und der zutage

getretenen Fragen empfiehlt die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser folgende Themen in das Arbeitsprogramm der neuen ‘Gemeinsamen Erklärung‘ aufzunehmen, damit angesichts der Strategieunterschiede gemeinsam auf eine weitere Risikominderung in der Grenzregion hingearbeitet werden kann:

1. Weitere gemeinsame Erfahrungen sammeln durch gemeinsame Forschung (einschließlich Kontrolle der Daten) und Wissensaustausch in den Bereichen
   - Hydraulischer Grundbruch und Piping: Durchführung weiterer Forschungsarbeiten, um ein verbessertes Bild dieses Versagensmechanismus und seiner Wirkung auf das Überflutungsrisiko zu erhalten,
   - Evakuierung: Weiterführung und Intensivierung des Austauschs zwischen Wasserwirtschaft und Katastrophenschutz durch verbesserte wasserwirtschaftliche Fachberatung in der Gefahrenabwehr,
   - Zukünftige Abflüsse: Fortführung des Wissensaustauschs bezüglich des Einflusses von Klimaänderung auf den Abfluss des Rheins im Grenzgebiet (und wie damit in der Zukunft umzugehen ist),
   - Methodischer Risikoansatz und Datenverfügbarkeit: Was können die Niederlande und Nordrhein-Westfalen voneinander in Bezug auf die jeweilige Strategie und die fachliche Vorgehensweise lernen? Beispielsweise Nordrhein-Westfalen vom niederländischen Risikoansatz und die Niederlande hinsichtlich der Anwendung des technischen Regelwerks aus Deutschland. Ferner ist die generelle Datenlage sowohl in den Niederlanden als auch in Nordrhein-Westfalen kontinuierlich zu verbessern.
2. Aufrechterhaltung und Stärkung der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit, v.a. durch:
   - Kooperation, u.a. stärkere Einbindung lokaler Akteure wie niederländische Wasserverbände und deutsche Deichverbände, Fortsetzung der Zusammenarbeit,
   - Informationsaustausch innerhalb der Arbeitsgruppe und nach außen, u.a.: Über die Organisation einer Hochwasserkonferenz hinaus Stärkung des Netzwerkes durch regelmäßigen Austausch sowie Ergänzung der Zusammenarbeit, die innerhalb der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) stattfindet.
3. Aufbau einer gemeinsamen Zukunftsperspektive für den grenzüberschreitenden Hochwasserschutz im Grenzgebiet.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Anlass zur Aktualisierung der Studie	2
1.3	Hauptuntersuchungsfragen	2
1.4	Projektumfang und Ziel	3
2	Bestimmungen zum Hochwasserschutz	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Hochwasserschutz in Nordrhein-Westfalen	5
2.3	Hochwasserschutz in den Niederlanden	7
2.4	Niederlanden und Nordrhein-Westfalen: Zwei unterschiedliche Sicherheitsphilosophien	11
3	Gebietsbeschreibung	13
3.1	Lage	13
3.2	Unterhaltung	14
3.3	Merkmale	14
4	Überflutungsrisiko	16
4.1	Methodik	16
4.2	Überflutungsrisiken 2015	22
4.3	Überflutungsrisiken 2025	28
4.4	Überflutungsrisiken 2025 unter Berücksichtigung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel	32
4.5	Überflutungsrisiken 2050	35
4.6	Übersicht der Entwicklung des Überflutungsrisikos	39
5	Sensitivitätsanalyse in Bezug auf das Überflutungsrisiko	43
5.1	Einfluss von Hydraulischem Grundbruch und Piping	43
5.2	Einfluss des Evakuierungsanteils	45
5.3	Einfluss Wasserstand absenkender Maßnahmen	45
5.4	Einfluss von Kammerungen	47
6	Angestrebter Hochwasserschutzgrad nach niederländischer Methodik	52
6.1	Einleitung	52
6.2	Ausgangspunkte	53
6.3	Methodik	55
6.4	Ergebnis zur Ermittlung der Norm gemäß niederländischer Vorgehensweise für die gesamten Deichringe	56
6.5	Sensitivitätsanalyse bezüglich der Ermittlung der Norm	59

6.6 Wirkungsabschätzung „theoretisch perfekter” Deiche zur Erfüllung der niederländischen Norm 61

7 Beantwortung der Hauptuntersuchungsfragen, Schlussfolgerungen und Empfehlungen 67
7.1 Beantwortung der Hauptuntersuchungsfragen 67
7.2 Schlussfolgerungen 72
7.3 Empfehlungen 76

8 Literaturverzeichnis 77

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die grenzüberschreitenden Deichgebiete am Niederrhein bestehen linksrheinisch aus dem Deichring 42 und rechtsrheinisch aus dem Deichring 48. Die Hochwasserrisiken in diesem Grenzgebiet sind daher nicht unabhängig voneinander: Ein Deichbruch in einem der beiden Länder kann Folgen für das andere Land haben. Aus diesem Grund pflegen die Niederlande und Nordrhein-Westfalen über die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser seit über 20 Jahren eine lange Tradition in der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit im Hochwasserschutz. Es ist daher naheliegend, die Überflutungsrisiken dieser Deichringe (42 und 48) gemeinsam zu untersuchen.

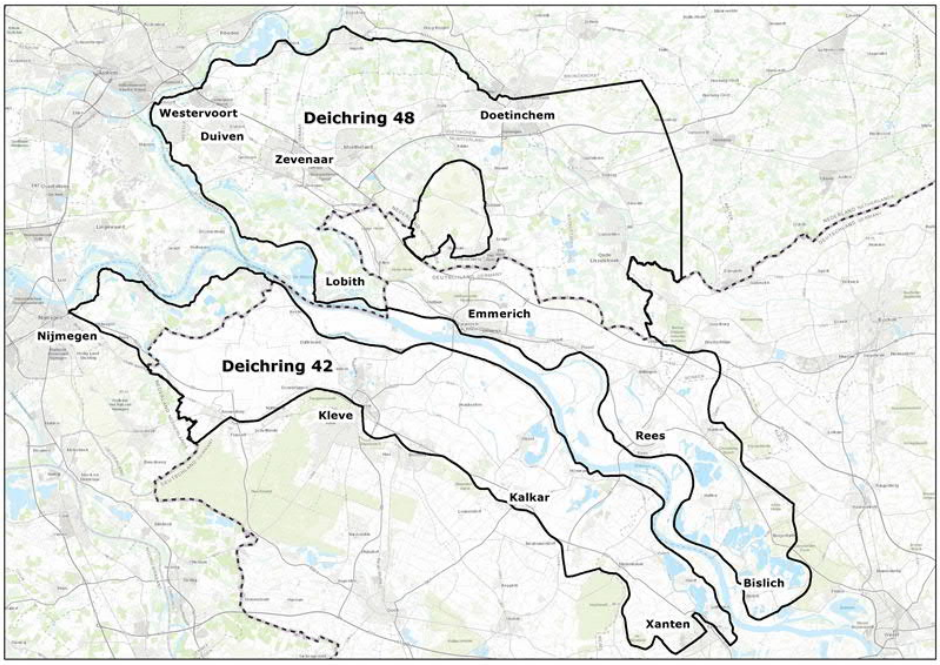


Abbildung 1 Übersicht über die Deichringe 42 und 48

Im Auftrag der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser wurde im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem Land Nordrhein-Westfalen und den Niederlanden für einen verbesserten Hochwasserschutz eine erste gemeinsame Untersuchung im Zeitraum 2005–2009 in Form einer grenzüberschreitenden Risikoanalyse durchgeführt [1]. In dieser im Jahr 2009 abgeschlossenen Studie wurde das Überflutungsrisiko in den grenzüberschreitenden Deichringen 42 und 48 mit einer gemeinsam entwickelten Methode ermittelt. Darüber hinaus wurden Maßnahmen zur Verringerung des Überflutungsrisikos identifiziert und es wurde mit Hilfe einer kurzen Kosten-Nutzen-Analyse untersucht, wie sinnvoll diese Maßnahmen sind.

1.2 Anlass zur Aktualisierung der Studie

Seit dem Jahr 2009 haben nach Abschluss der Studie einige technische und politische Entwicklungen im Bereich des Hochwasserschutzes stattgefunden, beispielsweise die Studie Veiligheid Nederland in Kaart (VNK, Überflutungsrisiko in den Niederlanden) [2], die Einführung einer neuen, risikobasierten Norm zum Hochwasserschutz in den Niederlanden im Jahr 2017, die Überprüfung der Hochwasserstatistik für den Niederrheinabfluss in NRW und neue Erkenntnisse über den Einfluss des Klimawandels und der Überflutungen im Einzugsgebiet auf den Abfluss des Rheins.
Darüber hinaus spielen auch andere Entwicklungen eine Rolle, sowohl infolge durchgeführter Maßnahmen im Gebiet als auch in Bezug auf die zur Durchführung der Sicherheitsanalysen verwendeten Instrumente (Software). Aus diesen Gründen hat die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser die Aktualisierung der Studie zum Überflutungsrisiko der Deichringe 42 und 48 beschlossen.

U.a. wegen der Einführung der neuen, risikobasierten Norm zum Hochwasserschutz in den Niederlanden im Jahr 2017, steht die Anwendung der neuen niederländischen Vorgehensweise für die deutschen Teile der grenzüberschreitenden Deichringe im Zentrum des Vorhabens. Die vorhandene Bemessungsmethode in Nordrhein-Westfalen, nämlich die Ermittlung der hydrologischen Wahrscheinlichkeit für das Deichüberströmen (plus Freibord) und das Einhalten der technischen Regeln bzw. DIN-Vorschriften für die konstruktiven Aspekte (Grundbau, Deichaufbau etc.), ist dagegen nicht Gegenstand des Vorhabens.

1.3 Hauptuntersuchungsfragen

Die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser hat die folgenden fünf Hauptuntersuchungsfragen formuliert:

1. Wie wird nach aktuellen Bewertungsverfahren das Überflutungsrisiko im Grenzgebiet heute (2015), in der mittelbaren Zukunft nach Abschluss der laufenden Projekte (2025) und mit dem Ausblick auf zukünftiger Entwicklungen (Klima, Deltaprogramm, ökonomische Entwicklungen, Bevölkerungswachstum 2050, etc.) beurteilt?
2. Welche Ergebnisse werden bei der Anwendung der neuen niederländischen Methode zur Bestimmung des gewünschten Hochwasserschutzgrades sowohl für die deutschen als auch die niederländischen Deichabschnitte in den grenzüberschreitenden Deichringen unter Berücksichtigung der beiderseitigen Auswirkungen von Deichbrüchen abgeleitet?
3. Welche Konsequenzen im Sinne von Maßnahmen sind zu treffen, um den nach der niederländischen Methode angestrebten Hochwasserschutzgrad im gesamten Deichring zu erreichen?
4. Wie wirkt sich eine Änderung der (extremen) Hochwasserabflüsse auf das ermittelte Überflutungsrisiko aus, wenn Überflutungen im

Einzugsgebiet des Rheins und der Klimawandel berücksichtigt werden?

5. Welchen Einfluss haben die unterschiedlichen Methoden in den Niederlanden und in Deutschland bei der Festlegung des angestrebten Hochwasserschutzgrades, bei Deichentwurf, Deichbau, Deichertüchtigung und Deichprüfung auf das Überflutungsrisiko?

1.4 Projektumfang und Ziel

Dieser Bericht bietet einen zusammenfassenden Überblick über den Inhalt von zwei Teilberichten von Ingenieurbüro RoyalhaskoningDHV [15][16] sowie die Beantwortung der o.g. fünf Hauptuntersuchungsfragen. Die Beantwortung dieser Fragen wird anhand der folgenden Themen aufgebaut:

- Eine kurze Beschreibung der Sicherheitsphilosophie in Deutschland und den Niederlanden (Kapitel 2),
- eine Beschreibung der beiden Deichringgebiete (Deichring 42 und 48) mit den wichtigsten Merkmalen (Kapitel 3),
- die aktuellen Überflutungsrisiken in beiden Gebieten sowie die voraussichtlichen Überflutungsrisiken in den Jahren 2025 und 2050 nach der Durchführung von Maßnahmen und Entwicklungen infolge des Klimawandels (Kapitel 4),
- die Sensitivität des Überflutungsrisikos gegenüber bestimmten gewählten Ausgangspunkten und von möglichen Maßnahmen zur Reduzierung des Überflutungsrisikos (Kapitel 5),
- die mit der niederländischen Methode berechneten Normen für Überflutungsrisiken in beiden Gebieten (Kapitel 6),
- Kapitel 7 schließt den Bericht mit einer Übersicht über die Beantwortung der Hauptuntersuchungsfragen sowie den Schlussfolgerungen und Empfehlungen ab.

Damit bietet der Bericht einen kompletten Überblick zur Ermittlung der aktuellen Überflutungsrisiken in beiden Deichringen, der voraussichtlichen Überflutungsrisiken in den Jahren 2025 und 2050 und der möglichen Wirksamkeit von Maßnahmen zur Senkung dieser Überflutungsrisiken.

2 Bestimmungen zum Hochwasserschutz

2.1 Einleitung

Die Deichringe 42 und 48 sind grenzüberschreitend (sie umfassen sowohl deutsches als auch niederländisches Hoheitsgebiet) und unterliegen somit den Bestimmungen zum Hochwasserschutz in Deutschland (Land Nordrhein-Westfalen) und den Niederlanden. Die Bestimmungen zum Hochwasserschutz in beiden Ländern ist nicht statisch und wird ständig weiterentwickelt.
In den folgenden Abschnitten folgt eine kurze Darstellung der Bestimmungen zum Hochwasserschutz in Nordrhein-Westfalen (Kapitel 2.2) und in den Niederlanden vor 2017 (Kapitel 2.3.1) und nach 2017 (Kapitel 2.3.2). Kapitel 2 endet mit einem Vergleich der beschriebenen Bestimmungen zum Hochwasserschutz in den Niederlanden und Nordrhein-Westfalen. Eine mehr umfassende Beschreibung der oben stehenden Aspekte findet sich in [3].

2.2 Hochwasserschutz in Nordrhein-Westfalen

Rechtlicher Rahmen

In Nordrhein-Westfalen (NRW) geben das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) (Juli 2009) des Bundes sowie das Landeswassergesetz (LWG 2016) den rechtlichen Handlungsrahmen vor. Grundlage für die Zulassung von Hochwasserschutzanlagen ist § 68 WHG. Die Überwachung von Hochwasserschutzanlagen ist in §§ 116, 122 LWG geregelt.

Darüber hinaus existieren Ergänzungsregelungen, wie die im Amtsblatt veröffentlichte Deichschutzverordnung der Bezirksregierung Düsseldorf vom 01.09.2000 (DSchVO), die sich auf §82 LWG gründet. Die DSchVO gibt Schutzzonen für die Hochwasserschutzanlagen vor und regelt u.a. Fragen der Unterhaltung, der Deichaufsicht sowie der Deichverteidigung.

In Nordrhein-Westfalen sind die Bemessungshochwasserabflüsse in 2003 nach aufwändigen statistischen Untersuchungen der Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in Nordrhein-Westfalen durch das Umweltministerium festgesetzt worden. Der Nachweis im Rahmen der 10-jährigen Überprüfung der Bemessungsgrundlagen am Rhein in NRW hat 2016 bestätigt, dass eine Anpassung der Bemessungsgrundlagen zurzeit nicht erforderlich ist. Die Überprüfung hatte hinsichtlich der Überschreitungswahrscheinlichkeit ergeben, dass die extremwertstatistischen Ergebnisse durch die Aktualisierung der Abflusszeitreihen zu etwas geringeren Abflüssen der Jährlichkeit von 500 Jahren führen und somit der bestehende Hochwasserschutzgrad unter heutigen Bedingungen mindestens erhalten bleibt.

Die Bezirksregierung Düsseldorf hat u.a. für den Bereich der Deichringe 42 und 48 auf Basis der Festsetzung der Bemessungsabflüsse am 24. Mai 2004 die Bemessungswasserstände (BHW2004) am Rhein neu festgesetzt und im Amtsblatt veröffentlicht. Im Gebiet der Deichringe 42 und 48 orientiert sich dieses Bemessungshochwasser an einem Hochwasser mit einer Wiederkehrzeit von 500 Jahren.

Bau und Unterhaltung

Hochwasserschutzanlagen sind in Nordrhein-Westfalen nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik zu errichten und zu unterhalten (§§ 77, 78 LWG).

Diese Regelwerke sind in Veröffentlichungen des Deutschen Instituts für Normung (DIN) festgelegt, hier insbesondere in der DIN 19712, Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern, die im Jahr 2013 fortgeschrieben wurde. Sie beinhaltet Regelungen für Deiche, Hochwasserschutzwände und mobile Schutzelemente. Die Norm umfasst die folgenden Hauptpunkte: Begriffsdefinitionen, Planungsgrundsätze, Umweltaspekte, hydrologische und hydraulische Bemessung, Form und Funktion von Deichen, Hochwasserschutzwänden und mobilen Schutzelementen, geotechnische Untersuchungen, Nachweise für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, Baustoffe, Baudurchführung, angrenzende Bauwerke, Unterhaltung, Dokumentation sowie Betrieb im Normal-und Hochwasserfall [4].

Neben den Deutschen Instituts für Normung (DIN) stehen weitere Regelwerke zur Verfügung. Hier sind vor allem die Merkblätter der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) und des Bundes der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. (BWK) anzuführen. Das DWA-Merkblatt 507-1, Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, aus dem Jahr 2011 sei hier exemplarisch genannt. Es enthält detaillierte Anforderungen an und Informationen über Deiche.

Maßnahmen

In Nordrhein-Westfalen wird an der Umsetzung des Deichsanierungsprogramms des Rheins (sog. Fahrplan Deichsanierung NRW) gearbeitet. Maßgebend ist hier der sogenannte „Drei-Zonen-Deich“, bei dem eine wasserseitige Lehmdichtung das Eindringen des Flusswassers in den Stützkörper erschwert und ein an der Landseite angebrachter wasserdurchlässiger Drän das dennoch eingedrungene Wasser sicher abführt. Durch die Anordnung einer landseitigen Berme wird dort ein Aufbrechen der Decklehmschicht verhindert. Der Deichquerschnitt besteht somit aus Zone 1: Wasserseitige Dichtung, Zone 2: Stützkörper und Zone 3: Filter- und Dränschicht mit Berme im Deichhinterland.

Ziel des Deichsanierungsprogramms ist die Durchführung der geplanten Deichsanierungsmaßnahmen bis zum Jahr 2025 [5]. Im Zeitraum bis 2015 wurden im Deichring 42 bereits 23 Kilometer Hochwasserschutzanlage saniert

und im Deichring 48 ungefähr 22 Kilometer. Für den Zeitraum 2015-2025 sind noch verschiedene Deichsanierungsmaßnahmen geplant: Im Deichring 42 betrifft dies etwa 17 Kilometer Hochwasserschutzanlage und im Deichring 48 circa 18 Kilometer Hochwasserschutzanlage.

Neben den Deichsanierungsmaßnahmen in Deichring 42 und Deichring 48 wurde rechtsrheinisch eine Retentionsmaßnahme bei Lohrwardt mit einem Volumen von 13 Millionen m³ realisiert. Diese Maßnahme wurde nach dem Jahr 2015 in Betrieb genommen und hat seitdem eine Wasserstand absenkende Wirkung, die für beide Deichringe relevant ist.

2.3 Hochwasserschutz in den Niederlanden

2.3.1 Hochwasserschutz in den Niederlanden bis 2017

Rechtlicher Rahmen

Nach der Flutkatastrophe von 1953 im Rhein-Maas-Delta wurde die Deltakommission eingerichtet, die den Auftrag hatte, ein Hochwasserschutzprogramm zur Vermeidung derartiger Katastrophen in der Zukunft zu erstellen. Die Deltakommission legte eine Norm auf Grundlage des Bemessungshochwassers fest, dem die Deiche standhalten mussten.

Im Jahr 1996 wurden diese Normen im Gesetz Wet op de Waterkering verankert, das Ende 2009 zusammen mit sieben anderen Wasserbewirtschaftungsgesetzen in das Gesetz Waterwet integriert wurde.

Dieses Gesetz Waterwet enthielt bis 2017 für jeden Deichring eine Überschreitungswahrscheinlichkeit für den Wasserstand, dem die Hochwasserschutzanlagen standhalten mussten. Für das Flussgebiet, unter anderem für Deichring 42 und 48, wurde diese Überschreitungswahrscheinlichkeit auf 1/1.250 pro Jahr festgelegt. Der zugrunde liegende Abflusswert wurde als Bemessungsabfluss bezeichnet.

Überprüfung

In das Gesetz Waterwet wurden neben den dem Bemessungsabfluss zugeordneten Abflussfrequenzen auch Verfahrensabläufe und Verantwortlichkeiten (von Reich, Wasserverbände und Provinzen) in Bezug auf den Hochwasserschutz festgelegt, ebenso wie die regelmäßige Überprüfung der Schutzeinrichtungen. Zwischen 1996 und 2011 erfolgte eine solche Überprüfung alle 5 Jahre. Seit 2012 ist die Überprüfungsfrequenz gesetzlich auf 12 Jahre festgelegt.

Alle Hochwasserschutzanlagen, bei denen die Prüfung ergab, dass sie die Anforderungen nicht erfüllen, wurden in das Hochwasserschutzprogramm (HWBP) aufgenommen, in dem bestimmt wurde, welche Hochwasserschutzanlagen saniert werden.
Der Entwurf der Deichsanierung erfolgte nach dem Regelwerk Leidraad Rivieren [6] und den zugrunde liegenden Technischen Rapporten [7].

Nach dem Hochwasser im Jahr 1995 wurde der Bemessungsabfluss für den Rhein von 15.000 m^3/s auf 16.000 m^3/s erhöht und für das 21. Jahrhundert ein weiterer Anstieg auf 18.000 m^3/s bis zum Jahr 2100 angenommen. Bis 2005 wurde in erster Linie auf Deichertüchtigungen gesetzt um den gewünschten Hochwasserschutz zu erreichen. Im raumordnerischen Grundsatzprogramm Ruimte voor de Rivier von 2005 [8] wurde eine Änderung der Politik beschlossen: Damit die Anforderungen an den Hochwasserschutz erfüllt werden können, richteten sich die Anstrengungen jetzt nicht mehr nur auf die Deichsanierung, sondern hauptsächlich auf Flussbett erweiternde Maßnahmen, um eine Senkung des Wasserstands beim Bemessungsabfluss zu bewirken.

Maßnahmen

Im Anschluss an die Prüfung der Hochwasserschutzanlagen im Jahr 2006 wurden 87 Projekte in das niederländische Hochwasserschutzprogramm aufgenommen. Keines dieser Projekte liegt in Deichring 42 oder 48. Die Projekte wurden im Jahr 2017 größtenteils abgeschlossen oder befinden sich in der Umsetzungsphase.

Das Grundsatzprogramm Ruimte voor de Rivier umfasst an den Rheinnebenflüssen insgesamt 39 Projekte, von denen die letzten im Jahr 2017 fertiggestellt wurden.
Vier Maßnahmen im Rahmen von Ruimte voor de Rivier befinden sich in der Nähe der grenzüberschreitenden Deichringe und wirken sich auf die Wasserstände vor Ort aus: Die Vorlandabsenkung Millingerwaard (am Deichring 42), die Deichrückverlegung Lent (unmittelbar stromabwärts von Deichring 42), der Gewässerausbau Huissensche Waarden und die Deichrückverlegung Hondsbroeksche Pleij (beide am Deichring 48).

2.3.2 Hochwasserschutz in den Niederlanden nach 2017

Rechtlicher Rahmen

Im Jahr 2010 fiel der Startschuss für das Deltaprogramm. Dieses Programm zielt darauf ab, dass in den Bereichen Hochwasserschutz, Trink- und Brauchwasserversorgung sowie Raumplanung bis zum Jahr 2050 die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass die Niederlande in der Lage sind, die größeren Klimaextreme aufzufangen.

Im Deltaprogramm wird festgehalten, dass:

1. Klimawandel und Bodensenkung zu stärkeren Belastungen des Gewässersystems führen;
2. die Folgen einer Überflutung größer sind als vor 50 Jahren, weil es mehr Einwohner gibt und mehr Schaden entstehen wird;
3. ausreichendes Wissen zur Ermittlung des Überflutungsrisikos aus der Wahrscheinlichkeit von Überflutungen und deren Risiken vorhanden ist;
4. die Überflutungsrisiken im Flussgebiet im Vergleich zu den restlichen Niederlanden höher sind.

Das Deltaprogramm vollzieht bezüglich des Ausgangspunktes einen Wandel im Hochwasserschutz: Von Wiederkehrzeiten von Wasserständen im Fluss bzw. an der Küste, denen die Hochwasserschutzanlage standhalten müssen, hin zu einem Hochwasserschutzgrad, die anhand des Überflutungsrisikos ermittelt wird. Dabei werden die Zahl der potentiellen Opfer und der wirtschaftliche Schaden berücksichtigt und es wird allen Einwohnern mindestens dieselbe Grundsicherheit gewährleistet [9].

Im Jahr 2017 wurde im Waterwet die Bestimmung aufgenommen, dass alle Hochwasserschutzanlagen in den Niederlanden spätestens im Jahr 2050 die neuen Normen[3] erfüllen müssen. Die neuen Normen beruhen auf den Überflutungsrisiken. Dabei wurden für jede Normstrecke (anstelle der früheren Deichringe) Überflutungswahrscheinlichkeiten abgeleitet, die nicht überschritten werden dürfen. Dadurch wird Folgendes erreicht:

- Jedem Individuum wird ein Mindestmaß an Sicherheit (Grundsicherheit) gewährleistet, für das gilt, dass die Wahrscheinlichkeit, infolge einer Überflutung ums Leben zu kommen, kleiner als 1:100.000 pro Jahr ist.
- Ergänzend wird ein größerer Schutz für räumliche Bereiche mit potentiell großen Gruppen von Opfern und/oder großem wirtschaftlichen Schaden und/oder weitreichenden Schäden durch Ausfall vitaler und schadensanfälliger Infrastruktur von nationaler Bedeutung geboten.

Für das Flussgebiet, einschließlich des Grenzgebiets, bedeuten die neuen Normen, dass für ihre Verwirklichung bis zum Jahr 2050 eine große Ertüchtigungsaufgabe zu erfüllen ist um den gesetzlich definierten Schutz zu erreichen.

Überprüfung

Ab dem Jahr 2017 werden Hochwasserschutzanlagen auf Grundlage der neuen Norm überprüft und entworfen. Für die Deiche wird von einem Überprüfungszyklus von 12 Jahren ausgegangen. Beanstandete Deiche werden zur Ertüchtigung ins Hochwasserschutzprogramm (HWBP) aufgenommen. Der aktuelle Überprüfungszeitraum endet im Jahr 2023. Für die Prüfung stehen das Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017) einschließlich unterstützender Software zur Verfügung [10][11][12][13].

Bei der Aufstellung der Norm wurden zwei Werte definiert, damit Veränderungen in Bezug auf die Sicherheit, die im Laufe der Zeit auftreten können, berücksichtigt werden:

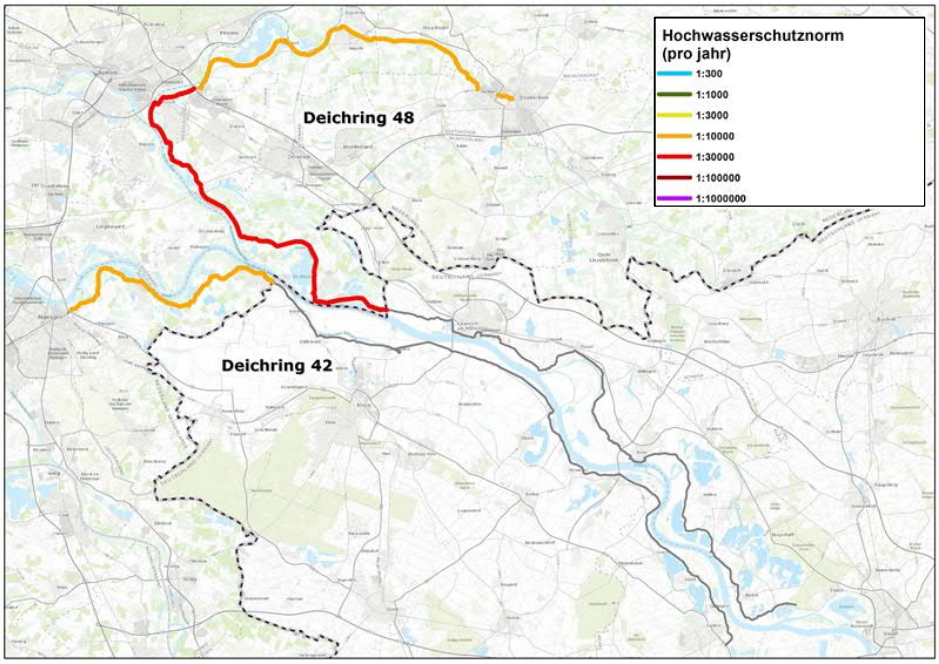
1. Der Signalwert – das Signal, dass Vorbereitungen für eine Deichsanierung getroffen werden müssen und
2. die Untergrenze – die Versagenswahrscheinlichkeit des Deichs darf diesen Wert nicht überschreiten, da ansonsten die gesetzlichen Vereinbarungen nicht mehr eingehalten werden.

[3] Hinweis:
Der niederländische Begriff "Norm", wie er hier im Zusammenhang mit Hochwasserschutz verwendet wird, beschreibt in den Niederlanden den Maßstab, der an Deiche angelegt wird um das zu akzeptierende Hochwasserrisiko zu erreichen. Dieser Begriff steht somit in keiner Verbindung mit der deutschen Verwendung von „Norm“, z.B. im Sinne einer technischen Regel (DIN-Norm o.ä.)

Abbildung 2 enthält die Signalwerte für die Abschnitte in den niederländischen Teilen der Deichringe 42 und 48. Insbesondere für den stromaufwärts gelegenen Abschnitt von Deichring 48 ist die Norm mit einer Überflutungswahrscheinlichkeit von 1/30.000 pro Jahr relativ streng.

Hintergrund dieser strengen Norm ist der Umstand, dass die auftretenden Wassertiefen und Anstiegsgeschwindigkeiten bei einer Überflutung relativ groß sind. Um das Grundsicherheitsniveau von 1/100.000 pro Jahr bieten zu können, ist eine relativ strenge Norm für die Hochwasserschutzanlage erforderlich.

Abbildung 2 Hochwasserschutz-norm (Signalwert) für die niederländischen Teile von Deichring 42 und Deichring 48 (Deltaprogramm, 2015)



Für die Beurteilung sind beide Werte relevant, da sie die Dringlichkeit einer möglichen Beanstandung verdeutlichen. Wenn die Prüfung ergibt, dass die Anforderungen nicht erfüllt werden, wird der Deichabschnitt in das Hochwasserschutzprogramm (HWBP) aufgenommen. In diesem Programm werden die Deichertüchtigungen priorisiert und eingeplant.

Maßnahmen

Im Zusammenhang mit der Beanstandung der Deiche sind Maßnahmen erforderlich, damit die neuen Normen im Jahr 2050 erfüllt werden können. Dabei wird ein Anstieg des Abflusses infolge des Klimawandels berücksichtigt.

Für den Entwurf von Deichertüchtigungsmaßnahmen wurde das Ontwerpinstrumentarium entwickelt, das Angaben darüber enthält, wie dabei mit Hilfe geltender Leitfäden, Anleitungen und technischer Regelwerke im Einklang mit dem neuen Ansatz der Überflutungswahrscheinlichkeit vorgegangen werden kann.

2.4 Niederlanden und Nordrhein-Westfalen: Zwei unterschiedliche Sicherheitsphilosophien

In den Niederlanden wurden die Sicherheitsnormen bis Ende 2016 als Überschreitungswahrscheinlichkeiten festgelegt. Dabei ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit definiert als Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Wasserstand eintritt.
Die Wasserstände, die zu den in den Sicherheitsnormen festgelegten Überschreitungswahrscheinlichkeiten gehören, sind die Bemessungswasserstände. Die jeweiligen Hochwasserschutzanlagen mussten Schutz vor diesen Wasserständen bieten. Bis Ende 2016 galt in den Niederlanden für die Deiche von Deichring 42 eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1/1.250 pro Jahr als Sicherheitsnorm.

In Nordrhein-Westfalen bilden die Bemessungswasserstände und das technische Regelwerk die Grundlage für den Hochwasserschutz am Rhein. Für die deutschen Deiche der Deichringe 42 und 48 gilt, dass sie auf Grundlage eines festgesetzten Bemessungshochwassers (BHW2004) und der entsprechenden Wasserstände (inklusive Freibord) bemessen wurden und werden. Dieser Bemessungsabfluss orientiert sich für die deutschen Teile der Deichringe 42 und 48 an Hochwasserabflüssen mit einer Überschreitungshäufigkeit von 1/500 pro Jahr, die anschließend in lokale Wasserstände übertragen werden.

Vom Grundsatz her wurde also bis zum Jahr 2016 in beiden Ländern mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit des Abflusses bzw. der Überschreitungswahrscheinlichkeit lokaler Wasserstände gearbeitet. Nur die Höhe der Häufigkeit war unterschiedlich, die für die Deichringe 42 und 48 1/1.250 pro Jahr in den Niederlanden und 1/500 pro Jahr in Deutschland betrug. Infolge des unterschiedlichen Freibords (ca. 0,5 m in den Niederlanden und 1 m in Deutschland) ist die tatsächliche Deichhöhe jedoch vergleichbar.

Sowohl in Nordrhein-Westfalen als auch in den Niederlanden werden die Vorgaben zu den konstruktiven Aspekten, z.B. Untergrund, Deichkonstruktion sowie Bauwerke in und am Deich, über die Einhaltung des jeweiligen technischen Regelwerks erfüllt (DIN-Normen, DWA-Arbeits- und Merkblätter, technische Leitfäden und Vorschriften etc.).

Während Nordrhein-Westfalen fachlich begründet diesen Ansatz von Bemessungshochwasser und technischem Regelwerk weiterhin verfolgt, beruhen die Sicherheitsstandards in den Niederlanden seit dem 1. Januar 2017 nicht mehr auf der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung von bestimmten Wasserständen. Stattdessen ist die „Überflutungswahrscheinlichkeit je Abschnitt der Deichlinie“, die unterschritten werden muss, um das Überflutungsrisiko im dahinterliegenden Gebiet auf ein als vertretbar angesehenes Maß zu beschränken, maßgebend.

So soll für jeden Einzelnen hinter dem Deich ein minimales Schutzniveau, die sogenannte Grundsicherheit, erreicht werden. Darüber hinaus wird ein zusätzlicher Schutz für Orte

- mit potentiell großen Opfergruppen und/oder
- großen wirtschaftlichen Schäden und/oder
- schweren Schäden durch den Verlust lebenswichtiger und gefährdeter Infrastrukturen von nationaler Bedeutung vorgesehen.

Zur Umsetzung dieser Ziele wird in den Niederlanden zunächst in Abhängigkeit der Einwohneranzahl, der Wirtschaftskraft und weiterer Faktoren das anzustrebende Maß des noch akzeptablen Überflutungsrisikos bestimmt und übersetzt in eine maximal zulässige Überflutungswahrscheinlichkeit je Abschnitt der Deichlinie - die sogenannte Norm. Danach wird ermittelt, ob die Hochwasserschutzanlagen die Einhaltung dieses Risikos gewährleisten.

Hierbei werden verschiedene Versagensmechanismen in die Risikobewertung einbezogen, z.B. die Wahrscheinlichkeit eines hydraulischen Grundbruchs mit Piping („Untergrunderosion“). Dabei können Schäden potentiell auch durch Deichversagen bei Wasserständen unterhalb der Deichkrone auftreten. Die Niederlande müssen infolge der niederländischen Gesetzgebung bis zum Jahr 2050 die Einhaltung dieser neuen gesetzlichen Norm unter Berücksichtigung der sich bis dahin möglicherweise verändernden Faktoren - wie beispielsweise aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels und der zu erwartenden zukünftigen wirtschaftlichen Entwicklung - umsetzen.

Der wesentliche Unterschied der beiden Länderansätze für den Hochwasserschutz ist somit die Berücksichtigung des «Risikos» in den Niederlanden einerseits und die Nutzung der «Überschreitungswahrscheinlichkeit» von Wasserständen in NRW bzw. Deutschland andererseits.

Die Hochwasserschutzbestimmungen Nordrhein-Westfalens und der Niederlande folgen gleichwohl in vielen Bereichen gleichen Grundsätzen und nutzen ähnliche, teils auch gleiche Instrumente und Daten. Zunächst einmal haben beide Seiten ein - auch im internationalen Vergleich - sehr hohes Schutzniveau, d.h. sie bieten einen Schutz gegen ein außerordentlich seltenes Hochwasser; sie nutzen die geografischen und hydrologischen Daten jeweils beider Seiten sowie die gleichen Grundlagen für die wasserwirtschaftlichen Modelle. Letztendlich bieten sie auch den – nicht nur in den Deichringen 42 und 48 potentiell betroffenen - Menschen ein jeweils vergleichbares Maß an Schutz.

3 Gebietsbeschreibung

In diesem Kapitel werden die Lage der beiden Deichringe, die besonderen Merkmale und die Unterhaltungspflichtigen der Hochwasserschutzanlagen erläutert.

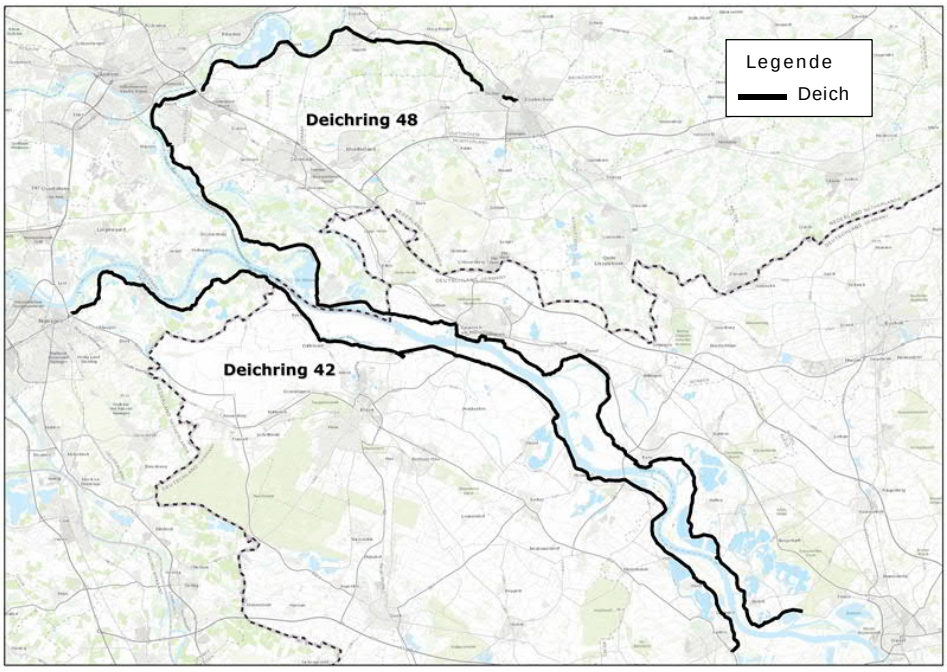
3.1 Lage

Die Deichringe 42 und 48 liegen am linken beziehungsweise rechten Ufer des Rheins. Deichring 42 hat eine Länge von ungefähr 60 Kilometer und Deichring 48 eine Länge von fast 100 Kilometer.

Die Hochwasserschutzanlage von Deichring 42 beginnt im Südosten bei Xanten am Niederrhein und endet bei Nijmegen an der Waal (Abbildung 3). Die vorhandenen primären Hochwasserschutzanlagen (Banndeiche) in diesem Deichring schützen das Gebiet vor Überflutungen durch Rhein und Waal. Das Deichringgebiet mit einer Fläche von ungefähr 275 km^2 liegt zu etwa 90 % in Deutschland. Bei den wichtigsten Städten, die von den Hochwasserschutzanlagen geschützt werden, handelt es sich um Xanten, Kleve und Nijmegen.

Die Hochwasserschutzanlage von Deichring 48 verläuft von Wesel-Bislich über Lobith, Westervoort und über Doesburg an der Oude IJssel bis Doetinchem und schützt vor Überflutungen durch den Rhein, den Pannerdenschen Kanaal, die IJssel und die Oude IJssel. Das Deichringgebiet mit einer Fläche von ungefähr 535 km^2 liegt zu 70 % in den Niederlanden. Bei den wichtigsten Städten, die geschützt werden, handelt es sich um Rees, Emmerich, Zevenaar, Duiven und Westervoort.

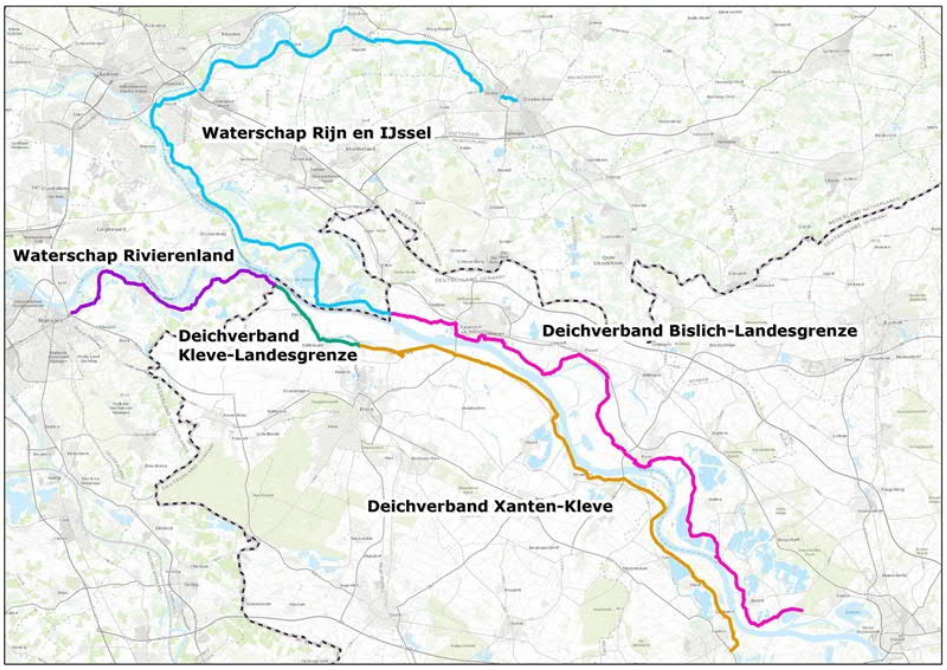
Abbildung 3
Lage der Deichringe 42 und 48



3.2 Unterhaltung

Die Hochwasserschutzanlage von Deichring 42 beginnt stromaufwärts bei Xanten und wird ab Xanten vom Deichverband Xanten-Kleve unterhalten. Ab Kleve ist der Deichverband Kleve-Landesgrenze für die Unterhaltung zuständig. Unterhaltungspflichtiger des niederländischen Teils von Deichring 42 ist die Waterschap Rivierenland. Die Hochwasserschutzanlagen im deutschen Teil von Deichring 48 fallen in die Zuständigkeit des Deichverbands Bislich-Landesgrenze. Die Waterschap Rijn & IJssel ist für den niederländischen Teil zuständig.

Abbildung 4 Unterhaltungs-pflichtige



3.3 Merkmale

Im gesamten Gebiet leben 310.000 Einwohner: 70.000 Einwohner in Deichring 42 und 240.000 in Deichring 48. Für Deichring 42 ist die Verteilung zwischen den Niederlanden und Deutschland 20 % bzw. 80 % und für Deichring 48 80 % bzw. 20 %. Für die Gesamtfläche der Deichringe gilt, dass 15 bis 20 % besiedelt sind und dass das übrige Gebiet überwiegend landwirtschaftlich genutzt wird (70 bis 75 %). Auf der restlichen Fläche befinden sich unter anderem Infrastruktur, Natur und offene Gewässer.

Das Deichringgebiet ist ein Flusslehmgebiet mit Uferwällen und Auenböden. Der Untergrund der deutschen Niederrhein-Deiche besteht aus mehreren sandigen Grundwasserleitern, stellenweise sind kohäsive Deckschichten vorhanden, die im Deichhinterland hauptsächlich aus lehmigem Sand bis sandigem Lehm bestehen.

Die primären Hochwasserschutzanlagen der Deichringe 42 und 48 sind 60 beziehungsweise 100 km lang. Die Wasserstandsdifferenz zwischen dem jeweils am weitesten stromaufwärts gelegenen Punkt der Deichringe und dem

jeweils am weitesten stromabwärts gelegenen Punkt beträgt bei hohen Abflüssen etwa 6 - 7 Meter. Aus diesem Grund richten sich die Folgen einer Überflutung in hohem Maße nach der Stelle, an der ein Deichbruch auftritt. Je weiter stromaufwärts ein Deichbruch auftritt, desto größer sind die Folgen (siehe Kapitel 4.1.2).

4 Überflutungsrisiko

Zur Ermittlung des Überflutungsrisikos für die Zeithorizonte 2015, 2025 und 2050 in den Deichringen 42 und 48 wird in der vorliegenden Studie die in den Niederlanden entwickelte Methodik exemplarisch verwendet. In Kapitel 4.1 werden die Grundzüge dieser Methodik, die im Rahmen des Projekts Veiligheid Nederland in Kaart 2 [14] genutzt wurde, beschrieben und werden in den anschließenden Kapiteln die Überflutungsrisiken für die einzelnen Zeithorizonte dargestellt.

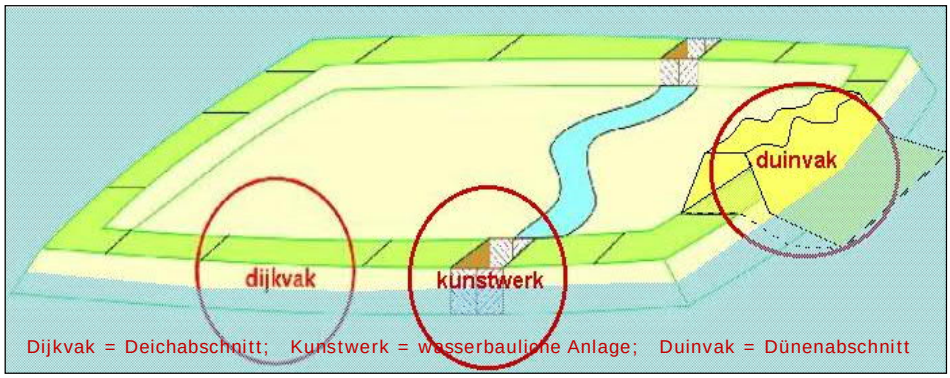
4.1 Methodik

Das Überflutungsrisiko ist die Kombination von Wahrscheinlichkeiten und Folgen. Für die Ermittlung der Überflutungsrisiken müssen Kenntnisse darüber vorliegen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich an einer bestimmten Stelle eine Überflutung ereignet und welche Folgen damit verbunden sind. Zu diesem Zweck wurde für die einzelnen Elemente der Hochwasserschutzanlage (unterschiedliche Deichabschnitte und wasserbauliche Anlagen) die Versagenswahrscheinlichkeit festgestellt. Außerdem wurden die Folgen (wirtschaftlicher Schaden und potentielle Opfer) bei einem Versagen der Hochwasserschutzanlage ermittelt. Da die Versagenswahrscheinlichkeiten und die Folgen von Deichbrüchen nicht überall in einem Deichring identisch sind, kann das Überflutungsrisiko innerhalb eines Deichringgebiets sehr unterschiedlich sein.

4.1.1 Versagenswahrscheinlichkeiten

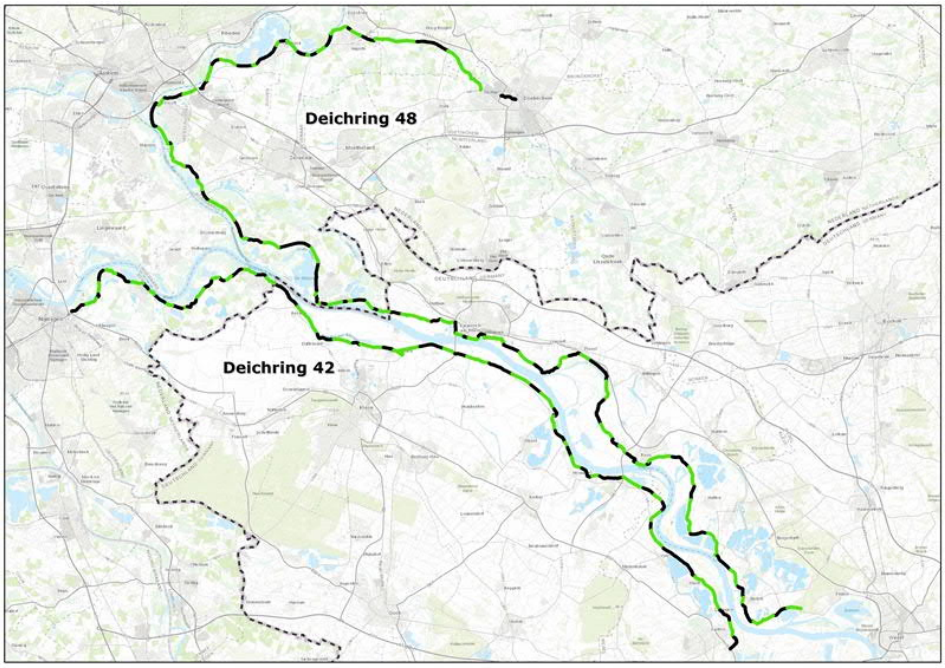
Ein Deichring kann als Kette aufgefasst werden: Die Glieder der Kette sind alle Deichabschnitte, Dünenabschnitte und wasserbaulichen Anlagen, die Bestandteil der Hochwasserschutzanlage sind (Abbildung 5). In Bezug auf die einzelnen Deichabschnitte und wasserbaulichen Anlagen werden die unterschiedlichen Formen untersucht, durch die diese versagen können, d.h. ihre Schutzwirkung verlieren. Diese unterschiedlichen Formen des Versagens werden als Versagensmechanismen bezeichnet. Die Überflutungswahrscheinlichkeit wird berechnet, indem alle Versagenswahrscheinlichkeiten in Bezug auf jeden Versagensmechanismus für alle Deichabschnitte kombiniert werden.

Abbildung 5
Deichring als Kette mit mehreren Gliedern



Bei der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten und der Überflutungswahrscheinlichkeiten spielen Unsicherheiten eine wichtige Rolle. Wenn die Belastung einer Hochwasserschutzanlage größer ist als ihre Höhe und/oder Stabilität, dann wird die Schutzanlage versagen.
Je weniger Angaben beispielsweise über die Eigenschaften des Deiches vorliegen, desto größer ist die Unsicherheit, mit der gerechnet wird. Die Unsicherheit in Bezug auf die Höhe der Hochwasserschutzanlage ist im Allgemeinen viel geringer als die Unsicherheit z.B. in Bezug auf Parameter, die mit dem Untergrund zusammenhängen. Eine größere Unsicherheit bedeutet, dass eine größere Parameterbandbreite berücksichtigt werden muss, was sich relativ stark auf die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit auswirken kann.
Die Deichringe 42 und 48 wurden zunächst in Deichabschnitte unterteilt. In Abbildung 6 wird die Deichabschnittseinteilung für beide Deichringe dargestellt. Deichring 42 besteht aus 61 Deichabschnitten und Deichring 48 umfasst 92 Deichabschnitte. Nähere Angaben zu den Kriterien bei der Abgrenzung der Deichabschnitte finden sich in den Berichten zu Deichring 42 und 48 von RoyalhaskoningDHV [15][16] und VNK2 [17][18].

Abbildung 6
Einteilung der Deichringe in Deichabschnitte

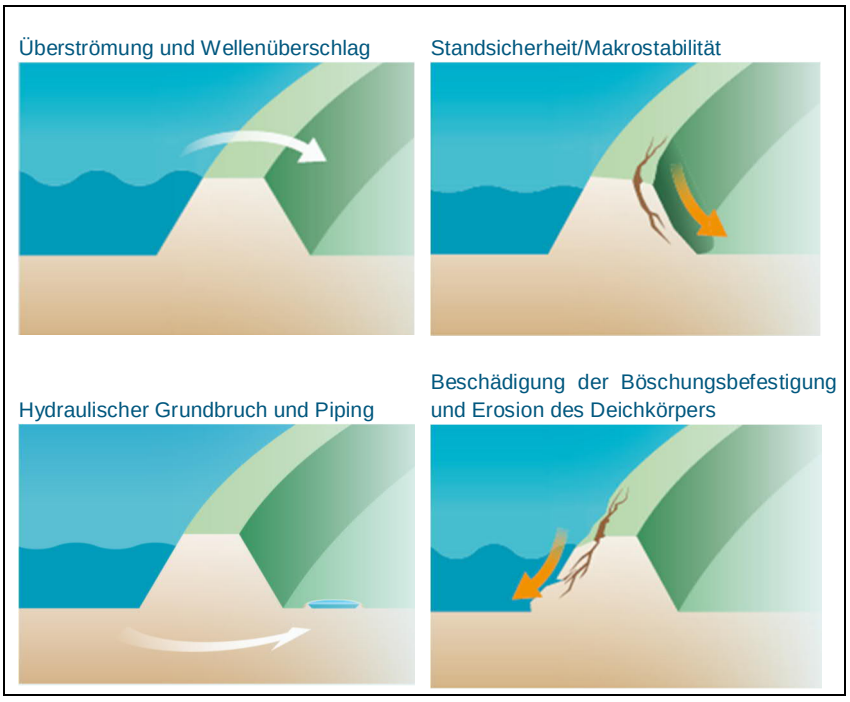


Die Berechnungen der Überflutungswahrscheinlichkeit für das Deichringgebiet und der Versagenswahrscheinlichkeiten für die Deichabschnitte und wasserbaulichen Anlagen wurden mit Hilfe des Programms PC-Ring [19][20][21] durchgeführt. PC-Ring ist ein vom niederländischen Forschungs- und Wissensinstitut TNO entwickeltes Programm für die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Deichen und wasserbaulichen Anlagen und wurde zuvor im Rahmen des Projekts VNK2 in den Niederlanden für alle Deichringe verwendet.

Mit der Software PC-Ring können die Versagenswahrscheinlichkeiten für die folgenden vier Versagensmechanismen der Deiche berechnet werden:

- Überströmung und Wellenüberschlag
- Hydraulischer Grundbruch und Piping
- Standsicherheit/Makrostabilität
- Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers

Abbildung 7 Untersuchte Versagens-mechanismen bei Deichen



Die Versagenswahrscheinlichkeiten werden somit für jeden Deichabschnitt und jeden Versagensmechanismus mittels der aktuell verfügbaren oder angenommenen Daten über Untergrund, Höhe, Böschungsbefestigung, Material und Aufbau des Deiches, hydraulische Belastung usw. bestimmt. Nach Eingabe dieser Daten in PC-Ring lässt sich auch die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit ermitteln. Diese Methode wird im VNK2 Hintergrundbericht zur Schematisierung der Deichabschnitte [22] eingehender erläutert.

Überströmung und Wellenüberschlag

Bei diesem Versagensmechanismus bricht der Deich, weil große Wassermengen über den Deich fließen und die landseitige Böschung beschädigt wird und erodiert. Bei ablandigem Wind oder geringen

Wellenhöhen wird der Deichbruch durch den Versagensmechanismus Überströmung beschrieben, in anderen Fällen durch den Versagensmechanismus Wellenüberschlag.

Standsicherheit / Makrostabilität
Bei diesem Versagensmechanismus bricht der Deich, weil ein Teil des Deichs infolge langanhaltender hoher Wasserstände instabil wird und anschließend auf der Landseite abschert oder aufschwimmt.

Hydraulischer Grundbruch und Piping
Bei diesem Versagensmechanismus bricht der Deich, weil der Sand unter dem Deich erodiert wird. Durch den Druck des Wassers wird zuerst die gegebenenfalls vorhandene Deckschicht aufbrechen. Anschließend können infolge von Erosion unter dem Deich „Röhren" entstehen, die zum Deichbruch führen.

Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers
Bei diesem Versagensmechanismus bricht der Deich, weil zuerst die Oberflächenbefestigung auf der Wasserseite durch den Wellenangriff beschädigt wird, woraufhin sich anschließend die Größe des Deichquerschnitts verringert und der Deich bricht.

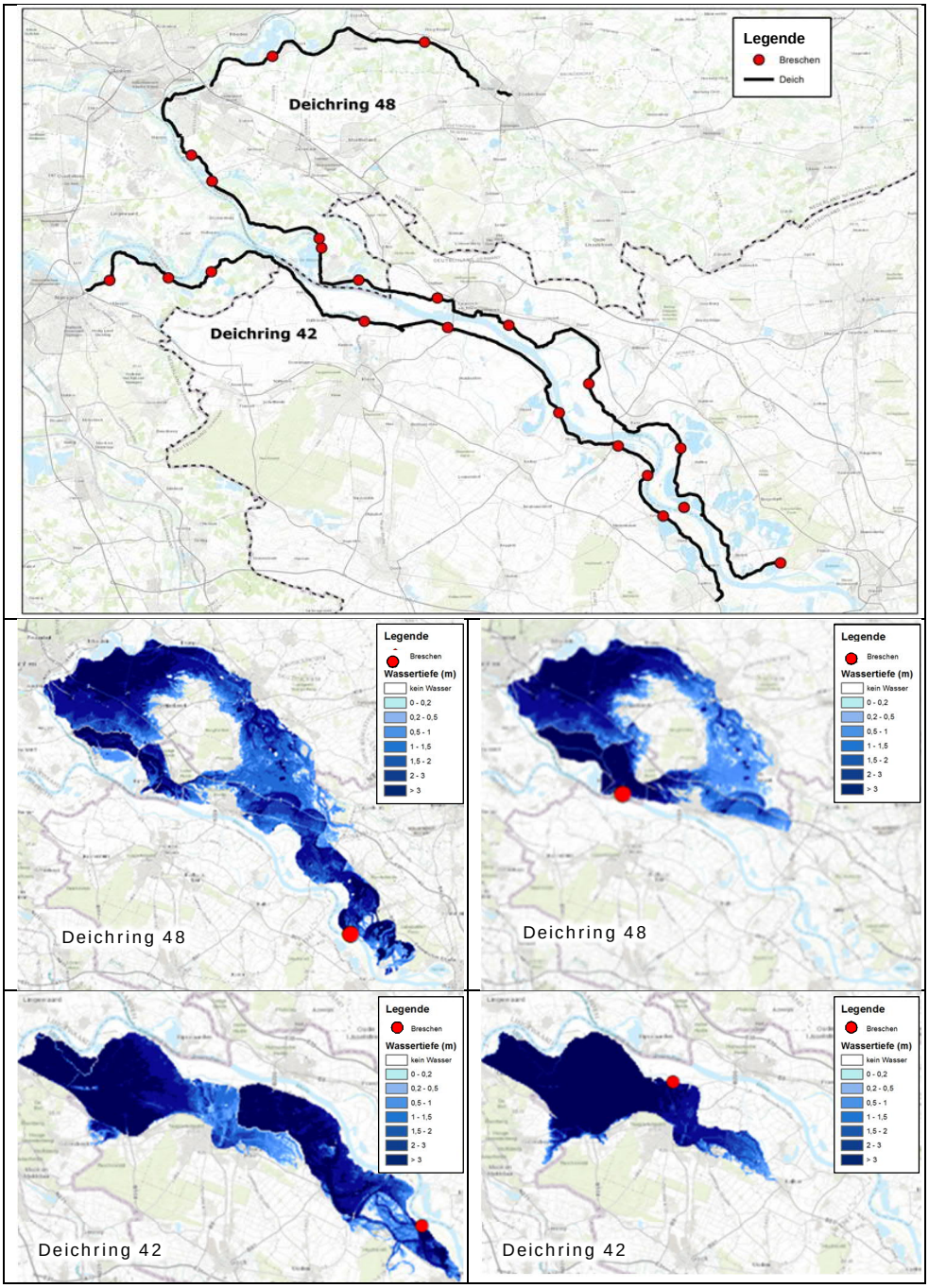
Zur Gewährleistung der Effizienz der Risikoanalyse wurde für jeden Versagensmechanismus auf der Grundlage von Expertenmeinungen eine Auswahl der Deichabschnitte getroffen, bei denen die Versagenswahrscheinlichkeit möglicherweise relevant ist. Nur in diesen Deichabschnitten wurden die Versagenswahrscheinlichkeiten für den entsprechenden Versagensmechanismus berechnet. Die Auswahl der relevanten Versagensmechanismen wird in dem VNK2-Hintergrundbericht der Deichringe 42 und 48 für den niederländischen Teil beider Deichringe [23][24] und dem Arbeitsplan [25][26] für den deutschen Teil beider Deichringe erläutert.

4.1.2 Folgen einer Überflutung

Überflutungsszenarien
Eine Überflutung entsteht durch eine Bresche in der Hochwasserschutzanlage. Da sich der Umfang der Überflutung nach dem Ort richtet, an dem die Bresche entsteht, werden mehrere Szenarien untersucht. Um den jeweiligen Umfang einer Überflutung festzustellen, wurden für Deichring 42 und für Deichring 48 mehrere potentielle Breschen untersucht. Abbildung 8 enthält eine Übersicht über die untersuchten Breschen und zeigt exemplarisch für 4 Breschen den Umfang der Überflutung. In diesem Zusammenhang wurde davon ausgegangen, dass die erhöhten Linienelemente in den geschützten Gebieten standsicher sind und im Falle einer Überflutung nicht versagen werden. Die Elemente werden höchstens überströmt. Die Überflutungsmuster aller untersuchten Breschen sind in den

Berichten von RoyalhaskoningDHV über Deichring 42 und 48 [15][16] enthalten

Abbildung 8 Potentielle Breschen (oben, rote Punkte) und Beispiele für Überflutungs-szenarien (unten)



Überflutungsfolgen

Die Folgen einer Überflutung richten sich nach deren Charakteristiken (wie etwa Wassertiefe und Anstiegsgeschwindigkeit) und der Gefährdung der betroffenen Objekte oder Personen. Aufgrund der erheblichen Schwankungen in Bezug auf den Umfang der Überflutungen je nach Szenario sind die Unterschiede der Folgen sowohl im Vergleich der beiden Deichringe als auch innerhalb der Deichringe relativ groß.

Für die Ermittlung der Folgen wird ein niederländisches Schadens- und Opfermodell [27] verwendet. Das Modell wurde für die niederländische Situation entwickelt und wurde im Rahmen dieser Studie auch auf den deutschen Teil der Deichringe 42 und 48 ausgeweitet.

Für die Berechnung des wirtschaftlichen Schadens und der Zahl der potentiellen Opfer nutzt das Modell Grunddaten. Die Grunddaten stellen die räumliche Verteilung von u.a. dem Straßennetz, der Flächennutzung, den Unternehmen, Häusern und Einwohnern dar.

Evakuierung

Für die Ermittlung der Zahl der potentiellen Opfer infolge einer Überflutung spielen die Möglichkeiten einer (Präventiv-) Evakuierung ebenfalls eine wichtige Rolle. In der Praxis hängt die Effektivität der Präventivevakuierungen von der Vorhersagbarkeit von Überflutungen, der Kapazität der vorhandenen Infrastruktur und den Bedingungen, unter denen die Evakuierung durchgeführt werden muss, wie etwa Beunruhigung der Bevölkerung, ab [28].

Die Möglichkeit der Präventivevakuierung wurde berücksichtigt, indem analog zur Methode der VNK2-Studie die Zahl der potentiellen Opfer für vier Evakuierungsteilszenarien berechnet wurde. Diese Szenarien werden in dieser Studie für die Ermittlung der Folgen einer Überflutung verwendet. Die Evakuierungsanteile bezeichnen den Prozentsatz der Bevölkerung, der präventiv evakuiert werden kann. Weitere Informationen bezüglich der Evakuierung finden sich in dem Hintergrundbericht der VNK2-Studie [29].

4.1.3 Überflutungsrisiko

Der Begriff Überflutungsrisiko bezeichnet die Kombination von Wahrscheinlichkeiten und Folgen von Überflutungen. Das Risiko wurde berechnet, indem die nach Kapitel 4.1.1 ermittelten Wahrscheinlichkeiten mit den Folgen der einzelnen Überflutungsszenarien (Kapitel 4.1.2). kombiniert wurden. Bei der Auswahl der Überflutungsberechnungen wurden jeweils die Belastungsbedingungen berücksichtigt, bei denen das Eintreten der unterschiedlichen Szenarien am wahrscheinlichsten ist.

Die Folgen werden als wirtschaftlicher Schaden oder Zahl der potentiellen Opfer ausgedrückt. Das wirtschaftliche Risiko und das Opferrisiko können mit verschiedenen Risikomaßen dargestellt werden. In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Risikomaße beschrieben.

Wirtschaftliches Risiko

Das wirtschaftliche Risiko ist der jährliche Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens und wird in Euro pro Jahr ausgedrückt. Es handelt sich um einen gewichteten Mittelwert aller möglichen Schäden. Die Wahrscheinlichkeiten dieser Schäden bilden die Gewichtung.

Opferrisiko
Das Opferrisiko ist der jährliche Erwartungswert der Zahl an Opfern, ausgedrückt als Anzahl der Opfer pro Jahr. Es handelt sich um einen gewichteten Mittelwert der Zahl der möglichen Opfer je Überflutungsszenario. Die Wahrscheinlichkeiten dieser Zahl von Opfern bilden die Gewichtung.

Lokales individuelles Risiko (LIR)
Das lokale individuelle Risiko ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person, die sich ständig an einem bestimmten Ort innerhalb des Deichrings aufhält, infolge einer Überflutung ums Leben kommt. Bei der Berechnung des lokalen individuellen Risikos werden die Möglichkeiten einer Präventivevakuierung berücksichtigt.

4.2 Überflutungsrisiken 2015

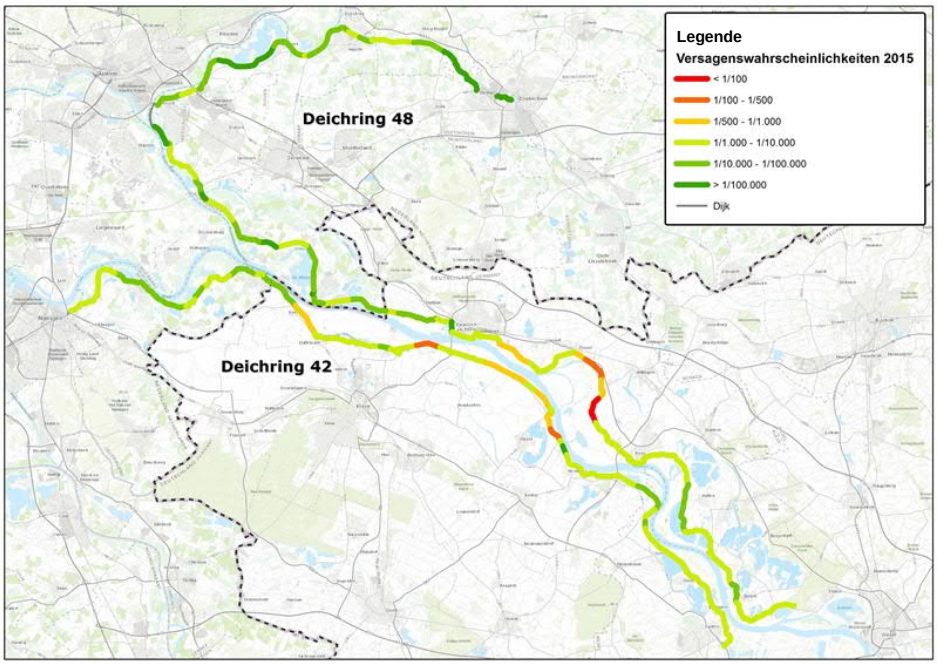
Bei der Ermittlung des Überflutungsrisikos für das Jahr 2015 wurde von dem Zustand der Hochwasserschutzanlagen im Jahr 2015 und den Folgen bezogen auf das Jahr 2015 ausgegangen. Für die Hochwasserschutzanlage bedeutet das, dass die in jenem Jahr eingeleiteten Sanierungen der Hochwasserschutzanlage als abgeschlossen zu betrachten sind. Dort, wo die Sanierungen zwar geplant, aber noch nicht eingeleitet wurden, wurde die Situation vor der Deichertüchtigung berücksichtigt. Um die Konsequenzen in der Situation von 2015 zu bestimmen wurden die Größe der Bevölkerung, die Anzahl und die Art der Gebäude sowie die vorhandene Infrastruktur berücksichtigt.

4.2.1 Versagenswahrscheinlichkeit

Für alle Deichabschnitte beider Deichringe wurden gemäß der im Rahmen des VKN2-Projekts angewandten Methodik Versagenswahrscheinlichkeiten berechnet. Für den niederländischen Teil wurde in Bezug auf die Versagenswahrscheinlichkeiten von den bereits berechneten Wahrscheinlichkeiten aus der VNK2-Studie [17][18] ausgegangen und für den deutschen Teil wurden die Versagenswahrscheinlichkeiten für die unterschiedlichen Mechanismen mit Hilfe von PC-Ring berechnet. Die Berichte von RoyalhaskoningDHV [15][16] und [31] enthalten weitere Angaben zu den berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten je Versagensmechanismus je Deichabschnitt.

In Abbildung 9 werden die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten je Deichabschnitt für die Situation 2015 dargestellt. Dabei handelt es sich um die kombinierten Versagenswahrscheinlichkeiten für alle Mechanismen. Falls für einen Deichabschnitt mehrere Versagensmechanismen untersucht wurden, wird hier die kombinierte Versagenswahrscheinlichkeit dargestellt.

Abbildung 9
Versagenswahr-
scheinlichkeiten
2015 je
Deichabschnitt



In Deichring 42 gibt es insgesamt sechs Deichabschnitte mit einer Versagenswahrscheinlichkeit größer als 1/1000 pro Jahr, mit einer Bandbreite von 1/240 bis 1/910 pro Jahr. Für zwei dieser Deichabschnitte ist der Mechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping maßgebend. Für die übrigen vier Deichabschnitte ist der maßgebende Versagensmechanismus Überströmung und Wellenüberschlag

In Deichring 48 gibt es ebenfalls sechs Deichabschnitte mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von größer als 1/1000 pro Jahr, mit einer Bandbreite von 1/100 bis 1/880 pro Jahr. Für einen dieser Deichabschnitte ist der Mechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping maßgebend. Für die übrigen fünf Deichabschnitte ist der maßgebende Versagensmechanismus Überströmung und Wellenüberschlag.

Bei den Deichabschnitten, in denen die errechnete Versagenswahrscheinlichkeit relativ groß ist, handelt es sich um Abschnitte, in denen im Rahmen des Fahrplans Deichsanierung NRW bis 2025 noch Deichertüchtigungen durchgeführt werden.

Durch die Kombination aller Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Deichabschnitte kann je Deichring die Überflutungswahrscheinlichkeit ermittelt werden. In Tabelle 1 werden auf Deichringebene die Versagenswahrscheinlichkeiten je Versagensmechanismus sowie die gesamte Überflutungswahrscheinlichkeit je Deichring dargestellt. Dabei wurde zwischen den berechneten Wahrscheinlichkeiten für den deutschen und den niederländischen Teil des Deichrings unterschieden.

Tabelle 1 Versagenswahrscheinlichkeiten 2015

Zeithorizont 2015	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 42			Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 48		
Versagensmechanismen	Abschnitt D	Abschnitt NL	Gesamter Deichring	Abschnitt D	Abschnitt NL	Gesamter Deichring
Überströmung und Wellenüberschlag	1/660 bzw. 0.151%	1/4.500 bzw. 0.022%	1/660 bzw. 0.151%	1/580 bzw. 0.172%	1/6.700 bzw. 0.015%	1/580 bzw. 0.172%
Standsicherheit/ Makrostabilität	1/380.000 bzw. 0.0003%	1/830.000 bzw. 0.0001%	1/300.000 bzw. 0.0003%	1/10.000 bzw. 0.01%	1/200.000 bzw. 0.0005%	1/10.000 bzw. 0.01%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	1/150 bzw. 0.667%	1/450 bzw. 0.222%	1/120 bzw. 0.833%	>1/100 bzw. >1%	1/570 bzw. 0.175%	>1/100 bzw. >1%
Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers	1/520.000 bzw. 0.0002%	1/300.000 bzw. 0.0003%	1/210.000 bzw. 0.0005%	1/21.000 bzw. 0.005%	1/11.000 bzw. 0.009%	1/7.600 bzw. 0.013%
Überflutungswahrscheinlichkeit über alle vier Versagensmechanismen	1/140 bzw. 0.714%	1/410 bzw. 0.244%	1/120 bzw. 0.833%	>1/100 bzw. >1 %	1/530 bzw. 0.189%	>1/100 bzw. >1%

4.2.2 Folgen

In Kapitel 4.1.2 wurden einige Überflutungsbeispiele dargestellt. Wenn alle unterschiedlichen Breschen berücksichtigt werden, richtet sich der Schaden für Deichring 42 nach der Lage der Bresche und beträgt zwischen 1 Milliarde und 9 Milliarden Euro. Die Zahl der Geschädigten liegt zwischen 10.000 und 50.000 und die Zahl der potentiellen Opfer in Deichring 42 liegt zwischen 5 und 1200, je nach Lage der Bresche und dem Umfang einer erfolgreichen Präventivevakuierung, ausgedrückt in einem bestimmten Evakuierungsprozentsatz.

Für Deichring 48 ist die Bandbreite größer: je nach Lage der Bresche beträgt der Schaden 250 Millionen bis 13 Milliarden Euro und liegt die Zahl der Geschädigten zwischen 3.500 und 160.000. Die Zahl der potentiellen Opfer ist in Deichring 48 ebenfalls höher als in Deichring 42. Für Deichring 48 liegt die Zahl der Opfer je nach Lage der Bresche und dem Umfang einer erfolgreichen Präventivevakuierung zwischen 5 und 1500.

Bei den soeben dargestellten Ergebnissen bezüglich der Anzahl der Geschädigten und potentiellen Opfern wurde sowohl für Deichring 42 als auch Deichring 48 für den gesamten Deichring von der in der VNK2-Studie benutzten Annahme in Bezug auf die Präventivevakuierung ausgegangen, dass mindestens 76 % der Einwohner rechtzeitig evakuiert werden können.

In Nordrhein-Westfalen hingegen wird bei vergleichbaren Untersuchungen üblicherweise von der Annahme ausgegangen, dass 100 % der Einwohner evakuiert werden können. Aus diesem Grund wurde diesbezüglich eine Sensitivitätsanalyse mit höheren Evakuierungsanteilen durchgeführt (siehe Kapitel 5.2).

Beim Vergleich der beiden Deichringe fällt auf, dass sich die Schäden und die Zahl der Geschädigten in Deichring 42 größtenteils auf das deutsche

Hoheitsgebiet konzentrieren, und zwar in einer Größenordnung von 75 %. Für Deichring 48 verhält es sich genau umgekehrt: 90 % der Schäden und Geschädigten befinden sich in den Niederlanden. Eine Übersicht aller einzelnen Breschen mit ihren jeweiligen Folgen ist in den Berichten von RoyalhaskoningDHV [15] [16] enthalten.

4.2.3 Überflutungsrisiko

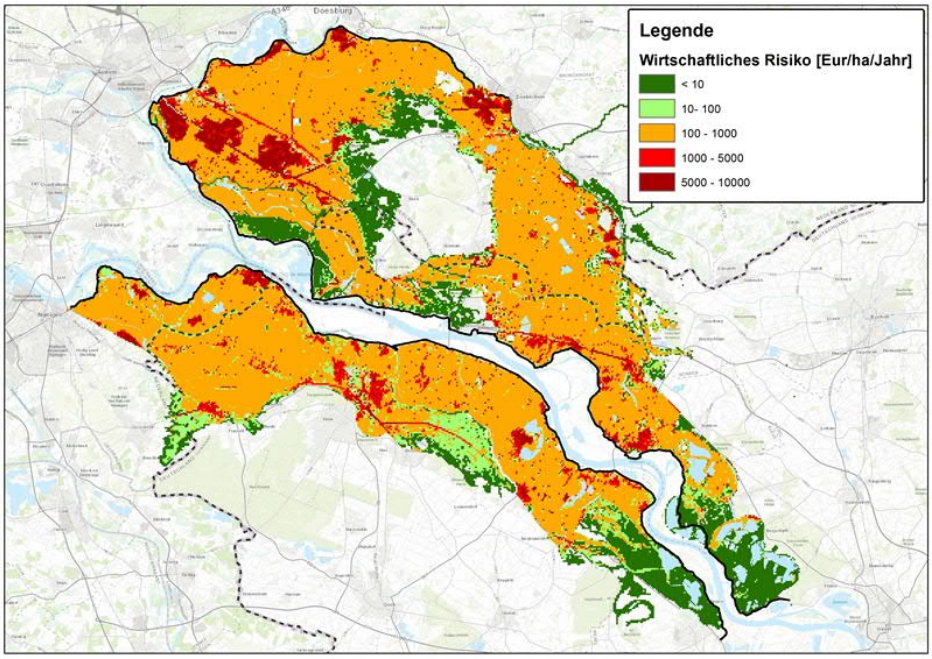
Das Überflutungsrisiko wird anschließend bestimmt, indem die in Kapitel 4.2.1 ermittelten Wahrscheinlichkeiten mit den in Kapitel 4.2.2 ermittelten Überflutungsfolgen der unterschiedlichen Überflutungsszenarien kombiniert werden.

Wirtschaftliches Risiko

Durch die Kombination des wirtschaftlichen Schadens infolge der unterschiedlichen Überflutungsszenarien mit der Wahrscheinlichkeit, dass dieses Szenario eintritt, wird der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens ermittelt. Für Deichring 42 liegt der berechnete Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens bei einer Größenordnung von 23 Millionen Euro pro Jahr und für Deichring 48 bei 78 Millionen Euro pro Jahr für die Situation 2015.

Dieser wirtschaftliche Schaden tritt insbesondere in den Siedlungsräumen auf. Das spiegelt sich auch in der räumlichen Verteilung des Erwartungswerts des wirtschaftlichen Risikos wider. In Abbildung 10 ist deutlich erkennbar, dass das wirtschaftliche Risiko an den Stellen am höchsten ist, an denen sich die Städte befinden.

Abbildung 10 Wirtschaftliches Risiko 2015



Bei Betrachtung der Verteilung des wirtschaftlichen Risikos zwischen Deutschland und den Niederlanden lässt sich feststellen, dass bei Deichring 42 ungefähr 75 % des Risikos im deutschen Teil des Deichrings auftritt. Für

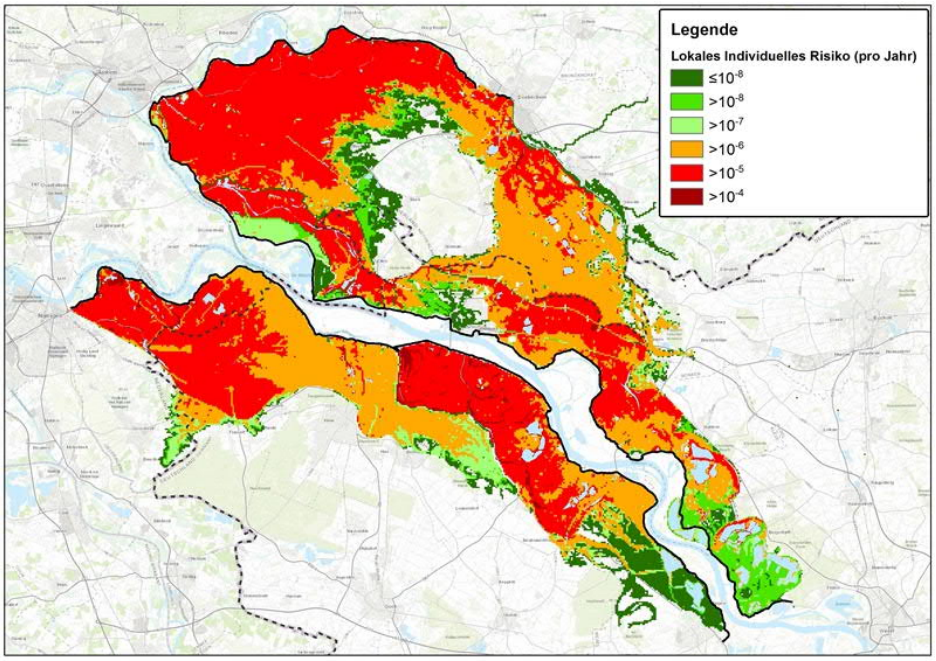
Deichring 48 tritt das wirtschaftliche Risiko insbesondere im niederländischen Teil des Deichrings auf, und zwar zu ungefähr 90 % des berechneten wirtschaftlichen Gesamtrisikos.

Opferrisiko

Das lokale individuelle Risiko (LIR) vermittelt einen räumlichen Eindruck von dem Risiko und beschreibt die jährliche Wahrscheinlichkeit, dass eine Person, die sich ständig an einem bestimmten Ort innerhalb des Deichrings aufhält, infolge einer Überflutung dieses Deichringgebiets ums Leben kommt, unter Berücksichtigung der Möglichkeiten einer Präventivevakuierung. Dabei wurde bei beiden Deichringen von der in der VNK2-Studie benutzten Annahme in Bezug auf die Evakuierung (im Durchschnitt 76%) ausgegangen [29]. Eine Sensitivitätsanalyse in Bezug auf einen Evakuierungsanteil von 100 Prozent wurde in Kapitel 5.2 erarbeitet. Der jährliche Erwartungswert der Zahl der Opfer wird als Anzahl der (Todes-) Opfer pro Jahr ausgedrückt. Für Deichring 42 beträgt dieser Wert weniger als 1 Opfer pro Jahr und für Deichring 48 1 bis 2 Opfer pro Jahr.

In Abbildung 11 wird das lokale individuelle Risiko dargestellt. In den roten Gebieten des Deichrings beträgt das LIR zwischen 1/10.000 und 1/100.000 pro Jahr. Das bedeutet, dass in diesen Gebieten die berechnete Wahrscheinlichkeit, dass jemand infolge einer Überflutung ums Leben kommt, zwischen 1/10.000 und 1/100.000 pro Jahr liegt. In der Abbildung sind ebenfalls die erhöhten Linienelemente erkennbar, die bewirken, dass das Wasser dort lokal aufgestaut wird, was infolge der höheren Wasserstände und/oder des rascheren Anstiegs der Wasserstände zu einer größeren Opferwahrscheinlichkeit führt.

Abbildung 11
Lokales individuelles Risiko 2015



4.2.4 Einfluss der wasserbaulichen Anlagen auf das Risiko 2015

Neben den Deichabschnitten wurden auch mehrere wasserbauliche Anlagen untersucht. Diese Anlagen haben nicht nur eine Hochwasserschutzfunktion, sondern dienen beispielsweise auch zur Gewährleistung der Durchgängigkeit für den Verkehr bei Deichscharten und Schiffsschleusen oder der Wasserwirtschaft im Deichring (Schöpfwerke und Ein-/Auslassbauwerke). Diese wasserbaulichen Anlagen wurden speziell für die Erfüllung dieser unterschiedlichen Aufgaben errichtet und bedürfen bei der Prüfung ihrer Hochwasserschutzfunktion besonderer Aufmerksamkeit. In Abbildung 12 und Tabelle 2 werden alle analysierten wasserbaulichen Anlagen dargestellt.

Für die niederländischen wasserbaulichen Anlagen wurden die Ergebnisse aus der VNK2-Analyse der Deichringe 42 und 48 [17][18] übernommen. Die Versagenswahrscheinlichkeiten der wasserbaulichen Anlagen in Deutschland wurden in Übereinstimmung mit der in der niederländischen VNK2-Studie verwendeten Systematik ermittelt. Da nicht genügend Informationen für eine detaillierte Versagenswahrscheinlichkeitsberechnung in PC-Ring vorlagen, wurden die in VNK2 verwendeten Handrechenregeln für eine erste Einschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit genutzt. Für wasserbauliche Anlagen, für die gar keine Informationen zur Verfügung standen, hat eine Experteneinschätzung stattgefunden [30][15][16].

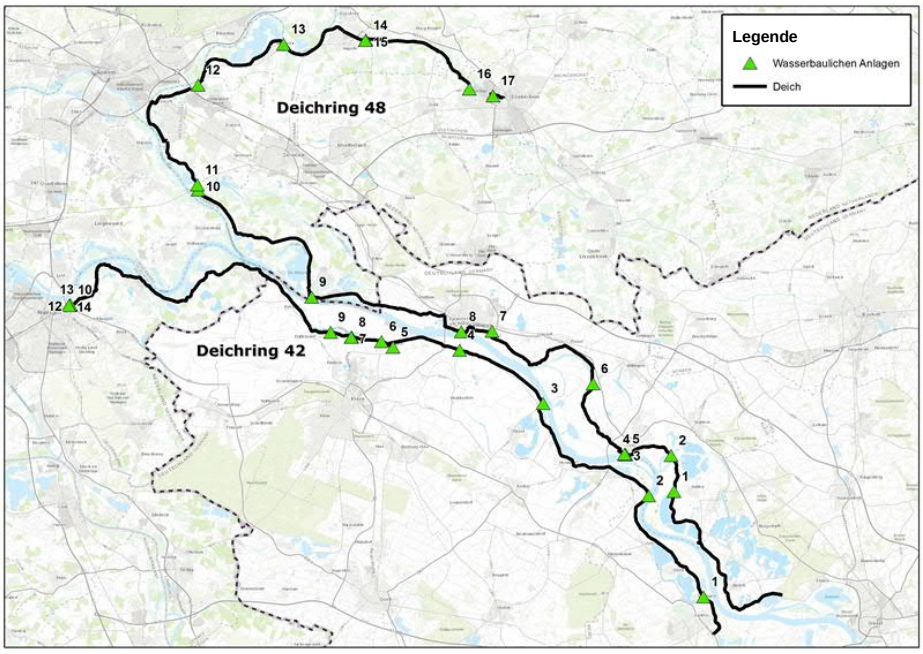


Abbildung 12 Wasserbauliche Anlagen in den Deichringen 42 und 48

Tabelle 2 Übersicht wasserbauliche Anlagen in Deichring 42 und Deichring 48

Deichring 42		Deichring 48	
1	Deichscharte Lüttingen	1	Schöpfwerk Bislicher Ley
2	Obermörmter - Mobile Schutzwand	2	Schöpfwerk Haffen *
3	Grieth – Deichtor	3	Deichtor Rees – Op de Poort *
4	Schöpfwerk Kalflack	4	Deichtor Rees – Aurich *
5	Schöpfwerk Altrhein	5	Deichtor Rees – Hotel
6	Deichtor Griethausen	6	Durchlassbauwerk Bienen *
7	Schleuse Brienen *	7	Schöpfwerk Löwenberg
8	Schöpfwerk Spoy	8	Rheinpromenade Emmerich *
9	Schöpfwerk Vossholt	9	Deichscharte Tolkamer
10	Deichscharte Dijkgraaf van Wijckweg	10	Schöpfwerk Bevermeer
11	Deichscharte Ubbergseweg (Sandsäcke)	11	Schöpfwerk Liemers
12	Deichscharte Waalbandijk (in Brücke Hollands-Duitsch Gemaal)	12	Schöpfwerk Kandia
13	Eco-Düker (Hollands-Duitsch Gemaal –Eco-Schleuse)	13	Eisenbahnlinie Betuwe
14	Hollands-Duitsch Gemaal	14	Durchlassbauwerk Wijbergse loopgraaf
		15	Durchlassbauwerk Kapperkolkse water
		16	Entwässerungsschleuse Hoge Leiding
		17	Abflussrohr Kläranlage Nieuwgraaf

In Deichring 42 gibt es 1 wasserbauliche Anlage, die in erheblichem Maße zur Überflutungswahrscheinlichkeit beiträgt und in Deichring 48 beträgt diese Zahl 5. In Tabelle 2 sind diese wasserbaulichen Anlagen mit einem Stern gekennzeichnet. Die genannten wasserbaulichen Anlagen befinden sich allesamt im deutschen Teil des Deichrings. Zu diesen wasserbaulichen Anlagen standen manchmal relativ wenige Angaben zur Verfügung, so dass zum Teil auch Annahmen getroffen werden mussten. Die übrigen wasserbaulichen Anlagen im Deichring haben keinen bedeutenden Anteil an der Überflutungswahrscheinlichkeit.

Die aktuelle Überflutungswahrscheinlichkeit für Deichring 42 und 48, bei der ausschließlich die Deiche berücksichtigt wurden, beträgt 1/120 beziehungsweise >1/100 pro Jahr für den Zeithorizont 2015 (siehe Kapitel 4.2.1). Für Deichring 42 erhöht sich diese Überflutungswahrscheinlichkeit um Faktor 2 bis 3, wenn auch die wasserbaulichen Anlagen berücksichtigt werden. Auch für Deichring 48 beläuft sich diese Zunahme auf Faktor 2 bis 3. Da sich die wasserbaulichen Anlagen mit den größten Versagenswahrscheinlichkeiten in der Mitte (Deichring 42) beziehungsweise stromaufwärts (Deichring 48) des Deichrings befinden, kann angenommen werden, dass sich das Überflutungsrisiko (sowohl in Bezug auf das wirtschaftliche Risiko als auch auf die Zahl der Opfer) ebenfalls um diese Faktoren erhöhen könnte.

4.3 Überflutungsrisiken 2025

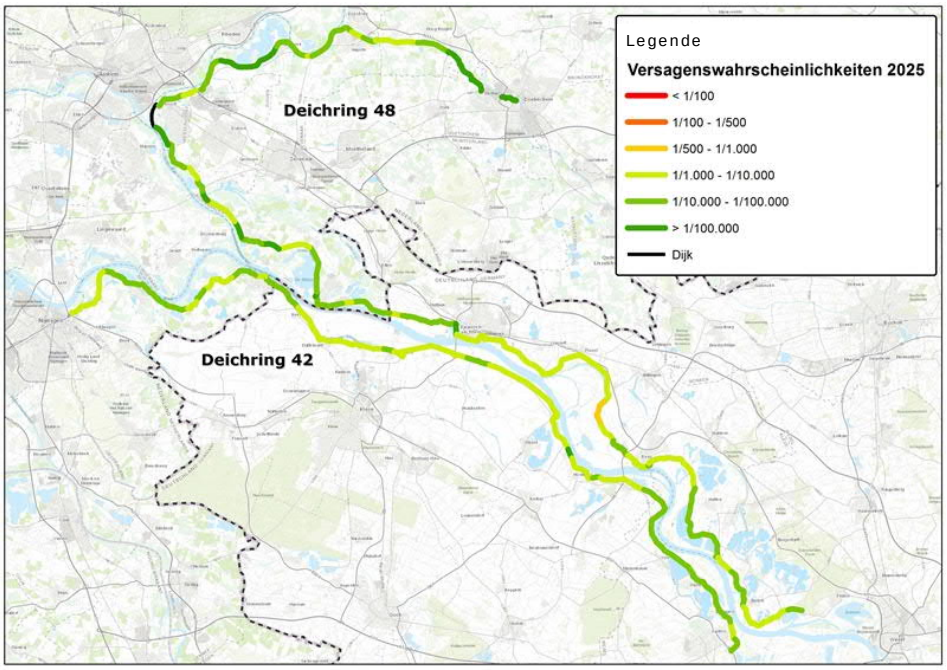
In der Situation 2015 wurden die noch durchzuführenden Deichertüchtigungen nicht berücksichtigt. In der untersuchten Situation 2025 gelten alle noch geplanten Deichertüchtigungsmaßnahmen in NRW als abgeschlossen. Darüber hinaus wird für das Jahr 2025 der Rückhalteraum Lohrwardt als fertiggestellt angenommen. Diese Maßnahme hat eine Wasserstand absenkende Wirkung auf den Rhein. Zudem wurde davon

ausgegangen, dass alle wasserbaulichen Anlagen saniert wurden und damit keinen Einfluss mehr auf die Versagenswahrscheinlichkeit haben.

4.3.1 Versagenswahrscheinlichkeit

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten entspricht der Vorgehensweise in der Situation 2015. Es wurde lediglich die Schematisierung der Hochwasserschutzanlage in Bezug auf jene Orte angepasst, an denen Deichertüchtigungsmaßnahmen vorgesehen sind, damit sie zum Entwurf der Hochwasserschutzanlage in der Situation 2025 passt. In Abbildung 13 werden die erneut berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten je Deichabschnitt für die Situation 2025 dargestellt. Dabei handelt es sich um die kombinierten Versagenswahrscheinlichkeiten für alle Mechanismen. Falls für einen Deichabschnitt mehrere Versagensmechanismen untersucht wurden, wird hier die kombinierte Versagenswahrscheinlichkeit dargestellt.

Abbildung 13 Versagenswahrscheinlichkeiten 2025 je Deichabschnitt



In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass sich die Versagenswahrscheinlichkeiten insbesondere im mittleren Teil der Abbildung verringert haben. Das ist auf die geplanten Deichertüchtigungsmaßnahmen in Nordrhein-Westfalen zurückzuführen.

In Deichring 42 haben alle Deichabschnitte eine Versagenswahrscheinlichkeit von weniger als 1/1000 pro Jahr und in Deichring 48 hat nur ein einziger Deichabschnitt eine Versagenswahrscheinlichkeit von mehr als 1/1000 pro Jahr, nämlich 1/700 pro Jahr. Für beide Deichringe ist der Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping maßgebend.

Durch die Kombination der einzelnen Deichabschnitte werden die Versagenswahrscheinlichkeiten auf Deichringebene ermittelt. In Tabelle 3 werden auf Deichringebene die Versagenswahrscheinlichkeiten je

Versagensmechanismus sowie die gesamte Überflutungswahrscheinlichkeit je Deichring dargestellt.

Tabelle 3 Versagenswahrscheinlichkeiten 2025

Zeithorizont 2025	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 42			Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 48		
Versagensmechanismen	Abschnitt D	Abschnitt NL	Gesamter Deichring	Abschnitt D	Abschnitt NL	Gesamter Deichring
Überströmung und Wellenüberschlag	1/2.200 bzw. 0.045%	1/5.300 bzw. 0.151%	1/2.200 bzw. 0.151%	1/1.500 bzw. 0.067%	1/6.900 bzw. 0.015%	1/1.500 bzw. 0.067%
Standsicherheit/ Makrostabilität	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	1/830.000 bzw. 0.0001%	1/750.000 bzw. 0.0001%	1/190.000 bzw. 0.0005%	1/200.000 bzw. 0.0005%	1/190.000 bzw. 0.0005%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	1/590 bzw. 0.169%	1/450 bzw. 0.222%	1/280 bzw. 0.357%	1/580 bzw. 0.172%	1/700 bzw. 0.143%	1/360 bzw. 0.278%
Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	1/300.000 bzw. 0.0003%	1/290.000 bzw. 0.0003%	1/520.000 bzw. 0.0002%	1/11.000 bzw. 0.009%	1/11.000 bzw. 0.009%
Überflutungswahrscheinlichkeit über alle vier Versagensmechanismen	1/500 bzw. 0.2%	1/420 bzw. 0.238%	1/280 bzw. 0.357%	1/510 bzw. 0.196%	1/650 bzw. 0.154%	1/340 bzw. 0.294%

Anhand der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Überflutungswahrscheinlichkeiten beider Deichringe im Jahr 2025 in etwa gleich sind und dass die Versagenswahrscheinlichkeiten im niederländischen und deutschen Teil des jeweiligen Deichrings ebenfalls ungefähr gleich sind.

4.3.2 Folgen

Für den Zeithorizont 2025 wurden keine neuen Folgenberechnungen durchgeführt. Für die Berechnung des Überflutungsrisikos des Jahres 2025 werden die Folgen für das Jahr 2015 beibehalten. Der Vergleich zwischen dem Überflutungsrisiko in den Jahren 2015 und 2025 zielt hauptsächlich darauf ab, die Wirksamkeit der noch geplanten Deichertüchtigungen in NRW in Bezug auf das Risiko darzulegen. Deswegen wurde für das Jahr 2025 von den gleichen Folgen wie im Jahr 2015 ausgegangen und es wurde kein Wirtschafts- oder Bevölkerungswachstum in dem Zeitraum 2015 bis 2025 berücksichtigt.

4.3.3 Überflutungsrisiko

Die Folgen entsprechen in Bezug auf die Risiken im Jahr 2025 dem Zeithorizont 2015. Die Veränderung bei den Risiken wird somit ausschließlich von einer Veränderung der Versagenswahrscheinlichkeit verursacht.

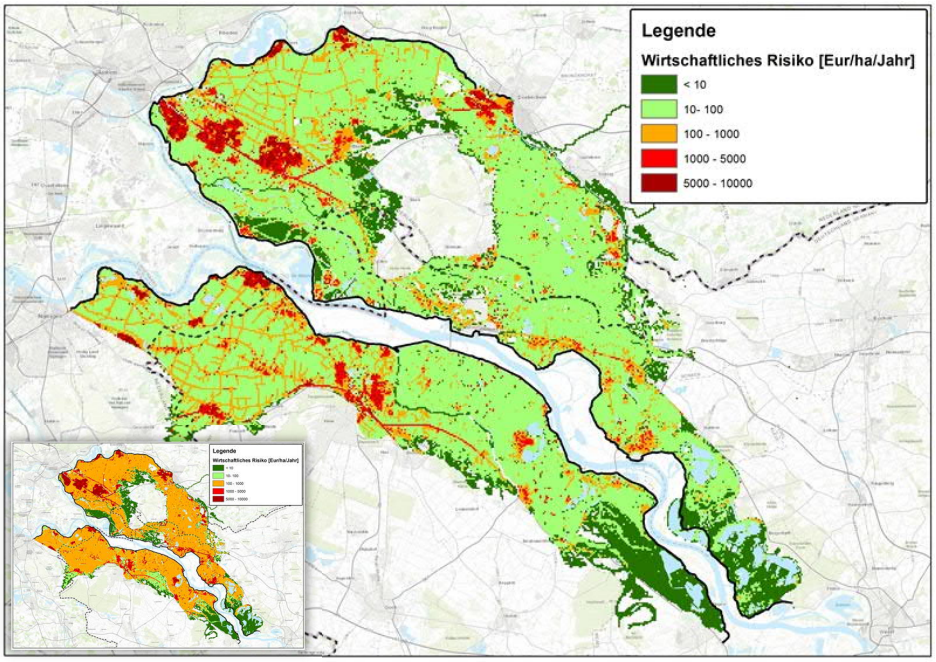
Wirtschaftliches Risiko

Infolge der geringeren Versagenswahrscheinlichkeiten der Hochwasserschutzanlage verringert sich das wirtschaftliche Risiko für den Zeithorizont 2025 erheblich. Der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens pro Jahr verringert sich in Deichring 42 von 23 Millionen Euro pro Jahr auf 14,2 Millionen Euro pro Jahr; das ist ein Rückgang von ungefähr 40 Prozent. In Deichring 48 ist der Rückgang noch größer, denn dort verringert

sich der Erwartungswert von 78 Millionen Euro pro Jahr auf ungefähr 17,5 Millionen Euro pro Jahr, was einem Rückgang von etwa 75 % entspricht.

Der Rückgang des wirtschaftlichen Risikos ist auf die geplanten Deichertüchtigungen in NRW zurückzuführen [32]. In Abbildung 14 wird der Rückgang des wirtschaftlichen Risikos in dem Gebiet dargestellt. Die Situation 2015 wird zum besseren Vergleich in dem verkleinerten Kartenausschnitt dargestellt. Daraus geht deutlich die Abnahme des Risikos hervor.

Abbildung 14 Wirtschaftliches Risiko 2025 mit verkleinertem Kartenausschnitt des wirtschaftlichen Risikos in 2015

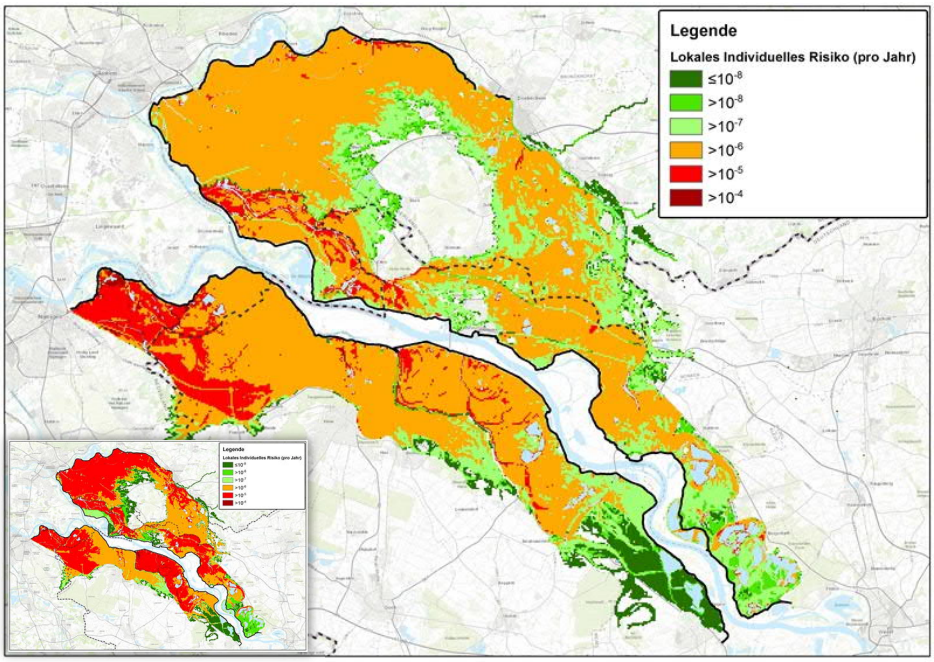


Opferrisiko

Auch das Opferrisiko verringert sich infolge der kleineren Wahrscheinlichkeiten. Der jährliche Erwartungswert der Zahl der Opfer für Deichring 42 betrug bereits in 2015 weniger als 1 Opfer pro Jahr und verringert sich nochmals um 30 %. Für Deichring 48 betrug der Erwartungswert für das Jahr 2015 1 bis 2 Opfer pro Jahr. Dieser Wert verringert sich um 75 % auf weniger als 1 Opfer pro Jahr.

Das lokale individuelle Risiko verzeichnet ebenfalls einen starken Rückgang gegenüber dem Zeithorizont 2015 (siehe Abbildung 15). In der Abbildung ist zu erkennen, dass der Großteil des Deichrings 48 ein lokales individuelles Risiko von weniger als 1/100.000 pro Jahr aufweist. Für Deichring 42 ist der Rückgang ebenfalls groß, nur im stromabwärts gelegenen Teil des Deichrings beträgt das LIR noch 1/10.000 bis 1/100.000 pro Jahr.

Abbildung 15
Lokales individuelles Risiko 2025 mit verkleinertem Kartenausschnitt des lokalen individuellen Risikos in 2015



4.4 Überflutungsrisiken 2025 unter Berücksichtigung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel

Die in den vorangehenden Kapiteln präsentierten Überflutungsrisiken für 2015 und 2025 beruhen unter anderem auf der Wasserstandsstatistik, die auch in dem Projekt Veiligheid Nederland in Kaart 2 verwendet wurde. Diese Statistik wird in den hydraulischen Randbedingungen aus dem Jahr 2001 [33] dokumentiert. Sie beruhen auf der bestehenden Messreihe der Abflüsse bei Lobith und wurden über Verfahren der Extremwertstatistik auf Extremabflüsse geringer Eintrittswahrscheinlichkeit extrapoliert.

Diese auf gemessenen Zeitreihen basierende Vorgehensweise wird auch für die Rhein-Pegel in Nordrhein-Westfalen angewendet, um für extreme Abflüsse seltener Jährlichkeit entsprechende Größen zu generieren.

Spätestens seit der Studie Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein [34] ist bekannt, dass dieses Verfahren für Extremabflüsse eine nicht unerhebliche Unschärfe aufweist. Während in den Messdaten, d.h. den Hochwassern der vergangenen etwa 100 Jahre, keine großräumigen Überflutungen entlang des Rheins enthalten sind, wird aber mit Hilfe des statistischen Verfahrens auf Basis dieser Daten in Abflussbereiche hineinextrapoliert, bei denen eben diese großräumigen Überflutungen stattfinden.

Im Rahmen des niederländischen Projekts Generation of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) wurde u.a. aus diesem Grund eine neue Methode zur Ermittlung von Extremabflüssen und den entsprechenden Abflussganglinien für das Einzugsgebiet des Rheins entwickelt [35].

Mit dieser Methode können Zeitreihen berechnet werden, die die Wirkung von Überflutungen stromaufwärts im Rheineinzugsgebiet auf die Abflüsse am Niederrhein berücksichtigen. Darüber hinaus kann diese Methode zur Ermittlung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Rheinabflüsse genutzt werden. Dabei werden die Eingangsdaten des Niederschlags mit einem entsprechenden Klimawandel-Szenario modifiziert und die so ermittelten Abflusszeitreihen entsprechend verändert. Weitere Hintergrundinformationen über die GRADE-Methodik und die Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko finden sich in den Berichten zu den Deichringen 42 und 48 von RoyalhaskoningDHV [15][16].

4.4.1 Versagenswahrscheinlichkeit

Die Berücksichtigung von Überflutungen im Rheineinzugsgebiet stromaufwärts von Wesel, etwas oberhalb von Deichring 42 und Deichring 48, bei der Ermittlung der Belastung der Hochwasserschutzanlage hat einen überwiegend positiven Effekt auf die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Versagensmechanismen. Lediglich in Bezug auf den Hydraulischen Grundbruch und Piping hat die Berücksichtigung von Überflutungen am Oberlauf einen begrenzten Effekt. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass für den Hydraulischen Grundbruch und Piping auch niedrigere Wasserstände hinsichtlich der Versagenswahrscheinlichkeit wichtig sind. Bei diesen niedrigeren Wasserständen treten stromaufwärts kaum Überflutungen auf, weshalb der Effekt für diesen Versagensmechanismus begrenzt ist. Tabelle 4 enthält eine Übersicht über die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Mechanismen auf Deichringebene. Darin ist klar zu erkennen, dass die Berücksichtigung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel, mit Ausnahme vom Hydraulischen Grundbruch und Piping, einen positiven Effekt hat. Da Hydraulischer Grundbruch und Piping der Mechanismus mit der größten Versagenswahrscheinlichkeit ist, ist er auch für die Überflutungswahrscheinlichkeit maßgebend.

Tabelle 4 Versagenswahrscheinlichkeiten 2025 mit Überflutungen stromaufwärts von Wesel

	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 42		Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 48	
Zeithorizont	2025	2025	2025	2025
Mit/ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel	ohne	mit	ohne	mit
Überströmung und Wellenüberschlag	1/2.200 bzw. 0.045%	1/16.000 bzw. 0.006%	1/1.500 bzw. 0.067%	1/9.600 bzw. 0.01%
Standsicherheit/ Makrostabilität	1/750.000 bzw. 0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	1/190.000 bzw. 0.0005%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	1/280 bzw. 0.357%	1/300 bzw. 0.333%	1/360 bzw. 0.278%	1/350 bzw. 0.286%
Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers	1/290.000 bzw. 0.0003%	1/580.000 bzw. 0.0002%	1/11.000 bzw. 0.009%	1/18.000 bzw. 0.006%
Überflutungswahrscheinlichkeit über alle vier Versagensmechanismen	1/280 bzw. 0.357%	1/300 bzw. 0.333%	1/340 bzw. 0.294%	1/340 bzw. 0.294%

4.4.2 Folgen

Beide hier untersuchten Situationen beziehen sich auf den Zeithorizont 2025. Bezüglich der Folgen (Überflutungsmuster, ökonomischer Schade, Anzahl Opfer) ergeben sich also keine Veränderungen. Darüberhinaus wurde wie bereits bei der Untersuchung zum Zeithorizont 2015 ohne Überflutungen oberhalb von Wesel davon ausgegangen, dass die Situation in 2025 der von 2015 entspricht, siehe Kapitel 4.3.2.

4.4.3 Überflutungsrisiko

Die Überflutungsrisiken wurden in dem Kapitel mit der Situation 2025 ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel verglichen.

Wirtschaftliches Risiko

Da der allgemeine Effekt von Überflutungen stromaufwärts von Wesel auf Deichringebene begrenzt ist, hält sich die Änderung des wirtschaftlichen Risikos ebenfalls in Grenzen. Der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens pro Jahr verringert sich bei Deichring 42 von etwa 14,2 Millionen Euro pro Jahr auf 13,2 Millionen Euro pro Jahr; dies entspricht einem Rückgang von ungefähr 7 %. Für Deichring 48 ist der Rückgang vergleichbar; dort geht der Erwartungswert von 17,5 Millionen Euro pro Jahr auf 16,2 Millionen Euro pro Jahr zurück, was ebenfalls einer Abnahme von circa 7 % entspricht.

In Abbildung 16 wird die räumliche Verteilung des wirtschaftlichen Risikos dargestellt. Im Vergleich zur Situation 2025 ohne Überflutungen am Oberlauf (verkleinerter Kartenausschnitt) sind die Unterschiede geringfügig.

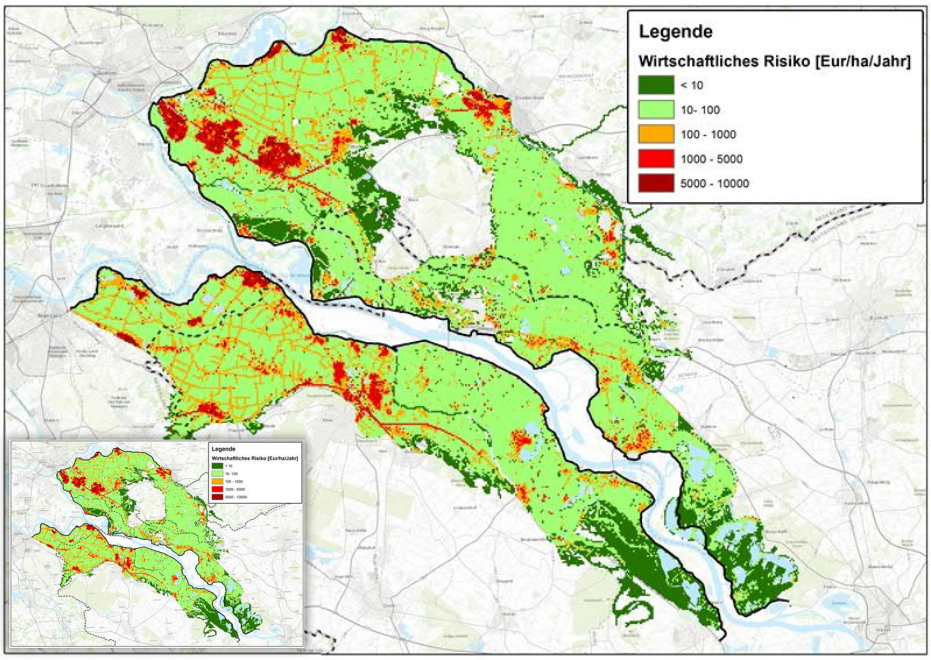


Abbildung 16 Wirtschaftliches Risiko 2025 mit Überflutungen stromaufwärts von Wesel. Der verkleinerte Kartenausschnitt zeigt das wirtschaftliche Risiko 2025 ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel

Opferrisiko

Der Einfluss auf das Opferrisiko ist begrenzt. Der jährliche Erwartungswert der Zahl der Opfer für Deichring 42 und 48 lag bereits in 2015 unter 1 Opfer pro Jahr und verringert sich für beide Deichringe infolge von Überflutungen stromaufwärts von Wesel um 7 %.

Das lokale individuelle Risiko ist im Vergleich zu der Situation 2025 ohne Überflutungen am Oberlauf fast gleich. In Abbildung 17 wurde das lokale individuelle Risiko visualisiert. Im Vergleich zu der Situation 2025 ohne Überflutungen am Oberlauf (verkleinerter Kartenausschnitt) ist das Bild sehr ähnlich.

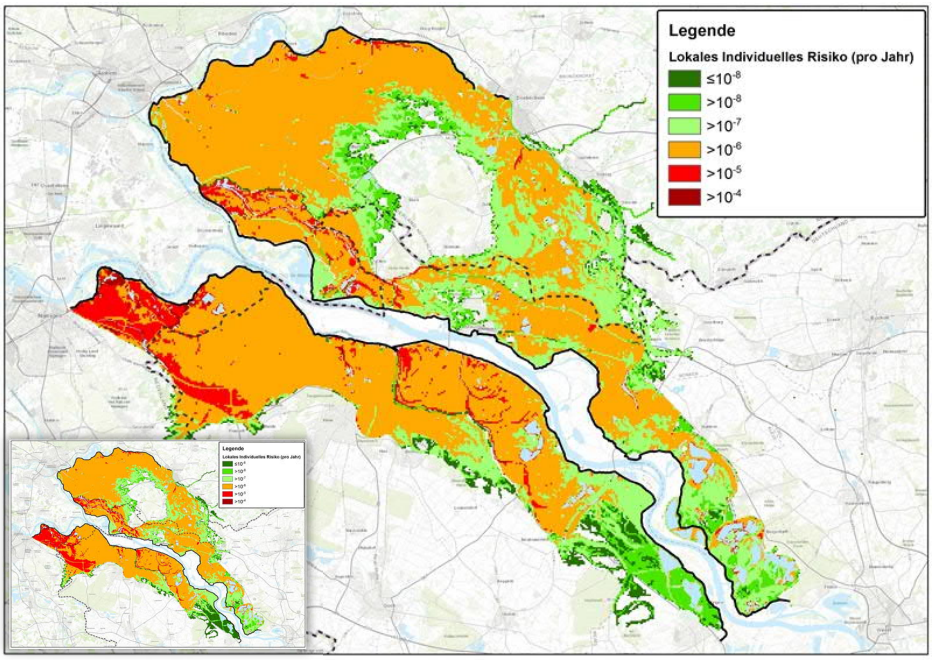


Abbildung 17
Lokales individuelles Risiko 2025 mit Überflutungen stromaufwärts von Wesel.
Der verkleinerte Kartenausschnitt zeigt das lokale individuelle Risiko 2025 ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel

4.5 Überflutungsrisiken 2050

In den vorangehenden Kapiteln wurde das Überflutungsrisiko unter den aktuellen Klimabedingungen beschrieben. Darüber hinaus wurde das mögliche Überflutungsrisiko im Jahr 2050 unter Berücksichtigung des Klimawandels (mit Überflutungen stromaufwärts von Wesel) untersucht. Hierbei findet das Klimawandelszenario KNMI'14 W_H Berücksichtigung. Dieses Szenario ist eins von insgesamt 4 Szenarien, die vom Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) in 2014 für die Niederlande entwickelt und veröffentlicht wurden [36]. Sie stellen eine Aktualisierung der im Jahr 2006 veröffentlichten KNMI'06-Szenarien dar [37].

Für die vorliegende Studie wurde vom „nassen", extremen Szenario KNMI'14 W_H ausgegangen. Dieses Szenario geht von einem weltweiten Temperaturanstieg von 2 °C bis zum Jahr 2050 aus.

Maßgebend für die vorliegende Studie sind die Veränderungen im Niederschlagsverhalten, die sich für dieses Szenario für die Niederlande

ergeben: Die 10-tägige Niederschlagssumme im Winter, die einmal in 10 Jahren überschritten wird, steigt bis zum Jahr 2020 um 17 % und die Anzahl der Wintertage mit Niederschlag von 10 mm und mehr erhöht sich um 35 %. Mit diesen Zahlen wird deutlich, dass dieses Szenario in Bezug auf das Rheineinzugsgebiet den nassen und bezüglich von Hochwassern ungünstigen Rand der durch den Klimawandel möglichen Bandbreite beschreibt.

Neben den Veränderungen, die in den Niederlanden selbst stattfinden, werden auch die Abflüsse der grenzüberschreitenden Wasserläufe, die aus anderen Ländern in die Niederlande fließen, von den künftigen Veränderungen beeinflusst. Aus diesem Grund wurden die KNMI'14-Szenarien in Temperatur- und Niederschlagsreihen für das gesamte Einzugsgebiet des Rheins und der Maas umgewandelt. Mit Hilfe des GRADE-Instrumentariums wurden daraus langjährige Reihen von Abflüssen an verschiedenen Stellen am Rhein generiert.

4.5.1 Versagenswahrscheinlichkeit

Damit die möglichen Effekte des Klimawandels bei der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden können, wurde die Beziehung zwischen dem Abfluss und der entsprechenden Wiederkehrzeit angepasst.

Infolge dieser Anpassung kann der Einfluss des Klimawandels auf die Versagenswahrscheinlichkeit berechnet werden. In Tabelle 5 wird die Wahrscheinlichkeit auf Deichringebene für die einzelnen Versagensmechanismen dargestellt. Die Tabelle verdeutlicht, dass die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten im Jahr 2050 zunehmen. Dieser Anstieg wird dadurch verursacht, dass infolge des Klimawandels die Wahrscheinlichkeit hoher Abflüsse auf der Grundlage des gewählten Klimaszenarios KNMI '14 W_H zunimmt. Für beide Deichringe beträgt die Wahrscheinlichkeit einer Überflutung im Jahr 2050 circa 1/100 pro Jahr, wobei der weitaus größte Teil durch den Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping verursacht wird.

Tabelle 5 Versagenswahrscheinlichkeiten für die Zeithorizonte 2025 und 2050

	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 42			Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 48		
Zeithorizont	2025	2025	2050	2025	2025	2050
mit/ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel	ohne	mit	mit	ohne	mit	mit
Überströmung und Wellenüberschlag	1/2.200 bzw. 0.045%	1/16.000 bzw. 0.006%	1/3.700 bzw. 0.045%	1/1.500 bzw. 0.067%	1/9.600 bzw. 0.01%	1/2.700 bzw. 0.037%
Standsicherheit/ Makrostabilität	1/750.000 bzw. 0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	1/190.000 bzw. 0.0005%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	1/280 bzw. 0.357%	1/300 bzw. 0.333%	1/100 bzw. 1%	1/360 bzw. 0.278%	1/350 bzw. 0.286%	1/110 bzw. 0.909%
Beschädigung der Böschungs-befestigung und Erosion des Deichkörpers	1/290.000 bzw. 0.0003%	1/580.000 bzw. 0.0002%	1/300.000 bzw. 0.0003%	1/11.000 bzw. 0.009%	1/18.000 bzw. 0.006%	1/12.000 bzw. 0.008%
Überflutungs-wahrscheinlichkeit	1/280 bzw. 0.357%	1/300 bzw. 0.333%	1/100 bzw. 1%	1/340 bzw. 0.294%	1/340 bzw. 0.294%	1/110 bzw. 0.909%

4.5.2 Folgen

Bei der Ermittlung der Folgen im Jahr 2050 wurde das Wirtschaftswachstum berücksichtigt. Zu diesem Zweck wurde im gesamten Gebiet ein Wirtschaftswachstum von 2 % pro Jahr angesetzt, was zu einer Erhöhung des wirtschaftlichen Schadens im Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2015 um Faktor 2 führt.

In Bezug auf die potentielle Zahl der Opfer wurde das Bevölkerungswachstum nicht berücksichtigt, da dieser Aspekt im Projektgebiet schwer vorhersagbar ist. Auf das lokale individuelle Risiko hat ein mögliches Bevölkerungswachstum keinen Einfluss da es sich nicht nach der Einwohnerzahl richtet, sondern lediglich das Risiko aufzeigt, dem eine Person an einem bestimmten Ort im Deichring ausgesetzt ist.

4.5.3 Überflutungsrisiko

Die Überflutungsrisiken für das Jahr 2050 verzeichnen im Vergleich zum Jahr 2025 infolge der gestiegenen Überflutungswahrscheinlichkeit und der Berücksichtigung des Wirtschaftswachstums einen Zuwachs.

Wirtschaftliches Risiko

Der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens verzeichnet im Jahr 2050 einen Zuwachs im Vergleich zu der Situation 2025. Für die Situation im Zeitraum 2025 bis 2050 erhöht sich dieser Wert für Deichring 42 um Faktor 6 und für Deichring 48 um Faktor 7. In Deichring 42 verzeichnet der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens einen Zuwachs auf 80,2 Millionen Euro pro Jahr und in Deichring 48 auf 105,6 Millionen pro Jahr. Dieser Anstieg wird zum einen durch die größere Wahrscheinlichkeit einer Überflutung (Zunahmen um Faktor 3-3,5) und zum anderen durch die

Berücksichtigung eines Wirtschaftswachstums von 2 % pro Jahr (Zunahme um Faktor 2) verursacht.

In Abbildung 18 wird die räumliche Verteilung des wirtschaftlichen Risikos im Deichringgebiet für den Zeithorizont 2050 dargestellt. Wie aufgrund der oben stehenden Ergebnisse erwartet, erhöht sich der Erwartungswert des wirtschaftlichen Risikos im Jahr 2050 infolge des Klimawandels und des Wirtschaftswachstums.

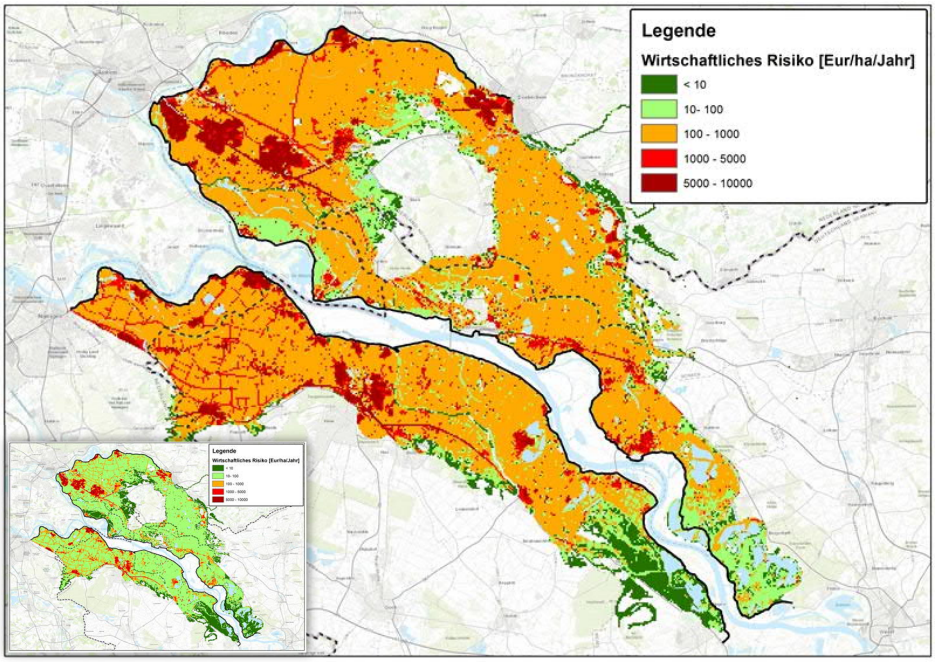


Abbildung 18 Wirtschaftliches Risiko 2050 mit verkleinertem Kartenausschnitt des Zeithorizonts 2025 (mit Überflutungen stromaufwärts von Wesel)

Opferrisiko

Der Erwartungswert der Zahl der Opfer pro Jahr erhöht sich für den Zeithorizont 2050 ebenfalls. Da kein Bevölkerungswachstum berücksichtigt wurde, ist diese Zunahme auf die Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit zurückzuführen.

Der jährliche Erwartungswert der Zahl der Opfer für Deichring 42 und 48 betrug im Jahr 2025 weniger als 1 Opfer pro Jahr. Dieser Wert erhöht sich bis zum Jahr 2050 auf ungefähr 1 Opfer pro Jahr.

Das lokale individuelle Risiko im Jahr 2050 verzeichnet eine erhebliche Zunahme gegenüber der Situation 2025 (Abbildung 19). In weiten Teilen beider Deichringe ist das lokale individuelle Risiko größer als 1/100.000 pro Jahr.

Im Jahr 2050 haben der gesamte niederländische Teil des Deichrings 42, sowie ein großer Teil des deutschen Gebiets in diesem Deichring, ein lokales individuelles Risiko von mehr als 1/100.000 pro Jahr. In Deichring 48 ist das lokale individuelle Risiko insbesondere im niederländischen Teil des Deichrings größer als 1/100.000 pro Jahr.

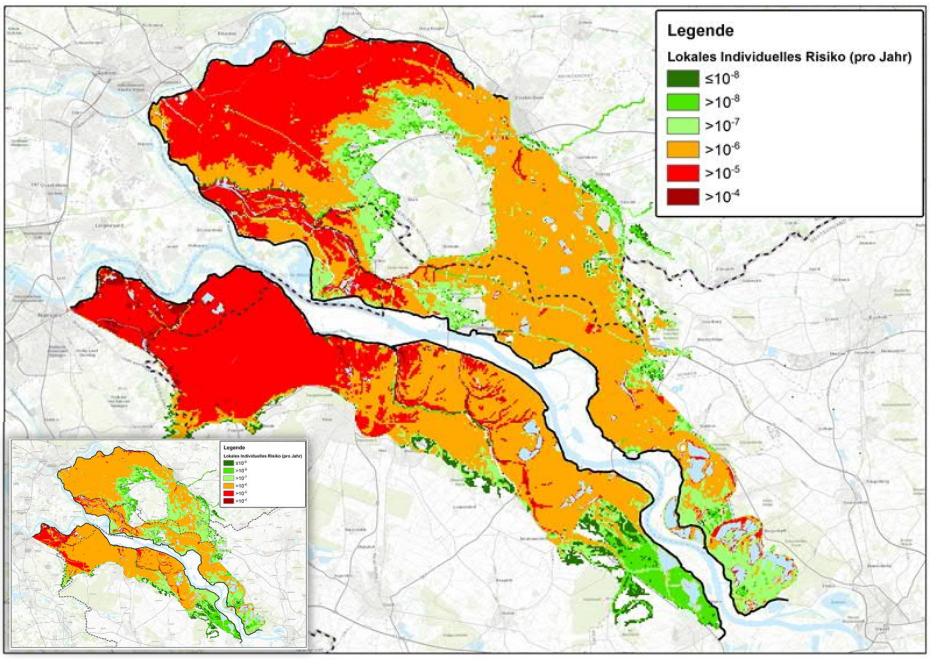


Abbildung 19 Lokales individuelles Risiko 2050 mit verkleinertem Kartenausschnitt des Zeithorizonts 2025 (mit Überflutungen stromaufwärts von Wesel)

4.6 Übersicht der Entwicklung des Überflutungsrisikos

In den vorangehenden Kapiteln wurde die Entwicklung der Versagenswahrscheinlichkeit und des Überflutungsrisikos dargestellt. Dieses Kapitel enthält eine Übersicht über die einzelnen Schritte und die dazu gehörenden Ergebnisse.

Es lassen sich folgende Schritte unterscheiden:

0. Ausgangspunkt: Überflutungsrisiko 2015
1. Überflutungsrisiko 2025 nach Abschluss der Deichertüchtigung NRW
2. Überflutungsrisiko 2025 nach Abschluss der Deichertüchtigung NRW und Berücksichtigung von Überflutungen im Rheineinzugsgebiet stromaufwärts von Wesel
3. Überflutungsrisiko 2050 nach Abschluss der Deichertüchtigung NRW, Berücksichtigung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel und Berücksichtigung des Klimawandels.

In Tabelle 6 und Tabelle 7 wird die Entwicklung der Versagenswahrscheinlichkeit in Deichring 42 und 48 in Bezug auf die einzelnen Schritte dargestellt.

Tabelle 6 Übersicht Entwicklung der Überflutungs-wahrscheinlichkeit von Deichring 42

Übersicht DR 42	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 42			
Zeithorizont	2015	2025	2025	2050
Deichertüchtigung NRW ja/nein	nein	ja	ja	ja
mit/ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel	ohne	ohne	mit	mit
Überströmung und Wellenüberschlag	1/660 bzw. 0.151%	1/2.200 bzw. 0.045%	1/16.000 bzw. 0.006%	1/3.700 bzw. 0.027%
Standsicherheit/ Makrostabilität	1/300.000 bzw. 0.0003%	1/750.000 bzw. 0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	1/120 bzw. 0.833%	1/280 bzw. 0.357%	1/300 bzw. 0.333%	1/100 bzw. 1%
Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers	1/210.000 bzw. 0.0005%	1/290.000 bzw. 0.0003%	1/580.000 bzw. 0.0002%	1/300.000 bzw. 0.0003%
Überflutungswahr-scheinlichkeit über alle vier Versagensmechanismen	1/120 bzw. 0.833%	1/280 bzw. 0.357%	1/300 bzw. 0.333%	1/100 bzw. 1%

Tabelle 7 Übersicht Entwicklung der Überflutungs-wahrscheinlichkeit von Deichring 48

Übersicht DR 48	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 48			
Zeithorizont	2015	2025	2025	2050
Deichertüchtigung NRW ja/nein	nein	ja	ja	ja
mit/ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel	ohne	ohne	mit	mit
Überströmung und Wellenüberschlag	1/580 bzw. 0.172%	1/1.500 bzw. 0.067%	1/9.600 bzw. 0.01%	1/2.700 bzw. 0.037%
Standsicherheit/ Makrostabilität	1/10.000 bzw. 0.01%	1/190.000 bzw. 0.0005%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	>1/100 bzw. >1%	1/360 bzw. 0.278%	1/350 bzw. 0.286%	1/110 bzw. 0.909%
Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers	1/7.600 bzw. 0.013%	1/11.000 bzw. 0.009%	1/18.000 bzw. 0.006%	1/12.000 bzw. 0.008%
Überflutungswahr-scheinlichkeit über alle vier Versagensmechanismen	>1/100 bzw. >1%	1/340 bzw. 0.294%	1/340 bzw. 0.294%	1/110 bzw. 0.909%

In Schritt 1 (Differenz 2015 – 2025) führt die Fertigstellung der noch geplanten Deichertüchtigungsmaßnahmen in Nordrhein-Westfalen bei allen Versagensmechanismen zu einer geringeren Versagenswahrscheinlichkeit. In Deichring 42 verringert sich die Überflutungswahrscheinlichkeit um Faktor 2,5 und in Deichring 48 um Faktor 4.

Die Berücksichtigung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel (Schritt 2) hat einen erheblichen positiven Effekt auf alle Versagensmechanismen, mit Ausnahme des Mechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass in Bezug auf den Hydraulischen Grundbruch und Piping auch niedrigere Wasserstände für die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit wichtig sind. Da Überflutungen am Oberlauf eine begrenzte Wirkung auf diese niedrigeren Wasserstände haben, wird die Versagenswahrscheinlichkeit für diesen Versagensmechanismus nicht oder

kaum beeinflusst. Weil der Hydraulische Grundbruch und Piping der dominante Versagensmechanismus ist, tritt auch keine erhebliche Veränderung der Überflutungswahrscheinlichkeit für den gesamten Deichring auf.

Durch den Klimawandel (Schritt 3) nehmen die Wahrscheinlichkeit von Extremabflüssen und damit auch die Überflutungswahrscheinlichkeit zu. Auf der Grundlage des „nassen" Klimaszenarios KNMI'14 W_H erhöht sich die Überflutungswahrscheinlichkeit für beide Deichringe um Faktor 3.

Beim Überflutungsrisiko wird zwischen dem wirtschaftlichen Risiko und dem Opferrisiko unterschieden. Das jeweilige Risiko wird als jährlicher Erwartungswert für das gesamte Gebiet ausgedrückt und als räumliche Darstellung des Risikos präsentiert. In Tabelle 8 werden die Entwicklungen des jährlichen Erwartungswerts des wirtschaftlichen Risikos und des Opferrisikos dargestellt.

Tabelle 8 Übersicht Entwicklung des jährlichen Erwartungswerts des Risikos

Risiko	Erwartungswert (pro Jahr) Deichring 42				Erwartungswert (pro Jahr) Deichring 48			
Zeithorizont	2015	2025	2025	2050	2015	2025	2025	2050
Deichertüchtigung NRW ja/nein	nein	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
mit/ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel	ohne	ohne	mit	mit	ohne	ohne	mit	mit
Wirtschaftliches Risiko	23	14,2	13,2	80,2	78	17,5	17,2	105,6
Opferrisiko	<1	<1	<1	~1	1-2	<1	<1	~1

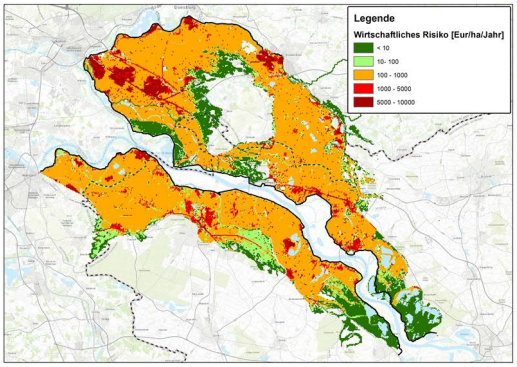
Hier ist deutlich erkennbar, dass die Deichertüchtigungsmaßnahmen in NRW (Schritt 1: Differenz 2015 - 2025) einen positiven Effekt auf die jährlichen Erwartungswerte des Überflutungsrisikos haben. Die Berücksichtigung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel (Schritt 2: Differenz 2025 ohne – mit Überflutungen stromaufwärts von Wesel) wirkt sich wie erwartet nur begrenzt auf das Risiko aus, weil auch fast keine Wirkung auf die Überflutungswahrscheinlichkeit vorliegt. Bedingt durch den Klimawandel (Schritt 3: Differenz 2025 - 2050) steigen die Risiken wieder an. Dieser Umstand ist in Bezug auf das wirtschaftliche Risiko zum einen auf die Zunahme der Überflutungswahrscheinlichkeit und zum anderen auf die Zunahme des wirtschaftlichen Schadens infolge des angenommenen jährlichen Wirtschaftswachstums von 2 % zurückzuführen.

In Abbildung 20 wird die räumliche Verteilung des wirtschaftlichen Risikos und des lokalen individuellen Risikos dargestellt. Die oben stehende Erläuterung zu der Entwicklung des jährlichen Erwartungswerts des Risikos gilt ebenfalls für diese räumliche Darstellung.

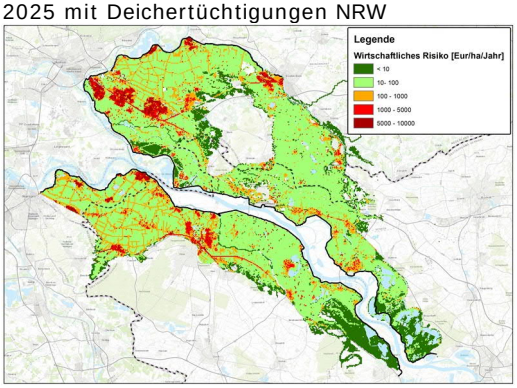
Abbildung 20
Übersicht
Entwicklung des
wirtschaftlichen
Risikos

Wirtschaftliches Risiko

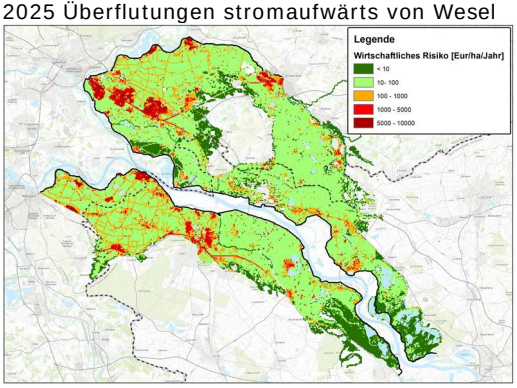
2015



2025 mit Deichertüchtigungen NRW



2025 Überflutungen stromaufwärts von Wesel



2050 mit Klimawandel

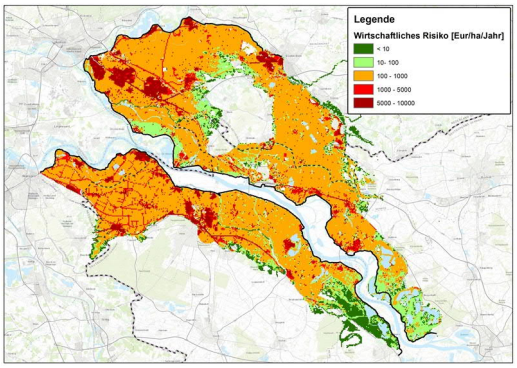
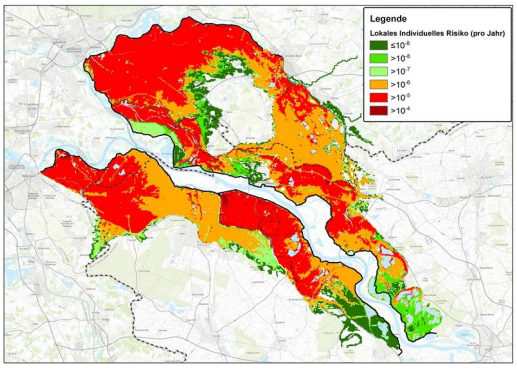


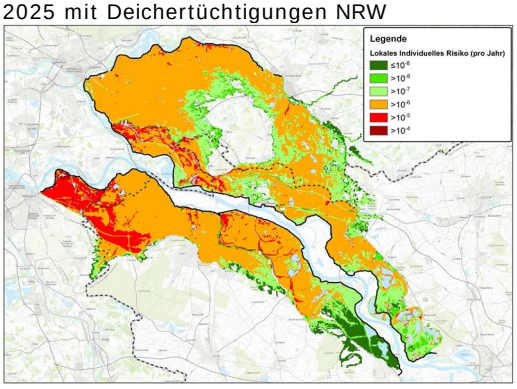
Abbildung 21
Übersicht
Entwicklung des
lokalen individuellen
Risikos

Lokales individuelles Risiko

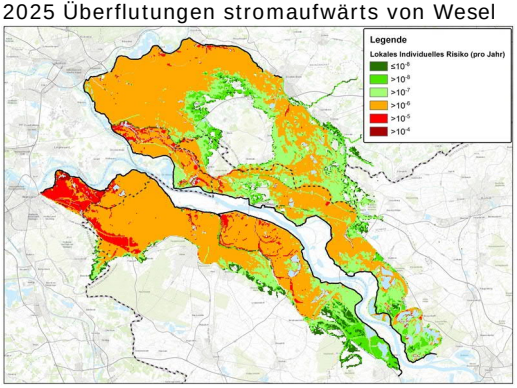
2015



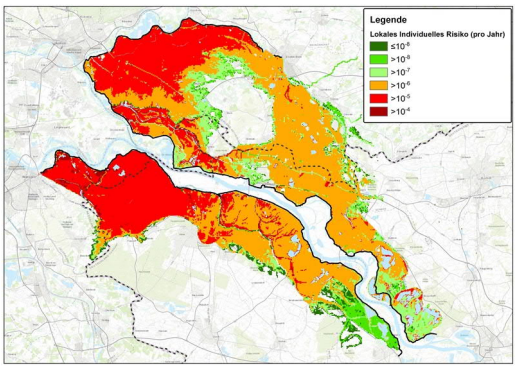
2025 mit Deichertüchtigungen NRW



2025 Überflutungen stromaufwärts von Wesel



2050 mit Klimawandel



5 Sensitivitätsanalyse in Bezug auf das Überflutungsrisiko

In diesem Kapitel wird anhand von Sensitivitätsanalysen untersucht, inwiefern der Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping sowie Annahmen bezüglich der Evakuierung die Berechnung des Überflutungsrisikos beeinflussen. Darüber hinaus wird ebenfalls der Einfluss von Maßnahmen wie Kammerungen und Gewässerausbau geprüft.

5.1 Einfluss von Hydraulischem Grundbruch und Piping

Der Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping hat den größten Anteil an den Überflutungswahrscheinlichkeiten. Dieser Umstand wird nicht zuletzt durch die Unsicherheit bezüglich der Kenntnisse über den Untergrund in der Nähe der Deiche infolge mangelnder Datenverfügbarkeit verursacht, weshalb bei der Schematisierung dieses Versagensmechanismus konservative Annahmen zugrunde gelegt wurden. Darüber hinaus gibt es auch Unterschiede in der fachlichen Bewertung grundbaulicher Vorgänge, ob bzw. in wie weit z.B. das Auftreten von Hydraulischem Grundbruch und Piping zu einem möglichen Deichbruch führen kann – und auch dazu, wie dies modelltechnisch plausibel abzubilden ist.

In dieser Sensitivitätsanalyse wird die Veränderung der Ergebnisse bezüglich der Überflutungswahrscheinlichkeit und des Überflutungsrisiko dadurch untersucht, dass der Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping vollständig unberücksichtigt bleibt.

Ausgangspunkt für diese Analyse ist die Situation der Hochwasserschutzanlagen im Jahr 2025 ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel und unter Berücksichtigung der Wasserstand absenkenden Wirkung der Maßnahme Lohrwardt. Die Überflutungswahrscheinlichkeiten wurden für beide Deichringe erneut berechnet. Tabelle 9 enthält die Ergebnisse. Die Überflutungswahrscheinlichkeit von Deichring 42 verringert sich ohne den Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping um etwa Faktor 8 (von 1/280 auf 1/2.200 pro Jahr) und für Deichring 48 um Faktor 4 (von 1/340 auf 1/1.400 pro Jahr).

Tabelle 9 Berechnete Versagenswahrscheinlichkeiten je Versagensmechanismus und Überflutungswahrscheinlichkeit des Deichrings mit und ohne Hydraulischen Grundbruch und Piping (Zeithorizont 2025)

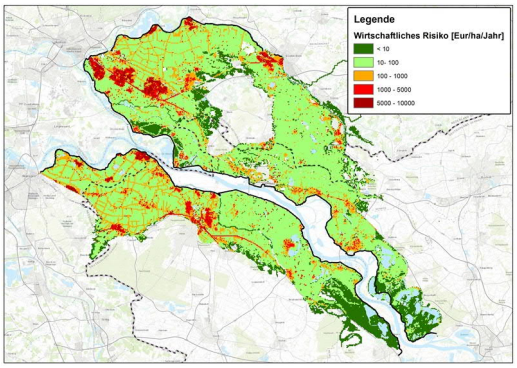
Zeithorizont 2025	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 42		Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 48	
Mit/ohne Piping	mit	ohne	mit	ohne
Überströmung und Wellenüberschlag	1/2.200 bzw. 0.045%	1/2.200 bzw. 0.045%	1/1.500 bzw. 0.067%	1/1.500 bzw. 0.067%
Standsicherheit/ Makrostabilität	1/750.000 bzw. 0.0001%	1/750.000 bzw. 0.0001%	1/190.000 bzw. 0.0005%	1/190.000 bzw. 0.0005%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	1/280 bzw. 0.357%	-	1/360 bzw. 0.278%	-
Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers	1/290.000 bzw. 0.0003%	1/290.000 bzw. 0.0003%	1/11.000 bzw. 0.009%	1/11.000 bzw. 0.009%
Überflutungswahrscheinlichkeit über alle vier Versagensmechanismen	1/280 bzw. 0.357%	1/2.200 bzw. 0.045%	1/340 bzw. 0.294%	1/1.400 bzw. 0.071%

Wenn der Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping nicht berücksichtigt wird, verringert sich der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens für Deichring 42 um Faktor 10 von 14,2 Millionen Euro pro Jahr auf 1,4 Millionen Euro pro Jahr. Für Deichring 48 beträgt der Rückgang um Faktor 2, und zwar von 17,5 Millionen Euro pro Jahr auf 8,2 Millionen Euro pro Jahr. Die Reduzierung des Risikos ist bei Deichring 42 größer als bei Deichring 48, was darauf zurückzuführen ist, dass zum einen der Rückgang der Überflutungswahrscheinlichkeit größer ist und dass zum anderen die Verringerung in Bezug auf die Wahrscheinlichkeiten insbesondere an jenen Stellen auftritt, an denen auch die Folgen größer sind.

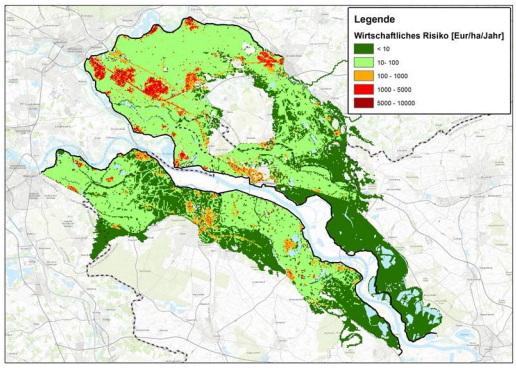
Abbildung 22 zeigt die räumliche Darstellung des wirtschaftlichen Risikos für die Situationen mit und ohne Hydraulischen Grundbruch und Piping. Der Abbildung ist ebenfalls zu entnehmen, dass sich das Risiko insbesondere in Deichring 42 verringert.

Abbildung 22 Wirtschaftliches Risiko 2025 mit und ohne Hydraulischen Grundbruch und Piping

Wirtschaftliches Risiko 2025



Mit Hydraulischem Grundbruch und Piping



Ohne Hydraulischen Grundbruch und Piping

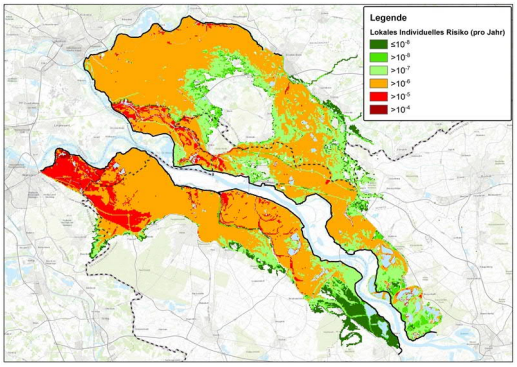
Das Opferrisiko verzeichnet ebenfalls einen Rückgang, wenn Piping nicht berücksichtigt wird. In Deichring 42 verringert sich der Erwartungswert der

Zahl der Opfer ebenso wie beim wirtschaftlichen Risiko um etwa Faktor 10 und in Deichring 48 beträgt dieser Rückgang Faktor 2.

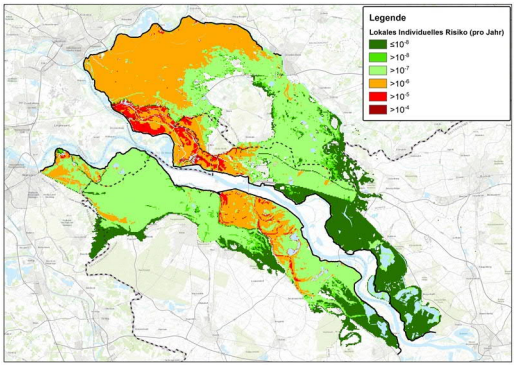
In Abbildung 23 wird das lokale individuelle Risiko dargestellt. Der Abbildung ist ebenfalls zu entnehmen, dass sich das Risiko insbesondere in Deichring 42 verringert.

Abbildung 23
Lokales individuelles Risiko 2025 mit und ohne Hydraulischen Grundbruch und Piping

Lokales individuelles Risiko 2025



Mit Hydraulischem Grundbruch und Piping



Ohne Hydraulischen Grundbruch und Piping

5.2 Einfluss des Evakuierungsanteils

In Bezug auf die Präventivevakuierung der Bevölkerung vor einem Deichbruch herrschen in den Niederlanden und Deutschland unterschiedliche Auffassungen. Während in den Niederlanden mit unterschiedlichen Szenarien gearbeitet wird, bei denen bis zu 90 % der Einwohner evakuiert werden können, geht man in Deutschland davon aus, dass alle Einwohner rechtzeitig in Sicherheit gebracht werden können (100%ige Evakuierung). In Kapitel 4 wurde das Überflutungsrisiko auf der Grundlage der niederländischen Evakuierungsszenarien ermittelt, und zwar mit einem durchschnittlichen Evakuierungsanteil von 76 %. In dieser Sensitivitätsanalyse wurde die Wirkung einer 100%igen Evakuierung auf das Überflutungsrisiko untersucht.

Da sich das lokale individuelle Risiko und das Opferrisiko auch nach der Wahrscheinlichkeit richten, dass Einwohner im Gebiet zurückbleiben, reduzieren sich diese Risikomaße bei Annahme einer 100%igen Evakuierung auf 0.

Der Evakuierungsanteil wirkt sich nicht auf das wirtschaftliche Risiko aus.

5.3 Einfluss Wasserstand absenkender Maßnahmen

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten wurden in den Niederlanden und Deutschland zahlreiche Deichrückverlegungen, Vorlandvertiefungen und Retentionsflächen realisiert, die auf eine Absenkung des Scheitelwasserstands im Rhein und damit auf eine Verringerung der Überflutungswahrscheinlichkeit abzielen. In den Niederlanden wurde das Programm „Ruimte voor de Rivier" (Raum für den Fluss) durchgeführt.

In Deutschland wurden verschiedene Retentionsflächen angelegt und es wurden an einigen Stellen Deiche zurückverlegt, um dem Fluss mehr Raum zu geben. In dieser Sensitivitätsanalyse wird untersucht, inwiefern zusätzliche Wasserstand absenkende Maßnahmen das Überflutungsrisiko verringern können. Dabei wird eine Reduzierung des Überflutungsrisikos bei einer pauschalen Absenkung des Wasserstands um 0,1 m oder 0,2 m betrachtet.

Da es sich dabei um mögliche künftige Maßnahmen handelt, wird diese Analyse für den Zeithorizont 2050 vorgenommen, und zwar unter Berücksichtigung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel und einer Klimaänderung auf der Grundlage des niederländischen Klimaszenarios KNMI'14 W_H.

In Tabelle 10 wird der Einfluss Wasserstand absenkender Maßnahmen auf die Versagenswahrscheinlichkeiten und die Überflutungswahrscheinlichkeit dargestellt. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass der Versagensmechanismus Überströmung und Wellenüberschlag relativ gesehen eine größere Veränderung aufweist als der Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass die Versagenswahrscheinlichkeit in Bezug auf den Mechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping in hohem Maße durch die Unsicherheit in Bezug auf die Eigenschaften des Deichs und weniger durch andere Parameter wie etwa die Wasserspiegelhöhe im Fluss beeinflusst wird. Darüber hinaus spielen beim Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping auch niedrigere Wasserstände eine wichtige Rolle. Bei dem Versagensmechanismus Überströmung und Wellenüberschlag herrscht zudem weniger Unsicherheit in Bezug auf die relevanten Parameter (Höhe der Deichkrone), weshalb sich ein Rückgang des Wasserstands unmittelbarer auf eine Reduzierung der Versagenswahrscheinlichkeit auswirkt.

Tabelle 10 Berechnete Versagenswahrscheinlichkeiten (Zeithorizont 2050) für die Referenzsituation und die Situation mit einer zusätzlichen Wasserstandsabsenkung von 0,1 m und 0,2 m

	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 42		
Zeithorizont	2050	2050	2050
mit/ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel	mit	mit	mit
Wasserstandsabsenkung	-	-0,1 m	-0,2 m
Überströmung und Wellenüberschlag	1/3.700 bzw. 0.027%	1/4.600 bzw. 0.022%	1/5.800 bzw. 0.017%
Standsicherheit/ Makrostabilität	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	1/100 bzw. 1 %	1/110 bzw. 0.909%	1/140 bzw. 0.714%
Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers	1/300.000 bzw. 0.0003%	1/330.000 bzw. 0.0003%	1/360.000 bzw. 0.0003%
Überflutungswahrscheinlichkeit über alle vier Versagensmechanismen	1/100 bzw. 1%	1/110 bzw. 0.909%	1/140 bzw. 0.714%

	Versagenswahrscheinlichkeit (pro Jahr) Deichring 48		
Zeithorizont	2050	2050	2050
mit/ohne Überflutungen stromaufwärts von Wesel	mit	mit	mit
Wasserstandsabsenkung	-	-0,1 m	-0,2 m
Überströmung und Wellenüberschlag	1/2.700 bzw. 0.037%	1/3.500 bzw. 0.029%	1/4.300 bzw. 0.023%
Standsicherheit/ Makrostabilität	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%	<1/1.000.000 bzw. <0.0001%
Hydraulischer Grundbruch und Piping	1/110 bzw. 0.909%	1/140 bzw. 0.714%	1/180 bzw. 0.556%
Beschädigung der Böschungsbefestigung und Erosion des Deichkörpers	1/12.000 bzw. 0.008%	1/13.000 bzw. 0.008%	1/14.000 bzw. 0.007%
Überflutungswahrschein-lichkeit über alle vier Versagensmechanismen	1/110 bzw. 0.909%	1/140 bzw. 0.714%	1/180 bzw. 0.556%

Aufgrund der geringfügigen Veränderung der Überflutungswahrscheinlichkeit verzeichnet das Überflutungsrisiko ebenfalls nur einen begrenzten Rückgang. Das Risikobild ändert sich im Vergleich zum Risikobild für den Zeithorizont 2050 kaum.

5.4 Einfluss von Kammerungen

Der Bau von Kammerungsdeichen ist eine Maßnahme im Deichhinterland, die die Folgen einer Überflutung (und damit das Überflutungsrisiko) beeinflusst. Ein Kammerungsdeich unterteilt einen Deichring in mehrere Teilgebiete. Im Gegensatz zu einer Deicherhöhung ändern sich infolge der Kammerung also nicht die Überflutungswahrscheinlichkeit, sondern der potentielle Schaden und die Anzahl der möglichen Opfer infolge einer Überflutung.

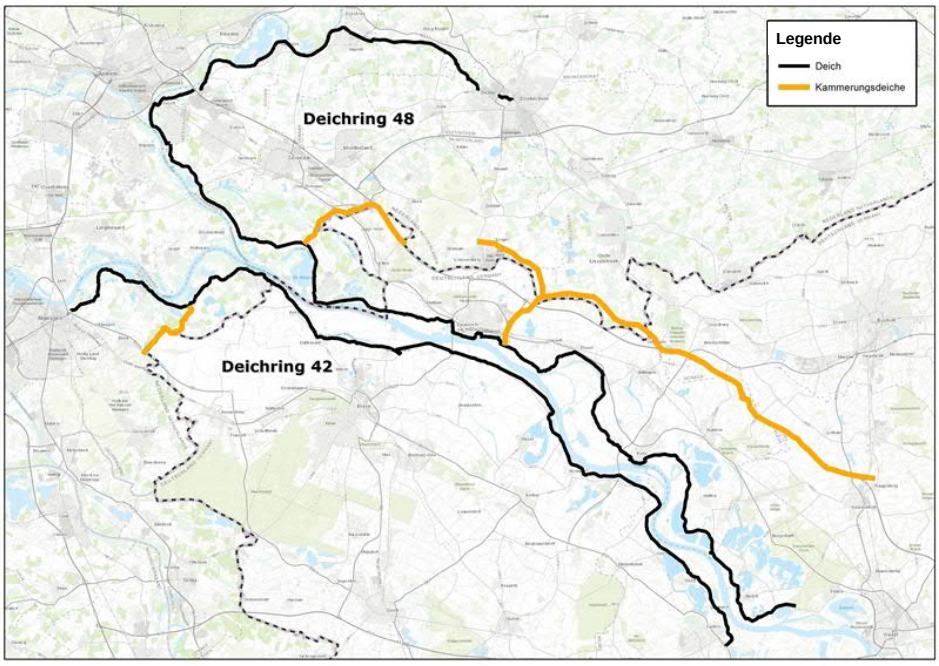
Da es sich dabei um eine mögliche künftige Maßnahme handelt, wird diese Analyse für den Zeithorizont 2050 vorgenommen, und zwar unter Berücksichtigung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel und einer Klimaänderung auf Grundlage des niederländischen Klimaszenarios KNMI'14 W_H.

In der Risikostudie aus dem Jahr 2009 [1] wurden verschiedene Varianten von Kammerungsdeichen in Deichring 42 und 48 untersucht. Dabei wurden bestehende Strukturen identifiziert, die sich für eine Kammerung eignen.

Bei einer dieser Strukturen in Deichring 48 handelt es sich um einen vollständig neu zu errichtenden Deich der von nördlich von Hamminkeln kommend parallel zur deutsch-niederländischen Grenze nach Lengel verlaufend östlich von Emmerich an den Banndeich anschließt. Ergänzt wird dieser Deich westlich vom Elten Berg durch den bereits bestehenden alten Deich am Oude Rijn im Rijnstrangen-Gebiet. Eine andere Struktur betrifft den

alten Querdamm / Kapitteldijk in Deichring 42. In Abbildung 24 werden die beiden Kammerungsdeiche dargestellt.

Abbildung 24
Lage der untersuchten Kammerungsdeiche



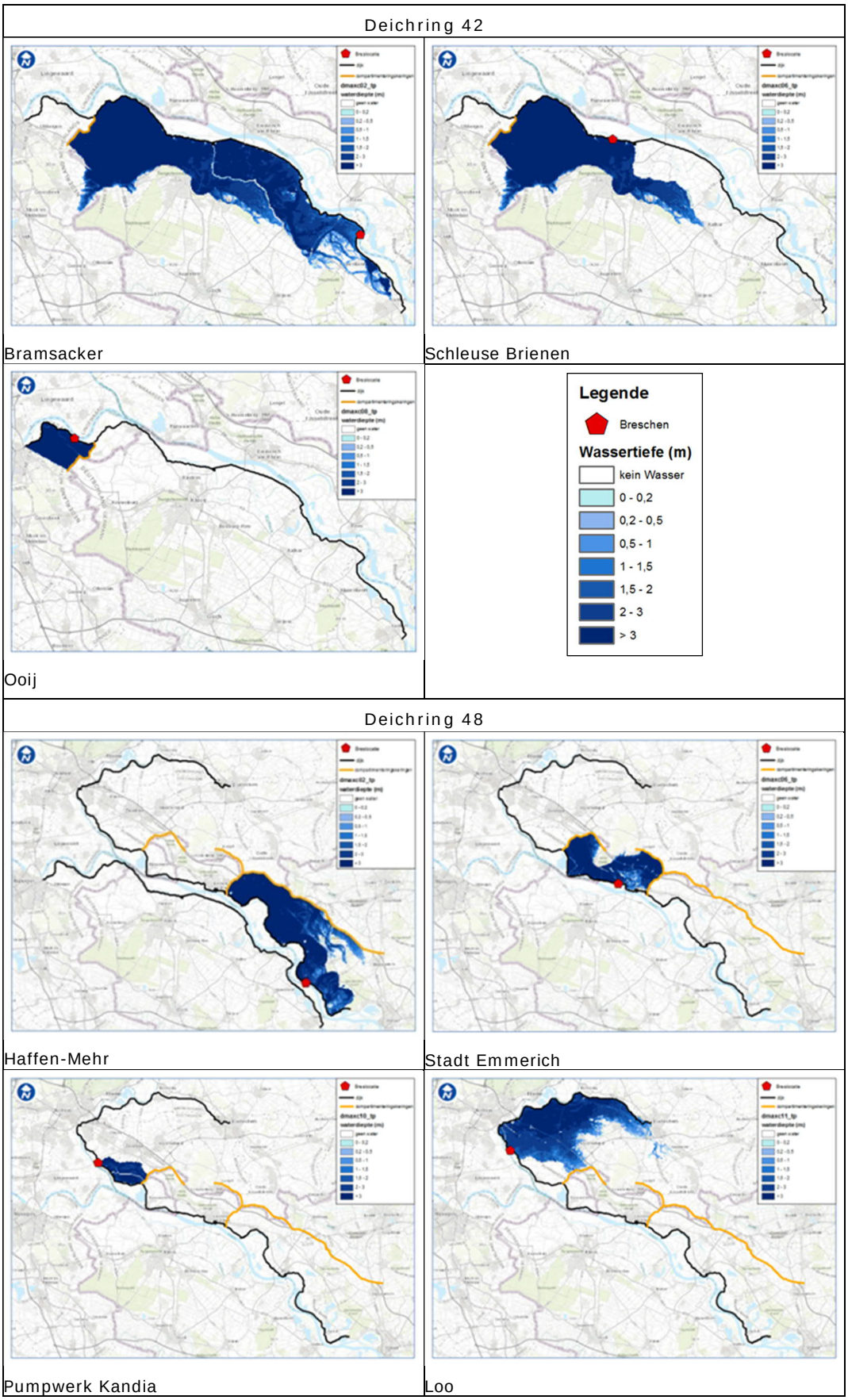
Durch Kammerung verändern sich die Überflutungsmuster der einzelnen Überflutungsszenarien. In Abbildung 25 werden beispielhaft die Überflutungsmuster von drei unterschiedlichen Breschen in Deichring 42 und 4 Breschen in Deichring 48 dargestellt. In der Darstellung ist der Einfluss der Kammerungsdeiche auf das überflutete Gebiet deutlich erkennbar. Informationen über die anderen untersuchten Breschen finden sich in den Berichten von RoyalhaskoningDHV über die beiden Deichringe [15][16].

5.4.1 Wirkung der Kammerungen auf das wirtschaftliche Risiko und das Opferrisiko

Ein Kammerungsdeich wirkt sich auf das Überflutungsmuster und damit auf das wirtschaftliche Risiko und das Opferrisiko aus. Auf der Grundlage der Überflutungsberechnungen mit Kammerung und niederländischen Schadensfunktionen wurden je Überflutungsszenario der wirtschaftliche Schaden und die Zahl der potentiellen Opfer erneut berechnet.

Für Deichring 42 hat die gewählte Kammerung eine sehr begrenzte Wirkung auf die Überflutungen aus dem deutschen Teil des Deichrings. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Großteil des Schadens in Deutschland entsteht und dass die Kammerung eine Überflutung in den Niederlanden verhindert. Außerdem trägt der niederländische Teil lediglich in geringem Maße zum Gesamtschaden bei. Allerdings führt die Kammerung lokal zu größeren Wassertiefen und Anstiegsgeschwindigkeiten.

Abbildung 25
Maximale Wassertiefen für die Situationen mit Kammerung



Für die Annahme von Breschen im niederländischen Teil von Deichring 42 verringert sich der Schaden allerdings erheblich, da der deutsche Teil von den Niederlanden aus nicht mehr überflutet wird. Je nach Ort des Deichüberströmens wirkt die Kammerung also unterschiedlich.

Die Situation für Deichring 48 stellt sich anders da. Hier verringert sich der Schaden durch Überflutungen aus dem deutschen Teil des Deichrings erheblich. Die gewählte Kammerung verhindert, dass der niederländische Teil des Deichrings überflutet wird, wo auch der Großteil des Schadens entstand. Für die Breschen in den Niederlanden stromabwärts vom Pumpwerk Kandia hat die Kammerung keinen Einfluss mehr, da die Überflutung aus den Breschen nicht so weit reicht und sich ebenso wie in der Situation ohne Kammerungsdeiche auf den niederländischen Teil des Deichrings beschränkt.

5.4.2 Überflutungsrisiko bei Kammerung

In Tabelle 11 wird das berechnete wirtschaftliche Risiko und das Opferrisiko für beide Deichringe für den Zeithorizont 2050 mit und ohne Kammerungsdeiche dargestellt. Für Deichring 42 verringert sich das wirtschaftliche Risiko für den gesamten Deichring um durchschnittlich etwa 20 %. Für Deichring 48 ist der Rückgang des wirtschaftlichen Risikos größer, es hat sich durch die Kammerung halbiert.

Das Opferrisiko für Deichring 42 verringert sich für den gesamten Deichring im Durchschnitt nicht, da die Kammerung lokal zu größeren Wassertiefen und Anstiegsgeschwindigkeiten führt, die sich ungünstig auf das Opferrisiko auswirken. Bei Deichring 48 lässt sich allerdings ein Rückgang feststellen: dort hat sich das Opferrisiko für den gesamten Deichring im Durchschnitt in etwa halbiert.

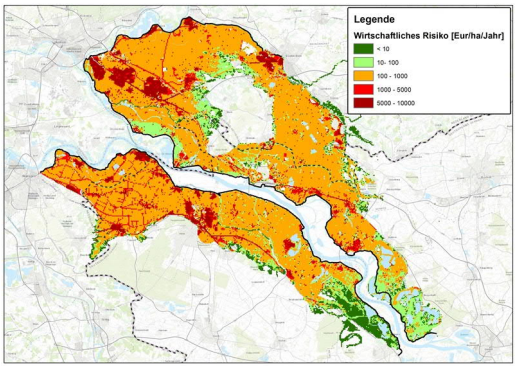
Tabelle 11 Wirtschaftliches Risiko und Opferrisiko 2050 mit und ohne Kammerungen

	Deichring 42		Deichring 48	
Kammerung	Nein	Ja	Nein	Ja
Wirtschaftliches Risiko (Millionen Euro pro Jahr)	80,2	62,8	105,6	49,3
Opferrisiko (Opfer pro Jahr)	<1	<1	~1	<1

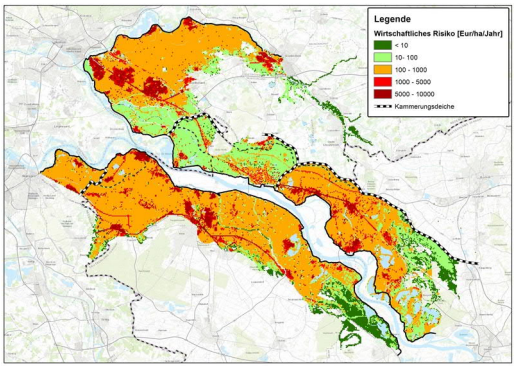
Das Risiko wird in Abbildung 26 räumlich dargestellt. Dort wird ersichtlich, dass das wirtschaftliche Risiko für Deichring 42 etwas abnimmt und dass sich das lokale individuelle Risiko kaum ändert.
Bei Deichring 48 lässt sich ein noch deutlicherer Unterschied feststellen: Sowohl beim wirtschaftlichen Risiko als auch beim lokalen individuellen Risiko treten erhebliche Veränderungen auf. Auffällig in Bezug auf das wirtschaftliche Risiko und das lokale individuelle Risiko ist der Umstand, dass sich das Risiko in Deichring 48 stromaufwärts vom Kammerungsdeich, d.h. im deutschen Teil des Deichrings, wegen der Aufstaueffekte durch den Kammerungsdeich erheblich erhöht und dass sich das Risiko im niederländischen Teil des Deichrings verringert.

Abbildung 26
Überflutungsrisiko 2050 für Situation mit und ohne Kammerungen

Wirtschaftliches Risiko 2050

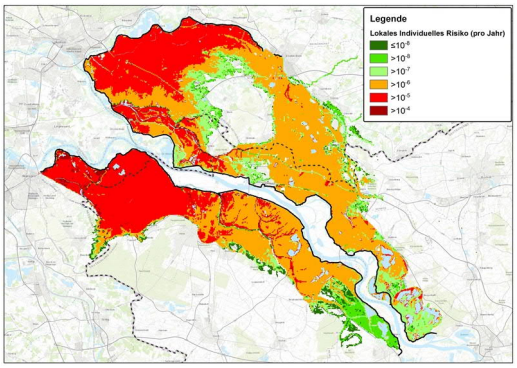


Ohne Kammerung

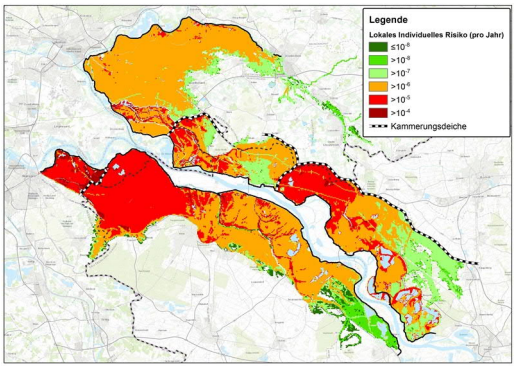


Mit Kammerung

Lokales individuelles Risiko 2050



Ohne Kammerung



Mit Kammerung

6 Angestrebter Hochwasserschutzgrad nach niederländischer Methodik

6.1 Einleitung

Im Jahr 2017 wurden im niederländischen Waterwet [38] neue gesetzliche Normen für die primären Hochwasserschutzanlagen verankert. Diese Normen wurden auf der Grundlage des Überflutungsrisikos in den Deichringgebieten ermittelt und basieren auf einer Reihe von Anforderungen, die zu einem tragbaren Überflutungsrisiko führen müssen, unabhängig davon, wo man sich in den von Hochwasserschutzanlagen geschützten Gebieten in den Niederlanden befindet. Diese Gebietsanforderungen werden in der vorliegenden Studie als „Schutzgrade" bezeichnet. Diese Schutzgrade werden als akzeptables Überflutungsrisiko unter Berücksichtigung unterschiedlicher Risiken definiert [9]:

> Hinweis:
>
> Der niederländische Begriff "Norm", wie er hier im Zusammenhang mit Hochwasserschutz verwendet wird, beschreibt in den Niederlanden den Maßstab, der an Deiche angelegt wird um das zu akzeptierende Hochwasserrisiko zu erreichen.
>
> Dieser Begriff steht somit in keiner Verbindung mit der deutschen Verwendung von „Norm", z.B. im Sinne einer technischen Regel (DIN-Norm o.ä.)

1. Basis ist die Grundsicherheit: Jedem Individuum wird eine Grundsicherheit gewährleistet, für die gilt, dass das „lokale individuelle Risiko" (LIR), infolge einer Überflutung potentielles Opfer zu werden, höchstens 1:100.000 pro Jahr betragen darf.
2. Ergänzend wird ein größerer Schutz für die räumlichen Bereiche gefordert, in denen
   a. eine hohe Zahl von Geschädigten (inklusive möglicher Opfer) auftreten könnten (Gruppenrisiko) und/oder
   b. ein großer wirtschaftlicher Schaden entstehen kann (wirtschaftliches Risiko) und/oder
   c. weitreichende Schäden durch Ausfall vitaler und schadensanfälliger Infrastruktur von nationaler Bedeutung auftreten können.

In Bezug auf das Gruppenrisiko wurde für die Niederlande eine Reihe von Hotspots identifiziert, an denen diese Anforderung gilt; dies ist bei den grenzüberschreitenden Deichringen jedoch nicht der Fall. Eine vitale und schadensanfällige Infrastruktur im Sinne von Unterabsatz (c) befindet sich nicht in den grenzüberschreitenden Deichringen.

Der wirtschaftlich optimale Schutzgrad im Sinne von Unterabsatz (b) wird anhand einer gesamtgesellschaftlichen Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)

ermittelt. Der wirtschaftlich optimale Schutzgrad richtet sich nach dem wirtschaftlichen Schaden infolge einer Überflutung und den Kosten zur Verringerung der Überflutungswahrscheinlichkeit.

Im niederländischen Waterwet werden jedoch keine Schutzgrade vorgegeben, sondern sogenannte Normen für die Hochwasserschutzanlagen. Aus diesem Grund wurde im Deltaprogramm Veiligheid (Hochwasserschutz) eine Methodik zur Ermittlung von Normen für die Hochwasserschutzanlagen anhand der erforderlichen Schutzgrade entwickelt.
Diese Normen sind als Überflutungswahrscheinlichkeitsnorm definiert. Diese neue Überflutungswahrscheinlichkeitsnorm soll bis zum Jahr 2050 in den Niederlanden erfüllt werden.

Bei der Ermittlung der Norm für die niederländischen Deiche im Rahmen des Deltaprogramms wurden für die grenzüberschreitenden Deichringe 42 und 48 die deutschen Teile der Deichringgebiete seinerzeit nicht berücksichtigt. Anders als seinerzeit beim Deltaprogramm werden in der nun vorliegenden Studie für beide Deichringe auch grenzüberschreitend Deichbrüche und deren (grenzüberschreitenden) Folgen berücksichtigt, um für die Niederlande das Maß des anzustrebenden Hochwasserschutzes zu bestimmen (mit anderen Worten: Was wäre die Norm, wenn Sie die Folgen grenzüberschreitender Deichbrüche mit einbeziehen würden?). Darüber hinaus wurden auch für die deutschen Deichabschnitte in den Deichringen 42 und 48 die niederländische Methode zur Ermittlung des Hochwasserschutzgrades gemäß Deltaprogramm angewandt.

6.2 Ausgangspunkte

Zeithorizont
Die Bestimmungen zum Hochwasserschutz in den Niederlanden zielt darauf ab, die im Jahr 2017 im Waterwet verankerten Anforderungen im Jahr 2050 zu erfüllen. Deswegen wird für den Zeithorizont 2050 das wirtschaftliche Wachstum in den Berechnungen des wirtschaftlichen Schadens mit einem Faktor mitberücksichtigt.

Evakuierung
Bei der Bestimmung der Norm wurde der Evakuierungsanteil berücksichtigt. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass der Evakuierungsanteil für die Bestimmung des Schutzgrades von den Evakuierungsanteilen abweicht, die bei der Ermittlung des Überflutungsrisikos in Kapitel 4 dieses Berichts verwendet wurden. Dies entspricht der Abweichung zwischen der VNK2-Studie und dem Deltaprogramm [39]:

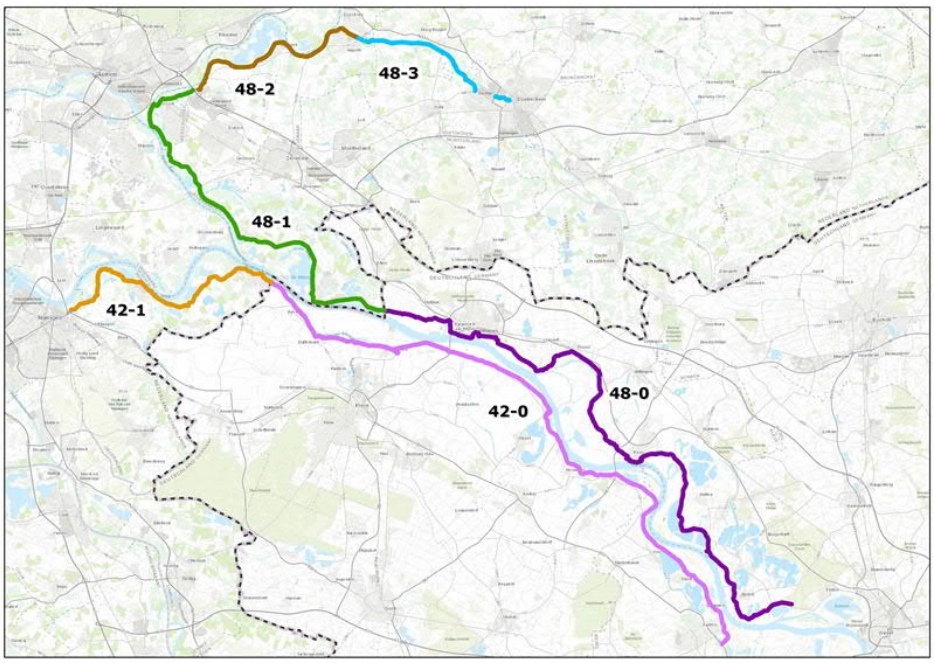
- In der VNK2-Studie beruht der Evakuierungsanteil im Bovenrivieren-Gebiet (nicht durch Gezeiten beeinflusste Flussabschnitte) auf 4 verschiedenen Evakuierungsszenarien mit unterschiedlichen Evakuierungsanteilen und bedingten Wahrscheinlichkeiten. Daraus ergibt sich für das Bovenrivieren-Gebiet ein durchschnittlicher Evakuierungsanteil von 76 %.

- Im Deltaprogramm, das sich nur auf die Niederländischen Teile beider Deichringe bezieht, hat man sich bei der Festlegung der Normen, die zu dem angestrebten Schutzgrad gehören, für eine konservative Untergrenze des Evakuierungsanteils von 56 % entschieden, damit die erforderliche Grundsicherheit besser gewährleistet werden kann. Es wurden keine unterschiedlichen Evakuierungsszenarien berücksichtigt.
- Im Rahmen der Studie wurde bei der Bestimmung der Norm sowohl für den deutschen als auch den niederländischen Teil der Deichringe ein Evakuierungsanteil von 56 % berücksichtigt. In einer Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, inwiefern die Wahl eines anderen Evakuierungsanteils zu anderen Normen führt. Dabei wird ebenfalls die Wirkung eines Evakuierungsanteils von 100 % untersucht. In Nordrhein-Westfalen wird nämlich davon ausgegangen, dass bei einer Überflutung des Deichrings vollständig evakuiert wird.

Normstrecken

Im Deltaprogramm wurden anstelle der bis dahin geläufigen Deichringe Normstrecken eingeführt. Bei der Entwicklung der Streckeneinteilung wurden unter anderem Unterschiede bezüglich der Gefährdung und hinsichtlich des Umfangs der Folgen und des überfluteten Gebiets berücksichtigt. Große Unterschiede in Bezug auf die Folgen zwischen zwei benachbarten Deichringabschnitten bzw. Normstrecken begründen die Unterscheidung einer neuen Normstrecke. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Unterteilung in Strecken besteht darin, dass die Länge von Strecken nicht zu sehr voneinander abweichen sollte.

Abbildung 27 Normstrecken der Deichringe 42 und 48



In den Niederlanden sind die Normstrecken circa 20 bis 30 km lang. Für jede Normstrecke wird eine eigene Norm abgeleitet, die zu dem angestrebten Schutzgrad passt. Auf der Grundlage der oben genannten Kriterien wurde für die deutschen Abschnitte von Deichring 42 und 48 jeweils eine einzige

Normstrecke definiert, siehe Abbildung 27. Für die niederländischen Abschnitte beider Deichringe wurde die Einteilung in Normstrecken aus dem Deltaprogramm übernommen, und zwar mit einer Normstrecke in Deichring 42 und drei Normstrecken in Deichring 48.

6.3 Methodik

Die Grundlage für die Ermittlung der Normen zur Erreichung des angestrebten Schutzgrads bildet die Methodik des niederländischen Deltaprogramms. Die in diesem Bericht beschriebenen Schritte stammen aus [9] und den dazu gehörenden Anlagen. Für den deutschen Teil des Deichrings müssen jedoch noch einige zusätzliche praktische Entscheidungen getroffen werden, die im Anschluss erläutert werden.

Für die grenzüberschreitenden Deichringe werden die neuen Normen auf der Grundlage von zwei unterschiedlichen Anforderungen in Bezug auf den Schutzgrad ermittelt: Grundsicherheit (lokales individuelles Risiko [LIR]) und ökonomische Zweckmäßigkeit (gesamtgesellschaftliche KNA-Anforderung).

Für jede dieser Anforderungen wird eine Norm für die Normstrecke ermittelt. Die strengste dieser beiden Normen je Normstrecke bestimmt die neue Norm bzw. den angestrebten Schutzgrad. Es zählt also die strengste Norm auf der Grundlage der LIR-Anforderung oder der gesamtgesellschaftlichen KNA-Anforderung.

Darüber hinaus werden ein sogenannter Signalwert und ein sogenannter Untergrenzwert ermittelt:

- Die Signalnorm dient dazu, die Ertüchtigungsaufgabe rechtzeitig zu erkennen; sie muss dem Unterhaltungspflichtigen genügend Zeit verschaffen, eine Deichertüchtigung durchzuführen, damit die Überschreitung der Untergrenzennorm verhindert wird.
- Die Untergrenzennorm gibt die höchstzulässige Überflutungswahrscheinlichkeit an, die eine Hochwasserschutzanlage in jedem Fall erfüllen muss.

Bezüglich der Grundsicherheit wird ein LIR-Wert von 1/200.000 pro Jahr zur Ermittlung der Signalnorm verwendet und ein LIR-Wert von 1/100.000 pro Jahr für die Untergrenzennorm, wobei die Grundsicherheit (LIR) die Wahrscheinlichkeit darstellt, dass eine Person, die sich ständig an einem bestimmten Ort im Deichring aufhält, infolge einer Überflutung ums Leben kommt. Bei der Ermittlung der Grundsicherheit werden die Möglichkeiten einer Präventivevakuierung berücksichtigt.

Bei der wirtschaftlichen Zweckmäßigkeit wird mit Hilfe der gesamtgesellschaftlichen Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) das optimale Verhältnis zwischen den Kosten einer Deichertüchtigung und der Verringerung des wirtschaftlichen Risikos gesucht. Diese Vorgehensweise wurde für die Niederlande im Rahmen des Deltaprogramms entwickelt. Für

die sogenannte gesamtgesellschaftliche KNA-Anforderung wird nur die Signalnorm berechnet. Die Untergrenzennorm für die gesamtgesellschaftliche KNA ist nach der Methode des Deltaprogramms grundsätzlich eine Normklasse niedriger als die Signalnorm.

6.4 Ergebnis zur Ermittlung der Norm gemäß niederländischer Vorgehensweise für die gesamten Deichringe

Anforderung auf der Grundlage der Grundsicherheit (LIR-Anforderung)
Je Normstrecke wurde jeweils eine Norm für den Signalwert (LIR < 1/200.000 pro Jahr) und für die höchstzulässige Wahrscheinlichkeit (LIR < 1/100.00 pro Jahr), auch Untergrenze genannt, abgeleitet.
In Tabelle 12 werden die abgeleiteten Normen (Normklasse) für die grenzüberschreitenden Deichringe 42 und 48 dargestellt.

Tabelle 12 Anforderungen Grundsicherheit (einschließlich Deutschland)

Normstrecke	Signalwert	Untergrenze
42-0	1/10.000	1/10.000[4]
42-1	1/10.000	1/10.000[1]
48-0	1/10.000	1/3.000
48-1	1/30.000	1/10.000
48-2	1/3.000	1/1.000
48-3	1/1.000	1/300

In Tabelle 13 werden die Normen (Normklasse) gemäß der Berechnung für die niederländischen Deiche von Deichring 42 und 48 im Deltaprogramm dargestellt, und zwar ohne Berücksichtigung von Überflutungen aus und Folgen in Deutschland.

Tabelle 13 Anforderungen Grundsicherheit (ohne Deutschland)

Normstrecke	Signalwert	Untergrenze
42-0	n. z.	
42-1	1/10.000	1/3.000
48-0	n. z.	
48-1	1/30.000	1/10.000
48-2	1/1.000	1/300
48-3	1/3.000	1/1.000

Für Normstrecke 42-1 ist die Signalnorm gleich geblieben, lediglich die Untergrenze ist durch Berücksichtigung von Überflutungen aus Deutschland um eine Normklasse strenger geworden.

[4] Der Signalwert ist um einen Faktor 2 strenger als der Untergrenzwert. Da zwischen den Normklassen ein Faktor 3 liegt, gibt es eine Reihe von Normstrecken, in denen der Untergrenzwert und der Signalwert in dieselbe Normklasse fallen. Das war auch im Deltaprogramm der Fall und wurde entsprechend im niederländischen Waterwet verankert.

In Deichring 48 ist die Norm für Normstrecke 48-1 gleich geblieben. Normstrecke 48-2 ist sowohl in Bezug auf den Signalwert als auch auf die Untergrenze um eine Normklasse strenger geworden. Normstrecke 48-3 ist in dieser Analyse um eine Normklasse weniger streng geworden. Im Deltaprogramm wurden hohe Mortalitäten für Gemarkungen berechnet, die nicht überflutet werden. Dadurch wird im Deltaprogramm (unbegründet) eine zu hohe Grundsicherheitsnorm für Normstrecke 48-3 berechnet. In der vorliegenden Analyse wurde diese Annahme korrigiert und wurden diese Gemarkungen nicht berücksichtigt (weitere Hintergrundinformationen dazu finden sich im Bericht von RoyalhaskoningDHV über Deichring 48 [16]).

Anforderung auf der Grundlage des wirtschaftlichen Risikos (gesamtgesellschaftliche KNA-Anforderung)

Die Anforderung für die gesamtgesellschaftliche KNA-Analyse richtet sich überwiegend nach den wirtschaftlichen Folgen einer Überflutung.
In Tabelle 14 werden die berechneten Normen auf Grundlage der gesamtgesellschaftlichen KNA-Methodik für die einzelnen Normstrecken in den grenzüberschreitenden Deichringen dargestellt. Wie bereits erwähnt, wurde die Berechnung nur für die Signalnorm durchgeführt. Die Untergrenze ist grundsätzlich eine Normklasse niedriger und beruht somit nicht auf einer Berechnung.

Tabelle 14 Anforderungen gesamtgesellschaftliche KNA (einschl. Deutschland)

Normstrecke	Signalwert	Untergrenze
42-0	1/3.000	1/1.000
42-1	1/10.000	1/3.000
48-0	1/10.000	1/3.000
48-1	1/30.000	1/10.000
48-2	1/10.000	1/3.000
48-3	1/10.000	1/3.000

In Tabelle 15 werden die Normen gemäß der Berechnung im Deltaprogramm auf der Grundlage der gesamtgesellschaftlichen KNA-Anforderung dargestellt, und zwar ohne Berücksichtigung von Überflutungen aus und Schaden in den Deichringen in Deutschland.

Tabelle 15 Anforderungen gesamtgesellschaftliche KNA (ohne Deutschland)

Normstrecke	Signalwert	Untergrenze
42-0	n. z.	
42-1	1/3.000	1/1.000
48-0	n. z.	
48-1	1/10.000	1/3.000
48-2	1/10.000	1/3.000
48-3	1/10.000	1/3.000

Die Normstrecke 42-1 erhält im Vergleich zum niederländischen Deltaprogramm eine höhere Normklasse in der deutsch-niederländischen Analyse. Diese Tatsache lässt sich damit erklären, dass Deichbrüche in den Niederlanden zu großen Schäden in Deutschland führen, weshalb eine höhere Schutznorm angesetzt wird.

In Deichring 48 führt die Berücksichtigung von Deutschland zu einer strengeren Norm für Normstrecke 48-1. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei einer Bresche in Strecke 48-1 jetzt auch der Schaden in Deutschland berücksichtigt wird. Für die anderen niederländischen Normstrecken tritt keine Veränderung der berechneten Normklasse im Vergleich zum Deltaprogramm auf.

Anforderung auf der Grundlage des Gesamtergebnisses
Zuvor wurden die Anforderungen in Bezug auf die Grundsicherheit (LIR) und die wirtschaftliche Zweckmäßigkeit (gesamtgesellschaftliche KNA) dargestellt. Im Deltaprogramm wurde festgelegt, dass die strengste dieser beiden Anforderungen als Norm für die jeweilige Normstrecke gilt. Diese Vorgehensweise wurde auch bei der grenzüberschreitenden Risikostudie für die Ableitung der Normen gewählt.

In Tabelle 16 werden die Ergebnisse unter Angabe des für die Höhe der Norm maßgeblichen Kriteriums dargestellt. Die Normen für den deutschen Teil der Deichringe sind mit den Normen für den niederländischen Teil vergleichbar.

Tabelle 16
Ergebnisse
Ermittlung der Norm
(einschließlich
Deutschland)

Normstrecke	Signalwert	Untergrenze	maßgeblich
42-0	1/10.000	1/10.000	Grundsicherheit
42-1	1/10.000	1/10.000	Grundsicherheit
48-0	1/10.000	1/3.000	Grundsicherheit/KNA
48-1	1/30.000	1/10.000	Grundsicherheit/KNA
48-2	1/10.000	1/3.000	KNA
48-3	1/10.000	1/3.000	KNA

In Tabelle 17 werden die im Rahmen des Deltaprogramms ermittelten Normen dargestellt. Im Vergleich zu den neu berechneten Normen ist lediglich die Untergrenze von Normstrecke 42-1 um eine Klasse strenger geworden.

Tabelle 17
Ergebnisse
Ermittlung der Norm
(ohne Deutschland)

Normstrecke	Signalwert	Untergrenze	maßgeblich
42-0	n. z.		
42-1	1/10.000	1/3.000	Grundsicherheit
48-0	n. z.		
48-1	1/30.000	1/10.000	Grundsicherheit
48-2	1/10.000	1/3.000	KNA
48-3	1/10.000	1/3.000	KNA

6.5 Sensitivitätsanalyse bezüglich der Ermittlung der Norm

In diesem Kapitel wird mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen die Wirkung einiger wichtiger Annahmen untersucht, die bei der Ermittlung der Normen zugrunde gelegt wurden. Dabei wurden folgende Parameter untersucht: Wirtschaftswachstum, Evakuierung und Schadensfunktionen.

6.5.1 Wirtschaftswachstum

Das Wirtschaftswachstum ist ein wichtiger Parameter zur Ermittlung der gesamtgesellschaftlichen KNA-Anforderung und ein Maß für das wirtschaftliche Wachstum, mit dem der aktuelle potentielle Schaden für das Jahr 2015 berechnet und auf den möglichen Schaden im Jahr 2050 übertragen werden kann. Im niederländischen Deltaprogramm und in dieser Studie wurde ein Wirtschaftswachstum von 1,9 % verwendet. In dieser Sensitivitätsanalyse wird auch der Einfluss eines Wirtschaftswachstums von 0,5 % und 4,0 % untersucht.

In Tabelle 18 wird der Einfluss des Wirtschaftswachstums auf den Signalwert dargestellt. Die Anwendung eines anderen Wirtschaftswachstums führt nicht in jedem Fall zur Einteilung in eine andere Normklasse.
Für Normstrecke 42-0 führt die Anwendung eines Wirtschaftswachstums von 4 % zu einer höheren Normklasse des Signalwerts. Die LIR-Anforderung für diese Normstrecke bleibt weiterhin maßgeblich. Dies hat folglich keinen Einfluss auf die Gesamtnorm. Für Normstrecke 42-1 führt die Anwendung eines Wirtschaftswachstums von 0,5 % zu einer Einteilung in eine niedrigere Normklasse für den Signalwert. Die Anwendung eines Wirtschaftswachstums von 4 % führt zur Einteilung in dieselbe Normklasse für den Signalwert wie bei Anwendung eines Wirtschaftswachstums von 1,9 %.

Im Fall von Normstrecke 48-0 und 48-2 führt die Anwendung eines Wirtschaftswachstums von 4 % zu einer höheren Klassenzuordnung des Signalwerts. Für diese Strecken war die gesamtgesellschaftliche KNA-Anforderung bereits maßgeblich. Das höhere Wirtschaftswachstum beeinflusst somit die Streckennorm. Bei allen Normstrecken von Deichring 48 führt die Anwendung eines Wirtschaftswachstums von 0,5 % zu einer Zuordnung des Signalwerts in eine niedrigere Normklasse.

Tabelle 18 Signalwert gesamtgesellschaftliche KNA für unterschiedliche Größen des Wirtschaftswachstums

Norm-strecke	Gesamtgesellschaftlicher KNA-Signalwert bei Wirtschaftswachstum 0,5 %	Gesamtgesellschaftlicher KNA-Signalwert bei Wirtschaftswachstum 1,9 %	Gesamtgesellschaftlicher KNA-Signalwert bei Wirtschaftswachstum 4,0 %
42-0	1/3.000	1/3.000	1/10.000
42-1	1/3.000	1/10.000	1/10.000
48-0	1/3.000	1/10.000	1/30.000
48-1	1/10.000	1/30.000	1/30.000
48-2	1/3.000	1/10.000	1/30.000
48-3	1/3.000	1/10.000	1/10.000

6.5.2 Evakuierung

Der Evakuierungsanteil ist ein wichtiger Parameter zur Ermittlung der Anforderung aus der Grundlage der Grundsicherheit (LIR). Das LIR richtet sich nämlich nach dem Evakuierungsanteil, der Mortalität und der Wahrscheinlichkeit einer Überflutung. Im Deltaprogramm wurde für die Deichringe entlang der Flüsse ein Evakuierungsanteil von 56 % angesetzt. In Deutschland wird jedoch davon ausgegangen, dass eine vollständige Evakuierung stattfinden kann, bevor eine Überflutung auftritt. In einem solchen Fall beträgt das Risiko, infolge einer Überflutung ums Leben zu kommen, gleich null. Aus diesem Grund wird eine Sensitivitätsanalyse zum Evakuierungsanteil durchgeführt.

Falls für den gesamten Deichring ein Evakuierungsanteil von 100 % angesetzt wird, gilt keine Anforderung auf der Grundlage der Grundsicherheit und ist für alle Normstrecken die gesamtgesellschaftliche KNA-Anforderung maßgeblich. In Tabelle 19 werden die unterschiedlichen Schutzgrade bei 100%iger Evakuierung im gesamten Deichringgebiet denen bei 56%iger Evakuierung im gesamten Deichring gegenübergestellt.

Tabelle 19 Schutzgrade bei unterschiedlichen Evakuierungsgraden im Deichringgebiet

Norm-strecke	Signalwert	Untergrenze	Signalwert	Untergrenze
	56%ige Evakuierung im gesamten Deichringgebiet		100%ige Evakuierung im gesamten Deichringgebiet	
42-0	1/10.000	1/10.000	1/3.000	1/1.000
42-1	1/10.000	1/10.000	1/10.000	1/3.000
48-0	1/10.000	1/3.000	1/10.000	1/3.000
48-1	1/30.000	1/10.000	1/30.000	1/10.000
48-2	1/10.000	1/3.000	1/10.000	1/3.000
48-3	1/10.000	1/3.000	1/10.000	1/3.000

Für Deichring 42 führt eine 100-prozentige Evakuierung im gesamten Deichringgebiet für Normstrecke 42-0 zu einer Verringerung des Signalwertes und des Untergrenzwertes um eine beziehungsweise zwei Normklassen. Für Normstrecke 42-1 wird nur der Untergrenzwert um eine Normklasse niedriger eingestuft.

Für Deichring 48 führt eine 100-prozentige Evakuierung im gesamten Deichringgebiet nicht zu einer anderen Normklasse für die Normstrecken. Das gilt sowohl für die Signalwerte als auch für die Untergrenzwerte. Das ist darauf zurückzuführen, dass für Deichring 48 die gesamtgesellschaftliche KNA-Anforderung maßgebend ist oder in die gleiche Normklasse fällt wie die LIR-Anforderung (Tabelle 16).

6.5.3 Schadensfunktionen

Bei der Berechnung der Norm wurden die niederländischen Schadensfunktionen verwendet, die ebenfalls in der VNK-Analyse und bei der Ermittlung der Norm für die niederländischen Normstrecken im Rahmen des Deltaprogramms genutzt wurden. In der grenzüberschreitenden Risikostudie

von 2009 [1] wurden teilweise neue deutsch-niederländische Schadensfunktionen abgeleitet. In dieser Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welchen Einfluss die Verwendung der deutsch-niederländischen Schadensfunktionen auf die berechneten Normen für den grenzüberschreitende Deichringe hat.

Im Allgemeinen ist der wirtschaftliche Schaden bei Anwendung der deutsch-niederländischen Schadensfunktionen circa 15 % niedriger. Das führt zu einem geringeren wirtschaftlichen Risiko und wirkt sich auf die gesamtgesellschaftliche KNA-Anforderung aus. Die Auswirkung beschränkt sich auf die Normstrecke 48-1. Diese Strecke fällt aufgrund des geringeren wirtschaftlichen Schadens knapp in eine niedrigere Normklasse.
Die Gesamtnorm für die Normstrecke 48-1 ändert sich jedoch nicht, da das LIR für diese Normstrecke maßgeblich ist. In Tabelle 20 werden die Ergebnisse für die gesamtgesellschaftliche KNA dargestellt.

Tabelle 20 Signalwert gesamtgesellschaftliche KNA für zwei unterschiedliche Sätze an Schadensfunktionen

Norm-strecke	Gesamtgesellschaftlicher KNA-Signalwert niederländische Schadensfunktionen	Gesamtgesellschaftlicher KNA-Signalwert deutsch-niederländische Schadensfunktionen
42-0	1/3.000	1/3.000
42-1	1/10.000	1/10.000
48-0	1/10.000	1/10.000
48-1	1/30.000	1/10.000
48-2	1/10.000	1/10.000
48-3	1/10.000	1/10.000

6.6 Wirkungsabschätzung „theoretisch perfekter” Deiche zur Erfüllung der niederländischen Norm

In Kapitel 6.4 wurden die Normen für den gesamten Deichring auf der Grundlage der Methode aus dem niederländischen Deltaprogramm abgeleitet. In Kapitel 4 wurden die Überflutungswahrscheinlichkeiten der Deiche für den Zeithorizont 2025 ermittelt. Ein Vergleich dieser Ergebnisse ergibt, dass die Überflutungswahrscheinlichkeiten der Situation im Jahr 2025 größer sind als die berechneten angestrebten Überflutungswahrscheinlichkeiten, die sich aus den niederländischen Normen ableiten. In diesem Kapitel wird die Frage erörtert, ob durch die Annahme theoretisch perfekter Deiche ein rechnerische Erfüllung der Norm möglich ist und welchen Effekt dies auf das wirtschaftliche Risiko und das Opferrisiko hat.

In einem iterativen Prozess wird sowohl auf der deutschen als auch auf der niederländischen Seite des Deichrings schrittweise für den jeweils schwächsten Deichabschnitt die Versagenswahrscheinlichkeit für alle Versagensmechanismen und damit auch insgesamt mit null angesetzt. In dem Modell PC-Ring wird dadurch modelltechnisch von einer „theoretisch perfekten” Deichsanierung ausgegangen. Für jede Normstrecke wird diese Iteration so lange durchgeführt bis die gewünschte Normklasse erreicht ist.

6.6.1 Auswirkungen „theoretisch perfekter” Deichabschnitte in den gesamten Deichringen

Unter Zugrundelegung der abgeleiteten Normen aus Kapitel 6.4 und des oben beschriebenen iterativen Prozesses kann festgestellt werden, für welche Deichabschnitte ein „theoretisch perfekter” Deich angenommen werden muss, damit die einzelnen Normklassen erfüllt werden. Für Deichring 42 bedeutet das, dass für 28,5 Kilometer (von 61,8 km) angenommen werden muss, dass der Deich „theoretisch perfekt” ist.

Für Deichring 48 ist diese Annahme bei 49,1 Kilometer (von 99,9 km) Deich notwendig. In Abbildung 28 werden die entsprechenden Deichabschnitte in rot dargestellt.

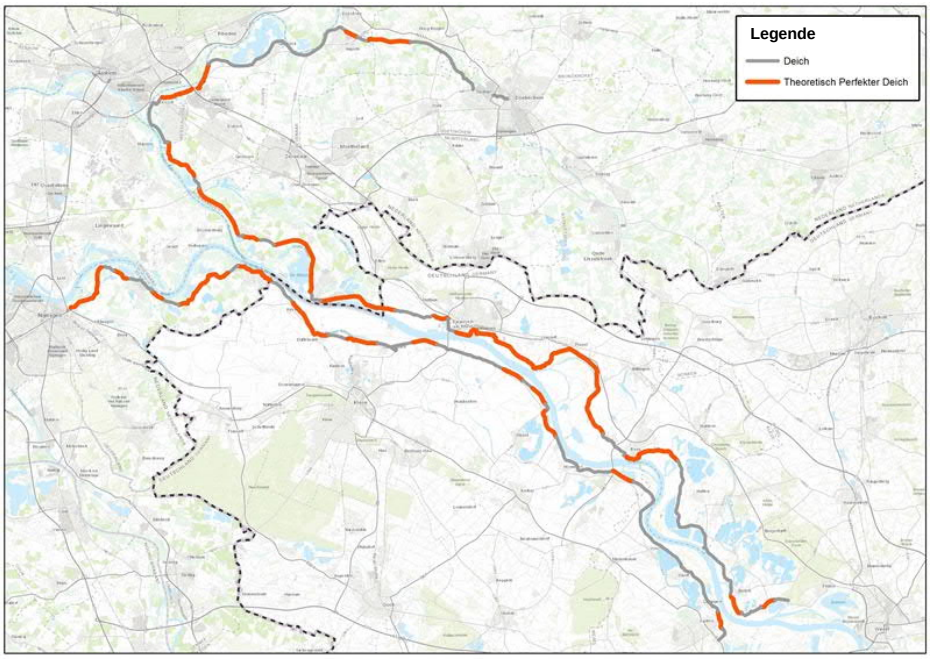


Abbildung 28 Deichabschnitte, für die ein „theoretisch perfekter” Deich angenommen werden müsste, um die Überflutungswahrscheinlichkeit auf die berechnete Norm senken zu können

Das Überflutungsrisiko wurde ebenfalls für die Situation berechnet, dass alle erforderlichen Deichabschnitte ein „theoretisch perfekter” Deich sind. Der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens und der Opferzahl wird in Tabelle 21 dargestellt. In beiden Deichringen lässt sich ein starker Rückgang des Risikos feststellen, in Deichring 42 um Faktor 100 und in Deichring 48 um Faktor 60.

Tabelle 21 Überflutungsrisiko 2050 für die Situation ohne und mit „theoretisch perfekten” Deichabschnitten zur Erreichung der angestrebten Norm

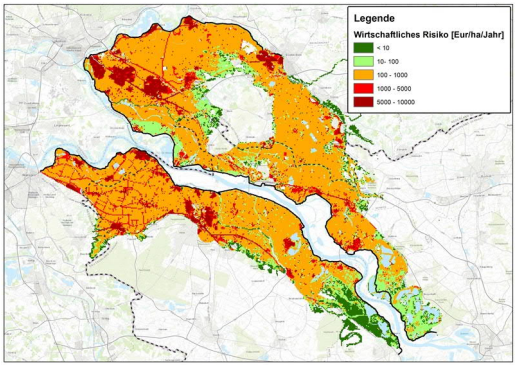
	Deichring 42		Deichring 48	
Theoretisch perfekte Deichabschnitte im gesamten Deichring	Nein	Ja	Nein	Ja
Wirtschaftliches Risiko (Millionen Euro pro Jahr)	80,2	0,7	105,6	1,8
Opferrisiko (Opfer pro Jahr)	<1	<<1	~1	<<1

Bei der räumlichen Verteilung des Risikos lässt sich ebenfalls ein starker Rückgang feststellen. In Abbildung 29 werden die Unterschiede zwischen der

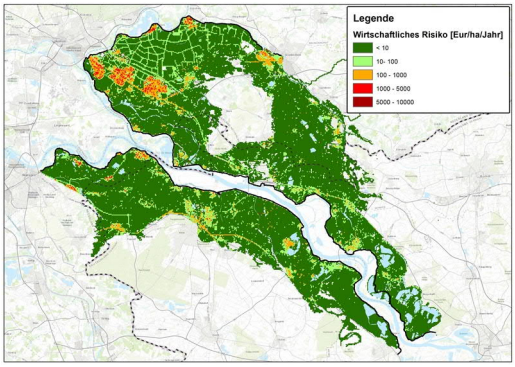
Situation 2050 ohne und 2050 mit theoretisch perfekten Deichabschnitten dargestellt. Der Rückgang der Überflutungswahrscheinlichkeit um Faktor 60 und 100 ist der Grund für diese große Abnahme des Risikos.

Abbildung 29 Übersicht Überflutungsrisiko 2050 für die Situation ohne und mit „theoretisch perfekten" Deichabschnitten im gesamten Deichring zur Erreichung der angestrebten Norm

Wirtschaftliches Risiko 2050

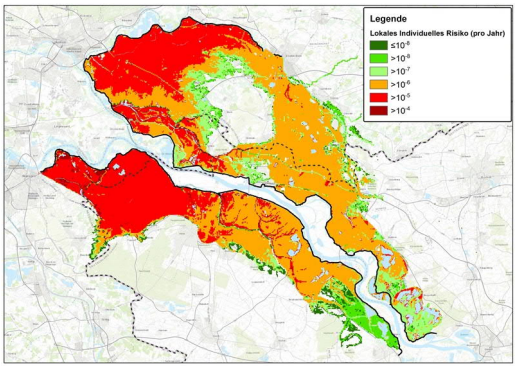


Situation 2050 (Referenz)

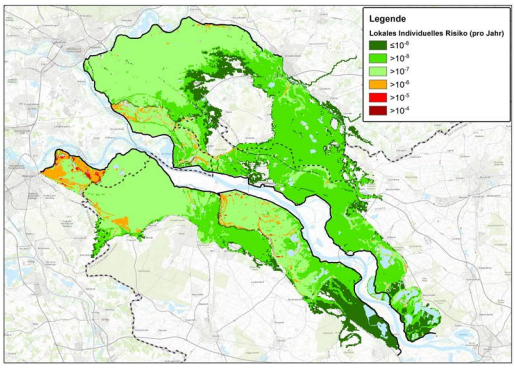


Situation 2050 mit „theoretisch perfekten" Deichabschnitten im gesamten Deichring

Lokales individuelles Risiko 2050



Situation 2050 (Referenz)



Situation 2050 mit „theoretisch perfekten" Deichabschnitten im gesamten Deichring

6.6.2 Auswirkungen „theoretisch perfekter" Deichabschnitte nur in den Niederlanden

Das niederländische Waterwet [38] enthält die Bestimmung, dass der angestrebte Schutzgrad im Jahr 2050 erreicht werden muss. Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang lautet, ob diese gesetzliche Vorgabe erreicht werden kann, wenn nur in den Niederlanden Deichertüchtigungsmaßnahmen durchgeführt werden. Anders ausgedrückt: Ist es möglich, den gesetzlich verankerten Schutzgrad im niederländischen Teil der Deichringe ausschließlich mit Deichertüchtigungsmaßnahmen in den Niederlanden zu erreichen?

Zur Beantwortung dieser Frage wird für alle niederländischen Deichabschnitte angenommen, dass sie „theoretisch perfekt" sind, indem die Versagenswahrscheinlichkeit dieser Deichabschnitte im Modell PC-Ring mit null angesetzt wird. Die niederländischen Deiche werden auf diese Weise maximal ertüchtigt und das Überflutungsrestrisiko wird somit rechnerisch ausschließlich von Deichbrüchen in Deutschland verursacht.

Der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens und der Opferzahl wird in Tabelle 22 dargestellt. In beiden Deichringen lässt sich ein Rückgang des Risikos feststellen, in Deichring 42 um Faktor 2 und in Deichring 48 um etwa 20 %.

Tabelle 22 Übersicht Überflutungsrisiko 2050 für die Situation ohne und mit „theoretisch perfekten" Deichabschnitten nur in den Niederlanden

	Deichring 42		Deichring 48	
Theoretisch perfekte Deichabschnitte nur in den Niederlanden	Nein	Ja	Nein	Ja
Wirtschaftliches Risiko (Millionen Euro pro Jahr)	80,2	39,7	105,6	81,5
Opferrisiko (Opfer pro Jahr)	<1	<1	~1	<1

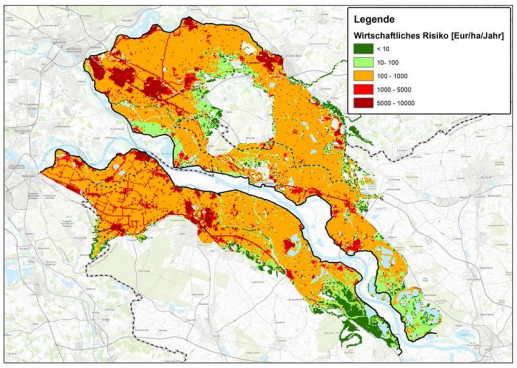
Bei der räumlichen Verteilung des Risikos lässt sich ebenfalls ein Rückgang feststellen. In Abbildung 30 werden die Unterschiede zwischen der Situation 2050 ohne und 2050 mit theoretisch perfekten Deichabschnitten in den Niederlanden dargestellt, wobei die Versagenswahrscheinlichkeit der niederländischen Deichabschnitte mit null angesetzt wurde.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass es nicht möglich ist, im Jahr 2050 die Anforderung für die Grundsicherheit aus dem niederländischen Deltaprogramm von 1/100.000 (10^{-5}) pro Jahr zu erfüllen, wenn nur die niederländischen Deichabschnitte maximal ertüchtigt werden. In Deichring 42 ist das LIR in fast dem gesamten niederländischen Teil des Deichrings größer als 10^{-5}. Im niederländischen Teil von Deichring 48 lässt sich zwar eine Verbesserung der Situation feststellen, allerdings erfüllen noch stets weite Teile des niederländischen Teils von Deichring 48 nicht die Anforderung für Grundsicherheit.

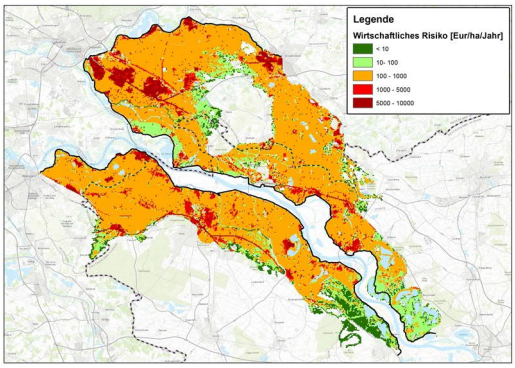
Daraus folgt, dass mit „theoretisch perfekten" Deichen in den Niederlanden das politische Ziel einer Mindestsicherheit (Grundsicherheit) hinter den primären Hochwasserschutzanlagen, auf denen die niederländischen Wassersicherheitsnormen des Waterwet (teilweise) beruhen, im Jahr 2050 nicht ohne weiteres erreicht werden kann.

Abbildung 30
Übersicht Überflutungsrisiko 2050 für die Situation ohne und mit „theoretisch perfekten" Deichabschnitten nur in den Niederlanden

Wirtschaftliches Risiko 2050

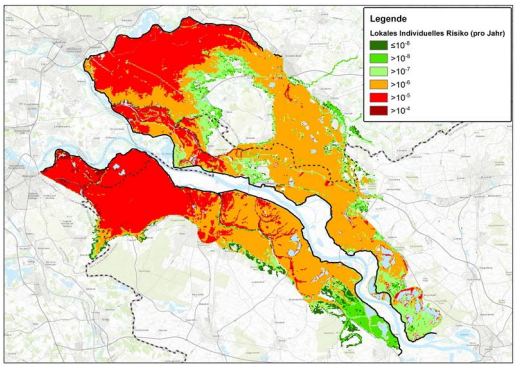


Situation 2050 (Referenz)

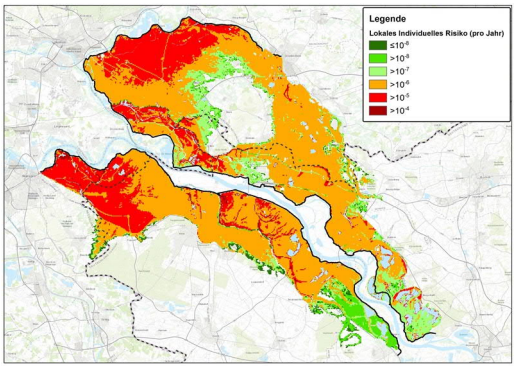


Situation 2050 mit „theoretisch perfekten" Deichabschnitten nur in den Niederlanden

Lokales individuelles Risiko 2050



Situation 2050 (Referenz)



Situation 2050 mit „theoretisch perfekten" Deichabschnitten nur in den Niederlanden

7 Beantwortung der Hauptuntersuchungsfragen, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Beantwortung der Hauptuntersuchungsfragen

Zu Beginn der Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“ hat die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser fünf Hauptuntersuchungsfragen formuliert. Zur Beantwortung dieser fünf Fragen wurden die in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Analysen von RoyalHaskoningDHV und HKV durchgeführt. Dieses Kapitel enthält je Frage eine Zusammenfassung der Antworten. Zur besseren Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Fragen wurde eine andere Reihenfolge der Hauptuntersuchungsfragen gewählt (1, 4, 2, 3 und 5).

7.1.1 Beantwortung Hauptuntersuchungsfrage 1

Wie wird nach aktuellen Bewertungsverfahren das Überflutungsrisiko im Grenzgebiet heute (2015), in der mittelbaren Zukunft nach Abschluss der laufenden Projekte (2025) und in der Perspektive zukünftiger Entwicklungen (Klima, Deltaprogramm, ökonomische Entwicklungen, Bevölkerungswachstum 2050 etc.) beurteilt?

Zeithorizont 2015
Für den Zeithorizont 2015 sind die Versagenswahrscheinlichkeiten im deutschen Teil des Deichrings größer als die Versagenswahrscheinlichkeiten im niederländischen Teil. Das ist insbesondere in Bezug auf die Versagensmechanismen Überströmung und Wellenüberschlag bzw. Hydraulischer Grundbruch und Piping der Fall. Für den deutschen Teil von Deichring 42 beträgt die berechnete Überflutungswahrscheinlichkeit 1/140 pro Jahr und für den niederländischen Teil 1/410 pro Jahr. Für Deichring 48 ist die Überflutungswahrscheinlichkeit für den deutschen Teil größer als 1/100 pro Jahr und für den niederländischen Teil 1/530 pro Jahr. Für Deichring 42 beläuft sich der Erwartungswert des wirtschaftlichen Schadens auf 23 Millionen Euro pro Jahr, gegenüber 78 Millionen Euro pro Jahr in Deichring 48. Das lokale individuelle Risiko (LIR) bewegt sich im Großteil der Deichringe 42 und 48 zwischen 1/10.000 und 1/100.000 pro Jahr.

Zeithorizont 2025
Bei den Abschnitten in den Deichringen, die für den Zeithorizont 2015 eine relativ große Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen, handelt es sich um die

Abschnitte, die im Rahmen des Deichsanierungsprogramms des Landes Nordrhein-Westfalen („Fahrplan Deichsanierung NRW") bis zum Jahr 2025 noch ertüchtigt werden. Die Versagenswahrscheinlichkeiten der Deiche sind im Anschluss an diese Deichertüchtigung einheitlicher über die gesamten Deichringe verteilt. Signifikante Unterschiede zwischen den deutschen und den niederländischen Teilen der Deichringe sind nicht mehr festzustellen. Die Überflutungswahrscheinlichkeit für den deutschen Teil von Deichring 42 verzeichnet einen Rückgang auf 1/500 pro Jahr und für Deichring 48 auf 1/510 pro Jahr. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass Versagenswahrscheinlichkeiten für die Deiche in Deutschland und den Niederlanden im Jahr 2025 vergleichbar sind.

Damit wird sich auch das wirtschaftliche Risiko verringern. Der Rückgang des wirtschaftlichen Risikos für Deichring 42 beläuft sich auf 40 Prozent und für Deichring 48 auf ungefähr 75 Prozent. Das „Lokale Individuelle Risiko" (LIR) beträgt in Deichring 42 vielerorts weniger als 1/100.000 pro Jahr, nur im niederländischen Teil befindet sich ein Gebiet, in dem sich das LIR zwischen 1/10.000 und 1/100.000 pro Jahr bewegt. In Deichring 48 beträgt das LIR größtenteils weniger als 1/100.000 pro Jahr. Die Schlussfolgerung lautet, dass sich die geplanten Deichsanierungen in Nordrhein-Westfalen positiv auf die Überflutungswahrscheinlichkeit und das Überflutungsrisiko auswirken.

7.1.2 Beantwortung Hauptuntersuchungsfrage 4

Wie wirkt sich eine Änderung der (extremen) Hochwasserabflüsse auf das ermittelte Überflutungsrisiko aus, wenn Überflutungen im Einzugsgebiet des Rheins und der Klimawandel berücksichtigt werden?

Zeithorizont 2025 (mit Überflutungen stromaufwärts von Wesel)

Die Einbeziehung von Überflutungen oberstrom, d.h. stromaufwärts von Wesel, führt zu einer veränderten Hochwasserstatistik: Die Häufigkeit von extremen Hochwasserständen nimmt ab. Die Folge ist, dass sich die Wahrscheinlichkeit des Deichüberströmens unterstrom von Wesel verringert. Dies führt dazu, dass die relevanten Versagensmechanismen Überströmung und Wellenüberschlag sowie Hydraulischer Grundbruch und Piping andere Wahrscheinlichkeiten bekommen.

Hinsichtlich der Risikobetrachtung ist für das Szenario „mit Überflutungen oberhalb, d.h. stromaufwärts von Wesel" der Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping maßgebend, wobei die Versagenswahrscheinlichkeit für Hydraulischer Grundbruch und Piping im Vergleich zur Betrachtung „Ohne Überflutungen oberhalb Wesel" fast gleich bleibt. Der Versagensmechanismus Überströmung und Wellenüberschlag hat wegen der geringeren Wahrscheinlichkeit nun deutlich weniger Auswirkung auf das Risiko. Die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit für diesen

Mechanismus verringert sich um Faktor 6-7 bei Berücksichtigung von Überflutungen oberhalb von Wesel.

In der Risikobetrachtung ergeben sich also durch die Einbeziehung von Überflutungen oberhalb Wesel kaum Unterschiede, weil der maßgebende Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping nur sehr geringfügig veränderte Überflutungswahrscheinlichkeiten ergibt (siehe Tabelle 4).

Zeithorizont 2050

Für den Zeithorizont 2050 wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf der Grundlage des „nassen" Szenarios KNMI'14 W_H unter Beachtung von Überflutungen stromaufwärts von Wesel berücksichtigt, was zu einer veränderten Hochwasserstatistik führt.

Wenngleich die Wahrscheinlichkeit von Überströmung und Wellenschlag auf eine Größe von 1/3.700 (Deichring 42) und 1/2.700 (Deichring 48) zunimmt, so bleibt doch Hydraulischer Grundbruch und Piping in der Berechnung maßgebend (1/100 bzw. 1/110) für die Überflutungswahrscheinlichkeit.

Die Überflutungswahrscheinlichkeit für beide Deichringe erhöht sich dadurch um Faktor 3 bis 3,5 im Vergleich zu der Berechnung für 2025. Die Folgen nehmen aufgrund des Wirtschaftswachstums um Faktor 2 zu. Das Ergebnis beider Entwicklungen ist, dass sich das wirtschaftliche Risiko für beide Deichringe um Faktor 6-7 erhöht.

Auf das Opferrisiko wirkt sich lediglich die Überflutungswahrscheinlichkeit aus. Weil diese zunimmt, nimmt auch das Opferrisiko um Faktor 3-3,5 zu (siehe Tabelle 5).

7.1.3 Beantwortung Hauptuntersuchungsfrage 2

Welche Ergebnisse werden bei der Anwendung der neuen niederländischen Methode zur Bestimmung des gewünschten Hochwasserschutzgrades sowohl für die deutschen als auch die niederländischen Deichabschnitte in den grenzüberschreitenden Deichringen unter Berücksichtigung der beiderseitigen Auswirkungen von Deichbrüchen abgeleitet?

Die Anwendung der niederländischen Methodik für die Ermittlung des Hochwasserschutzgrades gemäß Deltaprogramm führt zu zwei zusätzlichen Normstrecken, eine im deutschen Teil von Deichring 42 (42-0) und eine im deutschen Teil von Deichring 48 (48-0). Für beide deutschen Normstrecken wurde die Norm 1/10.000 pro Jahr als Signalwert berechnet.

Der Signalwert[5] der niederländischen Normstrecken ändert sich gegenüber den im niederländischen Wassergesetz festgelegten Werten nicht wenn man den deutschen Teil der Deichringe jeweils mitberücksichtigt. Lediglich der Untergrenzwert[6] der niederländischen Strecke 42-1 wird eine Normklasse strenger.

Weitere Hintergrundinformationen finden sich in Kapitel 6.

7.1.4 Beantwortung Hauptuntersuchungsfrage 3

Welche Konsequenzen im Sinne von Maßnahmen sind zu treffen, um den nach der niederländischen Methode angestrebten Hochwasserschutzgrad im gesamten Deichring zu erreichen?

Um die maximale Auswirkung von möglichen Ertüchtigungsmaßnahmen auf das Überflutungsrisiko abschätzen zu können, wurden in den Modellberechnungen schrittweise für jeden Deichabschnitt die Wahrscheinlichkeiten aller Versagensmechanismen auf Null gesetzt: dies wäre ein „theoretisch perfekter“ Deich, der nicht versagen kann.

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Versagenswahrscheinlichkeits-berechnungen für den Zeithorizont 2050 wurde abgeschätzt, wieviel Kilometer Deich theoretisch perfekt sein müssten damit die mit der niederländischen Methode berechneten Schutzgrade erreicht werden. In Deutschland müssen in Normstrecke 42-0 circa 16 km theoretisch perfekt sein und in Normstrecke 48-0 circa 25 km. Für die niederländischen Normstrecken ist die Annahme eines theoretisch perfekten Deichs bei circa 12 km in Normstrecke 42-1 und für die drei niederländischen Normstrecken in Deichring 48 gemeinsam bei insgesamt circa 24 km erforderlich.

Falls nur für die niederländischen Normstrecken angenommen wird, dass die Deiche theoretisch perfekt sind, und für die deutschen Hochwasserschutzanlagen die Versagenswahrscheinlichkeiten für 2050 angenommen werden (auf der Grundlage des Zustands der Deiche im Jahr 2025 und des Klimaszenarios KNMI’14 W_H), erfüllen die niederländischen Teile der Deichringe 42 und 48 im Jahr 2050 nicht ohne weiteres das Grundsicherheitsniveau von 1/100.000 pro Jahr. Auch das wirtschaftliche Risiko im Jahr 2050 bleibt relativ hoch.

Eine detailliertere Ausarbeitung zur Hauptuntersuchungsfrage 3 findet sich in Kapitel 6.6 dieses Berichtes.

[5] Der Signalwert ist eine Überflutungswahrscheinlichkeit, die dazu dient die Notwendigkeit einer Ertüchtigungsaufgabe rechtzeitig anzuzeigen.
[6] Der Untergrenzwert ist die maximal zulässige Überflutungswahrscheinlichkeit, die eine Hochwasserschutzanlage zu allen Zeiten erfüllen muss.

7.1.5 Beantwortung Hauptuntersuchungsfrage 5

Welchen Einfluss haben die unterschiedlichen Methoden in den Niederlanden und in Deutschland bei der Festlegung des angestrebten Hochwasserschutzgrades bei Deichentwurf, Deichbau, Deichertüchtigung und Deichprüfung auf das Überflutungsrisiko?

Bei der Festlegung des angestrebten Hochwasserschutzgrades bei Deichentwurf, Deichbau, Deichertüchtigung und Deichüberprüfung wurden in Deichring 42 und 48 bis zum Jahr 2016 in beiden Ländern mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit des Abflusses beziehungsweise der Überschreitungswahrscheinlichkeit des lokalen Wasserstandes gearbeitet. Nur die Häufigkeit war unterschiedlich: 1/1.250 pro Jahr in den Niederlanden und 1/500 pro Jahr in Deutschland. Infolge des unterschiedlichen Freibords (ca. 0,5 m in den Niederlanden und 1 m in Deutschland) ist die tatsächliche Höhe der Deiche jedoch vergleichbar.

In den Niederlanden gelten seit dem 1. Januar 2017 neue Sicherheitsnormen, ausgedrückt als „Überflutungswahrscheinlichkeit je Deichabschnitt“. Bei der Bestimmung dieser Normen werden auch die möglichen Folgen einer Überflutung berücksichtigt. Bei Entwurf, Bau und Überprüfung der Hochwasserschutzanlagen gehen die wichtigsten Versagensmechanismen von Deichen konform der dafür geltenden Regelwerke und Vorschriften ein.

In Deutschland werden die Versagensmechanismen auf deterministischem Wege im Zuge der Nachweisführung auf Basis des technischen Regelwerks berücksichtigt, so dass Planung, konstruktive Gestaltung und Bauausführung der Hochwasserschutzanlagen entsprechend zuverlässig erfolgt. In diesem Rahmen werden die Standsicherheit, die Gebrauchstauglichkeit sowie die Erosionssicherheit nachgewiesen.

Auch begrifflich finden sich Unterschiede: Insbesondere in Bezug auf den Mechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping unterscheiden sich die niederländische und deutsche Sicht. Für den Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping unterscheidet sich die Beschreibung des Vorgangs. In den Niederlanden ist der Moment, in dem ein Röhre mit einer bestimmten kritischen Länge unter dem Deich auftritt, als Versagensmoment definiert. In Deutschland gibt es Überlegungen, ob nicht detailliertere Betrachtungen aller zugrunde liegenden (Einzel)Mechanismen nötig sind. Hydraulischer Grundbruch und Piping kann auch die Höhe des Deiches beeinflussen. Durch Ausspülung d.h. innere Erosion unter dem Deich fällt der Deich durch Verletzung des Stützkörpers in sich zusammen wodurch sich die Höhe des Deichs verringert und der Moment des Versagens später eintritt als nach der niederländischen Definition. Das ist ein etwas anderes Verständnis dieses Begriffs. Bezogen auf die Bestimmung der Überflutungswahrscheinlichkeit, für die im Rahmen dieser Studie die niederländische Definition von Hydraulischem Grundbruch und Piping genutzt wurde, ist dies ein wichtiger Unterschied.

In Bezug auf die Evakuierung wird in Nordrhein-Westfalen davon ausgegangen, dass alle Betroffenen vor einer Überflutung präventiv evakuiert werden können, da es z.B. entsprechende Vorwarnzeiten für Hochwasserwellen gibt. In den Niederlanden hingegen wird ebenfalls die Möglichkeit berücksichtigt, dass der Deichbruch unerwartet auftritt und dass keine Präventivevakuierung stattgefunden hat oder dass eine Evakuierung nicht vollständig erfolgreich ist. Das ist ebenfalls ein wichtiger Unterschied im Zusammenhang mit der rechnerischen Ermittlung des Risikos.

7.1.6 Sensitivitätsbetrachtungen

Überflutungsrisiko

Verschiedene Sensitivitätsanalysen lassen erkennen, dass unter den Versagensmechanismen der Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping in allen betrachteten Szenarien maßgebend zum Überflutungsrisiko beiträgt. Eine Erhöhung des Evakuierungsanteils, wasserstandsabsenkende Maßnahmen und die Kammerung der Deichringe können die Risiken in den Deichringen mindern. Die Kapitel 4 und 5 enthalten eine detaillierte inhaltliche Ausarbeitung dieser Analysen.

Norm

Verschiedene Sensitivitätsanalysen mit den Parametern Wirtschaftswachstum, Evakuierung und Schadensfunktionen haben ergeben, dass sich insbesondere die Auswahl des Wirtschaftswachstums auf die Höhe der berechneten Norm auswirkt. Ein höheres Wirtschaftswachstum (4 %) führt in 3 der 6 Normstrecken zu einer strengeren Norm, wohingegen ein niedrigeres Wirtschaftswachstum (0,5 %) bewirkt, dass für 5 der 6 Normstrecken eine weniger strenge Norm gilt.

7.2 Schlussfolgerungen

7.2.1 Schlussfolgerungen für die weitere gemeinsame Bearbeitung des Hochwasserrisikomanagements

Aufgrund des geänderten Nachweisverfahrens in den Niederlanden bestehen seit Anfang 2017 Unterschiede in der Nachweisführung des Hochwasserschutzes beider Länder. Die vorliegende Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“ trägt dazu bei, über die Anwendung des niederländischen Verfahrens auch auf die deutschen Teile der grenzüberschreitenden Deichringe, diese Unterschiede zu verstehen und aufzuzeigen. Die Studie bestätigt, dass beide Länder beim Hochwasserschutz im Grenzgebiet aufeinander angewiesen sind.

Zeithorizont 2025

Diese Studie zeigt, dass sich die Sicherheit im Grenzgebiet auf beiden Seiten der Grenze, aufgrund der voraussichtlich bis 2025 laufenden und geplanten Deichsanierungen in Nordrhein-Westfalen, deutlich verbessern wird. Nach Abschluss des „Fahrplan Deichsanierung Nordrhein-Westfalen“ ist das Sicherheitsniveau auf beiden Seiten der Grenze trotz unterschiedlicher Hochwasserstandards und Nachweisverfahren vergleichbar. Dies zeigt, dass die Umsetzung des „Fahrplan Deichsanierung Nordrhein-Westfalen“ sowohl für Deutschland als auch für die Niederlande ein wichtiger Baustein ist zur Verbesserung des Hochwasserschutzes in beiden Deichringgebieten.

Zeithorizont 2050

In der Periode 2025 bis 2050 werden die Niederlande weitere Anstrengungen unternehmen, um die für die Hochwasserschutzanlagen in den Niederlanden geltende neue gesetzliche Norm bis 2050 zu erfüllen. In die für diesen Zeithorizont berechneten Überflutungsrisiken und –wahrscheinlichkeiten geht neben der wirtschaftlichen Entwicklung auch der mögliche Einfluss des Klimawandels (hier: nasses Szenario) auf die Abflussverhältnisse des Rheins ein. Dies bedeutet, dass nicht nur höhere Hochwasser auftreten können, sondern dass sich auch die Häufigkeit von Hochwassern mit Wasserständen in der Größenordnung der Deichhöhe ändert.

In Nordrhein-Westfalen wird der „Fahrplan Deichsanierung Nordrhein-Westfalen“ nach Abschluss der vorgesehenen Maßnahmen eine Verstetigung erfahren, um im Rahmen der Deichüberwachung und der Unterhaltung der Hochwasserschutzeinrichtungen sowie der Anlagen in und am Deich, den Hochwasserschutz dauerhaft sicherzustellen. Im Weiteren erfolgt in Nordrhein-Westfalen regelmäßig eine Überprüfung der Grundlagen für den Bemessungshochwasserabfluss, in dem sich Einflüsse des Klimawandels abbilden.

Die Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“ zeigt für den Zeithorizont 2050, dass das Risiko im Grenzgebiet –trotz der in beiden Ländern getroffenen Maßnahmen- in Zukunft durch Wirtschaftswachstum und Klimawandel voraussichtlich steigen wird. Weiter zeigt die Studie, dass, unter Berücksichtigung der heutigen Erkenntnisse und ausgehend von den verwendeten Prinzipien und Annahmen, wie z.B. in den Bereichen Klimawandel und Evakuierung, auch nach ergänzenden Deichertüchtigungen in den Niederlanden, die grundlegende Sicherheit (politisches Ziel der niederländischen Norm) in der Grenzregion in 2050 nicht überall erreicht werden kann. Zudem bleibt das ökonomische Risiko hoch.

Somit führen die Ergebnisse der vorliegenden Studie, insbesondere zum Zeithorizont 2050, zu einer Reihe von Fragestellungen, die im Folgenden erläutert werden.

7.2.2 Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung des Verfahrens zur Bewertung des Risikos

Die Studie liefert wichtige Einblicke in die Wirkung des Hochwasserschutzes im Grenzgebiet und wie sich verschiedene Faktoren hierauf auswirken. Die wichtigsten Punkte wurden in den vorhergehenden Kapiteln zusammengefasst. Die Ergebnisse geben Anlass für weitere Untersuchungen. Die vorliegende Studie zeigt, dass

1. die Annahmen, Grundlagen und Berechnungsmethoden für den Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping,
2. die angenommene Anzahl der Personen, die aus dem Gebiet evakuiert werden können,
3. die zukünftige Entwicklung des Rheinabflusses, sowie
4. die generelle Datenverfügbarkeit

die Ergebnisse weitgehend bestimmen. Im Vorhaben besprachen die Projektpartner daher die gewählten Ausgangspunkte und Berechnungsmethoden vor allem bezüglich dieser Faktoren.

Die Annahmen, Grundlagen und Berechnungsmethoden für den Versagensmechanismus Hydraulischer Grundbruch und Piping („Untergrunderosion“)
Aus den Analysen geht der Hydraulische Grundbruch und Piping als wichtigster Versagensmechanismus hervor. Während der Studie wurde gemeinsam eine ähnliche Diskussion über diesen Versagensmechanismus geführt wie derzeit in den Niederlanden: Bilden die vorhandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse diesen komplexen Mechanismus ausreichend genau ab? Sind die vorliegenden Erkenntnisse ausreichend detailliert? Führen die darauf basierten allgemeinen Berechnungsregeln zu realistischen Ergebnissen? Ist das niederländische Berechnungsverfahren für Hydraulischen Grundbruch und Piping für die deutschen Verhältnisse (z.B. Untergrundverhältnisse), wie in der Studie angenommen, ohne weiteres anwendbar?

Die verwendete Methode aus der VNK2-Studie ist sicherlich ein erster Schritt, doch auch in den Niederlanden sind weitere Analysen üblich, um die Ergebnisse weiter zu schärfen oder Deichabschnitte genauer zu beurteilen. Hier ist u.U. auch eine Weiterentwicklung der Berechnungsmethodik zielführend.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass zukünftig ein besseres Prozessverständnis der Versagensmechanismen insgesamt, die verbesserte Abbildung detaillierterer Versagensabläufe in der Berechnungsmethode und verbesserte Grundlagendaten zum Untergrund deutlich (positiven) Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben werden.

Die angenommene Anzahl der Personen, die aus dem Gebiet evakuiert werden können

Die Niederlande und Nordrhein-Westfalen haben unterschiedliche Ansatzpunkte für die Evakuierung im Hochwasserfall. Nordrhein-Westfalen verfolgt die vollständige Evakuierung (100 Prozent) und berücksichtigt dies entsprechend bei Planung und bei Übungen; in den Niederlanden ist der angesetzte Evakuierungsanteil deutlich geringer. In den Niederlanden wird der Evakuierungsanteil bei der Festlegung der Norm für die Deichabschnitte berücksichtigt. Daraus ergeben sich unter anderem folgende Fragen: Welches Mindestmaß an Evakuierung ist erforderlich, um die grundlegende Sicherheit in den Niederlanden zu erreichen und welche Maßnahmen sind im Rahmen des Krisenmanagements denkbar? Was ist hierbei realisierbar?

Die zukünftige Entwicklung des Rheinabflusses

In der vorliegenden Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“ wurde für den Zeithorizont 2050 ein Klimaszenario verwendet, das, wie in den Niederlanden üblich, den oberen Bereich der Bandbreite der Konsequenzen für den Rheinabfluss angibt. Es ist wichtig weiter zu untersuchen, welche Versagensmechanismen davon besonders beeinflusst werden und was ein moderateres Klimaszenario für das Hochwasserrisiko bedeuten würde, um sich ein besseres Bild von der Bandbreite der Szenarien und der sich daraus ergebenden Ergebnisse für das Risiko machen zu können.

Datenverfügbarkeit (wo sind Daten vorhanden und wo sind Annahmen zu treffen?)

Neben den drei oben genannten fachlichen Aspekten spielte in der Studie auch die Frage der Datenverfügbarkeit, insbesondere zu den Materialkennwerten des Untergrundes und der bestehenden Hochwasserschutzanlagen, eine sehr wesentliche Rolle. Die niederländische Methode stellt generell hohe Anforderungen an die Datenverfügbarkeit. Zudem sind die Ergebnisse empfindlich gegenüber den gewählten Parameterwerten, Annahmen, Ausgangspunkten und Randbedingungen. Im Vorhaben mussten für den Untergrund, aber auch für die Deichkörper, vielfach (häufig konservative) Annahmen getroffen werden. Eine verbesserte Datenlage würde zu einer sachgerechteren Abbildung der tatsächlichen Verhältnisse und zu anderen Ergebnissen führen.

In vielerlei Hinsicht erfordern die vorgenannten Punkte eine inhaltliche Nachbearbeitung der Datenlage und ggf. der Methode, um ein stabileres Bild des Hochwasserrisikos zu erhalten. In den Niederlanden werden derzeit wichtige Erfahrungen bei der Bewertung und Gestaltung der Deiche nach dem neuen Risikoansatz gesammelt. Diese Erkenntnisse könnten in Zukunft berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund ist zusätzliche Forschung auf der Grundlage der vorliegenden Studie eine wertvolle Investition.

7.3 Empfehlungen

Angesichts der Ergebnisse der Studie „Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein“ und der zutage getretenen Fragen wird empfohlen folgende Themen in das Arbeitsprogramm der neuen „Gemeinsamen Erklärung“[7] aufzunehmen, damit angesichts der unterschiedlichen Bestimmungen zum Hochwasserschutz in den beiden Ländern, gemeinsam an einer weiteren Risikominderung in der Grenzregion gearbeitet werden kann.

Vorgeschlagen wird weitere gemeinsame Erfahrungen durch gemeinsame Forschung (einschließlich Kontrolle der Daten) zu sammeln und Erkenntnisse auszutauschen in den Bereichen:

a. Hydraulischer Grundbruch und Piping:
   Durchführung weiterer Forschungsarbeiten zu den grundlegenden geophysikalischen Mechanismen und deren Modellabbildung, um ein verbessertes Bild dieses Versagensmechanismus und seiner Wirkung auf das Überflutungsrisiko zu erhalten.
b. Evakuierung:
   Weiterführung und Intensivierung des Austauschs zwischen Wasserwirtschaft und Katastrophenschutz durch verbesserte wasserwirtschaftliche Fachberatung in der Gefahrenabwehr.
c. Zukünftige Abflüsse
   Fortführung des Wissensaustauschs bezüglich des Einflusses von Klimaänderung auf den Abfluss des Rheins im Grenzgebiet (und wie damit in der Zukunft umzugehen ist).
d. Methodischer Risikoansatz und Datenverfügbarkeit:
   Was können die Niederlande und Nordrhein-Westfalen voneinander in Bezug auf die jeweilige Strategie und die fachliche Vorgehensweise lernen? Beispielsweise Nordrhein-Westfalen vom niederländischen Risikoansatz (Was sind interessante Elemente in Bezug auf die eigene Hochwasserschutzstrategie und den eigenen Ansatz?) und die Niederlande z.B. hinsichtlich der Anwendung des technischen Regelwerks aus Deutschland. Ferner ist die generelle Datenlage sowohl in den Niederlanden als auch in Nordrhein-Westfalen kontinuierlich zu verbessern.

[7] Gemeinsame Erklärung für die Zusammenarbeit im nachhaltigen Hochwasserschutz am Hauptstrom des Rheins im deutsch-niederländischen Grenzgebiet für den Zeitraum 2019 bis 2025 zwischen dem Ministerium für Infrastruktur und Wasserwirtschaft der Niederlande, der Provinz Gelderland, dem Waterschappen Rijn en IJssel und Rivierenland und dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und in Abstimmung mit dem Arbeitskreis Hochwasserschutz und Gewässer in NRW e.V.

8 Literaturverzeichnis

[1] Silva W. et al, 2009
Risikoanalyse für die grenzüberschreitenden Deichringe am Niederrhein, Phase 2 und 3: Hauptbericht. Im Auftrag der Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser. Aachen und Lelystad, April 2009.

[2] Rijkswaterstaat Projectbureau VNK, 2014
De Veiligheid van Nederland in Kaart, Eindrapportage ("Überflutungsrisiko in den Niederlanden, Endbericht"). Im Auftrag des Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Unie van Waterschappen, Interprovinciaal Overleg, HB 2540621.

[3] Maaskant B., 2016
Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe Niederrhein, Bericht Arbeitspaket 1. Im Auftrag der Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser. HKV PR3112.10, Oktober 2016.

[4] Pohl, 2013
Hochwasserschutzanlagen in der Normung und Regelung, 36. Dresdener Wasserbaukolloquium 2013, Dresden, 2013.

[5] MKULNV, 2015
Niederschrift zur Sitzung Hochwasserschutz am Rhein, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 8. Januar 2015.

[6] Ministerie Verkeer en Waterstaat und Expertise Netwerk Waterkeren, 2007
Leidraad rivieren ("Regelwerk Flüsse"). Zusammengestellt durch Rijkswaterstaat, HKV, Arcadis, Met Andere Woorden, Juli 2007.

[7] Ministerie Verkeer en Waterstaat und Expertise Netwerk Waterkeren, 2007
Technisch rapport ontwerpbelastingen voor het rivierengebied ("Technischer Bericht Belastungen zum Deichentwurf im Flussgebiet"), Rijkswaterstaat RIZA, Juli 2007.

[8] Ministerie Verkeer en Waterstaat, 2006
Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier ("raumordnerisches Grundsatzprogramm Raum für den Fluss"), Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier, december 2006.

[9] Minister van Infrastructuur en Milieu, 2016
Achtergronden bij de normering van de primaire waterkeringen in Nederland, Hoofdrapport ("Hintergrund bei der Normierung von Haupt-Hochwasserschutzanlagen in den Niederlanden, Hauptbericht"), Juni 2016.

[10] Minister van Infrastructuur en Milieu, 2016
Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 ("Regelung Hochwasserschutzanlagen erster Ordnung 2017").

[11] Minister van Infrastructuur en Milieu, 2017
Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage I Procedure ("Regelung Hochwasserschutzanlagen erster Ordnung 2017, Anlage 1 Prozedere").

[12] Minister van Infrastructuur en Milieu, 2017
Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen ("Regelung Hochwasserschutzanlagen erster Ordnung 2017, Anlage II Vorschriften zur

Bestimmung der hydraulischen Belastung von Hochwasserschutzanlagen erster Ordnung”).

[13] Minister van Infrastructuur en Milieu, 2017
Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid (“Regelung Hochwasserschutzanlagen erster Ordnung 2017, Anlage III Deichstabilität und Hochwasserschutz”).

[14] VNK2, 2011
Veiligheid Nederland in Kaart 2. De methode van VNK2 nader verklaard. De technische achtergronden (“Überflutungsrisiko in den Niederlanden 2, Die VNK2-Methode näher erläutert, Technischer Hintergrund”). Herausgegeben vom Projectbüro VNK2, Dokument HB 1267988, März 2011.

[15] RHDHV, 2019
Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein, Technischer Bericht Deichring 42. Im Auftrag der Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, Juni 2019.

[16] RHDHV, 2019
Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein, Technischer Bericht Deichring 48. Im Auftrag der Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, Juni 2019.

[17] VNK2, 2012
Veiligheid Nederland in Kaart 2. Overstromingsrisico dijkringgebied 42, Ooij en Millingen (“Überflutungsrisiko in den Niederlanden 2. Überflutungsrisiko Deichringgebiet 42 Ooij und Millingen“), HB 1838751, November 2012.

[18] VNK2, 2014
Veiligheid Nederland in Kaart 2. Overstromingsrisico dijkringgebied 48, Rijn en IJssel (“Überflutungsrisiko in den Niederlanden 2. Überflutungsrisiko Deichringgebiet 48, Rijn und IJssel“), HB 2585156, Oktober 2014.

[19] TNO, 2008
Theoriehandleiding PC-Ring versie 5.0. Deel A: Mechanismebeschrijvingen (“Theoriehandbuch PC-Ring Version 5.0. Teil A: Beschreibung der Mechanismen”), 29. Februar 2008.

[20] TNO, 2003
Theoriehandleiding PC-Ring, Versie 4.0, Deel B: Statistische modellen (“Theoriehandbuch PC-Ring Version 4.0. Teil B: Statistische Modelle“), April 2003.

[21] TNO, 2003
Theoriehandleiding PC-Ring, Versie 4.0, Deel C: Rekentechnieken (“Theoriehandbuch PC-Ring Version 4.0. Teil C: Berechnungstechniken“), April 2003.

[22] Rijkswaterstaat, 2010
Van Ruwe Data tot Overstromingsrisico. Handleiding ter bepaling van het overstromingsrisico van dijkringen binnen het project VNK2 (“Von rohen Daten zum Überflutungsrisiko. Handbuch zur Bestimmung des Überflutungsrisikos von Deichringen im Projekt VNK2“), HB-nummer: RWS-858538, 2010.

[23] VNK2, 2011
Overstromingsrisico dijkringgebied 42: Ooij en Millingen, Achtergrondrapport (“Überflutungsrisiko Deichringgebiet 42: Ooij und Millingen, Hintergrundbericht“). Im Auftrag von Rijkswaterstaat Waterdienst, kenmerk HB1838751, November 2012.

[24] VNK2, 2015
Overstromingsrisico Dijkring 48: Rijn en IJssel, Achtergrondrapport ("Überflutungsrisiko Deichringgebiet 48: Rijn und IJssel, Hintergrundbericht"). Im Auftrag von Rijkswaterstaat WVL, Mai 2015.

[25] Maaskant B, 2016
Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein, Arbeitsplan Risikoanalyse Deichring 42. Im Auftrag der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser, HKV, kenmerk PR3112.10, Oktober 2016.

[26] Maaskant B, 2016
Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe am Niederrhein, Arbeitsplan Risikoanalyse Deichring 48. Im Auftrag der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser, HKV, kenmerk PR3112.10, Oktober 2016.

[27] Kok, 2004
Standaardmethode 2004 Schade en Slachtoffers als gevolg van overstromingen ("Standardmethode 2004: Schaden und Opfer als Folge von Überflutungen"), kenmerk DWW-2005-005, HKV, November 2004.

[28] Maaskant B., 2009
Evacuatieschattingen Nederland ("Evakuierungsschätzungen in den Niederlanden"). Im Auftrag von Rijkswaterstaat, HKV, Dezember 2009.

[29] VNK2, 2009
Conditionele kansen en evacuatiefracties binnen VNK2 („Bedingte Wahrscheinlichkeiten und Evakuierungsfraktionen in der VNK2-Studie"), Memorandum, Oktober 2009.

[30] RHDHV, 2019
Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe Niederrhein, Hintergrundbericht zu den wasserbaulichen Anlagen. Im Auftrag der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser, kenmerk BD8884WATRP1904040800, Juni 2019.

[31] RHDHV, 2018
Überflutungsrisiko grenzüberschreitende Deichringe Niederrhein, Vorgehensweise zur Einteilung bzw. Schematisierung der Deichabschnitte sowie Erläuterung der verwendeten Versagensmechanismen. Im Auftrag der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe Hochwasser, kenmerk WATBD8884R001F01, Juni 2018.

[32] MKULNV, 2014
Fahrplan Deichsanierung NRW, 2014.

[33] Rijkswaterstaat, 2001
Hydraulische randvoorwaarden 2001: maatgevende afvoeren Rijn en Maas ("Hydraulische Randbedingungen 2001: Bemessungsabflüsse Abflüsse Rhein und Maas"), Rijkswaterstaat RIZA, 2001.

[34] Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, 2004
Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein: Abschlussbericht. ISBN: 9036956390, 2004.

[35] Deltares, 2014
Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins - Final report of GRADE 2.0, 1209424-004.

[36] KNMI, 2014
KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective, WR 2014-01.

[37] KNMI, 2006
KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands, WR 2006-01.

[38] Minister van Infrastructuur en Milieu, 2016
Wet van 2 november 2016 tot wijziging van de Waterwet en enkele andere wetten (nieuwe normering primaire waterkeringen); (“Gesetz von 2. November 2016 zur Änderung des Waterwets und einiger anderer Gesetze (Neue Anforderungen an die Hochwasserschutzanlagen erster Ordnung)“).

[39] Kolen B., 2013
Evacuatieschattingen Nederland addendum (“Ergänzung zur Evakuierungsschätzungen in den Niederlanden“). Im Auftrag von Rijkswaterstaat WVL, kenmerk PR2753.10, 2013.

Hoofdkantoor
HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad
Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Nevenvestiging
Elektronicaweg 12
2628 XG Delft

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl