



Michael Kersting, Nicola Werbeck

## Zu viel Wasser?

Hochwasserschäden durch die  
Flusshauptläufe von Emscher und Lippe in der  
*dynaklim*-Region im (Klima)Wandel

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



**KLIMZUG**

Klimawandel in Regionen





## ZU VIEL WASSER?

### Hochwasserschäden durch die Flusshauptläufe von Emscher und Lippe in der *dynaklim*-Region im (Klima)Wandel

Dr. Michael Kersting u. Dr. Nicola Werbeck

Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik e.V. (RUFIS), Bochum

---

dynaklim-Publikation Nr. 28, Juli 2012



---

#### Hochwasserschäden der Flusshauptläufe von Emscher und Lippe in der *dynaklim*-Region

Überschwemmungen durch Flüsse führen bereits heute zu Schäden an Grundstücken, Gebäuden und beweglichem Vermögen. Durch die Folgen des Klimawandels ist in Zukunft mit einer Zunahme von Überschwemmungsereignissen zu rechnen. Diese äußern sich in einer Veränderung der Jährlichkeiten, mit denen unterschiedliche Hochwasserereignisse zu erwarten sind. Basierend auf den Ergebnissen der Hochwasseraktionspläne für Emscher und Lippe kann die klimawandelbedingte Veränderung der Hochwasserrisiken (als Produkt aus Schadenshöhe und Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens) bestimmt werden. Für unterschiedliche Klimaprojektionen wird für die Emscher eine Zunahme dieses Risikos um 110% bis 170% und für die Lippe eine Zunahme von 60% bis 80% erwartet. Sollen diese zusätzlichen Risiken vermieden werden, ist aus ökonomischer Sicht eine Anpassungsmaßnahme dann sinnvoll, wenn sie kostengünstiger ist als die hierdurch vermiedenen Schäden. Die hier dargestellte Kalkulation stellt somit eine Obergrenze der ökonomisch sinnvollen Anpassungsmaßnahmen dar, wenn das Ziel verfolgt werden soll, das bisherige Schutzniveau auch in Zeiten des Klimawandels beizubehalten. Die Berechnungen sind in Zukunft um Klimawandelrisiken aus den Nebenläufen, den Überflutungen aus der Siedlungsentwässerung zu ergänzen und den jeweiligen Kosten für mögliche Anpassungs- und zusätzliche Schutzmaßnahmen gegenüber zu stellen.

#### ***dynaklim*-Wiki:**

Hochwasserschäden; Hochwasserrisiken; Änderung der Jährlichkeiten; klimawandelbedingte, zusätzliche Erwartungsschäden; Barwert der Erwartungsschäden;

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
Tabellenverzeichnis .....	2
Abbildungsverzeichnis .....	3
Abkürzungsverzeichnis .....	4
1 Zielstellung .....	5
2 Methodik .....	5
2.1 Aktueller Schadenserwartungswert .....	5
2.2 Änderung des Schadenserwartungswertes .....	8
2.3 Klimasignal .....	10
2.4 Anpassungskosten .....	12
2.5 Abwägung .....	14
3 Relevante Bereiche .....	17
3.1 Emscher .....	18
3.2 Lippe .....	19
4 Erwartungsschäden .....	20
4.1 Emscher .....	20
4.2 Lippe .....	22
5 Änderung der Schadenserwartungswerte .....	23
6 Barwert der Schadenserwartungswerte .....	24
7 Zusammenfassung .....	25
LITERATURVERZEICHNIS .....	26

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Niederschlagsmengen und –häufigkeiten in der Referenzperiode .....	10
Tabelle 2: Niederschlagsmengen und –häufigkeiten in der nahen Zukunft .....	11
Tabelle 3: Koeffizienten der Niederschlags-Schätzfunktionen (Referenzwerte und CLM-Läufe [nahe Zukunft]) .....	12
Tabelle 4: Jährlichkeiten der Niederschlagsereignisse (Referenzwerte und CLM-Läufe [nahe Zukunft]) .....	12
Tabelle 5: Aktueller Schadenserwartungswert im Überflutungsgebiet Emscher .....	20
Tabelle 6: Aktuelle Schadenserwartungswerte in den potenziellen Überflutungsgebieten der Emscher .....	21
Tabelle 7: Aktueller Schadenserwartungswert im Überflutungsgebiet Lippe (im Lippeverbandsgebiet gelegen) .....	22
Tabelle 8: Aktuelle Schadenserwartungswerte in den potenziellen Überflutungsgebieten der Lippe (im Lippeverbandsgebiet gelegen) .....	23

Tabelle 9: Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Emscher (Hauptlauf; nahe Zukunft) .....	23
Tabelle 10: Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Lippe (Hauptlauf; nahe Zukunft) .....	24
Tabelle 11: Barwert der Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Emscher (Hauptlauf; nahe Zukunft) .....	24
Tabelle 12: Barwert der Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Lippe (Hauptlauf; nahe Zukunft) .....	25
Tabelle 13: Zusammenfassung der Ergebnisse .....	25

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schritte zur Bestimmung der Schadenserwartungswerte .....	6
Abbildung 2: Berechnung des Schadenserwartungswertes .....	8
Abbildung 3: Ermittlung und Übertragung der Jährlichkeiten von Niederschlagsereignissen .....	9
Abbildung 4: zukünftiger und Änderung des Schadenserwartungswertes .....	10
Abbildung 5: Klimawandelsignal der Niederschläge .....	11
Abbildung 6: Schema der Änderung des Schadenserwartungswertes .....	14
Abbildung 7: Veränderung der optimale Vorsorge .....	15
Abbildung 8: Wirkung von Anpassungsmaßnahmen .....	16
Abbildung 9: Bewertung von Anpassungsmaßnahmen .....	17
Abbildung 10: Relevante Haupt- und Nebenläufe der oberirdischen Fließgewässer .....	18
Abbildung 11: Schadensberechnungen im HWAP Lippe .....	19

## Abkürzungsverzeichnis

A.....	Anpassungsmaßnahme(nkombination)
a .....	Jährlichkeit
AK .....	Anpassungskosten
ANN .....	Annuität
b.....	Zahlungsreihe
B <sub>0</sub> .....	Barwert
CLM.....	Climate Limited-Area Modelling
d.....	Ein-/Überstauhöhe
EU-HWRM-RL ..	Europäische Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
F .....	Unterschreitenswahrscheinlichkeit
HQ.....	Hochwasser-(Abfluss-)Menge
HWAP .....	Hochwasseraktionsplan
I.....	Investition
i .....	Zinssatz
K.....	Kosten
LWG-NW .....	Landeswassergesetz des Landes Nordrhein-Westfalen
MW .....	Mittelwert
n.....	Jahre
S .....	Schaden
SEW.....	Schadenserwartungswert
ÜFG .....	Überflutungsgebiet
V.....	Vorsorgemaßnahmen(kombinationen)
VK.....	Vorsorgekosten
WHG .....	Wasserhaushaltsgesetz

## 1 Zielstellung

Der Klimawandel wird in Zukunft Veränderungen für die Emscher-Lippe-Regionen mit sich bringen. Der Umgang mit diesen Veränderungen stellt eine neue Herausforderung für die Region dar. Im Projekt *dynaklim* wird dies in unterschiedlichen Bereichen mit Blick auf die Klimafolgen:

- Starkregen,
- Trockenheit und
- Hitze

untersucht.

In dem vorliegenden Text wird die grundlegende Vorgehensweise der quantitativen Bestimmung und Bewertung von Klimafolgen von zu erwartenden zunehmenden (zumindest jahreszeitlichen) Niederschlägen und -intensitäten am Beispiel der Überschwemmungsrisiken an Emscher und Lippe skizziert. Ziel dieser Zusammenstellung ist es, einen Rahmen für die Bewertung von Anpassungsmaßnahmen an die Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer zu liefern. So soll geprüft werden,

1. wie hoch die zu erwartenden Schäden durch Extremereignisse gegenwärtig sind,
2. wie sich diese zu erwartenden Schäden durch den Klimawandel ändern werden und
3. wie hoch die Kosten von Anpassungsmaßnahmen sein dürfen, wenn das Ziel verfolgt werden soll, den heutigen Schutzgrad resp. den heutigen Entwässerungskomfort zu erhalten.

Im Kern führt dieses Vorgehen zur Vorbereitung einer Nutzen-Kosten-Abwägung, bei der der Nutzen einer Anpassungsmaßnahme aus dem vermiedenen Anstieg des Schadenserwartungswertes gebildet wird, der den Anpassungskosten gegenüber gestellt werden kann.

Zu diesem Zweck werden, nach einer Erläuterung der Vorgehensweise (Kapitel 2), für die Hauptläufe von Emscher und Lippe (Kapitel 3) bereits existierenden Berechnungen zu Überschwemmungsereignissen<sup>1</sup> aktualisiert (Kapitel 4) und die durch den Klimawandel zu erwartenden Änderungen modelliert (Kapitel 5). Abschließend werden die Kostenobergrenzen für Anpassungsmaßnahmen berechnet, wenn die Erhaltung des Schutzniveaus gesichert werden soll (Kapitel 6).

## 2 Methodik

### 2.1 Aktueller Schadenserwartungswert

Im Rahmen der Gewässerbewirtschaftung existiert ein etabliertes Verfahren zur Abschätzung gegenwärtiger Hochwasserrisiken bei oberirdischen Fließgewässern.<sup>2</sup> Für die Bestimmung wird eine exakte Vorgehensweise definiert, die sich zum Beispiel in den in der Region relevanten Hochwasseraktionsplänen<sup>3</sup> zeigt und in Abbildung 1 dargestellt wird.

---

<sup>1</sup> Das sind für die Emscher Emschergenossenschaft (o.J.a) und für die Lippe Hydrotec (2002a).

<sup>2</sup> Vgl. exemplarisch DVWK - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1985) oder Beyene, M. (2001)..

<sup>3</sup> Vgl. Hydrotec (2002a); Emschergenossenschaft (o.J.a).

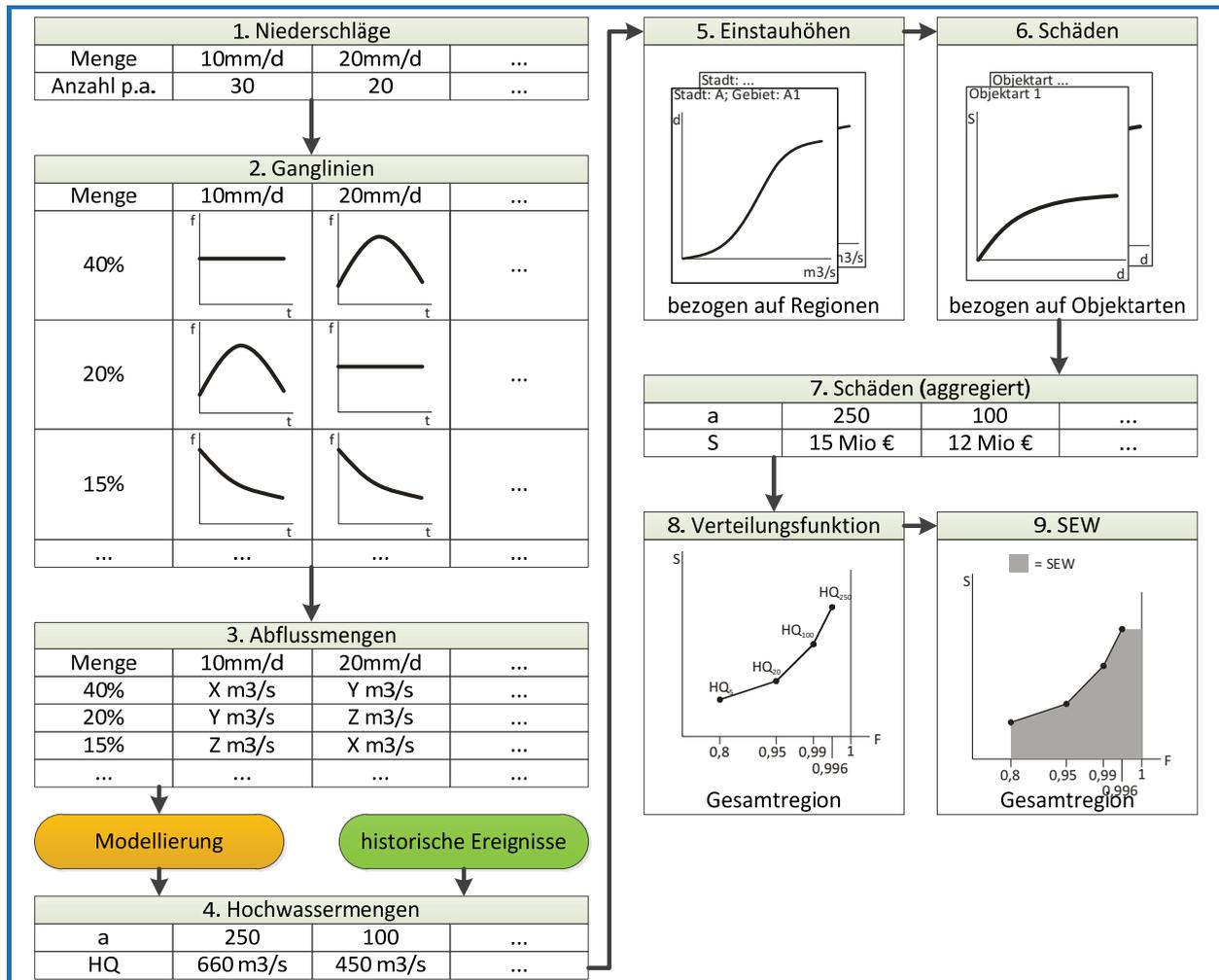


Abbildung 1: Schritte zur Bestimmung der Schadenserwartungswerte

1. Eine wesentliche Ursache für Überschwemmungen ist der Niederschlag (von anderen Gründen wie z.B. der Schneeschmelze wird an dieser Stelle abgesehen). Aus der Metrologie können Informationen über unterschiedliche Niederschlagsereignisse und -summen generiert werden.
2. Diese Niederschlagsereignisse verteilen sich in der angegebenen Zeitspanne unterschiedlich, was divergierende hydraulische Belastungen der Wasser- bzw. Abwassersysteme nach sich zieht.
3. Aus den Niederschlägen und der zeitlichen Verteilung der Niederschläge innerhalb der angegebenen Zeitspannen ergeben sich über hydrologische Modelle unterschiedliche Abflussmengen und -spitzen, die durch das Gewässersystem abgeleitet werden müssen.
4. Durch eine Reihung der Abflussereignisse nach ihrer Höhe und der Kenntnis über ihre Häufigkeit können Angaben über Hochwasserereignisse und ihre Jährlichkeit abgeleitet werden. Alternativ zu den Schritten 1-4 können diese Angaben auch aus der Betrachtung historischer Abflussereignisse gewonnen werden.<sup>4</sup>
5. Im Rahmen von hydraulischen Modellen der Gewässersysteme können für jedes Abflussereignis entsprechend der topografischen Besonderheiten der Region und der Spezifika der Gewässer Überschwemmungen bestimmt werden. Diese werden kartografisch in ihrer räumlichen Reichweite unter Zuhilfenahme von Geländemodellen inkl. der Überstauhöhen abgebildet. Zur Bestimmung der schadensträchtigen Überflutungshöhen und/oder Fließgeschwindigkeiten können je nach erforderlichem Maßstab (kleinräumige vs. großräumige Ergebnisse) oder Berücksichti-

<sup>4</sup> Vgl. beispielsweise Hydrotec (2001) oder Emschergenossenschaft (o.J.a)

gung von räumlichen Besonderheiten (z.B. Wirkung von Gebäuden auf das Fließverhalten des Wassers bei einer Überflutung<sup>5</sup>) unterschiedliche Modelle angewandt werden.<sup>6</sup>

6. Die von den jeweiligen Ereignissen betroffenen Objekte (Gebäude, Infrastrukturen, Flächen, Fahrzeuge, Personen, etc.) und ihre Vermögenswerte müssen über bestehende Daten oder über eine originäre Aufnahme erfasst werden. In Verbindung mit den (in Schritt 5 erfassten) räumlichen Überstauhöhen können entsprechende Schadenswerte unter Verwendung von objektspezifischen Schadensfunktionen je Abflussereignis bestimmt werden. Bei einer mesoskaligen Betrachtung ist es möglich, einzelne Objekte zu Klassen zusammen zu fassen<sup>7</sup> und für diese Klassen Durchschnittswerte für die Wertansätze und Schadensfunktionen zu verwenden.

In der vorliegenden Untersuchung sollen Aussagen über die in *dynaklim* relevanten Hauptläufe von Emscher und Lippe (Verbandsgebiete von Emschergenossenschaft und Lippeverband) erstellt werden. Die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf das gesamte relevante Gebiet dieser beiden Flüsse. Eine mesoskalige Vorgehensweise ist daher als ausreichend anzusehen.<sup>8</sup> Wo vorhanden, können mikroskalige Daten berücksichtigt werden. Unberücksichtigt bleiben für die Modellierung die Personenschäden. Alle Berechnungen beziehen sich somit auf zu erwartende Sachschäden durch Überschwemmungen.

7. Für jedes Abflussereignis können anschließend die gesamten Schäden aggregiert werden. Es ergibt sich somit eine Kombination aus Wahrscheinlichkeit (als Kehrwert der Jährlichkeit) des Ereigniseintritts und dem dazugehörigen Schadenswert.
8. Beide Informationen können in einer Verteilungsfunktion zusammengeführt werden, die zu der jeweiligen Überstauhäufigkeit (gebildet aus der Eintrittswahrscheinlichkeit) den Schaden angibt.
9. Der Schadenserwartungswert wird als die Fläche unterhalb der Verteilungsfunktion aus dem vorherigen Schritt ermittelt.

Bei der Bestimmung der Schadenskurve (Schritt 8) und der Berechnung der Schadenserwartungswerte (Schritt 9) wird zwischen den Stützpunkten der berechneten Schäden je Jährlichkeit interpoliert, wobei die einzelnen Flächenabschnitte Trapeze bilden (graue Flächen in Abbildung 2). Für den Bereich bis zur oberen Integrationsgrenze (unendliche Jährlichkeit bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Null) wird der ermittelte Schaden für die höchste Jährlichkeit als konstant angenommen (grüne Fläche in Abbildung 2). Die untere Integrationsschwelle beginnt bei der Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die Hochwasserschwelle. Diese ergibt sich aus der Jährlichkeit des Hochwasserereignisses, bei dem gerade noch kein Schaden auftritt. Ist diese Schwelle bekannt, wird die orangefarbene Dreiecksfläche mit berücksichtigt. Ist sie es nicht, wird ab der ersten betrachteten Jährlichkeit (in Abbildung 2 das HQ<sub>5</sub>) integriert.<sup>9</sup>

---

<sup>5</sup> Vgl. beispielsweise de Moel, H.; J. C. J. H. Aerts (2011), S. 417.

<sup>6</sup> Vgl. beispielsweise für erste Abschätzungen der Überstauhöhen anhand der einfachen topografischen Analyse Nichler, T. u.a. (2011); für detaillierte Analysen unter Berücksichtigung räumlicher Spezifika (z.B. Gebäude, Bodenversiegelung, Fließmodelle des Wassers) vgl. exemplarisch Hydrotec (o.J.), Björnson Beratende Ingenieure GmbH (o.J.) oder Deltares (2012).

<sup>7</sup> Vgl. beispielsweise Klijn, F. u.a. (2007), S. 6-9f.

<sup>8</sup> Vgl. auch Emschergenossenschaft; Hydrotec (2004) und in Teilen Hydrotec (2002a).

<sup>9</sup> Vgl. Beyene, M. (2001), S. 29f.

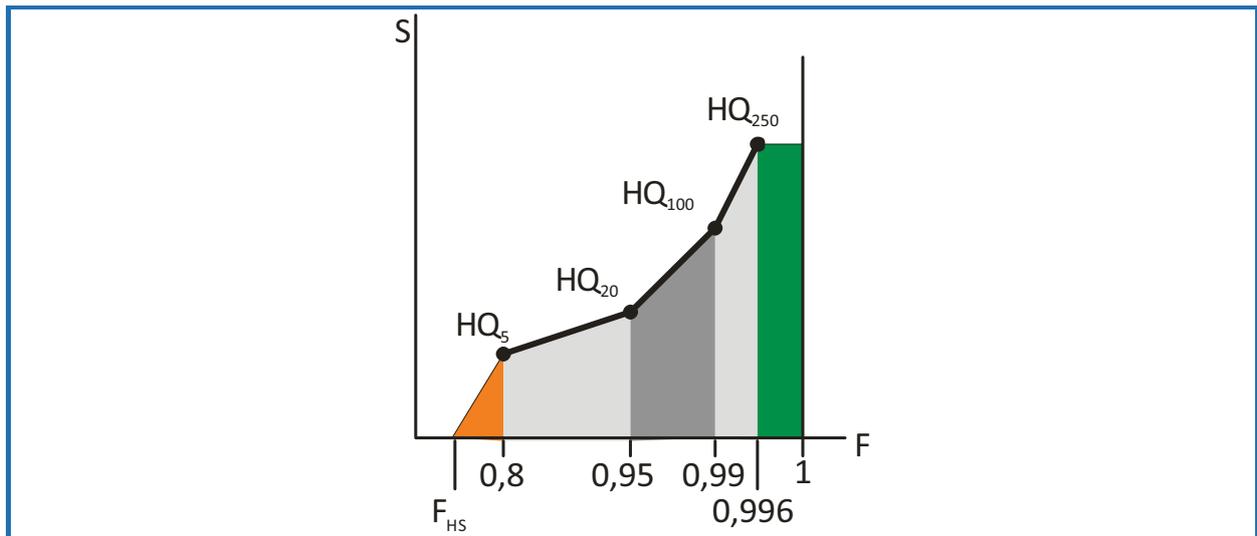


Abbildung 2: Berechnung des Schadenserwartungswertes

## 2.2 Änderung des Schadenserwartungswertes

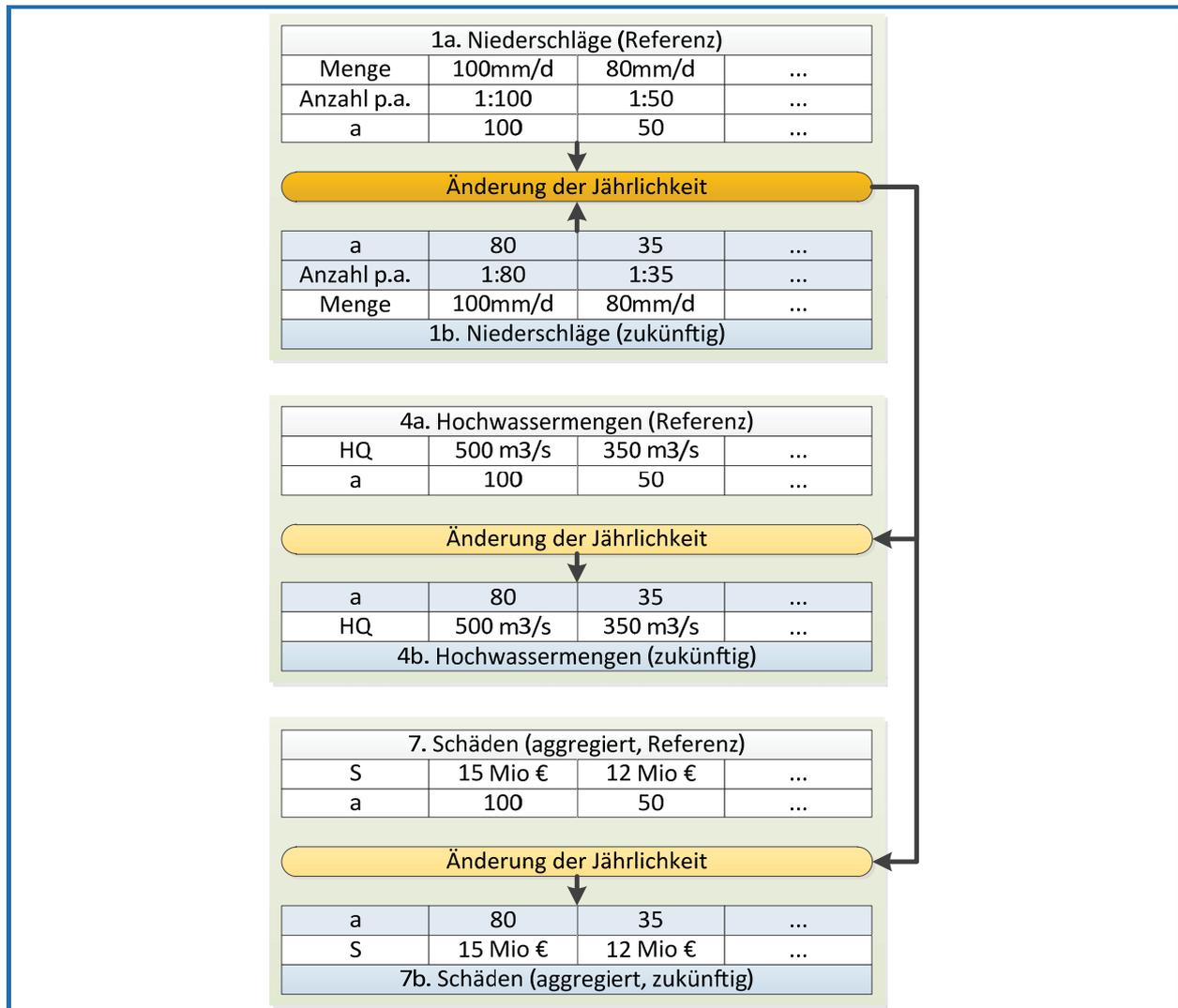
Aus den klimawandelbedingten Änderungen der Niederschlagsereignisse lassen sich mithilfe der in Abschnitt 2.1 dargestellten Schritte die zukünftigen Schadenserwartungswerte berechnen. Hierfür müssen die zukünftigen Niederschlagsmengen und –spitzen sowie ihre zeitliche Verteilung durch geeignete Modelle der Klimatologie und Metrologie bestimmt werden, die dann in das Modell der Gewässersysteme eingespeist werden. Auf dieser Grundlage lassen sich die Hochwasserabflussmengen in den Gewässern modellieren.

In der vorliegenden Studie wird eine vereinfachte Vorgehensweise gewählt. Es wird angenommen, dass auch in Zukunft Niederschlagsereignisse einer bestimmten Höhe zu identischen Abflussspitzen und Schadensereignissen führen. Für eine erste Einschätzung reicht es daher aus, die Änderung der Jährlichkeiten der Niederschlagsereignisse auf die bereits vorliegenden Schadenshöhen zu übertragen (Abbildung 3).

Diese Vorgehensweise impliziert, dass alle anderen für die Schadenshöhe relevanten Einflussgrößen konstant gehalten werden. Diese sind insbesondere

- die Besiedlungsdichte der Überflutungsgebiete,
- die Flächennutzung und Siedlungsstruktur,
- die Vermögenswerte der darin befindlichen Objekte und
- die Verläufe der Schadensfunktionen für die jeweiligen Objektklassen.

Diese „ceteris paribus“-Annahme ermöglicht es, die isolierten Auswirkungen des Klimawandelsignals auf die Änderung des Schadenserwartungswertes zu betrachten. Gleichzeitig können die bereits für die aktuelle Situation berechneten Schadenshöhen weiter verwendet werden. In der schematischen Darstellung der Verteilungsfunktion in Abbildung 1 (Schritt 8) drückt sich dies in einer Verschiebung der Stützpunkte aus, wie in Abbildung 4 links dargestellt.



**Abbildung 3: Ermittlung und Übertragung der Jährlichkeiten von Niederschlagsereignissen**

Die Berechnung der Fläche unterhalb der neuen Verteilungskurve führt zum Klimawandelschadens-erwartungswert. Die Differenz zum bisherigen Schadenserwartungswert ist in Abbildung 4 rechts als blaue Fläche dargestellt. Wenn das Anpassungsziel verfolgt werden soll, den bisherigen Schutzgrad durch Maßnahmen/-kombinationen beizubehalten, muss somit der gesamte Schadenserwartungs-wert inkl. der Klimawandelfolgen konstant bleiben. In diesem Anpassungsszenario entspricht die in Abbildung 4 rechts dargestellte blaue Fläche dem vermiedenen Schadenserwartungswert und damit dem Nutzen der Anpassungsmaßnahme(nkombination).

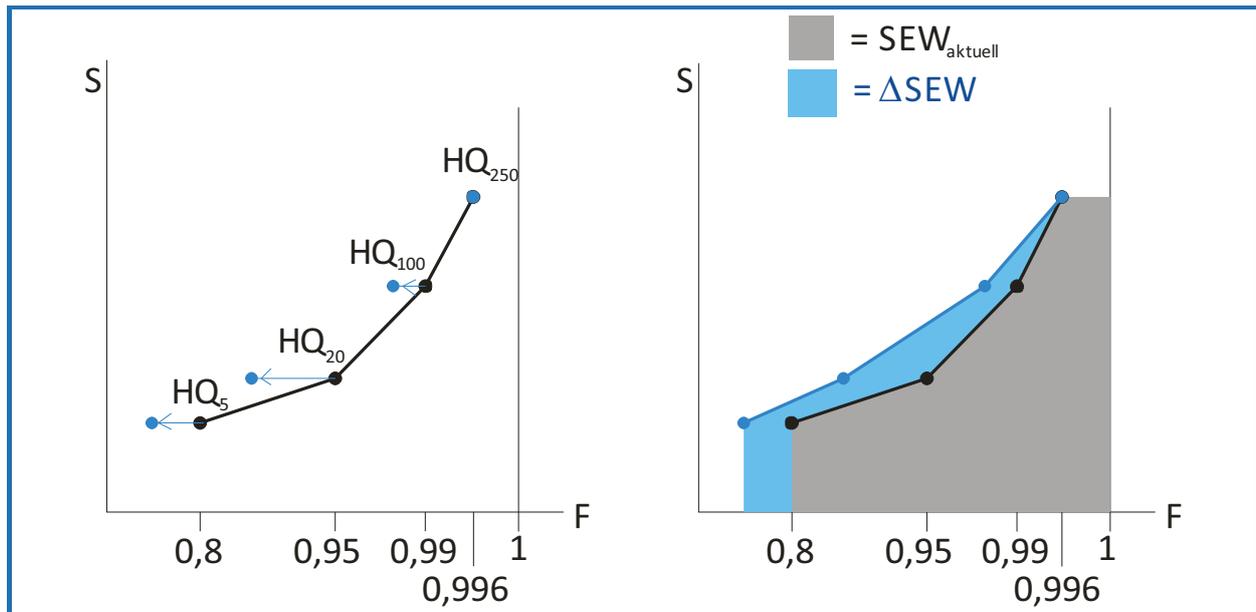


Abbildung 4: zukünftiger und Änderung des Schadenserwartungswertes

### 2.3 Klimasignal

Im Rahmen des Projektes *dynaklim* werden Untersuchungen zu Änderungen der Niederschlagsereignisse von der dr. papadakis GmbH durchgeführt. Analysiert werden regionale Niederschläge für die nahe Zukunft (2021-2050) anhand der beiden Läufe des Modells CLM. Die Modellergebnisse werden in Relation zu der Niederschlagshäufigkeit der Referenzperiode (1961-1990) gesetzt, wobei die statistische Ungenauigkeit der Messwerte der Referenzperiode zu berücksichtigen ist. Um letztere auszuschließen, wird eine obere Grenze des Vertrauensintervalls gebildet, indem in Anlehnung an KOSTRA-DWD-2000<sup>10</sup> durch einen Zuschlag ein oberer Toleranzbereich gebildet wird (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Niederschlagsmengen und –häufigkeiten in der Referenzperiode

Wiederkehrzeit [a]	Wahrscheinlichkeit [1/a]	Messwerte [mm/d]	Zuschlag	Referenzwert [mm/d]
1	1,00	33,5	10%	36,8
3,3	0,30	45,4	10%	49,9
5	0,20	49,4	10%	54,3
10	0,10	56,3	15%	64,7
20	0,05	63,2	15%	72,6
25	0,04	65,4	15%	75,2
33,3	0,03	68,2	15%	78,4
50	0,02	72,2	15%	83,1
100	0,01	79,1	20%	94,9

Quelle: (Quirnbach, M. u.a. 2012 i.E.)

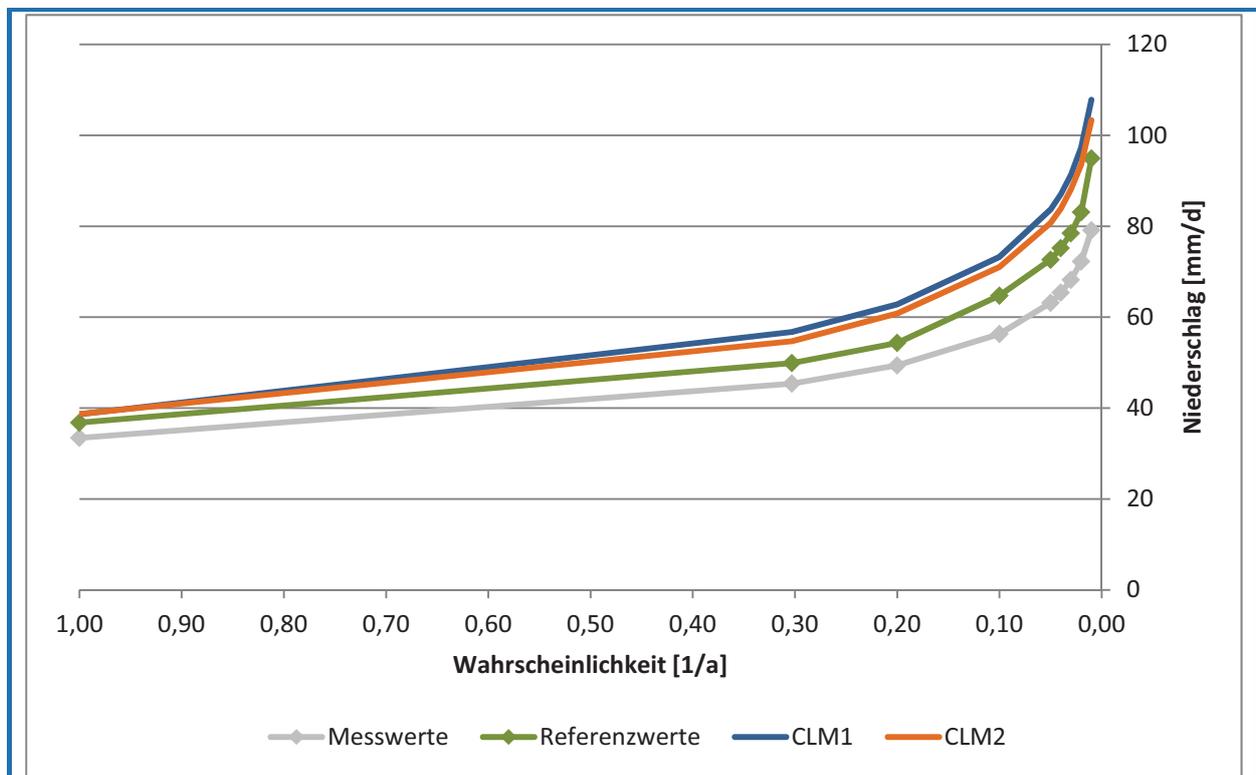
Die Berechnungen der Niederschlagssummen und Jährlichkeiten der beiden CLM-Läufe zeigen im Vergleich zu den Referenzwerten ein deutliches Klimasignal, das über die statistische Unsicherheit der Messwerte in der Referenzperiode hinausgeht. In Tabelle 2 werden die Berechnungsergebnisse der beiden CLM-Läufe angegeben. In Abbildung 5 wird das Klimasignal an dem Abstand der CLM-Kurven zur Kurve der Referenzwerte deutlich.

<sup>10</sup> Vgl. Bartels, H. u.a. (2005).

**Tabelle 2: Niederschlagsmengen und –häufigkeiten in der nahen Zukunft**

Wiederkehrzeit [a]	Wahrscheinlichkeit [1/a]	2021-2050	
		CLM1	CLM2
		[mm/d]	
1	1,00	38,6	38,7
3,3	0,30	56,7	54,7
5	0,20	62,8	60,8
10	0,10	73,3	71,0
20	0,05	83,7	80,7
25	0,04	87,0	83,9
33,3	0,03	91,3	88,1
50	0,02	97,4	93,6
100	0,01	107,8	103,3

Quelle: (Quirnbach, M. u.a. 2012 i.E.)



**Abbildung 5: Klimawandelsignal der Niederschläge**

Quelle: (Quirnbach, M. u.a. 2012 i.E.)

Unter der Annahme, dass gleiche Niederschlagshöhen auch in Zukunft zu identischen Schadensereignissen (Überschwemmungen) führen, kann eine sich ändernde Wiederkehrzeit (Jährlichkeit) der Niederschlagsereignisse auf die Schadensereignisse übertragen werden (vgl. Abbildung 3). Zu diesem Zweck werden für die Niederschlagshöhen

- der Referenzwerte der Bezugsperiode (vgl. Tabelle 1) und
- der beiden CLM-Läufe (vgl. Tabelle 2)

Schätzfunktionen nach folgender Form gebildet:

$$NS = b_0 \cdot \ln(X) + b_1$$

Als hoch signifikante Koeffizienten ergeben sich für die vier geschätzten Reihen folgende Werte:

**Tabelle 3: Koeffizienten der Niederschlags-Schätzfunktionen (Referenzwerte und CLM-Läufe [nahe Zukunft])**

	Ref.	CLM1	CLM2
$b_0$	-12,465171	-15,024611	-14,143555
$b_1$	35,441058	38,647395	38,286143
korr. $R^2$	0,9956	1,0000	0,9998

Mithilfe der Schätzfunktionen können schließlich die Wiederkehrzeiten berechnet werden, die in den unterschiedlichen Modellläufen (CLM1 und CLM2) zu denselben Starkregenereignissen ( NS ) und damit Schäden führen, wie in der Referenzperiode. Die sich ändernden Jährlichkeiten werden in Tabelle 4 angegeben.<sup>11</sup>

**Tabelle 4: Jährlichkeiten der Niederschlagsereignisse (Referenzwerte und CLM-Läufe [nahe Zukunft])**

NS Referenzwert [mm/d]	Jährlichkeit		
	Ref.	CLM1	CLM2
36,8	1	0,8	0,8
49,9	3,3	2,2	2,3
54,3	5	3,1	3,4
64,7	10	5,5	6,2
72,6	20	9,7	11,5
75,2	25	11,7	14,0
78,4	33,3	14,8	18,0
83,1	50	20,7	25,7
94,9	100	36,9	47,3

Die Tabelle zeigt, dass bspw. ein in der Referenzperiode alle 10 Jahre auftretendes Ereignis nach CLM1 alle 5,7 Jahre auftreten wird, nach CLM 2 alle 6,2 Jahre. Ein solcher Niederschlag (mit 64,7 mm/d) wird also in Zukunft etwa doppelt so häufig auftreten wie in der Referenzperiode. Oberhalb der Jährlichkeit von 100 wird keine Neuberechnung durchgeführt, da die CLM-Läufe nur Aussagen für 100 Jahre zulassen.

## 2.4 Anpassungskosten

Anpassungen an die Folgen des Klimawandels bestehen in der vorliegenden Studie zunächst aus Schutzmaßnahmen, die die Folgen sich ändernder Hochwässer oder Überflutungen bewältigen sollen. Entsprechend der bei der Ermittlung der Schadenssummen gemachten Annahmen (vgl. Abschnitt 2.2) wird zum Beispiel eine Änderung der Siedlungsstruktur – Rückbau von gefährdeten Objekten in potenziellen Überflutungsflächen – als Anpassungsmaßnahme nicht betrachtet. In gleicher Weise werden Maßnahmen an den betroffenen Objekten selbst nicht betrachtet. Diese könnten zum Beispiel aus baulichen Veränderungen an den Gebäuden (Höherlegen des Eingangs, Schutzmauer vor Kellerfenstern, Bevorratung mit Sandsäcken) oder in den Gebäuden (Umnutzung von stark betroffenen Kellerräumen) bestehen.

<sup>11</sup> Die Neukalkulation berücksichtigt lediglich die Änderung der Jährlichkeit der bisherigen 100-jährigen Ereignisse. Die Reichweite der Messreihen lässt eine analoge Kalkulation der selteneren Ereignisse nicht zu, so dass deren Eintrittshäufigkeit konstant gehalten wird. Dies dürfte zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Zunahme des Schadenserwartungswertes führen.

Stattdessen werden hier insbesondere Maßnahmen zur Ertüchtigung der Gewässersysteme zum Beispiel durch einen verstärkten technischen Hochwasserschutz betrachtet. Eine entsprechende Anpassung verfolgt unter den hier getroffenen Annahmen das Ziel, für die betroffenen Flächen und Personen zu einem Erhalt des gegenwärtigen Entwässerungskomforts zu führen.

Für die anschließende Abwägung müssen die Kosten für diese Anpassungsmaßnahmen mit den Ergebnissen der Schadenserwartungswertberechnung verglichen werden können. Diese liegen als jährliche Größen vor, so dass auch die Anpassungskosten p.a. zu bestimmen sind. Maßnahmen an der Wasser- und Abwasserinfrastruktur haben üblicherweise eine längere Nutzungsdauer, so dass eine Umrechnung der Gesamtkosten unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer auf jährliche Beträge erfolgen muss. Relevant für die Gesamtkosten sind

- Kosten für den Grunderwerb,
- Investitionskosten und
- Betriebskosten.

Wenn die Anpassungsmaßnahmen an bestehenden Bauwerken (Deiche oder Abwasserkanäle im Straßenraum, Abwasserbehandlungsanlagen, etc.) erfolgen, für die bereits entsprechende Flächen vorgehalten werden, kann von den Kosten für den Grunderwerb abgesehen werden. Werden bestehende Anlagen in ihrer Leistungsfähigkeit erweitert, können gegebenenfalls die zusätzlichen Betriebskosten ebenfalls vernachlässigt werden. Dies ist dann der Fall, wenn die Betriebskosten nicht von der Dimensionierung einer zu betreibenden Anlage abhängen (z.B. Kontrolle von Deichen, Dichtigkeitsprüfung von Kanälen).

Die Zusatzkosten für die Anpassungsmaßnahme können mithilfe dynamischer Kostenkalkulationsmodelle in jährliche Kosten umgerechnet werden.<sup>12</sup> Die Berechnung einer Annuität führt dabei zu einer über die Nutzungsdauer der Anlage konstanten jährlichen Kostenbelastung. Innerhalb der Nutzungsdauer würde diese Annuität exakt ausreichen, um die Zinsen für eine (hypothetische oder tatsächliche) Fremdfinanzierung und die Tilgung dieser Fremdfinanzierung zu decken. Die Annuität stellt somit die jährlichen Anpassungskosten dar. Sie wird berechnet nach:<sup>13</sup>

$$ANN = I_0 \cdot \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}.$$

Die Annuität (ANN) steigt mit der Investitionssumme zum Zeitpunkt 0 ( $I_0$ ), mit dem Kalkulationszinssatz ( $i$ ) und sinkt mit der Nutzungsdauer ( $n$ ). Von eventuell zu berücksichtigenden Steuerzahlungen, einer Wiederanlage oder Alternativanlage von Mitteln oder unterschiedlichen Zinssätzen für Eigen- bzw. Fremdkapital und dem Einfluss der Inflation auf den Zins wird in der vorliegenden Studie abstrahiert.<sup>14</sup>

Alternativ lassen sich jährlich gleichbleibende Zahlungen mithilfe folgender Formel in einen Barwert umrechnen:

$$B_0 = b \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n},$$

wobei  $b$  die jährliche Zahlung und  $B_0$  den Barwert dieser Zahlungsreihe darstellt. Der Barwert sinkt mit steigendem Kalkulationszinssatz ( $i$ ) und steigt mit der Höhe der jährlichen Zahlung ( $b$ ) sowie der Nutzungsdauer ( $n$ ). Diese Berechnungsweise kann genutzt werden, um den Nutzen einer Anpassungsmaßnahme (Verringerung der jährlichen Überschwemmungsrisiken) über einen längeren Zeitraum zu aggregieren und den Investitionskosten der hierfür erforderlichen Anpassungsmaßnahme gegenüber zu stellen (vgl. Kapitel 6).

---

<sup>12</sup> Vgl. LAWA (2005).

<sup>13</sup> Vgl. Busse von Colbe, W.; G. Lassmann (1986), S. 37.

<sup>14</sup> Vgl. Busse von Colbe, W.; G. Lassmann (1986), S. 83ff.; Kajüter, P. (2011), S. 31ff.

## 2.5 Abwägung

Würde keine Anpassungsmaßnahmen durchgeführt, ergeben sich die Folgen des Klimawandels für die Gewässer als:

Änderung des Schadenserwartungswertes

$$= \text{Schadenserwartungswert}_{\text{zukünftig}} - \text{Schadenserwartungswert}_{\text{aktuell}}$$

Der Nutzen einer Anpassungsmaßnahme ergibt sich nach Abbildung 6 aus dem vermiedenen Schadenserwartungswert. Bei einer Erhaltung des *aktuellen Schutzniveaus* ist der Nutzen einer Anpassungsmaßnahme:

$$\text{Nutzen} = \text{vermiedener Schadenserwartungswert} = -\text{Änderung des Schadenserwartungswertes}$$

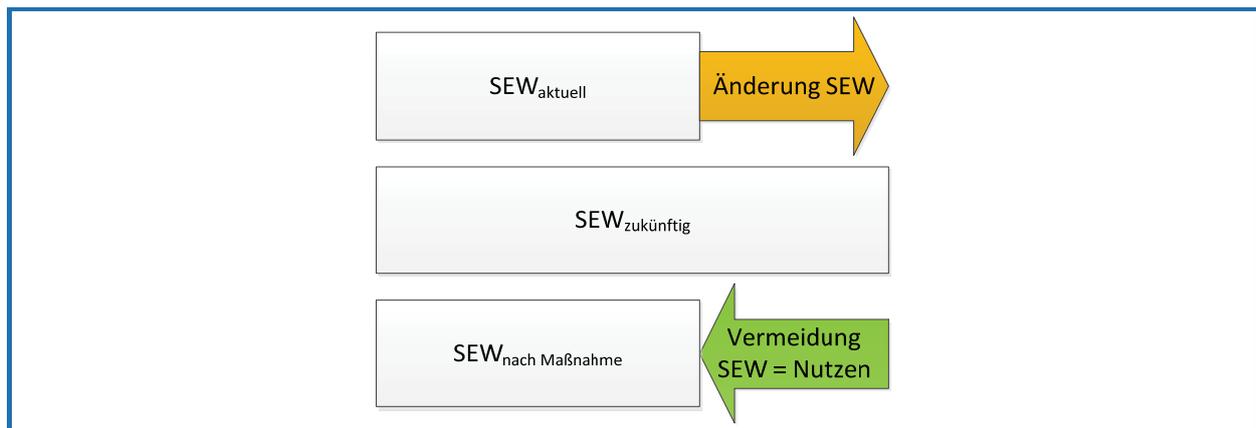


Abbildung 6: Schema der Änderung des Schadenserwartungswertes

Im Rahmen einer Nutzen-Kosten-Abwägung ist eine Anpassungsmaßnahme, die den gegenwärtigen Schutzgrad erhält, dann sinnvoll, wenn gilt:

$$\text{vermiedener Schadenserwartungswert} > \text{Anpassungskosten}$$

Eine solche Effizienzprüfung von Anpassungsmaßnahmen kann auch auf gesetzliche Regelungen angewandt werden. Zementieren Rechtsnormen das gegenwärtige Schutzniveau, können Anpassungsmaßnahmen ggf. ohne Rücksicht auf Kosten-Nutzen-Relationen verpflichtend sein. Eine solche Vorschrift könnte gesamtwirtschaftlich zu ineffizienten Ergebnissen führen. Mittels der Vorgehensweise in dieser Studie kann hinterfragt werden, ob die bestehenden Regelungen zu optimalen Ergebnissen führen oder ob sie in Zukunft selbst an die Herausforderungen des Klimawandels angepasst werden müssen, um effiziente Lösungen zu ermöglichen.

Bislang ist immer von dem Erhalt des gegenwärtigen Schutzstandards ausgegangen worden. Bisher ist eine solche Entscheidung politisch noch nicht getroffen worden. Daher ist es sinnvoll darüber hinausgehend zu prüfen, ob es sinnvoll ist, für die Formulierung des Anpassungszieles ein davon abweichendes Ausmaß des Schutzes anzustreben. Sind unterschiedliche Schutzmaßnahmen möglich, kann die Vorteilhaftigkeit aller einzelnen oder kombinierter Schutzmaßnahmen nach obigem Schema ermittelt werden. Die Möglichkeiten der Anpassung müssen dann gegeneinander abgewogen werden. Dies kann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

1. Nutzen-Kosten-Differenz: Für jede Maßnahme(nkombination) wird der Überschuss des Nutzens über die Anpassungskosten berechnet. Ausgewählt wird diejenige Maßnahme(nkombination), die den größten Überschuss aufweist.
2. Nutzen-Kosten-Relation: Für jede Maßnahme(nkombination) wird der Quotient aus Nutzen und Anpassungskosten berechnet. Ausgewählt wird diejenige Maßnahme(nkombination), die den größten Quotienten aufweist.

In Entscheidungssituationen, in denen zwischen unterschiedlichen, miteinander kombinierbaren Maßnahmen bei einem begrenzten Budget ausgewählt werden soll, werden die Maßnahmen mit den höchsten Nutzen-Kosten-Relationen ausgewählt.<sup>15</sup> Dadurch ist gewährleistet, dass die ausgewählte Lösung den höchsten Nutzen je eingesetzten Euro aufweist. Sofern sich Maßnahmen gegenseitig ausschließen, ist das erste Kriterium der Nutzen-Kosten-Differenz heranzuziehen.<sup>16</sup>

In der Praxis existieren zudem zahlreiche Fälle, in denen der Nutzen exogen vorgegeben wird, so etwa indem gesetzlich ein Schutzniveau verpflichtend festgelegt wird. Diese Vorgabe kann über explizite Gesetze erfolgen oder im Zuge der richterlichen Praxis (zum Beispiel als „Stand der Technik“) etabliert werden. In diesem Fall eines normativ festgelegten Nutzens reduziert sich die Abwägung auf die Suche nach der Minimalkostenlösung:

3. **Minimalkosten:** Es wird diejenige Maßnahme(nkombination) ausgewählt, die das (normativ) vorgegebene Schutzniveau zu den geringsten Anpassungskosten erreicht.

Mathematisch stellt dieses Kriterium eine Sonderform der ersten beiden dar, da hier von einem fixen Nutzen (eben dem definierten Schutzniveau) ausgegangen wird.<sup>17</sup> Eine Prüfung der Effizienz dieses Schutzniveaus selbst ist hierbei nicht vorgesehen.

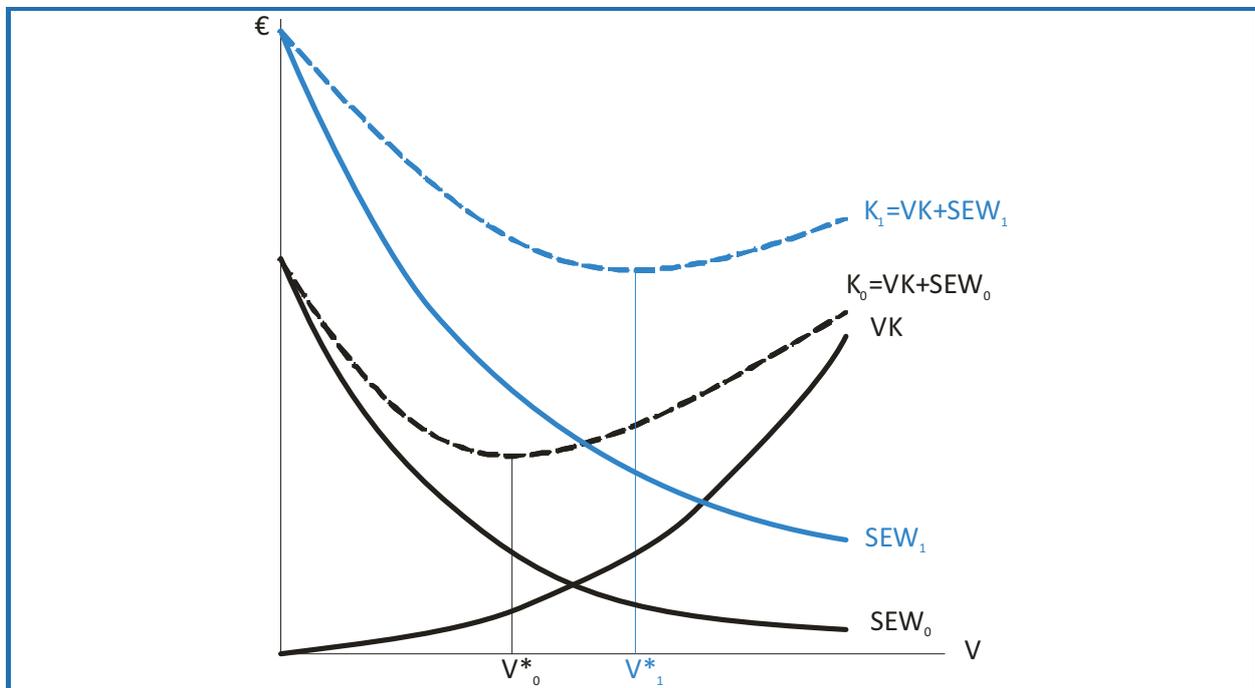


Abbildung 7: Veränderung der optimale Vorsorge

Eine effiziente Anpassung an die Folgen des Klimawandels muss die bereits durchgeführten Vorsorgemaßnahmen mit berücksichtigen. In Abbildung 7 wird die gegenwärtige Situation (ohne Klimawandelfolgen) durch die schwarzen Kurven dargestellt:

- Vorsorgemaßnahmen (V) führen zu überproportional ansteigenden Vorsorgekosten (VK)
- bei degressiv sinkenden Schadenserwartungswerten (SEW<sub>0</sub>).
- Das Minimum der Gesamtkosten (K<sub>0</sub>) stellt das optimale Vorsorgeniveau dar. (V\*<sub>0</sub>).

Durch den Klimawandel, der sich in Zukunft in einem erhöhten Schadenserwartungswert bei gleichbleibender Vorsorge zeigt, wird durch die blauen Kurven dargestellt:

<sup>15</sup>; Vgl. Hanusch, H. (2011), S. 122f.; BMVBW (2005), S. 37-40.

<sup>16</sup> Vgl. Hanusch, H. (2011), S. 125.

<sup>17</sup> Vgl. LAWA (2005), Kap. 2.

- Die Kurve der zukünftigen Schadenserwartungswerte ( $SEW_1$ ) liegt über den bisherigen Erwartungswerten ( $SEW_0$ ) und
- die Gesamtkosten ( $K_1$ ) führen in ihrem Minimum zu einem neuen optimalen Vorsorgelevel ( $V_1^*$ ).

Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels werden aber immer auf bereits bestehende Vorsorgemaßnahmen aufbauen und so das Vorsorgelevel verändern. Unter Berücksichtigung eines bereits bestehenden Vorsorgelevels von  $\bar{V}$  ergibt sich in Abbildung 8 durch die Folgen des Klimawandels zunächst eine Zunahme des Schadenserwartungswertes von  $\Delta SEW_{A=0}$ . Zusätzliche Anpassungsmaßnahmen, die das Vorsorgelevel erhöhen, führen einerseits zu einer Senkung des Schadenserwartungswertes ( $-\Delta SEW_1$ , grün schraffierte Fläche), andererseits zu Anpassungskosten, da die Vorsorgemaßnahmen ausgeweitet werden (AK; rot schraffierte Fläche).

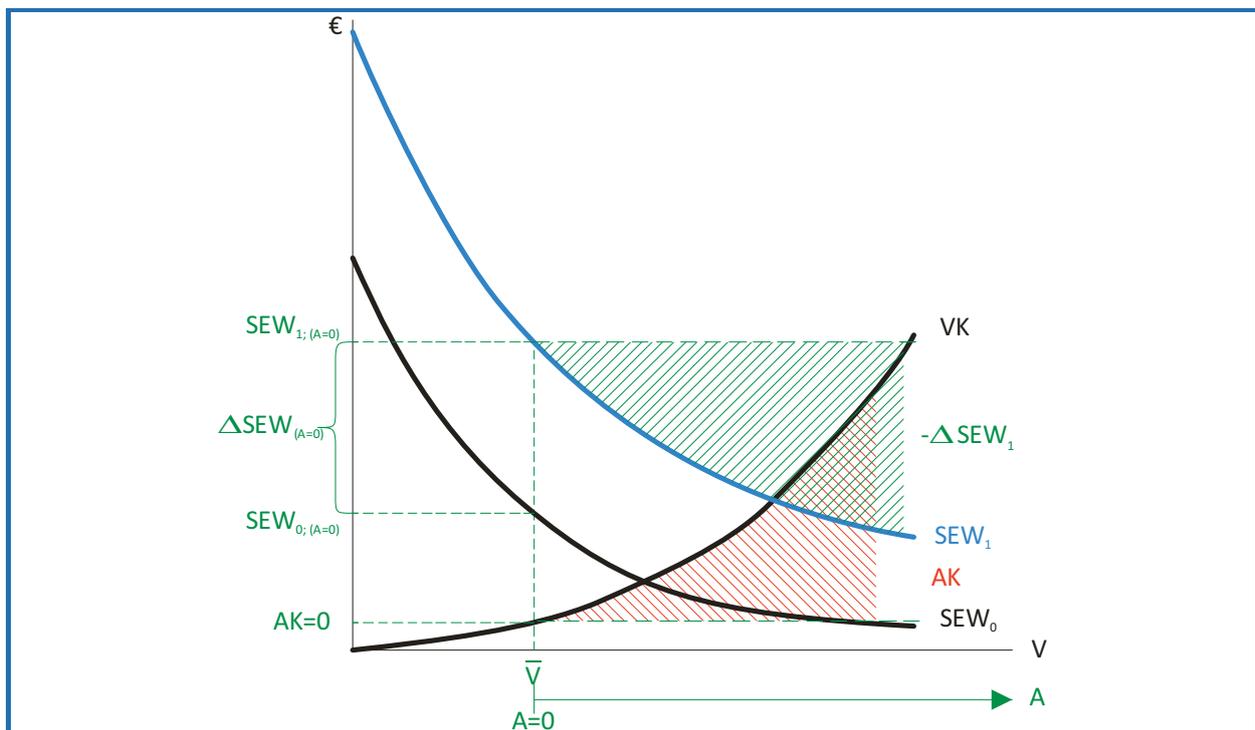


Abbildung 8: Wirkung von Anpassungsmaßnahmen

Idealerweise ist das optimale Niveau der Anpassung zu bestimmen. Entsprechend des ersten Bewertungskriteriums – der Nutzen-Kosten-Differenz – ist das bei einem maximalen Überschuss des Nutzens über die Kosten gegeben. In dem aus Abbildung 8 abgeleiteten vereinfachten Modell der Abbildung 9 kann dies folgendermaßen beschrieben werden:

- Als Nutzen wurde der eingesparte Schadenserwartungswert ( $-\Delta SEW_1$ ) und
- als Kosten die in Annuitäten umgewandelten Anpassungskosten (AK) definiert.
- Mit zunehmenden Anpassungsmaßnahmen (A)
- steigen sowohl der eingesparte Schadenserwartungswert als auch die Anpassungskosten.
- Der Anstieg des eingesparten Schadenserwartungswertes wird mit zunehmenden Anpassungsmaßnahmen immer geringer,
- der der Anpassungskosten immer größer.

In Abbildung 9 zeigen die Kurven des eingesparten Schadenserwartungswertes und der Anpassungskosten den beschriebenen Verlauf. Da zunächst die wirksamsten Maßnahmen ergriffen werden, führt

eine zusätzliche Anpassungsaktivität zu einem starken Rückgang des Schadenserwartungswertes und nur zu geringen Anpassungskosten. Mit zunehmenden Anpassungsanstrengungen kehrt sich diese Relation um.

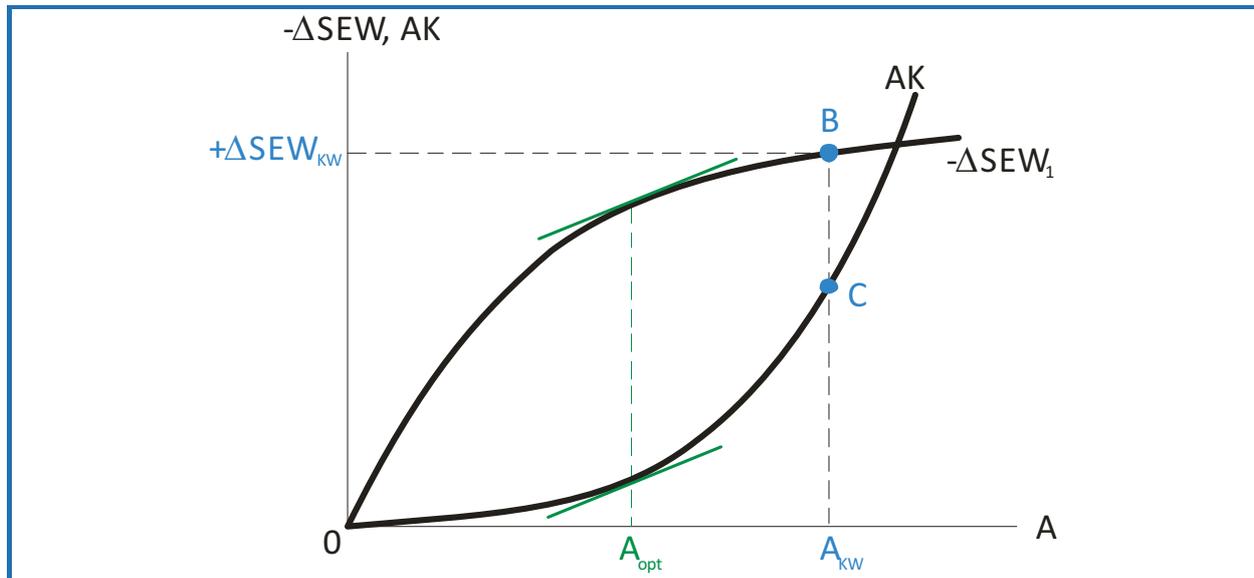


Abbildung 9: Bewertung von Anpassungsmaßnahmen

Ausgehend von dem gegenwärtigen Vorsorge- und damit Schutzniveau führt das Klimasignal zu einem Anstieg des Schadenserwartungswertes, der in der Abbildung 9 mit  $+\Delta SEW_{KW}$  angegeben ist. Um den gegenwärtigen Schutz beizubehalten, sind Anpassungsmaßnahmen im Umfang von  $A_{KW}$  erforderlich. Diese Anpassung ist in dem gewählten Beispiel sinnvoll, da der Nutzen aus dem zusätzlichen Schutz (Punkt B) größer ist als die dafür aufzuwendenden Anpassungskosten (Punkt C).

Ein solcher Vergleich gibt zwar Auskunft darüber, ob es besser ist, die Anpassungsmaßnahmen im Umfang von  $A_{KW}$  durchzuführen oder nicht, es ist aber keine Aussage darüber möglich, ob es sich dabei um die *optimale* Anpassung handelt. Vorweg wird normativ festgelegt, dass das gegenwärtige Schutzniveau beibehalten werden soll. Optimal wäre in der Abbildung 9 dagegen ein Anpassungsniveau in Höhe von  $A_{opt}$ , da hier der Überschuss des eingesparten Schadenserwartungswertes gegenüber den Anpassungskosten maximiert wird. Grundsätzlich basieren aber alle diese Überlegungen auf dem gegebenen Schutzstandard ohne zu hinterfragen, ob dieser als optimal oder als suboptimal anzusehen ist. Diese Frage muss für die Region separat gestellt werden.

Für die vorliegende Untersuchung wird vereinfachend davon ausgegangen, dass bezüglich der Anpassung an die Folgen des Klimawandels lediglich eine dichotome Entscheidung zwischen: (a) Es wird keine Anpassung erfolgen oder (b) das gegenwärtige Schutzniveau soll auch in Zukunft erreicht werden erfolgt. Damit entfallen (zunächst) die Varianten, die ein zu variierendes Schutzniveau betreffen. Dies wird Gegenstand zukünftiger Untersuchungen im Rahmen von *dynaklim* sein.

### 3 Relevante Bereiche

Bei der Betrachtung der Datenlage für die oberirdischen Gewässer ist zwischen den Haupt- und Nebenläufen zu unterscheiden. Für Hauptläufe wurden in Umsetzung des §31d WHG a.F. Hochwasseraktionspläne erstellt. Für die Nebenläufe ist dies bisher nicht der Fall. Ihre Hochwasserrisiken werden gegenwärtig zur Umsetzung der EU-HWRM-RL untersucht; aktuell sind die potenziell hochwasserge-

fährdeten Gewässer nach § 112 (2) LWG-NW bestimmt.<sup>18</sup> Die Hauptläufe der Lippe und der Emscher gelten als hochwassergefährdet. Die relevanten Gewässer sind in Abbildung 10 dargestellt.



Abbildung 10: Relevante Haupt- und Nebenläufe der oberirdischen Fließgewässer

Für die Hauptläufe der in dieser Untersuchung relevanten Flüsse Emscher und teilw. Lippe kann auf die bereits bestehenden Hochwasseraktionspläne zurückgegriffen werden.<sup>19</sup> Beide wurden unter Beteiligung der Emschergenossenschaft/Lippeverband durch das Ingenieurbüro Hydrotec erarbeitet.

### 3.1 Emscher

Die Hochwasserabflüsse wurden anhand historischer Niederschlagsereignisse mithilfe extremwertstatistischer Verfahren geschätzt und die entsprechenden Jährlichkeiten und Abflussmengen ermittelt. Die Überflutungsgebiete wurden mithilfe geeigneter GIS-Verfahren und regionalen Daten durch ein hydraulisches 1D- bzw. 2D-Modell bestimmt.<sup>20</sup> Die 2D-Modellierung wird für ein Sonderszenario verwendet, das die Besonderheiten der bergbaulichen Tradition und ihrer Folgen im Ruhrgebiet berücksichtigt. Durch die Folgen des Bergbaus sind Teile des Ruhrgebiets abgesunken und bilden entsprechende Bergsenkungsgebiete, die unterhalb der Fließgewässer liegen. Zum Schutz dieser Gebiete sind die Flüsse eingedeicht. Das Sonderszenario betrachtet den Fall, dass diese Deiche infolge von Hochwasserereignissen versagen und die Bergsenkungsgebiete entsprechend geschädigt werden (potenzielle Überflutungsgebiete).

Für die Berechnung der jeweiligen ereignisspezifischen Schäden ( $HW_{100}$ ,  $HW_{200}$ ,  $HW_{\text{extrem}}$ )<sup>21</sup> wurden im HWAP Emscher geeignete Karten zur Flächennutzung erstellt. Sie unterscheiden jeweils potenziell gefährdete Objekte und Flächen.<sup>22</sup> Zugleich wurden für die jeweiligen Objektarten bzw. Flächen

<sup>18</sup> Vgl. MUNLV (2010).

<sup>19</sup> Vgl. Emschergenossenschaft (o.J.a); Hydrotec (2002a).

<sup>20</sup> Vgl. Emschergenossenschaft (o.J.b).

<sup>21</sup> Durch das Modell HWS-GIS des Büros Hydrotec

<sup>22</sup> Vgl. Emschergenossenschaft; Hydrotec (2004).

Schadensfunktionen aus vorhandenen Studien und durch Befragungen ergänzt. In den Funktionen ist berücksichtigt, dass

- Schäden allein aus der Überflutungshöhe entstehen<sup>23</sup>,
- zum Teil ein Schaden erst ab einer bestimmten Überflutungshöhe entsteht (Schwelle z.B. bei Gebäuden, KFZ),
- für manche Nutzungsarten die Überflutungshöhe keinen Einfluss auf die Schadenshöhe hat sondern lediglich die Information, ob eine Überflutung vorliegt oder nicht, relevant ist,
- bei Überflutungen von Gewerbeobjekten neben direkten Schäden (Gebäude, Inventar) auch indirekte Schäden durch Produktionsausfälle entstehen,
- bei Großereignissen zusätzliche Kosten entstehen, die nicht einem Objekt zugeordnet werden können (z.B. Aufräumarbeiten nach Überschwemmungen) und
- alle Werte zum Preisstand des Jahres 2001 umgerechnet werden.

### 3.2 Lippe

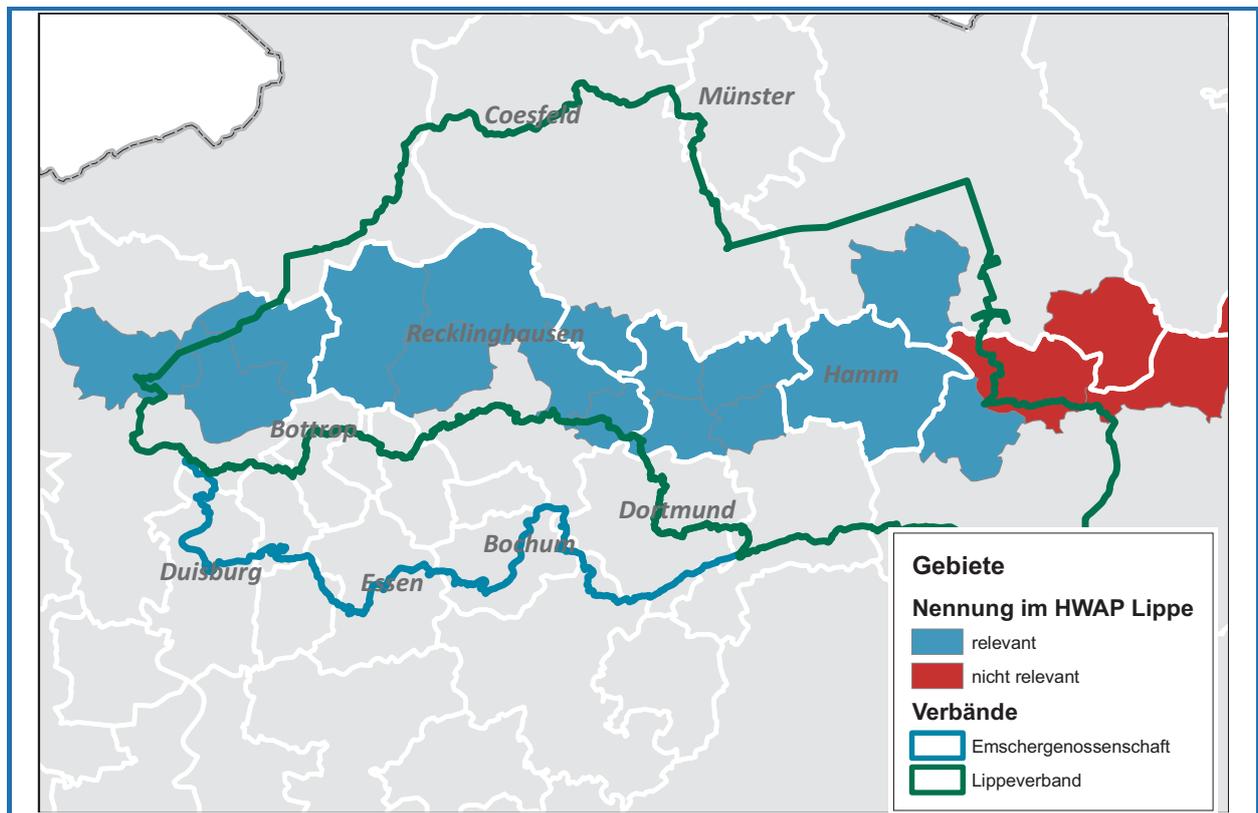


Abbildung 11: Schadensberechnungen im HWAP Lippe

Grundlage für die Abflussmengen an der Lippe ist die Auswertung der Pegelstatistiken. Die hierdurch ermittelten Hochwasserereignisse wurden mithilfe hydraulischer Modelle (1D- und 2D-Modelle), der Verwendung von Bemessungsregen im Zuge eines Niederschlag-Abfluss-Modells und der Auswertung regionalisierter Hochwasserhäufigkeiten in Überflutungsgebiete überführt.<sup>24</sup> Für den Bereich von Bad Lipspringe bis Hamm-Heessen wurden die Hochwässer mit den Jährlichkeiten 5, 10, 20, 50, 100 und

<sup>23</sup> Die Fließgeschwindigkeit bei Überflutungen wird außer Acht gelassen.

<sup>24</sup> Vgl. Hydrotec (2001).

250 berechnet. Für den unteren Teil der Lippe (Hamm-Heessen bis zur Mündung in den Rhein) die Jährlichkeiten 5, 10, 25, 100 und 250. Die im HWAP Lippe betrachteten Gemeinden und Städte, die für die vorliegende Studie relevant sind, werden in Abbildung 11 dargestellt. Ansonsten gelten für die Berechnung der Schäden im Zuge des Hochwasseraktionsplans Lippe dieselben Annahmen wie für den Hochwasseraktionsplan Emscher (Kapitel 3.1).

## 4 Erwartungsschäden

### 4.1 Emscher

Die Emscher ist in allen Bereichen des Hauptlaufs bis zum HQ<sub>100</sub> überflutungssicher bzw. wird bis für dieses Schutzniveau ausgebaut.<sup>25</sup> Die Hochwasserschwelle liegt daher bei einer Jährlichkeit von 100 Jahren. Die Erwartungsschäden für die Überflutungsgebiete werden im HWAP Emscher in zwei Teilabschnitten untersucht und die Ergebnisse entsprechend in Tabelle 5 angegeben. Dabei werden die Schadenserwartungswerte anhand des Verbraucherpreisindex auf den Preisstand von 2010 angepasst.<sup>26</sup>

**Tabelle 5: Aktueller Schadenserwartungswert im Überflutungsgebiet Emscher**

<b>Emscher</b>					
<b>Emscher Oberlauf</b>					
a	F	S	dF	MW(S)	SEW
100	0,99	158.418.540	-	-	-
unendl.	1	158.418.540	0,01	158.418.540	1.584.185
				<b>Summe</b>	<b>1.584.185</b>
<b>Emscher DO-Deusen bis Dinslaken</b>					
a	F	S	dF	MW(S)	SEW
100	0,99	0	-	-	-
200	0,995	1.553.729	0,005	776.865	3.884
500	0,998	6.360.328	0,003	3.957.029	11.871
unendl.	1	6.360.328	0,002	6.360.328	12.721
				<b>Summe</b>	<b>28.476</b>
<b>Emscher ÜFG insg.</b>					<b>1.612.661</b>

*Quelle: Emschergenossenschaft (2004), eigene Berechnungen.*

Das Sonderszenario der potenziellen Überflutungsflächen berücksichtigt den Fall, dass die Schutzdeiche der Emscher versagen und brechen. Hierdurch würden großflächige Bergsenkungsgebiete geflutet. Im HWAP Emscher werden 32 dieser Gebiete untersucht. Die Schadensereignisse bei den potenziellen Überflutungsgebieten sind – im Gegensatz zu den Überflutungsgebieten – statistisch nicht voneinander unabhängig: Wenn ein Deich bricht, führt dies zu einer zügigen entlastenden Wirkung auf die anderen Deiche. Deren Versagenswahrscheinlichkeit nimmt dann rapide ab. Da die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Deichabschnitte somit statistisch nicht voneinander unabhängig sind, kann für den Fall von Hochwasserereignissen für die potenziellen Überflutungsgebiete kein gesamter Schadenserwartungswert berechnet werden. In Tabelle 6 werden die zum Preisstand

<sup>25</sup> Vgl. Emschergenossenschaft (2004).

<sup>26</sup> Vgl. Destatis (2012).

2010 umgerechneten Schadenserwartungswerte für die jeweiligen potenziellen Überflutungsflächen angegeben.

**Tabelle 6: Aktuelle Schadenserwartungswerte in den potenziellen Überflutungsgebieten der Emscher**

<b>Emscher pot. ÜFG</b>				
<b>a</b>	100	200	unendl.	
<b>F</b>	0,99	0,995	1	
<b>Stadt / Gemeinde</b>	<b>S[100]</b>	<b>S[200]</b>	<b>S[unendl.]</b>	<b>SEW</b>
	[T EUR]	[T EUR]	[T EUR]	[EUR]
Dortmund (Deusen)	39.127	41.026	41.026	405.510
Dortmund (Kleingartenanlage)	468	598	598	5.653
Castrop-Rauxel	0	0	0	0
Recklinghausen	0	0	0	0
Herne (Waldfriedhof)	643	684	684	6.735
Herne (Herne Nord/ Schalke)	104.498	115.679	115.679	1.128.838
Herten (Waldfriedhof)	2.249	2.390	2.390	23.544
Gelsenkirchen (Herne Nord/ Schalke)	128.221	146.160	146.160	1.416.756
Gelsenkirchen (Waldfriedhof)	3	3	3	34
Gelsenkirchen (Resser Mark)	14.979	17.128	17.128	165.904
Gelsenkirchen (Erle)	586.166	682.086	682.086	6.581.059
Gelsenkirchen (Horst)	321.179	340.767	340.767	3.358.700
Gelsenkirchen (Karnap)	387.819	401.148	401.148	3.978.159
Gelsenkirchen (Insel)	50.731	75.670	75.670	694.355
Gladbeck (Karnap)	20.892	22.516	22.516	221.100
Essen (Insel)	85.110	109.042	109.042	1.030.588
Essen (Boye)	0	1	1	9
Essen (Karnap)	242.821	253.425	253.425	2.507.741
Bottrop (Boye)	48.650	59.768	59.768	569.882
Bottrop (Insel)	88.630	106.855	106.855	1.022.985
Oberhausen (Insel)	1.484	2.423	2.423	21.880
Oberhausen (Alte/ Kleine Emscher)	301.243	315.195	315.195	3.117.070
Oberhausen (Schwarze Heide)	156.960	261.233	261.233	2.351.644
Oberhausen (Nassenkampgraben)	0	0	0	0
Duisburg (Alte/ Kleine Emscher)	437.155	493.564	493.564	4.794.617
Dinslaken (Schlagregenshof)	1	2	2	20
Dinslaken (Averbruch)	30.508	50.713	50.713	456.618
Dinslaken (B8)	113	147	147	1.383
Dinslaken (Pflipsenhof)	0	1	1	9
Dinslaken (Am Birnbaum)	1.606	2.135	2.135	20.031
Dinslaken (Eppinghoven)	70	94	94	879
Dinslaken (Stapp)	27	33	33	318

Quelle: Emschergenossenschaft (2004), eigene Berechnungen.

## 4.2 Lippe

Für die Berechnung der Hochwasserschäden für die relevanten Jährlichkeiten wurden die Hochwasser betroffenen Objekte mithilfe mikro- und mesoskaliger Daten bestimmt. In Teilen wurden die Daten durch Begehungen überprüft und aktualisiert. Die Schadensfunktionen und Schadenshöhen wurden aus anderen Studien übernommen und durch Befragungen ergänzt sowie auf den Preisstand von 2001 hochgerechnet.<sup>27</sup> Der Detailgrad und die Vorgehensweise entspricht im Wesentlichen dem der Erstellung des HWAP Emscher. Die Ergebnisse für die im Gebiet des Lippeverbandes liegenden Gemeinden und Städte werden in Tabelle 7 dargestellt. Die Schadenserwartungswerte sind auf den Preisstand von 2010 umgerechnet.

**Tabelle 7: Aktueller Schadenserwartungswert im Überflutungsgebiet Lippe (im Lippeverbandsgebiet gelegen)**

<b>Lippe</b>						
<b>Lippe a</b>						
a	F	S	dF	MW(S)	SEW	
5	0,8	2.169.235	-	-	-	
10	0,9	4.081.945	0,1	3.125.590	312.559	
25	0,96	6.280.702	0,06	5.181.324	310.879	
100	0,99	15.080.174	0,03	10.680.438	320.413	
250	0,996	20.831.640	0,006	17.955.907	107.735	
unendl.	1	20.831.640	0,004	20.831.640	83.327	
				<b>Summe</b>	<b>1.134.914</b>	
<b>Lippe b</b>						
a	F	S	dF	MW(S)	SEW	
5	0,8	774.207	-	-	-	
10	0,9	1.162.150	0,1	968.179	96.818	
20	0,95	2.170.942	0,05	1.666.546	83.327	
50	0,98	2.675.125	0,03	2.423.034	72.691	
100	0,99	3.833.947	0,01	3.254.536	32.545	
250	0,996	4.970.298	0,006	4.402.123	26.413	
unendl.	1	4.970.298	0,004	4.970.298	19.881	
				<b>Summe</b>	<b>331.675</b>	
<b>Lippe</b>					<b>1.466.589</b>	

Quelle: Hydrotec (2002b), eigene Berechnungen.

Neben einer Berechnung der Hochwasserschäden in den Überflutungsgebieten der Lippe wurden (analog zum Vorgehen beim HWAP Emscher) potenzielle Überflutungsgebiete untersucht. Hier treten Schäden dann auf, wenn Hochwasserschutzanlagen versagen.<sup>28</sup> Für diese Gebiete wird der Schaden anhand des 100-jährigen Hochwassers berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

<sup>27</sup> Vgl. Hydrotec (2002a), S. 62.

<sup>28</sup> Vgl. Hydrotec (2002a), S. 27.

**Tabelle 8: Aktuelle Schadenserwartungswerte in den potenziellen Überflutungsgebieten der Lippe (im Lippeverbandsgebiet gelegen)**

<b>Lippe pot. ÜFG</b>				
<b>a</b>		100	unendl.	
<b>F</b>		0,99	1	
<b>Stadt/ Gemeinde</b>	<b>pot. ÜFG</b>	<b>S[100]</b>	<b>S[unendl.]</b>	<b>SEW</b>
		[T EUR]	[T EUR]	[EUR]
Hamm	Heessen	229.067	229.067	2.290.668
	Hövel	84.578	84.578	845.781
	Kläranlage	622	622	6.217
Werne	Hövel	0	0	1
Bergkamen	Rünthe	6.226	6.226	62.264
Lünen	Lünen	15.104	15.104	151.045
	Beckinghausen	8.104	8.104	81.041
	Nordlünen/Lippolthausen	338	338	3.378
Haltern	Lippramsdorf	25.139	25.139	251.390
Marl	Sickingmühle	119	119	1.191
	Lippramsdorf	704	704	7.042
Dorsten	Dorsten	15.513	15.513	155.132
	Hervest	4.769	4.769	47.688
	Holsterhausen	217.385	217.385	2.173.847
Wesel	Fusternberg	1	1	9

Quelle: Hydrotec (2002b), eigene Berechnungen.

## 5 Änderung der Schadenserwartungswerte

Mithilfe der kalkulierten neuen Jährlichkeiten der Niederschlagsereignisse (Tabelle 4) infolge des Klimawandels können die Berechnungen analog zu den Hochwasseraktionsplänen für die CLM-Läufe durchgeführt werden. Analog zur Tabelle 5 können die Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Emscher mit den Jährlichkeiten der CLM-Läufe für die nahe Zukunft bestimmt werden.

**Tabelle 9: Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Emscher (Hauptlauf; nahe Zukunft)**

<b>Messreihe</b>	<b>Schadenserwartungswert (in € p.a.)</b>	<b>Zunahme (in € p.a.)</b>
Referenzperiode	1.612.661	-
CLM1	4.338.990	+2.726.329
CLM2	3.382.940	+1.770.278

Analog zum Vorgehen bei der Berechnung der projizierten Niederschlags-Wiederkehrzeiten und der daraus resultierenden Änderung der Schadenserwartungswerte für die Überflutungsgebiete an der Emscher können auch für die relevanten Gemeinden an der Lippe die Änderungen der Schadenserwartungswerte bestimmt werden. Auch hier werden die Änderungen der bisher maximal 100-jährlichen Ereignisse berücksichtigt.

**Tabelle 10: Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Lippe (Hauptlauf; nahe Zukunft)**

Messreihe	Schadenserwartungswert (in € p.a.)	Zunahme (in € p.a.)
Referenzperiode	1.466.589	-
CLM1	2.669.404	+1.202.815
CLM2	2.338.596	+872.007

## 6 Barwert der Schadenserwartungswerte

Eine Anpassungsmaßnahme, die den Entwässerungskomfort der Referenzperiode auch für die nahe Zukunft aufrechterhält, führt dazu, dass die Zunahme der Schadenserwartungswerte gerade **nicht** eintritt. Dies stellt nach Kapitel 2.5 den jährlichen Nutzen der Anpassungsmaßnahme dar, der nach den in Kapitel 2.4 angegebenen Berechnungsverfahren in einen Barwert des Nutzens überführt werden kann. Dabei wird angenommen, dass das Ziel der Beibehaltung des Entwässerungskomforts durch eine Anpassung des technischen Hochwasserschutzes erfolgt, wodurch alternative Anpassungsmaßnahmen bei Bürgern oder Unternehmen außer Acht gelassen werden. Die Nutzungsdauern der Anlagen des technischen Hochwasserschutzes werden bei Deichen mit bis zu 100 Jahren angesetzt.<sup>29</sup> Der Kalkulationszinssatz wird mit 3% angesetzt.<sup>30</sup> Der Barwert der Schadenserwartungswerte und die Änderung der Barwerte der Schadenserwartungswerte durch das Klimasignal für die Emscher sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

**Tabelle 11: Barwert der Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Emscher (Hauptlauf; nahe Zukunft)**

Messreihe	Barwert des Schadenserwartungswertes [100 a] (in €)	Zunahme des Barwertes (in €)
Referenzperiode	50.958.337	-
CLM1	137.107.346	+86.149.009
CLM2	106.897.195	+55.938.858

Entsprechend der in Kapitel 2.5 dargestellten Abwägung ist eine Anpassungsmaßnahme an der Emscher, die den Entwässerungskomfort der Referenzperiode aufrechterhält, dann sinnvoll, wenn sie (ohne Berücksichtigung der Kosten für den laufenden Betrieb oder Grunderwerb) maximal 86,1 Mio. € (CLM1) bzw. 55,9 Mio. € (CLM2) an Investitionskosten beträgt. In Abhängigkeit von den tatsächlich durchgeführten Maßnahmen muss ggf. ein Abschlag für die Betriebskosten vorgenommen werden.

Analog zu den Berechnungen für den Hauptlauf der Emscher können für die Schadenserwartungswerte und deren Zunahme an der Lippe die Barwerte bestimmt werden. Entsprechend der in Kapitel 2.5 dargestellten Abwägung ist eine Anpassungsmaßnahme an der Lippe, die den Entwässerungskomfort der Referenzperiode aufrechterhält, dann sinnvoll, wenn sie (ohne Berücksichtigung von Kosten für den laufenden Betrieb oder Grunderwerb) maximal 38,0 Mio. € (CLM1) bzw. 27,5 Mio. € (CLM2) an Investitionskosten beträgt.

<sup>29</sup> Vgl. LAWA (2005), S. Anl. 1-3. Es wird die obere Grenze des dort angegebenen Bereichs von 80-100 Jahren Nutzungsdauer angesetzt.

<sup>30</sup> Vgl. LAWA (2005), S. 4-3. Dieser wird beispielsweise auch für öffentliche Infrastrukturinvestitionen in Verkehrswege angesetzt; vgl. BMVBW (2005), S. 35.

**Tabelle 12: Barwert der Schadenserwartungswerte der Überflutungsgebiete der Lippe (Hauptlauf; nahe Zukunft)**

Messreihe	Barwert des Schadenserwartungswertes [100 a] (in €)	Zunahme des Barwertes (in €)
Referenzperiode	46.342.608	-
CLM1	84.350.254	+38.007.645
CLM2	73.897.086	+27.554.477

## 7 Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung gibt Auskunft über zusätzliche Hochwasserrisiken, die aufgrund des Klimawandels in der *dynaklim*-Projektregion zu erwarten sind. Für den projektrelevanten Bereich der Lippe und der Emscher wurden auf der Basis bestehender Hochwasseraktionspläne unter Annahme häufigerer Hochwasserereignisse die zusätzlichen Schäden und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten kalkuliert. Unabhängig vom Klimaszenario (CLM 1 oder 2 in Tabelle 13) nehmen die Schadenserwartungswerte (SEW) ohne Anpassungsmaßnahmen deutlich zu. Werden Anpassungsmaßnahmen ergriffen, geht damit ein Nutzen einher, weil die erwarteten Schäden weniger stark ansteigen oder ganz vermieden werden. In welchem Umfang Anpassungsmaßnahmen effizient sind, ergibt sich aus einer Gegenüberstellung von Nutzen und Kosten. Die Summierung der vermiedenen erwarteten Schäden über eine plausible Nutzungsdauer von technischen Hochwasserschutzeinrichtungen (hier: 100 Jahre) gibt die Obergrenze des Barwertes der ökonomisch als sinnvoll anzusehenden Anpassungskosten an. Diese Kosten werden im weiteren Verlauf des *dynaklim*-Projektes durch ingenieurtechnische Forschungen ermittelt werden.

**Tabelle 13: Zusammenfassung der Ergebnisse**

Gegenstand	CLM	SEW <sub>aktuell</sub>	SEW <sub>CLM</sub>	Nutzen: $\Delta$ SEW	Barwert des Nutzens [100 a]	Anpassungskosten
Emscher (Hauptlauf)	CLM1	1.612.661	4.338.990	+2.726.329	+86.149.009	
	CLM2		3.382.940	+1.770.278	+55.938.858	
Lippe (Hauptlauf)	CLM1	1.466.589	2.669.404	+1.202.815	+38.007.645	
	CLM2		2.338.596	+872.007	+27.554.477	

Nicht untersucht wurden weitere Bereiche, die ebenfalls zu Schäden durch „Zu viel Wasser“ führen können: Hochwasser an den Nebenläufen der großen Flüsse Emscher und Lippe, die Überflutung durch die Siedlungsentwässerung infolge von Starkregen oder Rückstau und die Schäden durch einen möglichen Anstieg des Grundwasserspiegels, was in den durch Bergsenkung betroffenen Gebieten in der Projektregion von Bedeutung sein könnte. Für die hier erforderlichen Berechnungen des Nutzens liefert die vorliegende Studie aber ein ökonomisches Bewertungsschema.

Offen bleibt auch nach ermittelten Anpassungskosten die Frage, ob die Region Anpassungsmaßnahmen für eine vollständige Vermeidung zusätzlicher Hochwasserrisiken aufgrund des Klimawandels vornehmen und wie sie diese finanzieren möchte. Alternativ könnte das Ziel einer teilweisen Anpassung an Klimawandelfolgen ökonomisch effizienter sein. Um hier zu einem Ergebnis zu kommen, sind die Kosten begrenzter Anpassungsmaßnahmen dem damit verbundenen Nutzen gegenüber zu stellen. Für den dann verbleibenden Anstieg des Hochwasserrisikos müsste die Frage nach der Lastenverteilung in der Region beantwortet werden.

## LITERATURVERZEICHNIS

- Bartels, Hella u.a. (2005): 'KOSTRA-DWD-2000. Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2000). Fortschreibungsbericht', URL: [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU4/HM/Neuigkeiten/fortschreibungsbericht\\_\\_pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/fortschreibungsbericht\\_\\_pdf.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU4/HM/Neuigkeiten/fortschreibungsbericht__pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/fortschreibungsbericht__pdf.pdf), 21.12.2005, gepr. am 17.07.2012.
- Beyene, M. (2001): Hochwasserschadenspotenziale, Düsseldorf.
- Björnsen Beratende Ingenieure GmbH (o.J.): 'Kalypso. Ein Modellsystem für die Wasserwirtschaft', URL: <http://kalypso.bjoernsen.de/>, gepr. am 27.08.2011.
- BMVBW (2005): 'Bundesverkehrswegeplan 2003. Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik', URL: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/78638/publicationFile/50908/bundesverkehrswegeplan-2003-bewertungsmethodik.pdf>, 08.02.2012, gepr. am 06.05.2012.
- Busse von Colbe, Walther; Lassmann, Gert (1986): Investitionstheorie (Springer-Lehrbuch), 2., rev. u. erw. Aufl. Aufl., Berlin.
- de Moel, H.; Aerts, J. C. J. H. (2011): 'Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates', in: *Natural Hazards*; Nr. 58, H. 1, S. 407–425.
- Deltares (2012): 'Delft-FLS. Delft flooding system - 2D hydrodynamic simulation', URL: <http://www.wldelft.nl/soft/fls/int/index.html>, gepr. am 19.07.2012.
- Destatis (2012): 'GENESIS-Online: Ergebnis - 61111-0001', URL: [https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=A0E7D4899A76876150A36DA82D81F8F9.tomcat\\_GO\\_1\\_2?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1342705798612&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=61111-0001&auswahltext=&werteabruf=Werteabruf](https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=A0E7D4899A76876150A36DA82D81F8F9.tomcat_GO_1_2?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1342705798612&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=61111-0001&auswahltext=&werteabruf=Werteabruf), 19.07.2012, gepr. am 19.07.2012.
- DVWK - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1985): Ökonomische Bewertung von Hochwasserschutzwirkungen. Arbeitsmaterialien zum method. Vorgehen (Mitteilungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V; Nr. 10), Bonn.
- EmscherGenossenschaft (o.J.a): 'Hochwasser-Aktionsplan Emscher', URL: <http://www.eglv.de/wasserportal/flussgebietsmanagement/hochwasserschutz/hochwasseraktionsplan-emscher.html>, gepr. am 19.07.2012.
- EmscherGenossenschaft (o.J.b): 'Hochwasseraktionsplan Emscher: Allgemeine Hinweise', URL: <http://www.eglv.de/wasserportal/flussgebietsmanagement/hochwasserschutz/hochwasseraktionsplan-emscher/hochwasserschutzhochwassergefaehrdung/allgemeine-hinweise.html>, gepr. am 19.07.2012.
- EmscherGenossenschaft (2004): 'Hochwasseraktionsplan Emscher: Schäden je Stadt', URL: [http://www.eglv.de/fileadmin/EmscherGenossenschaft/2.3\\_Flussgebietsmanagement/Karten\\_Anlage/Schaeden\\_je\\_Stadt\\_und\\_Gesamtschaeden/schaden\\_gemeinden.pdf](http://www.eglv.de/fileadmin/EmscherGenossenschaft/2.3_Flussgebietsmanagement/Karten_Anlage/Schaeden_je_Stadt_und_Gesamtschaeden/schaden_gemeinden.pdf), 11.11.2004, gepr. am 19.07.2012.
- EmscherGenossenschaft; Hydrotec (2004): 'Hochwasseraktionsplan Emscher: Methodik der Schadensermittlung', URL: [http://www.eglv.de/fileadmin/EmscherGenossenschaft/2.3\\_Flussgebietsmanagement/Karten\\_Anlage/Methodik\\_der\\_Schadensermittlung/methodik\\_schadensermittlung.pdf](http://www.eglv.de/fileadmin/EmscherGenossenschaft/2.3_Flussgebietsmanagement/Karten_Anlage/Methodik_der_Schadensermittlung/methodik_schadensermittlung.pdf), 24.11.2004, gepr. am 19.07.2012.
- Hanusch, Horst (2011): Nutzen-Kosten-Analyse (Vahlens-Kurzlehrbücher), 3. Aufl., München.
- Hydrotec (o.J.): 'NASIM - Software für die Hydrologie', URL: <http://www2.hydrotec.de/vertrieb/nasim/>, gepr. am 27.08.2011.
- Hydrotec (2001): 'Hochwasser-Aktionsplan Lippe. Anlage 1.8: Ermittlung und Festsetzung von Überschwemmungsgebieten', URL: [http://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/container/hochwasseraktionsplaene/hwlippe/main/18\\_Anlagen/an\\_1.08\\_\\_hw-gef\\_gebiete/endentwurf\\_uesg\\_nrw.pdf](http://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/container/hochwasseraktionsplaene/hwlippe/main/18_Anlagen/an_1.08__hw-gef_gebiete/endentwurf_uesg_nrw.pdf), 13.06.2002, gepr. am 19.07.2012.

- Hydrotec (2002a): Hochwasser-Aktionsplan Lippe. Grundlagen, Überflutungsgebiete, Schadenspotenzial, Defizite und Maßnahmen. Band I: Bericht und Karten, Aachen.
- Hydrotec (2002b): Hochwasser-Aktionsplan Lippe. Grundlagen, Überflutungsgebiete, Schadenspotenzial, Defizite und Maßnahmen. Anlage 6.2: Schadenspotenzial Kommunen , Aachen.
- Kajüter, Peter (2011): 'Wertorientierte Unternehmensführung', in: Busse von Colbe, Walther u.a. (Hrsg.), *Betriebswirtschaft für Führungskräfte. Eine Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Juristen und Geisteswissenschaftler*. 4. überarb. u. erw. Aufl., Stuttgart, S. 29–47.
- Klijn, Frans u.a. (2007): Overstromingsrisico's in Nederland in een veranderend klimaat. Verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het project Nederland Later (Delft Hydraulics; Q4290), Delft.
- LAWA (2005): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen. (KVR-Leitlinien) (Wasserwirtschaftliche Grundlagen), 7., überarb. Aufl., Berlin.
- MUNLV-Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (2010): Bestimmung der hochwasserbedingt schadensträchtigen Gewässer und Gewässerabschnitte gemäß § 112 Absatz 2 LWG (Gewässerliste). RdErl. d. Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz IV5429037423 v. 27.4.2010 .
- Nichler, Thomas u.a. (2011): 'Risikobewertung von Starkniederschlägen am Beispiel der Stadt Stuttgart', in: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), *Essener Tagung. Tagungsband*, Hennef, S. 57/1-57/17.
- Quirnbach, Markus u.a. (2012 i.E.): Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region. Analysen zu den Parametern Lufttemperatur und Niederschlag (dynaklim Publikation), Hattingen.

**Ansprechpartner**

Jens Hasse  
hasse@fiw.rwth-aachen.de

Birgit Wienert  
wienert@fiw.rwth-aachen.de

**Projektbüro *dynaklim***

Mozartstraße 4  
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 38

***www.dynaklim.de***