

Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Reduktion von Hochwasserschäden im Zusammenspiel von staatlicher und privater Vorsorge“ Eine Fallstudie an der Mulde

vorgelegt von

Sarah Kienzler

Teilnehmerkennzahl: 102847, UNIGIS MSc Jahrgang 2012

begutachtet von

Prof. Dr. Annegret Thieken
(Universität Potsdam)

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Berlin, 30.06.2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis.....	iii
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Forschungsziel, -fragen und -hypothesen.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Forschung.....	6
2.1 Hochwasserrisikomanagement in Deutschland	6
2.1.1 Vom Sicherheitsdenken zur Risikokultur	6
2.1.2 Private Eigenvorsorge	10
2.2 Hochwasserschäden	13
2.2.1 Klassifikation von Hochwasserschäden.....	13
2.2.2 Räumliche Skalen der Schadensabschätzung.....	14
2.2.3 Risikoanalyse	15
3 Das Untersuchungsgebiet: die Mulden.....	23
3.1 Das Einzugsgebiet der Mulden.....	23
3.2 Landnutzung	25
3.3 Klima und Hochwasserentstehung	25
3.4 Technischer Hochwasserschutz.....	27
3.5 Das Untersuchungsgebiet	28
4 Daten und Methoden.....	30
4.1 Technische Gewässerausbauzustände	30
4.1.1 Festgestellter Zustand 2002	32
4.1.2 PLAN-Zustand HWSK	32
4.1.3 Ausbauzustand 2013.....	33
4.2 Niveaus der privaten Eigenvorsorge.....	33
4.3 Modellierung.....	36
4.3.1 Modellbeschreibung	37
4.3.2 Eingangsdaten FLEMOps (Basisvariante).....	40
4.3.3 Eingangsdaten FLEMOps+ (Aufbau-Variante)	41
4.4 Berechnung des jährlichen Schadenserwartungswerts	44
4.4.1 Vorgehensweise zur Berechnung des EAD für den technischen Hochwasserschutz (Referenzzustand)	46

4.4.2	Vorgehensweise zur Berechnung des EAD unter zusätzlicher Berücksichtigung der Eigenvorsorge	46
5	Ergebnisse und Diskussion	47
5.1	Schadensminderung durch technischen Hochwasserschutz ohne Einfluss von privater Eigenvorsorge	47
5.2	Schadensminderung durch technischen Hochwasserschutz und Einfluss von privater Eigenvorsorge	50
5.3	Modellbewertungen	54
6	Fazit und Ausblick	58
	Danksagung	62
	Literaturverzeichnis	63
	Eidesstattliche Erklärung	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Risiko als Produkt der Gefährdung und Vulnerabilität.	15
Abbildung 2: Beispiele von Wasserstands-Schadensfunktionen für den relativen Wohngebäudeschaden.	19
Abbildung 3: Einflussfaktoren auf den Hochwasserschaden in Privathaushalten, eingeteilt nach Einwirkungs- und Widerstandsfaktoren.	20
Abbildung 4: Topographische Karte des Einzugsgebiets der Mulden.	24
Abbildung 5: Das Untersuchungsgebiet.	29
Abbildung 6: Ausschnitt der Überschwemmungsflächen und -tiefen eines HQ100 für den festgestellten Zustand 2002 (links), den technischen PLAN-Zustand HWSK (Mitte) und den Ausbauzustand 2013 (rechts) an der Vereinigten Mulde.	32
Abbildung 7: FLEMOps-Basisvariante zur Berechnung von Wohngebäudeschäden (Mikroskala) mit den Eingangsparametern Wasserstand, Gebäudetyp und Gebäudequalität.	38
Abbildung 8: Absolute (links) und prozentuale (rechts) Änderungen des erwarteten jährlichen Gebäudeschadens für den technischen Ausbauzustand 2013 und PLAN-Zustand HWSK, jeweils im Vergleich zum festgestellten Zustand 2002.	49
Abbildung 9: Zu erwartende jährliche Wohngebäudeschäden in Gemeinden für den festgestellten Zustand 2002 (> 1 Mio. €/Jahr) und vergleichend beim Ausbauzustand 2013 und PLAN-Zustand HWSK – differenziert nach verschiedenen Wiederkehrintervallen.	50
Abbildung 10: Änderungen des erwarteten jährlichen Wohngebäudeschadens in fünf Gemeinden beim Vergleich der Vorsorgeneiveaus von 2002, 2013 bzw. „optimal“ zum Referenzschaden ohne Berücksichtigung der Eigenvorsorge – jeweils berechnet für die unterschiedlich stark ausgeprägten Hochwasserschutzzustände.	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die teuersten Überschwemmungen in Deutschland zwischen 1990 und 2011 (Originalschäden und inflationsbereinigte Schäden für 2011; Stand 1.11.2012)..	2
Tabelle 2: Arbeitsschritte und Zeitplan zur Umsetzung der europäischen HWRM-RL.....	9
Tabelle 3: Strategien und Beispiele der Bauvorsorge.	11
Tabelle 4: Klassifizierung von Hochwasserschäden mit Beispielen.....	14
Tabelle 5: Mittlere und Hochwasser-Abflusswerte für ausgewählte Pegel entlang der Mulden.	26
Tabelle 6: Markante Hochwasserereignisse im Mulde-Einzugsgebiet seit 1903.....	27
Tabelle 7: Übersicht der untersuchten Gewässerzustände.	30
Tabelle 8: Charakterisierung der Haushaltsbefragungen zum August-Hochwasser 2002 und Juni-Hochwasser 2013.	34
Tabelle 9: Klassifikation der Bauvorsorge und Kontamination.....	36
Tabelle 10: Übersicht der Vorsorgeniveaus und ihrer Charakteristik.....	36
Tabelle 11: Eingangsparemeter in FLEMOps.	37
Tabelle 12: Skalierungsfaktoren für Wohngebäudeschäden durch Bauvorsorge und Kontaminierung des Hochwassers.	39
Tabelle 13: Cluster für typische Gebäudetypzusammensetzungen in Deutschland.	41
Tabelle 14: Anzahl der befragten Privathaushalte pro Landkreis, zugeordneter Gemeinden und Befragungskampagne. Hinweis: einige Gemeinden existieren aktuell aufgrund ihrer Eingliederung in andere Gemeinden nicht mehr.	43
Tabelle 15: Anhand der Haushaltsbefragungen abgeleitete Skalierungsfaktoren für Wohngebäudeschäden durch Bauvorsorge und Kontaminierung des Hochwassers.....	44
Tabelle 16: Übersicht der für jede Gemeinde berechneten EADs für die verschiedenen Schutz- und Vorsorgeszenarien.	45
Tabelle 17: EAD bei verschiedenen Vorsorgeniveaus und technischen Gewässerausbauzuständen für alle Gemeinden zusammengefasst und dessen Änderung im Vergleich zu den drei Referenzzuständen ohne Eigenvorsorge.....	54

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Hochwasser zählen weltweit mit zu den am häufigsten vorkommenden Naturgefahren (EM-DAT, 2010; IFRC, 2010; UNISDR, 2011; IPCC, 2012). Sie sind natürliche Prozesse, die räumlich und zeitlich mit unterschiedlichen Intensitäten und Ausdehnungen auftreten können. Jedoch nimmt in den letzten Dekaden nicht nur die Häufigkeit von Hochwasserereignissen, sondern auch das Ausmaß der entstandenen Schäden zu (Munich Re, 2005; Barredo, 2009). Weltweit machen Hochwasser etwa ein Drittel der volkswirtschaftlichen Schäden aus und kosten Tausende von Menschenleben (Kron, 2005). Auch in Europa und Deutschland ist ein ansteigender Trend von Hochwasserschäden zu erkennen (Hattermann et al., 2012, 2014; Höppe, 2014). In den letzten 25 Jahren waren in Deutschland fast alle großen Flusseinzugsgebiete mindestens einmal von Hochwasser betroffen, die jeweils Schäden in Millionenhöhe verursachten (DKKV, 2015). Die teuersten Überschwemmungen im Zeitraum von 1990 bis 2011 sind in Tabelle 1 aufgelistet. Mit einem Gesamtschaden von 11,6 Mrd. € sticht insbesondere das August-Hochwasser 2002 an der Elbe und Donau hervor. Trotz eines hydrologisch ähnlichen Hochwasserereignisses im Mai/Juni 2013, war dies die bislang teuerste Naturkatastrophe in Deutschland (DKKV, 2015). Groben Abschätzungen zu Folge besteht in Deutschland ein signifikantes Hochwasserrisiko für eine Fläche von ca. 32.390 km², auf der ca. 7,9 Mio. Menschen leben (etwa 10 % der Bevölkerung) (BSU, 2014). Die wachsenden Hochwasserschäden sind Folge der zunehmenden Überschneidung der natürlichen Überschwemmungsgebiete mit den von einer wachsenden Anzahl an Menschen immer intensiver genutzten Lebensräumen, der anwachsenden Vermögenswerte in den hochwassergefährdeten Gebieten und einer zunehmenden Verwundbarkeit sozialer und technischer Systeme (Barredo, 2009; Bouwer, 2010; UNISDR, 2011; Kron et al., 2012).

Tabelle 1: Die teuersten Überschwemmungen in Deutschland zwischen 1990 und 2011 (Originalschäden und inflationsbereinigte Schäden für 2011; Stand 01.11.2012; Patt & Jüpner, 2013).

Zeitpunkt		Betroffene Gebiete	Schäden [Mio. €/Jahr]	
Monat	Jahr		Original	Wert 2011
12	1993	Rhein	530	826
4	1994	Saale, Unstrut	300	456
1-2	1995	Rhein	270	399
8	1997	Oder	330	463
10-11	1998	Ganz Deutschland	220*	304*
5	1999	Rhein, Donau	410	554
6	2002	Westliches Bayern	100	125
8	2002	Elbe, Donau	11.600	14.532
8	2005	Bayern (Donau)	175	202
3	2006	Elbe	80	89
7	2007	Mittelfranken (Baiersdorf)	90	98
5-6	2008	Südwest-, Westdeutschland („Hilal“)	400*	418*
8-9	2010	Sachsen	1.000	1.032

*) geschätzter Überschwemmungsanteil bei einem Unwetterereignis

Um Hochwasserschäden zukünftig zu reduzieren, ist es notwendig, Gebiete mit einem hohen Hochwasserrisiko zu identifizieren und dort ein entsprechendes Risikomanagement zu implementieren (De Moel, 2012). Unter Risiko wird in dieser Arbeit der erwartete finanzielle Schaden verstanden, der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in einem bestimmten Zeitraum eintritt oder übertroffen wird. In der Vergangenheit stützte sich der staatliche Hochwasserschutz in Deutschland vorrangig auf technische Schutzbauten wie Deiche, Mauern oder Rückhaltebecken. Seit den letzten Dekaden vollzieht sich jedoch zunehmend ein Wandel weg vom traditionell technisch geprägten Hochwasserschutz hin zu einem integrierten Hochwasserrisikomanagement, bei dem nicht-technische Hochwasservorsorgemaßnahmen wie die private Eigenvorsorge gleichberechtigt Berücksichtigung finden. Vielen Studien bestätigen inzwischen, dass die private Eigenvorsorge wesentlich dazu beitragen kann, Hochwasserschäden langfristig zu mindern (u.a. IKSR, 2002; Kreibich et al., 2005; Kreibich & Thieken, 2008; BMVI, 2013; De Moel et al., 2014; Lasage et al., 2014). Vor diesem Hintergrund erscheint eine Kombination von technischen und nicht-technischen Maßnahmen für die Zukunft sinnvoll und im Hinblick auf den wirtschaftlichen Nutzen vielversprechend (Hayes, 2004).

Die Voraussetzung für eine (Kosten-Nutzen-)Bewertung von Vorsorgemaßnahmen sowie möglicher Alternativen ist die Abschätzung und Quantifizierung der zu erwartenden Schäden und damit auch des Risikos (Risikoanalyse). Eine solche Risikoanalyse dient auch als Entscheidungsgrundlage für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen und ist dementsprechend ein wesentlicher Aspekt im Hochwasserrisikomanagement. Eine Hochwasserrisikoanalyse zur Schadensabschätzung kann mit Hilfe von Computermodellen durchgeführt werden. In der Vergangenheit wurde solchen Schadensmodellen generell jedoch nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Entsprechend wird derzeit standardmäßig in den meisten Schadensmodellen lediglich der Wasserstand als Haupteinflussparameter zur Quantifizierung des direkten Hochwasserschadens verwendet. In wie weit beispielsweise der im Hochwasserrisikomanagement zunehmend wichtiger werdende Faktor der privaten Eigenvorsorge den Hochwasserschaden beeinflusst, ist anhand von Modellen allerdings bislang nur unzureichend untersucht worden. So wird auch aktuell der schadensmindernde Effekt der Eigenvorsorge bei staatlichen Planungen oder Abschätzungen von Hochwasserschäden nicht systematisch berücksichtigt – auch wenn dies inzwischen vermehrt gefordert wird. Es existieren erst seit wenigen Jahren einige umfassendere Modelle, die weitere erklärende Parameter wie die Eigenvorsorge mit einfließen lassen (Elmer et al., 2010; Kreibich et al., 2010; Schröter et al., 2014). Eines davon ist das multifaktorielle Schadensmodell FLEMOps (Flood Loss Estimation MOdel for the private sector), dessen Anwendbarkeit bereits für Gemeinden entlang der Mulde für das Hochwasserereignis 2002 validiert wurde (Thieken et al., 2008a; Wunsch et al., 2009).

1.2 Forschungsziel, -fragen und -hypothesen

Um der Forderung im Hochwasserrisikomanagement, dass technischer Hochwasserschutz und private Eigenvorsorge verstärkt Hand in Hand gehen sollten, Nachdruck zu verleihen, ist das Ziel dieser Arbeit mit Hilfe des multifaktoriellen Schadensmodells FLEMOps anhand von Vergleichsrechnung zu untersuchen, in welchem Maße technische Schutzbauten und private Eigenvorsorge zur Risikominderung für Wohngebäude beitragen können. Darüber soll insbesondere das schadensreduzierende Potenzial der privaten Eigenvorsorge bewertet werden. Ziel dieser Arbeit ist folglich auch einen Beitrag zu zukünftigen Entscheidungsprozessen im Hinblick auf die Maßnahmenplanung für ein integriertes Hochwasserrisikomanagement zu leisten.

Aus diesen übergeordneten Zielen leiten sich die folgenden Forschungsfragen ab:

- 1 Wie groß ist das schadensmindernde Potenzial von staatlich technischen Hochwasserschutzmaßnahmen bei jeweils unterschiedlich gut ausgebauten Schutzzuständen?
- 2 Wie groß ist das schadensmindernde Potenzial von staatlich technischen Hochwasserschutzmaßnahmen bei jeweils unterschiedlich gut ausgebauten Schutzzuständen in jeweiliger Kombination mit unterschiedlich gut ausgeprägten privaten Eigenvorsorgeniveaus?
- 3 Wie ist die Relevanz der privaten Eigenvorsorge und deren vorherrschendes Niveau in Bezug auf die Schadensminderung im Vergleich zur Wirkung des technischen Hochwasserschutzes einzuschätzen?

Dazu soll als Risikoindikator der jährliche Schadenserwartungswert (englisch expected annual damage, EAD) für Wohngebäude in 30 sächsischen Gemeinden entlang der Mulde berechnet werden. Das Gebiet der Mulde wurde gewählt, da es sowohl 2002 als auch 2013 stark von Hochwasser betroffen war.

Hinsichtlich der Forschungsfragen lassen sich im Vorfeld folgende Hypothesen aufstellen:

- 1 Mit dem Ausbau und zunehmender Verbesserung des technischen Hochwasserschutzes reduziert sich der jährlich zu erwartende Wohngebäudeschaden.
- 2 Durch die Kombination von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen mit privater Eigenvorsorge tritt eine nochmals gesteigerte Reduktion des jährlich zu erwartende Wohngebäudeschadens auf.
- 3 Im Vergleich zum staatlich technischen Hochwasserschutz spielt die Durchführung von privater Eigenvorsorge in Bezug auf die Schadensminderung mindestens eine ebenso wichtige Rolle. Eine gezielte Verbesserung der privaten Vorsorgeniveaus (Steigerung der Bauvorsorge und Verminderung der Kontamination durch Öl oder Benzin) kann sogar gewinnbringender ausfallen als der (alleinige) Ausbau des technischen Hochwasserschutzes.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist insgesamt in sechs Kapitel unterteilt. Nach einer kurzen Einführung in die Thematik in Kapitel 1 schließt sich in Kapitel 2 der Stand der Forschung an, in dem die Veränderungen im Hochwasserrisikomanagement in Deutschland aufgezeigt und der aktuelle Stand der Hochwasserschadensabschätzung detailliert beschrieben wird. Kapitel 3 gibt eine Übersicht zum Einzugsgebiet der Mulden. Im anschließenden Kapitel 4 wird die Vorgehensweise zur Modellierung des EADs für Wohngebäude auf Gemeindeebene näher erläutert, die untersuchten Szenarien der technischen und privaten Vorsorgestrategien beschrieben sowie die jeweiligen Datengrundlagen vorgestellt. In Kapitel 5 werden die Hochwasserschadensergebnisse sowohl für den technischen Hochwasserschutz als auch für dessen Kombination mit privater Eigenvorsorge dargestellt und vergleichend diskutiert. Zudem erfolgt eine Auseinandersetzung mit den Unsicherheiten bei der Modellanwendung und der resultierenden Aussagefähigkeit der Ergebnisse. Die Arbeit schließt mit einem Fazit und einem Ausblick in Kapitel 6, in dem anhand der Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen, Verbesserungsvorschläge für ein effizienteres Hochwasserrisikomanagement abgeleitet und Möglichkeiten zu weiteren Forschungsarbeiten aufgezeigt werden.

2 Stand der Forschung

In dieser Arbeit steht die Abschätzung von Hochwasserschäden an Wohngebäuden speziell unter Berücksichtigung der privaten Eigenvorsorge im Vordergrund. Um nachvollziehen zu können, welchen Stellenwert die Eigenvorsorge im heutigen Hochwasserrisikomanagement hat, was sie genau beinhaltet und inwiefern sie auf den Hochwasserschaden Einfluss nehmen kann, sollen in diesem Kapitel zunächst die Entwicklungen und Veränderungen im Hochwasserrisikomanagement in Deutschland der letzten Jahrzehnte beschrieben werden. Des Weiteren ist es für diese Arbeit wichtig zu erklären, was Hochwasserschäden überhaupt sind und mit Hilfe welcher Methoden sie letztendlich quantifiziert werden können. Dies soll im anschließenden Unterkapitel näher dargestellt werden.

2.1 Hochwasserrisikomanagement in Deutschland

2.1.1 Vom Sicherheitsdenken zur Risikokultur

Bis in die 1980er Jahre stützte sich der staatliche Hochwasserschutz in Deutschland vorrangig auf den Ausbau von strukturellen Schutzmaßnahmen wie Deiche, Talsperren, Mauern oder Rückhaltebecken und der Verbesserung von technischen Anlagen (Patt & Jüpner, 2013). Dabei wurde ein „Schutzversprechen“ gegeben, dass die Bauwerke bis zu einem bestimmten Bemessungsereignis HQ_x wirksam vor Schäden schützen. Solch ein Schutzversprechen vermittelt aber auch ein hohes Sicherheitsgefühl in der Bevölkerung, sodass das Schadenspotenzial hinter den Schutzeinrichtungen im Laufe der Zeit häufig zunimmt, die Vorsorgeaktivität jedoch gleichzeitig abnimmt (Seifert, 2012). Dennoch können auch derartige technische Bauten keinen vollkommenen Schutz vor einem Hochwasserschaden bieten, da sie überlasten oder bei einer Überschreitung des Bemessungsereignisses gar versagen können (z.B. Deichbruch). Demzufolge bleibt stets ein Restrisiko bestehen, dessen sich die Bewohner hinter solchen Anlagen jedoch nicht immer bewusst sind. Folgen sind, dass die im Ereignisfall entstehenden Schäden für diese Bevölkerung häufig um ein Vielfaches höher ausfallen (Patt & Jüpner, 2013). Eine Verbesserung des Schutzniveaus ist in der Vergangenheit allerdings ereignisbezogen umgesetzt worden, d.h. sie erfolgte erst, wenn bei einem Hochwasserereignis tatsächlich Schäden entstanden sind. Die Neubemessung der technischen Hochwasserschutzanlagen orientierte sich dann daran, das gerade erlebte Hochwasserereignis in Zukunft schadlos abführen zu können (DKKV, 2003). Sobald die angepassten Schutzmaßnahmen

implementiert waren, stellte sich schnell erneut das Gefühl einer absoluten Sicherheit ein (Patt & Jüpner, 2013). Die Maßnahmenkosten wurden allerdings selten den vermiedenen Hochwasserschäden gegenüber gestellt (Kosten-Nutzen-Analysen) (DKKV, 2003; Messner & Meyer, 2006; Seifert, 2008). Es wurde vielmehr nach dem Motto gehandelt „Reaktion statt Prävention“. Eine offene Diskussion über Risiken oder ein Konzept zur Bewertung von Schutzmaßnahmen gab es nicht (Merz, 2006; Patt & Jüpner, 2013).

Nach den großen Hochwasserereignissen in den 1990er Jahren und insbesondere nach dem August-Hochwasser 2002 setzte in Deutschland und Europa jedoch allmählich ein Umdenken in der politisch-strategischen Ausrichtung des Hochwassermanagements ein (DKKV, 2015). Die sehr hohen Schäden bei diesen Ereignissen zeigten zunehmend, dass selbst vermeintlich gut geschützte Gebiete nicht stets hochwassersfrei bleiben und ein absoluter Schutz aus technischer Sicht nicht möglich und nachhaltig ist. Im Rahmen der Internationalen Dekade zur Reduzierung von Naturkatastrophen von 1990 bis 1999 wurde anerkannt, dass das bisherige Hochwassermanagement über den technischen Hochwasserschutz hinausgehen und auch eine Betrachtung möglicher Konsequenzen (was kann passieren, Schadensszenarien) sowie die Abwägung von Handlungsoptionen im Vorfeld erfolgen muss, um zukünftige Schäden zu minimieren. Somit wurde ein Paradigmenwechsel eingeläutet: weg vom Sicherheitsdenken, hin zu einer Risikokultur (Plate et al., 1993; PLANAT, 1998; Merz & Thieken, 2004). Als einen ersten Meilenstein formulierte die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) nach den Rhein-Hochwassern von 1993 und 1995 „Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz“ (LAWA, 1995) mit empfehlendem Charakter, in denen ein integriertes Hochwasserrisikomanagement erstmals aufgegriffen wurde und neben dem technischen Hochwasserschutz und dem natürlichen Wasserrückhalt, die Hochwasservorsorge als Novum gleichberechtigt Berücksichtigung fand (LAWA, 1995). Die einzelnen Maßnahmen der Hochwasservorsorge lassen sich in Maßnahmen zum Schutz, zur Vorsorge und zur Vorbereitung kategorisieren. Schutzmaßnahmen zielen dabei auf die vollständige Vermeidung von Schäden in hochwassergefährdeten Gebieten ab. Vorsorge- und Vorbereitungsmaßnahmen hingegen sollen helfen, die nachteiligen Auswirkungen eines Hochwasserereignisses einzugrenzen sowie die Bewältigungskapazitäten zu stärken (z.B. DKKV, 2003; Vis et al., 2003; PLANAT, 2004; De Bruijn, 2005). Die in LAWA (1995) aufgeführten Hochwasservorsorgemaßnahmen werden dieser Kategorisierung zugeordnet und im Folgenden kurz dargestellt:

Kategorie: Schutz

- Flächenvorsorge: Vermeidung der Bebauung von Überschwemmungsgebieten

Kategorie: Vorsorge (private Eigenvorsorge, siehe auch Kapitel 2.1.2)

- Bauvorsorge: Schutz der Gebäude und des Inventars vor Hochwasser
- Verhaltensvorsorge: Durchführung von Maßnahmen, die im Hochwasserfall zur Schadensminderung beitragen. Dies setzt oftmals Kenntnisse über die Hochwassergefahr und Schutzmöglichkeiten voraus (Informationsvorsorge)
- Risikovorsorge: finanzielle Absicherung, z.B. durch eine Versicherung

Kategorie: Vorbereitung

- Informationsvorsorge: Entwicklung und Verbesserung der Vorhersage-, Warn-, und Informationssysteme
- Organisation und Übung der Katastrophenabwehr

Nach dem einschneidenden Hochwasserereignis 2002 wurde die Einführung und Umsetzung des Hochwasserrisikomanagements europaweit sehr viel verbindlicher verfolgt. Einen weiteren Meilenstein stellt in dieser Hinsicht die 2007 verabschiedete europäische Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL; 2007/60/EG) dar, die zum Ziel hat, hochwasserbedingte Risiken für die menschliche Gesundheit, die Umwelt, die Wirtschaft, Infrastrukturen und Kulturgüter zu verringern. Ausgehend von dieser Vorgabe leitete die LAWA vier grundlegende Ziele für Deutschland ab (LAWA, 2013):

- Vermeidung neuer Risiken (im Vorfeld eines Hochwassers) im Hochwasserrisikogebiet,
- Reduktion bestehender Risiken (im Vorfeld eines Hochwassers) im Hochwasserrisikogebiet,
- Reduktion nachteiliger Folgen während eines Hochwassers,
- Reduktion nachteiliger Folgen nach einem Hochwasser.

Zur Erreichung der Ziele erfolgt die Umsetzung der europäischen HWRM-RL für alle EU-Mitgliedstaaten in drei Schritten, für die jeweils unterschiedliche Fristen vorgegeben wurden. Zusätzlich sollen die Ergebnisse der jeweiligen Schritte alle sechs Jahre geprüft und gegebenenfalls aktualisiert werden (EG, 2007) (Tabelle 2).

Tabelle 2: Arbeitsschritte und Zeitplan zur Umsetzung der europäischen HWRM-RL (EG, 2007).

Arbeitsschritt	Fertigstellung bis	Erste Aktualisierung bis
1. Vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos	22. Dezember 2011	22. Dezember 2018
2. Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten	22. Dezember 2013	22. Dezember 2019
3. Hochwasserrisikomanagementpläne	22. Dezember 2015	22. Dezember 2021

Im ersten Schritt sollten bis Dezember 2011 die jeweiligen Flussgebietseinheiten einer vorläufigen Risikobewertung unterzogen werden, um anhand dessen Gewässer(-abschnitte) mit einem signifikanten Hochwasserrisiko zu identifizieren. Im zweiten Schritt wurden für die identifizierten Risikogebiete Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten für Hochwasserereignisse mit niedriger, mittlerer (HQ100) und hoher Wahrscheinlichkeit bis Dezember 2013 erstellt. Hochwassergefahrenkarten stellen für jedes der Überflutungsszenarien vor allem die Überschwemmungsgebiete und die Wassertiefe dar, z.T. auch die Fließgeschwindigkeit. Hochwasserrisikokarten zeigen für die jeweiligen Überflutungsszenarien mögliche nachteilige Folgen des Hochwassers, in dem sie unter anderem die Flächennutzung sowie die Anzahl der potenziell betroffenen Einwohner oder Schutzgebiete im Überschwemmungsgebiet abbilden. Im dritten Schritt sollen zuletzt bis Dezember 2015 Hochwasserrisikomanagementpläne für die in den Karten dargestellten Risikogebiete entwickelt werden, die verbindliche Ziele zur Verringerung des Hochwasserrisikos festlegen. Die für die Zielerreichung geplanten Maßnahmen sollen dabei alle Aspekte des Hochwasserrisikomanagements umfassen. Dies beinhaltet technische Maßnahmen aber vorrangig auch die oben beschriebenen nicht-technischen Maßnahmen der Hochwasservorsorge (LAWA, 2013; DKKV, 2015).

Mit dem Wandel hin zu einem Hochwasserrisikomanagement hat sich also das grundlegende Verständnis zum Umgang mit der Hochwassergefahr in zwei Aspekten geändert. Zum einen erfolgt die Bemessung von technischen Hochwasserschutzanlagen nicht (mehr) ereignisbezogen sondern vielmehr risikobasiert, d.h. das Schadenspotenzial (bei verschiedenen Hochwasserwahrscheinlichkeiten) wird bei der Planung zunehmend mit berücksichtigt. Zum anderen werden nun neben dem technischen Hochwasserschutz auch nicht-bauliche Hochwasservorsorgemaßnahmen als wichtig erachtet.

Ein Schwachpunkt des Hochwasserrisikomanagements ist derzeit allerdings noch, dass seit 1995 zwar viel auf dem Papier steht, die Ziele und Maßnahmen aber noch nicht konsequent genug umgesetzt werden. Die Umsetzung der europäischen HWRM-RL hat das Hochwasserrisikomanagement zwar wesentlich gestärkt, dennoch wird z.B. die Rolle der privaten Eigenvorsorge als Hochwasservorsorgestrategie im Hinblick auf eine Risikominderung bislang nicht ausreichend untersucht. So wird sie beispielsweise aktuell auch nur selten bei Hochwasserschutzplanungen oder Abschätzungen von Hochwasserschäden mitberücksichtigt. Diese Fallstudie soll dazu beigetragen, diesen Umstand zukünftig zu ändern. Deswegen wird zunächst die Bedeutung und Relevanz der Eigenvorsorge näher dargestellt.

2.1.2 Private Eigenvorsorge

Im Zuge dieser Veränderungen hin zu einem integrierten Hochwasserrisikomanagement ist die Rolle der privaten Eigenvorsorge im Hinblick auf die Schadensminderung sehr gestärkt worden. Seit 2005 ist sie sogar bereits rechtlich im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) verankert. So heißt es in § 5 Abs. 2 WHG:

„Jede Person, die durch Hochwasser betroffen sein kann, ist im Rahmen des ihr Möglichen und Zumutbaren verpflichtet, geeignete Vorsorgemaßnahmen zum Schutz vor Hochwassergefahren und zur Schadensminderung zu treffen, insbesondere die Nutzung von Grundstücken den möglichen Gefährdungen von Mensch, Umwelt oder Sachwerten durch Hochwasser anzupassen.“

Private Eigenvorsorge beinhaltet dabei drei verschiedene Typen von Vorsorgemaßnahmen: (1) die Informations- und Verhaltensvorsorge (z.B. Information über die Hochwassergefahr und Schutzmöglichkeiten), (2) die Bauvorsorge (z.B. Anpassung der Gebäudenutzung und Inneneinrichtung, Sicherung des Heizöltanks oder Einbau von Wassersperren) und (3) die Risikoversorge (z.B. Abschluss einer Hochwasserversicherung) (LAWA, 1995; IKSR, 2002; DKKV, 2003; Kreibich et al., 2005, 2011; BMVI, 2013).

Wie hoch der Beitrag der Eigenvorsorge an der Schadensreduktion ist, hängt jedoch stark vom Grad der Implementierung und der Art der umgesetzten Maßnahmen ab. Die frühzeitige Information – sowohl über die Gefahren, denen man potenziell ausgesetzt ist, als auch über die Möglichkeiten, wie man sich vor ihnen schützen kann – ist ein wichtiger erster Schritt in Richtung Eigenvorsorge, führt allein jedoch nicht zur Schadensminderung. Erst die Umsetzung dieses Wissens in konkrete Maßnahmen, insbesondere der Bauvorsorge, bringt den gewünschten Effekt (IKSR, 2002; Kreibich et al., 2005). Unter Eigenvorsorge wird in

dieser Arbeit deshalb lediglich die Bauvorsorge verstanden und die Begriffe im Folgenden synonym verwendet.

Zur Vermeidung oder Minderung von Hochwasserschäden sollte sich nicht nur auf eine Maßnahme verlassen werden, sondern stets eine Mischung verschiedener Baumaßnahmen implementiert werden, da die private Hochwasservorsorge abhängig vom Hochwassertyp (z.B. Flusshochwasser, Grundhochwasser, Sturzflut, Deichbruch) oder von der regionalen Lage ist. Eine gute Bauvorsorge kann dabei Schäden mindern, eine schlechte Bauvorsorge kann Schäden aber auch deutlich erhöhen, z.B. durch die Kontaminierung des Hochwassers durch ausgelaufenes Benzin oder Öl aus nicht gesicherten Heizöltanks. Die Maßnahmen der Bauvorsorge orientieren sich an vier Strategien: dem Ausweichen, dem Widerstehen, dem Nachgeben und dem Sichern (Tabelle 3) (IKSE, 2003). Die Maßnahmen der Strategien Nachgeben und Sichern zählen zu den „wet-proofing“ Maßnahmen. Diese zielen darauf ab, den Schaden bei eindringendem Wasser so gering wie möglich zu halten (Lasage et al., 2014). Im Unterschied dazu zählen die Maßnahmen der Strategien Ausweichen und Widerstehen zu den „dry-proofing“ Maßnahmen, die das Eindringen des Wassers in das Gebäude möglichst vollständig verhindern sollen (De Moel et al., 2014).

Tabelle 3: Strategien und Beispiele der Bauvorsorge (nach IKSE, 2003).

Strategie	Charakteristik	Beispiele
Ausweichen	Idealerweise keine Bebauung in hochwassergefährdeten Gebieten (Flächenvorsorge) oder zumindest erhöhte Anordnung des Gebäudes.	<ul style="list-style-type: none"> • Kellerverzicht • erhöhte Anordnung des Erdgeschosses • mobile Wassersperren
Widerstehen	Verhinderung des Eindringens von Wasser in das Gebäude bzw. Verbesserung von dessen Standsicherheit.	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäudeabdichtung • Rückstausicherung
Nachgeben	Anpassung der Gebäudenutzung und -ausstattung für den Fall des Wassereintritts in das Gebäude.	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung der Gebäudenutzung • Anpassung der Inneneinrichtung • Verlegung der Heizung in obere Stockwerke
Sichern	Schutz des Gebäudes und der Umwelt vor Kontamination durch Schadstoffe.	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherung des Heizöltanks

Bubeck et al. (2012) verglichen die Vorsorgesituation von Privathaushalten jeweils vor den großen Rheinhochwassern 1993 und 1995 und bekräftigen, dass die initiierten Verbesserungen der Bau- und Risikovorsorge nach dem Hochwasser 1993, die Schäden von 1995 signifikant minderten. Kreibich et al. (2005) werteten 1248 Befragungen von hochwasserbetroffenen Privathaushalten an der Elbe aus und zeigten, dass insbesondere die Durchführung von Bauvorsorgemaßnahmen in Gebieten mit häufigen kleinen Hochwasserereignissen, aber auch bei extremen Ereignissen wie 2002, sehr effektiv sein kann. Beispielsweise konnten beim Hochwasser 2002 die durchschnittlichen Gebäudeschäden durch eine hochwasserangepasste Gebäudenutzung und Inneneinrichtung sowie die Verlegung der Heizungsanlage in höhergelegene Stockwerke um jeweils 46 %, 53 % und 36 % reduziert werden (wet-proofing Maßnahmen). Die Kostenwirksamkeit solcher Maßnahmen wurde in Kreibich et al. (2011a) diskutiert. Ähnliche Ergebnisse bezüglich der Wirkung von wet-proofing Maßnahmen wurden von DEFRA (2008) berichtet. Bei Untersuchungen von De Moel et al. (2014) für den Großraum Rotterdam (Niederlande) und Lasage et al. (2014) für Ho Chi Minh City (Vietnam) lag die Schadensreduktion jedoch lediglich zwischen 20 % und 29 %. Die Spannweite der schadensreduzierenden Wirkung von dry-proofing Maßnahmen ist jedoch auch sehr groß. Poussin et al. (2012) führten Untersuchungen an der Maas (Niederlande) durch und ermittelten eine schadensmindernde Wirkung von 40 %. Bei De Moel et al. (2014) und Lasage et al. (2014) lag diese mit 60 % bis 100 % jedoch sehr viel höher. Weitere Informationen und Übersichten zu möglichen (Bau-)Vorsorgemaßnahmen, deren Wirksamkeiten und Implementierungen geben auch IKSR (2002) und die Hochwasserschutzfibel des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, 2013).

Die oben genannten Beispiele belegen eindeutig, dass private Eigenvorsorge einen relevanten Beitrag zur Hochwasserschadensminderung leisten kann. Positiv zu beurteilen ist auch der Umstand, dass sich die Eigenvorsorge von Privathaushalten seit dem Hochwasserereignis 2002 deutlich verbessert hat (Kreibich et al., 2011b; Kienzler et al., 2015a, 2015b). Kienzler et al. (2015b) wertete nach den Hochwasserereignissen 2002 und 2013 diesbezüglich jeweils 1697 und 1652 Befragungen aus. Es ergab sich, dass beim Hochwasser 2002 maximal 13 % der betroffenen Privathaushalte vor dem Ereignis Baumaßnahmen durchgeführt hatten, vor dem Hochwasserereignis 2013 waren es bereits 36 %. Auch die Einstufung der Effektivität von Vorsorgemaßnahmen hat von 39 % im Jahr 2002 auf 67 % im Jahr 2011 zugenommen, wie ebenfalls Privathaushaltsbefragungen von Kienzler et al. (2015a) zeigten.

2.2 Hochwasserschäden

Die Quantifizierung von Hochwasserschäden kann allgemein für verschiedene Schadenstypen, auf verschiedenen räumlichen Skalen und mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden. Deswegen werden im Folgenden die unterschiedlichen Hochwasserschadenskategorien, Betrachtungsmaßstäbe und gegenwärtig verwendeten Methoden und Modelle vorgestellt.

2.2.1 Klassifikation von Hochwasserschäden

Die nach einem Hochwasser auftretenden Schäden lassen sich in verschiedene Typen klassifizieren (Tabelle 4). Zunächst können direkte und indirekte Schäden unterschieden werden (Smith & Ward, 1998; Merz et al., 2010). Direkte Schäden entstehen durch den physischen Kontakt des Hochwassers mit dem Menschen oder anderen exponierten Objekten. Beispiele sind Todesopfer oder Verletzte, Gebäudeschäden, oder auch Umweltschäden durch Kontaminierung (Smith & Ward, 1998; Merz et al., 2010). Indirekte Schäden entstehen zeitlich und räumlich betrachtet außerhalb des Hochwasserereignisses. Beispiele hierfür sind Verkehrs- oder Betriebsunterbrechungen, psychische Erkrankungen oder auch der Vertrauensverlust in Autoritäten (Smith & Ward, 1998; Merz et al., 2010, Bubeck & Kreibich, 2011).

Direkte und indirekte Schäden können zudem jeweils in tangible und intangible Schäden weiter unterteilt werden (Smith & Ward, 1998). Tangible Schäden sind in Geldeinheiten messbar. Beispielsweise können Gebäudeschäden leicht anhand von Material- oder Reparaturkosten quantifiziert werden. Im Gegensatz dazu sind intangiblen Schäden nur schwer zu monetarisieren, da sie nicht am Markt gehandelt werden oder vielmehr ein ideeller Wert besteht. Beispiele hierfür sind psychische Schäden oder der Verlust von Andenken/Erinnerungsstücken (Merz et al. 2010, Meyer et al., 2013). Ein Versuch der Monetarisierung solcher Schäden erfolgt beispielsweise über die Ermittlung der Zahlungsbereitschaft der Bevölkerung zur Verbesserung, Vermeidung oder Wiederherstellung eines bestimmten Zustands (der Umwelt, der Gesundheit, der Kulturgüter etc.) (Meyer et al., 2013).

Tabelle 4: Klassifizierung von Hochwasserschäden mit Beispielen (verändert nach Smith & Ward, 1998).

		Schadensart	
		direkt	indirekt
Messgröße	tangibel	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäude-/Hausratschäden • Infrastrukturschäden • Ertragsschäden 	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsunterbrechungen • Verkehrsunterbrechungen • Einsatzkosten der Notfallhilfe
	intangibel	<ul style="list-style-type: none"> • Todesopfer • Verletzte • Verlust von Andenken/Erinnerungsstücken 	<ul style="list-style-type: none"> • Psychische Schäden • Migration von Unternehmen • Vertrauensverlust in Autoritäten

Abweichend zu dieser bisherigen Schadenskategorisierung führen Meyer et al. (2013) eine eigene Subkategorie für Schäden durch Betriebsunterbrechungen ein. Als Begründung führen sie an, dass diese Schäden nicht immer eindeutig klassifiziert werden können, sondern teilweise den direkten (z.B. Wilhite et al., 2007) oder den indirekten Schäden (z.B. Smith & Ward, 1998) zugeordnet werden. Zum anderen unterscheidet sich die Methode der Schadensabschätzung von Betriebsunterbrechungen deutlich von den Abschätzungsmethoden der anderen Schadenskategorien.

2.2.2 Räumliche Skalen der Schadensabschätzung

Die Schadensabschätzung kann je nach Fragestellung und Datenverfügbarkeit für verschiedene räumliche Skalen durchgeführt werden:

Auf der „Mikroskala“ erfolgt die Schadensabschätzung objektgenau, beispielsweise für einzelne Wohngebäude (Messner & Meyer 2006; Merz et al., 2010; Thieken et al., 2010).

Auf der „Mesoskala“ basiert die Schadensabschätzung auf der räumlichen Aggregation. Das heißt, Schäden werden nicht objektspezifisch erfasst, sondern es werden Landnutzungseinheiten, wie z.B. CORINE-Landnutzungsdaten oder administrative Einheiten, z.B. Gemeinden, Bundesländer oder Postleitzahlzonen, zugrunde gelegt, für die statistische Daten oder Schäden jeweils aggregiert werden. Darüber können beispielsweise Gesamtschadensbilanzen auf regionaler Ebene erstellt werden (Merz et al., 2010; Thieken et al., 2010).

Auf der „Makroskala“ erfolgt ebenfalls eine Aggregation der Daten, allerdings werden hier Schadensberechnungen für ganze Flusseinzugsgebiete oder Länder durchgeführt (Seifert,

2008), um beispielsweise Entscheidungshilfen für nationale oder internationale Schadensminderungsstrategien geben zu können (Messner & Meyer, 2006).

2.2.3 Risikoanalyse

Zur Ermittlung oder Prognose möglicher direkter Schäden durch Naturgefahren und deren monetäre Quantifizierung wird häufig eine Risikoanalyse durchgeführt (Patt & Jüpner, 2013). In den Naturwissenschaften wird unter Risiko zumeist der erwartete Schaden verstanden, der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in einem bestimmten Zeitraum eintritt oder übertroffen wird. Das Risiko kann als Produkt der Gefährdung durch einen Naturprozess und der Vulnerabilität berechnet werden (Abbildung 1).

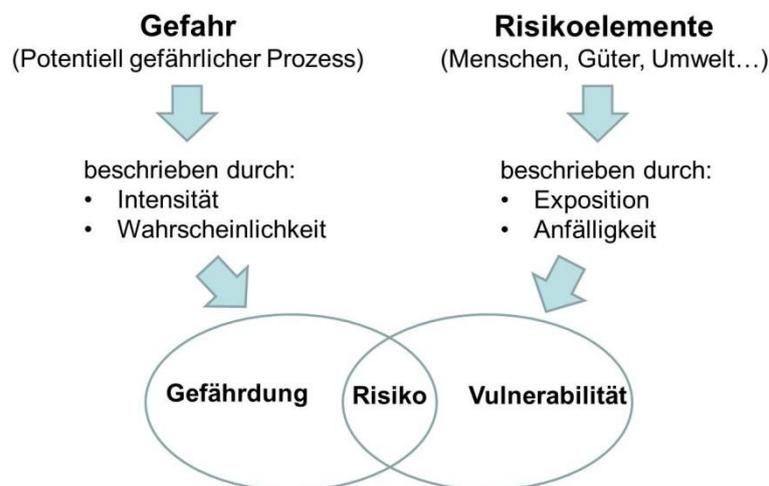


Abbildung 1: Risiko als Produkt der Gefährdung und Vulnerabilität (verändert nach DKKV, 2003).

Bei der Gefährdungsabschätzung geht es um die Gefahrenerkennung und die Gefahrenbeurteilung. Dabei wird untersucht, welche Gefahren, z.B. Hochwasser, wo, wie häufig und wie intensiv auftreten können. Die Gefährdung setzt sich zusammen aus der Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefahr, die möglicherweise einen Schaden in einer Region in einem bestimmten Zeitraum verursacht und der Intensität der Gefahr (Merz & Thieken, 2004; Merz, 2006). Die Eintrittswahrscheinlichkeit kann durch eine Hochwasserhäufigkeitsfunktion beschrieben werden, bei der den verschiedenen Abflüssen jeweils eine Jährlichkeit zugeordnet ist. Die Jährlichkeit ist dabei definiert als mittlere Zeitspanne (in Jahren), bei dem ein Ereignis auftritt dessen Intensität einen bestimmten Wert erreicht oder überschreitet. Sie ist also ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Ereignis in x Jahren wiederholt. Solche Abfluss-Jährlichkeit-Beziehungen können mithilfe der Extremwertstatistik auf Grundlage von historischen Hochwasserereignissen und Beobachtungsdaten abgeleitet werden (Merz, 2006). Unter der (Hochwasser-)Intensität wird zumeist die

Überschwemmungsfläche und Überstauhöhe verstanden, die durch hydraulische Modellierungen ermittelt werden.

Bei der Abschätzung der Vulnerabilität geht es um die Analyse von Konsequenzen bei einem Schadensereignis und die Bestimmung des Schadensausmaßes. Die Vulnerabilität wird zum einen beschrieben durch die Exposition von Risikoelementen; das heißt es wird untersucht, welche Objekte und Werte in der Gefahrenzone liegen und potenziell betroffen sein können (z.B. Gebäude, Straßen, Landwirtschaftsflächen, Personen etc.). Gleiche Risikoelemente werden oftmals gruppiert und ein durchschnittlicher finanzieller Wert für diese Elementgruppe ermittelt (daraus ergibt sich das Schadenspotenzial). Insgesamt ergibt sich die Schwierigkeit, dass z.B. exponierte Elemente wie Personen räumlich und zeitlich variieren können, so dass eine genaue Erfassung der Risikoelemente nicht immer möglich ist (Merz, 2006). Zum anderen wird die Vulnerabilität durch die Schadensanfälligkeit der potenziell betroffenen Risikoelemente ausgedrückt. Ein weit verbreiteter Ansatz zur Bestimmung dieser Anfälligkeit ist die Anwendung von Anfälligkeitskurven, auch Schadensfunktionen genannt. Über sie werden ein oder mehrere Gefährdungsparameter, z.B. der Wasserstand, mit dem finanziellen Schaden eines potenziell betroffenen Elements, z.B. Wohngebäude, verknüpft (Smith, 1994; Merz et al., 2010; Green et al., 2011; Meyer et al., 2013). Für die verschiedenen Risikoelemente können entsprechend unterschiedliche Schadensfunktionen abgeleitet werden, die in Schadensmodellen Anwendung finden (Merz, 2006).

Die Hochwasserforschung hat sich lange vorwiegend mit Untersuchungen zur Hochwassergefährdung beschäftigt, so dass für Abschätzungen über die Intensität und Häufigkeit von Hochwasserereignissen bereits genaue und verlässliche Modelle entwickelt werden konnten (Freni et al., 2010; Merz et al., 2010; De Moel et al., 2012). Eine weiterführende Verknüpfung zur Analyse des Schadensausmaßes hat im Vergleich jedoch nur wenig Aufmerksamkeit bekommen. Entsprechend existieren derzeit nur wenige Daten und Modelle zur Abschätzung von potenziellen Hochwasserschäden, die zudem großen Unsicherheiten unterliegen (Merz et al., 2004; Egorova et al., 2008; Freni et al., 2010; De Moel & Aerts, 2011; Meyer et al., 2013). Heutzutage gewinnen solche Modelle allerdings zunehmend an Bedeutung. Sie werden beispielsweise verwendet für Kosten-Nutzen-Bewertungen von Hochwasserschutzplanungen, für die Erstellung von Hochwasserrisikokarten (vorgeschrieben durch die europäische HWRM-RL), für Kalkulationen von Wiederaufbauhilfen und Schadensregulierungen seitens des Bundes und (Rück-)Versicherungen oder helfen Gemeinden bei der Risikoabschätzungen und Vorbereitung auf den Notfall (Takeuchi, 2001; Dutta et al., 2003; Downton & Pielke, 2005; Thieken et al., 2009; Merz et al., 2010; Jongman et al., 2012; Meyer et al., 2013).

Als Risikoindikator wird oft der jährliche Schadenserwartungswert verwendet (englisch expected annual damage, EAD). Dieser entspricht dem durchschnittlichen Schaden, der bei Hochwasserereignissen verschiedener jährlicher Überschreitungswahrscheinlichkeiten über einen langen Zeitraum betrachtet auftritt (National Research Council, 2000).

2.2.3.1 Modelle zur Hochwasserschadensabschätzung

Bei Schadensfunktionen zur Abschätzung von Hochwasserschäden wird zumeist ausschließlich der Wasserstand mit dem Schaden für ein Risikoelement (unterschieden nach Typ oder Nutzung) in Beziehung gebracht (Wasserstand-Schadensfunktion). Diese Vorgehensweise wurde von White (1945) erstmals vorgestellt und ist in der Vergangenheit vielfach aufgegriffen worden (z.B. Penning-Rowsell & Chatterton, 1977; Parker et al., 1987; Klaus et al., 1994; IWK, 1999). Inzwischen ist die Anwendung von Wasserstand-Schadensfunktion zur Abschätzung urbaner Hochwasserschäden eine international anerkannte Standardmethode (Smith, 1994; Kelman & Spence, 2004; Meyer & Messner, 2005; Merz et al., 2010; Green et al., 2011).

Die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Wasserstand und Schaden kann entweder über eine empirische oder synthetische Vorgehensweise erfolgen. Empirisch abgeleitete Schadensfunktionen basieren auf realen Schadensdaten, die nach einem Hochwasserereignis gesammelt wurden. Synthetische Schadensfunktionen resultieren aus hypothetischeren „was-wäre-wenn-Analysen“. Hierbei versuchen Experten einzuschätzen, welcher Schaden bei einem bestimmten Wasserstand zu erwarten wäre (Merz et al., 2010). Ferner können Wasserstand-Schadensfunktionen entweder den absoluten monetären Schaden berechnen, oder sie geben den relativen (prozentualen) Schadensanteil am Gesamtvermögenwert an. Hierbei muss jedoch der Vermögenswert bekannt sein, um auf den monetären Schaden zurückschließen zu können (Thieken et al., 2008b). Zuletzt kann der Schadensabschätzung je nach Forschungsfrage eine unterschiedliche Kostenbasis zugrunde gelegt werden. Zum einen können Wiederbeschaffungskosten verwendet werden, um den Schaden am Vermögenwert zu berechnen. Dabei handelt es sich um den Neuwert des geschädigten Risikoelements. Zum anderen können abgeschriebene Kosten herangezogen werden, die den aktuellen Wert des geschädigten Objekts zum Zeitpunkt des Hochwassers repräsentieren. (Rück-)Versicherungsunternehmen kalkulieren das Risiko vorrangig auf Grundlage von Wiederbeschaffungskosten, da viele Versicherungsverträge den Neuwert kompensieren. Da diese Kosten den wirtschaftlichen Schaden jedoch etwa um das Zweifache überschätzen, werden abgeschriebene Kosten für ökonomische Abschätzungen verwendet (Van der Veen & Logtmeijer, 2005; Penning-Rowsell et al. 2005; Merz et al., 2010; Jongman, 2012).

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von Hochwasserschadensfunktionen und -modellen für verschiedene ökonomische Sektoren entwickelt (Industriebereich, öffentliche Infrastruktur oder Agrarsektor) (Thieken et al., 2010). Jedoch sind die meisten heute existierender Schadensfunktionen für die Abschätzung von Schäden im Wohnsektor entwickelt worden, die zumeist auch nach verschiedenen Gebäudetypen differenzieren, z.B. Ein-, Reihen- oder Mehrfamilienhaus (Merz et al., 2010; Thieken et al., 2010). Sehr umfassend ist beispielsweise das von Penning-Rowell & Chatterton (1977) veröffentlichte "Blue Manual", das in England (Großbritannien) ein Standardwerk für die Schadenabschätzung darstellt. Dort wurden zum einen 168 Schadensfunktionen für Wohn- und Gewerbegebäude in England bereitgestellt, aber auch erstmalig Leitlinien für die Beurteilung von Hochwassergefahren und Schäden in England veröffentlicht. Die Schadensfunktionen wurden im nachfolgenden „Multi-Coloured Manual (MCM)“ über die Jahre immer wieder angepasst und aktualisiert, zuletzt von Penning-Rowell et al. (2013).

Die in Deutschland am häufigsten zur Abschätzung von Wohngebäudeschäden verwendeten Modelle sind das MURL-Modell (Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, MURL, 2000), das IKSR-Modell (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, IKSR, 2001) oder das Hydrotec-Modell (Emschergenossenschaft & Hydrotec, 2004). Der Verlauf ihrer Schadensfunktionen ist beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt.

In Deutschland basieren viele Schadensmodelle auf der Hochwasserschadensdatenbank HOWAS, dem Vorgänger der Datenbank HOWAS 21, das von der LAWA initiiert und vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft aufgebaut wurde. Dazu gehören auch die Modelle MURL und Hydrotec (Merz et al., 2010; Thieken et al., 2010). Die Datenbank beinhaltet derzeit 5500 Schadensfälle aus vier Sektoren, die bei Hochwasserereignissen zwischen 1978 und 2006 aufgetreten sind (Stand Mai 2015). Allgemein weichen die aus der HOWAS-Datenbank abgeleiteten Funktionen jedoch teilweise deutlich voneinander ab, selbst wenn dasselbe Risikoelement (z.B. Wohngebäude) betrachtet wird (Merz et al., 2004). Dieser Effekt ist auch aus anderen Daten abgeleiteten Modellen zu sehen (Kang et al., 2005; Freni et al., 2010; Pistrika & Jonkman, 2010). Die großen Unsicherheiten sind vorrangig in der breiten Streuung der erfassten Daten begründet, die vermutlich u.a. durch unterschiedliche Einschätzungen einer Situation bei der Schadenserfassung verursacht werden (Merz et al., 2004). So scheint die Betrachtung und Erhebung des Wasserstands als alleiniger Einflussparameter auf den Schaden als nicht ausreichend.

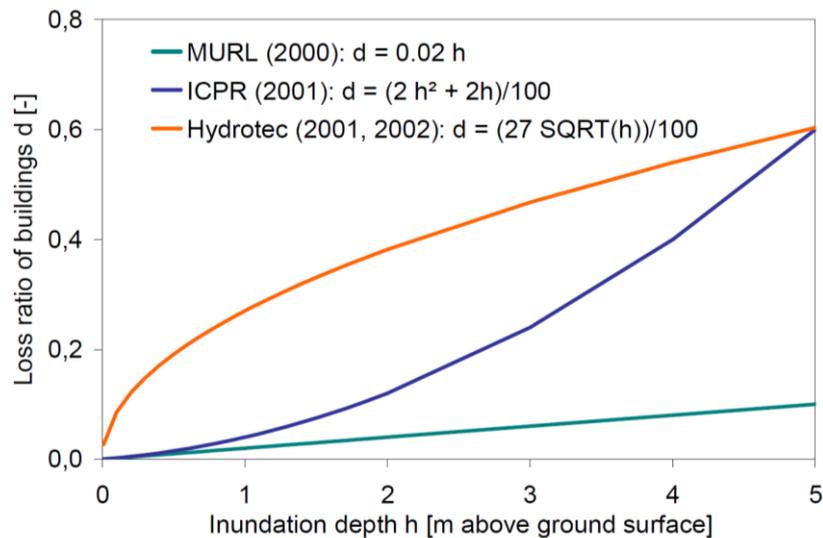


Abbildung 2: Beispiele von Wasserstands-Schadensfunktionen für den relativen Wohngebäudeschaden (Merz et al., 2010).

Verschiedene Studien bestätigen, dass Hochwasserschäden an Wohngebäuden nicht allein durch die Höhe des Wasserstandes gesteuert werden. Vielmehr lassen sich weitere Faktoren identifizieren, die den Schaden entweder erhöhen (Einwirkungsparameter) oder verringern (Widerstandsparameter) können (Kreibich et al., 2005; Thieken et al., 2005). Auf der Einwirkungsseite sind neben dem Wasserstand als wichtigstem Parameter die Überflutungsdauer, die Fließgeschwindigkeit, die Kontamination und Sedimentkonzentration im Flusswassers zu nennen. Auf der Widerstandsseite hingegen können neben den Objektcharakteristika (z.B. Gebäudetyp, -wert), aber auch die persönliche Hochwassererfahrung, Vorwarnzeit, Qualität der Frühwarnung sowie die kurzfristige Verhaltensvorsorge und langfristige Vorsorgemaßnahmen mindernd auf den Schaden einwirken (Abbildung 3) (Smith 1994; USACE 1996; Nicholas et al., 2001; Kelman & Spence 2004; Thieken et al., 2005; Merz et al., 2010). Diese zusätzlichen Parameter finden jedoch nur selten Eingang in Hochwasserschadensmodelle, da sie aufgrund ihrer räumlichen und zeitlichen Heterogenität sehr schwer zu bestimmen und vorherzusagen sind. Hinzu kommt, dass bei der Erhebung von Hochwasserschadensdaten Informationen zu diesen Parametern selten oder uneinheitlich aufgenommen werden. Entsprechend sind die Kenntnisse über die quantitativen Effekte dieser Parameter auf den Schaden immer noch limitiert (Merz et al., 2010; Thieken et al., 2010).

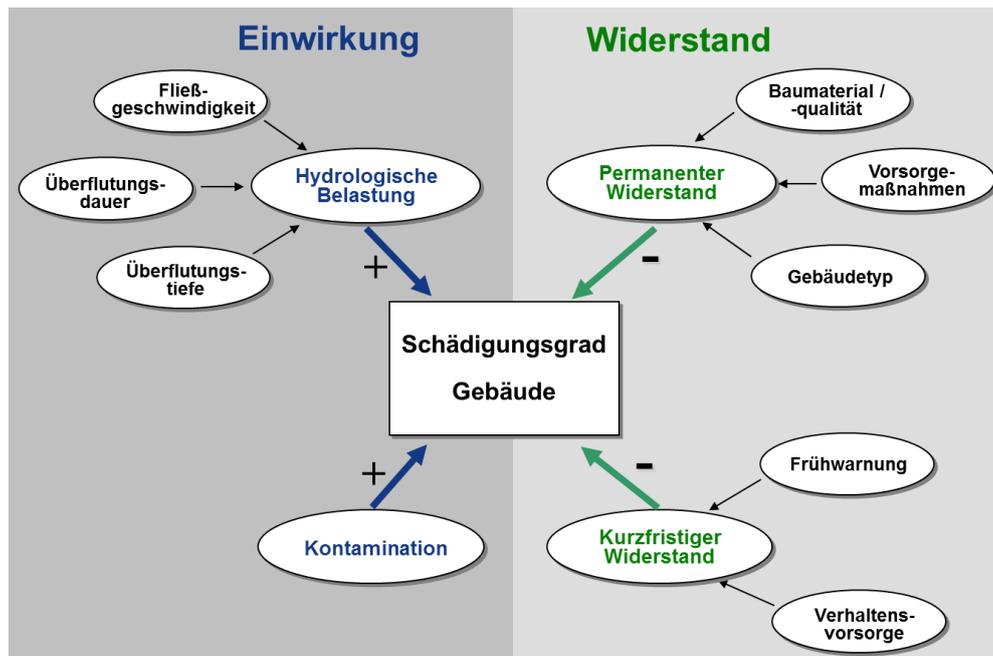


Abbildung 3: Einflussfaktoren auf den Hochwasserschaden in Privathaushalten, eingeteilt nach Einwirkungs- und Widerstandsfaktoren (Thieken & Merz 2009, verändert nach Thieken et al. 2005).

Jedoch analysieren in den letzten Jahren zunehmend mehr Studien die Zusammenhänge und quantitativen Auswirkungen dieser und weiterer Faktoren auf den Wohngebäudeschaden und binden diese teils in neu entwickelte multifaktorielle Schadensmodelle mit ein. Beispiele für die Berücksichtigung von schadensverstärkenden Einflussfaktoren wie der Fließgeschwindigkeit und der Überflutungsdauer finden sich u.a. in Schwarz & Maiwald (2007), Kreibich et al. (2009) und Pistrika & Jonkman (2010) bzw. in Dutta et al. (2003) und Penning-Rowse et al. (2005). Elmer et al. (2010) und Ward et al. (2011) quantifizieren vorrangig den Einfluss der Hochwasserhäufigkeit bzw. die Wahl des Wiederkehrintervalls auf den Schaden. Das Pfingsthochwasser 1999 und das August-Hochwasser 2002 haben gezeigt, dass die Kontamination des Flusswassers, insbesondere durch auslaufendes Öl oder Benzin, den Gebäude- und Hausratschaden um das Zwei- bis Dreifache erhöhen kann (Müller, 2000; DKKV, 2003; Kreibich et al., 2011a). Kreibich & Thieken (2008), Thieken et al. (2008a) oder auch Pretenthaler et al. (2010) greifen diese Problematik auf und berücksichtigen diesen Parameter mit in ihrem Schadensmodell.

Kurzfristige und langfristige Schutzmaßnahmen können dem Schaden jedoch entgegen wirken. Smith (1981), Penning-Rowse & Green (2000) oder Tunstall (2006) berücksichtigen beispielsweise den Faktor Frühwarnung und zeigen eine signifikante Schadensreduktion bei verbesserter Warnung. Allerdings streuen die jeweiligen Ergebnisse stark zwischen 13 % und 41 %. Zudem zeigen Wind et al. (1999) beim Vergleich der hydrologisch ähnlichen Hochwasserereignisse 1993 und 1995 an der Maas (Niederlande), dass die verbesserte

Frühwarnzeit und Hochwassererfahrung der Bevölkerung den Gebäudeschaden 1995 im Vergleich zum Jahr 1993 um 35 % reduzierte.

Weitere Studien untersuchen die Effektivität der privaten Eigenvorsorge auf Wohngebäude- oder Hausratsschäden. Kreibich et al. (2005), Poussin et al. (2012), De Moel et al. (2014) und Lasage et al. (2014) führten jeweils Schadensabschätzungen unter Berücksichtigung von wet-proofing und dry-proofing Maßnahmen durch. Thieken et al. (2008a) entwickelten das Schadensmodell FLEMOps (Flood Loss Estimation MOdel for the private sector), das sowohl Einwirkungs- als auch Widerstandsfaktoren kombiniert. In einer Basisversion wird der Wohngebäudeschaden anhand des Wasserstands, des Gebäudetyps und der Gebäudequalität quantifiziert. In einer Erweiterung des Modells (FLEMOps+) kann zusätzlich die Kontamination und die private Vorsorge mitberücksichtigt werden (Büchele et al., 2006; Kreibich & Thieken, 2008; Thieken et al., 2010). Merz et al. (2013) entwickelten ein multivariates Schadensmodell mittels Data-Mining-Verfahren (Regressionsbäume), bei dem Variablen zur Hochwassercharakteristik, Frühwarnung, Notmaßnahmen, Vorsorge, Gebäudecharakteristik und Sozioökonomie mit eingehen. Dieselben Variablen nutzten auch Vogel et al. (2012), um anhand von datengetriebenen bayesischen Netzwerken ein probabilistisches Modell abzuleiten (Schröter et al., 2014).

Einen Überblick über vorhandene Modelle oder Modellvergleiche geben beispielsweise Smith (1994), Merz & Thieken (2004), Meyer & Messner (2005), Messner et al. (2007), Merz et al. (2010), Bubeck et al. (2011), De Moel & Aerts (2011), Green et al. (2011), Jongman et al. (2012), Meyer et al. (2013) und Schröter et al. (2014). Im folgenden Abschnitt wird u.a. die Qualität der Vorhersagefähigkeit von solchen Schadensmodellen thematisiert.

2.2.3.2 Modellunsicherheiten

Viele Ergebnisse der oben genannten Studien zeigen, dass Modellergebnisse durch die Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren zuverlässigere Aussagen über den Schaden zulassen, als wenn lediglich der Wasserstand herangezogen wird (Meyer et al., 2013; Schröter et al. 2014). Dennoch unterliegen Schadensabschätzungen sehr großen Unsicherheiten. Gründe dafür liegen in der Ableitung der Schadensfunktionen (Kurvenverlauf, Datenverfügbarkeit und -qualität) (Merz et al., 2004, 2010; Meyer & Messner, 2005; Messner et al., 2007; Apel et al., 2008; Merz & Thieken, 2009; Freni et al., 2010; De Moel & Aerts, 2011; Jongman et al., 2012; Meyer et al., 2013), den assoziierten Vermögenswerten der Risikoelemente (Meyer & Messner, 2005; Merz et al., 2010, Jongman et al., 2012), den berücksichtigten Einflussfaktoren (Merz, 2006; Meyer et al., 2013; Schröter et al., 2014) sowie der Wahl der Raumskala (objektspezifisch oder gebietsbezogen) (Merz et al., 2010), der Kostenbasis (Wiederbeschaffungskosten oder abgeschriebene Kosten) oder

des Schadensfunktionstyps (absolut oder relativ, bzw. empirisch oder synthetisch abgeleitet) (Jongman et al., 2012).

Apel et al. (2009), Merz & Thieken (2009) und De Moel & Aerts (2011) bekräftigen, dass Unsicherheiten in der Risikoabschätzung vielmehr durch die Vulnerabilitätsanalyse eingeführt werden (vorrangig durch die Form der Schadensfunktion und den angesetzten Vermögenswerten), als durch die Gefährdungsabschätzung mit den hydraulischen Komponenten (z.B. der Wassertiefe). Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass sich die Hochwasserforschung bis vor kurzem vorwiegend mit Untersuchungen zur Hochwassergefährdung beschäftigt hat und Entwicklungen und Güteabschätzungen von Schadensmodellen vergleichsweise selten durchgeführt werden (Freni et al., 2010; Merz et al., 2010; De Moel et al., 2012; Jongman et al., 2012; Schröter et al., 2014).

Generell kann eine Modellvalidierung anhand von beobachteten Daten helfen, die Aussagefähigkeit der Modellergebnisse besser zu beurteilen. Die Validierung von Schadensmodellen ist allerdings nur vereinzelt zu finden, da reale Schadensdaten von Hochwasserereignissen oftmals nur unzureichend verfügbar sind oder in unterschiedlicher bzw. nicht ausreichender Qualität und räumlichen Auflösung vorliegen. Um diesen Schwierigkeiten zu begegnen, bedarf es zukünftig vor allem einheitlicher Standards bei der Datenerfassung (Thieken et al., 2008b; Merz et al., 2010). Beispiele für eine (erfolgreiche) Modellvalidierung sind die Untersuchungen von Thieken et al. (2008a), die Schadensabschätzungen des Modells FLEMOps+ für Wohngebäude mit beobachteten Instantsetzungskosten nach dem Hochwasser 2002 an der Elbe verglichen und gute Ergebnisse sowohl auf der Mikro- als auch der Mesoskala erzielten. Elmer et al. (2010) prüften das Modell FLEMOps+r, eine Weiterentwicklung von FLEMOps+ mit Berücksichtigung des Wiederkehrintervalls, anhand einer „leave-one-out“ Krossvalidierung und kamen zu einer positiven Bewertung. Jongman et al. (2010) verglichen sieben Schadensmodelle bezüglich deren quantitativen Schadensvorhersagen für das Hochwasser 2002 in Eilenburg (Deutschland) und 2005 in Carlisle (England) und glichen die Ergebnisse mit offiziell gemeldeten Schadensdaten von Finanzinstituten ab. Hierbei zeigte sich, dass die einzelnen Modelle für die beiden Untersuchungsgebiete jeweils unterschiedlich gut abschnitten. Die Autoren schlussfolgerten, dass eine räumliche Übertragbarkeit der Modelle ohne vorherige Anpassung der Eingangsdaten an die Gebietscharakteristika nur eingeschränkt möglich ist. Zu gleichen Ergebnissen kommen auch Cammerer et al. (2013), die die regionale Übertragbarkeit verschiedener Schadensmodelle durch den Abgleich mit beobachteten Schadensdaten explizit untersuchten. Sie bestätigen, dass Schadensmodelle, die aus ähnlichen Regionen mit ähnlichen Hochwasser- und Gebäudecharakteristika abgeleitet wurden deutlich besser abschneiden als Modelle, die auf Datengrundlage unterschiedlicher Regionen und Hochwasserereignisse entwickelt wurden.

3 Das Untersuchungsgebiet: die Mulden

Für die Hochwasserschadensmodellierung wurden die Mulden als Fallstudie gewählt. Zur besseren Einordnung der Region wird in diesem Kapitel das Einzugsgebiet vorgestellt, insbesondere das Abflussregime und die Hochwasserentstehung näher beschrieben und Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes vorgestellt.

3.1 Das Einzugsgebiet der Mulden

Die Vereinigte Mulde, oder oft nur Mulde genannt, ist ein Nebenfluss der Elbe und entsteht durch den Zusammenfluss der Freiburger Mulde und Zwickauer Mulde südöstlich von Leipzig bei Sermuth (Sachsen). Insgesamt werden durch die Mulden große Teile der Nordabdachung des Erzgebirges und des nördlich vorgelagerten Hügellandes entwässert (LfULG, 2014) (Abbildung 4). Die Freiburger Mulde entspringt im tschechischen Teil des Osterzgebirges in einer Höhe von 850 m über NN und überwindet auf ihrem 124 km Fließweg bis zum Zusammenfluss mit der Zwickauer Mulde einen Höhenunterschied von 719 m (mittleres Gefälle: 5,8 ‰). Einer ihrer wichtigsten Nebenflüsse ist die Zschopau, die westlich von Döbeln in die Freiburger Mulde mündet. Mit einem fast doppelt so großen Einzugsgebiet entwässert die Zschopau vorrangig das mittlere Erzgebirge. Zusammen mit ihrem Hauptnebenfluss der Flöha kann die Zschopau den mittleren Jahresdurchfluss der Freiburger Mulde (MQ 35,6 m³/s) mehr als verdreifachen (IKSE, 2005; LfULG, 2009; LfULG, 2014).

Die Zwickauer Mulde entspringt aus zwei Quellflüssen, der Roten und der Weißen Mulde, im Westerzgebirge bei Muldenberg (Vogtland) in einer Höhe von 770 m über NN (Rote Mulde) und überwindet bis zum Zusammenfluss mit der Freiburger Mulde 639 Höhenmeter (mittleres Gefälle: 3,8 ‰) (IKSE, 2005; LfULG, 2009). Ihr wichtigster Nebenfluss ist die aus der Zwönitz und Würschnitz gebildete Chemnitz, die nördlich von Wechselburg in die Zwickauer Mulde entwässert. Mit einer Lauflänge von 167 km ist die Zwickauer Mulde zwar der längere Zufluss der Vereinigten Mulde, jedoch mit einem MQ von 26,3 m³/s das wasserärmere Gebiet (IKSE, 2005; LfULG, 2009; LfULG, 2012).

Die Vereinigte Mulde überwindet ab dem Zusammenfluss von Freiburger und Zwickauer Mulde 86 km Fließstrecke bis zur sächsischen Landesgrenze nordwestlich von Bad Dübau. Hier hat sie einen mittleren Jahresabfluss von 64,6 m³/s (LfULG, 2012). Nach weiteren 61 km mündet sie zwischen Dessau und Rosslau in Sachsen-Anhalt linksseitig in die Elbe.

Ihr mittleres Gefälle vom Zusammenfluss der Freiburger und Zwickauer Mulde bis zur Elbemündung beträgt 0,5 ‰ (IKSE, 2005).

Das Gesamteinzugsgebiet aller Mulden beträgt insgesamt ca. 7400 km², das Einzugsgebiet des sächsischen Teils beträgt 6250 km²). Davon gehören 2985 km² zum Einzugsgebiet der Freiburger Mulde, 2360 km² zum Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde und 2055 km² zum Einzugsgebiet der Vereinigten Mulde. 388 km² liegen davon insgesamt auf tschechischem Staatsgebiet (IKSE, 2005).

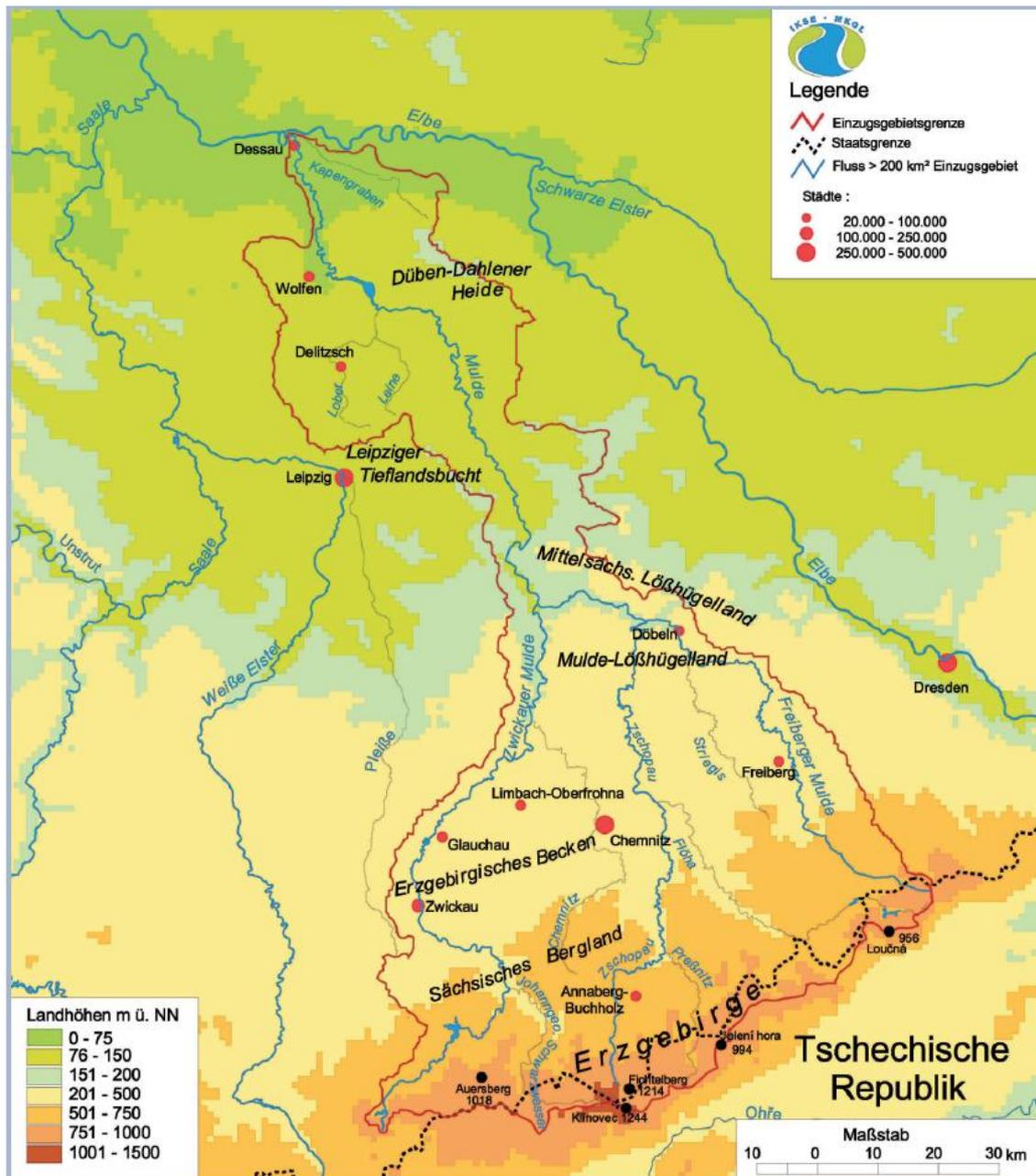


Abbildung 4: Topographische Karte des Einzugsgebiets der Mulden (IKSE, 2005).

3.2 Landnutzung

Die Landnutzung im Einzugsgebiet der Mulden ist überwiegend durch landwirtschaftliche Flächen (52 %) geprägt. Weitere 30 % der Flächen entfallen auf Waldgebiete, 9 % auf Siedlungsgebiete und 7 % auf Weideland (Schädler et al., 2012). Aufgrund der Topographie sind diese Flächen im Gebiet jedoch nicht gleich verteilt. Die Gebirgsregion ist vorrangig von Wäldern bedeckt, wohingegen im mittleren und nördlichen Flachlandteil des Einzugsgebiet primär landwirtschaftliche Nutzflächen liegen (Menzel & Bürger, 2002; Schädler et al., 2012).

3.3 Klima und Hochwasserentstehung

Nach Marcinek (1991) gehört das Einzugsgebiet der Mulden klimatisch gesehen zum Kontinentaltyp des zentraleuropäischen Mittelgebirgslandes höherer und mittlerer Lagen (BfG, 2003). Zudem werden die Temperaturen und Niederschlagssummen maßgeblich durch die Topographie beeinflusst. Auf der höchsten deutschen Erhebung des Erzgebirges, dem Fichtelberg (1214 m über NN), beträgt die mittlere Jahrestemperatur 3 °C. Mit abnehmender Geländehöhe nehmen die Temperaturen zu, so dass im Flachland durchschnittliche Temperaturen von 8-9 °C im Jahr vorherrschen (IKSE, 2005). Bezüglich der Niederschläge ist zum einen eine Abnahme der mittleren jährlichen Niederschlagsmengen von West nach Ost zu verzeichnen. Zum anderen nehmen die Niederschläge in Richtung des nördlich vorgelagerten Hügellandes ab (Schädler et al., 2012). Entsprechend werden in den Kammlagen des Erzgebirges mittlere Jahresniederschläge von mehr als 1000 mm gemessen (z.B. Messstation Fichtelberg 1118 mm). Die entsprechenden Werte im Tiefland liegen bei etwa 600 mm (IKSE, 2005; Schädler et al., 2012).

Das vorherrschende Abflussregime im Einzugsgebiet der Mulden ist zum einen charakterisiert durch periodische Frühjahrshochwasser, die vor allem durch zyklonale Westlagen verursacht werden (Petrow et al., 2007). Höchste Abflüsse sind entsprechend in den Monaten März und April aufgrund von Schneeschmelze und Regenereignissen zu verzeichnen (Menzel & Bürger, 2002; Schädler et al., 2012). Ein weiteres Maximum kann zudem im Januar beobachtet werden, wenn feuchtmilde Luftmassen nach Deutschland gelenkt werden und zum Jahresende das so genannte „Weihnachtstauwetter“ verursachen, das zu ausgeprägtem Hochwasser führen kann (LfULG, 2009).

Zum anderen treten in den Sommermonaten zwar generell die geringsten Abflusswerte auf (Schädler et al., 2012), allerdings ist das Abflussregime zusätzlich geprägt durch episodisch auftretende Sommerhochwasser zumeist in den Monaten Juni, Juli oder August. Diese werden vornehmlich durch die so genannten Vb-Wetterlagen verursacht, wie z.B. auch das August-Hochwasser 2002 (Menzel & Bürger, 2002; Petrow et al., 2007; Schädler et al.,

2012). Auf einer Vb-Zugbahn transportiert ein Tiefdruckgebiet warmfeuchte Luft aus der Adriaregion in nordöstliche Richtung über Österreich und Tschechien in Richtung Polen. Sobald die Luftmassen Gebirgsregionen erreichen, z.B. die Alpen oder das Erzgebirge, werden sie aufgrund der Topographie gezwungen aufzusteigen und kühlen dabei ab. Dies führt zu räumlich ausgedehnten, intensiven Niederschlägen, die zu Hochwasserereignissen mit extremen Ausmaßen führen können (Mudelsee et al., 2004).

Die sehr hohen Abflüsse und Überschwemmungen, verursacht durch Schneeschmelze, langanhaltendem Dauerregen mit hohen Niederschlagssummen oder lokalen Starkniederschlägen, sind vor allem auf die Gebietscharakteristika des Erzgebirges mit einem hohen Gefälle, schmalen Talauen, felsigen Untergrund mit geringer Bodenbedeckung und begrenzter Speicherkapazität zurück zu führen. Entlang des Flusses verringern sich die resultierenden Hochwasserwellen erst im Erzgebirgsbecken oder im sich nördlich anschließenden Hügelland durch die dortige Überschwemmung der ausgedehnten Talauen (LfULG, 2009). Tabelle 5 gibt eine Übersicht über Abflussmengen an ausgewählten Pegeln entlang der Mulden.

Tabelle 5: Mittlere und Hochwasser-Abflusswerte für ausgewählte Pegel entlang der Mulden (LfULG, 2012).

Gewässer	Pegel	Einzugsgebiet [km ²]	MQ [m ³ /s]	HQ [m ³ /s]	Beobachtungs- zeitreihe
Vereinigte Mulde	Bad Dübén 1	6170	64,6	2200	1961-2010
Zwickauer Mulde	Wechselburg 1	2099	26,3	1000	1910-2010
Chemnitz	Göritzhein	532	6,4	250	1910-2010
Freiberger Mulde	Nossen 1	586	6,9	690	1926-2010
Zschopau	Lichtenwalde 1	1572	21,9	1250	1910-2010

Eines der schlimmsten Hochwasserereignisse an der Mulde ereignete sich im August 2002, das in Deutschland einen finanziellen Schaden von 11,6 Mrd. € verursachte – davon 8,7 Mrd. € allein in Sachsen – und damit als die bisher teuerste Naturkatastrophe in Deutschland gilt (Thielen et al., 2006a; LfLUG, 2009). Im Einzugsgebiet der Zwickauer Mulde wurden Abfluss-Jährlichkeiten bis zu 180 Jahren ermittelt. Im Einzugsgebiet der Freiberger Mulde und Vereinigten Mulde bewegten sich die Jährlichkeiten mehrheitlich zwischen 200 und 400 Jahren. Diese Berechnungen vom LfLUG (2009) erfolgten anhand einer nach Winter- und Sommerereignissen differenzierten Hochwasserstatistik unter Einbeziehung des Hochwasserereignisses 2002. Weitere markante Hochwasserereignisse,

die seit Beginn der Aufzeichnungen 1903 an der Mulde verzeichnet worden, sind in Tabelle 6 gelistet.

Tabelle 6: Markante Hochwasserereignisse im Mulde-Einzugsgebiet seit 1903 (LfULG, 2009).

Monat	Jahr
Juli	1926
Januar	1932
Juli	1954
Juli	1958
Dezember	1974
August	2002
Juni	2013

3.4 Technischer Hochwasserschutz

Die natürlichen Abflussbedingungen im Mulde-Einzugsgebiet werden seit Jahrhunderten durch menschliche Eingriffe in den Gewässerlauf beeinflusst (Gewässeraufstau, Flussbegradigungen, Gerinnebettveränderungen, Deichbau) (PGS, 2004). Erste Wasserstauanlagen wurden ausschließlich zu wirtschaftlichen Zwecken vor allem im Bergbau genutzt. Erst im Nachgang eines Hochwasserereignisses im Jahr 1897 wurden technische Anlagen (z.B. Talsperren) auch für den Hochwasserschutz konzipiert. In den Folgejahren kam insbesondere die Funktion der Trinkwasserbereitstellung hinzu (Von Kirchbach et al., 2002). Heute gibt es im deutschen Mulde-Gebiet 34 Talsperren mit einem Stauraum von insgesamt etwa 200 Mio. m³, davon werden ca. 23 Mio. m³ für den gewöhnlichen Hochwasserrückhalt bereitgestellt (IKSE, 2012).

Das Hochwasserschutzsystem an den Mulden stützte sich in der Vergangenheit jedoch weitestgehend auf den Bau von Deichen, um insbesondere die Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen zu vergrößern. Zum Schutz der fruchtbaren Flussauen befinden sich deswegen viele der uferbegleitenden Deiche an der Vereinigten Mulde – mit dem Ergebnis, dass dort die natürlichen Hochwasserretentionsflächen stark reduziert sind. Siedlungsgebiete werden häufig durch lokal begrenzte Schutzmaßnahmen wie Mauern oder auch Deiche geschützt (PGS, 2004). In der Regel vermitteln diese Schutzeinrichtungen jedoch ein hohes Sicherheitsgefühl, sodass sich hinter ihnen im Laufe der Zeit ein großes Schadenspotenzial aufgebaut hat.

Die durch das Hochwasserereignis 2002 verursachten hohen Schäden, die u.a. durch über 100 Deichbrüche entlang der Mulde entstanden sind, führten deutlich die Schwachstellen

des bisherigen Hochwasserschutzsystems vor Augen. Ein zukünftiges Schutzsystem sollte sich vielmehr in Abhängigkeit von der Flächennutzung an den Schadens- und Gefährdungspotenzialen orientieren. Das Schadenpotenzial sollte zusätzlich durch eine Einschränkung der Siedlungstätigkeit in überschwemmungsgefährdeten Gebieten gemindert werden (PGS, 2004).

Schlüsselereignisse wie das Hochwasser 2002 werden oft zum Anlass genommen, die bisherigen Schutzstrategien zu überprüfen und anzupassen. Zur grundlegenden Verbesserung des Hochwasserschutzes wurden im Freistaat Sachsen deswegen Hochwasserschutzkonzepte (HWSK) für die Gewässer 1. Ordnung und die Elbe entwickelt. Diese beinhalten die Umsetzung von ca. 1600 Maßnahmen unterschiedlicher Priorität, bei denen auch soziale, ökologische und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden sollten (PGS, 2004; LTV, 2015). Der technische Hochwasserschutz beinhaltet dabei folgende Baumaßnahmen: Gewässerausbau, Neu- oder Umbau von Deichen, Hochwasserschutzanlagen und Rückhaltebecken sowie Errichtung von Flutungspoldern. Für Siedlungsgebiete soll darüber hinaus zumeist ein Schutzniveau für ein HQ100-Ereignis gewährleistet werden (LTV, 2015). Dies ist ein Hochwasserabfluss (HQ), der durchschnittlich alle 100 Jahre erreicht oder überschritten wird.

Seit dem Hochwasser 2002 wurden in Sachsen bereits über 500 Mio. € in die Verbesserung des technischen Hochwasserschutzes investiert; bis 2020 soll sich dieser Betrag auf insgesamt 1 Mrd. € belaufen (Kuhlicke et al., 2013). An den Mulden wurde 2004 das HWSK im Auftrag der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV) entwickelt. Dafür wurde anhand verschiedener Variantenuntersuchungen ein Maßnahmenkatalog erstellt, der letztendlich den optimierten Planzustand des Hochwasserschutzes für die Mulden darstellt.

3.5 Das Untersuchungsgebiet

Innerhalb des Einzugsgebiets der Mulden wird ein Abschnitt als Untersuchungsgebiet für die vorliegende Arbeit ausgewählt. Die Wahl orientiert sich an der räumlichen Gliederung der in Sachsen erstellten HWSK und der vorhandenen Datengrundlage für die Schadensmodellierung. Entsprechend werden als Untersuchungsgebiet alle Flussabschnitte der Mulden ausgewählt, die im ehemaligen Regierungsbezirk Leipzig liegen (Abbildung 5). Dazu gehören ca. 10 km der Zwickauer Mulde bis zum Zusammenfluss in die Vereinigte Mulde, ca. 45 km der Freiburger Mulde ab dem Pegel Nossen und 90 km der Vereinigten Mulde bis zur Landesgrenze zu Sachsen-Anhalt.

Die Hochwasserschadensabschätzung erfolgt für die in diesem Gebiet liegenden 30 sächsischen Gemeinden.

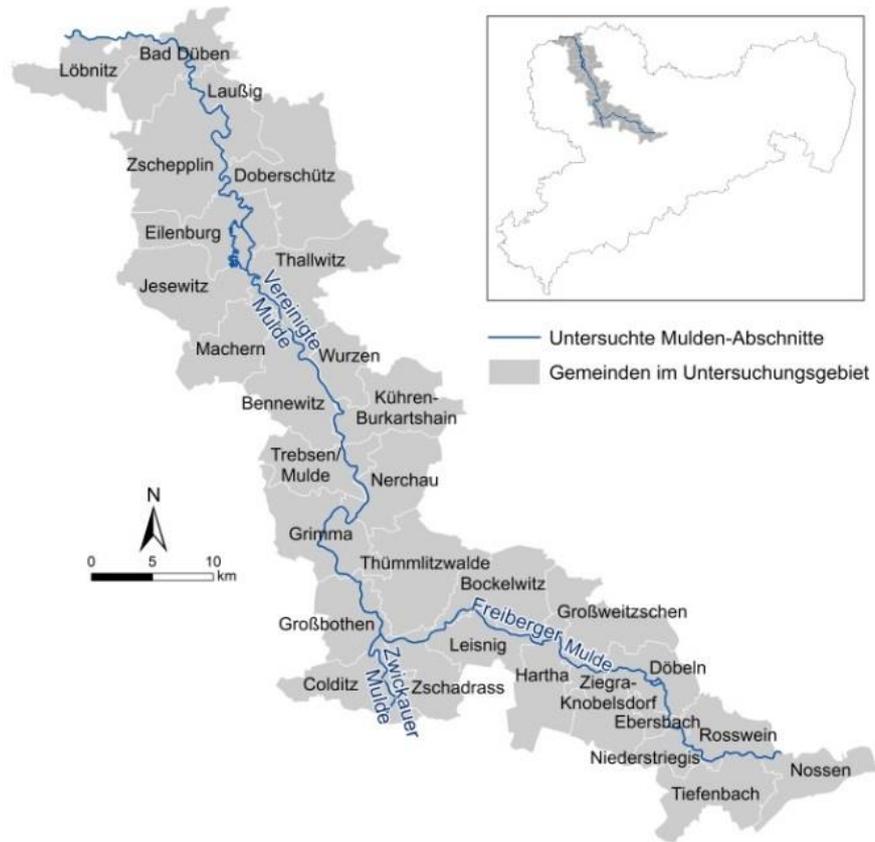


Abbildung 5: Das Untersuchungsgebiet (Datenquelle: LTV, Infas Geodaten).

4 Daten und Methoden

Die Arbeit verfolgt das vorrangige Ziel zu untersuchen, wie hoch der schadensmindernde Beitrag der privaten Eigenvorsorge in Bezug auf Hochwasserschäden an Wohngebäuden im Vergleich zur Schutzwirkung von technischen Anlagen des Staates ist. Für die Beantwortung der Fragestellung sollen mithilfe des multifaktoriellen Hochwasserschadensmodells FLEMOps (Flood Loss Estimation Model for the private sector) Vergleichsrechnungen mit drei unterschiedlich stark ausgeprägten technischen Hochwasserschutzzuständen sowie drei unterschiedlich hohen Niveaus privater Eigenvorsorge durchgeführt werden, um letztendlich den jährlichen Schadenserwartungswert (EAD) für Wohngebäuden für 30 sächsische Gemeinden entlang der Mulde abzuschätzen.

Im Einzelnen werden in den folgenden Abschnitten deswegen zunächst die drei untersuchten technischen Gewässerausbauzustände sowie die Charakteristika der drei privaten Vorsorgeebenen beschrieben. Des Weiteren wird das verwendete Modell mit den benötigten Eingangsdaten und die Vorgehensweise zur Berechnung des EAD vorgestellt.

4.1 Technische Gewässerausbauzustände

Als Basis für den Stand der staatlichen, technischen Hochwasservorsorge dienen die baulichen Gewässerzustände der Mulden von 2002 bzw. 2013 sowie der Zustand nach Umsetzung aller im Hochwasserschutzkonzept (HWSK) Mulden vorgesehener und im Flussgebiet geplanten Baumaßnahmen. Dieser Zustand stellt den optimierten Plan-Zustand für das Untersuchungsgebiet dar. Die drei betrachteten Gewässerausbauzustände werden in den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 näher beschrieben. Tabelle 7 gibt eine Übersicht der untersuchten Gewässerausbauzustände und ihrer Charakteristika.

Tabelle 7: Übersicht der untersuchten Gewässerzustände.

Bezeichnung	Gewässerzustand
festgestellter Zustand 2002	nach dem Hochwasser 2002 feststellbarer Istzustand (inkl. einiger Schadensbeseitigungen bzw. vorgenommenen Deichverschlüsse)
PLAN-Zustand HWSK	gemäß HWSK Mulden vorgesehener Planzustand für das Gesamtgewässer
Ausbauzustand 2013	erreichter Ausbauzustand bis Juli 2014

Für die Quantifizierung des EADs stehen dieser Masterarbeit simulierte Überschwemmungsflächen und -tiefen für die drei Gewässerausbauzustände zur Verfügung, die mit dem 1D Modell HEC-RAS erstellt wurden. Die hydraulischen Simulationen basieren dabei auf den Ergebnissen der Variantenuntersuchungen im HWSK Mulden der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV). Sie wurden jeweils für Hochwasserabflüsse mit verschiedenen Jährlichkeiten durchgeführt (HQ 5, 25, 50, 100, 200 und 500) und mit einer Rasterauflösung von 5 m ausgegeben. Eine nähere Beschreibung der hydraulischen Modellierung ist in Kienzler et al. (2015c) zu finden. Die generierten Überschwemmungsflächen und -tiefen gehen anschließend als Inputdaten in die Schadensmodellierung mit FLEMOps ein.

Abbildung 6 zeigt ausschnittsweise die Ergebnisse der Überschwemmungsflächen für ein statistisch ermitteltes 100-jährliches Hochwasser (HQ100) in den drei Gewässerzuständen (festgestellter Zustand 2002, PLAN-Zustand HWSK und Ausbauzustand 2013). Während die Simulationsergebnisse im festgestellten Gewässerzustand 2002 weitreichende Überflutungen von Siedlungsflächen zeigen (Abbildung 6 links), sind im PLAN-Zustand HWSK diesbezüglich deutliche Verbesserungen zu sehen (Abbildung 6 Mitte). Beim Ausbauzustand 2013 verringern sich die Überschwemmungsflächen aufgrund der vorangeschrittenen Baumaßnahmen vor allem in Eilenburg und oberstrom von Eilenburg (Abbildung 6 rechts).

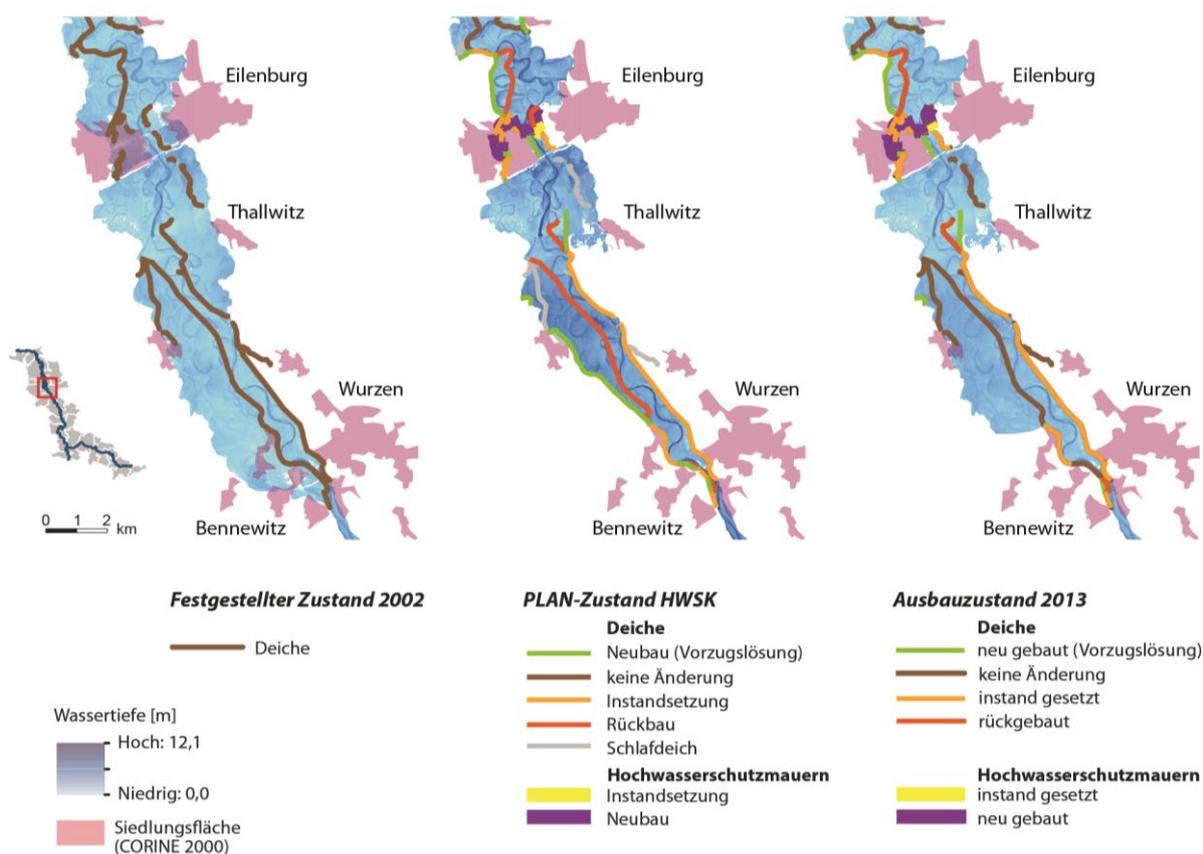


Abbildung 6: Ausschnitt der Überschwemmungsflächen und -tiefen eines HQ100 für den festgestellten Zustand 2002 (links), den technischen PLAN-Zustand HWSK (Mitte) und den Ausbauzustand 2013 (rechts) an der Vereinigten Mulde (Datenquellen: LTV, Infas Geodaten, CORINE Land Cover (CLC2000); Umweltbundesamt, DLR-DFD 2004).

4.1.1 Festgestellter Zustand 2002

Das technische Hochwasserschutzsystem im festgestellten Zustand 2002 entspricht dem Zustand nach dem Hochwasser 2002, der u.a. durch Vermessung ermittelt und in Kapitel 3.4 bereits kurz beschrieben wurde. Charakteristisch für diesen Zustand sind uferbegleitende Deiche, die vorrangig an der Vereinigten Mulde verlaufen, ortsnah verlaufende Mauern oder Deiche, die größere Siedlungsbereiche schützen sowie vereinzelte Verwallungen oder Teilschutzdeiche, die zumeist landwirtschaftliche Flächen absichern (Abbildung 6 links). Im HWSK Mulden wurde für diesen Zustand vermerkt, dass bei einem HQ100 mit einer weitreichenden Überströmung der Hochwasserschutzanlagen zu rechnen sei (PGS, 2004).

4.1.2 PLAN-Zustand HWSK

Um die hydraulische Simulation für den Gewässerzustand nach Umsetzung aller geplanten Baumaßnahmen durchzuführen, wurde die Variantenrechnung des PLAN-Zustands des

HWSK Mulden herangezogen. Die geplanten Maßnahmen beinhalten u.a. den Neubau und die Instandsetzung von Deichen und Hochwasserschutzmauern oder auch Deichrückverlegungen (Abbildung 6 Mitte). Zudem sollen in den Bereichen Mörtitz und Löbnitz (Landkreis Delitzsch) steuerbare Flutungspolder angelegt werden (PGS, 2004).

Der optimierte Maßnahmenkatalog des HWSK Mulden wurden in das hydraulische Modell eingearbeitet und der Abflussbereich um die künftig durch Hochwasserschutzanlagen geschützten Flächen reduziert (Kienzler et al., 2015c).

4.1.3 Ausbauzustand 2013

Der Ausbauzustand 2013 stellt quasi einen Übergangszustand zwischen dem festgestellten Zustand 2002 und dem PLAN-Zustand dar und beinhaltet alle geplanten Maßnahmen, die bereits bis Juli 2014 umgesetzt worden waren. Eine detaillierte Auflistung dieser Maßnahmen wurde von der LTV bereitgestellt.

Analog zum PLAN-Zustand HWSK wurde auch hier das hydraulische Modell an die Baumaßnahmen angepasst und neue Simulationen durchgeführt (Kienzler et al., 2015c).

Die bisher umgesetzten Baumaßnahmen sind ausschnittsweise in Abbildung 6 (rechts) dargestellt. Die Verbesserungen des technischen Hochwasserschutzes sind insbesondere in Eilenburg und stromaufwärts bereits sehr vorangeschritten. Zudem erfolgten schon Deichrückverlegungen, Sanierungsarbeiten und Neubauten am Zusammenfluss der Zwickauer und Freiburger Mulde sowie bei Nitzschka (Kienzler et al., 2015c).

4.2 Niveaus der privaten Eigenvorsorge

Für die Berücksichtigung des schadensmindernden Einflusses der privaten Eigenvorsorge werden analog zu den drei baulichen Gewässerausbauzuständen das Niveau privater Eigenvorsorge für 2002 und 2013 sowie ein „optimaler“ Vorsorgezustand verwendet. Diese werden auf Basis von computergestützten Telefoninterviews mit Privathaushalten in Deutschland abgeleitet, die bei den Hochwasserereignissen vom August 2002 oder Juni 2013 direkte Sachschäden erlitten hatten.

Als kurzer Einschub sollen hier zunächst das Ziel und die Inhalte der Befragungen vorgestellt werden: Um besser zu verstehen, wie potenzielle Einflussfaktoren den finanziellen Hochwasserschaden an Wohngebäuden beeinflussen, wurden nach den Hochwasserereignissen von 2002 und 2013 jeweils umfangreiche Befragungen von Privathaushalten in Deutschland durchgeführt. Die Haushalte in den von Hochwasser betroffenen Regionen wurden jeweils etwa neun Monate nach dem Ereignis telefonisch

befragt. Auf Grundlage von Informationen betroffener Gemeinden, Hochwasserberichten oder Überflutungsflächen wurden Straßenlisten erstellt, anhand derer die Telefonnummern hochwasserbetroffener Privathaushalte recherchiert wurden. Für die Befragung zum Hochwasser 2002 wurden zufällig Haushalte aus diesen Listen ausgewählt, für die Befragung zum Ereignis 2013 wurde eine Vollerhebung durchgeführt, d.h. alle recherchierten Telefonnummern wurden angerufen. Inhaltlich unterschieden sich die beiden Befragungen nur wenig. Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die beiden Kampagnen und listet die abgefragten Themenfelder auf. Eine nähere Beschreibung der Befragungen ist u.a. in Thieken et al. (2007) oder DKKV (2015) zu finden.

Tabelle 8: Charakterisierung der Haushaltsbefragungen zum August-Hochwasser 2002 und Juni-Hochwasser 2013.

Befragung:	August-Hochwasser 2002	Juni-Hochwasser 2013
Befragungsmethode:	Computergestützte Telefoninterviews	
Befragungszeitraum:	08. April bis 10. Juni 2003	18. Februar bis 24. März 2014
Anzahl der befragten Privathaushalte:	1697	1652
Übergeordnete Befragungsthemen:	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrologische Einwirkung des Hochwassers am Gebäude • Hochwasserschäden (an Gebäude und Hausrat) • Persönliche Hochwassererfahrung • Langfristige Vorsorgemaßnahmen • Frühwarnung • Notmaßnahmen • Evakuierung • Reinigungsarbeiten und Kontamination des Hochwassers • Wiederherstellung von geschädigtem Hausrat und Gebäude • Angaben zum Wohngebäude • Sozio-demographische Angaben 2013 zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> • Intangible Effekte • (staatliche) Hilfen und finanzielle Entschädigung (inkl. Bewertung des Wiederaufbaufonds) 	
Projektpartner:	GFZ Potsdam, Deutsche Rück	Universität Potsdam, GFZ Potsdam, Deutsche Rück
Finanzierung:	Deutsche Rück, BMBF	BMBF, Deutsche Rück, GFZ Potsdam

Um nun die verschiedenen Niveaus der Eigenvorsorge zu definieren sind Informationen zu durchgeführten Baumaßnahmen von Privathaushalten essentiell. Diese Auskünfte werden aus den eben beschriebenen Befragungen entnommen (langfristige Vorsorgemaßnahmen). Die befragten Hochwasserbetroffenen haben dabei aus einer Liste von vorgegebenen Baumaßnahmen auswählen können, welche sie davon vor dem jeweiligen Hochwasser durchgeführt haben. Diese Maßnahmen waren:

- angepasste Gebäudenutzung (z.B. keine Lagerung wertvoller Gegenstände im Keller)
- angepasste Inneneinrichtung (z.B. Verlegung von wasserresistenten Bodenbelägen im EG)
- Einbau einer hochwassersicheren Heizungsanlage/Öltank
- Verlegung der Heizungsanlage in höhergelegene Stockwerke
- Abdichtung des Gebäudes
- Anschaffung von Wassersperren

Aus den Befragungsdaten wird die Anzahl bzw. der prozentuale Anteil der Befragten mit einer oder mehr durchgeführten Bauvorsorgemaßnahmen im Untersuchungsgebiet ermittelt und anschließend in drei qualitative Klassen eingeteilt: keine, gute und sehr gute Bauvorsorge. Die genaue Zuordnung der Prozentwerte ist in Tabelle 9 aufgeführt.

Das Eigenvorsorgeniveau wird in dieser Arbeit zusätzlich in Kombination zur Kontamination des Flusswassers durch Öl oder Benzin betrachtet, da eine gute Bauvorsorge zwar Schäden reduzieren, eine schlechte/ungenügende Bauvorsorge diese aber auch deutlich erhöhen kann, z.B. wenn Benzin oder Öl aus nicht gesicherten Heizöltanks ausläuft. Dafür ist es wichtig zu wissen, wie viele Personen im Untersuchungsgebiet überhaupt von Kontamination betroffen waren. Auch diese Information wird anhand der Befragungsdatensätzen zu den Hochwasserereignissen 2002 und 2013 ermittelt (Reinigungsarbeiten und Kontamination des Hochwassers). Analog zur Bauvorsorge wird dann der prozentuale Anteil der Haushalte mit Öl-/Benzin-Kontamination in keine, mittlere und starke Kontamination klassifiziert. Die jeweiligen Prozentwerte sind ebenfalls in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Klassifikation der Bauvorsorge und Kontamination.

Klassifikation Bauvorsorge	Anteil der Haushalte mit mindestens einer Bauvorsorgemaßnahme [%]	Klassifikation Kontamination	Anteil der Haushalte mit Öl-/Benzin-Kontamination [%]
Keine	0 – 24	Keine	0 – 19
Gut	25 – 74	Mittel	20 – 49
Sehr gut	75 – 100	stark	50 – 100

Durch die Auswertungen der Befragungen zur Bauvorsorge und Kontamination können die Vorsorgeniveaus für das Jahr 2002 und 2013 bestimmt werden. Das Vorsorgeniveau 2002 ist charakterisiert durch eine geringe Bauvorsorge und hohe Kontaminierung des Wassers mit Öl oder Benzin. Beim Vorsorgeniveau 2013 hingegen liegt eine deutlich verbesserte Bauvorsorge vor, die auch eine Verringerung der Kontaminierung bewirkt. Das zusätzlich betrachtete Vorsorgeniveau „optimal“ ist ein hypothetischer Zustand, der die bestmögliche Minderung von Hochwasserschäden durch Eigenvorsorge repräsentieren soll. Bei diesem Zustand liegt eine sehr gute Bauvorsorge vor, so dass es zu keiner weiteren Kontamination des Flusswassers kommt. Tabelle 10 gibt eine Zusammenfassung der drei verschiedenen Vorsorgeniveaus und ihrer Charakteristika. Diese Angaben werden später für die Modellierung und Abschätzung des EAD mit herangezogen.

Tabelle 10: Übersicht der Vorsorgeniveaus und ihrer Charakteristik (vgl. Tabelle 8).

Bezeichnung	Charakteristik
Vorsorgeniveau 2002	Keine Bauvorsorge und starke Kontaminierung
Vorsorgeniveau 2013	gute Bauvorsorge und mittlere Kontaminierung
Vorsorgeniveau „optimal“	sehr gute Bauvorsorge und keine Kontaminierung

4.3 Modellierung

Das für diese Fallstudie auf der Mesoskala (Gemeindeebene) verwendete Schadensmodell FLEMOps (Flood Loss Estimation Model for the private sector) ist eines der wenigen Hochwasserschadensmodelle, das schadensreduzierende Parameter, wie die Eigenvorsorge, mitberücksichtigen kann. Dieses empirische Modell wurde am Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) entwickelt und auf Basis von 1697 erhobenen Hochwasserschadensdaten von Privathaushalten in den Bundesländern Sachsen, Sachsen-Anhalt und Bayern abgeleitet, die vom Hochwasser 2002 betroffen waren (Thieken et al.,

2008a, vgl. Tabelle 8). Das Modell wurde bereits von Thieken et al. (2008a) und Wünsch et al. (2009) für Gemeinden entlang der Mulde für das Hochwasserereignis 2002 validiert und von Apel et al. (2009) für Eilenburg. Die Ergebnisse zeigten, dass das mesoskalige Modell in diesem Gebiet die Schäden von 2002 zuverlässiger schätzen konnte als andere Schadensmodelle wie IKSR (2002). Daher wurde es für die vorliegende Untersuchung gewählt.

4.3.1 Modellbeschreibung

FLEMOps ist ein multifaktorielles Modell, das insgesamt fünf schadensbeeinflussende Parameter berücksichtigt (Tabelle 11). In der Basisvariante wird der direkte monetäre Schaden für Wohngebäude anhand von fünf Wasserstandsklassen, drei Gebäudetypklassen und zwei Gebäudequalität-/Ausstattungsklassen berechnet (Abbildung 7). Dafür wird für jede dieser Unterklassen der mittlere Wohngebäude-/Hausratsschadensgrad aus den empirischen Schadensdaten abgeleitet.

Tabelle 11: Eingangsparemeter in FLEMOps (nach Thieken et al., 2008a).

Modell	Einflussfaktor	Klassifikation
FLEMOps Basis-Variante	Wasserstand	• < 20 cm
		• 21-60 cm
		• 61-100 cm
• 101-150 cm		
• > 150 cm		
Gebäudetyp	• Einfamilienhaus (EFH)	
	• Reihen-/Doppelhaus (RDH)	
Gebäudequalität	• Mehrfamilienhaus (MFH)	
	• einfach	
FLEMOps+ Aufbau-Variante	Private Bauvorsorge	• mittel/hoch
		• keine
		• gut
Kontamination des Hochwassers	• sehr gut	
	• keine	
	• mittel	
		• stark

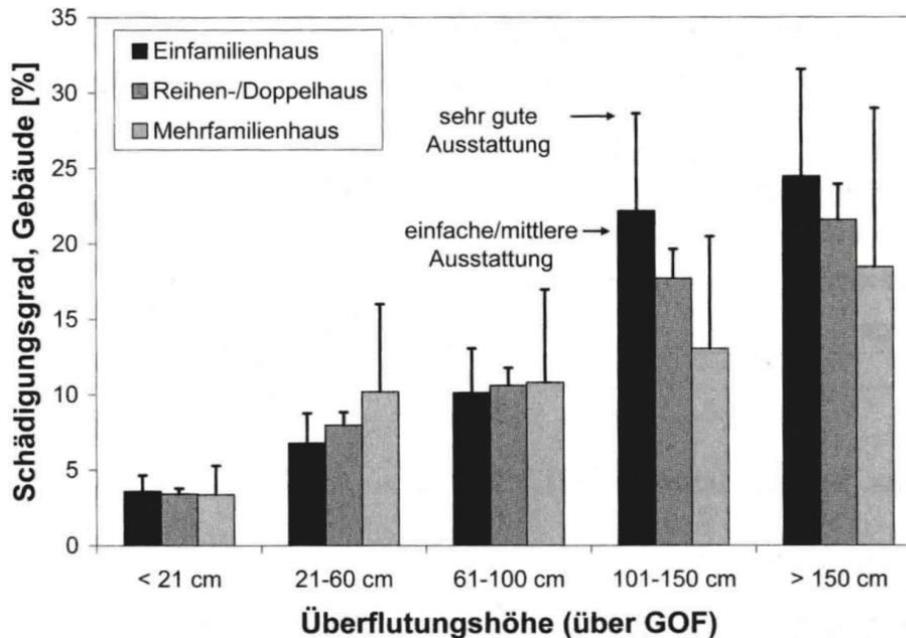


Abbildung 7: FLEMOps-Basisvariante zur Berechnung von Wohngebäudeschäden (Mikroskala) mit den Eingangsparametern Wasserstand, Gebäudetyp und Gebäudequalität (Thieken & Kreibich, 2009).

In der erweiterten Variante FLEMOps+ können Skalierungsfaktoren (Zu- oder Abschläge) für Schäden an privaten Wohngebäuden durch verschiedene Kombinationen der Kontaminierung des Hochwassers mit Öl oder Benzin und der Bauvorsorge zusätzlich berücksichtigt werden, die von Büchele et al. (2006) ebenfalls empirisch aus den Befragungsdaten von 2002 (vgl. Tabelle 8) abgeleitet wurden. Beispielsweise kann eine sehr gute Bauvorsorge ohne das Auftreten einer Kontamination den resultierenden Schaden auf 41 % reduzieren. Auf der anderen Seite erhöht eine starke Kontamination bei keiner Vorsorge den Schaden um 58 %. Zusätzlich gilt die Annahme, dass keine starke Kontaminierung auftreten kann, wenn mindestens eine gute Bauvorsorge vorliegt. Die jeweiligen Skalierungsfaktoren sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Skalierungsfaktoren für Wohngebäudeschäden durch Bauvorsorge und Kontamination des Hochwassers (angepasst nach Büchele et al., 2006).

Skalierungsfaktoren		Kontamination (Anteil der Haushalte, bei denen Kontamination durch Öl oder Benzin aufgetreten ist)		
		Keine (0 – 19 %)	Mittel (20 – 49 %)	Stark (50 – 100 %)
Bauvorsorge (Anteil der Haushalte mit mindestens einer Bauvorsorgemaßnahme)	Keine (0 – 24 %)	0,92	1,20	1,58
	Gut (25 – 74 %)	0,64	0,86	--
	Sehr gut (75 – 100 %)	0,41	0,71	--

Das Modell lässt sich sowohl auf Mikroskala (Gebäudeebene) als auch auf Mesoskala (Gemeindeebene) anwenden. Für die Anwendung auf der Gemeindeebene, wie in dieser Fallstudie, muss das zuvor beschriebene Modell allerdings anhand eines Skalierungsverfahrens angepasst werden, da keine flächendeckend detaillierten Daten zu den Gebäudecharakteristika (Typ, Qualität) verfügbar sind. Dies geschieht auf Basis von statistischen Zensusdaten auf Gemeindeebene (Infas Geodaten) sowie einem dasymetrischen Kartierungsverfahren für Geomarketingdaten (Wohngebäudewerte) anhand von Landnutzungsdaten (Apel et al., 2009; Thieken & Kreibich, 2009). Auf Basis von Infas-Geodaten und einer Clusteranalyse wird zuerst die typische durchschnittliche Gebäudetypzusammensetzung und -qualität auf Gemeindeebene bestimmt. Für die Ableitung der Schadensfunktionen im Schadensmodell auf Gemeindeebene wird im Folgenden das Mikroskala-Modell von FLEMOps anhand der prozentualen Gebäudetypanteile in den Clustern sowie der ermittelten Gebäudequalität der untersuchten Gemeinden gewichtet (Thieken et al., 2008a; Apel et al., 2009). Darüber hinaus wird ein dasymetrisches Kartierungsverfahren angewendet, das die zugrunde liegenden Wohngebäudewerte räumlich disaggregiert, da diese beispielsweise anders als Informationen zu Überflutungsflächen, häufig nur als Summe auf Gemeindeebene vorliegen. Für eine Schadensabschätzung werden diese jedoch in einer sehr viel größeren räumlichen Auflösung benötigt. Um nun eine realistischere Verteilung der Vermögenswerte zu erhalten, werden zusätzlich Landnutzungsdaten (z.B. CORINE-Daten) herangezogen. Mittels dasymetrischem Kartierungsverfahren werden den verschiedenen Landnutzungsklassen unterschiedliche Gewichtung zugewiesen und die Wohngebäudewerte darüber räumlich

disaggregiert (Thieken et al., 2008a; Apel et al., 2009). Verschiedene Verfahren dazu werden in Wunsch et al. (2009) oder Seifert et al. (2010) beschrieben.

4.3.2 Eingangsdaten FLEMOps (Basisvariante)

Für die Berechnung der jährlichen erwarteten Wohngebäudeschäden auf Gemeindeebene – vorerst ohne Berücksichtigung der Bauvorsorge und Kontamination (FLEMOps-Basisvariante) – bedarf es der folgenden Eingangsdaten:

1. Überflutungsflächen und -tiefen (verschiedener Szenarien und Wiederkehrintervalle)
2. Administrative Gemeindegrenzen
3. Gebäudetypzusammensetzung (Cluster) je Gemeinde
4. mittlere Gebäudequalität je Gemeinde
5. Vermögenswerte (Wohngebäude)

Für die Zusammenstellung und Aufbereitung der Eingangsdaten konnte bereits auf einige Vorarbeiten zurückgegriffen werden. Beispielsweise lagen schon simulierte Überflutungsflächen und -tiefen für die drei betrachteten technischen Gewässerausbauzustände (festgestellter Zustand 2002, Ausbaustand 2013 und PLAN-Zustand HWSK) für jeweils sechs verschiedene Jährlichkeiten (HQ 5, 25, 50, 100, 200 und 500) als Rasterdateien in einer 5m-Auflösung vor (siehe Kapitel 4.1).

Für die Bestimmung der Gebäudetypzusammensetzung und der mittleren Gebäudequalität je Gemeinde werden Zensusdaten verwendet, die von Infas-Geodaten (2001) auf Gemeindeebene verfügbar sind. Die dort definierten Wohngebäudetypen wurden bereits von Thieken et al. (2008a) den drei in FLEMOps verwendeten Gebäudetypen (EFH: Einfamilienhaus, RDH: Reihen-/Doppelhaus, MFH: Mehrfamilienhaus) zugeordnet und anschließend die jeweiligen prozentualen Anteile pro Gemeinde berechnet. Mittels Clusteranalyse haben die Autoren die Gebäudetypzusammensetzungen klassifiziert und insgesamt fünf typische Gebäudestrukturen (Cluster) für Deutschland ermittelt (Tabelle 13), die jeweils den untersuchten Gemeinden zugewiesen werden.

Tabelle 13: Cluster für typische Gebäudetypzusammensetzungen in Deutschland (Thieken et al., 2008a).

Cluster	Anteil EFH [%]	Anteil RDH [%]	Anteil MFH [%]	Beschreibung
1	12,00	5,13	82,87	MFH-dominiert
2	31,35	24,58	44,07	Mischbebauung (hoher Anteil MFH)
3	37,51	46,19	16,30	Mischbebauung (hoher Anteil RDH)
4	68,51	21,43	10,05	Mischbebauung (hoher Anteil EFH)
5	92,25	4,81	2,94	EFH-dominiert

Die ebenfalls in Infas-Geodaten (2001) enthaltenen Angaben zur Gebäudequalität/-ausstattung auf Gemeindeebene sind in sechs Klassen abgestuft (von 1 = exklusive Ausstattung bis 6 = sehr einfache Ausstattung). Da in den Geodaten jedoch keine weitere Unterteilung je Gebäudetyp vorhanden ist, kann lediglich die mittlere Gebäudequalität pro Gemeinde berechnet werden. Gemeinden mit einer durchschnittlichen Gebäudequalität von ≤ 2 gehen mit „hoher“ Gebäudequalität in FLEMOps ein. Lag die durchschnittliche Gebäudequalität > 2 , wird in FLEMOps eine „einfache/mittlere“ Gebäudequalität angenommen.

Für die Fallstudie wird bezüglich der Wohngebäudewerte und Disaggregation auf die Arbeiten von Kleist et al. (2006), in der Vermögenswerte für alle Gemeinden in Deutschland zum Stand 2001 abgeschätzt wurden, sowie von Thieken et al. (2006b), in der die Gesamtwerte mithilfe der CORINE-Daten räumlich disaggregiert wurden, zurückgegriffen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Gebäudebestand, die -qualität und die Wohngebäudewerte für das Jahr 2001 gelten und auch für die Schadensauswertungen für das Jahr 2013 nicht aktualisiert werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass dadurch die Schadensminderung der verschiedenen Vorsorgestrategien klar herausgearbeitet werden können.

4.3.3 Eingangsdaten FLEMOps+ (Aufbau-Variante)

Für die Berechnung der jährlichen erwarteten Wohngebäudeschäden (EAD) je Gemeinde – diesmal unter Berücksichtigung der Bauvorsorge und Kontamination (FLEMOps-Aufbau-Variante) – müssen die entsprechenden Skalierungsfaktoren ermittelt werden. Welcher Skalierungsfaktor für die einzelnen Gemeinden zu verwenden ist, hängt vom Anteil der durchgeführten Bauvorsorgemaßnahmen in Kombination mit dem Anteil an Kontamination des Hochwassers durch Öl oder Benzin ab (vgl. Tabelle 12). Die dafür benötigten

Informationen werden aus den zuvor beschriebenen Befragungsergebnissen von Privathaushalten abgeleitet, die im August 2002 und/oder Juni 2013 vom Hochwasser betroffen waren.

Für die Fallstudie werden die Befragungsdaten für die Landkreise Meißen, Mittelsachsen, Leipzig und Nordsachsen ausgewertet, da sich die Anzahl der befragten Haushalte je betrachteter Gemeinde als zu gering erwies. Der Befragungsdatensatz zum Juni-Hochwasser 2013 wird zudem durch Angaben zur Bauvorsorge aus einer weiteren Haushaltsbefragung zur Hochwasservorsorge ergänzt, die im Mulde-Gebiet zehn Jahre nach dem Hochwasser 2002 durchgeführt wurde. Da die Befragung sich nicht auf ein konkretes Schadensereignis bezog, können keine Daten zur Kontamination des Hochwassers erhoben werden. Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die Anzahl der interviewten Privathaushalte auf Landkreisebene (und zugeordneten Gemeinden) in den verschiedenen Befragungskampagnen. Anzumerken ist, dass im Datensatz zum Juni-Hochwasser 2013 keine Betroffenen im Landkreis Mittelsachsen befragt wurden. Daher wird hier für die Bauvorsorge der Befragungsdatensatz von 2012 herangezogen. Zur Abschätzung der Kontaminierung wird der Durchschnittswert für 2013 aus den Landkreisen Leipzig, Meißen und Nordsachsen verwendet. Tabelle 15 listet die Ergebnisse der abgeleiteten Skalierungsfaktoren je Landkreis auf.

Tabelle 14: Anzahl der befragten Privathaushalte pro Landkreis, zugeordneter Gemeinden und Befragungskampagne. Hinweis: einige Gemeinden existieren aktuell aufgrund ihrer Eingliederung in andere Gemeinden nicht mehr (Statistisches Landesamt Sachsen, 2014).

Landkreis (ab 2008)	Gemeinden (Stand 2001)	Anzahl der befragten Privathaushalte		
		2002	2012	2013
Meißen	Nossen	71	30	147
Mittelsachsen	Döbeln			
	Ebersbach			
	Ziegra-Knobelsdorf			
	Großweitzschen			
	Hartha	130	88	0
	Bockelwitz			
	Leisnig			
	Niederstrießis			
Leipzig	Rosswein			
	Tiefenbach			
	Bennewitz			
	Colditz			
	Zschadrass			
	Grimma			
	Nerchau			
	Thümmlitzwalde	59	40	53
	Großbothen			
	Machern			
Nordsachsen	Thallwitz			
	Trebsen/Mulde			
	Kühren-Burkartshain			
	Wurzen			
	Bad Düben			
	Doberschütz			
	Eilenburg			
Jesewitz	43	27	33	
	Laussig			
	Löbnitz			
	Zschepplin			
Gesamt		303	185	233

Tabelle 15: Anhand der Haushaltsbefragungen abgeleitete Skalierungsfaktoren für Wohngebäudeschäden durch Bauvorsorge und Kontaminierung des Hochwassers (vgl. auch Tabelle 10).

Landkreis	Vorsorgeniveau 2002	Vorsorgeniveau 2013	Vorsorgeniveau "optimal"
Meißen	1,20	0,64	0,41
Mittelsachsen	1,20	0,64	0,41
Leipzig	1,58	0,64	0,41
Nordsachsen	1,58	0,86	0,41

4.4 Berechnung des jährlichen Schadenserwartungswerts

Der jährliche Schadenserwartungswert (EAD) wird oft als Risikoindikator verwendet und stellt den mittleren erwarteten Schaden pro Jahr dar. Er wird durch die Aufsummierung der Schäden für alle theoretisch möglichen Abflusswahrscheinlichkeiten berechnet und entspricht damit dem Integral unter der Risikokurve. Die Risikokurve stellt die finanziellen Schäden mit den jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten der schadenverursachenden Hochwasser in den Zusammenhang (Merz, 2006). Die Gleichung zur Berechnung des EAD lautet (National Research Council, 2000):

$$EAD = \int_0^1 D(F)dF \quad (\text{Gleichung 1})$$

$F = F(X \geq X_T)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Abfluss X_T in einem bestimmten Jahr erreicht oder überschritten wird und stellt gleichzeitig den Kehrwert des Wiederkehrintervalls T dar. $D(F)$ ist der Schaden für ein Hochwasserereignis mit der jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit F (Xu & Booij, 2007). Da es jedoch praktisch kaum möglich ist, Schäden für alle Abflussereignisse zu bestimmen, kann der EAD nur annäherungsweise berechnet werden (Grossi et al., 2005; Meyer et al., 2009; Olsen et al., 2015). Aufgrund der oft nur wenigen zur Verfügung stehenden Daten für Abflussszenarien und deren assoziierten Jährlichkeiten, muss die oben stehende Gleichung 1 zur Berechnung des EAD also umformuliert werden (Merz & Thieken, 2004):

$$EAD = \sum_{j=1}^m \Delta P_j D_j \quad (\text{Gleichung 2})$$

wobei ΔP_j die Differenz der Überschreitungswahrscheinlichkeiten zweier benachbarter Abflussszenarien (q_j und q_{j+1}) und D_j der mittlere Hochwasserschaden jeweils für das j -te Intervall ist; m repräsentiert die Anzahl der Wahrscheinlichkeitsdifferenziale. Die jeweiligen

Gleichungen für ΔP_j und D_j sind im Folgenden nochmals näher beschrieben (Merz & Thieken, 2004):

$$\Delta P_j = P(q_j) - P(q_{j+1}) \quad (\text{Gleichung 3})$$

$$D_j = \frac{1}{2}(D(q_j) + D(q_{j+1})) \quad (\text{Gleichung 4})$$

Untersuchungen von Ward et al. (2011) ergaben, dass fünf Jährlichkeiten mit hohen und niedrigen Wahrscheinlichkeiten ausreichend sind, um den EAD adäquat zu berechnen. In dieser Arbeit wird der EAD für Wohngebäude auf Gemeindeebene auf Basis von sechs Wiederkehrintervallen (HQ 5, 25, 50, 100, 200 und 500) ermittelt.

Die Berechnung des EAD wird für die verschiedenen Schutz- und Vorsorgeszenarien und deren Kombinationen insgesamt zwölfmal durchgeführt. Als erstes erfolgt die Schadensabschätzung jeweils für die drei unterschiedlichen Gewässerausbauzustände des technischen Hochwasserschutzes *ohne* den Einfluss von privater Eigenvorsorge. Diese kalkulierten Schadenssummen werden im Folgenden auch als Referenzzustände bezeichnet und dienen als Vergleich zur Schadensänderung bei Mitberücksichtigung der privaten Eigenvorsorge (Tabelle 16). Als zweites erfolgt dann eine Schadensabschätzung für die drei unterschiedlichen Gewässerausbauzustände des technischen Hochwasserschutzes *mit zusätzlicher* Berücksichtigung des Einflusses von privater Eigenvorsorge. Hierfür werden die drei unterschiedlichen Gewässerausbauzustände jeweils mit den drei unterschiedlichen Eigenvorsorgeneiveaus kombiniert (Tabelle 16).

Tabelle 16: Übersicht der für jede Gemeinde berechneten EADs für die verschiedenen Schutz- und Vorsorgeszenarien.

Niveau privater Eigenvorsorge		Technischer Hochwasserschutz		
		Festgestellter Zustand 2002	Ausbauzustand 2013	PLAN-Zustand HWSK
Referenzzustand	ohne Berücksichtigung von Bauvorsorge und Kontaminierung	EAD	EAD	EAD
2002	Bauvorsorge: keine Kontamination: stark	EAD	EAD	EAD
2013	Bauvorsorge: gut Kontamination: mittel	EAD	EAD	EAD
Optimal	Bauvorsorge: sehr gut Kontamination: keine	EAD	EAD	EAD

Nach den einzelnen Kalkulationen werden die EADs mit dem Baupreisindex auf das Preisniveau von 2013 angepasst (DESTATIS, 2015). Eine detailliertere Vorgehensweise zur Bestimmung der EADs soll im Folgenden gegeben werden.

4.4.1 Vorgehensweise zur Berechnung des EAD für den technischen Hochwasserschutz (Referenzzustand)

Die entstandenen Wohngebäudeschäden für die drei betrachteten technischen Gewässerausbauzustände werden jeweils für die sechs Abflussszenarien (HQ 5, 25, 50, 100, 200 und 500) berechnet. Dabei erfolgt keine Berücksichtigung der Eigenvorsorge. Entsprechend wird der folgende Vorgang 18-mal mit immer unterschiedlichen Überschwemmungsflächen und -tiefen als Input wiederholt.

Die Schadensabschätzung erfolgt auf Rasterbasis. Das heißt, die in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Eingangsdaten (1-5) werden mit Hilfe von ArcGIS zuerst in ein Rasterformat gleicher Auflösung (5 m) konvertiert. Die Daten werden mit Hilfe der ArcGIS-Funktion „Stichprobe“ miteinander verschnitten (Spatial Analyst Tools > Extraktion > Stichprobe) und alle Informationen je Rasterzelle in eine .txt-Datei exportiert. Die Informationen dieser Datei werden dann in MATLAB mit den von Thielen et al. (2008a) abgeleiteten Schadensfunktionen verknüpft (Modell FLEMOps) und somit der Schadensgrad für jede einzelne Rasterzelle bestimmt. Durch die Multiplikation der einzelnen Schadensgrade mit dem jeweils zugehörigen Wohngebäudewert kann der finanzielle Gebäudeschaden je Rasterzelle ermittelt werden, der zuletzt für jede Gemeinde jeweils aufsummiert wird. Die finale Berechnung des EAD für die drei technischen Gewässerausbauzustände erfolgt dann auf Basis der sechs Abflussszenarien mit Hilfe der Gleichung 2.

4.4.2 Vorgehensweise zur Berechnung des EAD unter zusätzlicher Berücksichtigung der Eigenvorsorge

In diesem Schritt erfolgt nun die Berechnung des EAD für die Kombinationen der drei verschiedenen technischen Gewässerausbauzustände mit den drei unterschiedlichen privaten Vorsorgeniveaus. Dafür werden die zuvor berechneten EADs für jede Gemeinde lediglich mit den jeweiligen Skalierungsfaktoren (entsprechend ihrer Landkreise) aus Tabelle 15 multipliziert.

5 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Modellergebnisse der jährlichen Schadenserwartungswerte (EAD) für Wohngebäude in den 30 sächsischen Gemeinden entlang der Mulden sowohl für den technischen Hochwasserschutz des Staates als auch für dessen Kombination mit privater Eigenvorsorge beschrieben und vergleichend diskutiert. Anschließend erfolgt eine Betrachtung der Modellunsicherheiten und der Aussagefähigkeit der resultierenden Ergebnisse.

5.1 Schadensminderung durch technischen Hochwasserschutz ohne Einfluss von privater Eigenvorsorge

In diesem Abschnitt werden die Schadensabschätzungen je Gemeinde jeweils für die drei unterschiedlichen Gewässerausbauzustände des technischen Hochwasserschutzes (Festgestellter Zustand 2002, Ausbauzustand 2013 und PLAN-Zustand HWSK) ohne den Einfluss von privater Eigenvorsorge dargestellt und die Änderungen beschrieben. Die hier beschriebenen absoluten Schäden repräsentieren den jeweiligen Referenzzustand, um die Schadensänderungen bei der nachfolgenden Mitberücksichtigung der privaten Eigenvorsorge in Relation setzen zu können.

Für den festgestellten technischen Zustand 2002 ergeben sich die höchsten jährlich zu erwartenden Wohngebäudeschaden von mehr als einer Million Euro pro Jahr (in Preisen von 2013) in den Gemeinden Eilenburg (2,3 Mio. €/Jahr), Grimma (2,1 Mio. €/Jahr), Döbeln (1,9 Mio. €/Jahr), Bennewitz (1,3 Mio. €/Jahr) und Leisnig (1,1 Mio. €/Jahr).

Die nach dem Hochwasser 2002 angestoßenen Verbesserungen im technischen Hochwasserschutz zeigen bereits für den Ausbauzustand 2013 teils deutliche schadensmindernde Wirkung. In allen 30 betrachteten Gemeinden reduziert sich der EAD im Vergleich zum festgestellten Zustand 2002 insgesamt um rund 1,3 Mio. €/Jahr (10 %). Hervorzuheben sind insbesondere die Gemeinden Bennewitz, Eilenburg und Thallwitz, in denen eine absolute Schadensreduktion von jeweils 775.000 €/Jahr, 389.000 €/Jahr und 127.000 €/Jahr zu verzeichnen ist (Abbildung 8 links). Auch prozentual gesehen profitieren die Gemeinden Bennewitz und Thallwitz mit 60 % bzw. 39 % jährlicher Gebäudeschadensreduktion am meisten. Der entsprechende Wert für Eilenburg beläuft sich lediglich auf 17 % (Abbildung 8 rechts).

Werden nun die EADs für den PLAN-Zustand HWSK mit denen für den festgestellten Zustand 2002 verglichen, wird für die Mehrheit der Gemeinden eine nochmals gesteigerte

Schadensminderung erkennbar. Insgesamt reduziert sich der EAD in allen Gemeinden um rund 3,5 Mio. €/Jahr (26 %). In absoluten Zahlen verringert sich der EAD mit mehr als 100.000 €/Jahr in den Gemeinden Bennewitz (876.000 €/Jahr), Grimma (823.000 €/Jahr), Eilenburg (439.000 €/Jahr), Machern (437.000 €/Jahr), Döbeln (397.000 €/Jahr), Roßwein (117.000 €/Jahr) und Großbothen (107.000 €/Jahr) (Abbildung 8 links). Prozentual betrachtet ergibt sich die höchste Schadensminderung mit über jeweils 65 % in Machern und Bennewitz (Abbildung 8 rechts).

Obwohl viele Gemeinden von den umgesetzten technischen Maßnahmen des PLAN-Zustands HWSK profitieren, zeigt sich insbesondere für die Gemeinden Kühren-Burkartshain, Laußig und Löbnitz ein umgekehrtes Bild. Im Vergleich zu anderen Gemeinden wird in diesen zwar ein verhältnismäßig geringer EAD für den festgestellten Zustand 2002 von 71.000 €/Jahr, 150.000 €/Jahr bzw. 70.000 €/Jahr errechnet, jedoch ist mit zunehmendem technischen Hochwasserschutz keine Schadensreduktion, sondern eine Schadenserhöhung zu verzeichnen. So ergibt sich für den PLAN-Zustand HWSK in den Gemeinden Kühren-Burkartshain, Laußig und Löbnitz eine prozentuale Zunahme des EAD von jeweils 42 %, 40 % und 19 % (Abbildung 8 rechts). Dies hat vermutlich vorrangig modelltechnische Gründe. Für den festgestellten Zustand 2002 wurde bei den hydraulischen Simulationen für HQ5 bis HQ50 davon ausgegangen, dass der Abfluss vollständig zwischen den bestehenden Hochwasserschutzanlagen abgeführt wird (PGS, 2004; Kienzler et al., 2015c). Im PLAN-Zustand HWSK sind jedoch Flächen in Kühren-Burkartshain, Laußig und Löbnitz bei Abflüssen ab einem HQ25 bzw. HQ50 überschwemmt, die beim festgestellten Zustand 2002 noch als geschützt ausgewiesen sind. Zudem erhöhen sich über weite Abschnitte die Überschwemmungstiefen. Beide Umstände führen wahrscheinlich zu einer Erhöhung des EADs für die drei Gemeinden.

Beispielhaft erfolgt nun ein näherer Vergleich der EADs für die drei technischen Ausbaustände in den fünf Gemeinden Döbeln, Leisnig, Grimma, Bennewitz und Eilenburg, in denen beim festgestellten Zustand 2002 die höchsten EADs abgeschätzt wurden (Abbildung 9). Im Ergebnis zeigt sich, dass vorrangig die Gemeinden Bennewitz und Eilenburg bereits vom Ausbaustand 2013 profitieren, da die Umsetzung des technischen Hochwasserschutzausbaus bei Eilenburg und stromaufwärts bereits sehr weit vorangeschritten ist (Abbildung 6). In den Gemeinden Döbeln und Grimma mindert sich der jährliche Gebäudeschaden hingegen erst bei der Umsetzung des PLAN-Zustands HWSK deutlich. In Leisnig sind zwar die geringsten EADs der hier verglichenen fünf Gemeinden zu verzeichnen, dafür zeigt sich jedoch nur eine sehr geringe Schadensminderung bei stetigem Ausbau des technischen Hochwasserschutzes. Hier stellt sich die Frage, wie private Eigenvorsorge einen zusätzlichen Beitrag zur Gebäudeschadensminderung leisten könnte.

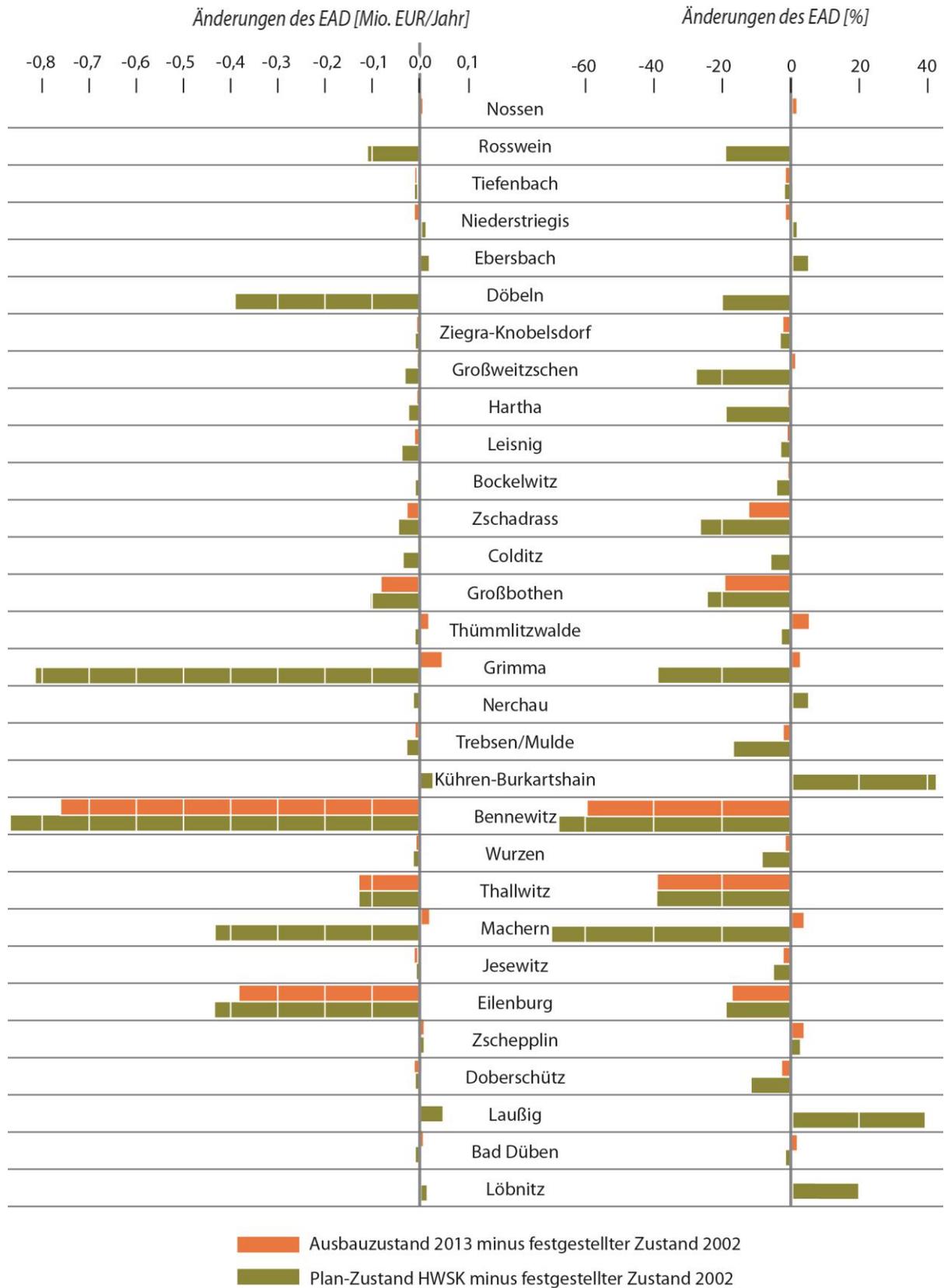


Abbildung 8: Absolute (links) und prozentuale (rechts) Änderungen des erwarteten jährlichen Gebäudeschadens für den technischen Ausbauzustand 2013 und PLAN-Zustand HWSK, jeweils im Vergleich zum festgestellten Zustand 2002.

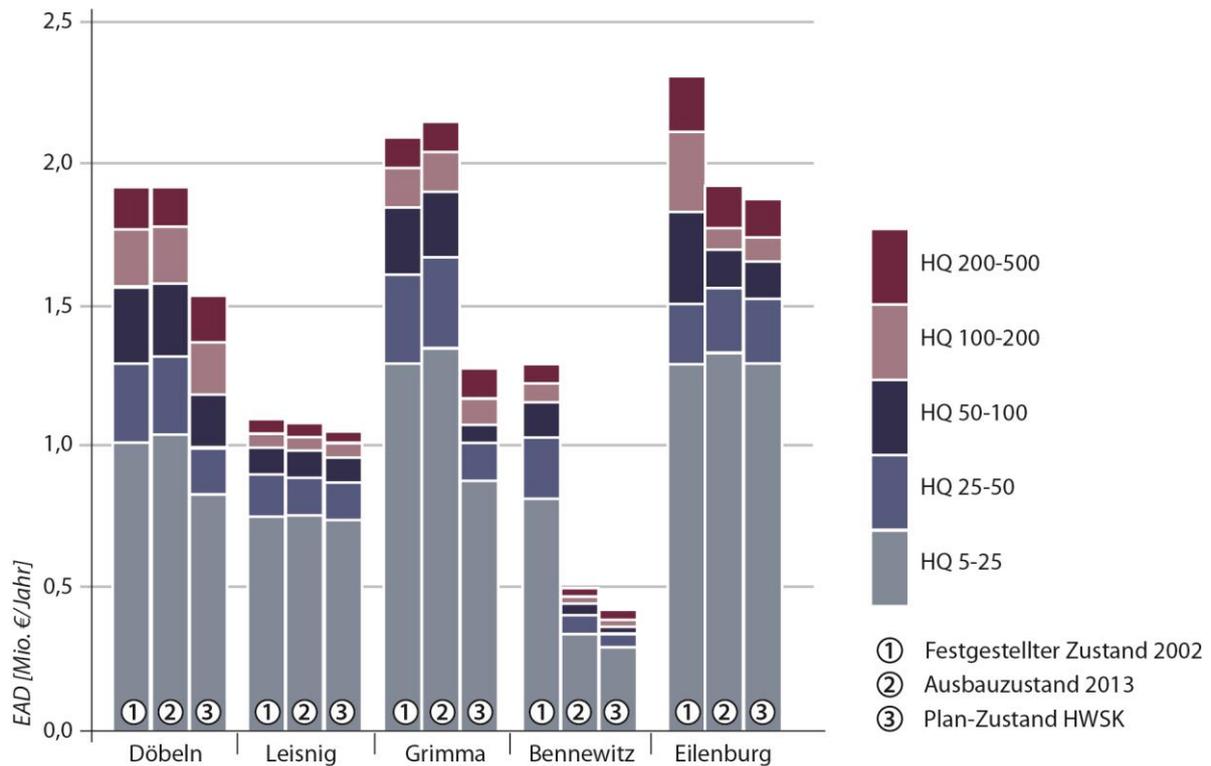


Abbildung 9: Zu erwartende jährliche Wohngebäudeschäden in Gemeinden für den festgestellten Zustand 2002 (> 1 Mio. €/Jahr) und vergleichend beim Ausbauzustand 2013 und PLAN-Zustand HWSK – differenziert nach verschiedenen Wiederkehrintervallen.

5.2 Schadensminderung durch technischen Hochwasserschutz und Einfluss von privater Eigenvorsorge

Im Folgenden wird untersucht, wie sich die drei unterschiedlich stark ausgeprägten technischen Gewässerausbauzustände in Kombination mit den drei verschiedenen Niveaus privater Eigenvorsorge (Vorsorgeniveau 2002, 2013 und optimal) auf den jährlich zu erwartenden Wohngebäudeschaden auswirken. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Skalierungsfaktoren für die Eigenvorsorge für die Landkreise abgeleitet und auf alle zugehörigen Gemeinden übertragen wurden. Die Ergebnisse werden diesmal nicht für alle, sondern lediglich für die fünf Gemeinden Döbeln und Leisnig (Landkreis Mittelsachsen), Grimma und Bennewitz (Landkreis Leipzig) sowie Eilenburg (Landkreis Nordsachsen) exemplarisch dargestellt. Auch werden primär die absoluten Schadensänderungen (Differenzen) der EADs im Vergleich zu den drei technischen Zuständen ohne Berücksichtigung der Eigenvorsorge (Referenzzustände) betrachtet.

Zuletzt werden die schadensmindernden Wirkungen der privaten Eigenvorsorgeniveaus noch für das gesamte Untersuchungsgebiet (alle 30 Gemeinden zusammengefasst) angeschaut und die EADs erneut mit den drei Referenzzuständen verglichen. Zu diesem Zweck wurden die in Kapitel 5.2 beschriebenen EADs für die drei technischen Gewässerausbauzustände ebenfalls für das gesamte Untersuchungsgebiet aufsummiert.

Das Vorsorgeniveau 2002 ist durch keine/geringe Bauvorsorge und einen so hohen Anteil von kontaminiertem Hochwasser charakterisiert (vgl. Tabelle 10), dass die Schadenserrhöhung durch Kontamination der Gebäude nicht durch die vorhandene Bauvorsorge kompensiert werden kann. Für dieses Vorsorgeniveau wurde also entsprechend Tabelle 12 der Skalierungsfaktor 1,58 ausgewählt, so dass sich prinzipiell alle (Referenz-)Schäden um 58 % erhöhen. Bezüglich der Skalierungsfaktoren ist zudem anzumerken, dass in der Basisvariante von FLEMOps die mittleren Kontaminationen im Gesamtschadensdatensatz berücksichtigt sind. Daher beträgt der Skalierungsfaktor für keine Vorsorge/keine Kontamination auch nicht 1 sondern 0,92. Wenn – wie in diesem Beispiel bei den hier untersuchten Gemeinden – die Bauvorsorge nicht ausgeprägt und die Kontamination hoch ist, gibt das erweiterte Modell FLEMOps+ entsprechend höhere Schäden aus. Folglich erhöhen sich in allen Gemeinden die EADs für alle technischen Ausbauzustände im Vergleich zu den drei Referenzzuständen ohne Eigenvorsorge (Abbildung 10). Mit zunehmendem technischem Hochwasserschutz werden die absoluten Schadensänderungen jedoch generell kleiner, auch weil die jeweiligen Referenzschäden bereits geringer sind. In den Gemeinden Grimma und Eilenburg sind für alle technischen Ausbauzustände die jeweils höchsten jährlichen Schadenszunahmen zu verzeichnen (Abbildung 10).

Eine Minderung des EAD kann hingegen durch die beiden Vorsorgeniveaus 2013 und „optimal“ – charakterisiert durch eine gute Bauvorsorge und mittlere Kontaminierung bzw. sehr gute Bauvorsorge und keine Kontaminierung – für alle Gemeinden und alle Ausbauzustände im Vergleich zu den drei Referenzzuständen ohne Eigenvorsorge erreicht werden (Abbildung 10). Die jährliche Schadensminderung ist dabei (erneut) für den festgestellten Zustand 2002 insgesamt am effektivsten, zum Teil auch weil hier der zugrunde liegende Referenzschaden am höchsten war. Beim Vorsorgeniveau 2013 erzielten vorrangig die Gemeinden Grimma und Döbeln die besten Ergebnisse (Abbildung 10). Im Vergleich zum Vorsorgeniveau 2013 kann der EAD beim Vorsorgeniveau „optimal“ sogar nochmals stärker reduziert werden. Auffällig dabei sind insbesondere die Ergebnisse der Gemeinde Eilenburg, die im Vergleich zum Vorsorgeniveau 2013 eine große Steigerung in der Schadensminderung aufweisen und sowohl für den festgestellten Zustand 2002 als auch den

PLAN-Zustand HWSK die höchsten Werte von jeweils 1,4 Mio. €/Jahr und 1,1 Mio. €/Jahr erreichen. Dies liegt auch daran, dass für Eilenburg beim Vorsorgeniveau 2002 und 2013 bereits eine schlechtere Eigenvorsorge (Skalierungsfaktoren 2002: 1,58 und 2013: 0,86) aus den Daten ermittelt wurde als für die anderen Gemeinden (Skalierungsfaktoren 2002: 1,20 bzw. 1,58 und 2013: 0,64) und somit der Sprung in den Abnahmen des EAD am auffälligsten ist.

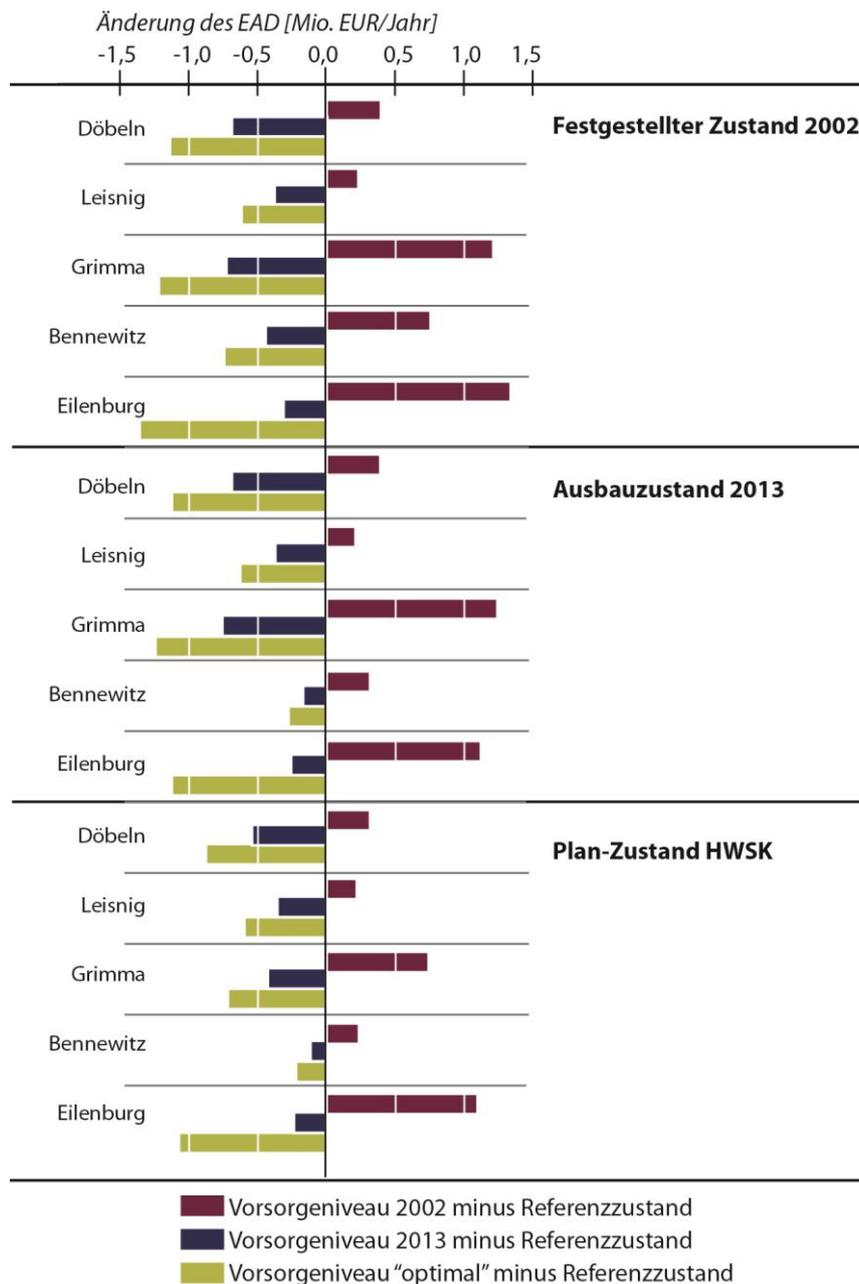


Abbildung 10: Änderungen des erwarteten jährlichen Wohngebäudeschadens in fünf Gemeinden beim Vergleich der Vorsorgeniveaus von 2002, 2013 bzw. „optimal“ zum Referenzschaden ohne Berücksichtigung der Eigenvorsorge – jeweils berechnet für die unterschiedlich stark ausgeprägten Hochwasserschutzzustände.

Bei der abschließenden Betrachtung der schadensmindernden Wirkung der privaten Eigenvorsorge auf den EAD für das gesamte Untersuchungsgebiet können folgende Ergebnisse abgeleitet werden: Läge beim festgestellten Zustand 2002 ein Vorsorgeniveau wie 2002 vor, wäre im Vergleich zum Referenzzustand ohne Eigenvorsorge aufgrund der Berücksichtigung von Ölkontaminationen mit einer Erhöhung des EAD in allen Gemeinden von insgesamt 6,3 Mio. €/Jahr zu rechnen. Würde sich für diesen Gewässerzustand die Vorsorge hingegen auf das Niveau von 2013 verbessern, verminderte sich der EAD um insgesamt 4,2 Mio. €/Jahr. Bei einem optimalen Vorsorgeniveau würde die Minderung des EAD sogar 8,0 Mio. €/Jahr betragen (Tabelle 17).

Beim Ausbauzustand 2013 und PLAN-Zustand HWSK fallen die Änderungen des EAD bei den verschiedenen Vorsorgeniveaus im Vergleich zu den Referenzzuständen insgesamt etwas geringer aus als beim festgestellten Zustand 2002. Beim PLAN-Zustand HWSK mit dem Vorsorgeniveau 2013 wäre beispielsweise mit einer jährlichen Schadensreduktion für Wohngebäude von 3,0 Mio. €/Jahr zu rechnen, die sich bei einem „optimalen“ Vorsorgeniveau nochmals auf ca. 6,0 Mio €/Jahr verdoppeln würde (Tabelle 17). Zum Vergleich: Die alleinige Verbesserung des technischen Hochwasserschutzes vom festgestellten Zustand 2002 zum PLAN-Zustand HWSK bewirkt lediglich eine Schadensminderung von 3,5 Mio. €/Jahr (vgl. Kapitel 5.2). Auch das folgende Beispiel unterstreicht nochmals die Wichtigkeit, die private Eigenvorsorge zu verbessern. Würde etwa beim optimierten PLAN-Zustand HWSK nur ein geringes Vorsorgeniveau wie 2002 vorliegen, wäre mit den verwendeten Modellannahmen der resultierende EAD selbst im Vergleich zum festgestellten Zustand 2002 ohne Eigenvorsorge (Referenzzustand) um ca. 1,0 Mio. €/Jahr höher (vgl. Tabelle 17). Vergleicht man für den PLAN-Zustand HWSK die schlechteste Eigenvorsorge (Vorsorgeniveau 2002) mit dem festgestellten Zustand 2002 in Kombination mit der besten Vorsorgevariante („optimal“), beträgt die Differenz sogar ca. 9,0 Mio. €/Jahr (vgl. Tabelle 17).

Das bedeutet, dass sich von staatlicher Seite her (neue, verbesserte) technische Maßnahmen implementieren lassen, die Schäden bis zu einem gewissen Grad verhindern. Diese Studie zeigt jedoch nachdrücklich, dass der Privathaushalt durch eigenverantwortliches Handeln in der Lage ist diesen Schutz nochmals deutlich zu verbessern. Und mehr noch, dass eine Verbesserung der Bauvorsorge und gleichzeitige Minderung der Kontamination finanziell gesehen sogar ein größeres Potenzial in der Risikominderung bedeuten kann, als der stetige Ausbau des staatlich, technischen Hochwasserschutzes allein. Deswegen sollte zukünftig die gezielte Verbesserung der privaten Eigenvorsorge als Basisvariante bei der Planung von staatlichen

Hochwasserschutzmaßnahmen mit betrachtet werden, um alternative Schutzkonzepte aufzuzeigen.

Tabelle 17: EAD bei verschiedenen Vorsorgeniveaus und technischen Gewässerausbauzuständen für alle Gemeinden zusammengefasst und dessen Änderung im Vergleich zu den drei Referenzzuständen ohne Eigenvorsorge.

Vorsorgeniveau	Festgestellter Zustand 2002	Ausbauzustand 2013	PLAN-Zustand HWSK
	EAD [Mio. €/Jahr] (Differenz zum Referenzzustand)	EAD [Mio. €/Jahr] (Differenz zum Referenzzustand)	EAD [Mio. €/Jahr] (Differenz zum Referenzzustand)
Referenzzustand (ohne Eigenvorsorge)	13,6	12,3	10,1
Vorsorgeniveau 2002	20,9 (+6,3)	17,9 (+5,6)	14,6 (+4,5)
Vorsorgeniveau 2013	9,4 (-4,2)	8,6 (-3,7)	7,1 (-3,0)
Vorsorgeniveau optimal	5,6 (-8,0)	5,1 (-7,2)	4,1 (-6,0)

5.3 Modellbewertungen

Die hier abgeschätzten EADs für Wohngebäude in den jeweiligen Gemeinden beruhen auf einer Schadensmodellierung, die wiederum auf den Ergebnissen eines vorgeschalteten hydraulischen Modells aufbaut. Beide Modelle sind mit unterschiedlich großen Unsicherheiten behaftet, d.h. die Rechnungen zeigen Tendenzen auf, die absoluten Höhen der Schadensminderungen oder -erhöhungen können mit anderen Modellen oder Modellannahmen durchaus anders ausfallen.

Prinzipiell ist die Ergebnisqualität der hydraulischen Modellierung als zufriedenstellend zu bewerten. Das Modell HEC-RAS wurde bereits im Vorfeld von der LTV kalibriert und anhand von vorhandenen Hochwassermarken des Hochwassers von 1954 plausibilisiert (Kienzler et al., 2015c). Dennoch sind einige Einschränkungen der Genauigkeit bei der hydraulischen Modellierung zu machen. Beispielsweise wurden mit HEC-RAS lediglich ein 1D Modell für die Simulationen der Überschwemmungsflächen und -tiefen verwendet. Dies bedeutet unter anderem, dass insbesondere Gewässerabschnitte mit ausuferndem Verhalten und Fließwegen über Vorländer (z.B. in Flachlandbereichen) nicht gut hydraulisch dargestellt werden können (LfU, 2003). Weiterführende hydraulische Untersuchungen bezüglich der im HWSK Mulden vorgesehenen Schutzmaßnahmen werden seitens der LTV inzwischen mit

einem nahezu durchgängigen 2D hydraulischen Modell durchgeführt, das einen sehr viel höheren Detailierungsgrad aufweist sowie andere Prozesse mit berechnet und damit aussagekräftigere Ergebnisse liefern kann. Allerdings zeigen die Untersuchungen von Apel et al. (2009), dass in einem gut ausgebildetem Flusstal (wie bei Eilenburg) ein 1D-Modell fast genauso gut abschneidet. Die Anwendung eines 2D Modells ist vor allem dann wichtig, wenn großräumige Überflutungen im Flachland gegeben sind oder Deichbrüche simuliert werden sollen. Zudem lag das 2D Modell der LTV für den festgestellten Zustand 2002 noch nicht vor, so dass für diese Fallstudie kein Vergleich der Überschwemmungsflächen und -tiefen mit dem Ausbauzustand 2013 oder PLAN-Zustand HWSK möglich gewesen wäre.

Zudem wurde der Wasserstand von HEC-RAS tendenziell eher überschätzt, da die Flussquerschnitte im 1D Modell als zu schmal angenommen werden. Um die realen Gegebenheiten im Modell besser widerspiegeln zu können, müssten die Querschnitte manuell verbreitert werden. Um diese Einschränkungen zu umgehen, werden heute deswegen auch vielmehr 2D Modelle verwendet.

Eine weitere Limitierung des Modells HEC-RAS besteht darin, dass es keine Deichbrüche abbilden kann. Sollte es zu einem Deichbruch kommen, sind die resultierenden Schäden im Durchschnitt oftmals größer als die verursachten Schäden allein durch ein Flusshochwasser. Optimalerweise sollte deswegen das mögliche Versagen von technischen Schutzeinrichtungen bei Risikoabschätzungen mitberücksichtigt werden (DKKV, 2015). Im Modell wurden in dieser Hinsicht zumindest Annahmen dafür getroffen, ab welchen Überschwemmungsszenarien ein Deich überspült wird und damit an Schutzwirkung verliert.

Unsicherheiten bei der Schadensmodellierung treten vor allem durch eine mangelnde Verfügbarkeit und -qualität von Schadensdaten zur Ableitung von Schadensfunktionen, die Form der Schadensfunktion, die Wahl und Anzahl der berücksichtigten schadensbeeinflussenden Faktoren, der räumlichen Skala für die Schadensabschätzung oder auch der zugrunde liegenden Vermögenswerte der Gebäude auf. Das Besondere beim Schadensmodell FLEMOps ist, dass es im Gegensatz zu vielen anderen Modellen anhand einer umfangreichen Schadensdatenbasis empirisch abgeleitet wurde und mehrere Parameter, u.a. die Eigenvorsorge, berücksichtigen kann. Zudem ist es für diese Fallstudie generell sehr gut geeignet den EAD für Wohngebäude zu quantifizieren, da es zu den wenigen Modellen gehört, dessen Anwendbarkeit validiert werden konnte (z.B. Thieken et al., 2008a; Wunsch et al., 2009). Beispielsweise modellierten Wunsch et al. (2009) Hochwasserschäden an Wohngebäuden in Gemeinden entlang der Mulde auf der Mesoskala, u.a. auch wie in dieser Arbeit auf Basis von CORINE-Landnutzungsdaten, und zeigten, dass die Basisversion FLEMOps die Hochwasserschäden im Ergebnis um ca. 20 %

(Median des relativen Modellfehlers) unterschätzt. Thieken et al. (2008a) berechneten bei mesoskaligen Schadensabschätzungen für Wohngebäude nach dem Hochwasser 2002 an der Elbe einen relativen Fehler für die Aufbauvariante FLEMOps+ von 24 %. Apel et al. (2009) testeten u.a. auch FLEMOps und FLEMOps+ in Kombination mit unterschiedlich komplexen hydraulischen Modellierungen für Wohngebäudeschäden in der Stadt Eilenburg beim Hochwasser 2002 und ermittelten jeweils einen mittleren relativen Fehler von -34 % und 4 %. Alle drei genannten Studien führten die Untersuchungen zum Vergleich auch mit den Schadensmodellen IKSR, MURL und Hydrotec durch, die jedoch stets schlechter abschnitten. Für die Ergebnisbewertung dieser Fallstudie lässt sich anhand der dargestellten Fehlerwerte vermuten, dass das Modell die jährlichen Schadenserwartungswerte tendenziell eher etwas überschätzt. Insbesondere, wenn die Eigenvorsorge nicht mit berücksichtigt wird. Diese Ergebnisse der Validierungsstudien zeigen zwei Dinge sehr gut auf: zum einen wird deutlich, dass die Berücksichtigung von mehr Einflussfaktoren als dem Wasserstand zur Verbesserung der Ergebnisse beiträgt und zum anderen, dass die regionale Gültigkeit der Modelle einen großen Einfluss hat. Ein häufiges Problem von Schadensmodellen ist generell die direkte räumliche Übertragbarkeit auf ein anderes Untersuchungsgebiet, da sie zumeist für eine bestimmte Region mit bestimmten Gebietscharakteristika zugeschnitten sind (Kang et al., 2005; Luino et al., 2009; Merz et al., 2010; Cammerer et al., 2013; Meyer et al., 2013). Im Grunde müsste der Kurvenverlauf der Schadensfunktion angepasst werden. Diese Schwierigkeit bestand für diese Fallstudie allerdings nicht, da FLEMOps bereits für Gemeinden an der Mulde für das Hochwasser 2002 entwickelt und auch validiert wurde. Gleichwohl sind bei den Ergebnissen der Schadensmodellierung weitere wichtige Unsicherheiten und Fehlerquellen zu berücksichtigen. Diese wurden zum einen durch die Wahl der Skala zur Schadensabschätzung verursacht. Aufgrund des mesoskaligen Ansatzes ging die genaue Lokalisation der Gebäude insbesondere bei kleinen Gemeinden oder dünn besiedelten Gebieten nicht aus den CORINE-Landnutzungsdaten hervor, so dass die entsprechende räumliche Verortung der Gebäude-Vermögenswerte ungenau wurde. Wunsch et al. (2009) zeigten, dass eine bessere Verteilung der Vermögenswerte unter Verwendung von hochaufgelösteren Landnutzungsdaten (z.B. dem ATKIS Basis-Landschaftsmodell) erreichbar ist. Zum anderen werden Unsicherheiten durch die Qualität und Quantität der Eingangsdaten eingebracht. Die Verwendung von Befragungsdaten birgt eine Unsicherheit, da im Nachgang der telefonischen Befragungen nicht überprüft werden konnte, ob die Angaben der Befragten bezüglich der Kontamination und durchgeführten Bauvorsorgemaßnahmen tatsächlich der Wahrheit entsprachen. Den Aussagen der Betroffenen wurde in diesem Fall vollstes Vertrauen geschenkt. Allerdings war die Anzahl der Haushaltsbefragungen je Landkreis zur Ableitung

der Skalierungsfaktoren Kontaminierung und Bauvorsorge teilweise gering. Sie variierte zwischen 43 und 177 Befragungen (vgl. Tabelle 14). Zur Absicherung der Zuordnung der Skalierungsfaktoren zu den Landkreisen – die einen entscheidenden Einfluss auf das Schadensergebnis hat – wäre ein größerer Stichprobenumfang wünschenswert gewesen.

Unsicherheiten entstehen weiterhin durch die Datenbasis der Gebäudestruktur und Vermögenswerte. Die Angaben sowohl zur Gebäudetypzusammensetzung, zur Gebäudequalität als auch zu den Wohngebäudewerten bezogen sich auf das Jahr 2001 und wurden für die Schadensberechnungen der verschiedenen Vorsorgestrategien (technischer Hochwasserschutz/ private Eigenvorsorge) jeweils konstant gehalten, wohlwissend, dass sich die Gebäudecharakteristika und Vermögenswerte mit den Jahren durchaus geändert haben. Diese Parameter wurden jedoch hier absichtlich konstant gehalten, um einen Referenzzustand der bebauten Umwelt zu schaffen und nicht verschiedene schadensmindernde Effekte zu vermischen. In dieser Arbeit wurde entsprechend nur die technische sowie private Anpassung der Vorsorge als Treiber für Veränderungen analysiert. So konnte das Schadensminderungspotenzial den verschiedenen Schutz- und Vorsorgestrategien eindeutig zugewiesen werden.

FLEMOps zeigt zudem generell Ungenauigkeiten bei der Abschätzung von Gebäudeschäden, sobald sehr hohe Wasserstände auftreten (z.B. wenn mindestens das erste Obergeschoss betroffen ist), da es im Befragungsdatensatz von 2002 nur wenige Fälle zur Kalibrierung der Schadensfunktionen gab (Thieken et al., 2008a).

Zudem mag bemängelt werden, dass im Modell keine weiteren der zuvor diskutierten schadensbeeinflussenden Faktoren mitberücksichtigt wurden. So bestätigen beispielsweise Schröter et al. (2014), dass sich durch die Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren die Modellaussagefähigkeit steigert. Aufgrund der bereits in Kapitel 2.3.3 dargestellten Komplexität der Faktoren-Variabilität und der über allem stehenden Herausforderung der Datenverfügbarkeit, wäre dies in diesem Fall jedoch keine Garantie für eine gleichzeitige Verbesserung der Modell- und Ergebnisqualität.

6 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Frage nachgegangen, in welcher Größenordnung unterschiedlich gut ausgeprägte private Eigenvorsorge von Privathaushalten und unterschiedlich gut ausgebaute technische Hochwasserschutzzustände des Staates zur Risikominderung für Wohngebäude beitragen können und welche Rolle die Eigenvorsorge dabei im Vergleich zum technischen Schutz einnimmt. Zur Abschätzung des Risikominderungspotenzials wurde anhand einer Schadensmodellierung mit FLEMOps (Flood Loss Estimation MOdel for the private sector) der jährliche Schadenserwartungswert (EAD) für Wohngebäude in 30 sächsischen Gemeinden entlang der Mulden quantifiziert. Im Ergebnis zeigt sich, dass der EAD bei alleiniger Betrachtung der drei verschiedenen technischen Gewässerausbauzustände (Referenzzustände) wie vermutet tendenziell mit zunehmendem Ausbaustatus abnimmt und sich das Hochwasserrisiko bei einer optimalen Umsetzung von strukturellen Hochwasserschutzmaßnahmen (PLAN-Zustand HWSK) zukünftig um bis zu 70 % reduzieren lässt. Jedoch geschieht dies nicht kontinuierlich und gleichermaßen für alle Gemeinden, sondern es profitieren vorrangig die Gemeinden, bei denen der Umsetzungsgrad der Verbesserung des technischen Hochwasserschutzes schnell voranschreitet. Weiterhin bestätigt sich grundsätzlich, dass sich bei der zusätzlichen Berücksichtigung der privaten Eigenvorsorge, abgesehen vom Vorsorgeniveau 2002, für die Niveaus 2013 und „optimal“ eine nochmals deutliche Reduktion des EADs im Vergleich zu den Referenzzuständen (ohne Berücksichtigung der Eigenvorsorge) ergibt. Bei der Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets beträgt diese zusätzliche Schadensminderung bei einem „optimalen“ Vorsorgeniveau in jeglicher Kombination mit den technischen Gewässerausbauzuständen zwischen 6,0 Mio. €/Jahr und 8,0 Mio. €/Jahr. Im Vergleich dazu bewirkt die alleinige Verbesserung des technischen Hochwasserschutzes vom festgestellten Zustand 2002 zum PLAN-Zustand HWSK lediglich eine Schadensminderung von 3,5 Mio. €/Jahr. Diese Zahlen belegen deutlich, dass der gezielte Ausbau von privater Eigenvorsorge in Bezug auf eine Schadensminderung finanziell gesehen größeres Potenzial birgt, als die ausschließliche Investition in den Ausbau des staatlich technischen Hochwasserschutzes. Damit wird auch eindeutig die Wichtigkeit der Stärkung eines integrierten Hochwasserrisikomanagements aufgezeigt.

In den letzten Jahren entstanden einige Studien, die sich auch mit der Wirkungsabschätzung von nicht-technischen Maßnahmen wie der Eigenvorsorge auf den Schaden beschäftigten (z.B. Kreibich et al., 2005; Thielen et al., 2008a; Bubeck et al., 2012; Poussin et al., 2012; De Moel et al., 2014; Lasage et al., 2014, siehe auch Kapitel 2.2.3).

Anders als in den genannten Arbeiten, in denen oftmals der Vergleich der Effektivität verschiedener Maßnahmen der Eigenvorsorge untereinander im Vordergrund stand, wurde in der hier vorliegenden Fallstudie vielmehr die Effektivität von privater Eigenvorsorge der Effektivität staatlich technischer Hochwasserschutzmaßnahmen gegenübergestellt, um anhand von Variantenrechnungen differenzierte Alternativen zu bisherigen Planungskonzepten aufzeigen zu können.

Das Potenzial privater Eigenvorsorge wird in den Konzepten zum Hochwasserrisikomanagement zwar oft erwähnt und eingefordert, es wird aber nicht systematisch bei Planungen betrachtet, obwohl die Schadensminderung beachtlich sein kann, wie die Ergebnisse dieser Fallstudie gezeigt haben. Für zukünftige Planungen sollte deshalb nicht nur eine mögliche Schadensminderung durch technische Schutzmaßnahmen geprüft werden, sondern es ist unbedingt zu empfehlen, stets auch eine Variante mit optimierter Eigenvorsorge in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Beispielsweise kann es aufgrund des Ausbaus oder der Modernisierung des technischen Hochwasserschutzes bei Oberliegern möglicherweise bei einem großen Hochwasserereignis zu nachteiligen Auswirkungen bei Unterliegern kommen, wenn die dort vorhandenen technischen Schutzmaßnahmen die Abflusswerte nicht (mehr) schadlos abführen können. Der in dieser Fallstudie aufgezeigte Ansatz kann jedoch dabei helfen – beispielsweise anhand der Variantenrechnung einer gezielten Verbesserung der privaten Eigenvorsorge für solche Unterlieger oder auch entlang des gesamten Flusslaufes – neue Lösungswege bei einer bestehenden Hochwasserrisikoverlagerung aufzuzeigen. Zudem wird es bei der Priorisierung von Maßnahmen durch Kosten-Nutzen-Betrachtungen im Risikomanagement immer wieder den Fall geben, dass gerade kleinere Ortschaften oder allgemein ländliche Gebiete aufgrund des geringeren Schadenspotenzials lange auf technischen Schutz warten müssen oder keine Schutzanlagen gebaut werden. Auch für diese Betroffenen stellt der gezielte Ausbau der Eigenvorsorge (Objektschutzmaßnahmen) eine Alternative dar, die von der öffentlichen Hand entsprechend unterstützt und gefördert werden sollte.

Eine Möglichkeit, die Eigenvorsorge voranzutreiben, wäre die Verbreitung des vom HochwasserKompetenzZentrum (HKC) entwickelten Hochwasserpasses. Mit diesem können sich Hausbesitzer gezielt über das Hochwassergefährdungspotenzial ihres Wohngebäudes erkundigen und erhalten Ratschläge, wie sie mögliche Schwachstellen beseitigen können (DKKV, 2015; HKC, 2015).

Ferner ist zu beachten, dass hinter neuen oder verbesserten Hochwasserschutzanlagen im Laufe der Zeit das Schadenspotenzial vermutlich weiter ansteigen und sich der Ausbau der Eigenvorsorge abschwächen wird (Seifert, 2012). Für eine langfristige Reduktion der Schäden müssen technische Maßnahmen daher durch planerische Maßnahmen (Auflagen und Beratung zum hochwasserangepassten Bauen; Verbot oder Sicherung von

Ölheizungen) im potenziellen Überschwemmungsgebiet begleitet werden, um einen Anstieg des Schadenspotenzials zu unterbinden.

Auf der anderen Seite darf man nicht vergessen, dass Betroffene immer mal wieder mit einem Hochwasserereignis konfrontiert werden, das nicht nur Sachschäden verursacht, sondern auch gesundheitliche Folgen oder Effekte auf die Lebensqualität und Zuversicht haben kann (Tapsell et al., 2002; Hajat et al., 2005; DKKV, 2015). Solche Auswirkungen sind zwar schwer monetär zu bewerten, dennoch sollte es mehr Bestrebungen geben, diese in Hochwasserschutzplanungen und auch in Kosten-Nutzen-Analysen mit einfließen zu lassen. Letztendlich bleibt jedoch auch der Wasserstand einer der wichtigsten Faktoren, der den resultierenden Schaden in entscheidendem Ausmaß beeinflusst, wie anhand der drei Szenarien des technischen Gewässerausbaus zu sehen war. Gänzlich unberücksichtigt blieben in dieser Studie dabei Veränderungen der hydrologischen Abflusswerte der entsprechenden Wiederkehrintervalle. Laut persönlicher Mitteilung der LTV (März 2015) zeigen allerdings die hydrologischen Auswertungen im Nachgang der Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre, insbesondere des Hochwassers von 2013, dass es zu Veränderungen im hydrologischen Längsschnitt der Mulde kommen wird. Die genauen Werte seien zwar noch nicht bekannt, jedoch sei zu erwarten, dass sich die Abflusswerte der einzelnen Wiederkehrwahrscheinlichkeiten, insbesondere unterstrom von Pegel Golzern (Gemeinde Grimma) an der Vereinigten Mulde, erhöhen. Mögliche Auswirkungen seien vermutlich ein deutlicher Anstieg der Abflusswerte. Demzufolge käme es in Zukunft auch zu Veränderungen in der Ausdehnung der Überschwemmungsgebiete bzw. in der Intensität der Überschwemmungen. Es wäre nun zum einen spannend zu untersuchen, wie sich diese hydrologischen Änderungen auf den EAD für Wohngebäude im Untersuchungsgebiet auswirken würden und zum anderen auch zu betrachten, welche Konsequenzen dies eventuell für das Unterlieger-Land Sachsen-Anhalt bedeuten würde.

Auch seitens der Schadensmodellierung ließen sich Verbesserungen vornehmen. Modellunsicherheiten könnten von vorn herein stärker berücksichtigt werden, wenn beispielsweise minimale und maximale Abschätzungen der Wohngebäudewerte zu Grunde gelegt und darüber obere und untere Grenzen der Schadensfunktionen ermittelt werden würden. Dies bietet die Möglichkeit Spannweiten des erwarteten Gebäudeschadens zu berechnen (Meyer & Messner, 2005). Die Modellunsicherheiten lassen sich insbesondere durch eine Verbesserung der Datengrundlage reduzieren, z.B. in dem Schadensdaten häufiger nach Hochwasserereignissen und unter Verwendung von einheitlichen Standards erfasst werden. Es wäre auch zu überlegen, die in der Modellierung berücksichtigten einzelnen Bauvorsorgemaßnahmen einzeln zu gewichten. Derzeit werden alle Maßnahmen gleichwertig behandelt. Kreibich et al. (2005) zeigten jedoch auf, dass insbesondere die Anpassung der Gebäudenutzung und Innenausstattung Schäden reduziert, aber auch die

Verlegung der Heizungsanlage in höher gelegene Stockwerke sehr effektiv sein kann. In einer nachfolgenden Modellierung könnte demnach der Durchführung der drei genannten Maßnahmen ein größerer Einfluss auf die Schadensminderung zugerechnet werden. Modellunsicherheiten bezüglich der räumlichen Disaggregation von Vermögenswerten ließen sich dadurch vermindern, dass hochaufgelöstere Landnutzungsdaten (z.B. dem ATKIS Basis-Landschaftsmodell) verwendet würden. Eine weitere Möglichkeit die Unsicherheiten der eigenen Modellergebnisse zumindest im Verhältnis besser einschätzen zu können, ist die Verwendung mehrerer Schadensmodelle, so dass eine Spannbreite von Ergebnissen aufgestellt werden kann. Eine bessere Möglichkeit zur Abschätzung und Kommunikation von Modellunsicherheiten könnte die Anwendung von probabilistischen, multiparameter Modellen sein, die vielmehr die Ergebnisse mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit versehen, jedoch auch umfangreicher Datensätze bedürfen.

Danksagung

Diese Arbeit wäre nicht ohne die Hilfe von zahlreichen Personen zu Stande gekommen.

Ich möchte mich ganz herzlich bei Prof. Dr. Josef Strobl (Universität Salzburg) bedanken, der es mir grundsätzlich ermöglichte diese Arbeit zu verfassen und mich stets durch seine wertvollen Ratschläge unterstützt hat.

Meinen ausdrücklichen Dank möchte ich Prof. Dr. Annegret Thieken (Universität Potsdam) aussprechen, die sich nicht nur bereit erklärt hat diese Arbeit zu begutachten, sondern die mich vor allem auch in die Hochwasserrisikoabschätzung und Modellierung eingeführt und meine Begeisterung für diese Thematik geweckt hat. Ihre konstruktiven Anmerkungen und stete Bereitschaft Feedback zu geben hatten einen signifikanten Einfluss auf den Erfolg dieser Arbeit. Zudem schätze ich sehr, dass sie mir die Möglichkeit einräumte, kontinuierlich an der Fertigstellung der Abschlussarbeit und meines Fernstudiums zu arbeiten.

Weiterhin hätte die Arbeit in dieser Form nicht ohne die hilfreiche Zuarbeit von Daniela Falter (Universität Potsdam, GeoForschungsZentrum Potsdam) umgesetzt werden können, die mir durch vorab durchgeführte hydraulische Modellierungen die benötigten Karten der Überschwemmungsflächen und -tiefen bereitstellen konnte. In dem Zusammenhang möchte ich auch der Landestalsperrenverwaltung Sachsen für die Bereitstellung von hydraulischen Modell- und Geodaten danken, und insbesondere Stefan Jentsch, der wertvolle Hinweise und Einschätzungen zu den Schadensergebnissen beisteuerte.

Gleichermaßen empfinde ich gegenüber dem gesamten Team des BMBF-Verbundprojekts „Untersuchungen zur Bewältigung des Hochwassers im Juni 2013“ großen Dank, über das ich immer viel Unterstützung erfahren und hilfreiche Anmerkungen erhalten habe.

Ein aufrichtiger und herzlicher Dank geht an das gesamte UNIGIS-Team der Universität Salzburg, für die selbstverständliche Hilfe zur Klärung aller aufkommender Fragen, die Bemühungen den bürokratischen Ablauf so reibungslos wie möglich zu gestalten, aber auch die interessanten Lehrinhalte sowie die generelle Unterstützung während des Fernstudiums.

Während meiner Masterarbeit hatte ich immer den Beistand und das Verständnis meiner Freunde und Arbeitskollegen. Ihre Empathie und Fähigkeit mich in anstrengenden Phasen aufzuheitern begleiteten mich jeden Tag. In dieser Hinsicht geht mein besonderer Dank an Katharina Meifert, Susanne Vettermann und Henriette Schubert sowie Ute Dolezal, Antje Otto, Patric Kellermann und Sebastian Seidel.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und insbesondere meinen Eltern Birgit und Klaus Kienzler sowie meiner Schwester Kirsten bedanken. Ohne ihre bedingungslose Unterstützung, Motivation und ihr Vertrauen in mich wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Literaturverzeichnis

- Apel, H., Merz, B., Thielen, A. H. (2008): Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management* 6(2): 149–162.
- Apel, H., Aronica, G. T. Kreibich, H., Thielen, A.H. (2009): Flood risk analyses – how detailed do we need to be? *Natural Hazards* 49: 79–98.
- Barredo, J. I. (2009): Normalised flood losses in Europe: 1970-2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 97–104.
- BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) (2003): Bedeutung der Nebenflüsse für den Feststofftransport der Elbe. Endbericht Band 1 und 2. 204 S. Abrufbar unter: <http://elise.bafg.de/servlet/is/4506/>. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2013); Hochwasserschutzfibel – Objektschutz und bauliche Vorsorge. 56 S. Abrufbar unter: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/hochwasserschutzfibel_2.pdf?__blob=publicationFile. Letzter Zugriff: 15.05.2015.
- Bouwer, L. M., Bubeck, P., Aerts, J. C. J. H. (2010): Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area. *Global Environmental Change* 20: 463–471.
- BSU (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg) (2014): Die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie im deutschen Einzugsgebiet der Elbe. Vortrag auf dem Projektworkshop am 23./24. Juni 2014, Potsdam.
- Bubeck, P., Kreibich, H. (2011): Natural Hazards: Direct Costs and Losses Due to the Disruption of Production Processes, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), Sektion Hydrologie, Potsdam. Abrufbar unter: http://conhaz.org/CONHAZ%20REPORT%20WP01_2.pdf. Letzter Zugriff: 20.6.2015.
- Bubeck, P., De Moel, H., Bouwer, L. M., Aerts, J. C. J. H. (2011): How reliable are projections of future flood damage? *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11(12): 3293–3306.
- Bubeck, P., Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H. (2012): A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. *Risk Analysis* 32(9): 1481–1495.

- Bücheler, B., Kreibich, H., Kron, A., Thieken, A. H., Ihringer, J., Oberle, P., Merz, B., Nestmann, F. (2006): Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6(4): 485–503.
- Cammerer, H., Thieken, A. H., Lammel, J. (2013): Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13(11): 3063–3081.
- De Bruijn, K. M. (2005): Resilience and flood risk management, A systems approach applied to lowland rivers. PhD thesis. Delft University, the Netherlands.
- DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs) (2008): Developing the evidence base for flood resistance and resilience: summary report. R&D Technical report FD2607/TR1. Environment Agency and the Department for Environment Food and Rural Affairs, London. 20 S.
- De Moel, H. (2012): Uncertainty in Flood Risk. Institute for Environmental Studies. Vrije Universiteit Amsterdam. Doktorarbeit. 164 S.
- De Moel, H., Aerts, J. C. J. H. (2011): Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. *Natural Hazards* 58(1): 407–425.
- De Moel, H., Asselman, N. E. M., Aerts, J. C. J. H. (2012): Uncertainty and sensitivity analysis of coastal flood damage estimates in the west of the Netherlands. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12: 1045–1058.
- De Moel, H., Van Vliet, M., Aerts, J. C. J. H. (2014): Evaluating the effect of flood damage-reducing measures: a case study of the unembanked area of Rotterdam, the Netherlands. *Regional Environmental Change* 14(3): 895–908.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt) (2015): Preise. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Konjunkturindikatoren/Preise/bpr110.html>. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- DKKV (Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge) (2003): Lessons Learned – Hochwasservorsorge in Deutschland – Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. DKKV-Schriftenreihe Nr. 29. Bonn. 144 S.
- DKKV (Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge) (2015): Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. DKKV-Schriftenreihe Nr. 53. Bonn. 207 S.
- Downton, M., Pielke, R. (2005): How Accurate are Disaster Loss Data? The Case of U.S. Flood Damage. *Natural Hazards* 35: 211–228.

- Dutta, D., Herath, S., Musiak, K. (2003): A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology* 277(1–2): 24–49.
- EG (Europäische Gemeinschaften) (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (2007/60/EG). L 288: 27–34.
- Egorova, R., Van Noordwijk, J. M., Holterman, S. R. (2008): Uncertainty in flood damage estimations. *International Journal of River Basin Management* 6(2): 139–148.
- Elmer, F., Thieken, A. H., Pech, I., Kreibich, H. (2010): Influence of flood frequency on residential building losses. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10: 2145–2159.
- EM-DAT (The ofda/cred international disaster database) (2010): Abrufbar unter: www.emdat.be. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- Emschergenossenschaft & Hydrotec (2004): Hochwasser-Aktionsplan Emscher, Kapitel 1: Methodik der Schadensermittlung, Emschergenossenschaft, Report. 16 S. Abrufbar unter: http://www.eglv.de/fileadmin/EmscherGenossenschaft/2.3_Flussgebietsmanagement/Karten_Anlage/Methodik_der_Schadensermittlung/methodik_schadensermittlung.pdf. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- Freni, G., La Loggia, G., Notaro, V. (2010): Uncertainty in urban flood damage assessment due to urban drainage modelling and depthdamage curve estimation, *Water Science Technology* 61: 2979–2993.
- Green, C., Viavattene, C., Thompson, P. (2011): Guidance for assessing flood losses: CONHAZ report. Middlesex, Flood Hazard Research - Centre Middlesex University. WP6 report. 86 S. Abrufbar unter: http://www.mdx.ac.uk/__data/assets/pdf_file/0006/58794/floodsWP_FINALREPORTsept11.pdf. Letzter Zugriff: 10.04.2015.
- Grossi, P., Kunreuther, H., Windeler, D. (2005): An introduction to catastrophe models and insurance. In: Grossi, P., Kunreuther, H. (eds.): *Catastrophe modeling: a new approach to managing risk*. Springer Science Business Media, Inc., Boston. 23–42.
- Hajat, S., Ebi, K. L., Kovats, R. S., Menne, B., Edwards, S., Haines, A. (2005). The Human Health Consequences of Flooding in Europe: a Review. In: Kirch, W., Bertollini, R., Menne, B. (eds.): *Extreme Weather Events and Public Health Responses*. Springer Berlin Heidelberg: 185-196.

- Hattermann, F. F., Huang, S., Vetter, T., Kron, W., Burghoff, O., Merz, B., Bronstert, A., Krysanova, V., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P., Hauf, Y. (2012): Flood risk from a holistic perspective – observed changes in Germany. In: Kundzewicz, Z. W. (eds.): Changes in flood risk in Europe. CRC Press. 212–237.
- Hattermann, F. F., Huang, S., Burghoff, O., Willems, W., Österle, H., Büchner, M., Kundzewicz, Z. (2014): Modelling flood damages under climate change conditions – a case study for Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14(12): 3151–3168.
- Hayes, B. D. (2004): Interdisciplinary planning of non-structural flood hazard mitigation. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(1): 15–25.
- HKC (HochwasserKompetenzCentrum e.V.) (2014): Hochwasserpass - für Wohngebäude und Gebäude mit Kleingewerbe: Der Risiko-Check für Ihr Haus. Abrufbar unter: http://www.hkc-online.de/uploads/media/Hochwasserpass_Flyer.pdf. Letzter Zugriff: 10.05.2015.
- Höppe, P. (2014): Naturkatastrophen der letzten Jahrzehnte. Trends bei Häufigkeit und Schäden, Ausblick in die nahe Zukunft. *Natur und Landschaft* 89. Jahrgang 12: 516–521.
- IFRC (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies) (2010): World disasters 2010. Abrufbar unter: <https://www.ifrc.org/Global/Publications/disasters/WDR/WDR2010-full.pdf>. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- IKSE (Internationale Kommission zum Schutz der Elbe) (2003): Das Extremhochwasser der Elbe vom August 2002 – Schlussfolgerungen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes aus Sicht der IKSE. Magdeburg. 6/2003. 6 S.
- IKSE (Internationale Kommission zum Schutz der Elbe) (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet: ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. 258 S. Abrufbar unter: digital.bibliothek.uni-halle.de/pe/download/pdf/1485813?originalFilename=true. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- IKSE (Internationale Kommission zum Schutz der Elbe) (2012): *Abschlussbericht* über die Erfüllung des Aktionsplans Hochwasserschutz Elbe 2003-2011. Magdeburg. 67 S. Abrufbar unter: http://www.ikse-mkol.org/fileadmin/download/AP-HWS/Abschlussbericht/IKSE_Abschlussbericht_AP%20HWS_2003-2011.pdf. Letzter Zugriff: 25.05.2015.
- IKSR (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins) (2001): Rhein-Atlas, IKSR, Koblenz. Abrufbar unter: <http://www.rheinatlas.de>. Letzter Zugriff: 20.6.2015.

- IKSR (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins) (2002): Hochwasservorsorge – Maßnahmen und ihre Wirksamkeit. Koblenz. 50 S. Abrufbar unter: http://www.iksr.org/uploads/media/RZ_iksr_dt_02.pdf. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by: Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G.-K., Allen, S. K., Tignor, M., and Midgley, P. M.. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA. 582 pp.
- IWK (Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik) (1999): Auswertung der HOWAS-Datenbank. Projektnummer HY 98/15, Auftraggeber Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) für die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). IWK Universität Karlsruhe. 22 S.
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J. C. J. H., Ward, P. J. (2012): Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12: 3733–3752.
- Kang, J.-L., Su, M.-D., Chang, L.-F. (2005): Loss functions and framework for regional flood damage estimation in residential area. *Journal of Marine Science and Technology* 13(3): 193–199.
- Kelman, I., Spence, R. (2004): An overview of flood actions on buildings. *Engineering Geology* 73(3–4): 297–309.
- Kienzler, S., Pech, I., Kreibich, H., Müller, M., Thieken, A. H. (2015a): After the extreme flood in 2002: changes in preparedness, response and recovery of flood-affected residents in Germany between 2005 and 2011. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15: 505–526.
- Kienzler, S., Pech, I., Thieken, A. H. (2015b): Risikowahrnehmung, Risikokommunikation und Entwicklung der Eigenvorsorge von Betroffenen. In: DKKV (Hrsg.): Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. DKKV-Schriftenreihe Nr. 53, Bonn. 99–110.
- Kienzler, S., Falter, D., Thieken, A. H. (2015c): Zusammenwirken von staatlicher und privater Vorsorge: Fallstudie Mulde. In: DKKV (Hrsg.): Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. DKKV-Schriftenreihe Nr. 53, Bonn. 110–120.

- Klaus, J., Pflügner, W., Schmidtke, R. F., Wind, H., Green, C. (1994): Models for Flood Hazard Assessment and Management. In: Penning-Rowsell, E. C., Fordham, M. (eds): Floods across Europe, Hazard assessment, modelling and management. London, UK. 67–106.
- Kleist, L., Thieken, A. H., Köhler, P., Müller, M., Seifert, I., Borst, D., Werner, U. (2006): Estimation of the regional stock of residential buildings as a basis for a comparative risk assessment in Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6(4): 541–552.
- Kreibich, H., Thieken, A. H. (2008): Assessment of damage caused by high groundwater inundation. *Water Resources Research* 44(9): W09409.
- Kreibich, H., Thieken, A. H., Petrow, T., Müller, M., Merz, B. (2005): Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures - lessons learned from the Elbe flood in August 2002. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5: 117–126.
- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., Merz, B., Thieken, A. H. (2009): Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 1679–1692.
- Kreibich, H., Seifert, I., Merz, B., Thieken, A. H. (2010): Development of FLEMOcs – A new model for the estimation of flood losses in companies. *Hydrological Science Journal* 55: 1302–1314.
- Kreibich, H., Christenberger, S., Schwarze, R. (2011a): Economic motivation of households to undertake private precautionary measures against floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 309–321.
- Kreibich, H., Seifert, I., Thieken, A. H., Lindquist, E., Wagner, K., Merz, B. (2011b): Recent changes in flood preparedness of private households and businesses in Germany. *Regional Environmental Change* 11(1): 59–71.
- Kron, W. (2005): Flood Risk = Hazard * Values * Vulnerability. *Water International* 30(1): 58–68.
- Kron, W., Steuer, M., Löw, P., Wirtz, A. (2012): How to deal properly with a natural catastrophe database — Analysis of flood losses. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12(3): 535–550.
- Kuhlicke, C., Steinführer, A., Meyer, V. (2013): Jenseits der Leitdifferenz von „Beton contra Natur“: Neue Paradoxien und Ungleichheiten im Hochwasserrisikomanagement. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 57(2): 70–74.

- Lasage, R., Veldkamp, T. I. E., De Moel, H., Van, T. C., Phi, H. L., Vellinga, P., Aerts, J. C. J. H. (2014): Assessment of the effectiveness of flood adaptation strategies for HCMC. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14: 1441–1457.
- LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. *Hochwasser – Ursachen und Konsequenzen*. 30 S. Abrufbar unter: http://lawa.de/documents/Leitlinien_d59.pdf. Letzter Zugriff: 15.05.2015.
- LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (2013): Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen. Ständiger Ausschuss der LAWA "Hochwasserschutz und Hydrologie". 96 S. Abrufbar unter: http://www.lawa.de/documents/Empfehlungen_zur_Aufstellung_von_HWRMPL_mit_Anlagen_563.pdf. Letzter Zugriff: 15.05.2015.
- LfU (Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg) (2003): *Hydraulik naturnaher Gewässer. Teil 4 – Numerische Modelle zur Strömungssimulation*. 1. Auflage. 56 S. Abrufbar unter: https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/14422/hydraulik_teil_4.pdf?command=downloadContent&filename=hydraulik_teil_4.pdf. Letzter Zugriff: 15.05.2015.
- LfULG (Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen) (2009): *Hochwasser 2002 im Muldegebiet – eine meteorologisch-hydrologische Analyse*. Heft 32/2009. 160 S.
- LfULG (Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen) (2012): *Hydrologisches Handbuch – Gewässerkundliche Hauptwerte 11/2012, Teil 3*. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13700/documents/21713>. Letzter Zugriff: 30.05.2015.
- LfULG (Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen) (2014): *Ereignisanalyse Hochwasser Juni 2013 - Arbeitsstand 2014*. 115 S. Abrufbar unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13700/documents/21713>. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- LTV (Landestalsperrenverwaltung Sachsen) (2015): *Hochwasserschutz*. <http://www.smul.sachsen.de/ltv/11754.htm>. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- Luino, F., Cirio, C. G., Biddoccu, M., Agangi, A., Giulietto, W., Godone, F., Nigrelli, G. (2009): Application of a model to the evaluation of flood damage. *Geoinformatica* 13(3): 339–353.
- Marcinek, J. (1991): *Gewässer und Wasserhaushalt*. In: *Physische Geographie Mecklenburg-Vorpommern – Brandenburg – Sachsen-Anhalt – Sachsen – Thüringen*. Gotha. 221–270.

- Menzel, L., Bürger, G. (2002): Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology* 267(1–2): 53–64.
- Merz, B. (2006): Hochwasserrisiken - Grenzen und Risiken der Risikoabschätzung. Schweizerbart, Stuttgart. 334 S.
- Merz, B., Thielen, A. H. (2004): Flood risk analysis: Concepts and challenges. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 56(3-4): 27–34.
- Merz, B., Thielen, A. H. (2009): Flood risk curves and uncertainty bounds. *Natural Hazards* 51(3): 437–458.
- Merz, B., Kreibich, H., Thielen, A. H., Schmidtke, R. (2004): Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4(1): 153–163.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. H. (2010): Review article "Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10: 1697–1724.
- Merz, B., Kreibich, H., Lall, U. (2013): Multi-variate flood damage assessment: A tree-based data-mining approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13(1): 53–64.
- Messner, F., Meyer, V. (2006): Flood Damage, Vulnerability and Risk Perception – Challenges for Flood Damage Research. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. J. Schanze, Zeman, E., Marsalek, J., Springer Netherlands. 67: 149–167.
- Messner, F., Penning-Rowsell, E. C., Green, C., Meyer, V., Tunstal, I. S., Van der Veen, A. (2007): Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods. *FLOODsite-Report T09-06-01*: 176.
- Meyer, V., Messner, F. (2005): National Flood Damage Evaluation Methods. A review of applied methods in England, the Netherlands, Czech Republic and Germany. *UFZ-Diskussionspapiere, Fachbereich Sozialwissenschaften, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ). Leipzig. 1–47. Abrufbar unter: https://www.ufz.de/export/data/1/26214_dp212005.pdf. Letzter Zugriff: 20.06.2015.*
- Meyer, V., Scheuer, S., Haase, D. (2009): A multicriterial approach for flood risk mapping exemplified at the mulde river, Germany. *Natural Hazards* 48: 17–39.

- Meyer, V., Becker, N., Markantonis, V., Schwarze, R., Van den Bergh, J. C. J. M., Bouwer, L. M., Bubeck, P., Ciavola, P., Genovese, E., Green, C., Hallegatte, S., Kreibich, H., Lequeux, Q., Logar, I., Papyrakis, E., Pfurtscheller, C., Poussin, J., Przulski, V., Thieken, A. H., Viavattene, C. (2013): Review article: Assessing the costs of natural hazards - state of the art and knowledge gaps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13(5): 1351–1373.
- Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G., Grünewald, U. (2004): Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway “Zugstrasse Vb”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109(D23): D23101.
- Müller, M. (2000): Die Auswirkungen von Deichbrüchen und Heizöllagerung auf Überschwemmungsschäden bei Wohngebäuden. *Versicherungswirtschaft* 2000(10): 693–696.
- Munich Re (2005): *Weather catastrophes and climate change. Knowledge Series.* Münchner Rückversicherungsgesellschaft. München. 264 S.
- MURL (Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen) (2000): *Potentielle Hochwasserschäden am Rhein in Nordrhein-Westfalen* Düsseldorf.
- National Research Council (2000): *Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies.* National Academy Press, Washington, D. C. 216 S.
- Nicholas, J., Holt, G. D., Proverbs, D. G. (2001): Towards standardising the assessment of flood damaged properties in the UK. *Structural Survey* 19(4): 163–172.
- Olsen, A. S., Zhou, Q., Linde, J. J., Arnbjerg-Nielsen, K. (2015): Comparing methods of calculating expected annual damage in urban pluvial flood risk assessments. *Water* 7: 255–270.
- Patt, H., Jüpner, R. (2013): *Hochwasser-Handbuch.* Berlin Heidelberg, Springer. 696 S.
- Parker, D., Green, C., Thompson, C. S. (1987): *Urban flood protection benefits: A project appraisal guide.* Gower Technical Press, Aldershot, UK.
- Penning-Rowsell, E. C., Chatterton, J. (1977): *The benefits of flood alleviation: A manual of assessment techniques.* Gower Technical Press, Aldershot, England.
- Penning-Rowsell, E. C., Green, C. (2000): New insights into the appraisal of flood-alleviation benefits: (1) Flood damage and flood loss information. *Journal of the Institute of Water Environment Management* 14: 347–353.

- Penning-Rowsell, E. C., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., Green, C. (2005): The benefits of flood and coastal risk management: a handbook of assessment techniques. Flood Hazard Research Centre, Middlesex University Press.
- Penning-Rowsell, E. C., Priest, S., Parker, D., Morris, J., Tunstall, S., Viavattene, C., Chatterton, J., Owen, D. (2013): Flood and Coastal Erosion Risk Management - A Manual for Economic Appraisal. Flood Hazard Research Centre and Environment Agency. Routledge. 448 S.
- Petrow, T., Merz, B., Lindenschmidt, K.-E., Thielen, A. H. (2007): Aspects of seasonality and flood generating circulation patterns in a mountainous catchment in south-eastern Germany. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(4): 1455–1468.
- PGS (Planungsgesellschaft Dr. Scholz mbH) (2004): Hochwasserschutzkonzept Mulden im Regierungsbezirk Leipzig. 175 S.
- Pistrika, A., Jonkman, S. (2010): Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina. *Natural Hazards* 54: 413–434.
- PLANAT (Plattform Naturgefahren) (1998): Von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur. Broschüre zur Nationalen Plattform Naturgefahren. Bern, Landeshydrologie und -geologie.
- Plate, E., Kron, W., de Haar, U. (Hrsg., 1993): Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung: Bericht des Wissenschaftlichen Beirats der DFG für das Deutsche Komitee für die „International Decade for Natural Disaster Reduction“. Weinheim. VCH.
- Poussin, J. K., Bubeck, P., Aerts, J. C. J. H., Ward, P. J. (2012): Potential of semi-structural and non-structural adaptation strategies to reduce future flood risk: case study for the Meuse. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12(11): 3455–3471.
- Prettenthaler, F., Amrusch, P., Habsburg-Lothringen, C. (2010): Estimation of an absolute flood damage curve based on an Austrian case study under a dam breach scenario. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10: 881–894.
- Schädler, G., Berg, P., Dühmann, D., Feldmann, H., Ihringer, J., Kunstmann, H., Liebert, J., Merz, B., Ott, I., Wagner, S. (2012): Flood Hazards in a Changing Climate. Project Report. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM). Karlsruhe. 83 S:
Abrufbar unter:
http://www.cedim.de/download/Flood_Hazards_in_a_Changing_Climate.pdf. Letzter
Zugriff: 06.06.2015.

- Schröter, K., Kreibich, H., Vogel, K., Riggelsen, C., Scherbaum, F., Merz, B. (2014): How useful are complex flood damage models? *Water Resources Research* 50(4): 3378–3395.
- Schwarz, J., Maiwald, H. (2007): Prognose der Bauwerksschädigung unter Hochwassereinwirkung. *Bautechnik* 84(7): 450–464.
- Seifert, I. (2008): Risikomanagement von Unternehmen bei Hochwasser. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Fridericana zu Karlsruhe. Karlsruhe. 250 S.
- Seifert, I., Thieken, A. H., Merz, B., Borst, D., Werner U. (2010): Estimation of industrial and commercial assets values for hazard risk assessment. *Natural Hazards* 52(2): 453–479.
- Seifert, P. (2012): Mit Sicherheit wächst der Schaden? – Überlegungen zum Umgang mit Hochwasser in der räumlichen Planung. 38 S. abrufbar unter: http://www.rpv-elbtalosterz.de/fileadmin/templates/PDF/mit_sicherheit_waechst_der_schaden.pdf.
Letzter Zugriff: 05.05.2015.
- Smith, D. (1981): Actual and potential flood damage: a case study for urban Lismore, NSW, Australia. *Applied Geography* 1: 31–39.
- Smith (1994): Flood damage estimation – a review of urban stage-damage curves and loss functions. *Water Sa* 20: 231–238.
- Smith, K., Ward, R. C. (1998): *Floods: physical processes and human impacts*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Statistisches Landesamt Sachsen (2014): Statistik – Gebietsänderungen. <http://www.statistik.sachsen.de/html/825.htm>. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- Takeuchi, K. (2001): Increasing vulnerability to extreme floods and societal needs of hydrological forecasting. *Hydrological Science Journal* 46(6): 869–881.
- Tapsell, S. M., Penning-Rowsell, E. C., Tunstall, S. M., Wilson, T. L. (2002): Vulnerability to flooding: health and social dimensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 360(1796): 1511–1525.
- Thieken, A. H., Kreibich (2009): Ansätze zur Bewertung von Schäden an Wohngebäuden und in Privathaushalten. Monetäre Schäden in Privathaushalten – ein empirischer Ansatz. In: Thieken, A. H., Seifert, I., Merz, B. (Hrsg.): *Hochwasserschäden. Erfassung, Abschätzung und Vermeidung*. Oekom Verlag, München. 173–184.
- Thieken, A. H., Merz, B. (2009): Schadensabschätzung – eine Einführung. In: Thieken, A. H., Seifert, I., Merz, B. (Hrsg.): *Hochwasserschäden. Erfassung, Abschätzung und Vermeidung*. Oekom Verlag, München. 155–160.

- Thieken, A. H., Müller, M., Kreibich, H., Merz, B. (2005): Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. *Water Resources Research* 41(12): W12430.
- Thieken, A. H., Petrow, T., Kreibich, H., Merz, B. (2006a): Insurability and Mitigation of Flood Losses in Private Households in Germany. *Risk Analysis* 26(2): 383–395.
- Thieken, A. H., Müller, M., Kleist, L., Seifert, I., Borst, D., Werner, U. (2006b): Regionalisation of asset values for risk analyses. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6: 167–178.
- Thieken, A. H., Kreibich, H., Müller, M., Merz, B. (2007): Coping with floods: preparedness, response and recovery of flood-affected residents in Germany in 2002. *Hydrological Sciences Journal* 52(5): 1016–1037.
- Thieken, A.H., Olschewski, A., Kreibich, H., Kobsch, S., Merz, B. (2008a): Development and evaluation of FLEMOps – a new Flood Loss Estimation MOdel for the private sector. In: Proverbs, D., Brebbia, C.A., Penning-Rowsell, E. (eds): *Flood Recovery, Innovation and Response*. WIT Press. 315–324.
- Thieken, A. H., Ackermann, V., Elmer, F., Kreibich, H., Kuhlmann, B., Kunert, U., Maiwald, H., Merz, B., Müller, M., Piroth, K., Schwarz, J., Schwarze, R., Seifert, I., Seifert, J. (2008b): Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses. *RIMAX Contributions at the 4th International Symposium on Flood Defence*. 4th International Symposium on Flood Defence (ISFD4). Toronto 2008. 10 S.
- Thieken, A. H., Seifert, I., Elmer, F., Maiwald, H., Haubrock, S., Schwarz, J., Müller, M., Seifert, J. (2009b): Standardisierte Erfassung und Bewertung von Hochwasserschäden. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 53(3): 198–207.
- Thieken, A. H., Seifert, I., Merz, B. (Hrsg., 2010): *Hochwasserschäden – Erfassung, Abschätzung und Vermeidung*. Oekom, München. 300 S.
- Tunstall, S., Tapsell, S., Fernandez-Bilboa, A. (2006): *Damage reducing effects of flood warnings. Guidelines for Socio-economics flood damage evaluation*. Wallingford, UK.
- UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2011): *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction—Revealing Risk, Redefining Development*. United Nations, Geneva, Switzerland. 178 S. Abrufbar unter: <http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/home/download.html>. Letzter Zugriff: 20.6.2015.

- USACE (U.S. Army Corps of Engineers) (1996): Engineering and Design. Risk-Based analysis for flood damage reduction studies. Washington, DC. Manual No. 1110-2-1619. Abrufbar unter: http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1619.pdf. Letzter Zugriff: 20.06.2015.
- Van der Veen, A., Logtmeijer, C. (2005): Economic Hotspots: Visualizing Vulnerability to Flooding. *Natural Hazards* 36: 65–80.
- Vis, M., Klijn, F., De Bruijn, K. M., Van Buuren, M. (2003): Resilience strategies for flood risk management in the Netherlands. *International Journal of River Basin Management* 1: 33–40.
- Vogel, K., Rigg, C., Kreibich, H., Merz, B., Scherbaum, F. (2012): Flood damage and influencing factors: A Bayesian network perspective, paper presented at the 6th European Workshop on Probabilistic Graphical Models (PGM 2012), University of Granada, Granada, Spain.
- Von Kirchbach, H.-P., Franke, S., Biele H. et al. (2002): Bericht der Unabhängigen Kommission der Sächsischen Staatsregierung Flutkatastrophe 2002. Dresden. 252 S.
- Ward, P. J., De Moel, H., Aerts, J. C. J. H. (2011): How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods? *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11(12): 3181–3195.
- Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. November 2014 (BGBl. I S. 1724) geändert worden ist.
- White, G. I. (1945): Human adjustments to floods – A geographical approach to the flood problem in the United States. Research paper No. 20. Department of Geography, University of Chicago, Chicago, Illinois.
- Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., Hayes, M. J. (2007): Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resource Management* 21: 763–774.
- Wind, H.; Nierop, T., De Blois, C., De Kok, J. (1999): Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse flood. *Water Resources Research* 35: 3459–3465.
- Wünsch, A., Herrmann, U., Kreibich, H., Thielen, A. H. (2009): The role of disaggregation of asset values in flood loss estimation: a comparison of different modeling approaches at the Mulde River, Germany. *Environmental Management* 44(3): 524–541.
- Xu, Y. P., Booij, M. J. (2007): Propagation of discharge uncertainty in a flood damage model for the Meuse River. In: Begum, S., Hall, J., Stivem, M. (eds.): *Flood risk management in Europe: innovation in policy and practice (Advances in natural and technological hazards research series)*. Kluwer, Dordrecht. 293–310.

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Sarah Kienzler, versichere hiermit, dass ich meine Masterarbeit mit dem Thema:

*Reduktion von Hochwasserschäden im Zusammenspiel von staatlicher und privater
Vorsorge – eine Fallstudie an der Mulde*

selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, wobei ich alle wörtlichen und sinngemäßen Zitate als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Berlin, den 30. Juni 2015

Sarah Kienzler