

**WIFO**

A-1103 WIEN, POSTFACH 91  
TEL. 798 26 01 • FAX 798 93 86

 **ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR  
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG**

**Wahrscheinlichkeits-  
Überschreitungskurven  
für Hochwasserkatastrophen  
in Österreich**

Thomas Url

Wissenschaftliche Assistenz:  
Ursula Glauninger, Dietmar Weinberger

Oktober 2008

# Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasserkatastrophen in Österreich

Thomas Url

Oktober 2008

Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung

Im Auftrag des Verbandes der Versicherungsunternehmen Österreichs

Begutachtung: Ulrike Schneider (Universität Wien), Franz Sinabell (WIFO) •

Wissenschaftliche Assistenz: Ursula Glauninger, Dietmar Weinberger

## Inhalt

Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven sind eine Möglichkeit zur optischen Darstellung und Nutzung der Ergebnisse eines Katastrophenmodells. Sie beschreiben die jährliche Wahrscheinlichkeit, mit der ein gegebenes Portfolio von Objekten ein vorgegebenes Schadensausmaß potentiell überschreitet. Die hier für Österreich erstmals berechneten Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasserkatastrophen zeigen, dass für Wohngebäude privater Haushalte in Österreich ein Gesamtschadenvolumen von 100 Mio. € einmal in 1.000 Fällen (0,1%) überschritten wird; umgekehrt ausgedrückt bleibt der Gesamtschaden an privaten Wohngebäuden in 999 von 1.000 Fällen (99,9%) unter dem Wert von 100 Mio. €. Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven erlauben auch die Berechnung der Grenzwerte für ein Sicherheitsniveau von 1 in 10.000 Fällen (0,01%). In diesem Fall würde für private Wohngebäude ein Gesamtschaden von 400 Mio. € einmal in 10.000 Fällen überschritten. Höhere Schäden können durchaus auftreten, die entsprechende Eintrittswahrscheinlichkeit ist jedoch gering. Die Berechnung von Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für öffentliche Gebäude, Gebäude des Dienstleistungssektors, der Industrie und des Gewerbes sowie sonstige Gebäude erlaubt eine umfassende Einschätzung des Hochwasserrisikos auf der Grundlage des Bestands aus dem Jahr 2005.

Rückfragen: [Thomas.Url@wifo.ac.at](mailto:Thomas.Url@wifo.ac.at)

2008/342-1/S/WIFO-Projektnummer: 3007

© 2008 Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung

Medieninhaber (Verleger), Herausgeber und Hersteller: Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung,  
Wien 3, Arsenal, Objekt 20 • Postanschrift: A-1103 Wien, Postfach 91 • Tel. (+43 1) 798 26 01-0 • Fax (+43 1) 798 93 86 • <http://www.wifo.ac.at/> •  
Verlags- und Herstellungsort: Wien

Verkaufspreis: 40,00 € • Kostenloser Download: [http://www.wifo.ac.at/www/jsp/index.jsp?fid=23923&id=34140&typeid=8&display\\_mode=2](http://www.wifo.ac.at/www/jsp/index.jsp?fid=23923&id=34140&typeid=8&display_mode=2)

## Kurzzusammenfassung

Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven sind eine Möglichkeit zur Darstellung und Nutzung der Ergebnisse eines Katastrophenmodells. Katastrophenmodelle dienen allgemein zur besseren Einschätzung von Katastrophenrisiken und zur Verbesserung des Risikomanagements. Innerhalb des Risikomanagements für Naturkatastrophen können die Ergebnisse unterschiedliche Maßnahmen nahe legen. Einerseits im Bereich der Schadenvorbeugung und andererseits in der Weitergabe von Risiken aus Naturkatastrophen an Rückversicherungen oder Kapitalmärkte. Für Versicherungen gegen Schäden aus Naturkatastrophen ist dieses Instrument besonders wichtig, weil durch die hohe Korrelation der Schäden innerhalb der betroffenen Region rasch Klumpenrisiken entstehen können.

Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve ist eine optische Darstellung der jährlichen Wahrscheinlichkeit mit der ein bestimmtes Portfolio von Objekten ein vorgegebenes Schadenausmaß potentiell überschreitet. Der interessanteste Bereich der Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve ist der rechte Rand, in dem die größten zu erwartenden Schadenwerte liegen.

Die hier für Österreich erstmals berechneten Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven dienen als eine erste und mit einigen Schwächen behaftete Grundlage zur Einschätzung des Rückversicherungsbedarfs einer Pflichtversicherung gegen Hochwasserschäden für Wohngebäude privater Haushalte in Österreich. Für private Wohngebäude wird ein Gesamtschadenvolumen von 100 Mio. € mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu 1.000 (0,1%) überschritten; umgekehrt ausgedrückt bleibt der Gesamtschaden an privaten Wohngebäuden in 999 von 1.000 Fällen (99,9%) unter dem Wert von 100 Mio. €. Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven erlauben auch die Berechnung der Grenzwerte für ein Sicherheitsniveau von 1 in 10.000 Fällen (0,01%). In diesem Fall würde für private Wohngebäude ein Gesamtschaden von 400 Mio. € einmal in 10.000 Fällen überschritten werden. Darüber liegende Schäden können durchaus auftreten, die dazu gehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten sind jedoch gering. Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für öffentliche Gebäude, Gebäude des Dienstleistungssektors, der Industrie und des Gewerbes, sowie Sonstige Gebäude erlauben eine umfassende Einschätzung auf der Grundlage des Bestands aus dem Jahr 2005.

Das hier vorgestellte Modell ist als ein erster Schritt zur Berechnung von Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven zu bewerten, weil die meisten Module des Modells den Zustand in Österreich nur grob und vereinfachend beschreiben.



# Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasserkatastrophen in Österreich

Thomas Url

## Inhaltsverzeichnis

### Kurzzusammenfassung

### Verzeichnis der Übersichten

### Verzeichnis der Abbildungen

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Die Struktur von Katastrophenmodellen</b>	<b>5</b>
2.1	<i>Das Modul zur Risikoeinschätzung</i>	7
2.2	<i>Das Modul mit Österreichs Gebäudebestand</i>	10
2.3	<i>Das Modul zur Bestimmung der Schadenanfälligkeit</i>	14
2.4	<i>Modul zur Ermittlung des Schadenwertes</i>	18
<b>3.</b>	<b>Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Österreich</b>	<b>21</b>
3.1	<i>Ergebnisse für Österreich</i>	21
<b>4.</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>43</b>
<b>5.</b>	<b>Literaturhinweise</b>	<b>45</b>
	<b>Technischer Anhang</b>	<b>47</b>
A1	<i>Das Modul zur Risikoeinschätzung</i>	47
A2	<i>Das Modul mit Österreichs Gebäudebestand</i>	48
A3	<i>Das Modul zur Bestimmung der Schadenanfälligkeit</i>	51
A4	<i>Modul zur Ermittlung des Schadenwertes</i>	52
A5	<i>Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve</i>	53

## Verzeichnis der Übersichten

Übersicht 1: Vergleich der Gebäudezählung 2001 mit der Zahl potentiell gefährdeter Objekte gemäß HORA-Auswertung 2006	12
Übersicht 2: Zahl und Struktur der Gebäude in den Bundesländern 2001	15
Übersicht 3: Durchschnittliche Reparaturkosten und Kosten für Inventarschäden nach Gebäudetyp	17
Übersicht 4: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich Gebäude privater Haushalte	24
Übersicht 5: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich Öffentliche Gebäude	26
Übersicht 6: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich Gebäude des Dienstleistungssektors	28
Übersicht 7: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich Gebäude des Industrie- bzw. Gewerbesektors	30
Übersicht 8: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich Sonstige Gebäude	32
Übersicht 9: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich Wirtschaftlich genutzte Gebäude	34
Übersicht 10: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich Gebäude im Privatbesitz	36
Übersicht 11: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich Gebäude insgesamt	38
Übersicht 12: Durchschnittliche Reparaturkosten und Kosten für Inventarschäden nach Gebäudetyp in Euro des Jahres 2005	39
Übersicht 13: Erwarteter durchschnittlicher jährlicher Schaden aus Hochwasser in Österreich	40
Übersicht 14: Struktur der Gebäude in Österreich - Überleitung von der Abgrenzung in der Gebäudezählung zur Abgrenzung im Simulationsmodell	50

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Struktur eines Katastrophen-Simulationsmodells	6
Abbildung 2: Der räumliche Zusammenhang zwischen den Bezirken bei einem Hochwasser	9
Abbildung 3: Histogramm der Wiederkehrhäufigkeit simulierter Hochwasserkatastrophen	11
Abbildung 4: Verteilung der hochwassergefährdeten Objekte 2005	13
Abbildung 5: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Gebäuden privater Haushalte in Österreich, 2005	23
Abbildung 6: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an öffentlichen Gebäuden in Österreich, 2005	25
Abbildung 7: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Gebäuden des Dienstleistungssektors in Österreich, 2005	27
Abbildung 8: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Gebäuden des Industrie- bzw. Gewerbesektors in Österreich, 2005	29
Abbildung 9: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Sonstigen Gebäuden in Österreich, 2005	31
Abbildung 10: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an wirtschaftlich genutzten Gebäuden in Österreich, 2005	33
Abbildung 11: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Privatgebäuden in Österreich, 2005	35
Abbildung 12: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Gebäuden insgesamt in Österreich, 2005	37



## 1. Einleitung

Großflächige Naturkatastrophen ereignen sich in Österreich nur selten. Umso größer war die Überraschung als in den Jahren 2002 und 2005 ein durch starke Regenfälle verursachtes Hochwasser eine vergleichsweise hohe Schadenssumme verursachte. Insgesamt betrug die Schäden 2,9 Mrd. € (2002) und 0,6 Mrd. € (2005), wobei die Aufteilung der Schadenssumme zwischen dem privaten Sektor und der öffentlichen Hand in beiden Jahren ungefähr 40:60 war, d. h. das Schadenvolumen an öffentlicher Infrastruktur und Gebäuden übertraf die Schäden an privaten Vermögensgegenständen. Die Finanzierung der Schadenbehebung bzw. des Produktionsausfalls geschädigter Betriebe wurde teilweise durch private Versicherungsverträge gedeckt (etwa 35%), einen erheblichen Teil der Finanzierung übernahmen jedoch Bund und Länder durch die Ausschüttung von Mittel aus dem Katastrophenfonds (40%), die restlichen 25% wurden zum Großteil durch die betroffenen Haushalte und Unternehmen aufgebracht. Ein nicht unerheblicher Teil wurde durch private Spenden gedeckt (7%).

Die Belastung öffentlicher Haushalte durch Schadenkompensationen erzwang Einschränkungen in anderen Bereichen der Staatsausgaben und führte zu verstärkten Vorbereitungsaktivitäten zur Abwehr von Hochwasserschäden. Eine der wichtigsten Aktivitäten war dabei die Zusammenarbeit zwischen dem Lebensministerium und dem Versicherungsverband, die im Hochwasserinformationssystem HORA mündete. Dieses über Internet frei zugängliche Informationssystem gibt für jede Gebäudeadresse in Österreich den Grad der Gefährdung durch Hochwasser bzw. Erdbeben an. Für Hochwasser wird zwischen Gefährdungszonen mit sehr häufiger Wiederkehrwahrscheinlichkeit (30 Jahre), mit weniger häufiger Wiederkehrwahrscheinlichkeit (100 Jahre) und mit seltener Wiederkehrwahrscheinlichkeit (200 Jahre) unterschieden.

Eine weitere Folge des Hochwassers war der Vorschlag der privaten Versicherungswirtschaft für eine Versicherungslösung zur Schadenabdeckung von Naturgefahren. Die vorgeschlagene Versicherungslösung soll den Anteil versicherter Schäden an der gesamten Schadenssumme steigern und damit die öffentliche Hand entlasten. *Sinabell – Url (2006)* entwerfen dafür ein System mit einer Pflichtversicherung gegen Naturkatastrophen, das ohne öffentliche Katastrophenhilfe auskommt. Die risikoadäquat angesetzte Prämienhöhe bewirkt vorbeugende Maßnahmen der Versicherten, weil damit entsprechende Prämienabschläge verbunden sind. Als Absicherung gegen außerordentlich große Ereignisse wird im Vorschlag von *Sinabell – Url (2006)* ein Verein auf Gegenseitigkeit eingerichtet, der im Ernstfall die Abdeckung extremer Großschäden durch Nachzahlungen aller Versicherten abdeckt. Zusätzlich bzw. alternativ dazu könnte die öffentliche Hand in Form einer Ausfallshaftung auftreten, wobei der öffentliche Zuschuss in das Versicherungssystem in Form eines rückzahlbaren Kredits gestaltet sein sollte (*Jaffee – Russell, 2006*). Die „Lender of Last Resort“-Lösung von Jaffee und Russell ist der Funktion einer Zentralbank im Kreditwesen nachgeahmt,

wo ebenfalls im Notfall Zentralbank-Liquidität in Form von Wertpapierpfandgeschäften dem privaten Bankensystem zugeführt wird. Die Umsetzung dieses Vorschlags muss aus aktueller Perspektive als dringlich eingeschätzt werden, weil jüngste Ergebnisse der Klimaforschung (Allan – Soden, 2008) nachweisen, dass die Auswirkung der Erderwärmung auf die Intensität von Regenfällen in den bisher eingesetzten Simulationsmodellen unterschätzt wurde. Die Fähigkeit der Atmosphäre zur Speicherung von Energie und Wasserdampf steigt mit höherer Temperatur stärker als bisher erwartet, sodass auch die damit verbundenen extremen Regenmengen über den bisherigen Erwartungen liegen werden.

Deutschland wurde 2002 ebenfalls von einer großflächigen Überflutung betroffen und diskutierte danach die Einführung eines Pflichtversicherungssystems, allerdings mit einer direkten staatlichen Ausfallhaftung im Fall von Extremereignissen (Schwarze – Wagner, 2007). Die Unwägbarkeit der Höhe einer staatlichen Ausfallhaftung im Fall einer extremen Überflutung weiter Landstriche war in Deutschland eine der ausschlaggebenden Ursachen für das Scheitern einer privaten Versicherungslösung. Die österreichische Lösung mit einer Pflichtversicherung ist bisher über den Diskussionsstatus noch nicht hinweggekommen. Ein Scheitern soll jedoch durch die Ergebnisse dieser Studie verhindert werden. Mit Hilfe von Katastrophen-Simulationsmodellen kann die Häufigkeit potentieller Schäden von Hochwasser und anderen Naturkatastrophen einigermaßen zuverlässig eingeschätzt werden. Dadurch verbessern sich die Kalkulationsgrundlagen für private Versicherungsunternehmen. Das wichtigste Instrument zur Darstellung der Häufigkeit bestimmter Gesamtschäden sind Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven (Exceedance-Probability-Curve) für Hochwasserschäden. Sie werden in der vorliegenden Studie für Österreich erstmals geschätzt.

Eine Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der extreme Schadenshöhen eintreten bzw. überschritten werden, z. B. der Schaden in der Höhe von 2,9 Mrd. €, aus dem Jahr 2002. Die Vorgangsweise zur Berechnung dieser Kurven lehnt sich an US-amerikanische Katastrophenmodelle an. Diese Modelle werden vor allem in den Bereichen Wirbelstürme und Erdbeben eingesetzt, sie finden jedoch auch für Hochwasser Verwendung. In den USA entwickeln private Unternehmen Katastrophenmodelle und setzen sie zum Risiko-Management im Bereich Naturkatastrophen ein (Grossi – Kunreuther, 2005).

Die Modellierung einer Naturkatastrophe setzt eine standardisierte Metrik zur Messung der Intensität einer Katastrophe voraus. Im Fall von Hochwasser bietet sich die Wiederkehrhäufigkeit von Überflutungen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes an. Die Wiederkehrhäufigkeit von Hochwasser wird im HORA in 30, 100 und 200 Jahresabständen gemessen. Auf dieser Metrik aufbauend, kann mit Hilfe theoretischer Zufallsprozesse ein Modell zur Schätzung der Hochwasserschäden zusammengestellt werden.

Diese Strategie ist vor allem dann vorteilhaft, wenn die Aufzeichnung von Ereignissen nicht weit in die Vergangenheit zurückreicht oder nur sehr seltene Ereignisse zu hohen Schadenssummen führen. Die meisten Datierungen gewöhnlicher und extremer Naturereignisse reichen nicht so weit in die Vergangenheit zurück, wie es die genaue

Modellierung von Extremereignissen verlangen würde. Ein weiteres Hindernis ist die genaue Bestimmung des physischen Schadens bzw. des Schadenwertes. Der Schaden eines Hochwassers an einem Gebäude hängt nicht nur von dessen exponierter Lage sondern auch von dessen eingebauten Schutzmechanismen ab. Hochgelagerte bzw. verschließbare Öffnungen eines Gebäudes bzw. die Verankerung von Gefäßen mit Gefahrgütern können den Schaden eines Hochwassers deutlich vermindern. Die statischen Eigenschaften eines Gebäudes unterscheiden sich ebenfalls deutlich nach dem Baujahr. Gebäudespezifische Eigenschaften werden z. B. in Simulationsmodellen für die USA berücksichtigt, in denen geographische Informationssysteme mit Katastrophenmodellen verknüpft sind. Diese Modelle ermöglichen sogar die Schätzung einer Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Portfolios einzelner Versicherungsunternehmen. Nach einigen großen Schadenereignissen in den USA stieg die Nachfrage nach Schätzungen für das Schadenpotential durch Naturkatastrophen in einer bestimmten Region. Die meisten Modelle in den USA werden von Privatunternehmen betreut, nur eines steht als Open Source Programm zur Verfügung (Grossi *et al.*, 2005).

Diese Studie enthält die Modellbeschreibung für ein Simulationsmodell für Hochwasserschäden in Österreich und beschreibt erste Simulationsergebnisse. Das Modell beruht auf einem statistischen räumlichen Modell für Extremereignisse, einer Zuordnung der Gebäude auf Hochwasserzonen entsprechend der Einteilung des Hochwasserinformationssystems (HORA) und verknüpft diese Informationen mit der Gebäudezählung für Österreich. Dadurch sind alle in Österreich 2005 bestehenden Gebäudeadressen erfasst und können auch grob hinsichtlich der Gebäudestruktur unterschieden werden. Schadenwerte aus den Hochwasserereignissen 2002 und 2005, sowie aus einer Auswertung einer deutschen Datenbank über Hochwasserschäden ermöglichen eine monetäre Bewertung der simulierten Schäden.

Der folgende Abschnitt enthält eine Kurzbeschreibung des Modells, die durch den technischen Anhang ergänzt wird. Der dritte Abschnitt beschreibt die Konstruktion und den Nutzen der Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve und erste Simulationsergebnisse für Österreich. Der letzte Abschnitt enthält Schlussfolgerungen und einen Ausblick über mögliche Erweiterungen des Modells.



## 2. Die Struktur von Katastrophenmodellen

Ein Simulationsmodell für Katastrophen besteht aus vier Modulen:

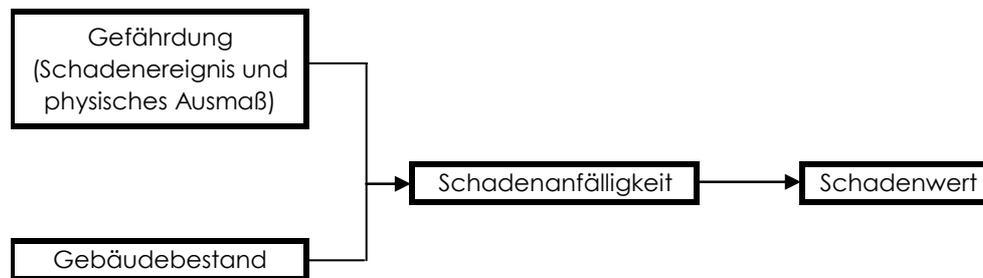
1. ein Modul zur Risikoeinschätzung bzw. Gefährdung,
2. ein Modul in dem der Bestand aller gefährdeten Objekte festgehalten und laufend fortgeschrieben wird,
3. ein Modul in dem die Schadenanfälligkeit der Gebäude festgehalten wird und
4. ein Modul zur Ermittlung des Schadenwertes,

die in Abbildung 1 dargestellt sind. Das Modell beschreibt das Risiko von Naturereignissen. Im Fall von Hochwasser werden der Eintritt und das Ausmaß von Hochwasserereignissen in einer bestimmten Gemeinde in einem statistischen Modell abgebildet. In den USA werden solche Modelle vor allem zur Schätzung des potentiellen Schadens aus Wirbelstürmen und Erdbeben eingesetzt. Sie dienen letztendlich zur Verbesserung der Entscheidungsfindung in der Versicherungswirtschaft, weil damit Schadenpotentiale zumindest näherungsweise geschätzt werden können. Ein statistischer Ansatz bietet sich vor allem deshalb an, weil in der Modellierung von Naturereignissen viele Quellen für Unsicherheiten bestehen (*Mahdyar – Porter, 2005*). Der seltene Eintritt großer Katastrophen bewirkt, dass historische Daten über Schäden nur unzureichend vorhanden sind. Dadurch sind die üblichen versicherungsmathematischen Verfahren nicht anwendbar. Zusätzlich erschwerend wirkt sich die wirtschaftliche Entwicklung aus, weil mit dem steigenden Wohlstand auch die Zahl der Gebäude zunimmt, die Bautechnik besser wird, sich Bauordnung bzw. Flächenwidmung laufend wandeln und die Reparaturkosten ansteigen. Steigende Reparaturkosten können durch Berücksichtigung der Baupreientwicklung aufgefangen werden; die Ausweitung der Besiedelung und die Freigabe gefährdeter Zonen zur Bautätigkeit können mit historischen Daten jedoch nicht mehr erfasst werden, sodass eine Extrapolation vergangener Werte auf zukünftige Großereignisse zwingend unzulänglich wird. Weiters können Vorbeugemaßnahmen das Gefährdungspotential von Objekten oder das Schadenausmaß im Ernstfall deutlich vermindern (*Kunreuther – Pauly, 2006*).

Im Idealfall kann ein Katastrophenmodell die komplexen meteorologischen, geographischen und hydrologischen Strukturen gut abbilden, und die räumliche und zeitliche Natur der Ereignisse in ein statistisches Modell übertragen. Zusätzlich braucht ein Modell eine detaillierte Buchhaltung über die vorhandenen Gebäude und deren Exponiertheit bzw. Anfälligkeit gegenüber Hochwasser. In diesem Fall ist es möglich den physischen Schaden an einem Gebäude zu berechnen, zu bewerten und damit in einen monetären Schaden umzulegen.

Abbildung 1 enthält die vier Module des Katastrophenmodells. Im Gefährdungsmodul wird die Wahrscheinlichkeit ermittelt, mit der ein Hochwasserniveau einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Im Gebäudebestandsmodul sind die räumliche Verteilung und die Struktur der Gebäude gespeichert, d. h. welcher Gebäudetyp steht in welcher

Abbildung 1: Struktur eines Katastrophen-Simulationsmodells



Q: Grossi - Kunreuther (2005).

Hochwasserabflusszone einer bestimmten Gemeinde. Das Schadenanfälligkeitsmodul in Abbildung 1 beschreibt das Potential für physische Schäden an Gebäuden, und das Schadenwertmodul übersetzt die physischen Schäden in monetäre Schadenwerte. Das Endergebnis der Berechnungen sind simulierte Schadenwerte, die in Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven zusammengefasst werden können. Sie geben die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein bestimmtes aggregiertes Schadenniveau überschritten wird. Diese Information ist besonders für die Versicherungswirtschaft bedeutend, weil damit ein Sicherheitsniveau festgelegt werden kann, bis zu dem eine Risikoübernahme die Existenz eines Versicherungsunternehmens nicht gefährdet.

## 2.1 Das Modul zur Risikoeinschätzung

Das Modul zur Risikoeinschätzung bestimmt die räumliche Lage eines Extremereignisses in Österreich, sowie die Häufigkeit und das Ausmaß der Ereignisse. Mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen müssen Zufallsvariable definiert werden, die diese drei Dimensionen abbilden. Die Grundlage dafür sind historische Daten. Im Fall von Hochwasser gibt es nunmehr für Österreich im Hochwasserinformationssystem HORA vier Hochwasserabflusszonen (HQ30, HQ100, HQ200 und außerhalb). Die HQ100 zeigt z. B. an, dass Gebäude außerhalb dieser Zone von einem Hochwasser höchstens alle 100 Jahre oder seltener bedroht sind. Jede Gebäudeadresse in Österreich ist einer dieser vier Zonen zugeordnet. Das hier eingesetzte Katastrophenmodell für Hochwasser benutzt diese Einteilung zur Beschreibung der Wahrscheinlichkeit mit der ein Extremereignis auftritt. Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt von der richtigen Wahl der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und von dessen Ausmaß ab.

Die wichtigsten Zufallsvariablen im Risikomodul beschreiben den Eintritt eines Hochwassers in jedem Bezirk Österreichs und dessen Ausmaß in einem zweistufigen Prozess. Zuerst wird aus einer Gleichverteilung eine Null-Eins-Variable gezogen, die angibt, ob in einem Bezirk ein Extremereignis eintritt. Da für Österreich bereits die Hochwasserabflusszonen berechnet wurden, kann in der Simulation das Ausmaß als eine Zufallsvariable aus einer inversen Gleichverteilung gezogen werden. Diese Zufallsvariable ist so konstruiert, dass sie Werte im Bereich der natürlichen Zahlen von 20 und größer annimmt und bei 10.000 abgeschnitten ist. Während für die Modellierung von Pegelständen die Extremwerttheorie eingesetzt werden muss (*Smith, 2004; Johnson et al., 2004B; Reiss-Thomas, 2001*) bildet die inverse Gleichverteilung die Wiederkehrhäufigkeit eines Hochwassers genau ab, sofern eine Zuteilung der Gebäude auf Hochwasserabflusszonen vorhanden ist. Die Wiederkehrhäufigkeit gibt an, wie oft ein bestimmtes Hochwasserniveau im Zeitablauf überschritten wird (z. B. 100-jährliche Ereignisse).

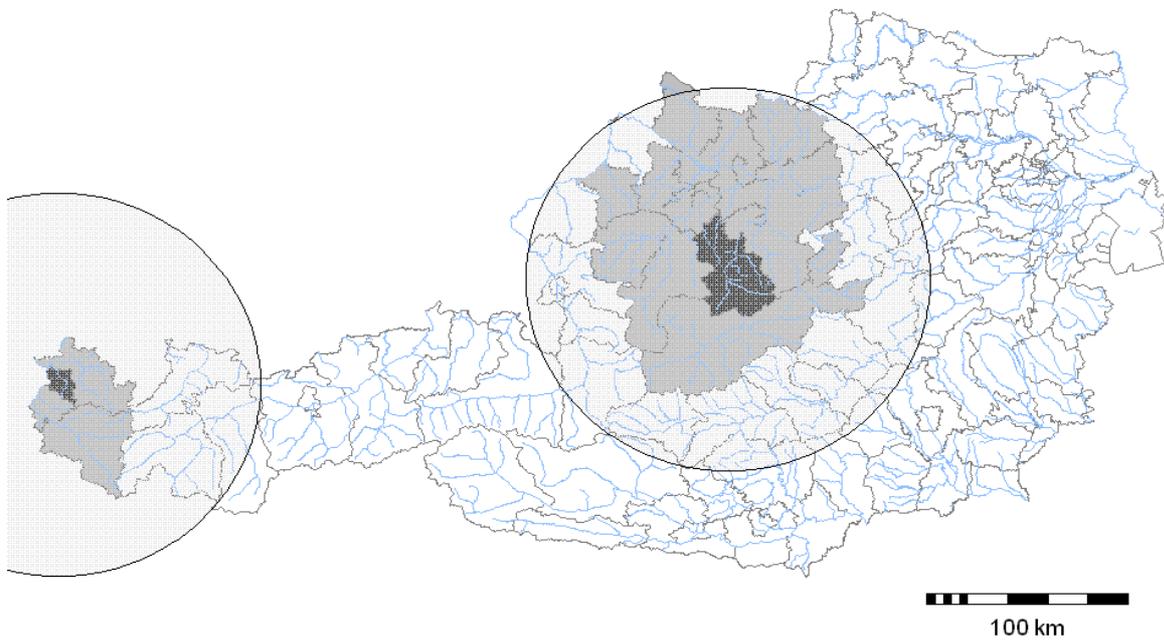
Das Simulationsmodell kann sowohl das lokale Ausmaß extremer Hochwasserereignisse als auch den räumlichen Zusammenhang innerhalb Österreichs gut abbilden. In Österreich muss in der Simulation die besondere topographische Struktur berücksichtigt werden. Durch die

deutlich unterschiedliche regionale Intensität von Regenfällen wirken sich Höhenunterschiede in einzelnen Bezirken auf die Wahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses aus. Flache Landstriche dominieren im Osten Österreichs, während im Zentralbereich und im Westen mehr oder weniger enge Täler von Gebirgszügen umfasst sind. Merz (2002) schätzt für ganz Österreich die Wahrscheinlichkeit eines Hochwassers und kommt dabei zum Schluss, dass die räumliche Distanz zwischen zwei Gebieten ein wesentlich besseres Maß für die hydrologische Ähnlichkeit ist als deren Gebietseigenschaften. Schätzmethode auf der Grundlage räumlicher Distanz liefern zuverlässigere Schätzungen für die Hochwasserwahrscheinlichkeit als Methoden, die die Einzugsgebietseigenschaften berücksichtigen. Diese Erkenntnis erleichtert den Aufbau eines Simulationsmodells für Hochwasserstände auf Gemeindeebene, weil das Modell für den Eintritt eines Hochwasserereignisses ohne große Informationsverluste auf die räumliche Nähe zwischen zwei Gemeinden abstellen kann, während hydrologische Beziehungen außer Acht bleiben können.

Die räumlichen Beziehungen zwischen zwei Gebieten werden im Modell durch eine Nachbarschaftsmatrix auf Bezirksebene dargestellt, die eine Eins enthält, wenn zwei Bezirke innerhalb eines Umkreises von 100 km liegen, ansonsten enthält diese Matrix eine Null. Wenn durch die Ziehung aus der inversen Gleichverteilung im Bezirk  $i$  ein Hochwasser auftritt, verzeichnen alle Bezirke im Umkreis von 100km ebenfalls ein Hochwasser. Durch diesen räumlichen Zusammenhang treten in Bezirken mit vielen Nachbarn regelmäßig häufiger Überflutungen auf als in Bezirken mit wenigen Nachbarn. Besonders auffällig ist dieser Unterschied für die westösterreichischen Bezirke, die vergleichsweise wenige Nachbarbezirke in Österreich haben. Abbildung 2 zeigt den Nachbarschaftseffekt für zwei Beispiele (Dornbirn, Ried a. d. Krems) deutlich. Die unterschiedliche Häufigkeit zwischen Bezirken wird mit bezirksspezifischen kritischen Werten korrigiert. Bezirke mit überdurchschnittlich vielen Nachbarn bekommen einen niedrigeren kritischen Wert zugewiesen als Bezirke mit unterdurchschnittlich vielen Nachbarn. Im Durchschnitt über alle Bezirke gewährleistet diese Transformation, dass Extremereignisse in 5% der Fälle auftreten, was genau einer 20-jährlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeit entspricht. Trotzdem schwankt die Betroffenheit einzelner Bezirke durch extreme Hochwasser in der Simulation etwas um die 5%-Marke mit tendenziell niedrigeren Werten im Westen und höheren Werten im Osten Österreichs. In einer weiteren Ausbauphase könnte das Simulationsmodell um Dummybezirke erweitert werden, die die Zahl der Nachbarn für Bezirke an der Staatsgrenze entsprechend erhöht.

Da die Topographie und die hydrologischen Eigenschaften in den einzelnen Bezirken unterschiedlich ausgeprägt sind, nehmen Extremereignisse bezirksweise ein unterschiedliches Ausmaß an. Die Intensität des Hochwassers wird daher in drei Schritten modelliert. Zuerst wird für ganz Österreich ein einheitliches Hochwasserausmaß aus einer inversen Gleichverteilung gezogen, und dann wird im zweiten Schritt zwischen den Bezirken mit Hilfe einer Normalverteilung eine Variation um diesen Mittelwert erzielt. Der dritte Schritt erfolgt auf Gemeindeebene, wo ebenfalls mit einer Normalverteilung ein unterschiedliches Ausmaß des Hochwassers zwischen den Gemeinden eingeführt wird, wobei als Ausgangswert der

Abbildung 2: Der räumliche Zusammenhang zwischen den Bezirken bei einem Hochwasser



Anmerkung: Eingefärbte Bezirke sind in der Simulation von einem Hochwasser betroffen. Ausgangspunkt der Zufallsziehung ist der Bezirk im Zentrum des Kreises mit einem Radius von 100km.

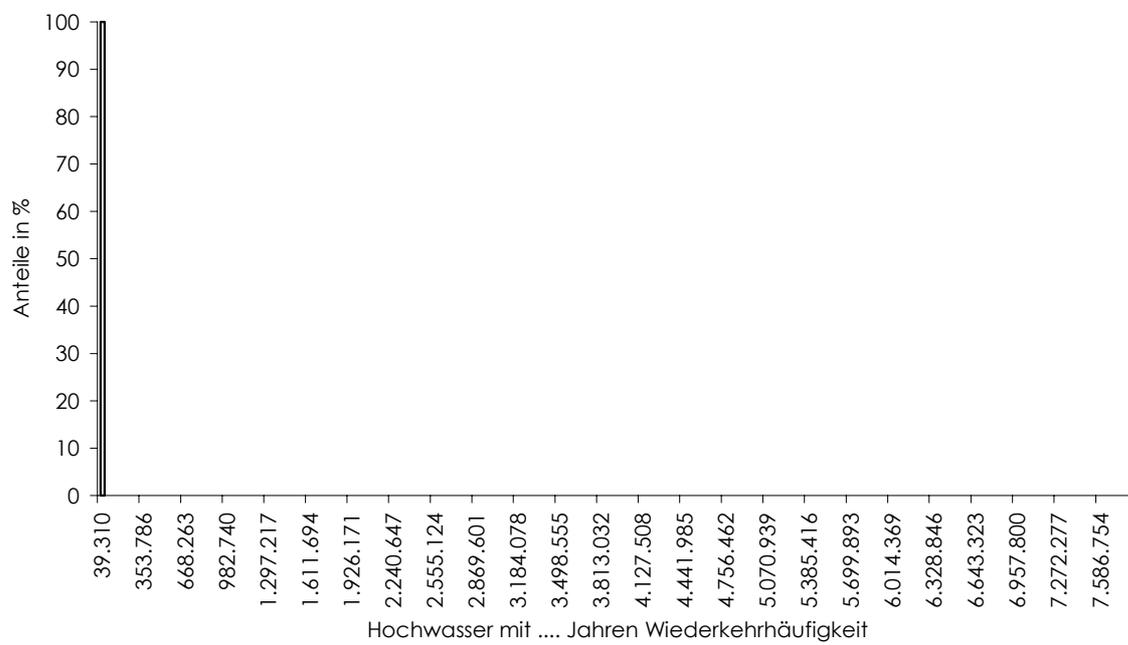
Bezirkdurchschnitt eingesetzt wird. Abbildung 3 zeigt die Verteilung des Hochwasserausmaßes gemessen in Wiederkehrhäufigkeiten für 1.000.000 Simulationen des Katastrophenmodells. Die Verteilung ist stark rechtsschief und erzeugt sogar Ereignisse mit etwa 7.480.000-jährlicher Wiederkehrwahrscheinlichkeit. In einer Million Simulationen entstanden 3 Ereignisse mit einer Wiederkehrhäufigkeit, die größer als eine Million Jahre war. Zur Berechnung der Schäden werden allerdings Extremereignisse bei 10.000 abgeschnitten.

## 2.2 Das Modul mit Österreichs Gebäudebestand

Das Ausmaß der Gefährdung österreichischer Gebäude durch Hochwasser ist im Hochwasserinformationssystem HORA (HOchwasserRisikoflächen Austria) veröffentlicht. Das System wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft gemeinsam mit dem Verband der Versicherungsunternehmen Österreichs erstellt und gibt für jede Gebäudeadresse in Österreich den Grad der Gefährdung durch Hochwasser an. HORA fehlt die Detailgenauigkeit von Gefahrenzonenplänen. Damit ist auch die Wirksamkeit von Schutzbauten in einer gefährdeten Zone derzeit noch unbekannt. Für die Simulation von Extremereignissen überwiegen die Vorteile aus der allgemeinen Verfügbarkeit die fehlende Detailtreue. Zusätzlich sind bei einem wirklich großen Hochwasserausmaß die vorhandenen in der Regel auf 100-jährliche Ereignisse ausgerichteten Schutzbauten unzureichend wirksam. In der Berechnung der Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve wird dieses Manko durch zwei unterschiedliche Szenarien berücksichtigt, die als Extremszenarien betrachtet werden können. Erstens wird eine Simulation ohne Berücksichtigung etwaiger Schutzbauten durchgeführt und zweitens eine, in der alle Flächen bis zu HQ-100 vom Hochwasser unbetroffen bleiben, solange die Flut unter dem Niveau 100-jährlicher Ereignisse bleibt. Bei darüber liegenden Ereignissen sind die Schutzbauten für Objekte in der Hochwasserabflusszone HQ100 unwirksam. Die Spannweite zwischen dem Szenario mit vollständiger Betroffenheit aller Zonen und dem Szenario mit vollständigem Schutz der HQ-100-Zone bei bis zu 100-jährlichen Wiederkehrhäufigkeiten engt die potentiellen Schadenwerte ein. Für Wien wird wegen der besonders wirksamen Schutzbauten eine generelle Annahme getroffen: Hochwasser bis zu einer 9.800-jährlichen Wiederkehrhäufigkeit richten keinerlei Schaden an. Darüber liegende Ereignisse betreffen sukzessive den gesamten Bestand der Wiener Gebäude: Ein 10.000-jährliches Ereignis beschädigt alle Gebäude Wiens.

Abbildung 4 zeigt das Ausmaß der Gefährdung durch Hochwasser in Österreich im Jahr 2005. Die unterschiedliche Einfärbung der Gemeinden gibt den Anteil der Objekte (Gebäude mit Adressen) in den jeweiligen Gemeinden innerhalb der Zone mit 200-jährlichen Hochwasserereignissen an. Dunklere Gemeinden haben einen höheren Anteil gefährdeter Objekte und sind im Rheintal, entlang des Alpenhauptkammes und entlang der Donau konzentriert. Wie bereits erwähnt sind in dieser Abbildung Schutzbauten nicht berücksichtigt. Übersicht 1 enthält eine Zusammenfassung der Daten auf Ebene der Bundesländer und vergleicht die Werte aus HORA mit der Gebäudezählung aus dem Jahr 2001. Die beiden

Abbildung 3: Histogramm der Wiederkehrhäufigkeit simulierter Hochwasserkatastrophen



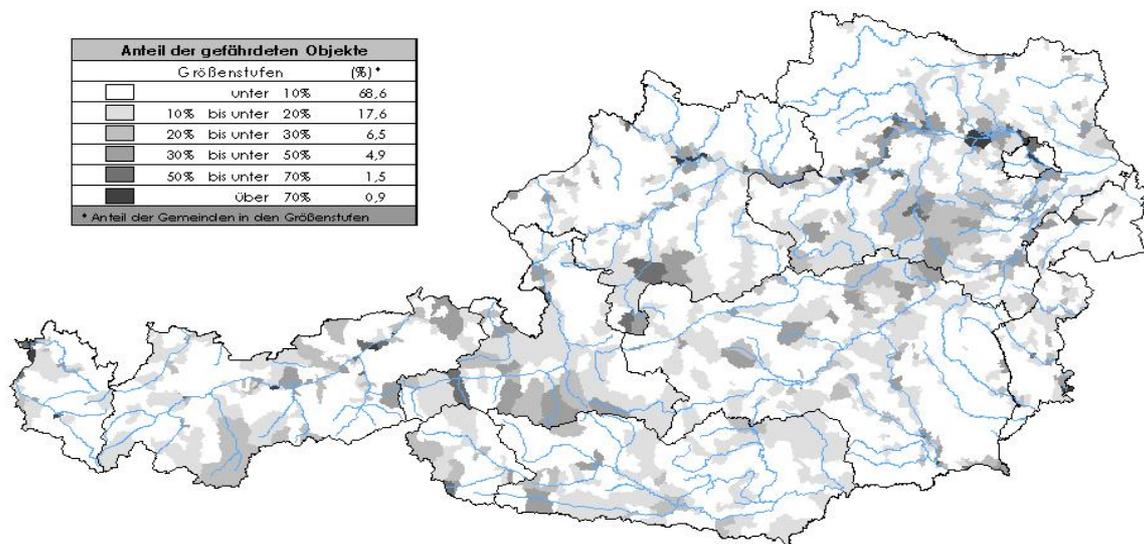
Anmerkung: Verteilung beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Übersicht 1: Vergleich der Gebäudezählung 2001 mit der Zahl potentiell gefährdeter Objekte gemäß HORA-Auswertung 2006

	Wohn- gebäude 2001	Gebäude insgesamt 2001	Gültige Adressen=Zahl der Objekte 2005	Potentiell gefährdete Objekte 2005 <sup>1)</sup>	Potentiell gefährdete Objekte in			Anteil der potentiell gefährdeten Objekte 2005	hoch- gefährdeten Objekte 2005
					Zone 1 <sup>2)</sup>	Zone 2 <sup>3)</sup>	Zone 3 <sup>4)</sup>		
	Zahl				In %				
Burgenland	102.373	114.403	114.831	8.254	78,5	3,9	17,6	7,2	5,6
Kärnten	137.083	162.075	150.708	15.594	84,6	9,0	6,4	10,3	8,8
Niederösterreich	487.094	553.604	545.801	73.531	72,1	17,5	10,4	13,5	9,7
Oberösterreich	306.743	352.326	354.861	35.755	75,7	16,2	8,1	10,1	7,6
Salzburg	100.167	119.818	114.330	19.732	80,5	13,1	6,3	17,3	13,9
Steiermark	281.108	325.822	319.083	26.785	74,4	13,2	12,4	8,4	6,2
Tirol	133.252	161.261	153.196	22.044	79,2	14,8	6,0	14,4	11,4
Vorarlberg	77.078	89.236	88.181	15.527	88,2	8,0	3,8	17,6	15,5
Wien	139.557	168.167	174.407	24.829	43,6	35,1	21,3	14,2	6,2
Österreich	1.764.455	2.046.712	2.015.398	242.051	73,4	16,4	10,2	12,0	8,8

Q: Statistik Austria, Gebäudezählung 2001; Land-, forst- und wasserwirtschaftliches Rechenzentrum GmbH (2006), WIFO-Berechnungen. – 1) Zahl der Objekte im Jahr 2005 in potentiellen Überschwemmungsgebieten unterschiedlicher Zonierung (Gefährdung). – 2) Zone 1: Erwartungswert eines Ereignisses mit einer Jährlichkeit von T= 30 (hochgefährdete Objekte). – 3) Zone 2: zwischen T=30 und T=100. – 4) Zone 3: zwischen T=100 und T=200). Anmerkung: HORA (HochwasserRisikoflächen Austria) weist Objekte als potentiell gefährdet entsprechend einer eigens entwickelten Methode aus. Dabei wurde die Wirkung bestehender Hochwasserschutzmaßnahmen [...] bei der Berechnung (in der Regel) nicht erfasst (BMLFUW, 2006A). Für Ballungsräume gelten Einschränkungen in der Genauigkeit der Daten. Nähere Hinweise sind verfügbar unter: <http://www.hochwasserisiko.at>.

Abbildung 4: Verteilung der hochwassergefährdeten Objekte 2005



Q: Land-, forst- und wasserwirtschaftliches Rechenzentrum GmbH (2006); WIFO-Berechnungen; Anmerkung: Anteil der Objekte in Überschwemmungsgebieten unterschiedlicher Gefährdung nach Gemeinden im Jahr 2005 (Zone 1: Erwartungswert eines Ereignisses mit einer Jährlichkeit T=30; Zone 2: T=100; Zone 3: T=200) an den Objekten in der Gemeinde insgesamt.

Datensätze stimmen gut überein, sodass zusätzliche Informationen aus der Gebäudezählung sinnvoll in die Simulation eingebaut werden können.

Insgesamt gelten etwas über 242.000 Objekte als potentiell gefährdet (sie liegen innerhalb der Zone von 200-jährlichen Hochwasserereignissen). Dies entspricht etwa 12% des Bestandes an Objekten. Der Großteil davon, über 177.000, liegt in der Zone von 30-jährlichen Ereignissen, ist also stark gefährdet. Zwischen den Zonen mit 100- und 200-jährlichen Ereignissen liegen knapp 25.000 Objekte.

Die vorhandene Einteilung der Gebäude in HORA in vier Hochwasserzonen ist für die Berechnung der Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve zu ungenau. Das Ausmaß eines Hochwassers wird in der Simulation als Wiederkehrhäufigkeit in Jahresschritten angegeben. Daher muss die Zonierung im Vergleich zu HORA feiner vorgenommen werden. Da es keine Information über die genaue Lage einzelner Objekte in den jeweiligen Zonen gibt, wird eine Gleichverteilung innerhalb der Zone angenommen. Sind z. B. in einer Gemeinde 60 Objekte in der 30-jährlichen Zone, so wird die HQ-30-Zone in 30 Zonen aufgeteilt und jeder Zone werden  $60/30=2$  Objekte zugewiesen. In der 100-jährlichen Zone wird ein Durchschnitt über 70 Zonen gebildet und in der 200-jährlichen Zone beruht der Durchschnittswert auf 100 Unterteilungen.

Zusätzlich erschwerend wirkt sich aus, dass für die auf Hochwasserzonen zugeteilten Objekte kein Verwendungszweck bekannt ist, d. h. über deren Nutzung als Wohngebäude, Lagerhalle oder in einer anderen Form gibt es in HORA keine Information. Da das potentielle Schadenausmaß stark von der Nutzung eines Objektes abhängt (Merz *et al.*, 2004), verbessern sich die Simulationsergebnisse stark durch den Einbau der Nutzungsstruktur in das Modell. Die Struktur der Gebäude in einer Gemeinde ist in der Gebäudezählung erfasst. Übersicht 2 enthält eine Zusammenfassung der Gebäudestatistik auf Bundesländerebene. Die privaten Wohnhäuser sind mit Abstand die wichtigste Gebäudekategorie, danach folgen gleichauf die Gebäudetypen aus dem Bereich der Privatwirtschaft. Im Gegensatz dazu gibt es vergleichsweise wenige Öffentliche Gebäude. Während sich die Verteilung im Bundesländervergleich kaum unterscheidet, treten auf Gemeindeebene deutliche Differenzen auf, die im Modell genutzt werden.

Das Simulationsmodell berücksichtigt nur Gebäude und nicht andere Schäden an der öffentlichen Infrastruktur wie etwa Straßen, Kanäle und Leitungen. Solche Infrastruktureinrichtungen müssten in einem weiteren Schritt integriert werden. Die dazu notwendigen Daten stehen dem WIFO zur Verfügung. Eine weitere Verbesserung der Simulationsergebnisse könnte durch die jährliche Ergänzung des Gebäudebestands um Neubauten bzw. Abrisse erzielt werden.

### **2.3 Das Modul zur Bestimmung der Schadenanfälligkeit**

Das Modul zur Bestimmung der Schadenanfälligkeit legt das erwartete Ausmaß der Schädigung eines Gebäudes in Abhängigkeit vom Ausmaß des Hochwassers fest. Eine

Übersicht 2: Zahl und Struktur der Gebäude in den Bundesländern 2001

	Private Haushalte	Öffentliche Infrastruktur	Dienstleistungssektor	Industrie und Gewerbe	Sonstige Gebäude	Insgesamt
	Zahl					
Burgenland	102.373	801	4.110	2.943	4.176	114.403
Kärnten	137.083	1.263	10.252	5.657	7.820	162.075
Niederösterreich	487.094	4.298	19.782	19.058	23.372	553.604
Oberösterreich	306.743	3.460	14.836	13.848	13.439	352.326
Salzburg	100.167	1.284	8.915	4.106	5.346	119.818
Steiermark	281.108	3.093	15.764	11.365	14.492	325.822
Tirol	133.252	1.955	13.240	5.645	7.169	161.261
Vorarlberg	77.078	852	4.580	3.063	3.663	89.236
Wien	139.557	2.236	9.658	6.126	10.590	168.167
Österreich	1.764.455	19.242	101.137	71.811	90.067	2.046.712
	Anteile in %					
Burgenland	89,5	0,7	3,6	2,6	3,7	100,0
Kärnten	84,6	0,8	6,3	3,5	4,8	100,0
Niederösterreich	88,0	0,8	3,6	3,4	4,2	100,0
Oberösterreich	87,1	1,0	4,2	3,9	3,8	100,0
Salzburg	83,6	1,1	7,4	3,4	4,5	100,0
Steiermark	86,3	0,9	4,8	3,5	4,4	100,0
Tirol	82,6	1,2	8,2	3,5	4,4	100,0
Vorarlberg	86,4	1,0	5,1	3,4	4,1	100,0
Wien	83,0	1,3	5,7	3,6	6,3	100,0
Österreich	86,2	0,9	4,9	3,5	4,4	100,0

Q: Gebäudezählung ST.AT.

Voraussetzung für die Feststellung eines Schadens an einem Gebäude ist, dass im Risikomodul ein Hochwasserereignis gezogen wurde, nur dann wird mit der Feststellung des Schadenausmaßes und der Bewertung fortgesetzt.

Im Hochwasserinformationssystem HORA gibt es nur eine grobe Einteilung der Gebäude in vier Hochwasserzonen. Für eine Einschätzung des Schadenausmaßes ist eine genauere Aufteilung der Gebäude auf 1-jährliche Zwischenzonen notwendig, die bereits im Gebäudemodul geschieht. Die betroffenen Gebäude in einer Gemeinde,  $nab_m$ , werden entsprechend der Wiederkehrhäufigkeit von Hochwasser in vier Zonen aufgeteilt:

- Gebäude in der Hochwasserabflusszone 30 ( $nab_{30_m}$ ),
- Gebäude in der Hochwasserabflusszone 100 ( $nab_{100_m}$ ),
- Gebäude in der Hochwasserabflusszone 200 ( $nab_{200_m}$ ) und
- Gebäude außerhalb der 200-jährlichen Hochwasserabflusszone ( $nab_{top_m}$ ).

Die Zahl der beschädigten Gebäude hängt vom Ausmaß des Hochwasserereignisses in einer Gemeinde ab. Dabei wird durch die Berücksichtigung der vier Hochwasserabflusszonen auch auf die Gefährdung der Gebäude Rücksicht genommen. Wenn das Hochwasser niedrig ist, bleiben die Gebäude der darüber liegenden Hochwasserzone unberührt. Bei einem Ereignis mit 200-jährlicher Wiederkehrhäufigkeit sind z. B. nur die Gebäude bis zu dieser Zone vom Hochwasser betroffen.

Zusätzlich entstehen unterschiedlich hohe Schadenwerte an Gebäuden, je nachdem, ob nur der Keller oder auch die Geschoße vom Hochwasser betroffen sind (Übersicht 3). Deshalb wird für kleine Hochwasserereignisse angenommen, dass es nur zu Kellerschäden kommt; das sind Ereignisse bis zu HQ100. Bei Ereignissen, die in den Bereich zwischen HQ100 und HQ200 fallen, treten in den Gebäuden der HQ30-Zone auch Schäden in den Geschoßen auf. Bei einem über 200-jährlichen Ereignis sind auch in den Gebäuden der HQ100 Schäden in den Geschoßen zu verzeichnen.

Danach erfolgt die Aufteilung der beschädigten Gebäude in jeder Zone entsprechend der Gebäudestruktur in der entsprechenden Gemeinde. Es gibt für jede Gemeinde und Hochwasserabflusszone fünf Gebäudetypen:

- Wohngebäude von privaten Haushalten,
- Gebäude der öffentlichen Infrastruktur,
- Gebäude des Dienstleistungssektors,
- Gebäude von Industrie und Gewerbe,
- Sonstige Gebäude (Nebengebäude und land- bzw. forstwirtschaftliche Gebäude).

Die genaue Verteilung der fünf Gebäudetypen über die Hochwasserabflusszonen innerhalb einer Gemeinde ist nicht bekannt. Daher erfolgt die Aufteilung der Gebäude in jeder

Übersicht 3: Durchschnittliche Reparaturkosten und Kosten für Inventarschäden nach Gebäudetyp

	Bei überflutetem		Durchschnitt je Schadenfall
	Keller	Erdgeschoß	
In € des Jahres 2005			
Teil A			
<b>Schadenwerte in Deutschland<sup>1)</sup></b>			
Private Haushalte	10.491	24.209	-
Öffentliche Infrastruktur	52.453	63.751	-
Dienstleistungssektor	29.858	58.909	-
Industrie und Gewerbe	13.719	59.716	-
Sonstige Gebäude	2.017	5.245	-
Teil B			
<b>Schadenwerte in Salzburg 2005<sup>2)</sup></b>			
Private Haushalte mit überflutetem Keller	-	-	14.566
Öffentliche Infrastruktur	-	-	3.613
Dienstleistungssektor	-	-	40.100
Industrie und Gewerbe	-	-	64.028
Nebengebäude und land- und forstwirt. Gebäude	-	-	22.330
Teil C			
<b>Schadenwerte in Österreich 2002<sup>3)</sup></b>			
Private Haushalte mit überflutetem Keller	-	-	20.921
Öffentliche Infrastruktur	-	-	189.429
Dienstleistungssektor	-	-	-
Industrie und Gewerbe	-	-	133.365
Nebengebäude und land- und forstwirt. Gebäude	-	-	7.919

Q: Merz et al. (2004), diverse Landesregierungen. Anmerkung: Die Berechnung der Schadenwerte auf Preisbasis 2005 beruht auf dem Preisindex für Baumeisterarbeiten von ST.AT. - 1) Der Wert für Nebengebäude und land- und forstwirt. Gebäude entspricht dem Durchschnitt aus den beiden Einzelwerten in Merz et al; sie beinhalten Gebäudeschäden und Schäden an festem und beweglichem Inventar. Sie wurden mit dem Wechselkurs des Jahres 1991 in Schilling und dann in Euro umgerechnet. - 2) Landesregierung Salzburg, einschließlich der Schäden aus Betriebsunterbrechungen. - 3) Landesregierungen Niederösterreich, Oberösterreich, Steiermark und Salzburg, einschließlich der Schäden aus Betriebsunterbrechungen.

Hochwasserabflusszone anhand des Anteils des jeweiligen Gebäudetyps im gesamten Gemeindegebiet; es wird also unterstellt, dass die Gebäudestruktur in allen Hochwasserabflusszonen einer Gemeinde gleichartig ist.

Wegen fehlender Information über die Schutzwirkung von Dammbauten werden zwei Szenarien simuliert. In einem Szenario sind alle Gebäude in den vier Hochwasserzonen von einem Extremereignis betroffen. Dieses Szenario bringt überhöhte Maximalwerte für den Gesamtschaden, weil die schadenmindernde Wirkung von Schutzbauten ignoriert wird. In Österreich schreiben die Vorschriften für Wasserschutzschutzbauten eine Sicherheit gegen 100-jährliche Ereignisse vor. Manche Schutzbauten überschreiten diesen Wert, andere Schutzbauten sind älter und wurden unter anderen Vorgaben erbaut. Einige Gebäude sind noch nicht durch Schutzbauten geschützt. Im zweiten Szenario wird daher angenommen, dass bei einem Hochwasser bis zu HQ100 alle Gebäude in den darunter liegenden Zonen unbetroffen bleiben, weil die Schutzbauten die Normwirkung entfalten und alle Gebäude ausreichend über Schutzbauten verfügen. Erst wenn das Ausmaß eines Hochwassers über einem 100-jährlichen Ereignis liegt, kommt es auch in den darunter liegenden Hochwasserabflusszonen zu einer Überschwemmung, weil die Schutzbauten dann unzureichend sind. Für beide Szenarien werden Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven simuliert.

## **2.4 Modul zur Ermittlung des Schadenwertes**

Die wichtigste Einflussgröße für die Höhe des Schadenwertes ist der Typ des geschädigten Gebäudes. Das Simulationsmodell unterscheidet zwischen fünf Gebäudetypen: Private Wohnhäuser, Öffentliche Gebäude, Gebäude im Dienstleistungssektor, Gebäude in Industrie und Gewerbe, sowie Sonstige Gebäude. Für diese Gebäudetypen präsentieren Merz *et al.* (2004) durchschnittliche Schadenwerte und die zugehörigen Standardabweichungen (Übersicht 3). Die niedrigsten Schäden treten in Sonstigen Gebäuden auf, während die höchsten Werte im Bereich der öffentlichen Infrastruktur zu verzeichnen sind. Die Schadenwerte von Merz *et al.* (2004) beinhalten Reparaturkosten für Schäden an Gebäuden und Kosten für den Ersatz von beweglichem und nicht beweglichem Inventar.

Die Werte für Deutschland können mit österreichischen Erfahrungswerten aus den Jahren 2002 und 2005 verglichen werden. Für das Jahr 2002 gibt es auf Gemeindeebene eine Zusammenfassung über die Schäden in den Bundesländern Niederösterreich, Oberösterreich, Salzburg und der Steiermark. Aus diesen Daten kann der durchschnittliche geschätzte Schadenwert je Schadenfall abgeleitet werden, der den Kompensationen aus dem Katastrophenfonds zugrunde lag (Übersicht 3 Teil C). Diesen Berechnungen liegen 40.370 gemeldete Schadenfälle zugrunde. Im Unterschied zu den deutschen Berechnungen enthalten die Werte für 2002 auch die Schadenwerte für Betriebsunterbrechungen, und in den Nebengebäuden bzw. land- und forstwirtschaftlich genutzten Gebäuden sind teilweise auch Schäden an Straßen und Wegen berücksichtigt. Im Unterschied zur sehr hoch

aggregierten Datenbasis des Jahres 2002 steht aus dem Jahr 2005 für Salzburg eine Vollerhebung der Schadenwerte für einzelne Schadenfälle mit einer kurzen Bezeichnung des Schadenfalles zur Verfügung. Dadurch ist eine trennschärfere Zuteilung auf die fünf in Deutschland ausgewerteten Gebäudetypen möglich. Die salzburgischen Schadenwerte liegen nahe an den deutschen Werten. Die Schadenwerte des Hochwassers 2002 liegen für die Öffentliche Infrastruktur und die Industrie- und Gewerbebauten deutlich darüber. Eine Erklärung dafür könnte die Kompensation von Betriebsunterbrechungen für Privatunternehmen in Österreich sein, die in Deutschland nicht berücksichtigt wurde. Eine weitere Erklärung für die hohen öffentlichen Infrastrukturschäden könnte in der Erfassung von Straßen, Brücken und anderen Infrastrukturobjekten in den österreichischen Daten sein.

Die Abhängigkeit des Schadens von der Höhe des Hochwassers ist in den deutschen Daten gut sichtbar (Teil A). Wenn in einem Objekt nur der Keller überflutet ist, ist der Schadenwert geringer, als wenn zusätzlich die Geschoße des Gebäudes vom Hochwasser betroffen sind. In den meisten Fällen sind die Schadenwerte bei einer Überflutung der Gebäudegeschoße etwa doppelt so hoch; im Bereich der Industrie und des Gewerbes betragen sie bei Geschoßschäden sogar mehr als das Vierfache. Wegen der Möglichkeit zur Trennung der Schadenwerte in leicht und schwer geschädigte Gebäude und weil auch die für die Simulation wichtige Standardabweichung der Schadenwerte zur Verfügung steht, werden in der Simulation die deutschen Schadenwerte aus Teil A in Übersicht 3 eingesetzt. In der Simulation wird der Schadenwert für jedes betroffene Gebäude einzeln aus einer Log-Normalverteilung mit den Erwartungswerten und der Varianz aus Merz *et al.* (2004) zufällig gezogen. Der gesamte Schadenwert wird dann als Summe über alle Gebäude ermittelt.



### **3. Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Österreich**

Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven sind eine Möglichkeit zur Darstellung und Nutzung der Ergebnisse eines Katastrophenmodells. Katastrophenmodelle dienen allgemein zur besseren Einschätzung von Katastrophenrisiken und zur Verbesserung des Risikomanagements. Innerhalb des Risikomanagements können die Ergebnisse unterschiedliche Maßnahmen in den Bereichen Schadenvorbeugung bzw. Weitergabe der Risiken durch Rückversicherung oder Katastrophenanleihen nahe legen. Am stärksten werden Katastrophenmodelle zurzeit von Direkt- und von Rückversicherungsunternehmen genutzt. Ein weiterer Einsatzbereich sind Hintergrundanalysen von Investmentbanken zur Emission von Katastrophenanleihen; in diesem Fall dienen sie zur besseren Einschätzung des Risikos und damit des erwarteten Ertrags.

Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve ist eine optische Darstellung der jährlichen Wahrscheinlichkeit mit der ein gegebenes Portfolio von Objekten ein vorgegebenes Schadenausmaß potentiell überschreitet. Der interessanteste Bereich der Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve ist der rechte Rand, in dem die größten zu erwartenden Schadenzahlungen liegen. Für Versicherungsunternehmen bieten Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven ein Mittel zur Einschätzung der Größe und der Wahrscheinlichkeit potentieller Verluste in ihrem Versicherungsportfolio. Für die Versicherung gegen Schäden aus Naturkatastrophen ist dieses Instrument besonders wichtig, weil durch die hohe Korrelation der Schäden innerhalb der betroffenen Region rasch Klumpenrisiken entstehen können. Eine damit verbundene Verwendung für Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven ist die Bestimmung der Insolvenzwahrscheinlichkeit eines Versicherungsunternehmens. Die Insolvenzwahrscheinlichkeit gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Schadenhöhe eintritt, die das Versicherungsunternehmen eigenständig nicht mehr tragen kann. Die Fähigkeit zur Übernahme von Risiken bestimmt wiederum die Entscheidung über das Ausmaß der Weitergabe eines Risikos an Rückversicherer bzw. an den Kapitalmarkt in Form von Katastrophenanleihen (Cummins, 2007).

#### **3.1 Ergebnisse für Österreich**

Die detaillierte Kenntnis der Gebäudestruktur aus der Gebäudezählung ermöglicht eine getrennte Berechnung von Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für die fünf im Katastrophenmodell eingeführten Gebäudetypen. Eine Zusammenfassung in Übergruppen erscheint für Privatgebäude, wirtschaftlich genutzte Gebäude und den Gesamtbestand an Gebäuden sinnvoll. Die Privatgebäude umfassen alle Gebäudetypen mit Ausnahme Öffentlicher Gebäude. Die wirtschaftlich genutzten Gebäude sind eine Untergruppe der Privatgebäude und schließen die für Wohnzwecke genutzten Gebäude aus. Für diese Übergruppen werden ebenfalls Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven berechnet.

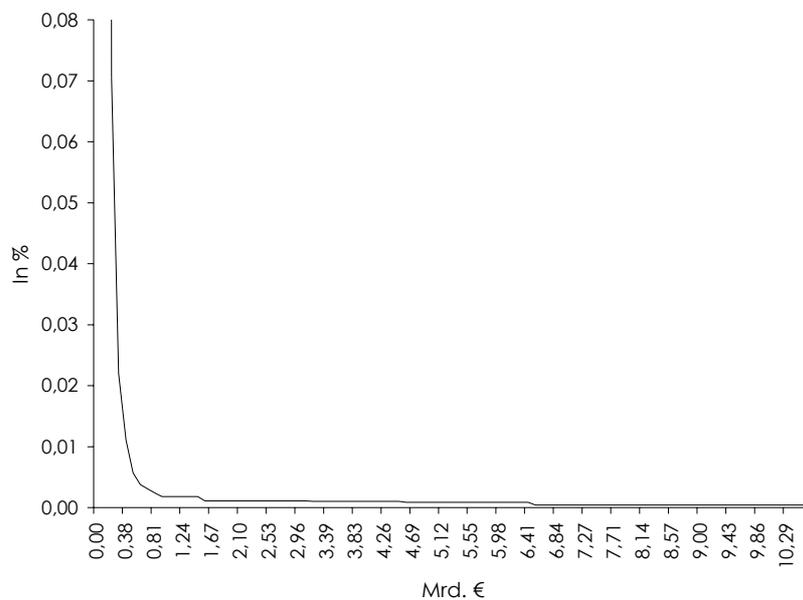
Die mit dem Simulationsmodell geschätzten Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Österreich geben einen ersten Eindruck über das mögliche Verlustpotential aus Hochwasserkatastrophen. Abbildungen 5 bis 12 zeigen die Kurven für die fünf Gebäudetypen aus Übersicht 3 und die drei Übergruppen jeweils für das Szenario mit (Teil A) und ohne Berücksichtigung (Teil B) der Wirksamkeit von Schutzbauten. Zur besseren Darstellung ist der Wert für die erste Klasse in jeder Abbildung abgeschnitten. Dadurch ist der Bereich mit kleinen Wahrscheinlichkeiten in den ersten Schadenklassen besser sichtbar. Die genauen Werte für die ersten 20 Schadenklassen und weitere vier Ereignisse (25, 50, 75 und 100) sind in den Übersichten 4 bis 11 ersichtlich.

Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven sind für alle Gebäudetypen stark abfallend, sodass große Kumulschäden nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auftreten. Abbildung 5 bzw. Übersicht 4 zeigen z. B., dass in Österreich ein Gesamtschaden von 162 Mio. € für private Gebäude nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,07% überschritten wird. Wenn man eine vollständige Wirksamkeit der Schutzbauten für alle Gebäude in der Hochwasserabflusszone HQ100 unterstellt, wird ein Gesamtschaden von 162 Mio. € nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,05% überschritten. Der in der wirtschaftspolitischen Diskussion öfter erwähnte Betrag von 300 Mio. € wird mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 0,015% überschritten. Die Auswirkung von Schutzbauten auf eine Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve ist aus dem Vergleich von Teil A und Teil B in Abbildung 5 gut ersichtlich. Schutzmaßnahmen verschieben die Kurve nach links unten, wobei das genaue Ausmaß in diesem Fall von der Lage der Gebäude in den Hochwasserabflusszonen bestimmt ist. Mit einer besseren Erfassung der Schutzbauten im Hochwasserinformationssystem könnte deren Wirksamkeit genauer dargestellt werden. Die höchsten simulierten Gesamtschäden für Wohngebäude von Privathaushalten gehen bis zu 10,6 Mrd. €. Dieser Wert tritt unter 1 Mio. Simulationen allerdings nur einmal auf und hat daher eine dementsprechend niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit. Gleichzeitig ist gerade dieser Wert mit einer großen Schwankungsbreite behaftet, weil praktisch nur ein Simulationsdurchgang mit einem derartig großen Schaden gezogen wurde.

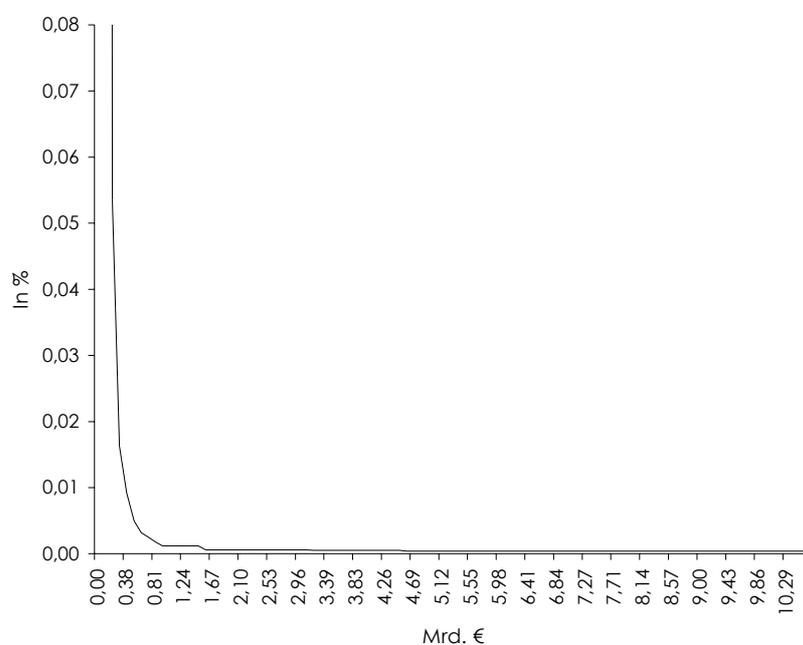
Die Gesamtschäden an anderen Gebäudetypen liegen weit unter den Werten für private Wohngebäude. Der Grund dafür ist die hohe Zahl von Wohngebäuden unter den Gebäudetypen (Übersicht 2). Die geringe Zahl der anders genutzten Gebäude wird nicht durch deren im Durchschnitt höheren Schadenwert überkompensiert. Die Auswirkung der außergewöhnlich großen Standardabweichung der erwarteten Schadenwerte für Öffentliche Gebäude (Übersicht 12) auf die Berechnung der Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven ist in den Abbildungen und Übersichten kaum erkennbar. Die erwarteten durchschnittlichen jährlichen Schäden sind in Übersicht 13 zusammengefasst. Für private Wohngebäude ist mit einem Wert von 300.000 € zu rechnen, falls Schutzbauten keine Wirkung entfalten. Unter der Annahme vollständig wirksamer Wasserschutzbauten innerhalb der HQ100 Zone sinkt der erwartete durchschnittliche jährliche Schadenwert auf 200.000 €.

Abbildung 5: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Gebäuden privater Haushalte in Österreich, 2005

Teil A: Ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten



Teil B: Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten innerhalb von HQ100



Anmerkung: Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells. Die Häufigkeit der Schäden in der niedrigsten Schadenklasse ist aus optischen Gründen mit 0,08% (8 in 10.000) abgeschnitten. Die tatsächlichen Werte sind in Übersicht 4 angegeben.

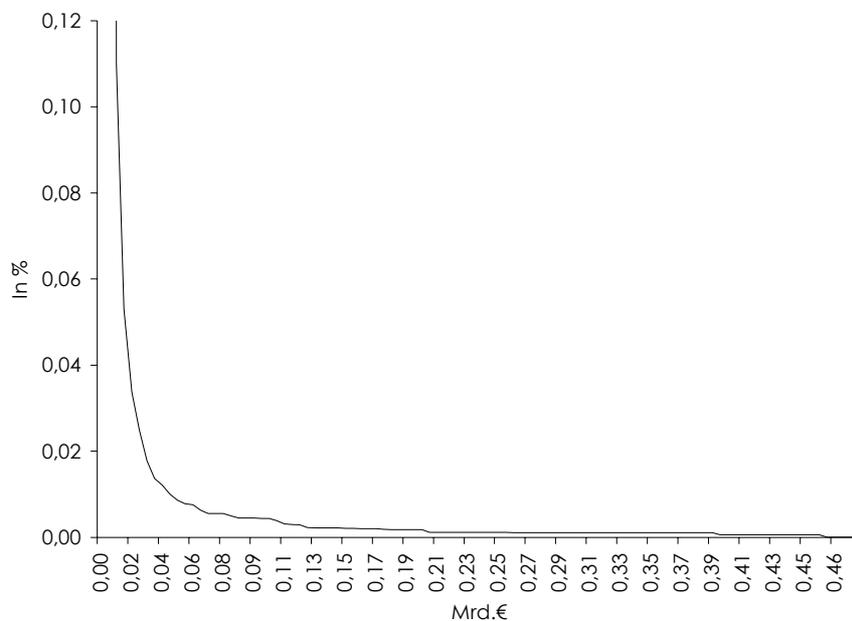
*Übersicht 4: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-  
kurven für Hochwasser in Österreich  
Gebäude privater Haushalte*

Ereignis	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten			
	ohne		mit	
	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurve	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurve
E <sub>i</sub>	Mrd. €	In %	Mrd. €	In %
1	0,000	79,0405	0,000	93,5933
2	0,000	29,8623	0,000	6,8761
3	0,162	0,0706	0,162	0,0535
4	0,269	0,0220	0,269	0,0163
5	0,377	0,0111	0,377	0,0092
6	0,485	0,0057	0,485	0,0050
7	0,593	0,0038	0,593	0,0032
8	0,701	0,0031	0,701	0,0025
9	0,808	0,0024	0,808	0,0018
10	0,916	0,0018	0,916	0,0012
11	1,024	0,0018	1,024	0,0012
12	1,132	0,0018	1,132	0,0012
13	1,239	0,0018	1,239	0,0012
14	1,347	0,0018	1,347	0,0012
15	1,455	0,0018	1,455	0,0012
16	1,563	0,0011	1,563	0,0006
17	1,670	0,0011	1,670	0,0006
18	1,778	0,0011	1,778	0,0006
19	1,886	0,0011	1,886	0,0006
20	1,994	0,0011	1,994	0,0006
25	2,533	0,0011	2,533	0,0006
50	5,227	0,0009	5,227	0,0004
75	7,921	0,0004	7,921	0,0004
100	10,616	0,0004	10,616	0,0004

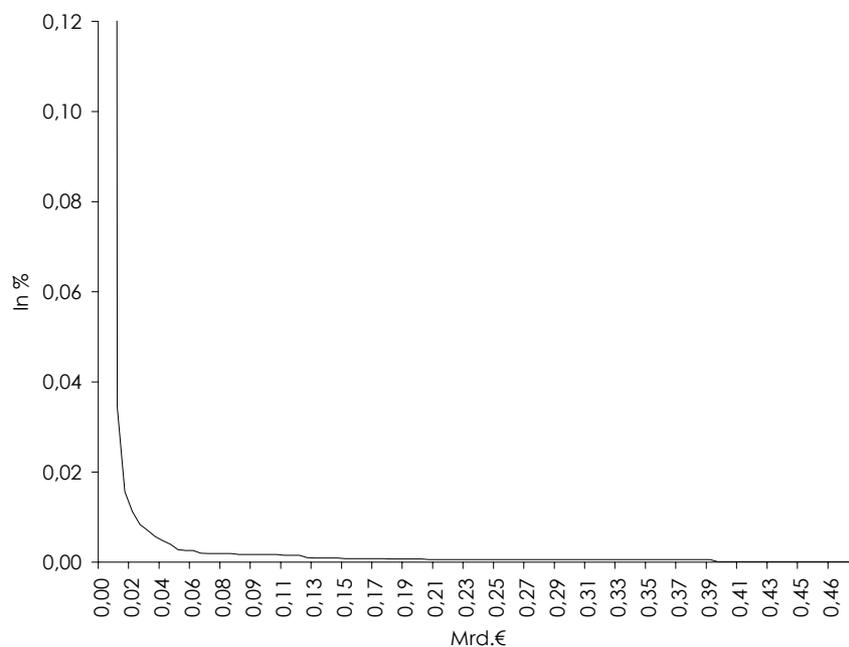
Anmerkung: Die Ereignisse, E<sub>i</sub>, sind Klassenmittelwerte des Histogramms.  
Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Abbildung 6: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an öffentlichen Gebäuden in Österreich, 2005

Teil A: Ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten



Teil B: Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten innerhalb von HQ100



Anmerkung: Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells. Die Häufigkeit der Schäden in der niedrigsten Schadenklasse ist aus optischen Gründen mit 0,12% (12 in 10.000) abgeschnitten. Die tatsächlichen Werte sind in Übersicht 5 angegeben.

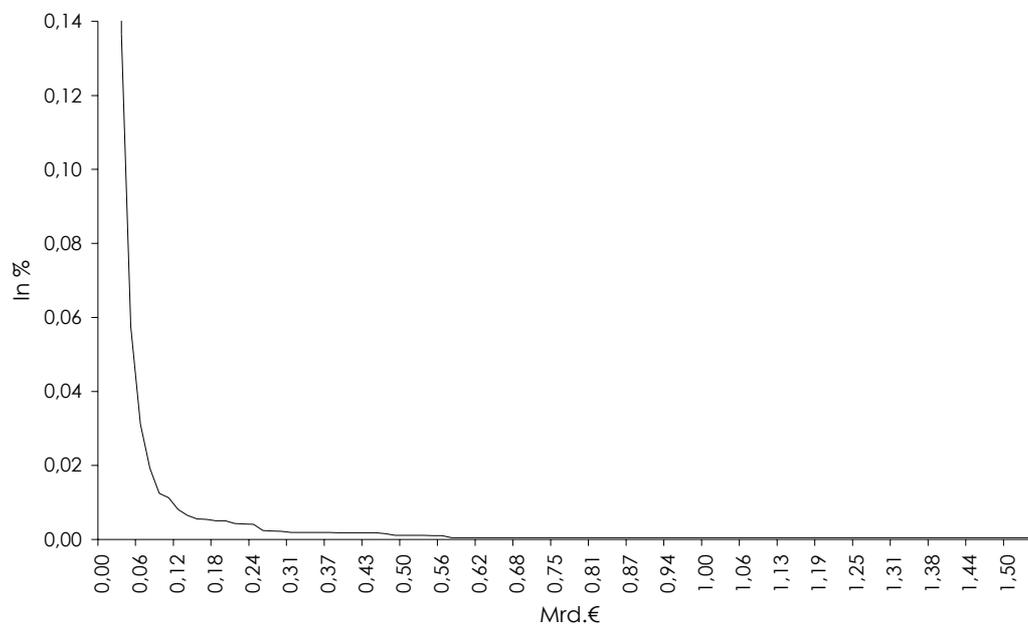
Übersicht 5: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-  
kurven für Hochwasser in Österreich  
Öffentliche Gebäude

Ereignis	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten			
	ohne		mit	
	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurve	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurve
$E_i$	Mrd. €	In %	Mrd. €	In %
1	0,000	87,6733	0,000	97,0421
2	0,000	14,3815	0,000	3,0499
3	0,007	0,1101	0,007	0,0345
4	0,012	0,0530	0,012	0,0157
5	0,017	0,0338	0,017	0,0112
6	0,022	0,0249	0,022	0,0084
7	0,027	0,0178	0,027	0,0071
8	0,032	0,0137	0,032	0,0057
9	0,037	0,0121	0,037	0,0048
10	0,041	0,0100	0,041	0,0040
11	0,046	0,0086	0,046	0,0028
12	0,051	0,0078	0,051	0,0026
13	0,056	0,0076	0,056	0,0026
14	0,061	0,0063	0,061	0,0020
15	0,066	0,0056	0,066	0,0019
16	0,071	0,0056	0,071	0,0019
17	0,075	0,0056	0,075	0,0019
18	0,080	0,0050	0,080	0,0019
19	0,085	0,0045	0,085	0,0017
20	0,090	0,0045	0,090	0,0017
25	0,114	0,0031	0,114	0,0015
50	0,236	0,0012	0,236	0,0006
75	0,358	0,0011	0,358	0,0006
100	0,479	0,0001	0,479	0,0001

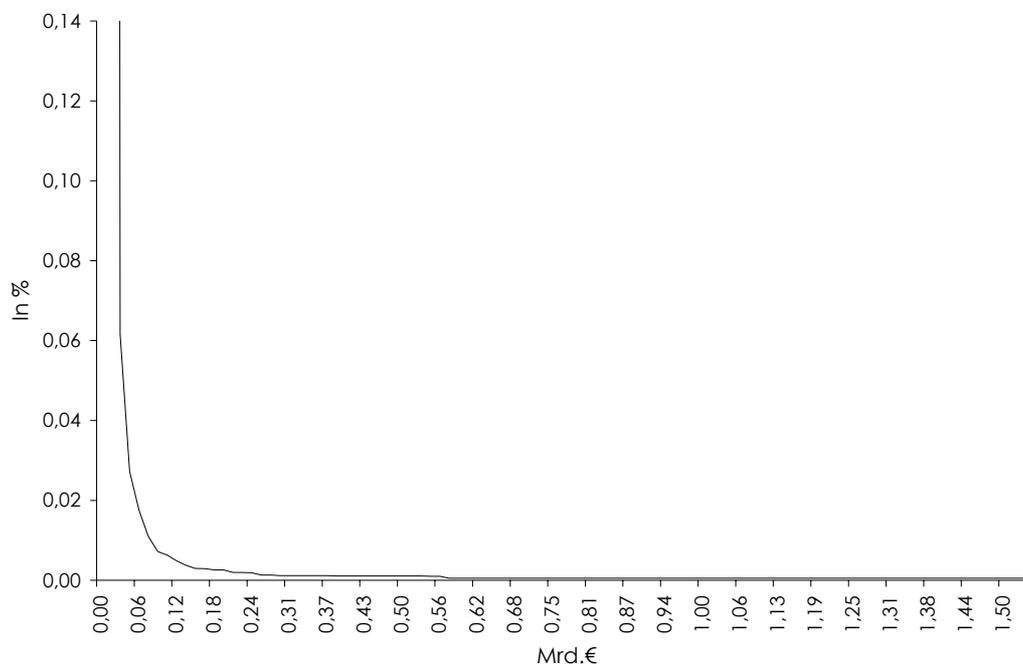
Anmerkung: Die Ereignisse,  $E_i$ , sind Klassenmittelwerte des Histogramms.  
Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Abbildung 7: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Gebäuden des Dienstleistungssektors in Österreich, 2005

Teil A: Ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten



Teil B: Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten innerhalb von HQ100



Anmerkung: Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells. Die Häufigkeit der Schäden in der niedrigsten Schadenklasse ist aus optischen Gründen mit 0,14% (14 in 10.000) abgeschnitten. Die tatsächlichen Werte sind in Übersicht 6 angegeben.

### Übersicht 6: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich

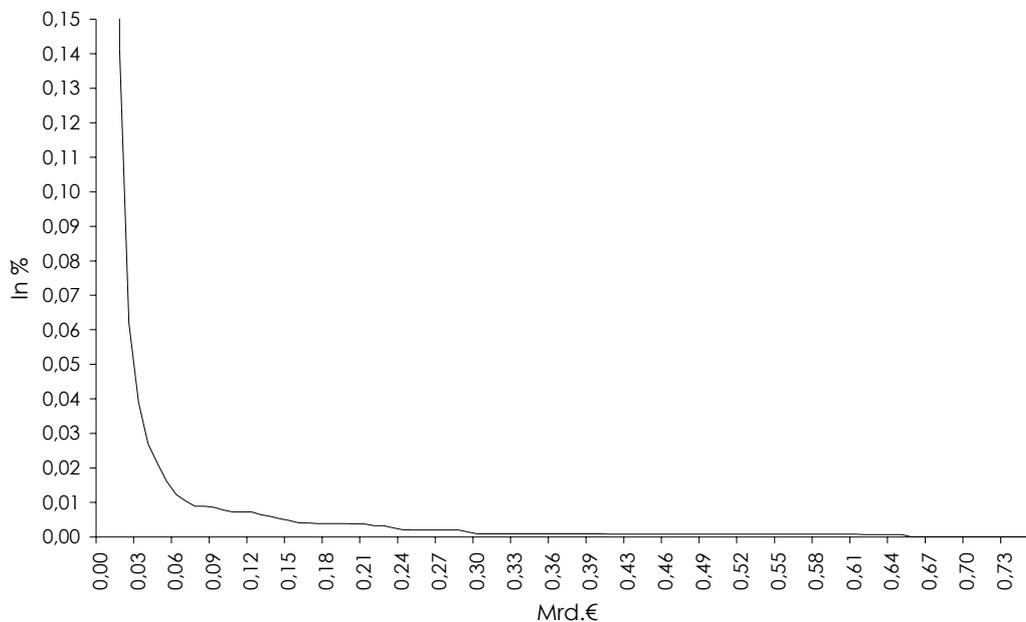
Gebäude des Dienstleistungssektors

Ereignis	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten			
	ohne	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve	mit	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve
	Schaden		Schaden	
	Mrd. €	In %	Mrd. €	In %
E <sub>i</sub>				
1	0,000	81,5018	0,000	94,9819
2	0,000	24,4521	0,000	5,2955
3	0,024	0,1364	0,024	0,0616
4	0,039	0,0576	0,039	0,0273
5	0,055	0,0312	0,055	0,0176
6	0,071	0,0192	0,071	0,0110
7	0,087	0,0125	0,087	0,0072
8	0,102	0,0113	0,102	0,0063
9	0,118	0,0081	0,118	0,0049
10	0,134	0,0065	0,134	0,0038
11	0,150	0,0056	0,150	0,0030
12	0,165	0,0054	0,165	0,0029
13	0,181	0,0050	0,181	0,0026
14	0,197	0,0050	0,197	0,0026
15	0,212	0,0043	0,212	0,0020
16	0,228	0,0042	0,228	0,0020
17	0,244	0,0041	0,244	0,0019
18	0,260	0,0024	0,260	0,0013
19	0,275	0,0023	0,275	0,0013
20	0,291	0,0022	0,291	0,0012
25	0,370	0,0019	0,370	0,0012
50	0,763	0,0005	0,763	0,0005
75	1,157	0,0005	1,157	0,0005
100	1,550	0,0005	1,550	0,0005

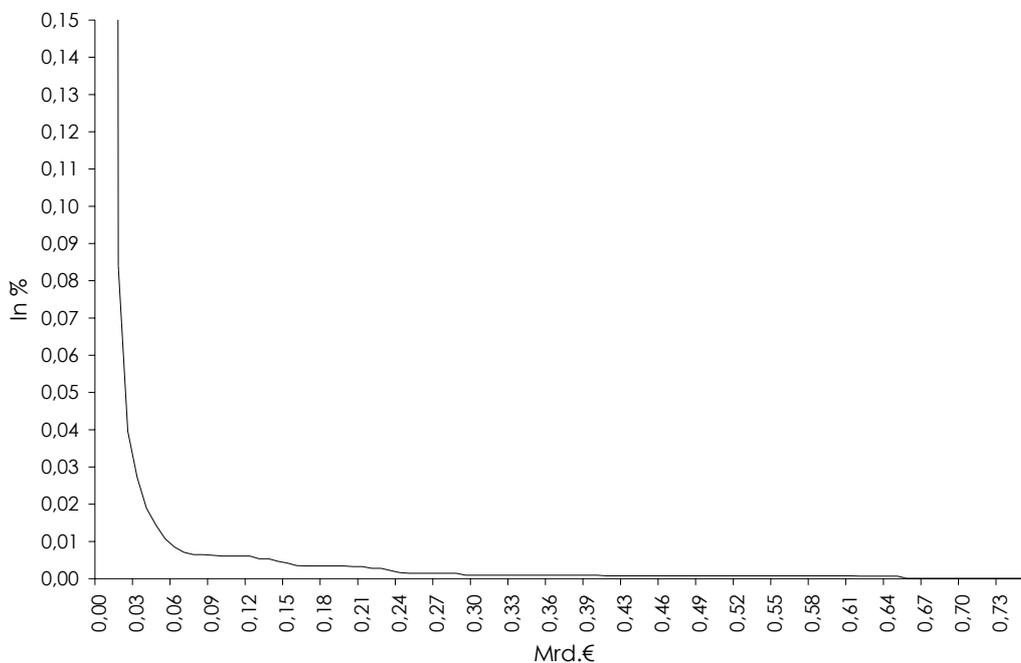
Anmerkung: Die Ereignisse, E<sub>i</sub>, sind Klassenmittelwerte des Histogramms. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Abbildung 8: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Gebäuden des Industrie- bzw. Gewerbesektors in Österreich, 2005

Teil A: Ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten



Teil B: Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten innerhalb von HQ100



Anmerkung: Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells. Die Häufigkeit der Schäden in der niedrigsten Schadenklasse ist aus optischen Gründen mit 0,15% (15 in 10.000) abgeschnitten. Die tatsächlichen Werte sind in Übersicht 7 angegeben.

### Übersicht 7: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich

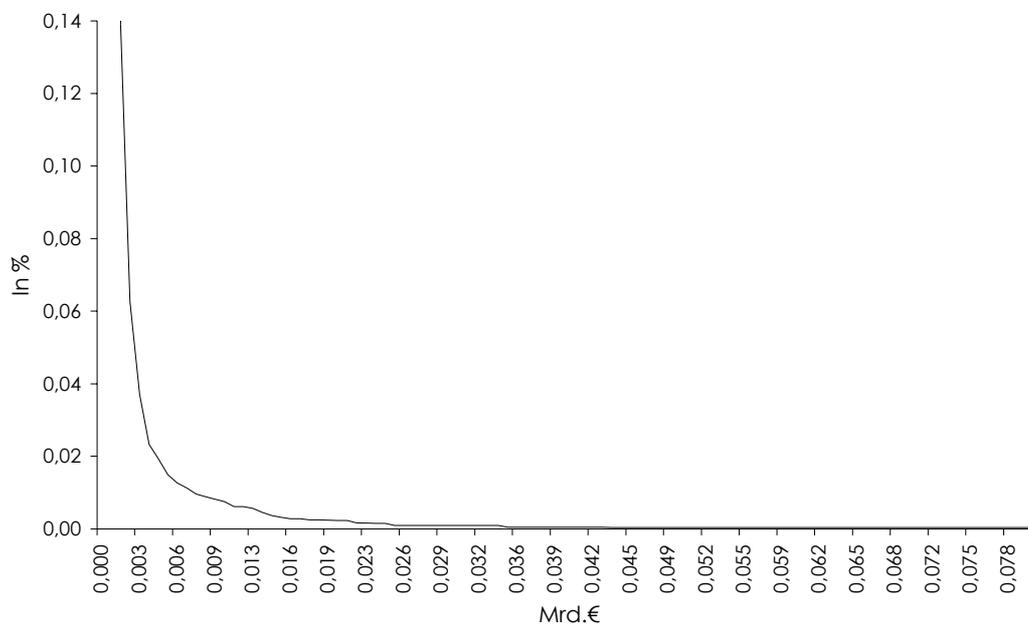
Gebäude des Industrie- bzw. Gewerbesektors

Ereignis	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten			
	ohne		mit	
	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve
E <sub>i</sub>	Mrd. €	ln %	Mrd. €	ln %
1	0,000	82,4656	0,000	95,2636
2	0,000	22,6317	0,000	4,9806
3	0,011	0,1413	0,011	0,0840
4	0,019	0,0619	0,019	0,0396
5	0,027	0,0390	0,027	0,0273
6	0,034	0,0270	0,034	0,0189
7	0,042	0,0214	0,042	0,0144
8	0,050	0,0161	0,050	0,0107
9	0,057	0,0123	0,057	0,0085
10	0,065	0,0104	0,065	0,0071
11	0,073	0,0089	0,073	0,0065
12	0,080	0,0089	0,080	0,0065
13	0,088	0,0086	0,088	0,0063
14	0,096	0,0078	0,096	0,0061
15	0,103	0,0072	0,103	0,0061
16	0,111	0,0072	0,111	0,0061
17	0,119	0,0072	0,119	0,0061
18	0,126	0,0065	0,126	0,0054
19	0,134	0,0060	0,134	0,0054
20	0,142	0,0053	0,142	0,0047
25	0,180	0,0039	0,180	0,0034
50	0,372	0,0009	0,372	0,0009
75	0,563	0,0008	0,563	0,0008
100	0,755	0,0001	0,755	0,0001

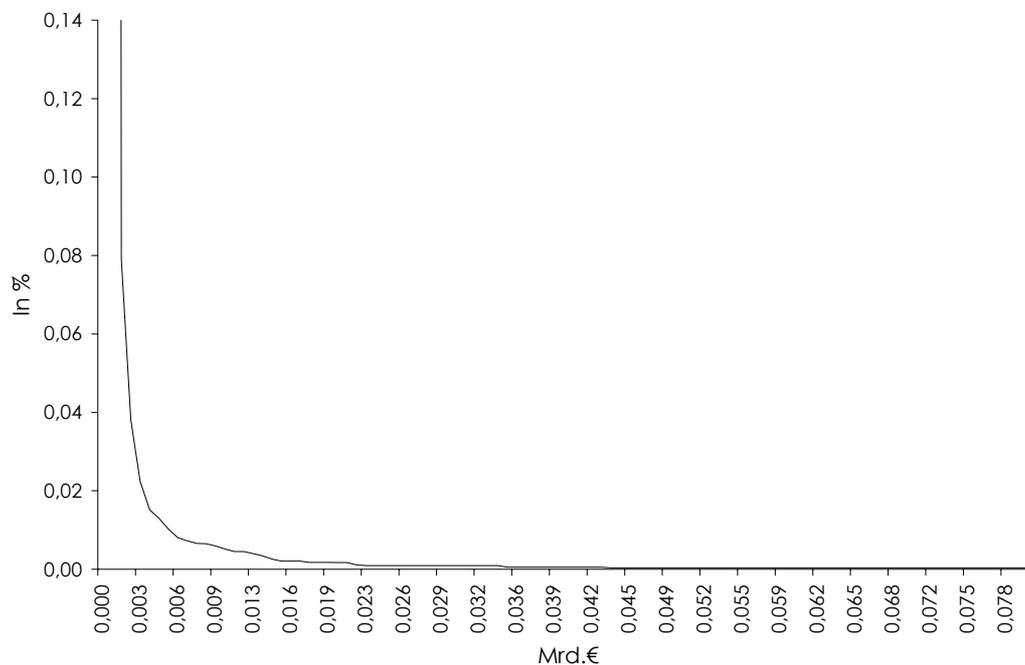
Anmerkung: Die Ereignisse, E<sub>i</sub>, sind Klassenmittelwerte des Histogramms. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Abbildung 9: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Sonstigen Gebäuden in Österreich, 2005

Teil A: Ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten



Teil B: Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten innerhalb von HQ100



Anmerkung: Sonstige Gebäude umfassen Nebengebäude bzw. land- und forstwirtschaftliche Gebäude. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells. Die Häufigkeit der Schäden in der niedrigsten Schadenklasse ist aus optischen Gründen mit 0,14% (14 in 10.000) abgeschnitten. Die tatsächlichen Werte sind in Übersicht 8 angegeben.

Übersicht 8: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich

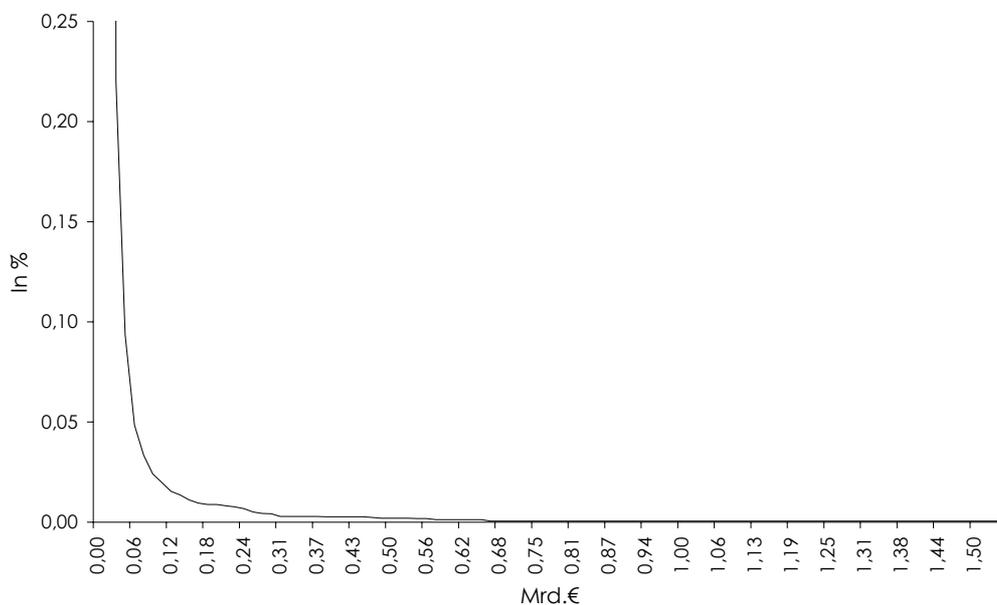
Sonstige Gebäude

Ereignis	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten			
	ohne		mit	
	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve
$E_i$	Mrd. €	In %	Mrd. €	In %
1	0,000	83,7924	0,000	95,6414
2	0,000	20,3102	0,000	4,5634
3	0,001	0,1389	0,001	0,0791
4	0,002	0,0627	0,002	0,0381
5	0,003	0,0371	0,003	0,0224
6	0,004	0,0233	0,004	0,0152
7	0,005	0,0193	0,005	0,0130
8	0,005	0,0149	0,005	0,0102
9	0,006	0,0127	0,006	0,0081
10	0,007	0,0113	0,007	0,0073
11	0,008	0,0096	0,008	0,0066
12	0,009	0,0089	0,009	0,0065
13	0,009	0,0082	0,009	0,0059
14	0,010	0,0075	0,010	0,0052
15	0,011	0,0062	0,011	0,0045
16	0,012	0,0062	0,012	0,0045
17	0,013	0,0057	0,013	0,0040
18	0,014	0,0046	0,014	0,0034
19	0,014	0,0037	0,014	0,0026
20	0,015	0,0032	0,015	0,0021
25	0,019	0,0024	0,019	0,0018
50	0,040	0,0005	0,040	0,0005
75	0,060	0,0004	0,060	0,0004
100	0,081	0,0004	0,081	0,0004

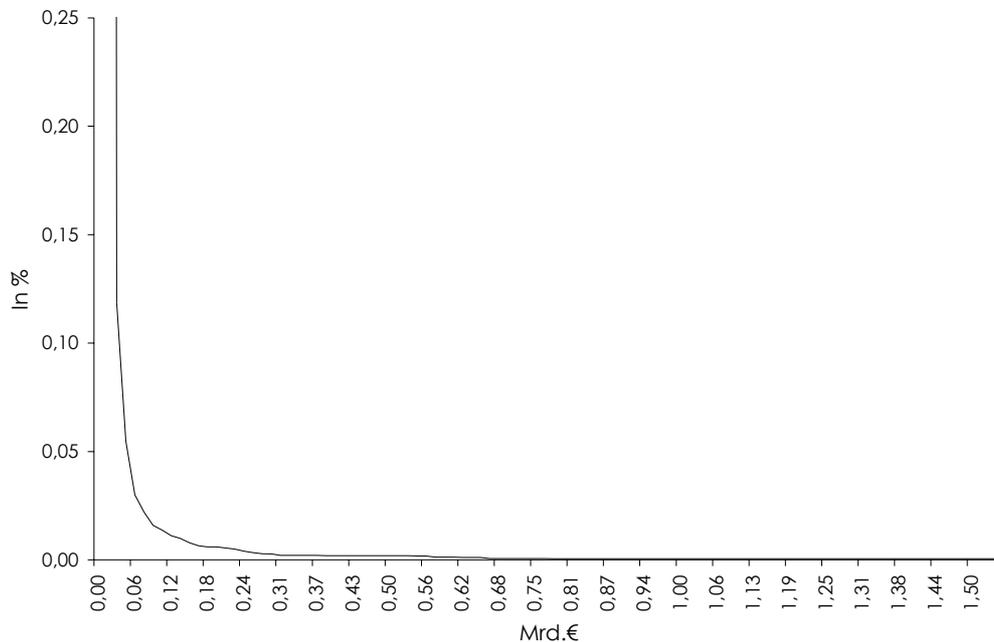
Anmerkung: Die Ereignisse,  $E_i$ , sind Klassenmittelwerte des Histogramms. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Abbildung 10: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an wirtschaftlich genutzten Gebäuden in Österreich, 2005

Teil A: Ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten



Teil B: Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten innerhalb von HQ100



Anmerkung: Gebäude von Dienstleistungsunternehmen, Unternehmen des industriellen und gewerblichen Bereichs und Sonstige Gebäude. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells. Die Häufigkeit der Schäden in der niedrigsten Schadenklasse ist aus optischen Gründen mit 0,25% (25 in 10.000) abgeschnitten. Die tatsächlichen Werte sind in Übersicht 9 angegeben.

## Übersicht 9: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs- kurven für Hochwasser in Österreich

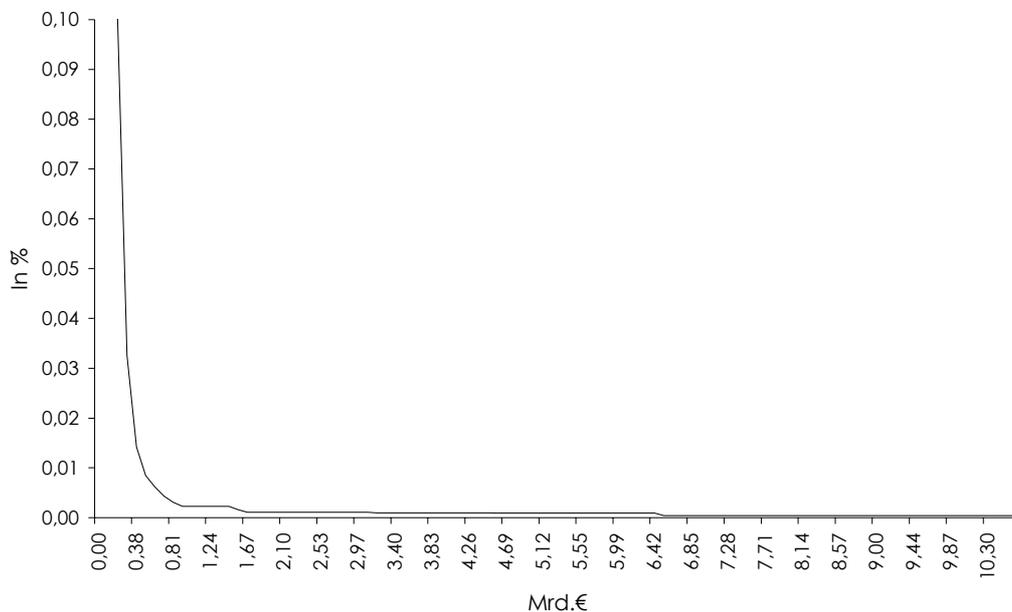
Wirtschaftlich genutzte Gebäude

Ereignis	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten			
	ohne		mit	
	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurve	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurve
E <sub>i</sub>	Mrd. €	In %	Mrd. €	In %
1	0,000	81,3197	0,000	94,8625
2	0,000	24,7799	0,000	5,4259
3	0,024	0,2199	0,024	0,1188
4	0,039	0,0936	0,039	0,0547
5	0,055	0,0485	0,055	0,0300
6	0,071	0,0335	0,071	0,0220
7	0,087	0,0241	0,087	0,0160
8	0,102	0,0198	0,102	0,0137
9	0,118	0,0154	0,118	0,0111
10	0,134	0,0136	0,134	0,0098
11	0,150	0,0111	0,150	0,0079
12	0,165	0,0096	0,165	0,0065
13	0,181	0,0089	0,181	0,0060
14	0,197	0,0089	0,197	0,0060
15	0,213	0,0082	0,213	0,0054
16	0,228	0,0076	0,228	0,0049
17	0,244	0,0067	0,244	0,0040
18	0,260	0,0050	0,260	0,0034
19	0,276	0,0043	0,276	0,0028
20	0,291	0,0042	0,291	0,0027
25	0,370	0,0028	0,370	0,0021
50	0,764	0,0006	0,764	0,0006
75	1,157	0,0005	1,157	0,0005
100	1,551	0,0005	1,551	0,0005

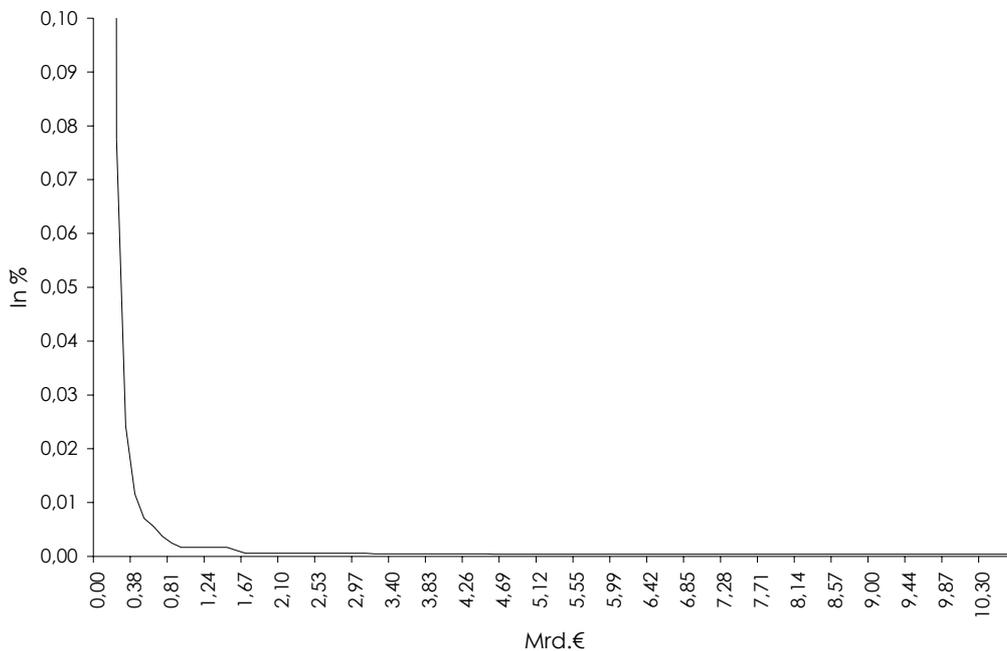
Anmerkung: Gebäude von Dienstleistungsunternehmen, Unternehmen des industriellen und gewerblichen Bereichs und Sonstige Gebäude. Die Ereignisse, E<sub>i</sub>, sind Klassenmittelwerte des Histogramms. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Abbildung 11: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Privatgebäuden in Österreich, 2005

Teil A: Ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten



Teil B: Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten innerhalb von HQ100



Anmerkung: Gebäude von Privaten Haushalten, Unternehmen des industriellen und gewerblichen Bereichs, Dienstleistungsunternehmen und Sonstige Gebäude. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells. Die Häufigkeit der Schäden in der niedrigsten Schadenklasse ist aus optischen Gründen mit 0,1% (10 in 10.000) abgeschnitten. Die tatsächlichen Werte sind in Übersicht 10 angegeben.

## Übersicht 10: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven für Hochwasser in Österreich

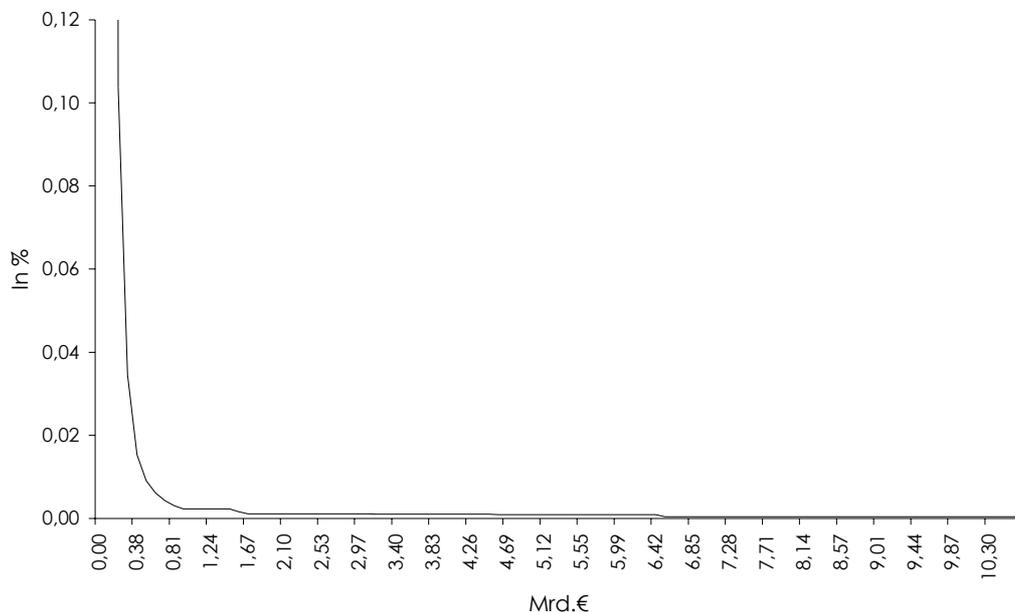
Gebäude im Privatbesitz

Ereignis	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten			
	ohne		mit	
	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve
$E_i$	Mrd. €	ln %	Mrd. €	ln %
1	0,000	79,0379	0,000	93,5932
2	0,000	29,8537	0,000	6,8745
3	0,162	0,0998	0,162	0,0775
4	0,270	0,0326	0,270	0,0242
5	0,377	0,0142	0,377	0,0116
6	0,485	0,0085	0,485	0,0071
7	0,593	0,0062	0,593	0,0056
8	0,701	0,0043	0,701	0,0037
9	0,809	0,0031	0,809	0,0025
10	0,917	0,0023	0,917	0,0017
11	1,024	0,0023	1,024	0,0017
12	1,132	0,0023	1,132	0,0017
13	1,240	0,0023	1,240	0,0017
14	1,348	0,0023	1,348	0,0017
15	1,456	0,0023	1,456	0,0017
16	1,564	0,0016	1,564	0,0011
17	1,672	0,0011	1,672	0,0006
18	1,779	0,0011	1,779	0,0006
19	1,887	0,0011	1,887	0,0006
20	1,995	0,0011	1,995	0,0006
25	2,534	0,0011	2,534	0,0006
50	5,230	0,0009	5,230	0,0004
75	7,926	0,0004	7,926	0,0004
100	10,622	0,0004	10,622	0,0004

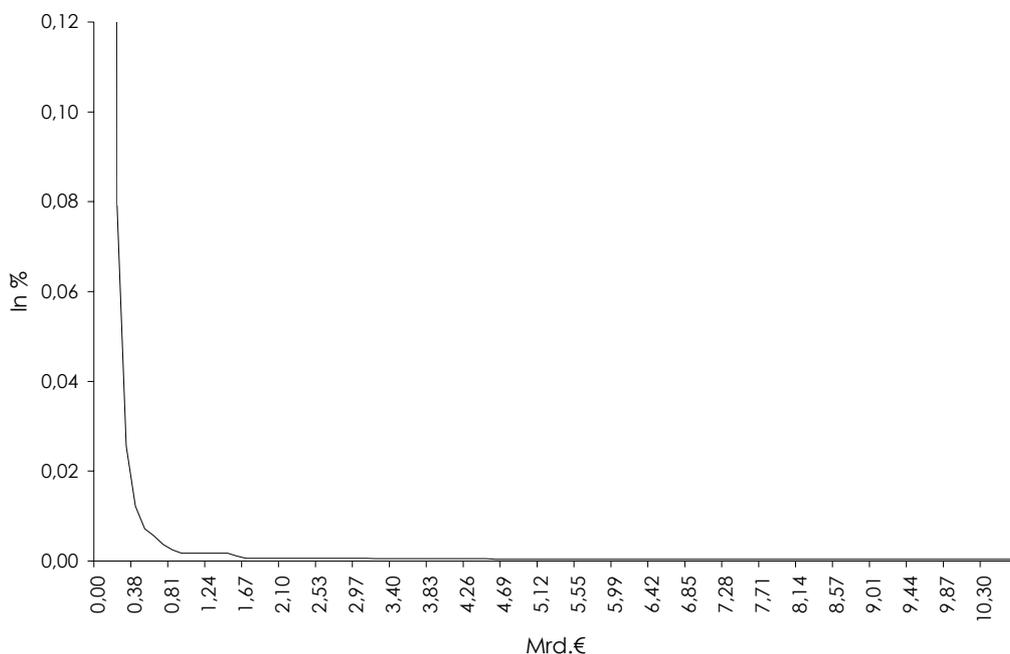
Anmerkung: Gebäude von Privaten Haushalten, Unternehmen des industriellen und gewerblichen Bereichs, Dienstleistungsunternehmen und Sonstige Gebäude. Die Ereignisse,  $E_i$ , sind Klassenmittelwerte des Histogramms. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Abbildung 12: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve für Hochwasserschäden an Gebäuden insgesamt in Österreich, 2005

Teil A: Ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten



Teil B: Unter Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten innerhalb von HQ100



Anmerkung: Gebäude von privaten Haushalten, der öffentlichen Hand, Unternehmen des industriellen und gewerblichen Bereichs und Sonstige Gebäude. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells. Die Häufigkeit der Schäden in der niedrigsten Schadenklasse ist aus optischen Gründen mit 0,12% (12 in 10.000) abgeschnitten. Die tatsächlichen Werte sind in Übersicht 11 angegeben.

## Übersicht 11: Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurven für Hochwasser in Österreich

Gebäude insgesamt

Ereignis $E_i$	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten			
	ohne		mit	
	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurve	Schaden	Wahrscheinlichkeits-Überschreitungs-kurve
	Mrd. €	In %	Mrd. €	In %
1	0,000	79,0375	0,000	93,5931
2	0,000	29,8525	0,000	6,8744
3	0,162	0,1038	0,162	0,0793
4	0,270	0,0346	0,270	0,0256
5	0,377	0,0153	0,377	0,0122
6	0,485	0,0091	0,485	0,0072
7	0,593	0,0062	0,593	0,0056
8	0,701	0,0043	0,701	0,0037
9	0,809	0,0031	0,809	0,0025
10	0,917	0,0023	0,917	0,0017
11	1,025	0,0023	1,025	0,0017
12	1,132	0,0023	1,132	0,0017
13	1,240	0,0023	1,240	0,0017
14	1,348	0,0023	1,348	0,0017
15	1,456	0,0023	1,456	0,0017
16	1,564	0,0016	1,564	0,0011
17	1,672	0,0011	1,672	0,0006
18	1,779	0,0011	1,779	0,0006
19	1,887	0,0011	1,887	0,0006
20	1,995	0,0011	1,995	0,0006
25	2,534	0,0011	2,534	0,0006
50	5,231	0,0009	5,231	0,0004
75	7,927	0,0004	7,927	0,0004
100	10,623	0,0004	10,623	0,0004

Anmerkung: Gebäude von privaten Haushalten, der öffentlichen Hand, Unternehmen des industriellen und gewerblichen Bereichs und Sonstige Gebäude. Die Ereignisse,  $E_i$ , sind Klassenmittelwerte des Histogramms. Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

*Übersicht 12: Durchschnittliche Reparaturkosten und Kosten für Inventarschäden nach Gebäudetyp in Euro des Jahres 2005*  
Schadenwerte in Deutschland

	Bei Überflutetem			
	Keller		Erdgeschoß	
	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
	In € des Jahres 2005			
Private Haushalte	10.491	1.626.047	24.209	3.607.162
Öffentliche Infrastruktur	52.453	8.497.409	63.751	18.742.719
Dienstleistungssektor	29.858	7.942.213	58.909	12.253.054
Industrie und Gewerbe	13.719	1.879.436	59.716	24.961.241
Sonstige	2.017	219.900	5.245	1.041.397

Quelle: Merz et al. (2004). - Die Werte beinhalten Gebäudeschäden und Schäden an festem und beweglichem Inventar. Sie wurden mit dem Wechselkurs des Jahres 1991 in Schilling und dann in Euro umgerechnet. Die Berechnung der Schadenwerte auf Preisbasis 2005 beruht auf dem Preisindex für Baumeisterarbeiten von ST.AT.

*Übersicht 13: Erwarteter durchschnittlicher jährlicher Schaden aus Hochwasser in Österreich*

Gebäudetyp	Berücksichtigung der Wirksamkeit von Wasserschutzbauten	
	ohne	mit
	Mio. €	
Private Haushalte	0,301	0,194
Öffentliche Infrastruktur	0,026	0,009
Dienstleistungssektor	0,077	0,039
Industrie und Gewerbe	0,047	0,031
Sonstige	0,005	0,003
Wirtschaftlich genutzte Gebäude	0,129	0,075
Private Gebäude insgesamt	0,399	0,260
Gebäude insgesamt	0,413	0,266

Anmerkung: Beruht auf 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells.

Ein Vergleich der Hochwasserschäden der Jahre 2002 und 2005 mit den Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven ist interessant, obwohl die tatsächlich verzeichneten Hochwasserschäden auch Flurschäden und Schäden aus Betriebsunterbrechungen beinhalten. Eine genaue Trennung der Gebäude- und Inventarschäden von den Gesamtschäden steht leider nicht zur Verfügung. Ein Gesamtschaden von mindestens 2,9 Mrd. € an Gebäuden tritt im Szenario ohne Wirksamkeit der Schutzbauten mit 0,0011% Wahrscheinlichkeit ein (Abbildung 12); unter Berücksichtigung von Schutzbauten etwas seltener mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,0006%. Wenn der Schadenwert des Hochwassers 2002 ausschließlich durch Gebäude- und Inventarschäden verursacht worden wäre, würde das Hochwasser anhand von Abbildung 12 als ein Ereignis eingeschätzt, das einmal in 90.000 bis 170.000 Jahren auftritt. Die Werte des Jahres 2005 würden einem Ereignis zugeordnet werden, das einmal in 16.000 bis 18.000 Jahren stattfindet (Übersicht 11). Unter Ausschluss öffentlicher Schäden betrug die Schadenssumme 2002 1,2 Mrd. €. Wenn alle privaten Schäden im Jahr 2002 durch Gebäude- und Inventarschäden verursacht worden wären, müsste man das Hochwasser als ein 400- bis 600-jährliches Ereignis einstufen (Abbildung 11 und Übersicht 10). Das Hochwasser des Jahres 2005 erzeugte einen Schadenwert an Privateigentum von 225 Mio. € und kann mit Hilfe von Abbildung 11 und Übersicht 10 damit als ein 15- bis 20-jährliches Ereignis gelten. Alle angeführten Werte beziehen sich auf ganz Österreich, d. h. einer bestimmten Gemeinde können weitaus größere Jährlichkeiten zugeteilt werden. Wenn das Hochwasser jedoch lokal begrenzt ist, wird ein solches Ereignis im Durchschnitt über das gesamte Bundesgebiet nicht als ein besonders seltenes Ereignis gewertet. Der Schadenwert eines lokalen Ereignisses bleibt auf Bundesniveau klein und fällt daher nicht aus dem Rahmen des Gewöhnlichen.



#### 4. Schlussfolgerungen

Die hier berechneten Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven dienen als eine erste und mit einigen Schwächen behaftete Grundlage zur Einschätzung des Rückversicherungsbedarfs einer Pflichtversicherung gegen Hochwasserschäden für Wohngebäude privater Haushalte in Österreich. Auf Grundlage von 1 Mio. Simulationen des Katastrophenmodells für Hochwasser kann die jährliche Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der ein Gesamtschaden an privaten Wohngebäuden einen vorgegebenen Wert potentiell überschreitet. Da für Österreich die genaue Wirkung von Schutzbauten flächendeckend nicht bekannt ist, müssen vereinfachend Simulationen unter zwei Szenarien gerechnet werden. Das erste Szenario unterstellt keine schadendämpfende Wirkung von Schutzbauten, und das zweite Szenario unterstellt eine vollständige schadenmindernde Wirkung für alle Gebäude innerhalb der Hochwasserabflusszone HQ100. Diese beiden Szenarien decken Extremvorstellungen ab, zwischen denen sich die tatsächliche Situation bewegt. Sie sind aber in den Berechnungen nur für Hochwasser mit bis zu einer 100-jährlichen Wiederkehrhäufigkeit relevant, weil größere Katastrophen annahmegemäß auch die geschützten Flächen überfluten. Für private Wohngebäude wird ein Gesamtschadenvolumen von 100 Mio. € in 1 von 1.000 Fällen (0,1%) überschritten; umgekehrt ausgedrückt bleibt der Gesamtschaden an privaten Wohngebäuden in 999 von 1.000 Fällen (99,9%) unter dem Wert von 100 Mio. €. Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven erlauben auch die Berechnung der Grenzwerte für ein Sicherheitsniveau von 1 in 10.000 Fällen. In diesem Fall würde für private Wohngebäude ein Gesamtschaden von 400 Mio. € (0,01%) überschritten werden. Darüber liegende Schäden können durchaus auftreten, die dazu gehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten sind jedoch gering. Die in dieser Arbeit vorgestellten Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven umfassen auch potentielle Schäden an anderen Gebäuden, wie etwa Öffentlichen Gebäuden, Gebäuden des Dienstleistungs-, Industrie- und Gewerbesektors, sowie Sonstigen Gebäuden.

Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven sind nur ein Instrument in einem umfassenden Risikomanagementsystem gegen Naturgefahren. Sie sind für die Prämienkalkulation und für die Entscheidung über den Eigenbehalt von Risiken wichtig, weil sie für genau definierte Risiken die Wahrscheinlichkeit zeigen, mit denen ein gewisser Schadenwert überschritten wird. Für Naturkatastrophen sind sie besonders gut geeignet, weil sie die gleichzeitige Häufung von Schadenfällen berücksichtigen. Wahrscheinlichkeits-Überschreitungsfunktionen sollten jedoch nicht unabhängig von anderen Elementen des Risikomanagementsystems für Naturkatastrophen analysiert werden, weil in den drei Phasen einer Naturkatastrophe verschiedene Instrumente und Institutionen zum Einsatz gelangen, die gegenseitige Wechselwirkungen entfalten und die dadurch das Schadenausmaß beeinflussen. Richtig gestaltete Versicherungsinstrumente verstärken z. B. die Anreize für Privathaushalte und Unternehmen zur Ergreifung von Vorsorgemaßnahmen; sie dämpfen damit das

Gesamtschadenvolumen und die Wahrscheinlichkeit von Extremschäden. Eine gut organisierte Kooperation zwischen Versicherungswirtschaft und öffentlicher Hand ermöglicht verbesserte Entscheidungen über Investitionen in öffentliche Schutzbauten, weil die Versicherungswirtschaft wesentlich besser über die genaue geographische Verteilung der gefährdeten Sachwerte informiert ist als die öffentliche Hand. Die Umlenkung öffentlicher Investitionen zum Schutz der am stärksten gefährdeten Werte optimiert auch den öffentlichen Mitteleinsatz gegenüber den bisher überwiegend länderspezifischen Entscheidungsverfahren.

Das hier vorgestellte Modell kann sicher nur als ein erster Schritt zur Berechnung von Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurven bewertet werden, weil die meisten Module des Modells den Zustand in Österreich zu grob und vereinfachend beschreiben. Die genaue Wirkung von Schutzbauten, eine feinere Struktur der Hochwasserabflusszonen, eine verbesserte Datenbasis zur Schätzung der durchschnittlichen Kosten zur Wiederinstandsetzung betroffener Gebäude, die detailliertere Beschreibung der Gebäude bzw. des Inventars (zumindest für wichtige Gebäude mit hohen potentiellen Schäden) und eine Ausweitung um die Kosten von Betriebsunterbrechungen würden die Simulationsergebnisse verbessern. Obwohl wissenschaftliche Untersuchungen ergaben, dass gebietsspezifische Eigenheiten keinen nachweisbaren Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines Hochwassers haben, könnte eine bessere Berücksichtigung meteorologischer Gegebenheiten, z. B. von Wetterscheiden, die Simulationsqualität steigern. Das Simulationsmodell berücksichtigt nur Gebäude und enthält daher nicht die Schäden an der öffentlichen Infrastruktur wie etwa Straßen, Kanäle und Leitungen. Solche Infrastruktureinrichtungen könnten in einem weiteren Schritt integriert werden, damit eine vollständige Abschätzung des erwarteten Schadenvolumens möglich wird. Die Datengrundlage für diese Erweiterung ist am WIFO vorhanden. Schließlich beruhen die Simulationsergebnisse auf dem Gebäudebestand des Jahres 2005 und der Gebäudestruktur des Jahres 2001 und spiegeln daher die aktuelle Lage nicht mehr exakt wider. Eine laufende Pflege des Modells durch Einarbeitung von Neubauten und Abrissen bzw. die Aktualisierung entsprechend dem HORA-Informationssystem ist daher notwendig. Daneben sollte in zukunftsgerichteten Simulationen die höhere Wahrscheinlichkeit extremer Wetterereignisse berücksichtigt werden, die mit der steigenden Temperatur der Erdatmosphäre erwartet wird.

Für die österreichische Versicherungswirtschaft wäre die Verknüpfung des Modells mit den versicherten privaten Wohnhäusern aus dem jeweiligen Portfolio eines Versicherungsunternehmens interessant. Diese Weiterentwicklung würde den in den USA verbreiteten kommerziellen Nutzungen von Katastrophenmodellen folgen und könnte auf der Ebene des Einzelunternehmens das Verlustpotential aus einer Versicherung gegen Hochwasserschäden für Privathaushalte in Österreich aufzeigen.

## 5. Literaturhinweise

- Allan, R. P., Soden, B. J., "Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes", *Scienceexpress*, 2008, (8), p. 1-7, <http://www.scienceexpress.org/7August2008/Page1/10.1126/science.1160787>.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft), Anhang, 2006A, Wien, abgerufen am 30. Sept. 2006, <http://www.wassernet.at/filemanager/download/16038/>.
- Cummins, J. D., "Reinsurance for Natural and Man-Made Catastrophes in the United States: Current State of the Market and Regulatory Reform", *Risk Management and Insurance Review*, 2007, 10, S. 179-220.
- Grossi, P., Kunreuther, H. (ed.) *Catastrophe Modeling: A new Approach to Managing Risk*, Springer, New York, 2005.
- Grossi, P., Kunreuther, H., Windeler, D., „An Introduction to Catastrophe Models and Insurance“, in Grossi, P., Kunreuther, H. (ed.) *Catastrophe Modeling: A new Approach to Managing Risk*, Springer, New York, 2005, S. 23-42.
- Jaffee, D. M., Russell, T., „Should Governments Provide Catastrophe Insurance?“, *Economist's Voice*, 2006, 3(5), <http://www.bepress.com/ev>.
- Johnson, N. L., Kotz, S., Balakrishnan, N., *Continuous Univariate Distributions Volume 1*, Wiley, New York, 2004A.
- Johnson, N. L., Kotz, S., Balakrishnan, N., *Continuous Univariate Distributions Volume 2*, Wiley, New York, 2004B.
- Kunreuther, H., Pauly, M., "Rules Rather Than Discretion: Lessons From Hurrigan Katrina", *Journal of Risk and Uncertainty*, 2006, 33, S. 101-116.
- Land-, forst- und wasserwirtschaftliches Rechenzentrum GmbH, Elektronische Übermittlung der Adress.Certified (AC) Geo Daten 2005, Oktober 2006.
- Mahdyiar, M., Porter, B., "The Risk Assessment Process: The Role of Catastrophe Modeling in Dealing with Natural Hazards", in Grossi, P., Kunreuther, H. (ed.) *Catastrophe Modeling: A new Approach to Managing Risk*, Springer, New York, 2005, S. 45-68.
- Merz, R., "Understanding and Estimating Flood Probabilities at the Regional Scale", *Wiener Mitteilungen*, 2002, Band 181, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft Technische Universität Wien, Wien.
- Merz, B., Kreibich, H., Thieken, A., Schmidtke, R., "Estimation Uncertainty of Direct Monetary Flood Damage to Buildings", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, (4), S. 153-163.
- Reiss, R. D., Thomas, M., *Statistical Analysis of Extreme Values*, Birkhäuser, Basel, 2001.
- Schwarze, R., Wagner, G. G., „The Political Economy of Natural Disaster Insurance: Lessons from the Failure of a Proposed Compulsory, Insurance Scheme in Germany“, *European Environment*, 2007, 17, S. 403-415.
- Sinabell, F., Url, T., *Versicherungen als effizientes Mittel zur Risikotragung von Naturgefahren*, WIFO-Studie, Wien, 2006.
- Smith, R. L., „Statistics of Extremes, with Applications in Environment, Insurance, and Finance“, in Finkenstädt, B., Rootzen, H., *Extreme Values in Finance, Telecommunications, and the Environment*, Chapman&Hall, Boca Raton (FL), 2004, S. 1-78.



## Technischer Anhang

### A1 Das Modul zur Risikoeinschätzung

Die Darstellung des Eintritts eines Hochwassers verwendet eine Zufallsvariable,  $ex_d$ , die den Wert 1 annimmt, wenn ein extremes Hochwasserereignis eintritt und sonst gleich 0 ist. Diese Darstellung wird eingesetzt, weil ein Hochwasser üblicherweise nicht nur in einem Bezirk eintritt, sondern mehrere Bezirke gleichzeitig betrifft. Der Eintritt eines extremen Hochwassers wird für jeden Bezirk  $d=1, \dots, D$  durch Ziehung einer Zufallsvariable aus einer Gleichverteilung  $x_d \sim U[0,1]$  simuliert. Der Wert von  $x_d$  wird mit dem kritischen Wert verglichen, der sicherstellt, dass im Durchschnitt über alle Simulationen in 5% der Fälle ein Extremereignis im Bezirk  $d$ ,  $ex_d=1$ , eintritt. Gleichzeitig werden alle Nachbarbezirke im Umkreis von 100 km ebenfalls auf Eins gesetzt:

$$ex_d = \begin{cases} 1 & x_d \leq cval \text{ oder } \exists j, j \neq d, \text{ mit } x_j \leq cval \text{ und } \text{dist}(d, j) \leq 100 \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (\text{A.1.1})$$

wobei  $\text{dist}(d,j)$  die kürzeste Fahrdistanz zwischen den Hauptstädten der Bezirke  $d$  und  $j$  in Kilometer angibt. Fahrdistanzen haben gegenüber Luftstrecken den Vorteil, dass Wetterscheiden durch trennende Berge besser berücksichtigt sind. Die räumliche Korrelation zwischen den Bezirken erhöht die Wahrscheinlichkeit eines Extremereignisses gegenüber einer für jeden Bezirk unabhängig gleichverteilten Zufallsvariablen. Der 5%-kritische Wert einer gleichverteilten Zufallsvariablen,  $cval_d$ , wird daher insgesamt herabgesetzt und für jeden Bezirk entsprechend der Zahl der Nachbarn korrigiert:

$$cval_d = 0,0037 / \left( \frac{(nngb_d - nmng) + nmng}{nmng} \right) \quad (\text{A.1.2})$$

wobei der Faktor 0,0037 so gewählt ist, dass im Durchschnitt über alle Bezirke in 5% der Ziehungen ein Extremereignis eintritt. Die bezirksspezifische Korrektur berücksichtigt, dass die Zahl der Nachbarn im Bezirk  $d$  über- bzw. unterdurchschnittlich groß ist. Ohne Korrektur würde ein Bezirk mit vielen Nachbarn öfter von einem Extremereignis betroffen sein als ein Bezirk mit wenigen Nachbarn. Die Variable  $nngb_d$  beschreibt die Anzahl der Nachbarbezirke des Bezirkes  $d$  und  $nmng$  ist die durchschnittliche Zahl der Nachbarn über alle Bezirke. Für Bezirke mit überdurchschnittlich vielen Nachbarn verringert die Korrektur den kritischen Wert und für Bezirke mit unterdurchschnittlich vielen Nachbarn steigert ihn die Korrektur. Im Durchschnitt über alle Simulationen gewährleistet der niedrige Wert des Faktors 0,0037, dass trotz der Übertragung von Extremereignissen über die Bezirke ein Extremereignis nur in 5% der Fälle auftritt. Dieser Grenzwert entspricht genau einer 20-jährlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeit. In einer weiter ausgebauten Version des Modells könnten an Stelle der näherungsweisen

Korrektur Dummy-Nachbarbezirke eingeführt werden, die für alle Grenzbezirke Österreichs ausreichend viele künstliche Nachbarn erzeugen.

Wenn in keinem der  $D$  Bezirke ein ausreichend großes Hochwasser eintritt, wird die Schadensumme für alle Gebäudetypen  $t$ ,  $dab_t$ , auf Null gesetzt und eine neue Simulation startet mit der Ziehung von  $x_d$  für jeden Bezirk. Wenn andererseits ein Extremereignis auftritt, wird aus einer weiteren Zufallsvariablen gezogen, die darauf bedingt ist, dass ein mindestens 20-jährliches Ereignis eintritt. Das Ausmaß des Hochwassers wird für alle Bezirke gemeinsam als bedingte Zufallsvariable  $flex | flex \geq 20$  mithilfe der inversen Transformationsmethode gezogen. Die bedingte Zufallsvariable  $flex | flex \geq 20$  hat die Verteilungsfunktion:

$$G(flex) = \begin{cases} 0 & flex < 20 \\ 1 - \frac{20}{flex} & flex \geq 20, \end{cases} \quad (\text{A.1.3})$$

somit kann die gesuchte Variable in der Simulation als  $flex=20/u$  gewählt werden, wobei  $u$  einer Gleichverteilung im Intervall zwischen Null und Eins folgt. Der durchschnittliche Hochwasserstand,  $flex$ , ist als Wiederkehrhäufigkeit ausgedrückt. Zu diesem Durchschnittswert wird eine Abweichung,  $y_d$ , addiert, die aus einer Normalverteilung für jeden Bezirk gezogen wird. Das Ausmaß eines Hochwassers ausgedrückt als Wiederkehrhäufigkeit im Bezirk  $d$ ,  $fld_d$  wird folgendermaßen berechnet:

$$fld_d = \begin{cases} flex \cdot \text{abs}(1 + y_d) & ex_d = 1 \\ 0 & ex_d = 0, \end{cases} \quad (\text{A.1.4})$$

mit  $y_d \sim N(\mu = 0, \sigma^2 = 0,1)$ . Der Absolutbetrag von  $(1+y_d)$  verhindert negative Wiederkehrhäufigkeiten.

Der Hochwasserstand in einem betroffenen Bezirk,  $fld_d$ , wird mit einer normalverteilten Zufallsvariable,  $y_m$ , zusätzlich über die Gemeinden variiert. Die Zufallsvariable  $y_m$  bestimmt die Variation des Hochwassers in der Gemeinde  $m$  innerhalb des Bezirkes  $d$ . Das Ausmaß eines Hochwassers ausgedrückt als Wiederkehrhäufigkeit in der Gemeinde  $m=1, \dots, M$ ,  $flm_m$ , wird folgendermaßen berechnet:

$$flm_m = fld_d \text{abs}(1 + y_m). \quad (\text{A1.5})$$

mit  $y_m \sim N(\mu = 0, \sigma^2 = 0,05)$ . Da die Normalverteilung trotz der niedrigen Varianz negative Werte für  $y_m$  erreichen kann, wird auch hier der Absolutbetrag verwendet.

## A2 Das Modul mit Österreichs Gebäudebestand

Der Bestand an Gebäuden für das Simulationsmodell stammt aus dem Projekt Hochwasserrisikoflächen Austria (HORA) und aus der Gebäudezählung von ST.AT. Im HORA sind alle in Österreich vorhandenen Gebäudeadressen einer der drei

Hochwasserabflusszonen (HQ30, HQ100 und HQ200) zugeteilt. Dem WIFO steht für die Simulationen eine Auswertung zur Verfügung, in der für jede Gemeinde die Zahl der Gebäude in jeder der drei Zonen angegeben wird. Aus der Gebäudezählung von ST.AT ist die Gesamtzahl der Gebäude in jeder Gemeinde bekannt, sodass auch die Zahl der außerhalb der HQ200-jährlichen Zone liegenden Gebäude berechnet werden kann.

Für die Simulation von Hochwasserschäden muss eine Aufteilung der Gebäude innerhalb der vier Zonen erfolgen. Wenn für alle Gebäude die jeweilige Wiederkehrhäufigkeit bekannt wäre, könnte jedem einzelnen Gebäude der entsprechende Wert zugewiesen werden. Die Zuteilung ist aber nur für die gesamte Zone bekannt. Deshalb werden die Gebäude gleichmäßig über alle in der Zone vorhandenen Jährlichkeiten aufgeteilt. Wenn z. B. HORA in der HQ30-Zone einer Gemeinde 60 Gebäude ausweist, werden der HQ1-Zone 2 Gebäude, der HQ2-Zone 2 Gebäude usw. zugewiesen. Entsprechend wird auch in HQ100, HQ200 und in der darüber liegenden Zone vorgegangen. Die interpolierte Gebäudezahl jeder Zone wird für jede Gemeinde im Vektor  $build\_int_m$  abgelegt, der die Dimension  $10.000 \times 1$  hat, d. h. alle vorhandenen Gebäude in einer Gemeinde werden auf einer Skala von 10.000 verteilt. Wenn ein 10.000-jährliches Ereignis eintritt, ist somit der gesamte Gebäudebestand Österreichs vom Hochwasser geschädigt. Ein Eintrag im Gebäudevektor  $build\_int(i)$  gibt die Zahl der Gebäude in der entsprechenden Hochwasserabflusszone  $i$  an. Die Gesamtzahl der durch ein Hochwasser geschädigten Gebäude,  $nab_m$ , kann dann leicht als die Summe aller Einträge von der ersten Position in  $build\_int(1)$  bis zur Position, die durch die gezogene Hochwasserintensität bestimmt wird,  $build\_int(flm_m)$ , berechnet werden:

$$nab_m = \sum_{i=1}^{flm_m} build\_int_{i,m} . \quad (A2.1)$$

Der Wert für  $flm_m$  ist auf eine ganze Zahl abgerundet.

Die Gebäudezählung von ST.AT enthält auch eine detaillierte Struktur der Gebäude. Die in der Gebäudezählung eingesetzte Typisierung der Gebäude weicht von der in Merz *et al.* (2004) verwendeten Typisierung ab. Merz *et al.* (2004) bestimmen aus einer Auswertung deutscher Hochwasserschadendaten die durchschnittlichen Schadenwerte aus mehreren Ereignissen. Da die durchschnittlichen Schadenwerte und die zugehörigen Standardabweichungen von Merz *et al.* (2004) Grundlage für die Ermittlung der Schadenwerte sind, wird die etwas detailliertere Gebäudezählung aggregiert und an die Struktur in Merz *et al.* (2004) angepasst. Übersicht 14 beschreibt die Überleitung von der Gebäudezählung zur Gebäudestruktur im Simulationsmodell. In der Simulation wird zwischen Privaten Wohngebäuden, Öffentlichen Gebäuden bzw. Infrastruktur, Gebäuden im Dienstleistungssektor, Gebäuden in Industrie und Gewerbe, sowie Sonstigen Gebäuden unterschieden.

Übersicht 14: Struktur der Gebäude in Österreich - Überleitung von der Abgrenzung in der Gebäudezählung zur Abgrenzung im Simulationsmodell

Gebäudetyp in der Gebäudezählung	Gebäudetyp im Simulationsmodell	Bezeichnung	Anteile in %
Wohngebäude mit 1, 2 oder mehr Wohnungen und Wohngebäudegemeinschaften	Private Haushalte	r	86,2
Gebäude des Verkehrs- und Nachrichtenwesens, der Kultur, der Freizeit, der Bildung und des Gesundheitswesens	Öffentliche Infrastruktur	p	0,9
Hotels und ähnliche Gebäude, Büro- und Handelsgebäude	Dienstleistungssektor	s	4,9
Werkstätten, Industrie und Lagerhallen	Industrie und Gewerbe	m	3,5
Nebengebäude und land- und forstwirtschaftl. Gebäude	Sonstige Gebäude	o	4,4

Q: ST.AT, Merz et al. (2004).

### A3 Das Modul zur Bestimmung der Schadenanfälligkeit

Die betroffenen Gebäude in einer Gemeinde,  $nab_m$ , werden entsprechend der Wiederkehrhäufigkeit von Hochwasser in vier Zonen aufgeteilt:

- Gebäude in der Hochwasserabflusszone 30 ( $nab30_m$ ),
- Gebäude in der Hochwasserabflusszone 100 ( $nab100_m$ ),
- Gebäude in der Hochwasserabflusszone 200 ( $nab200_m$ ) und
- Gebäude außerhalb der 200-jährlichen Hochwasserabflusszone ( $nabtop_m$ ).

Je nach dem für eine Gemeinde gezogenen Hochwasserausmaß,  $flm_m$ , wird die entsprechende Zahl an Gebäuden beschädigt. Dazu wird der im Abschnitt für das Gebäudebestandsmodul beschriebene Vektor der Gebäude  $build\_int$  genommen, und alle Einträge/Gebäude bis zu jener Position zusammengezählt, die dem gerundeten Wert von  $flm_m$  entspricht. Dabei wird durch die Berücksichtigung der Hochwasserabflusszonen auch auf die Gefährdung der Gebäude Rücksicht genommen:

$$nab30_m = \begin{cases} \sum_{i=1}^B build\_int_i & B = \min(flm_m, 30) \\ 0, & flm_m = 0 \end{cases} \quad (A3.1)$$

$$nab100_m = \begin{cases} \sum_{i=31}^B build\_int_i & B = \min(flm_m, 100) \quad \forall flm_m > 30 \\ 0 & flm_m = 0 \end{cases} \quad (A3.2)$$

$$nab200_m = \begin{cases} \sum_{i=101}^B build\_int_i & B = \min(flm_m, 200) \quad \forall flm_m > 100 \\ 0 & flm_m = 0 \end{cases} \quad (A3.3)$$

$$nabtop_m = \begin{cases} \sum_{i=201}^B build\_int_i & B = flm_m \quad \forall flm_m > 200 \\ 0 & flm_m = 0. \end{cases} \quad (A3.4)$$

Wenn das Hochwasser niedrig ist, bleiben die Gebäude der darüber liegenden Hochwasserzone unberührt. Z. B. ist für ein Ereignis mit 200-jährlicher Wiederkehrhäufigkeit  $nabtop_m=0$ , während alle Gebäude in den darunter liegenden Zonen betroffen sind.

Danach erfolgt die Aufteilung der beschädigten Gebäude in jeder Zone entsprechend der Gebäudestruktur in der Gemeinde  $m$ . Es gibt für jede Gemeinde fünf Gebäudetypen:

- Private Wohngebäude  $nb30_{mr}, nb100_{mr}, nb200_{mr}, nbtopy_{mr}$
- Öffentliche Infrastruktur  $nb30_{mp}, nb100_{mp}, nb200_{mp}, nbtopy_{mp}$
- Dienstleistungssektor  $nb30_{ms}, nb100_{ms}, nb200_{ms}, nbtopy_{ms}$
- Industrie und Gewerbe  $nb30_{mm}, nb100_{mm}, nb200_{mm}, nbtopy_{mm}$

- Sonstige Gebäude  $nb30_{mo}, nb100_{mo}, nb200_{mo}, nbtop_{mo}$

und für jeden Gebäudetyp vier Zonierungen. Die Aufteilung erfolgt in jeder Zone mit dem Anteil des jeweiligen Gebäudetyps in der Gemeinde, z. B.  $nab30_{mr} = nab30_m \cdot \gamma_{mr}$ , wobei  $\gamma_{mr}$  der Anteil der privaten Wohnhäuser,  $r$ , an den Gebäuden in der Gemeinde  $m$  ist. Es wird also unterstellt, dass die Gebäudestruktur in jeder Hochwasserzone gleich ist. Die Gesamtsumme der beschädigten Gebäude eines Gebäudetyps wird als  $nbtot_{mr}, nbtot_{mp}$ , usw. bezeichnet.

Die Berechnung der Schadenwerte erfolgt in Abhängigkeit vom Ausmaß des Hochwassers,  $flm_m$ , durch unterschiedliche durchschnittliche Schadenwerte für Gebäude. Je nachdem, ob nur der Keller oder auch die Geschoße vom Hochwasser betroffen sind (Übersicht 3). Deshalb wird für kleine Hochwasserereignisse angenommen, dass es nur zu Kellerschäden kommt; das sind Ereignisse bis zu HQ100. Bei Ereignissen, die in den Bereich zwischen HQ100 und HQ200 fallen, treten in den Gebäuden der HQ30-Zone auch Schäden in den Geschoßen auf. Bei einem über 200-jährlichen Ereignis entstehen auch in den Gebäuden der HQ100 Schäden in den Geschoßen.

#### A4 Modul zur Ermittlung des Schadenwertes

Der Schaden an einem Gebäude wird aus einer Lognormal-Verteilung als Zufallsvariable gezogen, wobei die Erwartungswerte aus Teil A Übersicht 3 von Merz *et al.* (2004) übernommen werden. Die zugehörigen Varianzen stammen ebenfalls aus dem deutschen Datensatz und sind in Übersicht 12 gemeinsam mit den Mittelwerten abgebildet. Der Schaden an einem Gebäude  $i$  hängt davon ab, welcher Gebäudetyp,  $t$ , betroffen ist und um welches Schadenausmaß,  $e$ , es sich handelt; d. h. ob es sich nur um einen Keller- oder bereits um einen Geschoßschaden handelt. Der Schadenwert,  $C_{iet}$ , wird für jedes Gebäude getrennt aus einer Lognormal-Verteilung (Johnson *et al.*, 2004A) gezogen. Die Umrechnung der Mittelwerte,  $\mu_{1et}$ , und Varianzen,  $\mu_{2et}$ , von Merz *et al.* (2004) in Mittelwert,  $\xi_{et}$ , und Varianz,  $\sigma_{et}^2$ , der zugrunde liegenden Normalverteilung für die Simulation erfolgte für jeden Gebäudetyp,  $t$ , und das Schadenausmaß,  $e$ , entsprechend (Johnson *et al.*, 2004A):

$$\mu_{1et} = \exp\left(\xi_{et} + \frac{1}{2} \sigma_{et}^2\right), \quad (\text{A4.1})$$

$$\mu_{2et} = \exp(2\xi_{et}) \exp(\sigma_{et}^2) \left(1 - \exp(-\sigma_{et}^2)\right), \quad (\text{A4.2})$$

wobei das Schadenausmaß,  $e$ , niedrig,  $l$ , sein kann, weil nur der Keller betroffen ist, oder es kann hoch,  $h$ , sein, weil auch die Geschoße betroffen sind. Die Berechnung des Gesamtschadens folgt durch Aufsummieren der Einzelschäden beschädigter Gebäude,  $C_{iet}$ , für alle Gebäudetypen separat und wird hier nur für private Wohnhäuser exemplarisch dargestellt.

$$dab_{mr} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{nbtot_r} c_{ilr} & flm_m \leq 100 \\ \sum_{i=1}^{nb30_r} c_{ihr} + \sum_{i=1}^{nbtot_r - nb30_r} c_{ilr} & 100 < flm_m \leq 200 \\ \sum_{i=1}^{nb30_r + nb100_r} c_{ihr} + \sum_{i=1}^{nb200_r + nbtot_r} c_{ilr} & 200 < flm_m. \end{cases} \quad (A4.3)$$

Die erwarteten Schadenwerte sind unabhängig von der Gemeinde, in dem ein Ereignis auftritt. Der Bezug zur Gemeinde entsteht nur durch die Gebäudezahl und die Gebäudestruktur. Der Gesamtschaden eines Hochwassers  $dab$ :

$$dab = \sum_{m=1}^M \sum_{t=r}^o dab_{mt} \quad (A4.4)$$

folgt aus der Summe über alle Gebäudetypen ( $r, p, s, m, o$ ) und Gemeinden ( $M$ ).

## A5 Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve beruht auf den Simulationsergebnissen des Katastrophenmodells (Grossi – Kunreuther, 2005). Ausgangspunkt ist der Gesamtschaden eines Hochwassers,  $dab$ . Da eine Simulation mit z. B. 1 Mio. Durchgängen zu viele Ereignisse für eine übersichtliche Darstellung schafft, bietet sich eine Klasseneinteilung der Gesamtschäden an. Eine einfache Möglichkeit dazu ist die Erstellung eines Histogramms mit  $nmid$  diskreten Klassen. In der vorliegenden Simulation wurde  $nmid=100$  gesetzt. Jede Klasse des Histogramms kann als Ereignis,  $E_i$ , mit  $i=1, \dots, nmid$  aufgefasst werden. Zu jedem Ereignis,  $i$ , gehört ein Gesamtschaden,  $L_i$ , in der Höhe der Klassenmitte zwischen der jeweiligen unteren und oberen Klassengrenze. Die Häufigkeit von Schadenwerten innerhalb einer Klasse, kann durch den Vergleich mit der Zahl an Simulationen berechnet werden. Damit gibt es für jedes Ereignis,  $E_i$ , einen Schaden,  $L_i$ , und eine Eintrittswahrscheinlichkeit,  $p_i$ :

$$\begin{aligned} P(E_i \text{ tritt ein}) &= p_i \\ P(E_i \text{ tritt nicht ein}) &= (1 - p_i), \end{aligned} \quad (A5.1)$$

wobei die Menge der Ereignisse vollständig ist, sodass die Summe der Wahrscheinlichkeiten für alle Ereignisse,  $p_i$ , Eins ergibt.

Wenn kein Hochwasserereignis über dem Schwellwert von 20-jährlichen Ereignissen eintritt, ist der Schadenwert Null, d. h.  $dab=0$ . Der erwartete Schaden für ein Ereignis,  $E_i$ , in einem gegebenen Jahr ist

$$E(dab) = p_i L_i. \quad (A5.2)$$

Der gesamte zu erwartende Schaden für die Gesamtmenge der Ereignisse wird als durchschnittlicher jährlicher Schaden, AAL, bezeichnet:

$$AAL = \sum_{i=1}^{nmid} p_i L_i . \quad (A5.3)$$

Unter der Annahme, dass pro Jahr nur ein Hochwasserereignis stattfinden kann, ist die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung eines gegebenen Schadenniveaus,  $EP(L_i)$ , durch die Funktion

$$\begin{aligned} EP(L_i) &= P(L > L_i) = 1 - P(L \leq L_i) \\ EP(L_i) &= 1 - \prod_{j=1}^i (1 - p_j) . \end{aligned} \quad (A5.4)$$

gegeben (Grossi et al., 2005). Die Überschreitungswahrscheinlichkeit ist die jährliche Wahrscheinlichkeit, dass der Gesamtschaden einen bestimmten Wert überschreitet. Die Wahrscheinlichkeits-Überschreitungskurve stellt den Zusammenhang zwischen dem Gesamtschaden,  $L_i$ , auf der horizontalen und der Überschreitungswahrscheinlichkeit auf der vertikalen Achse dar (Abbildung 5 bzw. Übersicht 4 und folgende).