

# Hochwasser- risiken

Bruno Merz



## Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung  
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart

**Bruno Merz**

# Hochwasser- risiken

## **Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung**

Mit 105 Abbildungen und 33 Tabellen



Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung  
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart

Anschrift des Autors:

**Dr.-Ing. Bruno Merz**

GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ)  
Head Section 5.4 'Engineering Hydrology'  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

**Titelfoto:** Das „Jahrhunderthochwasser“ 2002 an der Elbe – 29. August 2002 bei Vehlgast/Havelgebiet. Foto: S. Itzerott (GFZ Potsdam) und M. Zebisch (PIK Potsdam).

ISBN ebook (pdf) 978-3-510-65459-8

ISBN 978-3-510-65220-4

© 2006 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller)  
Johannesstr. 3A, 70176 Stuttgart

[www.schweizerbart.de](http://www.schweizerbart.de)  
e-mail: [mail@schweizerbart.de](mailto:mail@schweizerbart.de)

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, des auszugsweisen Nachdrucks, der Herstellung von Mikrofilmen, der photomechanischen Wiedergabe sowie der Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen, vorbehalten.

♻ Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

**Druck:** Tutte Druckerei GmbH, Salzweg  
Printed in Germany

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>viii</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Bedeutung von Risikoanalysen . . . . .	1
1.2 Ziele und Vorgehensweise . . . . .	5
<b>2 Sicherheit und Risiko: Begriffe und Konzepte</b>	<b>7</b>
2.1 Begriffe . . . . .	7
2.2 Management von öffentlichen Risiken . . . . .	16
2.2.1 Risikomanagement als Sicherheitsstrategie . . . . .	16
2.2.2 Optimale Reduzierung des Risikos . . . . .	18
2.2.3 Bestmögliche Beherrschung des Restrisikos . . . . .	21
2.2.4 Schutzziele für öffentliche Risiken . . . . .	22
2.3 Grundsätzliches zu Risikoanalysen . . . . .	26
2.3.1 Zur historischen Entwicklung von naturwissenschaftlich- technischen Risikoanalysen . . . . .	26
2.3.2 Vorgehen bei Risikoanalysen . . . . .	28
<b>3 Methoden zur Abschätzung von Risiken</b>	<b>31</b>
3.1 Gefahrenanalyse und Szenariobildung . . . . .	31
3.2 Eintrittswahrscheinlichkeit von Schadensszenarien . . . . .	33
3.2.1 Hinweise zur Ableitung von Eintrittswahrscheinlichkeiten . . . . .	33
3.2.2 Historische Ereignisse und Beobachtungsdaten . . . . .	35
3.2.3 Modellierung von Schadensszenarien . . . . .	36
3.2.4 Expertenmeinung . . . . .	42
3.3 Darstellung von Risikoaussagen . . . . .	44
3.3.1 Risikoindikatoren . . . . .	44

3.3.2	Risikokurven . . . . .	45
3.4	Risikoanalysen und Unsicherheiten . . . . .	48
3.4.1	Bedeutung von Unsicherheitsbetrachtungen . . . . .	49
3.4.2	Quellen von Unsicherheit . . . . .	51
3.4.3	Natürliche Variabilität und Unwissenheit . . . . .	56
3.4.4	Unsicherheitsanalyse . . . . .	59
3.5	Validierung von Risikoanalysen . . . . .	64
3.5.1	Indikatoren zur Modellvalidierung . . . . .	65
3.5.2	Datenverfügbarkeit und Extrapolation . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Grundlegende Aspekte des Hochwasserrisikos</b>	<b>73</b>
4.1	Gefährdung, Vulnerabilität und Risiko . . . . .	73
4.2	Raumskalen . . . . .	76
4.3	Datengüte, Instationarität und Extrapolation . . . . .	77
4.3.1	Beobachtungsdaten für Hochwasserrisikoanalysen . . . . .	77
4.3.2	Instationarität . . . . .	78
4.3.3	Extrapolation . . . . .	80
4.4	Risikomanagement als Kreislauf . . . . .	81
<b>5</b>	<b>Hochwasserbemessung und Risikoanalysen</b>	<b>85</b>
5.1	Bemessungshochwasser . . . . .	85
5.2	Traditionelle Bemessungsverfahren . . . . .	86
5.2.1	Empirische Bemessung . . . . .	86
5.2.2	Bemessung nach Grenzwerten des Abflusses . . . . .	88
5.2.3	Bemessung nach Jährlichkeiten . . . . .	92
5.2.4	Bewertung der traditionellen Bemessungskonzepte . . . . .	96
5.3	Bemessung nach Versagenswahrscheinlichkeiten . . . . .	99
5.4	Risiko-orientierte Bemessung . . . . .	100
5.5	Anwendung der Bemessungskonzepte . . . . .	102
5.5.1	Bemessungspraxis in Deutschland . . . . .	102
5.5.2	Bemessungspraxis im Ausland . . . . .	104
<b>6</b>	<b>Gefahrenanalyse und Szenariobildung</b>	<b>107</b>
6.1	Über die Vielfalt möglicher Schadenszenarien . . . . .	107
6.2	Szenariobildung im Hochwasserschutz . . . . .	113

6.3	Identifizierung repräsentativer Szenarien . . . . .	119
6.3.1	Sicherheitswissenschaftliche Methoden zur Szenariobildung . . . . .	119
6.3.2	Szenariobildung auf Basis von Expertenmeinung . . . . .	121
6.4	Wieviele Szenarien reichen aus? . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Wahrscheinlichkeit von Schadensszenarien</b>	<b>127</b>
7.1	Versagen von Hochwasserschutzsystemen . . . . .	127
7.1.1	Flussdeiche . . . . .	127
7.1.2	Hydrologisches Versagen von Talsperren . . . . .	136
7.1.3	Wie vertrauenswürdig sind Versagenswahrscheinlichkeiten für Hochwasserschutzsysteme? . . . . .	139
7.2	Schadensszenarien in Flusseinzugsgebieten . . . . .	141
7.2.1	Hochwasser als Überlagerung von Zufallsprozessen . . . . .	141
7.2.2	Systematisierung der Ansätze zur Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten . . . . .	143
7.2.3	Hochwasserhäufigkeitsanalyse . . . . .	145
7.2.4	Traditionelle ereignisbasierte Simulation – Bemessungsregemethode . . . . .	153
7.2.5	Abgeleitete Hochwasserhäufigkeitsverteilung . . . . .	155
7.2.6	Zeitkontinuierliche Simulationsansätze . . . . .	161
7.2.7	Wie sicher sind Wahrscheinlichkeitsaussagen über extreme Abflüsse? . . . . .	162
7.2.8	Gefährdungsanalyse in Einzugsgebieten – Eine Bewertung . . . . .	175
	<b>Farbabbildungen</b>	<b>177</b>
<b>8</b>	<b>Hochwasserschäden</b>	<b>189</b>
8.1	Grundsätzliches zur Schadenabschätzung . . . . .	189
8.1.1	Schadenkategorien und Betrachtungsmaßstäbe . . . . .	189
8.1.2	Exposition und Anfälligkeit . . . . .	192
8.1.3	Datenerhebung und Schadendaten . . . . .	195
8.1.4	Natürliche Variabilität und Vulnerabilität . . . . .	197
8.2	Personenschäden . . . . .	201
8.2.1	Wer ist betroffen? . . . . .	201
8.2.2	Physische Auswirkungen . . . . .	203
8.2.3	Psychische Auswirkungen . . . . .	214

---

8.3	Direkte ökonomische Schäden . . . . .	217
8.3.1	Was ist betroffen? . . . . .	217
8.3.2	Anfälligkeitsfunktionen . . . . .	223
8.3.3	Schadenfunktionen . . . . .	225
8.3.4	Zuverlässigkeit von Schadenaussagen . . . . .	230
8.3.5	Was determiniert die Höhe von Hochwasserschäden? . . . . .	235
8.4	Indirekte ökonomische Schäden . . . . .	252
8.5	Wie gut sind Schadenabschätzungen? . . . . .	256
<b>9</b>	<b>Aussagen zum Hochwasserrisiko</b>	<b>259</b>
9.1	Einige illustrative Beispiele . . . . .	259
9.2	Räumliche Darstellung des Hochwasserrisikos . . . . .	263
9.3	Risiko-orientierte Hochwasserbemessung . . . . .	268
9.4	Güte und Validierung von Risikoaussagen . . . . .	271
<b>10</b>	<b>Risikobewertung</b>	<b>281</b>
10.1	Risiko als mehrdimensionales Phänomen . . . . .	281
10.2	Risikoaversion als Element der Risikobewertung . . . . .	282
10.3	Öffentliche Wahrnehmung und Risikomanagement . . . . .	285
<b>11</b>	<b>Synthese und Empfehlungen</b>	<b>289</b>
11.1	Grenzen und Möglichkeiten von Risikoanalysen . . . . .	289
11.2	Auf dem Weg zur Risikokultur . . . . .	295
	<b>Literatur</b>	<b>297</b>
	<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>331</b>
	<b>Index</b>	<b>333</b>

# Danksagung

Dieses Buch ist über mehrere Jahre entstanden. In dieser Zeit habe ich von vielen Seiten Ideen und Hilfen bekommen, die in diese Arbeit eingeflossen sind. Bedanken möchte ich mich besonders bei Erich Plate, der mein Interesse an Risikoanalysen geweckt hat und mir über viele Jahre mit Rat zur Seite gestanden ist. Alle Ideen in dieser Arbeit habe ich mit Annegret Thieken diskutiert. Sie hat sehr großen Anteil an diesem Buch.

Diese Arbeit wurde als Habilitationsschrift von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam anerkannt. Mein besonderer Dank gilt Axel Bronstert, Erich Plate und Uwe Grünwald für die Übernahme der Referate und die motivierende Atmosphäre während des Habilitationsverfahrens. Des weiteren bedanke ich mich herzlich bei Günter Borm und Rolf Emmermann für die Unterstützung, die ich vom GeoForschungsZentrum Potsdam erhalten habe, in der Zeit als ich an diesem Buch gearbeitet habe.

Theresia Petrow und Heidi Kreibich lasen den Entwurf des Manuskripts und gaben viele gute Ratschläge. Astrid Krahn danke ich ganz herzlich für ihre Hilfe und Unverdroffenheit bei der Erstellung der Abbildungen. Da ein erheblicher Teil dieser Arbeit an Wochenenden und Abendstunden entstanden ist, danke ich Petra, Lea und Marius für ihre Nachsicht.

Potsdam, im Oktober 2005

Bruno Merz



# Zusammenfassung

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre in Deutschland und anderen Ländern haben Defizite im Umgang mit Hochwasserrisiken aufgezeigt. Die heute im Hochwasserschutz angewandten Sicherheitskonzepte basieren nicht auf einer umfassenden Systematik, die es erlaubt, (a) das Hochwasserrisiko durch eine optimale Auswahl von Schutzmaßnahmen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren, und (b) durch Verdeutlichung des Restrisikos den Umgang mit Situationen, in denen Schutzsysteme überlastet sind, bestmöglich vorzubereiten. Grundlage einer solchen Systematik sind Risikoanalysen. Bisherige Hochwasserrisikoanalysen haben jedoch wesentliche Schwachstellen. Die Arbeit bewertet die vorliegenden Konzepte und Methoden und zeigt Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von Risikoabschätzungen im Hochwasserschutz auf. Des Weiteren skizziert sie, welchen Beitrag Risikoabschätzungen zu einem rationalen Risikomanagement leisten.

Ausgangspunkt der Überlegungen ist, dass das Hochwasserrisiko aus der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität resultiert. Die Gefährdung bezeichnet die Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität von Hochwassersituationen, während die Vulnerabilität festlegt, wie groß die Schäden bei Eintritt einer bestimmten Gefährdungssituation sind. Als Grundlage für verbesserte Hochwasserrisikoanalysen werden allgemeingültige Konzepte zur Risikoanalyse aus verschiedenen Bereichen mit Relevanz für die Sicherheit von Mensch und Umwelt diskutiert. Eine Risikoanalyse hat drei Fragen zu beantworten: (1) Was sind die möglichen Gefahren und Schadenereignisse? (2) Wie wahrscheinlich sind Schadenereignisse? (3) Was sind die Konsequenzen, wenn ein Schadenereignis eintritt?

Der erste Schritt einer Hochwasserrisikoanalyse besteht in der Gefahrenanalyse und Szenariobildung. Im Idealfall werden alle vorstellbaren Schaden- bzw. Versagensereignisse, d.h. auch solche, die jenseits bisheriger Erfahrungen liegen, identifiziert und bewertet. Daraus ergibt sich ein Szenarioset, das die Grundlage für die weitere Analyse ist. Dieser Schritt wird bei heutigen Risikoanalysen im Hochwasserschutz vernachlässigt. Dies birgt die Gefahr, dass wesentliche Schadensszenarien übersehen bzw. Szenarien über- oder unterbewertet werden. Es wird dringend empfohlen, die in anderen sicherheitsrelevanten Bereichen entwickelten Methoden zur Gefahrenanalyse auch im Hochwasserschutz verstärkt einzusetzen und die Auswahl von Szenarien strukturierter vorzunehmen.

Im zweiten Schritt sind den als wesentlich beurteilten Szenarien Eintrittswahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Während fortgeschrittene Methoden zur Ableitung von Versa-

genswahrscheinlichkeiten bei der Analyse der Sicherheit von einzelnen Schutzanlagen, wie Deichen und Talsperren, bereits Eingang finden, ist dies bei der Analyse des Risikos in Flussgebieten nicht der Fall. Hieraus resultieren konzeptionelle Defizite. Dies betrifft beispielsweise die Berücksichtigung von Zufallsprozessen und ihrer Interaktionen. Hochwasserereignisse resultieren aus dem Zusammenspiel verschiedener Prozesse mit hohem Zufallsanteil. Eine vollständige Beschreibung erfordert, dass die wesentlichen Zufallsprozesse und ihre Interaktionen mit probabilistischen Ansätzen erfasst werden. Im Allgemeinen beschränkt sich die Berücksichtigung des Zufallsanteils auf einen oder wenige Prozesse, z.B. bei der Bemessungsregenmethode auf die Niederschlagshöhe. Für die überwiegende Zahl von Zufallseinflüssen werden deterministische Annahmen gewählt. Ein weiteres Defizit ist die häufig mangelhafte Beschreibung des Systemverhaltens. Hochwasserereignisse zeichnen sich durch vielfältige gegenseitige Einflüsse aus. Ein Beispiel ist die Verringerung der Überflutungsgefahr unterstrom durch Deichbrüche und Ausuferungen oberstrom. Es ist notwendig, stärker als bisher das Systemverhalten bei der Ableitung von Hochwasserszenarien und ihren Wahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Am Beispiel einer 160 km langen Flusstrecke am Niederrhein wird gezeigt, wie es durch die Kombination von Simulationsmodellen und probabilistischen Ansätzen möglich wird, einerseits die wichtigen Zufallsprozesse und andererseits das Systemverhalten zu erfassen. Die Kopplung von meteorologischen, hydrologischen, hydraulischen und anderen Modellen in einem probabilistischen Rahmen erlaubt es, Prozesse zu beschreiben, die im beobachteten Datenmaterial nicht aufgetreten sind, aber dennoch berücksichtigt werden müssen, wie z.B. Deichbrüche.

Der dritten Frage "Was sind die Konsequenzen, wenn ein Schadenereignis eintritt?" wird in der Arbeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet, da die Vulnerabilitätsanalyse bisher vernachlässigt wurde. Die Folgen von Hochwasserereignissen sind vielfältiger und komplexer als bisherige Risikoanalysen berücksichtigen. Die Beschränkung auf tangible Schäden, zumeist sogar nur direkte Sachschäden, blendet wichtige Hochwasserfolgen aus. Deshalb ist eine größere Aufmerksamkeit auf die intangiblen und indirekten Folgen von Hochwasserereignissen, wie z.B. deren psychischen Belastungen, zu legen. Darüber darf allerdings nicht vergessen werden, dass auch die vorhandenen Daten und Ansätze für die Abschätzung der direkten tangiblen Hochwasserschäden unbefriedigend sind. Es werden Wege aufgezeigt, wie die momentan verwendeten Methoden verbessert werden können. Dies betrifft z.B. die Erweiterung der eindimensionalen Anfälligkeitsfunktionen. Diese nehmen an, dass der Schadengrad, der durch ein Hochwasser an einem bestimmten Risikoelement (Gebäude, Gemeinde etc.) verursacht wird, lediglich vom Wasserstand abhängt. Die Berücksichtigung weiterer schadenbeeinflussender Faktoren, wie z.B. Überflutungsdauer, Vorsorge der Betroffenen, kann die Abschätzung der Schäden verbessern. Allerdings hängt die Schadenentstehung von vielen, nur teilweise vorhersagbaren Einflüssen ab. Deshalb wird vorgeschlagen, auch die Schadenentstehung als Zufallsprozess zu betrachten. Hierzu werden Verteilungsfunktionen für den Schadengrad abgeleitet.

Basierend auf der Diskussion der Methoden zur Gefährdungs- und Vulnerabilitätsabschätzung wird vorgeschlagen, die Methoden der abgeleiteten Hochwasser-*Häufigkeits*-Verteilung zur abgeleiteten Hochwasser-*Schaden*-Verteilung weiterzuentwickeln. Im Gegensatz zu den bisherigen Risikoanalysen im Hochwasserschutz

würdigt dieser Ansatz, dass die Schadenentstehung ebenfalls eine erhebliche Zufallskomponente besitzt. Dieser Ansatz bedeutet, dass die Jährlichkeit des Hochwasserabflusses nicht der Jährlichkeit des Schadens entsprechen muss. Es wird also nicht der  $T$ -jährliche Abfluss gesucht, sondern der  $T$ -jährliche Schaden.

Die Abschätzung von Risiken ist immer mit Unsicherheiten verbunden. Ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Frage nach der Güte von Gefährdungs- und Risikoaussagen. Die Diskussion macht deutlich, dass Hochwasserrisikoanalysen in der Regel sehr große Unsicherheiten aufweisen. Dies ist problematisch, da traditionelle Ansätze zur Validierung bei Hochwasserrisikoanalysen aufgrund mangelnder Daten ausscheiden. Deshalb sind alternative Ansätze zu entwickeln, um die Güte von Risikoaussagen zu bewerten. Hierzu gehört eine adäquate Dokumentation, so dass die Nachvollziehbarkeit der Risikoanalyse gesichert ist. Risikoanalysen sind mit Aussagen zu dem Gültigkeitsbereich und den Begrenzungen der Annahmen und Modelle zu versehen.

In diesem Zusammenhang ist die Unterscheidung zwischen aleatorischer Unsicherheit und epistemischer Unsicherheit zu beachten. In fast allen Hochwasserrisikoanalysen werden diese beiden grundsätzlich verschiedenen Arten der Unsicherheit vermischt. Gerade bei Risikoanalysen ist es jedoch notwendig, zwischen der Variabilität des untersuchten Prozesses (aleatorische Unsicherheit) und der Unwissenheit über die Variabilität (epistemische Unsicherheit) zu unterscheiden. Dadurch wird deutlich, welcher Teil der Unsicherheit *natürlich* ist und nicht reduziert, und welcher Teil durch bessere Daten, Methoden und Modelle verringert werden kann. Am Beispiel der Hochwasserhäufigkeitsanalyse wird gezeigt, wie beide Unsicherheitstypen getrennt werden können. Die natürliche Variabilität findet ihren Ausdruck in der Gefährdungs- und Risikokurve, während die Unwissenheit durch ein Unsicherheitsband um die Gefährdungs- und Risikokurve repräsentiert wird.

Es lässt sich folgern, dass eine formale Risikoanalyse zu einem strukturierten und transparenten Prozess führt, der wesentlich zum Verständnis des untersuchten Systems beiträgt. Selbst wenn die quantitativen Ergebnisse einer Risikoanalyse aufgrund der damit verbundenen Unsicherheiten vorsichtig zu interpretieren sind, hilft sie (a) die verschiedenen Versagensmechanismen und Prozesse, die zu Schäden führen können, aufzudecken, (b) die Sicherheit des untersuchten Systems zu quantifizieren, (c) die Auswirkungen der untersuchten Gefahr zu erfassen, (d) das Restrisiko zu bestimmen und damit die Erkenntnis zu fördern, dass Schutzsysteme versagen können, und (e) ein optimales Gleichgewicht zwischen dem Aufwand für Schutzmaßnahmen und der dadurch erreichten Risikoreduktion anzustreben.

Je komplexer ein System ist und je weniger Beobachtungsdaten über das System vorliegen, desto notwendiger sind Risikoanalysen. Entscheidungen im Hochwasserschutz beziehen sich auf komplexe Systeme und auf Ereignisse, für die nicht ausreichend Daten zur Verfügung stehen. Solche Systeme lassen sich in ihrer vollen Komplexität letztlich nur über systematische Risikoanalysen erschließen. Risikoanalysen eröffnen auch im Hochwasserschutz die Möglichkeit, zu besseren Entscheidungen zu gelangen.

# Kapitel 1

## Einführung

Die zukünftigen Schäden durch Naturkatastrophen<sup>1</sup> sind Konsequenzen aus unseren heutigen Entscheidungen (Mileti, 1999). Vor diesem Hintergrund und in Anbetracht der dramatisch und kontinuierlich ansteigenden Schäden durch Naturkatastrophen in den letzten Dekaden (Münchener Rück, 2003) sind die heute angewendeten Methoden des Risikomanagements für Naturgefahren zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Dies gilt auch für das Hochwasserrisiko. Weltweit sind jährlich ca. 196 Mio. Menschen von Hochwasser betroffen; allein zwischen 1980 und 2000 kamen über 170000 Menschen durch Hochwasser ums Leben (UNDP, 2004). Ca. die Hälfte aller Verluste durch Naturgefahren werden durch Überschwemmungen verursacht (Kron & Thumerer, 2002).

### 1.1 Bedeutung von Risikoanalysen

In der jüngeren Vergangenheit wird die Hochwasserproblematik in Deutschland aber auch in anderen Ländern verstärkt öffentlich diskutiert. Dazu tragen eine für Umweltfragen zunehmend sensibilisierte Öffentlichkeit, das in manchen Regionen gehäufte Auftreten von Hochwasserereignissen und die großen Hochwasserschäden der letzten Jahre bei.

Im Rheingebiet wurde das Hochwasser im Dezember 1993 zum Jahrhunderthochwasser erklärt – um kurz darauf im Januar 1995 durch ein weiteres Hochwasser übertroffen zu werden (Gesamtschäden beider Ereignisse über 5.5 Mrd. €). Das Hochwasser an der Oder in Tschechien, Polen und Deutschland im Sommer 1997 forderte mehr als 100 Tote und verursachte Schäden in der Höhe von ca. 5 Mrd. €, wobei Deutschland vergleichsweise glimpflich davonkam (Grünwald et al., 1998). Es folgten das Pfingsthochwasser 1999 in Bayern und Baden-Württemberg mit 5 Todesopfern und 335 Mio. € Schäden, und im August 2002 schwere Überschwemmungen in Mitteleuropa, wobei sich die Schäden in Deutschland auf 11.8 Mrd. € und 21 Todesopfer addierten (DKKV, 2003).

---

<sup>1</sup>Im Folgenden wird Hochwasser als Naturkatastrophe bezeichnet, auch wenn es *reine Naturkatastrophen* nicht gibt. Solche Ereignisse zeichnen sich immer durch die Interaktion von natürlichen, sozialen und technologischen Prozessen aus (Jones, 1993).

Abb. 1.1 zeigt die Kompartimente und Prozesse, die bei der Entstehung von Hochwasserkatastrophen an Flüssen zusammenwirken. Diese Hochwasserwirkungskette unterliegt einer Vielzahl von anthropogenen Einflüssen, die mit unterschiedlichen Zeitskalen verbunden sind. Aufgrund dieser Vielfalt existieren unterschiedliche Möglichkeiten, Hochwasserkatastrophen zu verhindern oder deren Auswirkungen zu reduzieren:

- **Verbesserung des natürlichen Rückhalts:**  
Hierzu zählen Maßnahmen zur Erhöhung des natürlichen Rückhalts in Flusseinzugsgebieten (z.B. durch standortgerechte Aufforstung) und an Gewässern (z.B. Gewässerrenaturierung, Bereitstellung von Überflutungsflächen). Diese Maßnahmen können einen Beitrag zur Entschärfung der Hochwassersituation leisten und haben gleichzeitig positive ökologische Auswirkungen.
- **Planerischer Hochwasserschutz:**  
Dazu zählen alle planerischen Maßnahmen, die den Hochwasserfall in ihre Überlegungen miteinbeziehen und durch Freihalten von Überflutungsflächen und durch angepasste Bauweisen und Nutzungen Hochwasserschäden reduzieren. Dieser Schnittstelle zwischen Raumplanung, Landesplanung, Wasserwirtschaft und Katastrophenmanagement wurde bisher in Deutschland nicht genügend Aufmerksamkeit gewidmet (Greiving, 1999, DVWK, 2003). In den letzten Jahren ist jedoch ein Umdenken zu beobachten. Verstärkt wird ein langfristig angelegtes Flächenmanagement mit einer gezielten Steuerung der Nutzung in gefährdeten Bereichen gefordert (DKKV, 2003).
- **Technischer Hochwasserschutz und Objektschutz:**  
In Deutschland wurden in den vergangenen Jahrzehnten vorzugsweise technische Schutzmaßnahmen, z.B. Deiche und Rückhaltebecken, eingesetzt. Diese Maßnahmen haben in unzähligen Fällen ihre Wirksamkeit zur Reduzierung von Abflüssen oder zum Schutz von gefährdeten Gebieten unter Beweis gestellt. Es wird aber zunehmend erkannt, dass auch sehr kostenintensive technische Maßnahmen keinen absoluten Schutz gegen Hochwasserkatastrophen bieten.
- **Erhöhung der Bereitschaft:**  
Dazu zählen Maßnahmen zur Vorbereitung auf den Katastrophenfall, wie z.B. die Erstellung von Notfall- und Evakuierungsplänen, die Aufklärung der Bevölkerung oder Vorhersage und Frühwarnung. Solche Maßnahmen können sehr wirksam sein: Beim Dezemberhochwasser 1993 trat in der Kölner Altstadt ein Schaden von 150 Mio. DM auf (Vogt, 1995). Ein Jahr später, im Januar 1995, trat bei einem um einige Zentimeter höheren Wasserstand ein Schaden von 65 Mio. DM ein – eine dramatische Schadenreduktion, die einer erhöhten Bereitschaft zugeschrieben wird (Fink et al., 1996, Plate et al., 1999).
- **Notfallhilfe:**  
Beim Eintritt von Überflutungen trägt auch die Notfallhilfe (z.B. Aktivierung von Notfallplänen, Koordination von Rettungsmaßnahmen) ganz wesentlich zur Schadenreduktion bei.

Es existieren also vielfältige Maßnahmen zur Reduzierung von Hochwasserschäden. Dabei ist zu beachten, dass diese Maßnahmen bei verschiedenen Hochwasserereignis-

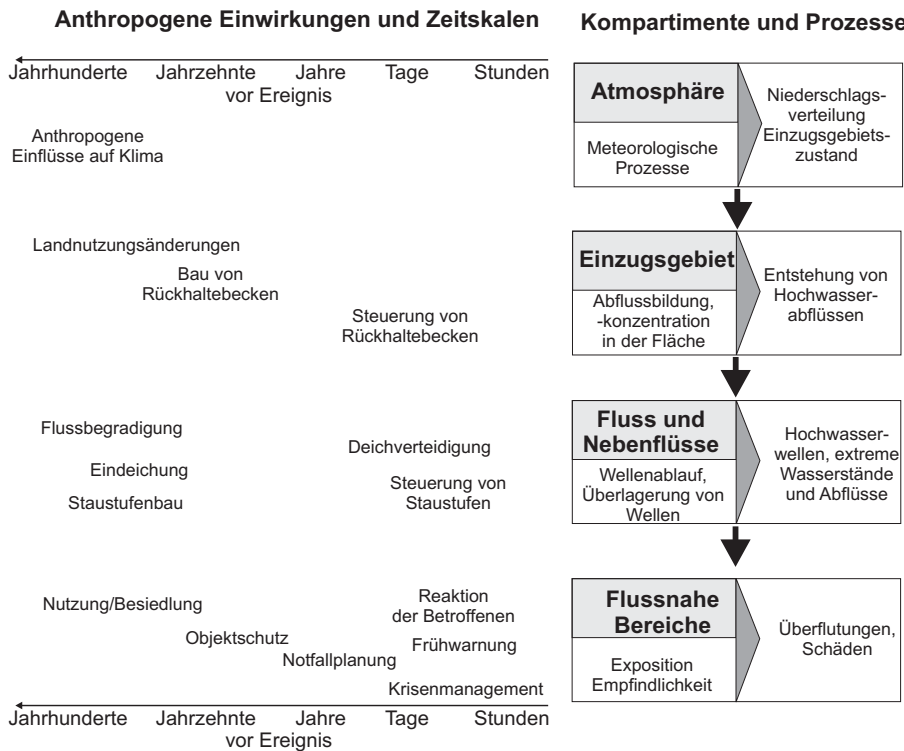


Abbildung 1.1: Wirkungskette Flussüberschwemmungen: Verschiedene Prozesse in unterschiedlichen Kompartimenten tragen zur Entstehung von Hochwasserkatastrophen bei. Dabei sind vielfältige anthropogene Einflüsse wirksam, die das Hochwasserrisiko verschärfen oder mindern können.

sen (z.B. Hochwasser in kleinen bzw. großen Einzugsgebieten, häufige bzw. seltene Ereignisse) unterschiedlich wirksam sind (DVWK, 2003). Diese Vielfältigkeit erschwert Entscheidungen im Hochwasserschutz. Hinzu kommt, dass:

- Hochwasserschutzmaßnahmen Auswirkungen auf andere Bereiche (z.B. Ökologie, wirtschaftliche Entwicklung) haben,
- komplizierte Zusammenhänge zwischen Schutzmaßnahmen und ihren Folgen vorliegen,
- verschiedene Bevölkerungsgruppen von Hochwasserschutz und Hochwasserschäden unterschiedlich betroffen sind.

Diese Komplexität bei Entscheidungen des Hochwasserschutzes macht es erforderlich, Sicherheitsbeurteilungen und die Bewertung und Bemessung von Schutzmaßnahmen innerhalb eines konsistenten und transparenten Referenzrahmens vorzunehmen. Es ist eine einheitliche Systematik erforderlich, um aus der Fülle der möglichen Schutzmaßnahmen eine optimale Auswahl zu treffen. Die gängigen Sicherheitskonzepte, die den wasserwirtschaftlichen Regelwerken zugrunde liegen, reichen dazu nicht aus (DFG,

1995, DKKV, 2003). Selbst innerhalb der Gemeinschaft der *Hochwasserrisikoexperten* gibt es keine allgemein akzeptierten Ansätze. Dies führt zu einer unnötigen Gefährdung von Menschenleben und Behinderung von Entwicklungsmöglichkeiten und zu öffentlichen Ausgaben, die das Risiko nicht entsprechend reduzieren.

Im Zuge der Aufarbeitung des Elbehochwassers 2002 (DKKV, 2003) wird auch der heute stattfindende Übergang von einer undifferenzierten Gefahrenabwehr zu einer interdisziplinären Risikokultur (PLANAT, 1998, Gindi, 2002) thematisiert. Der traditionelle Ansatz des Hochwasserschutzes ist geprägt durch:

- **Reaktion statt Prävention:**  
Hochwasserschutz wird erst dann aktiv, wenn Schäden eingetreten sind. Dann wird der Schutz häufig so ausgelegt, dass man sicher wäre, sollte dieses Ereignis noch einmal eintreten. Hochwasserschutz ist also rückwärtsgerichtet.
- **Sicherheitsversprechen statt Offenlegen von Risiken:**  
Für Hochwasser gilt, dass die Gefahr von schadenbringenden Abflüssen immer gegeben ist. Auch nach Umsetzung von Schutzmaßnahmen verbleibt ein Restrisiko und dieses ist abzuschätzen und – unter den gegebenen ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Randbedingungen – auf ein akzeptables Maß zu reduzieren (WBGU, 1997:117). Gerade in dieser Hinsicht ist jedoch ein großes Defizit spürbar. Viel zu häufig wird das Restrisiko vernachlässigt. Häufig fühlen sich z.B. die Anwohner im Hinterland von Deichen sicher, auch wenn klar ist, dass Deiche nur gegen Hochwasser einer bestimmten Stärke schützen können. Dieses trügerische Sicherheitsempfinden resultiert auch dadurch, dass in vielen Fällen nur widerwillig über solche Gefahren informiert wird (DKKV, 2003).
- **Unausgewogene Entscheidungen statt adäquater Schutzziele:**  
Die Praxis des Hochwasserschutzes basiert häufig auf intransparenten und unangewogenen Entscheidungen. So hat z.B. der 100-jährliche Abfluss eine dominierende Stellung als Bemessungsgröße im Hochwasserschutz in Deutschland, in vielen Fällen ohne detaillierte Analysen und Diskussion anderer Szenarien und Schutzziele.

Diesem traditionellen Sicherheitsversprechen, das auch durch Verdrängen und Beliebigkeit geprägt ist, wird zunehmend eine Risikokultur entgegengesetzt, die sich der Bedrohung durch Hochwasser bewusst ist, und versucht, das Hochwasserrisiko sowie Schutzmaßnahmen und ihre Wirkungen auf das Risiko transparent darzustellen und zu beurteilen. Dies bildet die Grundlage für einen adäquaten Umgang mit dem Risiko.

Die Grundlage zur Konzeption und Bemessung von Schutzmaßnahmen im Sinne dieser Risikokultur ist die Identifizierung und Quantifizierung von Risiken. Was nicht bekannt ist oder nicht wahrgenommen wird, lässt sich weder steuern noch abstellen. Diese Aufgabe der Risikoanalyse, die Identifizierung und Quantifizierung des Hochwasserrisikos, steht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Aspekte der Risikowahrnehmung und -bewertung sowie des Umgangs mit dem Risiko werden soweit diskutiert, dass die Einbettung von Risikoanalysen in das gesellschaftliche Umfeld deutlich wird.

## 1.2 Ziele und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gibt einen umfassenden Überblick über den Stand des Wissens zur Analyse von Hochwasserrisiken. Es werden die Grenzen der heute eingesetzten Verfahren diskutiert sowie neue Ansätze aufgezeigt. Dabei wird besonderes Gewicht gelegt auf:

- methodische Aspekte zur Hochwasserrisikoanalyse:  
Welche Methoden wurden in verschiedenen sicherheitsrelevanten Gebieten zur Abschätzung von Risiken entwickelt? Wie werden diese Methoden im Hochwasserschutz eingesetzt? Welche Informationen, Daten, Modelle und Ansätze sind für *gute* Risikoanalysen notwendig?
- die Abschätzungssicherheit von Risikoaussagen:  
Lassen sich Risikoanalysen validieren? Wie verlässlich sind Risikoanalysen im Hochwasserschutz?

Die Frage nach der Abschätzungssicherheit ist in Anbetracht einer zunehmenden Anzahl von Risikoanalysen im Hochwasserschutz von besonderer Bedeutung. Es gibt viele Stimmen, die auf die Unsicherheiten von Risikoanalysen hinweisen und davor warnen, Risikoanalysen ein zu großes Gewicht beizumessen. Beispielsweise folgern McDonald et al. (2000) bezüglich der Sicherheitsbeurteilung von Talsperren: *„... methodologies for estimating the chance of dam failure are poorly developed and, at the present time, do not provide a defensible basis for the conclusive sign off on the safety status of a dam.”* Noch schärfer formuliert Klemeš (2002): *„Reliance on so-called rigorous mathematical approaches to risk analysis may pose the greatest risk to the planning and design of water resources systems.”*

Zur Beantwortung dieser Fragen wird die internationale Literatur zu Hochwasserrisikoanalysen aufgearbeitet und in Zusammenhang gestellt mit Methoden und Vorgehensweisen, wie sie in anderen sicherheitsrelevanten Bereichen entwickelt wurden. Kap. 2 führt die grundlegenden Begriffe der Risikoanalyse und des Risikomanagements ein. Es wird diskutiert, wie Risikoanalysen in die Bewertung von Risiken einfließen. Kap. 3 stellt die Methoden zusammen, die in sicherheitsrelevanten Bereichen, z.B. zur Sicherheit von Kernkraftwerken, eingesetzt werden. Da solche sicherheitswissenschaftlichen Ansätze bisher nur zögerlich auf Naturrisiken angewandt wurden (Hollenstein, 1997), wird in den folgenden Kapiteln diskutiert, ob und wie Hochwasserrisikoanalysen durch die Übertragung von Methoden aus anderen Gebieten weiterentwickelt werden können. Kap. 4 diskutiert die Besonderheiten des Hochwasserrisikos und verdeutlicht besonders sensible Aspekte der Hochwasserrisikoanalyse. Anschließend (Kap. 5) werden die Bemessungskonzepte vor dem Hintergrund der Ansätze aus Kap. 2 und 3 bewertet. Kap. 6 und 7 strukturieren die Ansätze zur Identifizierung von Schadenszenarien einschließlich der Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten. Die Methoden zur Abschätzung der Auswirkungen von Hochwasserereignissen werden in Kap. 8 diskutiert. Da dieses Feld bisher vernachlässigt wurde, ist die Frage nach der Güte solcher Abschätzungen von besonderer Bedeutung. Kap. 9 führt die Aussagen zu Hochwasserabflüssen und zu Hochwasserschäden zusammen.



Weichselgartner (2000) weist darauf hin, dass Hochwasserkatastrophen das Ergebnis gesellschaftlicher Entscheidungsprozesse verschiedenster Bereiche, wie z.B. Raumplanung, Landnutzung oder Katastrophenvorsorge, sind. Davon hängt ab, welche Auswirkungen extreme Naturereignisse auf die Gesellschaft haben und ob aus solchen Ereignissen Katastrophen werden. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Aspekte Sicherheit und Risiko aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht. Auf die Bedeutung der Risikowahrnehmung und -bewertung unter dem Einfluss sozialer, kultureller, politischer und wirtschaftlicher Randbedingungen wird an verschiedenen Stellen, insbesondere in Kap. 10, hingewiesen. In Kap. 11 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und Forschungs- und Entwicklungsempfehlungen abgeleitet.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den international eingesetzten Methoden zur Hochwasserrisikoanalyse. Da einige Aspekte des Hochwasserrisikos, wie z.B. die Schadenabschätzung, einen starken regionalen Bezug haben, liegt der Schwerpunkt der gezeigten Daten und Beispiele auf Deutschland. Die Konzepte sind jedoch beliebig übertragbar.

# Kapitel 2

## Sicherheit und Risiko: Begriffe und Konzepte

Alle menschlichen Aktivitäten sind mit Risiken verbunden, seien es die tägliche Autofahrt zur Arbeitsstelle, die Einnahme von Medikamenten, Segelfliegen oder die Besiedlung von potenziellen Überschwemmungsflächen eines Flusses. Grundsätzlich erscheint ein rationaler Umgang mit Risiken einfach: Die Risiken müssen identifiziert, analysiert und bewertet werden, dann muss festgelegt werden, was – in Anbetracht des Nutzens der jeweiligen Aktivität – akzeptierbar ist und schließlich ist durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen oder durch Verzicht auf die Aktivität das Risiko auf das akzeptierbare Maß zu reduzieren. Weiterhin sind Vorkehrungen für das dann noch bestehende Risiko, das sog. Restrisiko zu treffen. Dieser Prozess eines rationalen Umgangs mit Risiken wird als Risikomanagement bezeichnet. In diesem Kapitel wird ein Referenzrahmen für die nachfolgenden Sicherheits- und Risikobetrachtungen im Hochwasserschutz gegeben. Grundlegende Begriffe und Konzepte werden eingeführt.

### 2.1 Begriffe

Viele Begriffe mit Relevanz für die Sicherheit von Menschen und ihrer Umwelt sind nicht einheitlich definiert (Kuhlmann, 1995, Yoe, 1996, Smith, 2001). Deshalb wird erläutert, wie die grundlegenden Begriffe in der vorliegenden Arbeit verwendet werden. Diese Definitionen sind mit Beispielen aus dem Bereich des Hochwasserrisikos erläutert, sie können jedoch auf andere Risiken übertragen werden.

#### RISIKOELEMENT

Als Risikoelemente werden alle Objekte bezeichnet, die durch die betrachtete Gefahr bedroht sind und in einer Risikoanalyse betrachtet werden müssen. Risikoelemente können Personen, Sachkapital (Gebäude, Infrastruktur, ökonomische Systeme etc.), Naturkapital (Tierpopulationen, Naturschutzgebiete etc.) und Kulturgüter sein. Bei Risikoanalysen werden häufig einzelne Objekte zu größeren Risikoelementen zusammengefasst. Beispielsweise können alle hochwassergefährdeten Objekte innerhalb einer Postleitzahlenzone zu einem Risikoelement aggregiert werden.

## SCHADEN

Der Begriff Schaden wird als Verletzung eines Gutes definiert (Kuhlmann, 1995:19). Naturwissenschaftlich-technische Analysen beschränken sich in der Regel auf physisch messbare Veränderungen von Gütern, wobei diese Veränderungen mit hoher gesellschaftlicher Übereinstimmung als nicht wünschenswert beurteilt werden (Renn, 1992). Dies sind häufig Beeinträchtigungen von Leben und Gesundheit oder Vernichtung von Vermögen. Je nach Schadenart wird die Größe eines Schadens in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt, beispielsweise Menschenleben, Verletzte oder Geldwert. Zunehmend werden weitere Schadenkategorien, insbesondere zur Erfassung von Beeinträchtigungen von Natur und Umwelt, bei Sicherheitsfragen einbezogen (WBGU, 1999).

Die Frage, was als Schaden zu betrachten ist, kann durchaus kontrovers diskutiert werden: Wer definiert erwünschte und unerwünschte Folgen? Reicht es aus, Tote, Verletzte und materielle Verluste zu erfassen, während psychische Belastungen und Verletzungen sozialer Beziehungen oder kultureller Werte vernachlässigt werden?

In der Ökonomie, der Psychologie und den Sozialwissenschaften wird ein weit gefasster Schadenbegriff verwendet (Renn, 1997, WBGU, 1999). Zusätzlich sind hier auch nicht-physisch messbare, symbolische oder immaterielle Verluste als Schaden von Bedeutung, die in der Ökonomie durch den subjektiven Nutzenbegriff erfasst werden. In sozialwissenschaftlichen Untersuchungen spielt auch die Verteilung dieser Verluste auf unterschiedliche Gruppen in der Gesellschaft eine Rolle: Eine ungleiche Verteilung des Schadens bzw. Nutzens einer Aktivität kann mehr politische Sprengkraft besitzen als die (aggregierte oder durchschnittliche) Höhe des Schadens bzw. Nutzens (WBGU, 1999). Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Schadendefinition, wie sie üblicherweise in naturwissenschaftlich-technischen Analysen verwendet wird.

## SCHADENPOTENZIAL

Das Schadenpotenzial ist der einer gefährlichen Situation zugehörige Teil der Risikoelemente, der durch diese Situation potenziell Schaden erleidet. Betrachtet man z.B. direkte Sachschäden, so ist das ökonomische Schadenpotenzial für ein 200-jährliches Hochwasser derjenige Teil der Vermögenswerte, der innerhalb der 200-jährlichen Überschwemmungsfläche liegt. Das Schadenpotenzial ist der obere Grenzwert für Schadenabschätzungen. Das maximale Schadenpotenzial ist mit dem *worst-case*-Szenario verbunden, z.B. entspricht das maximale ökonomische Schadenpotenzial der Summe der Vermögenswerte, die durch das größte anzunehmende Hochwasserereignis geschädigt werden könnten.

## VERSAGEN

Als Versagen werden solche Zustände bezeichnet, bei denen das betrachtete System eine festgelegte Leistung nicht vollbringt. Ein Versagensfall eines Hochwasserschuttedeiches ist z.B. das Überströmen des Deiches mit einer dadurch verursachten Überflutung des zu schützenden Areals. Ein System kann durch eine Vielzahl von Mechanismen versagen, und Versagensfälle werden durch eine Überlagerung von verschiedenen Ereignissen und Prozessen hervorgerufen.

## GEFAHR, GEFÄHRDUNG

Als Gefahr bzw. Gefährdung wird ein Prozess definiert, der dann zu Schäden führt, wenn sich verletzbare Objekte in seinem Wirkungsbereich befinden. Gefahr und Gefährdung beinhalten also lediglich die Möglichkeit eines Schadens. Verschiedentlich wird zwischen Gefahr und Gefährdung weiter differenziert. Vor allem in der Literatur zu Naturkatastrophen wird Gefahr als die Möglichkeit eines Schadens bezeichnet, während der Begriff Gefährdung Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Schadenereignissen einschließt (Plate et al., 2001).

## WAHRSCHEINLICHKEIT

Der Begriff der Wahrscheinlichkeit spielt eine zentrale Rolle bei Sicherheitsfragen. Im Allgemeinen sind die Einflüsse so komplex, unübersichtlich und variabel, dass eine exakte Vorhersage von Schadenereignissen nicht möglich ist. Die Prozesse, die zu Schadenereignissen führen, werden deshalb in der Regel als Zufallsprozesse verstanden und durch Wahrscheinlichkeitsfunktionen beschrieben.

Es gibt verschiedene Interpretationen des Begriffs Wahrscheinlichkeit (Watson, 1994, Winkler, 1996). Die klassische Interpretation, die im 17. bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts im Wesentlichen von Pascal, James und Daniel Bernoulli sowie Laplace entwickelt wurde, basiert auf der Vorstellung von gleich wahrscheinlichen Ereignissen, wie sie bei Zufallsspielen, z.B. dem Würfeln, auftreten. Dabei ergibt sich die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses aus dem Verhältnis der Anzahl der Realisierungen, für die das Ereignis wahr ist, zu der Gesamtanzahl der Ereignisse.

Eine weitere Definition wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts von Venn, von Mises und Reichenbach entwickelt (Watson, 1994). Dabei wird die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses als der Wert definiert, gegen den die relative Häufigkeit bei zunehmender Anzahl von Versuchen konvergiert. Dieser Ansatz liefert aus der statistischen Analyse eines Datensatzes sog. frequentistische Wahrscheinlichkeiten. Die Wahrscheinlichkeit ist also eine Eigenschaft einer theoretisch unendlichen Folge von Versuchen, der Grundgesamtheit.

Die klassische und die frequentistische Definitionen der Wahrscheinlichkeit sind streng genommen bei den meisten Sicherheitsproblemen nicht anwendbar. So kann bei Hochwasserereignissen nicht von gleich wahrscheinlichen Ereignissen gesprochen werden. Außerdem ist nicht klar, was die relevante Grundgesamtheit ist. Häufig handelt es sich um *einmalige* Ereignisse, die nicht mit Häufigkeitsinformationen verbunden sind. In solchen Fällen liegen nicht genügend Daten vor, um frequentistische Wahrscheinlichkeiten zu berechnen (Faber & Stewart, 2003).

Eine dritte Interpretation des Begriffs Wahrscheinlichkeit beschäftigt sich mit subjektiven Wahrscheinlichkeiten (oder Bayes-Wahrscheinlichkeiten). Diese sind ein Maß für den Grad des Vertrauens in eine Aussage (z.B. Schneider, 1994, Watson, 1994, Kuhlmann, 1995, Parent & Bernier, 2003). Die Aussage eines Experten: "Die Wahrscheinlichkeit, dass der betrachtete Deichabschnitt einer bestimmten Belastung (beispielsweise vorgegeben durch Höhe und Dauer eines extremen Wasserstandes) standhält, ist 95%" liefert eine subjektive Wahrscheinlichkeit.

Subjektive Wahrscheinlichkeiten geben die Meinung der befragten Person wieder und sind daher von der Information abhängig, die der Person zum Zeitpunkt der Aussage zur Verfügung steht. Da verschiedene Personen über verschiedene Informationen bezüglich eines Ereignisses verfügen können, und eine Person im Laufe der Zeit neue Informationen erhalten kann, ist es schwierig, von *der* Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses zu sprechen. Verschiedene Personen und eine Person zu verschiedenen Zeiten können berechtigterweise demselben Ereignis verschiedene Wahrscheinlichkeiten zuordnen. Der subjektive Ansatz bedeutet jedoch nicht, dass Wahrscheinlichkeiten beliebig vergeben werden können: Die Axiome der Wahrscheinlichkeitsrechnung gelten für subjektive Wahrscheinlichkeiten ebenso. Mit dem Satz von Bayes (Schneider, 1994, Parent & Bernier, 2003) können verschiedene Informationen bei der Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt und subjektive und frequentistische Wahrscheinlichkeiten kombiniert werden.

Watson (1994) und Winkler (1996) diskutieren die Anwendung dieser verschiedenen Interpretationen des Wahrscheinlichkeitsbegriffs im Hinblick auf Risikoanalysen. Sie folgern, dass die klassische und die frequentistische Interpretationen keine geeignete Basis sind und bei derart komplexen Problemen und seltenen Ereignissen keine wahren, objektiven Wahrscheinlichkeiten ableitbar sind. Die subjektive Interpretation ist befriedigender, weil sie der Subjektivität Rechnung trägt und nicht eine Objektivität vorgibt, die nicht erreichbar ist.

#### ÜBERSCHREITUNGSWAHRSCHEINLICHKEIT, JÄHRLICHKEIT, WIEDERKEHRINTERVALL

Ein zentraler Wahrscheinlichkeitsbegriff bei vielen Sicherheitsfragen ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit ( $P_E$ , exceedance probability). Sie ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Wert, im Hochwasserschutz z.B. der Wasserstand, ab dem ein Schaden eintritt ( $h_D$ ), in einem gegebenen Zeitintervall überschritten wird:

$$P_E = P(h > h_D) \quad (2.1)$$

Als Zeitintervall wird zumeist ein Jahr verwendet. In diesem Fall ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit und der Jährlichkeit  $T$  (bzw. dem mittleren Wiederkehrintervall):

$$P_E = 1/T \quad (2.2)$$

#### VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEIT, ZUVERLÄSSIGKEIT

Weitere wichtige Wahrscheinlichkeitsbegriffe sind Zuverlässigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit. Zuverlässigkeit ( $P_R$ , reliability) ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete System während einer festgelegten Dauer (z.B. ein Jahr oder die Nutzungsdauer eines Bauwerks) eine festgelegte Funktion erfüllt, also nicht versagt. Die Versagenswahrscheinlichkeit ( $P_F$ , failure probability) ergibt sich als komplementäre Wahrscheinlichkeit:

$$P_R = 1 - P_F \quad (2.3)$$

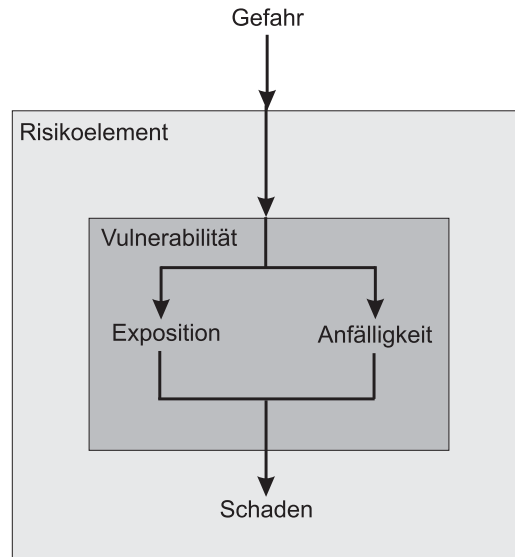


Abbildung 2.1: Definition des Begriffs Vulnerabilität

## VULNERABILITÄT

Während sich die Begriffe Gefahr und Gefährdung auf gefährliche Prozesse beziehen, deckt der Begriff Vulnerabilität die Schadenseite ab. Die Vulnerabilität bestimmt, wie groß der Schaden aufgrund eines bestimmten physischen Ereignisses ist. Sie setzt sich aus den beiden Komponenten Exposition und Anfälligkeit zusammen.

Der Begriff Vulnerabilität soll am Beispiel des Gesundheitsrisikos, das von einer chemischen Anlage ausgeht, illustriert werden (Abb. 2.1). In diesem Falle bestimmt sie, welcher Gesundheitsschaden bei der Freisetzung eines Schadstoffes hervorgerufen wird. Die Vulnerabilitätsanalyse umfasst zwei Schritte, die Expositionsanalyse und die Festlegung der Anfälligkeit (Dosis-Wirkungs-Beziehung). Die Expositionsanalyse schätzt ab, wer welcher Gefährdung unterliegt, also wieviele bzw. welche Personen durch einen Störfall einer gefährlichen Schadstoffkonzentration ausgesetzt werden. Im zweiten Schritt werden mittels der Dosis-Wirkungs-Beziehung die Gesundheitsschäden (Wirkung) der betroffenen Menschen abgeschätzt, die mit einem bestimmten Schadstoffniveau (Dosis) konfrontiert werden. Bei beiden Schritten ist die Variabilität innerhalb der betroffenen Gruppe zu beachten. So variiert die Dauer der Exposition zwischen der Gruppe der Arbeiter in der Anlage und den Bewohnern eines im Einflussbereich liegenden Wohngebietes. Ebenso beeinflusst die Variabilität innerhalb der Betroffenen (z.B. Körpergewicht, Alter) und die unterschiedlichen Aufnahmepfade (z.B. inhalativ, oral) die Anfälligkeit.

Die Erfassung der Vulnerabilität wird auch als Konsequenzanalyse bezeichnet. Man geht von einem gefährlichen Prozess aus und versucht, seine negativen Konsequenzen abzuschätzen. Die Übertragung dieses Ansatzes auf Hochwasser bzw. Naturkatastrophen erscheint einleuchtend. Die Vulnerabilität einer Region, einer Gemeinde oder ei-

ner Bevölkerungsgruppe ergibt sich dann als zu erwartender Schaden bei Eintritt eines extremen Abflusses bzw. Naturereignisses (Plate et al., 1999:23).

In der neueren Literatur zu Naturkatastrophen gibt es eine lebhaft diskutierte Diskussion des Begriffs Vulnerabilität (Blaiky et al., 1994, Comfort et al., 1999, Mileti, 1999, Smith, 2001, Plate, 2002, Green, 2003). Diese Diskussion, die vorwiegend politische, ökonomische, kulturelle und psychologische Aspekte berührt, kann hier nicht wiedergegeben werden. Es soll jedoch angemerkt werden, dass Vulnerabilität ein komplexer Begriff ist, der unterschiedlich verstanden wird. Es lassen sich naturwissenschaftlich-orientierte und sozio-ökonomische Konzepte des Begriffes Vulnerabilität unterscheiden (Feldbrügge & von Braun, 2000). Die naturwissenschaftlich-orientierten Konzepte werden durch das eben skizzierte Verständnis von Vulnerabilität gekennzeichnet – die Vulnerabilität bestimmt den Schaden, der bei einem Extremereignis zu erwarten ist. Je größer die Vulnerabilität, desto größer sind die Schäden, die durch ein Extremereignis verursacht werden.

Sozio-ökonomische Konzepte sind dagegen weniger ereigniszentriert, sondern legen den Fokus auf die politischen, ökonomischen, gesellschaftlichen und psychologischen Aspekte, die Menschen anfällig machen und ihre Vorsorge- und Bewältigungsmöglichkeiten beschränken (Blaiky et al., 1994, Comfort et al., 1999). Im Zentrum des Interesses liegt nicht die Empfindlichkeit (Wie stark werden Menschen, Gemeinden etc. durch ein Extremereignis geschädigt?), sondern das Bewältigungspotenzial (Welche Mechanismen und Randbedingungen beeinflussen das Potenzial von Menschen, Gemeinden etc. mit Extremereignissen umzugehen?). Green (2003) bezeichnet diese beiden Sichtweisen als passive und aktive Vulnerabilität. Katastrophen werden als Ausdruck eines dynamischen Prozesses, als das Ergebnis einer Summe von Entscheidungen während langer Zeiträume gesehen (*socially constructed disasters*, Comfort et al., 1999:43).

Die sozio-ökonomischen Konzepte zu Vulnerabilität sind außerordentlich vielfältig, so dass die Definition von Vulnerabilität vage bleibt und uneinheitlich ist (Feldbrügge & von Braun, 2000, Weichselgartner & Deutsch, 2002, Green, 2003). Dementsprechend schwierig ist ihre Quantifizierung. Deshalb wird die Entwicklung von Vulnerabilitätsindikatoren bzw. -indizes gefordert (Comfort et al., 1999:43). Plate (2002, 2003) entwickelt ein Konzept zur Erfassung der Vulnerabilität mit solchen Indikatoren, wobei eine Katastrophe als ein Zustand definiert wird, in dem die zeitvariable Vulnerabilität eine kritische Schwelle übersteigt. Weitere Versuche zur Ableitung von Indikatoren zur quantitativen Bewertung der Katastrophenanfälligkeit wurden von Lass et al. (1998) und Weichselgartner & Deutsch (2002) unternommen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein technisch-orientierter Vulnerabilitätsbegriff benutzt, und zwar im Sinne der genannten Konsequenzanalyse. Die Vulnerabilität eines Systems wird beschrieben durch seine Exposition und seine Anfälligkeit gegenüber einem bestimmten Hochwasser. Die unzweifelhaft wichtigen sozio-ökonomischen Aspekte, die Fragen, durch welche psychologischen, politischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und kulturellen Einflüsse Menschen verletzbar werden, werden hier nicht behandelt.

## RESILIENZ, ELASTIZITÄT

Resilienz oder Elastizität bezeichnen die Eigenschaft eines Systems, nach einer Störung in seinen Ausgangszustand oder einen anderen Gleichgewichtszustand zurückzukehren (Green, 2003). Die Resilienz eines Systems bestimmt, ob ein System sich von einer Störung erholt, wie schnell dies passiert, von welchen Störungen es sich erholt und was seine Reaktion auf eine Störung ist (de Bruijn, 2003). Im Gegensatz zu elastischen Systemen stehen spröde Systeme, die bis zu gewissen kritischen Belastungen kaum eine Reaktion zeigen, dann aber kollabieren. Vereinfacht kann gesagt werden, dass die Vulnerabilität einer Gemeinschaft bestimmt, welcher Schaden bei einem gewissen Hochwasserereignis eintritt, während die Resilienz festlegt, wie schnell die Gemeinschaft sich von dem Ereignis erholt (Plate, 2002). Wie die Vulnerabilität hängt die Resilienz von vielen, teilweise schwer fassbaren Faktoren ab. Eine Diskussion über die Resilienz verschiedener Hochwasserschutzstrategien (Frühwarnsystem, Deiche) findet sich bei de Bruijn (2003).

## RISIKO

Im alltäglichen Sprachgebrauch bedeutet Risiko die Möglichkeit, einen Schaden zu erleiden und ist damit vergleichbar mit dem Begriff Gefahr. In der Sicherheitswissenschaft beinhaltet der Begriff Risiko die beiden Aspekte Eintrittswahrscheinlichkeit und die Größe eines Schadens (Kaplan & Garrick, 1981, Schneider, 1994, Kolluru & Brooks, 1995, Kuhlmann, 1995, WBGU, 1999, Plate et al., 2001). Das Risiko ergibt sich aus der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität (Abb. 2.2). Dementsprechend kann das Risiko vermindert werden, indem die Gefährdung (z.B. durch die Vergrößerung des Wasserretentionspotenzials im Einzugsgebiet) und/oder die Vulnerabilität (z.B. durch Rücknahme von hochwertigen Nutzungen in gefährdeten Zonen oder Einrichtung eines Warnsystems) verringert werden.<sup>1</sup>

Das Risiko  $RI$  kann durch den Erwartungswert des Schadens  $E\{D\}$  innerhalb eines Zeitintervalls  $\Delta t$  ausgedrückt werden:

$$RI = \frac{E\{D\}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int D f_D(D) dD \quad \left[ \frac{\text{Schadeneinheit}}{\text{Zeiteinheit}} \right] \quad (2.4)$$

Dabei ist  $D$  die Zufallsvariable Schaden und  $f_D(D)$  ihre Dichtefunktion. Das Risiko hat damit dieselbe Dimension wie der Schaden (z.B. Anzahl der Todesfälle oder Geldeinheiten) bezogen auf eine Zeiteinheit. Üblicherweise beziehen sich Aussagen zu Hochwasserrisiken auf ein Jahr, so dass  $\Delta t = 1$ . Besteht der mögliche Schaden aus  $k$  diskreten Schadenereignissen mit dem jeweiligen Schadenumfang  $D_i$ , so gilt:

$$RI = \sum_{i=1}^k P_i D_i \quad \left[ \frac{\text{Schadeneinheit}}{\text{Zeiteinheit}} \right] \quad (2.5)$$

mit  $P_i$  als der Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadenereignisses  $i$  je Zeiteinheit  $\Delta t$ . Diese beiden Aspekte des Risikos finden sich schon in einer Veröffentlichung des Pariser Port-Royal-Klosters aus dem Jahre 1662: Die Angst vor einem Schaden sollte

<sup>1</sup>Okrent (1980) gibt ein einfaches Beispiel für den Unterschied zwischen Gefährdung und Risiko. Zwei Personen überqueren den Ozean, eine in einem Ruderboot, die andere in einem Passagierschiff. Beide sind der gleichen Gefährdung ausgesetzt, nämlich Stürmen und hohen Wellen. Die Person im Ruderboot ist jedoch anfälliger und hat damit ein viel höheres Risiko zu kentern und zu ertrinken.



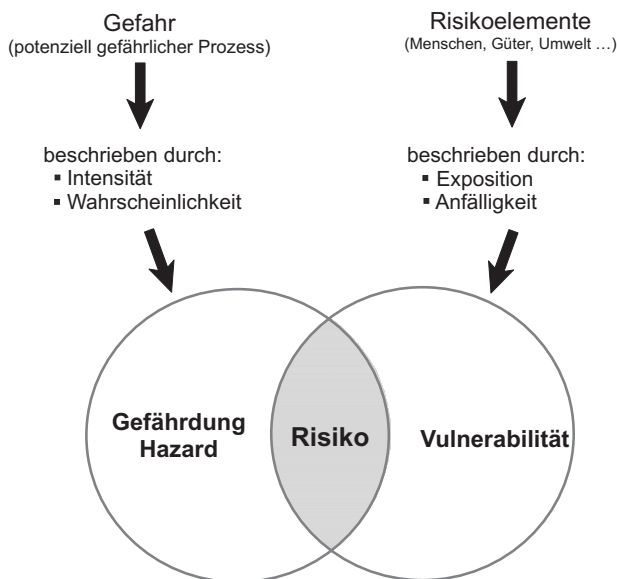


Abbildung 2.2: Risiko als Resultat der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität (DKKV, 2003)

nicht nur proportional zur Größe des Schadens, sondern auch zur Wahrscheinlichkeit des Ereignisses sein (Bernstein, 1996).

Der Begriff des Risikos, wie er eben eingeführt wurde, entstammt dem Feld der technischen Risikoabschätzung. Diese technische Sicht spiegelt nicht alle Aspekte des Begriffs Risiko wider (Pidgeon et al., 1992, Renn, 1993, Renn, 1997, Slovic, 1998). So ist beispielsweise der Erwartungswert des Schadens, der bei technischen Risikoabschätzungen häufig verwendet wird (aber nicht verwendet werden muss!), in vielen Situationen kein geeignetes Maß für die Beschreibung des Risikos. Die Angabe des Risikos in einer einzigen Zahl, dem Erwartungswert, stammt aus der Versicherungswirtschaft und hat dort ihre Berechtigung: Es geht um monetäre Erstattungen, und Schadensfälle sind im Allgemeinen häufig. Deshalb können einzelne Risiken addiert und gegeneinander verrechnet werden. Der Erwartungswert sagt aber beispielsweise nichts über die Risikoaversion der Gesellschaft aus, also der Neigung, Ereignisse mit großen Schadenfolgen zu meiden. Auf diese Aspekte der Risikoakzeptanz und Risikobewertung wird in Kap. 10 hingewiesen.

#### OBJEKTRISIKO, INDIVIDUALRISIKO und KOLLEKTIVRISIKO

Risiken lassen sich aus verschiedener Sicht betrachten und bewerten. Man spricht vom Objektrisiko, wenn man das Risiko eines Objektes, definiert als die kleinste untersuchte Einheit der Risikoanalyse, bestimmt (BUWAL, 1999). Ein Objekt ist z.B. ein Gebäude, ein Betrieb, eine abgegrenzte Fläche oder ein gefährdeter Abschnitt einer Verkehrsachse. Bezieht sich die Risikobetrachtung nicht auf ein Objekt, sondern auf alle gefährdeten Objekte, so spricht man vom Globalrisiko, das sich als Summe über alle Objektrisiken ergibt.

Diese Unterscheidung wird insbesondere bei Personenschäden vorgenommen. Hierbei spricht man vom individuellen Risiko (entspricht dem Objektrisiko) und dem kollektiven Risiko (entspricht dem Globalrisiko bzw. dem gesellschaftlichen Risiko). Das Individualrisiko  $RI_I$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person im Bezugszeitraum geschädigt wird (siehe z.B. die Definition des Institute for Chemical Engineering, ICE: *"the frequency at which an individual may be expected to sustain a given level of harm from the realisation of specified hazards"*; Vrijling et al., 1998:142).

Das Globalrisiko  $RI_G$  bezieht sich dagegen auf alle Personen im Betrachtungsraum (z.B. die Definition des ICE: *"the relation between frequency and the number of people suffering from a specified level of harm in a given population from the realisation of specified hazards"*; Vrijling et al., 1998:142). Statistiken geben meist das Globalrisiko an, also beispielsweise die Todesfälle bei einer bestimmten Tätigkeit der Bevölkerung eines Landes. Solche Angaben sagen über das Risiko des Einzelnen nicht viel aus. Dabei ist zu berücksichtigen, wieviele Personen diese Tätigkeit ausgeübt haben, also wieviele Personen gefährdet waren:

$$RI_I = RI_G/m \quad (2.6)$$

mit  $m$  als der Anzahl der gefährdeten Personen. Allerdings gilt dieser Zusammenhang nur, falls alle Personen in der gefährdeten Gruppe die gleiche Anfälligkeit aufweisen. Dies ist im Regelfall nicht gegeben: Beispielsweise können Mitglieder einer bestimmten Altersgruppe stärker gefährdet sein.

#### HYDROLOGISCHES RISIKO

In der Literatur zu hydrologischen und wasserbaulichen Fragestellungen wird als hydrologisches Risiko häufig ein verkürzter Risikobegriff verwendet, der sich lediglich auf die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Abflussereignisses bezieht. Beispielsweise bezeichnen Chow et al. (1988) als hydrologisches Risiko die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb der Lebensdauer einer wasserbaulichen Anlage ein Abfluss  $Q$  über dem Bemessungswert  $Q_{DV}$  auftritt:

$$RI = 1 - [1 - P(Q > Q_{DV})]^n \quad (2.7)$$

mit  $n$  als der erwarteten Lebensdauer des Bauwerks. Dieser Risikobegriff kennzeichnet lediglich die Gefährdung und sagt nichts über das Schadenpotenzial und die Anfälligkeit aus.

#### SICHERHEIT

Eine hilfreiche Definition des Begriffs Sicherheit ist die Formulierung in den Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA, 1989): *"Sicherheit gegenüber einer Gefährdung besteht dann, wenn diese Gefährdung durch geeignete Maßnahmen unter Kontrolle oder auf ein akzeptierbar kleines Maß beschränkt wird."* Häufig wird Sicherheit als qualitativer Begriff verwendet (Schneider, 1994, Kuhlmann, 1995, Elms, 1999). Es ist nicht unbedingt notwendig, dass dieses akzeptierbar kleine Maß angegeben wird. Ein Gebäude gilt z.B. als sicher, wenn die gültigen Baunormen eingehalten werden.

Der Begriff Risiko, so wie er in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, unterscheidet sich in dreifacher Hinsicht vom Begriff Sicherheit. Erstens ist Risiko umfassender

als Sicherheit, da Risiko die möglichen Schäden einschließt. Zweitens ist Risiko ein quantitativer Begriff, während Sicherheit häufig qualitativ verwendet wird. Der dritte Unterschied liegt darin, dass das Risiko im Allgemeinen nicht Null sein kann<sup>2</sup>, jedoch vollständige Sicherheit vorhanden sein kann. Wenn z.B. die Eintrittswahrscheinlichkeit des Versagensfalls sehr klein ist, dann spricht man von einem sicheren System. Daraus folgt jedoch auch, dass selbst ein sicheres System versagen kann (Elms, 1999).

## 2.2 Management von öffentlichen Risiken

Menschen haben unterschiedliche Risikopräferenzen und unterschiedliche Strategien im Umgang mit Risiken. Risiken werden zuweilen auch um ihrer selbst willen gesucht. Auch wenn das menschliche Risikoverhalten irrationale Züge annehmen kann (Kuhlmann, 1995:434), so sollte der Einzelne die Freiheit haben, freiwillige Risiken einzugehen, deren Folgen er selbst trägt. Es kann nicht Aufgabe des Staates sein, den Einzelnen vor Risiken wie Drachenfliegen zu schützen, solange nicht zugleich die Rechte anderer gefährdet werden. Bedingung dafür ist, dass der dadurch der Gesellschaft entstehende Schaden, z.B. Kosten für Krankenpflege, durch Haftungssysteme abgedeckt ist (WBGU, 1999).

Deshalb wird zwischen privaten Risiken und öffentlichen Risiken unterschieden (Lind, 2002). Zu den privaten Risiken zählen alle Risiken, deren Auswirkungen sich auf die Person beschränken, die sich entscheidet, das Risiko einzugehen. Die folgende Diskussion bezieht sich auf öffentliche Risiken, zu denen das Hochwasserrisiko gehört. Die Schäden aufgrund von öffentlichen Risiken sind häufig *anonym*: Es ist im Voraus nicht abzusehen, welche Personen bei einem bestimmten Ereignis geschädigt werden.

### 2.2.1 Risikomanagement als Sicherheitsstrategie

Es lassen sich verschiedene Sicherheitsstrategien unterscheiden, z.B. die *Null-Risiko-Strategie*, also das Bestreben, das Risiko auf Null zu reduzieren. Dieser Ansatz zielt auf die Eliminierung eines Risikos unter allen Umständen – ungeachtet der Nutzen und Kosten oder der Größe des Risikos. Diese Strategie ist allerdings für die meisten Gefahren (Naturgefahren, Gefahren, die von technischen Anlagen ausgehen, etc.) nicht haltbar. Da mit jeder Aktivität ein Risiko verbunden ist, ist ein *Null-Risiko-Ziel* nur durch Unterlassen dieser Aktivität zu erreichen. Im Falle von Hochwasser bedeutet dies, Überflutungsflächen frei von Nutzungen zu halten, bzw. nur solche Nutzungen zuzulassen, bei denen Überflutungen keine nennenswerten Schäden verursachen. Dieser Ansatz ist nur in Ausnahmefällen möglich. Beispielsweise wurden in Rapid City in South Dakota nach der Hochwasserkatastrophe im Jahr 1972 mit den Nothilfemitteln alle betroffenen Häuser aufgekauft und umgesiedelt. Die Überflutungsflächen wurden in einen Grüngürtel umgewandelt, der aus Parks und Sportanlagen besteht (Domeisen

---

<sup>2</sup>Eine Null-Risiko-Situation ergibt sich nur dann, wenn die Wahrscheinlichkeit eines Schadens Null ist. Dies wäre beim Hochwasserschutz dadurch zu erreichen, dass alle Flächen, auf denen ein schadenbringendes Hochwasser eintreten kann, nicht genutzt würden.

et al., 1996). In Deutschland wurde diese Lösung – und zwar erstmals in größerem Stil – nach dem Elbehochwasser 2002 angewandt. Für die Bewohner des überfluteten Neubaugebiets Röderau-Süd wurden Entschädigungen gezahlt, um sie zu einem Umzug und Wiederaufbau an anderer Stelle zu bewegen (DKKV, 2003).

Eine andere, häufigere Strategie ist die implizite Ableitung von Sicherheitsstandards durch *trial and error*. Dabei werden Versagensfälle analysiert und das System neu bemessen, erfolgreiche Projekte werden wiederholt oder leicht modifiziert, so dass mit der Zeit (fast-)optimale und ökonomisch vernünftige Bemessungsregeln entstehen.<sup>3</sup> Diese Vorgehensweise wurde und wird immer noch im Hochwasserschutz angewandt. An vielen Flüssen wurden beispielsweise die Deiche immer dann – und nur dann – erhöht, wenn ein Hochwasser auftrat, gegen das die Deiche nicht mehr schützen konnten. Die Deiche wurden so weit erhöht, dass man bei einer Wiederholung dieses Hochwassers sicher wäre.

Die *trial and error*-Strategie hat den Nachteil, dass Lehrgeld bezahlt werden muss. Gehandelt wird erst, wenn man durch eingetretene Schäden klug geworden ist. Ein weiterer Nachteil ist, dass die entwickelten Sicherheitsstandards nicht auf einer konsistenten Grundlage basieren. Eine weit verbreitete Unterstrategie ist der Ansatz, sich bei der Entwicklung einer Technologie ausschließlich auf die Nutzen zu konzentrieren und sich um die Gefahren erst dann zu kümmern, wenn sie sichtbar werden. Lind et al. (1991) nennen einige Beispiele von Technologien (Einsatz von Asbest, Röntgenstrahlen etc.), deren Entwicklung vermutlich nicht möglich gewesen wäre, wenn damals die damit verbundenen Gefahren ebenso im öffentlichen Interesse gestanden hätten wie heute.

Die dritte und ideale Strategie ist ein rationales Risikomanagement. Dieses versucht, die Gefahren und Risiken zu identifizieren, zu quantifizieren, zu bewerten und durch Festlegung konsistenter Schutzziele beherrschbar zu machen. Dazu ist neben der Berücksichtigung der bisherigen Erfahrungen ein Vorausdenken, also eine Analyse der Gefährdung bzw. des Risikos, *bevor* ein Schadenfall eingetreten ist, notwendig. Ein solches Vorausdenken wird vom deutschen Gesetzgeber auch für bestimmte großtechnische Anlagen vorgeschrieben, bei denen ein Unfall besonders schwere Folgen hervorrufen kann (Kuhlmann, 1995:14). Das Vorausdenken ist auch notwendig in Bezug auf globale Risiken, also Risiken von globaler Reichweite (z.B. Anstieg des Meeresspiegels durch Klimaveränderungen, Änderung der ozeanischen Strömungsmuster), da ein Irrtum mit globalen Folgen zu inakzeptablen Schäden führen könnte (WBGU, 1999).

Das Ziel jedes Risikomanagements ist Sicherheit. Dabei sind zwei Aspekte zu berücksichtigen, die in Abb. 2.3 verdeutlicht sind. Einerseits ist das bestehende Risiko optimal zu reduzieren und andererseits ist das nach Umsetzung von Schutzmaßnahmen bestehende Restrisiko bestmöglich zu beherrschen.

---

<sup>3</sup>Die *trial and error*-Methode lässt sich in der Zeit des gotischen Kirchenbaus erkennen. Man besaß über das Tragwerkverhalten der damals neuen, ungewöhnlich schlanken Konstruktionen keinerlei Erfahrung. Die hohen Spitzbogen und Kuppelkonstruktionen wurden bei einem Einsturz während der Bauphase mit etwas konservativeren Abmessungen wieder neu errichtet (Schuëller & Bourgund, 1987).

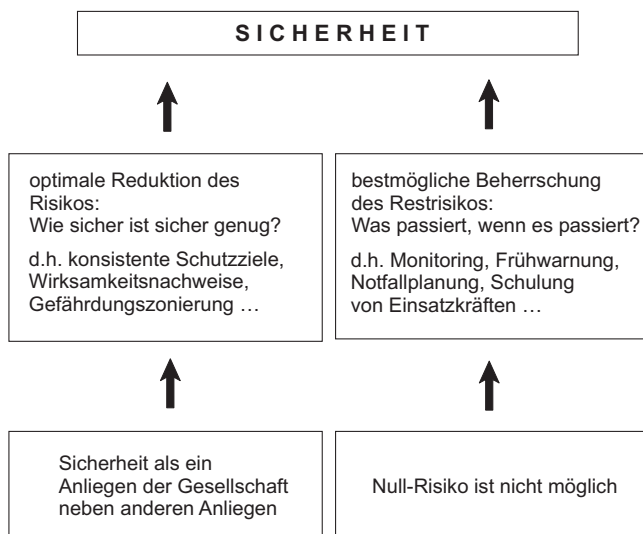


Abbildung 2.3: Optimale Reduzierung des Risikos und bestmögliche Beherrschung des Restrisikos als die zwei Säulen der Sicherheit

## 2.2.2 Optimale Reduzierung des Risikos

Sicherheit ist ein Bedürfnis der Gesellschaft, das in Konkurrenz zu anderen Bedürfnissen steht. Die Menschen möchten Sicherheit vor Hochwasserschäden, sie verlangen aber auch Investitionen in das Bildungs- oder Gesundheitswesen. Ressourcen, die in den Hochwasserschutz investiert werden, stehen für andere Bedürfnisse nicht zur Verfügung. Vorsorgemaßnahmen und Katastrophenschutz stehen somit in Konkurrenz zu anderen Bedürfnissen. In Anbetracht begrenzter Mittel stellt sich daher die Aufgabe nach der optimalen Reduzierung des Risikos. Es ist die Frage zu beantworten: Wie sicher ist sicher genug? Zur Beantwortung dieser Frage sind konsistente Sicherheitsstrategien und Schutzziele notwendig, es sind Gefährdungs-, Vulnerabilitäts- und Risikoanalysen durchzuführen, und die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen ist nachzuweisen.

Die Frage, ob eine Aktivität oder Schutzmaßnahme angemessen ist, wird häufig durch Abwägung von Gewinn und Verlust beantwortet (Kaplan & Garrick, 1981, Lind et al., 1991, Lind, 2002, Faber & Stewart, 2003, Pandey & Nathwani, 2004). Dabei wird argumentiert, dass es keinen Sinn macht, ein Risiko isoliert zu betrachten. Nur für sich betrachtet ist kein Risiko akzeptabel. Erst aus der gemeinsamen Betrachtung der Verluste und Nutzen sind sinnvolle Entscheidungen möglich: Was sind die möglichen Optionen und die Kosten und Nutzen jeder Option? Die Option mit dem besten Verhältnis von Nutzen und Verlusten wird gewählt.

Sehr konsequent wird dieser Ansatz von Lind et al. (1991), Lind (2001, 2002) und Pandey & Nathwani (2004) vertreten. Die Grundannahme ihres Ansatzes ist, dass die für

die öffentliche Sicherheit eingesetzten Mittel so zu verteilen sind, dass sie tatsächlich dem öffentlichen Interesse dienen. Ein Vorhaben wird dann als positiv gewertet, wenn es zu einem Gewinn für die Gesellschaft führt:

$$A(g, y, \dots a \dots) > 0 \quad (2.8)$$

- $A$  = Akzeptabilitätsfunktion
- $g$  = erwarteter finanzieller Gewinn des Vorhabens
- $y$  = erwartete Erhöhung der Lebenserwartung
- $a$  = andere relevante Indikatoren z.B. zur Erfassung ökologischer, sozialer oder kultureller Auswirkungen.

Dieser Ansatz erfordert, dass gemeinsame Maßstäbe von Gewinn und Verlust eingeführt werden und sinnvolle Quantifizierungen möglich sind. Sind Menschenleben gefährdet, so kommen soziale Indikatoren wie der Lebensqualitätsindex (*Life Quality Index, LQI*, Pandey & Nathwani, 2004) oder der Indikator qualitätsbereinigte Lebensjahre (*quality-adjusted life year, QALY*, Lind, 2002) zur Anwendung. Diese Indikatoren versuchen, die Lebenserwartung bei guter Gesundheit und die Lebensqualität zu erfassen. Ein Vorhaben führt zu einem Gewinn für die Gesellschaft, wenn z.B. der Gewinn an qualitätsbereinigten Lebensjahren den Verlust an solchen übersteigt. Diese Indikatoren basieren auf Parametern wie dem Bruttosozialprodukt und der Lebenserwartung.

Dieser Ansatz ist eine konsequente Anwendung von Methoden der Entscheidungsanalyse (Keeney & Raiffa, 1976, Bohnenblust & Schneider, 1987, Buck, 1995, Clemen, 1996). Diese stellt Techniken zur Entscheidungsfindung unter Unsicherheit zur Verfügung. Sie ermöglicht den Vergleich von Maßnahmen und Alternativen und das Finden einer optimalen Lösung auch bei mehrfachen, sich widerstrebenden Zielen. Zu diesen Methoden gehören die Kosten-Nutzen-Analyse und die Nutzwertanalyse. Diese Analysen basieren auf den gleichen Überlegungen; der Unterschied liegt darin, dass die Nutzen-Kosten-Analyse eine monetäre Bewertung vornimmt, während die Nutzwertanalyse Gewinn und Verlust in sog. Nutzwerten (*utilities*) ausdrückt. Nutzwerte sind die Rangzahlen auf einer Intervallskala, die bestimmten Zielen zugewiesen werden. Diese Nutzwerte sind in vielen Fällen schwieriger als monetäre Werte zu bestimmen, sie ermöglichen aber die Beschreibung von nicht-monetären Zielgrößen. Eine Variation der genannten Verfahren ist die Kosten-Wirksamkeits-Analyse (FEMA, 1998). Sie versucht diejenige Schutzmaßnahme zu bestimmen, die entweder ein gegebenes Schutzziel mit minimalen Kosten erreicht, oder für gegebene Kosten einen maximalen Schutz bereitstellt.

Die Techniken der Entscheidungsanalyse erlauben die Maximierung des erwarteten Gewinns (in monetären Einheiten oder Nutzwerteinheiten). Dazu ist es notwendig, das Risiko (in monetären Einheiten oder Nutzwerteinheiten) abzuschätzen. Das Risiko geht als Verlust in die Entscheidungsanalyse ein.

Eine Anwendung der Entscheidungsanalyse ist der Vergleich verschiedener Sicherheitsmaßnahmen in einem Aufwand-Risiko-Diagramm (Abb. 2.4). Die Kosten (Aufwendungen zur Risikoreduktion) und die Nutzen (Risikoreduktion) der möglichen Maßnahmen werden in diesem Diagramm aufgetragen. Jede Maßnahme zur Risikoreduktion erfordert Aufwendungen, und es gilt das Prinzip des kleiner werdenden Er-