

**Institut für Wasser und Gewässerentwicklung  
Universität Karlsruhe (TH)**

---

**Mikroskalige Ermittlung potenzieller  
Hochwasserschäden zur Gefahren- und  
Risikoanalyse**

**Andreas Kron**

**Heft 236**

---

Mitteilungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung  
-Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik-  
mit "Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium"  
der Universität Karlsruhe (TH)  
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Franz Nestmann, Ordinarius

---

**2008**

# **Mikroskalige Ermittlung potenzieller Hochwasserschäden zur Gefahren- und Risikoanalyse**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

von der Fakultät für  
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

**DISSERTATION**

von  
Dipl.-Ing. Andreas Kron  
aus Herberlingen

Tag der mündlichen Prüfung: 15.06.2007

Hauptreferent: Prof.-Dr.- Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann

Korreferent: Prof. Dr.- Ing. Lothar Stempniewski

Karlsruhe 2008

## Vorwort

Die Forschungsarbeit stellt das Bindeglied dar zwischen den Einflussgrößen von Hochwasserereignissen und den daraus resultierenden Schäden, die im Rahmen von Wirtschaftlichkeits- und Risikobetrachtungen zu quantifizieren sind. Die monetäre Bewertung des Hochwasserrisikos ist dabei eine entscheidende Grundlage für Konzeption zukunftsfähiger Schutzstrategien. Diesem Umstand wird durch Gesetze und Richtlinien auf unterschiedlichen administrativen Rechnung getragen, genannt seien hier auf europäischer Ebene die „EU-Hochwassermanagement-Richtlinie“ und auf Ebene des Landes Baden-Württemberg der „Leitfaden zur Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“ der LUBW.

Ausgehend von einer Diskussion des Risikobegriffs im Allgemeinen und speziell für Fragen des Hochwassermanagements werden in der vorliegenden Arbeit sowohl die fachwissenschaftlichen Fragestellungen auf Einwirkungsseite (Hochwasserparameter) als auch auf der Widerstandsseite (Anfälligkeit, Vulnerabilität) detailliert behandelt. Dabei wird aufgezeigt, welche Modelle und Methoden zur Verfügung stehen und mit welchem Detaillierungsgrad heutzutage Aussagen möglich sind. In einer vergleichenden Risikobetrachtung wird für ein Pilotgebiet auch untersucht, welchen Einfluss Unsicherheiten in den Eingangsdaten auf das berechnete Hochwasserrisiko haben.

Herr Dr. Kron hat in seiner Dissertation Wege aufgezeigt, wie auf Basis heutzutage bzw. in naher Zukunft zur Verfügung stehenden Datengrundlagen Hochwasserrisikoanalysen durchgeführt werden können, die sowohl den gesellschaftlichen und politischen Anforderungen als auch den administrativen Randbedingungen gerecht werden. Mit der Zusammenführung von Berechnungsdaten eines hydrodynamisch-numerischen Simulationsmodells, Nutzungsinformationen auf Katasterebene (ALK-Daten) sowie weiteren Fachinformationen in eine GIS-Fachschaale wurde von Dr. Kron ein Werkzeug entwickelt, mit dem potenzielle Hochwasserschäden flächendeckend auf Objektebene ermittelt werden. Die Arbeit ist ein herausragendes Beispiel für die Umsetzung wissenschaftlicher Forschungsarbeiten in die wasserwirtschaftliche Praxis.

Karlsruhe, im Juni 2008

Franz Nestmann

## Kurzfassung

Angesichts der zunehmenden Hochwasserschäden bei knapper werdenden finanziellen Mitteln wird zukünftig die wirtschaftliche Bewertung möglicher Schutzmaßnahmen mehr und mehr in den Vordergrund der Entscheidungsfindung rücken. Die Risikoanalyse und weitergehend die Risikobewertung können wesentliche Entscheidungshilfen zur Erstellung von zukunftsfähigen Schutzkonzepten sein. Bei Hochwasseruntersuchungen wird Risiko im Allgemeinen definiert als das Produkt aus dem Erwartungswert des Schadens und der Eintritts- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit des schadensverursachenden Ereignisses. Die Berechnung des Risikos kann entweder über die Angabe von Schädigungsgraden (in Abhängigkeit des Gesamtwertes) oder als monetäre Größe berechnet werden. Die finanzmathematische Bewertung erfolgt i.d.R. über Nutzen-Kosten-Untersuchungen, in denen die Nutzen der Maßnahme (in Form von verhinderten Schäden) den Gesamtkosten der Schutzmaßnahme (Investitions- und laufende Kosten) gegenübergestellt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird die Methodik zur Berechnung des Hochwasserrisikos erläutert und die Implementierung in ein GIS-gestütztes Berechnungsmodell vorgestellt. Ausgehend von den allgemeinen Aspekten der analytischen Risikobetrachtung wird anhand der „Wirkungskette Hochwasser“ die Methodik zur Ermittlung des Hochwasserrisikos dargestellt. Bei der Schadensberechnung wird zwischen einer mikroskaligen, mesoskaligen und makroskaligen Vorgehensweise unterschieden. Während bis vor wenigen Jahren die Wahl der Methodik im Wesentlichen von der zur Verfügung stehenden Rechnerleistung abhängig war, ist heutzutage die Auflösung der Eingangsdaten das wesentliche Entscheidungskriterium. Mit den heute zur Verfügung stehenden Kapazitäten ist auch eine objektscharfe Schadensberechnung auf Basis von Katasterdaten (ALK-Daten) für größere Untersuchungsgebiete möglich.

Um das Hochwasserrisiko umfassend bewerten zu können, sind grundsätzlich alle Schadwirkungen, die von den Hochwasserparametern ausgehen zu berücksichtigen. Dies ist heute jedoch nur bedingt möglich. Die größten Wissenslücken bestehen in der Erfassung und Aufbereitung nicht in Geldeinheiten erfassbarer Schäden wie z.B. Umweltschäden oder Auswirkungen auf die Gesundheit der Betroffenen. Zum einen liegen hierfür nur wenige Schadensdokumentationen vor, zum anderen sind Bewertungsverfahren für einen Vergleich mit monetären Schäden bislang erst in der Entwicklung. Der entscheidende Faktor für die Höhe der Hochwasserschäden bei Flussüberschwemmungen ist der maximale Wasserstand während des Ereignisses. Für monetär bewertbare Schäden liegen aus der Literatur eine Vielzahl möglicher Wasserstands-Schadensfunktionen vor, die zwar grundsätzlich vergleichbar, jedoch nur in wenigen Fällen übertragbar sind. Gründe hierfür sind z.B. unterschiedliche bauliche Voraussetzungen, regional verschiedenes Hochwasserbewusstsein und viele mehr. Die in Deutschland meistverwendeten Schadensinformationen stammen aus der HOWAS-Datenbank, die Mitte der Achtziger Jahre aufgebaut wurde,

inzwischen aber nicht mehr aktuell gehalten wird. Trotz der Tatsache, dass die Verwendung aus dieser Datenbank abgeleiteten Schadensfunktionen mit großen Unsicherheiten verbunden ist, wird sie in der Praxis häufig angewendet. Für mikroskalige Untersuchungen, in denen eine Beurteilung der Hochwasserschäden auf Basis einzelner Gebäude bzw. Objekte erfolgt, wird empfohlen, die Grundlagen zur Ermittlung der Schadensfunktionen auf Basis von gutachterlichen **WAS-WÄRE-WENN** –Untersuchungen zu ermitteln. Dabei werden durch Begehungen die möglichen Schäden in / an einzelnen Gebäuden oder Gebäudetypen für verschiedene Wasserstände geschätzt und in einen funktionalen Zusammenhang gebracht.

Zur Berechnung möglicher Hochwasserschäden wurde im Rahmen dieser Arbeit ein modulares GIS-gestütztes Tool entwickelt, das auf ein bestehendes Hochwassersimulationsmodell für den Neckar aufbaut. Die Funktionalitäten des Modells erlauben die Berechnung objektbezogener Hochwasserschäden auf Basis offizieller Flächennutzungsdaten, die um Schadensrelevante Attribute (z.B. Hochwasserschwellen, Erdgeschoßfußbodenhöhe) erweitert werden und bietet die Möglichkeit, einzelnen Gebäuden oder Gebäudetypen beliebige Schadensfunktionen zuzuweisen. Die Berechnung der Schäden erfolgt über die Verknüpfung der Wasserstands-Schadensfunktionen mit dem Raster der Wasseroberfläche. Über die weitere Auswertung der berechneten Schäden können die Anforderungen erfüllt werden, die sich aus aktuellen nationalen und internationalen Richtlinien und Bemessungsgrundlagen ergeben, z.B. Durchführung von Nutzen-Kosten-Analysen zur Festlegung des Bemessungshochwassers in Baden-Württemberg oder die flächendeckende Ermittlung und Darstellung der Hochwasserrisiken in den EU-Mitgliedstaaten.

Die Ermittlung von Hochwasserschäden unterliegt Unsicherheiten, die in der natürlichen Variabilität einzelner Ereignisse, den Datengrundlagen oder den gewählten Modellansätzen begründet liegen. Im Rahmen einer differenziellen Unsicherheitsanalyse wurden ausgewählte Parameter in der Schadensberechnung variiert und die Auswirkungen auf die berechneten Wasserstände bzw. Schäden ermittelt. Neben dem Streubereich der statistischen Verteilungsfunktion zur Berechnung der Scheitelabflussmenge (als hydrologische Eingangsgröße) sowie der Rauheitsparametrisierung im HN-Modell wurden zur Extremwertabschätzung die Auswirkungen einer veränderten Abflussgeometrie an einer Brücke (Kontrollbauwerk) auf die Wasserstände oberhalb untersucht.

Weiterhin wurden exemplarisch die Folgen einer möglichen Klimaänderung auf die Auftretenswahrscheinlichkeit statistisch ermittelter Hochwasserereignisse untersucht. Dies ist von besonderem Interesse, da der Lastfall „Klimaänderung“ in Baden-Württemberg zukünftig bei der Planung von Hochwasserschutzkonzepten mitberücksichtigt werden soll. Insbesondere im Bereich kleiner bis mittlerer Ereignisse ergeben sich im untersuchten Beispiel erhebliche Auswirkungen auf den Schutzgrad (Reduktion von Schutzgrad  $HQ_{100}$  auf  $HQ_{20}$ ) und die potenziellen Hochwasserschäden (Faktor 25 für  $HQ_{20}$ , Faktor 9 für  $HQ_{50}$ ).

## **Abstract**

In the face of increasing flood damages and decreasing financial means, the economic assessment of possible protection measures will in future become more and more central to decision making. Risk analysis and, more far-reaching, risk valuation can contribute substantially to drawing up sustainable protection concepts. In flood research, risk is generally defined as the product of the expected damage and occurrence respectively exceedance probability of the incident causing the damage. Risk can be calculated either in terms of degrees of damage (depending on the overall value) or as a monetary value. The financial mathematical evaluation is usually based on cost-benefit-analyses, confronting the benefits of a protection measure (in terms of prevented damages) with its overall costs (investment and recurrent costs).

This study introduces to the methodology for calculating flood risk and implementing it into a GIS-based calculation model. Starting out from general aspects of analytical risk assessment, the methodology for determining flood risk is presented via the functional flood chain. With regard to damage calculation, a distinction is made between a micro-scale, meso-scale and macro-scale approach. Until a few years ago, the choice of methodology depended essentially on the computing power available, whereas the main decision-making criterion today is input data resolution. With the capacities given today, an object sharp damage calculation is possible also for larger research areas on the basis of cadastral data (ALK data).

In order to evaluate flood risk extensively, all damaging effects of flood parameters must be taken into account. However, to date, these requirements cannot be fully met. Knowledge is lacking, above all, regarding the gathering and processing of damages that cannot be costed in a straightforward manner, such as environmental damages or effects on people`s health. The documentation of such damages is rare and evaluation procedures for determining their monetary value are only being developed. The decisive factor for the flood damages in river floods is the maximum water level during the incident. For monetarily assessable damages, literature provides us with numerous possible water level–damage functions which are in principle comparable, however rarely transferable. Reasons therefore are e.g. different structural conditions or regional distinctions of the flood awareness. In Germany, the main source for damage information is the HOWAS database, which was established in the 1980s but is no longer being updated. In spite of the fact that damage functions derived from this database are associated with great uncertainties, they are frequently applied in practice. For micro-scale investigations that evaluate flood damages looking at single buildings or objects, damage functions should be determined on the basis of what-if scenario analyses drawn from experts` reports. Here, by means of on-site investigations possible damages in/ at single buildings or building types can be estimated for different water levels and included into corresponding functions.

In the context of this study, a modular GIS-based tool for calculating possible flood damages was developed on the basis of an existing flood simulation model for the River Neckar. The functions of the model make possible the calculation of object-related flood damages based on official land use data plus relevant attributes (e.g., flood thresholds, level of ground flooring) as well as the assignment of user-defined damage functions to single buildings or building types. Damages are calculated by combining water level–damage functions with the grid of water depths. The calculated damages can be further analysed in order to meet the requirements of current national or international guidelines and design criteria, e.g., benefit-cost-analyses for determining design flood in Baden-Wuerttemberg or a comprehensive evaluation and presentation of flood risks for all EU member states.

Assessment of flood damages is associated to uncertainties due to natural variability of single incidents, database or chosen model approaches. In the context of a differential uncertainty analysis, selected parameters of damage calculation were modified and effects on calculated water levels respectively damages were determined. Apart from the stray area of the statistical distribution function for calculating peak discharge amount (as hydrological input parameter) and roughness parameterisation in the HN-model, effects of a modified discharge geometry at a bridge (control building) on upstream water levels were examined in order to estimate extremal values.

Furthermore, implications of a possible climate change for the occurrence probability of statistically calculated flood incidents were exemplarily investigated. This is of special interest, since in Baden-Wuerttemberg climate change is in future officially to be taken into consideration when planning flood protection concepts. Especially for small and medium incidents, the investigated example shows considerable repercussions on the degree of protection (reduction of protection degree  $HQ_{100}$  to  $HQ_{20}$ ) and on potential flood damages (factor 25 for  $HQ_{20}$ , factor 9 for  $HQ_{50}$ ).

## Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung an der Universität Karlsruhe (TH).

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. mult. Franz Nestmann, der mir im Rahmen meiner Beschäftigung die Möglichkeit gegeben hat, meiner Forschungsarbeit nachzugehen. Seine Motivation, die fachliche Begleitung der Arbeit sowie sein Engagement für praxisrelevante Fragestellungen in der Wasserwirtschaft haben wesentlich zum erfolgreichen Abschluss meiner Promotion beigetragen.

Danken möchte ich ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski für die Übernahme des Korreferates und die fachliche Begleitung. Die Diskussionen und Fachgespräche innerhalb der CEDIM-Gruppe haben wertvolle Impulse in die Bearbeitung eingebracht.

Zudem möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. H.H. Bernhart bedanken, der mich seit Beginn meiner Tätigkeit am IWG fachlich unterstützt hat und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Auch an alle Kollegen am Institut ein herzliches Dankeschön für die kollegiale und freundschaftliche Atmosphäre. Meinen Dank möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Oleg Evdakov aussprechen, der durch seine Programmierarbeiten einen erheblichen Beitrag zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Zu guter letzt gilt mein besonderer Dank meiner Familie, die mir seit Jahr und Tag zur Seite steht allen voran meine Frau Susanne und meine Kindern Hannah und Paula, die mir mit Ihrer Geduld und ihrem Verständnis Kraft für den erfolgreichen Abschluss meiner Promotion gegeben haben.

Karlsruhe, im Juni 2008

Andreas Kron

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung und Inhalt .....	3
<b>2</b>	<b>Allgemeine Risikobetrachtung .....</b>	<b>5</b>
2.1	Risikobegriff.....	5
2.2	Einteilung in Risikotypen .....	7
2.3	Grundlagen der Risikobetrachtung.....	11
2.3.1	Risikoanalyse.....	12
2.3.2	Risikobewertung .....	13
2.3.3	Risikomanagement.....	15
<b>3</b>	<b>Hochwasserrisiko .....</b>	<b>17</b>
3.1	Wirkungskette Hochwasser.....	17
3.2	Definitionen Risiko, Gefährdung, Gefahr.....	21
3.3	Risikoermittlung.....	23
3.3.1	Schadenserwartungswerte über Verteilungsfunktion der HW-Schäden	28
3.3.2	Schadenserwartungswerte über Dichtefunktion der HW-abflüsse .....	30
3.4	Methodische Ansätze für unterschiedliche Maßstabsebenen .....	31
<b>4</b>	<b>Grundlagen der Gefährdungsermittlung.....</b>	<b>35</b>
4.1	Hochwasserparameter .....	35
4.2	Zeitabhängigkeit der Modelle .....	36
4.3	Hochwasserwahrscheinlichkeit .....	39
4.4	Numerische Modelle .....	41
4.4.1	Grundlagen .....	41
4.4.2	2D-HN-Modelle .....	43
4.4.3	1D-HN-Modelle .....	45
4.5	Physikalische Modelle.....	46
4.5.1	Grundlagen .....	46
4.5.2	Ähnlichkeitsmechanik .....	47

---

4.5.3	Modellgesetze.....	48
4.6	Abgrenzung der Einsatzbereiche .....	51
<b>5</b>	<b>Einflussfaktoren auf Gebäudeschäden.....</b>	<b>52</b>
5.1	Einwirkungen.....	52
5.1.1	Wasserstand.....	53
5.1.2	Fließgeschwindigkeit.....	56
5.1.3	Anpralllasten (Treibgut).....	61
5.1.4	Anstiegsgeschwindigkeit.....	62
5.1.5	Dauer .....	62
5.1.6	Sediment / Schadstoffe.....	63
5.2	Widerstand .....	63
5.2.1	Objekteigenschaften .....	64
5.2.2	Vorsorgemaßnahmen .....	64
<b>6</b>	<b>Schadensfunktionen.....</b>	<b>66</b>
6.1	Schadensarten .....	66
6.2	Schadensfunktionen aus der Literatur.....	73
6.2.1	HOWAS-Schadendatenbank .....	75
6.2.2	Weitere Schadens-, Schädigungsfunktionen .....	82
6.3	Ermittlung synthetischer Schadens- bzw. Schädigungsfunktionen .....	85
6.3.1	Grundlagen .....	85
6.3.2	Pilotprojekt „Greifswald“ .....	87
<b>7</b>	<b>GIS-gestützte Abschätzung von Hochwasserschäden.....</b>	<b>96</b>
7.1	Eingangsdaten .....	96
7.2	Digitales Geländemodell .....	97
7.2.1	Allgemeine Datengrundlagen.....	97
7.2.2	DGM des Neckarmodell.....	99
7.3	Hydrodynamisch-numerisches Modell .....	101
7.3.1	Allgemeine Anforderungen an HN-Modelle.....	101
7.3.2	HN-Modell Neckar.....	102
7.4	Nutzungsdaten .....	105
7.4.1	Arten von Nutzungsinformationen.....	105

---

7.4.2	Liegenschaftsinformationen (Einzelobjekte) Beispiel: ALK .....	105
7.4.3	Aggregierte Liegenschaftsinformationen, Beispiel: ATKIS.....	109
7.4.4	Daten der Fernerkundung Beispiel: CORINE .....	111
7.5	Schadens- / Schädigungsfunktionen.....	113
7.5.1	Verwendete Typen von Schadens-, Schädigungsfunktionen.....	113
7.6	Modelltopologie .....	117
7.7	Anwendungsbereiche.....	124
<b>8</b>	<b>Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse .....</b>	<b>127</b>
8.1	Allgemeines.....	127
8.2	Anpassung der statistischen Verteilungsfunktion .....	130
8.3	Wahl der Rauheitsparameter für Gewässersohle und Vorländern .....	133
8.4	Änderung in der Abflussgeometrie .....	139
8.4.1	Ermittlung der Leistungsfähigkeit.....	140
8.4.2	Verlegung einzelner Brückenfelder.....	142
8.4.3	Einstau des Unterzuges.....	145
8.5	Wahl der Wasserstand-Schaden-Funktionen.....	147
8.6	Einfluss möglicher Klimaänderung .....	150
8.7	Auswirkungen der Unsicherheiten auf die Schadenssummen .....	155
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung, Ausblick .....</b>	<b>160</b>
9.1	Zusammenfassung.....	160
9.2	Ausblick.....	163
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>164</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>175</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>179</b>
	<b>Bildverzeichnis .....</b>	<b>180</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahrzehnte zeigen einen eindeutigen Trend: Sowohl die Anzahl der Ereignisse als auch die Höhe der verursachten Schäden steigen signifikant. Europaweit gab es seit 1998 über 100 größere Hochwasserereignisse, bei denen mehr als 500.000 Menschen ihr Zuhause verloren haben. Die versicherten Schäden betragen dabei mehr als 25 Mrd. EUR. Zählt man die kleineren Ereignisse dazu steigen die Schäden gut auf das Doppelte. Bei den 20 weltweit größten Ereignissen seit 1990 sind volkswirtschaftliche Schäden von 240 Mrd. US-\$ entstanden. Entlang des Rheines sind mehr als 10 Mio. Menschen durch Hochwasser bedroht, in den potenziellen Überschwemmungsgebieten befinden sich Vermögenswerte in Höhe von 170 Mrd. EUR. Auch wenn die steigende Zahl der Hochwasser heute zum Teil auf klimatische Änderungen zurückzuführen ist, sind die Betroffenen zu einem nicht unerheblichen Teil selbst für die Zunahme der Schadenspotenziale verantwortlich. Erst die Akkumulation von Vermögenswerten durch die zunehmende Besiedlung potenzieller Überschwemmungsgebiete konnte zu den heute immer häufiger beobachtbaren extremen Schadenssummen führen. Die Politik hat darauf reagiert und 2005 das „Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes“ erlassen, in dem die Nutzung überschwemmungsgefährdeter Flussgebiete neu geregelt wird.

Da eine Verhinderung von Hochwasser auch zukünftig nicht möglich ist, zielen heutige Schutzkonzepte auf eine Verminderung der möglichen Schäden. Demzufolge kommt der Ermittlung des Hochwasserrisikos im Planungsprozess von Vorsorge- und Schutzmaßnahmen mehr und mehr Bedeutung zu. Im Hinblick auf knapper werdende finanzielle Mittel wird zukünftig auch die wirtschaftliche Bewertung möglicher Schutzmaßnahmen zunehmend in den Vordergrund der Entscheidungsfindung rücken. Diesen Umständen wird auch in aktuellen nationalen und internationalen Richtlinien Rechnung getragen.

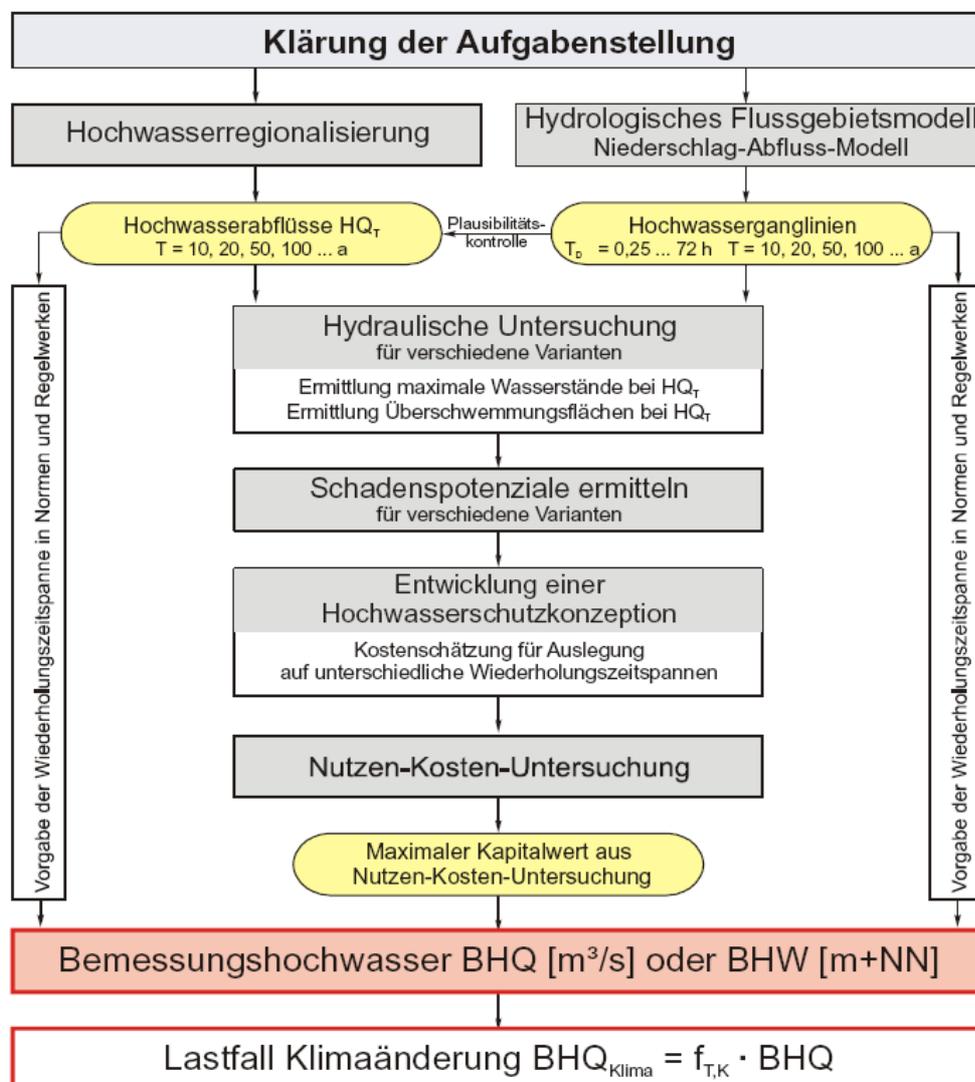
Die vorgeschlagene „Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und Bekämpfung von Hochwasser“ (KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2006) wird unter anderem mit folgenden Stellungnahmen begründet:

*[...] (1) Hochwasser kann zu Todesfällen führen, die Umsiedlung von Personen erforderlich machen, die wirtschaftliche Entwicklung ernsthaft gefährden und die wirtschaftlichen Tätigkeiten in der Gemeinschaft behindern.*

*(2) Hochwasser ist ein natürliches Phänomen, das sich nicht verhindern lässt. Allerdings tragen auch menschliche Tätigkeiten dazu bei, die Wahrscheinlichkeit von Hochwasser zu erhöhen und dessen negative Auswirkungen zu verstärken.*

(3) Eine Verringerung des Risikos hochwasserbedingter Schäden für die menschliche Gesundheit, die Umwelt und Infrastrukturen ist möglich und wünschenswert, aber entsprechende Maßnahmen können nur dann Wirkung entfalten, wenn sie innerhalb der Einzugsgebiete koordiniert werden. [...]

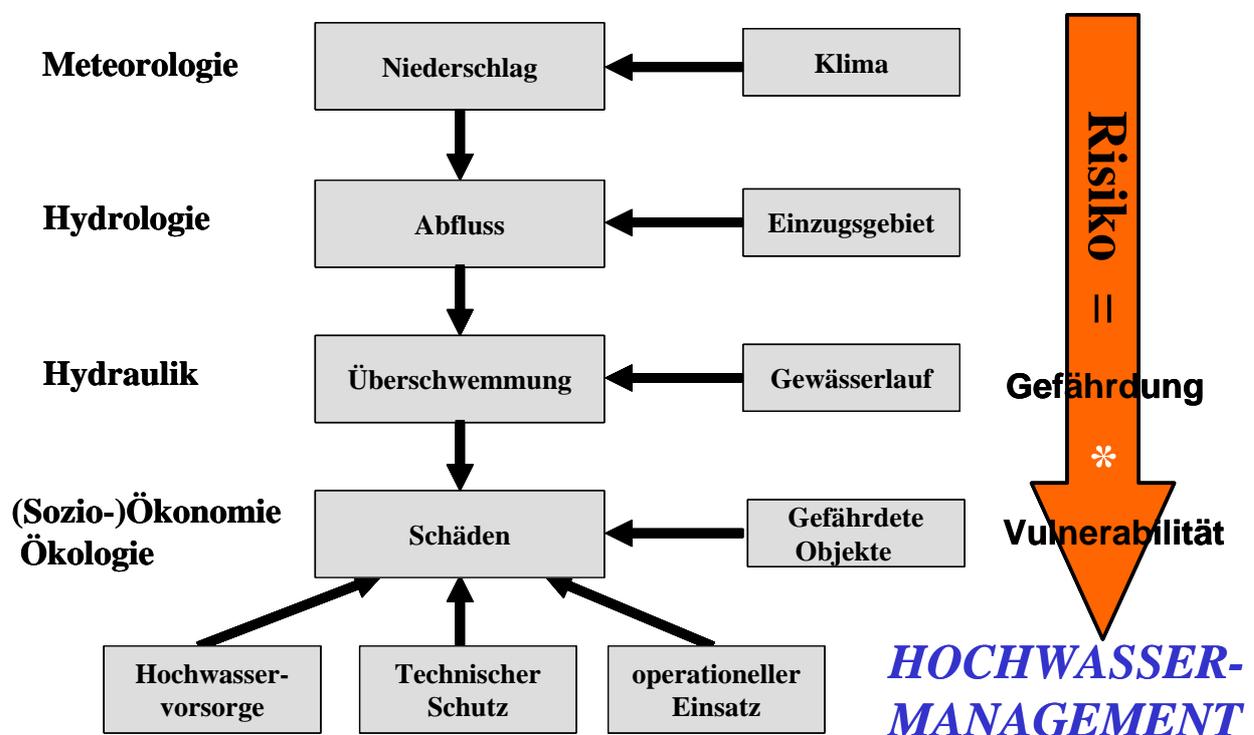
Eine wirtschaftliche Bewertung von möglichen Schutzmaßnahmen wird in Baden-Württemberg im Leitfaden zur „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“ gefordert. Gemäß Abbildung 1-1 kommt der Schadenspotenzialermittlung hierbei zentrale Bedeutung zu. Zusätzlich zur Nutzen-Kosten-Analyse statistischer Ereignisse ist bei der Wahl des Bemessungsereignisses auch der Lastfall „Klimafaktor“ zu untersuchen, in dem die in den nächsten 50 Jahren zu erwartenden klimatischen Änderungen berücksichtigt werden.



**Abbildung 1-1:** Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes (LFU 2005)

## 1.2 Zielsetzung und Inhalt

Zur Umsetzung der administrativen Vorgaben werden Simulations- und Analysemodelle benötigt, die Gefährdungs- und Risikoanalyse zur Entscheidungsstützung ermöglichen. Dies gilt sowohl für den Bereich des vorsorgenden Hochwasserschutzes (Ermittlung von Überschwemmungsflächen, Bewertung alternativer Schutzkonzepte), zur Wirksamkeitsprüfung technisch-infrastruktureller Schutzmaßnahmen (Deiche, Schutzmauern) sowie für Maßnahmen des operationellen Hochwasserschutzes. Insbesondere im Echtzeitbetrieb ist eine schnelle Verfügbarkeit der Berechnungsergebnisse erforderlich, die wiederum nur über eine nutzerorientierte Bedienbarkeit der Analysemodelle gewährleistet werden kann.



**Abbildung 1-2:** Wirkungskette Hochwasser; Risikoermittlung als Grundlage für das Hochwassermanagement

In Kapitel 2 werden zunächst allgemeine Aspekte der Risikobetrachtung erläutert sowie unterschiedliche Risikotypen dargestellt. Die allgemeine Thematik der Risikoanalyse wird in Kapitel 3 für die Hochwasserthematik erläutert. Neben der Methodik zur Erfassung des Hochwasserrisikos in der Prozesskette Hydrologie – Hydraulik – Ökonomie werden unterschiedliche Fragestellungen dargelegt, die für die wasserwirtschaftliche Praxis von wesentlicher Bedeutung sind.

Die Kapitel 4 und 5 beschäftigen sich mit den Fragen der Schadensermittlung. Ausgehend von der Gefährdungsermittlung über physikalische oder hydrodynamisch-

numerische Simulationsverfahren werden Einflussfaktoren vorgestellt, die die Höhe der Hochwasserschäden beeinflussen. Dabei wird unterschieden zwischen Faktoren auf der Einwirkungsseite, die über hydrologische Randbedingungen und topografische Gegebenheiten definiert sind und Faktoren, die auf der Widerstandsseite die Schadenshöhe beeinflussen können.

Um das Hochwasserrisiko umfassend bewerten zu können, sind alle Schadwirkungen, die von den Hochwasserparametern ausgehen, zu berücksichtigen. In Kapitel 6 wird zunächst eine allgemeine Klassifizierung von Hochwasserschäden vorgestellt. Anhand der Angaben aus der Literatur werden unterschiedliche Ansätze und Beispiele für Wasserstands-Schadensfunktionen vorgestellt und auf die Unsicherheiten bei deren Verwendung eingegangen. Für mikroskalige Schadensuntersuchungen wird ein Ansatz zur Ableitung von Schadensfunktionen vorgestellt, in dem mögliche Hochwasserschäden auf Basis von gutachterlichen Gebäudebegehungen erhoben werden.

In Kapitel 7 wird ein GIS-gestütztes Schadensabschätzungsmodell vorgestellt, mit dem potenzielle Hochwasserschäden auf Basis von Einzelobjekten berechnet werden können. Die modulare Struktur erlaubt eine prozessorientierte Berechnung und Datenhaltung. Mögliche Einsatzbereiche sind:

- Ermittlung von Gebieten mit erhöhtem Risiko
- Erstellung von Hochwasserrisikokarten
- Nutzen-Kosten-Untersuchungen geplanter Maßnahmen
- Kostenmäßiger Vergleich alternativer Schutzkonzepte
- Auswirkungen möglicher Klimaänderungen

Kapitel 8 beschäftigt sich mit den Unsicherheiten bei der Risikoermittlung. Diese können auf natürlichen Gegebenheiten beruhen (individuelle Ausprägung jedes einzelnen Ereignisses, natürliche Schwankungsbereiche), in der Wahl der Eingangsdaten und -parameter oder systemimmanent in den Modellansätze begründet liegen, die Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse haben können. In einer differentiellen Unsicherheitsanalyse werden ausgewählte Parameter im Rahmen ihrer Schwankungsbereiche variiert und der Einfluss auf die Wasserstände und Schadenssummen berechnet u.a. auch die Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung.

## 2 Allgemeine Risikobetrachtung

### 2.1 Risikobegriff

Der Begriff des Risikos [*-ital. *risico, risico*; zu *risicare* „Gefahr laufen, wagen“ <vulgärlat. \**risicare* „Klippen umschiffen“; zu grch. *rhiza* „Wurzel, Klippe“]* wird heutzutage in einer Vielzahl unterschiedlicher Bereiche und Umgebungen benutzt. Daher ist es verständlich, dass es im allgemeinem Sprachgebrauch als auch in den einzelnen Fachbereichen teilweise unterschiedliche Begriffsdefinitionen gibt, die von einer Beschreibung im allgemeinen Sinn bis zu technischen und mathematischen Definitionen reichen. Risiko wird dabei folgendermaßen beschrieben:

- "Wer wagt, gewinnt - außer er verliert"

oder definiert als:

- Die Möglichkeit eines Schadens oder Verlustes als Konsequenz eines bestimmten Verhaltens oder Geschehens; dies bezieht sich auf Gefahrensituationen, in denen nachteilige Folgen eintreten können, aber nicht müssen. [Quelle: RiskNet]
- Die Möglichkeit, oder die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis, meist auf Grund von Handlungen oder Naturereignissen, welches in der Zukunft liegt, unerwünscht ausfällt. [Quelle: wissen.de]
- Risiko ist die Gefahr, ein angestrebtes Ziel nicht zu erreichen, bzw. im betrieblichen Bereich einen Verlust zu erleiden. Ein Risiko wohnt jeder unternehmerischen Tätigkeit inne, kann aber durch geeignete Maßnahmen, wie genaue Rechnungsführung, Marktbeobachtung und Vertragsgestaltung verringert werden. [Quelle: wissen.de]
- 1. (allgemein): Möglichkeit eines Schadens infolge einer Gefährdung 2. (exakt): Schadenserwartungswert, d.h. Produkt aus Überschreitungswahrscheinlichkeit und dazugehörigen Konsequenzen (Schäden). Die Schäden werden mitunter als Produkt aus exponiertem Wert und Vulnerabilität angegeben.  
[Quelle: Münchener Rück (2000): Welt der Naturgefahren. CD-ROM]
- Die Wahrscheinlichkeit negativer Auswirkungen oder möglicher Verluste (Tote, Verletzte, zerstörte Vermögen, Existenzen und Wirtschaftsaktivitäten oder Umweltschäden), entstehend aus den Wechselwirkungen von natürlichen oder anthropogen verursachten Gefahren und der Anfälligkeit. Üblicherweise wird Risiko durch die Schreibweise „Risiko = Gefahr x Anfälligkeit“ ausgedrückt. Über den Ausdruck der Möglichkeit eines physikalischen Schadens hinaus, ist es wichtig zu verstehen, dass Risiken immer in sozialen Systemen entstehen oder existieren. Es ist wichtig, die sozialen Kontexte, in denen Risiken auftreten, zu berücksichtigen und zu bedenken, dass Menschen daher nicht

notwendigerweise dieselben Wahrnehmungen von Risiken und den zugrundeliegenden Gründen teilen

*[Quelle: ISDR (2002): Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives. Preliminary version, UN, Geneva.; DKKV (2002): Journalistenhandbuch zum Katastrophenmanagement. 7. Auflage, Bonn]*

Die verschiedenen Definitionen bringen alle ein (meist negatives) Ereignis in Verbindung mit der Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis eintritt. Ein Risiko kann demnach nur dort vorhanden, wo im Auftretensfall mit negativen Auswirkungen zu rechnen ist. Für den Bereich der menschlichen Gesellschaft bedeutet dies dass ein Risiko nur dann vorliegt, wenn Gesundheit und Leben der Bevölkerung, Sachwerte, Versorgungseinrichtungen und sonstige (auch kulturelle oder ökologische) Güter erheblich beschädigt oder zerstört werden können. Würden extreme Ereignisse wie z.B. der Wintersturm Lothar (1999), das Elbehochwasser (2002) oder der Hitzesommer (2003) nicht in besiedelten oder landwirtschaftlich genutzten Gebieten auftreten, wo sie zu wirtschaftlichen Schäden in Millionen- und Milliardenhöhe geführt haben, sondern in außerhalb des menschlichen Einflussbereichs liegenden Gegenden, würde von ihnen kein Risiko ausgehen.



**Bild 2-1:** Risiko, ja oder nein? (Foto: Nestmann)

## 2.2 Einteilung in Risikotypen

Unabhängig von der Art des Risiko können für alle natürlichen, technischen, soziologischen, ökologischen und alle weiteren Gefahren zunächst unterschiedliche Bereiche und verschiedene Typen unterschieden werden. Im Gutachten der WBGU (1998) werden abhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schwere der Auswirkungen (Schäden) drei Kategorien unterschieden: Der „Normalbereich“, der „Grenzbereich“ sowie der „Verbotsbereich“.

Der „Normalbereich“ weist folgende Eigenschaften auf:

- Geringe Ungewissheit in Bezug auf die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß
- Insgesamt eher geringes Schadenspotenzial
- Insgesamt geringe bis mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit
- Geringe Persistenz (Zeitdauer) und Ubiquität (räumliche Ausbreitung) der Risikoverursacher oder -folgen
- Hohe Reversibilität der Risikofolgen, sollte der Schaden eintreten
- Geringe statistische Schwankungsbreite von Schadenspotenzial und Eintrittswahrscheinlichkeit
- Keine deutlichen Verzerrungen zwischen der Gruppe der Risikoträger und der Gruppe der Chancen- bzw. Nutzengewinner (Verteilungsgerechtigkeit)

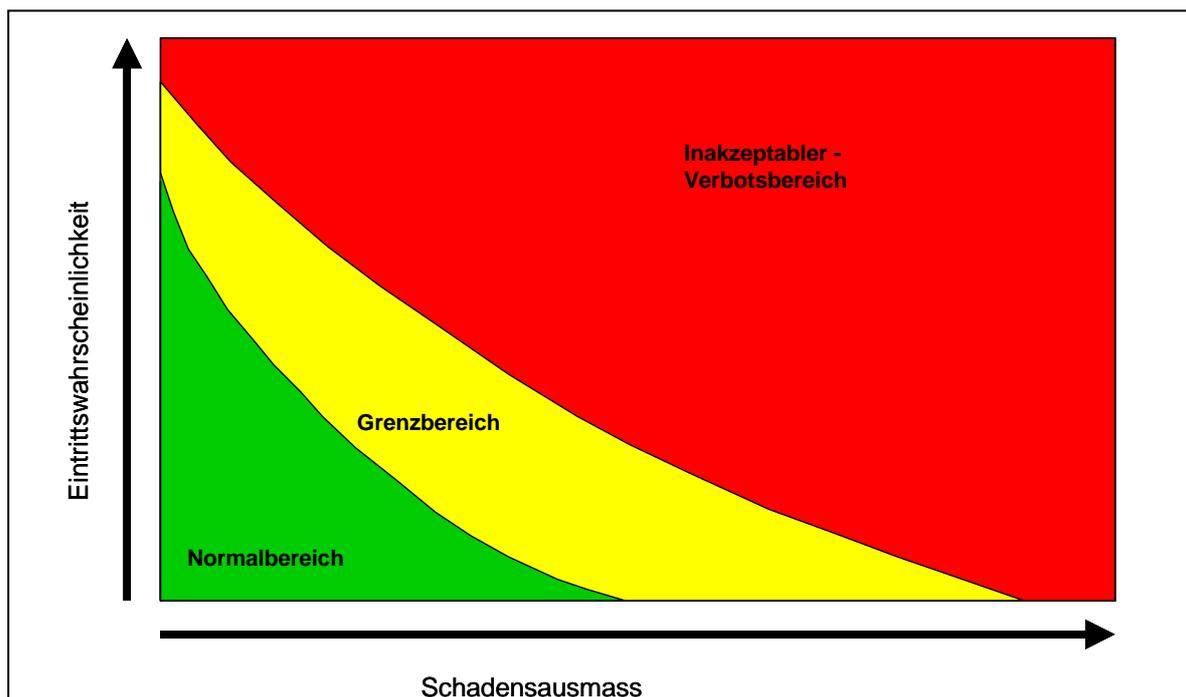
Die beschriebenen Merkmale erlauben eine Betrachtung und Bewertung der Risiken im Sinne eines klassischen Risikomanagements, innerhalb dessen eine annähernd objektive Berechnung von Schadenspotenzialen und Schadens Erwartungswerten durchgeführt werden kann. Hier können auch monetäre Nutzenbewertungen im Sinne von Kosten-Nutzen-Analysen oder eine Maximierung der Erwartungsnutzen (Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert mit den nach den jeweiligen Nutzen bewerteten Folgen) erstellt werden.

Sind weitergehende und extreme Schädwirkungen zu erwarten, die über den Normalbereich hinausgehen und zu schwerwiegenden und irreversiblen globalen Schäden führen können, so sind die Risiken dem „Grenz-, bzw. Verbotsbereich“ zuzuordnen, dem folgende Eigenschaften zugewiesen werden (WBGU (1998):

- Die Ungewissheit ist bei allen Risikoparametern hoch
- Das Schadenspotenzial ist hoch
- Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist hoch und tendiert gegen 1 (dieser Fall ist, sofern keine der anderen Bedingungen gegeben ist, global wenig relevant)

- Die Abschätzungssicherheit ist gering, es liegt aber ein begründeter Verdacht vor, dass große Schäden möglich sind
- Persistenz, Ubiquität und Irreversibilität sind in besonderem Maß gegeben, wobei auch hier ein begründeter Verdacht gegeben sein muss, dass Schäden möglich sind.
- Aus Gründen der wahrgenommenen Verteilungsgerechtigkeit oder anderer sozialer und psychischer Faktoren ist mit einem hohen Mobilisierungspotential (Verweigerung, Protest, Widerstand) zu rechnen.

Im Grenz- bzw. dem Verbotsbereich fehlen oftmals die wissenschaftlichen Grundlagen für eine objektive Beurteilung, da hierfür i.d.R. keine Erfahrungen vorliegen, die eine statistische Auswertung im Sinne einer Extremwertanalyse zulassen. Hier ist eine gegenseitige Abwägung der Risiken in Form von Handlungs- bzw. Optimierungsstrategien oftmals nicht mehr möglich – der Schwerpunkt möglicher Aktivitäten liegt im Wesentlichen auf einer Verringerung der möglichen Schadwirkungen.



**Abbildung 2-1:** Risikobereiche (WBGU (1998))

Abhängig von den acht in Tabelle 2-1 aufgeführten Bewertungskriterien lassen sich nach WBGU (1998) und BEAUFORT (2003) sechs unterschiedliche Risikotypen definieren, die in ihrer Bezeichnung mit griechischen Mythen symbolisiert sind. Bewertungskriterien sind:

Eintrittswahrscheinlichkeit P:	statistische Wahrscheinlichkeit des Auftretens oder Überschreitens [-]
Abschätzungssicherheit von P:	entspricht dem Reziprokwert der Standardabweichung (statistische Unsicherheit) [-]
Schadensausmaß S	Schadwirkungen des betrachteten Ereignisses [EUR, Anzahl Betroffener, ...] oder qualitative Ordnung [-]
Abschätzungssicherheit von S:	Maß für die möglichen Ungenauigkeiten in der Schadensermittlung, Ermittlung über Unsicherheits-, Sensitivitätsstudien [-]
Verzögerungswirkung:	Maß für die Zeitdauer vom Eintreten des Ereignisses bis zum Schadenseintritt [t]
Mobilisierungspotential:	Protestpotential der Bevölkerung [-]
Persistenz:	Dauer, die die Schadwirkungen anhalten [t]
Irreversibilität:	Auftreten dauerhafter Schäden, die nicht mehr beseitigt werden können [-]
Ubiquität:	räumliche Ausdehnung der Schadwirkungen [m <sup>2</sup> ]

### **Risikotyp Damokles**

*Die Mythologie berichtet, dass Damokles zu einem Bankett des Königs eingeladen wurde. Er musste sein Mahl jedoch unter einem scharf geschliffenen Schwert einnehmen, das nur an einem dünnen Faden direkt über seinem Kopf aufgehängt war. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Faden während der relativ kurzen Zeitdauer des Mahles reißen würde war relativ gering. Im Fall des Eintretens des „Schadensereignisses“ ist dagegen das Schadensausmaß für Damokles das Größtmögliche.*

Beispiele für diesen Risikotyp sind vor allem Versagen großtechnischer Anlagen wie z.B. Kernkraftwerke, Staudämme oder chemische Anlagen.

### **Risikotyp Zyklop**

*Zyklopen oder „Einaugen“ sind nach der griechischen Mythologie mächtige Riesen, die als Bestrafung nur ein Auge hatten. Dadurch bleibt ihre Sichtweise eindimensional, eine Wahrnehmung in räumlichen Einheiten ist somit nicht möglich.*

Bei diesen Risikotypen ist das Ausmaß der möglichen Katastrophe zwar bekannt, die Eintrittswahrscheinlichkeit ist jedoch relativ ungewiss. Hierzu gehören z.B. Naturgefahren wie Überschwemmungen, Erdbeben oder Vulkanausbrüche.

### **Risikotyp Pythia**

*Das Orakel von Delphi mit der blinden Seherin Pythia wird von den Griechen des Altertums für Weissagungen befragt. Die Weissagungen der Pytha blieben dabei allerdings mehrdeutig, so dass zwar die Möglichkeit einer großen Bedrohung besteht, genauere Aussagen über Ausmaß und Wahrscheinlichkeit wurden jedoch nicht gemacht.*

Unter diesem Risikotyp können solche Katastrophen zusammengefasst werden, deren Ursachen-Wirkungsgefüge die wissenschaftlichen Möglichkeiten der Erfassung überschreiten. Hierzu zählen z.B. Klimaänderungen, gentechnische Risiken oder auch BSE.

### **Risikotyp Pandora**

*Pandora war Überbringerin einer Büchse, die von Zeus für die Menschen geschaffen wurde. Solange die Büchse verschlossen blieb, ging keinerlei Gefahr von ihr aus. Für den Fall jedoch, dass sie geöffnet wurde, bringt sie eine Vielzahl von Geißeln für die Menschheit.*

Dieser Risikotyp zeichnet sich vor allem durch die katastrophalen Auswirkungen aus, die sowohl in räumlicher Ausdehnung als auch in Bezug auf die Dauerhaftigkeit und Irreversibilität der Schäden quasi unbegrenzt sind. Beispiel hierfür sind z.B. Veränderungen im Ökosystem, Verlust der Artenvielfalt.

### **Risikotyp Cassandra**

*Kassandra, eine Seherin der Trojaner traf ihre Weissagungen mit sehr hoher Sicherheit, so z.B. den Sieg der Griechen über die Trojaner. Die Schadwirkungen bei Eintritt der Ereignisse sind somit denkbar ungünstig. Da jedoch die Auswirkungen erst sehr viel später nach dem Eintreten offenbar werden, wurde der Seherin keinen Glauben geschenkt.*

Ähnliche Phänomene sind heutzutage in vielzähliger Form zu finden z.B. bei Fragen des Klimawandels, der Auswirkungen von Treibhausgasen oder dem Verlust der biologischen Diversität.

### **Risikotyp Medusa**

*Die Medusa war eine der drei Gorgonenschwestern, die von den Griechen gefürchtet wurde, weil bereits ihr Anblick den Betrachter zu Stein erstarren ließ.*

Diese Risikoklasse ist vor allem klassifiziert durch ihre Mobilisierungspotentiale. Die Gefahren, die der Klasse innewohnen, auch wenn sie nicht schlüssig nachgewiesen oder bewiesen sind, werden von der Bevölkerung als so bedrohlich empfunden, dass sich starker Widerstand innerhalb unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen regt. Das Konfliktpotential wird dabei umso höher, je weiter die unterschiedlichen Standpunkte auseinander liegen, z.B. die Auffassungen von „Experten“ und „Betroffenen“ in der Frage der Belastung durch Elektrosmog.

**Tabelle 2-1:** Kennzeichnende Eigenschaften der Risikotypen (WBGU (1998))

Eigenschaften	Risikotypen					
	Damokles	Zyklus	Pythia	Pandora	Kassandra	Medusa
Eintrittswahrscheinlichkeit P	Gering	Unbekannt	Unbekannt	Unbekannt	Eher hoch – Hoch	Eher gering
Abschätzungssicherheit von P	Hoch	Gering	Gering	Unbekannt	Eher gering	Eher gering
Schadensausmaß S	Hoch	Hoch	Unbekannt	Unbekannt	Eher hoch – Hoch	Eher gering
Abschätzungssicherheit von S	Hoch	Eher hoch	Gering	Unbekannt	Eher hoch	Eher hoch
Verzögerungswirkung	-	-	-	-	Hoch	
Mobilisierungspotential	-	-	-	-	-	Politisch sehr relevant
Persistenz	-	-	-	< 30 a	-	-
Irreversibilität	-	-	-	Unwiderbringlich	-	-
Ubiquität'	-	-	-	Global	-	-

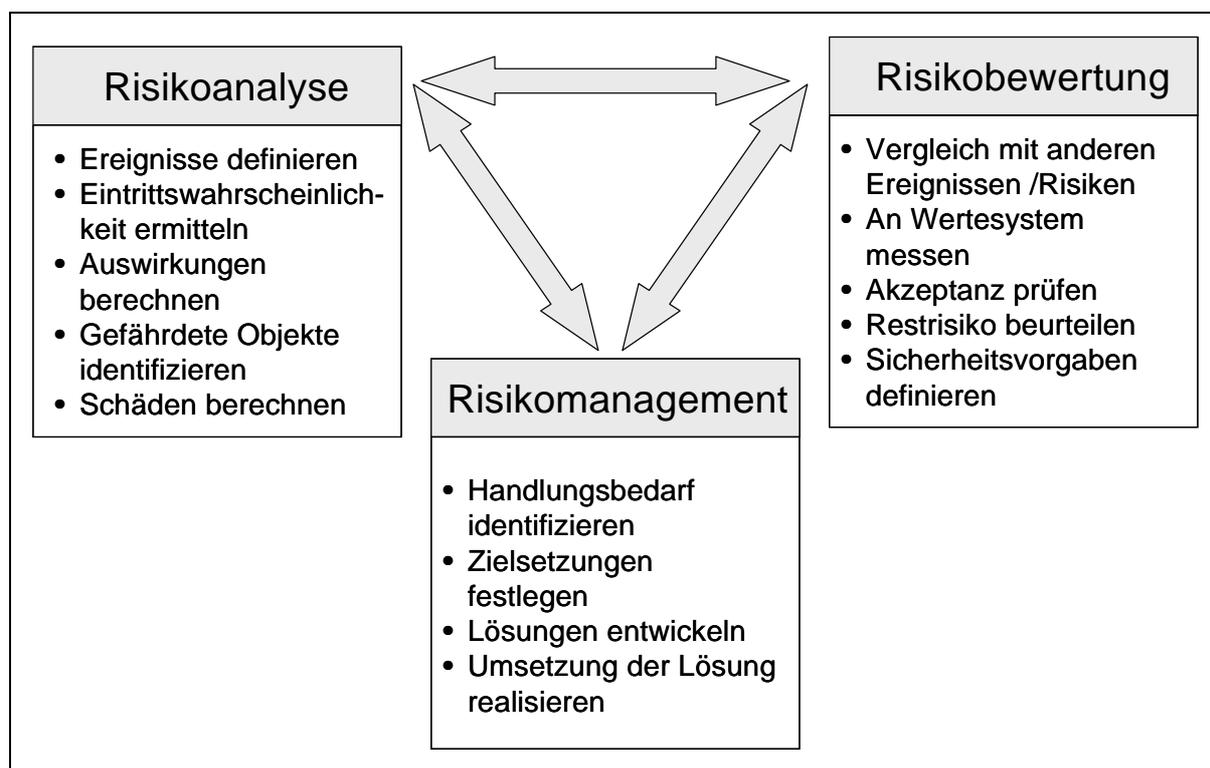
### 2.3 Grundlagen der Risikobetrachtung

Erste Untersuchungen zur Risikobetrachtung bzw. der Sicherheitswissenschaft wurden zu Beginn der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert durchgeführt. Ausgehend von einzelfallorientierten Sicherheitsbetrachtungen an Dampfmaschinen und Chemieanlagen wurde mit zunehmender Komplexität der technischen Systeme auch die Risikobetrachtung mehr und mehr ausgeweitet, um Interaktionen und weitergehende Schadwirkungen berücksichtigen zu können. Weitere Meilensteine in der Entwicklung waren hier die Raumfahrtprogramme sowie die zivile Nutzung der Kernenergie. Neben der Betrachtung der Naturrisiken resultieren heutige und zukünftige Anforderungen zum einen aus neuen Technologien wie z.B. der Gentechnologie und zum anderen aus den Infrastrukturnetzen (Transport- und Kommunikationsnetze), die in rapidem Maße ausgebaut werden und aufgrund ihrer hohen Informations- und Datendichte auch anfällig für Versagen sind. Im Vordergrund stehen hierbei nicht mehr nur die direkten Schadwirkungen, die vom Versagensereignis ausgehen, die komplexe Struktur führt vielmehr dazu, dass sich aus dem Ereignis Rückkopplungen mit anderen Systemen ergeben, die wie z.B. im

Bereich bio- oder gentechnologischer Veränderungen wiederum Stoff- und Stoffwechselkreisläufe verändern (HOLLENSTEIN (1997)). Im Vergleich zu den technischen Risiken, die sich aus modernen Produktions- und infrastrukturellen Anlagen ergeben, weisen natürliche Gefährdungen einen noch höheren Grad an Komplexität auf, da diese Systeme

1. nur zu einem geringen Maß beeinflusst werden können
2. nicht erfassbare (chaotische) Prozesse beinhalten
3. zusätzliche Ursachen-Wirkungs-Gefüge aufweisen

Grundsätzlich gliedert sich die Risikobetrachtung sowohl technischer, als auch natürlicher Risiken in die in Abbildung 2-2 dargestellten Bereiche Risikoanalyse – Risikobewertung - Risikomanagement



**Abbildung 2-2:** Elemente der Risikobetrachtung (HOLLENSTEIN (1997))

### 2.3.1 Risikoanalyse

Ziel der Risikoanalyse ist eine qualitative Beurteilung und/oder eine Quantifizierung des Risikos bzw. der Risiken, die sich aus natürlichen oder technologischen

Prozessen ergeben können. Sie liefert die Ausgangsbasis für die spätere Bewertung der betrachteten Risiken, indem sie die folgenden Fragestellungen beantwortet:

- Mit welcher Wahrscheinlichkeit tritt ein Schaden verursachendes Ereignis auf?
- Welche Auswirkungen sind im Eintretensfall zu erwarten?

Klassische Werkzeuge für die Risikoanalyse sind naturwissenschaftlich-mathematische und finanztechnische Methoden und Verfahren, mit denen Eintrittswahrscheinlichkeiten statistisch verteilter Ereignisse oder einzelne definierte Szenarien auf Basis von beobachteten Ausprägungen sowie deren Auswirkungen auf das betrachtete Gebiet möglichst realitätsgetreu ermittelt und beurteilt werden können. Die Risikoanalyse ist grundsätzlich auf die Ermittlung objektiver Parameter (Wasserstand, Windstärke, Ausbreitung einer Schadstoffwolke) ausgerichtet und sollte grundsätzlich keine Zustandsbewertung darstellen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine Einschätzung des Bearbeiters subjektiver Größen nicht ausgeschlossen werden kann (z. B. Schäden an Freizeit- und Erholungseinrichtungen bzw. deren Auswirkungen auf das Allgemeinwohl der Bevölkerung).

### **2.3.2 Risikobewertung**

Eine Bewertung der Risiken in einem Untersuchungsgebiet kann erst vorgenommen werden, nachdem die auftretenden Risiken analysiert, d.h. in ihrem qualitativen und quantitativen Ausmaß bekannt sind. Für Naturrisiken wie Hochwasser werden vor allem die Gefährdung von Menschen sowie die zu erwartenden monetären Schäden an Objekten eines Ereignisses zur Bewertung herangezogen.

Die Bewertung der Risiken ist dabei grundsätzlich subjektiv und kann je nach Risikoaversität der betroffenen Personen unterschiedlich ausfallen. Im Gegensatz zur Risikoanalyse beruht die Risikobewertung nicht auf kausalen Zusammenhängen, sondern ist immer durch den gesellschaftlichen Kontext beeinflusst. Das heißt, dass eine Risikobewertung durch unterschiedliche Personen in unterschiedlichen Regionen und zu unterschiedlichen Zeiten auch zu verschiedenen Ergebnissen führt. Die grundsätzliche Frage lautet hierbei:

- Welches Risiko muss bzw. kann noch in Kauf genommen werden ?

Dabei zeichnet sich im Hochwassermanagement ein Paradigmenwechsel ab, der von der reinen Gefahrenabwehr (Schutz vor aufgetretenen Ereignissen) hin zu einer Risikokultur führt (siehe Tabelle 2-2).

**Tabelle 2-2:** Paradigmenwechsel im Hochwasserschutz (PLANAT (1988))

	<b>Gefahrenabwehr (bisher)</b>	<b>Risikokultur (zukünftig)</b>
Zentrale Frage	Wie können wir uns schützen ?	Welche Sicherheit kann zu welchem Preis erreicht werden ?
Erfasste Ereignisse	Häufige	Häufige und seltene
Stellenwert der Gefahren	Nicht bekannt	Bekannt, Bewertung berücksichtigt
Maßnahmenplanung	Fachtechnisch	Interdisziplinär
Vergleich von Maßnahmen	Kaum möglich	Wirksamkeit vergleichbar erfasst, Akzeptanz berücksichtigt
Steuerung des Mitteleinsatzes	Sektoruell	Aktiv, Prioritätensetzung aus Gesamtschau
Sicherheit	Für die heutige Generation, hoch in einzelnen Sektoren	Solidarität mit künftigen Generationen, ausgewogen für das Gesamtsystem

Ausgangspunkt der Diskussion ist die in DKKV (2003) dargestellte Erkenntnis, dass:

- „ die intensive Nutzung unseres Lebensraumes das Risiko durch Naturgefahren in den letzten Jahrzehnten vergrößert hat
- extreme Naturereignisse Bestandteile der Natur sind, denen sich der Mensch nicht entziehen kann
- aus finanzieller und technischer Sicht, aber auch aufgrund von Akzeptanzproblemen, ein absoluter Schutz nicht möglich ist
- keine einheitlichen Maßstäbe, nicht einmal stringente Diskussion über Maßstäbe zur Bewertung von Naturrisiken und möglichen Schutzmaßnahmen vorliegen“

Die Risikobewertung stellt einen Vergleich der vorhandenen Risiken mit dem akzeptierten Risiko dar. Folglich lassen sich drei Verhältnisse definieren:

$$R_{vorh} > R_{akz} \quad (\text{Sicherheitsdefizit}) \quad (\text{Gl. 2-1})$$

$$R_{vorh} = R_{akz} \quad (\text{Sicherheitsgleichgewicht}) \quad (\text{Gl. 2-2})$$

$$R_{vorh} < R_{akz} \quad (\text{Sicherheitsüberschuss}) \quad (\text{Gl. 2-3})$$

Ist das vorhandene Risiko höher als das akzeptierte, so liegt ein Sicherheitsdefizit vor. Diese Situation ist die am Häufigsten anzutreffende, da ein vermutetes bzw. erwartetes Defizit i.d.R. der Ausgangspunkt für Risikobetrachtungen ist.

Der singuläre Fall des Sicherheitsgleichgewichts, in dem das vorhandene gleich dem akzeptierten Risiko ist, stellt grundsätzlich das Optimum und somit die Zielfunktion des Risikomanagements dar. Im Rahmen der zu berücksichtigenden Unsicherheiten bzgl. Eintretenswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen erfolgt hierbei ein optimaler Ressourceneinsatz.

Bei Sicherheitsüberschuss besteht grundsätzlich kein Handlungsbedarf. Ein Überschuss kann jedoch zu einer nicht beabsichtigten Erhöhung des akzeptierten Risikos führen. Dies ist in den letzten Jahren und Jahrzehnten insbesondere im Fall der Naturgefahr Hochwasser aufgetreten. Hier hat ein vermeintlich hoher Grad an Sicherheit zu einer Erhöhung der Schadenspotenziale geführt, indem mehr und mehr Werte in überschwemmungsgefährdeten Gebieten akkumuliert wurden. Der subjektive Charakter der Risikoakzeptanz kann also auch bei gleich bleibendem Risiko zu einer Reduktion des Sicherheitsüberschusses führen.

### 2.3.3 Risikomanagement

Das Risikomanagement bildet die Synthese aus den Risikoanalyse und der Risikobewertung.

Die zentralen Fragen lauten:

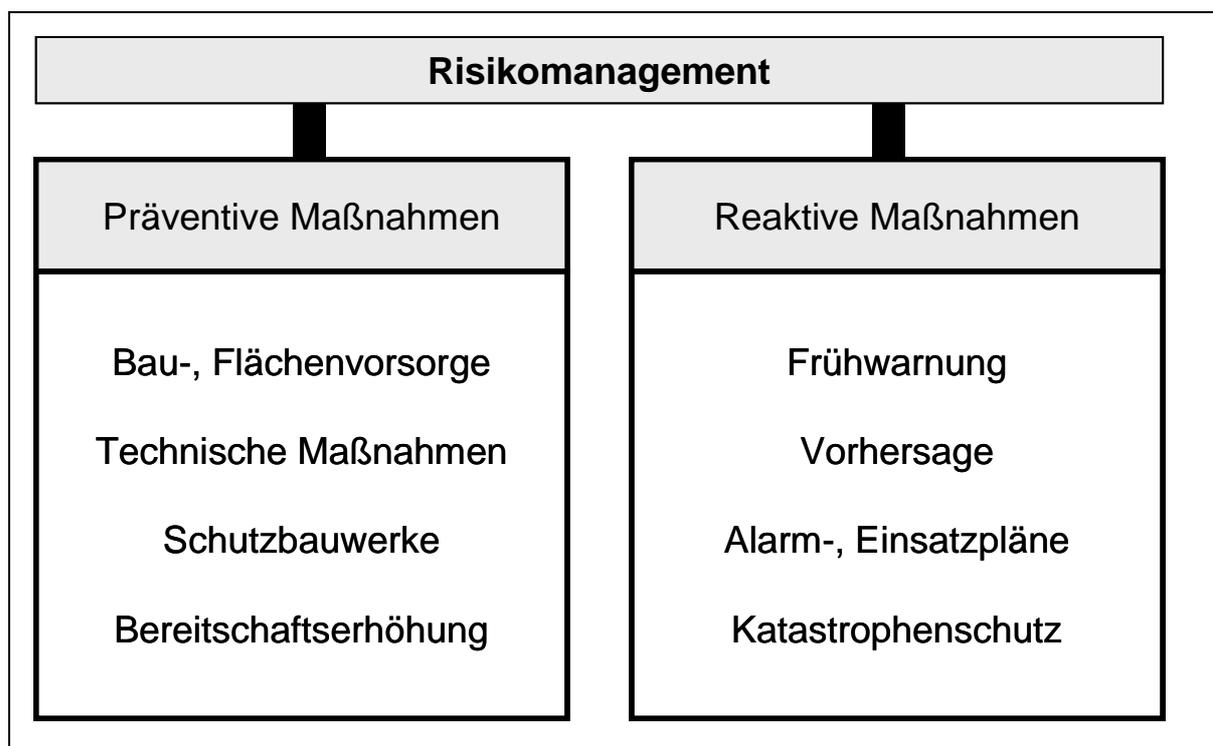
- Welches Risiko kann mit vertretbaren Mitteln verhindert werden?
- Mit welchem Restrisiko ist zu rechnen?
- Welche Maßnahmen müssen für den Extremfall vorgesehen werden?

Während sich die reine Gefahrenabwehr im Wesentlichen auf die Frage nach technischen und nichttechnischen Maßnahmen zur (präventiven) Verhinderung möglicher Schäden beschränkt, werden im Risikomanagement auch reaktive Handlungsoptionen berücksichtigt, die im Eintretensfall zu einer Schadensbegrenzung beitragen können. Die in Abbildung 2-3 aufgeführten präventiven Maßnahmen können in drei Kategorien eingeteilt werden.

- Die Bau- und Flächenvorsorge als räumliches Element zielt darauf ab, die **Vulnerabilität** im betroffenen Gebiet zu **verringern**. Hierunter sind all diejenigen Maßnahmen zu zählen, die im Fall eines eingetretenen Schadensereignisses zu einer geringeren Schadenssumme führen als ohne die Maßnahme. Beispiele aus dem Bereich Hochwasser sind z.B. der Einbau druckwasser- und auftriebssicherer Öltanks, eine wasserdichte Ausführung des Gebäudes oder eine auf die Hochwassergefahr angepasste Nutzung des Kellergeschosses
- Mithilfe von technischen Maßnahmen und Schutzbauwerken wird versucht, den **Gefährdungsprozess von den gefährdeten Objekten zu trennen**.

Hierzu gehören klassische bautechnische Maßnahmen, wie z.B. die Errichtung von Fangzäunen, Schutzmauern in lawinengefährdeten Gebieten oder Hochwasserschutzdeiche.

- Die Erhöhung der Bereitschaft zielt letztlich darauf ab, weitere Maßnahmen zu treffen, die im Ereignisfall zu einer **Verringerung möglicher Schäden** beitragen können. Die Bereitschaftserhöhung spielt auch eine Rolle im reaktiven Hochwassermanagement, allerdings sind hierfür eine Reihe von präventiven Maßnahmen zu treffen und vorzusehen, z.B. Bereithaltung von wichtigen Telefonnummern und sonstiger Informationsquellen, um im Gefährdungsfall auf dem aktuellen Informationsstand zu sein.



**Abbildung 2-3:** Elemente des Risikomanagements

Ziel der reaktiven Maßnahmen ist, im Fall des Eintretens die Schäden möglichst gering zu halten. Der Maßnahmenkatalog umfasst dabei die gesamte zeitliche Prozesskette des Ereignisses, beginnend bei Frühwarnung und Vorhersage im Vorfeld des Ereignisses, über Alarm- und Einsatzpläne, bis hin zu den Maßnahmen des Katastrophenschutzes während und nach dem Ereignis.

Im Sinne eines erfolgreichen Risikomanagements ist es hierfür zwingend erforderlich, administrative, technische und auch politische Rahmenbedingungen zu analysieren und in Handlungsstrategien umzusetzen. Nur unter Beteiligung der zuständigen Fachbehörden kann eine optimale Maßnahmenplanung und –umsetzung stattfinden.

### 3 Hochwasserrisiko

#### 3.1 Wirkungskette Hochwasser

Zur Ermittlung des Hochwasserrisikos können, wie in Abbildung 3-1 dargestellt, die natürlichen Prozesse in einer linearen Prozesskette betrachtet werden, von der Entstehung bis zu den verursachten Schäden.

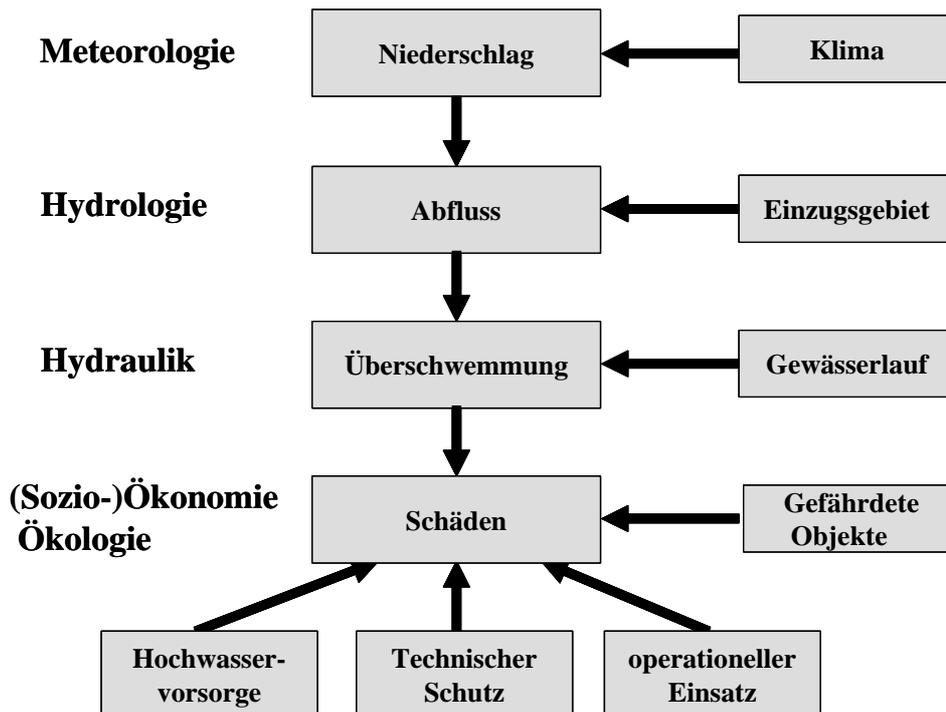


Abbildung 3-1: Wirkungskette Hochwasser

Ausgehend von den meteorologischen Verhältnissen betrifft dies zunächst den **Bereich Hydrologie**, in dem die Niederschläge im Einzugsgebiet in Abflusswerte an ausgewählten Gewässerstellen transformiert werden. Eingangsdaten in die Niederschlags-Abfluss-Modelle sind die räumlichen Verteilung und Intensität der Niederschläge sowie relevante Kenngrößen des Einzugsgebiets, z.B. Fläche, Morphologie, Geologie. Für Hochwasserfragen ist der Oberflächenabfluss maßgebend, Grundwasserströmungen oder als Zwischenabfluss bezeichnete Strömungsvorgänge im Bodenkörper spielen in diesem Fall für die Abflussbildung eine untergeordnete Rolle. Die Berechnung der maßgeblichen Abflüsse erfolgt auf Basis von Niederschlags-Abfluss-Modellen oder über Regionalisierungsverfahren, in denen das Abflussverhalten unter Berücksichtigung der abflussrelevanten physikalischen Eigenschaften modelliert wird.

Die Modellierung der N-A-Modelle kann je nach vorliegender Informationsmenge und -dichte über verschiedene Ansätze erfolgen (PATT, H. (2001):

- **Black-Box-Modelle**  
In Black-Box-Modellen werden die Eingangs- und Ausgangsgrößen über empirische Parameter verknüpft, ohne die kausalen Wirkungszusammenhänge zu betrachten (empirische Ermittlung des Abflussbeiwertes, Berechnung über Einheitsganglinienverfahren). Voraussetzung für die Anwendung von Black-Box-Modellen ist ein ausreichendes Datenkollektiv von Naturmessreihen, aus denen die zur Berechnung erforderlichen Parameter abgeleitet werden können. Zeitabhängige Veränderungen der Abflusscharakteristik des Einzugsgebiets werden i. d. R. nicht abgebildet.
- **Teilflächenvariante Modellierung**  
Für Einzugsgebiete, die ein zeitlich und räumlich variierendes Abflussverhalten aufweisen oder für die keine ausreichend genaue Datengrundlage vorhanden ist, werden Verfahren eingesetzt, in denen die Abflussbildung zeitabhängig und teilflächenbezogen modelliert wird, z.B. über Fließzeitansätze oder Linearspeicher-Kaskaden (DVWK (1999c)). In diesen halbempirischen Ansätzen werden neben aus Naturdaten abgeleiteten Parametern auch aus physikalischen Gebietseigenschaften (Versickerungsfähigkeit der Böden, Bewuchssituation) abgeleitete Kennwerte verwendet.

Sind die zur Verfügung stehenden Messdaten für ein Einzugsgebiet nicht oder in nicht ausreichender Qualität vorhanden, ist die Verwendung eines N-A-Modells nicht möglich. Um dennoch Aussagen über die Abflusswerte machen zu können werden Regionalisierungsverfahren eingesetzt. In diesen Verfahren macht man sich die Tatsache zunutze, dass Einzugsgebiete mit vergleichbarer Gebietscharakteristik auch ein vergleichbares Abflussverhalten aufweisen. Anhand von Pegelinformationen einzelner Einzugsgebiete können über Mehrfachregressionsberechnungen allgemeingültige und übertragbare Regionalisierungsparameter ermittelt werden.

Daran anknüpfend können im **Bereich Hydraulik** durch hydrodynamisch-numerische (HN) oder physikalische Modelle Aussagen zu den Strömungsverhältnissen im Fließgewässer (Wasserstand, Wassertiefe, Fließgeschwindigkeiten, Wellenablauf etc.) gemacht werden. Alternativ existieren auch hydrologische Berechnungsverfahren, wie z.B. das Muskingum oder Kalinin-Miljukov-Verfahren. Mit diesen Verfahren kann die Transformation der Hochwasserwelle im Gewässer auf Basis von Speicher-Abfluss-Beziehungen näherungsweise berechnet werden. Für eine detaillierte Ermittlung der Hochwasserrisiken sind diese Verfahren jedoch nur bedingt geeignet und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher erläutert. Grundsätzlich sind zur Beurteilung des Hochwasserrisikos Informationen über alle schadensrelevanten Einflussgrößen und an allen möglichen Schadenorten erforderlich. Hydraulische Modelle, mit denen die strömungsrelevanten Parameter berechnet werden können, ermöglichen eine Beurteilung der Gefährdung durch

beliebige Hochwasserereignisse. In der praktischen Anwendung werden zwei mögliche konzeptionelle Ansätze unterschieden (DYCK, S., PESCHKE, G. (1983):

Grundlage des **stochastischen Konzeptes** ist die statistische Analyse von Beobachtungsreihen. Über die Anpassung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung an die Messdaten können die Überschreitungswahrscheinlichkeiten aufgetretener Ereignisse und über Extrapolation auch außerhalb des Beobachtungszeitraumes liegender (seltenerer) Hochwasserereignisse berechnet werden. Die auf diese Art und Weise ermittelten  $T_n$ -jährlichen Abflusskennwerte werden in der Praxis häufig zur Bemessung von Schutzbauwerken herangezogen (z.B.  $HQ_{100}$  als Schutzgrad für bebaute Gebiete). Es ist darauf hinzuweisen, dass die so ermittelten Kenngrößen „typisch“ für die gewählte Wahrscheinlichkeitsverteilung sind und insbesondere in verzweigten Flusssystemen nicht zwangsläufig mit realen Ereignissen identisch sind.

Im Gegensatz dazu gehen **deterministische Konzepte** von aufgetretenen oder in ihrer Ausprägung erwartbaren Ereignissen aus. Hierzu gehören historische Hochwasser, Szenarien (Deichbrüche, Versagen von Sperrwerken oder mobilen Schutzbauten) oder auch physikalisch begründbare Extremereignisse.

Die Wahl des Modellierungsverfahrens ist dabei abhängig von den Zielgrößen sowie der geforderten Genauigkeit und räumlich/zeitlichen Auflösung der Berechnungsergebnisse. Gängige hierfür verwendete Verfahren sind in Kap. 3 hinsichtlich ihrer spezifischen Erfordernisse und Eignung für verschiedene Fragestellungen erläutert.

Ein Beispiel für ein HN-Modell ist das Hochwassersimulationsmodell Neckar, das im Auftrag der Wasserwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg für den schiffbaren Neckar über eine Länge von 200 Flusskilometern erstellt wurde (OBERLE, P., THEOBALD, S., NESTMANN, F. (2000). Basierend auf dem HN-Modell sowie einem hoch aufgelösten digitalen Geländemodell (DGM) können Aussagen über hochwasserrelevante Fragestellungen getroffen werden, z.B. zu:

- Darstellung von Überschwemmungsgrenzen und -flächen
- Darstellung der berechneten Wassertiefen
- Darstellung potenziell gefährdeter Bereiche hinter Schutzanlagen
- Informationen über die Landnutzung, Gebäude und Flurstücke
- Abgrenzung abflusswirksamer Bereiche
- Auswirkungen von Baumaßnahmen auf den HW-Abfluss
- Integration und Dokumentation abgelaufener Hochwasser

Die Anwendung erfolgt vom Bearbeiter selbständig unter Verwendung vorgegebener Berechnungsmodule (wie z.B. die Berechnung von Wasserspiegellagen für verschiedene Abflussszenarien, Darstellung von Überflutungsflächen, etc) mit

speziell an die Anforderungen der Wasserwirtschaftsverwaltung angepassten Benutzeroberflächen (OBERLE, P., THEOBALD, S., NESTMANN, F. (2000).

Sind die „hydraulischen“ Auswirkungen bei Hochwasser bekannt, kann bei Kenntnis der **Vulnerabilität** der gefährdeten Objekte der mögliche Schaden abgeschätzt werden. Zur monetären Bewertung der potenziellen Schäden sind als grundlegende Informationen Wasserstand-Schaden-Beziehungen zu ermitteln, die sowohl für Nutzen-Kosten-Untersuchungen geplanter Maßnahmen, für Katastrophenschutz-einsätze und letztendlich auch für Versicherungsunternehmen wichtige Informationen über das Risiko für einzelne Gebäude, Siedlungsflächen oder Flussgebiete liefern können.

Weitere charakteristische Hochwassergößen wie z.B. Fließgeschwindigkeit oder Hochwasserdauer können ebenfalls schadenrelevante Parameter darstellen. Insbesondere sehr seltene Ereignisse mit entsprechend höheren Abflussmengen führen bei Überschreiten des Freibordes zwangsläufig zu einem „Versagen“ der Schutzeinrichtung durch Überströmen und als Folge möglicherweise zur völligen Zerstörung. Dadurch können Flutwellen mit sehr großen Fließgeschwindigkeiten auftreten, die im Vergleich zum auftretenden Wasserstand wesentlich größere Schäden verursachen können. Gleiches gilt für das Versagen von technischen Schutzmaßnahmen, z.B. Sperrtoren oder mobile Schutzwänden.

Die Ermittlung der möglichen Hochwasserschäden kann, wie in Tabelle 3-1 dargestellt, je nach Zielgröße auf Basis einzelner Ereignisse oder unter Berücksichtigung einer Reihe von (statistischen) Ereignissen erfolgen.

**Tabelle 3-1:** Zielgrößen der Schadensermittlung

Art Ereignis	Einzelereignis	Ereignisreihe
deterministisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl betroffener Personen Gebäude, Gebiete</li> <li>• Schäden an Einzelobjekten (monetär / Schädigungs-grad)</li> <li>• Schäden im Untersuchungsgebiet; Objekte versch. Nutzungsklassen</li> <li>• Gesamtschäden</li> </ul>	zusätzlich <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximalschaden</li> <li>• Ereignisse nach Schadensklassene</li> </ul>
stochastisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl betroffener Personen Gebäude, Gebiete</li> <li>• Schäden an Einzelobjekten (monetär / Schädigungs-grad)</li> <li>• Schäden im Untersuchungsgebiet; Objekte versch. Nutzungsklassen</li> <li>• Gesamtschäden</li> </ul>	zusätzlich <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximalschaden</li> <li>• Ereignisse nach Schadensklassen</li> <li>• Schadenswahrscheinlichkeit</li> <li>• Schadenserwartungswerte</li> </ul>

### 3.2 Definitionen Risiko, Gefährdung, Gefahr

Wie in Kap. 2.1 sind im Begriff „Risiko“ die negativen Auswirkungen eines Ereignisses mit dessen Eintrittswahrscheinlichkeit verknüpft. Demnach bedeutet ein Risiko eine kalkulierte Prognose eines möglichen Schadens.

Im Ingenieurwissenschaftlichen Bereich wird **Risiko** im Allgemeinen definiert als das Produkt aus dem Erwartungswert des Schadens und der Eintritts- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit des schadenverursachenden Ereignisses. Die Berechnung des Risikos kann entweder über die Angabe von Schädigungsgraden (in Abhängigkeit des Gesamtwertes) oder als monetäre Größe berechnet werden.

$$R = P \cdot S \quad \text{mit} \quad S = S(V, W) \quad (\text{Gl. 3-1})$$

*mit*

*R* Risiko [1/a; EUR/a]

*P* Eintritts-, Überschreitungswahrscheinlichkeit des Schadenereignisses [1/a]

*S* Schädigungsgrad oder Schaden [-; EUR]

*V* Vulnerabilität, Schadenanfälligkeit, Verletzlichkeit des/der Objekte(s) [-]

*W* Wertigkeit, Wert des/der Objekte(s) [-; EUR]

Für hochwasserrelevante Fragestellung berechnet sich das Risiko somit aus der statistischen Eintrittswahrscheinlichkeit eines oder mehrerer hydrologischer Ereignisse ( $HQ_T$ ) und die beim Eintreten verursachten Schäden.

Der Begriff des Hochwasserrisikos ist dabei zu trennen von den Begriffen Gefahr und Gefährdung durch Hochwasser:

Eine **Gefahr** durch Hochwasser ist dann gegeben, wenn bei Auftreten eines (extremen) Hochwasserereignisses in einem bestimmten räumlich definierten Gebiet eine Bedrohung von Menschen bzw. eine Schädigung von Sach-, Umwelt- und Kulturgütern droht. Eine Hochwassergefahr ist nach dieser Definition auch dann gegeben, wenn eine Schadwirkung nur durch Extremereignisse verursacht werden kann; eine (Be-) Wertung in Form von Angaben z.B. der Wassertiefen kann erfolgen, ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Wird der Hochwasserbegriff in seiner allgemeinen Form verwendet und neben den in dieser Arbeit betrachteten Flussüberschwemmungen auch Starkniederschlagsereignisse mitberücksichtigt, liegt eine Hochwassergefahr praktisch flächendeckend vor. Dies gilt für die gemäßigten Zonen Mitteleuropas genauso wie für aride Wüstengebiete, in denen aufgrund hoher Niederschlagsintensitäten und den dadurch verursachten Sturzbächen im Jahresdurchschnitt mehr Menschen zu Tode kommen als durch Wassermangel.

Eine Bewertung der Bedrohung erfolgt in der Beschreibung der **Gefährdung** durch Hochwasser. Bei der Gefährdungsermittlung werden neben den möglichen Schadwirkungen (Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten, Dauer des Ereignisses, etc.) einzelner oder mehrerer Ereignisse zusätzlich Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens gemacht. Die Information der betroffenen Gebiete über die vorliegende Hochwassergefährdung in Form von kartografischen Darstellungen gehört inzwischen in den meisten Flussgebieten Deutschlands zum „Standardinstrumentarium“ des Hochwassermanagements (z.B. IKSR (2000), MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR, INNENMINISTERIUM UND WIRTSCHAFTSMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2003). Erst wenn auf der Seite der zuständigen Behörden und Planer bestimmt ist, welche Gefährdung vorliegt können entsprechende Schutzkonzepte erarbeitet werden. Auf der anderen Seite hat sich gezeigt, dass die Aufklärung der Bevölkerung ein weiteres wesentliches Element der SchADVorsorge ist, z. B. die Bereitschaft zur hochwasserangepassten Nutzung.

In Abbildung 3-2 ist die Abgrenzung der Begriffe Gefahr / Gefährdung / Risiko anhand möglicher Kartendarstellungen verdeutlicht:

- Die Ausweisung der Gefahr als mögliches durch Überschwemmungen betroffenes Gebiet.
- Die Darstellung der Gefährdung unter zusätzlicher Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit.
- Zur Ermittlung des Risikos eines oder mehrerer Ereignisse die Berücksichtigung der Nutzungen im überschwemmungsgefährdeten Gebiet, bzw. die Angabe möglicher betroffener Werte.

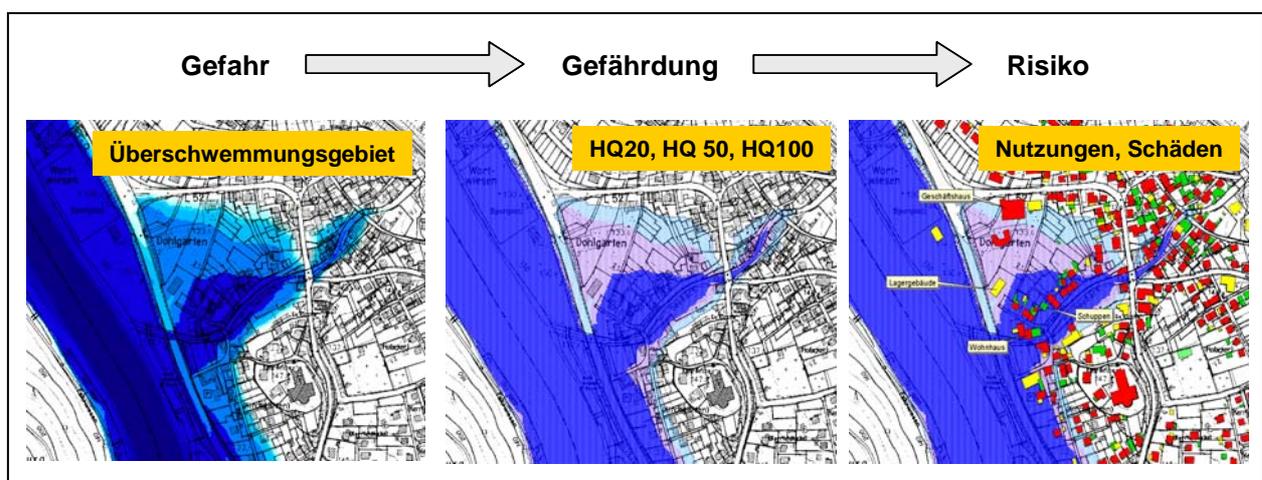
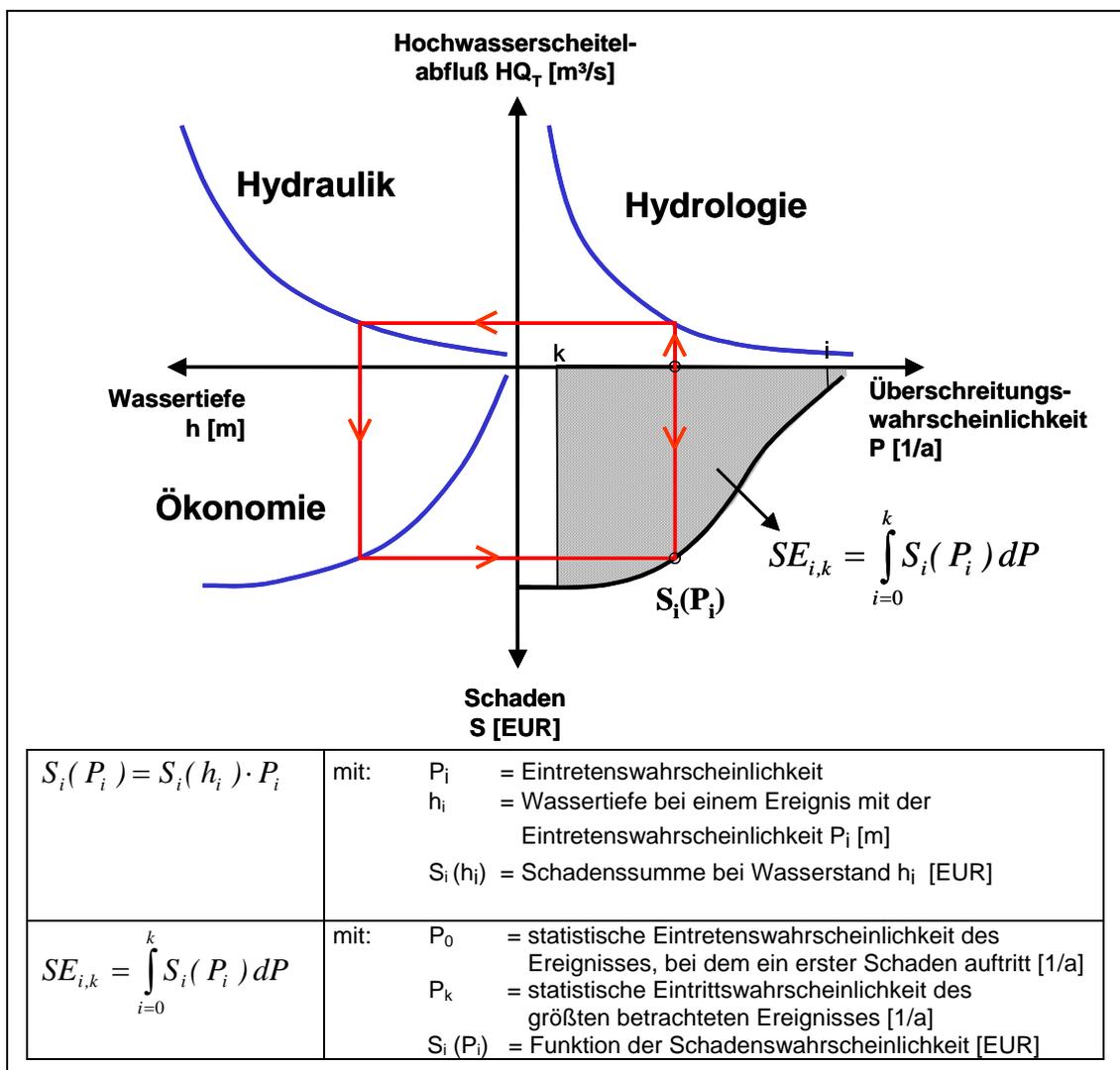


Abbildung 3-2: Abgrenzung Gefahr/Gefährdung/Risiko (bearbeitet aus OBERLE, P. (2004))

### 3.3 Risikoermittlung

Sind die erforderlichen Informationen aus der gesamten Wirkungskette des Hochwassers vorhanden, so kann gemäß Abbildung 3-3 eine schrittweise Bewertung des Hochwasserrisikos nach folgendem Bearbeitungsschema erfolgen.

- (1) Ermittlung der Abflussmengen für den Bereich der zu bewertenden Ereignisse (Bereich Hydrologie).
- (2) Berechnung der Wasserstände im Untersuchungsgebiet, bzw. an den zu bewertenden Nutzungsobjekten (Bereich Hydraulik).
- (3) Berechnung der Hochwasserschäden über nutzungsklassifizierte Wasserstand-Schaden-Funktionen (Bereich Ökonomie)
- (4) Auswertung der resultierenden Wahrscheinlichkeits-Schaden-Funktion



**Abbildung 3-3:** Diagramm zur Bestimmung des Hochwasserrisikos

Die Ermittlung des Hochwasserrisikos kann für verschiedene Ereignisse und unterschiedliche Zeiträume erfolgen. Hierbei kann unterschieden werden nach

## a) Ereigniszeitpunkt / Ereigniszeitraum

Der Ereigniszeitpunkt bezeichnet den Zeitpunkt bzw. die Wiederholzeitspanne oder Jährlichkeit, in dem das/die betrachtete(n) Ereignis(se) statistisch einmal eintritt / eintreten. Der Zeitpunkt wird dabei durch die Angabe der Jährlichkeit  $T_n$  definiert. Bei der Betrachtung von Hochwasserszenarien, bei der die Auftretenswahrscheinlichkeit nicht angegeben und bei der folglich auch das entsprechende Risiko nicht berechnet werden kann, ist lediglich eine Angabe zur Höhe der Schadenspotenziale möglich. Zur Kalibrierung und Validierung der Schadensmodelle können auch aufgetretene Hochwasser Berücksichtigung finden. In diesem Fall liegt der Ereigniszeitpunkt in der Vergangenheit. Werden in der Analyse mehrere Hochwasser mit unterschiedlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten betrachtet, ergibt sich der Ereigniszeitraum aus dem Bereich der kleinsten bis größten betrachteten Jährlichkeit.

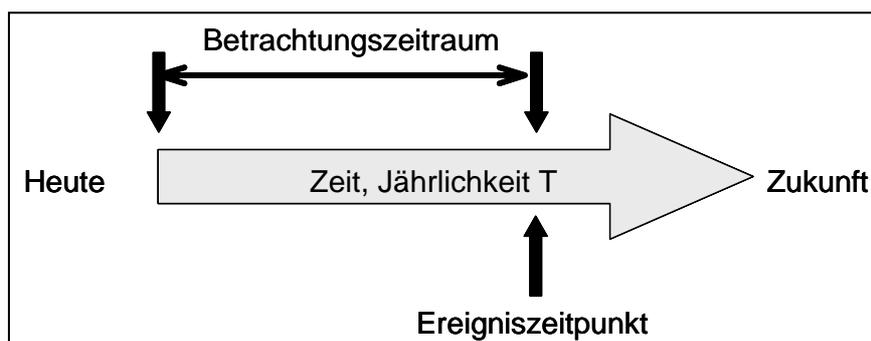
## b) Betrachtungszeitpunkt / Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitpunkt bzw. Betrachtungszeitraum ist die Zeitspanne, für die Aussagen über das Hochwasserrisiko gemacht werden sollen. Für Analysen statistischer Ereignisse ergeben sich jährliche Schadenserwartungswerte. Bei Berechnung als szenarienbasierte Schadenspotenziale können absolute Schäden angegeben werden.

Für die praktische Anwendung der Schadenspotenzial- bzw. Risikoanalyse einer betroffenen Gemeinde oder Region sind vor allem folgende Fragen zu beantworten:

**(1) Wie groß ist der zu erwartende Schaden bzw. das Risiko beim Eintreten eines Ereignisses einer bestimmten Größe (Einzelschaden)?**

Wie in Abbildung 3-4 dargestellt, liegt hier der Ereigniszeitpunkt (Jährlichkeit  $T_n$ ) an einer bestimmten zeitlichen Stelle in der Zukunft. (Anmerkung: Nach der Definition des Begriffs der Jährlichkeit wird hierbei keine Angabe gemacht, in welchem Jahr oder zu welchem Zeitpunkt das Ereignis real auftritt, sondern eine Zeitspanne angegeben, die statistisch zwischen dem Auftreten gleich großer Ereignisse liegt). Über die Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich als Ergebnis der jährliche Schadenserwartungswert mit der gegebenen Jährlichkeit als obere Grenze.



**Abbildung 3-4:** Zeit- / Risikoachse Einzelereignis

In Abbildung 3-5 sind die Ergebnisse der Schadenspotenzial- und Risikoanalyse für einzelne statistische Ereignisse (HQ<sub>10</sub>, HQ<sub>50</sub>, HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>200</sub>) beispielhaft für die Gemeinde Offenau / Neckar dargestellt. Die absoluten Schadenssummen wurden auf Basis von aus der HOWAS-Datenbank abgeleiteten Schadensfunktionen berechnet. Die Schadenserwartungswerte ergeben sich aus der Verknüpfung der Schäden S mit den entsprechenden Eintrittswahrscheinlichkeiten P zu:

$$SEW_T = S_T \cdot P_T \quad (\text{Gl. 3-2})$$

mit

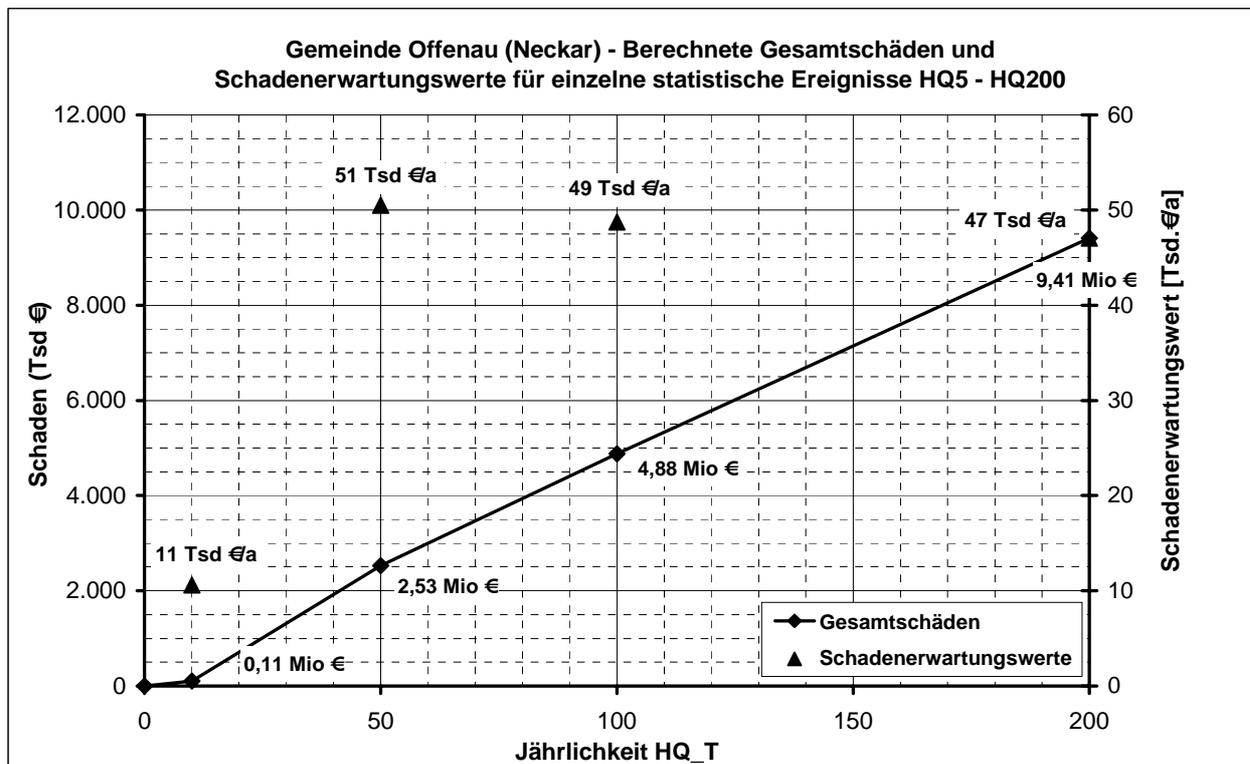
$SEW_T$  Schadenserwartungswert bei Ereignis HQ<sub>T</sub> [EUR/a]

$S_T$  Schaden bei Ereignis HQ<sub>T</sub> [EUR]

$P_T$  Eintrittswahrscheinlichkeit von HQ<sub>T</sub> [1/a]

$T$  Jährlichkeit des Ereignisses HQ<sub>T</sub> [a]

Während bedingt durch die zunehmend höheren Wasserstände bei selteneren Ereignissen die absolute Schadenshöhe stetig zunimmt, erreichen die Schadenserwartungswerte im Beispiel ihr Maximum beim HQ<sub>50</sub> und nehmen bedingt durch die geringeren Wahrscheinlichkeiten bei größeren Abflussmengen wieder ab. Für die später dargestellte Berechnung der Schadenserwartungswerte liefern diese Ereignisse den größten Schadenanteil (51 Tsd. EUR/a).

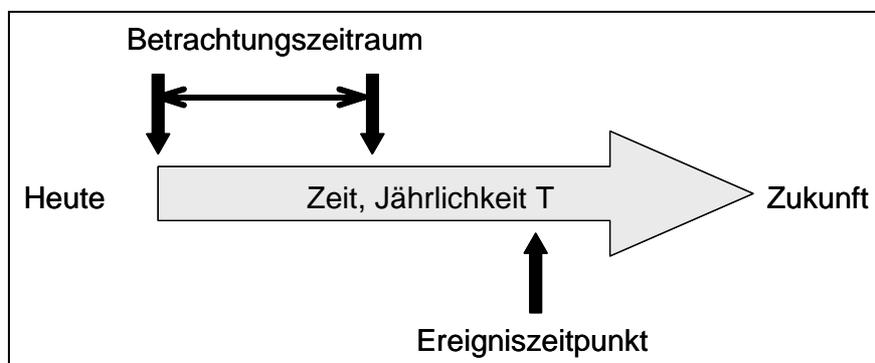


**Abbildung 3-5:** Gesamtschäden und Schadenserwartungswerte

**(2) Mit welcher Wahrscheinlichkeit tritt ein bestimmtes Ereignis in einem festgelegten Zeitraum ein (Einzelschaden unter Berücksichtigung des hydrologischen Risikos)?**

Zur Abschätzung von seltenen Risiken kann es sinnvoll sein, auch solche Ereignisse zu berücksichtigen, die außerhalb des üblicherweise verwendeten Betrachtungszeitraumes liegen (siehe Abbildung 3-6). Über die Berechnung des sog. hydraulischen Risikos können Angaben über die Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner Ereignisse in einem definierten Zeitraum gemacht werden, z.B. kann damit die Frage beantwortet werden:

*Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine 200-jährliches Ereignis in den nächsten 50 Jahren mindestens einmal auftritt?*



**Abbildung 3-6:** Zeit- / Risikoachse Hydrologisches Risiko

Die Berechnung des hydraulischen Risikos erfolgt über den statistischen Ansatz der bedingten Wahrscheinlichkeit zu:

$$R_{Hy} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (\text{Gl. 3-3})$$

mit

$R_{Hy}$  Hydrologisches Risiko [-]

$T$  Jährlichkeit des Ereignisses  $HQ_T$  [a]

$n$  Betrachtungszeitraum [a]

Die Angabe einer Jährlichkeit bei Hochwasseruntersuchungen wird oftmals fälschlicherweise so verstanden, dass durch sie die Zeitspanne bis zum Eintreten des Ereignisses beschrieben wird. Ein „seltenes“ Hochwasser mit einer Jährlichkeit bspw. von  $T=100$  wird dabei so aufgefasst, dass es erst in 100 Jahren auftritt und somit für die meisten Personen außerhalb des erfahrbaren Bereiches liegen wird. Richtig ist jedoch, dass die Wahrscheinlichkeit, dass es in jedem beliebigen Jahr eintritt bei  $P=0,01$  liegt. Dies bedeutet, dass das gleiche Ereignis in einem Zeitraum

von 1000 Jahren durchschnittlich 10-mal auftritt, entweder (statistisch unwahrscheinlich) in einem regelmäßigen Abstand von 100 Jahren oder in unregelmäßigen Abständen, wobei hierbei auch ein mehrmaliges Auftreten innerhalb eines Zeitraumes von wenigen Jahren möglich sein kann (z.B. die „Jahrhunderthochwasser“ 1993 und 1995 am Rhein).

Abbildung 3-7 zeigt die Kurvenverläufe der hydrologischen Risiken bei Ereignissen unterschiedlicher Jährlichkeiten und in Abhängigkeit des Betrachtungszeitraumes. Entsprechend der Frage aus dem oben dargestellten Beispiel ist aus der Kurve der Jährlichkeit  $T=200a$  zu erkennen, dass das Hochwasser in einem Zeitraum von 50 Jahren mit einer Wahrscheinlichkeit von 22 % auftreten wird. Dies bedeutet im Umkehrschluss jedoch auch, dass die Sicherheit, innerhalb der nächsten 50 Jahre nicht durch ein 200-jährliches Hochwasser betroffen zu sein, bei „nur“ 78 % liegt.

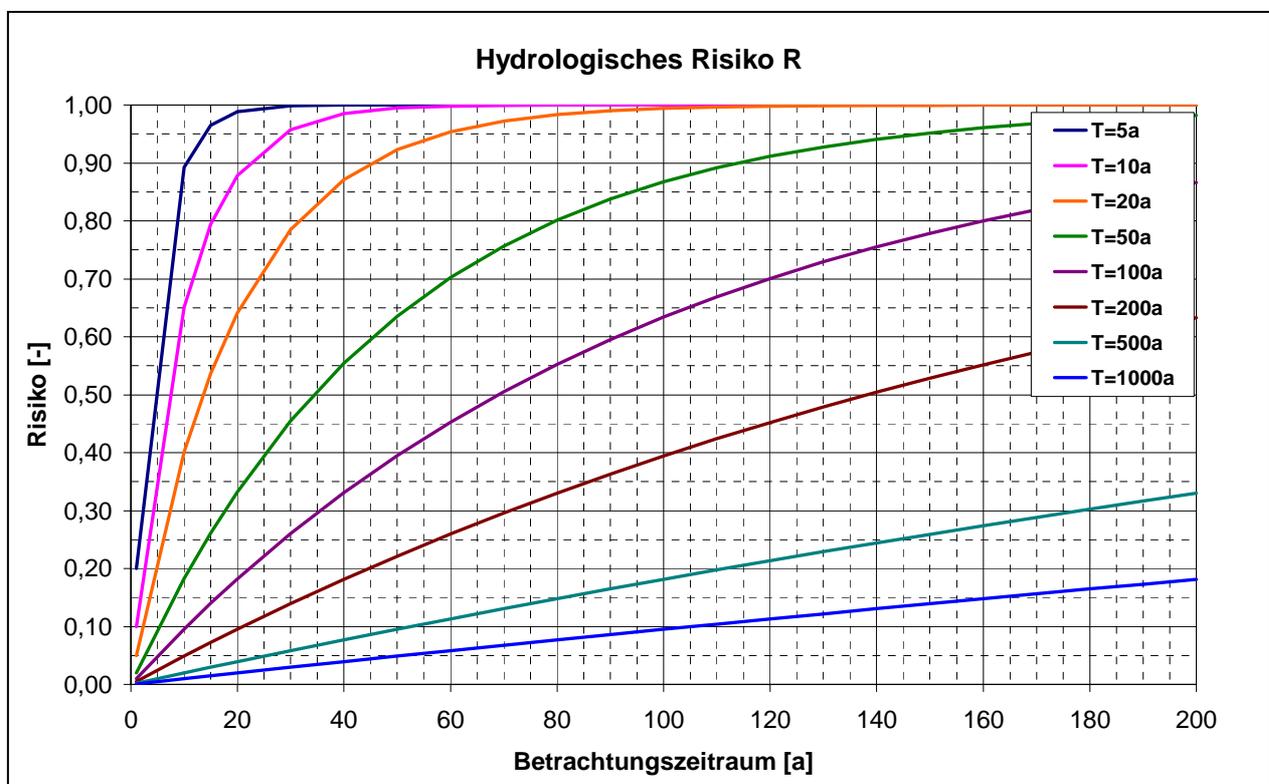
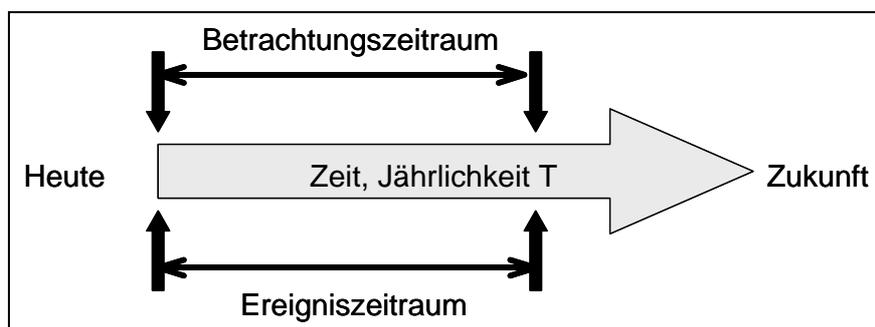


Abbildung 3-7: Hydrologisches Risiko

Ein typisches Anwendungsbeispiel für die Berücksichtigung des hydrologischen Risikos ist die Betrachtung der Restrisiken bei umgesetzten Hochwasserschutzmaßnahmen. Hierbei kann z.B. die Frage beantwortet werden, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass während der gesamten Nutzungsdauer der Schutzmaßnahme ein bestimmtes Hochwasser auftritt, das die Schutzhöhe der Maßnahme überschreitet.

**(3) Mit welchen durchschnittlichen jährlichen Schäden muss im derzeitigen bzw. in einem zukünftigen Zustand gerechnet werden (Schadenserwartungswert) ?**

Zur monetären Beurteilung des effektiven Hochwasserrisikos bzw. zur Ermittlung der monetären Nutzenkomponenten von Schutzmaßnahmen ist eine Betrachtung von Erwartungswerten einzelner Schadensereignissen nicht ausreichend. Vielmehr muss in diesem Fall das gesamte Spektrum möglicher auftretender Hochwasserereignisse in die Bewertung mit eingehen. Wie in Abbildung 3-8 dargestellt, erstrecken sich hier sowohl der Betrachtungszeitraum als auch der Ereigniszeitraum über den gesamten Bereich möglicher Ereignisse.



**Abbildung 3-8:** Zeit- / Risikoachse Schadenserwartung

Schadenserwartungswerte sind wesentliche Grundlage für Kosten-Nutzen-Untersuchungen bei der Planung von Schutzmaßnahmen in denen die Kosten der erforderlichen Maßnahmen der Summe der verhinderten Schäden gegenüberzustellen sind. Die Schadenserwartungswerte für den Zustand mit Baumaßnahme entsprechen dabei dem verbleibenden Risiko, das durch Überschreiten des Schutzgrades durch seltene Hochwasser bedingt ist. Das Hochwasserrisiko kann hierbei als Integral der Funktion der Hochwasserschäden über der Überschreitungswahrscheinlichkeit interpretiert werden (siehe Abbildung 3-3).

Die Berechnung der Schadenserwartungswerte kann sowohl über die Verteilungsfunktion der Hochwasserschäden als auch über die Dichtefunktion der Hochwasserabflüsse (DVWK (1985) erfolgen.

### **3.3.1 Schadenserwartungswerte über Verteilungsfunktion der Hochwasserschäden**

Die Berechnung der Schadenserwartungswerte über die Verteilungsfunktion der Hochwasserschäden ist in Abbildung 3-3 dargestellt und aus dem Integral der Schäden über die zugehörigen Eintretenswahrscheinlichkeiten berechnet:

$$SE_{i,k} = \int_{P_i}^k S_i(P) dP \quad (\text{Gl. 3-4})$$

mit

$SE_{i,k}$  Schadenerwartungswerte des Intervalls  $i$  bis  $k$  [EUR/a]

$S_i(P_i)$  Verteilungsfunktion der Schäden

$P_0$  Eintretenswahrscheinlichkeit des Ereignisses,  
bei dem erste Schäden auftreten [1/a]

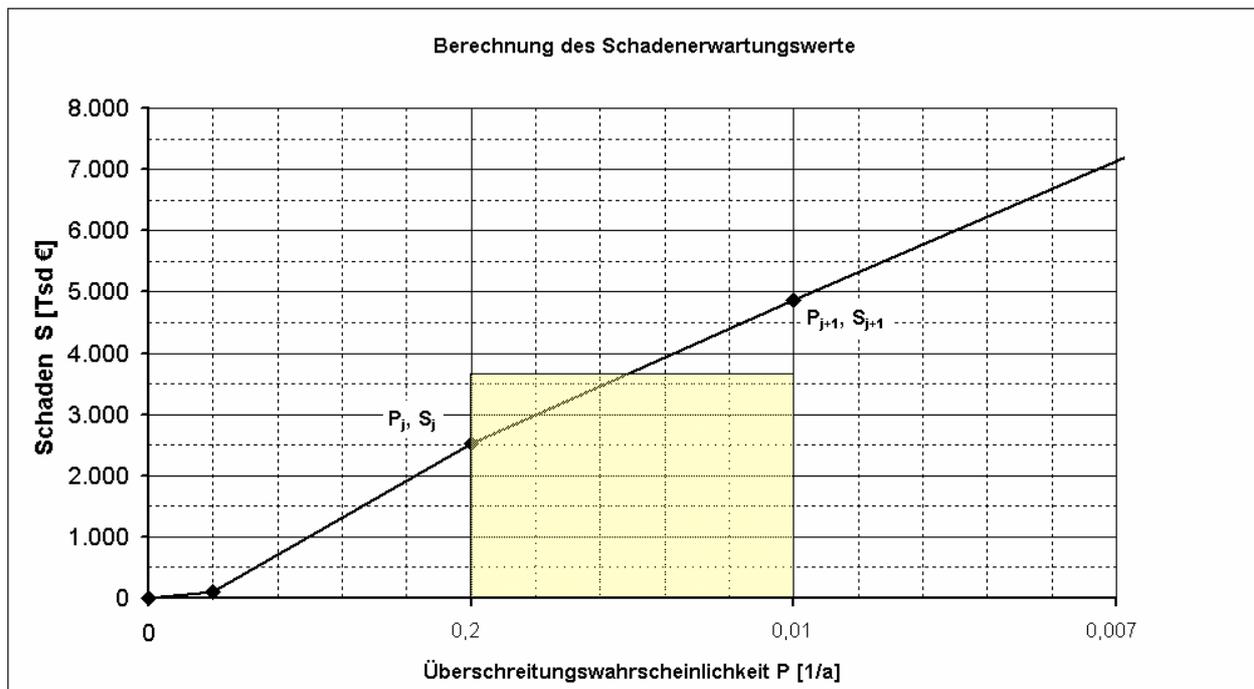
$P_k$  Eintretenswahrscheinlichkeit des größten betrachteten Ereignisses

Da die Funktion in der Praxis in analytischer Form meist nicht vorliegt bzw. nicht ermittelt wird, wird der Schadenerwartungswert näherungsweise über die Summenfunktion berechnet:

$$SE_{i,k} \approx \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{2} \cdot (S_j + S_{j+1}) \cdot (P_j - P_{j+1}) \quad (\text{Gl. 3-5})$$

In Abbildung 3-9 dargestelltem Beispiel ergibt sich exemplarisch für die Klasse der Ereignisse mit einer Eintretenswahrscheinlichkeit von 0,2 bis 0,01 (HQ50 bis HQ100) ein Schadenerwartungswert von:

$$SE \approx \frac{1}{2} \cdot (2530 + 4875) \cdot (0,2 - 0,01) = 704 \quad [\text{EUR/a}] \quad (\text{Gl. 3-6})$$



**Abbildung 3-9:** Näherungsweise Berechnung des Schadenerwartungswertes für das Intervall der Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{u}}=0,2$  bis  $0,01$ .

### 3.3.2 Schadenserwartungswerte über Dichtefunktion der Hochwasserabflüsse

Alternativ zu der in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Vorgehensweise kann der Erwartungswert auch über die Dichtefunktion der Hochwasserabflüsse berechnet werden. Dann ergibt sich:

$$SE_{i,k} = \int_{i=0}^k S(Q_i) \cdot h(Q_i) dQ \quad (\text{Gl. 3-7})$$

mit

$SE_{i,k}$  Schadenerwartungswerte des Intervalls  $i$  bis  $k$  [EUR/a]

$S(Q_i)$  Schadenfunktion [EUR/Ereignis]

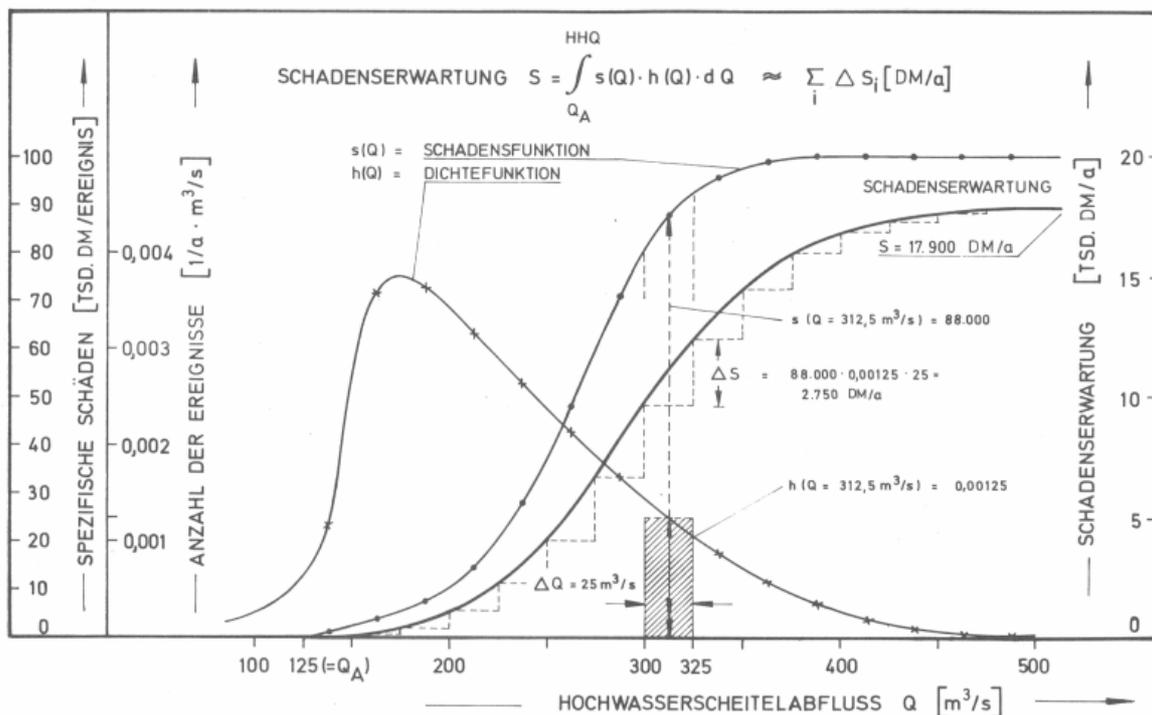
$h(Q_i) = P(Q_i) \cdot Q_i =$  Dichtefunktion der Abflussscheitelwerte [ $1/a \cdot m^3/s$ ]

bzw. näherungsweise als Summenfunktion:

$$SE_{i,k} \approx \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{2} \cdot (S_j + S_{j+1}) \cdot \frac{1}{2} (h_j - h_{j+1}) \cdot \Delta Q \quad (\text{Gl. 3-8})$$

Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise ist in SCHMIDTKE, R. F. (1981) folgendes Diagramm und Beispiel dargestellt:

„Um zu der gesuchten Schadenerwartung zu kommen, wird eine Intervallaufteilung der Abflüsse vorgenommen, hier mit  $\Delta Q=25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dann wird für jedes Intervall die zugehörige spezifische Schadenerwartung berechnet. Für ein als Beispiel gegriffenes Intervall zwischen  $Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $325 \text{ m}^3/\text{s}$  kann als repräsentativer Wert der Dichtefunktion die dem Abfluss  $Q=312,5 \text{ m}^3/\text{s}$  zugehörige Anzahl der Ereignisse mit 0,00125 abgelesen werden. Diese wird mit dem Faktor 25 multipliziert. Dadurch ist die Intervallfläche bestimmt, die den Anteil der Hochwässer zwischen 300 und  $325 \text{ m}^3/\text{s}$  am Gesamtanteil aller Hochwässer angibt. Ihre Eintrittswahrscheinlichkeit beträgt 0,0312. Hochwässer des betrachteten Intervalls verursachen Schäden, die auf der Schadenfunktion mit dem Wert 88.000.- DM repräsentiert werden. Die spezifische Schadenerwartung lässt sich somit zu  $88.000 \cdot 0,0312 = 2.750.- \text{ DM/a}$  ermitteln. Die Summe der spezifischen Schadenerwartungen ergibt schließlich die Gesamtschadenerwartung, die im Beispiel [...] 17.900 DM/a beträgt“.



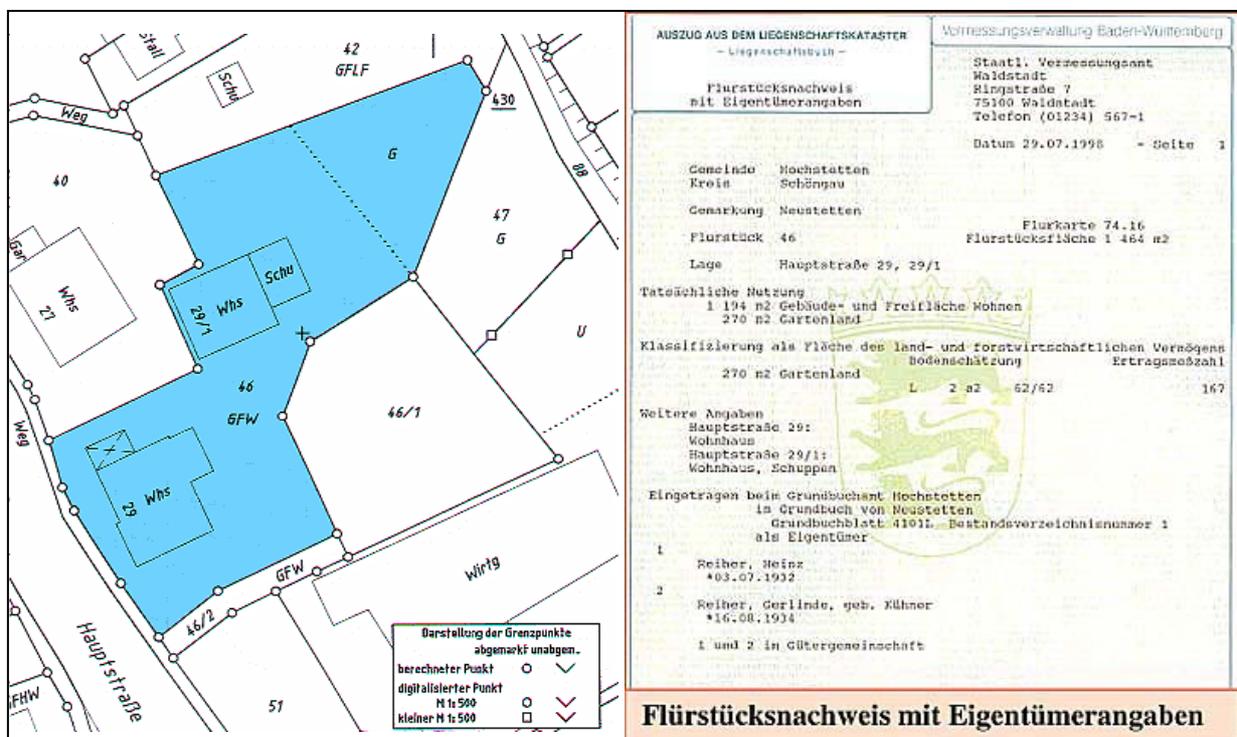
**Abbildung 3-10:** Berechnung der Schadenserwartungswerte über Dichtefunktion des Abflusses (SCHMIDTKE, R. F. (1981))

### 3.4 Methodische Ansätze für unterschiedliche Maßstabsebenen

Die Ermittlung der Schadenspotenziale bzw. der Schadenserwartungswerte kann abhängig von der Fragestellung, der Größe des Untersuchungsgebietes sowie der Qualität und Auflösung der vorhandenen Daten mit verschiedenen Ansätzen erfolgen. Während in früheren Untersuchungen die Größe des Untersuchungsgebietes, mit entsprechendem Aufwand für Modellierung und Datenhandling, der maßgebende Faktor für die Wahl der Modellskala war, ist mit den heutzutage vorhandenen Rechnerkapazitäten die Auflösung und Genauigkeit der Eingangsdaten der limitierende Faktor.

In **mikroskaligen Analysen** werden Schäden für einzelne Objekte bzw. Flurstücke ermittelt (lokale Ebene). Dies ist vor allem bei lokalen Schutzmaßnahmen erforderlich, bei denen unterschiedliche Ausführungsvarianten der geplanten Maßnahme(n) (sozio-) ökonomisch erfasst und bewertet werden müssen. Die Schäden werden objektbezogen entweder in absoluten Geldgrößen ermittelt, oder als Schädigungsgrade (evtl. in Abhängigkeit des Gesamtwerts) eines Objekts angegeben. Der Gesamtschaden im betrachteten Gebiet setzt sich aus der Summe der Einzelschäden an/in den betroffenen Objekten. Je nach Struktur des betrachteten Gebietes müssen die Schadensfunktionen dabei entweder für einzelne Gebäude ermittelt bzw. können gebäudetypbezogene Funktionsverläufe angesetzt werden. Z.B. ist bei der Berücksichtigung von Industriebetrieben meist eine

individuelle Erstellung bzw. Anpassung der Schadensfunktion erforderlich, da die einzelnen Betriebe eine meist nicht vergleichbare Ausstattung und Werteverteilung aufweisen (Höhenlage und Ausstattung der Produktionsstätten und Lager, Größe des Maschinenparks, etc.). Demgegenüber weisen kleine bis mittlere Gemeinden oftmals einen relativ homogenen Gebäudebestand auf (Bauweise, Gebäudegröße, Gebäudealter), so dass hierbei typbezogene Schadensfunktionen angesetzt werden können, die z.B. der HOWAS-Datenbank entnommen werden können. Voraussetzung für mikroskalige Analysen ist zum einen das Vorhandensein entsprechend hochaufgelöster Daten, die eine gebäude-, bzw. flurstücksscharfe Betrachtung ermöglichen. Dies betrifft sowohl die Auflösung des Geländemodells als auch die Genauigkeit der hydraulischen Untersuchungen (i.d.R. Berechnungen über HN-Modellierung). Weiterhin müssen entsprechend hochaufgelöste Informationen über die Landnutzung vorliegen, z.B. Datensätze aus der automatisierten



Liegenschaftskarte (ALK-Daten).

**Abbildung 3-11:** Beispieldatei aus dem Liegenschaftskataster Baden-Württemberg. Links: Darstellung der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK). Rechts: Darstellung des Automatisierten Liegenschaftsbuches (ALB). [Quelle: Landesvermessungsamt BW]

ALK-Daten sind der geometrische Nachweis der Flurstücke und neben den Informationen des automatisierten Liegenschaftsbuches (ALB), die den beschreibenden Nachweis liefern der zweite Bestandteil des Liegenschaftskatasters (LIKA). Die Daten werden von den für die Vermessung zuständigen Dienststellen der Bundesländer geführt und aktuell gehalten. Die ALK ist landesweit als Punkt- und Grundrissdatei eingerichtet und enthält Informationen über Flurstücke, politische Grenzen, Gebäude, tatsächliche Nutzungen, topografische Objekte etc. Die

Grundrissdaten werden als flächen-, punkt- oder linienförmige Objekte geführt und im Gauß-Krüger-Koordinatensystem angegeben. Die Lagegenauigkeit beträgt wenige cm bis zu maximal einigen Dezimetern. Die Genauigkeit sowie die unterschiedlichen verfügbaren Datenformate (Raster- oder Vektordaten) erlauben die Verwendung der ALK-Daten in GIS-gestützten Projekten.

Ist eine objektscharfe Betrachtung (aufgrund der Größe des Untersuchungsgebiets bzw. der Datenlage) nicht möglich, werden in **mesoskaligen Analysen** die Schadenspotenziale nicht mehr auf Objektebene erfasst, sondern die betroffenen Gebiete in Nutzungseinheiten (z.B. Flächeneinheiten mit Wohnbebauung) aggregiert (regionale Betrachtung). Die anzusetzenden Vermögenswerte werden dann üblicherweise aus wirtschaftsstatistischen Parametern abgeleitet (z.B. Anlagevermögen oder Bruttowertschöpfung einzelner Regionen). Die Bewertung der Hochwasserschäden erfolgt dabei zunächst als Angabe prozentualer Schädigungsgrade. Unter Berücksichtigung der Vermögenskomponenten erfolgt die Angabe der monetarisierten Schäden als Werte je Flächeneinheit (EUR/m<sup>2</sup>). In mikroskaligen Analysen erfolgt die Klassifizierung der Gebäude für das gesamte Untersuchungsgebiet, folglich wird die ermittelte Schadensfunktion auch für alle Gebäude gleichen Typs verwendet. Im Gegensatz dazu müssen in mesoskaligen Ansätzen aufgrund der regional unterschiedlichen wirtschaftsstatistischen Leitwerte auch die Schadensberechnungen jeweils für einzelne Teilräume mit unterschiedlichen Funktionsansätzen erfolgen. Ein weiterer Unterschied zur mikroskaligen Analyse ist die Tatsache, dass durch die Aggregation einzelnen Objekte in Nutzungseinheiten erfolgt eine Mittelung der Vermögenswerte auf die Nutzungsfläche, bei der grundsätzlich von größeren Ungenauigkeiten ausgegangen werden muss. Während bei der objektscharfen Betrachtungsweise alle schadensrelevanten Parameter in größtmöglicher Genauigkeit vorliegen (Nutzungstyp, Lage des Objekts, berechnete Wassertiefe am Objekt) ist dies bei der flächenaggregierten Betrachtungsweise nicht der Fall. Hier ergibt sich der Anteil der überschwemmungsgefährdeten Werte aus dem Anteil der vom Hochwasser betroffenen Fläche von der Gesamtfläche. Ist die gesamte Fläche betroffen, entspricht der resultierende Hochwasserschaden der Summe der Vermögenswerte, ist nur eine Teilfläche betroffen, ergibt sich der Schaden entsprechend dem betroffenen Flächenanteil. Auch hier werden die Schäden i.d.R. in Abhängigkeit der Wassertiefen ermittelt. Darin liegt eine weitere Unsicherheit der Methodik begründet, da für die gesamte betroffene Fläche ein Wert für die maßgebende Wassertiefe angenommen werden muss, der bei stark geneigtem Gelände bzw. unterschiedlichen Gefälleverhältnissen nur schwer bzw. unter Hinnahme großer Unsicherheiten zu ermitteln ist.

Datengrundlage der Flächennutzungen sind Angaben der zuständigen Vermessungsbehörden, die üblicherweise auf der Basis von digitalen Landschaftsmodellen abgeleitet werden können, z.B. ATKIS (Amtlich Topografisch-Kartografisches Informationssystem). Hierbei werden jeweils Flächen gleicher

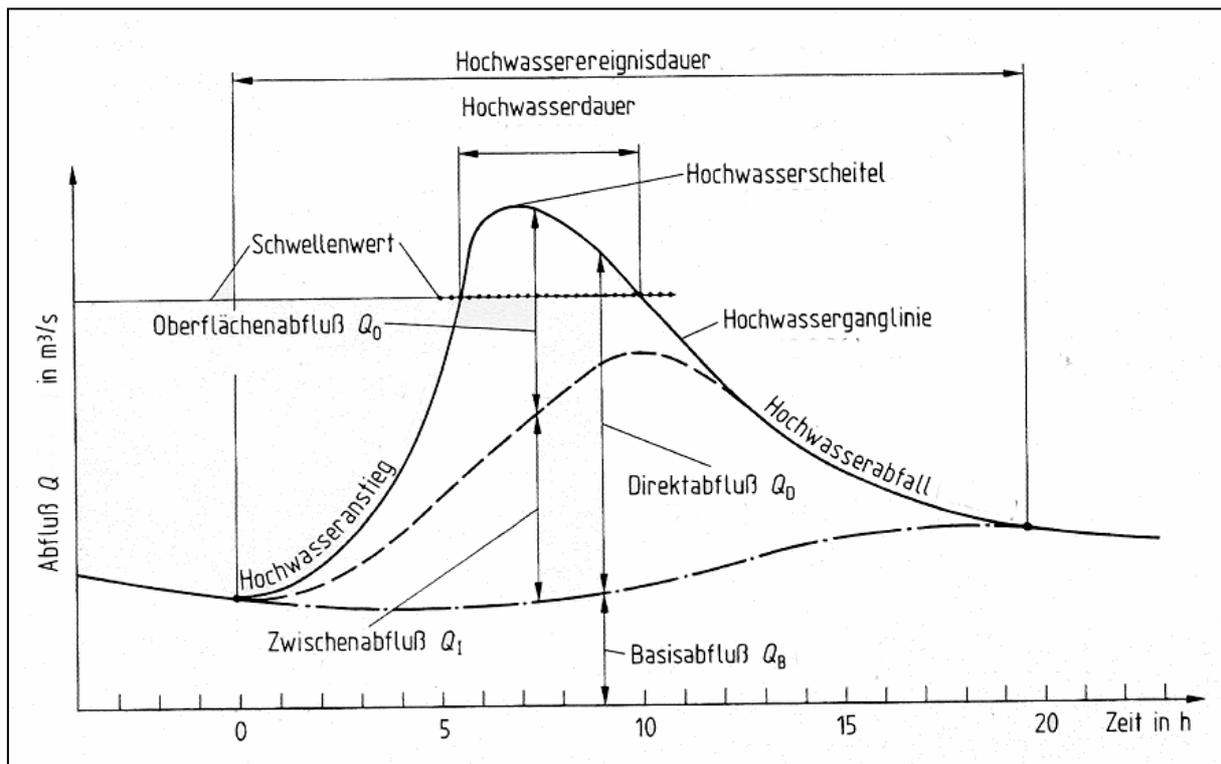
Nutzung definiert. Grundlage des ATKIS ist das Digitale Landschaftsmodell DLM 25, das auf Basis der topografischen Informationen der Deutschen Grundkarte DGK5 sowie der Topografischen Karte TK10 im Maßstab 1:10.000 erstellt wurde. Datenbestandteile sind ein grafischer Teil mit Geometrieangaben zu Punkten, Linien und Flächen sowie ein attributiver Teil mit Angaben zu Klassen, Größen und Namen. Im ATKIS System werden 6 Objektarten unterschieden (Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer, Relief, Gebiete) die wiederum in bis zu 50 Unterarten (Objektart Siedlung) gegliedert sind. Die Lagegenauigkeit der Flächen beträgt +/- 3 m. Eine weitere Schwierigkeit in der Verwendung nutzungsaggrierter Daten zur Schadenspotenzialanalyse beruht auf der Tatsache, dass die definierten Nutzungsklassen (Objektarten) weder mit den Klassen der wirtschaftsstatistischen Vermögenswerten noch mit deren räumlichen Einheiten übereinstimmen und erst auf diese abgestellt werden müssen.

Für großräumige Betrachtung (**makroskalige Analysen**) auf nationaler oder internationaler Ebene (z.B. Hochwasserrisikobetrachtung für Europa) mehrerer Flussgebiete (z.B. auf europäischer Ebene) sind die Möglichkeiten der Risikoanalyse als Basis zur Entwicklung von Schutzkonzepten stark begrenzt. Dies liegt zum einen am erforderlichen Detaillierungsgrad, der auch bei sehr großen Untersuchungsgebieten nicht unterschritten werden darf. Zum anderen gibt es derzeit keine Datengrundlage, die eine internationale Vergleichbarkeit der Vulnerabilität ermöglicht. Eine Risikoanalyse ist daher nur sehr eingeschränkt möglich (z.B. Identifizierung von „hot spots“ in Flusstälern)

## 4 Grundlagen der Gefährdungsermittlung

### 4.1 Hochwasserparameter

Die (Hochwasser-) Gefährdung ist definiert über die Auswirkungen eines Hochwasserereignisses in einem Untersuchungsgebiet einer bestimmten Größe bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit (Jährlichkeit). Sie stellt somit die Einwirkungsseite dar, die durch die physikalischen Charakteristiken des Wellenablaufs bestimmt ist (vgl. Abbildung 4-1).



**Abbildung 4-1:** Abflussganglinie (Quelle: DIN 4049 T3)

Die schadensrelevanten Eigenschaften der Hochwasserwelle können (abhängig von der Charakteristik des Ereignisses und des Einzugsgebiets) durch folgende Parameter beschrieben werden:

- Scheitelwasserstand
- Scheitelabfluss
- Fließgeschwindigkeiten
- Anstiegsdauer / Anstiegsgeschwindigkeit
- Wellenlaufzeit (Gesamtdauer)

Zur Ermittlung der Hochwassergefährdung müssen einzelne oder mehrere der genannten Größen bekannt sein. Grundsätzlich stellt jedes Hochwasser ein singuläres Ereignis dar, dessen Charakteristik sich aus dem aktuellen Niederschlagsereignisses und Gebietszustand ergibt. Auch wenn auf Basis von Erfahrungswerten die lokalen Hochwasserparameter teilweise aus Informationen von Oberliegern abgeleitet werden können, so sind für eine wissenschaftlich fundierte Analyse der lokalen, regionalen oder großräumigen Gefährdungssituation Analysewerkzeuge einzusetzen, mit denen eine Simulation beliebiger Hochwasserereignisse oder Szenarienrechnungen möglich sind. Für die praxisrelevanten Fragestellungen kommen hierzu eindimensionale oder zweidimensionale hydrodynamisch-numerische (HN-) sowie physikalische Modelle zum Einsatz, die in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert werden.

Der Einsatz dreidimensionaler Modelle ist derzeit für Fragen zur Hochwassergefährdung aufgrund des enormen zeitlichen und numerischen Aufwandes nicht zielführend. Die erforderliche vollständige dreidimensionale Simulation der Strömungsvorgänge macht eine Simulation größerer Flussabschnitte bzw. Überschwemmungsflächen nahezu unmöglich. 3D-Modelle können jedoch als Detail- bzw. Teilmodell lokaler Strömungsbereiche (z.B. bei Um/Überströmung von Brücken oder sonstigen Bauwerken die Hochwasseruntersuchungen ergänzen.

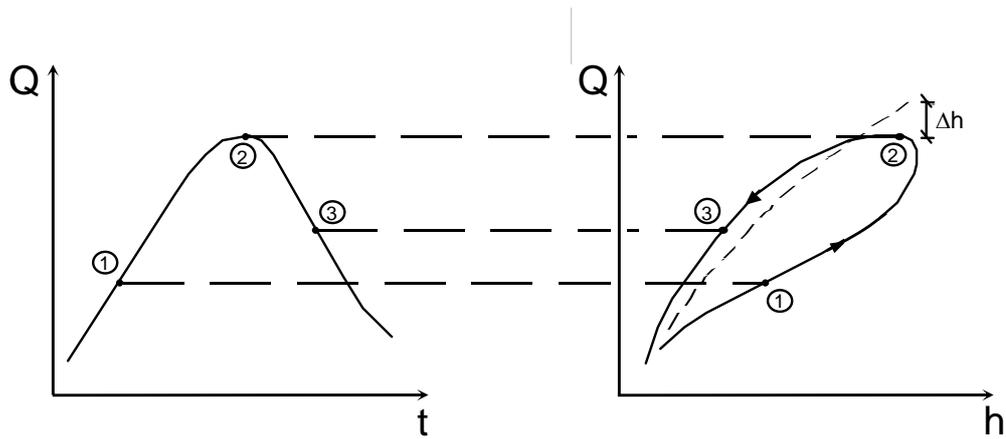
Neben der Unterscheidung nach der Anzahl der Dimensionen der Berechnungsergebnisse spielt bei der Auswahl auch die Frage nach der Zeitabhängigkeit der Strömungsparameter eine wesentliche Rolle.

## **4.2 Zeitabhängigkeit der Modelle**

Aufgrund der natürlichen Gegebenheiten laufen alle Prozesse in der Natur und somit auch alle Strömungsvorgänge zeitabhängig ab (instationär). Da sich die für den Abfluss maßgebenden Niederschläge sowie der Niederschlags-Abfluss-Prozess im Einzugsgebiet ständig ändern, ist auch der Abfluss in einem Gewässersystem einer ständigen zeitlichen Änderung unterworfen.

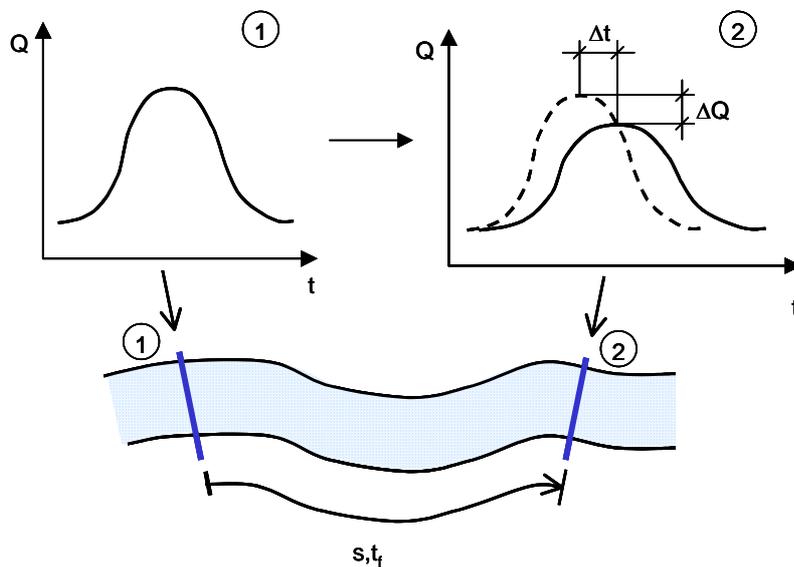
Neben den allgemeinen zeitlichen Veränderungen ergibt sich beim Durchlaufen einer Hochwasserwelle eine weitere zeitliche Abhängigkeit. Je nachdem, ob sich das System im Zustand des ansteigenden oder sinkenden Abflusses befindet, ergeben sich aus der Hysterese der Abflusskurve bei gleicher Abflussmenge unterschiedliche Wasserstände (Abbildung 4-2).

Abhängig von den Zielgrößen bzw. der zu untersuchenden Fragestellung ist im Einzelfall zu entscheiden, ob die Untersuchungen unter Berücksichtigung aller instationären Prozesse durchgeführt werden müssen oder ob einzelne instationäre Terme der Strömungsgleichungen vernachlässigt werden können, bzw. Vereinfachungen in den Eingangsgrößen zulässig sind.



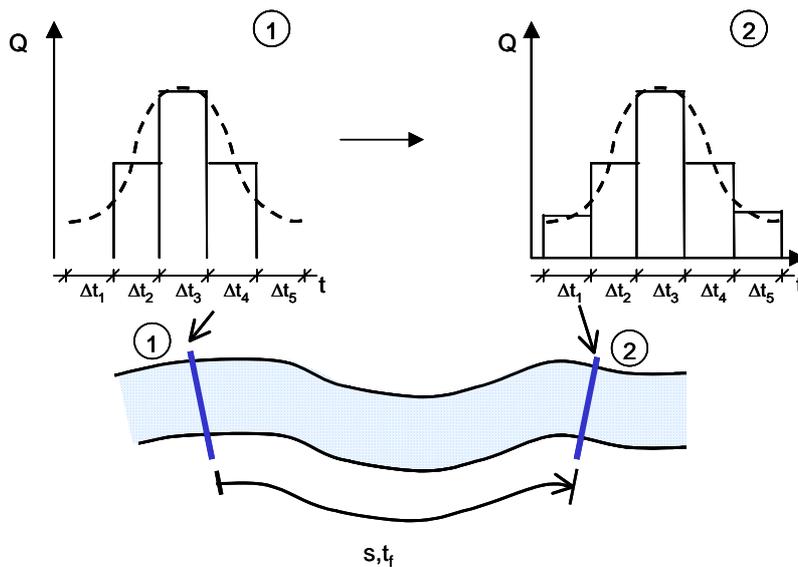
**Abbildung 4-2:** Hysterese einer instationären Abflusskurve

- Instationäre Modelle beschreiben die Prozessvorgänge unter Berücksichtigung aller zeitlichen Änderungen in den Strömungsvorgängen. Aufgrund der Komplexität der einzusetzenden Lösungsalgorithmen ist ein erhöhter Zeit- und Rechenaufwand erforderlich. Instationäre Modelle werden z.B. bei längeren Flussabschnitten eingesetzt, um die zeitliche Änderung im Wellenverlauf zu berechnen oder bei der Beurteilung von Flutungsvorgängen.



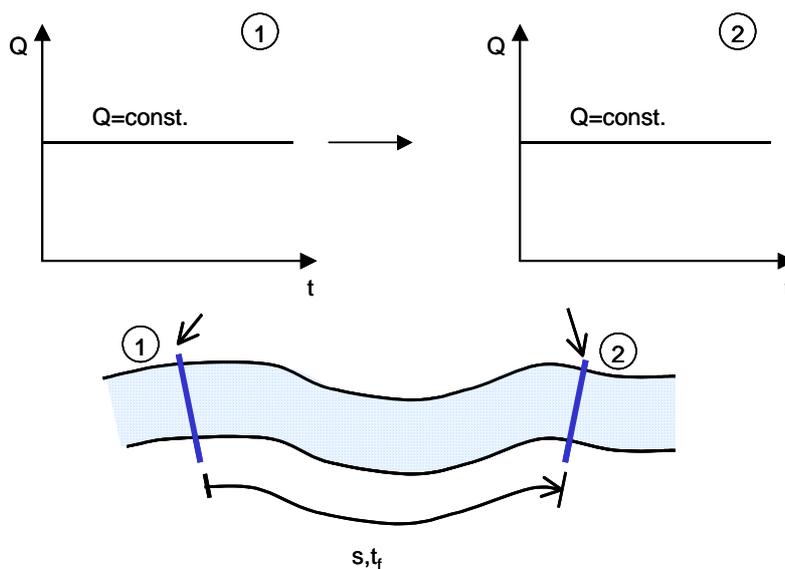
**Abbildung 4-3:** instationäres Abflussverhalten

- Quasi-Instationäre Modelle werden dann eingesetzt, wenn die zeitliche Änderung der Eingangs- und Bemessungsgrößen nur sehr langsam erfolgt. Dann kann der instationäre Prozess des Abflussgeschehens als Abfolge stationärer Zustände modelliert werden. Quasi-stationäre werden dann eingesetzt, wenn die Zuflussänderung am oberen Modellrand langsamer erfolgt als die Durchströmung des Modellgebiets dauert.



**Abbildung 4-4:** quasi -instationäres Abflussverhalten

- Stationäre Modelle vernachlässigen alle zeitabhängigen Terme in den Strömungsgleichungen; der Zufluss in das Modellgebiet bleibt über die ganze Berechnungsdauer konstant. Dadurch werden die Gleichungen wesentlich vereinfacht, was zu einem reduzierten Berechnungsaufwand mit entsprechend schneller Verfügbarkeit der Ergebnisse führt. Bei Hochwasseruntersuchungen werden stationäre Modelle vorwiegend dann eingesetzt, wenn (Höchst-) Wasserstände im Modellgebiet berechnet werden sollen.



**Abbildung 4-5:** stationäres Abflussverhalten

### 4.3 Hochwasserwahrscheinlichkeit

Die Mehrzahl der Schutzkonzepte gründen sich auf den Scheitelabfluss eines statisch abgeleiteten Hochwasserereignisses mit einer bestimmten Jährlichkeit  $HQ_T$ , über den bei bekanntem Strömungsverhalten des Fließgewässers der maximale Wasserstand berechnet werden kann.

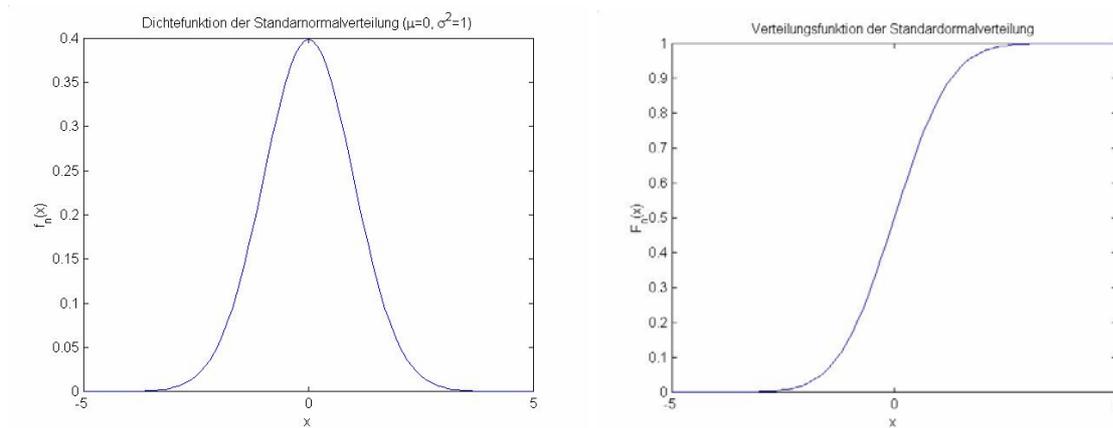
- Jährlichkeit bzw. Wiederkehrintervall (eines Ereignissen)  $HQ_T$ :  
Die Index T beschreibt die durchschnittliche Zeitdauer, in der ein Ereignis bestimmter Größe genau einmal erreicht oder überschritten wird. Zum Beispiel wird zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen häufig das örtliche  $HQ_{100}$  als Bemessungsabfluss angesetzt. Nach Definition ist unter dem  $HQ_{100}$  die Abflussmenge zu verstehen, die durchschnittlich einmal in hundert Jahren auftritt. Nach Definition tritt ein  $HQ_{20}$  im selben Zeitraum im Mittel fünfmal auf.
- Eintritts-, bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{u}}$ :  
Reziprokwert der Jährlichkeit ( $1/T$ ).  $P_{\bar{u}}$  drückt die Wahrscheinlichkeit aus, mit der ein Ereignis bestimmter Größe in jedem beliebigen Jahr erreicht oder überschritten wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ein  $HQ_{100}$  beträgt somit  $P_{\bar{u}} = 1/T = 1/100 = 0,01$ .

In den meisten Fällen von Hochwasserbetrachtungen ist der Zusammenhang zwischen dem Wasserstand an einer bestimmten Flusstelle beim Bemessungsereignis  $BHQ$  und die dazugehörige Eintritts- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit gesucht. Aufgrund der komplexen natürlichen Prozesse in der gesamten Kette der Abflussbildung kann jedoch keine analytische Ermittlung der Verteilungsfunktion  $HQ(a)$  erfolgen. Sind Messdaten vorhanden, so kann über Verfahren der Extremwertstatistik eine Verteilungsfunktion angepasst werden, mit der die einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zugeordneten Abflussmenge abgeschätzt werden kann.

Unter der Voraussetzung, dass die beobachteten Ereignisse statistisch unabhängig von einander sind, bilden sie eine Gesamtheit von stetigen Zufallszahlen. Da ein Beobachtungswert innerhalb einer Klasse an beliebiger Stelle auftreten kann, ist die relative Auftretenshäufigkeit und somit auch die Klassenbreite der jeweiligen Beobachtung physikalisch bedeutungslos. Aus diesem wird die relative Häufigkeit auf die Klassenbreite bezogen. Wie in PLATE, E. (1993) beschrieben, kann daraus die sog. Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F(x)$  und aus der Ableitung von  $F(x)$  die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f(x)$  gebildet werden.

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (\text{Gl. 4-1}) \quad \text{und} \quad F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) \cdot dx \quad (\text{Gl. 4-2})$$

Typische Funktionen sind in Abbildung 4-6 dargestellt.



**Abbildung 4-6:** typische Dichtefunktion (links) und Verteilungsfunktion (rechts) der Standardnormalverteilung

Grundsätzlich eignen sich als Dichtefunktionen alle mathematischen Funktionen, die eindeutig und nicht negativ sind, sowie deren Fläche 1 ist. In der Anwendung wird aus den verschiedenen zur Verfügung stehenden statistischen Funktionen jeweils die gewählt, aus der sich die beste Anpassung an die Messdaten ergibt. Für Hochwasserereignisse werden folgende Funktionen bevorzugt eingesetzt.

- Gumbel-Verteilung (Extremwertverteilung Typ 1)

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-c}{d}\right)\right], \quad f(x) = \frac{1}{d} \exp\left(-\frac{x-c}{d}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-c}{d}\right)\right] \quad (\text{Gl. 4-3})$$

- Pearson Typ 3 – Verteilung (dreiparametrig)

$$F(x) = \frac{\Gamma\left(a \cdot \frac{x-c}{d}\right)}{\Gamma(a)}, \quad f(x) = \frac{\left(\frac{x-c}{d}\right)^{a-1} \cdot \exp\left(-\frac{x-c}{d}\right)}{|d| \cdot \Gamma(a)} \quad (\text{Gl. 4-4})$$

- Log-Normal-Verteilung (dreiparametrig)

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x-c)-e}{d}\right), \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (x-c) \cdot d} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x-c)-e}{d}\right)^2\right] \quad (\text{Gl. 4-5})$$

- Log-Pearson Typ 3-Verteilung (dreiparametrig)

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x') \cdot dx', \quad f(x) = \frac{\left(\frac{\ln x - c}{d}\right)^{a-1} \cdot \exp\left(-\frac{\ln x - c}{d}\right)}{x \cdot |d| \cdot \Gamma(a)} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

Durch die Funktionsanpassung wird es möglich auch für seltene Ereignisse, die über den Beobachtungszeitraum hinausgehen, eine Eintrittswahrscheinlichkeit anzugeben. Die Extrapolation wird jedoch umso unsicherer, je weiter die Anzahl der Beobachtungsjahre von dem Wiederkehrintervall des betrachteten Ereignisses  $HQ_T$  abweicht. Insbesondere für die Risikoermittlung, in der auch seltene Extremereignisse betrachtet werden, ist die Qualität der Beobachtungsdaten ein entscheidender Faktor für die Güte der Extrapolation. Hierzu sind die Daten auf Konsistenz und Homogenität zu prüfen.

Nach DYCK, S., PESCHKE, G. (1983) ist als Kollektiv für Extremwertanalyse eine Beobachtungsreihe von 20-30 Jahre erforderlich, eine Extrapolation ist um die 2- bis 3-fache Länge der Beobachtungsreihe vertretbar. Der Extrapolationszeitraum kann jedoch verlängert werden, wenn zusätzliche HW-Informationen in die Betrachtung einbezogen werden, z.B. historische Informationen über maximale Wasserstände, Niederschlagsbeobachtungen, regionale Analogien.

Neben der Art der Verteilungsfunktion ist die Wahl der Funktionsparameter wesentlich für die Güte der Anpassung und extrapolierten Abflusskennwerte, die über verschiedene Verfahren (z.B. Momentenmethode, wahrscheinlichkeitsgewichtete Momente, Maximum-Likelihood-Methode) geschätzt werden können. Eine optimale Schätzung der Parameter ist nach DVWK (1999) dann erfolgt wenn:

- a) die Schätzung erwartungstreu ist. Die Bedingung ist dann erfüllt, wenn aus der Gesamtheit der vielen Schätzungen gemittelte Parameter gegen den zu bestimmenden Wert der Grundgesamtheit streben.
- b) die Schätzung effizient (wirksam) ist. Im Vergleich verschiedener Schätzverfahren ist das Verfahren vorzuziehen, bei dem die Streuung der einzelnen Parameter möglichst gering ist.
- c) die Schätzung robust ist. Die Forderung ist dann erfüllt, wenn eine Veränderung der Anzahl der Stichprobenelemente nur zu einer geringfügigen Änderung führt.

## 4.4 Numerische Modelle

### 4.4.1 Grundlagen

Strömungsprozesse in Fließgewässern ergeben sich aus den auf den Wasserkörper wirkenden äußeren und inneren Kräfte. Zu den äußeren Kräften gehören



#### 4.4.2 2D-HN-Modelle

##### Grundlegende Gleichungen

Neben der Annahme hydrostatischer Druckverhältnisse wird in der zweidimensionalen Betrachtungsweise eine weitere Vereinfachung von Strömungsparametern in z-Richtung vorgenommen. Aufgrund der schon beschriebenen Tatsache, dass die Wassertiefe im Verhältnis zur Gewässerbreite sehr klein ist, kann angenommen werden dass auch die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung sehr viel kleiner ist als in x- und y-Richtung ( $w \ll u, v$ ). Aus dieser Annahme ergibt sich eine Mittelung der Fließgeschwindigkeiten über die Tiefe.

Die Bestimmungsgleichungen, oft auch als Flachwassergleichungen bezeichnet, ergeben sich wie folgt:

- 2D-Gleichungen für Impulserhaltung

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial u^2 h}{\partial x} + \frac{\partial uvh}{\partial y} = -\frac{g}{2} \cdot \frac{\partial h^2}{\partial x} + \frac{h}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{h}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} - g \cdot h \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (\text{Gl. 4-9})$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial v^2 h}{\partial y} + \frac{\partial uvh}{\partial x} = -\frac{g}{2} \cdot \frac{\partial h^2}{\partial y} + \frac{h}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{h}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - g \cdot h \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (\text{Gl. 4-10})$$

- Massenerhaltung (Kontinuitätsbedingung)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (\text{Gl. 4-11})$$

##### Anfangs- und Randbedingungen

Zu Beginn der Simulationsrechnungen müssen an jedem Berechnungspunkt Startwerte für Wassertiefen und richtungsabhängige Geschwindigkeitskomponenten sowie für die Modellränder angegeben werden. Hierbei wird zwischen offenen und geschlossenen Rändern unterschieden:

Offene Ränder sind alle Modellränder über die ein Massenaustausch mit der Umgebung stattfinden kann. In Fließgewässern sind dies die durchflossenen Querschnitte am oberen und unteren Rand der Modellstrecke.

Geschlossene Ränder sind dadurch charakterisiert, dass keine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zum Rand auftreten kann. Tangentiale Geschwindigkeitskomponenten werden in Form von Schubspannungen berücksichtigt.

Da die erforderlichen Startwerte i.d.R. nicht aus Naturmessungen vorliegen, müssen sinnvolle Werte angenommen werden, bzw. plausible Vereinfachungen getroffen werden, z.B.

- Übernahme der Ergebnisse früherer Berechnungen
- Annahme eines horizontalen Wasserspiegels ( $h = \text{const.}$ ,  $u = v = 0$ )
- Start mit „trockenem“ Gerinne ( $h = 0$ )

Als Randbedingungen am oberen Rand wird bei unterkritischen (strömenden) Abflussverhältnissen üblicherweise eine Zuflussganglinie sowie eine Geschwindigkeitsverteilung verwendet, bei überkritischem (schießendem) Abfluss ist zusätzlich die Verteilung der Wasserstände anzugeben. Am unteren Rand sind bei strömendem Abfluss die Wasserstände über die Profilbreite, die Wasserstands-Abfluss-Beziehung oder das Wasserspiegel- bzw. Energieliniengefälle anzugeben, bei schießendem Abfluss sind keine Angaben erforderlich.

### Anwendungsbereiche

Zweidimensionale HN-Modelle bieten aufgrund der hohen Auflösung der Berechnungsergebnisse eine gute Grundlage zur Beurteilung von lokalen Strömungssituationen. Eine großflächige Anwendung ist mit erheblichem Aufwand an Modellierungszeit und Rechendauer verbunden, so dass die Anwendung in den meisten Fällen auf räumlich kleinere Einheiten beschränkt bleibt. Zweidimensionale Modelle werden eingesetzt z.B.:

- In Bereichen mit komplexen, mehrdimensionalen Strömungszuständen, z.B. beim Zusammenfluss zweier oder mehrerer Gewässer;
- Bei Untersuchungen, bei denen eine hohe räumliche Auflösung der Berechnungsergebnisse mit Angabe richtungsabhängiger Geschwindigkeitsvektoren gefordert ist;
- Zur Simulation von Deichbrüchen;
- Zur Untersuchung der Wirksamkeit von Flutungsmaßnahmen;
- Zur Ermittlung der Strömungsbelastung von Bauwerken (Wehre, Brückenpfeiler) und deren Dimensionierung;
- Für ökologische Fragestellungen, z.B. bei der Beurteilung von Habitateigenschaften oder Bewertung und Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen;
- Zur Simulation des Geschiebehaushaltes (Erosion-, Verlandungstendenzen von Gewässerabschnitten);
- Bei Untersuchungen zur Ausbreitung von Schadstoffen.

### 4.4.3 1D-HN-Modelle

#### Grundlegende Gleichungen

Eine weitere Vereinfachung kann vorgenommen werden unter der Annahme, dass neben der vertikalen auch die laterale Geschwindigkeitskomponente im Verhältnis zur Fließgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung sehr klein ist ( $u \gg v, w$ ). Das Gewässer wird als Stromröhre aufgefasst mit einer quer zur Strömungsrichtung horizontalen Wasserspiegellage. Die Annahme hat Gültigkeit für Fließstrecken mit einfachem Gerinnequerschnitt und nur geringen Krümmungen. Damit erhält man die eindimensionalen *St. Venant-Gleichungen*:

- 1D-Gleichung für Impulserhaltung

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(UQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial z_x}{\partial x} - \frac{\tau_q r_{hy}}{\rho} \quad (\text{Gl. 4-12})$$

- Massenerhaltung (Kontinuitätsbedingung)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{Gl. 4-13})$$

In diesen Gleichungen ist  $Q$  der lokale Abfluss,  $A$  die Fließfläche,  $r_{hy}$  der hydraulische Radius und  $\tau$  eine Schubspannung, die neben der Sohlreibung auch innere Strömungsverluste infolge von Turbulenz und Dispersion umfasst. In einem 1D Modell wird die Strömung als Gerinneströmung mit über ein Querprofil bzw. über Teile eines Querprofils gemittelten Strömungsparametern betrachtet.

#### Anfangs- und Randbedingungen

Auch bei der eindimensionalen Strömungssimulation müssen zu Beginn der Rechnungen Angaben zu den Anfangs- und Randbedingungen gemacht werden. Entsprechend dem Vorgehen bei 2D-Modellen müssen plausible Annahmen zu den Anfangsbedingungen gemacht werden, wenn keine Messungen vorliegen, z.B.

- Übernahme der Ergebnisse früherer Berechnungen
- Annahme eines horizontalen Wasserspiegels ( $h = \text{const.}, u = v = 0$ )
- Wasserspiegellagen aus Staukurvenberechnung
- Start mit „trockenem“ Gerinne ( $h = 0$ )

Als Eingangsgröße am oberen Modellrand wird üblicherweise eine Zuflussganglinie vorgegeben. Bei strömenden Abflussverhältnissen kann alternativ auch eine Wasserstandsganglinie verwendet werden. Liegt schießender Abfluss vor, so sind

am oberen Rand Angaben zu beiden Größen erforderlich. Als untere Randbedingung können ebenfalls Wasserstände oder Abflusskennwerte eingesetzt werden.

### Anwendungsbereiche

Bezüglich des Rechenaufwandes weisen eindimensionale Modelle eindeutige Vorteile gegenüber zweidimensionalen Modellen auf, allerdings mit geringerer räumlicher Auflösung der Berechnungsergebnisse. 1D-Modelle werden vor allem eingesetzt:

- Bei „einfachen“ hydraulischen Verhältnissen;
- Bei Untersuchungen, in denen eine Angabe der Zielgrößen über gemittelte Werte ausreichend ist, bzw. bei denen keine große Variation der Bemessungsgrößen über die Breite und die Tiefe vorliegt;
- Für Berechnungen der Wasserspiegellagen für Hochwasseruntersuchungen im Gerinne;
- Im Energiewasserbau zur Berechnung der Staukurven, zur Berechnung von Schwall- und Sunkerscheinungen;
- Zur Berechnung von Strömungs- und Transportvorgängen und des Retentionsverhaltens größerer Flussabschnitte;
- Zur Ermittlung der Auswirkungen von Rückhaltemaßnahmen auf das Abflussgeschehen im Gerinne;
- Für die Beurteilung von Transport- und Ausbreitungsvorgängen im regionalen und überregionalen Maßstab, z.B. Laufzeit einer Schadstoffwelle.

## **4.5 Physikalische Modelle**

### **4.5.1 Grundlagen**

Ebenso wie numerische Modelle sind physikalische Modelle zur Simulation natürlicher Strömungsvorgänge geeignet. Unter den Gesetzen der in Kapitel 4.5.2 beschriebenen Ähnlichkeitsmechanik erfolgt eine i.d.R. verkleinerte Abbildung eines Gewässers bzw. Fluss-Vorland-Systems. Sowohl bei der numerischen wie der physikalischen Modellierung müssen Vereinfachungen bzgl. der anzusetzenden Rauheitsparameter getroffen werden; im numerischen Modell über empirische Verlustbeiwerte, im physikalischen Modell über auf die Modellsohle aufgebraachte Rauheitselemente.

Im Unterschied zu numerischen Modellen müssen im physikalischen Modell die Strömungsvorgänge nicht mathematisch abstrahiert beschrieben werden, sondern ergeben sich aus der maßstäblichen Abbildung. Die Ermittlung der Strömungsgrößen ist dabei nicht auf einzelne Berechnungspunkte beschränkt, sondern kann über

geeignete Meßmethoden und -verfahren im gesamten Modellbereich ermittelt werden. Über Steuereinrichtungen im Zu- und Ablauf des Modells können nahezu beliebige Abflusszustände untersucht werden.

Der limitierende Parameter in der Anwendung physikalischer Modelle ist der geometrische Maßstabsfaktor. Einerseits muss der Maßstab so groß gewählt werden, dass die physikalischen Prozesse im Modell noch naturähnlich simuliert werden können, andererseits ist der zur Verfügung stehende Platz in der Versuchshalle begrenzt.

#### 4.5.2 Ähnlichkeitsmechanik

Die beim Bau und Betrieb von physikalischen Modellen einzuhaltende Modellgesetze ergeben sich aus der Forderung nach einer Vergleichbarkeit der im Modell gemessenen mit den natürlichen Größen. Diese Vergleichbarkeit ist nur dann gegeben wenn geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit gegeben ist.

Von einer geometrischen Ähnlichkeit kann dann gesprochen werden, wenn alle geometrischen Größen im Modell in einem bestimmten Maßstab abgebildet werden:

$$L_r = L_n / L_m \quad (\text{Gl. 4-14})$$

mit den Indizes

$r = \text{Maßstabs-, Verhältniszahl}$

$n = \text{Größe in Natur}$

$m = \text{Größe im Modell}$

Von dynamischer Ähnlichkeit wird dann gesprochen, wenn sich die Kräfte im Modell maßstäblich zu denen in der Natur ergeben:

$$F_r = F_n / F_m \quad (\text{Gl. 4-15})$$

Kinematische Ähnlichkeit ist dann gegeben, wenn die zeitabhängigen Prozesse im Modell in einem konstanten Verhältnis zu den natürlichen Vorgängen ablaufen:

$$t_r = t_n / t_m \quad (\text{Gl. 4-16})$$

Ist bei geometrisch ähnlichen Modellen eine dynamische Ähnlichkeit gegeben, kann gewährleistet werden, dass zeitabhängige Vorgänge kinematisch ähnlich abgebildet werden.

### 4.5.3 Modellgesetze

Aus den Forderungen der Ähnlichkeitsmechanik lassen sich Modellgesetze ableiten, die jeweils definiert sind als Verhältniszahlen hydraulischer Kennzahlen. Bei hochwasserrelevanten Fragestellungen in offenen Gerinnen überwiegen die Einflüsse von Schwere-, Trägheits- und Zähigkeitskräften. Um diese Kräfte im Modell naturähnlich abbilden zu können, müssen die charakteristischen hydraulischen Kennzahlen, in diesem Fall die *Froude- und Reynoldszahlen* in einem konstanten Verhältnis abgebildet werden.

Die Froude-Zahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerekräften und ist somit immer dann von Bedeutung, wenn Schwerkrafteinflüsse das Strömungsfeld maßgebend beeinflussen, wie bei allen Strömungsvorgängen in offenen Gerinnen. Sie ist definiert über die Gleichung:

$$Fr = \sqrt{\frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot v^2}{\rho \cdot g \cdot l}} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot l}} \quad (\text{Gl. 4-17})$$

Aus der Forderung einer modellähnlichen Abbildung muss gelten:

$$Fr_{\text{Natur}} = \frac{v_N}{\sqrt{g \cdot l_N}} = Fr_{\text{Modell}} = \frac{v_M}{\sqrt{g \cdot l_M}} \quad (\text{Gl. 4-18})$$

Unter der Voraussetzung einer geometrisch ähnlichen Abbildung können aus dem Modellgesetz Umrechnungsfaktoren für strömungscharakterisierende Größen in Natur und Modell abgeleitet werden, z.B. ergibt sich für die Fließgeschwindigkeiten:

$$v_r = \sqrt{l_r}, \quad \text{mit } v_r = \frac{v_N}{v_M}; l_r = \frac{l_N}{l_M} \quad (\text{Gl. 4-19})$$

Eine weitere wichtige hydraulische Kenngröße ist die Reynolds-Zahl, die das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften in der Gleichung

$$Re = \sqrt{\frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeitskraft}}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot v^2}{\eta \cdot \frac{v}{l}}} = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} \quad (\text{Gl. 4-20})$$

beschreibt. Auch hier ist die Modellähnlichkeit über einen konstanten Abbildungsfaktor gegeben, wenn gilt:

$$\text{Re}_{\text{Natur}} = \rho \cdot v_N \cdot l_N / \eta = \text{Re}_{\text{Modell}} = \rho \cdot v_M \cdot l_M / \eta \quad (\text{Gl. 4-21})$$

Hieraus ergibt sich der Umrechnungsfaktor für Strömungsgeschwindigkeiten zu:

$$v_r = 1/l_r \quad \text{mit} \quad v_r = v_N/v_M; l_r = l_N/l_M \quad (\text{Gl. 4-22})$$

Ein Vergleich der Umrechnungsfaktoren zeigt, dass die Forderungen der Modellgesetze nach Froude und Reynolds nur dann erfüllt werden können, wenn eine Anpassung der Zähigkeit des Modellfluids erfolgt; in der praktischen Anwendung ist dies jedoch nicht umsetzbar.

Unter der Voraussetzung, dass bei Gerinnen mit freier Oberfläche das Froudesche Modellgesetz eingehalten werden muss, ergeben sich im Modell im Vergleich zum natürlichen Zustand verkleinerte Reynoldszahlen, was wiederum zu einer Überschätzung der Zähigkeitskräfte im Modell bedeutet. Der Grad der Verkleinerung der Reynoldszahlen ergibt sich aus der geometrischen Maßstabszahl zu:

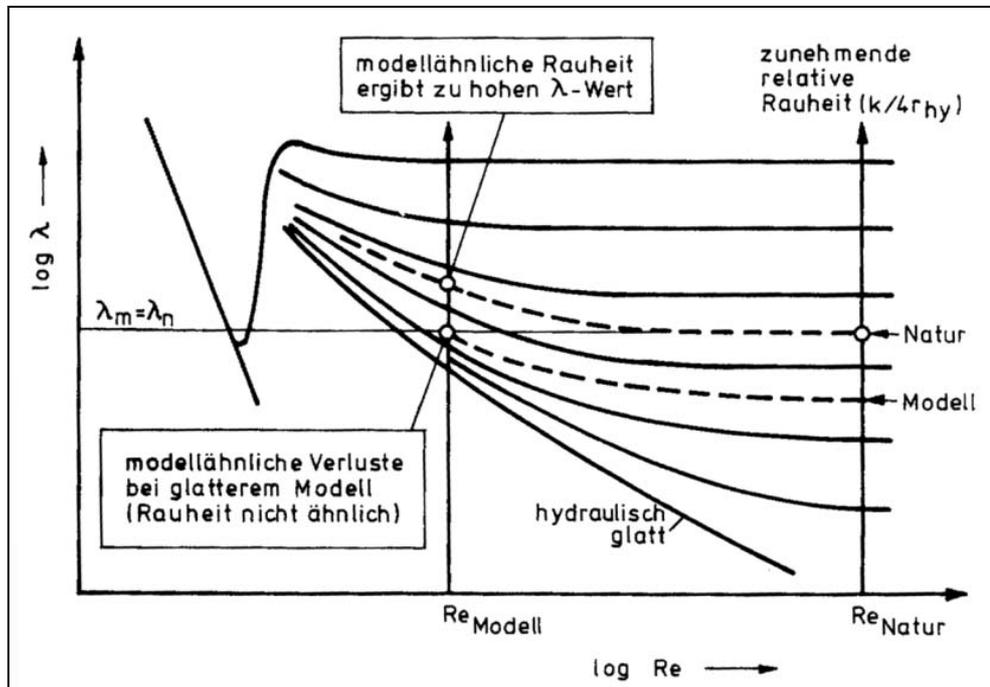
$$\text{Re}_r = \text{Re}_N / \text{Re}_M = v_N/v_M \cdot l_N/l_M = l_r^{3/2} \quad (\text{Gl. 4-23})$$

Welche Auswirkungen sich auf die Abbildung der Strömungsverhältnisse ergeben ist Abbildung 4-7 zu entnehmen, wobei hier 2 Fälle zu unterscheiden sind:

Liegen in Natur und Modell vollturbulente Verhältnisse vor, sind die Strömungsvorgänge unabhängig von den Reynoldszahlen. Die wirkenden Zähigkeitskräfte sind verhältnismäßig klein, so dass die Rauheitswirkungen ausschließlich vom Verhältnis der Rauheitserhebungen zur Querschnittsgeometrie abhängen. Die unmaßstäbliche Abbildung der Reynoldszahlen bleibt ohne Konsequenzen auf die Messergebnisse.

Für den häufiger vorkommenden Fall, dass die Reynoldszahlen im Modell nicht in allen Zuständen im vollturbulenten Bereich liegen, würde sich aus einer geometrisch ähnlichen Abbildung der Rauheitselemente eine Überschätzung der Rauheitswirkungen ergeben. Um die natürlichen Reibungsverhältnisse dennoch korrekt modellieren zu können, müssen die Rauheitserhebungen im Vergleich zum

Naturzustand in einem kleineren Maßstab abgebildet werden. In der wasserbaulichen Modellpraxis erfolgt dies im Zuge der Modelleichung, bei der über die Wahl der Modellrauheiten eine naturähnliche Abbildung des Wasserspiegellagen- und Energieliniengefälles erreicht wird.



**Abbildung 4-7:** Abbildung von Rauheitsverlusten bei Froude-Modellen (KOBUS, H. (1978))

### Anwendungsbereich

Ebenso wie bei den numerischen Modellen können mithilfe von physikalischen Modellen natürliche Strömungszustände simuliert werden. Insbesondere die stetige Weiterentwicklung der Mess- und Steuerungstechnik erlauben heutzutage den Einsatz physikalischer Modelle auch bei komplexen Anforderungen und Randbedingungen, z.B. unter Berücksichtigung instationärer Zu- und Abflussganglinien oder durch die Messung dreidimensionaler Geschwindigkeitsverteilungen. Die Hauptanwendungsbereiche physikalischer Modellversuche liegen vorwiegend in Bereichen mit komplexen Strömungssituationen, z.B. bei

- Zusammenflüssen zweier oder mehrere Gewässer (Mündungsbereich)
- Gegenseitiger Beeinflussung von Bauwerken und Strömung (Brückenpfeiler, Wehre)
- Strömungen im städtischen Bereich (Durchströmung von bewohnten Gebieten)

- An- bzw. Durchströmung von Bauwerken (z.B. Entnahmebauwerke an Poldern)
- Turbulenten Ausbreitungsvorgängen (Kühlwassereinleitung)
- Erosions-, Verlandungstendenzen

#### 4.6 Abgrenzung der Einsatzbereiche

Wie im vorigen Kapitel dargestellt decken sich die Einsatzbereiche physikalischer Modelle weitgehend mit denen numerischer Modelle, insbesondere mit denen von 2D-Modellen. Beiden Arten von Modellen gemeinsam ist auch, dass für die Modellerstellung bzw. den –betrieb Vereinfachungen getroffen werden müssen, die eine Kalibrierung über in der Natur gemessene Werte erforderlich machen.

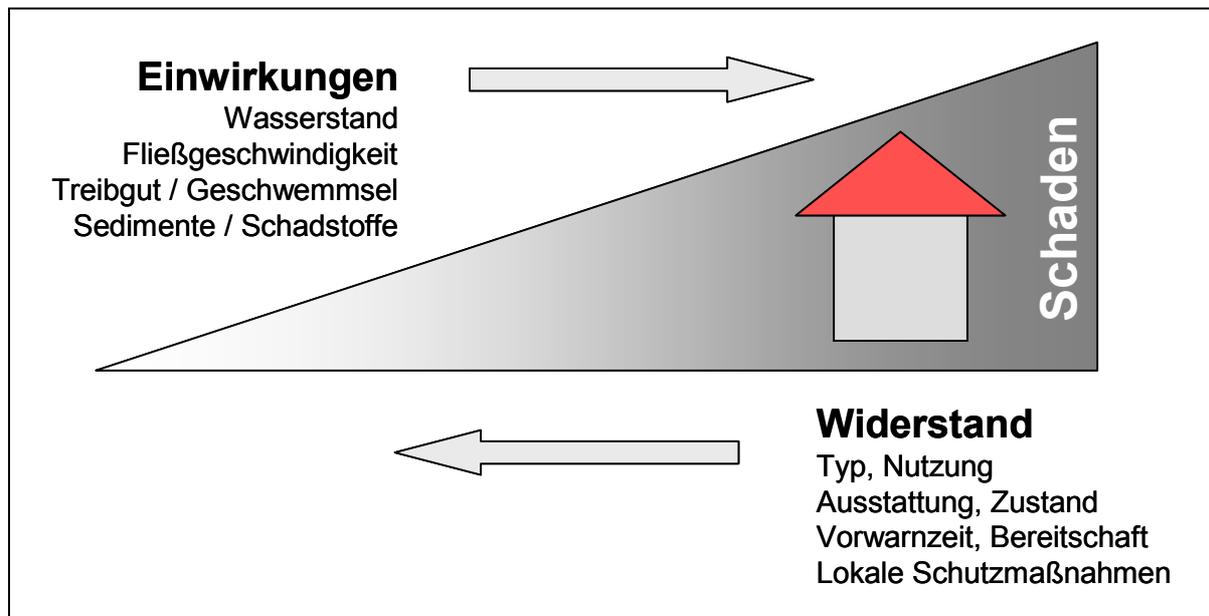
**Tabelle 4-1:** Einsatzgrenzen physikalischer und numerischer Modelle

	Anforderung	Limitierender Faktor
Physikalische Modelle	Einzuhaltender Modellmaßstab	Platzbedarf Leistungsfähigkeit
Numerische Modelle	Auflösung, Genauigkeit des Lösungsverfahrens	Rechnerkapazität Lösungsalgorithmen

- Es gilt zu beachten, dass die Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze bzw. die zur Verfügung stehenden Hallenflächen auch die Ausdehnung physikalischer Modelle beschränken.
- Vorteil der physikalischen Modellierung ist die, infolge der verbesserten und inzwischen rechnergestützten Regelungstechnik, detailliertere Modellierbarkeit von Öffnungs- und Schließvorgängen (insbesondere im Bereich komplexer Wehrgeometrien).
- Der notwendige Untersuchungszeitraum ist aufgrund der zwischenzeitlich automatisierten Geometrieerstellung und bei Einsatz standardisierter Messtechnik mit dem numerischer Modelle gleichzusetzen, da mit Hilfe von Erfahrungswerten die Kalibrierung/Validierung physikalischer Modelle wesentlich weniger Zeit in Anspruch nimmt als z.B. die Kalibrierung und Validierung im Falle numerischer 2D-Modelle.

## 5 Einflussfaktoren auf Gebäudeschäden

Die Höhe der durch Hochwasser verursachten Schäden an Gebäuden sind grundsätzlich von verschiedenen Faktoren abhängig, die entsprechend der gängigen statischen Definitionen entweder der Einwirkungs- oder der Widerstandsseite zugeordnet werden können (Abbildung 5-1).



**Abbildung 5-1:** Einflussfaktoren auf Gebäudeschäden

### 5.1 Einwirkungen

Der Einwirkungsseite sind all die Faktoren zuzuordnen, die aufgrund des Hochwasserereignisses selbst oder durch Folgewirkungen zu Schäden am oder im Gebäude führen können. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Einwirkungen mit den verursachten Schäden positiv korrelieren. Die resultierenden Kräfte sind abhängig von:

- Wasserstand
- Fließgeschwindigkeit
- Anstiegsgeschwindigkeit
- Dauer
- Anpralllasten (Treibgut)
- Sediment
- Schadstoffe

Abhängig von den Belastungsgrößen können Intensitätsstufen definiert werden, die die Auswirkungen beschreiben und so eine allgemeine Bewertung möglicher Gefährdungssituationen zulassen (Tabelle 5-1).

**Tabelle 5-1:** Intensitätsstufen von Hochwasser (Quelle: BWG (2004b))

	<b>starke Intensität</b>	<b>mittlere Intensität</b>	<b>schwache Intensität</b>
Wassertiefe h Fließgeschwindigkeit v	$h > 2 \text{ m}$ oder $v * h > 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$2 \text{ m} > h > 0,5 \text{ m}$ oder $2 > v * h > 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$	$h < 0,5 \text{ m}$ oder $v * h < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Schadenbilder an Gebäuden (laut Empfehlung BWG)	EG ganz überflutet, EG und Keller stark beschädigt, Fluchtwege in OG evtl. abgeschnitten, Grosse Geschiebeablagerungen, Erosionerscheinungen, dynamische Beanspruchungen, Gebäude stark beschädigt bis zerstört	Wasser dringt in Gebäude ein, Fenster werden evtl. eingedrückt, Mit Geschiebetrieb und Ablagerungen ist zu rechnen, Lokale Erosion ist möglich, Flucht in Obergeschosse ist in der Regel möglich	Abwehr von eindringendem Wasser ist in der Regel möglich, Untergeschosse sind gefährdet, Fahrzeuge können abgetrieben werden
Gefährdung von Personen und Tieren	in Gebäuden	im Freien und in Fahrzeugen	in der Regel keine Gefährdung

### 5.1.1 Wasserstand

Die am meisten schadensrelevante Einflussgröße ist der Wasserstand am / im Gebäude. Kann ein Wassereintritt in das Gebäude nicht verhindert werden, so treten zwangsläufig Schäden an der Gebäudehülle selbst und am festen und beweglichen Inventar auf. Die Höhe der Schäden ist dabei direkt abhängig von der Höhe des Wasserstandes und wird bei Analysen durch Wasserstand-Schaden-Funktionen berücksichtigt (siehe Kapitel 6).



**Bild 5-1:** Inventarschäden (Foto: S. Hickmann)

Unter der Annahme, dass das Wasser innerhalb des Gebäudes auf gleicher Höhe steht wie außerhalb, heben sich die Wasserdrücke auf und es ergeben sich keine resultierenden Druckkräfte auf die Gebäudestruktur. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass es bei einem dichten Anschluss von Wand- und Deckenelementen (Stahlbetondecken) zu einem Taucherglockeneffekt kommen kann, aus dem zusätzliche Auftriebskräfte resultieren können. Steigt der Wasserstand innerhalb des Gebäudes über die Höhe der Türstürze, kann das Luftvolumen nicht mehr entweichen und erzeugt eine von der Differenz der hydrostatischen Wasserdrücke abhängigen Auftriebskraft.

Bei Gebäude mit abgedichteter Gebäudehülle (mit schwarzer oder weißer Wanne) wirken hydrostatische Kräfte auf Kellersohle und Außenmauern, die zu schwerwiegenden strukturellen Schäden führen können. Unter der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung ergeben sich die resultierenden mittleren Drücke auf die äußeren Gebäudestrukturen zu:

$$p_z = \rho_w \cdot g \cdot z = \gamma_w \cdot z \quad [\text{kN/m}^2] \quad (\text{Gl. 5-1})$$

mit

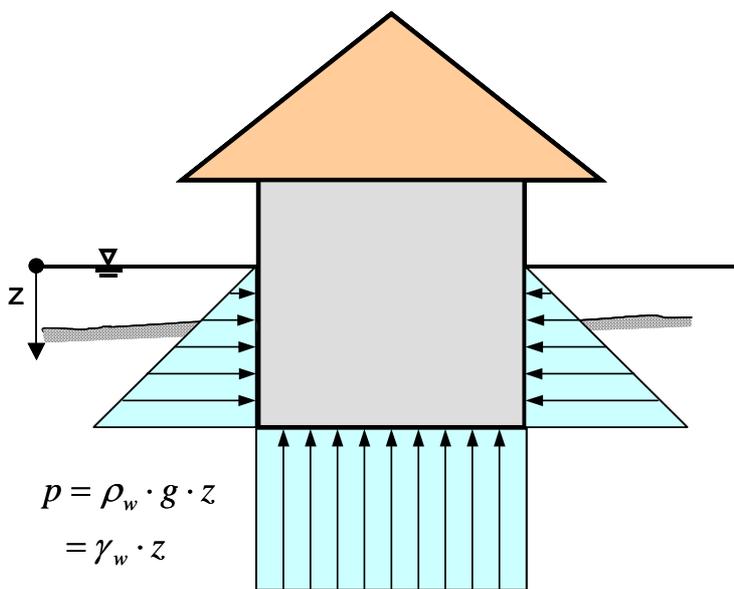
$p_z$  Wasserdruck in Höhe  $z$  [ $\text{kN/m}^2$ ]

$z$  Tiefe unter Wasserspiegel [ $\text{m}$ ]

$\rho_w$  Dichte von Wasser,  $\rho_w \approx 1.000 \text{ kg/m}^3$

$g$  Erdbeschleunigung;  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$\gamma_w$  Wichte Wasser;  $\gamma_w \approx 10 \text{ kN/m}^3$

Beispiel

Aus den Annahmen:

- Wasserstand 3,0 m über Keller
- Hydrostatische Druckverteilung
- Abgedichtetes Gebäude
- Grundfläche 100 m<sup>2</sup>

ergibt sich:

maximaler Druck auf Außenwand:

$$p_{max} = \gamma_w \cdot z = 30 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

mittlerer Druck auf Außenwand:

$$p_m = 0,5 \cdot \gamma_w \cdot z^2 = 45 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

resultierende Auftriebskraft:

$$F_A = \gamma_w \cdot z \cdot A = 3000 \text{ [kN]}$$

**Abbildung 5-2:** hydrostatische Kräfte auf Gebäude

Das Beispiel in Abbildung 5-2 zeigt, dass das Gebäude bereits bei einem Wasserstand von ca. 0,5 m über dem Gelände (bei einer Gründungstiefe von 2,5 m) eine resultierende Auftriebslast von 3.000 kN erfährt. Um ein Aufschwimmen zu vermeiden, muss das Gebäude ein „Gegengewicht“ von umgerechnet mindestens 300 t aufbringen. Falls eine Auftriebssicherheit nicht gegeben ist, kann es erforderlich sein das Gebäude zu fluten, um strukturelle Gebäudeschäden verhindern zu können. Ob hierzu die vorzuziehende Verwendung von Frischwasser (keine Verschlammung) möglich ist, hängt von den ereignisspezifischen und lokalen Gegebenheiten ab (Vorwarnzeit, zur Verfügung stehender Frischwasserstrom).

Ist aufgrund der (oben beschriebenen) baulichen Voraussetzungen (Stahlbetondecken mit dichtem Wandanschluss) keine vollständige Flutung des betroffenen Geschosses möglich, so sind die verbleibenden Auftriebskräfte in der statischen Bemessung zu berücksichtigen. Mit den Abmessungen aus Abbildung 5-2 ergibt sich bei beispielsweise bei Annahme eines Abstand von 50 cm zwischen Tür-, bzw. Fenstersturz zur Unterkante der Deckenkonstruktion eine Auftriebskraft von 500 kN.



**Bild 5-2:** Hochwasser 2002 in Grimma (Foto: S. Hickmann)

Mögliche Schadensbilder ergeben sich aus der Durchfeuchtung oder sind durch Lageveränderungen der Gebäude (Gründungsschäden) bedingt (Tabelle 5-2).

**Tabelle 5-2:** Schadensbilder aus hydrostatischer Belastung

Durchfeuchtungsschäden	Gründungsschäden
Ausblühungen	Schiefstellung
Abplatzungen	Setzungen
Aufquellen von Bauteilen	Rissbildung
Pilzbefall	Verformung von Bauteilen
Korrosion	Bodenverformungen

### 5.1.2 Fließgeschwindigkeit

Treten bei einem Hochwasserereignis höhere Fließgeschwindigkeiten auf, wirken neben den hydrostatischen Druckkräften zusätzliche dynamische Kräfte auf die Gebäude. Ab einer bestimmten, kritischen Fließgeschwindigkeit werden die Strömungskräfte so groß, dass die aufnehmbaren Lasten überschritten werden und einzelne Gebäudeteile bzw. das ganze Gebäude versagt.

Tabelle 5-3 zeigt für Wohngebäude die Abhängigkeit des Schädigungsgrade von der Fließgeschwindigkeit bzw. unter Berücksichtigung der Fließtiefe vom spezifischen Abfluss (PENNING-ROUSELL ET AL. (1992)).

**Tabelle 5-3:** Schädigungsgrade von Wohngebäuden

Schädigungsgrad	Fließgeschwindigkeit $v$ [m/s]	Spezifischer Abfluss $q$ [m <sup>3</sup> /s*m]
Ausschließlich Schäden durch Einstau	$v < 2$	$q < 3$
Teilweises Versagen	$v > 2$	$3 < q < 7$
Totalversagen	$v > 2$	$q > 7$

Die resultierende Kraft bzw. der Strömungsdruck der auf die Außenwand wirkt, ergibt sich aus der Impulsbetrachtung. Hierbei wird der auf das Gebäude wirkende Impuls der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit gegenübergestellt und man erhält:

$$F = \rho_w \cdot Q \cdot (\beta_2 \cdot v_2 - \beta_1 \cdot v_1) \quad [kN] \quad (\text{Gl. 5-2})$$

mit

$F$  resultierende Impulskraft [kN]

$\rho_w$  Dichte von Wasser,  $\rho_w \approx 1.000 \text{ kg/m}^3$

$Q$  Abfluss [m<sup>3</sup>/s]

$v_{1,2}$  Fließgeschwindigkeit in Querschnitt 1  
bzw. Querschnitt 2

$\beta_{1,2}$  Korrektur - Beiwert (Boussinesq)

Unter der Voraussetzung, dass die gesamte Geschwindigkeitsenergie dissipiert wird ( $v_2=0$ ) und unter den Annahmen einer gleichförmigen Geschwindigkeitsverteilung ( $\beta_1 = \beta_2 = 1$ ) und rechtwinkliger Anströmung ergibt sich

die Impulskraft  $F$  zu:

$$F = \rho_w \cdot Q \cdot v_1 \quad [N] \quad (\text{Gl. 5-3})$$

und daraus der resultierende Druck  $p$  zu:

$$p = \rho_w \cdot v_1^2 \quad [N/m^2] \quad (\text{Gl. 5-4})$$

Trifft die Strömung unter einem Winkel  $\delta$  auf die Gebäudewand, so ergeben sich folgende Einwirkungen senkrecht auf die Gebäudewand:

$$F = \rho_w \cdot Q \cdot (v_1 \cdot \sin \delta) \quad [N] \quad (\text{Gl. 5-5})$$

und  $p = \rho_w \cdot (v_1 \cdot \sin \delta)^2 \quad [N/m^2]$  (Gl. 5-6)

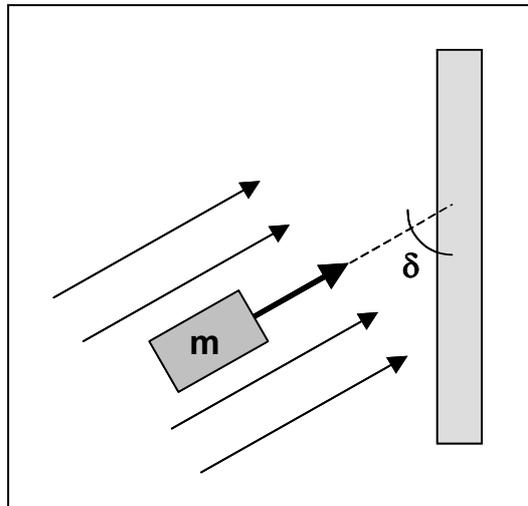
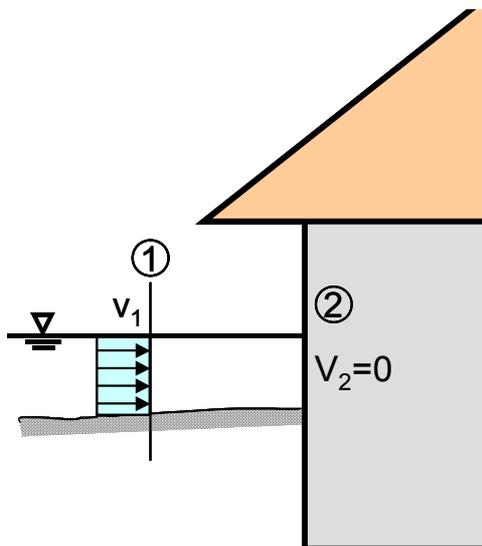


Abbildung 5-3: Strömungsdruck auf Gebäudewand



#### Beispiel

Aus den Annahmen:

- Wassertiefe 1,0 m
- Fließgeschwindigkeit  $v = 3 \text{ m}^2/\text{s}$
- Länge des Gebäudes = 10 m

ergibt sich:

mittlerer Druck auf Außenwand:

$$p_m = \rho_w \cdot v^2 = 9 \quad [kN/m^2]$$

resultierende Impulskraft:

$$F_l = \rho_w \cdot h \cdot L \cdot v = 90 \quad [kN]$$

Abbildung 5-4: hydrodynamische Kräfte auf Gebäude

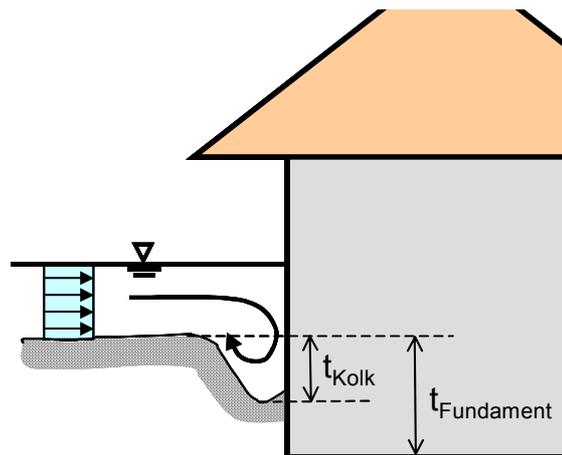
Anhaltswerte für auftretende Fließgeschwindigkeiten natürlicher Fließgewässer sind in flachem Gelände mit einem Gefälle von ca. 2 % oder kleiner ca. 2 m/s; in steilem Gelände mit Gefälle von ca. 5-10% kann mit Geschwindigkeiten von 3 bis 5 m/s gerechnet werden, wenn die Fließtiefe mehr als 0,5 m beträgt (IKSR (2002)).



**Bild 5-3:** Versagen von Gebäuden durch Strömungsangriff (Foto: S. Hickmann)

Hohe Fließgeschwindigkeiten in unmittelbarer Nähe von Gebäuden können, insbesondere dann, wenn die Strömungskräfte über längere Zeit aufrechterhalten bleiben, auch zu Schäden im Gründungsbereich führen. Durch Erosion des Bodens im Fundamentbereich kann es zu einer Schiefstellung des Gebäudes, zu Fassadeneinstürzen oder zu einem statischen Gesamtversagen kommen. Nach KOHLI (1998), der physikalische Modellversuche zu Kolken an Gebäuden infolge Hochwasser durchgeführt hat, kann die mögliche Kolkentiefe über folgende charakteristische Größen abgeschätzt werden:

- Wassertiefe
- Fließgeschwindigkeit
- Dauer der Überschwemmung bzw. Umströmung
- Korndurchmesser des Bodenmaterials
- Angeströmte Breite
- Gründungstiefe



**Abbildung 5-5:** Kolkbildung an Gebäuden

Mit einem (Teil-) Versagen ist spätestens dann zu rechnen, wenn der Kolk die Gründungssohle erreicht und Material unterhalb des Gebäudes erodiert wird. Eine Gefährdung ist somit im besonderen Maße für nicht unterkellerte Gebäude gegeben.

**Tabelle 5-4:** Kolktiefe (aus KOHLI (1998))

Parameter	Beispiel A Berggebiet	Beispiel B Talgebiet
Wassertiefe [m]	0,5	1,0
Fließgeschwindigkeit [m/s]	2,0	0,9
Dauer der Anströmung [h]	9	24
Mittlerer Korndurchmesser [mm]	20	8
Angeströmte Breite [m]	4	10
<b>Resultierende Kolktiefe [m]</b>	<b>1,55</b>	<b>1,84</b>



**Bild 5-4:** Gebäudeschäden durch Erosion (Schiefstellung) (Foto: S. Hickmann)

Die Problematik der Erosion entlang fester Körper ergibt sich nicht nur für Gebäude, auch infrastrukturelle Einrichtungen, z.B. Straßen- oder Gleiskörper können dadurch geschädigt werden. Als Beispiel sei die Erosion unterhalb von gebundenen Strassendecken erwähnt, bei denen, erzeugt durch hohe Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche, auch relevante Strömungen im Untergrund erzeugt werden (an der Unterseite der Fahrbahndecke sowie entlang von Versorgungs- oder Entwässerungsleitungen). Mit zunehmendem Austrag von Feinstpartikeln nehmen die Fließquerschnitte und –geschwindigkeiten und somit auch die erosiven Kräfte zu. Dadurch können größere Hohlräume entstehen, die während oder nach (keine Auftriebskräfte mehr) dem Hochwassers kollabieren können.



**Bild 5-5:** Elbehochwasser 2002, Erosion unter Strasse (Foto: S. Hickmann)

### 5.1.3 Anpralllasten (Treibgut)

Große Schäden am Gebäude selbst können auftreten, wenn aus dem Oberlauf mittransportiertes Treibgut (z.B. entwurzelte Bäume) auf eine Außenwand prallt und dadurch zusätzliche Kräfte auf die Gebäudestruktur übertragen werden. Eine allgemeine analytische Berechnung der auf die Gebäudewand wirkenden Kräfte ist aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten (z. B. Material, Dichte, Formstabilität des Treibgutes, Material der Wand, etc.) nicht möglich. In BWK (2004) sind für Treibgutprall oder Eisstoß zu berücksichtigende Ersatzlasten bei der Bemessung von mobilen Hochwasserschutzsystemen angegeben. Die Werte aus Tabelle 4-5 sind auf einer Fläche von 0,5 x 0,5 m anzusetzen. Der Angriffspunkt ist an der ungünstigsten Stelle anzunehmen. Die angegebenen Werte für  $\delta$  sind der Winkel der Gebäudefront zur Hauptströmungsrichtung, wobei ein Wert von  $0^\circ$  einer parallelen Anströmung und  $90^\circ$  einer rechtwinkligen Anströmung entspricht.

**Tabelle 5-5:** Ersatzlasten [kN] für Treibgutprall an mobile Wände (BWK (2004))

Anströmwinkel $\delta$	$v = 3 \text{ m/s}$	$v = 2 \text{ m/s}$	$v = 1 \text{ m/s}$
$31^\circ - 45^\circ$	30	20	10
$21^\circ - 30^\circ$	20	15	10
$11^\circ - 20^\circ$	15	10	10

Die Lasten entsprechen in etwa den Kräften, die durch Anprall eines Baumstammes mit ca. 7 m Länge und einem Durchmesser von 0,5 m entstehen.



**Bild 5-6:** „Treibgut“ bei Extremhochwasser (Foto: S. Hickmann)

#### **5.1.4 Anstiegsgeschwindigkeit**

Ein weiterer maßgebender Parameter der Hochwasserwelle ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Wasserstände während des Anstiegs erhöhen. Diese ist im Fall eines „normalen“ Hochwassers, das nicht durch Bauwerksversagen beeinflusst wird (z. B. Dammbbruch), abhängig von der Charakteristik des Einzugsgebietes und der Niederschlagsdauer und –intensität.

Die Anstiegsgeschwindigkeit ist ein maßgebender Parameter für die Umsetzung von Schutzmaßnahmen, und kann sich besonders schwerwiegend im Bereich des Katastrophenschutzes auswirken, wenn z. B. erforderliche Evakuierungsmaßnahmen infolge schnell steigender Wasserstände evtl. nicht rechtzeitig umgesetzt werden können. In Flussgebieten mit Warn- oder Vorhersagezentralen ist die Anstiegsgeschwindigkeit maßgebend für die erreichbaren Vorwarnzeiten (siehe 5.2.2).

#### **5.1.5 Dauer**

Neben der Strömungsgeschwindigkeit und der Fließtiefe ist die Hochwasserdauer eine weitere charakteristische Eigenschaft der Hochwasserwelle, der Einfluss auf die Höhe der Schäden hat. Mit zunehmender Einstaudauer nimmt auch der Grad der Vernässung zu, wobei der Einflussbereich der Vernässung größer ist als die maximale Überschwemmungstiefe. Durch Kapillarkräfte in den Bauteilen und

Verdunstung können auch Gebäudebereiche betroffen sein, die über dem Wasserstand liegen. Im Extremfall kann auch die Tragwerksstruktur so stark beeinträchtigt sein, dass die Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gewährleistet ist. Mit zunehmender Hochwasserdauer können die indirekten Schäden durch Betriebsunterbrechungen die direkten Schäden übersteigen (PARKER ET AL (1987)).

### 5.1.6 Sediment / Schadstoffe

In Abhängigkeit von der Korngröße und der Konzentration der transportierten Sedimente entstehen zusätzliche horizontale und vertikale Kräfte. Bei einer Raumdichte der Sedimente von ca. 2.100 bis ca. 2.400 kg/m<sup>3</sup> sind die hydrostatischen und hydrodynamischen Kräfte um den Faktor 1,1 – 1,4 zu erhöhen.

Erheblichen Einfluss auf die Schadenshöhe hat mitgeführtes Sediment auch deshalb, weil bei Eindringen in das Gebäude erhebliche Verschmutzungen auftreten können. Neben den erhöhten Kosten für die Beseitigung des zurückbleibenden Schlammes ist ein allgemeiner Wertverlust zu erwarten, da Feinstanteile aus porösen Materialien nicht mehr vollständig entfernt werden können. Wesentlich schwerwiegender sind die Folgen dann, wenn neben Bodenmaterial Schmutz- oder Gefahrenstoffe in das Gebäude eingelagert werden. Allein die Geruchsbelästigung kann ein weiteres Bewohnen des Gebäudes unmöglich machen und ist somit einem Totalversagen gleichzusetzen.

Den Einfluss der Kontamination durch ausgelaufenes Öl wurde u.a. bei einer Auswertung der Hochwasserschäden von 1999 in Bayern untersucht (DEUTSCHE RÜCKVERSICHERUNG AG (1999)). Abhängig von der Überflutungshöhe und der Anzahl der betroffenen Stockwerke wurden für die Stadt Neustadt/Donau Faktoren für die Schadenserhöhung durch ausgelaufenes Öl ermittelt (Tabelle 5-6)

**Tabelle 5-6:** Schadenssummen in Abhängigkeit der Kontamination durch Öl (BWG (2004b))

mittlere Schadenssumme [DM]	nur Wasser	Wasser mit Heizöl	Einflussfaktor Heizöl
Nur Keller betroffen	17.627	49.125	Faktor: 2,8
Keller und EG betroffen	44.266	106.699	Faktor: 2,4

## 5.2 Widerstand

Auf der Widerstandsseite sind alle diejenigen Faktoren zusammengefasst, die bei gegebenen Hochwassercharakteristika (Dauer, Wasserstand, Geschwindigkeit) Einfluss auf die Höhe der resultierenden Schäden haben. Grundsätzlich sind alle im Einflussbereich der Überschwemmung befindlichen Werte an Gebäuden,

Nebengebäude und Inventar gefährdet (Schadenspotenzial). Die tatsächlichen Schäden können aber auch durch Vorsorge- oder Schutzmaßnahmen der Bewohner selbst in gewissem Maß beeinflusst werden (Tabelle 5-7).

**Tabelle 5-7:** Schadensbeeinflussende Faktoren (Widerstandseite)

Objekteigenschaften	Vorsorge
Gebäude-, Nutzungstyp	Bereitschaft (Preparedness)
Gebäudezustand	Vorwarnzeit
Betroffene Werte (Gebäude, Inventar)	Lokale Schutzmaßnahmen

### 5.2.1 Objekteigenschaften

Die Höhe der Schäden hängt definitionsgemäß von der Anzahl der betroffenen Objekte und der darin enthaltenen Werte ab. Je höherwertig Bausubstanz und Ausstattung einzelner Gebäude sind, umso höher sind grundsätzlich die Schäden im Hochwasserfall. Je nach Gebäude- oder Nutzungstyp können sich die Schäden bei ansonsten gleichen Bedingungen wesentlich unterscheiden. Umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss von Gebäudeparametern liegen dem Programmpaket HOWAS zugrunde, in dem dokumentierte Hochwasserschäden an Wohngebäuden abhängig von Bauart, Baujahr, Anzahl der Stockwerke und weiterer Faktoren ausgewertet wurden (siehe Kapitel 5). Weitere Untersuchungen siehe (PENNING-ROUSELL, E.C., CHATTERTON, J.B. (1977), PARKER, D.J., GREEN, C.H., THOMPSON, P.M. (1987); SMITH, D. I. (1994).

### 5.2.2 Vorsorgemaßnahmen

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, ergeben sich die Schadenspotenziale zunächst aus den Eigenschaften der Gebäude selbst sowie den darin befindlichen Werten. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die tatsächlich auftretenden Schäden z.T. erheblich reduziert werden können, wenn vorsorgende Maßnahmen getroffen werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die Betroffenen:

- über die grundsätzliche Gefährdung informiert sind.

Informationen über die gefährdeten Gebiete mit Angaben zu Jährlichkeiten (Gefahrenkarten) liegen inzwischen in vielen Flussgebieten vor, bzw. werden derzeit erstellt. Hierin sind Überschwemmungsbereiche z.T. flurstücksscharf abgebildet und bieten den Menschen die Möglichkeit, sich detailliert über die persönliche Gefährdungssituation zu informieren. In Baden-Württemberg werden derzeit Gefahrenkarten für alle Gewässer mit einer Einzugsgebietsgröße von mehr als 10 km<sup>2</sup> erstellt. Neben statistischen Ereignissen (z. B. HQ100) können in Risikokarten auch szenarienbasierte

Überflutungsflächen dargestellt werden (z. B. Deichbruchszenario). Grundsätzlich sind Personen in gefährdeten Gebieten verpflichtet, sich selbst über die Hochwassergefährdung zu informieren:

„Jede Person, die durch Hochwasser betroffen sein kann, ist im Rahmen des ihr Möglichen und Zumutbaren verpflichtet, geeignete Vorsorgemaßnahmen zum Schutz vor Hochwassergefahren und zur Schadensminderung zu treffen, insbesondere die Nutzung von Grundstücken den möglichen Gefährdungen von Mensch, Umwelt oder Sachwerten durch Hochwasser anzupassen“ (§31a(2), Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes)

- bei einem Hochwasserereignis rechtzeitig gewarnt werden.

Für die rechtzeitige Warnung sind die Vorhersagezentren der Bundesländer zuständig, in denen Informationen aus Niederschlagsvorhersagen in zu erwartende Wasserstände an bestimmten Flussabschnitten (Pegelstellen) umgerechnet werden. Die Vorwarnzeit (Dauer vom Zeitpunkt der Vorhersage bis zum Eintreten der Hochwasserwelle) ist abhängig von der Größe und Charakteristik der Einzugsgebiete sowie der individuellen Ausprägung des Hochwasserereignisses und ist maßgebend für die möglichen Maßnahmen, die ergriffen werden können. Bei größeren Einzugsgebieten kann die Hochwassergefahr prinzipiell über beobachtete oder vorhergesagte Wasserstände bzw. Abflüsse an Messpegeln entlang der Fließgewässer rechtzeitig erkannt und Schutzmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden. Bei kleinen Einzugsgebieten bzw. steilem Abflussregime kann eine Vorhersage oftmals nicht oder nicht rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden. Den betroffenen Personen bleibt dann nur die Möglichkeit, kurzfristig aktivierbare Vorkehrungen umzusetzen oder bereits auf meteorologische Vorhersagen (Unwettermeldungen oder Wettervorhersagen) zu reagieren.

- über schadensreduzierende Maßnahme informiert sind und diese auch umsetzen können.

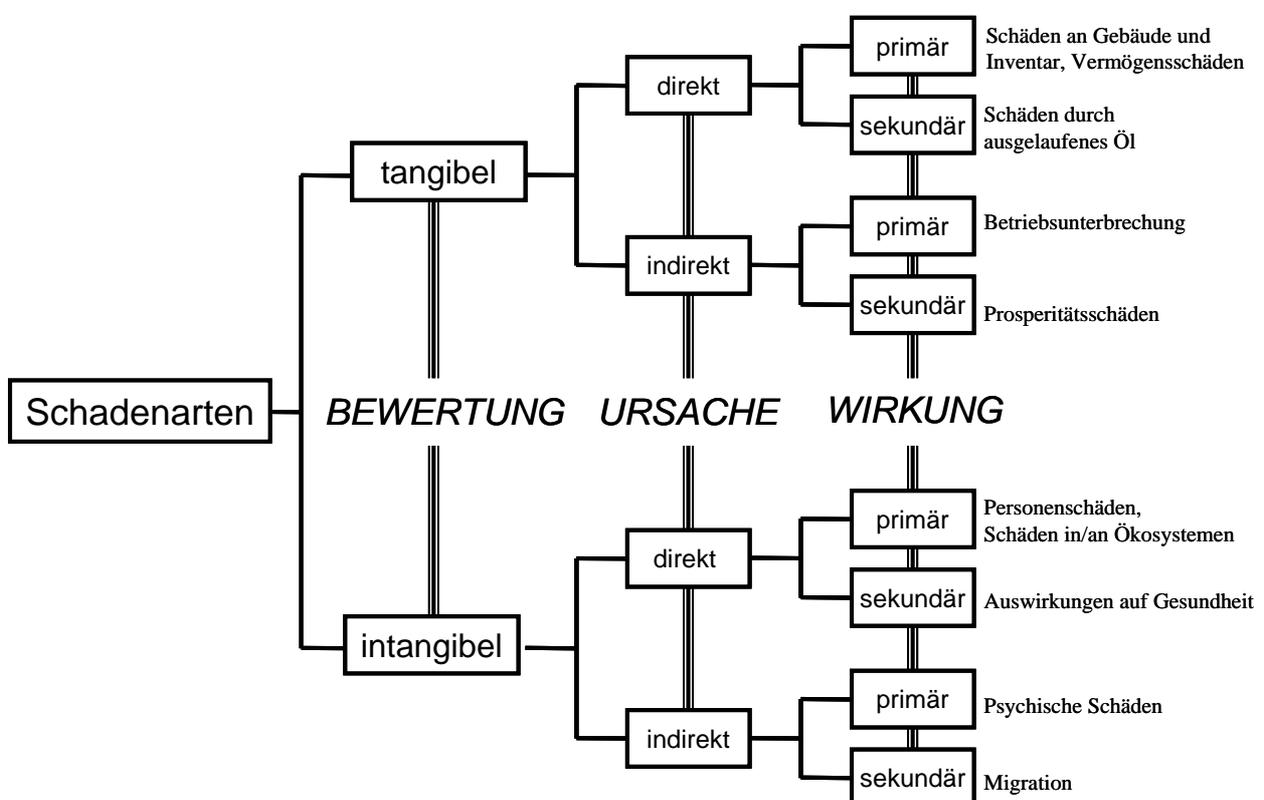
Die Bereitschaft der betroffenen Bevölkerung auf den Hochwasserfall bietet enormes Potenzial zur Verringerung der Schäden. Untersuchungen zu den Hochwasserereignissen 1993 und 1995 am Rhein haben gezeigt, dass bei annähernd gleichen Wasserständen die Schäden 1995 um fast 2/3 niedriger lagen als beim sog. „Weihnachtshochwasser“ von 1993 (EBEL, U., ENGEL, H. (1995). Durch die schadvollen Erinnerungen waren die Bürger 1995 bereit, Hochwasserwarnungen ernst zu nehmen und entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung der Schäden zu ergreifen, z. B.:

- Gas / Strom abstellen
- Wertsachen und Dokumente sichern
- Elektrische Geräte und Möbel in hochwassersichere Gebäudebereiche bringen.

## 6 Schadensfunktionen

### 6.1 Schadensarten

Zur Beurteilung des Gesamtschadens eines Hochwassers sind grundsätzlich alle negativen Wirkungen auf Personen, Gebäude, Bauwerke und die Umwelt zu berücksichtigen (auch wenn wie nachfolgend erläutert in der Praxis längst nicht alle Schadensarten quantifizierbar sind). Ein mögliche Differenzierung wird in Smith, K., Ward, R. (1998) vorgestellt und ist in modifizierter Form in Abbildung 6-1 dargestellt. Hierbei wird untergliedert in Schadenswirkungen (primäre oder sekundäre Schäden), Ursachen (direkte oder indirekte Schäden) und Möglichkeiten bzw. Restriktionen für die Bewertung (tangible oder intangible Schäden).



**Abbildung 6-1:** Schadensarten (bearbeitet aus SMITH, K., WARD, R. (1998))

Unter direkten Schäden sind jene zu verstehen, die während des Auftretens verursacht werden und aus dem unmittelbaren Einfluss des Hochwasserereignisses entstehen. Hierzu zählen z.B. Schäden an Vermögenswerten oder Umwelt- und Kulturgütern. Im Gegensatz dazu sind die indirekten Schäden als Folgeschäden zu betrachten, die mittel- oder längerfristige Schäden bzw. Nutzungsausfälle zur Folge haben. Beispielsweise kann die Erreichbarkeit von Gewerbebetrieben bei Schädigungen an der Verkehrsinfrastruktur auch nach Ablauf der Hochwasserwelle stark eingeschränkt bzw. gar nicht gegeben sein. Werden durch häufiger auftretende

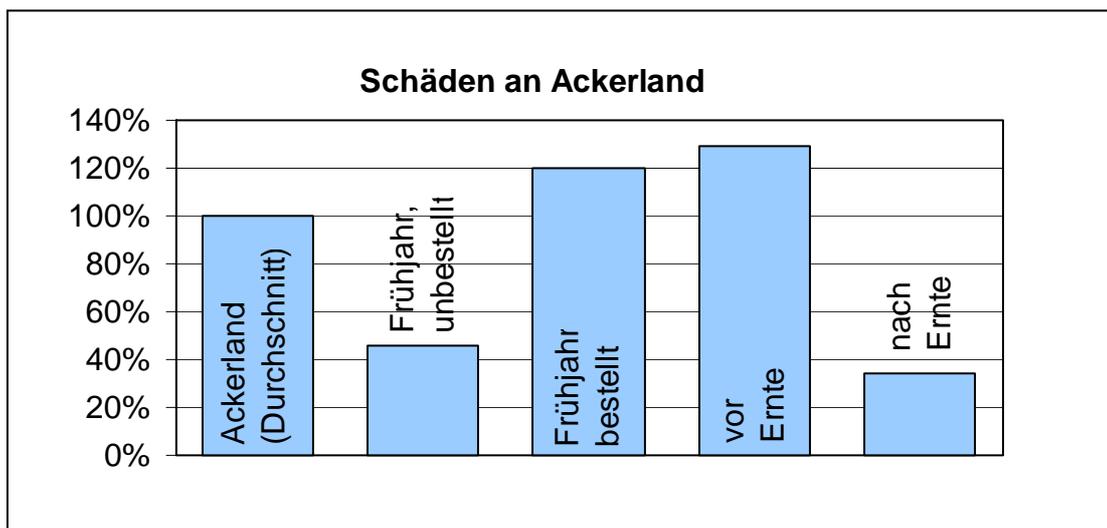
Ereignisse Investitionsvorhaben verschoben oder Standorte verlagert, können die dadurch verursachten Prosperitätsschäden zu einer wirtschaftlichen Schwächung der gesamten Region führen. Werden die Schäden durch das Hochwasserereignis selbst verursacht, spricht man von primären Schäden, treten sie in der Wirkungskette als kausale Folgeerscheinung auf, werden sie als sekundäre Schäden bezeichnet. Abhängig davon, ob die Schäden als monetäre Größen angegeben werden können oder nicht, wird weiterhin zwischen tangiblen und intangiblen Schäden unterschieden.

### Tangible Schäden

In Schadenspotenzialanalysen wird das Hauptaugenmerk auf die Ermittlung ökonomisch erfassbarer Schäden gelegt. Dies setzt voraus, dass sowohl die möglicherweise betroffenen Werte als auch der Umfang der Schädigungen monetär (in Geldwerten) erfassbar sind. Die höchsten Schadenssummen sind dabei unter den direkten primären Schäden zu finden. Dies trifft insbesondere in dicht besiedelten Gebieten zu, in denen auf kleiner Fläche eine große Besiedlungsdichte herrscht bzw. hohe Wertekonzentrationen vorliegen. In industrialisierten Regionen entfällt dabei der Großteil der Schäden auf zerstörte Anlagevermögen wie z.B. Produktions-, Lagerstätten oder Bürogebäude, während in ländlichen Gebieten die Schäden vornehmlich im privaten Bereich zu finden sind. Bis auf wenige Ausnahmen extremer Hochwasserereignisse, bei denen aufgrund plötzlichen Versagens von Schutzbauwerken eine Hochwasserwelle mit sehr großen dynamischen Kräften entstehen können, bleiben die Schäden in den meisten westlichen Ländern im Wesentlichen auf Inventarschäden begrenzt. Da Schäden an der Gebäudesubstanz nur selten auftreten, bleiben die Schädigungsgrade (Verhältnis von Höhe der Schadenssumme zum Gesamtwert) der betroffenen Objekte meist in einem noch akzeptablen Rahmen. In weniger entwickelten Ländern dagegen sind Überschwemmungen oftmals gleichzusetzen mit einem Totalverlust aller Werte. Die Vielzahl der Gebäude, die nicht nach baulichen Standards errichtet werden, können den Wassermassen keinen Widerstand bieten und werden komplett zerstört.

Direkte Schäden an landwirtschaftlichen Nutzflächen spielen in westlichen Ländern eine eher untergeordnete Rolle. Nach Angaben des US Department of Agriculture (US DEPARTMENT OF THE INTERIOR (1969), tragen die landwirtschaftlichen Schäden durchschnittlich etwa 5 – 10 % der direkten Schäden, beim Hochwasser 2002 in Sachsen waren der Anteil mit 1,3 % noch wesentlich geringer. Zum Vergleich betragen die landwirtschaftlichen Schäden beim Hochwasserereignis vom Sommer 2004 in Bangladesh insgesamt 580 Mio. USD (bei mehr als 2 Mio. Hektar betroffener landwirtschaftlicher Fläche), was einem Anteil von 27 % der gesamten Schäden entspricht (ADP (2004). Die Beispiele zeigen, dass eine Berechnung über die direkten Schäden nur eine grobe Schätzung sein kann, da der Anteil der bewirtschafteten an der gesamt betroffenen Flächen sowie die topografischen Verhältnisse die Schadenssummen wesentlich beeinflussen. Dies wird auch deutlich, wenn man sich die Flächenverhältnisse von überschwemmten zu nicht

überschwemmten Gebieten betrachtet. Während der Spitze der Hochwasserwelle waren in Bangladesh im Sommer 2004 teilweise zwei Drittel der gesamten Landesfläche überschwemmt (MUNICHRE (2004)). Demgegenüber haben Berechnungen der MunichRe ergeben, dass bei einem flächendeckenden 50-jährlichen Hochwasserereignis „nur“ 16.646 km<sup>2</sup> oder 4,7 % der gesamten Landesfläche (357.000 km<sup>2</sup>) betroffen wären (KRON, W., WILLEMS, W. (2002)). Weitere Abhängigkeiten der landwirtschaftlichen Schäden ergeben sich aus der Vegetationsperiode, in der das Hochwasser auftritt, dem Wasserstand und der Dauer der Überschwemmung. Wie groß der Schwankungsbereich landwirtschaftlicher Schäden sein kann, zeigt Abbildung 6-2 am Beispiel für Ackerland. Abhängig von der Vegetationsperiode streuen die zu erwartenden Schäden in einem Bereich von ca. 40 % bis zu 130 % vom mittleren anzusetzenden Wert. Als mittlerer Wert für Ernteschäden können ca. 450 EUR/ha angenommen werden (SCHMIDTKE, R.F. (1981), wobei sich die tatsächlichen Schäden abhängig von der angepflanzter Kultur stark vom Mittelwert unterscheiden können. Detaillierte Angaben zu Wertansätzen verschiedener Früchte werden als Deckungsbeiträge (Ernteerlöse abzüglich Kosten) regelmäßig vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) veröffentlicht.



**Abbildung 6-2:** Abhängigkeit der Schäden an Ackerland von der Vegetationsperiode (SCHMIDTKE, R.F. (1981))

Im privaten Bereich sind die direkten sekundären Schäden eng mit den direkten primären Schäden verbunden. Bei Wohngebäuden bspw. zählen die Kosten, die durch Neuanschaffung zerstörter Gebäude- und Einrichtungsgegenstände entstehen zu den direkten Kosten, während Renovierungsarbeiten den indirekten Kosten zuzuordnen sind. Inwieweit die Beseitigung der indirekten Schäden den Gesamtwert des/der Objekte(s) verändern ist im Einzelfall zu prüfen. Kann eine vollständige Renovierung in den Zustand vor dem Hochwasser aus wirtschaftlichen oder

bautechnischen Gründen heraus nicht erfolgen, so ist von einem gewissen Wertverlust auszugehen. Andererseits können Renovierungsarbeiten zu einer Werterhöhung des Gebäudes führen, insbesondere dann wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses sehr gering war, so dass statistisch für längere Zeit mit keinem weiteren Hochwasserschaden zu rechnen ist. Eine Wertsteigerung kann auch dann eintreten wenn die Reparaturarbeiten im Sinne eines vorbeugenden Hochwasserschutzes so ausgeführt werden, dass ( z.B. durch Fliesen der Kellerräume und angepasste Nutzung) bei erneutem Auftreten eines Ereignisses gleicher Höhe weniger hohe Schäden zu erwarten sind. Für Deutschland liegen keine Studien über die Werteentwicklung einzelner Objekte vor/nach dem Hochwasser vor, internationale Untersuchungen in Kalifornien und Neuseeland haben jedoch gezeigt, dass auch bei größeren Einstautiefen keine langfristigen Auswirkungen auf die Gebäudewerte zu beobachten sind (SMITH, K., WARD, R., (1988).

Indirekte Schäden resultieren im Wesentlichen auf einer Unterbrechung infrastruktureller Einrichtungen und den damit verbundenen Folgewirkungen. Vor allem für Wirtschaftsunternehmen spielen Betriebsunterbrechungen und die damit verbundenen betrieblichen Kosten eine wesentliche Rolle. Dabei treten die Schäden nicht erst bei Überschwemmung des Unternehmens ein, vielmehr können bereits dann erhebliche Betriebsstörungen auftreten, wenn Zufahrtswege für Zulieferer oder Mitarbeiter nur eingeschränkt genutzt werden können. Gleiches gilt auch für den Fall von beschädigten oder zerstörten Versorgungsleitungen. Befragungen von Großunternehmen zu Untersuchungen der Schadenspotenzialen am Rhein in Nordrhein-Westfalen, die im Auftrag des Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft durchgeführt wurden, haben ergeben, dass bei 5% der Unternehmen schon nach einem Tag ohne Möglichkeiten der Zu- oder Ablieferung der Betrieb eingestellt werden muss, nach einer Woche sind es bereits 44% und lediglich 11 % können ohne Verkehrsanbindung länger als 2 Wochen die Produktion aufrechterhalten (MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2000b). Untersuchungen zum Hochwasser 2002 in Österreich haben für den gesamten Unternehmenssektor (einschließlich Tourismus, Land- und Forstwirtschaft) Wertschöpfungsverluste in Höhe von ca. 180 Mio. Euro ergeben (ZENAR (2003). Dies entspricht in etwa einem Anteil von 0,1 % des nominellen BIP Österreichs. Beim Produktionsausfall ist dabei zu unterscheiden zwischen (kurzzeitigen) Wertschöpfungsverlusten in Folge von Betriebsunterbrechungen und langfristigen Auswirkungen auf die örtliche oder regionale Wirtschaftsstruktur. Abweichend von der Persistenzannahme, dass die Produktivität nach Beseitigung der Schäden wieder das frühere Niveau erreicht, können besonders im Falle regelmäßig auftretender Hochwasser, Standortverlagerungen oder Betriebsaufgaben langfristige negative Effekte auf die Wirtschaftsentwicklung auftreten (Prosperitätsschäden). Hierbei ist jedoch zwischen betriebs- und gesamtwirtschaftlicher Betrachtungsweise zu unterscheiden. Können die

Wirtschaftsausfälle durch Betriebe außerhalb der betroffenen Region kompensiert werden, so sind die Schadwirkungen zwar für die betroffenen Unternehmen gegeben, durch den regionalen Ausgleich tritt jedoch kein gesamtwirtschaftlicher Verlust auf.

### Intangible Schäden

Auch wenn monetär bewertbare Schäden wesentlich sind für ökonomische Studien zum Hochwasserrisiko, so muss hauptsächliches Ziel von Schutzmaßnahmen sein, Personenschäden (Todesfälle und Verletzte als direkte, primäre Schäden) möglichst zu verhindern oder auf ein Minimum zu beschränken. Auch wenn in Deutschland, wie in den meisten westlichen Ländern, zum Glück nur bei wenigen Extremereignissen Tote zu beklagen sind, so sind in der jüngeren Vergangenheit vor allem im asiatischen Raum Ereignisse eingetreten, die die Dimensionen möglicher Hochwasserkatastrophen aufs Deutlichste vor Augen führen. Zum Vergleich: Während bei der „Jahrtausendflut“ an Moldau, Elbe und Donau im August 2002 insgesamt 37 Personen zu Tode gekommen sind, waren es z.B. im gleichen Jahr bei Überschwemmungen in Bangladesch, Indien und Nepal mehr als 1200 Personen, die zu Tode gekommen sind, in China über 250 Personen (MUNICHRE (2002b)). Im Zeitraum von 1986 bis 1995 sind allein durch Hochwasserereignisse weltweit mehr als 200.000 Tote zu verzeichnen, dies entspricht einem Anteil von ca. 55 % aller Todesopfer durch Naturkatastrophen. Die dramatischen Auswirkungen wurden auch während der Ereignisse vom Sommer 2004 deutlich, als durch Schneeschmelze und starke Monsunregen in den Einzugsgebieten von Brahmaputra, Ganges und Meghna mehr als 33 Millionen Personen durch das Hochwasser bedroht waren und eine Fläche von 30.000 km<sup>2</sup> überschwemmt war (OCHA (2004)). Neben der primären Bedrohung durch den Einstau resultieren weitere Folgeschäden (direkte, sekundäre Schäden), die unmittelbar während oder nach dem Ereignis auftreten können und insbesondere im Falle von Personenschäden von langfristiger Dauer sein können. Hierzu zählen kurz bis mittelfristig auftretende Krankheiten durch verschmutztes Trinkwasser, den Kontakt mit verunreinigtem Wasser oder infolge mangelhafter hygienischer Zustände. Wesentlich schwerer als die direkten Schäden sind die indirekten Schäden (primäre und sekundäre) zu ermitteln. Dauerhafte psychische Problemen der betroffenen Bevölkerung oder Migrationsbewegungen können als Reaktion auf der durch das Hochwasser veränderten Lebensumstände angenommen werden, der direkte kausale Zusammenhang ist jedoch nur in wenigen Fällen eindeutig nachzuweisen. Untersuchungen von BENNET (1970), auf die in SMITH, K., WARD, R. (1998) verwiesen wird zeigen, dass nach dem 1968er Hochwasser in Bristol, bei dem 300 Personen betroffen waren, die Sterblichkeitsrate innerhalb der nächsten 12 Monate nach dem Hochwasser signifikant angestiegen ist.

Für Schadenspotenzialuntersuchungen in der wasserwirtschaftlichen Praxis ist die Quantifizierung der beschriebenen Schadensarten schwierig und teilweise mit heute

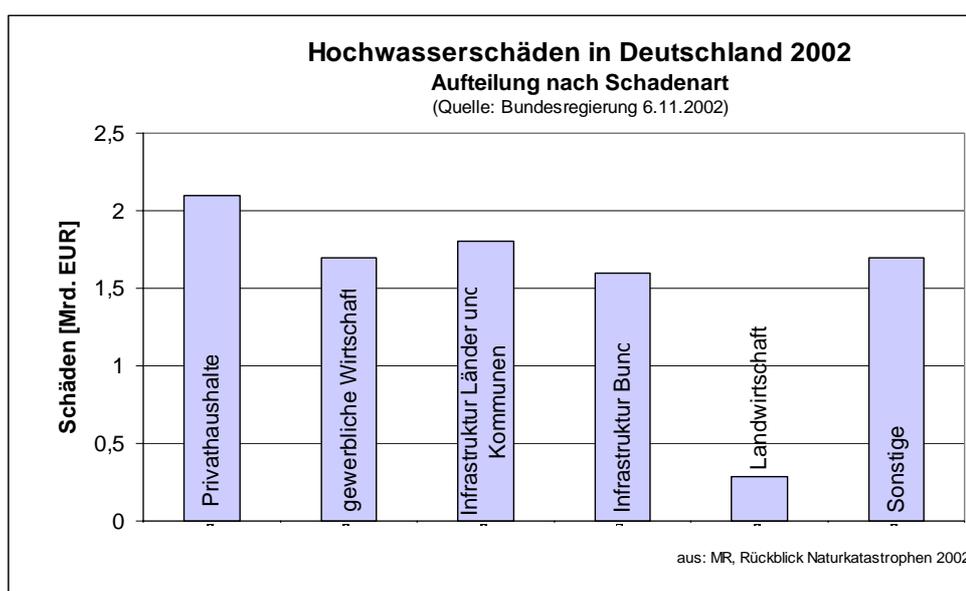
zur Verfügung stehenden Daten und Modellen noch nicht möglich. Für tangible Schäden gilt dies vor allem für sekundäre Schäden, bei denen eine nur sehr lückenhafte Daten- und Erfahrungsbasis vorliegt. Für den Bereich der intangiblen Schäden ergeben sich neben der Frage der zur Verfügung stehenden Daten aus abgelaufenen Ereignissen als Basis für weitergehende Untersuchungen noch zusätzliche Schwierigkeiten aus der grundsätzlichen Problematik der Monetarisierung eigentlich in Geldwerten nicht erfassbarer Schäden, z.B. „Verlust“ an Freizeitwert von Naherholungsanlagen oder Zerstörung von Kulturgütern. Aus diesem Grund werden in der Praxis zur Ermittlung des Hochwasserrisikos derzeit i.d.R. nur materielle Schäden an Wirtschafts-, Umwelt-, und Kulturgütern berücksichtigt, die einen größeren volkswirtschaftlichen Verlust bedeuten. Aus der gesamten Palette möglicher Schadensarten wird häufig eine vereinfachte Schadensklassifizierung verwendet (siehe Tabelle 6-1).

**Tabelle 6-1:** Kosten-, Schadensarten

Kosten-, Schadensart	Betroffener Bereich	Betroffene Werte / Aufwand
Personenschäden	Bevölkerung	Leib und Leben, Psychische Belastung
Direkte Vermögensschäden	Privater Wohnbereich	Gebäude, Inventar, Nebengebäude, Grundstück
	Kommunaler Bereich	Gebäude, Inventar, Nebengebäude, Grundstück
	Industrie	Gebäude, Inventar, Lagerbestände, Nebengebäude, Grundstück
	Land-, Forstwirtschaft	Gebäude, Inventar, Nebengebäude, Böden, Kulturen, Vieh
	Infrastruktur	Verkehrs-, Versorgungsnetze
	Landschaft / Ökologie	Verschlammung, Schadstoffeintrag, Bodenabtrag
	Kulturgüter	Historische Bauwerke, Kunstobjekte

Kosten-, Schadensart	Betroffener Bereich	Betroffene Werte / Aufwand
Weitergehende wirtschaftliche Schäden	Privater Bereich	Vollständige Wiederherstellung Wertverlust (Baupreis)
	Kommunaler Bereich	Abwanderungen, Ertragsänderungen, verringerte Investitionen, Verlust an Attraktivität
	Industrie	Produktionsausfall, Wertschöpfungs-, Prosperitätsverluste, Vertragsstrafen
	Infrastruktur	Verlagerung von Verkehrsnetzen
Bewältigung	Katastrophenschutz	Schutzmaßnahmen, Versorgung der Bevölkerung
	Rettungsdienste	Evakuierung

Die Höhe der Hochwasserschäden wird im Wesentlichen durch die im Überschwemmungsgebiet befindlichen Vermögenswerte bestimmt. Abbildung 6-3 zeigt die Verteilung der Hochwasserschäden 2002 klassifiziert nach Nutzungsarten. Auffallend ist, dass bei sehr großen Hochwasserereignissen, wie sie in Deutschland 2002 aufgetreten sind, die Schäden an infrastrukturellen Einrichtungen einen erheblichen Anteil an der Gesamtschadenssumme haben. Für die Ereignisse im August 2002 betrug die Summe der Schäden an öffentlicher Infrastruktur 3,4 Mrd. EUR.



**Abbildung 6-3:** Hochwasserschäden in Deutschland 2002

Wesentliches Augenmerk bei Hochwasser- bzw. Katastrophenschutzplanungen liegt konsequenterweise auf einem bestmöglichen Schutz der Bevölkerung. Dies bedeutet zunächst Schutz vor direkten Schäden durch strömendes oder stehendes Wasser, sowie den Folgewirkungen wie z.B. Gefährdung durch einstürzende Gebäude. Die direkten Personenschäden können zwar nicht monetarisiert werden, eine qualitative und auch quantitative Einschätzung ist mit den vorliegenden Verfahren zur Gefährdungsabschätzung jedoch noch bedingt möglich. Wesentlich schwerer oder gar nicht zu erfassen sind dagegen langfristige psychische Schäden der Betroffenen.

## 6.2 Schadensfunktionen aus der Literatur

Maßgebend für die Höhe der direkten monetären Hochwasserschäden ist der Wasserstand, der während eines Ereignisses maximal auftritt. Die zeitliche Dauer dieses maximalen Wasserstandes spielt dabei eine untergeordnete Bedeutung, da bei der Mehrzahl der betroffenen Werte bereits ein kurzzeitiger Kontakt mit dem Wasser zu einer irreversiblen Schädigung bzw. zu einem Totalschaden führt. Die wichtigste Grundlage zur Berechnung der Schäden sind somit Funktionen, die den Zusammenhang zwischen der maßgebenden Einflussgröße (Wasserstand) und den damit verbundenen Auswirkungen (Schäden) herstellen. Die funktionale Beziehung, die üblicherweise als Wasserstand-Schaden-Funktion bezeichnet wird, kann dabei entweder aus synthetischen Daten erstellt oder auf Basis dokumentierter Schäden ermittelt werden. Letztere Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die Berücksichtigung tatsächlich aufgetretener Schäden einen realistischen Eindruck über mögliche monetäre Auswirkungen von Hochwasser geben können, die Anwendbarkeit der so ermittelten Schadensfunktionen ist jedoch grundsätzlich auf das Erhebungsgebiet bzw. auf ein Gebiet mit vergleichbaren Gebäudetypen beschränkt.

Bei der Erfassung von Schadensereignissen kann der Zeitpunkt der Erhebung wesentlich sein für die Qualität der Daten. Direkt nach Ablauf des Hochwasser geht die Tendenz dahin, die direkten Schäden zu überschätzen, was zum einen auf den noch anhaltenden psychischen Druck zurückzuführen ist, zum anderen fehlt oftmals Zeit für eine genaue Schätzung und Reparaturrechnungen sind noch nicht vorhanden. Dies war auch beim Elbehochwasser 2002 zu beobachten, als im September 2002 eine Schadenssumme von 25 Mrd. EUR veröffentlicht wurde (BFG 2002) die im Dezember 2001 auf die Summe von 9,3 Mrd. EUR korrigiert wurde (MUNICHRE (2002)). Werden die Schäden erst Monate nach dem Ereignis erhoben, können hingegen wesentliche Informationen bereits wieder aus dem Gedächtnis der Betroffenen verschwunden sein. Eine offizielle und systematische Erhebung der Hochwasserschäden existiert in Deutschland bislang nicht. Mitte der 80er Jahre wurden erste Studien durchgeführt (u.a. GÜNTHER, W., SCHMIDTKE, R. F. (1988), MEON, G, MERZ B., BUCK, W., PLATE, E. (1986)). Bei der Verwendung historischer dokumentierter Schadensdaten ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei zunächst um singuläre Werte eines Einzelereignisses handelt, die grundsätzlich nicht auf

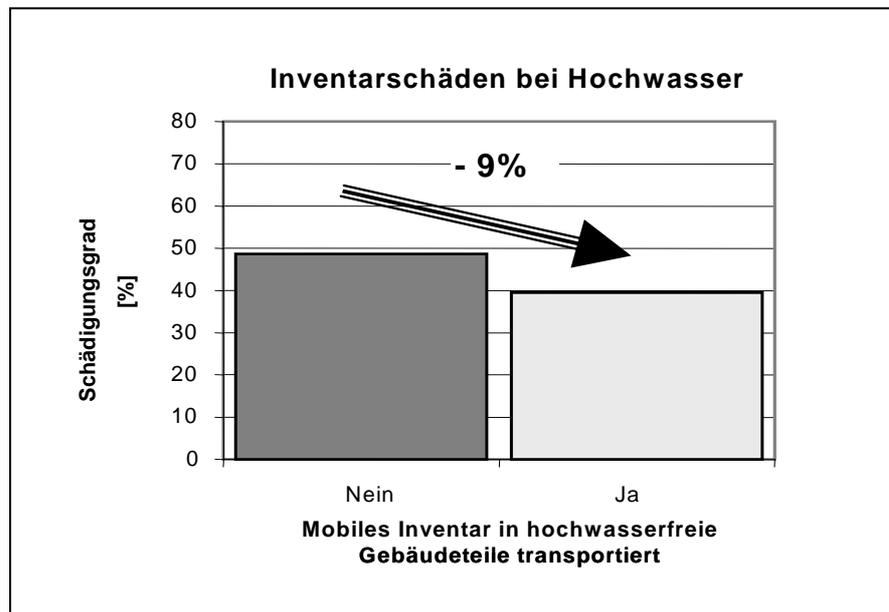
andere Ereignisse oder Regionen übertragen werden können. Erst mit steigender Anzahl der Einzel-Schadensinformationen kann eine Übertragbarkeit näherungsweise angenommen werden, wobei die Eingangsdaten (natürlich bedingt) zufällig sind und die Anpassung auf statistischen Auswertungen des Datenkollektives beruht. Daher muss es im Einzelfall zwangsläufig zu großen Abweichungen kommen (siehe 6.2.1). Eine systematische Erfassung aller Hochwasserschäden würde beispielsweise dazu führen, dass hochgefährdete Gebiete mit regelmäßigen Überschwemmungen in der Datenbank überrepräsentiert sind und bei einer Mittelung der Daten eine Unterschätzung der Schäden die Folge ist. Da die Bewohner dieser Gebiete jedoch (zwangsläufig) gelernt haben, mit der Hochwassergefahr zu leben und ihre Nutzung entsprechend anpassen, können die Einzelschäden wesentlich geringer gehalten werden als in Gebieten, die nur sehr selten, dann aber mit großer Intensität (Abflussmenge größer als beim Bemessungsereignis BHQ) und unvorbereitet betroffen sind. Grundsätzlich ist auch zu beachten, dass „verlässliche“ Aussagen nur für den Wertebereich gemacht werden können, für den auch Daten vorhanden sind. Für Aussagen außerhalb dieses Wertebereiches muss extrapoliert werden, was wiederum zu Unsicherheiten führt.

Die zweite Methode besteht darin Hochwasserschäden auf Basis synthetischer Funktionen zu berechnen. Bei dieser systematischeren Vorgehensweise werden charakteristische Eigenschaften des Hochwassers, in diesem Fall der Wasserstand, mit möglichen Schädigungen einzelner Gebäude in Verbindung gebracht. Damit können Schadenspotenziale ermittelt werden, die im Falle eines Hochwassers ganz oder teilweise betroffen sein können. Der Funktionsverlauf entspricht dabei genaugenommen der Werteverteilung der Gebäude- und Inventarwerte, die real auftretenden Schäden werden bei dieser Vorgehensweise jedoch oftmals überschätzt, da Vorsorgemöglichkeiten nicht berücksichtigt werden können.

#### Beispiel:

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich der Großteil der mobilen Inventarwerte in einem Stockwerk eines Gebäudes in einer Höhe von bis zu 1 m über der Fußbodenhöhe befindet. Ergibt sich aus den entsprechenden hydraulischen Untersuchungen im Fall eines Hochwassers nun ein Wasserstand von 1 m oder darüber, kann davon ausgegangen werden, dass die potenziellen Schäden 100 % betragen. Dies jedoch nur unter der Voraussetzung, dass von Seiten der Betroffenen keinerlei Maßnahmen eingeleitet werden (können), um das Schadensausmaß zu reduzieren. Für viele Flüsse werden heutzutage durch die Hochwassermeldezentren Vorhersagen bereitgestellt, die den Betroffenen Handlungsspielraum geben, wertvolle Gegenstände in hochwassersichere Gebäudeteile zu transportieren (Wertsachen, TV, Stereoanlage, Kleingeräte). In diesem Fall können die tatsächlichen Schäden wesentlich geringer gehalten werden, als auf Basis der Schadenspotenziale ermittelt wurde. Dass auch solch einfache

private Vorsorgemaßnahmen das Schadensausmaß erheblich reduzieren können, zeigen auch aktuelle Erhebungen zu den Hochwasserereignissen im Sommer 2002 im Einzugsgebiet der Elbe und an der Donau (siehe Abbildung 6-4; [Quelle: GFZ](#))



**Abbildung 6-4:** Schadensreduktion durch Vorsorgemaßnahmen, hier Transport mobiler Inventargegenstände in hochwasserfreie Gebäudeteile.

### 6.2.1 HOWAS-Schadendatenbank

Zur Schaffung einer Datenbasis, die eine Berechnung von Hochwasserschäden über standardisierte und nutzungsbezogene Schadensfunktionen erlaubt, wurden im Arbeitskreis „Nutzen-Kosten-Untersuchungen in der Wasserwirtschaft“ der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) das Programmpaket HOWAS (HOchWasserSchäden) erstellt, dem unter anderem eine umfangreiche Schadendatenbank zugrunde gelegt ist (KLEEBERG, H.B., NIEKAMP, O., CEMUS, J. (1988).

#### Nutzungsklassifizierung

Die Identifizierung der in überschwemmungsgefährdeten Gebieten vorhandenen Nutzungen ist eine wesentliche Voraussetzung zur Ermittlung potenzieller Hochwasserschäden. Eine wesentliche Aufgabe war die Erstellung eines Flächennutzungskataloges, anhand dessen betroffene Gebäude nach Art und Nutzung klassifiziert werden können. Die Klassifizierung orientierte sich an der „Hierarchical Land Use Classification“, die in England zur Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen eingesetzt wird (PENNING-ROUSELL, E.C., CHATTERTON, J.B. (1977).

In Abhängigkeit der Nutzungen werden die einzelnen Objekte jeweils einer der acht Hauptnutzungsarten zugeordnet (vgl. Tabelle 6-2).

**Tabelle 6-2:** Flächennutzung Schlüsselnummer der Sektoren

Schlüsselnummer (Ziffer 1 / Sektor)	Nutzung
1***	private Wohngebäude
2***	öffentliche Infrastruktur
3***	Dienstleistungsbereich
4***	Bergbau und Baugewerbe
5***	Verarbeitendes Gewerbe
6***	Wirtschaftsgebäude der Land- und Forstwirtschaft, Gartenbau
7***	Land- und Forstwirtschaft, Anbauflächen
8***	unbebaute und unbewirtschaftete Flächen

Die Schlüsselnummer besteht aus insgesamt 4 Ziffern, die neben der Hauptnutzungsart (Sektor, 1. Ziffer) die Objekte weitergehend klassifizieren.

Beispiel: SchlNr. 1469 : Private Wohngebäude, (1000)  
 Doppelhaushälfte, Stockwerksbau, (1400)  
 Bauperiode nach 1964, (1460)  
 vollunterkellert mit Tiefgarage (1469)

### Schadendatenbank

Kernpunkt des Programmsystems HOWAS ist die integrierte Schadendatenbank, in der zum derzeitigen Stand insgesamt ca. 4.000 Einzeldaten aus den zehn folgend aufgeführten Hochwasserereignissen in Deutschland im Zeitraum von 1987 bis 1998 erfasst sind:

- Ettenbach 1978
- Mosel 1983
- Ettenbach 1983
- Main-Tauber 1984
- Inn 1985
- Lippe 1988
- Donau 1988
- Elz 1993
- Elsenz/Schwarzbach 1994
- Emmer 1998

Seit Beginn der 80er Jahre wurde die Datenbank unter Federführung des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft verwaltet, wird heute aber nicht mehr weitergeführt. Grundlage war die Erhebung von Hochwasserschäden durch vereidigte Bausachverständige aufgrund von Unterlagen der zuständigen Brandversicherungsämter und durch Schadensaufnahmen und Befragungen vor Ort. Aufgrund des hohen zeitlichen und finanziellen Aufwandes wurden diese Erhebungen jedoch nicht flächendeckend durchgeführt. In der Datenbank werden für jeden Schadensfall die betroffenen Geschosse wie Keller, Erdgeschoss und Obergeschoss erhoben und folgende Schadensarten unterschieden:

- Gebäudeschäden
- Schäden an festem Inventar (z. B. Heizungs-, Sanitäreanlage)
- Schäden an mobilem Inventar (z. B. Möbel, Elektrogeräte)
- Schäden an Lagerbeständen (bei gewerblichen Objekten)

Neben den Schadensdaten werden zur eindeutigen Identifizierung und zur weiteren Auswertung zusätzlich folgende schadenrelevanten Informationen berücksichtigt:

- Wasserstände in den betroffenen Geschossen
- Neubauwerte (Goldmark)
- Hochwasserereignis
- Gemeinde
- Gemarkung
- Flurstücksnummer

Diese Daten sind in Schadendateien abgelegt, die auf der Grundlage des Flächennutzungskatalogs nach spezifischen Nutzungsmerkmalen strukturiert sind. Daraus können wahlweise nach verschiedenen Kriterien (z. B. alle Einfamilienhäuser oder alle Reihenhäuser ab Baujahr 1965 mit Keller oder alle privaten Wohngebäude insgesamt) Datenkollektive zusammengestellt werden, deren statistische Auswertung wiederum nach unterschiedlichen Vorgaben (z. B. Gebäudeschaden, Schaden an festem und/oder beweglichem Inventar, Gesamtschaden) erfolgen kann.

### Schadensauswertung

Die Auswertung der in der Datenbank abgelegten Schadensdaten kann über allgemeine statistische Parameter wie Mittelwert, arithmetisches Mittel, Varianz, Standardabweichung, Maximum, Range etc. erfolgen. Weiterhin besteht die Möglichkeit lineare und nichtlineare Regressionsberechnungen durchzuführen. Hierfür stehen folgende Funktionen zur Verfügung:

$$Y = Y_{\min} + A \cdot x + B \cdot x^2 \quad (\text{Gl. 6-1})$$

$$Y = Y_{\min} + A \cdot x + B \cdot \sqrt{x} \quad (\text{Gl. 6-2})$$

$$Y = Y_{\min} + A \cdot x^B \quad (\text{Gl. 6-3})$$

$$Y = Y_{\min} \cdot e^{B \cdot x} \quad (\text{Gl. 6-4})$$

$$Y = Y_{\min} \cdot \frac{1}{1 + e^{(C-B \cdot x)}} \quad \text{mit } C = \ln\left(\frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{Y_{\min}}\right) \quad (\text{Gl. 6-5})$$

$$Y = (Y_{\max} - Y_{\min}) \cdot (1 - e^{-A \cdot x}) + Y_{\min} \quad (\text{Gl. 6-6})$$

mit

$x$  Wasserstand [m]

$y$  Schaden [1000 DM]

$Y_{\min}$  minimaler absoluter Schaden [1000 DM]

$Y_{\max}$  maximaler absoluter Schaden [1000 DM]

$A, B$  Funktionsparameter [-]

Die Parameter A und B werden bei der Anpassung der Funktionen nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Die Parameter können aber auch vom Benutzer zu 1,0 oder 0,0 vorgegeben werden.  $Y_{\min}$  und  $Y_{\max}$  sind als minimale bzw. maximale Schäden (oder bezogene Schäden) immer vorzuzählen. Die Funktionen 5 (logistische Funktion 1. Ordnung) und 6 werden durch den maximalen Schaden (z. B. Verkehrswert als Sättigungsniveau) begrenzt. Bei der Anpassung kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden (soweit es sich um eine entsprechende Stichprobe handelt):

- Anpassung für Schäden im Keller und
- Anpassung für Schäden im Stockwerk

Eine solche Unterteilung vorzunehmen ist nur möglich, wenn der Wasserstand die unabhängige Variable darstellt. Die Trennung der Bereiche kann vom Benutzer im Hilfsmenü Funktionsauswahl angegeben werden. In diesem Fall sind zwei Anpassungen vorzunehmen, also zwei Kurven zu berechnen. Es ist aber Bedingung, dass der aus beiden Funktionen zusammengesetzte Kurvenverlauf stetig ist und nur in der Bereichsgrenze (Wasserstand= Höhe des Kellers) einen Knick aufweist. In diesem Fall wird zunächst die Regression für den unteren Bereich (Keller) berechnet.

Der Wert der Regressionsfunktion, der der Bereichsgrenze (Keller-Erdgeschoss) entspricht, ist dann der minimale Wert (minimaler Schaden  $Y_{\min}$ ) der nächsten Regressionsfunktion. Er entspricht dem Schaden, der bei einem unterkellerten Gebäude entsteht, bevor das Erdgeschoss überflutet wird. Es ist zudem möglich, unterschiedliche Funktionstypen für beide Wertebereiche anzupassen.

Zur einfacheren Anwendung der Datenbank wurden am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (heute: Institut für Wasser und Gewässerentwicklung IWG) Untersuchungen durchgeführt, um die Funktionsparameter für die verschiedenen Nutzungsarten zu ermitteln (BUCK, W., MERKEL, U. (1998)). Die Auswertungen wurden unter Verwendung von Gl. 1-2 durchgeführt, wobei die Werte für die Parameter  $Y_{\min}$  und  $A = 0$  gesetzt wurden. Die daraus resultierende Funktion:

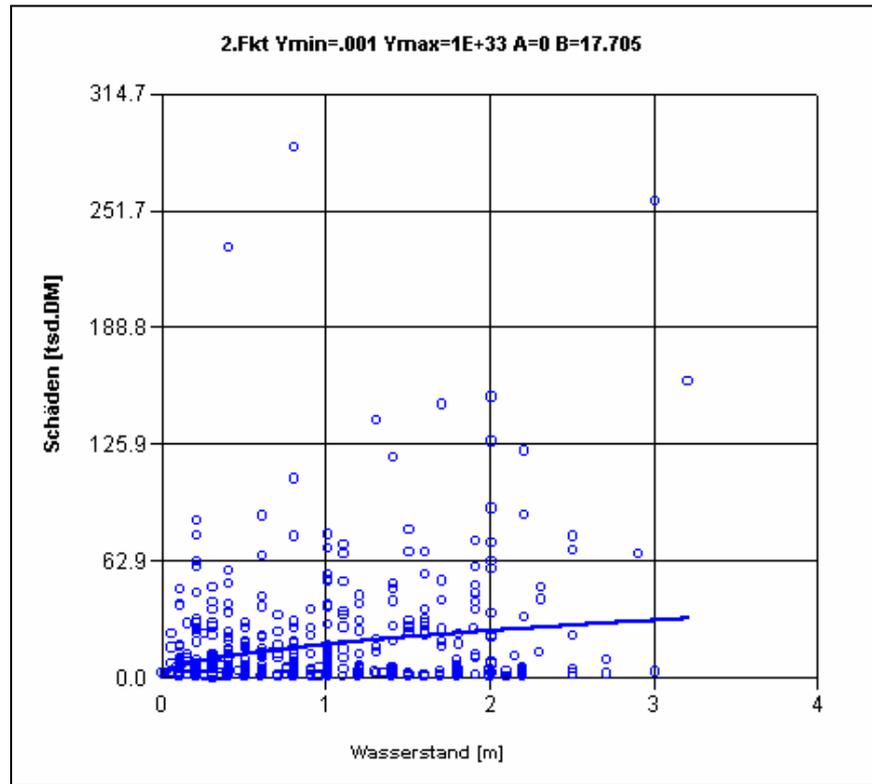
$$Y = B \cdot \sqrt{x} \quad (\text{Gl. 6-7})$$

berücksichtigt einen überproportionalen Anstieg der Schäden bei geringen Wassertiefen und strebt für große Wassertiefen einem Grenzwert zu (Maximalschaden). Nach Angaben der Verfasser entspricht dieser Funktionsverlauf am ehesten den natürlichen Verhältnissen. Der Faktor B kann hierbei interpretiert werden als die Schadenssumme in Tausend DM, die bei einem Wasserstand von 1 Meter im betrachteten Stockwerk auftritt.

Die Auswertungen liegen sowohl in tabellarischer, als auch in grafischer Form vor (siehe Beispiele in Tabelle 6-3 und Abbildung 6-5, Abbildung 6-6).

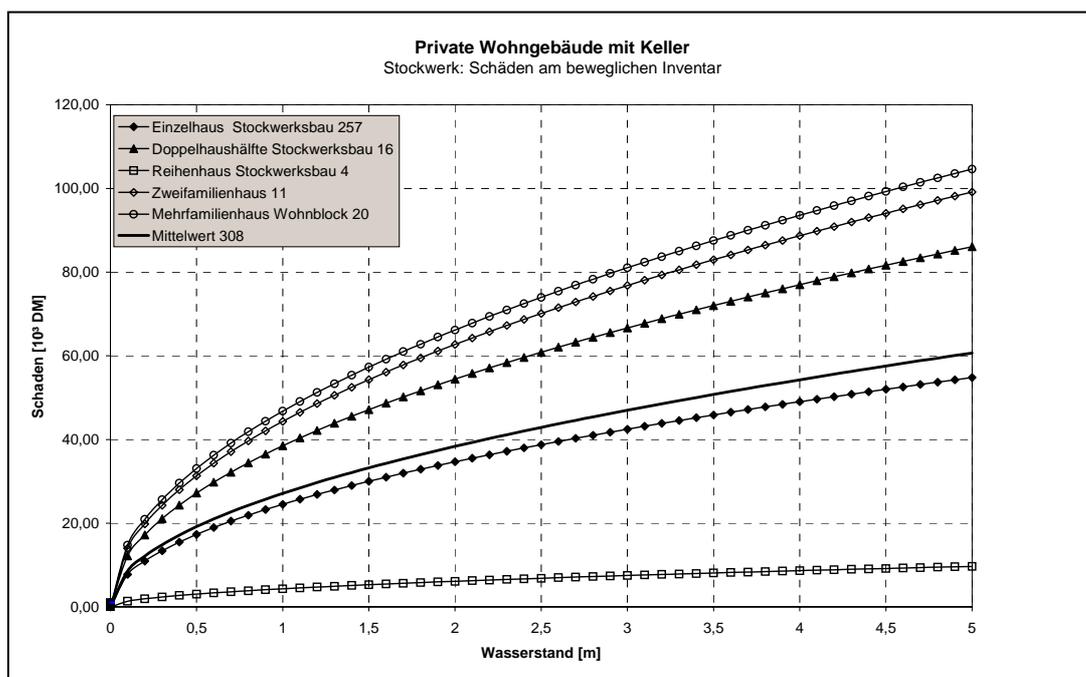
**Tabelle 6-3:** Tabellarische Auswertung des Untersektors 12\*\*: Einzelhaus, Stockwerksbau

Unter-sektor	Beschreibung	Ort	Art	B	n	mittl. Schaden [10 <sup>3</sup> DM]	mittl. Wasserstand [m]
12*1	Einzelhaus Stockwerksbau ohne Keller	Stockwerk	Geb	18,90	301	14,92	0,72
12*2			fest	8,02	109	6,75	0,77
12*3			bew	18,27	188	14,90	0,73
			außen	4,56	50	3,80	0,77
12*4	Einzelhaus Stockwerksbau mit Keller	Keller	Geb	7,45	747	8,56	1,46
12*5			fest	5,12	299	6,45	1,69
12*6			bew	6,92	399	8,66	1,66
12*7		Stockwerk	Geb	17,71	530	15,83	0,94
12*8			fest	7,71	88	5,79	0,66
12*9			bew	24,52	257	21,39	0,89
			außen	3,88	107	3,87	1,22



**Abbildung 6-5:** 12\*4 bis 12\*9: Private Wohngebäude, Einzelhaus, Stockwerksbau, mit Keller, Stockwerksschäden, Gebäudeschäden

Somit können für alle in der Datenbank vorhandenen Nutzungsarten Schadensfunktionen erstellt und verglichen werden (vgl. Abbildung 6-6).



**Abbildung 6-6:** Wasserstand-Schadens-Funktionen, Sektor 1: Private Wohngebäude, mit Keller, Stockwerk, Schäden am beweglichen Inventar

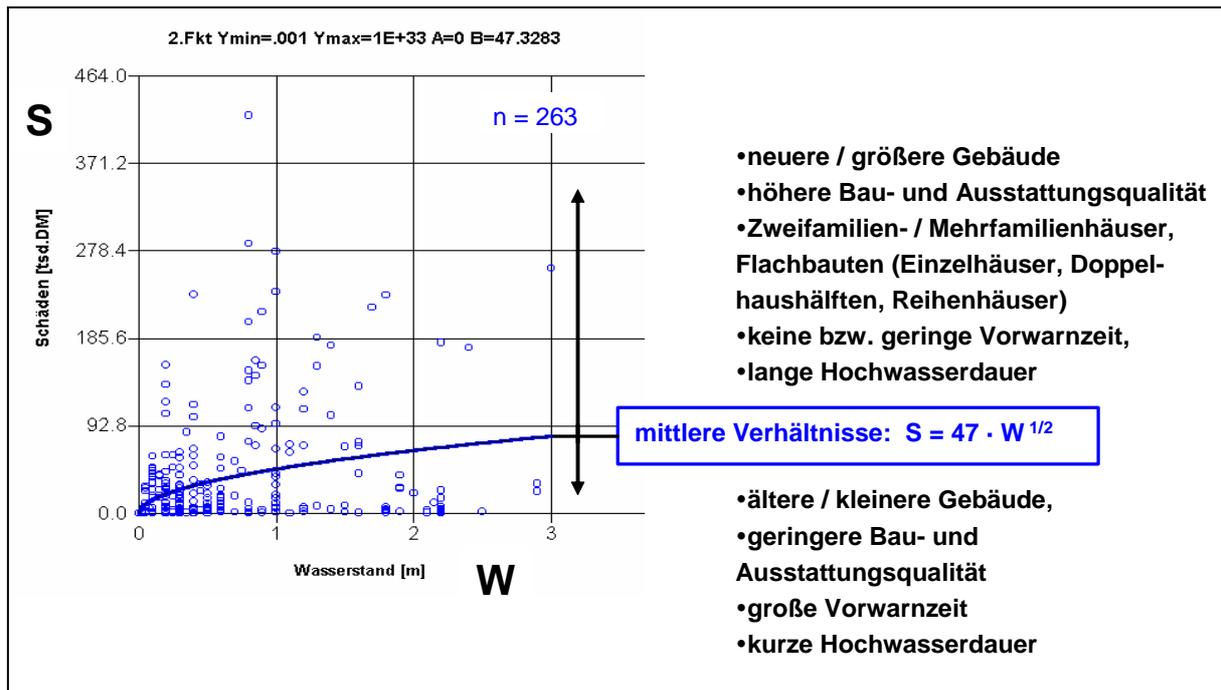
Es ist jedoch zu beachten, dass die angegebenen Funktionen nicht allgemein übertragbar sind, da sich sowohl aus der teilweise kleinen Stichprobenbelegung als auch aus der starken Streuung der Einzelwerte große Unsicherheiten in der Wahl der Funktionsparameter ergeben.

Die Unsicherheiten in der Wahl der Schadensfunktion bzw. der Streubereich der Originaldaten deutet darauf hin, dass nicht alle schadensrelevanten Parameter in der Datenbank erfasst sind. Zu den nicht dokumentierten und somit auch nicht berücksichtigten Faktoren zählen z. B.:

- die Hochwasserdauer
- die Vorwarnzeit
- das Vorbereitetsein auf ein Hochwasserereignis
- angepasste Bauweise und Nutzung gefährdeter Gebäudeteile sowie
- Ausstattungsgrad des Gebäudes und
- Wertigkeit des Inventars.

Trotz der großen Streubreite der Einzelwerte werden die HOWAS-Funktionen bei der Mehrzahl der Schadensabschätzungen in Deutschland eingesetzt, wobei die ursprüngliche Funktion in vielen Fällen auf Basis von sog. „Expertenwissen“ auf die lokalen Verhältnisse angepasst wird.

Die in der Datenbank abgelegten Schadensdaten sind in absoluten Geldwerten (DM) angegeben, somit stellen die ableitbaren Schadensfunktionen einen funktionalen Zusammenhang der Wassertiefe und dem zu erwartenden Schaden dar. Im Vergleich hierzu werden im internationalen Raum hauptsächlich Funktionen verwendet, die die Schäden im Verhältnis zum Gesamtwert des Gebäudes bzw. des Inventars darstellen. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass für gleiche Gebäudetypen die prozentuale Schädigung unabhängig von der Wertigkeit des Gebäudes und der Ausstattung einen vergleichbaren Verlauf über die Wassertiefe aufweist. Durch die Verwendung von diesen (prozentualen) Schädigungsfunktionen, die teilweise im folgenden Kapitel vorgestellt werden, kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass der Streubereich der Funktion zumindest reduziert werden kann.



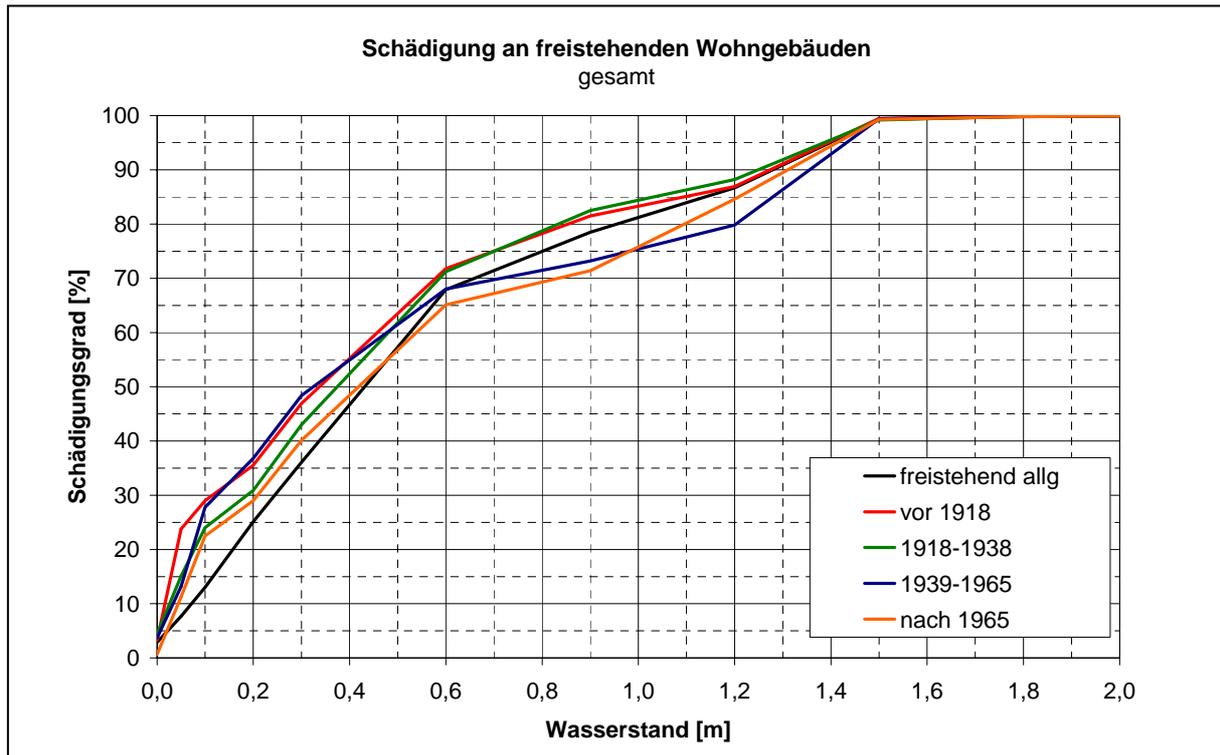
**Abbildung 6-7** : Einfluss in der HOWAS-Datenbank nicht dokumentierter Einflussgrößen auf die Wasserstand-Schadens-Funktionen (BUCK, W., MERKEL, U. (1998).

### 6.2.2 Weitere Schadens-, Schädigungsfunktionen

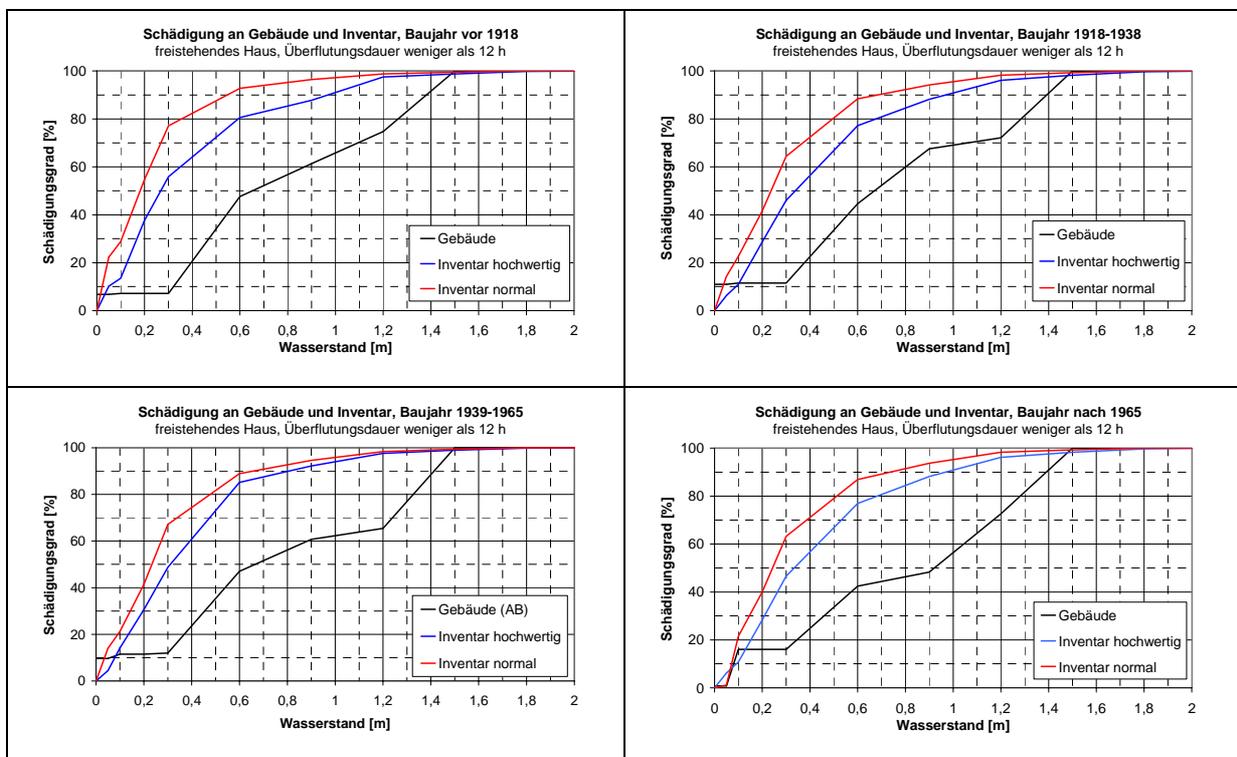
Auch internationale Studien belegen, dass der Wasserstand auf der Einwirkungsseite (Gefährdung) der wesentliche Parameter für die Höhe der Schäden bzw. der Schädigung ist. Für die Widerstandsseite (Vulnerabilität) ergeben sich teilweise unterschiedliche Parametrisierungen. Aus den Untersuchungen von PENNING-ROWSELL, E.C., CHATTERTON, J.B. (1977) ergeben sich für z. B. Wohngebäude folgende Parameter zur Wahl der Schadensfunktion:

- Gebäudeart (6 Gebäudearten)
- Baujahr bzw. der Zeitraum (4 Bauperioden)
- soziale Klasse, Ausstattung (4 soziale Klassen)
- Dauer der Flut (weniger als 12 h, mehr als 12 h)

Auf Basis der getroffenen Gebäudeklassifizierung wurden die Schadensfunktionen synthetisch abgeleitet und für alle Schadensuntersuchungen in Großbritannien landeseinheitlich „festgelegt“.



**Abbildung 6-8** : Beispiele für Schädigungsfunktionen nach PENNING-ROWSELL, E.C., CHATTERTON, J.B. (1977), Unterscheidung nach Baujahr der Gebäude, dargestellt sind die Gesamtschäden am Gebäude.

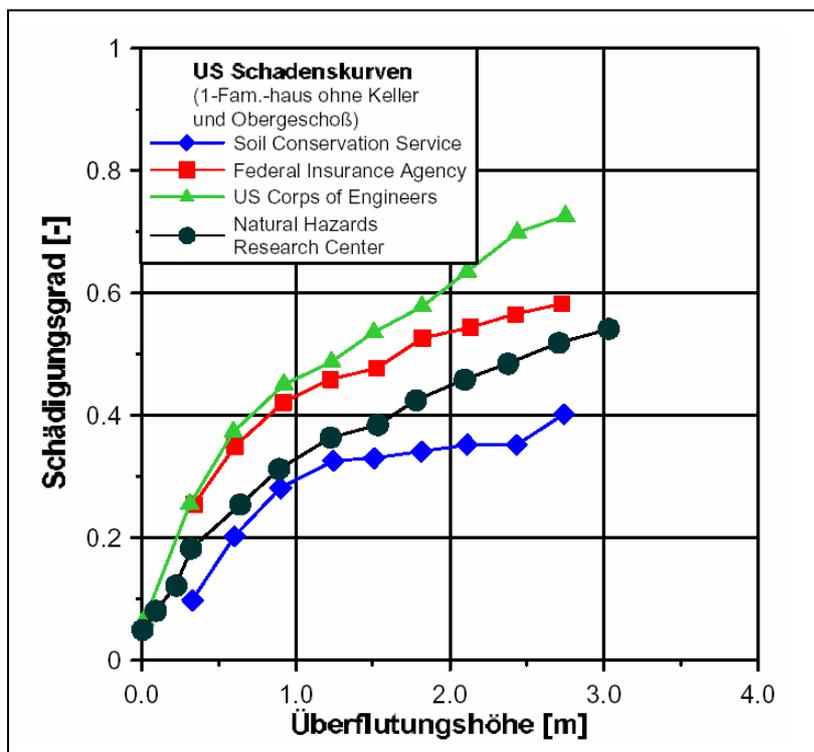


**Abbildung 6-9** : Beispiele für Schädigungsfunktionen nach PENNING-ROWSELL, E.C., CHATTERTON, J.B. (1977), Unterscheidung nach Baujahr der Gebäude, dargestellt sind die Schäden am Gebäude sowie die Inventarschäden für die höchste und niedrigste „soziale Klasse“.

Der Gesamtschaden ergibt sich aus Superposition der Gebäude-, mit den Inventarschäden. Auch hier ergibt sich ein vergleichbarer Schadensverlauf mit den Funktionen der HOWAS-Datenbank: überproportional stark steigende Schäden bei Überschwemmungsbeginn, die sich bei steigenden Wassertiefen asymptotisch dem Maximalschaden annähern.

Der angegebene Schädigungsgrad bezieht sich dabei nicht auf den Gesamtwert des Gebäudes bzw. der Inventarausstattung, sondern auf einzelne schadensanfällige Gebäudeelemente und Ausstattungsgegenstände. Der Gesamtschaden setzt sich aus den Reparaturkosten sowie den Kosten für die Erneuerung zusammen. Die Schädigung kann auch schon bei niedrigem Wasserstand 100% betragen, da z. B. eine Wand auch schon bei geringer Einstautiefe komplett neu verputzt werden muss.

Weitere Untersuchungen zu Schädigungsfunktionen für Wohngebäude zeigen in der Mehrzahl einen ähnlichen Schadensverlauf wie in den vorangehenden Abbildungen dargestellt, wobei der Grad des Anstieges bzw. der maximale Schädigungsgrad teilweise signifikant voneinander abweichen (Abbildung 6-10). Im Unterschied zu den Untersuchungen von PENNING-ROWSELL, E.C., CHATTERTON, J.B. (1977) bezieht sich der angegebene Schädigungsgrad bei den Auswertungen von GRIGG, N.S. AND HELWEG, O.J. (1975) auf den Gesamtwert des Gebäudes. Der Maximalschaden tritt bei Einstautiefen von ca. 2,7m bis 3 m auf und beträgt zwischen 40 und 70 % des Gesamtwertes.



**Abbildung 6-10** : Schädigungsfunktionen für Wohngebäude nach GRIGG, N.S. AND HELWEG, O.J. (1975), entnommen aus MAI, S. (2004).

## 6.3 Ermittlung synthetischer Schadens- bzw. Schädigungsfunktionen

### 6.3.1 Grundlagen

Die Ermittlung bzw. die Definition der maßgebenden Schadensfunktion für einzelne Objekte oder Objekttypen stellt einen zentralen Punkt in der Schadensermittlung dar und ist gleichzeitig das Element mit dem größten Unsicherheitsbereich. Der mögliche Schaden in / an einem Gebäude (oder allgemeiner ausgedrückt an einem Objekt) hängt wie gezeigt in erster Linie vom aufgetretenen maximalen Wasserstand während des Ereignisses statt und wird folglich wie beschrieben als Schadensfunktion über dem Wasserstand berücksichtigt. Aufgrund der individuellen Ausprägung der Schadensanfälligkeit einzelner Objekte bestehen Schwierigkeiten in der Übertragbarkeit von erhobenen Schadendaten auf andere Gebäude und Untersuchungsgebiete bzw. ist bei der Übertragung mit größeren Unsicherheiten zu rechnen. Die bestätigt sich in den im vorangegangenen Kapitel erläuterten Angaben aus der Literatur.

Für mikroskalige Schadensuntersuchungen ist die Verwendung individueller bzw. typbezogener Schadensfunktionen erforderlich, aufgrund der Streubreite und der Schwierigkeiten der regionalen Übertragbarkeit (Gebäudetypen sind international kaum standardisierbar) sind Literaturangaben hierzu jedoch kaum geeignet. Besser, aber auch mit einem erheblichen Untersuchungsaufwand verbunden sind synthetische Schadensfunktionen, die über **WAS-WÄRE-WENN** – Analysen mit unterschiedlicher Auflösung und Datendichte erhoben werden können. Dabei werden durch Sachverständige oder Gutachter die potenziellen Hochwasserschäden in und an Gebäuden für mindestens 3 verschiedene Wasserstände ermittelt. Aus den so erhobenen klassifizierten Schäden (Inventar-, Ausstattungsgegenstände, Gebäudesubstanz) oder Schadenssummen können Wasserstand-Schaden-Funktionen erstellt werden, entweder in absoluten monetären Werten oder in Bezug auf z.B. die Wohnfläche erstellt werden (EUR/m<sup>2</sup>). Im Gegensatz zu real aufgetretenen und dokumentierten Schadensdaten, bei denen i.d.R. nur jeweils ein einziger Schadenswert pro Gebäude vorliegt, sind bei der beschriebenen Vorgehensweise 3 Stützpunkte bekannt, aus denen eine plausible Funktion generiert werden kann.

Sollen die potenziellen Schäden mit höchstmöglicher Genauigkeit ermittelt werden, so sind die Schadenserhebung für alle potenziell gefährdeten Gebäude durchzuführen. Der in diesem Fall erforderliche sehr hohe zeitliche und finanzielle Aufwand machen eine Anwendung dieser Methode nur für sehr kleine Untersuchungsgebiet bzw. wenige Objekte wirtschaftlich, z.B. bei der Bewertung von lokalen objektbezogenen Schutzmaßnahmen.

Größere Untersuchungsgebiet können bearbeitet werden wenn anstatt einer Begehung jedes einzelnen Objektes die Gebäude in Nutzungstypen klassifiziert werden. Die zu wählende Anzahl der Nutzungstypen und deren weitere Unterteilung

ist dabei abhängig von der strukturellen Zusammensetzung der Bebauung im Projektgebiet. Für homogene Bebauungen wie z.B. neuere Wohngebiete, in denen Bauart und Größe vorgeschrieben sind, kann die Einteilung in wenige Nutzungstypen ausreichend sein. Eine Schadenserhebung ist dann nur für wenige repräsentative Gebäudetypen erforderlich, die ermittelte Wasserstand-Schaden-Funktion wird auf alle Gebäude gleichen Typs angewendet. Einzel- oder Sondernutzungen, z.B. Handel und Gewerbe oder gemischte Nutzungen sind getrennt zu erheben. Diese Methode kann z.B. für die Bewertung von Schutzmaßnahmen auf kommunaler Ebene im Rahmen von Nutzen-Kosten-Untersuchungen angewendet werden.

Für große Untersuchungsgebiete bzw. bei einer Vielzahl von Sonderobjekten oder unterschiedlicher Gebäudetypen kann eine wie oben beschriebene detaillierte Untersuchung den zur Verfügung stehenden Kostenrahmen sprengen. In diesem Fall kann es erforderlich sein, unter Akzeptanz einer verringerten Aussagegenauigkeit, eine „gröbere“ Methodik anzuwenden. Dabei kann die Erhebung auf eine kleine Anzahl von unterschiedlichen Gebäudetypen beschränkt bleiben oder auf bereits bekannte Schadensdaten (wenn vorliegend aus ex ante Untersuchungen bzw. aus Schadensdatenbanken wie z.B. der HOWAS Datenbank) zurückgegriffen werden. Dieses vorgehen kann aufgrund der damit verbundenen größeren Unsicherheiten in den berechneten Schadenssummen nur für große Projektgebiete empfohlen werden in denen nur eine qualitativ vergleichende Betrachtung für unterschiedliche Teilgebiete erforderlich ist. Eine quantitative Schadensberechnung für einzelne Gebäude ist damit nicht bzw. nur unter Inkaufnahme von großen Unsicherheiten möglich.

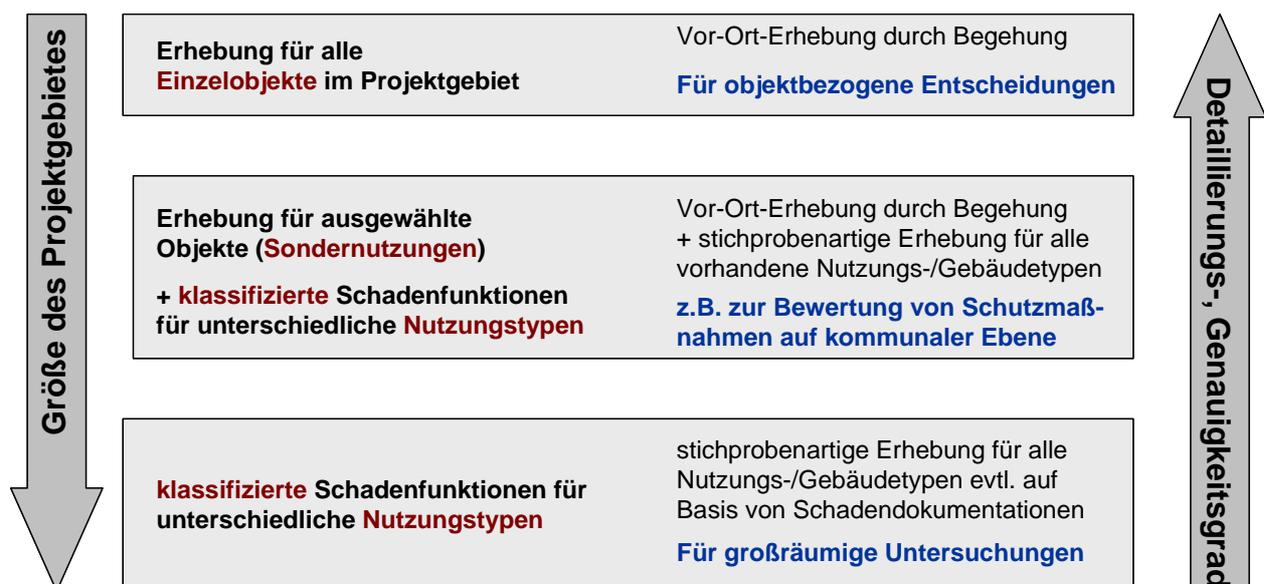


Abbildung 6-11 : Ermittlung synthetischer Schadensfunktionen

### 6.3.2 Pilotprojekt „Greifswald“

Ein erstes Projekt zur Realisierung der vorgestellten Methodik wurde am IWG im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für ein geplantes Sturmflusperrwerk in Greifswald umgesetzt. Ziel der Untersuchung war, die Kosten des Schutzbauwerkes (Herstellkosten, Betriebs- und Unterhaltungskosten sowie die Inspektions- und Ersatzinvestitionskosten) dem Nutzen der Maßnahme in Form von verhinderten Schäden gegenüberzustellen (BUCK, W., KRON, A, WETZEL, A. (2008)

Aufgrund der großen Anzahl betroffener Gebäude (> 2500 Einzelgebäude) war eine Schadenserhebung in allen betroffenen Gebäuden im Projektrahmen nicht umsetzbar. Aus diesem Grund wurde der Bestand an Wohngebäuden wie in Tabelle 6-1 beschrieben unterschiedliche Typen zugeordnet. Die Klassifizierung erfolgte zum einen anhand schadensrelevanter Gebäudemerkmale (z.B. Unterkellerung) zum anderen entsprechend dem gebäudetechnischen Ausstattungsgrad. Bei der Unterscheidung in kleine und große Mehrfamilienhäuser wurde z.B. dem Umstand Rechnung getragen, dass Gebäude ab 4 Vollgeschossen eine aufwendige technische Ausstattung erfordern und besonderen bautechnischen Vorschriften unterliegen.

**Tabelle 6-4:** Klassifizierung der Wohngebäude

<b>Bauart / Nutzungstyp</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Bemerkung</b>
Ein-/Zweifamilienhaus	EFH	1-2 Vollgeschoße
Doppelhaus		
Reihenhaus	RH	1-2 Vollgeschoße
Kleines Mehrfamilienhaus	KMH	1-3 Vollgeschoße
Großes Mehrfamilienhaus	GMH	>3 Vollgeschosse
<b>Bauperiode</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Bemerkung</b>
vor 2. WK	A	vor 1949
DDR	B	1949-1989
Gesamtdeutschland	C	nach 1989
<b>Angaben zur Unterkellerung</b>	<b>Bezeichnung</b>	
mit Keller	mK	
ohne Keller	oK	

Entsprechend der Häufigkeitsverteilung der hochwassergefährdeten Gebäude in den unterschiedlichen Klassifizierungsmerkmalen wurden insgesamt 98 Wohngebäude durch Schadensschätzer begutachtet. 50 nicht klassifizierbare Gebäude wurden als Sonderobjekte eingestuft und einzeln untersucht.

Für das Erdgeschoss wurde die Ermittlung der potenziellen Hochwasserschäden (getrennt nach Gebäude- und Hausratsschäden bzw. Schäden an Betriebseinrichtungen) jeweils für die Wasserstände von 0,1 m, 0,5 m und 1,5 m über dem Erdgeschossfußboden vorgenommen. Der Schaden im Keller wurde für einen Wasserstand von 2,5 m abgeschätzt (Vollfüllung) und als Wasserstand-Schadensfunktion eine Quadratwurzelfunktion angepasst. Als Grundlage zur Kalkulation der Gebäudeschäden als Summe der Zeitwerte der gewerkebezogenen Wiederherstellungskosten wurde eine durch ein örtliches Ingenieurbüro erstellte Baupreisliste verwendet.

Die Schäden am Hausrat wurden mithilfe eines aus der Versicherungspraxis entwickelten überschlägigen Berechnungsverfahrens in Abhängigkeit des Ausstattungsgrades (Wert des Inventars) ermittelt, wohingegen die Betriebseinrichtung von Sondergebäuden (gewerbliche und öffentliche Gebäude) nach einzelnen Komponenten aufgegliedert wurde. Die wesentlichen Elemente, für die eine monetäre Schadenserhebung durchgeführt wurde, sind in nachfolgender Darstellung aufgeführt:

- **Gebäude:** Reparaturarbeiten / Wiederherstellungskosten nach Gewerken  
Reinigungsarbeiten / Trocknung  
Honorar für Architekt
- **Hausrat:** Wasserempfindliche Möbel und Ausstattungsgegenstände, transportable oder schwere Elektroausstattung, wasserunempfindliche Gegenstände, sonstige Gegenstände, Ausstattungswert des Inventars (einfach, mittel, gut)
- **Betriebs-  
einrichtung:** Möblierung  
Geschäftsausstattung  
Maschinen  
Waren, Vorräte

Um die erwartete Streubreite der Erhebungsdaten zu erklären bzw. zu plausibilisieren wurden weitere mögliche Einflussgrößen auf die Schadenshöhen ermittelt, z.B. Bau-, Modernisierungsjahr, Bauweise, Baukonstruktion, Qualität von Rohbau, Fassade und Innenausbau.

Auf den folgenden Seiten ist ein Beispiel einer Auswertung für eine Wohngebäude dargestellt:

## Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Risikoinformationen
2. Ergebnis und Schadenszusammenstellung zum Grundstück / Objekt
3. Grundriss / Foto
4. Spezielle Risikoinformationen
5. Schadensabschätzung WSH 10 cm
6. Schadensabschätzung WSH 50 cm
7. Schadensabschätzung WSH 150 cm
8. Schadensabschätzung Hausrat

## 2. Ergebnis und Schadenszusammenstellung zum Grundstück / Objekt

	Hauptgebäude	Schaden		Zeitwert	
		absolut	Neuwert bezogen auf die Grundfläche EG	absolut	bezogen auf die Grundfläche EG
WSH 10	Architektengebühr	2.230 €		1.453 €	
	Erdgeschoss	30.042 €		20.374 €	
	Untergeschoss	18.309 €		13.109 €	
	<b>Gesamt WSH 10</b>	<b>50.581 €</b>	<b>432 €/m<sup>2</sup></b>	<b>34.936 €</b>	<b>299 €/m<sup>2</sup></b>
WSH 50	Architektengebühr	2.581 €		1.698 €	
	Erdgeschoss	39.591 €		27.819 €	
	Untergeschoss	18.309 €		13.109 €	
	<b>Gesamt WSH 50 cm</b>	<b>60.481 €</b>	<b>517 €/m<sup>2</sup></b>	<b>42.626 €</b>	<b>364 €/m<sup>2</sup></b>
WSH 150	Architektengebühr	3.288 €		2.254 €	
	Erdgeschoss	54.970 €		40.106 €	
	Untergeschoss	18.309 €		13.109 €	
	<b>Gesamt WSH 150 cm</b>	<b>76.567 €</b>	<b>654 €/m<sup>2</sup></b>	<b>55.469 €</b>	<b>474 €/m<sup>2</sup></b>

Nebengebäude					
WSH 10 cm		1.160 €	21 €/m <sup>2</sup>	1.107 €	20 €/m <sup>2</sup>
WSH 50 cm		1.455 €	26 €/m <sup>2</sup>	1.375 €	25 €/m <sup>2</sup>
WSH 150 cm		5.167 €	94 €/m <sup>2</sup>	3.489 €	63 €/m <sup>2</sup>

Hausrat		Schaden		Zeitwert	
Wasserstandshöhen (WSH)		absolut		absolut	bezogen auf die Grundfläche EG
ohne Rettungsmaßnahmen					
WSH 10 cm	Hausrat			8.408 €	72 €/m <sup>2</sup>
	Entrümpelung, Deponie			733 €	6 €/m <sup>2</sup>
				<b>9.141 €</b>	<b>78 €/m<sup>2</sup></b>
WSH 50 cm	Hausrat			25.543 €	218 €/m <sup>2</sup>
	Entrümpelung, Deponie			2.227 €	19 €/m <sup>2</sup>
				<b>27.770 €</b>	<b>237 €/m<sup>2</sup></b>
WSH 150 cm	Hausrat			37.090 €	317 €/m <sup>2</sup>
	Entrümpelung, Deponie			3.234 €	28 €/m <sup>2</sup>
				<b>40.324 €</b>	<b>345 €/m<sup>2</sup></b>

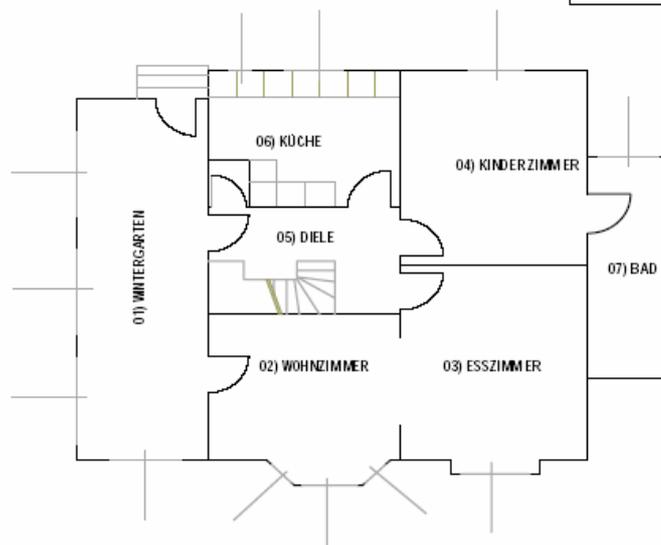
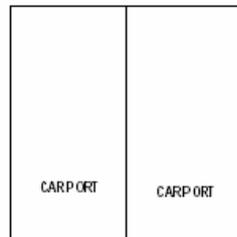
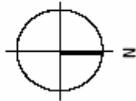
		mit Rettungsmaßnahmen			
WSH 10 cm	Hausrat			6.351 €	54 €/m <sup>2</sup>
	Entrümpelung, Deponie			554 €	5 €/m <sup>2</sup>
WSH 50 cm	Hausrat			19.294 €	165 €/m <sup>2</sup>
	Entrümpelung, Deponie			1.682 €	14 €/m <sup>2</sup>
WSH 150 cm	Hausrat			28.016 €	239 €/m <sup>2</sup>
	Entrümpelung, Deponie			2.443 €	21 €/m <sup>2</sup>

Betriebseinrichtung etc.		Schaden		Zeitwert	
Wasserstandshöhen (WSH)		absolut		absolut	bezogen auf die Grundfläche EG
ohne Rettungsmaßnahmen					
WSH 10 cm				- €	
WSH 50 cm				- €	
WSH 150 cm				- €	

Abbildung 6-12 : Beispiel Schadenserhebung: Ergebniszusammenstellung

### 3. Grundriss Erdgeschoss / Fotos

Grundriss



Foto



Abbildung 6-13 : Beispiel Schadenserhebung: Grundriß / Foto

#### 4. Spezielle Risikoinformationen zum Grundstück / Objekt

**Hauptgebäude** Baujahr ca.

Qualität des Gebäudes a) Rohbau  einfach  mittel  gut a) ZW Gebäude in %

b) Fassade und Innenausbau  einfach  mittel  gut b) ZW Schadenteil in %

Höhenlage OK EG über NN in m  Diff. OK EG - Gelände / straßenseitig / gebäudemittig in m

Gebäudetyp / Nutzung im EG  EFH  RH  GMFH  KMFH Brüstungshöhe EG in m

**Sondergebäude**  Grundfläche EG in m<sup>2</sup>

mit gewerblicher Nutzung? / Art  Anteil der gewerbl. Nutzung in %

Bauart

Konstruktion / Baumaterial

Baujahrsklasse / Bauperiode  vor 1949  1949 - 1989  nach 1989 modernisiert im Jahr

durchgeführte Mod.maßnahmen

Unterkellerung in %

falls unterschiedliche Nutzung UG  EG  OG

bei MFH: Lage der Wohnung  teilweise auch im OG?

**Nebengebäude**

GF in m <sup>2</sup>	Nutzung	Bauart
<input type="text" value="28"/>	<input type="text" value="Carport"/>	<input type="text" value="Holzpfosten"/>
<input type="text" value="27"/>	<input type="text" value="Schuppen"/>	<input type="text" value="Mauerwerk"/>
<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>

**Hausrat**

Wohnfläche in m<sup>2</sup> im UG  im EG  im OG  Gesamt-Wohnfläche

Qualität des Hausrates  einfach  mittel  gut Zeitwert des Hausrates in %

geschätzter Neuwert pro m<sup>2</sup> Wohnfläche

Anteil des durch Hochwasser betroffenen Hausrates in %

Anteil des Hausrates, der innerhalb der Vorwarnzeit "gerettet" werden kann in %

Art/Beschreibung des Hausrates, der "gerettet" werden kann

**Außenanlagen**

Qualität der Außenanlage  einfach  mittel  gut Zeitwert der Außenanlage in %

geschätzter Neuwert pro m<sup>2</sup> Außenanlage

angelegte Außenfläche in m<sup>2</sup> / ca.  Hofbefestigung mit Zufahrt

Schaden an der Außenanlage

Abbildung 6-14 : Beispiel Schadenserhebung: spezielle Risikoinformationen

**Zeitwertermittlung** Kunde: WSH 50

Schaden vom 01.12.2006, Sturmflut

D-17489 Greifswald

Schadenummer: WSH 50 03-050 0003-0

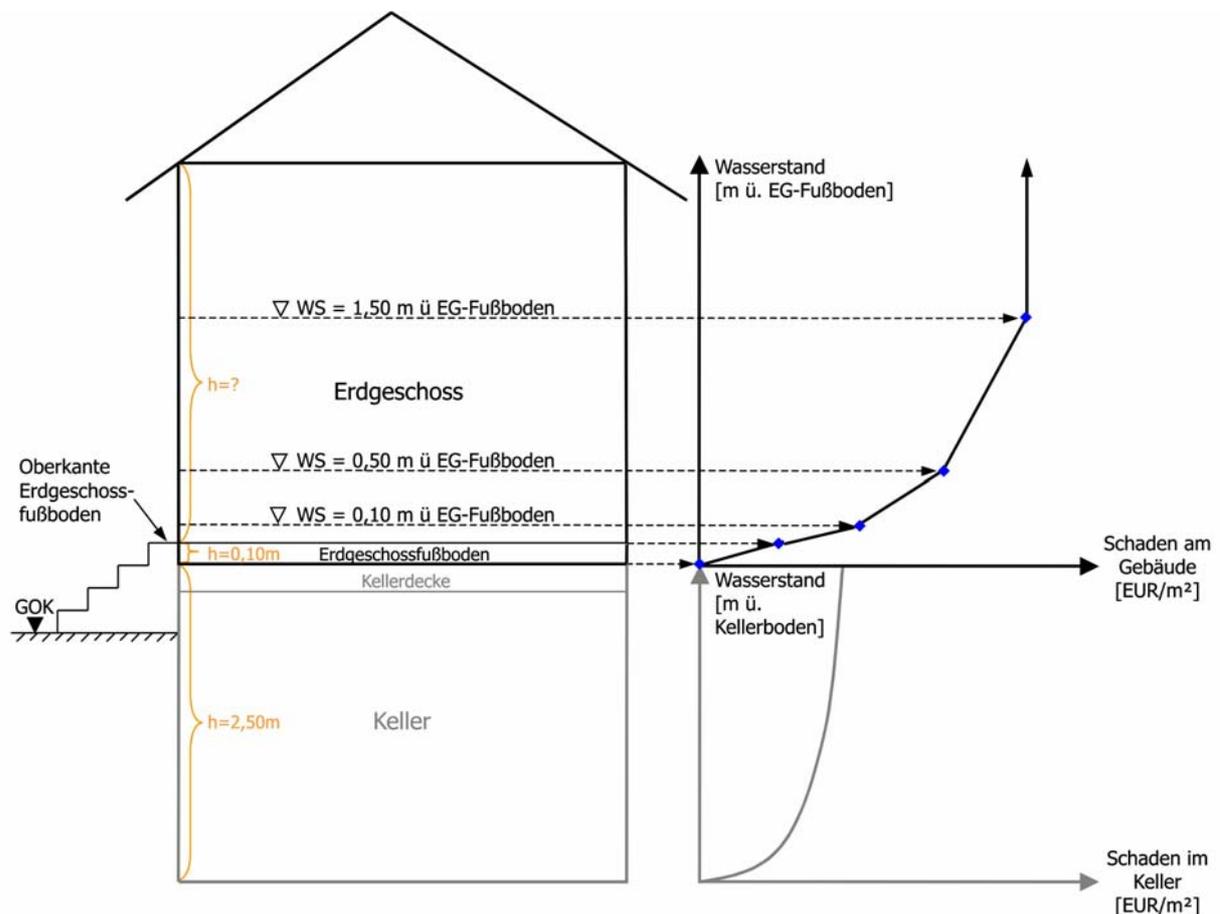
Kundenname: WSH 50

Nummer	Menge	Preis [€] Zeitwert [%]	Neuwert [€] Zeitwert [€]	Mwst NW [€] Mwst ZW [€]	Gesamt NW [€] <b>Gesamt ZW [€]</b>
Übertrag					3.228,78
50.006	Kalkzementputz an Innenwänden auf Mauerwerk oder Beton anbringen, einschl. aller erforderlichen Vorarbeiten. 16,96 m <sup>2</sup>	11,50 60,00%	195,04 117,02	---,-- ---,--	195,04 <b>117,02</b>
50.020	Stellung und Vorhaltung eines Arbeitsgerüsts für Gipsarbeiten und nachfolgende Handwerker. {ZW=100%} 129,00 m <sup>2</sup>	3,80 100,00%	490,20 490,20	---,-- ---,--	490,20 <b>490,20</b>
50.021	Vollwärmeschutz im Bereich der Durchfeuchtung abnehmen, neue Isolierung ansetzen, einschl. aller Materialien komplett liefern und anbringen, einschl. Gewebe, Spachtelung und Deckputz. {ZW=100%} 21,50 m <sup>2</sup>	51,00 100,00%	1.096,50 1.096,50	---,-- ---,--	1.096,50 <b>1.096,50</b>
50.022	Fassade hochdruckreinigen, incl. notwendiger Vorarbeiten. {ZW=100%} 107,50 m <sup>2</sup>	3,50 100,00%	376,25 376,25	---,-- ---,--	376,25 <b>376,25</b>
50.023	Anstrich auf Außenputz mit Dispersionsfarbe, incl. erforderlicher Vorarbeiten. 129,00 m <sup>2</sup>	8,00 60,00%	1.032,00 619,20	---,-- ---,--	1.032,00 <b>619,20</b>
Summe Gipsarbeiten: 3.921,42					
<b>52</b>	<b>Plattenlegerarbeiten</b>				
52.001	Boden ausgleichen und für Verlegung der Oberbeläge vorbereiten. 56,03 m <sup>2</sup>	8,50 60,00%	476,26 285,76	---,-- ---,--	476,26 <b>285,76</b>
52.004	Bodenfliesen im Dünnbett verkleben incl. Verfugung und dauerelastischer Fugenabdichtung. Fliesenpreis ca. 40,- €/m <sup>2</sup> . 56,03 m <sup>2</sup>	67,00 60,00%	3.754,01 2.252,41	---,-- ---,--	3.754,01 <b>2.252,41</b>
52.005	Naturstein oder Fliesensockel incl. notwendiger Vorarbeiten, Beiputz und Oberflächenbehandlung. 64,34 m	8,50 60,00%	546,89 328,13	---,-- ---,--	546,89 <b>328,13</b>
Übertrag					8.794,25

**Abbildung 6-15** : Beispiel Schadensenerhebung: Auszug aus Schadensabschätzung für Erdgeschoss auf Basis einer gewerkebezogener örtlicher Baupreisliste



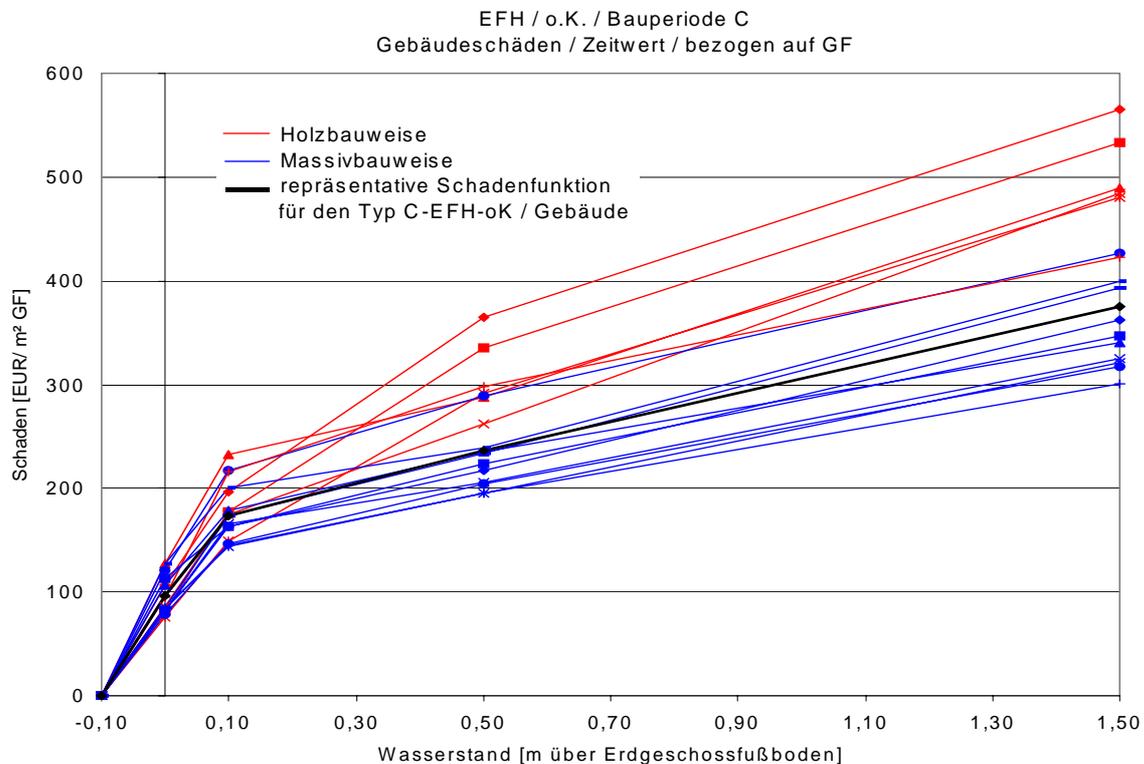
Die erhobenen Schäden können entweder als Absolutwerte oder (für die Übertragbarkeit besser geeignet) bezogen auf die Grund- oder Wohnfläche angegeben werden. Im Bereich niedriger Wasserstände im Erdgeschoss wurden die Erhebungsdaten um weitere Schadenssummen ergänzt. Es wurde für alle Gebäude angenommen, dass der Aufbauhöhe des Fußbodens 10 cm beträgt. Der Nullpunkt der Wasserstands-Schadens-Beziehung für Gebäudeschäden im EG wurde dementsprechend auf eine Höhe von 10 cm unterhalb der Erdgeschossfußbodenhöhe gewählt. Als weiterer Stützpunkt wurde die Schadenssumme bei einem Wasserstand von 0 cm über EG-Fußboden ermittelt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass alle „horizontalen“ Bauelemente (Fußbodenkonstruktion) geschädigt sind, Schäden an „vertikalen“ Elementen (Wände) aufgrund der geringen Wasserhöhe noch vernachlässigbar gering sind.



**Abbildung 6-17 :** Ableitung von Schadensfunktionen für Gebäudeschäden im Erdgeschoss und Keller auf Basis der erhobenen Schadensdaten.

Auf die beschriebene Art und Weise wurde die Schäden für Gebäude, Hausrat (Wohngebäude), Betriebseinrichtung (gewerbliche genutzte Gebäude) und Keller erhoben und ausgewertet. Als Beispiel zeigt Abbildung 6-18 die Ergebnisse für einen Gebäudetyp. Im Diagramm entspricht jede dargestellte Funktion einem begangenen

Gebäude. Deutlich erkennbar ist die Streuung der Erhebungsdaten, die aufgrund der individuellen Ausstattung der einzelnen Gebäude zu erwarten war. Im Unterschied zu Angaben aus der Literatur oder Schadensdatenbanken ist die Streuung hier jedoch aus den Erhebungsdaten erklärbar und auf die Bauart des Gebäudes zurückzuführen.



**Abbildung 6-18:** Wasserstand-Schadensfunktionen für Gebäudeschäden für die Klasse C-EFH-oK, differenziert nach der Baukonstruktion

Weitere relevante „Streuparameter“ waren der Zeitwert des Gebäudes, die Qualität von Fassade und Innenausbau sowie der Modernisierungs-, bzw. Renovierungszustand. Für die Übertragung der Schadensfunktion auf andere, nicht begangene Gebäude, wurden diese Informationen nach Möglichkeit berücksichtigt.

Die so abgeleiteten Funktionen wurden auf alle Gebäude gleichen Typs beziehungsweise auf identische Gebäude eines Wohngebietes (z.B. Reihenhäuser innerhalb eines Wohnquartiers) übertragen. Die Schadensfunktionen sowie die vollständigen Gebäudeinformationen wurden als Attribute den im Projektrahmen bereitgestellten Katasterdaten der ALK zugeordnet.

In der weiteren Projektbearbeitung wurden die potenziellen Hochwasserschäden für unterschiedliche Wasserstände berechnet und eine Nutzen-Kosten-Analyse entsprechend den Leitlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser über eine dynamische Kostenvergleichsrechnung durchgeführt (LAWA (2005)).

## 7 GIS-gestützte Abschätzung von Hochwasserschäden

### 7.1 Eingangsdaten

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein GIS-gestütztes Schadensabschätzungsmodell erstellt, mit dem auf Basis einzelner Gebäude bzw. Nutzungsobjekte (mikroskalige) zu erwartende Hochwasserschäden berechnet werden können. Das Modell baut auf dem im Rahmen der „Integrierenden Konzeption Neckar-Einzugsgebiet“ (IKoNE) erstellten Hydrodynamisch-Numerischen Simulationsmodell auf und bietet dem Anwender die Möglichkeit, über Eingabemasken alle erforderlichen Eingangsgrößen auszuwählen. Zur Schadensberechnung sind folgende Modellkomponenten erforderlich:

- **Digitales Geländemodell (DGM)**

Enthält die topografische Höheninformation, mit der die Exposition einzelner Nutzungsobjekte ermittelt werden kann. Grundlage des DGM können alle Datenformate sein, die die Lage und Höhe der Geländestruktur wiedergeben.

- **Hydrodynamisch-Numerisches Modell (HN-Modell)**

Über das HN-Modell kann die Gefährdung für ein zu untersuchendes Gebiet beschrieben werden (Einwirkungsseite). Mit ihm können alle schadensrelevanten Einflussgrößen wie z. B. Wasserstand und ggf. Fließgeschwindigkeiten für ein ausgewähltes Hochwasserereignis berechnet werden.

- **Flächennutzungsdaten**

Flächennutzungsdaten enthalten Informationen über Lage und Art gefährdeter Nutzungsobjekte. Im vorgestellten Modell werden die Daten der automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) entnommen.

- **Schadensfunktionen**

Schadensfunktionen oder genauer Wasserstand-Schaden-Funktionen beschreiben die Anfälligkeit der betrachteten Objekte gegenüber den durch das Hochwasser bedingten Schadwirkungen.

Im Folgenden werden die grundlegenden Anforderungen an die oben beschriebenen Eingangsdaten näher erläutert und die Implementierung in das Schadensabschätzungsmodell dargestellt.

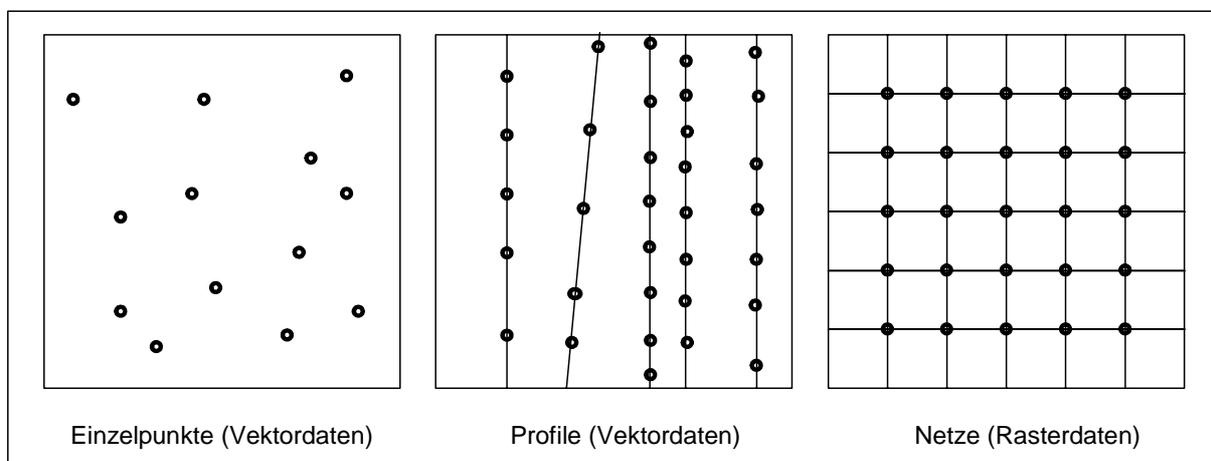
## 7.2 Digitales Geländemodell

### 7.2.1 Allgemeine Datengrundlagen

Über ein Digitales Geländemodell (DGM) können die topografischen Höheninformationen (der Erdoberfläche) eines Untersuchungsgebietes digital dargestellt werden. Datenbasis sind räumliche Koordinatentripel (Stützpunkte), aus denen flächendeckende Informationen z. B. in Form von Dreiecksnetzen oder Gitternetzen abgeleitet werden können. Die Lage der Stützpunkte ist in den meisten Fällen über festgelegten Rechts- und Hochwerte des Gauß-Krüger-Koordinatensystems definiert. Die Bezugsfläche für die Höhenangaben ist ein festgelegtes Referenzniveau, z. B. die geodätische Höhe über dem Meeresspiegel [m+NN]. Neben den Informationen über die Geländehöhe können in digitalen Geländemodellen weitere ergänzende Attribute, z. B. zur geomorphologischen Charakterisierung des Geländes, enthalten sein.

Die Geländeinformationen können dabei entweder als Vektordaten oder Rasterdaten aufgenommen werden (vgl. Abbildung 7-1). Bei Vektordaten sind die einzelnen Punkte sowohl in ihrer Lage als auch in der Höhenlage bekannt. Für wasserwirtschaftliche Untersuchungen werden Vektordaten in den meisten Fällen als Einzelpunkte (z. B. Kanaldeckelhöhen oder singuläre Höhenpunkte) oder als Profile (Querprofile der Gewässer, Verlauf der Dammkrone, Strassen oder Bahntrassen) aufgenommen. Die Aufnahme der Daten erfolgt über tachymetrische Vermessungen, bei größeren Gewässern auch über Schiffspeilungen (Echolot).

Im Gegensatz zu Vektordaten, die ungleichmäßig über das Gelände verteilt sein können, sind Rasterdaten in einer Zeilen/Spaltenstruktur organisiert. Über das Koordinatentripel des Ursprungs und die Zellgröße ist jeder einzelne Punkt lagemäßig exakt bestimmt. Die homogene Datenstruktur von Rasterdaten erlaubt eine effektive Bearbeitung auch großer Untersuchungsgebiete. Aufnahmeverfahren sind Aerophotogrammetrie, Laser-Scanner-Verfahren oder Radar-Aufnahmen.



**Abbildung 7-1:** Unterschiedliche Datentypen zur Geländemodellierung

Die digitale Abbildung der aufgenommenen topografischen Informationen erfolgt über Verfahren der regulären (bei Elementen gleicher Form und Größe) oder irregulären (bei unterschiedlich großen Elementen mit inhomogenen Formen) Tesselation<sup>1</sup>.

Während aus regulären Elementen, wie sie z. B. in Rasterdatensätzen vorliegen, das DGM direkt abgeleitet werden kann, müssen unregelmäßige Elemente, wie sie sich aus der Vermessung von Strukturelementen (Vektordaten) ergeben, in einem weiteren Bearbeitungsschritt in flächendeckende Geländeinformationen überführt werden. Ein Beispiel für irreguläre Tesselation ist ein TIN (Triangulated Irregular Network). Im TIN werden die vermessenen Stützpunkte so miteinander verbunden, dass sie Dreiecke bilden. Die Vermaschung erfolgt üblicherweise nach dem Triangulationsverfahren nach Delaunay<sup>2</sup>. Über die Koordinatentripel der Stützpunkte wird jeweils zwischen drei Punkten eine Fläche aufgespannt, auf der über lineare Interpolation jeder beliebige Punkt sowohl in der Lage als auch in der Höhe eindeutig definiert werden kann. Im Vergleich zu anderen Interpolationsverfahren mit Glättungsalgorithmen höherer Ordnung bleiben die Ergebnisse beim beschriebenen Triangulationsverfahren für den Modellierer nachvollziehbar. Ein wesentlicher Vorteil der Dreiecksnetze ist, dass hydraulisch relevante Bereiche mit höherer Auflösung modelliert werden können, während die Dreieckselemente in nicht strömungswirksamen Bereichen größer gewählt werden können. Dies führt im Vergleich zu Rasternetzen i.d.R. zu einer geringeren Anzahl von Stützpunkten und somit auch zu einer speicheroptimierten Geländemodellierung. Weiterhin besteht die Möglichkeit, hydraulisch relevante Strukturen über die Definition von Zwangskanten (Böschungskanten, Straßendämme, Dammkronen) exakt nachzubilden. Dies ist von besonderer Bedeutung bei der Implementierung von Querprofildateien in ein DGM. Die aufgenommenen Geometrien der Gewässerberandungen weisen üblicherweise einen Abstand von jeweils 100 bis 200 m zum nächstgelegenen Profil auf. Für Strömungsbereiche mit stark veränderlichen Geometrien oder bei stark gekrümmten Flussabschnitten führt eine Vermaschung, die ausschließlich auf der Verwendung von Originaldaten beruht, oftmals zu unplausiblen Ergebnissen. In diesem Fall müssen die Profilstände in lateraler Richtung durch Interpolation zusätzlicher Profile verringert werden. Verfahren zur Interpolation von Querprofilen unter Berücksichtigung hydraulisch relevanter Geländestrukturen sind in RITZERT (1999) beschrieben. Die zusammenhängenden und stetigen Flächen eines TIN können in Rasterelemente mit beliebiger Zellgröße überführt werden und so über GIS-Funktionalitäten mit anderen Rasternetzen verknüpft werden.

Neben der direkten Datengenerierung aus Vermessungsarbeiten besteht als weitere Möglichkeit der Erfassung der Geländetopografie die Digitalisierung aus bestehendem Kartenmaterial (z. B. Isolinien der Höhen aus topografischen Karten).

---

<sup>1</sup> Als Tesselation wird die Untergliederung einer zwei- oder dreidimensionalen Oberfläche bzw. eines Volumens in zusammenhängende und diskrete Elemente verstanden, die das Modellgebiet vollständig abdecken.

<sup>2</sup> Bei der Delaunay-Triangulation werden Dreiecke u.a. unter der Bedingung gebildet, dass in einem Umkreis um drei Punkte kein Punkt innerhalb des Kreises liegt.

Hierbei müssen durch die im Verfahren implementierte Fehlerfortpflanzung jedoch größere Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden.

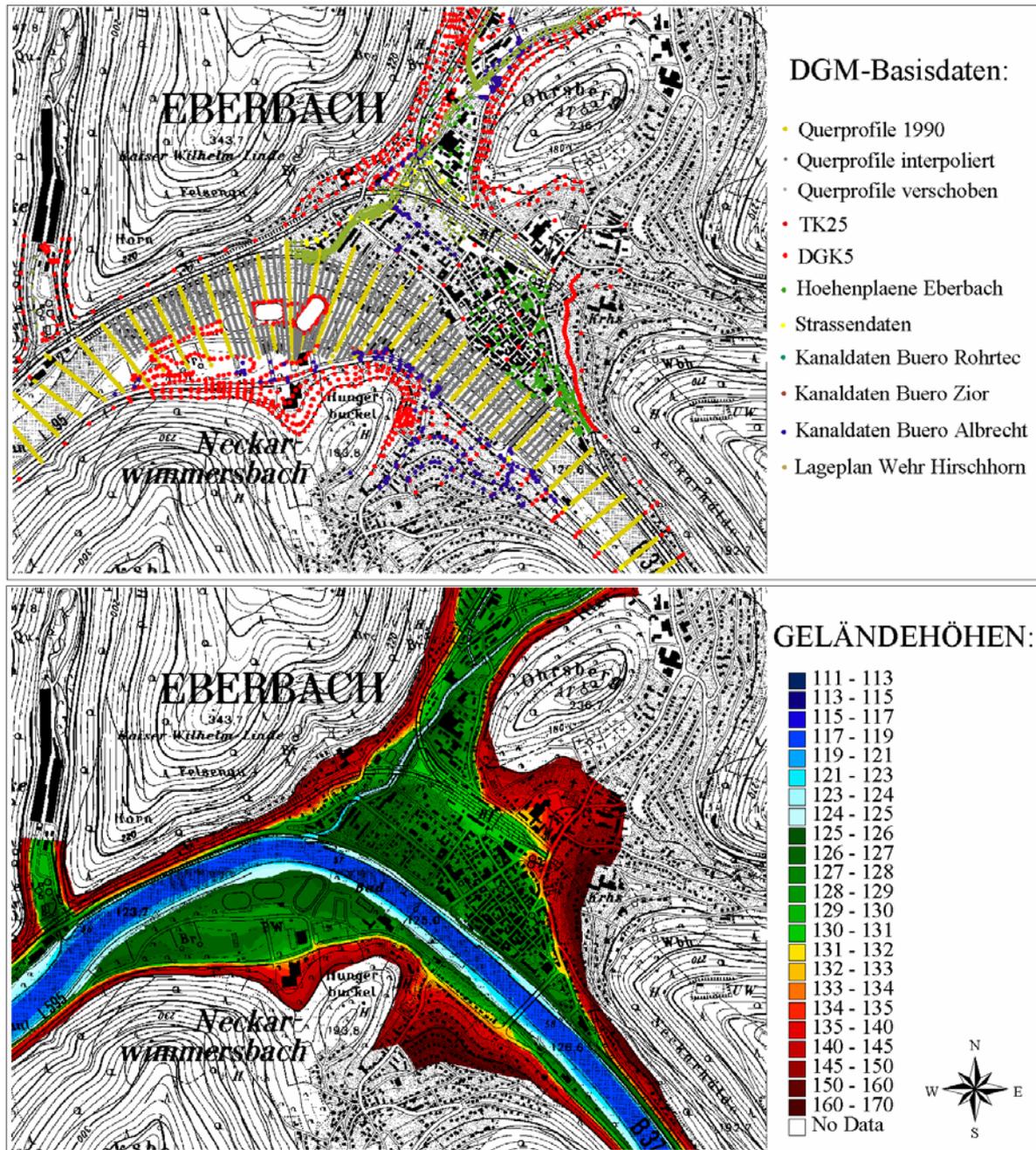
### 7.2.2 DGM des Neckarmodell

Zur Erstellung eines Rasters der Geländeoberfläche (Digitales Geländemodell) werden Höheninformationen aus unterschiedlichen Datenquellen im GIS zusammengeführt und aufbereitet. Ausgangsdaten für das DGM des Neckars waren Querprofilaufnahmen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes im Abstand von 100 m, welche auch die topographische Basis des HN-Modells darstellen (OBERLE, P. (2004, IWK (2000)). Sie weisen eine hohe Genauigkeit und Aktualität auf und decken große Bereiche des hochwasserrelevanten Bereichs der Neckartalaue ab. Georeferenziert werden sie über die Gauß-Krüger-Koordinaten der Hektometerpunkte und können über mehrere Konvertierungsschritte als Punktdaten mit Höhenattribut im GIS abgelegt werden. Um ein plausibles Rasterbild zu erzeugen, wurden zwischen die originalen Querprofile zusätzliche Profile interpoliert. Als weitere Höheninformation wurden Höhenlinien der topographischen Grundkarten (DGK 5 bzw. HFK 25) und ferner der topographischen Karte TK 25 des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg digitalisiert und als Höhenpunkte in das DGM integriert, so dass der gesamte potentiell hochwassergefährdete Auebereich erfasst ist. Um die Höhengenaugigkeit bzw. Informationsdichte des DGM weiter zu steigern, wurden zusätzlich alle zur Verfügung stehenden Datenquellen der Landes- und Kommunalbehörden, wie z. B. Straßenaufrisssdaten, photogrammetrische Bildflugauswertungen, Kanalisationskataster, terrestrisch aufgenommene Höhenpläne, CAD-Pläne von Hochwasserschutzmaßnahmen etc., hinsichtlich Aktualität und Genauigkeit bzw. Plausibilität bewertet und selektiv dem DGM-Basisdatensatz hinzugefügt. Bereits digital vorliegende Daten können über die Schnittstellenpalette von ARC/INFO in das entsprechende Format konvertiert werden. Analoge Pläne werden eingescannt, georeferenziert und Höhenangaben als Vektordaten digitalisiert. Durch die Datenzusammenführung entstand ein „Patchwork“ unterschiedlicher Genauigkeit, Aktualität und Dichte der Basisdaten des DGM. Die jeweilige Herkunft dieser Basisdaten wird in einer Attributstabelle dokumentiert und im GIS vorgehalten.

Um aus den punktuellen Höheninformationen ein flächendeckendes Raster zu erstellen, wurde zunächst mit Hilfe des Triangulationsalgorithmus nach Delaunay eine Dreiecksvermaschung ('Triangulated Irregular Network') erzeugt. Die hierdurch ermittelte Oberfläche kann nun in ein Raster mit beliebiger Zellengröße überführt werden, wobei jeder Rasterzelle ein Höhenwert zugeordnet wird. Die Wahl der Rasterzellengröße hängt von der Dichte der Basisdaten und des vertretbaren Speicherbedarfs ab.

Die Zusammenführung von Höheninformationen aus bestehenden Datenquellen ermöglichte eine kostengünstige DGM-Erstellung. Da nicht in allen Bereichen der

Talae gleich hohe Anforderungen an die Genauigkeit errechneter Überflutungsgrenzen gestellt werden, kann das Kosten-Nutzen-Verhältnis der weiteren Aufnahme und Aufbereitung topographischer Daten entsprechend optimiert werden. Durch Attribuierung der Vektordaten (Höhenpunkte) bezüglich Datenquelle, Eingabedatum und Bearbeiter ist langfristig eine übersichtliche Datenhaltung und sukzessive Erweiterung bzw. Aktualisierung des Datenbestandes möglich. Zudem kann hierdurch eine rasche Analyse des Geländeerasters im GIS erfolgen (Abbildung 7-2). Weitere Informationen siehe OBERLE, P. (2004) und IWK (2000).



**Abbildung 7-2:** Attribuierung von digitalen Höheninformationen (oben) und über Triangulation / Rasterung erzeugtes DGM (unten) am Beispiel der Ortslage Eberbach (aus IWK (2000))

## 7.3 Hydrodynamisch-numerisches Modell

### 7.3.1 Allgemeine Anforderungen an HN-Modelle

Wie bereits in Kap. 3 erläutert, ist die Modellwahl zur hydrodynamisch-numerischen Modellierung abhängig von den zu untersuchenden Zielgrößen, der Strömungscharakteristik des Untersuchungsgebietes, dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial sowie der Größe des Untersuchungsgebietes (bzw. der zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten).

Bei der Wahl des geeigneten hydrodynamisch-numerischen Lösungsverfahrens lassen sich nach DVWK (1999b) folgende Anwendungsbereiche unterscheiden:

1. Simulation des Verhaltens z. B. eines Gewässers unter Verwendung gemessener Ein- und Ausgangsgrößen sowie bekannter Systemparameter. In diesem Fall liefert das Modell detailliertere Information in Raum und Zeit, als dies mit meist punktuellen Messungen erreicht werden kann. Auch kann das Modell zur Planung von Messaktionen dienen.
2. Prognoserechnung bei unveränderten Systemparametern, aber veränderten Ein- und Ausgangsgrößen. Dieser Fall liegt z. B. vor, wenn mit einem Flussmodell nach erfolgter Kalibrierung mit einer vermessenen Hochwasserwelle eine Andere gerechnet wird, ohne dass dabei Geometrie und Rauheit des Flusses verändert werden.
3. Prognoserechnung mit veränderten Systemparametern, mit oder ohne Veränderung der Ein- und Ausgangsgrößen. Dieser Fall liegt z. B. vor, wenn signifikante Änderungen in einem Fluss vorgenommen werden (flussbauliche Maßnahmen, Fahrwasservertiefungen, Errichtung von Staustufen), also Änderungen von Geometrie und Rauheit.

Die zu berücksichtigenden räumlichen und zeitlichen Skalen der hydraulischen und morphologischen Kenngrößen können ebenfalls Hinweise auf geeignete Modellverfahren geben. Tabelle 7-1 zeigt für Simulationsmodelle von Fließgewässern den Zusammenhang zwischen räumlichen, hydraulischen und morphologischen Zeitmaßstäben. Neben den auf hydraulischen und numerischen Grundlagen basierenden Auswahlkriterien spielen in praktischen Anwendungen oftmals Qualität und Menge der vorhandenen Datengrundlagen die entscheidende Rolle in der Frage der Modellgüte. Grundsätzlich können die Ergebnisse eines numerischen Modells keine höhere Genauigkeit aufweisen als die Eingangsdaten. Dies bezieht sich sowohl auf die erforderlichen Geometriedaten als auch auf die Wasserspiegel- und Abflussmessungen, die zur Modellkalibrierung und Validierung der Berechnungsergebnisse benötigt werden. Diese sind insbesondere bei der Betrachtung von Hochwasserabflüssen zum Teil mit größeren Unsicherheiten

behaftet, da die Datenaufnahme (Geschwindigkeitsmessungen zur Abflussbestimmung und Wasserstandmessungen) während eines Hochwassers unter erschwerten Randbedingungen durchgeführt werden muss.

**Tabelle 7-1:** Raum- und Zeitskalen für den Einsatz von Simulationsmodellen (NACHTNEBEL 1991)

Räumlicher Maßstab	Hydraulischer Zeitmaßstab	Morphologischer Zeitmaßstab	Modelltyp
Flusssystem 100 - 1000 km	Mehrere Tage bis Monate	Jahrhunderte bis Jahrmillionen	Flussgebietsmodelle
Flussabschnitt 10 - 100 km	Ein bis mehrere Tage	10 bis 100 Jahre	1D-HN-Modelle
Lokaler Bereich 1 – 10 km	Stunden	0,1 bis 10 Jahre	2D-HN-Modelle, zunehmend auch 3D-HN-Modelle
Nahfeld < 1000 m	< Stunde	< Tage	Integralmodelle, Hochauflösende HN-Modelle

### 7.3.2 HN-Modell Neckar

Zur Simulation der Strömungsverhältnisse des Neckar im Hochwasserfall wird ein eindimensionales, instationäres Strömungsmodell verwendet, das im Rahmen einer vorhergehenden Dissertation erstellt wurde (OBERLE, P. (2004)). Die eindimensionale Betrachtungsweise ist bei den am Neckar vorhandenen überwiegend eindimensionalen Strömungsverhältnissen sowie den geforderten Zielgrößen (Wasserstand, Abfluss) zulässig und ermöglicht auch bei der Untersuchung großer Flussabschnitte eine hohe Effektivität bezüglich Datenhandhabung, Modellerstellung, Modellkalibrierung, Plausibilisierung der Berechnungsergebnisse sowie Sensitivitätsanalysen bzw. Variantenstudien. Modellierbar sind neben verzweigten bzw. vermaschten Flusssystemen (Altarme, Ausleitungen etc.) u.a. auch Bauwerke (z. B. Wehre, Schütze, Wasserkraftanlagen).

Das Berechnungsverfahren basiert auf der Lösung der Saint-Venant-Gleichungen durch ein implizites Differenzenverfahren (Preissmann - Schema). Es gehört somit zu den sogenannten "hydrodynamisch-numerischen", d.h. auf physikalischen Grundlagen aufgebauten Verfahren. Die Saint-Venant-Gleichungen werden durch Integration der dreidimensionalen Kontinuitäts- und Navier-Stokes'schen Bewegungsgleichungen hergeleitet und beruhen auf den Erhaltungssätzen für den Massen- und Impulsstrom. Die Lösung der Differentialgleichungen durch ein implizites Differenzenverfahren gewährleistet eine hohe numerische Stabilität und Genauigkeit.

Eingangsgrößen für das mathematische Modell sind zum einen die Systemgeometrie der zu untersuchenden Flussstrecke und zum anderen die Abflusskurven bzw. Wasserstände über die Dauer der zu simulierenden Zeit an den Modellgrenzen (Randbedingungen). Des Weiteren kann als Anfangszustand ein Wasserspiegellängsprofil (und somit das Wasservolumen zum Zeitpunkt  $t = 0$ ) vorgegeben werden. Die Randbedingungen und der Anfangszustand zum Zeitpunkt  $t = 0$  sind zur Lösung des Saint-Venant-Gleichungssystems erforderlich. Als Ergebnis erhält man die Durchflüsse und Wasserstände an den Berechnungspunkten als Funktion der Zeit ( $Q(t)$ ,  $y(t)$ ).

Zur Modellierung der Neckarkaskade wurde im bereits erwähnten Simulationsmodell Neckar zunächst für jede Stauhaltung ein Modell erstellt, welches unabhängig von den Modellen der angrenzenden Stauhaltungen lauffähig ist. Als Randbedingungen wurde an den unteren Modellgrenzen (Wehranlagen) ein Wasserstand ( $y(t)$ ) zur Berücksichtigung des Rückstaeinflusses und an den oberen Modellgrenzen (Wehranlagen der oberhalb liegenden Stauhaltungen, Kraftwerke, Seitengewässer) die entsprechenden Zu- bzw. Ausflüsse ( $Q(t)$ ) vorgegeben.

Zur Erstellung der Systemgeometrie der HN-Modelle wurden die abflusswirksamen Bereiche des Flussschlauchs und der Vorländer in Form von Querprofilen modelliert. Hierzu lagen Querprofilaufnahmen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) im Abstand von 100 m vor. Die Aufnahme der Querprofile erfolgte im Flussschlauch durch Echolotmessung und in den Vorländern. Für Kontrollquerschnitte (Brückenbauwerke etc.) wurden zusätzliche Profile integriert. Die im Hochwasserfall retentionswirksamen Bereiche der Neckartalaue wurden über eine Funktion des Speichervolumens in Abhängigkeit des Wasserstandes berücksichtigt. Die Volumenfunktionen  $V(y)$  der Retentionsräume wurden aus dem Digitalen Geländemodell mit Hilfe mehrerer GIS-Funktionalitäten bestimmt, d.h. ihnen lagen die topographischen Daten des DGM zugrunde.

Des Weiteren wurden zur Modellerstellung Stromkarten des Neckars im Maßstab 1:2500 sowie topographisches Kartenmaterial herangezogen.

Als Ergebnis der hydrodynamisch-numerischen Berechnung wird für jeden Berechnungspunkt (Querprofil) der berechnete Wasserstand sowie die dazugehörige mittlere Fließgeschwindigkeit ausgegeben. Aufgrund der Strömungscharakteristik der untersuchten Neckarabschnitte kann von einem quasi-stationären Abflussverhalten in diesen Bereichen ausgegangen werden. Grundsätzlich bietet das Modell die Möglichkeit, instationäre Abflussberechnungen durchzuführen. Für die Frage der Hochwasserschäden sind jedoch stationäre Berechnungen für die Scheitelabflussmenge ausreichend, da der maximale Schaden beim Durchgang des Hochwasserscheitels (maximaler Wasserstand) auftritt und näherungsweise als unabhängig von der Einstaudauer angenommen wird.

Zur Ermittlung der Überflutungsflächen und die spätere Berechnung der Wasserstände im Untersuchungsgebiet wird aus den zunächst stützpunktbezogenen



## 7.4 Nutzungsdaten

### 7.4.1 Arten von Nutzungsinformationen

Zur späteren Berechnung der Hochwasserschäden bzw. –schadensspotenziale müssen zunächst die Nutzungen im Untersuchungsgebiet ermittelt werden, die in einem weiteren Schritt in die Schadensabschätzungsmodelle implementiert werden müssen. Abhängig von den Zielgrößen der Untersuchung, Größe und Heterogenität des Untersuchungsgebietes und dem Detaillierungsgrad der verwendeten Modelle stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden sollen.

Weitere Möglichkeit der Datenerhebung ist die Gebietsbegehung, bei der auf Basis von Flurstückskarten die Nutzungen einzelner Objekte identifiziert werden. Auch wenn grundsätzlich eine Begehung des Untersuchungsgebietes aus vielerlei Gründen durchgeführt werden sollte, so ist eine generelle „manuelle“ Aufnahme der Nutzungsdaten aller möglicherweise betroffenen Objekte nur im Ausnahmefall erforderlich und wirtschaftlich sinnvoll.

### 7.4.2 Liegenschaftsinformationen (Einzelobjekte) Beispiel: ALK

Die Informationen über einzelne Flurstücke und Nutzungsobjekte werden in den Grundbüchern der zuständigen Katasterämter geführt. Mit der Entwicklung der digitalen Informationssysteme entstand auch das Bedürfnis, die Flurkarten des Liegenschaftskatasters in ein datenverarbeitungsfähiges Format zu überführen. Dazu war eine einheitliche und eindeutige Strukturierung der in den Flurkarten vorhandenen Informationen erforderlich. Die Umsetzung erfolgt seit den 80er Jahren über die zwei folgenden Komponenten der Liegenschaftsinformationen:

- Das Automatisierte Liegenschaftsbuch (**ALB**) als beschreibender Nachweis über Eigentums- und Rechtsverhältnisse sowie
- Die Automatisierte Liegenschaftskarte (**ALK**) als geografischer Nachweis.

Nach derzeitigem Stand ist praktisch die gesamte Fläche der Bundesrepublik im ALB erfasst, die ALK hat einen bundesweiten Deckungsgrad von ca. 86% (Stand März 2005; Quelle: [www.adv-online.de](http://www.adv-online.de)).

Für hochaufgelöste (mikroskalige) Schadensabschätzungen ist vor allem die ALK von Bedeutung, da darin alle wesentlichen Nutzungsinformationen sowie weitere Fachinformationen enthalten sind, Informationen aus dem Liegenschaftsbuch sind nur in Einzelfällen erforderlich und unterliegen zudem strengen Anforderungen bzgl. des zu gewährleistenden Datenschutzes.

Die ALK-Datensätze enthalten grundsätzlich die gleichen Informationen wie die amtlichen Flurkarten. Sie sind inhaltlich logisch in **Folien** und **Objekte** gegliedert. In den einzelnen Folien sind gleichartige fachliche Inhalte gemäß Tabelle 7-2

zusammengefasst. Die Folien lassen sich einzeln oder in beliebiger Kombination miteinander darstellen.

**Tabelle 7-2:** Folien der ALK

Folienschlüssel	Langschriftliche Bezeichnung	Folienschlüssel	Langschriftliche Bezeichnung
Folie 001	Flurstücke	Folie 050 - 59	Numerierte Punkte
Folie 002	Gemarkung, Flur	Folie 061	Grenzen kommunaler Zuständigkeit
Folie 003	Politische Grenzen	Folie 062	Grenzen gesetzlicher Belastung
Folie 011	Gebäude	Folie 063	Andere öffentlich-rechtliche Grenzen
Folie 021	Tatsächliche Nutzung	Folie 081	Topographie der Liegenschaftskarte
Folie 023	Grenzeinrichtungen	Folie 082	Weitere Topographie
Folie 028	Geländeform	Folie 084	Nicht katastermäßig eingemessene Gebäude
Folie 042	Bodenschätzung	Folie 085	Länderspezifische Punkte



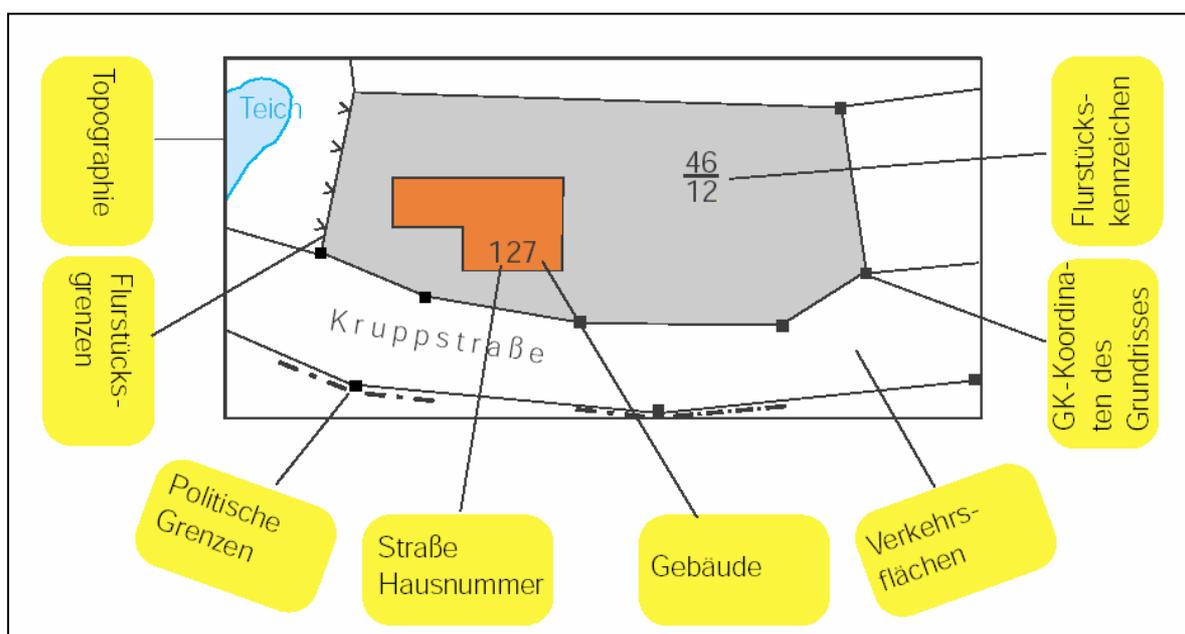
**Abbildung 7-4:** Beispiel für Folien der ALK (Quelle: Faltblatt ALK: Automatisierte Liegenschaftskarte, Hrsg: Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein)

Allen Karteninhalten wird nach Festlegungen des Objektschlüsselkataloges (OSKA) ein eindeutiger Schlüssel zugeordnet, wie in Tabelle 7-3 am Beispiel für Gebäude und Freifläche im Bereich Wohnen (Folie 11) dargestellt. Nutzungsobjekte in der ALK werden nach den Vorgaben des Objektartenkatalog (OBAK) in einen logischen Zusammenhang gebracht.

**Tabelle 7-3:** Beispiel für OSKA

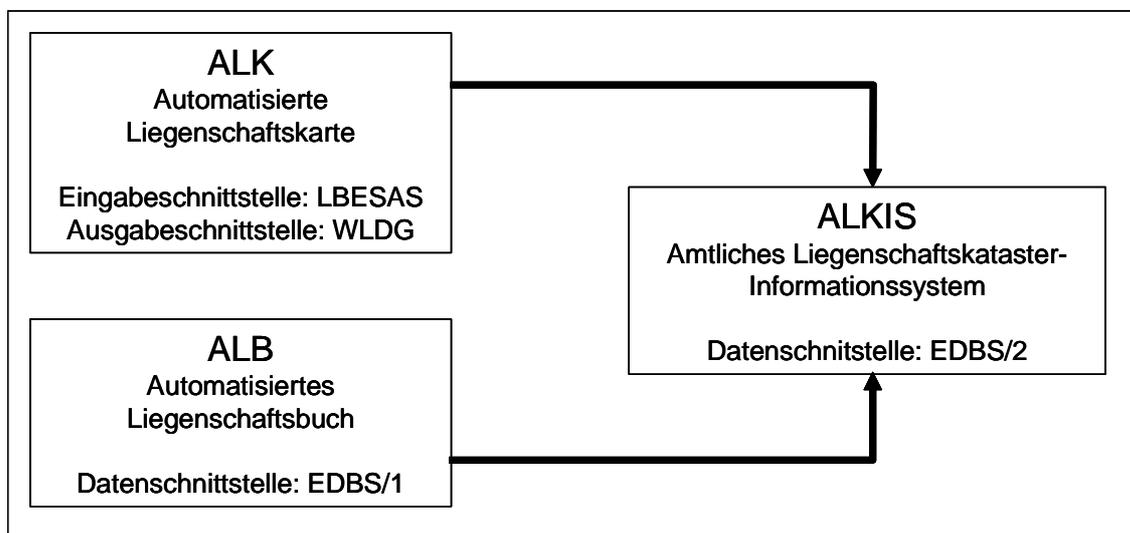
Objektschlüsselkatalog: Gebäude- und Freiflächen Wohnen			
011 – 1211	Wohnhaus in Reihe	011 - 1311	Einzelhaus
011 – 1221	Freistehender Wohnblock	011 – 1321	Doppelhaus
011 – 1231	Wohnblock in geschlossener Bauweise	011 – 1331	Reihenhaus
011 – 1301	Wohnhaus (exaktere Nutzung nicht bekannt)	011 – 1341	Gruppenhaus
		011 – 1361	Hochhaus

In den Objekten werden zusammengehörende Punkte, Linien, Flächen und Texte zu logischen Einheiten gemeinsam erfasst, z. B. werden Gebäudekoordinaten, Gebäudeumrisslinien und Hausnummer zu einem Objekt Gebäude zusammengefasst (siehe Abbildung 7-5). Das Objekt ist sowohl über die einzelnen Merkmale und Bestandteile oder als gesamte Einheit ansprechbar. Bezugssystem der Lagekoordinaten ist das Gauß-Krüger-Koordinatensystem.



**Abbildung 7-5:** Informationen ALK (Quelle: Informationsbroschüre ALK: Automatisierte Liegenschaftskarte, Hrsg: Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein)

Aufgrund des Sachverhaltes, dass die Datenstruktur der ALK und ALB eine Übertragung der Fachinformationen untereinander nicht zulassen und um einen Datenaustausch auch mit anderen Nutzungsinformationen (ATKIS) zu gewährleisten, wurde von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) die Entwicklung des Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystems ALKIS beschlossen, in dem die bisherigen Datenbestände in ein einheitliches Datenmodell überführt werden sollen (siehe Abbildung 7-7). Die Datenhaltungskomponenten wurden im November 2004 an die beteiligten Bundesländer übergeben und werden dort derzeit unter praxisnahen Bedingungen getestet. Ab Mitte Mai 2005 sollte ALKIS in den Pilotbetrieb eingesetzt werden (Quelle: [www.alkis.info](http://www.alkis.info)).



**Abbildung 7-6:** Migrationskonzept ALK / ALB – ALKIS

Für hochaufgelöste, kleinräumige Betrachtungen sind flurstücks-, bzw. objektorientierte Nutzungsinformationen von wesentlicher Bedeutung. Aus diesem Grund werden hierfür bevorzugt die Daten der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) verwendet, da sie zudem eine offizielle Quelle darstellen, die im Aufgabenbereich der Landesvermessungsverwaltungen aktuell vorgehalten werden. Im Bundesdurchschnitt sind ca. 86 % der Gesamtfläche in der ALK-Daten erfasst, in Baden-Württemberg beträgt der Anteil 93 % der Landesfläche (Quelle: [www.adv-online.de](http://www.adv-online.de) / Stand April 2005).

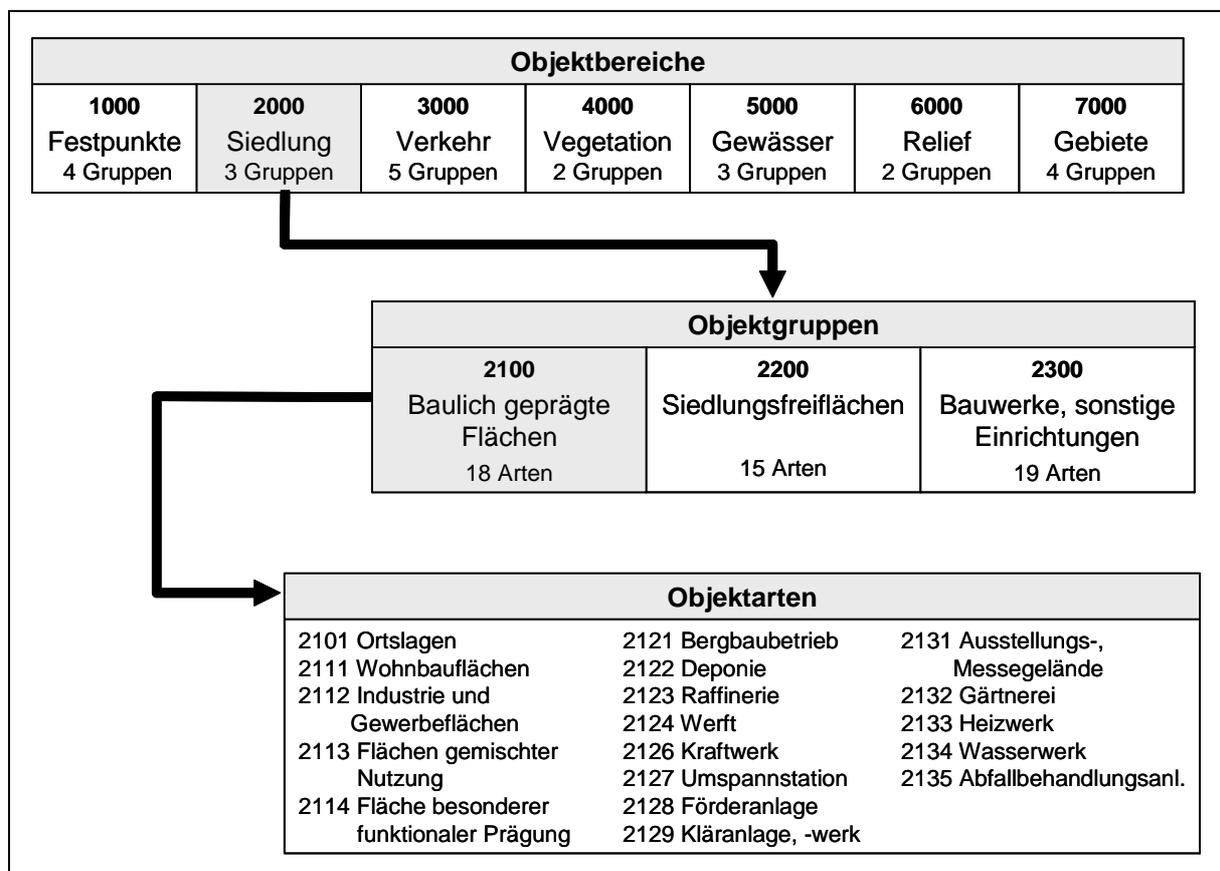
Für das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Schadensabschätzungsmodell werden folgende Folien der ALK als Datenbasis für die Nutzungsinformationen verwendet:

- Folie 001: Flurstücke
- Folie 011: Gebäude

### 7.4.3 Aggregierte Liegenschaftsinformationen (Nutzungseinheiten), Beispiel: ATKIS

Ist eine Schadensabschätzung für einzelne Nutzungsobjekte nicht gefordert oder z. B. aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes, der zur Verfügung stehenden Modelle oder der Datenlage nicht möglich, so besteht die Möglichkeit, auf räumlich aggregierte Nutzungsinformationen (Bereiche gleicher Nutzung) zurückzugreifen, wie sie z. B. im **ATKIS** (Amtliches Topografisch-Kartografisches Informationssystem) enthalten sind. Darin werden neben geotopografischen Basisdaten (Digitale Landschaftsmodelle, digitale topografische Karten, digitale Gelände/Höhenmodelle, digitale Orthofotos) weitere digital verarbeitbare geothematische Fachdaten, u.a. Informationen zur Flächennutzung bereitgestellt.

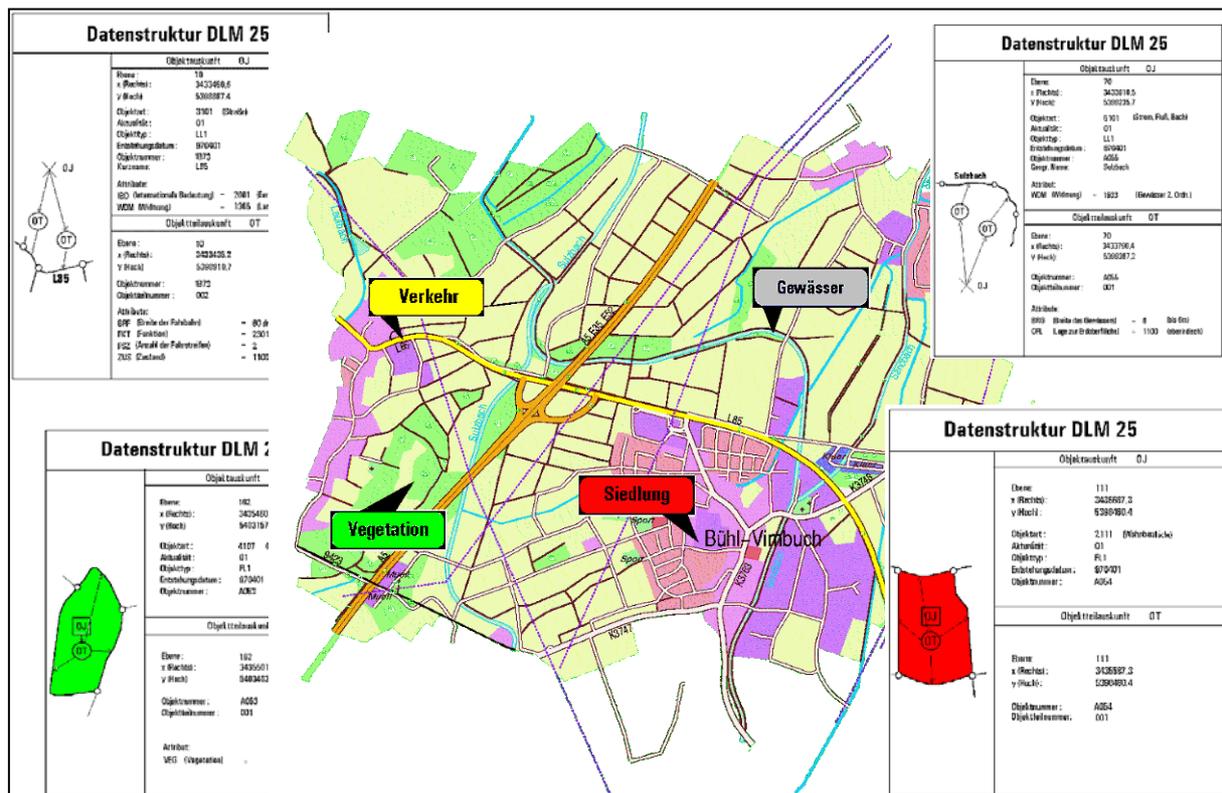
Die Topologie eines Gebietes wird bestimmt durch das Netz von Straßen, Wegen, Schienenbahnen und Gewässern. Dadurch wird die Erdoberfläche in Maschen eingeteilt, denen verschiedene Arten von Nutzungen zugeordnet werden können. Die unterschiedlichen (Flächen-) Nutzungsinformationen sind in ATKIS attributorientiert in einem Objektartenkatalog (OBAK) erfasst, in dem die Landschaft hierarchisch in Objektbereiche, Objektgruppen und Objektarten (siehe Abbildung 7-7) aufgegliedert und redundanzfrei dargestellt werden kann.



**Abbildung 7-7:** Objektartenkatalog ATKIS. Beispiel für Datenstruktur des Objektbereichs „Siedlung“.

Aufgrund der flächenaggregierten Erfassung der Landnutzungen ist keine objektscharfe Beurteilung der Gefährdungssituation mehr möglich. Dies ist vor dem Hintergrund der Modellgenauigkeit und insbesondere bei der späteren Wahl der Schadensfunktionen zu berücksichtigen. Für kleinräumige Untersuchungen hat sich bewährt, zusätzliche Erhebungen auf Basis der Liegenschaftsinformationen durchzuführen (BWK 2001).

In Baden-Württemberg liefern die ATKIS-Daten die Inhalte für das digitale Landschaftsmodell im Maßstab 1:25.000 (DLM25), das vom Landesvermessungsamt aufgebaut wurde und fortgeführt wird. Als Grundlage zur Erfassung der Vektordaten werden Orthofotos im Maßstab 1:10000, die Topographische Karte 1:25000 und die Deutsche Grundkarte 1:5000 verwendet, die geometrische Darstellung erfolgt in Vektordaten im Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem. Abbildung 7-8 zeigt ein Beispiel für Nutzungsinformationen im ATKIS.



**Abbildung 7-8:** Beispiel für ATKIS-Nutzungsinformationen auf Basis des DLM25 (Quelle: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, [www.lv-bw.de](http://www.lv-bw.de))

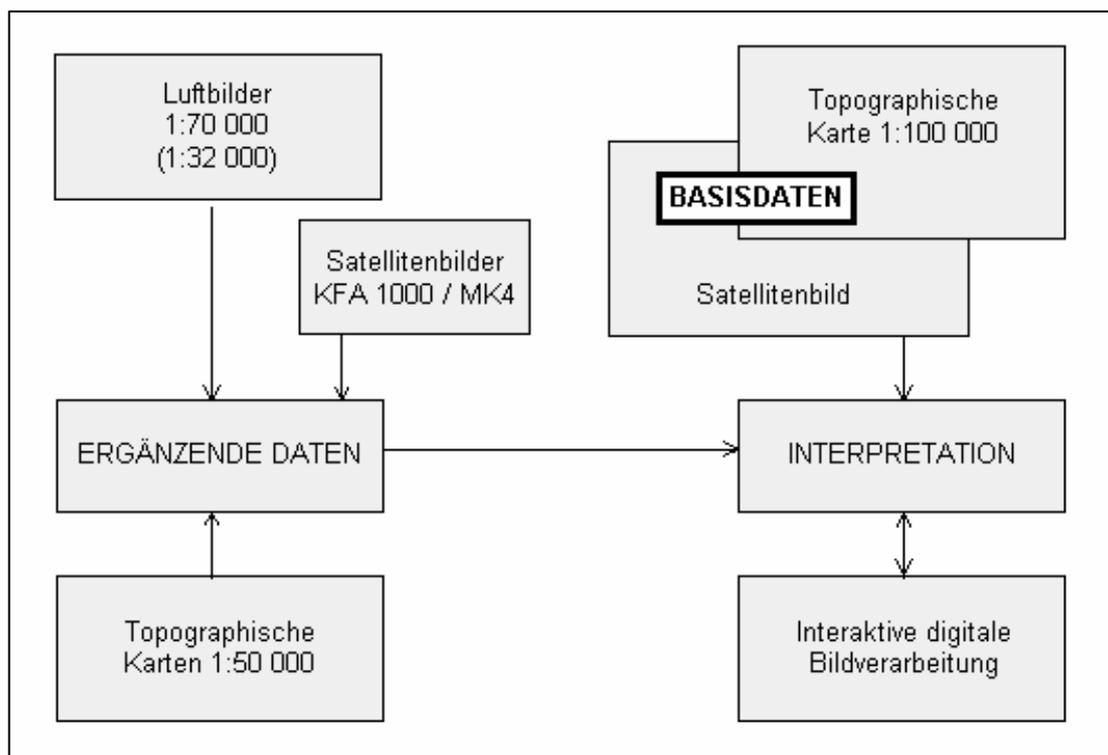
ATKIS ist ein bundesweit einheitliches Projekt der AdV und wird für die Maßstabsbereiche 1:5.000 bis 1:100.000 durch die Vermessungsverwaltungen der Länder, für die Maßstabsbereiche 1:200.000 bis 1:1.000.000 und für länderübergreifende Datenanforderungen durch das Geodatenzentrum beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) vertrieben.

#### 7.4.4 Daten der Fernerkundung

Beispiel: CORINE

Die in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Nutzungsinformationen basieren auf topografisch-kartografischen Geobasisdaten sowie auf Daten der Liegenschaftsämter und werden aus einer klassischen Flächenerhebung ermittelt. Eine weitere Möglichkeit zur Klassifizierung und Identifizierung von Flächennutzungen ist über die modernen Methoden der Fernerkundung gegeben. Hierzu zählen Luftbilder und Satellitenaufnahmen.

Im Rahmen des europaweiten (inzwischen abgeschlossenen) Projekts CORINE-Landcover (CoORdination of Information on the Environment) wurden ab 1993 Daten der Bodenbedeckung auf Basis von Satellitenbildern erhoben. Ziel des Projektes war eine europaweit koordinierte Erfassung von Umweltinformationen um eine vergleichbare Datenbasis in allen Mitgliedstaaten zu schaffen und umweltrelevante Fragestellungen im gesamteuropäischen Zusammenhang betrachten zu können.



**Abbildung 7-9:** Nutzung unterschiedlicher Datenquellen in CORINE

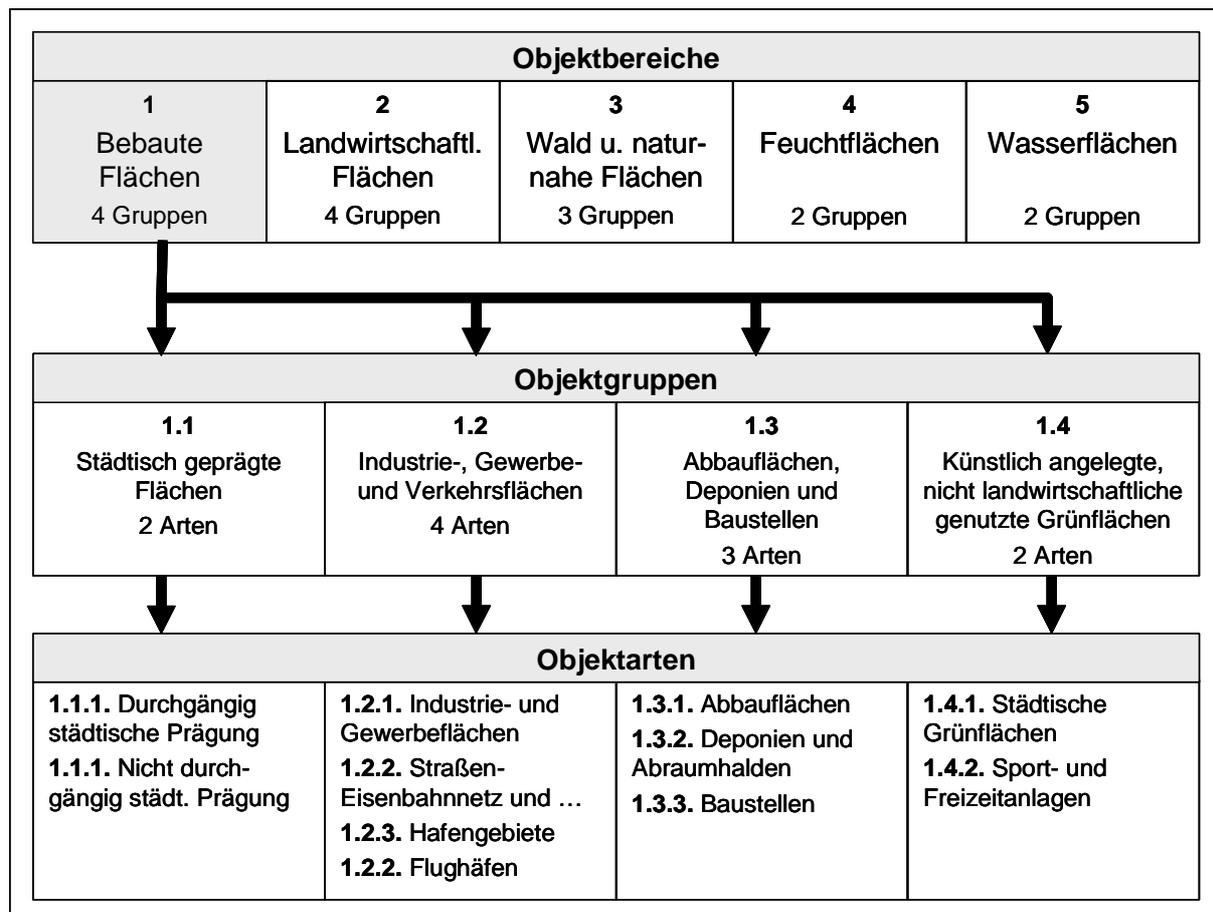
(Quelle: [http://www.destatis.de/stabis/oc\\_1090/f20/d/urbanle1/urban02.htm](http://www.destatis.de/stabis/oc_1090/f20/d/urbanle1/urban02.htm))

Die Erhebung erfolgte in erster Linie auf Basis von Satellitenbildern (Landsat TM) auf dem Maßstabsniveau 1:100.000. Daneben kamen topographische Karten und in der Regel panchromatische Luftbilder im Maßstab 1:70 000 zum Einsatz. Die digital vorliegenden Satellitenbildszenen wurden unter Bezugnahme auf die topographischen Karten im Maßstab 1:100 000 (TK 100) geokodiert, fotografisch

ausgegeben und orientiert an Blattschnitt und Maßstab der TK 100 vergrößert. Die Bodenbedeckungsdaten wurden anschließend durch eine visuelle Satellitenbildinterpretation ermittelt - unterstützt durch die Auswertung der darüber hinaus genannten Datenquellen und den Einsatz von Verfahren zur automatisierten Bildklassifikation (Quelle: Statistisches Bundesamt Deutschland [www.destatis.de](http://www.destatis.de)). Die verwendeten Datengrundlagen sind Abbildung 7-9 zu entnehmen. Die Koordinaten sind im Gauß-Krüger-Koordinatensystem angegeben.

Die identifizierten Landnutzungseinheiten werden in 44 verschiedene Bodenbedeckungsarten (Objektarten) klassifiziert (siehe Abbildung 7-10). Es werden alle homogen bedeckten Bodenflächen ab einer Größe von 25 ha erfasst. Linienhafte Objekte, wie z. B. Gewässer werden ab einer Breite von 100 m erfasst.

Die Auflösung und der Detaillierungsgrad der verwendeten Datengrundlagen (Maßstab der Topografischen Karte 1:100.000, kleinste berücksichtigte Flächen = 25 ha) und die Objektstruktur der Nutzungsdaten lassen eine Verwendung der CORINE-Daten bei Hochwasserbetrachtungen nur für grobe Abschätzungen zu. Auch hier gilt wie bei Verwendung der ATKIS-Daten, dass durch die Aggregation von Einzelobjekten zu Flächennutzungen eine Objektidentifikation nicht mehr möglich ist.



**Abbildung 7-10:** CORINE – Objektarten. Beispiel für Datenstruktur des Objektbereichs „bebaute Flächen“

## 7.5 Schadens- / Schädigungsfunktionen

### 7.5.1 Verwendete Typen von Schadens-, Schädigungsfunktionen

Wie in den vorangehenden Kapiteln dargestellt, stellt die Wahl der Schadensfunktion einen großen Unsicherheitsfaktor bei der Abschätzung der Schadenspotenziale dar. Die Angabe eindeutiger Funktionen für unterschiedliche Nutzungsobjekte ist, wie gezeigt, aus mehreren Gründen nicht möglich, u.a. weil nicht alle schadensrelevanten Faktoren parameterisiert werden können. Praktisch anwendbare Schadensabschätzungsmodelle müssen dennoch gewährleisten, dass:

- für großräumige Untersuchungen gemittelte Schadens-/Schädigungsfunktionen eingesetzt werden können, aber auch
- für kleinräumige Analysen individuelle Funktionsanpassungen für einzelne klassifizierte Gebäude- und Nutzungstypen durchgeführt werden können.

Entsprechend den Angaben aus der Literatur werden folgende Schäden berechnet:

- Schäden an Gebäudestruktur und festem Inventar
- Schäden an mobilem Inventar
- Schäden im Kellergeschoss
- Schäden im Erdgeschoss

Über die Identifikation weiterer, einem Gebäude zuzuordnenden schadensrelevanter Elemente können zusätzliche Schäden berücksichtigt werden. Dies gilt für zusätzliche direkte, aber auch für sekundäre und indirekte Schadenswirkungen. Der Gesamtschaden für ein einzelnes Gebäude ergibt sich aus der Superposition der Einzelschäden.

Zur Berechnungen stehen 3 verschiedene Schadens- bzw. Schädigungsfunktionen zur Verfügung, die sowohl die Verwendung auf Literaturangaben gestützter Funktionen ermöglichen und gleichzeitig die Definition individueller und nutzungsangepasster Funktionen erlauben.

#### **Funktionsstyp 1: Wurzelfunktion**

$$S = B \cdot \sqrt{h} \quad (\text{Gl. 7-1})$$

mit

$S$  Schaden [EUR], [-]

$h$  Wasserstand [m]

$B$  Funktionsparameter [-]

Die Anwendung der Wurzelfunktion hat sich in praktischen Anwendungen bewährt und bietet über den wählbaren Parameter  $B$  die Möglichkeit, die

Schadensentwicklung über die Wassertiefe auf einfache Weise abzuschätzen. Insbesondere für großräumige Untersuchungen, in denen mit nutzungsklassifizierten Elementen gearbeitet wird, ist weniger der exakte Schadensverlauf einzelner Gebäude von Interesse, vielmehr erfolgt hier eine Schadensabschätzung der Gesamtschadenspotenziale. Die Abweichung des angenommenen Schadensverlaufes von den real auftretenden Werten wird hierbei bewusst in Kauf genommen, da der mittlere Fehler mit der Größe des Datenkollektivs kleiner wird. Die Verwendung der Wurzelfunktion ist auch dann angezeigt, wenn keine weitergehenden Untersuchungen zur Werteverteilung im Einzugsgebiet angestellt wurden oder die Datengrundlage nur eine nutzungsklassifizierte Identifikation der Bebauung zulässt.

Beispiel für Schadensverläufe, die einer Wurzelfunktion entsprechen, sind in Abbildung 7-11 am Beispiel privater Wohngebäude dargestellt. Die Kurvenverläufe für einzelne Gebäudeelemente ergeben sich abhängig von der Wassertiefe aus der Wahl Funktionsparameter B.

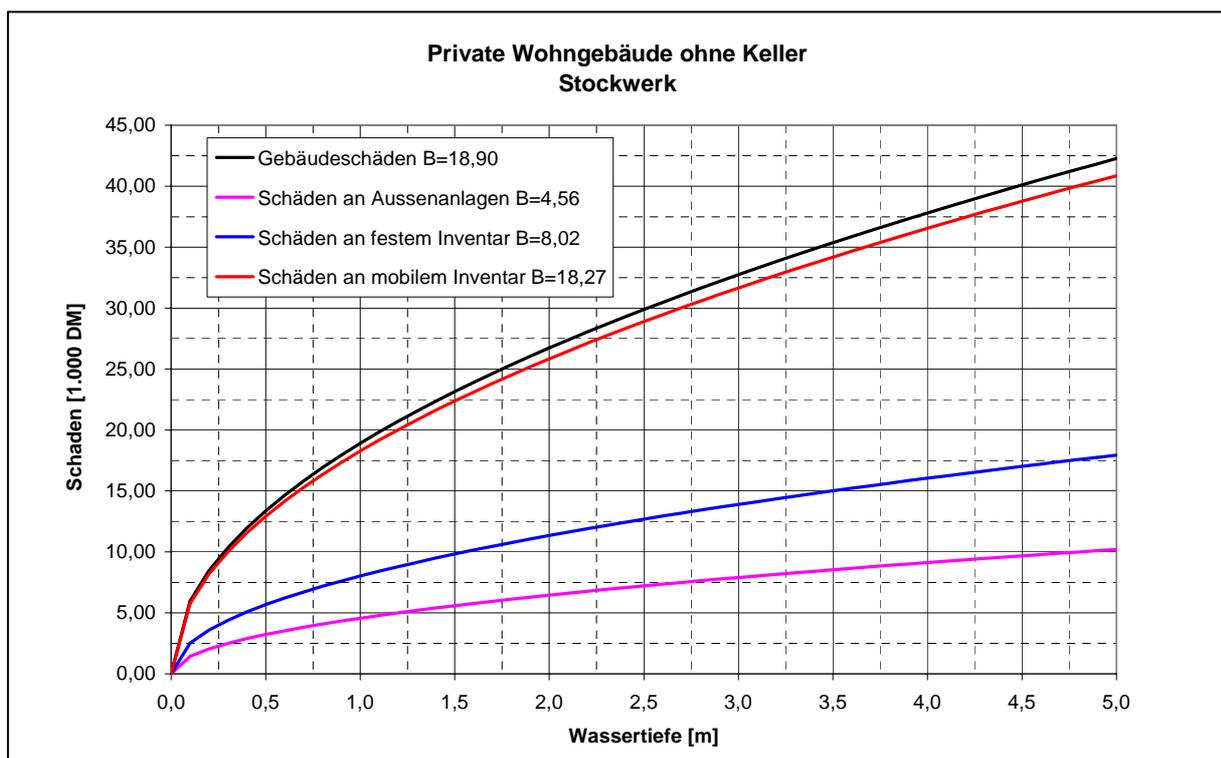


Abbildung 7-11 : Beispiel für Wurzelfunktionen (Werte HOWAS-Datenbank)

### Funktionstyp 2: Stützpunktbezogene Potenzfunktion

$$S = S_{max} \cdot \left[ \frac{S_0}{S_{max}} + \left( 1 - \frac{S_0}{S_{max}} \right) \cdot \left( \frac{h - h_0}{h_{max} - h_0} \right)^{1/B} \right] \quad (\text{Gl. 7-2})$$

mit

$S$  Schaden [EUR], [-]

$h$  Wasserstand [m]

$S_0$  (minimaler) Erstschaden [EUR], [-]

$h_0$  (minimaler) schadenverursachender Wasserstand [m],

$S_{max}$  maximaler Schaden [EUR], [-]

$h_{max}$  Wasserstand bei dem maximaler Schaden eintritt

$B$  Funktionsparameter [-]

Definitionsgemäß treten bei Schadensfunktionen, die durch den Koordinatenursprung gehen, die ersten Schäden mit beginnender Überflutung im jeweiligen Stockwerk auf. Diese Annahme ist bei hochwasserangepassten Nutzungen nicht immer gerechtfertigt. Beispielsweise treten in gefliesten Kellerräumen, abgesehen von Reinigungs- und Aufräumarbeiten, keine nennenswerten Schäden auf, bis Installationen (Steckdosen) oder Mobiliar eingestaut werden. Auf der anderen Seite tritt ein Totalschaden für Inventargegenstände i.d.R. dann ein, wenn diese vollkommen überschwemmt sind. In diesem Fall wird der tatsächliche Schadensverlauf durch eine stetig steigende Funktion nicht korrekt wiedergegeben. Aus diesem Grund wurde als weiterer Funktionstyp eine stützpunktbezogene Potenzfunktion gewählt, bei der sowohl der Anfangspunkt (erster schadenverursachender Wasserstand mit entsprechender Schadenssumme) als auch der Endpunkt (Wasserstand bei dem der maximale Schaden auftritt) über Koordinatenpaare individuell definiert werden können. Die Formanpassung des Schadensverlaufs erfolgt über den frei wählbaren Exponenten. Somit können auch unterschiedliche Funktionsverläufe aus Schadenserhebungen abgebildet werden.

Abbildung 7-12 zeigt weitere Beispiele für verschiedene Nutzungselemente mit unterschiedlichen Stützpunkten und Funktionsparametern. Die gewählten Stützpunkte und Funktionsparameter wurden beispielhaft angenommen, um die Anpassungsmöglichkeiten des Funktionstyps darzustellen. Für den Nutzungstyp 1 (z.B. Gebäudeschäden) wurde hier angenommen, dass bereits bei geringer Einstautiefe erste wesentliche Schäden durch Vernässung des Mauerwerks entstehen (unterer Stützpunkt). Für steigende Wasserstände wurde ein linear ansteigender Schadensverlauf ( $B=1$ ) angenommen. Für die Schäden an Nutzungstyp 2 (z. B. bewegliches Inventar) wurde von einem Kurvenverlauf ausgegangen, der einer Wurzelfunktion entspricht ( $B=2$ ). Die schadenverursachenden Wasserstände zwischen den ersten auftretenden Schäden und Maximalschaden bewegen sich in einem Bereich von + 0,5 bis +1,5 m Wassertiefe. Für größere Wassertiefen steigen die Schäden nicht weiter an, da die Schädigung nicht größer als 100 % (Totalschaden) sein kann. Für den Verlauf der Schäden an Nutzungstyp 3 (z. B. festes Inventar) wurde davon ausgegangen, dass bei Wassertiefen kleiner 30 cm keine nennenswerten Schäden auftreten. Mit steigenden Wasserständen steigen

jedoch auch die Schäden überproportional stark an ( $B=3$ ), der maximale Schaden wird erst bei komplettem Einstau erreicht.

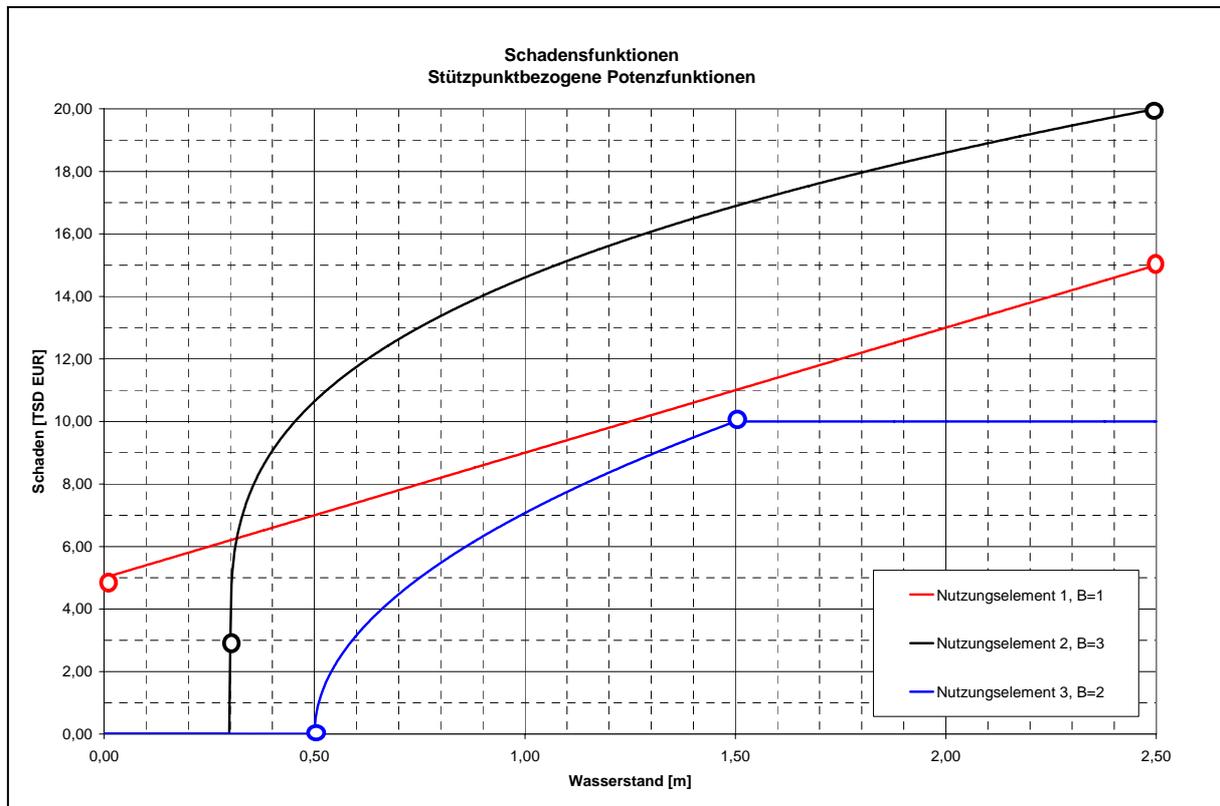


Abbildung 7-12 : Beispiel für stützpunktbezogene Potenzfunktionen

### Funktionstyp 3: Lineare Polygonfunktion

$$S = S_i + \left( \frac{S_{i+1} - S_i}{h_{i+1} - h_i} \right) \cdot (h - h_i), \quad h_i \leq h < h_{i+1} \quad (\text{Gl. 7-3})$$

mit

$S$  Schaden [E UR], [-]

$h$  Wassers tan  $d$  [m]

$S_i, h_i$  Stützpunkte der Schadenfunktion

Werden die Schadensfunktionen aufgrund von Gebäudebegehungen für einzelne Gebäude bzw. Gebäudeelemente festgelegt, kann nicht immer eine stetig differenzierbare funktionale Beziehung zwischen Wasserstand und Schaden ermittelt werden. Hierbei werden vielmehr für verschiedene angenommene Wasserstände entsprechende Schadenssummen abgeschätzt, der Verlauf zwischen den Stützpunkten wird linear interpoliert. Für diesen Anwendungsfall besteht als dritter wählbarer Funktionstyp die Möglichkeit, eine lineare Polygonfunktion zu definieren. In der Literatur sind z. B. in PENNING-ROUSELL, E.C., CHATTERTON, J.B. (1977) oder teilweise in den Untersuchungen der Schadenspotenziale am Rhein in NRW die Schadensfunktionen als polygonale Funktionen angegeben (siehe Abbildung

7-13). Als Datengrundlagen für die Generierung der Schadensfunktionen für Nordrhein-Westfalen waren neben den Schadensdokumentationen aus der HOWAS-Datenbank „Erfahrungswerte aus ähnlichen Untersuchungen in anderen Regionen (u.a. Model, Ober- und Mittelrhein)“, sowie „Befragungen und Analysen spezieller Standorte im Untersuchungsgebiet im Hinblick auf Schäden von abgelaufenen Hochwässern – insbesondere bei den Ereignissen 1993/1994 und 1995“ (MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2000b)).

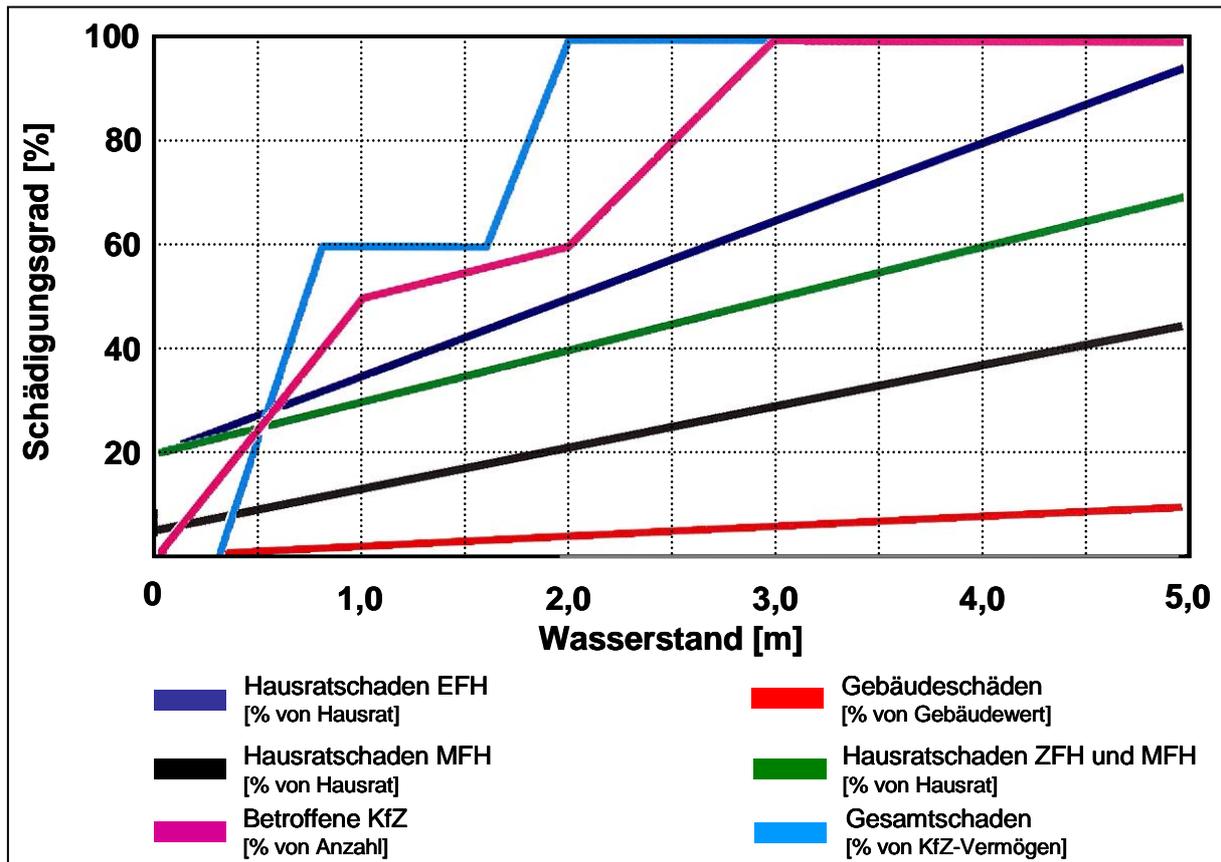


Abbildung 7-13 : Beispiel für Polygonfunktionen (Werte aus MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2000b))

## 7.6 Modelltopologie

Die Modelltopologie des entwickelten Schadensabschätzungsmodells orientiert sich an den Datenanforderungen und Prozessabläufen zur Berechnung mikroskaliger Hochwasserschäden auf Basis einzelner Nutzungsobjekte:

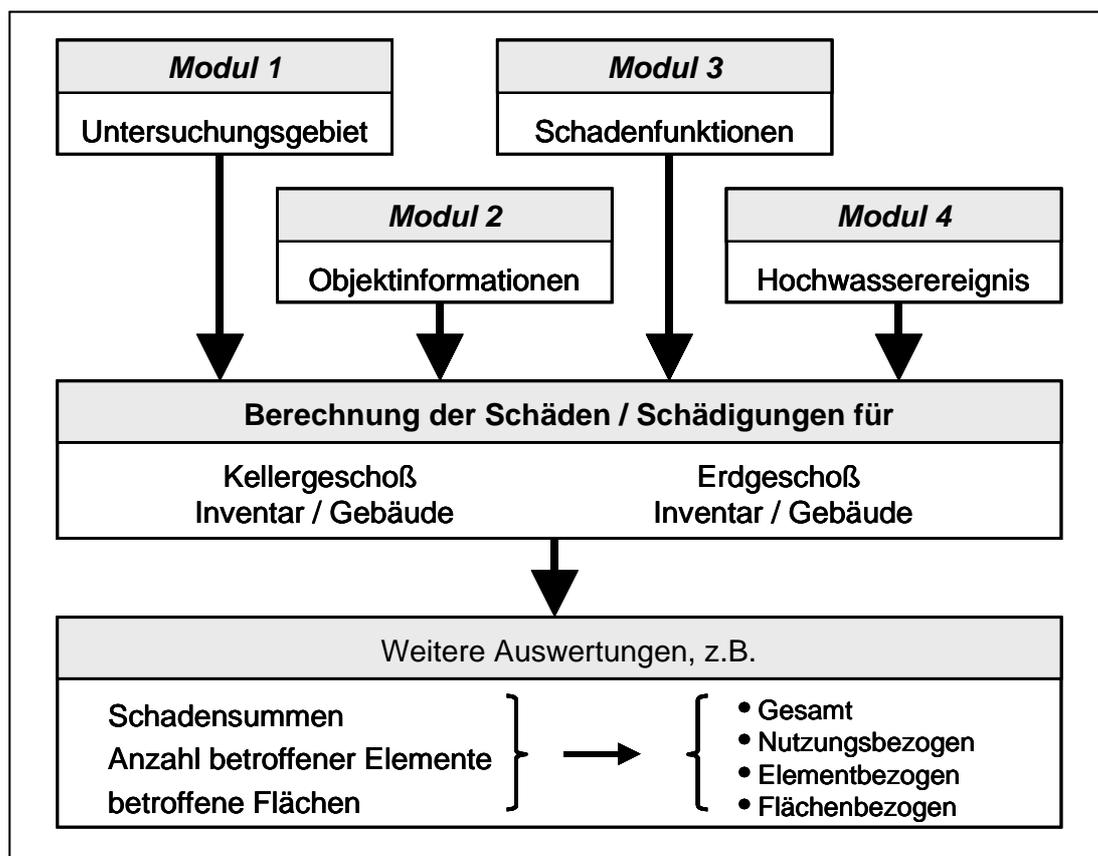
- Auswahl des Untersuchungsgebietes
- Identifikation einzelner Gebäude bzw. Nutzungselemente
- Berechnung der maximalen Wasserstände für das ausgewählte Hochwasserereignis
- Ermittlung der Vermögenswerte der einzelnen Nutzungselemente

- Ermittlung der Hochwasserschwelle<sup>3</sup> (HWS) und Erdgeschoßfußbodenhöhe (EFH)
- Wahl der Schadensfunktion
- Schadensberechnung

Die programmtechnische Umsetzung erfolgte innerhalb des Programmpakets ArcView 3.2a der Firma ESRI in der Programmiersprache AVENUE. Dadurch kann die volle Kompatibilität mit dem Hochwassersimulationsmodell Neckar gewährleistet werden, auf dessen Berechnungsergebnisse (Wasserstände) zur Schadensberechnung zurückgegriffen wird. Das Schadensberechnungstool wird als Projekt geladen, bei vollständiger Erhaltung der Standardfunktionalitäten von ArcView.

Das Gesamtmodell ist, wie in Abbildung 7-14 dargestellt, modular aufgebaut. Dadurch kann eine prozessorientierte und benutzerfreundliche Bedienung gewährleistet werden. Die Datenschnittstellen der Module sind so programmiert, dass eine eindeutige Identifikation der einzelnen Bearbeitungsschritte möglich ist.

In Modul 1 wird zunächst das Untersuchungsgebiet ausgewählt, in Modul 2 und Modul 3 ist die Vulnerabilität einzelner Objekte definiert, Modul 4 beschreibt die Gefährdungsseite (siehe Abbildung 7-15 bis Abbildung 7-18).



**Abbildung 7-14** : Modelltopologie Schadensabschätzungsmodell

<sup>3</sup> Die Hochwasserschwelle entspricht der Höhe [m+NN], bei deren Überschreiten eine Überschwemmung durch Oberflächenabfluss erfolgt.

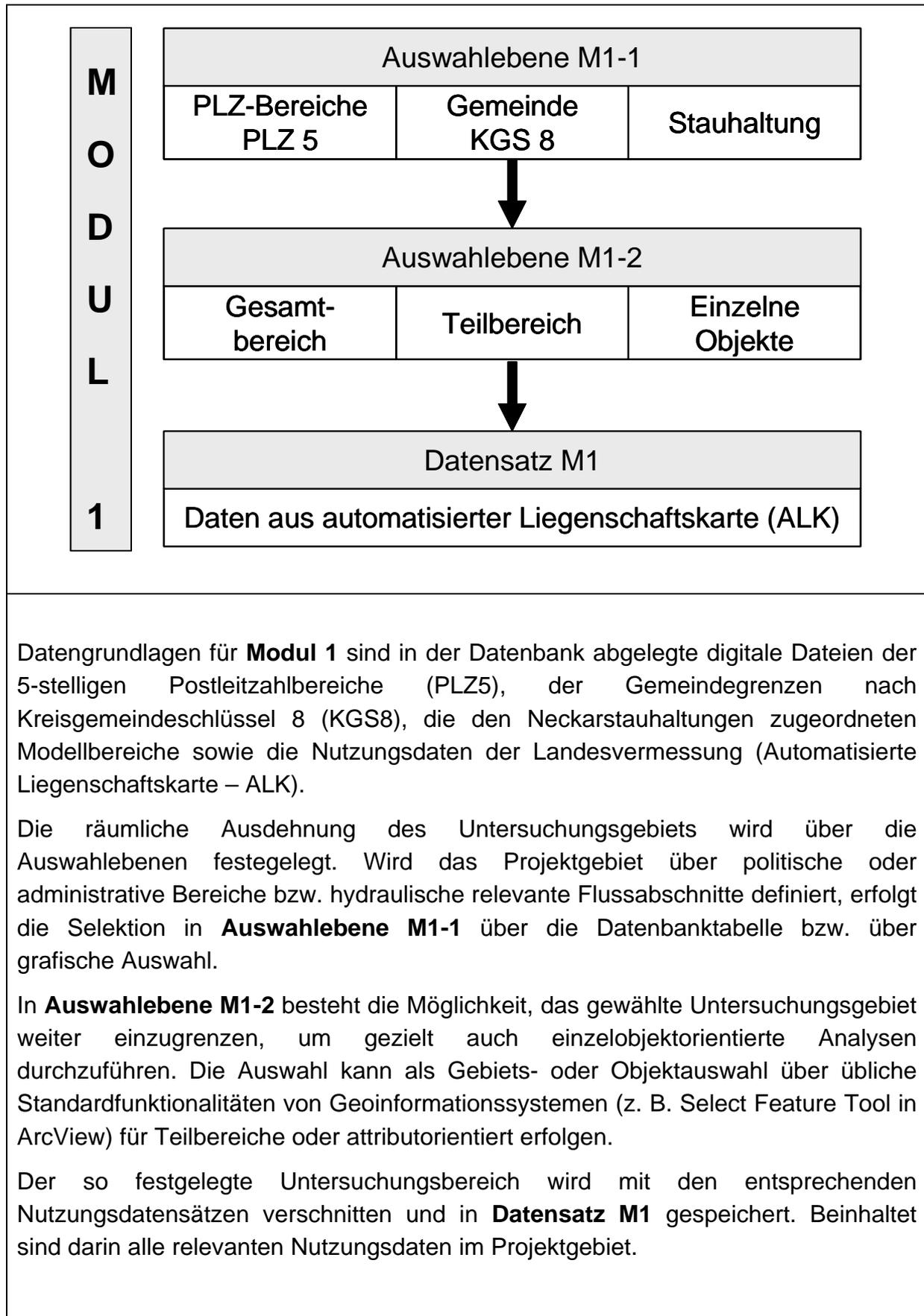
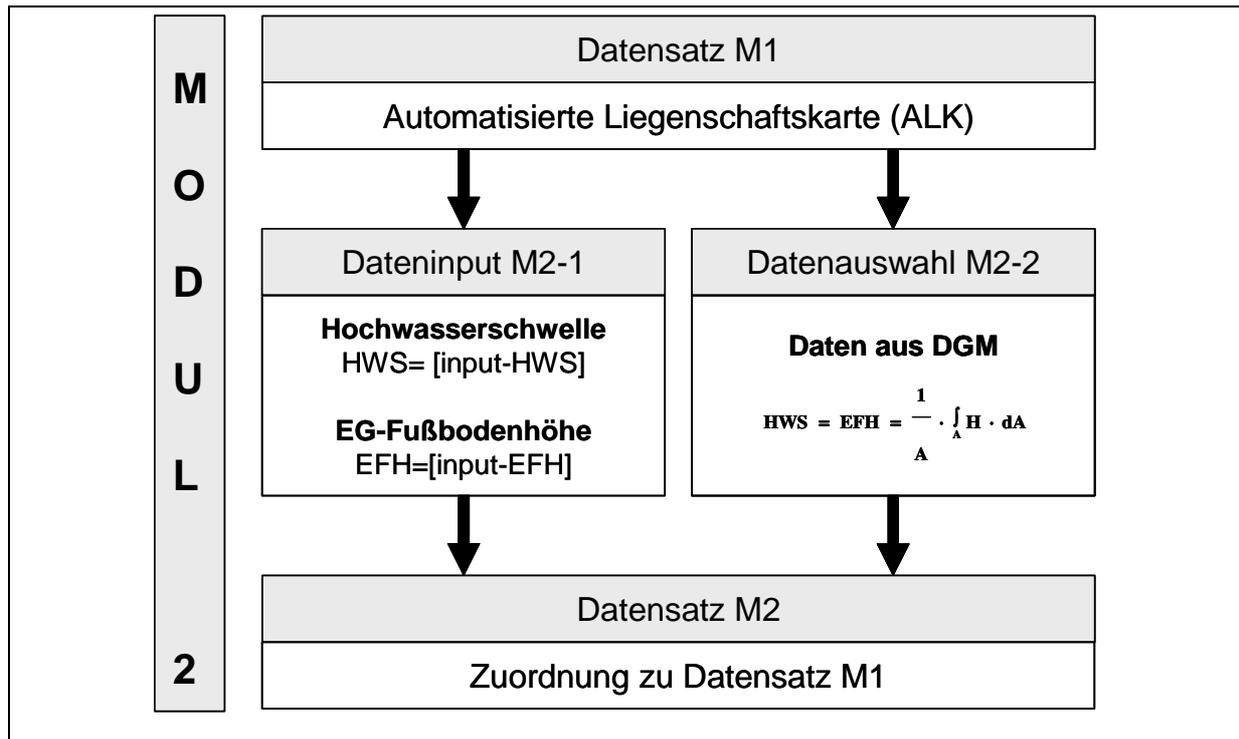


Abbildung 7-15 : Modul 1

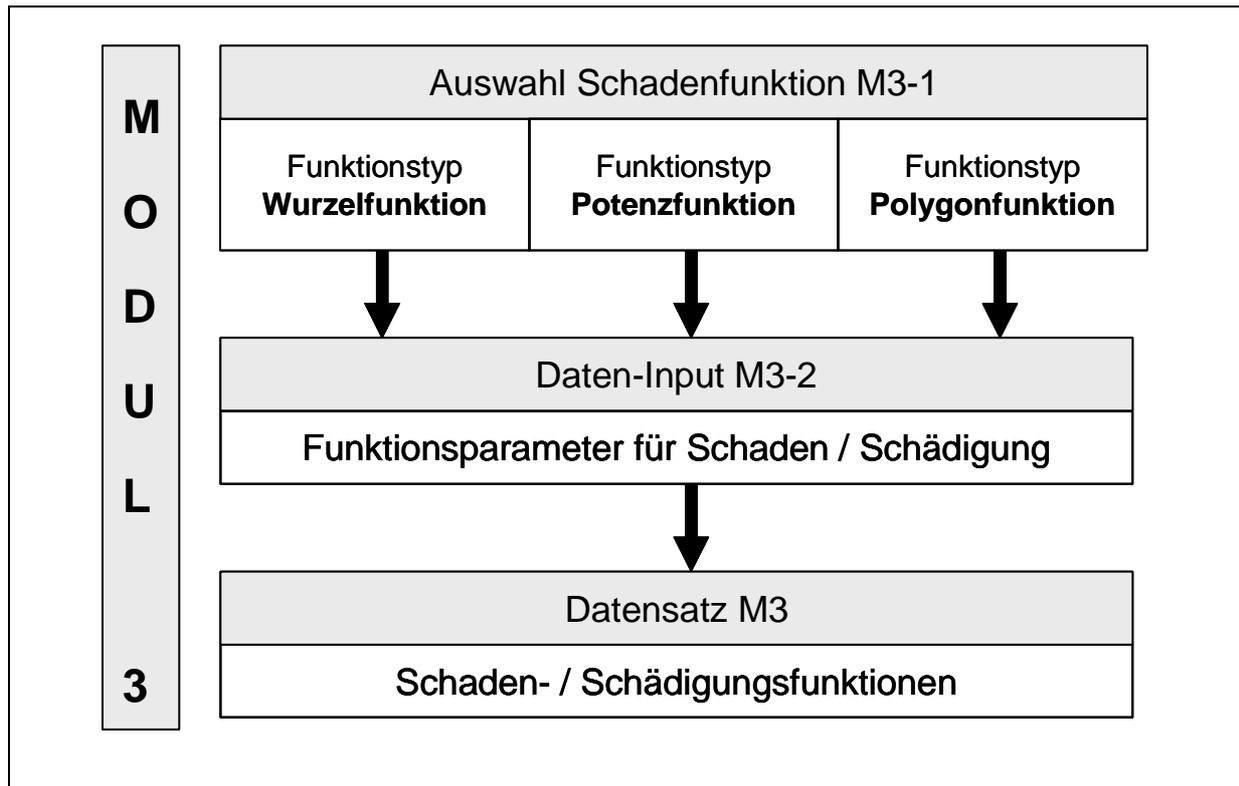


Aufbauend auf den in Datensatz 1 gespeicherten Nutzungsinformationen werden in **Modul 2** weitere schadensrelevante Höheninformationen der Nutzungsobjekte ermittelt.

Bei der Betrachtung von Überschwemmungen durch Oberflächenabfluss ist die **Hochwasserschwelle (HWS)** von wesentlicher Bedeutung. Schäden können erst dann auftreten, wenn die Wasserstände höher als HWS liegen. Für „ungeschützte“ Gebäude entspricht HWS dabei der umgebenden Geländehöhe; sind dauerhafte oder temporäre Hochwasserschutzelemente vorhanden, ist HWS über die Oberkante der Schutzmauer definiert. Weiterhin muss bekannt sein, welche Höhenlage die Stockwerke besitzen. Als charakteristische Höheninformation wird die **Erdgeschossfußbodenhöhe (EFH)** verwendet. Die Höhenlage der Kellersohle wird 2,5 m unter EFH angenommen. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass Schäden erst nach überschreiten der jeweiligen Fußbodenhöhen eintreten. Schäden, die evtl. durch Kapillarwirkungen in den Wänden entstehen, werden nicht berücksichtigt. Sowohl HWS als auch EFH können über Selektion für jedes einzelne Objekt dem Datensatz hinzugefügt bzw. über Schnittstellen eingelesen werden (Dateninput M2-1).

Sind detaillierte Objektinformationen nicht vorhanden, besteht die Möglichkeit, die Höheninformationen aus dem Digitalen Geländemodell (DGM) zu ermitteln. In diesem Fall wird für EFH und HWS die mittlere Geländehöhe auf der Grundfläche des Objektes aus dem Digitalen Geländemodell berechnet verwendet (Datenauswahl M2-2).

**Abbildung 7-16** : Modul 2

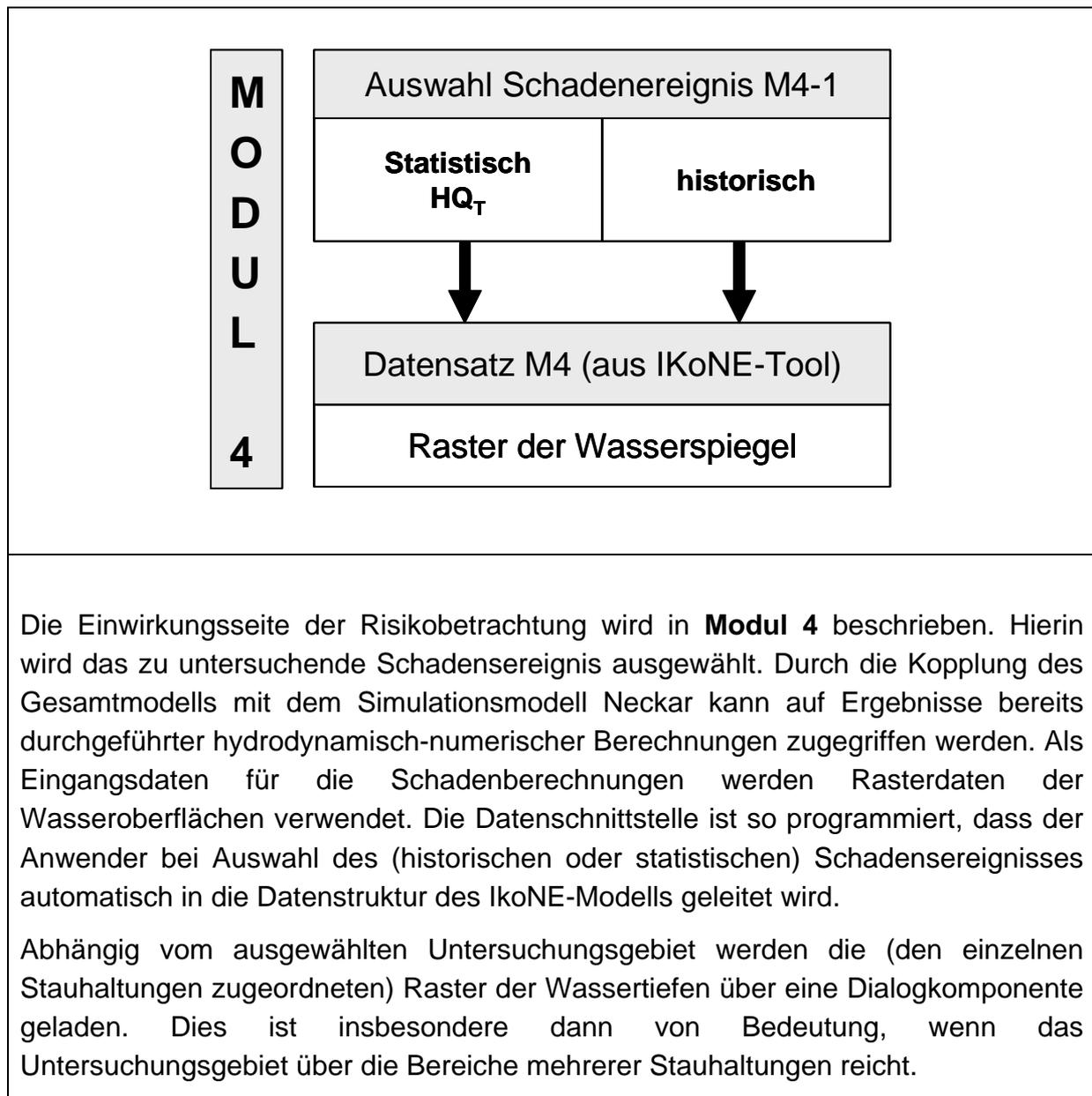


Wie bereits beschrieben stehen drei verschiedene Funktionstypen für die Schadensberechnung zur Verfügung, mit denen in **Modul 3** die Abhängigkeit des Schadens vom Wasserstand definiert werden kann. Die Anzahl der hierzu einzugebenden Parameter richtet sich zum einen nach dem gewählten Funktionstyp, zum anderen nach der gewünschten Zielgröße monetärer Schaden bzw. Schädigungsgrad.

Unterschieden werden in allen Fällen Schäden an mobilem Inventar und strukturelle Schäden an der Gebäudesubstanz jeweils für Keller- und Erdgeschoss. Grundsätzlich sind also jeweils 4 Parametersätze anzugeben. Die Berechnungen mittels **Potenz-** oder **Polygonfunktion** können wahlweise als Schädigungsgrad oder als monetärer Schaden erfolgen. Bei der Berechnung der Schädigung werden die jeweiligen Zahlentupel: Wasserstand / prozentuale Schädigung eingegeben. Über die Angaben der (Geld-) Werte ist ebenfalls eine Berechnung der monetären Schäden möglich. Die Berechnung über den Funktionstyp Wurzelfunktion erfolgt direkt als monetärer Schaden. Folglich sind hier auch die Zahlentupel: Wasserstand / monetärer Schaden anzugeben.

Die Eingabe erfolgt standardmäßig für alle in den ALK-Datensätzen angegebenen Nutzungsklassen, denen allen im Untersuchungsgebiet vorhandenen Einzelobjekten zugewiesen sind. Über die direkte Bearbeitung der Datenbanktabelle ist auch eine individuelle Funktionsanpassung für einzelne Objekte möglich.

**Abbildung 7-17** : Modul 3



**Abbildung 7-18** : Modul 4

Zur Berechnung der Hochwasserschäden werden die Informationen zu den vulnerablen Objekten (Art und Typ der Nutzung, Exposition) im Projektgebiet mit den relevanten Gefährdungsinformationen (Wasserstand im Objekt) verschnitten. Über Differenzenbildung des Wasserrasters mit den Höheninformationen bzw. dem digitalen Geländemodell werden die maßgebenden Wasserstände am / im Einzelobjekt berechnet. Über die Wasserstand-Schaden-Funktionen werden aus den Wasserständen die Schädigungsgrade bzw. die monetären Schadenssummen berechnet. Die Ergebnisse werden mit allen schadensrelevanten Informationen (Objekt-ID, Höhen, Parameter der Schadensfunktion, Wasserstand, etc.) in einer Datenbanktabelle abgelegt, die für weitere Auswertungen verwendet werden kann.

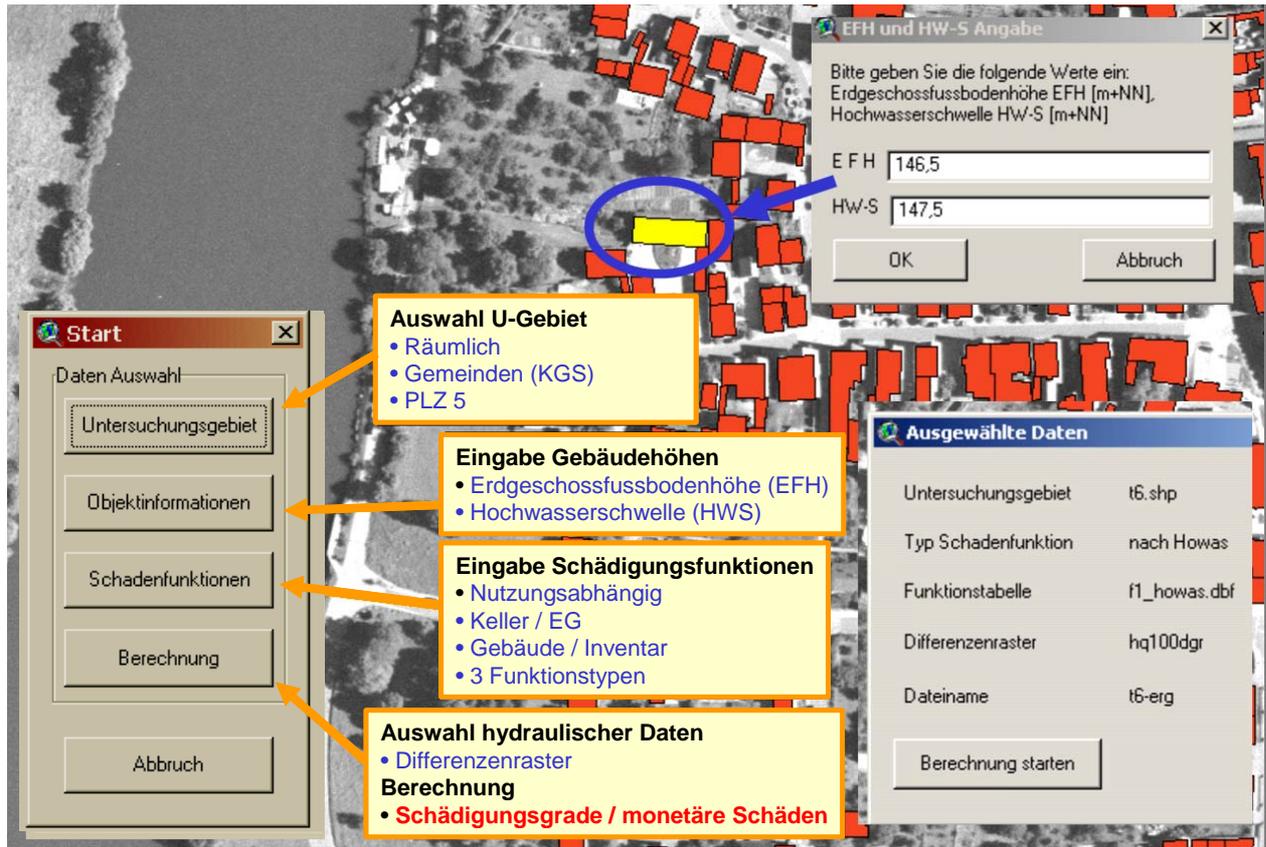


Abbildung 7-19: Screenshots Schadensberechnungstools: Startmaske, Eingabemaske charakteristischer Gebäudehöhen und ausgewählter Datensätze

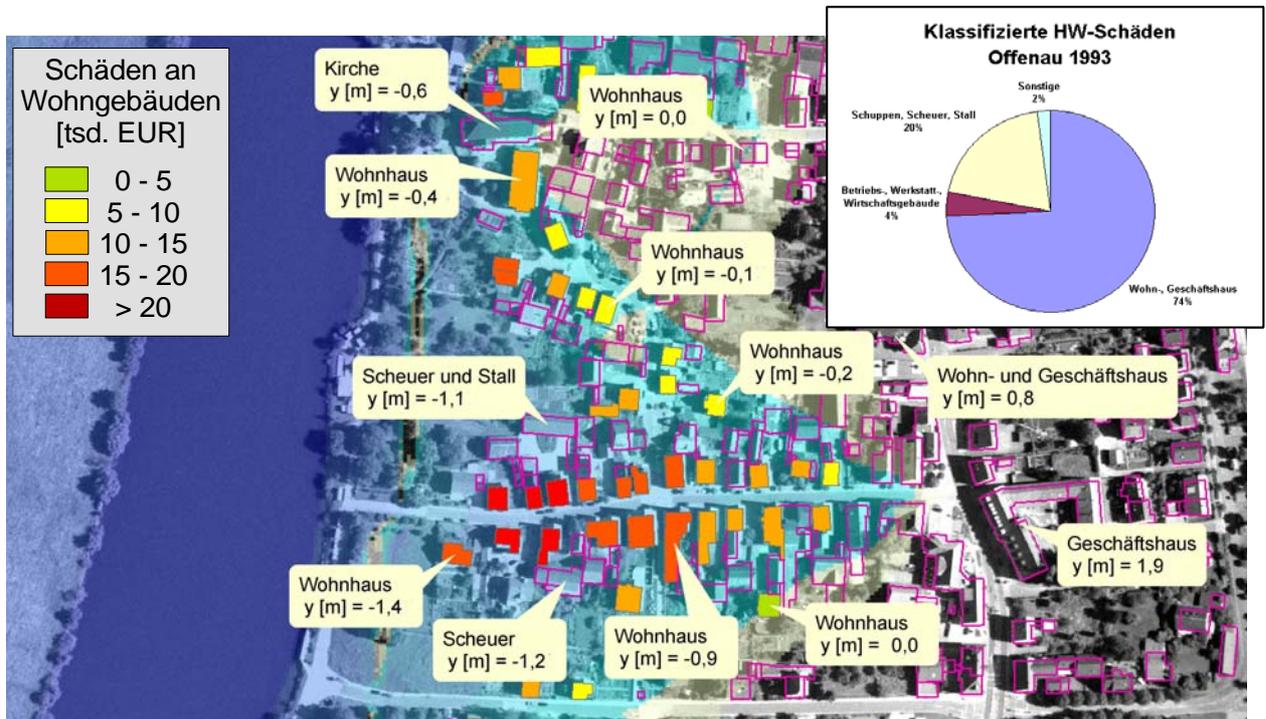


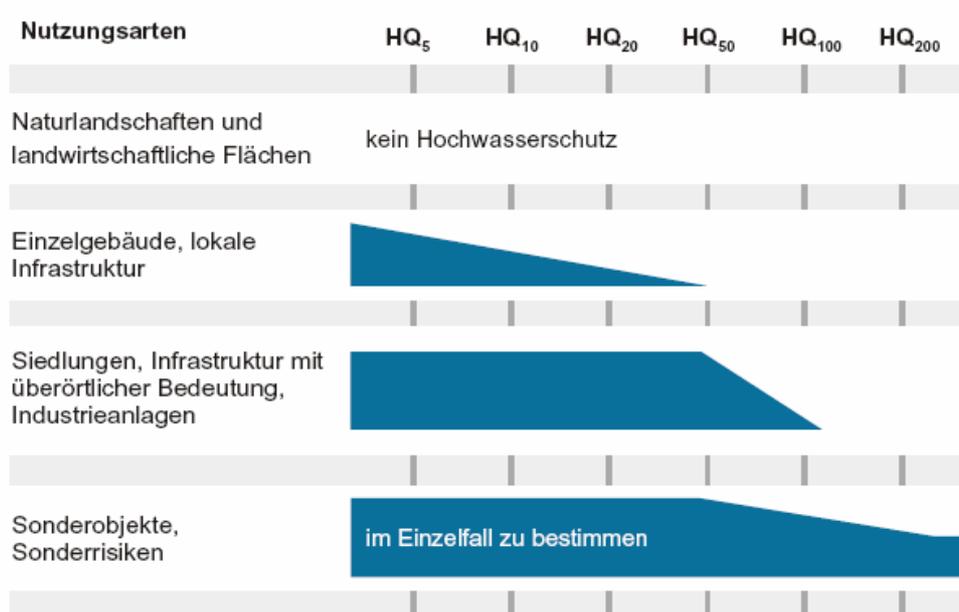
Abbildung 7-20: Ergebnis der Schadensberechnung, Schäden an Einzelobjekten und nutzungsklassifizierte Schäden; Beispiel Gemeinde Offenau (Neckar), Hochwasser1993

## 7.7 Anwendungsbereiche

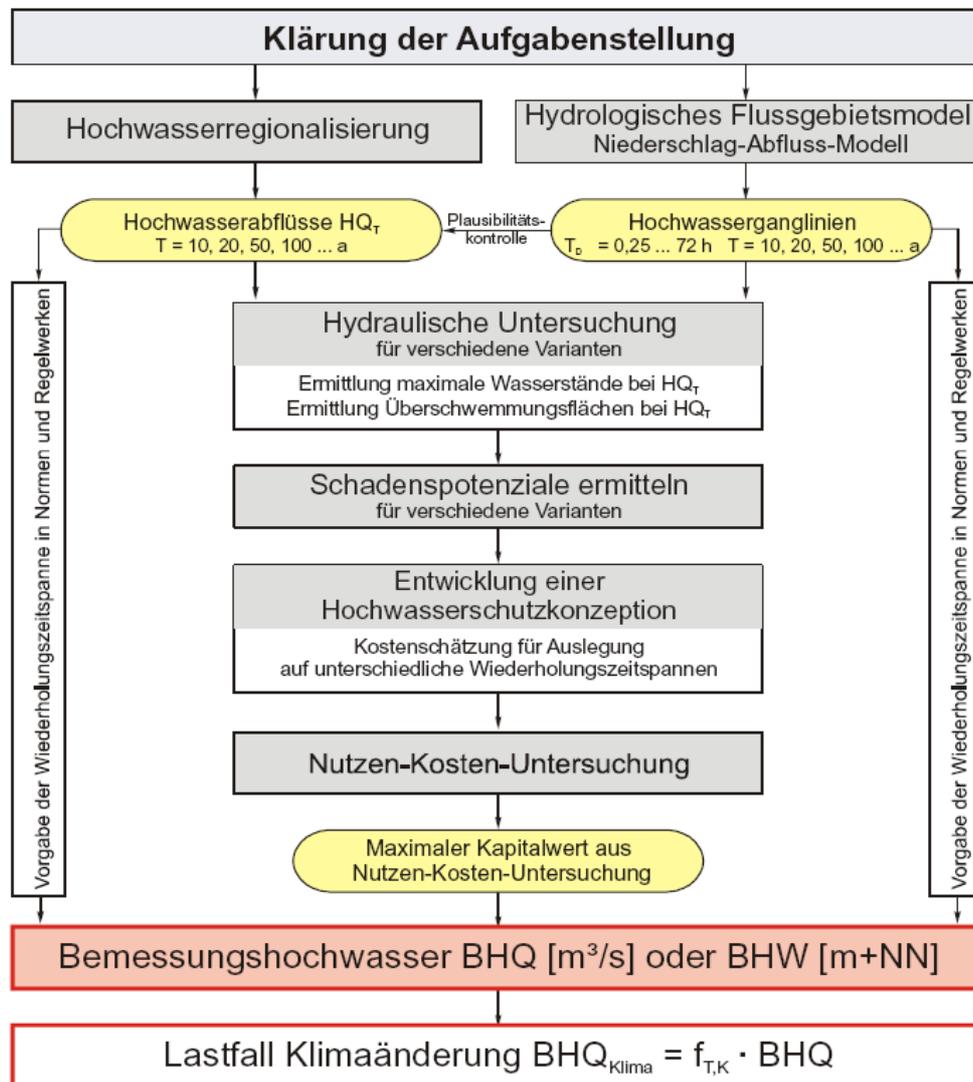
Die Ermittlung von Hochwasserschäden bzw. Schadenspotenzialen gewinnt angesichts der zunehmenden Schadenssummen und abnehmender finanzieller Ressourcen mehr und mehr Bedeutung in der wasserwirtschaftlichen Praxis. Während bis vor wenige Jahren der Schwerpunkt der Hochwasseruntersuchungen auf der Ermittlung der Gefährdungsparameter lag (Ausweisung von Überschwemmungsflächen, Darstellung in Hochwassergefahrenkarten) wird heutzutage zunehmend eine monetäre Bewertung der Risiken und möglicher Schutzkonzepte gefordert, z.B. bei

- Ermittlung von Gebieten mit erhöhtem Risiko
- Erstellung von Hochwasserrisikokarten
- Nutzen-Kosten-Untersuchungen geplanter Maßnahmen
- Kostenmäßiger Vergleich alternativer Schutzkonzepte
- Auswirkungen möglicher Klimaänderungen

In Baden-Württemberg werden in LFU (2005) Festlegungen zur **Wahl des Bemessungshochwassers** für technische Schutzanlagen festgeschrieben, in denen die Ermittlung der Schadenspotenziale als Basis für Nutzen-Kosten-Analysen im Planungsprozess verankert wird. Dies bedeutet eine Abkehr von der bis vor wenigen Jahren noch gängigen Praxis der allgemeinen Festlegung des Schutzgrades auf z.B. HQ<sub>100</sub>. Das neue Konzept bietet die Möglichkeit, den Schutzgrad entsprechend der lokal vorhandenen Gefährdungssituation zu wählen (siehe Abbildung 7-21 und Abbildung 7-22).



**Abbildung 7-21:** Festlegung des Hochwasserschutzgrades (LFU 2005)



**Abbildung 7-22:** Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes (LFU 2005)

Bewertungsbasis für **Nutzen-Kosten-Untersuchungen** (NKU) im Hochwasserschutz sind auf der Kostenseite die Aufwendungen für Erstellung und Unterhaltung der Schutzmaßnahme und auf der Nutzenseite die verhinderten Schäden bis zum Bemessungsereignis. Ein Vergleich von Nutzen und Kosten kann entweder über das Verhältnis  $N/K$  oder über den Kapitalwert (Nutzenbarwert minus Kostenbarwert) erfolgen. Aufgrund der Langlebigkeit von wasserbaulichen Schutzmaßnahmen ist in beiden Fällen eine dynamische Kostenrechnung durchzuführen, in der die Wertänderungen von zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Kosten über die gesamte Lebensdauer der Anlage mit berechnet wird. Die Änderung der Geldwerte wird über die Verwendung der realen Kosten und eines realen Zinssatzes berücksichtigt. Die Methodik und Vorgehensweise bei der Durchführung von dynamischen Kostenvergleichsrechnungen sind in LAWA (2005) beschrieben.

Die zunehmende Anzahl von Hochwasserereignissen und Höhe der Schäden rufen auch politische Verantwortungsträger auf den Plan, die infolge der Knappheit der finanziellen Mittel Entscheidungshilfen zur Erstellung von zukunftsfähigen Hochwasserschutzkonzepten benötigen. Eine flächendeckende und vergleichende **Darstellung der Schadenspotenziale und Hochwasserrisiken** für einzelne Gebietseinheiten (Gemeinden, Landkreise, Gebietskörperschaften etc.) kann hierbei eine wesentliche Entscheidungsgrundlage, welche Gebiete für Schutzmaßnahmen vorrangig zu behandeln sind. So wurde auch von der KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2006) festgestellt, dass in den Wasserrahmenrichtlinien Ziele für die Wasserqualität gesetzt sind, jedoch nicht bezüglich des Hochwasserrisikomanagements. Als Konsequenz wurde eine Richtlinie zur Bewertung und Bekämpfung von Hochwasser erarbeitet in denen in Kapitel III: Hochwasserrisikokarten, Artikel 7, Punkt 3 die Inhalte der zu erstellenden Hochwasserrisikokarten wie folgt beschrieben werden:

*„Die vorläufigen Karten für Hochwasserschäden geben potenzielle hochwasserbedingte Schäden unter den in Absatz 2 beschriebenen Szenarien an, die wie folgt ausgedrückt werden:*

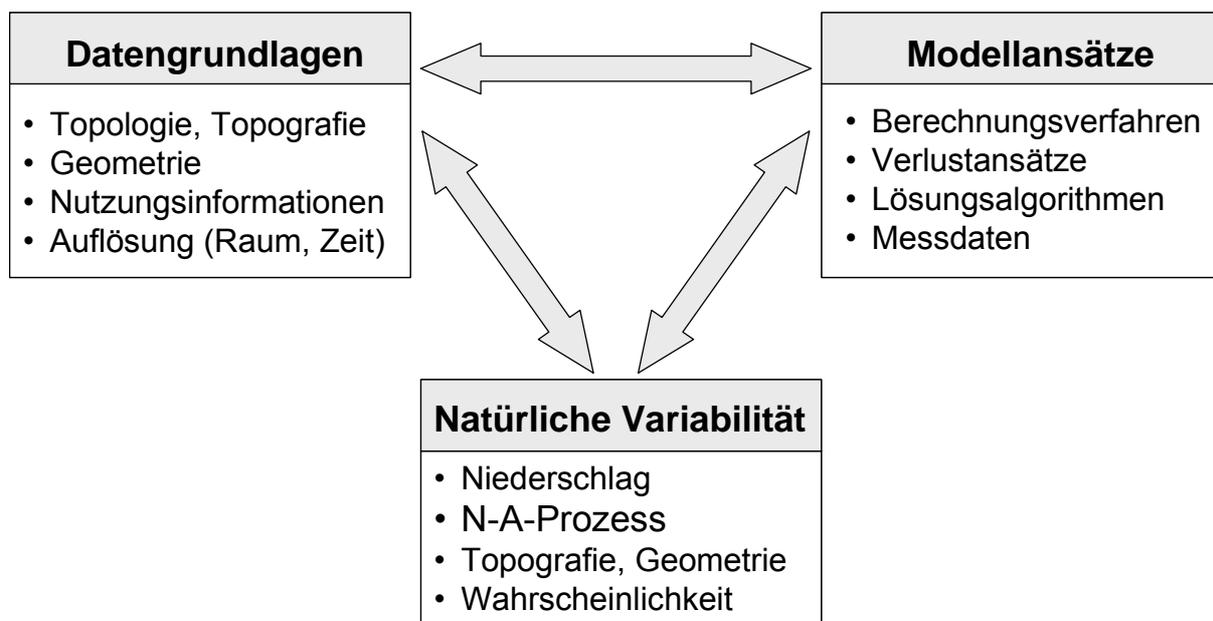
- (a) Anzahl der potenziell betroffenen Bewohner;*
- (b) potenzielle wirtschaftliche Schäden in dem Gebiet;*
- (c) potenzielle Umweltschäden.“*

Hierbei ist allerdings zu erwähnen, dass eine alleinige Betrachtung der verhinderten Schäden als Nutzen von Hochwasserschutzmaßnahmen kontraproduktiv im Sinne eines nachhaltigen Hochwassermanagements sein kann. Bei einer unreflektierten rein monetären Bewertung werden grundsätzlich diejenigen Objekte bzw. Gebiete als vorrangig schutzwürdig eingestuft, bei denen der aus der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung berechnete Kapitalwert am größten wird. Dies kann im Einzelfall bedeuten, dass Gebäude mit nicht angepassten Nutzungen im überschwemmungsgefährdeten Gebieten (mit hohen Schadenspotenzialen) mit einer Schutzmaßnahme „belohnt“ werden, während Gebäude mit entsprechenden Vorsorgemaßnahmen (keine hochwertige Nutzung gefährdeter Stockwerke) aufgrund der geringen Schadenspotenzialen bei den Planungen nicht berücksichtigt werden.

## 8 Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

### 8.1 Allgemeines

Grundlage für Schadenspotenzial- und Risikoanalysen sind Informationen über Geländetopografie, Art, Nutzung und Exposition überschwemmungsgefährdeter Objekte, der Verlauf der Schäden in Abhängigkeit der entsprechenden Einflussfaktoren (Informationen zur Vulnerabilität), die Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge, die bei Entstehung und Ablauf von Hochwasserereignissen maßgebenden Einfluss haben, sowie die individuellen Ausprägungen des Hochwassers (Informationen zur Gefährdung). All diese Parameter unterliegen gewissen Unsicherheiten. Diese können entweder auf natürlichen Gegebenheiten beruhen (individuelle Ausprägung jedes einzelnen Ereignisses, natürliche Schwankungen), in der Wahl der Eingangsdaten und -parameter oder systemimmanent in den Modellansätze begründet liegen, die Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse haben können.



**Abbildung 8-1:** Elemente der „Unsicherheit“

Die räumliche und zeitliche Auflösung sowie die Qualität der erforderlichen Datengrundlagen können bereits als „Eingangsgrößen“ für die Analysen eine Fehlerquelle darstellen. Grundsätzlich stellt sich hier natürlich die Frage nach der Datenverfügbarkeit, der generellen Fehleranfälligkeit durch verschiedene anzuwendende Messmethoden und –techniken sowie den absoluten und relativen Fehlern und Ungenauigkeiten. Auch hoch aufgelöste Datensätze wie sie heutzutage z.B. in Form von Geodaten aus Laserscanneraufnahmen mit einer Auflösung in 1mx1m-Rastern vorliegen, können nur die Situation zum Zeitpunkt der Aufnahme darstellen. Änderungen in der Topografie, die durch anthropogene oder natürlich bedingte Einflüsse verursacht sind, können nur durch erneute Datenaufnahme und Aktualisierung der Datensätze

(Pflege der Datenbank) auf dem aktuellen Stand gehalten werden. Neben der Auflösung der Daten spielen hierbei auch die zur Verfügung stehenden Kapazitäten (Rechenleistung, Größe der Datenbank) oft eine entscheidende Rolle. Für größere Flussgebiete ist es, trotz der immer weiter steigenden Leistungsfähigkeit der Computer, nicht möglich, Daten in beliebiger Auflösung und Menge zu verarbeiten. Hydrodynamisch-numerische Berechnungen basieren u.a. auf geometrischen Informationen der Fließquerschnitte. In eindimensionalen Modellen liegen diese Informationen in Form von Querprofilen vor, bei mehrdimensionalen Modellen als punktuelle Höheninformationen in einem Berechnungsnetz. Auch hier ist zu beachten, dass die meisten natürlichen Fließgewässer eine ständig veränderliche Gewässerberandung aufweisen und Höheninformationen zwischen den Berechnungspunkten bzw. –profilen durch die Modelle nicht erfasst werden können. Auch Strömungswiderstände, die durch die jahreszeitlich schwankende Vegetationsdichte veränderlich sind, bedürfen der Berücksichtigung.

Die Ermittlung der Abflusskennwerte (Eintretenswahrscheinlichkeiten, Scheitelabflüsse) erfolgt i.d.R. an Pegelstellen, an denen regelmäßig und über einen möglichst langen Zeitraum Durchfluss- und Wasserstandsmessungen durchgeführt werden. Über statistische Auswertungen der Messdaten werden Anpassungsfunktionen ermittelt, mit denen ein funktionaler Zusammenhang zwischen Wasserstand und Abflussmenge angegeben werden kann und mit denen Extrapolationen für größere Abflussmengen bzw. nach statistischer Auswertung für geringere Eintretenswahrscheinlichkeiten durchgeführt werden können. Auch hier sind Umfang und Qualität der Messdaten der entscheidende Faktor für die Genauigkeit der Anpassung. Liegen plausible Messungen über lange Zeitreihen vor und kann zudem von über den Beobachtungszeitraum nur unwesentlich veränderten Randbedingungen ausgegangen werden, so können auch extreme Abflusskennwerte mit hinreichend guter Genauigkeit angegeben werden. Weitere Unsicherheiten resultieren aus der Wahl der statistischen Verteilungsfunktion und der entsprechenden Funktionsparameter. Werden Abflusskennwerte an Flussabschnitten benötigt, an denen keine Messdaten vorhanden sind, so können die Werte über hydrologische Wellenablaufmodelle ermittelt werden.

Hydrodynamisch-numerische Modelle bieten die Möglichkeit, die wesentlichen Prozesse komplexer natürlicher Strömungsvorgänge abstrahiert abzubilden. Je nach Art des gewählten Modells müssen dabei Vereinfachungen getroffen werden, um die Strömungsprozesse analytisch oder über Näherungslösungen berechnen zu können. Der Grad der Vereinfachungen hängt dabei grundsätzlich von der Wahl des Verfahrens (ein- oder mehrdimensionale Verfahren) sowie der die Strömung beschreibenden Parameter ab. Im Falle von (wie in dieser Arbeit angewendeten) 1D-HN-Verfahren müssen bei der Modellerstellung auf Basis der vorhandenen Datengrundlage Annahmen über abflusswirksame Abschnitte bzw. Retentionsbereiche getroffen sowie Rauheitsparameter von Gewässersohle und Vorlandbereichen in Form von (empirischen) Stricklerwerten angenommen werden. Auch wenn im Zuge der Kalib-

rierung, abhängig von Art, Auflösung und Qualität der Daten, die Unsicherheiten reduziert werden, so verbleiben im besten Fall dennoch Ungenauigkeiten, die in der notwendigen Vereinfachung der numerischen Lösungsverfahren begründet liegen.

Modellansätze zur Berechnung von Schadenspotenzialen gehen in den meisten Fällen von der Annahme aus, dass der Schaden maßgebend durch den maximalen Wasserstand während eines Ereignisses hervorgerufen wird. Die Auswertung bestehender Datenbanken (z.B. HOWAS) bzw. Befragungen bestätigen zumindest, dass der Wasserstand den größten Einfluss auf die Schadenshöhe hat. Dennoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Wassertiefe allein maßgebend für den Schaden ist, die Berücksichtigung zusätzlicher Schaden beeinflussender Parameter ist bis heute aufgrund der ungenügenden Datenlage nur schwer möglich. Es ist jedoch naheliegend, dass auch Faktoren wie z.B. Dauer des Hochwassers, auftretende Fließgeschwindigkeiten und Wellen, Geschiebe- und Sedimenttransport sowie die Wasserqualität (Kontamination durch mittransportierte Schadstoffe) einen erheblichen Einfluss auf die Schadenshöhe haben können, auch wenn eine umfassende analytische Betrachtung derzeit noch nicht umgesetzt werden konnte. Die Unsicherheit in der Wahl der Parameter spiegelt sich in direkter Weise in der Streuung der für die Schadensberechnung zu Grunde zulegenden Wasserstand-Schaden-Funktionen wieder.

Deterministische Modelle sind u.a. dadurch charakterisiert, dass sie bei vorgegebenen Eingangsdaten reproduzierbare Ergebnisse liefern. Unterliegen die Eingangsgrößen, wie oben beschrieben, für den Fall von Hochwassermodellen einem Schwankungs- bzw. Unsicherheitsbereich, so kann über Sensitivitätsanalysen der Einfluss der einzelnen Modellparameter auf die Berechnungsergebnisse gezielt untersucht und nachgewiesen werden. Werden Sensitivitätsanalysen für alle maßgebenden Modellparameter durchgeführt, so können die „sensitivsten“ Eingabedatensätze ermittelt werden, die im Fall einer Wertevariation die größten Veränderungen in den Modellergebnissen hervorrufen. Sind die zu untersuchenden Parameter voneinander abhängig, so kann die Anzahl der möglichen Parameterkombinationen im gesamten Wertebereich allerdings so groß werden, dass eine umfassende Sensitivitätsanalyse mit vertretbarem Aufwand nicht mehr durchführbar ist. Hier bietet sich eine stochastische Modellierung, beispielsweise über eine Monte-Carlo-Simulation an. Dabei werden für die einzelnen Eingangsparameter statistische Verteilungen angenommen und über die Generierung von Zufallszahlen Verteilungen der Modellergebnisse berechnet, über die statistische Ergebnisparameter wie z.B. Mittelwert oder Varianz abgeleitet werden können.

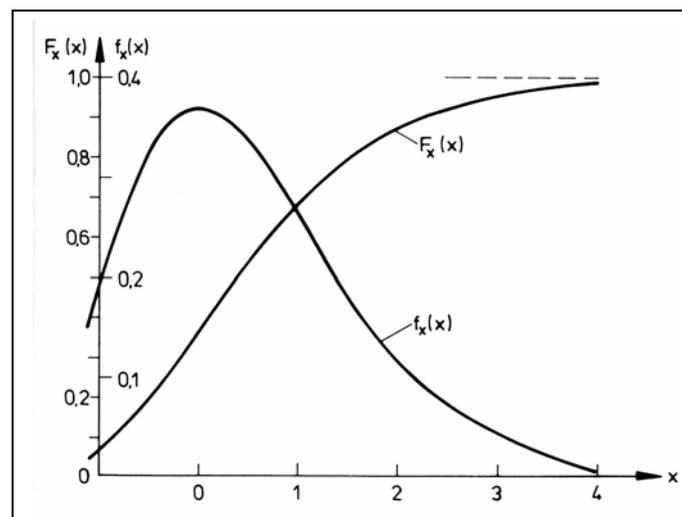
Im Rahmen dieser Arbeit sollen am Beispiel jeweils eines Eingangs- bzw. Unsicherheitsparameters in der Risikoermittlung aus den einzelnen Fachbereichen eine differentielle Unsicherheitsanalyse durchgeführt werden. Hierbei wurden folgenden Parameter untersucht:

- Berücksichtigung des Konfidenzintervalls der Verteilungsfunktion bei der Ermittlung der statistischen Abflusskennwerte.
- Einfluss der gewählten Rauheitsparameter für Gewässersohle und Vorländern auf die Wasserspiegellagen.
- Änderungen der Abflussgeometrie am Beispiel eines Brückenquerschnittes
- Berücksichtigung von Schwankungsbereichen in der Wahl der Schadensfunktion.
- Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Bemessungsgrundlagen für Schutzmaßnahmen.

Da die maßgebende Größe für die Schadenspotenzialanalysen der maximal auftretende Wasserstand während eines Hochwassers ist, wurden die Untersuchungen zunächst auf ihren Einfluss auf die Wasserstände untersucht und dargestellt. Anschließend wird für die gewählten Unsicherheitsbänder auch deren Einfluss auf die daraus resultierenden Änderungen bzgl. der monetären Schäden untersucht und dargestellt.

## 8.2 Anpassung der statistischen Verteilungsfunktion

Für die untersuchte Stauhaltung Gundelsheim liegen seit 1950 Abflussmessungen am Pegel Rockenau vor. Für die Anpassung der Verteilungsfunktion wurden insgesamt 48 Jahresmaxima verwendet. Die beste Anpassung ergibt sich für eine Gumbel-Verteilung (siehe Abbildung 8-2)

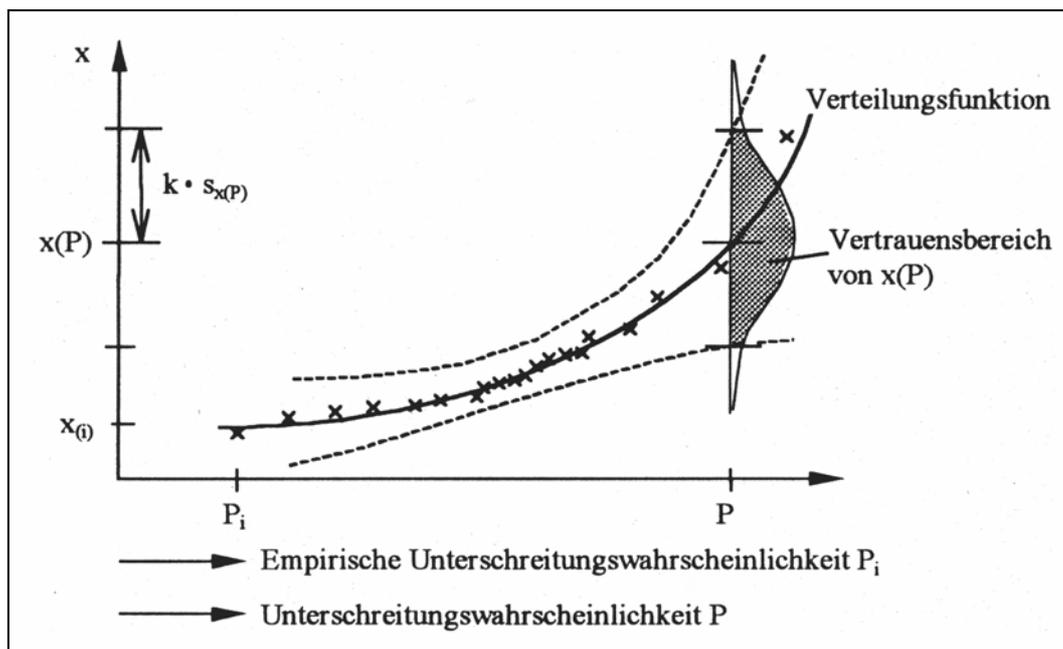


**Abbildung 8-2:** Allgemeine Form der Gumbel-Verteilung (aus PLATE, E. (1993))

Mit bekannter Verteilungsfunktion lassen sich die Scheitelabflussmengen für beliebige Wiederkehrperioden ermitteln. Da die Funktion jedoch „nur“ eine Anpassung an

die Messdaten und nicht die hydrologischen Verhältnisse abbilden kann, unterliegen die Funktionswerte Unsicherheiten, die mit zunehmender Abweichung vom Mittelwert größer werden. Der Vertrauensbereich der Quantile kann bestimmt werden, wenn von einer Normalverteilung der Abweichungen ausgegangen wird (siehe DVWK (1999) und PLATE, E. (1993)). Berechnet man für neben dem aus der Verteilungsfunktion berechneten Mittelwert (Quantile der Verteilungsfunktion) auch die zugehörige Standardabweichung, so kann der Vertrauensbereich mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit angegeben werden zu

$$x(P) \pm k \cdot s_{x(P)} \quad (\text{Gl. 8-1})$$



**Abbildung 8-3:** Verteilungsfunktion und Vertrauensbereiche (aus DVWK (1999))

Das Ergebnis der Extremwertstatistik für den Pegel Rockenau ist in Abbildung 8-4 dargestellt. Die ebenfalls eingezeichnete obere und untere Umhüllende geben den 95 %igen Streubereich der Verteilungsfunktion wieder. Es ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmender Extrapolation in Bereiche geringer Überschreitungswahrscheinlichkeiten die Abweichung zunimmt. Die maximale Abweichung liegt im Bereich der Extremereignisse ( $P=10E-4$ ) bei ca. 25 %. Die Auswirkungen auf die Wasserstände wurden für Neckar-Km 98,0 (Standort Pegel Offenau) berechnet. Da dieser Pegel erst im Jahre 2004 als Hochwasservorhersagepegel eingerichtet wurde, liegen an dieser Stelle keine gemessenen Zeitreihen der Abflusswerte vor. Die Abflusskennwerte wurden aus diesem Grund aus dem Regionalisierungsmodell für Baden-Württemberg (IWK (2003)) entnommen und sind in Abbildung 8-4 als Einzelwerte für Offenau angegeben. Der Streubereich von max. 25% Prozent wurde aus der Statistik für nächstgelegenen Pegel Rockenau übernommen. Die Auswirkungen auf die berechneten Wasserstände sind Abbildung 8-5 zu entnehmen. Bereits bei geringen prozentualen Abweichungen der Abflussmengen ist eine Wasserspiegeldifferenz

im Dezimeterbereich zu erwarten. Im Bereich des 100-jährlichen Abflussscheitelwertes von ca. 2900 m<sup>3</sup>/s im betrachteten Flussabschnitt beträgt die Wasserstandsdifferenz +/-1m, im Extrembereich über +/- 1,3 m.

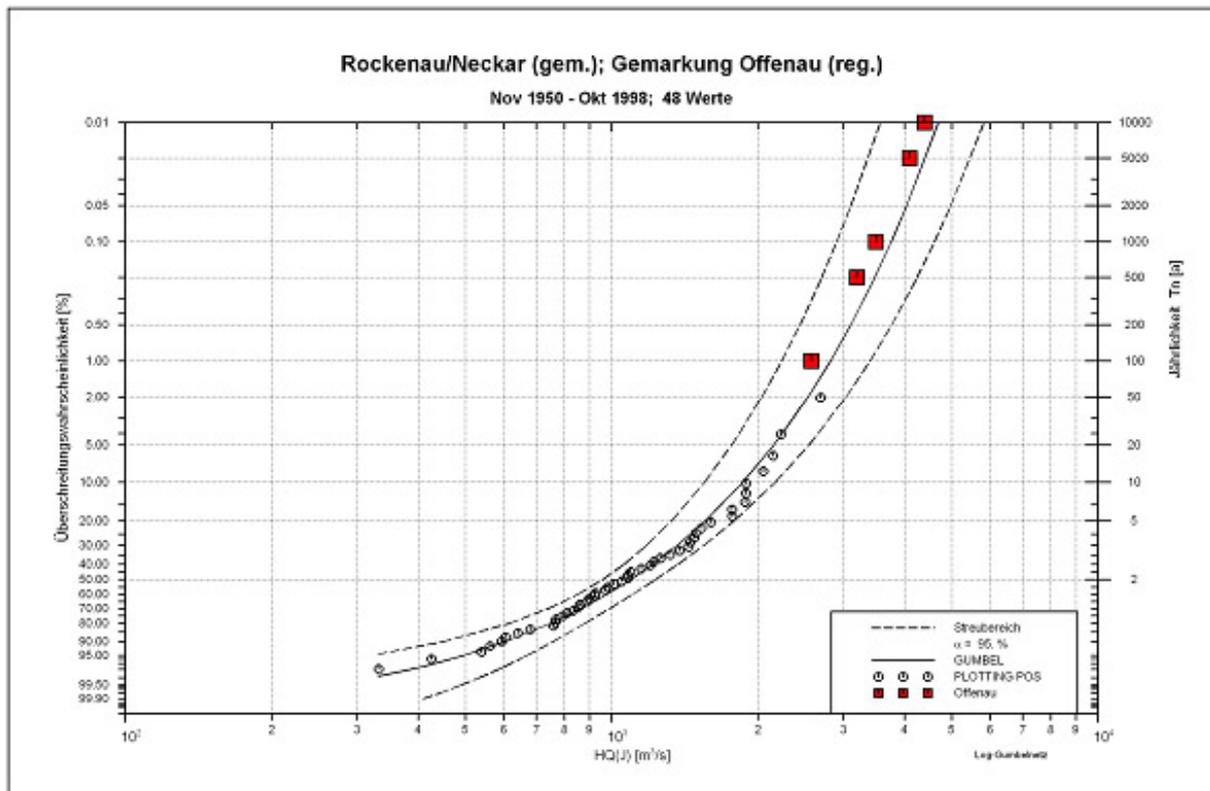


Abbildung 8-4: Extremwertstatistik Pegel Rockenau

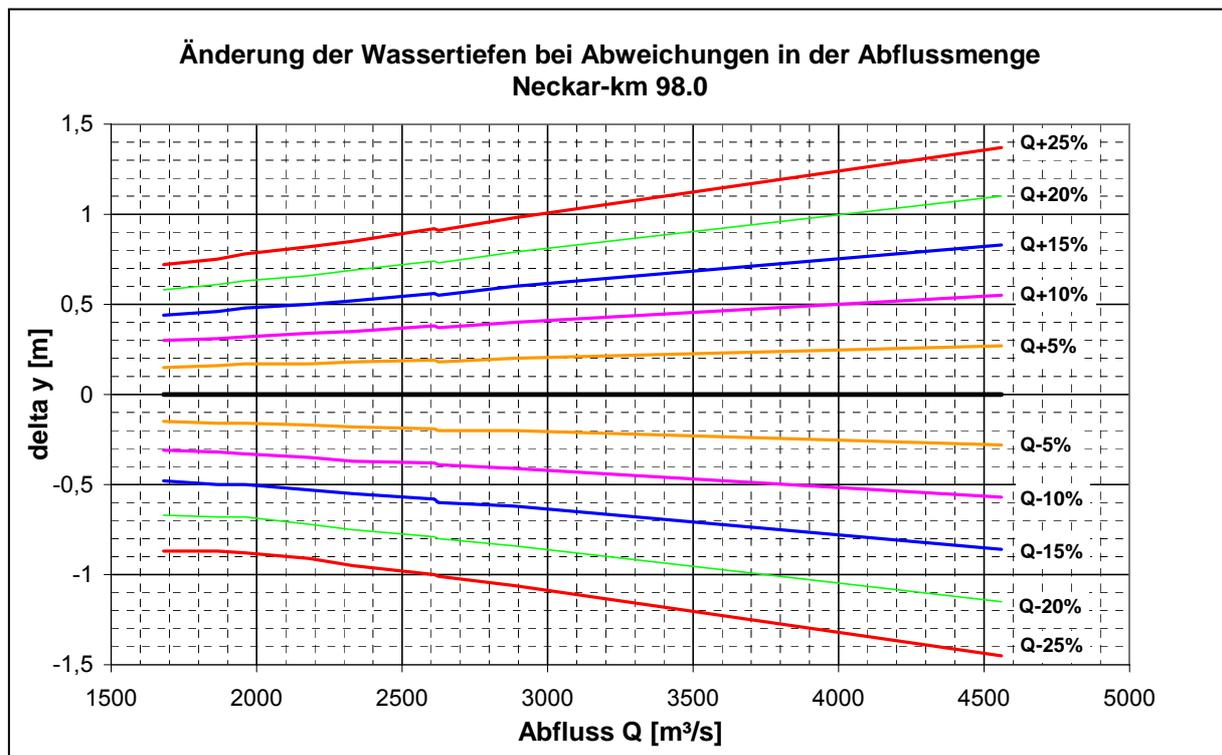


Abbildung 8-5: Sensitivität bzgl. der hydrologischen Unsicherheit

### 8.3 Wahl der Rauheitsparameter für Gewässersohle und Vorländern

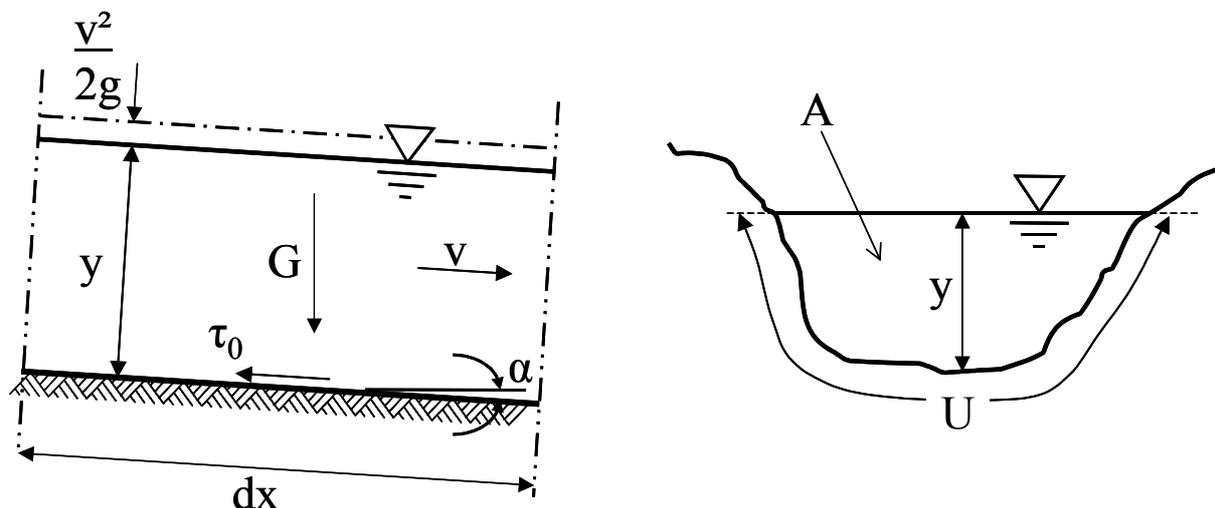
Für Fließgewässerabschnitte mit eindimensionaler Strömungscharakteristik können Geschwindigkeitskomponenten quer zur Hauptströmungsrichtung vernachlässigt werden. Durch vertikale und laterale Integration der dreidimensionalen Strömungsgleichungen ergeben sich die so genannten Saint-Venant-Gleichungen zu:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(UQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial z_x}{\partial x} - \frac{\tau_q r_{hy}}{\rho} \quad (\text{Gl. 8-2})$$

In den Saint-Venant-Gleichungen verbleibt als einzige Schubspannungskomponente die Reibung an den Gewässerberandungen, die über den Term

$$\frac{\tau_q r_{hy}}{\rho} \quad (\text{Gl. 8-3})$$

die Rauheitswirkung der Sohle und Uferböschung auf den Wasserkörper beschreiben. Sie ist gleichzeitig die einzige Kalibrierungsgröße in eindimensionalen HN-Modellen. Für eine stationärere, gleichförmige Strömung ergeben sich die in Abbildung 8-6 abgebildeten Kraftkomponenten auf ein Kontrollvolumen eines Wasserkörpers.



**Abbildung 8-6:** Definitionsskizze zur Bestimmung der Kräfte auf ein Kontrollvolumen

Aus dem Gesetz der gleichförmigen Bewegung muss im betrachteten Kontrollvolumen die Hangabtriebskraft im Gleichgewicht stehen mit den verzögernden Reibungskräften. Daraus ergibt sich:

$$\rho \cdot A \cdot \sin \alpha \cdot dx \cdot g = \tau_0 \cdot U \cdot dx \quad (\text{Gl. 8-4})$$

mit

$\rho$	Dichte Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]
$A$	durchflossene Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	mittlere Sohlneigung [°]
$dx$	Länge des Kontrollvolumen in lateraler Richtung [m]
$g$	Erdbeschleunigung [= 9,81 m/s <sup>2</sup> ]
$\tau_0$	mittlere Schubspannung an der Gewässerberandung [N/m <sup>2</sup> ]
$U$	benetzter Umfang [m]

Unter der Annahme eines gleichförmigen Abflusses ergibt sich ein paralleler Verlauf von Sohle, Wasserspiegel- und Energielinie. Aus Gl. 8-10 ergibt sich mit  $\sin(\alpha)=I_S=I_E$ ,  $R=A/U$  und nach Umformung die bekannte Schleppkraftformel:

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot R \cdot I_E \quad (\text{Gl. 8-5})$$

In praktischen Anwendungen zur Berechnung von Gerinneströmungen werden heutzutage hauptsächlich zwei Ansätze verfolgt:

Die Berechnungen über das Widerstandsgesetz von **Darcy-Weisbach** gehen von turbulenten Rohrströmungen aus. Die Verlusthöhe ist in etwa proportional zum Quadrat der mittleren Fließgeschwindigkeiten und wird berechnet über:

$$h_v = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Gl. 8-6})$$

mit

$h_v$	Verlusthöhe [m]
$\lambda$	Verlustbeiwert nach Darcy - Weisbach [-]
$L$	Fließlänge [m]
$D$	Rohrdurchmesser [m]
$v$	mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
$g$	Erdbeschleunigung [= 9,81 m/s <sup>2</sup> ]

Weiterhin ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht von haltenden zu treibenden Kräften entsprechend Abbildung 8-6 für Kreisrohre die Gleichung:

$$\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha = \tau_0 \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad (\text{Gl. 8-7})$$

und mit  $h_v = L \cdot \sin \alpha$

$$h_v = 4 \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\tau_0}{\rho \cdot g} \quad (\text{Gl. 8-8})$$

Aus dem Vergleich von Gl. 8-12 und Gl. 8-13 kann die Schubspannung in Abhängigkeit des Verlustbeiwertes geschrieben werden zu:

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{bzw.} \quad \tau_0 = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (\text{Gl. 8-9})$$

Aus Gl. 8-11 und Gl. 8-15 lässt sich die Fließformel nach Darcy-Weisbach ableiten:

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \cdot \sqrt{R \cdot I} \quad (\text{Gl. 8-10})$$

Eine weitere, in der Praxis häufig eingesetzte Fließformel wurde unabhängig von **Gauckler**, **Manning** und **Strickler** entwickelt. In Versuchen an offenen Gerinnen, Rohrleitungen und Stollen, in denen von einer gleichförmigen Strömung ausgegangen werden konnte, wurden die mittleren Geschwindigkeiten sowohl als Funktion des hydraulischen Radius als auch des Energieliniengefälles aufgetragen und daraus Proportionalitätsfaktoren abgeleitet. Die Messungen ergaben folgende Abhängigkeiten:

$$v \sim R^{\frac{2}{3}} \quad \text{und} \quad v \sim I^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Gl. 8-11})$$

Während sich für das Energieliniengefälle ein mit den Ableitungen von Darcy-Weisbach übereinstimmender Proportionalitätsfaktor ergibt, weicht die Abhängigkeit vom hydraulischen Radius von den Angaben von Darcy-Weisbach ab. Die von Gauckler-Manning-Strickler abgeleitete (rein empirische) Fließformel lautet:

$$v = k_{st} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I} \quad \text{bzw.} \quad v = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I} \quad (\text{Gl. 8-12})$$

wobei der Beiwert  $n$  nach Manning (wird hauptsächlich im englischsprachigen Raum verwendet) dem reziproken Beiwert  $k_{st}$  nach Strickler (im deutschsprachigen Raum vorwiegend eingesetzt) entspricht.

Trotz den grundsätzlichen Unsicherheiten bei der Verwendung dimensionsbehafteter Beiwerte wie dem  $k_{st}$ -Wert (Einheit  $m^{1/3}/s$ ) hat sich die Verwendung der GMS-Fomel für praktische Anwendungen bewährt und ist auch in den Berechnungsalgorithmen des im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten HN-Modells für den Neckar implementiert. Für die Wahl der Rauheitsbeiwerte liegen eine Vielzahl von Untersuchungen vor, mit denen die Rauheitswirkung der Gewässerberandungen abgeschätzt werden können. Ausgewählte  $k_{st}$ -Werte für natürliche Fließgewässer sind in Tabelle 8-1 aufgeführt

**Tabelle 8-1:**  $k_{st}$ -Werte für natürliche Fließgewässer (aus NAUDASCHER, E. (1992) und CHOW, V.T. (1959))

Beschaffenheit	$K_{st}$ -Wert [ $m^{1/3}/s$ ]
Natürliche Flussbette mit fester Sohle, ohne Unregelmäßigkeiten	40-42
Natürliche Flussbette mit mäßigem Geschiebe	33-35
Natürliche Flussbette, verkrautet	30-35
Natürliche Flussbette, mit Geröll und Unregelmäßigkeiten	30
Natürliche Flussbette, mit starker Geschiebeführung	28
Vorland, Wiese ohne Gestrüpp, kurzes Gras	30-40
Vorland, Wiese ohne Gestrüpp, hoch stehendes Gras	20-33
Vorland mit Gestrüpp, stark verkrautet	15-30

Die Anwendung der Gl. 8-18 setzt voraus, dass die Abweichungen der lokalen Fließgeschwindigkeiten von der mittleren Geschwindigkeit in allen Fließquerschnitten gering sind. Für stark gegliederte Querschnitte oder stark unterschiedlichen Bewuchs kann diese Annahme nicht mehr vertreten werden. In diesem Fall kann der Fließquerschnitt in Teilbereiche mit annähernd gleicher mittlerer Fließgeschwindigkeit eingeteilt werden und der Gesamtabfluss über die Summe der Teilabflüsse berechnet werden.

$$Q = \sum A_i \cdot v_i \quad \text{mit} \quad v_i = k_{st,i} \cdot \left( \frac{A_i}{U_i} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I} \quad (\text{Gl. 8-13})$$

Bei der Verwendung von Gl. 8-19 ist anzumerken, dass der Ansatz von einer Schubspannungsfreiheit in den Trennflächen der Teilabflussquerschnitte ausgeht, was physikalisch nicht korrekt ist und grundsätzlich zu einer Überschätzung der Abfluss-

kapazität führt. Tatsächlich führt der Impulsaustausch zwischen den Teilströmen zu einer Energiedissipation, die, wenn sie in der Wahl der  $k_{st}$ -Werte nicht berücksichtigt wird, zu einer erheblichen Reduktion der Abflussleistung führen kann (vgl. NAUDASCHER, E. (1992)).

In der praktischen Anwendung dient der Rauheitsbeiwert bei eindimensionalen HN-Modellen als Kalibrierungsgröße und wird im Wertebereich der dem Gewässerzustand entsprechenden  $k_{st}$ -Werte so gewählt, dass bei bekannten Abflusszuständen die im HN-Modell berechneten Wasserspiegellagen mit den in der Natur gemessenen Wasserständen übereinstimmen (Modellkalibrierung). Über den Rauheitsbeiwert werden die Energieverluste in einem betrachteten Flussabschnitt derart abgeschätzt, dass alle auftretenden kontinuierlichen Verluste auf die Sohlrauheit zurückgeführt werden. Neben den Einflüssen aus Sohl-, Böschungs- und Vorlandrauheit sind auch Auswirkungen der in den Bestimmungsgleichungen vernachlässigten Sekundärströmungen oder ungleichen Geschwindigkeitsverteilungen über den Querschnitt integriert.

Im Rahmen der hier durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen wurden, bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen, die Stricklerwerte  $k_{st}$  schrittweise in einem plausiblen Wertebereich variiert. Dabei wurde die Rauheit:

- der Vorlandbereiche in einem Wertebereich  $k_{st} \pm 10$  und
- des gesamten Abflussquerschnittes in einem Wertebereich von  $k_{st} \pm 5$

getrennt voneinander untersucht.

Für die Variation der Rauheitsbeiwerte der Vorländer wurde ein relativ großer Wertebereich von  $\pm 10$  Einheiten der  $k_{st}$ -Werte gewählt. Dadurch wird unter anderem dem Umstand Rechnung getragen, dass die Rauheitswirkung des Vorlandbewuchses sowohl von Art und Dichte des Bewuchses abhängt, aber auch in verschiedenen Vegetationsperioden deutliche Unterschiede aufweist. Dies ist leicht verständlich, wenn man sich z.B. die Bewuchssituation eines landwirtschaftlich genutzten Vorlandes vorstellt, das in den Wintermonaten brach liegt, im Sommer jedoch durch den hohen Fruchtstand neben der Sohlrauheit zusätzlich Elemente von Formrauheiten aufweist. Die Abweichungen in den Wasserspiegellagen liegen bei einer Variation der Stricklerwerte um  $\max. \Delta k_{st}=5$  für den gesamten untersuchten Abflussbereich im Bereich von 1 bis 2 Dezimetern, lediglich für extreme Änderungen ergeben sich Wasserspiegelanhebungen, die  $\max.$  bis zu 0,5 Meter betragen können.

Die Variation der Rauheitsbeiwerte für den **gesamten Abflussquerschnitt** beruht auf Angaben aus der Literatur zur Wahl der Strickler-Werte, die für verschiedene Sohl- und Uferstrukturen einen Wertebereich von bis zu ca.  $\pm 5$  Einheiten der  $k_{st}$ -Werte zulassen (vgl. z.B. Tabelle 8-1, CHOW, V. T. (1959), NAUDASCHER, E. (1992)). Aus Abbildung 8-8 ist erkennbar, dass bereits eine Abweichung von  $\Delta k_{st}=2$  in weiten Abflussbereichen eine Erhöhung der Wasserstände von mehreren Dezime-

tern zur Folge hat. Für noch größere Abweichungen von  $\Delta k_{st}=2$  ergeben sich Erhöhungen für extreme Abflüsse von über 80 cm.

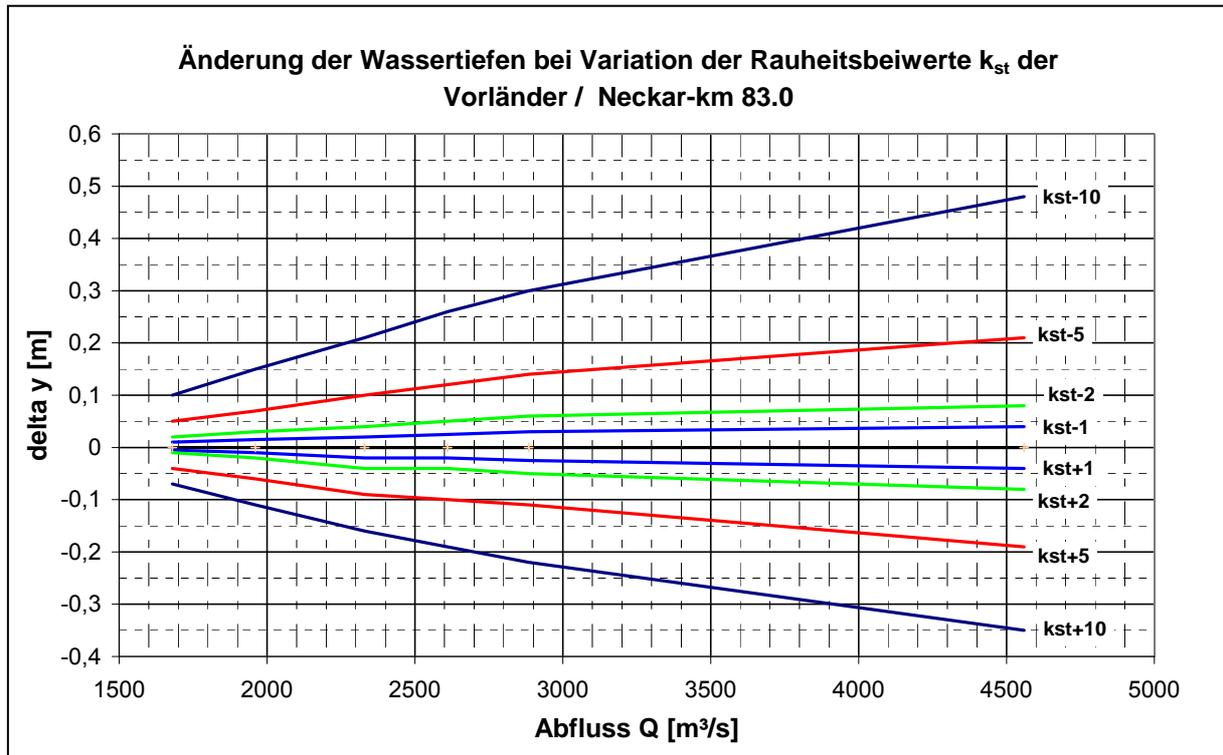


Abbildung 8-7: Sensitivität bzgl. Vorlandrauheiten

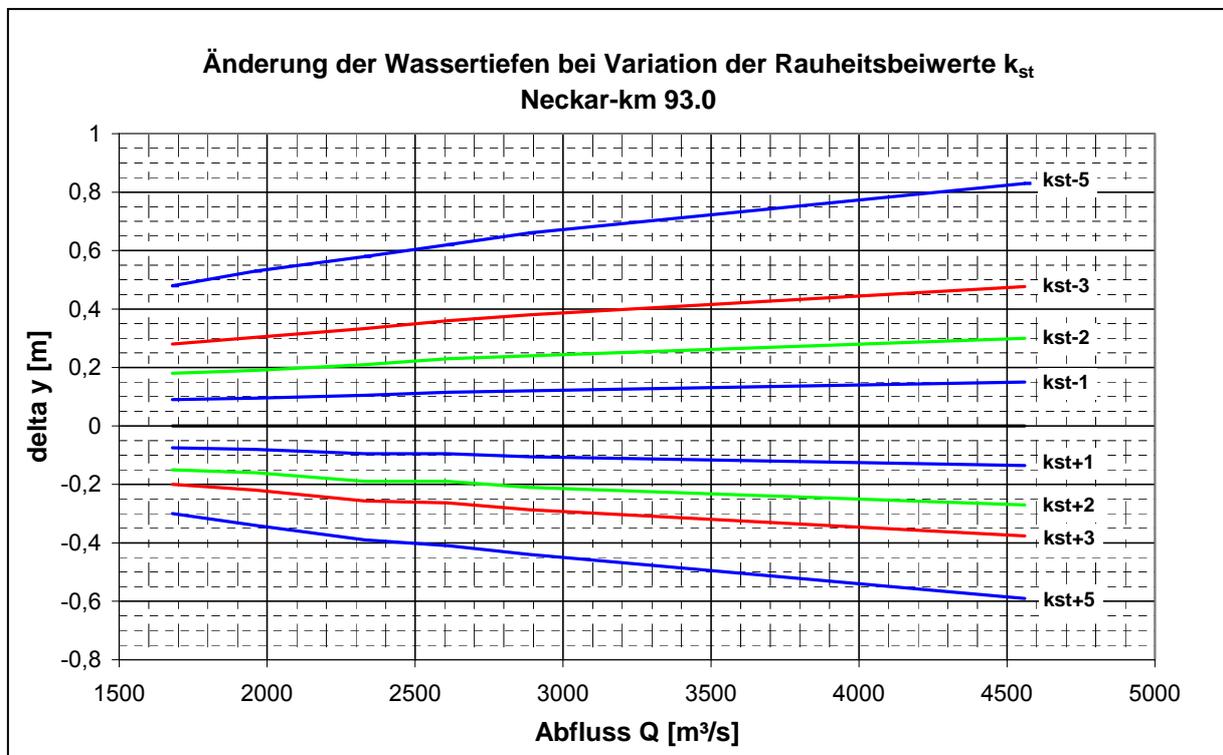


Abbildung 8-8: Sensitivität bzgl. Gesamtrauheiten

## 8.4 Änderung in der Abflussgeometrie

Bei Hochwasser werden oftmals große Mengen von Treibgut mittransportiert, die sich an Brückenbauwerken aufstauen und so zu einer drastischen Reduktion des Abflussquerschnittes und Erhöhung der Wasserspiegel im Oberwasser des Bauwerkes führen.



**Bild 8-1:** Verklausung einer Brücke beim Elbehochwasser2002  
(Foto: Münchner Rück)

Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Berechnungen sollen Anhaltswerte über mögliche Rückstauinflüsse liefern, die sich aus einer Reduzierung des Abflussquerschnittes (durch Verklausung) ergeben können. Hierzu wurde sowohl die Verlegung einzelner Brückenfelder betrachtet als auch eine Einstausituation, bei dem der Wasserstand den Unterzug der Brücke erreicht und der Abfluss unter Druck erfolgt.

Da die berechneten Wasserstandsanhörungen großen Unsicherheiten unterliegen, sind sie als Extremwertabschätzung zu verstehen. Unabhängig von den Unwägbarkeiten, die bei dem betrachteten Extremhochwasser grundsätzlich gegeben sind (Abflussmenge, Menge und Zusammensetzung des „Treibgutes“), könnten genauere Angaben zu den Auswirkungen nur nach einer hydraulischen Grundsatzuntersuchung gemacht werden, die im Rahmen dieser Projektbearbeitung nicht erfolgen kann. Hierbei müssten neben einer exakten geometrischen und hydraulischen Modellierung auch statische Aspekte bzgl. der Standsicherheit berücksichtigt werden.

Die nachfolgend dargestellten Berechnungen wurden exemplarisch für die Eisenbahnbrücke Jagstfeld bei Neckar-Km 101,83 (siehe Bild 8-2 und Bild 8-3) bei einem Abfluss von  $Q = 4560 \text{ m}^3/\text{s}$  durchgeführt. Dies entspricht den historischen Abflussangaben vom Hochwasser 1824 unterhalb der Zuflüsse von Jagst und Kocher, dem bisher größten beobachteten Ereignis am oberen Neckar.

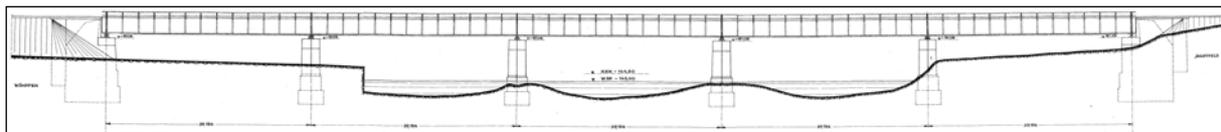


**Bild 8-2:** Brücke Jagstfeld, Blick von UW



**Bild 8-3:** Brücke Jagstfeld, Blick von OW

Die Brücke gliedert sich in insgesamt 5 Brückenfelder, wobei jeweils das äußere Feld auf den Vorländern und drei Felder im Abflussquerschnitt des Neckars liegen (vgl. Abbildung 8-9). Die horizontale Unterkante des Unterzuges liegt auf ca. 152,0 m+NN.



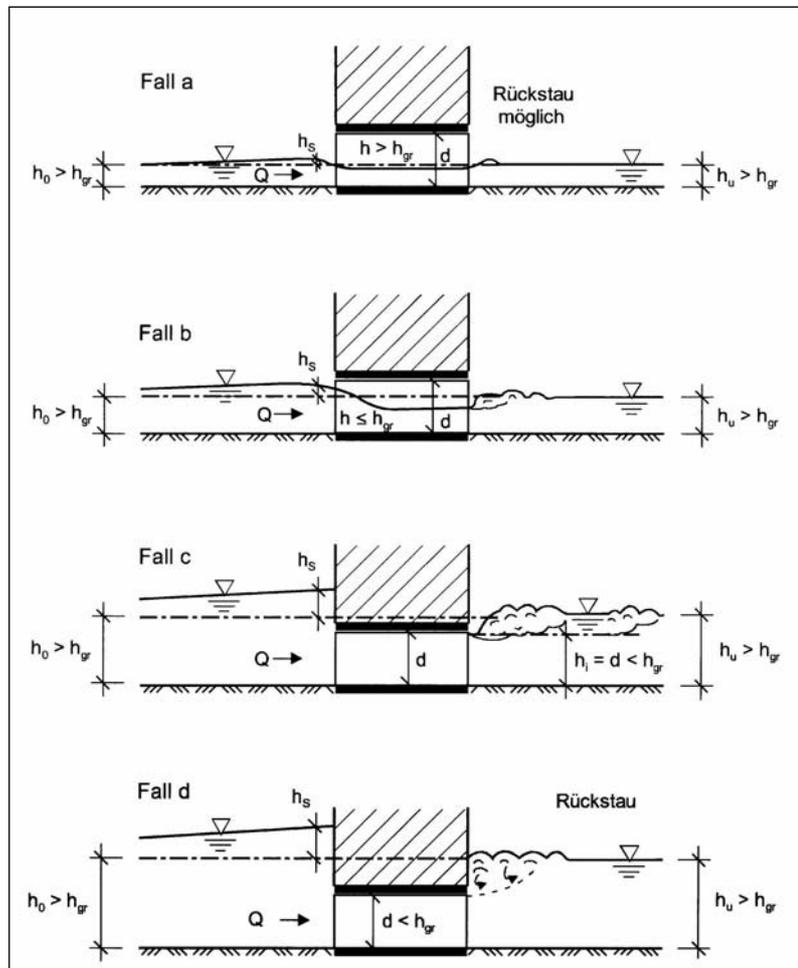
**Abbildung 8-9:** Eisenbahnbrücke Jagstfeld

#### 8.4.1 Ermittlung der Leistungsfähigkeit

Bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeit eines Brückenbauwerkes bzw. den möglichen Auswirkungen auf die Wasserstände oberhalb sind die in Abbildung 8-10 dargestellten 4 Fälle zu unterscheiden.

- Fall a: Der Abfluss unter der Brücke erfolgt mit freier Wasseroberfläche. Die Froude-Zahl ist kleiner 1. In diesem Fall ist der Wasserspiegel oberhalb der Brücke ( $h_0$ ) durch den Wasserstand unterhalb ( $h_U$ ) bestimmt. Ein Rückstau ist möglich.
- Fall b: Der Abfluss unter der Brücke erfolgt mit freier Wasseroberfläche. Die Froude-Zahl ist größer oder gleich 1, es tritt schießender Abfluss auf. Bedingt durch den sich einstellenden Fließwechsel bleibt der Wasserstand  $h_0$  unbeeinflusst durch  $h_U$ , ein Rückstau ist nicht möglich.
- Fall c: Der Abflussquerschnitt unter der Brücke ist vollständig mit Wasser gefüllt. Der Abfluss erfolgt unter Druck. Am Wasseraustritt am unteren Ende der Brücke ist die Froude-Zahl größer oder gleich 1. Wie in Fall b sind Rückstaeinflüsse durch  $h_U$  nicht möglich.

Fall d: Der Abflussquerschnitt unter der Brücke ist vollständig mit Wasser gefüllt. Der Abfluss erfolgt unter Druck. Der Unterwasserstand  $h_U$  ist so hoch, dass kein Fließwechsel auftritt. In diesem Fall erfolgt ein Rückstau, der Oberwasserstand  $h_O$  ist vom Unterwasserstand  $h_U$  beeinflusst.



**Abbildung 8-10:** Abflusstypen bei Durchlässen (nach DIN19 666)

Bei der Betrachtung von Brücken als „kurzen“ Durchlässen sind für die Ermittlung der Energieverluste die Querschnittsänderungen von maßgebender Bedeutung. Nach BLEINES, W. (1968) kann der Abfluss näherungsweise als Abfluss unter einem Schütz berechnet werden zu:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (\text{Gl. 8-14})$$

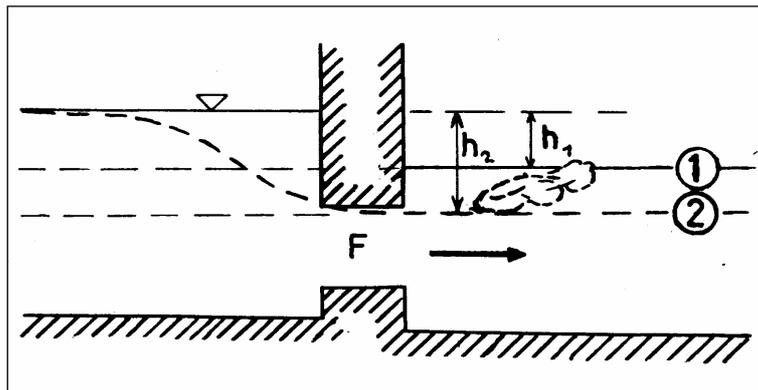


Abbildung 8-11: Abflussbeiwerte unter Schütz

Tabelle 8-2: Abflussbeiwerte nach BLEINES, W. (1968)

Fall	Schwelle	Schwelle hervorragend		Schwelle sohtgleich	
		Wangen scharfkantig	Wangen abgerundet	Wangen scharfkantig	Wangen abgerundet
①	scharfkantig	0,64	0,76	0,72	0,81
	rund	0,68	0,81	0,76	0,85
②	scharfkantig	0,72	0,85	0,80	0,90

Die numerischen Berechnungen des Brückenstaus wurden in Anlehnung an die in Tabelle 8-2 aufgeführten Abflussbeiwerte durchgeführt, wobei der effektive Abflussbeiwert im HN-Modell in Abhängigkeit der Wasserspiegeldifferenz von Ober- zu Unterwasser berechnet wird.

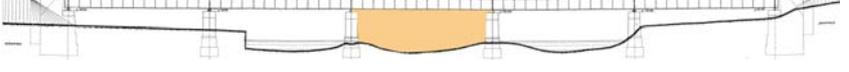
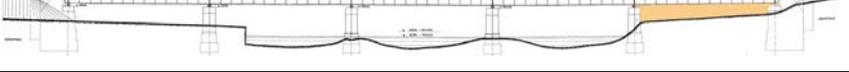
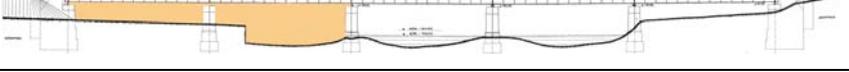
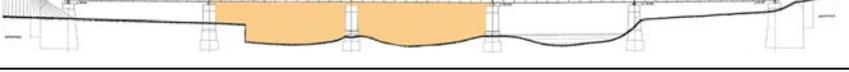
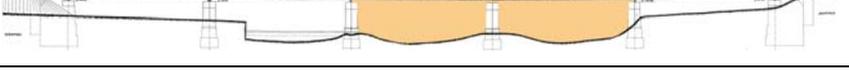
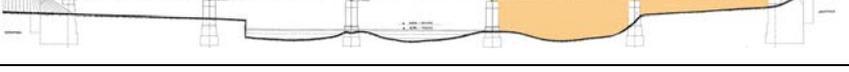
#### 8.4.2 Verlegung einzelner Brückenfelder

Für die Verlegung wurde angenommen, dass jeweils ganze Brückenfelder verlegt sind und als Abflussquerschnitt nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Berechnungen wurden, wie in Tabelle 8-3 dargestellt, für die Verlegung von einzelnen sowie jeweils zwei benachbarten Brückenfelder durchgeführt, wobei darauf hingewiesen wird, dass die Ergebnisse als Extremwertabschätzung zu verstehen sind und keine realistischen Situationen abgebildet werden sollten. Die Berechnungen wurden mit einem nach oben offenen Profil berechnet, d.h. ein möglicher Einstau der Brücke wurde nicht berücksichtigt.

Die resultierenden Wasserspiegelanhebungen betragen bei einem geschlossenen Brückenfeld maximal ca. 20 cm, wobei hier der Einfluss der Randfelder, die auf dem Vorland liegen nur im Zentimeterbereich liegen. Der maximale Aufstau wurde bei zwei geschlossenen Feldern im Hauptabflussbereich des Neckars (Feld 3 und 4) errechnet und beträgt direkt oberhalb der Brücke ca. 1,3 m (vgl. Abbildung 8-12). Der Rückstaeinfluss ist über die gesamte Fließstrecke der Stauhaltung oberhalb der

Brücke zu beobachten und beträgt in einer Entfernung von 5 km noch ca. 0,6 m (50 % des maximalen Wertes).

**Tabelle 8-3:** untersuchte Varianten seitlicher Einengung

Geschlossene Brückenfelder	DB-Brücke Jagstfeld	Max Aufstau [m]
- V16		-
BF 1 (V17)		0,05
BF 2 (V18)		0,14
BF 3 (V19)		0,23
BF 4 (V20)		0,21
BF 5 (V21)		0,04
BF 1+2 (V22)		0,28
BF 2+3 (V23)		0,90
BF 3+4 (V24)		1,33
BF 4+5 (V25)		0,30

Die Anhebung der Wasserspiegel, die sich aus der prozentualen Reduktion der Abflussfläche ergeben, sind in Abbildung 8-13 dargestellt. Die dargestellten Kurven entsprechen dabei jeweils einem Flusskilometer im km-Abstand von der Stelle der Einengung, die Punktwerte stellen die Ergebnisse der Berechnungen gemäß Tabelle 8-3 dar.

Beispiel: Bei der maximal berechneten Einengung von 62 % ergibt sich direkt an der Brücke (Neckar-Km 101,84) ein Aufstau von ca. 1,3 m. In einer Entfernung von 5 km (Neckar-Km 106,9) beträgt die Wasserspiegelanhebung noch ca. 0,6 m.

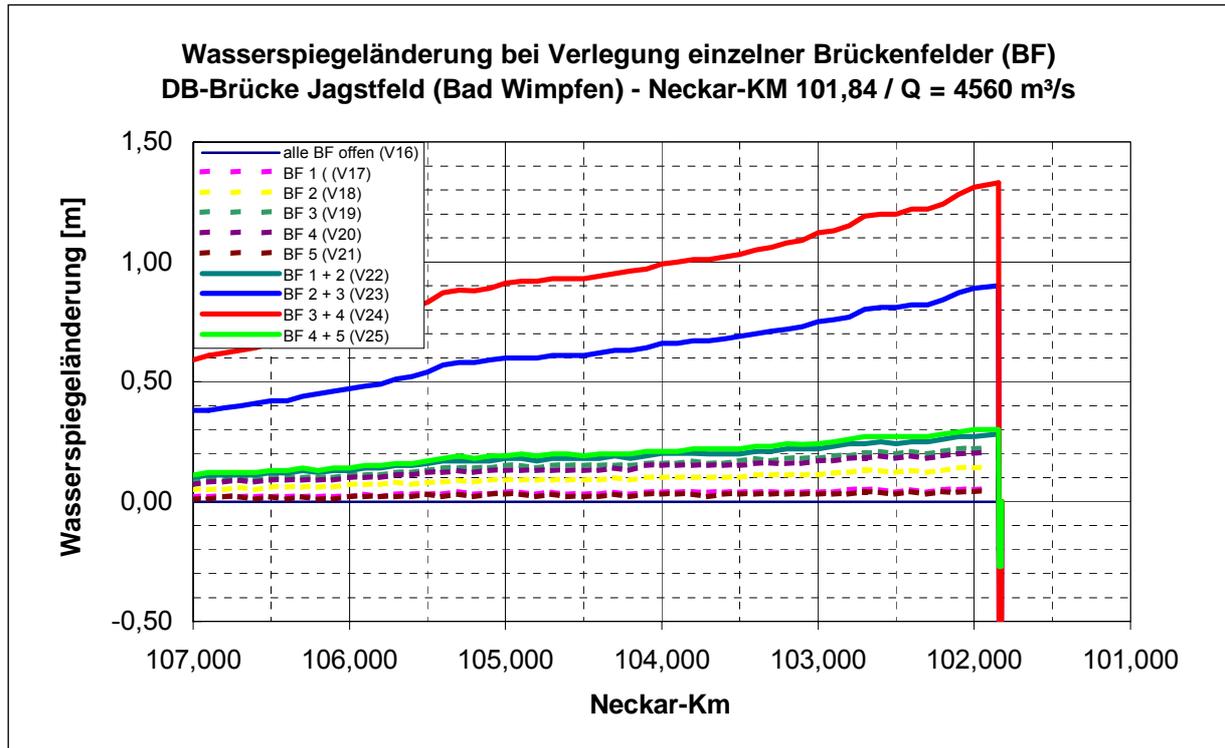


Abbildung 8-12: Wasserspiegelanstieg bei seitlicher Einengung

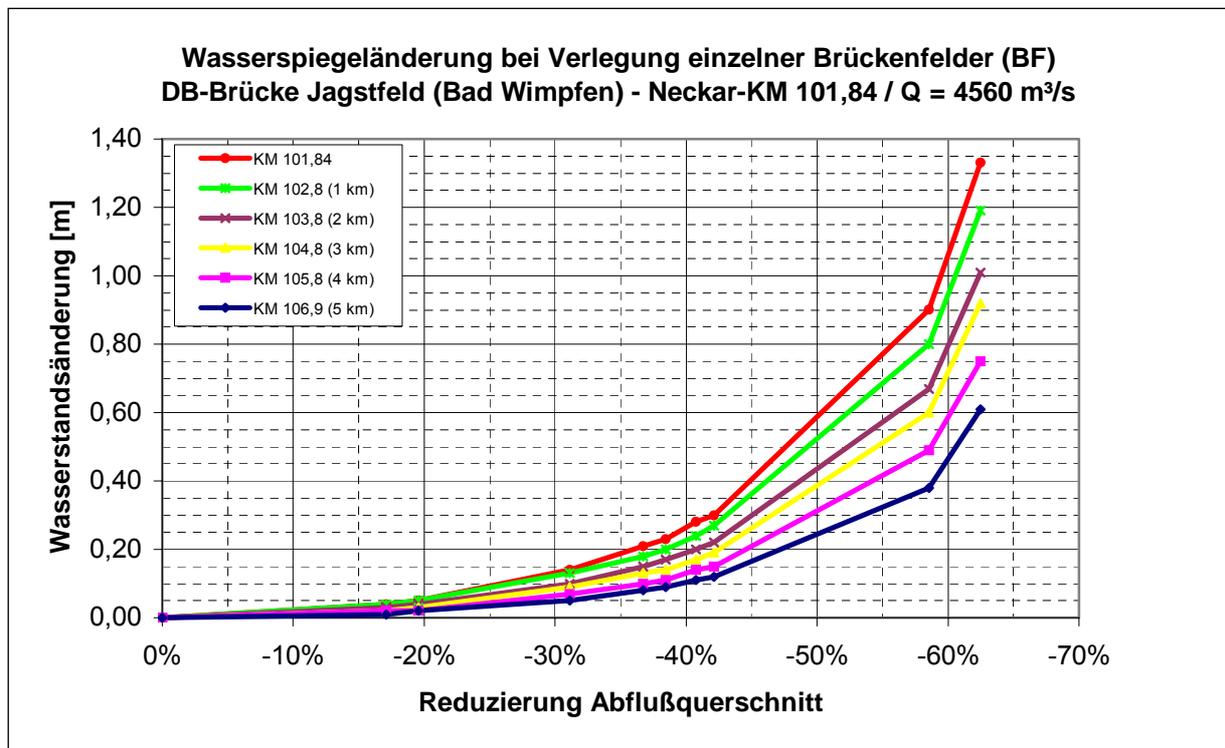


Abbildung 8-13: Wasserspiegelanhebung in Abhängigkeit der prozentualen Änderung des Abflussquerschnittes (horizontal)

### 8.4.3 Einstau des Unterzuges

Zur Ermittlung der Rückstaueffekte, die sich aus einem Einstau ergeben können, wurde die Brücke mit Unterzug modelliert und die Höhenlage der Unterzüge schrittweise verringert (vgl. Tabelle 8-4). Der Abfluss unter der Brücke wird dabei vergleichbar einem unterströmten Schütz berechnet, mit wasserstandsabhängigen Abflussbeiwerten. Erreicht der Wasserstand rechnerisch die Höhe des Unterzuges, wird die Brücke eingestaut und der Abfluss erfolgt unter Druck. Auch hier ist darauf hinzuweisen, dass die Berechnungen keine realistischen Situationen abbilden, sondern vielmehr der Ermittlung von Extremwerten dienen sollen.

In der Praxis kann das Bauwerk jedoch bereits bei kleineren Wasserständen eingestaut werden, wenn durch Pfeilerstau die Wasserspiegel im Nahbereich angehoben werden, oder es durch Treibgut zu einer teilweisen Verklauung kommt.

**Tabelle 8-4:** Varianten vertikaler Einengung (Abflussbeiwert = 0,72)

Variante	Unterkante Unterzug [m+NN]	Reduktion der Abflussfläche (%)	Max. Aufstau [m]
V16	152,0 (Brücke nicht eingestaut)	0	-
V37	151,5	5	0,63
V32	151,0	12	0,86
V39	150,5	20	0,99
V41	150,0	29	1,19
V43	149,5	39	1,43
V45	149,0	50	1,75

In den folgenden Abbildungen sind die resultierenden Wasserspiegeländerungen

- im Längsschnitt bei verschiedenen Höhenlagen der Unterzüge (Abbildung 8-14)
- bei prozentualer Änderung des Abflussquerschnittes an verschiedenen Flusskilometern (Abbildung 8-15)

dargestellt. Ausgehend von den Untersuchungen nach BLEINES, W. (1968) werden als Ausgangswerte für die Berechnungen Abflussbeiwerte von  $\mu = 0,72 - 0,8$  angenommen.

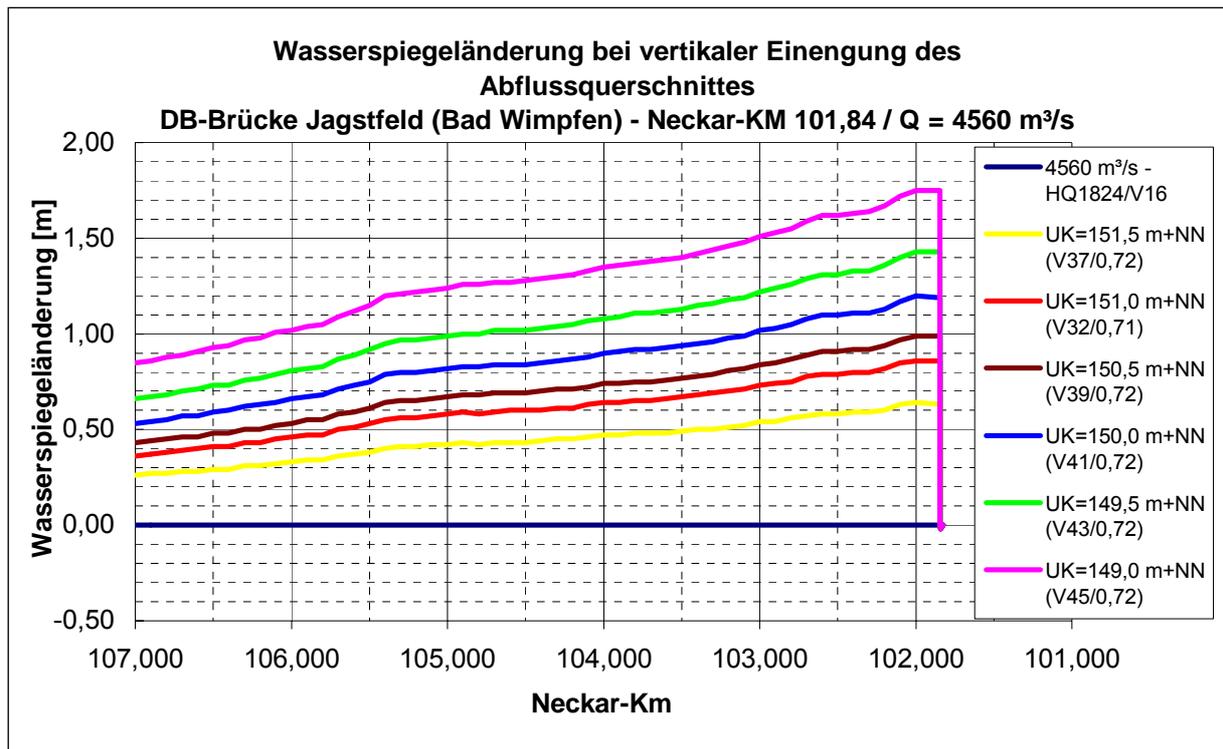


Abbildung 8-14: Wasserspiegelanstieg bei vertikaler Einengung

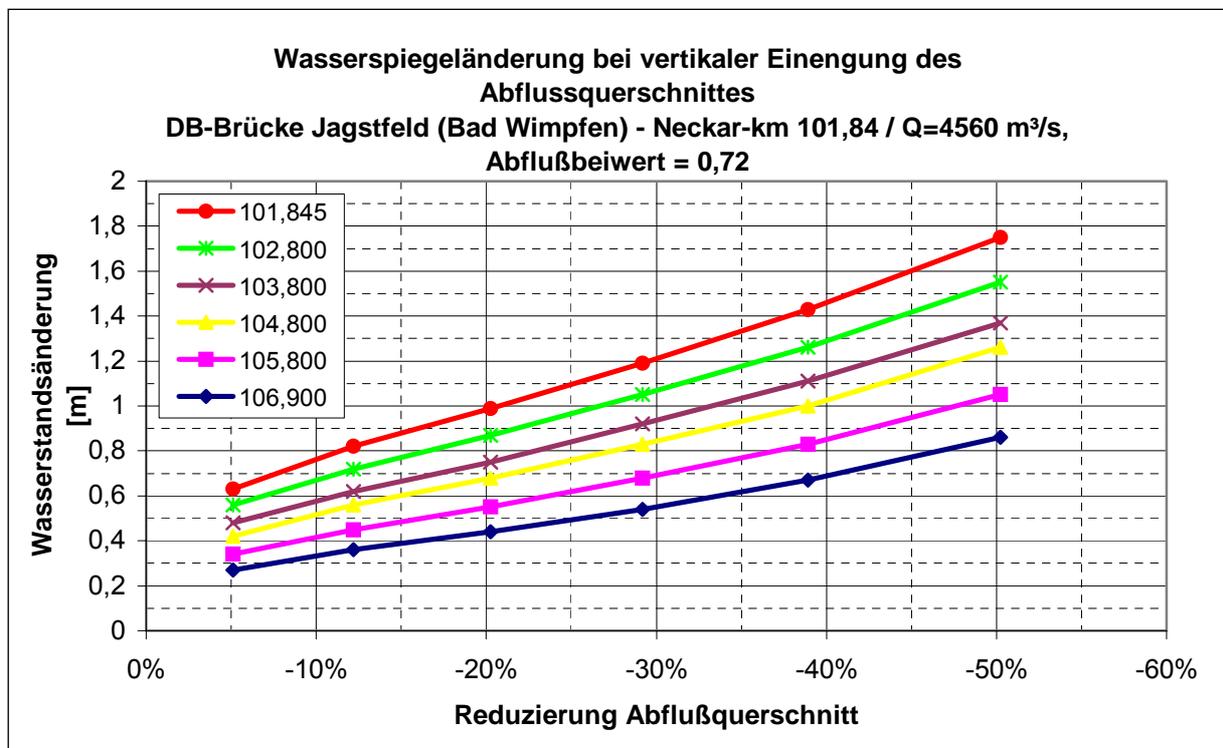


Abbildung 8-15: Wasserspiegelanhebung in Abhängigkeit der prozentualen Änderung des Abflussquerschnittes (vertikal)

## 8.5 Wahl der Wasserstand-Schaden-Funktionen

Die monetäre Bewertung von Hochwasserrisiken stellt einen wesentlichen Gesichtspunkt dar bei Planung von Schutzvorrichtungen und ökonomischen Betrachtungen im Rahmen von Nutzen-Kosten-Analysen. Die Auswirkungen der Abflussprozesse bei Hochwasser werden hierbei, wie an anderer Stelle in dieser Arbeit bereits erläutert, über den funktionalen Zusammenhang zwischen den auftretenden Wasserständen und den dadurch verursachten monetären Schadenswirkungen berechnet.

In mikroskaligen Analysen muss grundsätzlich jedem betrachteten Objekt eine Schadensfunktion zugeordnet werden. Die Schadensfunktion z.B. eines Wohnhauses spiegelt die Anfälligkeit (Vulnerabilität) gegen Vernässung in Verbindung mit der Verteilung der Vermögenswerte innerhalb und außerhalb des Gebäudes wieder. Es ist offensichtlich, dass durch die individuelle Gestaltung der Gebäude eine Vielzahl von Parametern in der Wahl der Schadensfunktion berücksichtigt werden müssten, z.B.

- Gebäudetyp (Art der Nutzung, Größe)
- Bauweise, Alter
- Ausstattungsgrad
- Nutzung einzelner Geschosse (Keller-, Erdgeschoss)
- Art und Anzahl von Nebengebäuden
- Wertigkeit des Inventars
- Topografische, geodätische Informationen (Geländehöhe, Hochwasserschwelle)
- ...

Neben den gebäudespezifischen Parametern gibt es noch eine Vielzahl weiterer Faktoren, die Einfluss auf die Höhe der verursachten Schäden haben. Zum Beispiel wird nach PENNING-ROUSELL, E., FORDHAM, M. (1994) wird die Vulnerabilität von Hausgemeinschaften (Gebäude und Personen) von folgenden Faktoren abhängig:

$$V = f\left[\left(\frac{A}{H, S, I, C, F}\right), \left(\frac{S_c, S_b, I_t}{S_t, R_o}\right), (D_e, V, D_t, W, S_d, S_t, P_t, R), \left(\frac{1}{W_o, W_t, W_a}\right), (T_r, R_a, R_q)\right]$$

mit den in Tabelle 8-5 aufgeführten Komponenten und Variablen.

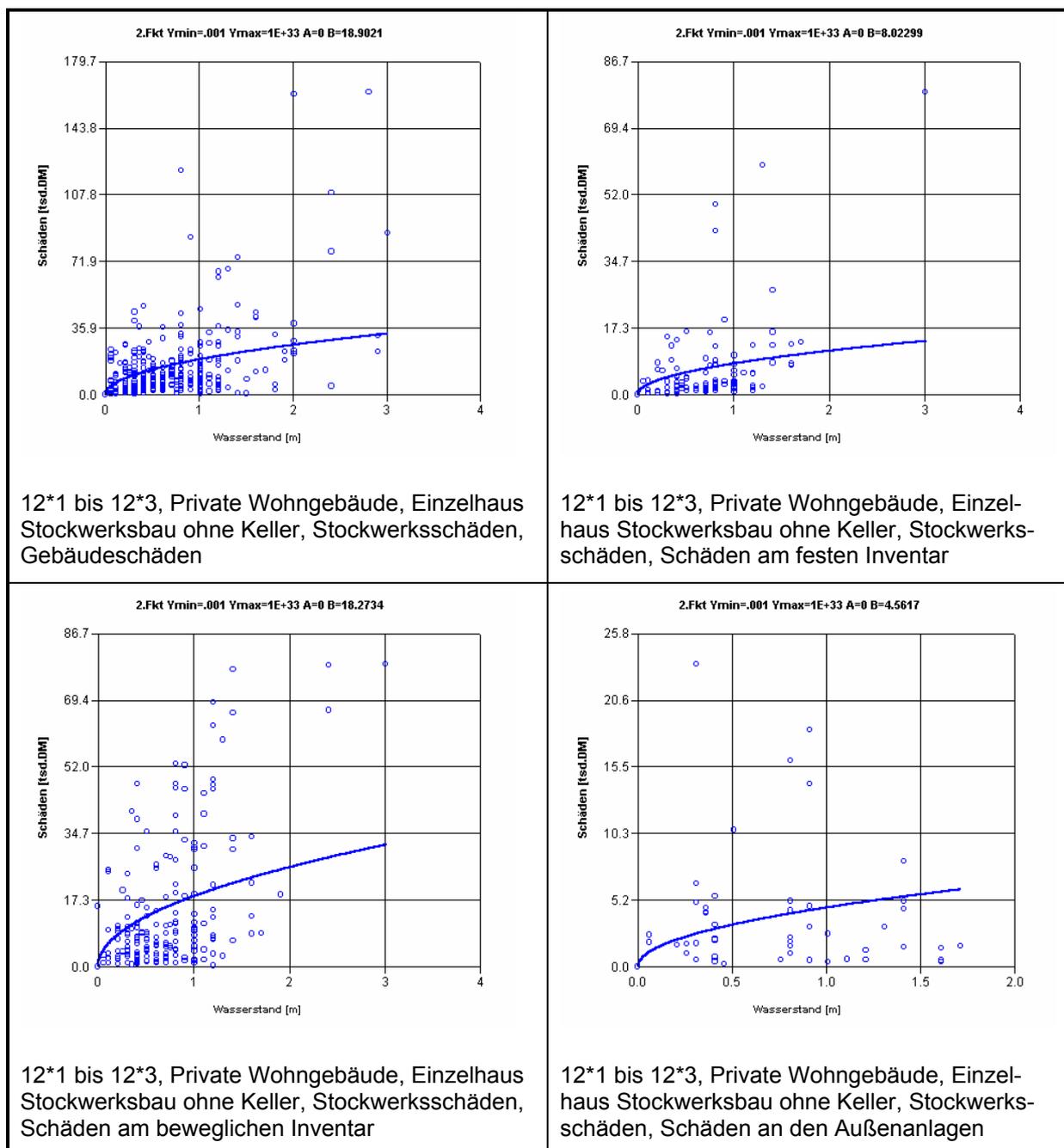
**Tabelle 8-5:** Schaden beeinflussende Parameter (aus PENNING-ROWSELL, E., FORD-HAM, M. (1994))

Parameter	Variable
Soziale / Ökonomische Komponenten	A = Altersstruktur der Hausgemeinschaft H = Gesundheit/Mobilität der Hausgemeinschaft S = Ersparnisse I = Einkommen C = soziale Bindung zur Gemeinschaft F = Bewusstsein über Hochwassergefahr
Gebäudespezifische Komponenten	S <sub>c</sub> = Schadensanfälligkeit des Inventars S <sub>b</sub> = Schadensanfälligkeit der Gebäudestruktur I <sub>t</sub> = Zeit für Beseitigung infrastruktureller Schäden S <sub>t</sub> = Anzahl der Stockwerke R <sub>o</sub> = Widerstandsfähigkeit der Gebäudestruktur
Hochwasserspezifische Komponenten	D <sub>e</sub> = Wassertiefe V = Fließgeschwindigkeit D <sub>t</sub> = Hochwasserdauer W = Einfluss von Wind und Wellen S <sub>d</sub> = Sedimentfracht S <sub>t</sub> = Sedimentgröße V = Verschmutzungsgrad / Kontamination des Wassers R = Anstiegsgeschwindigkeit des Wasserstandes
Komponenten der (Vor-) Warnung	W <sub>o</sub> = Vorhandensein einer HW-Warnung W <sub>t</sub> = Vorwarnzeit W <sub>a</sub> = Informationen zum Verhalten bei HW
Hilfsmaßnahmen	T <sub>r</sub> = Zeitdauer bis zum Eintreffen von Hilfe R <sub>a</sub> = Anzahl der Helfer R <sub>q</sub> = "Qualität" der Hilfsmaßnahmen

Aus der voranstehenden Aufzählung, die nur einen Teilbereich aller möglichen Einflussparameter darstellt wird deutlich, dass grundsätzlich jedem betrachteten Objekt eine individuelle Schadensfunktion zuzuordnen ist, was jedoch aufgrund des damit verbundenen Aufwandes nicht möglich ist. Neben der Ermittlung der (sich zeitlich verändernden) Werte müssen hierbei auch Vorsorgemöglichkeiten der Bewohner (Verlagerung hochwertiger Gegenstände in hochwasserfrei gelegene Gebäudebereiche) sowie die vorhandene Vorwarnzeit berücksichtigt werden.

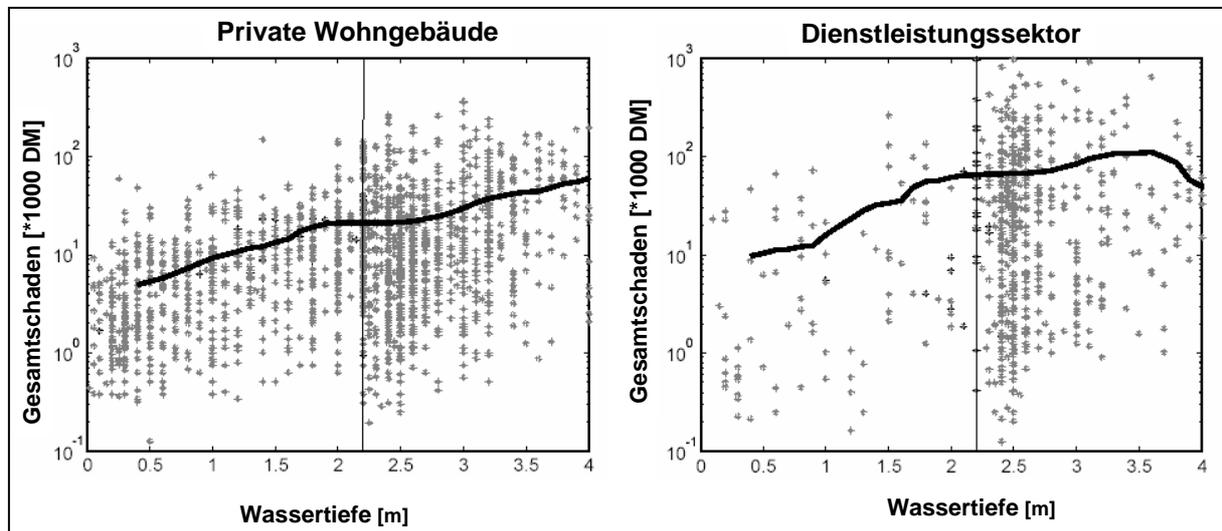
Aus praktischen Gesichtspunkten heraus werden bei Schadenspotenzialanalysen einzelnen Gebäudeklassen jeweils gleiche Schadensfunktionen zugewiesen, was jedoch zu einer mehr oder weniger großen Unsicherheit bzgl. der Genauigkeit der Berechnungsergebnisse führt. Abbildung 8-16 zeigt am Beispiel ausgewählter privater Wohngebäude die Ergebnisse der Auswertung der HOWAS-Datenbank, aus der man den Unsicherheitsbereich der ermittelten Schadensfunktion erkennen kann. Die

Abbildungen zeigen die ermittelten Schadensfunktionen für Gebäude, Inventar sowie Schäden an Außenanlagen für den Gebäudetyp: private Wohngebäude, Einzelhaus, Stockwerksbau ohne Keller. Neben der Streuung der Einzelwerte hat auch die Belegung der Stichprobe Einfluss auf die Genauigkeit der ermittelten Funktion. Als Funktionstyp wurde in dem abgebildeten Beispiel die quadratische Wurzelfunktion verwendet.



**Abbildung 8-16:** Ergebnisse der Auswertung der HOWAS-Datenbank (aus BUCK, W., MERKEL, U (1998))

Weitergehende Untersuchungen zur Unsicherheit bei der Wahl der Schadensfunktion auf Basis der HOWAS-Datenbank wurden u.a. von MERZ, B. ET AL. (2004) durchgeführt. Auf der linken Seite der Abbildung sind Daten und Ergebnis für private Wohngebäude, auf der rechten Seite für Gebäude aus dem Dienstleistungsbereich dargestellt.



**Abbildung 8-17:** Anpassung einer nicht-parametrischen Epanechnikov-Kernel-Funktion an die Daten der HOWAS-Datenbank, Bandbreite = 0,6 m (aus MERZ, B. ET AL. (2004)).

## 8.6 Einfluss möglicher Klimaänderung

Zur Bemessung von Hochwasserschutzanlagen und Beurteilung und Überprüfung des Schutzgrades werden als Bemessungsgrundlagen Hochwasserereignisse mit einer bestimmten Eintritts- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit verwendet. Im Bereich von bebauten Gebieten wird der Schutzgrad üblicherweise auf ein statistisch einmal in 100 oder 200 Jahren auftretendes Hochwasser ausgelegt (HQ100 bzw. HQ200). Die den Jährlichkeiten entsprechenden Scheitelabflusswerte werden über Verfahren der Extremwertstatistik aus vorhandenen Beobachtungszeitreihen an Pegeln abgeleitet. Die extremen Wetterereignisse der letzten Jahre (Hochwasser 2002 an Elbe und Donau und Nebenflüssen, Trockenheit im Sommer/Herbst 2003) haben die Frage aufgeworfen, ob diese Erscheinungen auf eine Änderung der klimatischen Verhältnisse zurückzuführen sind. Um die Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft zu untersuchen, wurde 1998 von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern sowie dem Deutschen Wetterdienst das Kooperationsprojekt KLIWA (**K**limaveränderung und Konsequenzen für die **W**asserwirtschaft) ins Leben gerufen. Als Gegenstand der Kooperation wurden folgende Ziele formuliert:

- Ermittlung bisheriger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts
- Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt

- Messprogramm zur Erfassung künftiger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts
- Öffentlichkeitsarbeit.

Inzwischen liegt der 4. Bericht vor, indem u.a. der Einfluss der Klimaszenarien für das Einzugsgebiet des Neckars vorgestellt wird (IHRINGER, J. (2004)). Darin wurde auf Basis der Tagesmittelwerte des Abflusses das mittlere Hochwasserabflussverhalten betrachtet. Über Verfahren der Extremwertstatistik wurden die Auswirkungen auf die Abflusskennwerte ermittelt. Die Berechnungen haben gezeigt, dass mit dem zugrunde gelegten Klimamodell eine deutliche Zunahme der Scheitelabflüsse insbesondere im Bereich der kleinen bis mittleren Hochwasser zu erwarten ist. Für Ereignisse mit geringerer Eintrittswahrscheinlichkeit wird der Einfluss geringer.

Als Empfehlung wird die Einführung eines Faktors „Klimaänderung“ vorgeschlagen, der von der Jährlichkeit des betrachteten Ereignisses gewählt werden sollte. Für den Bemessungsfall ergibt sich der Scheitelabfluss dann zu:

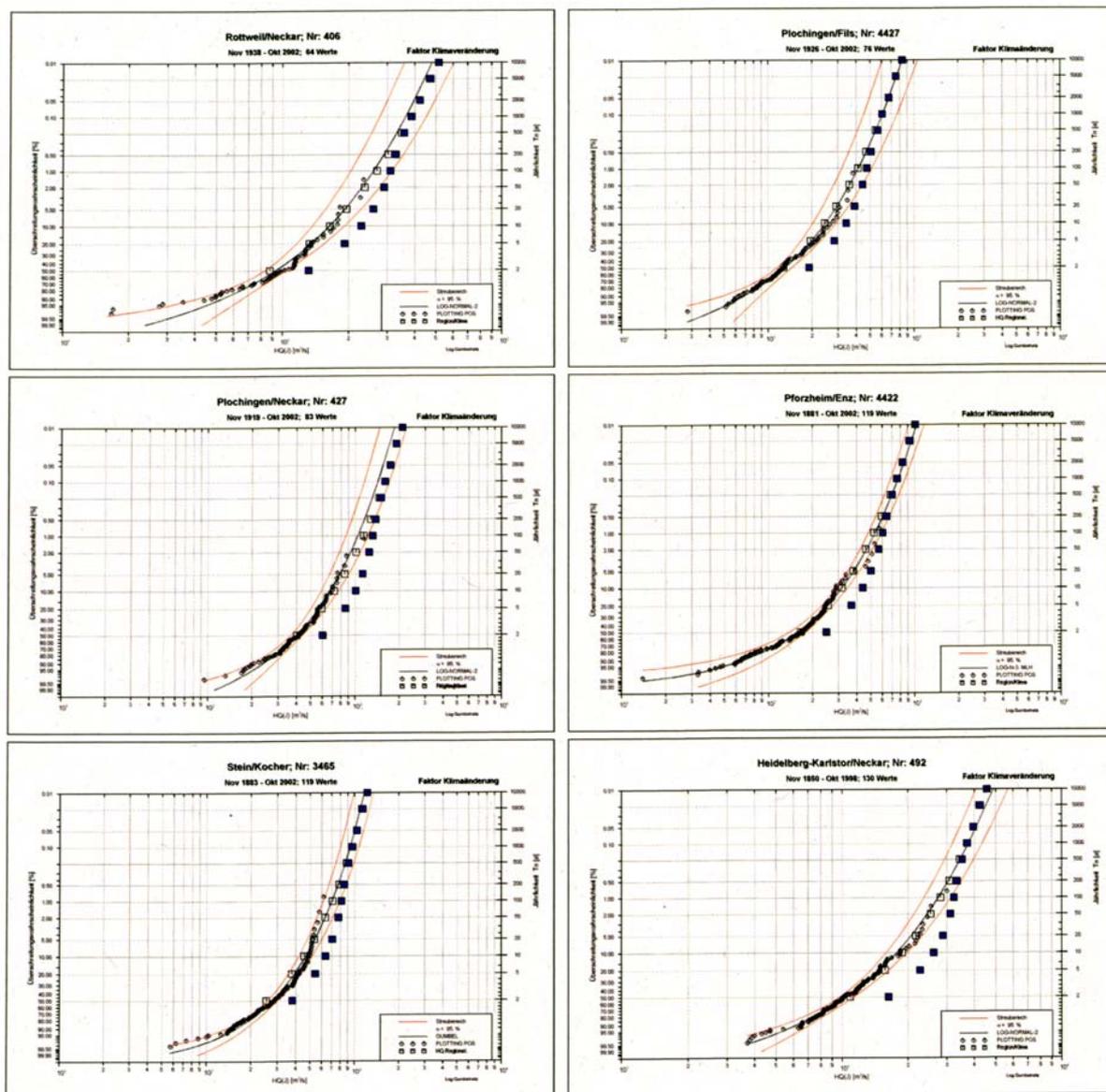
$$HQ_{T,K} = f_{T,K} \cdot HQ_T \quad (\text{Gl. 8-15})$$

Für das Einzugsgebiet des Neckars ergeben sich aus den Berechnungen die in Tabelle 8-6 aufgeführten Werte für den Klimafaktor. Die größte Abflusserhöhung ergibt sich demnach für häufige Ereignisse. Mit zunehmender Wiederkehrdauer nimmt der Faktor stetig ab und beträgt bei dem in vielen Fällen als Bemessungsereignis herangezogenen HQ100 noch  $f_{T,K} = 1,15$ . Für Ereignisse größer als HQ1000 ist keine Abflussveränderung zu erwarten.

**Tabelle 8-6:** Faktor „Klimaänderung“  $f_{T,K}$  für Hochwasserereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit im Einzugsgebiet des Neckars (aus IHRINGER, J. (2004))

Jährlichkeit [a]	Klimafaktor $f_{T,K}$
2	1,5
5	1,45
10	1,4
20	1,33
50	1,23
100	1,15
200	1,08
500	1,03
>1000	1,0

Abbildung 8-18 zeigt die Auswirkungen des Klimafaktors auf die Pegelstatistik ausgewählter Pegel im Einzugsgebiet des Neckars.



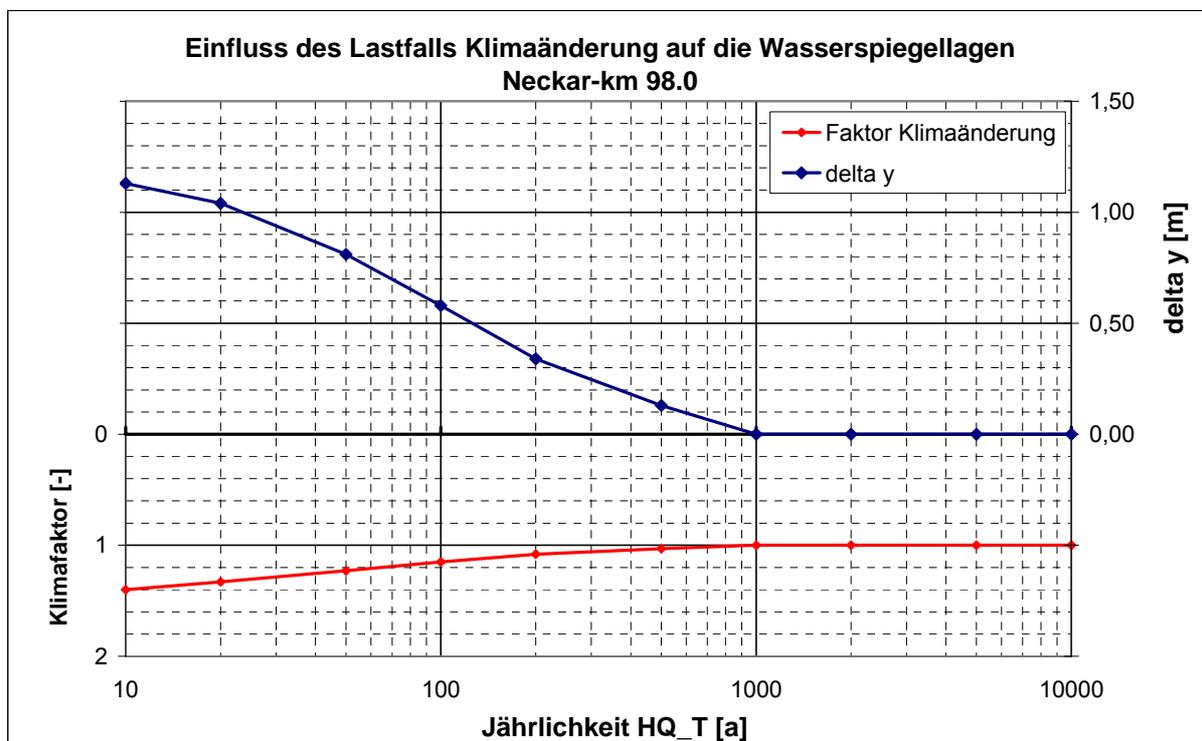
**Abbildung 8-18:** Durch den Faktor „Klimaänderung“ veränderte Pegelstatistik ausgewählter Pegel im Neckareinzugsgebiet (aus IHRINGER, J. (2004))

Die Auswirkungen der veränderten Abflusskennwerte wurden für die Stauhaltung Gundelsheim näher untersucht. Die Stauhaltung erstreckt sich von der Staustufe Gundelsheim (Neckar-Km 93,8) bis zum Wehr Neckarsulm (Neckar-Km 107,15). Die Auswirkungen auf die Wasserstandsänderungen werden exemplarisch für Neckar-Km 98,0 dargestellt.

Für die untersuchten Jährlichkeiten ergeben sich die in Tabelle 8-7 dargestellten Änderungen der Scheitelabflussmengen, die Auswirkungen auf die Wasserstände sind in Abbildung 8-19 dargestellt.

**Tabelle 8-7:** Einfluss des Faktors „Klimaänderung“  $f_{T,K}$  auf die Scheitelabflüsse in der Stauhaltung Gundelsheim bei Neckar-km98,0 (unterhalb Mündung Jagst und Kocher)

Jährlichkeit [a]	Klimafaktor $f_{T,K}$	Scheitelabfluss Ist-Zustand [m³/s]	Scheitelabfluss mit Klimafaktor [m³/s]	Delta Q [m³/s]
10	1,4	1680	2350	670
20	1,33	1960	2600	640
50	1,23	2330	2870	540
100	1,15	2610	3000	390
200	1,08	2885	3120	235
500	1,03	3200	3300	100
1000	1,0	3400	3400	0
2000	1,0	3655	3655	0
5000	1,0	4015	4015	0
10000	1,0	4240	4240	0

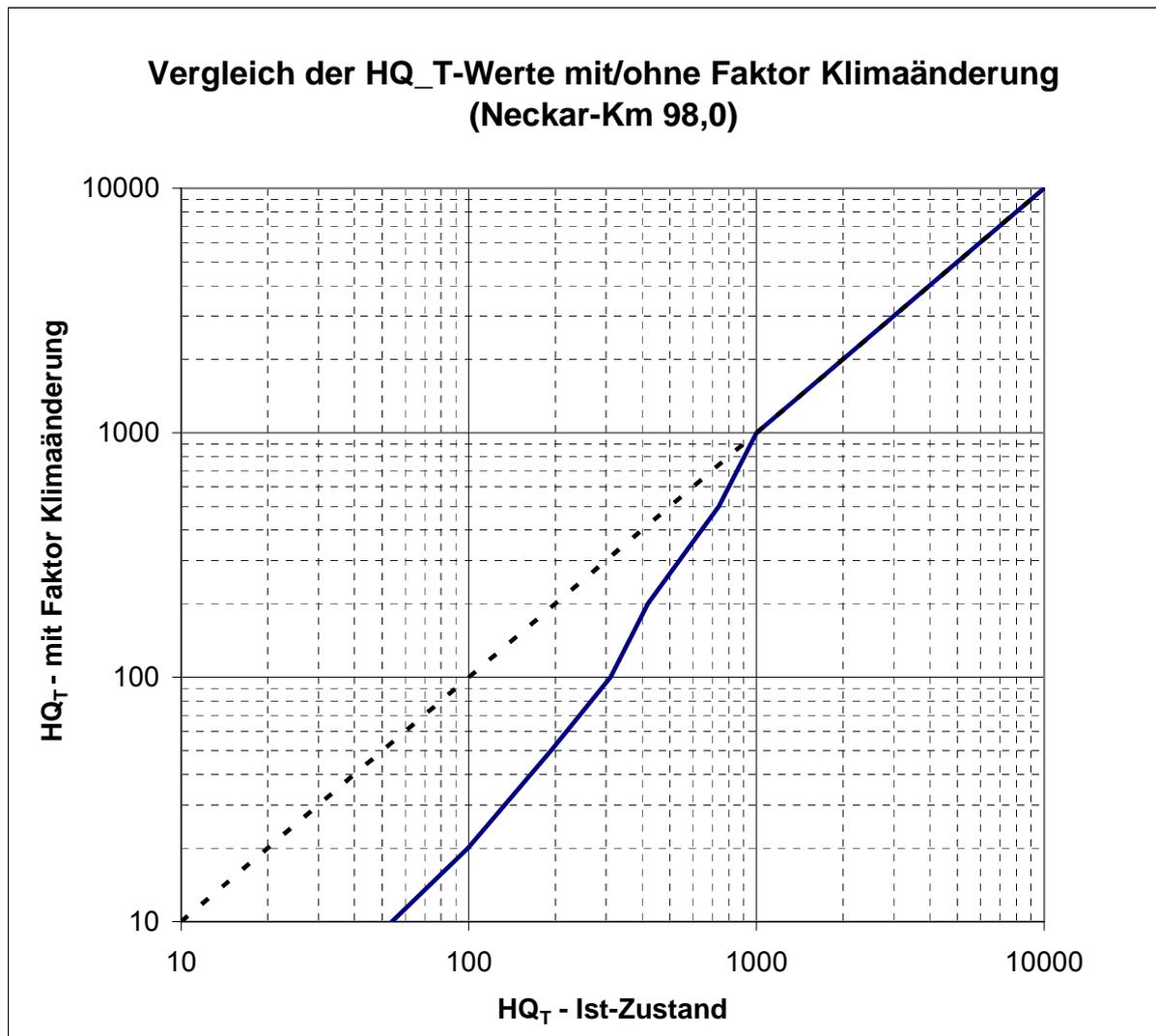


**Abbildung 8-19:** Durch den Faktor „Klimaänderung“ veränderte Wasserstände bei Neckar-km 98,0

Die Erhöhung der Scheitelabflüsse führt insbesondere bei häufigen Hochwasserereignissen zu einer signifikanten Erhöhung der Wasserstände. Für ein Ereignis der Jährlichkeit  $HQ_{10}$  ergibt sich durch den Faktor „Klimaänderung“ ein erhöhter Schei-

telabfluss von  $\Delta Q=670 \text{ m}^3/\text{s}$ , was zu einer Erhöhung der Wasserstände um mehr als 1,1 m führt. Auch beim 100-jährlichen Ereignis mit einer relativ geringen prozentualen Änderung der Abflussmenge um 15 % ist noch ein Anstieg der Wasserstände um ca. 60 cm zu erwarten.

Die Konsequenzen einer möglichen Klimaänderung auf die Bemessung von Schutzanlagen bzw. die „Neubewertung“ eines Hochwasserschutzgrades wird deutlich, wenn die Änderungen der Scheitelabflüsse rückgerechnet werden auf die zugehörigen Jährlichkeiten. In Abbildung 8-20 sind die  $HQ_T$ -Werte des Ist-Zustandes den über die erhöhten Scheitelabflüsse berechneten Jährlichkeiten gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass z.B. ein Schutz gegen ein  $HQ_{100}$  im heutigen Zustand nach einer möglichen Klimaänderung nur noch Schutz gegen ein 20-jährliches Hochwasser gewährleistet. Will man bei der Planung einer Schutzmaßnahme auf  $HQ_{100}$  den Klimaeinfluss berücksichtigen, so bedeutet dies, dass der Schutzgrad auf ein 300-jährliches Ereignis im heutigen Zustand zu bemessen ist.



**Abbildung 8-20:** Durch den Faktor „Klimaänderung“ veränderte Wasserstände bei Neckar-km 98.

### 8.7 Auswirkungen der Unsicherheiten auf die Schadenssummen

Zur Berechnung des Einflusses der Unsicherheiten auf die Schadenssummen wurden die Schwankungsbereiche der Eingangsparameter wie folgt festgelegt:

- Abflussbereich Q:  $\Delta Q = \pm 25 \%$
- Rauheit von Flussschlauch und Vorländer  $k_{st,g}$ :  $\Delta k_{st,g} = \pm 5$
- Rauheit der Vorländer  $k_{st,v}$ :  $\Delta k_{st,v} = \pm 10$
- Faktor Klimaänderung  $f_{T,K}$ :  $f_{T,K} = 1,4 - 1,0$
- Parameter Schadensfunktion B:  $\Delta B = \pm 100 \%$

Die Berechnungen der Schäden erfolgten unter Verwendung einer aus der HOWAS-Datenbank ermittelten Schadensfunktion vom Typ

$$Y = B \cdot \sqrt{x} \quad (\text{Gl. 8-16})$$

Als Beispiel sind in Abbildung 8-21 die aus der Wahl der Schwankungsbereiche resultierenden „Unsicherheitsbänder“ bzgl. der berechneten Wasserstände für den Neckar-Km 98,0 dargestellt.

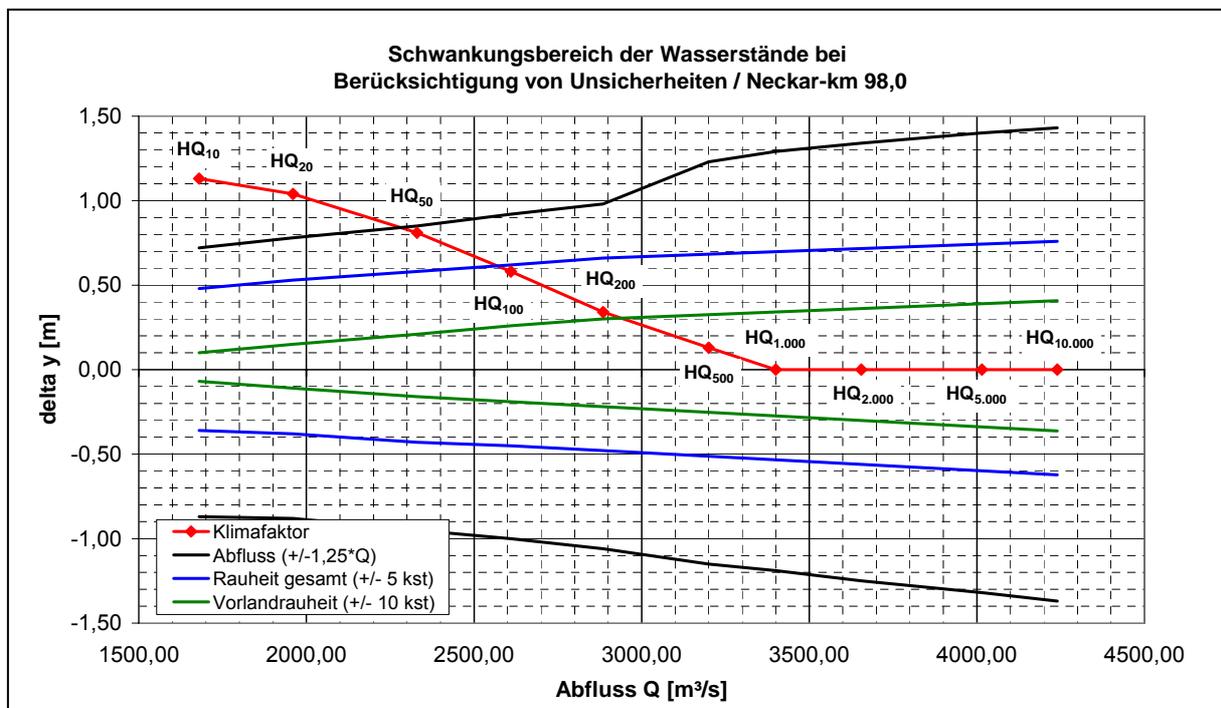


Abbildung 8-21: Schwankungsbereich der Wasserstände Neckar-km 98.

Im Bereich kleinerer Hochwasser bis ca. zum  $HQ_{50}$  dominiert der Einfluss einer möglichen Klimaänderung, der aber mit zunehmendem Scheitelabfluss weiter abnimmt; für seltene Ereignisse ( $> HQ_{500}$ ) ist dagegen keine weitere Verschärfung der Hochwassersituation zu erwarten. Alle anderen Unsicherheitseinflüsse dagegen nehmen proportional zur Abflussmenge stetig zu. Der größte Einfluss ist dabei bei einer erhöhten Wasserführung feststellbar, die Berücksichtigung einer erhöhten Vorlandrauigkeit ist dagegen vergleichsweise gering.

Als „ökonomische Größe“ hat die Wahl der Schadensfunktion bzw. deren Parameter keinen Einfluss auf die Wasserstände. Ein Vergleich mit den „hydrologischen und hydraulischen Auswirkungen“ kann über eine Darstellung der berechneten Schadenssummen erfolgen. Werden die berechneten „Schäden mit Unsicherheit“ in Relation zu den ursprünglich berechneten Werten gesetzt, so können Faktoren  $f_{U,T}$  definiert werden, die einen Vergleich der einzelnen Unsicherheiten zulassen.

$$S_U(HQ_T) = f_{U,T} \cdot S(HQ_T) \tag{Gl. 8-17}$$

Um einen Vergleich mit Originalwerten herstellen zu können, ist in Abbildung 8-22 die Schadensentwicklung in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode dargestellt. Die Einzelwerte sind dabei auf den Schadenwert für das 100-jährliche Ereignis normiert.

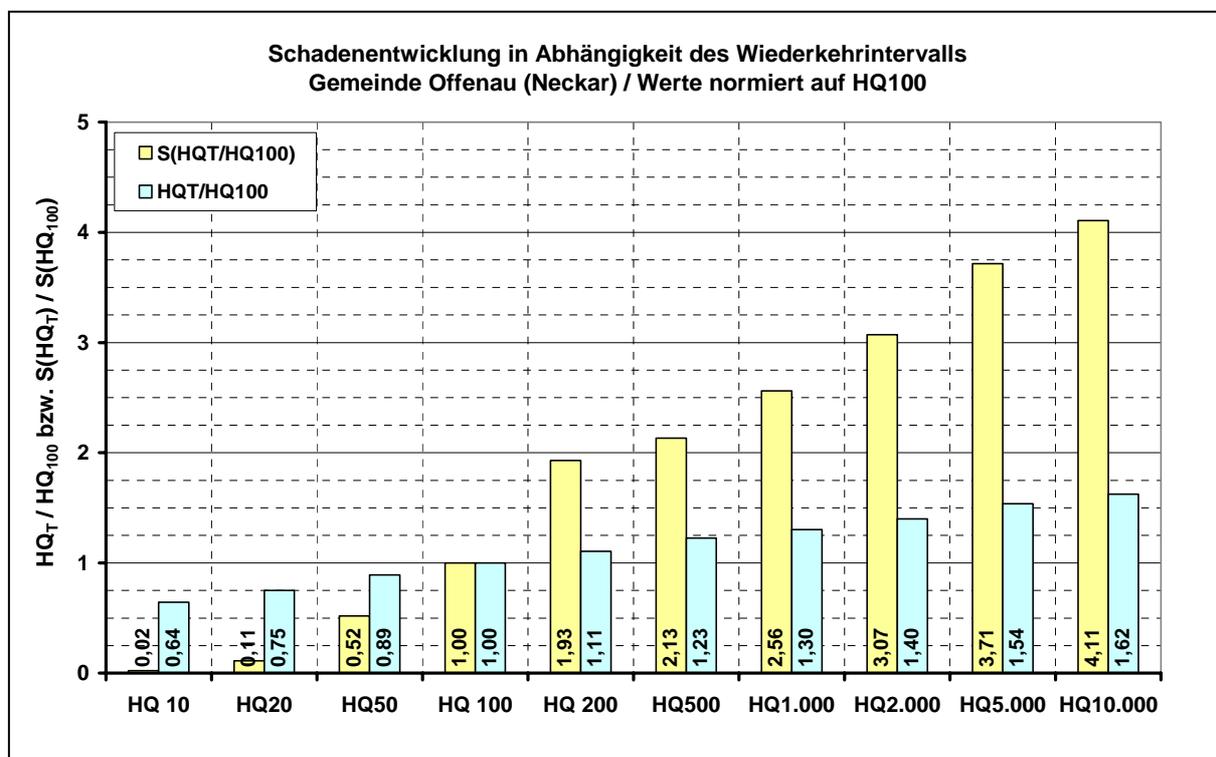


Abbildung 8-22: Schadensentwicklung Gemeinde Offenau / Neckar.

Die maximale Schadenssumme für ein 10.000-jährliches Ereignis ist in etwa um einen Faktor 4 höher als beim Referenzereignis HQ<sub>100</sub>. Dies gilt allerdings nur unter der Annahme, dass die gewählte Schadensfunktion auch bei extremen Ereignissen anwendbar ist. Der größte relative Anstieg der Schadenssummen ist im Bereich der unteren bis mittleren Abflüsse zu erwarten. So ist z.B. bei HQ<sub>200</sub> mit einem annähernd doppelt so hohen Schaden zu rechnen als bei HQ<sub>100</sub>, obwohl der Abfluss nur ca. 11 % höher liegt. Aufgrund der topografischen Verhältnisse nehmen die Anzahl der betroffenen Gebäude und somit auch die resultierenden Schadenssummen bei Ereignissen größer als dem HQ<sub>200</sub> im Verhältnis geringer zu als in den unteren Abflussbereichen. Demgegenüber beträgt die Abflusserhöhung zwischen HQ<sub>500</sub> und HQ<sub>1000</sub> ca. 6%, die Erhöhung der Schäden entspricht in etwa 20% des Schadens beim HQ<sub>500</sub>.

Da der Gebäudebestand in der betrachteten Gemeinde relativ homogen ist (der überwiegende Teil der betroffenen Bebauung sind Wohngebäude) entspricht der Verlauf des Schadensanstieges in etwa dem Verlauf der Anzahl der betroffenen Gebäude (siehe Abbildung 8-23).

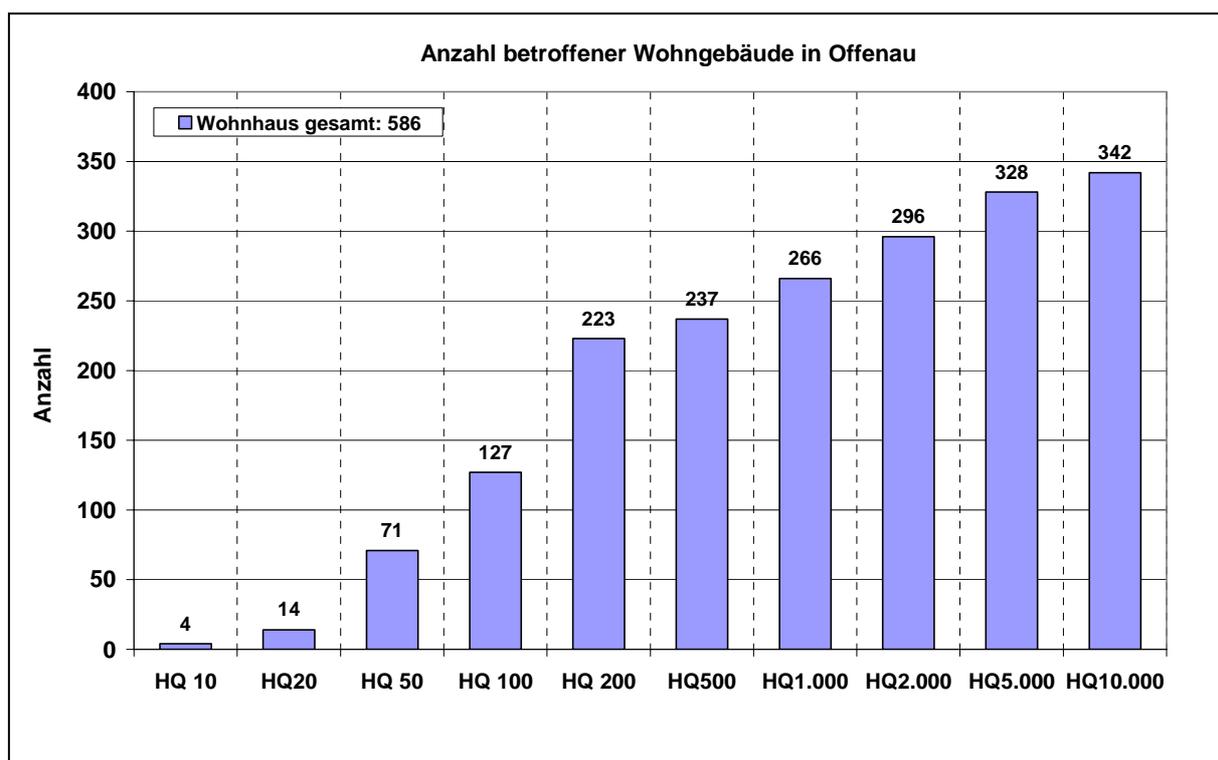


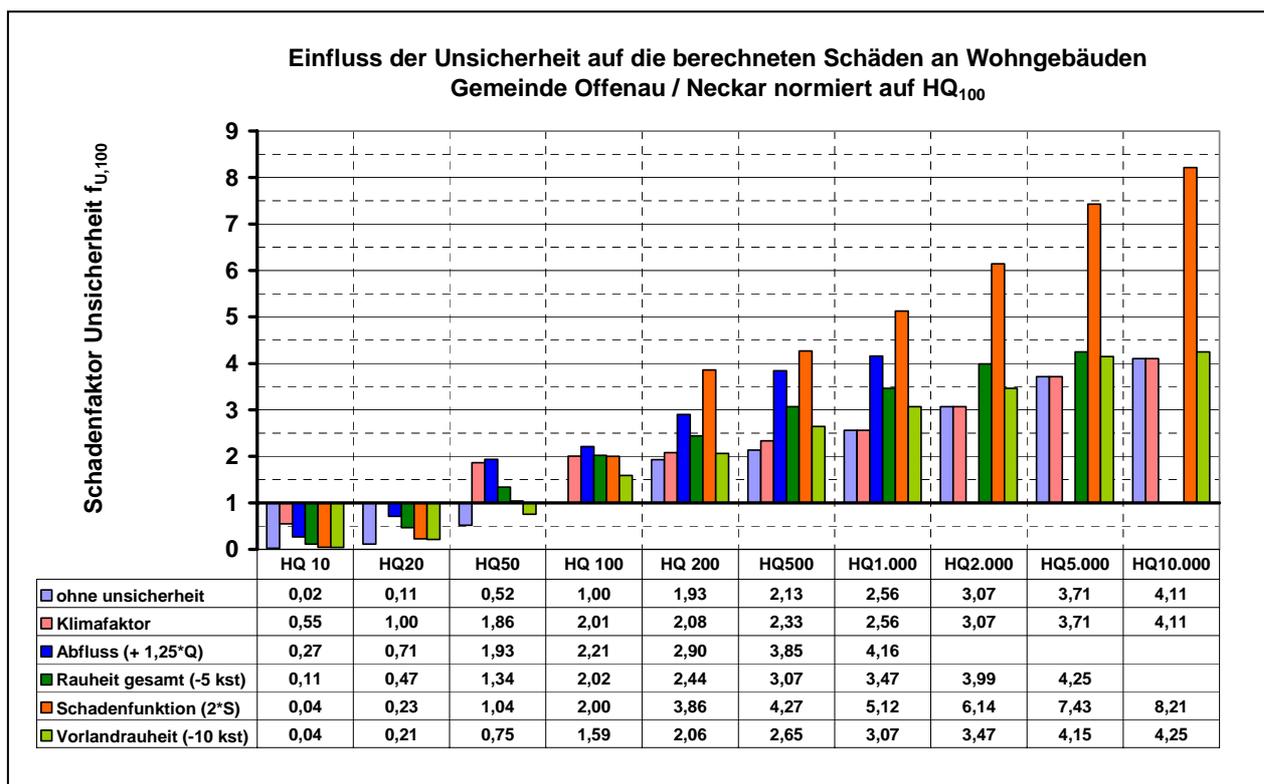
Abbildung 8-23: Anzahl betroffener Wohngebäude Offenau / Neckar

Aus den Berechnungen ergeben sich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Arten von Unsicherheiten die in untenstehenden Abbildungen dargestellten Auswirkungen auf die Schadenssummen. Abbildung 8-24 zeigt die Änderungen bezogen auf das 100-jährliche Hochwasserereignis. Die Schadensfaktoren ergeben sich aus

dem Verhältnis der Schadenssummen für die jeweilige Jährlichkeit zur Schadenssumme für das ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten berechnete HQ<sub>100</sub>.

$$f_{U,100} = \frac{S(HQ_T)}{S(HQ_{100})} \quad (\text{Gl. 8-18})$$

Als maximale Abflussmenge wurde für die Berechnungen ein Scheitelabflusswert von Q=4500 m³/s angenommen. Der Maximalabfluss wurde aus einer Auswertung historischer Wasserstandsmarken vom Hochwasser 1824 (dem bislang größten beobachteten Hochwasser im Unterlauf des Neckars) abgeleitet und entspricht der Abflussmenge, bei der im heutigen Zustand des Neckars die gleichen Wasserstände erreicht werden wie aus historischen Unterlagen verzeichnet. Größere Abflussmengen bzw. höhere Wasserstände wurden für die Schadensberechnungen nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund fehlen in den Abbildungen für die erhöhten Abflüsse und Rauheiten einige Werte im oberen Abflussspektrum. Sind die Schadenssummen für ein einzelnes Hochwasser bekannt oder können diese abgeschätzt werden, können aus Abbildung 8-24 die Schadenssumme für weitere Ereignisse (Jährlichkeiten) bzw. Unsicherheitsbereiche abgeschätzt werden.

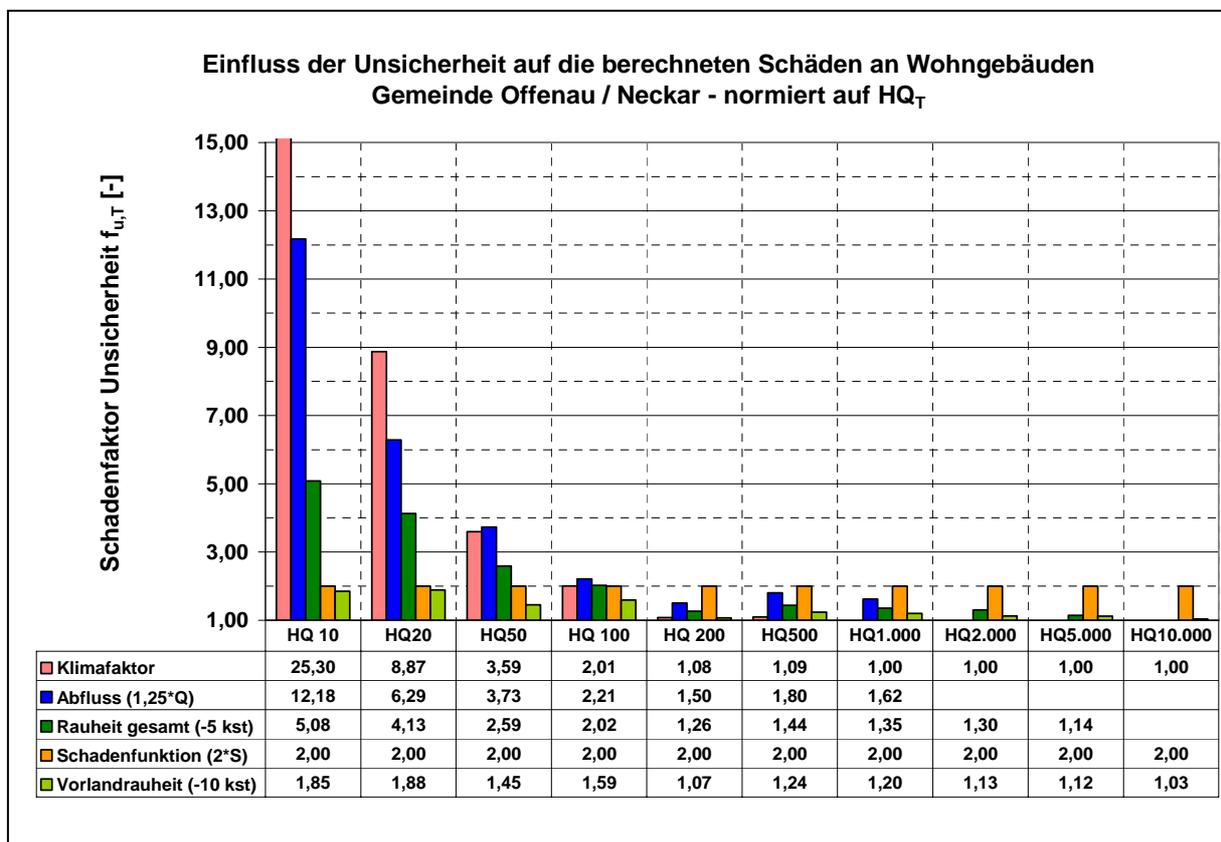


**Abbildung 8-24:** Schadensfaktor  $f_{U,100}$

In Abbildung 8-25 sind die Schadenssummen nicht auf ein einzelnes Ereignis (HQ100) normiert, sondern auf den Schadenswert eines Ereignisses mit gleichem Wiederkehrintervall ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten. Die Schadensfaktoren ergeben sich dann zu

$$f_{U,T} = \frac{S(HQ_T)}{S(HQ_T)} \quad (\text{Gl. 8-19})$$

Es wird deutlich, dass sich die größte relative Änderung der Schadenssummen für kleine bis mittlere Abflüsse ergibt. Zum Beispiel ergeben sich für ein 20-jährliches Hochwasser je nach verändertem Modellparameter Erhöhungen der Schäden um Faktoren im Bereich von 1,9 (für veränderte Vorlandrauheit) bis nahezu 9 im Vergleich zu den ursprünglich berechneten Werten. Besonders zu beachten ist der Bereich der üblicherweise als Bemessungsereignisse für Hochwasserschutzmaßnahmen herangezogenen Jährlichkeit  $HQ_{100}$ . Auch hier muss je nach veränderter Randbedingung mit einer Verdopplung der Schäden gerechnet werden. Dies kann insbesondere bei ökonomischen Bewertungen von geplanten Schutzmaßnahmen im Rahmen von Nutzen-Kosten-Analysen von wesentlicher Bedeutung sein und evtl. eine Erhöhung des Schutzgrades auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll machen.



**Abbildung 8-25:** Schadensfaktor  $f_{U,T}$

Die durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen zeigen, dass eine Variation einzelner Parameter teilweise drastische Auswirkungen auf die resultierenden Wasserstände und die dadurch verursachten Schäden haben kann. Diese können jedoch nicht verallgemeinert dargestellt werden, sondern sind von den lokalen Verhältnissen abhängig. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass eine Untersuchung der Modellsensitivitäten bei Planung und Beurteilung von Schutzmaßnahmen nicht vernachlässigt werden darf.

## 9 Zusammenfassung, Ausblick

### 9.1 Zusammenfassung

Angesichts der zunehmenden Hochwasserschäden bei knapper werdenden finanziellen Mitteln wird zukünftig die wirtschaftliche Bewertung möglicher Schutzmaßnahmen mehr und mehr in den Vordergrund der Entscheidungsfindung rücken. Als Basis werden hierbei die Kosten der Schutzmaßnahmen dem Nutzen gegenübergestellt. Die finanzmathematische Aufbereitung erfolgt über die Berechnung des Kapitalwertes (Kostenbarwert minus Nutzenbarwert) oder des Nutzen-Kosten-Verhältnisses. Für Hochwasserfragen wird der Nutzen in Form von verhinderten Schäden aus der Differenz der möglichen Hochwasserschäden vor und nach Realisierung der Schutzmaßnahme berechnet. Über die Ermittlung des Hochwasserrisikos können aus der Hochwasserstatistik abgeleitete Ereignisse in Jahreskosten (Schäden bzw. verhinderte Schäden in EUR/a) umgerechnet und den Investitions- und laufenden Kosten gegenübergestellt werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Methodik zur Berechnung des Hochwasserrisikos erläutert und die Implementierung in ein GIS-gestütztes Berechnungsmodell vorgestellt.

In Kapitel 2 werden zunächst allgemeine Aspekte der Risikobetrachtung erläutert sowie unterschiedliche Risikotypen dargestellt. Die analytische Berechnung erfolgt in der Risikoanalyse, in der die Eintretenswahrscheinlichkeit möglicher Ereignisse sowie die damit verbundenen Schäden berechnet werden. Zusammen mit der Risikobewertung liefert sie die Grundlage für das Risikomanagement.

Anhand der Wirkungskette bei Entstehung und Ablauf von Hochwasserereignissen wird in Kapitel 3 die Berechnung des Hochwasserrisikos erläutert. In der praktischen Anwendung kann die Ermittlung für unterschiedliche Ereignis- und Betrachtungszeiträume erfolgen. Zur finanzmathematischen Bewertung von Schutzmaßnahmen ist hierbei der Schwerpunkt auf die Berechnung der Jahreskosten bzw. –nutzen über die Schadens Erwartungswerte gelegt. Die Methodik der Schadensberechnung ist abhängig von der Maßstabsebene; hierbei wird zwischen einer mikroskaligen, mesoskaligen und makroskaligen Vorgehensweise unterschieden. Während bis vor wenigen Jahren die Wahl der Methodik im wesentlichen von der zur Verfügung stehenden Rechnerleistung abhängig war, ist heutzutage die Auflösung der Eingangsdaten das wesentliche Entscheidungskriterium. Mit den heute zur Verfügung stehenden Kapazitäten ist auch eine objektscharfe Schadensberechnung auf Basis von Katasterdaten (ALK-Daten) für größere Untersuchungsgebiete möglich.

Zur Berechnung der Hochwasserparameter stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die in Kapitel 4 beschrieben sind. Neben physikalischen Modellen, in denen lokale Situationen maßstäblich abgebildet werden können, werden für Hochwasseruntersuchungen hydrodynamisch-numerische Strömungsmodelle eingesetzt. Diese werden unterschieden nach der räumlichen Auflösung (1D, 2D, für

lokal begrenzte Untersuchungsgebiete auch 3D-Modelle) der Berechnungsergebnisse sowie der Abbildung der zeitabhängigen Prozesse (stationäre, instationäre Modelle).

In Kapitel 5 sind die für die durchgeführten Untersuchungen maßgebenden schadensbeeinflussenden Parameter vorgestellt. Auf Seite der Einwirkungen werden neben den hydrostatischen Kräften auch dynamische Kräfte auf Gebäude abgeleitet, die zu einer Schädigung von Gebäuden und Inventar führen können, z.B. Strömungsdruck oder Lasten durch Anprall von Treibgut. Strukturelle Schäden können aber auch dann auftreten, wenn aufgrund der erosiven Strömungskräfte den Gebäuden „der Boden unter den Füßen weggezogen wird“, sprich durch Ausspülen von Bodenmaterial die Lasten nicht mehr ordnungsgemäß in den Untergrund abgeleitet werden. Die dadurch mögliche Schiefstellung der Gebäude kann evtl. nicht mehr abgefangen werden, was einem Totalschaden gleichzusetzen ist. Auch bei Infrastruktureinrichtungen, z.B. entlang erdverlegter Leitungen, können Erosionskräfte zu Hohlraumbildung führen, die zu einem Absacken der darüber liegenden Erdschichten oder Fahrbahndecken führen kann.

Um das Hochwasserrisiko umfassend bewerten zu können sind alle Schadwirkungen, die von den Hochwasserparametern ausgehen, zu berücksichtigen. Dies ist heute jedoch nur bedingt möglich. Die größten Wissenslücken bestehen in der Erfassung und Aufbereitung nicht in Geldeinheiten erfassbarer Schäden wie z.B. Umweltschäden oder Auswirkungen auf die Gesundheit der Betroffenen. Zum einen liegen hierfür nur wenige Schadensdokumentationen vor, zum anderen sind Bewertungsverfahren für einen Vergleich mit monetären Schäden bislang erst in der Entwicklung. Für monetär bewertbare Schäden liegen aus der Literatur eine Vielzahl möglicher Schadensfunktionen vor, die zwar grundsätzlich vergleichbar, aufgrund der unterschiedlichen baulichen Voraussetzungen jedoch nur in wenigen Fällen übertragbar sind. Die in Deutschland meistverwendeten Schadensinformationen stammen aus der HOWAS-Datenbank, die Mitte der Achtziger Jahre aufgebaut wurde (KLEEBERG, H.B., NIEKAMP, O., CEMUS, J. (1988). Ziel war die Schaffung einer Datenbank zur Dokumentation und Auswertung aufgetretener Hochwasserschäden in Deutschland. Verschiedene Auswertungen haben gezeigt, dass eine Verwendung von Schadensfunktionen, die aus der Datenbank abgeleitet werden, mit großen Unsicherheiten verbunden ist (BUCK, W., MERKEL, U. (1998), MERZ, B. ET AL. (2004).

Für mikroskalige Untersuchungen erfolgt eine Beurteilung der Hochwasserschäden auf Basis einzelner Gebäude bzw. Objekte. Über **WAS-WÄRE-WENN** – Untersuchungen, in denen potenzielle Schäden einzelner Gebäude oder Gebäudetypen durch gutachterliche Begehungen erhoben werden, können Schadensfunktionen ermittelt werden, die die Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet bestmöglich abbilden. Je nach Detaillierungsgrad können die

Untersuchungen für lokale Schutzmaßnahmen aber auch für großräumige Analysen eingesetzt werden (Kapitel 6).

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte GIS-gestützte Tool zur Berechnung potenzieller Hochwasserschäden ist in Kapitel 7 vorgestellt. Das Modell baut auf ein bestehendes Hochwassersimulationsmodell für den Neckar auf (OBERLE, P. (2004) und basiert auf folgenden Datengrundlagen:

- Digitales Geländemodell (DGM)
- Hydrodynamisch-Numerisches Modell (HN-Modell)
- Flächennutzungsdaten (ALK-Daten)
- Schadensfunktionen

Durch die modulare Struktur des Modells kann eine prozessorientierte Bedienung gewährleistet werden. Die Funktionalitäten des Modells erlauben die Berechnung objektbezogener Hochwasserschäden auf Basis offizieller Flächennutzungsdaten, die um schadensrelevante Attribute (z.B. Hochwasserschwelle Erdgeschoßfußbodenhöhe) erweitert werden und bietet die Möglichkeit, einzelnen Gebäuden oder Gebäudetypen beliebige Schadensfunktionen zuzuweisen. Die Berechnung der Schäden erfolgt über die Verknüpfung der Wasserstands-Schaden-Funktionen mit dem Raster der Wasseroberfläche. Über die weitere Auswertung der berechneten Schäden können die Anforderungen erfüllt werden, die sich aus aktuellen nationalen und internationalen Richtlinien ergeben (LFU (2005), KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2006) z.B.

- Ermittlung von Gebieten mit erhöhtem Risiko
- Erstellung von Hochwasserrisikokarten
- Nutzen-Kosten-Untersuchungen geplanter Maßnahmen
- Kostenmäßiger Vergleich alternativer Schutzkonzepte
- Auswirkungen möglicher Klimaänderungen

Die Ermittlung von Hochwasserschäden unterliegt Unsicherheiten, die in der natürlichen Variabilität einzelner Ereignisse, den Datengrundlagen oder den gewählten Modellansätzen begründet liegen. Im Rahmen einer differenziellen Unsicherheitsanalyse wurden ausgewählte Parameter in der Schadensberechnung variiert und die Auswirkungen auf die berechneten Wasserstände bzw. Schäden ermittelt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 8 dargestellt. Neben dem Streubereich der statistischen Verteilungsfunktion zur Berechnung der Scheitelabflussmenge (als hydrologische Eingangsgröße) sowie der Rauheitsparametrisierung im Hydrodynamisch-numerischen Simulationsmodell wurden zur Extremwertabschätzung die Auswirkungen einer veränderten Abflussgeometrie an einer Brücke (Kontrollbauwerk) auf die Wasserstände oberhalb untersucht. Dieser Fall kann bei Verklausung von Brückenfeldern durch mitgeführtes Treibgut, z.B. entwurzelte

Bäume, Container etc. auftreten. Weiterhin wurden exemplarisch die Folgen einer möglichen Klimaänderung auf die Auftretenswahrscheinlichkeit untersucht. Insbesondere im Bereich kleiner bis mittlerer Ereignisse ergeben sich im untersuchten Beispiel erhebliche Auswirkungen auf den Schutzgrad (Reduktion von Schutzgrad  $HQ_{100}$  auf  $HQ_{20}$ ) und die potenziellen Hochwasserschäden (Faktor 25 für  $HQ_{20}$ , Faktor 9 für  $HQ_{50}$ ). In Baden-Württemberg soll der Lastfall „Klimaänderung“ bei der Festlegung des Bemessungshochwassers zukünftig mitberücksichtigt werden (LFU (2005)).

## 9.2 Ausblick

Die vorgestellte Methodik und GIS-gestützte Umsetzung zur Ermittlung von Hochwasserschäden auf Basis von Einzelobjekten bietet die Möglichkeit, auch größere Untersuchungsgebiete mit hohem Detaillierungsgrad zu bearbeiten. Die bislang gängige Unterscheidung der unterschiedlichen Modellskalen (Mikro-, Meso- und Makroskale) nach der Größe des Untersuchungsgebietes kann nun (zumindest in gewissem Rahmen) in Abhängigkeit der vorhandenen Datengrundlage dargestellt werden. Die flächendeckende Verfügbarkeit von digitalen Katasterdaten, die mit den ALK-Daten zum größten Teil bereits heute gegeben ist, sowie Informationen über die Gefährdungsparameter, die in Form von Gefahrenkarten in vielen Bundesländern derzeit erstellt werden, bieten eine wichtige Grundlage für eine flächendeckende Risikobetrachtung. Derzeit sind die Gefahrenanalysen in den meisten Fällen auf die Darstellung der Wasserstände bzw. Wassertiefen beschränkt. Um weitergehende Schadensparameter, z.B. dynamische Strömungskräfte auf Gebäude, Feststoff- und Schwebstofftransport, berücksichtigen zu können, müssen mehrdimensionale HN-Modelle eingesetzt werden. Die derzeit verfügbaren Modelle sind zwar grundsätzlich in der Lage, diese Strömungsparameter zu berechnen, allerdings ist der Aufwand für die Modellierung, insbesondere im urbanen Bereich noch sehr hoch. Am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung laufen weitere Forschungsarbeiten, die sich mit der Optimierung der HN-Verfahren für diesen Anwendungsfall beschäftigen.

Auf Seite der Vulnerabilitätsanalyse sind demgegenüber noch weitere Forschungsbemühungen erforderlich, um eine umfassende Schadensanalyse durchführen zu können. Insbesondere für intangible Schäden fehlen Bewertungsverfahren für einen Vergleich mit den monetär erfassbaren Schäden. Zur Erstellung von Schadensfunktionen werden derzeit in einer Arbeitsgruppe der DWA (Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) Empfehlungen erarbeitet, die eine zukünftig bundeseinheitliche Vorgehensweise initiieren sollen. Zur Ermittlung von Schadensfunktionen über **Was-Wäre-Wenn**-Analysen wird derzeit ein Pilotprojekt umgesetzt, in dem eine Nutzen-Kosten-Analyse für ein geplantes Sturmflutsperrwerk durchgeführt wird. Über einen Vergleich der ermittelten Schadensfunktionen mit Angaben aus der Literatur sollen weitere Erkenntnisse zur Schadensanalyse gewonnen werden, die in zukünftigen Handlungsempfehlungen Berücksichtigung finden können.

## Literaturverzeichnis

- ADV (1989)** Amtlich Topografisch-Kartografisches Informationssystem (ATKIS). Das Vorhaben der Landesvermessungsverwaltungen zum Aufbau digitaler Landschaftsmodelle und digitaler kartografischer Modelle.
- ADP (2004)** Bangladesh: 2004 Flood, Response, Damage and Recovery Needs, Asian Development Bank, Bangladesh: Quarterly Economic Update, September 2004.
- APEL, H. ET AL (2004)** Flood risk assessment and associated uncertainty, Natural Hazard and Earth System Sciences (2004) 4, European Geosciences Union.
- APEL, H.; THIEKEN, A. H.; MERZ, B.; BLÖSCHL, G. (2004)** A probabilistic modeling concept for the quantification of flood risks and associated uncertainties - In: Pahl-Wostl, C.; Schmidt, S.; Rizzoli, A. E.; Jakeman, A. J. (Eds.), Complexity and Integrated Resources Management, 977-983.
- ARBEITSAUSSCHUß UFEREINFASSUNGEN (1996)** Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstrassen, Verlag Ernst und Sohn, 9.Auflage.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1998)** Spektrum Wasser 1, Hochwasser, München.
- BEAUFORT, J., GUMPERT, E., VOGT, M. (Hrsg.) (2003)** Fortschritt und Risiko, Zur Dialektik der Verantwortung in (post-)modernen Gesellschaften, Forum für interdisziplinäre Forschung, Band 21, Verlag J.H. Röll.
- BENNET, G. (1970)** Bristol floods 1968: controlled survey of effects on health of local community disaster. British Medical J., 3, 454-458.
- BERNING, C., DU PLESSIS, L. A., VILJOEN, M. F. (2001)** Loss functions for structural flood mitigation measures, Water SA, Vol. 27, No. 1, January 2001.
- BEYENE, M. (1992)**. Ein Informationssystem für die Abschätzung von Hochwasserschadenspotentialen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, Mitteilungen Nr. 83, Aachen.
- BFG (2002)** Das Augusthochwasser 2002 im Elbegebiet, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- BLEINES, W. (1968)** Durchlässe, Kreuzungsbauwerke an Gewässern, Karlsruhe.
- BOBRICH, J. (2000)** Zur Integration von ALK-Gebäudedaten in ATKIS-Datenbestände. In: Mitteilungen des Bundesamtes für Kartografie und Geodäsie, Band 20.

- BOOYSEN, H. J., VILJOEN, M. F., DE VILLIERS, G. DU T. (1999)** Methodology for the calculation of industrial flood damage and its application to an industry in Ver-  
eeniging, Water SA, Vol. 25, No. 1, January 1999.
- BÜCHELE B., KREIBICH H., KRON A., IHRINGER J., THEOBALD S., THIEKEN  
A., MERZ B., NESTMANN F. (2004)** Developing a Methodology for Flood Risk  
Mapping: Examples from Pilot Areas in Germany. In: Malzahn D, Plapp T (eds)  
Disasters and Society - From Hazard Assessment to Risk Reduction. Logos-  
Verlag, Berlin, 99-106.
- BUCK, W. (2003)** Festlegung des Hochwasserschutzgrades, Seminar "Hochwasser-  
rückhaltebecken" der ATV/DVWK am 8./9. 10.2003, Erfurt.
- BUCK, W., MERKEL, U. (1998)** Auswertung der HOWAS-Datenbank, Gutachten im  
Auftrag der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Institut für Wasserwirt-  
schaft und Kulturtechnik, Karlsruhe.
- BUCK, W., KRON, A, WETZEL, A. (2008)** Nutzen-Kosten-Untersuchung für ein  
Sturmflutsperrwerk, Korrespondenz Wasserwirtschaft, 1. Jahrgang, Heft 5/2008.
- BUWAL (1996)** Vollzug Umwelt, Richtlinie, Beurteilungskriterien I zur Störfallverord-  
nung StfV, Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft.
- BURLANDO, P. (Hrsg.) (1999)** Veröffentlichungen des Fortbildungskurs Hochwas-  
ser: Vorhersage, Analyse, Maßnahmen, 15.-18.03.1999, Zürich.
- BWG (1995)** Anforderungen an den Hochwasserschutz. Berichte des Bundesamt für  
Wasser und Geologie, Bern.
- BWG (2004)** Hochwasservorsorge, Erkenntnisse aus vier Fallbeispielen. Berichte  
des Bundesamt für Wasser und Geologie, Serie Wasser, Nr. 6, Bern.
- BWG (2004b)** Hochwasserschutz – Beschreibung und Quantifizierung von Schaden-  
bildern, Berichte des Bundesamt für Wasser und Geologie, Serie Wasser, Nr. 6,  
Bern.
- BWK (2001)** Hochwasserschadenspotenziale, Berichte des Bund der Ingenieure für  
Wasserwirtschaft und Kulturbau (BWK), Bericht 1/2001.
- BWK (2004)** Mobile Hochwasserschutzsysteme – Grundlagen für Planung und Ein-  
satz. Merkblatt des Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft und Kulturbau  
(BWK).
- CARL, R.D., DAVIS, D.W. (1989)** An Integrated Software Package for Flood Dam-  
age Analysis. Technical Report, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps  
of Engineers.
- CHATTERTON, J.B., PIRT, J., WOOD, TR. (1979)** The benefits of flood forecasting.  
J. Inst. of Water Eng. 33: 237 – 252.
- DKKV (2003)** Hochwasservorsorge in Deutschland, Lernen aus der Katastrophe  
2002 im Elbegebiet, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V., Bonn.

- DEUTSCHE RÜCKVERSICHERUNG AG (1999)** Das Pfingsthochwasser im Mai 1999.
- DKKV (2003)** Hochwasservorsorge in Deutschland, Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Bonn, November 2003.
- DU PLESSIS, L. A. (2001)** The generation and use of cumulative probability distributions in flood risk assessment for the Mfolozi flood-plain, Water SA, Vol. 27, No. 1, January 2001.
- DU PLESSIS, L. A., VILJOEN, M. F. (1998)** Estimation of total direct flood damage in the lower Orange River area with the aid of a flood simulation model – A GIS approach, Water SA, Vol. 24, No. 3, July 1998.
- DU PLESSIS, L. A., VILJOEN, M. F., (1999)** Calculation of the secondary effects of floods in the lower Orange River area – A GIS Approach, Water SA, Vol. 25, No. 2, April 1999.
- DU PLESSIS, L. A., VILJOEN, M.F. (1999)** Determining the benefits of flood mitigation measures in the lower Orange River : A GIS application, Water SA, Vol. 25, No. 2, April 1999.
- DUTTA, D., HERATH, S., MUSIAKE, K. (2001)** Direct flood damage Modelling towards urban flood risk Management, Urban Safety Engineering 2001, ICUS-INCEDE Report 1, Bangkok.
- DVWK (1985)** Ökonomische Bewertung von Hochwasserschutzwirkungen, Arbeitsmaterialien zum methodischen Vorgehen, Mitteilungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Heft 10.
- DVWK (1999)** Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen, Merkblatt 251/1999, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- DVWK (1999b)** Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, DVWK-Schriften Heft 127.
- DVWK (1999c)** Hochwasserabflüsse, Einsatz von Niederschlags-Abfluss-Modellen zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen, DVWK-Schriften Heft 124.
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1983)** Grundlagen der Hydrologie, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- EBEL, U., ENGEL, H. (1995)** ... 13 Monate später, die Januar-Hochwasser 1995, Bayerische Rück, Sonderdruck 17, München.
- FARMER, F.R. (1967)** Siting criteria – a new approach, IAEA Conference "Containment and Siting", Wien.
- FLEMING, G. (Hrsg.) (2002)** Flood Risk Management, Learning to live with rivers, Tomas Telford Ltd., London.

- FRERICHS, S. ET AL. (2003)** Sichern und Wiederherstellen von Hochwasserrückhalteflächen, Texte 34/03, Forschungsbericht 201 16 116, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- GREEN, C., WILSON, T. (2004)** Assessing the benefits of reducing the risk of flooding from sewers, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University.
- GREEN, C., PARKER, D.J., THOMPSON, P.M., PENNING-ROWSELL, E.C. (1983)** Indirect Losses from Urban Modelling: An Analytical Framework. Flood Hazard research center, Middlesex Polytechnic.
- GREENWAY, M.A., SMITH, D.I. (1993)** ANUFLOOD Field guide. Centre for Resource and Environmental studies, Australian National University, Canberra.
- GRIGG, N.S. AND HELWEG, O.J. (1975)** State-of-the-art of estimating flood damage in urban areas. Water Resour. Bull., 11 (2): 379-390.
- GRÜNREICH, D. (1990)** ATKIS – Amtlich Topografisch-Kartografisches Informationssystem der Landesvermessung. Geo-Informationssysteme 3 (4) :4-9.
- GÜNTHER, W., SCHMIDTKE, R. F. (1988)** Hochwasserschadensanalysen – Pilotuntersuchungen über das Inn Hochwasser im August 1995, in: Wasserwirtschaft, Heft 2, Jg. 78, Stuttgart.
- HAAG, K., KÖPPER, B. (1987)** Die ALK-Grundrißdatei als zentrale Datei des bodenbezogenen Informationssystems. Zeitschrift des Vermessungswesens (9): 459-474.
- HINTERLEITNER, G. (2002)** Restrisikobetrachtung bei bestehenden Hochwasserschutzsystemen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 7-8, Juli / August 2002, 54. Jahrgang.
- HOLLENSTEIN, K. (1997)** Analyse, Bewertung und Management von Naturgefahren, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- HOYT, W.G., LANGBEIN, W.B. (1955)** Floods, Princeton University Press.
- HUBERT, P., BARRY, M.H., MOATTI, J. P. (1991)** Elicitation of Preferences for Management of Major Hazards, Risk Analysis, pp. 99-206.
- IHRINGER, J. ET AL. (2005)** Abflusskennwerte in Baden-Württemberg, T. 1: Hochwasserabflüsse. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Oberirdische Gewässer / Gewässerökologie 94 (CD-ROM).
- IHRINGER, J. ET AL. (2004)** Mittlere Abflüsse und mittlere Niedrigwasserabflüsse in Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Oberirdische Gewässer / Gewässerökologie 86 (CD-ROM)
- IHRINGER, J. (2004)** Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasser-Statistik, in KLIWA - Berichte Heft 4, S. 153-168, Arbeitskreis KLIWA 2004.

- IKoNE (2001)** Integrierende Konzeption Neckar-Einzugsgebiet, Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg.
- IKoNE (2002)** Dokumentation von Hochwasserschäden, Integrierende Konzeption Neckar-Einzugsgebiet, Heft 3, Gewässerdirektion Neckar, Besigheim.
- IKoNE (2002b)** Hochwassermanagement, Integrierende Konzeption Neckar-Einzugsgebiet, Heft 4, Gewässerdirektion Neckar, Besigheim.
- IKoNE (2002c)** Hydrodynamisch-numerisches Flussmodell Neckar, Integrierende Konzeption Neckar-Einzugsgebiet, Regierungspräsidium Stuttgart.
- IKSR (1998)** Aktionsplan Hochwasser. Internationale Kommission zum Schutz des Rheines.
- IKSR (2000)** Kriterien zur Bestimmung und Darstellung der Überschwemmungsgefährdung und Schadenrisiken. Internationale Kommission zum Schutz des Rheines.
- IKSR (2002)** Hochwasservorsorge. Maßnahmen und ihre Wirksamkeit. Internationale Kommission zum Schutz des Rheines.
- INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS (2001)** Learning to live with rivers. Final Report of the institution of Civil Engineers' Presidential Commission to review the technical Aspects of Flood Risk Management in England and Wales, London.
- IWK (2000)** Hydrodynamisch-Numerisches Flussmodell Neckar, Endbericht, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe.
- IWK (2003)** Abschätzung extremer Hochwasserabfluss-Scheitelwerte in Baden-Württemberg: Ermittlung der BHQ1- und BHQ2-Werte gemäß der neuen DIN 19700. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Heft HY 2/12, Universität Karlsruhe (TH), im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU).
- KALENBERG, C. (1998)** Zur Versicherbarkeit von Hochwasser- und Überschwemmungsschäden, Schriftenreihe des Fachbereichs Versicherungswesen der Fachhochschule Köln, Heft 14, Köln.
- KIESE, M., LEINWEBER, B. (2001)** Risiko einer Küstenregion bei Klimaänderung – Ökonomische Bewertung und räumliche Modellierung des Schadenpotentials in der Unterweserregion, Hannoversche Geographische Arbeitsmaterialien, Nr. 25 – 2001.
- KLEEBERG, H.B., NIEKAMP, O., CEMUS, J. (1988)** Konzeptstudie zur EDV-gestützten Abspeicherung und Auswertung von Hochwasserschadensdaten, Programmpaket HOWAS, München, unveröffentlicht.
- KLEMES, V. (2002)** Risikoanalyse: Die unerträgliche "Cleverness of bluffing", Risk, reliability, Uncertainty and Robustness of water resources Systems, International Hydrology Series, Cambridge University Press.

- KOBUS, H. (Hrsg.) (1978)** Wasserbauliches Versuchswesen, DVWW (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft), Mitteilungsheft Nr. 4.
- KOHLI, A. (1998)** Kolk an Gebäuden in Überschwemmungsgebieten, Mitteilungen Nr. 157 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technische Hochschule Zürich.
- KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2006)** Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und Bekämpfung von Hochwasser, SEK (2006) 66.
- KRON, A. (2000)** Mobile Flood protection, in: Toensmann, F., Koch, M. River Flood Defence, Kassel Reports on Hydraulic Engineering No.9/2000, Herkules Verlag.
- KRON, A., EVDAKOV, O., NESTMANN, F. (2005)** From Hazard to Risk – A GIS-based Tool for Risk Analysis in Flood Management. 3. International Symposium on Flood Defence, 25.-27. Mai 2005, Nijmegen, Niederlande.
- KRON, A., OBERLE, P., THEOBALD, S. (2003)** Tools for Risk Analysis in Flood Management, in: Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (DKKV), 4. Forum Katastrophenvorsorge, Extended Abstracts, München.
- KRON, W. (2002)** Flood Risk = Hazard x Exposure x Vulnerability, Flood Defence 2002, Science Press New York.
- KRON, W. (2003)** Hochwasserrisiko und Überschwemmungsvorsorge in Flussauen, in: Karl, H., Pohl, J. Raumorientiertes Risikomanagement in Technik und Umwelt, Katastrophenvorsorge durch Raumplanung, 79-101.
- KRON, W. THUMERER, T. (2001)** Überschwemmungen in Deutschland. Versicherungswirtschaft, Vol. 56: 1370-1377.
- KRON, W., WILLEMS, W. (2002)** Flood risk zoning and loss accumulation analysis for Germany. In: Proc. of the International Conference on Flood Estimation, Mar. 6-8, 2002, Berne, Switzerland, 549-558.
- LAWA (1995)** Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz, Veröffentlichung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Stuttgart 1995.
- LAWA (2005)** Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien), Veröffentlichung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Kulturbuchverlag Berlin 2005.
- LOBANOVA, H. V., LOBANOVA, M. V. (2003)** Statistical methods for estimation of design flood based on instrumental and paleo data, Paleofloods, Historical Floods and Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment (Proc. Of the PHE-FRA Workshop, Barcelona, 16-19<sup>th</sup> October, 2002).
- LFU (2005)** Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes, Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Heft 92, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

- MAI, S. (2004)** Klimafolgenanalyse und Risiko für eine Küstenzone am Beispiel der Jade-Weser-Region, Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 91/2004.
- MALZAHN, D., PLAPP, T. (Hrsg.) (2004)** Disasters and Society – From Hazard Assessment to Risk Reduction, Proc. of the International Conference, 27.-27.07.2004, Karlsruhe.
- MARKAU, H.-J., REESE, S. (2002)** Vulnerabilitätsanalysen in sturmflugegefährdeten Küstenniederungen, Aktuelle Ergebnisse der Küstenforschung, 20. AMK-Tagung Kiel, 30.5-1-6-2002.
- MEON, G, MERZ B., BUCK, W., PLATE, E. (1986)** Auswertung von Hochwasserschäden im Main-Tauber-Kreis: Gebäude- und Inventarschäden. Endbericht an das Regierungspräsidium Karlsruhe, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, HY86/3.
- MERZ, B. ET AL. (2004)** Estimation Uncertainty of direct monetary flood damages to buildings, Natural Hazards and Earth System Sciences (2004) 4:153-163, European Geoscience Union.
- MERZ, B., THIEKEN, A., BLÖSCHL, G. (2002)** Uncertainty Analysis for Flood Risk Estimation, Proceedings of the intern. Conference on Flood Estimation, March 6-8, 2002, Bern Switzerland.
- MERZ, B., THIEKEN, A. (2004)** Flood Risk Analysis: Concepts and Challenges, Österreichische Wasserwirtschaft, Heft 3-4, März/April 2004, 56.Jahrgang.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2000)** Potenzielle Hochwasserschäden am Rhein in NRW – Kurzfassung der Forschungsstudie Hochwasserschadenspotentiale am Rhein in Nordrhein-Westfalen.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2000b)** Potenzielle Hochwasserschäden am Rhein in NRW. MURL.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR, INNENMINISTERIUM UND WIRTSCHAFTSMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2003)** Hochwassergefahr und Strategien zur Schadensminderung in Baden-Württemberg, Stuttgart.
- MUNICHRE (1997)** Überschwemmung und Versicherung, Münchner Rückversicherungsgesellschaft.
- MUNICHRE (1999)** Naturkatastrophen in Deutschland – Schadenerfahrungen und Schadenpotentiale, Münchner Rückversicherungsgesellschaft.
- MUNICHRE (2002)** Topics-Rückblick Naturkatastrophen 2002, Münchner Rückversicherungsgesellschaft.
- MUNICHRE (2002b)** 50 bedeutende Naturkatastrophen 2002, Münchner Rückversicherungsgesellschaft.

- MUNICHRE (2004)** Topics-Rückblick Naturkatastrophen 2002, Münchner Rückversicherungsgesellschaft.
- MUDELSEE, M. ET AL. (2003)** No upward trends in the occurrence of extreme floods in central europe, *Nature*, Vol. 425, September 2003, Nature Publishing group.
- NACHTNEBEL, H.P., SAEJIS, H.L.F., VAN DER ZWAARD, J.J. (1991)** Rivers; in: *Hydraulics and the Environment*, (ed. P. Novak), Extra Issue of *J. Hydraul. Res.*, 29, pp. 24 - 34.
- NACHTNEBEL, H.P., FABER, R. (2002)** Flood Risk Assessment in Urban Areas: Development and Application of a Stochastic Hydraulic Analysis Method Considering Multiple Failure Types. In: Linnerooth-Bayer, J. (Ed.): *Second Annual IIASA-DPRI Meeting, Integrated Disaster Risk Management*, 29 - 31 July 2002, Laxenburg, Austria, 8.
- NAUDASCHER, E. (1992)** *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*, Springer Verlag Wien.
- NESTMANN, F., EMMERMANN, R. (2003)** Technologien für den operationellen Hochwasserschutz, *Acqua Alta*, 24.-27.11.2003, München.
- NESTMANN, F., KRON, A. (1999)** Hochwasser: Naturereignis oder Technikfolge ? in: Fiedler, F., Nestmann, F., Kohler, M. *Naturkatastrophen in Mittelgebirgsregionen*, Proc, des Symposium am 11./12.10.1999, Karlsruhe.
- NRC - NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2000)** Risk analysis and uncertainty in flood damage reduction studies. National Academy Press, Washington DC.
- NRC - NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1999)** The Impacts of Natural Disasters – A Framework for Loss Estimation, National Research council, National Academy Press, Washington.
- OBERLE, P., THEOBALD, S., NESTMANN, F. (2000)** GIS-gestützte Hochwassermodellierung am Beispiel des Neckars. *Wasserwirtschaft*, 90 (7-8): 368-373.
- OBERLE, P. (2004)** Integrales Hochwasserinformationssystem Neckar – Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen und Übertragung, Dissertation, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe, Heft 226.
- OCHA (2004)** Bangladesh: Floods, OCHA Situation Report no. 7, OCHA/GVA – 2004/117, UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs.
- OSWALD, M., ROTHBERGER, G. (1998)** ALKIS Amtliches Liegenschaftskataster – Informationssystem, in: *Vermessung Brandenburg*, Heft 1.
- PARKER, D.J., GREEN, C.H., THOMPSON, P.M. (1987)** Urban Flood Protection benefits – A Project Appraisal Guide, Gower Technical Press, UK.
- PATT, H. (2001)** *Hochwasserhandbuch, Auswirkungen und Schutz*, Springer Verlag Berlin Heidelberg.

- PENNING-ROWSELL, E. ET AL. (2005a)** The Benefits of Flood and Coastal Risk Assessment: A Manual of Assessment Techniques. 238 p., Middlesex University Press, London.
- PENNING-ROWSELL, E. ET AL. (2005b)** The Benefits of Flood and Coastal Risk Assessment: A Handbook of Assessment Techniques. 81 p. + CD, Middlesex University Press, London.
- PENNING-ROWSELL, E., ET AL. (1992)** The Economic of Coastal Management, A Manual of Benefit Assessment Techniques, Belhaven Press, London.
- PENNING-ROWSELL, E., FORDHAM, M., (Hrsg.) (1994)** Floods across Europe, Flood Hazard Assessment, Modelling and Management, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University Press, London.
- PENNING-ROWSELL, E.C., CHATTERTON, J.B. (1977)** The benefits of flood alleviation, Manual of Assessment Techniques, Saxon House, England.
- PETRASCHECK, A** Naturgefahren in den Alpen – Risiken und Schäden, [http://www.umweltdachverband.at/schwerpunkte/ausverkauf/htm\\_ordner/petrascheck.htm](http://www.umweltdachverband.at/schwerpunkte/ausverkauf/htm_ordner/petrascheck.htm).
- PFEFFERLE, J. (1997)** Interpolation von Querprofilen zur Erzeugung digitaler Geländemodelle, Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik / Institut für Fördertechnik, Universität Karlsruhe.
- PIELKE, R.A.JR., DOWNTON, M.W., MILLER, J.Z.B. (2002)** Flood Damages in the United States, 1996-2000, A Reanalysis of National Weather Service Estimates, Environmental and Societal Impacts Group, Boulder Colorada.
- PLANAT (1998)** Plattform Naturgefahren, Von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur, Broschüre zur nationalen Plattform Naturgefahren, Bern, Landeshydrologie und – geologie.
- PLATE, E. (1993)** Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure, Verlag Ernst und Sohn, Berlin.
- PLATE, E. (2001)** Die Bewältigung zukünftiger Naturkatastrophen, Zukünftige Bedrohung durch (anthropogene) Naturkatastrophen, in: Linneweber (Hrsg): Zukünftige Bedrohungen durch (anthropogene) Naturkatastrophen, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V. (DKKV), Nummer 22.
- PROAQUA (2000)** Potentielle Hochwasserschäden am Rhein in Nordrhein-Westfalen. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft.
- RITZERT, F. (1998)** Das Programm GEKO, entwickelt am Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, unveröffentlicht, Universität Karlsruhe.
- RITZERT, F. NESTMANN, F. (1999)** Nutzen eines digitalen Geländemodells zur Prognose biotischer Entwicklungen am Beispiel von Weich- und Hartholzauenver-

teilungen, in: Tagungsband „Elbe – Dynamik von Fluss und Aue“, 4.-7. Mai 1999, Wittenberge.

**RODRIGUEZ, E., ZEISLER, P. (1998)** Ermittlung der Hochwasserschadenspotenziale in den überflutungsgefährdeten Gebieten der Stadt Köln. Gutachten im Auftrag der Stadt Köln, unveröffentlicht.

**SCHMIDTKE, R. F. (2000)** Klimaveränderungen – sozioökonomische Konsequenzen, KLIWA-Symposium 2000.

**SCHMIDTKE, R.F. (1981)** Monetäre Bewertung Wasserwirtschaftlicher Maßnahmen – Systematik der volkswirtschaftlichen Nutzenermittlung, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft.

**SCHMIDTKE, R.F. (1995)** Sozio-ökonomische Schäden von Hochwasserkatastrophen, in Wasserbau-Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der Technischen Hochschule Darmstadt, Mitteilungen Nr. 40, Darmstadt.

**SMITH, D. I. (1994)** Flood damage estimation – A Review of Urban Stage-Damage curves and loss functions, Water SA, Vol. 20, No.3 , July 1994.

**SMITH, K., WARD, R. (1998)** Floods, Physical Processes and Human Impacts, Fohn Wiley & Sons, West Sussex, England.

**TAPSELL, S. M., ET AL (2002)** Vulnerability to flooding:: health and social dimensions, Phil. Trans. R. Soc. Lond., The Royal Society.

**THEOBALD, S. OBERLE P. NESTMANN F. (2004)** Simulationswerkzeuge für das operationelle Hochwassermanagement, Wasserwirtschaft 94.Jg, S. 23-28, 12/2004.

**USACE (1992)** Guidelines for risk and uncertainty analysis in water resources planning. Inst. for water resources, U.S. Army Corps of Engineers, IWR Report 92-R-1. Fort Belvore, VA.

**USACE (1996)** Risk-based analysis for flood damage reduction studies, U.S. Army Corps of Engineers, Engineering manual 1110-2-1619, Washington, DC.

**VILJOEN, M. F., DU PLESSIS, L. A., BOOYSEN, H. J. (2001)** Extending flood damage assessment methodology to include sociological and environmental dimensions, Water SA, Vol. 27, No. 4, October 2004.

**VILJOEN, M.F., DU PLESSIS, L. A., BOOYSEN, H.J. (2001)** Extending flood damage assessment methodology to include sociological and environmental dimensions, Water SA, Vol. 27, No. 4, October 2001.

**VLACHOS, EVAN (1995)** Socio-economic impacts and consequences of extreme floods, U:S.-Italy Research workshop on the Hydrometeorology, Impacts and Management of Extreme Floods, Perugia, November 1995.

- VOORTMAN, H.G., GELDER, P.H.A.J.M. VAN & VRIJLING, J.K. (2002)** Risk-based design of large-scale flood defence systems. In J. McKee Smith (Ed.), Solving coastal conundrums (pp. 2373-2385). Cardiff: World Scientific Publishing.
- WHO (2002)** Floods: Climate Changing and Adaptation Strategies for Human Health, Report on WHO Meeting, 30.06 – 02.07.2002, London.
- WIND, H.G., NIEROP, T.M., DE BLOIS, C.J. UND DE KOK J.L. (1999)** Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse floods, Water Resour Res, 35(11): 3459-3465.
- ZARN, B. (2003)** Szenarienbildung bei der Erstellung von Überflutungs-, und Gefahrenkarten – ein Diskussionsbeitrag, Wasser, Energie, Luft, 95. Jahrgang, Heft 5/6, 2003, Baden.
- ZENAR (2003)** Plattform Hochwasser, Ereignisdokumentation Hochwasser August 2002, ZENAR – Zentrum für Naturgefahren und Risikomanagement, 02/2003 Wien.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1-1:</b>	Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes (LFU 2005).....	2
<b>Abbildung 1-2:</b>	Wirkungskette Hochwasser; Risikoermittlung als Grundlage für das Hochwassermanagement .....	3
<b>Abbildung 2-1:</b>	Risikobereiche (WBGU (1998)).....	8
<b>Abbildung 2-2:</b>	Elemente der Risikobetrachtung (HOLLENSTEIN (1997) .....	12
<b>Abbildung 2-3:</b>	Elemente des Risikomanagements .....	16
<b>Abbildung 3-1:</b>	Wirkungskette Hochwasser .....	17
<b>Abbildung 3-2:</b>	Abgrenzung Gefahr/Gefährdung/Risiko .....	22
<b>Abbildung 3-3:</b>	Diagramm zur Bestimmung des Hochwasserrisikos.....	24
<b>Abbildung 3-4:</b>	Zeit- / Risikoachse Einzelereignis .....	24
<b>Abbildung 3-5:</b>	Gesamtschäden und Schadenserwartungswerte .....	25
<b>Abbildung 3-6:</b>	Zeit- / Risikoachse Hydrologisches Risiko .....	26
<b>Abbildung 3-7:</b>	Hydrologisches Risiko.....	27
<b>Abbildung 3-8:</b>	Zeit- / Risikoachse Schadenserwartung .....	28
<b>Abbildung 3-9:</b>	Näherungsweise Berechnung des Schadenserwartungswertes.....	29
<b>Abbildung 3-10:</b>	Berechnung der Schadenserwartungswerte über Dichtefunktion des Abflusses.....	31
<b>Abbildung 3-11:</b>	Beispieldatei aus dem Liegenschaftskataster Baden-Württemberg .....	32
<b>Abbildung 4-1:</b>	Abflussganglinie (Quelle: DIN 4049 T3).....	35
<b>Abbildung 4-2:</b>	Hysterese einer instationären Abflusskurve.....	37
<b>Abbildung 4-3:</b>	instationäres Abflussverhalten .....	37
<b>Abbildung 4-4:</b>	quasi -instationäres Abflussverhalten .....	38
<b>Abbildung 4-5:</b>	stationäres Abflussverhalten .....	38
<b>Abbildung 4-6:</b>	typische Dichtefunktion (links) und Verteilungsfunktion (rechts) der Standardnormalverteilung .....	40
<b>Abbildung 4-7:</b>	Abbildung von Rauheitsverlusten bei Froude-Modellen (KOBUS, H. (1978) .....	50
<b>Abbildung 5-1:</b>	Einflussfaktoren auf Gebäudeschäden .....	52
<b>Abbildung 5-2:</b>	hydrostatische Kräfte auf Gebäude .....	55
<b>Abbildung 5-3:</b>	Strömungsdruck auf Gebäudewand .....	58
<b>Abbildung 5-4:</b>	hydrodynamische Kräfte auf Gebäude .....	58
<b>Abbildung 5-5:</b>	Kolkbildung an Gebäuden .....	59

---

<b>Abbildung 6-1:</b>	Schadensarten.....	66
<b>Abbildung 6-2:</b>	Abhängigkeit der Schäden an Ackerland von der Vegetationsperiode .....	68
<b>Abbildung 6-3:</b>	Hochwasserschäden in Deutschland 2002.....	72
<b>Abbildung 6-4:</b>	Schadensreduktion durch Vorsorgemaßnahmen, hier Transport mobiler Inventargegenstände in hochwasserfreie Gebäudeteile. ....	75
<b>Abbildung 6-5:</b>	12*4 bis 12*9: Private Wohngebäude, Einzelhaus, Stockwerksbau, mit Keller, Stockwerksschäden, Gebäudeschäden .....	80
<b>Abbildung 6-6:</b>	Wasserstand-Schadens-Funktionen, Sektor 1: Private Wohngeb., mit Keller, Stockwerk, Schäden am beweglichen Inventar .....	80
<b>Abbildung 6-7:</b>	Einfluss in der HOWAS-Datenbank nicht dokumentierter Einflussgrößen auf die Wasserstand-Schadens-Funktionen. ....	82
<b>Abbildung 6-8:</b>	Beispiele für Schädigungsfunktionen nach Penning-Rowell, E.C., Chatterton, J.B. (1977), Unterscheidung nach Baujahr der Gebäude, Gesamtschäden am Gebäude. ....	83
<b>Abbildung 6-9:</b>	Beispiele für Schädigungsfunktionen nach Penning-Rowell, E.C., Chatterton, J.B. (1977), Unterscheidung nach Baujahr und sozialer Klasse .....	83
<b>Abbildung 6-10:</b>	Schädigungsfunktionen für Wohngebäude nach Grigg, N.S. and Helweg, O.J. (1975), entnommen aus Mai, S. (2004).....	84
<b>Abbildung 6-11:</b>	Ermittlung synthetischer Schadensfunktionen .....	86
<b>Abbildung 6-12 :</b>	Beispiel Schadenserhebung: Ergebniszusammenstellung .....	89
<b>Abbildung 6-13 :</b>	Beispiel Schadenserhebung: Grundriß / Foto .....	90
<b>Abbildung 6-14 :</b>	Beispiel Schadenserhebung: spezielle Risikoinformationen.....	91
<b>Abbildung 6-15 :</b>	Beispiel Schadenserhebung: Auszug aus Schadensabschätzung .....	92
<b>Abbildung 6-16 :</b>	Beispiel Schadenserhebung. Schadensabschätzung für Inventar.....	93
<b>Abbildung 6-17 :</b>	Ableitung von Schadensfunktionen für Gebäudeschäden im Erdgeschoss und Keller auf Basis der erhobenen Schadensdaten.....	94
<b>Abbildung 6-18:</b>	Wasserstand-Schadensfunktionen für Gebäudeschäden für die Klasse C-EFH-oK, differenziert nach der Baukonstruktion .....	95
<b>Abbildung 7-1:</b>	Unterschiedliche Datentypen zur Geländemodellierung.....	97
<b>Abbildung 7- 2:</b>	Attribuierung von digitalen Höheninformationen (oben) und über Triangulation / Rasterung erzeugtes DGM (unten) am Beispiel der Ortslage Eberbach (aus IWK (2000).....	100
<b>Abbildung 7-3:</b>	Erzeugung des Rasters der Wasseroberfläche (IWK (2000).....	104

---

<b>Abbildung 7-4:</b>	Beispiel für Folien der ALK (Quelle: Faltblatt ALK: Automatisierte Liegenschaftskarte, Hrsg: Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein) .....	106
<b>Abbildung 7-5:</b>	Informationen ALK (Quelle: Informationsbroschüre ALK: Automatisierte Liegenschaftskarte, Hrsg: Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein).....	107
<b>Abbildung 7- 6:</b>	Migrationskonzept ALK / ALB – ALKIS .....	108
<b>Abbildung 7- 7:</b>	Objektartenkatalog ATKIS. Beispiel für Datenstruktur des Objektbereichs „Siedlung“.....	109
<b>Abbildung 7- 8:</b>	Beispiel für ATKIS-Nutzungsinformationen auf Basis des DLM25 .....	110
<b>Abbildung 7-9:</b>	Nutzung unterschiedlicher Datenquellen in CORINE .....	111
<b>Abbildung 7-10:</b>	CORINE – Objektarten. Beispiel für Datenstruktur des Objektbereichs „bebaute Flächen“ .....	112
<b>Abbildung 7-11:</b>	Beispiel für Wurzelfunktionen (Werte HOWAS-Datenbank) .....	114
<b>Abbildung 7-12 :</b>	Beispiel für stützpunktbezogene Potenzfunktionen .....	116
<b>Abbildung 7-13 :</b>	Beispiel für Polygonfunktionen .....	117
<b>Abbildung 7-14 :</b>	Modelltopologie Schadensabschätzungsmodell .....	118
<b>Abbildung 7-15 :</b>	Modul 1 .....	119
<b>Abbildung 7-16 :</b>	Modul 2 .....	120
<b>Abbildung 7-17 :</b>	Modul 3 .....	121
<b>Abbildung 7-18 :</b>	Modul 4 .....	122
<b>Abbildung 7-19:</b>	Screenshots Schadensberechnungstools: Startmaske, Eingabemaske charakteristischer Gebäudehöhen und ausgewählter Datensätze .....	123
<b>Abbildung 7-20:</b>	Ergebnis der Schadensberechnung, Schäden an Einzelobjekten und nutzungsklassifizierte Schäden; Beispiel Gemeinde Offenau (Neckar), Hochwasser1993 .....	123
<b>Abbildung 7-21:</b>	Festlegung des Hochwasserschutzgrades (LFU 2005) .....	124
<b>Abbildung 7-22:</b>	Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes (LFU 2005).....	125
<b>Abbildung 8-1:</b>	Elemente der „Unsicherheit“ .....	127
<b>Abbildung 8-2:</b>	Allgemeine Form der Gumbel-Verteilung (aus PLATE, E. (1993)) .....	130
<b>Abbildung 8-3:</b>	Verteilungsfunktion und Vertrauensbereiche (aus DVWK (1999)).....	131
<b>Abbildung 8-4:</b>	Extremwertstatistik Pegel Rockenau .....	132
<b>Abbildung 8-5:</b>	Sensitivität bzgl. der hydrologischen Unsicherheit.....	132
<b>Abbildung 8-6:</b>	Definitionsskizze zur Bestimmung der Kräfte auf ein Kontrollvolumen .....	133

---

<b>Abbildung 8-7:</b>	Sensitivität bzgl. Vorlandrauheiten.....	138
<b>Abbildung 8-8:</b>	Sensitivität bzgl. Gesamtrauheiten .....	138
<b>Abbildung 8-9:</b>	Eisenbahnbrücke Jagstfeld.....	140
<b>Abbildung 8-10:</b>	Abflusstypen bei Durchlässen (nach DIN19 666) .....	141
<b>Abbildung 8-11:</b>	Abflussbeiwerte unter Schütz .....	142
<b>Abbildung 8-12:</b>	Wasserspiegelanstieg bei seitlicher Einengung.....	144
<b>Abbildung 8-13:</b>	Wasserspiegelanhebung in Abhängigkeit der prozentualen Änderung des Abflussquerschnittes (horizontal) .....	144
<b>Abbildung 8-14:</b>	Wasserspiegelanstieg bei vertikaler Einengung .....	146
<b>Abbildung 8-15:</b>	Wasserspiegelanhebung in Abhängigkeit der prozentualen Änderung des Abflussquerschnittes (vertikal).....	146
<b>Abbildung 8-16:</b>	Ergebnisse der Auswertung der HOWAS-Datenbank .....	149
<b>Abbildung 8-17:</b>	Anpassung einer nicht-parametrischen Epanechnikov-Kernel- Funktion an die Daten der HOWAS-Datenbank. ....	150
<b>Abbildung 8-18:</b>	Durch den Faktor „Klimaänderung“ veränderte Pegelstatistik ausgewählter Pegel im Neckareinzugsgebiet .....	152
<b>Abbildung 8-19:</b>	Durch den Faktor „Klimaänderung“ veränderte Wasserstände bei Neckar-km 98,0.....	153
<b>Abbildung 8-20:</b>	Durch den Faktor „Klimaänderung“ veränderte Wasserstände bei Neckar-km 98.....	154
<b>Abbildung 8-21:</b>	Schwankungsbereich der Wasserstände Neckar-km 98. ....	155
<b>Abbildung 8-22:</b>	Schadensentwicklung Gemeinde Offenau / Neckar. ....	156
<b>Abbildung 8-23:</b>	Anzahl betroffener Wohngebäude Offenau / Neckar .....	157
<b>Abbildung 8-24:</b>	Schadensfaktor $f_{U,100}$ .....	158
<b>Abbildung 8-25:</b>	Schadensfaktor $f_{U,T}$ .....	159

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2-1:</b> Kennzeichnende Eigenschaften der Risikotypen (WBGU (1998) .....	11
<b>Tabelle 2-2:</b> Paradigmenwechsel im Hochwasserschutz (PLANAT (1988).....	14
<b>Tabelle 3-1:</b> Zielgrößen der Schadensermittlung .....	20
<b>Tabelle 4-1:</b> Einsatzgrenzen physikalischer und numerischer Modelle.....	51
<b>Tabelle 5-1:</b> Intensitätsstufen von Hochwasser.....	53
<b>Tabelle 5-2:</b> Schadensbilder aus hydrostatischer Belastung.....	56
<b>Tabelle 5-3:</b> Schädigungsgrade von Wohngebäuden .....	57
<b>Tabelle 5-4:</b> Kolktiefe .....	60
<b>Tabelle 5-5:</b> Ersatzlasten [kN] für Treibgutprall an mobile Wände .....	61
<b>Tabelle 5-6:</b> Schadenssummen in Abhängigkeit der Kontamination durch Öl.....	63
<b>Tabelle 5-7:</b> Schadensbeeinflussende Faktoren (Widerstandseite) .....	64
<b>Tabelle 6-1:</b> Kosten-, Schadensarten.....	71
<b>Tabelle 6-2:</b> Flächennutzung Schlüsselnummer der Sektoren.....	76
<b>Tabelle 6-3:</b> Tabellarische Auswertung des Untersektors 12**: Einzelhaus, Stockwerksbau .....	79
<b>Tabelle 6-4:</b> Klassifizierung der Wohngebäude.....	87
<b>Tabelle 7-1:</b> Raum- und Zeitskalen für den Einsatz von Simulationsmodellen .....	102
<b>Tabelle 7-2:</b> Folien der ALK.....	106
<b>Tabelle 7-3:</b> Beispiel für OSKA.....	107
<b>Tabelle 8-1:</b> kst-Werte für natürliche Fließgewässer .....	136
<b>Tabelle 8-2:</b> Abflussbeiwerte nach BLEINES, W. (1968) .....	142
<b>Tabelle 8-3:</b> untersuchte Varianten seitlicher Einengung.....	143
<b>Tabelle 8-4:</b> Varianten vertikaler Einengung (Abflussbeiwert = 0,72).....	145
<b>Tabelle 8-5:</b> Schaden beeinflussende Parameter .....	148
<b>Tabelle 8-6:</b> Faktor „Klimaänderung“ $f_{T,K}$ für Hochwasserereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit im Einzugsgebiet des Neckars .....	151
<b>Tabelle 8-7:</b> Einfluss des Faktors „Klimaänderung“ $f_{T,K}$ auf die Scheitelabflüsse in der Stauhaltung Gundelsheim bei Neckar-km98,0 .....	153

## Bildverzeichnis

<b>Bild 2-1:</b> Risiko, ja oder nein? (Foto: Nestmann) .....	6
<b>Bild 5-1:</b> Inventarschäden .....	54
<b>Bild 5-2:</b> Hochwasser 2002 in Grimma .....	56
<b>Bild 5-3:</b> Versagen von Gebäuden durch Strömungsangriff .....	59
<b>Bild 5-4:</b> Gebäudeschäden durch Erosion (Schiefstellung) .....	60
<b>Bild 5-5:</b> Elbehochwasser 2002, Erosion unter Strasse.....	61
<b>Bild 5-6:</b> Gebäudeschäden infolge Lastanprall .....	62
<b>Bild 8-1:</b> Verklausung einer Brücke beim Elbehochwasser 2002 .....	139
<b>Bild 8-2:</b> Brücke Jagstfeld, Blick von UW.....	140
<b>Bild 8-3:</b> Brücke Jagstfeld, Blick von OW.....	140

# Lebenslauf

Name: Kron  
Vorname: Andreas Josef  
Familienstand: verheiratet, 2 Kinder  
Geburtsdatum: 20. August 1967  
Geburtsort: Saulgau

## Schulausbildung

1974 - 1978 Grundschole Herberlingen  
1978 - 1987 Störck-Gymnasium Saulgau  
1987 Abschluss mit der Allgemeinen Hochschulreife (Abitur)

## Studium

1988-1991 Vordiplom an der Universität Stuttgart  
Fachrichtung Bauingenieurwesen  
1991-1995 Hauptdiplom an der Universität Karlsruhe (TH), Fachrichtung  
Bauingenieurwesen  
Abschluss als Dipl.-Ing. in der Vertieferrichtung Wasserbau

## Beruf

1995-2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserwirtschaft und  
Kulturtechnik, Universität Karlsruhe  
2000-2002 Projektleiter und Technischer Vorstand der HWS Technologie AG,  
Karlsruhe  
Seit 2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserwirtschaft und  
Kulturtechnik, Universität Karlsruhe

Karlsruhe, im Juni 2008

*Bisher erschienene Mitteilungen aus dem  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung  
-Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik-*

***Bisher erschienene Mitteilungen aus dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung,  
Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik***

- Heft 154/1968*      *Ein Beitrag zur Erforschung von örtlichen Auskolkungen hinter geneigten Befestigungsstrecken in Abhängigkeit der Zeit; E. Mosonyi, B.Schoppmann  
Institutsberichte über die Modellversuche seit 1962  
Institutsberichte über die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft seit 1965; E. Mosonyi, B. Schoppmann*
- Heft 155/1969*      *Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömendem Abfluß; J.W. Dietz*
- Heft 156/1969 °*      *Widerstandskräfte und Energiedissipation bei Verteilerklötzen im Wechselsprung; R. Muser  
Schwebstoffführung feinsandiger Wasserläufe; St. Bruk*
- Heft 157/1969 °*      *Widerstand schräg angeströmter Rechengitter; J. Zimmermann  
Untersuchungen zur Durchströmung des Kraghammer Sattels an der Biggetalsperre nach neuentwickelten Methoden der Felshydraulik; W.Wittke, Cl. Louis*
- Heft 158/1970 °*      *Hydrodynamik der nichtstationären Dränung; G. Karadi, J. Gyuk, R.A.Williams  
An Experimental Study of Thin-Sheet Flow over Inclined Surfaces; O.N Wakhlu  
Schiffsträgheitskräfte als Indikator für die Güte von Schleusenfüllsystemen; E. Mosonyi, R. Muser  
Schwall- und Sunkerscheinungen aus Schleusenbetrieb in Schiffahrtskanälen; Maßnahmen zur Sicherung des Schiffahrtsbetriebes; R. Muser, G. Meder  
Beitrag zur Berechnung von Schleusenfüllungen; H.H. Bernhart  
Spitzenmaßstab und L-O-Integrator, ein Gerät zur genauen Messung des Wasserspiegels in Modellversuchen; W. Götz, K. Schwedes  
Turbulenzmessungen in Wasser mit Heißfilmanemometer; B. Schoppmann  
Messung von Größe und Richtung der mittleren Geschwindigkeit in einem zweidimensionalen Strömungsfeld; K. Schwedes  
Parameterfreie statistische Methoden zur Analyse von Datenreihen; H. Eggers  
Dreidimensionale, anisotrope Kluftwasserströmung; W. Wittke*
- Heft 159/1972 °*      *Ein Verfahren zur Richtungs- und Betragsbestimmung von Vektoren mittlerer Strömungsgeschwindigkeit einer turbulenten Strömung; K.Schwedes, H. Weiher  
Hydraulische Stabilität bei Wasserkraftanlagen; H. Berge  
Land Reclamation Projects as Essential Elements of Economic Development Programmes; G.E. Papadopoulos  
Institutsberichte über Modellversuche u. Forschungsarbeiten seit 1969  
Institutsberichte über die Exkursionen des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft seit 1969*

- Heft 160/1973 ° *Das Widerstands-Kapazitätsnetzwerk zur Simulation instationärer Grundwasserströmungen; A. Widmer*  
*Der elektrolytische Trog zur Lösung stationärer dreidimensionaler Grundwasserströmungsfälle; U. Stentzel, K. Schwedes*  
*Standfiltermodelle mit und ohne Überströmung zur Untersuchung von Selbstdichtungsmechanismen an Gewässersohlen; S.G. van Riesen*  
*Anhang: Veröffentlichungen, Vorträge, Dissertationen der Abteilung für Kulturtechnische Untersuchungen (Lehrgebiet Landwirtschaftlicher Wasserbau) auf dem Gebiet der Grundwasserforschung*
- Heft 161/1974 ° *Strömungs- und Transportmechanismen einer fortschreitenden Auskolkung; B. Schoppmann*  
*Water Resources Development in the U.A.R.; F. Nicola*
- Heft 162/1974 ° *Dünnschichtabfluß auf stark geneigter Ebene; G. Karantounias*  
*Die Entwicklung der Sparschleusen des Main-Donau-Verbindungskanals mit besonderer Betrachtung der Sparschleuse Leerstetten; R.Muser*  
*Neuere Methoden für die Analyse hydrologischer Systeme; G.M. Karadi*  
*Die Impedanz eines axial oszillierenden Sphäroids in einem nicht zusammendrückbaren Medium; R.Y.S. Lai, G.M. Karadi*
- Heft 163/1975 ° *Sekundärströmungen in aufeinanderfolgenden Gerinnekrümmungen; W.Götz*  
*Darstellung von skalaren Zustandsfeldern in beliebigen Kontrollräumen und ihre Nutzungsanwendung in der Hydrostatik mit Hilfe eines neuen Verfahrens der Vektoranalysis; M. Spielbauer*  
*Die Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit für deutsche Flußgebiete; D. Koberg, H. Eggers, W. Buck*  
*Drei Jahrzehnte operationelle Hydrologie; E. Walser*
- Heft 164/1976 ° *Einfluß der Schließzeit auf die Druckstoßtransmission durch Wasserschläsler; H.H. Bernhart*  
*Verstärkung und Erhöhung von Betonstaumauern; E. Vallarino*
- Heft 165/1976 ° *Die Auswahl des Bemessungshochwassers als ein Entscheidungsproblem unter Risiko und Ungewißheit; W. Buck*
- Heft 166/1977 *Einfluß von Sickerströmungen auf den Geschiebetransport; K.E. Wedemann*
- Heft 167/1979 *Der Einfluß seltener Ereignisse bei der Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeit; H. Eggers*  
*Statistisch erzeugte Serien von Hochwasserwellen; S. Weingärtner*
- Heft 168/1982 *Strömungscharakteristiken in einem Kanal mit 180°-Krümmungen; W. Siebert*  
*Bestimmung des Bemessungshochwassers mit Hilfe der Clusteranalyse; W. Kiefer*

- Heft 169/1982      *Entwurfskriterien zur Schleusenplanung; H.H. Bernhart*  
Heft 170/1984      *Druckerhöhungen durch instationäre Vorgänge in Schiffsschleusen mit großen Stufenhöhen; P.M. Schmelzle*
- Heft 171/1984      *Beitrag zur Hydromechanik von Schwall- und Sunkwellen; N. Göbel*
- Heft 172/1985      *Abschiedskolloquium zu Ehren von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.rer.techn., Dr.sc.h.c., Dr.-Ing. E.h., Dr.sc.h.c., Dr.sc.h.c. E. Mosonyi*
- Heft 173/1986 °      *Vor- und Nachteile des naturnahen Gewässerlaufes im Vergleich zu kanalisierten Fließgewässern; H. Willy*
- Heft 174/1986      *Naturnahe Umgestaltung ausgebauter Fließgewässer. Beiträge zum Wasserbaulichen Kolloquium am 14.02.1986 in Karlsruhe*
- Heft 175/1986 °      *Naturnahe Umgestaltung ausgebauter Fließgewässer Projektstudie; K. Kern, I. Nadolny*
- Heft 176/1987 °      *Der Einfluß von Querströmungen auf ein Schiff bei beschränkten Fahrwassertiefen; F. Bakowies*
- Heft 177/1988      *Zur Bemessung von Geschiebeabzügen; G.M. Kley*
- Heft 178/1988      *Hydraulik der kontinuierlichen und intermittierenden Furchenbewässerung: ein hydrodynamisches Modell; M. Awwad*
- Heft 179/1990      *Sturzwasserbewässerung. Bewässerung mit Niederschlagswasser ohne Zwischenspeicherung im Sahel; W. Klemm*
- Heft 180/1991      *Beiträge zur naturnahen Umgestaltung von Fließgewässern*
- Heft 181/1991 °      *Naturgemäße Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fließgewässer; R.-J. Gebler*
- Heft 182/1991      *Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Gerinnesohlen; A.Dittrich, M. Rosport, O. Badde*
- Heft 183/1993      *Der Einfluß der Belüftung auf die Kavitationserosion; N. Eisenhauer*
- Heft 184/1993      *nur als Buch erhältlich bei Springer Verlag: Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung. Geomorphol. Entwicklung von Fließgewässern; K. Kern*
- Heft 185/1993      *Ausbauoptimierung dezentraler Wasserkraftsysteme; H. Hildebrand*
- Heft 186/1994      *Turbulente, abgelöste Zweischichtenströmung über Sohlschwellen in einem offenen Rechteckgerinne; U. Kertzscher*
- Heft 187/1994      *Untersuchung des Niederschlags- und Abflußgeschehens im westafrikanischen Sahel. Abschätzung des Wasserdargebots aus kleinen*

- Einzugsgebieten mittels stochastischer Methoden unter Verwendung von Satellitenbilddaten; W. Tauer*
- Heft 188/1994 Bedarfsprognosen als Basis der Steuerungsoptimierung von Wasserversorgungssystemen; S. Ates*
- Heft 189/1994 Morphologie und Hydrologie naturnaher Flachlandbäche unter gewässertypologischen Gesichtspunkten - Gewässermorphologische und hydrologische Grundlagen für naturgemäßen Wasserbau und ökologische Gewässerentwicklung; I. Nadolny*
- Heft 190/1994 Ein Erosionsmodell mit räumlich und zeitlich veränderlicher Rillenmorphologie; M. Schramm*
- Heft 191/1995 Oberflächenabfluß und Bodenerosion in Kleineinzugsgebieten mit Mergelböden unter einem semiariden mediterranen Klima; D. Gomer*
- Heft 192/1995 Typologische und morphologische Untersuchungen an Bergbächen im Buntsandstein-Odenwald; G. Humborg*
- Heft 193/1997 Die Oberrheinkorrektion in Baden - Zur Umweltgeschichte des 19. Jahrhunderts; T. Löbert*
- Heft 194/1997 Erosionsprozesse auf Lößböden: Experimente und Modellierung; K. Gerlinger*
- Heft 195/1997 Synthese von biologischer und wasserbaulicher Analyse zur Bewertung von renaturierten Fließgewässern der Oberrheinebene; S. Kiene*
- Heft 196/1997 Fließwiderstand und Sohlstabilität steiler Fließgewässer unter Berücksichtigung gebirgsbachtypischer Sohlstrukturen; M. Rosport*
- Heft 197/1997 Ein Finite-Punkte-Verfahren für stationäre zweidimensionale Strömungen mit freier Oberfläche; C.J. Du*
- Heft 198/1998 Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer; A. Dittrich*
- Heft 199/1999 Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen - Grundlagen, Leitbilder, Planung; J. Scherle*
- Heft 200/1999 Zwei-Schichtenströmungen über Sohlenschwellen bei intern überkritischer Strömung; Y. Wang*  
*Hydraulic Design Considerations for Low- and High-Head Gates; E. Naudascher*
- Heft 201/1999 Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb; S. Theobald*
- Heft 202/1999 Der Einfluß von kurzen Gehölzstreifen auf den Hochwasserabfluß in Flüssen mit gegliedertem Querschnitt; K. Becker*

- Heft 203/1999 *Typisierungskonzept zur Festlegung einer ökologisch begründeten Mindestwasser menge; M. Scherer*
- Heft 204/1999 *Inseln und deren Widerstandsverhalten in Fließgewässern; A. Maryono*
- Heft 205/1999 *Boden- und Wasserschutz in landwirtschaftlich genutzten Gebieten der Mata Atlântica Brasiliens; M. Kunzmann*
- Heft 206/2000 *Nutzung von Landsat Thematic Mapper Daten zur Ermittlung hydrologischer Parameter; S. Belz (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 207/2000 *Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß; J. Aberle (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 208/2000° *Three Dimensional Computation of Turbulent Flow in Meandering Channels; V. T. Nguyen*
- Heft 209/2001 *Sedimenttransportprozesse im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen; S. Palt (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 210/2002 *Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald); M. Casper (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 211/2001 *Einfluß von Regelungsbauwerken auf die Wasserspiegellagen in Flüssen; F. Ritzert (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 212/2001 *Konzept für einen ganzheitlichen Gewässerschutz; W. Hauck*
- Heft 213/2002 *A Hydrodynamic-Numerical Model of the River Rhine; P. T. Minh Thu (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 214/2002 *Zur hydraulischen Systemanalyse von Wasserversorgungsnetzen; J. Deuerlein (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 215/2002 *Feststofftransport und Geschwindigkeitsverteilung in Raugerinnen; K. Koll (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 216/2002 *Simulationswerkzeuge zur Bewirtschaftung von Staustufenketten; A. Celan*
- Heft 217/2002 *Deutsch-Russisches Wörterbuch für Wasserwirtschaft; R. Krohmer, I.S. Rumjanzev*

- Heft 218/2002 *Entwurfsoptimierung städtischer Abwasserentsorgungsnetze; I. V. Domínguez Talavera (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 219/2002 *Kontrolle von Barrieren: Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit an Hand des Bodenwassergehaltes; R. Schuhmann (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 220/2003 *Langfristige, hydrologische Betrachtung der Grundwasserdynamik am Beispiel der Mittleren Elbe; P.-A. Burek (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 221/2003 *Wassermengenbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Ruhr: Simulation und Echtzeitbetrieb; T. Brudy-Zippelius (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 222/2004 *Russisch-Deutsches Wörterbuch für Wasserwirtschaft; R. Krohmer, I.S.Rumjanzev*
- Heft 223/2004 *Mobilisierung und Immobilisierung von mineralischen Feinstkornaggregaten an Gewässersohlen; J.-W. Kim (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 224/2004 *Strömungsstruktur und Impulsaustausch in gegliederten Gerinnen mit Vorlandvegetation; I. Schnauder (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 225/2004 *Towards Decision Support Models for Un-gauged Catchment in India, The Case of Anas Catchment; A. K. Singh (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 226/2004 *Integriertes Hochwasser-Simulationssystem Neckar – Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen und Übertragungen; P. Oberle (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 227/2004 *Small Hydropower Plants Based Power Systems for Remote Regions; R. K. Maskey (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 228/2004 *Spatial Time Domain Reflectometry and its Application for Monitoring Transient Soil Moisture Profile; R. Becker (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 229/2005 *River Flood Prediction Systems: Towards Complementary Hydrodynamic, Hydrological and Data Driven Models with Uncertainty Analysis; R. Shrestha (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 230/2005 *Empfehlungen zur naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Raum –unter Berücksichtigung der Hochwassersicherheit-; B. Lehmann (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*

- Heft 231/2005*      *Einfluß der Oberflächenströmung auf die permeable Gewässersohle; S. Vollmer (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 232/2005*      *Optimization of Internal Hydraulics and of System Design for PUMPS AS TURBINES with Field Implementation and Evaluation; P. Singh (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 233/2005*      *Entwicklung landschaftsverträglicher Bauweisen für überströmbare Dämme; J. Queißer (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 234/2006*      *Schritte zur Verbesserung der Hochwasserfrühwarnung mittels Online-Bodenfeuchtemessungen; W. Schädel (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 235/2006*      *Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren; M. Gebhardt (auch elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Heft 236/2008*      *Mikroskalige Ermittlung potenzieller Hochwasserschäden zur Gefahren- und Risikoanalyse; A. Kron (nur elektronisch unter: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html>)*
- Bestellungen an:*      *Institut für Wasser und Gewässerentwicklung  
-Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik-  
Bibliothek  
Universität Karlsruhe  
Kaiserstr. 12  
D-76131 Karlsruhe  
Tel.: (0721) 608 6389  
Fax: (0721) 60 60 46  
e-mail: sekretariat-WK@iwg.uka.de*

---

° vergriffen