

Entwicklung eines Werkzeugs zur systematischen Bewertung der Grundlagen von Hochwassergefahrenkarten

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte
Dissertation

von

M.Sc., Dipl.-Geogr. Thilo Weichel

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Juli 2011

Dekan des Fachbereiches Bauingenieurwesen: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kurz

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Robert Jüpner

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Karsten Schulz

Drittgutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Disse

D 386

Leipzig, im September 2011

Berichte des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft der
Technischen Universität Kaiserslautern

Bericht 21 (2011)

Thilo Weichel

**Entwicklung eines Werkzeugs
zur systematischen Bewertung der Grundlagen
von Hochwassergefahrenkarten**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2011

Impressum

Reihe der Berichte des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern

Herausgeber der Schriftenreihe: Prof. Dr. Robert Jüpner
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern

Herausgeber Bericht 21: Prof. Dr. Robert Jüpner

Redaktion: Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
der Technischen Universität Kaiserslautern

Kaiserslautern, im Oktober 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0501-1

ISSN 1433-4860

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Liebe Anja, liebe Jara, lieber Jannik, ich danke Euch für die Kraft und den Willen, die ihr mir zur Umsetzung dieser Arbeit gegeben habt.

Zudem möchte ich Allen meinen tief empfundenen Dank aussprechen, die mich auf diesem Weg begleitet und bewusst oder unbewusst mit Anregungen, Kritiken, Ablenkungen und neuen Sichtweisen versorgt haben. Allen voran und nicht nur als Doktorvater, sondern auch als persönlichen Wegbegleiter seit nunmehr fast einem Jahrzehnt, gilt Dir, Prof. Dr. Robert Jüpner, mein besonderer Dank. Ich danke Dir insbesondere für Deine fachlichen und strategischen Diskussionen, Deine Weitsichtigkeit und Geduld, sowie Deinem stets vorwärts gewandtem Blick, von dem ich seit unserer ersten Zusammenarbeit in Magdeburg sehr viel lernen konnte. Des Weiteren danke ich meinem Zweitprüfer Herrn Prof. Karsten Schulz, der mich in meiner Zeit am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig immer mit neuen und innovativen Ideen und methodischen Ansätzen bereichert hat. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch Herrn Prof. Markus Disse, der sich als weiterer Gutachter der Arbeit zur Verfügung gestellt hat. Zudem möchte ich Herrn Dr. Florian Pappenberger insofern einen besonderen Dank aussprechen, da er mir mit großem persönlichem Engagement, insbesondere während meines Aufenthalts in Lancaster/UK, den wirklichen Zugang zur hydraulischen Modellierung und den methodischen Werkzeugen zu angewandten Unsicherheitsanalysen ermöglicht hat. In diesem Zusammenhang sei auch den Projektpartnern des BMBF-Projektes 3ZM-GRIMEX recht herzlich für die zahlreichen methodischen und konzeptionellen Diskussionen gedankt. Nicht zu vergessen und dankend in Erinnerung an die zahlreichen Arbeiten in meiner Zeit am UFZ, sind Frau Prof. Dagmar Haase, Herr Dr. Martin Volk und Herr Stefan Liersch zu nennen. Für die täglichen Diskussionen und kritischen Anregungen, die sich im Spannungsfeld der praktischer Anwendung wissenschaftlicher Ansätze in meiner derzeitigen Arbeit im Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt ergeben, gilt mein aufrichtiger Dank Herrn Dr.-Ing. Hans-Werner Uhlmann und Herrn Frank Friedrich sowie allen anderen Kollegen des Geschäftsbereichs Grundlagen, Planung und Bau. An dieser Stelle möchte ich Frau Dr.-Ing. Manuela Gretzschel und Herrn Stefan Müller nicht unerwähnt lassen, für deren fachliche und freundschaftliche Zusammenarbeit ich mich ebenfalls bedanke.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Karla und Bernd Weichel sowie bei Haike und Dirk und allen Freunden bedanken, die mir allseits zur Seite standen.

Leipzig, den 30.04.2011

Thilo Weichel

Zusammenfassung

In den vergangenen zwei Jahrzehnten kam es immer wieder zu außergewöhnlich extremen Hochwasserereignissen in Mitteleuropa. Vor diesem Hintergrund und unter der Annahme sich möglicherweise verschärfender klimatischer Veränderungen, trat im Jahr 2007 die Richtlinie der Europäischen Union über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (HWRM-RL) in Kraft. Seitdem definiert sie innerhalb der Europäischen Union einen Ordnungsrahmen für den Umgang mit Hochwasserrisiken. Ein wesentliches Instrument der HWRM-RL stellen die Hochwassergefahrenkarten dar. Sie geben grundlegend Auskunft über das Ausmaß und die Intensität der von Hochwasser betroffenen Flächen. Als kartographische Darstellung dienen sie der Abgrenzung der vom Hochwasser ausgehenden Gefährdungen und bilden eine wesentliche Basis für die weiteren Planungen zum Hochwasserrisikomanagement. Demzufolge ist die Kenntnis über die Genauigkeiten und Unsicherheiten der in den Karten dargestellten Überschwemmungsflächen von grundlegender Bedeutung für den Umsetzungsprozess der HWRM-RL. Diesbezüglich hat sich der Autor das Ziel gesetzt, im Rahmen der hier vorgelegten Dissertation, ein Werkzeug zur systematischen Bewertung der Grundlagen von Hochwassergefahrenkarten zu entwickeln. Aufbauend auf einer Analyse der rechtlichen Anforderungen werden die bisher praktizierten Standards bei der Erstellung von Hochwassergefahrenkarten einleitend erläutert. Anschließend erfolgt eine detaillierte Auseinandersetzung mit Methoden zur Bewertung von Unsicherheiten bei der Ermittlung von Überschwemmungsflächen. Dazu werden beispielhaft Ansätze der Mustererkennung und Ganglinienanalyse vorgestellt, die bei Monte-Carlo basierten Unsicherheitsanalysen mit dem hydraulischen 2D-Modell TRIMR2D angewendet wurden. Im Weiteren werden die wesentlichen Verfahren und Datengrundlagen zur Ermittlung und Darstellung von Überschwemmungsflächen hinsichtlich ihrer Genauigkeiten und Aussagekraft analysiert und bewertet. Darauf aufbauend findet der konzeptionelle Aufbau des Bewertungssystems mit dem Namen FLOODVIEW statt. Es ist durch eine modulare Struktur gekennzeichnet die versucht, die Individualität und Wechselwirkungen der einzelnen Prozessgrößen zu berücksichtigen, ohne die Komplexität des Gesamtprozesses der Erstellung von Hochwassergefahrenkarten zu vernachlässigen. Dazu werden in einem ersten Schritt die Datengrundlagen bezüglich ihrer Genauigkeiten und Unsicherheiten bewertet und klassifiziert. Anschließend erfolgt der Einsatz von Auswahl- und Wichtungsroutinen, welche die klassifizierten Daten und Methoden untereinander und zusammenfassend bewerten. Dies erfolgt separat für die Datengrundlagen und ausgewählten methodischen Ansätze. Die Umsetzung des konzeptionellen Ansatzes von FLOODVIEW fand unter Verwendung der Programmiersprache FORTRAN statt, in dem ein eigenständiges Programm modifiziert für Einzel- und Vielfachsimulationen erstellt wurde. Darauf aufbauend wird die Einsatzfähigkeit des Bewertungssystems sowohl anhand eines theoretischen Datensatz, bestehend aus

1.111 zufällig ermittelten Überschwemmungsgebieten, sowie an einem realen Datensatz, bestehend aus Informationen über Hochwasserkarten an 40 Gewässern im Land Sachsen-Anhalt, getestet. Neben der systematischen Vergleichbarkeit der Grundlagen von Hochwassergefahrenkarten an unterschiedlichen Gewässern, konnten auch der Einsatz zur Ableitung qualitativer Entwicklungen am Beispiel des Realdatensatzes zwischen den Jahren 2007 und 2010 nachgewiesen werden. Im Ergebnis der Arbeit stellte sich heraus, dass das Bewertungssystem wissenschaftlich fundiert und praktisch relevant als Werkzeug zur Qualitätssicherung bei der Erstellung von Hochwassergefahrenkarten zum Einsatz kommen kann.

Abstract

During the past two decades a lot of exceptionally intensive flood events were recorded in Central Europe. Because of these phenomena as well as the potential of an increasing climate change led to the announcement of the directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks by the European Union. Since 2007 the directive itself defines a frame about the assessment and management of flood risks, which was transposed into national laws by each member state until 2009. Essential instruments of the flood directive are the flood hazard maps. They include basic information about the extent and intensity of the impacted areas by floods to defined discharge scenarios. The delineations in the flood hazard maps represent the extent of the hydrodynamic processes of the defined flood scenarios. Besides the delineation of the inundated areas, the maps provide a fundamental basis for the further realisation of the flood risk management. Because of this fact, the knowledge about uncertainties and the precision of the simulated and displayed floodplains and flood intensities are important for the whole management process. In this context the author try to develop an instrument for a systematically evaluation of the uncertainties of the basics of flood hazard maps. Based on an analysis of the legal demands on floodplains by law the author explains the technical standards of the preparation of flood hazard maps. After this, different methods for the evaluation of uncertainties by hydraulic simulations of inundation areas are detailed discussed. As an example, investigations of uncertainties with the two-dimensional hydrodynamic model TRIMR2D were introduced. Besides the use of approaches of pattern matching methods, different analysis of discharge hydrographs based on Monte-Carlo-simulations are explained. Furthermore the fundamental data and selected methods for the simulation of flood inundated areas are analysed and evaluated concerning their accuracy and uncertainty. Based on this information the author described the assembling of the evaluation system FLOODVIEW. The main objective of FLOODVIEW should be the excellence to evaluate the accuracy and quality of the basic data and methods of flood hazard maps. Because of this the evaluation system is characterised by a modular structure, which try to consider the single parameters as well as their interactions in the preparation of flood hazard maps. In a first step the required basic data are classified depending on their accuracy. Then the classified data and the used methods are evaluated by different routines, which compare the single parameters as well as the fitness of the methods to describe the hydraulic process during a flood. Finally a summarised evaluation of the basic data and the methodical approaches are the result of FLOODVIEW. The availability for use will be tested by a theoretical data set based on 1.111 randomly generated floodplains and a real data set, which represent 40 water bodies in Saxony-Anhalt. The transfer of the conceptual model of FLOODVIEW in a practical computer model was realised by the program language FORTRAN. It was assembled for single and multiple applications. The results of the theoretical and practical tests show, that FLOODVIEW can used for a systematically evaluation and comparison of flood hazard maps and their basics.

Furthermore the test of the real data set clarify, that the evaluation system is also available to compare flood maps at different water bodies as well as to different times. Therefore it's possible to identify trends of the quality of the flood maps similar to a monitoring concept. The result of this work is an evaluation system, which can be used as a practical instrument for the quality management in the case of the preparation of flood hazard maps.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Glossar	XXV
1. Einleitung	1
1.1 Hintergrund	2
1.2 Problemstellung.....	7
1.3 Ziele.....	8
2. Gesetzlicher Rahmen	11
2.1 Richtlinie 2007/60/EG über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.....	12
2.1.1 Vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos.....	14
2.1.2 Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten.....	15
2.1.3 Hochwasserrisikomanagementpläne	16
2.2 Wasserhaushaltsgesetz der Bundesrepublik Deutschland.....	18
2.3 Auswirkungen der rechtlichen Verbindlichkeit von Überschwemmungsgebieten.....	20
3 Gefahrenkarten als grundlegende Instrumente des Hochwasserrisikomanagements	23
3.1 Hochwassergefahrenkarten in der Europäischen Union.....	25
3.2 Hochwassergefahrenkarten in der Bundesrepublik Deutschland.....	28
3.3 Hochwassergefahrenkarten im Land Sachsen-Anhalt.....	33
4 Unsicherheiten von Hochwassergefahrenkarten	39

4.1 Der Unsicherheitsbegriff	39
4.2 Unsicherheiten vs. Verbindlichkeiten bei der Ausweisung von Überschwemmungsflächen	41
4.3 Unsicherheiten und Kalibrierung	42
4.4 Ansätze zur Bewertung von Unsicherheiten	43
4.4.1 Verfahren der räumlichen Mustererkennung	46
4.4.2 Ganglinienanalyse	50
4.4.3 Uncertainty Framework – Konzept zur Unsicherheitsanalyse	52
5 Ermittlung und Darstellung von Überschwemmungsflächen.....	61
5.1 Verfahren der hydraulischen Modellierung	62
5.1.1 Grundlagen hydraulischer Modelle	63
5.1.2 Zweidimensionale Modelle	67
5.1.3 Eindimensionale Modelle	69
5.1.4 Gekoppelte Modelle	70
5.1.5 Sonstige Modellansätze.....	73
5.2 Datengrundlagen	74
5.2.1 Eingangsdaten hydraulischer Modelle	74
5.2.2 Referenzdaten von Hochwasserereignissen	88
5.2.3 Sonstige Datengrundlagen	99
5.3 Kartenmaßstab und Darstellungshintergrund	102
6 FLOODVIEW – ein Werkzeug zur Bewertung der Unsicherheiten der Grundlagen von Hochwassergefahrenkarten	105
6.1 Grundlegende Idee und Anforderungen der Praxis.....	105
6.2 Aufbau des Bewertungssystems „FLOODVIEW“	107
6.2.1 Einsatzmöglichkeiten	107
6.2.2 Struktureller Aufbau	108
6.2.3 Klassifizierungen	110
6.3 Bewertung mittels Expertenwissen.....	111
6.4 Bewertung von Datengrundlagen.....	111
6.4.1 Modelleingangsdaten.....	112
6.4.2 Referenzdaten	117
6.4.3 Kartographischer Darstellungshintergrund	122

6.5 Bewertung von Methoden	123
6.5.1 Beobachtungs- und Messverfahren	124
6.5.2 Hydraulische Modelle.....	127
6.6 Zusammenfassende Bewertung	130
6.7 Technische Umsetzung	132
7 Anwendung des Bewertungssystems FLOODVIEW	135
7.1 Untersuchung des theoretischen Merkmalsraumes.....	135
7.1.1 Datengrundlagen.....	136
7.1.2 Methoden.....	136
7.2 Nachweis der Funktionsfähigkeit anhand theoretischer Beispiele	138
7.2.1 Untersuchte Grundgesamtheit.....	138
7.2.2 Beispiel 1 - Optimierung von Datengrundlagen für hydraulische Modellierungen	139
7.2.3 Beispiel 2 - Bewertung auf Referenzdaten basierender Hochwasserkarten.....	145
7.3 Bewertung von Überschwemmungsgebieten am Beispiel des Landes Sachsen-Anhalt.....	147
7.3.1 Sichtung und Bewertung der Unterlagen	148
7.3.2 Verfügbarkeit von Überschwemmungsgebieten und Datengrundlagen ...	151
7.3.3 Bewertung der Modelleingangsdaten	153
7.3.4 Bewertung der Referenzdaten.....	159
7.3.5 Bewertung des kartographischen Darstellungshintergrundes.....	162
7.3.6 Zusammenfassende Bewertung der Datengrundlagen.....	162
7.3.7 Bewertung der Methoden.....	164
7.3.8 Übersicht der Bewertungen von Datengrundlagen und Methoden	166
7.3.9 Bewertungen mittels Expertenwissen	168
7.3.10 Empfehlungen mittels FLOODVIEW	169
8. Diskussion der Ergebnisse	175
9. Schlussfolgerungen	187
10. Ausblick	189
11. Literatur- und Quellennachweise.....	191
Anlagen	205

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Risikobegriff (verändert nach DKKV 2003).....	3
Abbildung 2: Zusammenhang gesetzlicher Rahmenbedingung und theoretisch sowie praktisch möglichen Verfahren.....	4
Abbildung 3: Beispiele transnationaler Forschungsprojekte zum Hochwassermanagement (aus: EXIMAP 2007).....	26
Abbildung 4: Verfügbarkeit von Hochwasserkarten in Europa (aus: DE MOEL ET AL. 2009).....	28
Abbildung 5: Historische flurstücksgenaue Überschwemmungsgebietskarte der Unstrut (LHW).....	29
Abbildung 6: Hochwassergefahrenkarte des Rheinatlant - Ausschnitt (IKSR 2001).....	30
Abbildung 7: Wahrscheinlichkeits-Intensitäts-Diagramm als Grundlage von Gefahrenzonenkarten (nach: LAWA 2006).....	32
Abbildung 8: Beispiel einer Hochwassergefahrenkarte (nach: LAWA 2010A).....	32
Abbildung 9: Beispiel einer Gefahrenkarte Hochwasser im Land Sachsen- Anhalt (LHW 2009C).....	34
Abbildung 10: Beispiel einer Hochwassergefahrenkarte im Land Sachsen- Anhalt (Entwurf).....	36
Abbildung 11: Schema punktueller (links) und flächenhafter (rechts) Referenzdaten (dunkle Zellen).....	45
Abbildung 12: Gegenüberstellung der maximal beobachteten (rote Umrisslinie) und mittels 2D-Modell (TRIMR2D) berechneten (blaue Flächen) Überschwemmungsflächen für die Elbe zum Hochwasser 2002 im Stadtgebiet Dresden.....	46
Abbildung 13: Prinzip der Mustererkennung von überschwemmten und nicht überschwemmten Gebieten durch Gegenüberstellung (3) der beobachteten (1) und simulierten (2) Flächen nach Tabelle 4.....	47
Abbildung 14: „Höhenfehler“ und „Zeitfehler“ als Maß der Unsicherheit instationärer hydraulischer Modellsimulationen.....	50
Abbildung 15: „Höhenfehler“ als Maß der Unsicherheit stationärer hydraulischer Modellsimulationen.....	51

Abbildung 16: Schema des Uncertainty framework	53
Abbildung 17: Untersuchungsgebiet Dresden.....	55
Abbildung 18: „Error plot“ (A) als Darstellung der Häufigkeit der korrekt simulierten Rasterzellen. Zum Vergleich die als Referenzdatensatz (B) gewählten beobachteten Überschwemmungsflächen (blau).....	57
Abbildung 19: „Dotty plots“ (Punktdiagramm) zur Identifikation der Parametereignung von Rauheitswerten für Gerinne- und Vorlandbereiche	58
Abbildung 20: Vergleich von Ganglinien (Linienschar) als Ergebnisse instationärer Simulationsläufe, einer auf Monte-Carlo- Verfahren basierter Parameteroptimierung des Modells TRIMR2D, im Vergleich mit beobachteten Werten (gelbe Linie) am Beispiel des Hochwassers 2002 im Stadtgebiet Dresden.	59
Abbildung 21: Ergebnisse statistischer Auswertung instationärer Simulationen am Beispiel des Hochwassers 2002 mit dem 2D- Modell TRIMR2D	59
Abbildung 22: Historische Überschwemmungsgebietskarte (Ausschnitt) der Weißen Elster von 1912.....	61
Abbildung 23: Schema des Massenbilanzstroms eines Kontrollvolumens (Fluids) in x-Richtung	63
Abbildung 24: Schema der Größenverhältnisse der Raumrichtungen entlang eines Fließgewässers	64
Abbildung 25: Räumlich differenzierte Verteilung der Fließgeschwindigkeiten als Ergebnis zweidimensionaler Modellierungen (LHW 2010B).....	68
Abbildung 26: Schema der Modellkopplung des RIMAX-Projektes 3ZM- GRIMEX	71
Abbildung 27: Beispielergebnis der Modellkopplung von Oberflächen- und Grundwasser.....	72
Abbildung 28: Ermittlung von Wassertiefen und Überschwemmungsflächen mittels GIS.....	74
Abbildung 29: Digitale Geländemodelle im Vergleich	77
Abbildung 30: Abweichungen der Geländehöhen des INTERMAP-DGM5 (links) und des ATKIS-DGM10 (rechts) vom LASERSCAN- DGM1 (schwarze Flächen = keine Daten verfügbar)	77

Abbildung 31: Integration eines Brückenbauwerks in ein hydraulisches 2D-Modell (LHW).....	79
Abbildung 32: Integration von Gebäudeumrissen aus ATKIS-Daten (links, rote Flächen) in ein hydraulisches 2D-Modell (rechts, schwarze Flächen) (LHW)	79
Abbildung 33: Abflusskurven am Pegel Dresden/Elbe aus FLYS (BfG 2009)	81
Abbildung 34: Bewuchsverhältnisse an der Schwarze Elster (Pegel Löben) (LHW 10/2008).....	87
Abbildung 35: Datengrundlagen der indirekten Modellkalibrierung	89
Abbildung 36: Historische Wasserstandsmarken Grimma/ Mulde (1), Dessau-Elbbrücke (2) [Foto: Deutsch, 2008], Camburg/ Saale (3)	92
Abbildung 37: Wasserspiegelfixierungen zum Elbehochwasser 2006 (LHW)	93
Abbildung 38: Häufigkeit (%) der Abweichungen (cm) terrestrisch gemessener Wasserspiegelhöhen entlang der Elbe von denen in der Strommitte ermittelten Wasserstandsfixierungen zum Hochwasser 2006.....	94
Abbildung 39: Häufigkeiten (%) der Abweichungen (cm) von beobachteten und simulierten Wasserspiegelhöhen entlang der Elbe zum Hochwasser 2006.....	95
Abbildung 40: Hochwasserkartierung mittels Satellitengestützter Verfahren (www.zki.de).....	96
Abbildung 41: Hochwasserkartierung anhand objektbasierter Auswertungen (aus: HAASE ET AL. 2004).....	98
Abbildung 42: Vergleich von Auelehmkartierungen der BÜK1000 (1), BÜK400 (2) und der LKQ (3) im Bereich der Freiburger Mulde (Sachsen).....	101
Abbildung 43: Abweichungen der Deichsignatur in ausgewählten topographischen Karten (DTK10, TK50N) vom tatsächlichen Deichverlauf eines LASERSCAN-DGM	102
Abbildung 44: Darstellung von Überschwemmungsflächen in verschiedenen Maßstäben.....	103
Abbildung 45: Konzept der Einsatzmöglichkeiten von FLOODVIEW.....	107
Abbildung 46: Struktureller Aufbau des Bewertungssystems FLOODVIEW.....	109
Abbildung 47: Schema der Bewertung von Modelleingangsdaten in FLOODVIEW.....	113

Abbildung 48: Schema der Bewertung von Referenzdaten in FLOODVIEW	117
Abbildung 49: Schema der Bewertung der Methoden in FLOODVIEW	124
Abbildung 50: Ablaufschema zur Bewertung von Beobachtungs- und Messverfahren	126
Abbildung 51: Schema zur Bewertung hydraulischer Modelle in FLOODVIEW	129
Abbildung 52: Eingabemaske von FLOODVIEW	132
Abbildung 53: Häufigkeitsverteilung der theoretisch möglichen Klassenzuordnung für Methoden	138
Abbildung 54: Verteilung der Wertzuweisungen für 1.111 mittels Monte- Carlo-Verfahren ermittelter theoretischer Datensätze	139
Abbildung 55: Häufigkeitsverteilung (Anzahl) der mittels FLOODVIEW erzielten Bewertungen (Klasse) für den Nachweis der Funktionsfähigkeit des Bewertungssystems anhand der Optimierung von Datengrundlagen	141
Abbildung 56: Räumliche Verteilung der mittels FLOODVIEW erzielten Bewertungen für den Nachweis der Funktionsfähigkeit des Bewertungssystems anhand der Optimierung von Datengrundlagen am Beispiel eines theoretischen Gewässernetzes	143
Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der Bewertungsklassen für den Fall, dass allen Referenzdaten und den Daten zum Darstellungshintergrund zufällige Klassenwerte zugrunde liegen (links) bzw. die Daten zum Darstellungshintergrund zusätzlich mit der größten Genauigkeit vorliegen (rechts).	146
Abbildung 58: Räumliche Verteilung der Bewertungsklassen für den Fall, dass allen Referenzdaten und den Daten zum Darstellungshintergrund zufällige Klassenwerte zugrunde liegen (links) bzw. die Daten zum Darstellungshintergrund zusätzlich mit der größten Genauigkeit vorliegen (rechts).	147
Abbildung 59: Grundlagen und Herkunft amtlicher Überschwemmungsgebiete im Land Sachsen-Anhalt (Stand: 2007)	149
Abbildung 60: Untersuchtes Gewässernetz des Realdatensatzes im Land Sachsen-Anhalt	151
Abbildung 61: Verfügbarkeit von Überschwemmungsgebietskarten in den Jahren 2007 und 2010	152

Abbildung 62: Aktualisierung der Überschwemmungsgebietskarten zwischen den 2007 und 2010.....	152
Abbildung 63: Bewertung der Daten zur Topographie.....	154
Abbildung 64: Häufigkeitsverteilung der bewerteten Daten zur Topographie.....	154
Abbildung 65: Bewertung der Abflusswerte zur Kalibrierung.....	155
Abbildung 66: Häufigkeitsverteilung der bewerteten Abflüsse zur Kalibrierung.....	156
Abbildung 67: Bewertung der Abflusswerte zur HQ(T)-Berechnung.....	157
Abbildung 68: Häufigkeitsverteilung der bewerteten Abflüsse zur HQ(T)- Berechnung.....	157
Abbildung 69: Bewertung der Modelleingangsdaten zur Kalibrierung hydraulischer Modelle.....	158
Abbildung 70: Bewertung der Modelleingangsdaten zur HQ(T)-Berechnung.....	158
Abbildung 71: Häufigkeitsverteilung der verfügbaren Referenzdaten.....	160
Abbildung 72: Bewertung der Referenzdaten.....	161
Abbildung 73: Zusammenfassende Bewertung der Datengrundlagen.....	163
Abbildung 74: Ausgewiesenen Überschwemmungsbioten zugrunde liegende Methoden.....	164
Abbildung 75: Bewertung ausgewiesener Überschwemmungsgebieten zugrunde liegende Methoden.....	165
Abbildung 76: Veränderung der Bewertungsklassen von 2007 zu 2010.....	168
Abbildung 77: Differenz der Bewertungsklassen zum Stand 2010 gegenüber dem Maximalwert.....	168
Abbildung 78: Struktur der Einzelroutinen des Programms FLOODVIEW.....	205

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Terminkette zur Umsetzung der Bearbeitungsstufen der HWRM- RL	14
Tabelle 2: Umgang mit Flächen, die mindestens einmal in 100 Jahren überflutet werden	20
Tabelle 3: Verbindlichkeit der Festlegungen zu Hochwassergefahren- und - risikokarten	24
Tabelle 4: Vergleichsmatrix zur flächendifferenzierten Modellkalibrierung	47
Tabelle 5: Bewertung der Datenunsicherheit von Luft- und Satellitenbildaufnahmen zu ausgewählten Hochwasserereignissen.....	49
Tabelle 6: Ausgewählte Methoden zur Ermittlung von Überschwemmungsflächen	62
Tabelle 7: Arbeitsschritte zur Anwendung hydraulischer Modelle	67
Tabelle 8: Vergleich Digitaler Geländemodelle	76
Tabelle 9: Flächenanteile der Höhenabweichungen der untersuchten Geländemodelle.....	78
Tabelle 10: Spannweiten von Abfluss- und Wasserstandswerten ausgewählter Pegel entlang der Elbe unter Verwendung extremwertstatistischer Verfahren (nach: BFG 2009)	82
Tabelle 11: Unsicherheiten von Pegelzeitreihen	82
Tabelle 12: Verfahren zur Bestimmung hydrologischer Bemessungswerte (verändert nach DWA 2010).....	84
Tabelle 13: Ergebnisse von ADCP-Messungen am Pegel Löben (Schwarze Elster)	87
Tabelle 14: Einsatz von Geofernerkundungsdaten zur Dokumentation des Hochwassers 2002 am Beispiel von Auswertungen im Elbeinzugsgebiet (nach: HAASE ET AL. 2004)	97
Tabelle 15: Klassifizierung von Datengrundlagen und Methoden im Bewertungssystem FLOODVIEW.....	110
Tabelle 17: Datengrundlagen in FLOODVIEW	112
Tabelle 18: Klassifizierung der Höhengenaugigkeit der Daten zur Topographie	114

Tabelle 19: Klassifizierung der Abflusswerte zur Kalibrierung.....	115
Tabelle 20: Klassifizierung der Abflusswerte zur HQ(T)-Ermittlung	116
Tabelle 21: Zusammenfassende Klassifizierung der Modelleingangsdaten.....	116
Tabelle 22: Klassifizierung von Hochwasserkartierungen	119
Tabelle 23: Klassifizierung von Hochwassermarken	120
Tabelle 24: Klassifizierung von Wasserstandsermittlungen an Pegeln.....	120
Tabelle 25: Erläuterungen zur Wichtungsroutine für die Bewertung der Referenzdaten	122
Tabelle 26: Klassifizierung der Topographischen Karten.....	123
Tabelle 27: Zusammenfassende Klassifizierung der Datengrundlagen.....	130
Tabelle 28: Übersicht der Bewertungen in FLOODVIEW	131
Tabelle 29: Anzahl der möglichen Kombinationen des Bewertungssystems FLOODVIEW	135
Tabelle 30: Verteilung der theoretisch möglichen Klassenwerte für Datengrundlagen.....	136
Tabelle 31: Theoretisch mögliche Klassenwerte der Methoden.....	137
Tabelle 32: Erforderliche Genauigkeit der Datengrundlagen zur bestmöglichen Ermittlung von Überschwemmungskarten	144
Tabelle 33: Herkunft der Überschwemmungsgebiete im Land Sachsen- Anhalt (Stand 2007)	150
Tabelle 34: Ergebnisse der Eingangsabfragen.....	153
Tabelle 35: Ergebnisse der Bewertung der Modelleingangsdaten.....	159
Tabelle 36: Bewertung der Referenzdaten bereits ermittelter Überschwemmungsgebiete	160
Tabelle 37: Ergebnisse der Bewertung der Referenzdaten	161
Tabelle 38: Bewertung des Darstellungshintergrundes der Hochwasserkarten	162
Tabelle 39: Ergebnisse der zusammenfassenden Bewertung der Datengrundlagen.....	163
Tabelle 40: Übersicht der Bewertungen für die Datengrundlagen und Methoden.....	167
Tabelle 41: Bewertung der Überschwemmungsgebiete mittels Expertenwissen zum Stand 2007.....	169

Tabelle 42: Klassifizierung der Datengrundlagen für Gewässer ohne bisher ausgewiesene Überschwemmungsflächen und Hochwassergefahrenkarten zum Stand 2010	171
Tabelle 43: Empfehlungen zu Datengrundlagen für Gewässer ohne bisher erstellte Hochwassergefahrenkarten zum Stand 2010.....	172
Tabelle 44: Empfehlungen der in Abhängigkeit der Strömungscharakteristik im Hochwasserfall vorzugsweise zu verwendenden hydraulischen Modelle	173

Abkürzungsverzeichnis

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ALS	Airborne Laserscanning
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BTNT	Biotop- und Nutzungstypenkartierung
BÜK	Bodentübersichtskarte
BWK	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau
BVG	Bundesverwaltungsgericht
CORINE	Coordinated Information on the European Environment
CPU	Central Processing Unit
DGM	Digitales Geländemodell
DLR	Deutsche Luft- und Raumfahrt
DTK	Digitale Topographische Karte
DWA Abfall	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und
EG	Europäische Gemeinschaft
ELLA	Elbe-Labe (INTERREG IIIb Forschungsprojekt (www.ella-interreg.org/))
EU	Europäische Union
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
GW	Grundwasser
HH.MM	Zeitangabe (Stunde.Minute)
HN	hydrodynamisch-numerisch
HQ(T)	Hochwasserabfluss eines bestimmten Wiederkehrintervalls
HQ ₁₀	Hochwasserabfluss mit einem Wiederkehrintervall einmal in 10 Jahren
HQ ₁₀₀	Hochwasserabfluss mit einem Wiederkehrintervall einmal in 100 Jahren
HQ _{extrem}	Hochwasserabfluss mit niedriger Wahrscheinlichkeit (EG 2007)

HW	Hochwasser
HWRM-RL	Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der Europäischen Union (EG 2007)
IKONOS	Erdbeobachtungssatellit (www.geoeye.com)
IFSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IVU-Richtlinie	Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (vgl. EG 2007)
LAWA	Bund/ Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LfU	Bayrisches Landesamt für Umwelt
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
LIDAR	Light detection and ranging
LKQ	Lithofazieskarte Quartär
MpCCI	Multi-Physics Code Coupling Interface
m ü. NHN	Meter über Normalhöhennull
NAM	Niederschlags-Abfluss-Modell
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NSE	Nash-Sutcliffe-Efficiency
RADAR	Radio Detection and Ranging
RMK	Reihenmesskamera
SAR	Synthetic Aperture Radar
SCAI	Fraunhofer Institut für Algorithmen und wissenschaftliches Rechnen
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STAU	Staatliches Amt für Umweltschutz
TK	Topographische Karte
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle GmbH
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
W-Q	Wasserstands-Abfluss-Beziehung, auch Schlüsselkurve genannt
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union (EG 2000)
WSP	Wasserspiegel
ZUERS	Zonierungssystem für Überschwemmung, Hochwasser und Rückstau

1D	eindimensional
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional

Abkürzungen Text

Abs.	Absatz
Art.	Artikel
Gl.	Gleichung
k. A.	keine Angabe
Kap.	Kapitel
u. a.	unter anderem
vgl.	vergleiche

Lateinische Schriftzeichen

A	[m ²]	Durchflossene Querschnittsfläche
A_h	[m ² /s]	horizontale Viskosität
f	[-]	Corioliskraft
g	[m s ⁻²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Wassertiefe
I	[m m ⁻¹]	Gefälle
k	[mm]	Absolute Sandrauheit
k_{st}	[m ^{1/3} s ⁻¹]	Manning-Strickler-Rauheitsbeiwert
m	[m]	Meter
n	[s/m ^{1/3}]	Manning- Rauheitsbeiwert
p	[N m ⁻²]	Druck
Q	[m ³ s ⁻¹]	Abfluss
r_{hy}	[m]	Hydraulischer Radius
t	[s]	Zeit
u, v, w	[m s ⁻¹]	Richtungsbezogene (x, y, z) Geschwindigkeiten
\bar{v}	[ms ⁻¹]	mittlere Fließgeschwindigkeit
x, y, z	[]	Raumrichtungen

Griechische Schriftzeichen

λ	[]	Widerstandsbeiwert der Rohrreibung
ρ	[kg/m ³]	Dichte
γ	[]	Sohlwiderstandsbeiwert (Gl. 13)
ζ	[m]	Wasserspiegelhöhe
τ^b	[]	Sohlwiderstandsterm
τ^o	[]	Windwiderstandsterme

Glossar

ADCP	Der Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmesser ist ein Messgerät zur berührungslosen Strömungsmessung mittels Ultraschall, welcher die Doppler-Frequenzverschiebung von Streukörpern im Wasser zur direkten Bestimmung von Abfluss und Strömungsgeschwindigkeit verwendet.
ALS	Das Airborne Laserscanning bezeichnet ein Vermessungsverfahren zur optischen Abstandsmessung mittels LIDAR, welches von Flugzeugen oder Helikoptern aus erfolgt.
Flussgebietseinheit	ein als Haupteinheit für die Bewirtschaftung von Einzugsgebieten festgelegtes Land- oder Meeresgebiet, das aus einem oder mehreren benachbarten Einzugsgebieten, dem ihnen zugeordneten Grundwasser und den ihnen zugeordneten Küstengewässer im Sinne des § 7 Absatz 5 Satz 2 WHG besteht (LAWA 2010A).
Hochwasser	ist die zeitlich begrenzte Überschwemmung von normalerweise nicht mit Wasser bedecktem Land durch oberirdische Gewässer oder durch in Küstengebiete eindringendes Meerwasser (WHG 2009).
Hochwassergefahrenkarten	beinhalten gemäß dem Artikel 6 Absatz 3 und 4 der HWRM-RL die kartographische Darstellung der von Hochwasser ausgehenden Gefahr hinsichtlich der Informationen zum Ausmaß von Überflutungen sowie der Intensität, welche in Form von Wassertiefen, Wasserständen, Fließgeschwindigkeiten oder dem Wasserabfluss angegeben werden können.
Hochwasserrisiko	ist die Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Hochwasserereignisses und der hochwasserbedingten potenziellen nachteiligen Folgen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten (WHG 2009).
Hochwasserrisikokarten	beinhalten gemäß dem Artikel 6 Absatz 5 der HWRM-RL aufbauend auf den Hochwassergefahrenkarten die kartographische

	Darstellung der nachteiligen Auswirkungen, die sich aus der Hochwassergefährdung ergeben können.
Intensität	ein neutraler Begriff, der je nach Erfordernis für unterschiedliche physikalische Eigenschaften eines schädigenden Ereignisses stehen kann. Bei Hochwasser sind dies nach Relevanz geordnet: Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, das Produkt aus Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit, Dauer, Anstiegsgeschwindigkeit, Transport von Sedimenten und Schadstoffen (aus: LAWA 2010A nach MERZ & GOCHT 2003).
LIDAR	bezeichnet eine Methode zur optischen Messung von Entfernungen, welche unter Verwendung von Laserstrahlen arbeitet und den zeitlichen Abstand von gesendetem und empfangenem Signal auswertet.
Pattern Matching	Verfahren zur Auswertung räumlicher Muster, welches auf der Gegenüberstellung von simulierten und beobachteten Zuständen beruht.
Risikogebiete	Gebiete mit signifikantem Hochwasserrisiko, wobei das Hochwasserrisiko als die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses mit den möglichen nachteiligen Hochwasserfolgen für die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe, wirtschaftliche Tätigkeiten und erhebliche Sachwerte definiert ist (WHG 2009).
Subsidiarität	Prinzip von Politik und Gesellschaft, welches die Eigenverantwortung vor staatliches Handeln stellt.
Überschwemmungsgebiete	Gebiete zwischen oberirdischen Gewässern und Deichen oder Hochufern und sonstige Gebiete, die bei Hochwasser überschwemmt oder durchflossen oder die für Hochwasserentlastung oder Rückhaltung beansprucht werden (WHG 2009).
Referenzdaten	Daten aus Messungen und Beobachtungen von Hochwasserereignissen, welche zu einem definierten Zeitpunkt und für einen definierten Ort bzw. ein Gebiet, die aktuelle Hochwassersituation repräsentieren. Sie dienen der Kalibrierung und Validierung von hydraulischen Modellen.

Unsicherheit kann als das fehlende Wissen über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines bestimmten Umweltzustandes bezeichnet werden.

„Es ist leichter, die Bahn der fernen Gestirne zu berechnen als den Lauf des Wassers, das unter unseren Augen fließt.“ Galileo Galilei vor ca. 500 Jahren

(verändert aus: ZANKE 2002)