Technische Universität Dresden – Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016
„Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement“

Von der hydrologischen zur risikobasierten Hochwasservorhersage

Daniel Bachmann, Dirk Eilander, Annemargreet de Leeuw, Joost Beckers, Ferdinand Diermanse, Peter Gijsbers

Hochwasservorhersage, -warnung und Katastrophenschutz sind wichtige Bestandteile des Hochwasserrisikomanagements. Diese Maßnahmen tragen wesentlich dazu bei, das vorhandene Restrisiko im Hochwasserfall zu reduzieren.

Die vorhergesagten Informationen über Abflüsse oder Wasserstände berücksichtigen oft nur hydrologische oder hydraulische Aspekte des Systems. Relevante Informationen über die Zuverlässigkeit der Hochwasserschutzlinie, das Ausbreitungsverhalten einer Überflutung im Gebiet selbst und die dort vorhandenen Sachwerte und Infrastrukturen werden im operativen Einsatz nicht in einem System genutzt.

In Zusammenarbeit von Deltares (NL) und HR Wallingford (UK) werden deshalb Ansätze, Methoden und Werkzeuge mit dem Ziel entwickelt, bestehende hydrologisch basierte Hochwasservorhersagesysteme mit Elementen der strategischen Hochwasserrisikoanalyse, wie der Zuverlässigkeitsanalyse, der Analyse der Überflutungsausbreitung und der Hochwasserkonsequenzen, zu erweitern.

Stichworte: Hochwasserrisiko, Hochwasservorhersage, Katastrophenschutz

1 Einleitung

Die drei Säulen eines modernen Hochwasserrisikomanagements sind: Vermeidung, Schutz und Vorsorge. Wichtige Maßnahmen im Bereich der Vorsorge sind die Hochwasservorhersage, -warnung und der Katastrophenschutz (*EU, 2007*). Diese Maßnahmen dienen der Reduktion des Restrisikos durch eine frühzeitige und effektive Warnung.

Innerhalb des Katastrophenschutzes werden spezifische Warnungen in spezifische Notfallmaßnahmen umgesetzt (*Verkade & Werner, 2011*). Angepasste Steuerung von Hochwasserrückhalteräumen, Verstärkung vorhandener technischer Hochwasserschutzmaßnahmen durch Sandsäcke, notfallmäßige Errichtung eines zeitlich begrenzten Hochwasserschutzes sowie die horizontale oder vertikale Evakuierung von Personen sind Beispiele von Notfallmaßnahmen, die im Rahmen des Katastrophenschutzes zur Verfügung stehen.

Die derzeit eingesetzten modell-basierten Hochwasservorhersagesysteme berücksichtigen in der Regel folgende Prozesse: meteorologische Modelle dienen der Vorhersage der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Niederschlag, Wind und Temperatur; daran anschließend transformiert ein hydrologisches Modell die meteorologischen Eingangsdaten in hydrologische Daten, wie beispielsweise Abflüsse im Fluss (vgl. Abbildung 1).

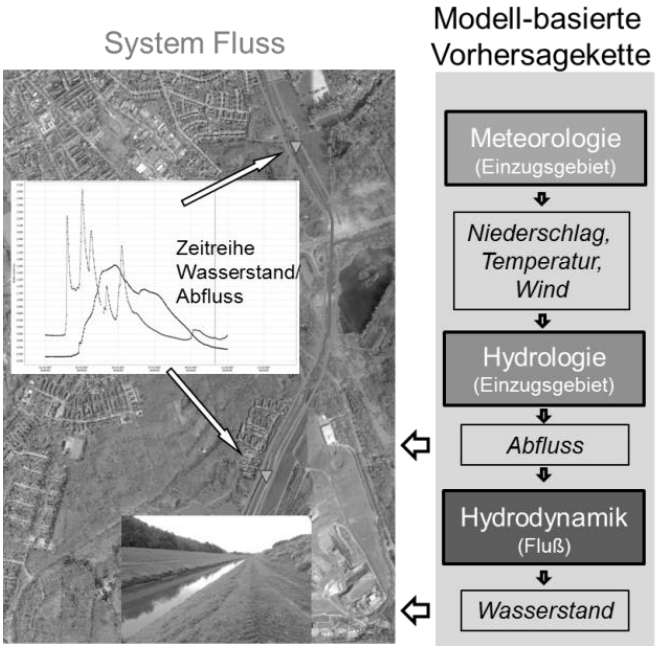

Abbildung 1: Status-quo einer modell-basierten Hochwasservorhersage: von der meteorologischen zur hydrologischen Vorhersage

Diese Informationen helfen jedoch nur teilweise relevante Fragen des Katastrophenschutzes zu beantworten:

- Wo und wann ist ein Versagen der Hochwasserschutzlinie möglich?
- Wo und wann muss die Hochwasserschutzlinie durch temporäre Maßnahmen verstärkt werden?
- Was sind die Konsequenzen des Überströmens oder Versagens der Hochwasserschutzlinie im Hinterland?
- Welche Maßnahmen können effizient diese Konsequenzen verhindern oder reduzieren?

Diese Fragen werden derzeit im Hochwasserfall weitestgehend mit Hilfe von Expertenwissen oder vorberechneten Informationen (z. B. Überflutungsflächen) beantwortet. Vor- und Nachteile der erwähnten Ansätze im Rahmen einer operativen Anwendung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Vorteile Expertenwissen: schneller Zugriff; basierend auf langjährigen Erfahrungen; Anpassung an vorhergesagte Zustände möglich;
- Nachteile Expertenwissen: Intuitive und subjektive Einschätzung der Situation möglich; Verfügbarkeit des Experten;
- Vorteile vorberechneter Informationen: schneller Zugang zu geprüften und objektiven Informationen;
- Nachteile vorberechneter Informationen: Verfügbarkeit der Informationen; Anpassung an vorhergesagte Zustände nicht immer möglich.

Das in diesem Artikel vorgestellte Konzept erweitert die derzeit angewendeten modell-basierten Vorhersagesysteme (vgl. Abbildung 1) durch Ansätze, welche schon seit einigen Jahren in der strategischen Hochwasserrisikoanalyse angewendet werden. Methoden, wie die probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse, die 2-dimensionale Modellierung der Überflutungsausbreitung und die Analyse der Konsequenzen, werden so angepasst, um dem Entscheidungsträger auch im operativen Bereich folgende zusätzliche Informationen zur Verfügung zu stellen:

- Ort, Zeit und Wahrscheinlichkeit eines Versagens in der Hochwasserschutzlinie,
- Überflutungsausbreitung und hydraulische Größen im Hinterland im Fall eines Versagens der Hochwasserschutzlinie,
- Konsequenzen der Überflutung im Hinterland, wie betroffene oder gefährdete Personen und Schäden an kritischen Infrastrukturen.

Diese zusätzlich vorhergesagten Informationen erweitern die bereits vorhandenen Informationen (Expertenwissen, vorberechnete Daten). Dadurch kann die Auswahl von Notfallmaßnahmen effizienter unterstützt (z. B. Ort, Zeit und Typ) und deren Bereitstellungszeit wesentlich verringert werden.

2 Erweiterung 1: Von dem meteorologischen Ereignis zur Versagenswahrscheinlichkeit

Erweiterung 1 berücksichtigt die Zuverlässigkeit der Hochwasserschutzlinie in der Hochwasservorhersage (vgl. Abbildung 2). Dazu wird die Hochwasserschutzlinie in quasi-homogene Sektionen (nach Typ, Geometrie und geotechnische Parameter etc.) eingeteilt. Die Zuverlässigkeit pro Sektion wird unter Berücksichtigung von geotechnischen und hydraulischen Aspekten in der sogenannten Einwirkungs-Versagensfunktion zusammengefasst.

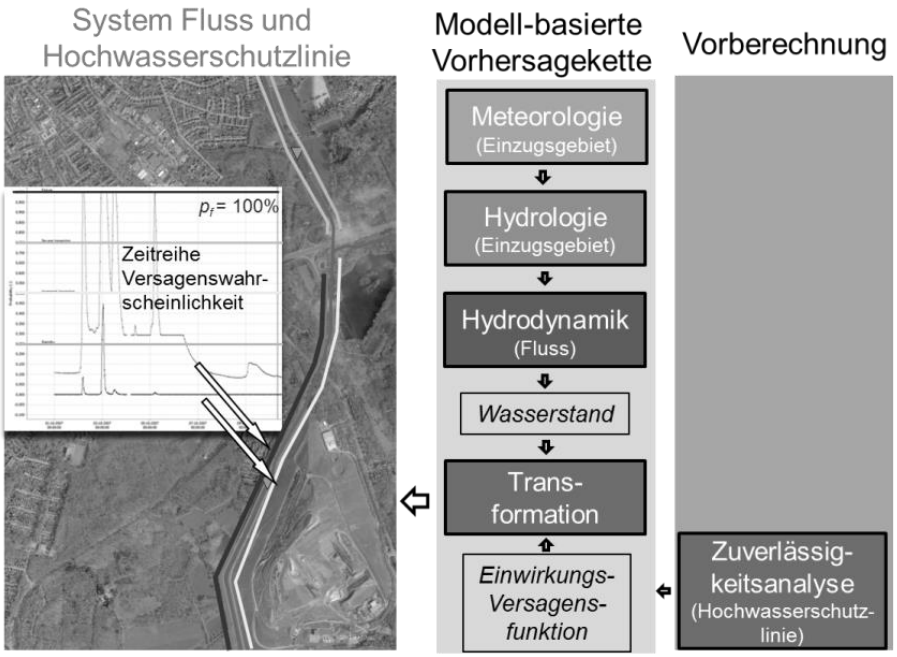

Abbildung 2: Integration einer probabilistischen Zuverlässigkeitsanalyse in die Vorhersagekette durch Erweiterung 1 zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Hochwasserschutzlinie

Die Einwirkungs-Versagensfunktion *Frc(x)* fasst die Zuverlässigkeit eines Bauwerkes in Abhängigkeit einer definierten Einwirkungsgröße zusammen *(Hall et al., 2003*). Im gegebenen Kontext wird der Wasserstand h_w im Gewässer am Bauwerk als einwirkende Größe definiert. Die Funktion stellt die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagensereignisses *P(Versagen|Einwirkung)* [-] auf der Ordinate in Abhängigkeit des Wasserstandes h_w [m] auf der Abszisse (vgl. Abbildung 3) dar. Die Ermittlung der Einwirkungs-Versagensfunktion findet in der Regel durch Expertenwissen oder eine probabilistische modellbasierte Analyse statt (*Bachmann et al., 2013*).

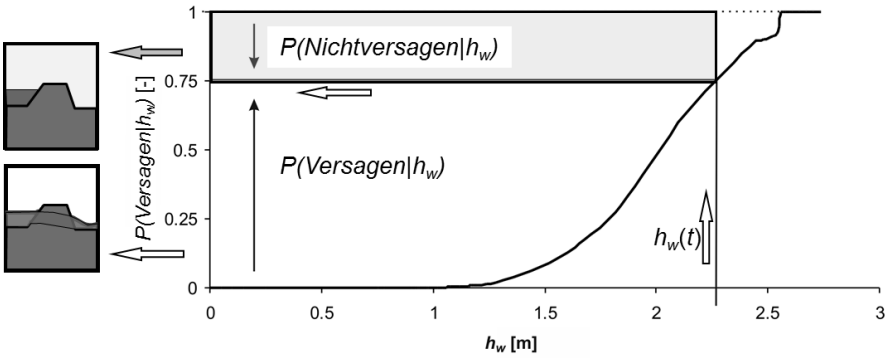

Abbildung 3: Konzept der Einwirkungs-Versagensfunktion; Transformation des Wasserstandes h_w in eine Versagenswahrscheinlichkeit *P(Versagen|h_w)*

Die Einwirkungs-Versagensfunktion wird bisher vorwiegend in der strategischen Hochwasserrisikoanalyse angewendet (*Bachmann & Schüttrumpf, 2014*). In letzter Zeit zeigt sich jedoch der Bedarf, diese Funktion auch im operativen Bereich einzusetzen (*Schultz et al., 2010*). So verwenden beispielsweise *Bachmann et al.* (*2013*) Einwirkungs-Versagensfunktionen für 60 Deichsektionen entlang der Emscher, um probabilistische Aspekte in eine operative Hochwasservorhersage zu integrieren.

Die Einwirkungs-Versagensfunktion wird pro Sektion vor einer operativen Anwendung ermittelt. Es gilt die Annahme, dass relevante Eingangsparameter während eines Hochwasserereignisses konstant sind. Eine Aktualisierung wird dann notwendig, wenn gemessene (z. B. Sensordaten) oder beobachtete Daten (z. B. durch Deichinspektion) zur Verfügung stehen.

In der operativen Anwendung werden dann die vorhergesagten Wasserstände mit Hilfe der Einwirkungs-Versagensfunktion in vorhergesagte Zeitreihen der Versagenswahrscheinlichkeit pro Sektion transformiert (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3). Diese Transformation vom Wasserstand zur Versagenswahrscheinlichkeit kann sehr schnell und effizient durchgeführt werden.

Somit stehen dem Entscheidungsträger Informationen über die Zuverlässigkeit der Hochwasserschutzlinie zur Verfügung. Maßnahmen wie eine Erhöhung der Inspektionsintervalle oder eine notfallmäßige Verstärkung der Hochwasserschutzlinie können zeitnah organisiert und geplant werden.

3 Erweiterung 2: Vom Versagensereignis zur Konsequenz

Die Erweiterung 2 zielt auf die modell-basierte Vorhersage möglicher Auswirkungen und Schäden im Hinterland durch ein Versagensereignis (Überströmen oder Bresche), wie in Abbildung 4 dargestellt, ab.

Das Ziel der hydrodynamischen Analyse ist es, die vorhergesagten hydrologischen Randbedingungen in hydraulische Größen, wie Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten, zu transformieren. Dabei werden sowohl die morphologischen Verhältnisse im Fluss und im Hinterland, als auch der Zustand der Hochwasserschutzlinie (Versagens- und Nichtversagensereignisse) berücksichtigt.

In der Analyse der Breschenentwicklung wird die Aufweitung einer Bresche modelliert. Diese hängt wesentlich von den geotechnischen und geometrischen Parametern der Hochwasserschutzsektion sowie vom Potentialunterschied zwischen Flusswasserstand und Wasserstand im Hinterland als treibende Kraft ab.

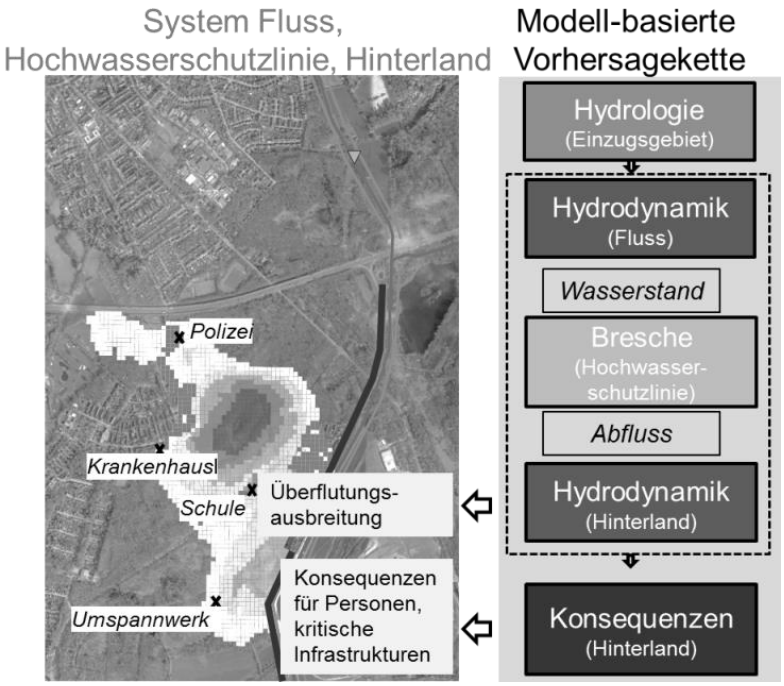

Abbildung 4: Integration der Breschenentwicklung, der Überflutungsausbreitung und möglicher Konsequenzen in die Vorhersagekette durch Erweiterung 2, um modell-basierte Informationen über die Auswirkungen einer Überflutung bereitzustellen

Die Analyse der Konsequenzen hat zum Ziel, die hydraulischen Größen in Konsequenzen für Personen, Wirtschaft und Umwelt zu transformieren. In einer operativen Anwendung ist eine rein qualitative Einschätzung der Konsequenzen oft ausreichend. Im Gegensatz zu einer quantitativen Analyse, oft angewendet in einer strategischen Hochwasserrisikoanalyse, wird bei einer qualitativen Einschätzung die Überflutungsausbreitung mit räumlichen Informationen über Landnutzungen, Bevölkerungsdichten oder kritischen Infrastrukturen verschnitten. Eine rein visuelle Aufbereitung dient dann einer qualitativen Einschätzung der Konsequenzen.

4 Prototypanwendung Rotterdam

4.1 Einleitung

Das Gebiet der Stadt Rotterdam liegt im westlichen Teil der Niederlande (vgl. Abbildung 5) am Delta von Maas und Rhein ca. 35 km von der Nordsee entfernt. Es ist mit einer durchschnittlichen Einwohnerdichte von 3000 Einwohner/km² dicht besiedelt. Die Landnutzung wird durch Wohnbebauung, Industrie und Landwirtschaft geprägt.

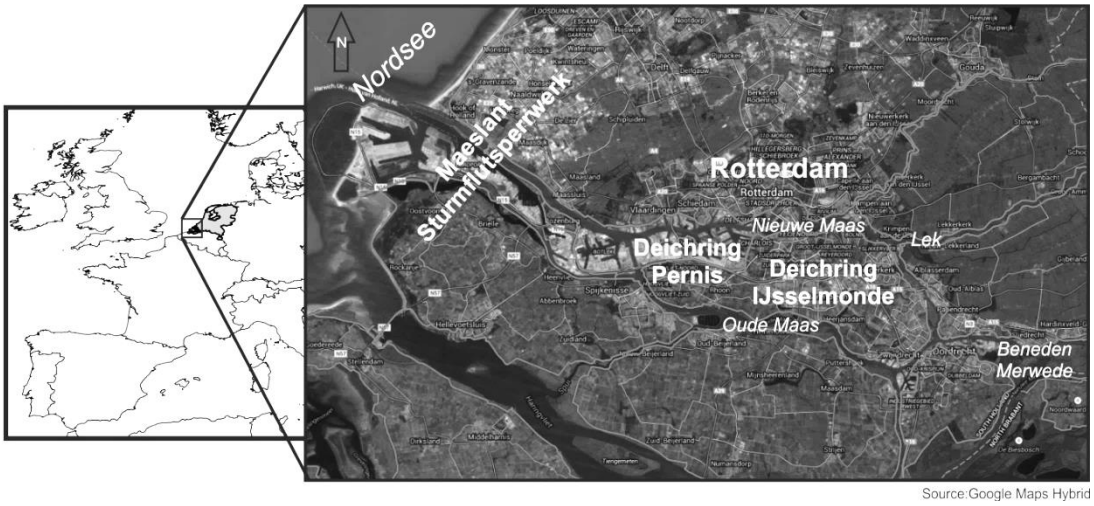

Abbildung 5: Übersicht Prototypanwendung Rotterdam

Die durchschnittliche Höhenlage von 0 m NAP (Normal Amsterdamer Pegel) und das vorhandene hohe Schadenspotential führt zu einem sehr hohen Hochwasserrisiko im Gebiet. Dieses hohe Hochwasserrisiko – sowohl von See- als auch von Binnenseite – wird durch technische Hochwasserschutzmaßnahmen, wie das Maeslant Sturmflutsperrwerk und durch Eindeichung des Gebietes mit einem hohen Schutzstandard (bis einem zu 10.000-jährlichen Ereignis) minimiert.

Ziel dieser Prototypanwendung ist es, die Möglichkeiten und den zusätzlichen Nutzen einer erweiterten Vorhersage für Entscheidungsträger des Katastrophenschutzes zu demonstrieren. Sie dient nicht dazu, das Hochwasserrisiko im Gebiet zu bewerten. Deshalb werden an verschiedenen Stellen Veränderungen des realen Systems vorgenommen (z. B. Maeslant Sturmflutsperre schließt nicht, Verringerung der Deichzuverlässigkeiten), da ansonsten – aufgrund des hohen vorhandenen Schutzstandards – eine Demonstration des Verfahrens nicht möglich wäre.

4.2 Modellaufbau

Im Modellgebiet liegen die Deichringe Pernis und IJsselmonde, welche im südlichen Bereich von Rotterdam liegen (vgl. Abbildung 5).

Zuverlässigkeitsanalyse

14 Deichsektionen im Deichring IJsselmonde und eine Sektion im Deichring Pernis werden als potentielle Bruchstellen im Modell berücksichtigt (vgl. Abbildung 6). Für diese Sektionen liegen vorberechnete Einwirkungs-Versagensfunktionen vor (*van der Meij, 2013*), welche sich aus den Versagenswahrscheinlichkeiten der Fehlermechanismen Überströmen, Piping und Makrostabilität zusammensetzen.

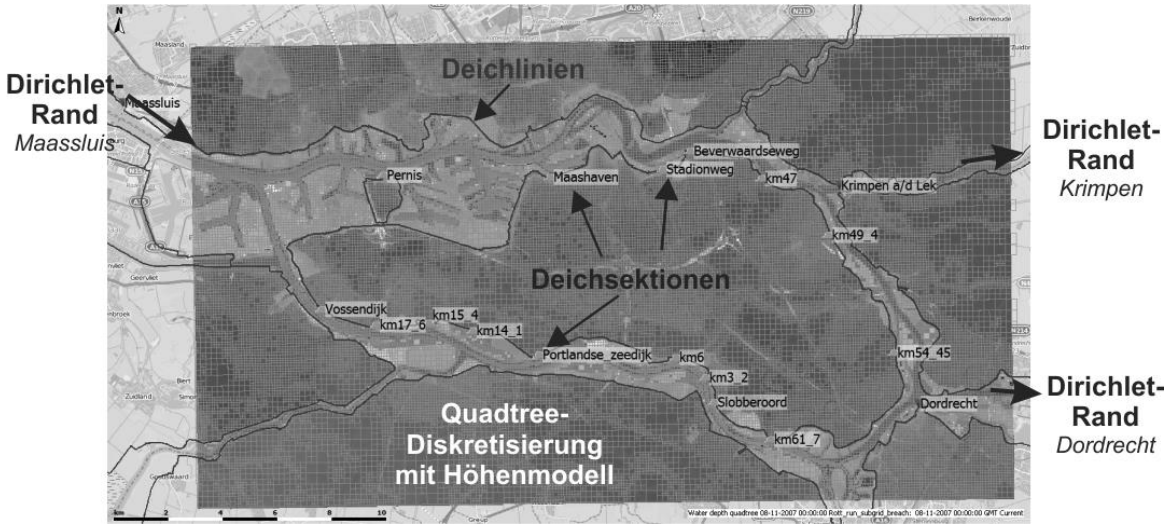

Abbildung 6: Berücksichtigte Deichsektionen und Modellaufbau zur hydrodynamischen Analyse

Hydrodynamische Analyse

Zur hydrodynamischen Analyse wird die von Deltares, Delft University of Technology und Neelen & Schuurmans entwickelte Modellierungssoftware 3Di angewendet. Sie basiert auf der Lösung der 2-dimensionalen ST.-VENANT Gleichung auf einem *Quadtree*-Raster. Für jedes *Quadtree*-Element sind sogenannte *Subgrid*-Elemente definiert, um eine höhere Auflösung des Geländes zu erreichen (*Stelling, 2012*).

Insgesamt werden ca. 500 km² im hydrodynamischen Modell durch ca. 40.000 *Quadtree*-Elemente abgedeckt (vgl. Abbildung 6). Die Größe der Elemente liegt dabei zwischen 100 x 100 m bis 400 x 400 m. Die den *Quadtree*-Elementen zugrunde liegenden *Subgrid*-Elemente weisen eine Größe von 25 x 25 m auf. Die Deichlinien der Deichringe werden durch 1-dimensionale Elemente im Modell repräsentiert. Das Modell umfasst sowohl die Deichringe als auch die umgebenden Flüsse (vgl. Abbildung 6), um mögliche Rückstaueffekte zwischen Fluss und Hinterland im Modell zu berücksichtigen.

Als Randbedingungen werden DIRICHLET-Randbedingungen (Wasserstände) an den Pegelstationen Maassluis, Krimpen und Dordrecht (vgl. Abbildung 6) angesetzt. Diese Zeitreihen basieren in der Prototypanwendung auf historisch gemessenen Wasserständen, können aber entsprechend für die operative Anwendung auf vorhergesagte Daten umgestellt werden. Die Berechnungsdauer des 2-dimensionalen Modells beträgt ca. 45 min auf einem handelsüblichen Laptop für einen Vorhersagezeitraum von 50 Stunden.

Analyse der Konsequenzen

Die Analyse der Konsequenzen basiert auf einem rein qualitativen Ansatz. Als Grundlage dazu dient die räumliche Verteilung der Einwohnerdichten, sowie räumliche Informationen über kritische Infrastrukturen, wie öffentliche Gebäude (z. B. Feuerwehr, Polizei etc.), kulturell bedeutende Orte (z. B. Museen etc.) oder Gebäude mit besonders gefährdeten Personen (z. B. Krankenhaus, Kindergarten etc.).

4.3 Ergebnisse

Erweiterung 1

Abbildung 7 (links) zeigt die berechneten Zeitreihen der Wasserstände an den 15 Deichsektionen vom 08.11.2007 0:00 Uhr bis 09.11.2007 23:00 Uhr, in Abhängigkeit der historischen/vorhergesagten Randbedingungen. Die mit Hilfe der Einwirkungs-Versagensfunktionen transformierten Zeitreihen der Versagenswahrscheinlichkeiten sind in Abbildung 7 (rechts) gezeigt. Ein starker Anstieg der Versagenswahrscheinlichkeit der Deichsektion km14 und km47 zum Zeitpunkt 09.11.2007 um 1:00 Uhr wird deutlich. Dabei werden mehrere definierte Grenzwerte überschritten, was beispielsweise eine Erhöhung der Inspektionsintervalle in diesen Deichsektionen oder eine Vorbereitung notfallmäßiger Deichverstärkungen zur Folge hätte.

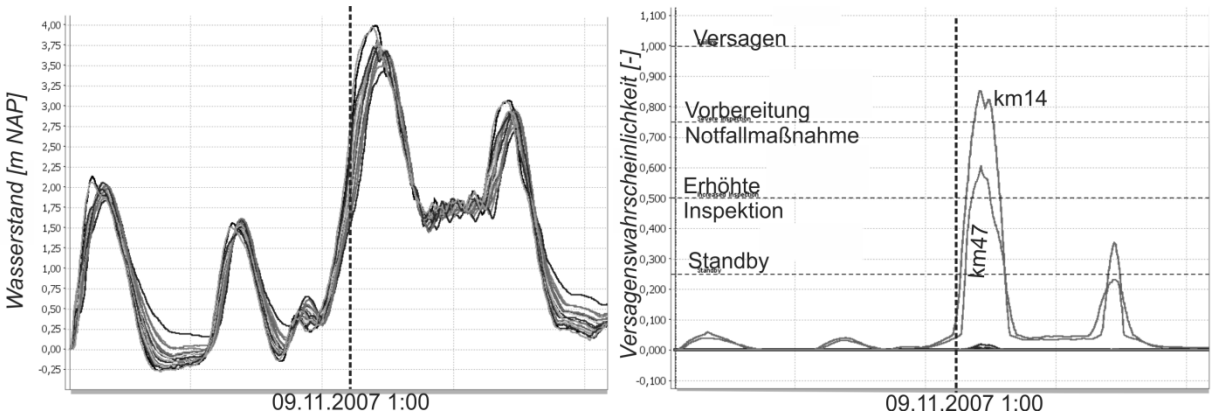

Abbildung 7: Berechnete Zeitreihen der Wasserstände (links); transformierte Zeitreihen der Versagenswahrscheinlichkeiten und Grenzwerte (rechts)

Erweiterung 2

Eine Übersicht des instationären Verhaltens der Überflutungsausbreitung im Fall eines Versagens von Deichsektion km14 und km47 gibt Abbildung 8 (schwarze Gebiete) für die Zeitpunkte 09.11.2007 00:00 (oben links) bis 10.11.2007 00:00 (unten rechts). Abbildung 8 (oben rechts) zeigt die Situation ca. 2 h nach Beginn der Deichbrüche in den Deichsektionen (Zeitpunkt 09.11.2007 5:00). Erste

Überflutungen in dicht besiedelten Gegenden (dunkel graue Bereiche in Abbildung 8) werden deutlich. Die darauffolgenden Zeitpunkte (ca. 9 h und 21 h nach Breschenstart; Abbildungen 8 unten) zeigen fortschreitende Überflutungen im westlichen Teil des Deichrings in dicht besiedelten Gebieten.

Der Nutzen der zusätzlichen Informationen für den Katastrophenschutz wird in Abbildung 8 deutlich, wenn die Überflutungsausbreitung mit entsprechenden Informationen über Bevölkerungsdichten oder kritischen Infrastrukturen in einer qualitativen Konsequenzenanalyse verschnitten werden. Informationen über die Auswirkungen (welche Bereiche sind wann betroffen?) eines vorhergesagten hydrologischen Ereignisses stehen dem Entscheidungsträger so zur Verfügung. Entsprechende Maßnahmen können zeitnah im Vorfeld geplant und organisiert werden.

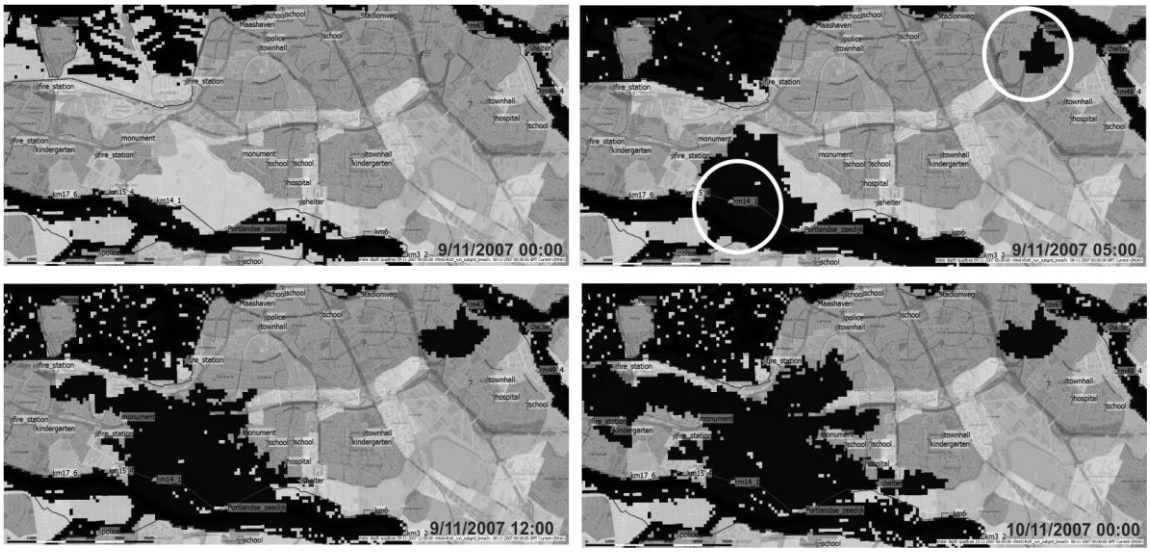

Abbildung 8: Übersicht über die Überflutungsausbreitung und qualitative Konsequenzenanalyse

5 Zusammenfassung

Hochwasservorhersage, -warnung und Katastrophenschutz sind wichtige Bestandteile eines modernen Hochwasserrisikomanagements. Um Entscheidungsträgern des Katastrophenschutzes zusätzliche modell-basierte vorhergesagte Informationen über die Zuverlässigkeit der Hochwasserschutzlinie, die Überflutungsausbreitung und mögliche Konsequenzen bereitzustellen, wird eine erweiterte Vorhersagekette für den operativen Bereich entwickelt. Dadurch kann die Auswahl von Notfallmaßnahmen effizienter unterstützt (z. B. Ort, Zeit und Typ) und deren Einsatzzeit wesentlich verringert werden, wie es anhand der Prototypanwendung Rotterdam gezeigt wurde.

6 Literatur

Bachmann, D., Johann, G., Huber, N.P, Schüttrumpf, H. (2013): Fragility curves in operational dike reliability assessment. – In: Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 7:1, pp. 49-60.- ISSN 1749-9518.

Bachmann, D. & Schüttrumpf, H. (2014): Integration der Zuverlässigkeit von Hochwasserschutzbauwerken in die einzugsgebietsbasierte Hochwasserrisikoanalyse. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Vol. 58, No. 3, pp. 168-177. - ISSN 1439-1783.

EU (2007): Directive of the European Parliament and of the Council on the assessment and management of flood risks (2007/60/EG); Brüssel: Kommission der Europäischen Union.

Hall, J., Dawson, R., Sayers, P., Rosu, C., Chatterton, J. U., Deakin, R. (2003): A methodology for national-scale flood risk assessment. In: Water & Maritime Engineering, Vol. 156, No. WM3, pp. 235-247. - ISSN 1472-4561.

Schultz, M., Gouldby, B., Simm, J., Wibowo, J. (2010): Beyond the Factor of Safety: Developing Fragility Curves to Characterize System Reliability. ERDC SR 10 1. G. a. S. Laboratory, USACE.

Stelling, G. S. (2012): Quadtree flood simulations with subgrid digital elevation models. In: Water Management, Vol. 165, Issue WM10, pp. 567-580. - ISSN 1751-7729.

van der Meij, R. (2013): Overhoogte in Rijnmond-Drechtsteden. Bericht Deltares 1207828-003.

Verkade, J. S. & Werner M. (2011): Estimating the benefits of single value and probability forecasting for flood warning. In: Hydrology and Earth System Science, Vol. 15, pp. 3751-3765. - ISSN 1027-5606.

Autoren:

Daniel Bachmann

Deltares,
Boussinesqweg 1,
2629 HV Delft
Niederlande

Tel.: +31 88 3357520
Fax: +31 88 3358582
E-Mail: daniel.bachmann@deltares.nl

Dirk Eilander, Annemargreet de Leeuw, Joost Beckers, Ferdinand Diermanse, Peter Gijsbers

Deltares,
Boussinesqweg 1,
2629 HV Delft
Niederlande