

Hochwassersimulation für Hamburg¹

Evelin Renner; Dieter Ackermann
Baubehörde Hamburg, Amt für Wasserwirtschaft

Dr. Stefan Kaden, Simone Reichert
WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH

Bedeutung und Ziele der Hochwassersimulation

Die Elbmarsch der Stadt Hamburg umfaßt ein Gebiet von 250 km². Dieses Gebiet ist potentiell sturmflutgefährdet. Die letzte große Sturmflutkatastrophe fand im Februar 1962 statt. Seit dieser Zeit wurden die Elbdeiche zum Schutz der Elbmarsch erheblich ausgebaut. Dennoch sind auch heute Überflutungen der deichgeschützten Gebiete infolge Überströmung der Hochwasserschutzanlagen, Deichbruch, nicht schließender Schutzore u.ä. im Sturmflutfall nicht vollkommen auszuschließen.

Hochwassersimulationen für die Elbmarsch werden von dem zentralen und den regionalen Katastrophendienststäben Hamburgs genutzt, um für den Sturmflutfall Deichüberflutungs- und Deichbruchszenarien durchzurechnen.

Grundlage sind Prognosen des Hamburger Sturmflutwarndienstes WADI der Scheitelhöhe und des Eintrittszeitpunktes am Pegel St. Pauli. Überschreiten die zu erwartenden Wasserstände die Kronenhöhe der öffentlichen Hochwasserschutzanlagen, werden die Deiche teilweise überströmt. Ihre Standsicherheit ist dann gefährdet, und durch Brüche können noch größere Wassermengen in das Hinterland eindringen. Es ist daher ein Planungsinstrument erforderlich, um das Ausmaß der Überflutungen abzuschätzen. Die zu entwickelnde Software dient in erster Linie der Vorsorge und Planungen von Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung, kann aber auch im Katastrophenfall operationell ergänzend zu den bestehenden Evakuierungsplänen eingesetzt werden.

Bereits im Jahre 1985 wurde durch die Stadt Hamburg begonnen, den Computereinsatz als Entscheidungshilfe im öffentlichen Hochwasserschutz vorzubereiten. 1986 wurde eine erste Überflutungssimulationssoftware erstellt (MASUCH & OLBRICH, 1987). Aus heutiger Sicht weist diese Software eine Reihe von Mängeln auf, die eine komplette Neuerstellung sinnvoll und notwendig machten. Diese Mängel sind in erster Linie in den aus heutiger Sicht veralteten DV-technischen Grundlagen und vor allem unzureichendem Datenmaterial (Höhenmodell) begründet. 1998 wurde die WASY GmbH von der Baubehörde Hamburg, Amt für Wasserwirtschaft beauftragt, diese Entwicklungsaufgabe zu übernehmen.

Als wesentliche Leistungskriterien waren zu beachten: Verarbeitung eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells (DGM) und Gewährleistung einer hohen Geschwindigkeit bei der Simulation und Visualisierung für den operativen Einsatz.

Sowohl die Verarbeitung eines hochaufgelösten DGM als auch die Visualisierung von Berechnungsergebnissen in Verbindung mit topographischen Karten des Modellgebietes machen den Einsatz moderner (GIS)-Software zwingend notwendig. Im vorliegenden Beitrag

¹ Redigierte und erweiterte Fassung eines Vortrages auf der EUROPEAN ESRI USER Conference 1999, München

werden Aspekte des GIS-Einsatzes in den Vordergrund gestellt. Zunächst werden jedoch die hydraulischen Grundlagen kurz skizziert.

Hydraulische Grundlagen

Grundlage der Hochwassersimulation ist die Gliederung der Elbmarsch in Polder. Dabei handelt es sich nicht um klassische Polder für die gezielte Hochwasserflutung, sondern um Teilflächen, die durch erhöhte Außenkanten abgegrenzt sind (Abbildung 3).

Im Fall einer realen Sturmflut stehen etwa 6 Stunden vor Eintritt des Scheitels der Sturmflut am Pegel St. Pauli als Minimalinformationen der Wasserstand und der Zeitpunkt des letzten Tideniedrigwassers und eine Prognose des Tidehochwassers (Eintrittszeitpunkt und Wasserstand) zur Verfügung. Diese Information stellt den realen Input für die Hochwassersimulation dar. Berechnungsgrundlage ist eine sogenannte Bemessungsflut² (DHI, 1985). Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Bemessungspegel in der Elbe.

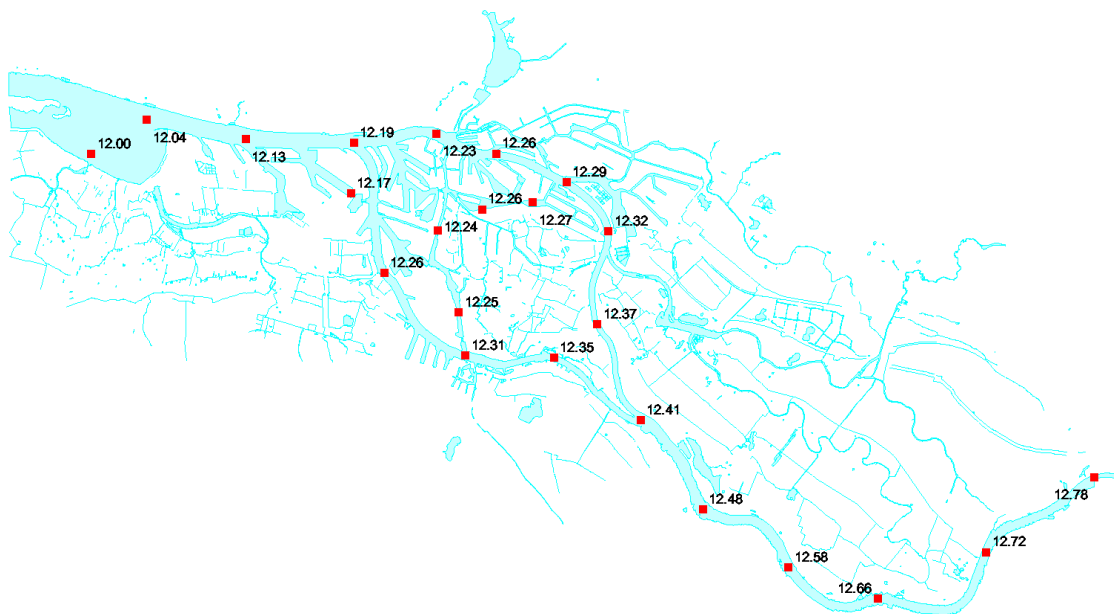


Abbildung 1: Bemessungspegel in der Elbe, Tidehochwasser (bezogen auf Pegelnull)

Die Wasserverteilung in den Poldern erfolgt ausgehend vom Elbdeich bei Überströmen, Wellenüberschlag, Deichbruch und durch nicht vollständig schließende Bauwerke. Zunächst werden die unmittelbar dem betroffenen Deichabschnitt benachbarten Polder geflutet. Von dort fließt das Wasser dann in Abhängigkeit der aktuellen Wasserstände und der Geländemorphologie über Polderkanten und / oder Kantendurchlässe in benachbarte Polder. Der Bezugswasserstand am jeweiligen Deichabschnitt ist eine Funktion der Zeit. Dieser Bezugswasserstand wird aus den Flutkurven ermittelt. Hierzu wurden die für die Bemessungsflut ermittelten Bemessungsflutkurven normiert und durch geeignete analytische Funktionen approximiert. Die Anpassung der realen Fluten an die Bemessungsflutkurven erfolgt durch einfache Rücktransformation.

Für die Berechnung der Über- bzw. Durchströmung von Deichen oder Kanten werden u.a. die bekannten hydraulischen Formeln des Überfalls (vollständig / unvollständig) verwendet.

² Berechnung einer Sturmflut für angenommene extreme Bedingungen als Bemessungsgrundlage für den Hochwasserschutz

Der Modellansatz der Wasserverteilung geht von einem Volumenmodell aus, d.h. horizontale Strömungsprozesse werden vernachlässigt.

In Abbildung 2 ist eine vereinfachte Übersicht zum Berechnungsablauf während eines Zeitschrittes gegeben.

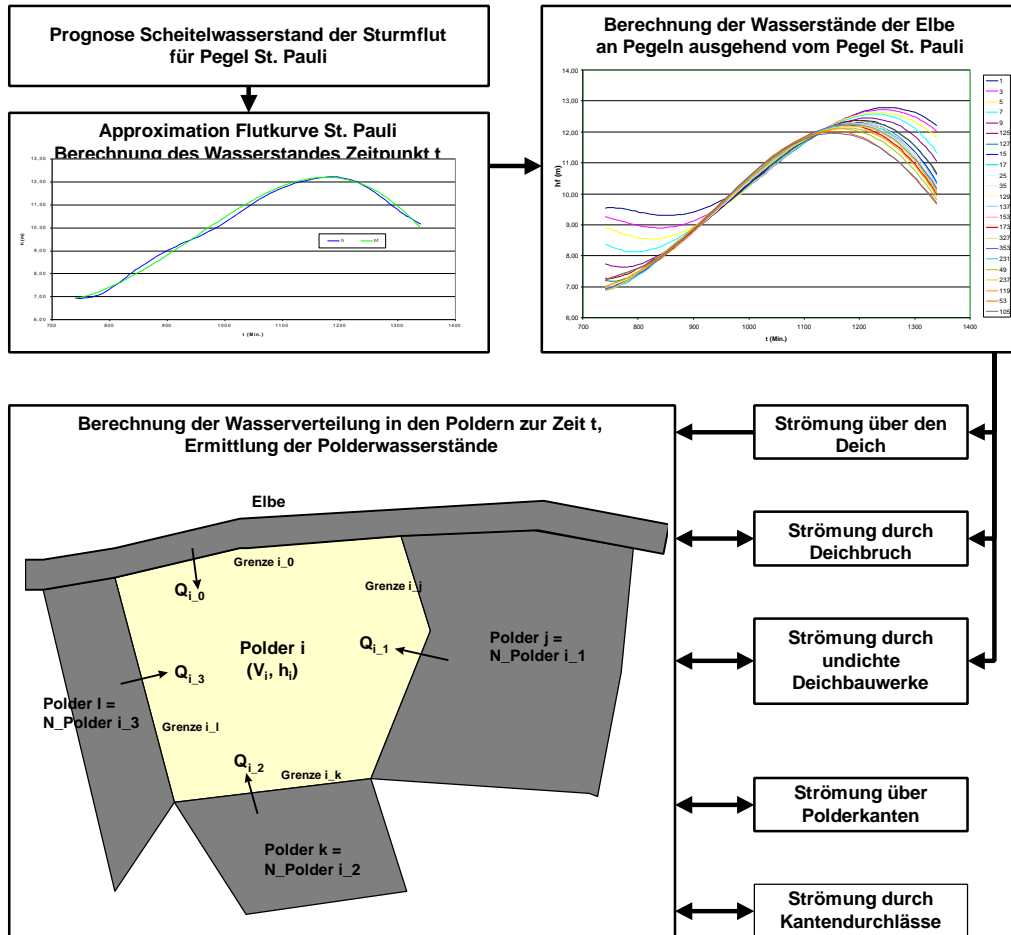


Abbildung 2: Berechnungsablauf während eines Zeitschrittes

GIS-gestützte Modellaufbereitung

Für den Aufbau des digitalen Geländemodells wurde eine photogrammetrische Auswertung der Elbmarschbefliegung durch die Firma PHOENICS 1996 verwendet, die in einem 50 m Raster erfolgte. Bruchkanten wurden ab einer Höhe von 1 m gemessen. Die Höhengenaugigkeit ist mit $\Delta z = 20$ cm angegeben.

Die Erstellung des digitalen Geländemodells erfolgte im GIS ARC/INFO mit der Extension TIN (Triangulated Irregular Network)

Da ein komplettes TIN für die gesamte Hamburger Elbmarsch aufgrund der großen Datenmenge schwer zu handhaben ist (über 140.000 Rasterpunkte und Bruchkanten mit über 170.000 z-Werten), wurde das Geländemodell in einzelnen Teilmodellen erstellt. Dabei entspricht ein Teilmodell dem Blattschnitt der Deutschen Grundkarte (2000 x 2000 m). Bei Bedarf können diese Teilmodelle zu größeren Einheiten zusammengefaßt werden. Diese Vorgehensweise erleichtert unter anderem die Einarbeitung neuer Höhendaten, da das Geländemodell nur für die betroffenen Teilgebiete neu interpoliert werden muß und nicht für das gesamte Gebiet der Elbmarsch.

Abschließend wurden die TIN-Daten in Rasterdaten (GRID's) mit unterschiedlicher Auflösung (2 m, 8 m) konvertiert.

Die bisherige Poldereinteilung lag in analoger Form als Eintragungen in die Deutsche Grundkarte 1:5.000 vor. Diese Poldereinteilung beruht im wesentlichen auf dem alten Polderplan, der für das bisherige Modell (IDP, 1989) erstellt wurde.

Die Poldergrenzen wurden digitalisiert und mit dem digitalen Geländemodell überlagert. Dabei ergaben sich teilweise Widersprüche zwischen der Poldereinteilung und der Geländemorphologie. Eine detaillierte Analyse der Unstimmigkeiten in Verbindung mit Ortsbegehungen zeigte, daß sich die alte Poldereinteilung oft an der Nutzung orientierte und nicht am Relief. Daher wurde die Poldereinteilung auf der Grundlage des neuen Geländemodells überarbeitet. Die Einteilung orientiert sich jetzt grundsätzlich nur noch an der Topographie. Zur Ableitung der Poldergrenzen aus dem Geländemodell wurden unter ArcView mit der Erweiterung 3D Analyst die Höhen stufenweise eingefärbt und zur Information mit dem alten Polderplan hinterlegt, vgl. Abbildung 3.

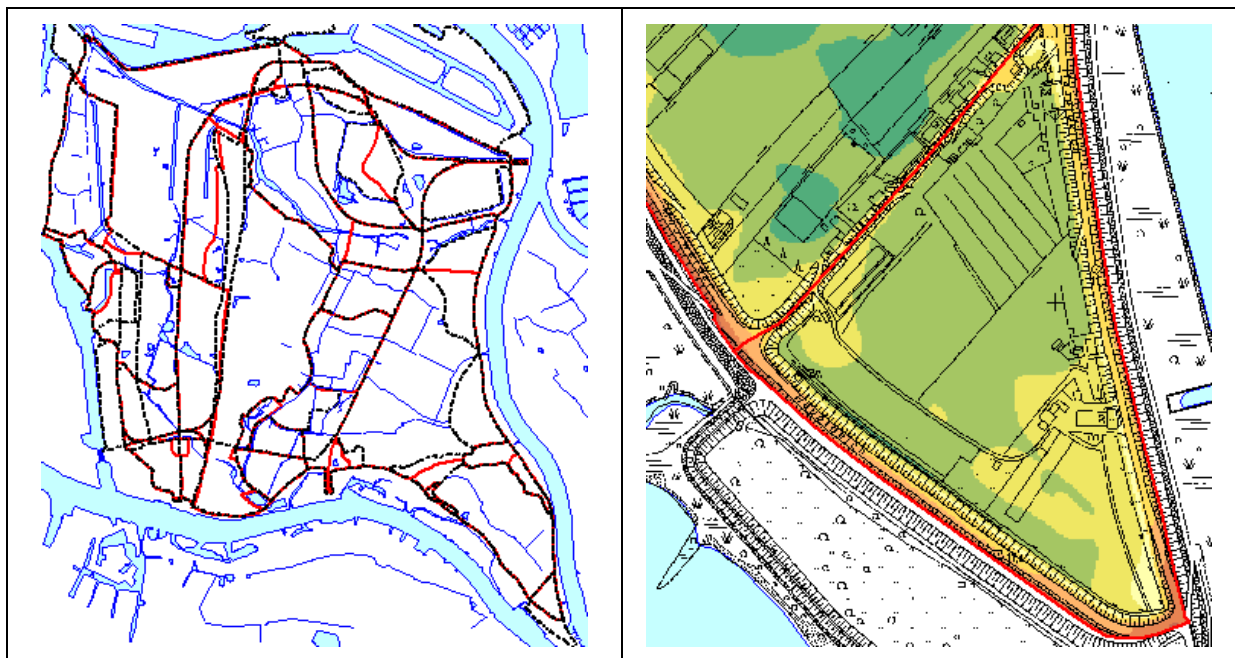


Abbildung 3: Poldereinteilung (schwarz: alte Poldereinteilung; rot: neue Poldereinteilung)

Wesentliche Komponenten des Simulationsmodells sind die Speicherinhaltsfunktionen der Polder sowie die Kantenhöhen der Kanten zwischen Poldern, die mittels des DGM berechnet werden können. Allerdings kann das aus Performancegründen nicht online während der Simulation erfolgen. Aus diesem Grunde wurde wie folgt vorgegangen:

Volumenmodelle: Für jeden Polder wurden mittels ARC/INFO diskrete Punkte $V(h_i)$ berechnet (10 cm Abstand). Diesen diskreten Funktionen wurden Polynome 3. Grades angepaßt.

Kantenmodelle: Für jede Kante wurden auf der Grundlage des Höhenmodells Profile erstellt und daraus eine Höhenstufenverteilung generiert. Diese Höhenverteilung wurde durch stückweise Geraden approximiert.

Datenkonzept

Nach der Festlegung, alle raumbezogenen Daten im GIS zu bearbeiten und zu verwalten, lag es nahe, für die Verwaltung aller übrigen Sachdaten einschließlich aller Modelldaten eine Datenbank einzusetzen.

Für die Verwaltung aller Projektdaten der Hochwassersimulation wurde das Datenbanksystem MS Access (Version 8.0) ausgewählt.

Die zu verwaltenden Daten wurden in drei Hauptgruppen eingeteilt:

- allgemeine Basisdaten der Elbmarsch (z.B. morphologische Daten von Poldern, technische Daten von Bauwerken und Durchlässen, hydrologische Daten der Flutkurven)
- ereignisspezifische Grunddaten simulierter Ereignisse (z.B. Deichbrüche)
- dynamische Daten abgelaufener bzw. simulierter Sturmfluten (z.B. Wasserstände, Durchflüsse, protokollierte Ereignisse).

Deren Verwaltung erfolgt in sogenannten Projekten.

Als **PROJEKT** wird ein simuliertes Sturmflutereignis bezeichnet. Zu jedem **PROJEKT** gehören die genannten Basisdaten, projektspezifische Grunddaten und dynamische Daten.

Grundsätzlich ergeben sich für die Ablage dieser Daten zwei Möglichkeiten - eine „Universal“-Datenbank (MDB **M**icrosoft**D**aten**B**ank) oder mehrere vom Kontext abhängige Teildatenbanken (MDB`s). Realisiert wurde die zweite Variante mit folgenden Vorteilen:

- **Verwaltung:** Die Aktualisierung der Basisdaten kann bequem mittels Austausch einer Datei erfolgen, ohne bereits erzeugte Projektdaten zu verlieren.
- **Sicherheit:** Die Dateiattribute der Basisdaten können ‚schreibgeschützt‘ werden.
- **Effizienz:** Die Verwaltung der Teildatenbanken ist übersichtlicher und effizienter.
- **Flexibilität:** Die Verwaltung von Datenbanken für die verschiedenen, weitgehend unabhängigen Anwender ist vereinfacht.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die unterschiedlichen, für ein PROJEKT zu erstellenden Datenbanken zusammengestellt.

Grundprinzip ist, daß alle vom Anwender erzeugten Ergebnisdaten einer Simulation (eines Projektes) **zusammen** mit ihren Einstellungen, d.h. den ereignisspezifischen Grunddaten, in kompletten Projekt-MDBs abgelegt werden. Dieses Vorgehen sichert die Datenintegrität. Es gewährleistet, daß sich spätere Änderungen in den generellen Einstellungen nicht auf ein archiviertes Projekt auswirken.

Tabelle 1: Datenbanken Hochwassersimulation Elbmarsch

Datei	Art	Beschreibung
BASIS.MDB	Basis	Basisdaten (Polder, Bauwerke ...)
SZENARIO.MDB	Szenario	Ereignisspezifische Grunddaten
PROJEKT/PROJEKT1.MDB ...u.a.	Projekt	Archivierte Projekte, Ereignisdaten

Nach Start des Programms wird eine Projektdatenbank nach Vorgabe des Anwenders geladen. Diese ist die aktuelle Arbeitsdatenbank und kann im Laufe der Simulation als neues Projekt modifiziert werden. Beim Anlegen eines neuen Projekts wird eine Reihe von Standardeinstellungen automatisch gesetzt.

Nach Abschluß einer Simulation können die Simulationsergebnisse in einer **PROJEKT.MDB** Datenbank archiviert und die Einstellungen eines Projektes durch eine Exportfunktion in einer **SZENARIO.MDB** abgelegt und von anderen Projekten mittels einer Importfunktion verwendet werden.

Die Datenbank wurde konsequent als relationale Datenbank aufgebaut.

Die Basisdatenstruktur wird durch die Polder und die Elbdeiche definiert. Benachbarte Polder unter sich sowie Polder und die Elbe besitzen gemeinsame Grenzen. Die Elbe wird in der Datenbank als Pseudopolder behandelt.

Die Grenze zwischen Poldern wird als Kante bezeichnet. Diese sind aufgeteilt in Binnenkanten (zwischen Poldern) und Deichkanten (zwischen Polder und Elbe). Die Position von Bauwerken und Durchlässen werden durch diese Kanten festgelegt und in der Basisdatenbank abgelegt.

Die zwei Arten von Grenzen spielen unterschiedliche Rollen bei der Zuordnung von Basisdaten und während der Simulation. Die Zuordnung zu Binnenkanten erfolgt über die Kanten-Id, die zu Deichkanten über den Deichkilometer.

Das realisierte Datenmodell hat den Vorteil hoher Flexibilität bei der Datenverwaltung, speziell auch unter Berücksichtigung möglicher späterer Daten- und Modellaktualisierungen. Der Datenaustausch zwischen GIS (ArcView) und Datenbank ist effizient möglich.

Modellkonzept

Bei der Anwendung des Hochwassersimulationsmodells können folgende globale **Handlungsebenen** unterschieden werden:

- | | | |
|----------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Katastrophendienst / Hochwasser | → | Modellanwendung während einer Sturmflut zur Berechnung der Auswirkungen von potentiellen und eingetretenen Deichüberströmungen und Deichbrüchen;

Schulung des Katastrophendienstes im Rahmen von Schutzübungen |
| Analyse | → | Modellanwendung zur Analyse abgelaufener Sturmfluten und zur Szenario-Analyse für Planungszwecke |
| Datenpflege | → | Datenpflege der Basisdaten des Modellsystems |

Diesen Handlungsebenen sind verschiedene Anwender zugeordnet, woraus sich ein modulares Modellkonzept, wie in Abbildung 4 dargestellt, ableitet.

Als Benutzeroberfläche und Basissoftware für die Analyse von Simulationen dient das Desktop-GIS ArcView. Das integrierte Simulationsmodell wurde in C++ erstellt, einschließlich der grafischen Visualisierung von Zwischenergebnissen. Diese Entscheidung mußte aus Performance-Gründen getroffen werden.

Nachfolgend werden die Module Simulation und Analyse kurz vorgestellt.

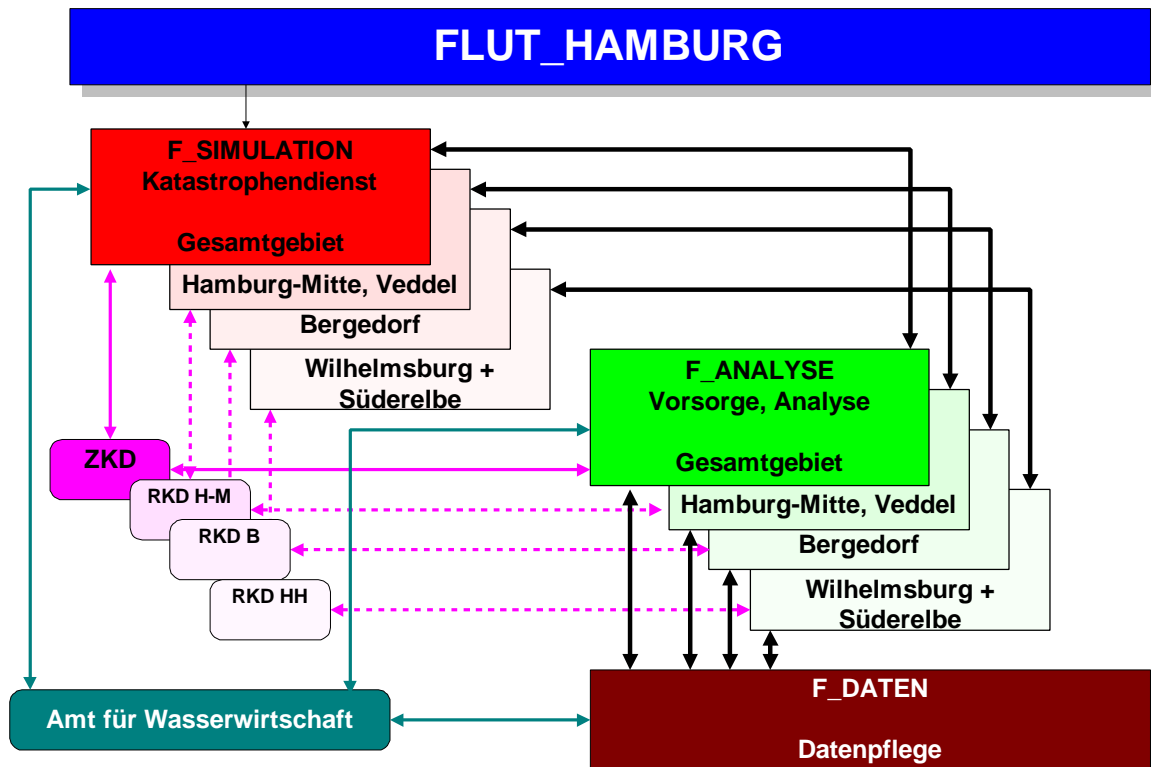


Abbildung 4: Zuständigkeiten für das Programm „Flut Hamburg“

Modul Simulation

Eine Simulation startet in der Regel mit der Prognose der Sturmflut, der Festlegung von Bauwerkszuständen und ggf. von Deichbrüchen. Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt den Dialog für die Festlegung der Flutkurve.

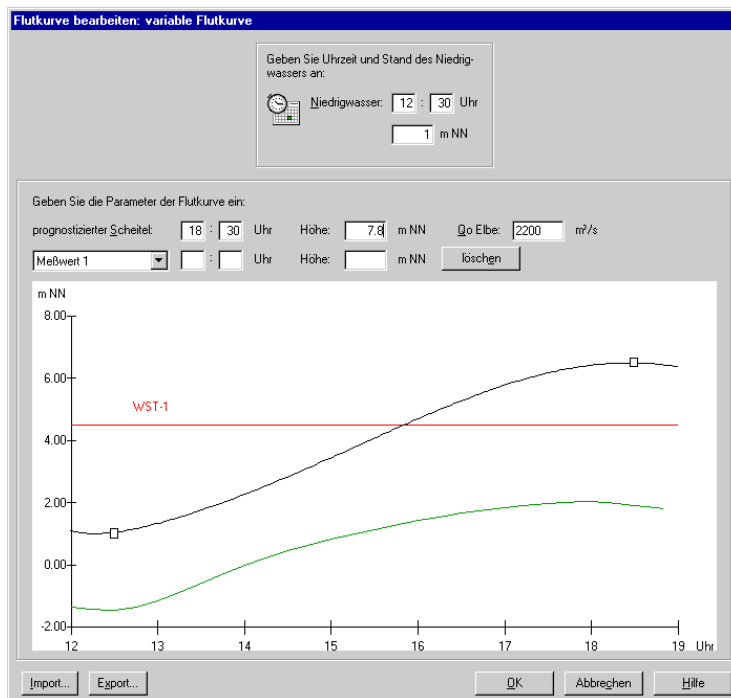


Abbildung 5: Dialog für die Festlegung der Flutkurve

Deichbrüche werden bezogen auf Deichkilometer (Dkm) eingegeben. Wesentliche Parameter sind neben der Lage und dem Zeitpunkt die erwartete Bruchbreite und -tiefe.

Nach dem Starten der Simulation werden Zwischenergebnisse in definierten Zeitschritten visualisiert. Die Simulation kann für Detailbetrachtungen jederzeit gestoppt werden. Die Visualisierung der Berechnungsergebnisse kann wahlweise schrittweise, bis zum Ende der Simulation (ca. 3 Stunden nach dem Flutscheitel) oder aber bis zu einer gesetzten Bedingung (Überschreiten eines kritischen Wasserstandes an vorgegebenen Kontrollpunkten) laufen. Abbildung 6 zeigt die Ausbreitung des einströmenden Wassers nach einem Deichbruch.

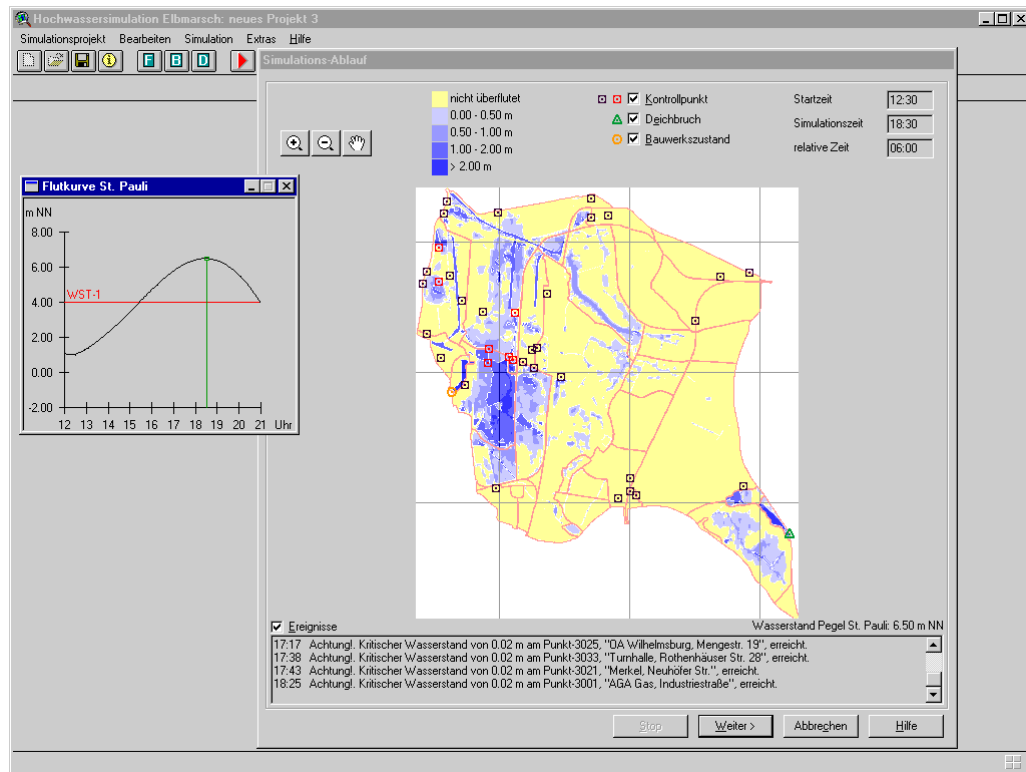


Abbildung 6: Ausbreitung des einströmenden Wassers nach einem Deichbruch

Nach der Simulation werden alle relevanten Einstellungen und Ergebnisse in der Datenbank abgelegt. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse der Simulation. So werden z.B. für jeden Zeitschritt folgende Berechnungsergebnisse gespeichert:

- Polder- und Pegelwasserstände
- Wasserstände an Kontrollpunkten
- Ströme über Deiche, durch Deichbrüche und undichte Bauwerke in der Deichlinie
- Ströme über Binnenkanten und durch Durchlässe.

Diese können sowohl räumlich im Modul Analyse (s. unten) als auch zahlenmäßig in einem Text-Protokoll ausgewertet werden.

Modul Analyse

Das Analyse-Modul unter ArcView dient der GIS-basierten Auswertung der Berechnungsergebnisse. Beim Start des Moduls wird ein Analyse-View für das aktuelle Simulationsprojekt zusammengestellt. Dazu werden verschiedene temporäre Shape-Dateien (z.B. Deichbrüche, Bauwerkszustände, Durchlässe, Kontrollpunkte) aus den Basis- und Ergebnistabellen der

Access-Datenbank generiert: Die Shape-Dateien werden beim Schließen des Analyse-Views wieder automatisch gelöscht. Die Kommunikation mit der Datenbank erfolgt über DAO³.

Die Benutzeroberfläche ArcView wurde projektspezifisch angepaßt. Einige Standardfunktionen von ArcView stehen aber weiterhin unverändert zur Verfügung. ArcView-Funktionalitäten, die für die Analyse einer Simulation nicht von Bedeutung, sind wurden aus der Oberfläche entfernt. Eine Vielzahl zusätzlicher Funktionalitäten wurden hinzugefügt.

In der Titelleiste des Analyse-Views erscheinen der Name des Simulationsprojekts, der aktuelle Zeitschritt, die Simulationszeit sowie der Wasserstand am Pegel St. Pauli. Über Schaltflächen kann zwischen Zeitschritten gewechselt werden.

Für jede beliebige Position innerhalb des Poldergebiets kann die Wasserstandsentwicklung grafisch dargestellt werden (vgl. Abbildung 7) oder es können Informationen wie Poldernummer, Gauß-Krüger-Koordinaten, Geländehöhe und der Wasserstand in m NN oder über Gelände abgefragt werden. Des weiteren können im Analyse-View durch Anklicken eines schadhaften Bauwerks, eines Deichbruchs oder eines Kontrollpunkts Informationen über diese Objekte erhalten werden.

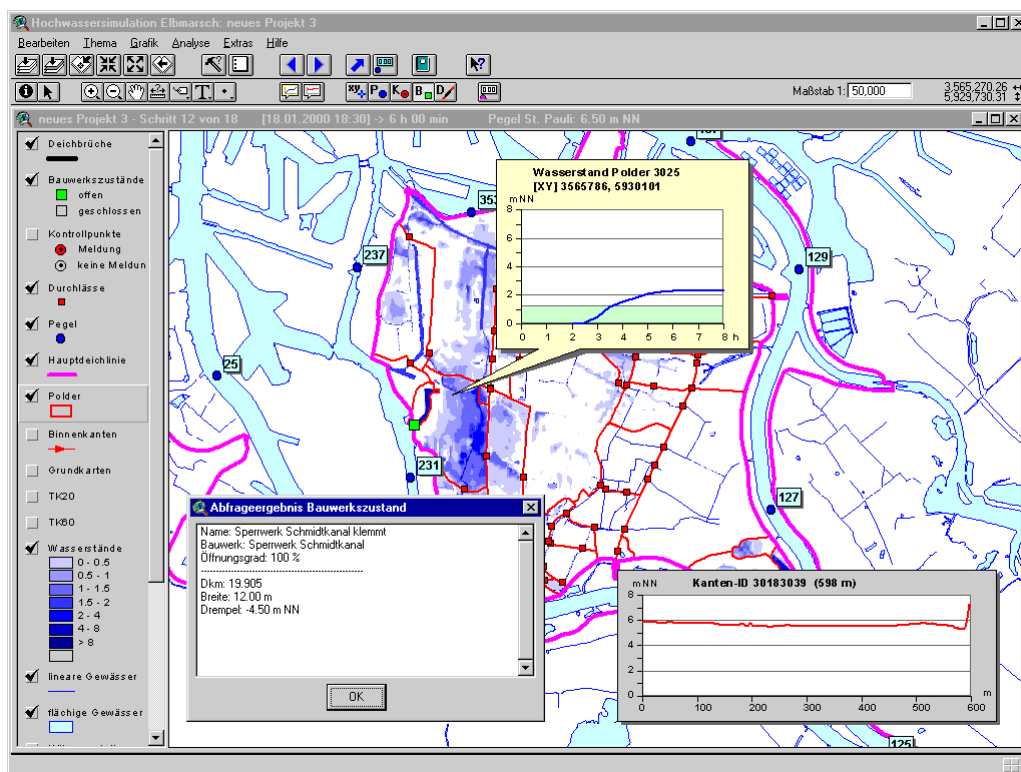


Abbildung 7: Analyse-View mit Wasserstands-Diagramm, Kantenprofil und Bauwerksinfo

Zur Plausibilitätsprüfung besteht die Möglichkeit, die Richtung der Wasserströme über bzw. durch Kanten für jeden Zeitschritt als Richtungspfeile darzustellen. Profile von Binnenkanten erhält man durch Anklicken einer Kante. Durch das Einblenden topografischer Karten (Abbildung 8) oder des Höhenmodells, farbkodiert als Höhenschichtkarte, erhält man weitere Informationen, vgl. Abbildung 9.

³ DAO – Data Access Objects

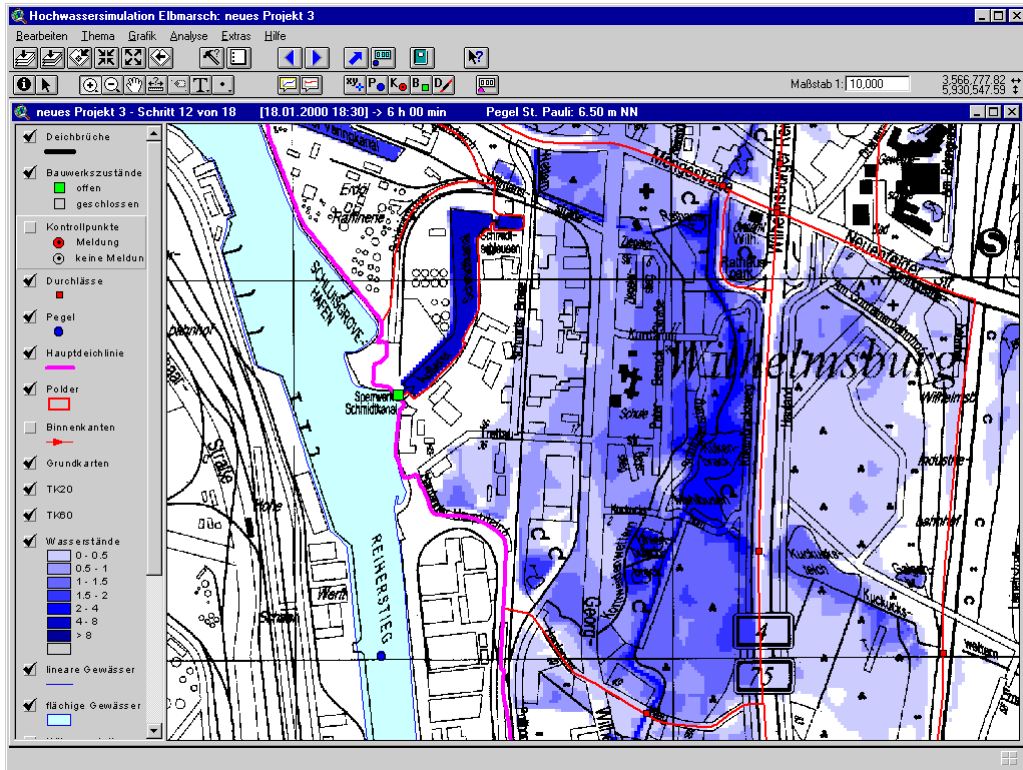


Abbildung 8: Analyse, Ausschnittsvergrößerung mit topographischer Karte

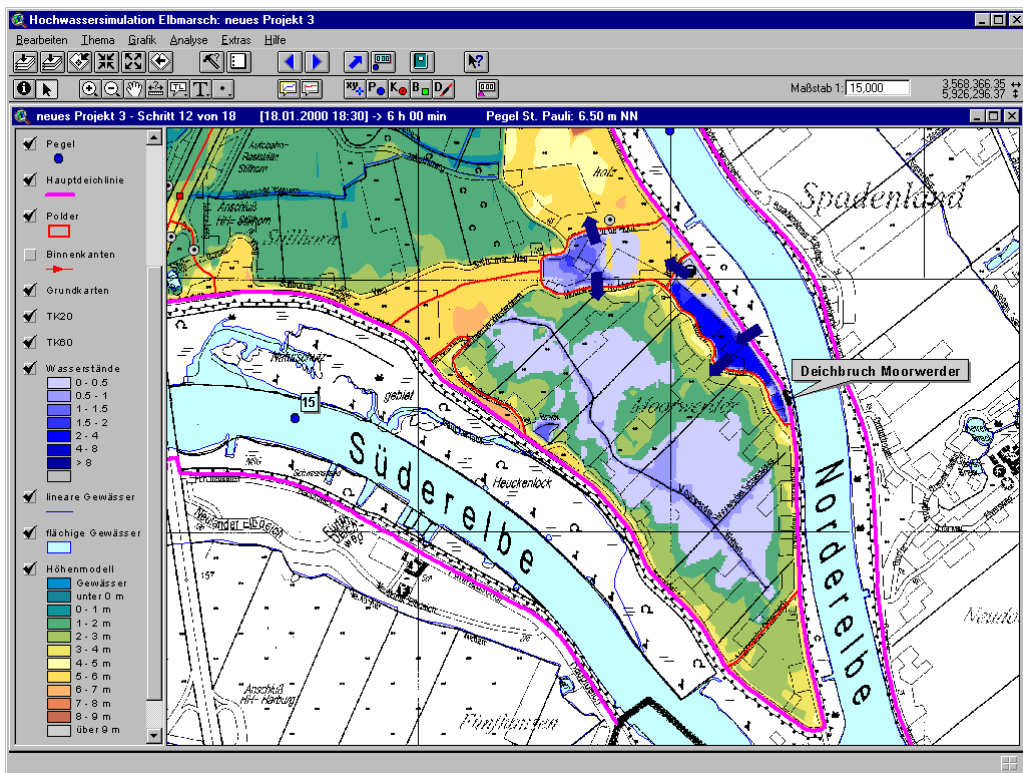


Abbildung 9: Analyse mit DGM, Überflutung bei Deichbruch und Darstellung der Fließrichtungen

Fazit

Das Hochwassersimulationsmodell für die Hamburger Elbmarsch wurde seit Ende September bei den zukünftigen Anwendern, dem zentralen und den regionalen Katastrophendienststäben sowie im Amt für Wasserwirtschaft getestet. Die Einführung der erfolgte Anfang des Jahres 2000.

Auch wenn das Modell speziell für die Hochwassersimulation in der Hamburger Elbmarsch entwickelt wurde, kann es aufgrund der objektorientierten Entwicklungskonzepte und vor allem des flexiblen Datenmodells mit vertretbarem Aufwand für andere Gebiete angepaßt werden.

Dabei beschränkt sich der Einsatzbereich nicht auf die Hochwassersimulation bei Sturmfluten. Das Modell ist gleichermaßen als Überflutungsmodell bei Hochwasser in Binnengewässern einsetzbar.

Literatur

DHI, 1986: Hamburger Hafen, Synthetische Sturmfluten; Dänisches Hydraulisches Institut im Auftrag von Strom- und Hafengebäudeamt, Hamburg, Juni 1986

MASUCH & OLBRICH, 1987: Rechnergestützte Überflutungsvorhersage; Endbericht und Programmdokumentation; Masuch + Olbrich GmbH, Oststeinbeck, 1987

IDP, 1989: Programmbeschreibung TIDE UND FLUT; IDP Dr.-Ing. Stein Ingenieurbüro GmbH; Oststeinbeck, Mai 1989