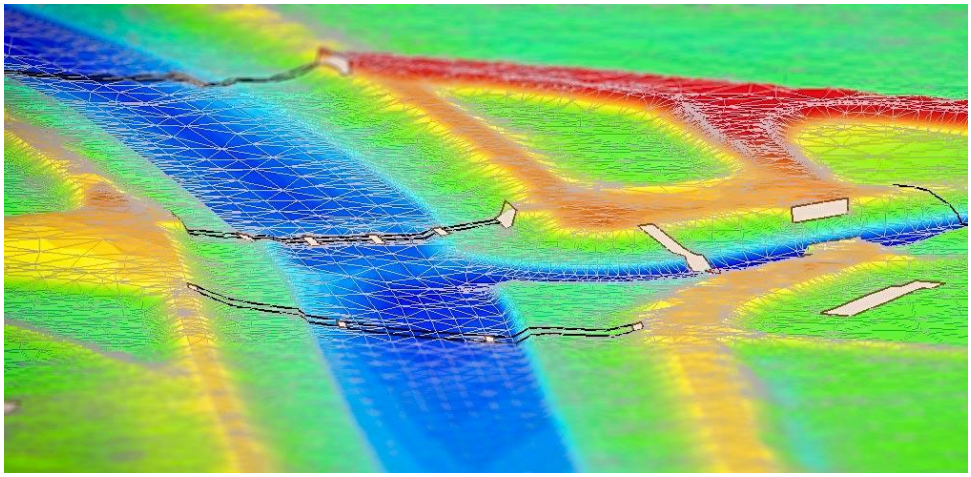
Hydrotec
Ingenieurgesellschaft für
Wasser und Umwelt mbH

Tagungsband

Anwendertreffen HYDRO_AS-2D 2016



05. Oktober 2016

an der Technischen Universität München

Impressum

Ingenieurbüro Dr. Nujić
Wallbergstraße 8
D-83026 Rosenheim

Hydrotec Ingenieurgesellschaft für
Wasser und Umwelt mbH
Bachstraße 62-64
D-52066 Aachen
Tel.: 0241 94689-0
Fax: 0241 506880
E-Mail: vertrieb@hydrotec.de
www.hydrotec.de

Jegliche, auch auszugsweise Verwertung des Tagungsbandes ist nur mit schriftlicher Zustimmung von beiden Firmen zulässig.

Herzlich willkommen zum Anwendertreffen HYDRO_AS-2D 2016!

Das Hydrotec-Team freut sich, Sie als Anwender der HYDRO_AS-2D Programmfamilie begrüßen zu können. Danke, dass Sie unserer Einladung nach München gefolgt sind.

Hydrotec entwickelt HYDRO_AS-2D fachlich und technisch mit großem Engagement weiter. Dazu haben wir seit dem letzten Anwendertreffen unser Entwicklerteam verstärkt und uns kontinuierlich mit Dr. Nujić ausgetauscht. In unseren Vorträgen sowie im Ausblick werden wir Ihnen den Stand der Entwicklung und weitere Planungen vorstellen.

Auch mit Aquaveo arbeiten wir intensiv zusammen. Mit Besuchen in den USA und regelmäßigem fachlichem Austausch koordinieren wir die Entwicklungsschritte für künftige Versionen von SMS und HYDRO_AS-2D. Unser Dank geht an Tom Moreland, der als Vertreter von Aquaveo für diese Veranstaltung aus den USA angereist ist und uns Neuerungen in SMS vorstellen wird.

In diesem Jahr bieten wir - zusätzlich zur Tagung - einen Workshop an. Das sehr große Interesse daran freut uns sehr. Da wir nicht alle Anmeldungen berücksichtigen konnten, planen wir im kommenden Jahr regionale Anwender-Workshops.

Wir danken allen Referenten und Referentinnen für Ihre interesanten Beiträge, die das große Anwendungsspektrum von HYDRO_AS-2D anhand spannender Projekte aus der Praxis aufzeigen.

Unser Dank gilt auch der Technischen Universität München insbesondere dem Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement für die organisatorische Unterstützung.

Ich freue mich zusammen mit dem Hydrotec-Team auf einen intensiven Erfahrungsaustausch und angeregte Diskussionen!

Aachen, 5. Oktober 2016

H. Sacher

Dr.-Ing. Hartmut Sacher
Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt

Inhalt

Hochwassergefahren- und Risikokarten in Bayern - Rückblick und Ausblick im Kontext der Umsetzung der EG-Hochwasserrisiko-Managementrichtlinie **4**
Dipl. Geogr. Martin Deuring, Bayerisches Landesamt für Umwelt

Entwicklungen im Programmsystem HYDRO_AS-2D **7**
Dipl.-Math. Benedikt Rothe, Dr. rer. nat. Eva Loch, Hydrotec

SMS Development Highlights **10**
Tom Moreland, Aquaveo

Anwendung von HYDRO_AS-2D im Rahmen von Polderplanungen **11**
Prof. Dr.-Ing. Alpaslan Yörük, Hydrotec

Ermittlung von Hochwasserrückhaltepotenzialen durch Staustufensteuerung mithilfe eines HYDRO_AS-2D-Moduls zur optimierten Bauwerkssteuerung **12**
Stefan Giehl M.Sc., Dorothea Pörtge M.Sc., Riccardo Scandroglio M.Sc.,
Prof. Dr.sc.tech. Peter Rutschmann, TU München,
Prof. Dr.-Ing. Alpaslan Yörük, Hydrotec

Juni-Hochwasser 2013 – Donau im Bereich Straubing-Vilshofen **15**
Dipl.-Ing. Jens Kastrup, RMD Wasserstraßen GmbH

Einsatz von HYDRO_AS-2D zur Simulation von urbanen Sturzfluten **19**
Dipl.-Ing. Robert Mittelstädt, Hydrotec

Geschiebetransportmodellierung mit HYDRO_FT-2D für langfristige Prognosen - Herausforderungen und Vorgehensweise am Beispiel der Salzach **22**
Dr.-Ing. Markus Noack, Dipl.-Ing. Felix Beckers, Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht,
Universität Stuttgart

Unterschiede bei der Geschiebemodellierung an flachen und steilen Fließ-gewässern mit HYDRO_GS-2D **26**
Dr. sc. techn. Roni Hunziker, Hunziker, Zarn & Partner AG

Weiterentwicklungen der HYDRO_AS-2D Produkte **28**
Dipl.-Math. Benedikt Rothe, Prof. Dr.-Ing. Alpaslan Yörük, Hydrotec

Hochwassergefahren- und Risikokarten in Bayern - Rückblick und Ausblick im Kontext der Umsetzung der EG-Hochwasserrisiko-managementrichtlinie

Dipl. Geogr. Martin Deuring, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 69 - Hochwasserrisikomanagement, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg, martin.deuring@lfu.bayern.de

1 Ausgangssituation und Rahmenbedingungen der EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie

Im Jahr 2016 zeigt sich erneut, dass Hochwasser eine vielerorts gegenwärtige Naturgefahr darstellt. Unter der Federführung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) koordiniert das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) die Umsetzung der EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EG-HWRM-RL) in Bayern. Die entsprechende „EU-Richtlinie 2007/60/EG über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken“ wurde mit der Neufassung des Wasserhaushaltsgesetzes des Bundes und des Bayerischen Wassergesetzes zum 1. März 2010 in nationales bzw. Landesrecht übernommen und inhaltlich konkretisiert.

Ziel des Hochwasserrisikomanagements ist es, die negativen Folgen von Hochwasser für die Schutzgüter menschliche Gesundheit, Umwelt, Kulturerbe, wirtschaftliche Tätigkeit und erhebliche Sachwerte zu verringern. Hochwasserrisikomanagement zielt auf einen planvollen und ausgewogenen Umgang mit Hochwasser ab. Das Hochwasserrisikomanagement gibt eine dreistufige Methodik mit klaren Fristen vor. Es ist als kontinuierlicher Prozess angelegt, bei dem sich alle Umsetzungsstufen in einem 6-Jahres-Zyklus wiederholen. So können die Ergebnisse stets an veränderte Bedingungen angepasst und aktualisiert werden. Die drei Stufen gliedern sich wie folgt:

Stufe 1: Die vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos

Die vorläufige Risikobewertung ist eine grobe Bestandsanalyse, in der die Gewässer ermittelt werden, an denen ein potenziell signifikantes Hochwasserrisiko besteht. Die vorläufige Risikobewertung für Bayern wurde erstmalig im Dezember 2010 abgeschlossen. Die Fortschreibung ist bis 22. Dezember 2018 vorgesehen.

Stufe 2: Die Erstellung und Fortschreibung von Hochwassergefahren- und -risikokarten

Für die Gewässer, an denen auf Basis der vorläufigen Risikobewertung ein besonderes Hochwasserrisiko besteht, werden Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten erarbeitet. Sie werden für die Hochwasserszenarien eines häufigen Ereignisses (HQ_{5-20}), eines mittleren Ereignisses (HQ_{100}) und eines Extremereignisses (HQ_{extrem}) erstellt. Hochwassergefahrenkarten stellen überflutete Flächen und Wassertiefen dar. Hochwasserrisikokarten geben Informationen über die Flächennutzung und die Anzahl der betroffenen Einwohner in den überschwemmten Gebieten. Die Fortschreibung der Hochwassergefahren- und -risikokarten erfolgt bis 22. Dezember 2019.

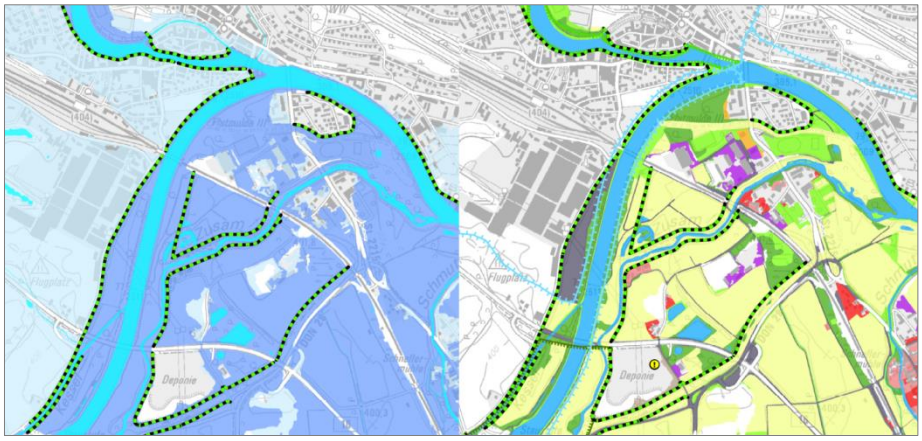


Bild 1: Hochwassergefahren- und -risikokarten im Bereich Donauwörth

Stufe 3: Die Erstellung von Hochwasserrisikomanagement-Plänen

Mit Hilfe der in Stufe 2 erstellten Gefahren- und -risikokarten werden Hochwasserrisikomanagement-Pläne erarbeitet. Die Pläne beinhalten Ziele und Maßnahmen, wie Hochwasserschäden zukünftig reduziert werden können. Dazu gehören alle Maßnahmen, die der Vermeidung von Risiken, dem Hochwasserschutz, der Vorsorge oder der Regeneration nach Hochwasserereignissen dienen. Als Beispiele können die Verbesserung des natürlichen Wasserrückhalts, hochwasserangepasstes Bauen, Überlegungen zum Katastrophenschutz, das Freihalten von Überschwemmungsgebieten, die Hochwasserwarnung oder der Wiederaufbau nach großen Hochwasserereignissen genannt werden. Die Fortschreibung der Managementpläne ist bis 22. Dezember 2021 vorgesehen.

Mit der Veröffentlichung der aktuellen HWRM-Pläne zum 22. Dezember 2015 ist der 1. Zyklus des Hochwasserrisikomanagements abgeschlossen. Derzeit laufen die ersten Arbeitsschritte zur Umsetzung des zweiten Zyklus.

2 Gefahren- und -risikokarten – Rückblick auf Zyklus 1

Im Rahmen des ersten Zyklus des Hochwasserrisikomanagements in Bayern wurden bis 2013 die aktuellen Karten für die Flussgebiete von Donau, Elbe und Bodensee vom LfU in Zusammenarbeit mit den Wasserwirtschaftsämtern erstellt. Dazu wurden vielfach schon vorhandene Daten und Modelle weiterverwendet und aufbereitet. Die Wasserwirtschaft wurde dabei von Ingenieurbüros bei Leistungen der Projektsteuerung, Qualitätssicherung, hydraulischen Modellierung und Vermessung unterstützt. Im bayerischen Maingebiet wurden die Karten als Bestandteil des Hochwasserrisikomanagement-Plans Main bereits 2010 fertig gestellt.

Im Rahmen des ersten Zyklus wurden für rund 5.750 km Gewässer (5.600 km Donaugebiet, 150 km Elbegebiet) in Bayern Hochwassergefahren- und -risikokarten neu erstellt. Zusammen mit den bereits vorhandenen Gefahren- und -risikokarten an rund 1.900 km Gewässern des Hochwasserrisikomanagement-Plans Main stehen aktuell insgesamt für rund 7.650 km Hochwassergefahren- und -risikokarten zur Verfügung.

3 Gefahren- und -risikokarten – laufende Arbeiten in Zyklus 2

Fortschreibung der vorläufigen Risikobewertung

Die im ersten Umsetzungszyklus durchgeführte vorläufige Risikobewertung wird derzeit fortgeschrieben und überprüft. Hierbei wurde auf Basis einer bayernweit einheitlichen GIS-Methodik eine Verschneidung des Gewässernetzes mit Daten zu Besiedelung, Landnutzung, Schutzgebieten und bestimmten Industriestandorten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden durch ortskundige Experten der Wasserwirtschaftsämter plausibilisiert.

Hierdurch wurden Gewässerabschnitte ermittelt, die nach Expertenmeinung ein potentiell signifikantes Hochwasserrisiko aufweisen. Im weiteren Bearbeitungsverlauf erfolgt noch eine gesetzlich vorgeschriebene Anhörung der von der Risikokulisse berührten Gemeinden.

Projektstruktur und Projektbeteiligte bei der Kartenerstellung

Aus den gesammelten Erfahrungen in der Projektabwicklung bei der Erstellung der Hochwassergefahren- und -risikokarten in Zyklus 1 wurde eine Projektstruktur entwickelt, die erneut das Zusammenwirken mehrerer verwaltungsinterner Akteure mit externen Dienstleistern vorsieht. Projekteigner ist das StMUV, welches die strategische Ausrichtung vorgibt. Die Gesamtkoordination sowie die Hauptaufgaben bei der Projektsteuerung liegen beim LfU. Die bayerischen Wasserwirtschaftsämter sind als regionale Experten die Schnittstelle vor Ort. Die eigentliche Erstellung der Karten mit den damit verbundenen Vermessungs- und Modellierungsleistungen werden meist durch externe Dienstleister (Ingenieurbüros) erbracht. Um einheitliche Qualitätsstandards zu gewährleisten, werden weitere Dienstleister mit Aufgaben der externen Qualitätssicherung beauftragt.

Einheitliche Qualitätsstandards

Die Hochwassergefahren- und -risikokarten haben vielfältige Einsatzbereiche und Nutzer. Der breiten Öffentlichkeit dienen sie als wertvolle Informationsquelle, sie sind eine Planungsgrundlage der Kommunen und der staatlichen Wasserwirtschaft bei Maßnahmen des Hochwasserschutzes. Ebenfalls dienen sie Einsatzkräften im Hochwasserfall als wichtige Entscheidungsgrundlage. Darüber hinaus bestehen gesetzliche Verpflichtungen zur rechtlichen Sicherung der Überschwemmungsgebiete als eine Maßnahme des vorbeugenden Hochwasserschutzes. Aus diesen genannten Gründen werden hohe Ansprüche in Sachen Genauigkeit und Qualität an die Karten selbst, und an deren Entstehungsprozess gestellt. Um diesen Ansprüchen dauerhaft gerecht werden zu können, wurden seitens LfU unter Einbeziehung der vorhandenen Erfahrungen und des Stands der Technik Arbeitshilfen und Musterausschreibungsunterlagen entwickelt. Diese sind bei der Auftragsvergabe und Projektabwicklung im Zuge der Erstellung der Hochwassergefahren- und -risikokarten von allen Beteiligten verpflichtend anzuwenden.

Zeitlicher Ausblick

Für das vierte Quartal 2016 plant das LfU die Bekanntmachung der Ausschreibung für die Leistungen der externen Qualitätssicherung. Anschließend folgen die Ausschreibungen für Hydraulik- und Vermessungsleistungen. Die konkrete Erstellung bzw. Aktualisierung der Hochwassergefahren- und -risikokarten erfolgt dann voraussichtlich ab Mitte 2017. Bis zum Meldezeitpunkt an die Europäische Union zum 22. Dezember 2019 müssen alle Arbeiten an den Hochwassergefahren- und -risikokarten für den zweiten Umsetzungszyklus der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie abgeschlossen sein.

Weitere Informationen zu allen Stufen des Hochwasserrisikomanagements in Bayern finden Sie unter: http://www.lfu.bayern.de

Entwicklungen im Programmsystem HYDRO_AS-2D

Dipl.-Math. Benedikt Rothe, Dr. rer. nat. Eva Loch, Hydrotec, benedikt.rothe@hydrotec.de, eva.loch@hydrotec.de

1 Rückblick HYDRO_AS-2D

Seit Beginn der Entwicklungskooperation zwischen Herrn Dr. Nujić und Hydrotec im Jahr 2014 wurden drei neue sog. „Major-Releases“ und elf „Minor-Releases“ veröffentlicht

Neue Merkmale werden jeweils in Major-Releases eingebracht. Minor-Releases sind im Vergleich zum Vorgänger funktional identisch und enthalten kleinere Verbesserungen und Fehlerbeseitigungen.

Für die Major-Releases werden Änderungen so geplant, dass jeweils die folgenden Themen adressiert werden:

- Verbesserungen im Bereich der Performance (Parallelisierung, Dateiformate,…)
- Erweiterung des Anwendungsbereiche (Starkregen, Wehrsteuerung,…)
- Punktuelle Verbesserung der numerischen Stabilität
- Bedienung: Fehlermeldungen, Warnungen, Dateinamen, Simulationssteuerung…

Die folgende Matrix ordnet die wesentlichen Änderungen der letzten Versionen in diesem Sinne ein:

Tabelle 1: Wesentliche Änderungen der letzten HYDRO_AS-2D-Versionen

Version	Wichtigste Neuerung	Performance	Anwendungsbereiche	Numerische Stabilität	Bedienung
4.0	GPU-Version	■			
4.1	Niederschläge/Starkregen		■		
4.1	CPU-Parallelität	■			
4.1	Zeitlich variable H-Randbedingungen		■		
4.1	Wasserspiegellage an Trocken/Nass-Grenze			■	
4.1	Steuerungsdatei: Info-ausgabe, Abbruch, …				■
4.2	Wehrsteuerung		■		
4.2	Siele		■		
4.2	XMDF-Dateien: Schnell & Klein	■			

2 Antworten auf häufig gestellte Fragen

Unsere Hotline steht allen Wartungskunden für Fragen rund um HYDRO_AS-2D zur Verfügung. Häufige Fragen werden im Folgenden kurz erläutert.

Durch die erweiterte Parallelisierung mit OpenMP in der CPU-Version sollte Folgendes beim Starten der Simulationsprogramme beachtet werden:

- Die Anzahl der sogenannten „threads“ sollte vor dem Start passend eingestellt werden. Das wird mit dem Befehl *set OMP_NUM_THREADS=Anzahl* erreicht.
- In den batch-Dateien, die im Installationsverzeichnis enthalten sind, wird dies automatisch übernommen. Die Voreinstellung liegt bei zwei threads, was einer Lizenz entspricht.
- Die maximale Anzahl der threads ist durch die Anzahl der verfügbaren Lizenzen beschränkt.
- Eine Lizenz stellt zwei threads zur Verfügung.
- Es können mehrere Rechenläufe mit jeweils mehreren threads gleichzeitig laufen. Dabei ist die Gesamtanzahl der threads durch die Lizenzen beschränkt.
- Die Gesamtzahl der threads sollte maximal der Anzahl der Cores des Rechners entsprechen.

Jede neue HYDRO_AS-2D-Version beinhaltet Veränderungen in der 2dm-Vorlage. Das Skript „upgrade2dm.py“ konvertiert ältere 2dm-Dateien auf die aktuelle Version. Manuelles Konvertieren sollte vermieden werden. Konvertierung zurück auf ältere Versionen ist nicht vorgesehen. Durch massive Umstellungen von SMS10 auf SMS11 ist dies zudem nicht ohne Weiteres möglich.

Bei der Modell-Erstellung/-Bearbeitung können Fehler auftreten, die sich erst während der Simulation durch fehlerhafte Ergebnisse oder einen Abbruch des Rechenlaufs äußern. Zum Teil können diese Fehler durch Anwenden von „Check Mesh“ in SMS gefunden werden. Zusätzlich wurde HYDRO_AS-2D um Kontrollmechanismen und entsprechende Fehlermeldungen erweitert.

3 Aktuelles – Version 4.2

Neben erweiterten Fehlermeldungen, verbesserten Ausgaben und kleineren Bugfixes enthält die Version 4.2 umfassende Erweiterungen.

- Die neuen Randbedingungstypen, **H-Wehr (Zeit) und H-Wehr (Steuerung)**, können zur Modellierung von Wehrsteuerungen, z.B. zur Vorabsenkung bei Hochwasser, eingesetzt werden.
- Die **numerische Stabilität der Abflussberechnung an Zufluss-und Abflussrandbedingungen** wurde erhöht, sodass Zulaufstrecken oft verkürzt werden oder wegfallen können. Künstliche Becken im Zulaufbereich sind nicht mehr erforderlich. Dennoch sollte die Sohle im Zulaufbereich möglichst glatt sein.
- Mithilfe der neuen Ausgabedateien „max_time“ und „timestep“ können Modelle optimiert und Rechenzeiten verkürzt werden.

  Die Datei „max_time“ enthält für jeden Knoten den Zeitpunkt des maximalen Wasserstands. Anhand der Zeiten kann festgestellt werden, ob eine Welle bereits durch das gesamte Modell gelaufen ist. So können Rechenzeiten ggf. verkürzt werden.

  Die Datei „timestep“ beinhaltet für jeden Knoten zu jedem SMS-Ausgabezeitschritt die interne Zeitschrittweite. Diese Zeitschrittweite wird aus den aktuellen Geschwindigkeiten und der lokalen Geometrie ermittelt. Geometrien, die zu einer kleinen Zeitschrittweite führen, können mithilfe von „timestep“ lokalisiert werden.

In Abbildung 1 sind die Zeitschrittweiten für eine Brücke, die durch KUK modelliert wird dargestellt. Im Bild ist die Fließrichtung von unten nach oben definiert. In der linken Abbildung wird der Zeitschritt am Bauwerkseinlauf sehr klein (rote Einfärbung) . Die KUK sind hier mit ca. 2 cm über Sohle zu niedrig gesetzt. Rechts sind die Zeitschritte dargestellt, die sich nach einer Erhöhung der KUK ergeben. HYDRO_AS-2D rechnet nun im Einlaufbereich mit größeren Zeitschritten (blaue Einfärbung).

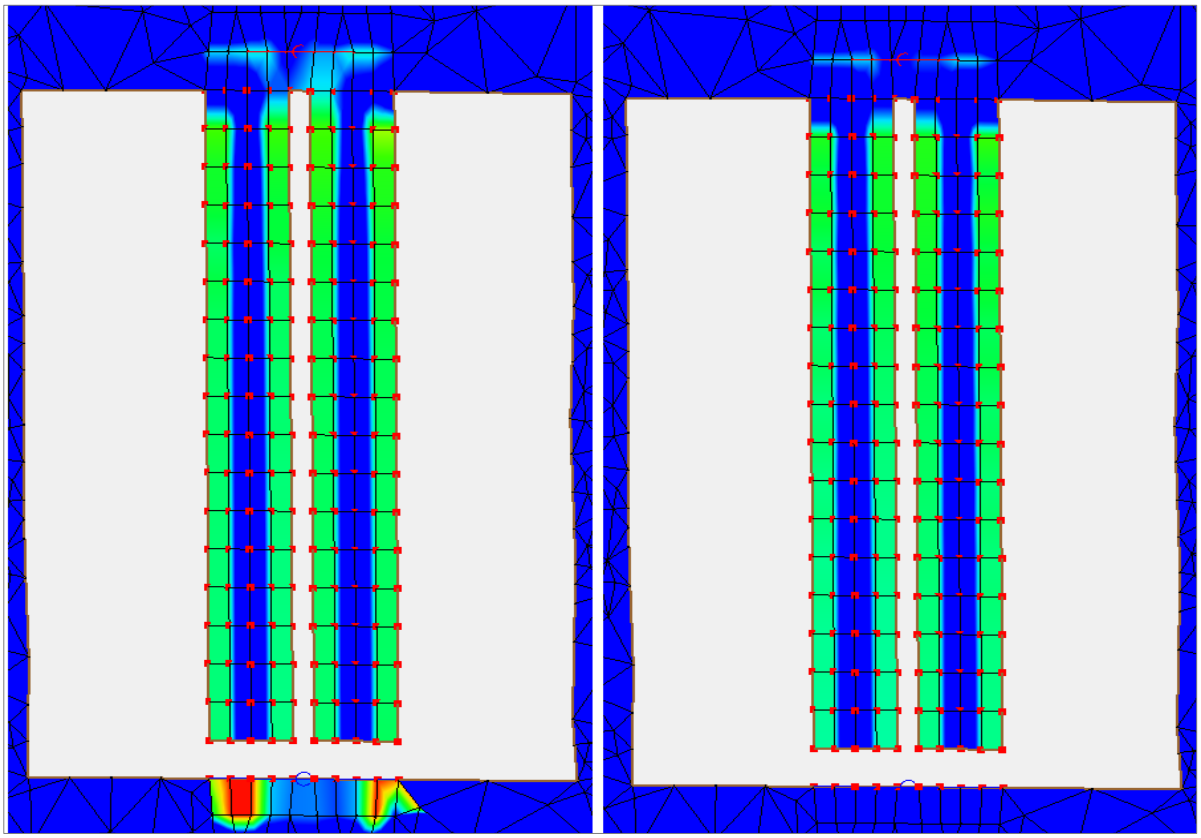


Abbildung 1: Zeitschrittweite im Vergleich. Skala: 0,04 (rot) bis > 0,1 (blau)

- SMS-Ausgabedateien können nicht nur im bisherigen ASCII-Format, sondern auch im so genannten **XMDF-Format** (binär, HDF5) erstellt werden. Eine entsprechende Auswahlmöglichkeit wird in SMS bereitgestellt. Die XMDF-Dateien sind wesentlich kleiner als die ASCII-Dateien und werden von SMS effizient/sehr schnell eingelesen. Sie können auch mithilfe eines HDF5-Viewers geöffnet werden. Im folgenden Beispiel wurden 4 SMS-Zeitschritte geschrieben. Das Modell enthält 118.962 Elemente und 574.751 Knoten. Die Größen der ASCII-Dateien und der XMDF-Dateien werden für jeweils eine skalare und eine vektorwertige Berechnungsgröße in Tabelle 1 gegenübergestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Dateigrößen

Dateiname/ Typ der Berechnungsgröße	Größe ASCII-Datei (.dat) in MB	Größe XMDF-Datei (.h5) in MB
DEPTH / skalar	26	0,4
VELOC / vektorwertig	39	1

SMS Development Highlights (presentation summary)

Tom Moreland, Aquaveo, 3210 N Canyon Rd, Ste300, Provo, UT 84604, USA, tmoreland@aquaveo.com

1 Options for Merging Meshes

Merge Methods:

- Automatic
- Overlapping
- Non-Overlapping

2 Mesh Building Enhancements

- Redistribute Vertices on Arcs
  - Size Arc
  - Arc Offsetting
- Arc Smoothing
- Convert Elements to Arcs

3 New Tools in Dataset Toolbox

Compare Datasets on Different Geometry

4 1D Summary Tables

Extract from 2D Solution

- Summary Tables
- Compare with 1D Models

5 Developments Coming Soon

- Dynamic Model Interface for HYDRO_AS-2D
- Expanded Online Data Sources
- SMS Performance
  - Parallelization and Utilization of Multiple CPU Cores
  - Better GPU Hardware Utilization
- Display Refinement with Anti-Aliasing

Anwendung von HYDRO_AS-2D im Rahmen von Polderplanungen

Prof. Dr.-Ing. Alpaslan Yörük, Hydrotec, alpaslan.yoeruek@hydrotec.de

1 Rückgewinnung von Hochwasserretentionsraum

Mit dem Ausbau des Oberrheins zwischen Basel und Iffezheim in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gingen ca. 130 km² Überschwemmungsflächen verloren. Dadurch laufen Rheinhochwasser heute schneller und höher ab und überlagern sich zudem ungünstiger mit den Hochwasserwellen der Nebenflüsse. Besonders für die Rheinanlieger unterhalb von Iffezheim bis zur Neckarmündung verschlechterte sich die Situation wesentlich.

Das Integrierte Rheinprogramm (IRP) des Landes Baden-Württemberg hat zum Ziel zusammen mit Maßnahmen von Rheinland-Pfalz und Frankreich, das Schutzniveau der Unterlieger wieder so herzustellen, wie es vor dem Ausbau des Oberrheins bestand. Dazu sollen 13 Hochwasserrückhalteräume mit einem gesamten Rückhaltevolumen von 167,3 Mio. m³ geschaffen werden. Bei der Planung und Realisierung sind Umweltschutz-Aspekte zu berücksichtigen. Insbesondere ist die Auenlandschaft am Oberrhein weitestgehend zu erhalten bzw. zu renaturieren.

Der Gewinn von verloren gegangenen Überflutungsflächen bzw. Retentionsräumen durch Planung von Poldern ist nicht nur am Rhein ein aktuelles Thema, sondern auch an anderen bedeutenden Gewässern (Elbe, Donau usw.).

2 Hydraulische Modellierung

Hydraulische Fragestellungen stellen einen wichtigen Teil der Planungen für die Polder dar. Folgende Aspekte / Arbeitsschritte sind dabei maßgeblich:

- Wirkungsnachweis im Hochwasserfall
- Bemessung von Ein- und Auslaufbauwerken
- Ableiten von Bauwerkskennlinien
- Bemessung von Dammhöhen
- Einfluss von Sommerdämmen
- Optimierung der Polderentleerung
- Analyse und Optimierung ökologischer Flutungen
- Schnittstelle Grundwassermodell/Oberflächenmodell

HYDRO_AS-2D ist das ideale Instrument, um all diese Fragestellungen hydraulisch zu untersuchen und zuverlässige Daten für die erforderlichen Bemessungsgrundlagen zu liefern. Zusätzlich lassen sich die Modellergebnisse auf einfache Weise visualisieren. Die aussagekräftigen Animationen und Bilder lassen sich wirkungsvoll für Information und Öffentlichkeitsarbeit einsetzen.

Ermittlung von Hochwasserrückhaltepotenzialen durch Staustufensteuerung mithilfe eines HYDRO_AS-2D-Moduls zur optimierten Bauwerkssteuerung

Stefan Giehl M.Sc., Dorothea Pörtge M.Sc., Riccardo Scandroglio M.Sc., Prof. Dr.sc.tech. Peter Rutschmann, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München, stefan.giehl@tum.de, dorothea.poertge@tum.de, *peter.rutschmann@tum.de*

Prof. Dr.-Ing. Alpaslan Yörük, Hydrotec, a.yoeruek@hydrotec.de

1 Einleitung

Ein Element des (gesteuerten) Hochwasserschutzes könnten Staustufen(-ketten) sein, sofern diese durch angepasste Betriebsweisen auf die Hochwasserwellenretention Einfluss nehmen können. Eine Erhöhung des im Stauraum vorhandenen Hochwasserrückhaltevolumens kann dabei entweder durch Vorabsenkung und/oder Überstauregelungen generiert werden. Die reale Wirkung dieser Staustufenbewirtschaftung ist im Wesentlichen abhängig von der Größe des Stauraums, der Kapazität der Wehre, dem Abfluss, dem Unterwasserstand und vor allem auch der Vorhersage der Hochwasserwelle.

Des Weiteren bedarf es u.U. einer baulichen Anpassung der Wehranlagen und Dämme, um Standsicherheitsprobleme zu vermeiden. Problematisch bei einem kombinierten Einsatz von mehreren Staustufen im Hochwasserfall könnte das Entstehen einer Vorabsenkungswelle oder sogar eine Erhöhung der Abflussspitze bei sub-optimaler Umsetzung sein. Im Beitrag soll vorgestellt werden, wie solche angepasste Betriebsweisen von Wehren und Staustufen mithilfe einer 2D-Numerik untersucht werden kann. Eine eigens entwickelte Erweiterung zur Bauwerkssteuerung mit dem Programm HYDRO_AS-2D ermöglicht die Umsetzung der komplexen Wehrbetriebsordnungen im Hochwasserfall mit Vorabsenkung beim Anlaufen der Hochwasserwelle, Wiederaufstau und Halten eines bestimmten Wasserstands.

2 Erweiterung zur Bauwerkssteuerung in HYDRO_AS-2D

In HYDRO_AS-2D konnten bisher steuerbare Wehre über eine definierte W-Q-Beziehung als Randbedingung abgebildet werden. Diese W-Q-Beziehung musste monoton steigend definiert werden und als Eingangssteuerungsparameter wurde ein Pegelpunkt angesteuert. Um eine komplexe Wehrsteuerung wie z. B. eine Vorabsenkung innerhalb einer Staustufe zu ermöglichen, wurde HYDRO_AS-2D um die Randbedingung „*H-Wehr (Steuerung)*“ und „*H-Wehr (Zeit)*“ erweitert. Die Randbedingung *H-Wehr (Zeit)* ermöglicht die Höhe der Wehrkrone als Zeitfunktion durch eine Modellrandbedingung vorzugeben. Die Randbedingung *H-Wehr (Steuerung)* ermöglicht die Wehrsteuerung in Abhängigkeit eines Abflusses und eines Wasserstandes.

3 Untersuchungen an akademischen Gerinnen und langen Flussabschnitten

Neben den hausinternen Testrechnungen bei Hydrotec wurde die Erweiterung zur Bauwerkssteuerung in HYDRO_AS-2D auch am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TUM getestet. Zunächst wurde dazu ein akademisches Gerinne mit einfachen Eigenschaften aufgebaut (Bild 1, links). Dieses hatte eine Länge von 40 km mit mittig angeordneter Staustufe (modelliert mit Randbedingung *Auslauf* und *Zulauf gebunden an Auslauf*) und konstantem Querschnitt und Sohlgefälle. Belegt wurde das Netz mit zwei Rauheiten (Flussschlauch und Vorland).

Da das Modul im akademischen Gerinne sensibel auf die Eingabeparameter reagierte, wurden weitere Testrechnungen mit einem realitätsnahen Ausschnittmodell (Bild 1, rechts) durchgeführt, um eventuelle Netzabhängigkeiten zu erkennen. Zudem konnten Erfahrungen für die Studien in großräumigen Untersuchungsgebieten gewonnen werden. Im Ausschnittmodell sind größere Vorländer sowie als untere Randbedingung eine Staustufe enthalten. Mit diesem Modell wurde eine weitere Vielzahl von Testrechnungen mit beiden neu verfügbaren Randbedingungen *H-Wehr (Zeit)* und *H-Wehr (Steuerung)* durchgeführt.

Bild 1: Akademisches Gerinne und realitätsnahes Ausschnittsmodell

Nach den Testrechnungen wurden instationäre HQ_{100} – Szenarien in größeren Flussabschnitten simuliert. Bild 2 zeigt eine typische Gewässersituation und Darstellung der Randbedingungen im numerischen Modell.

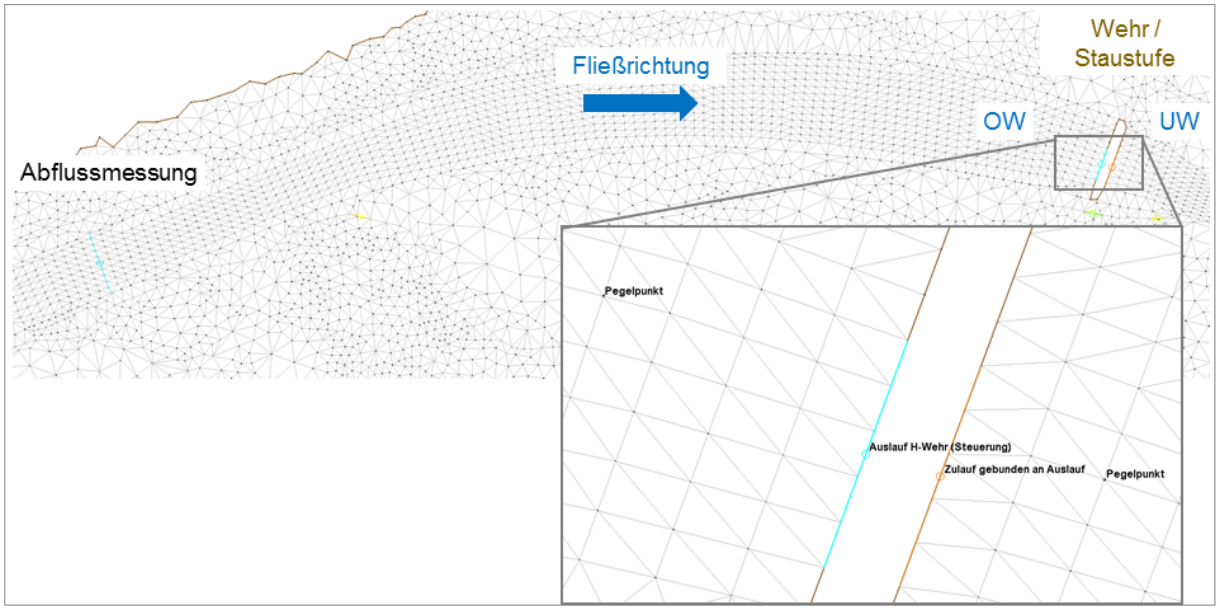


Bild 2: Staustufe im großräumigen Modell mit Darstellung der Auslauf- und Zulaufrandbedingung

4 Erkenntnisse im Lauf des Modellierungsprozesses

Im Laufe der Studien stellte sich heraus, dass für eine 1:1 Umsetzung einer Wehrbetriebsordnung die Randbedingung *H-Wehr (Steuerung)* nach passender Einstellung der Randbedingungen gut funktioniert und auch eine Kette von Wehren simuliert werden kann. Da allerdings, zumindest bei den untersuchten Staustufen und hydrologischen Szenarien, das Befolgen einer starren Steuervorgabe den Hochwasserscheitel nicht reduzieren konnte (s. Bild 3), wurden Optimierungsvarianten mit der Randbedingung *H-Wehr (Zeit)* simuliert. Damit konnten unterschiedliche Aufstauzeitpunkte und -geschwindigkeiten präziser eingestellt und annähernd horizontale Kappungen einer Hochwasserwelle erreicht werden. Diese repräsentieren aufgrund der oben erwähnten Rahmenbedingungen ein theoretisches Potential für Hochwasserrückhalt durch angepasste Wehrsteuerung.

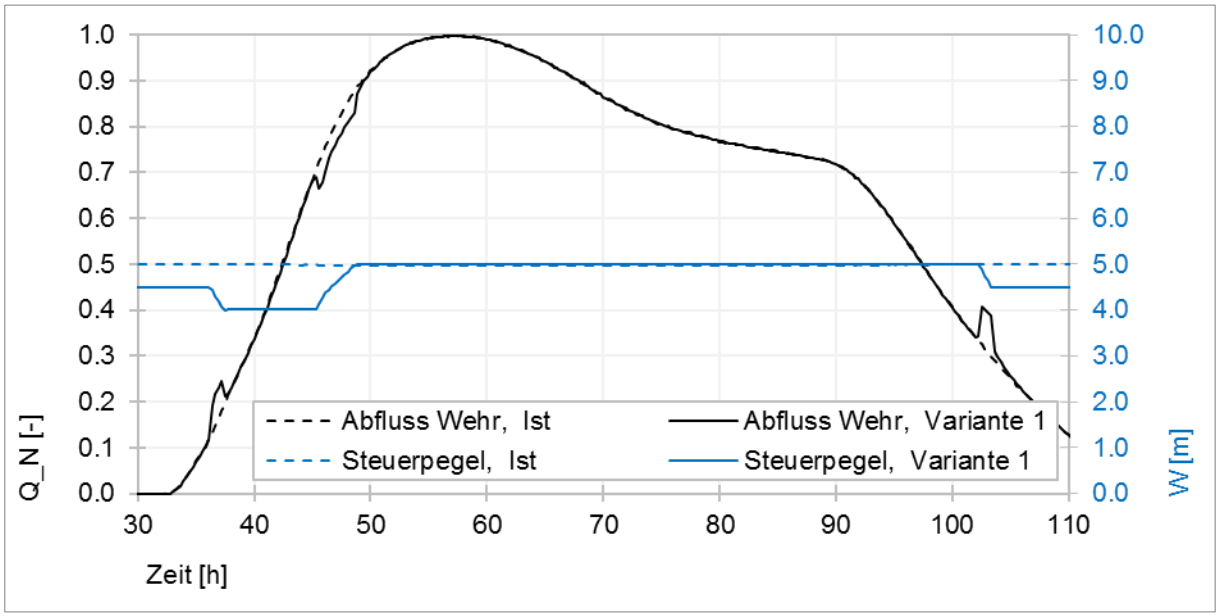


Bild 3: Abfluss- und Oberwasserstand-Ganglinien für den Ist-Zustand (konstantes Stauziel) und Umsetzung einer Steuervorgabe mit Vorabsenkung und Wiederaufstau (mit *H-Wehr (Steuerung)*). Abflüsse Q wurden ohne Basisabfluss normiert auf den Spitzenabfluss.

Nachteil der Randbedingung *H-Wehr (Zeit)* ist der erhöhte Aufwand durch iterative Ermittlung der verfügbaren Stauraumvolumina, Ab- und Aufstaugeschwindigkeit (Gradienten) und deshalb eine lange Bearbeitungszeit je nach Anzahl der Wehre im Untersuchungsgebiet. Die Randbedingung H-Wehr (Steuerung) ermöglicht zwar eine selbsttätige Steuerung des Auslaufs, wesentlich ist dabei aber eine sorgfältige Wahl der Lage der Steuerpegel und der Messquerschnitte. Für eine effektive Wellenbeeinflussung bzw. Kappung müssten auch hier die Wehrgeschwindigkeiten, die zum besten Resultat führen, iterativ ermittelt werden.

5 Danksagung

Wir danken dem Landesamt für Umwelt Bayern für die Finanzierung der Erweiterung der Bauwerkssteuerung für HYDRO_AS-2D und der TUM-Forschungsvorhaben, in deren Rahmen die Untersuchungen durchgeführt werden konnten.

Juni-Hochwasser 2013 – Donau im Bereich Straubing-Vilshofen

Dipl.-Ing. Jens Kastrup, RMD Wasserstraßen GmbH, Blutenburgstraße 20, 80363 München,
E-Mail: jens.kastrup@rmd-wasserstrassen.de

1 Einleitung

Die RMD Wasserstraßen GmbH betreibt für die hydraulischen Untersuchungen bei Hochwasserverhältnissen im Rahmen des Donauausbaus zwischen Straubing und Vilshofen ein zweidimensionales, hydrodynamisch-numerisches Strömungsmodell. Um das 2009 stationär kalibrierte Modell zu verifizieren, ist das Hochwasserereignis von Juni 2013 instationär nachgerechnet worden. Dabei wurden die folgenden drei Szenarien untersucht:

- Szenario ohne Deichüberströmungen
- Szenario mit Deichüberströmungen
- Szenario mit Deichbrüchen

2 Modellbeschreibung

Das Modellgebiet umfasst das Donautal zwischen Do-km 2330 (Straubing) und 2240 (ca. 9 km unterstromig von Vilshofen). Die Isar, welche bei Do-km 2282 in die Donau mündet, ist auf den unteren 9 km bis nach Plattling mit modelliert worden. Die Gesamtfläche des Modells beträgt ca. 280 km² (Bild 1).

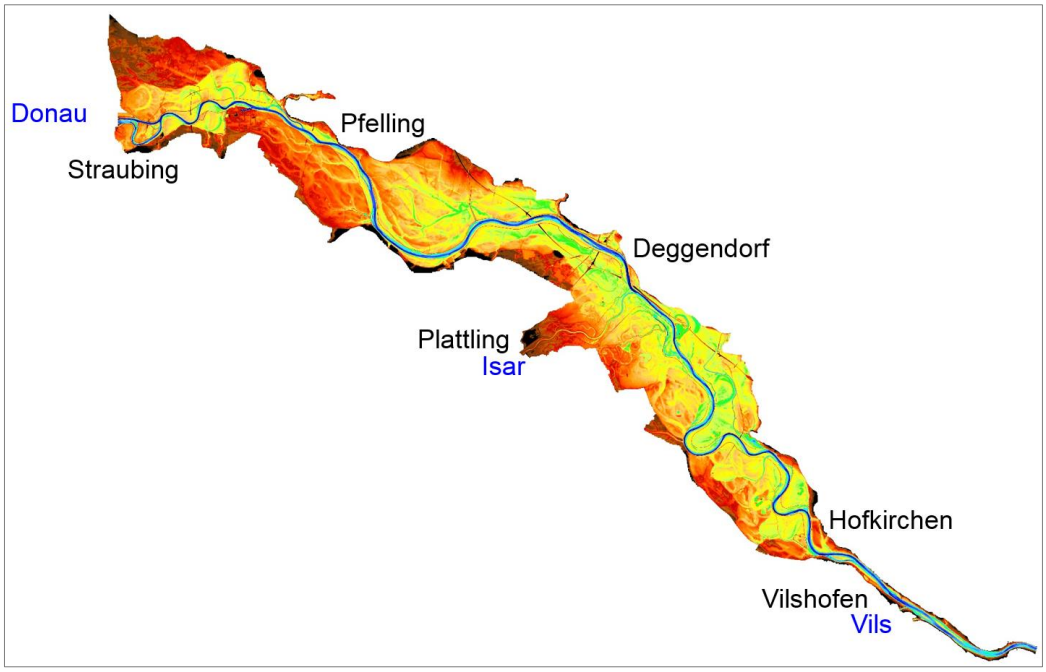


Bild 1: Modellgebiet des Strömungsmodells

Das Modell wurde bereits 2003 erstellt und seitdem kontinuierlich den aktuellen Verhältnissen angepasst, erweitert und bereichsweise verfeinert. Die Modellversion, mit der das Hochwasser von Juni 2013 nachgerechnet wurde, besteht aus ca. 680.000 Elementen und ca. 440.000 Knoten und wurde im Jahr 2009 stationär kalibriert.

Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist für die Variantenunabhängigen Untersuchungen zum Ausbau der Donau im Jahr 2012 veröffentlicht worden und befindet sich im Internet unter dem folgenden Link:

http://www.donauausbau.wsv.de/anlagen/Bericht_EU-Studie/B_I_Ist_Zustand/Anlage_I_06.pdf

3 Hochwasser 2013

Das Hochwasserereignis von Juni 2013 war ein isarbetontes Sommerhochwasser. Bezogen auf die gemessenen Abflüsse oberstromig der Isarmündung handelte es sich um ein ca. 30-jährliches und unterstromig der Isarmündung aufgrund der Deichbrüche um ein ca. 40-jährliches Ereignis. Wären die Deiche nicht gebrochen, würde es sich, bezogen auf die simulierten Abflussganglinien des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) unterstromig der Isarmündung, um ein ca. 70-jährliches Hochwasserereignis handeln.

Am 4. Juni 2013 gegen 10:45 Uhr brach der linke Donaudeich beim Schöpfwerk Auterwörth. Am selben Tag brach ebenfalls gegen 13:30 Uhr der linke Isardeich bei Schwaigisar. Infolge dieser beiden Deichbrüche brachen 8 weitere Binnendeiche wie z.B. an der Schwaig-Isar oder an der Hengersberger Ohe. Die Flutungen der Polder Gundelau/Auterwörth mit Niederalteich und Steinkirchen-Fischerdorf-Isar mit insgesamt rund 70 Millionen Kubikmeter Wasservolumen bewirkten eine deutliche Kappung des Hochwasserscheitels in der Donau.

Zum Zeitpunkt des Wellenscheitels am 05.06.2013 wurde eine durchgehende Wasserspiegelfixierung der Donau zwischen Straubing und Vilshofen durchgeführt. Zusätzlich sind die Fließgeschwindigkeiten an mehreren Messprofilen mit ADCP ermittelt worden. Die daraus ermittelten Abflüsse dienten u. a. zur Kalibrierung des hydrologischen Modells FGMOD vom LfU.

4 Nachrechnung des Hochwassers von Juni 2013

Neben den drei Hauptzuflüssen Donau, Isar und Vils sind aufgrund von Zwischeneinzugsgebieten 14 weitere Zuflüsse modelliert worden. Als Randbedingungen wurden die simulierten Abflussganglinien aus FGMOD (LfU) verwendet.

Die instationären Berechnungen wurden mit der Software HYDRO_AS-2D (Version 2.1) durchgeführt. Es sind 9,7 Tage simuliert worden. Die Länge der Zeitschritte wurde auf 3600 bzw. bei Deichbrüchen auf 900 Sekunden festgelegt.

In Bild 2 sind die berechneten Abflussganglinien der drei untersuchten Szenarien am Pegel Hofkirchen abgebildet.

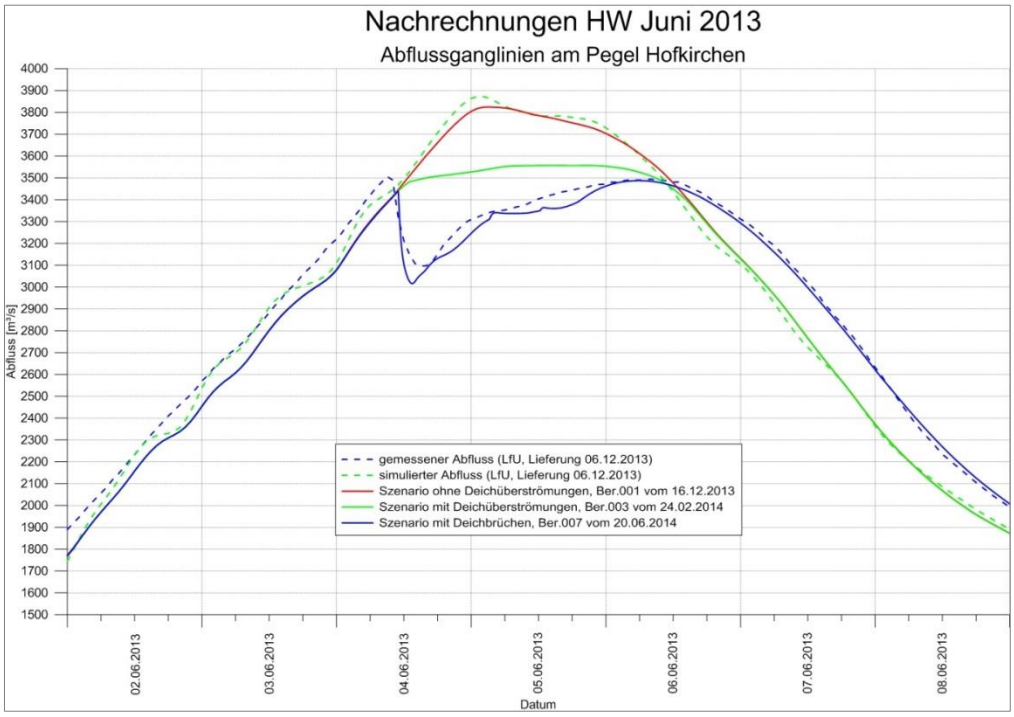


Bild 2: Abflussganglinien am Pegel Hofkirchen

Szenario ohne Deichüberströmungen

Beim Hochwasser von Juni 2013 sind sehr lange Deichstrecken erfolgreich verteidigt worden. Daher wurde bei diesem Szenario von einer Verteidigung aller Hochwasserdeiche ausgegangen. Im Modell wurden dazu die Deiche unüberströmbar definiert (disable).

Im Ergebnis (Bild 2) am Donaupegel Hofkirchen zeigt sich, dass der berechnete Abflussscheitel der Hochwasserwelle (rote Linie) deutlich höher als die gemessenen Werte mit Deichbrüchen (blau gestrichelte Linie) ist. Die berechnete Abflussganglinie bestätigt die vom LfU simulierte Abflussganglinie (grün gestrichelte Linie).

Szenario mit Deichüberströmungen

Im Gegensatz zum ersten Szenario, wurde hier ein Überströmen der Deiche im Modell zugelassen. Auch bei größeren Überströmungshöhen der Deiche wurde kein Deichbruch modelliert.

Die berechneten Zeitpunkte und die Lage der ersten Deichüberströmungen im Modell passen sehr gut mit den vor Ort beobachteten Deichüberströmungen bzw. Deichbrüchen zusammen. Obwohl die Deiche im Modell nur überströmt werden, sind die berechneten Überschwemmungsgebiete nicht wesentlich kleiner als im Szenario mit Deichbrüchen.

Der maximal berechnete Abfluss am Pegel Hofkirchen (Bild 2, grüne Linie) unterscheidet sich nicht bedeutend von den gemessenen Werten.

Szenario mit Deichbrüchen

Um die vor Ort beobachteten Zeitpunkte der Deichbrüche im Modell möglichst exakt abbilden zu können, sind die Zeitschritte der Berechnung von 3600 auf 900 Sekunden reduziert worden. Zum Zeitpunkt der beobachteten Deichbrüche wurde die Berechnung unterbrochen und die Deichbreschen modelliert. Anschließend ist die Berechnung mittels CPR fortgesetzt worden. Verteidigungsmaßnahmen wie z.B. entlang der Deiche, der Autobahn oder an Unterführungen wurden im Modell nicht berücksichtigt.

Bei Fischerdorf wurde für die Dauer der Überflutung ein Binnenpegel errichtet. Die kontinuierlich gemessenen Werte des Pegels konnten mit dem Modell gut nachgerechnet werden.

Bild 2 zeigt eine gute Übereinstimmung der berechneten Abflüsse am Pegel Hofkirchen mit den gemessenen Werten (blaue Linien).

Auf den folgenden beiden Bildern werden verschieden ermittelte Ü-Gebiete im Bereich des Polders Steinkirchen-Fischerdorf-Isar miteinander verglichen. Das Digitale Orthofoto vom 05.06.2013 wurde von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zur Verfügung gestellt. Die rot gestrichelte Fläche stellt das aus Beobachtungen und Luftbildern ermittelte Ü-Gebiet des Wasserwirtschaftsamtes Deggendorf dar. Die berechnete Überschwemmungsfläche, welche als maximale Wassertiefe in Bild 4 zu sehen ist, stimmt gut mit der ermittelten Fläche des WWA überein.

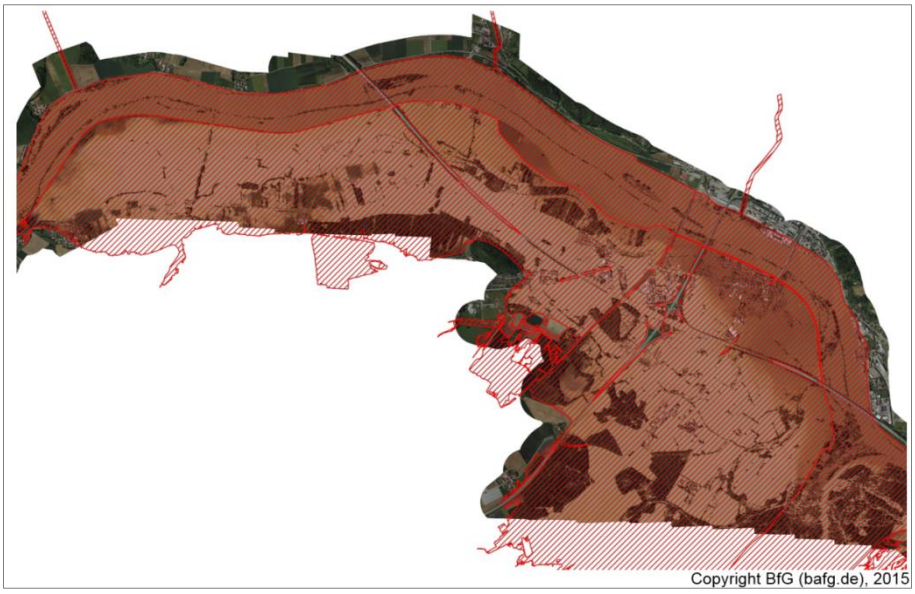


Bild 3: Ü-Gebiet im Polder Steinkirchen-Fischerdorf-Isar, Digitales Orthofoto vom 05.06.2013 (BfG) und ermittelte Überschwemmungsfläche des WWA Deggendorf (rot)

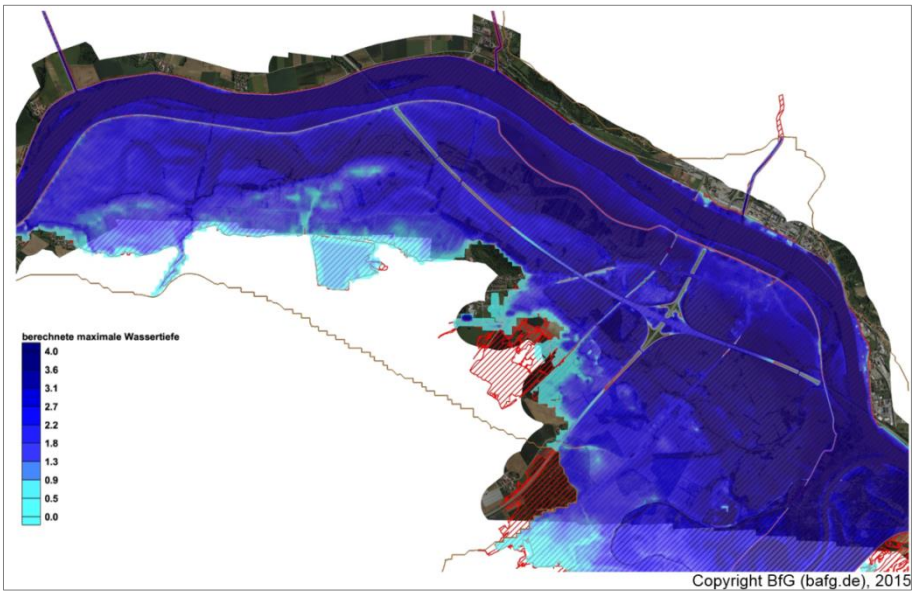


Bild 4: Ü-Gebiet im Polder Steinkirchen-Fischerdorf-Isar, berechnete Überschwemmungsfläche bzw. maximale Wassertiefe (Szenario mit Deichbrüchen)

Mit den drei untersuchten Szenarien des Hochwassers von Juni 2013 konnte das bestehende 2d-HN-Modell zwischen Straubing und Vilshofen verifiziert werden.

Einsatz von HYDRO_AS-2D zur Simulation von urbanen Sturzfluten

Dipl.-Ing. (FH) Robert Mittelstädt, Hydrotec, robert.mittelstaedt@hydrotec.de

1 Einleitung

Starkregen und daraus folgende Sturzfluten gab es auch schon früher. Durch dichte Besiedlung und geänderte landwirtschaftliche Nutzung können solche Sturzfluten heute aber zu hohen wirtschaftlichen Schäden führen. Das sich ändernde Klima spielt hierbei zusätzlich eine große Rolle. Viele Studien gehen von einer Zunahme der Starkniederschläge im Sommerhalbjahr in Deutschland aus. Auswertungen des DWD der letzten 10 Jahren zeigen, dass Starkregen gerade im Bereich großer Dauerstufen (KOSTRA-DWD-2010 , D > 12 h) zugenommen haben (Malitz 2015). Auch die Auswertungen der Kooperationsvorhabens KLIWA kommen teilweise zu einem ähnlichen Ergebnis (LfU Bayern 2012).

2 Gefahr erkannt – Gefahr gebannt

Um die Gefährdung, die von Sturzfluten infolge Starkregen ausgehen, zu ermitteln, hat Hydrotec ein spezielles Stufenkonzept entwickelt:

1. Einen Eindruck von den Gebietseigenschaften und möglichen Gefahrenpunkten vermitteln **topografische Analysen**. Hierbei erfolgt auf Basis eines DGM (1x1m-Raster) eine Auswertung und Darstellung der Höhenunterschiede, Hangneigungen und Senken im Untersuchungsgebiet. Weiterhin erfolgt eine Berechnung und Auswertung der potenziellen Fließwege allein aufgrund der Topographie.

2. Im zweiten Schritt erfolgt eine 2d-hydraulische Berechnung mit einem sogenanntem **2D-Screeningmodell**. Das 2D-Modell wird aus Viereckselementen mit einer Größe von 10x10 und 5x5 und kleiner (im bebauten Bereich) für das gesamte Untersuchungsgebiet erstellt. Somit können zurzeit bis zu 350 km² Fläche mit einem Rechengang berechnet werden. Die Oberflächeneigenschaften, Bebauung und die Gewässer werden bereits vereinfacht abgebildet. Die Belastung erfolgt mittels Effektivniederschlag in Abhängigkeit der Landnutzung und vorherrschenden Böden. Eine Versickerung kann auch im 2D-Modell berücksichtigt werden. Als Ergebnis werden Überflutungsflächen, die Höhe der Wasserspiegel und die Fließgeschwindigkeiten und -richtungen an allen Modellknoten für den gesamten Berechnungszeitraum ermittelt und ausgegeben. Hieraus lassen sich bereits Gefahren- und Risikokarten ableiten.

3. Im Anschluss werden die Ergebnisse von Kanalnetzmodellen (hier die Austritte aus dem Kanalnetz = **Kanalüberstau**) mit den Ergebnissen aus dem 2D-Screeeningmodell verglichen und ausgewertet.

4. Für die maßgeblichen Gefahren- und Risikobereiche, für die Maßnahmen erforderlich scheinen, werden nun detaillierte Untersuchungen mittels **2D-Feinmodelle** durchgeführt. In den 2D-Feinmodellen sind hochgenaue Geländemodelle (1x1m), Gebäudeumrisse, Mauern, Straßenverläufe und alle weiteren, die Abflussrichtung bestimmenden Geometrien eingeflossen. Die Simulation erfolgt gekoppelt mit dem Kanalnetzmodell. Hierbei werden Ergebnisse aus dem Kanalnetzmodell an das 2D-Feinmodell übergeben (sog. Offlinekopplung). Eine Wiedereinschöpfung in das Kanalnetz kann ebenfalls simuliert werden. Auch aus den Ergebnissen der 2D-Feinmodelle werden detaillierte Gefahren- und Risikokarten erstellt.

5. Sollen nun Maßnahmen entwickelt und umgesetzt werden, so lässt sich für die meisten technischen Maßnahmen mit dem 2D-Feinmodell eine **Wirkungsanalyse** durchführen. Hierzu werden die Maßnahmen, wie z.B. Rückhaltungen oder Mauern und Verwallungen, direkt in das 2D-Feinmodell-Prognose eingebaut. Die Wirkung kann über den Vergleich der Wasserspiegellagen veranschaulicht werden.

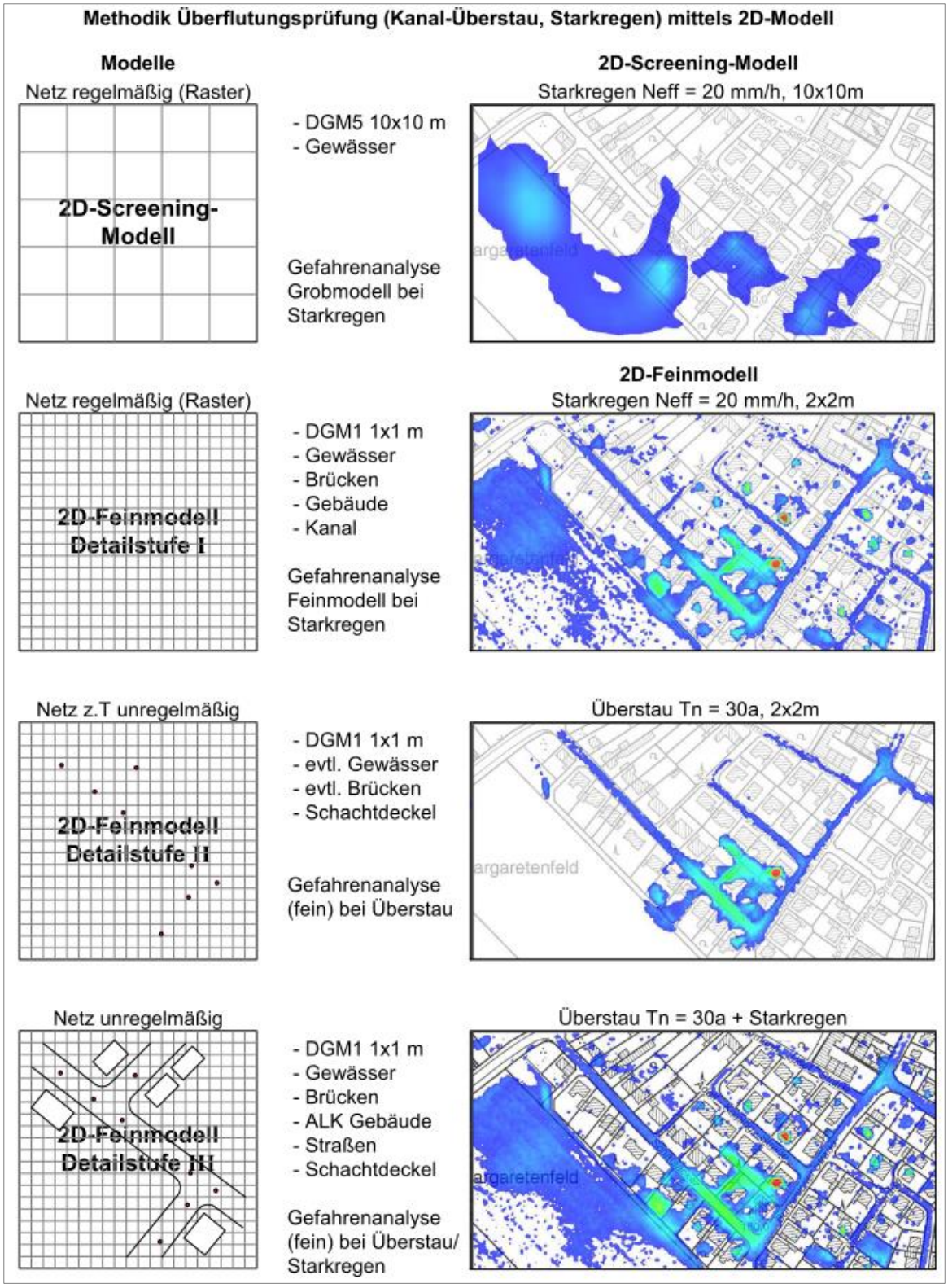


Bild 1: Methodik zur Überflutungsprüfung mittels 2D-Modell

3 2D-Modell auf die Untersuchungsziele abstimmen

Der Vorteil dieses stufenweisen Verfahrens liegt in der schrittweisen Eingrenzung auf die wirklichen Gefahrenbereiche. Zudem sind die ersten drei Schritte des Stufenkonzepts sehr kostengünstig und schnell bearbeitet. Trotzdem erhält man bereits mit dem 2D-Screeningmodell einen guten Eindruck über das Sturzflutverhalten im Untersuchungsgebiet.

Auf dieser Basis kann eine Beurteilung erfolgen und eine Entscheidungsgrundlage für die noch folgenden erforderlichen Untersuchungen und Maßnahmen geschaffen werden. Oft reichen die Ergebnisse auf Basis des 2D-Screeningmodells aber auch schon aus, um Maßnahmen zu treffen, die das bestehende Risiko mindern.

4 Modellierung ermöglicht Planung effizienter Maßnahmen

Auf der Grundlage der mit HYDRO_AS-2D erstellten Gefahren- und Risikokarten können Defizite und Handlungsbedarf rechtzeitig erkannt und Maßnahmenpläne mit den beteiligten Behörden erstellt werden.

Geplante technische Maßnahmen können an der gewünschten Stelle eine positive Wirkung (Absenkung der Wasserspiegel) besitzen, aber an einem anderen Ort (z.B. beim Nachbarn) zu einer unerwünschten Wasserspiegelerhöhung führen. Mit dem 2D-Modell können solche Effekte einfach lokalisiert und beseitigt werden.

5 Modellgenauigkeit hängt von Eingangsdaten ab

Die Unterschiede zwischen 2D-Screeningmodell und 2D-Feinmodell sind oft geringer als angenommen. Sie sind umso größer, je mehr bauliche Veränderungen an der Topographie (Mauern, Verwallungen) im Untersuchungsgebiet vorgenommen wurden.

Alle Modelle sind immer nur so genau wie die Daten, die in das Modell einfließen Deshalb hängt die Genauigkeit der Ergebnisse der 2D-Modellierung vor allem von der Auflösung und der Genauigkeit des verwendeten DGM ab.

6 Großflächige Berechnungen erforderlich

Wichtig ist nicht unbedingt, ob ein Modell so genau wie möglich ist. Viel wichtiger ist es, zeitnah für die bebauten Bereiche in Deutschland Sturzflutgefahrenkarten zu erstellen. Das bietet Kommunen und potenziell betroffenen Bürgern eine Chance sich zu informieren und vorsorgende Maßnahmen zu treffen, um gegen die nächste Sturzflut gewappnet zu sein. Schäden wie sie im Sommer 2016 deutschlandweit an zahlreichen Orten aufgetreten sind, ließen sich dadurch zwar nicht komplett verhindern, aber doch wesentlich verringern.

7 Literatur

LfU Bayern; Klimawandel in Süddeutschland - Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen [Bericht]. - 2012.

Malitz Gabriele und Ertel Heinz; KOSTRA-DWD-2010 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010) Abschlussbericht. - : DWD, 2015.

Geschiebetransportmodellierung mit HYDRO_FT-2D für langfristige Prognosen - Herausforderungen und Vorgehensweise am Beispiel der Salzach

Dr.-Ing. Markus Noack, Dipl.-Ing. Felix Beckers und Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart, markus.noack@iws.uni-stuttgart.de, felix.beckers@iws.uni-stuttgart.de, wieprecht@iws.uni-stuttgart.de

1 Einleitung

Die flussbaulichen Korrektionen der Vergangenheit sowie die Eingriffe in den Geschiebehaushalt führten zu einem massiven Eintiefungsprozess in der Salzach und Saalach. Insbesondere in der Salzach sind bereits Maßnahmen zur Gewässersanierung erarbeitet und teilweise umgesetzt worden. Vor der Umsetzung weiterer Maßnahmen, ist eine möglichst genaue Kenntnis über die Geschiebetransportvorgänge im Freilassinger Becken (Salzach) notwendig, weshalb eine numerische Geschiebetransportmodellierung mit HYDRO_FT-2D durchgeführt wurde. Das Modell umfasst die Salzach im Freilassinger Becken unterhalb der Sohlstufe Lehen bei Fkm 62,0 bis zur Sohlrampe bei Fkm 51,9, sowie die Saalach unterhalb des Kraftwerks Rott (Fkm 2,4) bis zur Mündung in die Salzach (Saalachspitz). Eine detaillierte Beschreibung von Modell und Ergebnissen der Geschiebetransportmodellierung sind in Noack et al. (2015) dokumentiert. Im Rahmen dieses Beitrags wird vorwiegend auf die Herausforderungen und die Vorgehensweise der Modellierung eingegangen.

2 Herausforderungen und Vorgehensweise

Eine gründliche Verifizierung der Modelleinstellungen über Kalibrierung und Validierung ist unerlässlich, um ein aussagefähiges Prognosemodell zur Sohlentwicklung zu erstellen. Die erste Herausforderung stellt die Verfügbarkeit von Daten zur Definition von Anfangs- und Randbedingungen sowie zur Kalibrierung und Validierung dar. Neben hydraulischen Messdaten wie Abflussganglinien und Wasserspiegel-Abflussbeziehungen, müssen Informationen über die morphologischen (Zwischen-) Zustände des Gewässers vorliegen. Hierzu gehören die räumliche und zeitliche Entwicklung der Gewässersohle, der Korngrößenverteilung, der Geschiebeein- und austragsmengen und der Transportraten sowie Aufzeichnungen über wasserbaulichen Veränderungen, die die Morphologie beeinflussen und Informationen über die Geschiebedurchgängigkeit von Wasserbauwerken. Da üblicherweise nicht alle Daten zur Verfügung stehen, müssen für Kalibrierung und Validierung teilweise Annahmen getroffen werden. Im Rahmen dieses Projektes standen zum Beispiel nur Sohlaufnahmen verschiedener Jahre für Kalibrierung und Validierung zur Verfügung. Eine Überprüfung des Modells auf Korngrößensortierung und Transportraten war somit nicht möglich. Des Weiteren kann der Geschiebetransport generell über eine Vielzahl an Parametern kalibriert werden, weshalb die Kalibrierung und Validierung eines Geschiebetransportmodells eine prinzipielle Herausforderung darstellt.

Neben der Kalibrierung und Validierung des Geschiebetransportmodells und der Datengrundlage stellt für langfristige Modellprognosen (80-100 Jahre) die Optimierung von räumlicher und zeitlicher Auflösung des Modellgebiets einen wesentlichen Aspekt dar, um vertretbare Rechenzeiten zu erlangen. Eine räumliche Auflösung, wie sie für hydrodynamisch-numerische Modelle üblicherweise verwendet wird, ist aufgrund der entstehenden morphologischen Rechenzeiten nicht praktikabel. Daher stellt die Vergröberung des Berechnungsnetzes einen wesentlichen Aspekt zur Reduzierung der Rechenzeit dar, wobei zu beachten ist, dass wesentliche abflussrelevante Strukturen über Bruchkanten erhalten bleiben. Eine weitere Möglichkeit bietet die Beschränkung der Abflussganglinie auf Abflüsse, die geschieberelevant bzw. für morphologische Veränderungen im Gewässer relevant sind. Die prinzipielle Vorgehensweise zur Ermittlung eines geschieberelevanten Abflusses ist in Sadid et al. (2016) beschrieben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Unsicherheiten in langfristigen Prognosen durch Geschiebetransportmodellierungen aus limitierenden Informationen zu Anfangs- und Randbedingungen sowie zur Kalibrierung und Validierung, dem Einfluss der räumlichen Auflösung des Berechnungsnetzes, der Verkürzung der Ganglinie, sowie den prinzipiellen mathematischen Einschränkungen von Transportgleichungen bestehen. Aus diesem Grund ist eine Sensitivitätsanalyse unerlässlich, um die Unsicherheiten von modell- und gewässerspezifischen Parametern zu quantifizieren und um die Belastbarkeit der Modellergebnisse zu überprüfen. Für das Geschiebetransportmodell der Salzach wurde eine ausführliche Sensitivitätsanalyse durchgeführt in deren Rahmen der kritische Shields-Parameter, der Vorfaktor für die Transportformel von Meyer-Peter, Müller (1948), die Schichtdicke der Austauschschicht, der Beschleunigungsfaktor, die Gesamtrauheit, die Kornrauheit sowie die Geschiebeeinträge (Salzach oberstrom und Saalach) variiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Sohlentwicklung, Geschiebefracht und Korngrößenentwicklung ausgewertet (Beckers et al., 2016).

3 Ergebnisse

Die Vergröberung des Berechnungsnetzes führt zu einer Reduzierung der Elementanzahl um 98% gegenüber dem numerischen Hydraulikmodell des Untersuchungsgebiets. Als resultierende Auflösung wird dabei für die Flusssohle eine Elementgröße von ca. 35 m x 15 m gewählt. Dies entspricht 4 bis 5 Elementen im Querschnitt. Für die Uferauflösung wird eine Elementgröße von 35 m x 7 m gewählt, welche wiederum ca. 4 bis 5 Elementen in den Uferbereichen entspricht. Die Auflösung des Berechnungsnetzes im Vorland beträgt ca. 50 m x 50 m.

Zur Ermittlung des geschieberelevanten Abflusses wird die Abflussganglinie durch eine Vorauswahl von Abflüssen (Schwellenwerte) so beschränkt, dass alle kleineren Abflüsse aus der Ganglinie entnommen werden. Anschließend werden für einen repräsentativen Zeitraum Simulationen sowohl für die ursprüngliche als auch für die gekürzte Ganglinie durchgeführt und die sich einstellenden Sohlhöhenveränderungen über die Erosions- und Depositionsvolumina sowie die sich einstellenden mittleren Korngrößen miteinander verglichen. Insgesamt wurden zehn unterschiedliche Grenzwerte für einen geschieberelevanten Abfluss im Bereich zwischen 100 m³/s und 400 m³/s untersucht. Basierend auf den Auswertungen der Erosions- und Depositionsvolumina ergab sich ein geschieberelevanter Abfluss von Q_G = 350 m³/s.

Um eine möglichst hohe Modellbelastbarkeit zu erzielen wurden für die Kalibrierung und Validierung jeweils zwei Zeiträume festgelegt. Der erste umfasst die Zeitspanne vor dem Sohldurchschlag 2002 mit einem Kalibrierungszeitraum von 1985-1998 und einem Validierungszeitraum von 1998-2001, während der zweite Zeitraum die Situation nach dem Sohldurchschlag beinhaltet mit einer Kalibrierung von 2002 bis 2010 und einer Validierung von 2010 bis 2013. Die morphologische Kalibrierung und Validierung des ersten Zeitraums (1985-2001) ergibt in der Salzach für die simulierte Sohlhöhenentwicklung eine mittlere absolute Abweichung von ca. ±15 cm zur gemessenen Sohlhöhenentwicklung, während die Summe der Erosions- und Depositionsvolumina eine Abweichung von ca. 3% aufweist. Im zweiten Zeitraum (2002-2013) beträgt die mittlere Abweichung für die simulierte Sohlhöhenentwicklung ±19 cm und ca. 7% für die Summe der Erosions- und Depositionsvolumina. In Anbetracht der Unsicherheiten bezüglich der Datengrundlage zeigen die simulierten Ergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen eine hohe Empfindlichkeit für die transportwirksamen Modellparameter (z.B. kritischer Shields-Faktor und Vorfaktor der Transportformel) und die Variation des Geschiebeeintrages aus der Saalach. Räumlich betrachtet reagiert insbesondere der Saalachspitz (Zusammenfluss von Saalach und Salzach) äußerst sensitiv auf Parametervariationen. Je nach Parameterwahl kann eine Rückstauwirkung in die Saalach und Salzach oberstrom des Saalachspitzes eintreten, die dort eine Veränderung des Transportgeschehens und der Sohlhöhenentwicklung bewirkt. In der Salzach treten außerdem höhere Sensitivitäten an der gebauten Rampe bei Fkm 51,9 auf. Dies bedeutet, dass die Modellergebnisse am Saalachspitz, in dem Saalachabschnitt zwischen Kraftwerk

Rott und Mündung sowie an der Rampe 51,9 in der Salzach mit größeren Unsicherheiten behaftet sind.

Für die Langzeitprognose der Sohlhöhenentwicklung werden insgesamt drei Szenarien simuliert: Der IST-Zustand beinhaltet die unveränderte Gewässergeometrie der Salzach. Die Option A beinhaltet eine Rampe bei Fkm 55,4 mit Aufweitungen und einer festgelegten Bogenfolge zwischen Saalachspitz und der Rampe bei Fkm 51,9. Die Option B beschreibt eine Uferabsenkung zwischen Saalachmündung und der Rampe bei Fkm 51,9 auf bayerischer Seite und Anhebung der Sohle mit dem daraus gewonnenen Kies. Ein Vergleich der Prognosesimulationen zeigt, dass sich über den Prognosezeitraum von 84 Jahren die mittleren Sohlhöhen für alle Varianten anheben und sich die Salzachsohle langfristig stabilisieren wird. Jedoch liegt das zu erwartende Sohlniveau für die Optionen A und B im Vergleich zur IST-Prognose höher. Ein ganz wesentlicher Unterschied zwischen den einzelnen Szenarien ist die sich einstellende Sohldynamik. Für den IST-Zustand und die Option B stellt sich ein dynamisches System mit alternierenden Kolken und Kiesbänken ein. Letztere wandern nach unterstrom und verfüllen auf diese Weise kontinuierlich die Kolke. Bei Option A hingegen bilden sich aufgrund der Fixierung der Sohle durch die Rampe bei Fkm 55,4 quasi-stationäre Kiesbänke und Kolke aus.

4 Erfahrungen im Modellbetrieb

Die erzielten Ergebnisse im Rahmen der Geschiebetransportmodellierung an Salzach und Saalach zeigen die Möglichkeiten aber auch die Grenzen von 2D-Geschiebetransportmodellen auf. Die 2-dimensionale Hydraulik erlaubt detaillierte Betrachtungen der Interaktion zwischen Strömungsangriff auf die Sohle und dem daraus resultierenden Sedimenttransport und den morphologischen Veränderungen (z. B. wandernde Kiesbänke). Modellunabhängig stellt oftmals die Datengrundlage für morphologische Kalibrierungs- und Validierungsmöglichkeiten eine Limitierung dar, sowie die Anforderungen an die Rechenkapazitäten, die momentan einer massiven Vergröberung der Berechnungsnetze sowie einer Reduzierung der Abflussganglinie bedürfen. Die Möglichkeit Ergebnisparameter zur Ausgabe vorzugeben bzw. einzuschränken fehlt in der momentanen Version und könnte deutlich zur Reduzierung der Rechenzeit beitragen. Des Weiteren stellen gesteuerte Bauwerke eine Schwierigkeit für die Geschiebetransportmodellierung dar.

Zwar bietet HYDRO_FT-2D verschiedene Möglichkeiten zur Berücksichtigung einer Kraftwerkssteuerung, allerdings kann z.B. die Steuerung des Kraftwerk Rotts an der Saalach, welches in Abhängigkeit des Abflusses die Wasserspiegellage reduziert (Spülung von abgelagerten Sedimenten), nicht abgebildet werden. Allerdings kann bei vorhandener Datengrundlage der programminterne Bagger- und Verklappalgorithmus von HYDRO_FT-2D verwendet werden, um vereinfachend die gespülten Geschiebemengen umzusetzen und so die Spülereignisse im Modell morphologisch nachzubilden. Eine Variation der Rauheit stellt momentan die einzige Möglichkeit dar, den Sedimenttransport lokal zu beeinflussen. Alle weiteren Kalibrierparameter werden global definiert und beeinflussen somit das gesamte Modellgebiet. Da allerdings aufgrund von Unsicherheiten in den Anfangs- und Randbedingungen lokale Unstimmigkeiten auftreten können, wäre es vorteilhaft weitere Kalibrierparameter lokal definieren zu können (z. B. Einfluss von Krümmungen, Hiding/Exposure etc).

5 Literatur

Beckers, F., Noack, M., Wieprecht, S., 2016. Reliability analysis of a 2D sediment transport model: An example of the lower river Salzach, in: Wieprecht, S., Haun, S., Weber, K., Noack, M., Terheiden, K. (Eds.), River Sedimentation. Presented at the International Symposium on River Sedimentation, CRC Press/Balkema, Stuttgart, Germany.

Meyer-Peter, E., Müller, R., 1948. Formulas for Bed-Load Transport, in: 2nd Meeting. Presented at the International Association for Hydraulic Structures Research, Stockholm, p. 39.

Noack, M., Beckers, F., Wieprecht, S., 2015. Geschiebetransportmodellierung (GTM) Salzach und Saalach – Teilmodell 1: Salzach (Freilassinger Becken) – (No. 08a/2012). Institute for Modelling Hydraulic and Environmental Systems, University of Stuttgart.

Sadid, N., Beckers, F., Noack, M., Haun, S., Wieprecht, S., 2016. An Evolution Volume Balance Approach to Determine Relevant Discharge Threshold for Bed Load Transport, in: Rowiński, P., Marion, A. (Eds.), Hydrodynamic and Mass Transport at Freshwater Aquatic Interfaces. Springer International Publishing, Cham, pp. 307–318.

Unterschiede bei der Geschiebemodellierung an flachen und steilen Fließgewässern mit HYDRO_GS-2D

Dr. sc. techn. Roni Hunziker, Hunziker, Zarn & Partner AG, Schachenallee 29, CH-5000 Aarau, roni.hunziker@hzp.ch

1 Einleitung

Die Transportprozesse in flachen und steilen Fliessgewässern unterscheiden sich grundsätzlich. Bei den flachen Talflüssen ist die Transportkapazität massgebend für die Geschiebefracht, bei den steilen Gebirgsbächen mehrheitlich die Verfügbarkeit des Geschiebes im Einzugsgebiet. Diese unterschiedlichen Prozesse müssen in der Modellierung berücksichtigt werden. Im Vortrag wird auf die Unterschiede eingegangen und ein Vorschlag zur Modellierung der beiden unterschiedlichen Fliessgewässertypen gemacht.

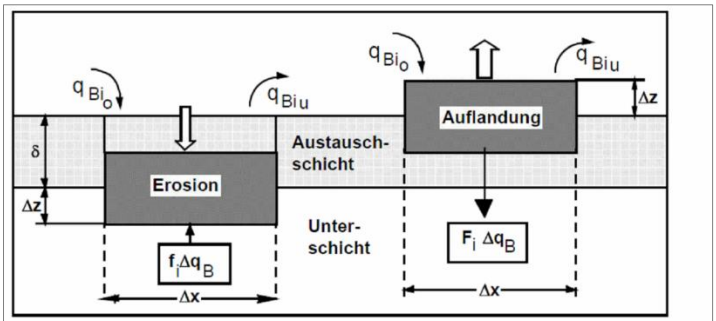
Bild 1: Unterschiedliche Transportprozesse bei einem flachen Talfluss (Emme in Biberist, Bild links) und bei einem steilen Gebirgsbach (Fedacla im Engadin, Bild rechts)

2 Talflüsse

Prozesse: Bei Talflüssen kann davon ausgegangen werden, dass immer genügend Geschiebe für den Transport zur Verfügung steht und sich die Transportkapazität als Funktion von Schubspannung und Kornverteilung (charakterisiert durch den mittleren Korndurchmesser oder durch die Kornverteilung des Geschiebes an der Sohlenoberfläche) berechnen lässt. Der Transportprozess ist ein Erosionsprozess, wobei im Gleichgewichtszustand das aus einem Kontrollquerschnitt erodierte Volumen durch die Geschiebezufuhr vom Querschnitt flussaufwärts wieder aufgefüllt wird.

Modellierung: Die transportierte Fracht entspricht der Transportkapazität und kann direkt mittels einer Transportformel (Ein- oder Mehrkorn) berechnet werden. Als Kornverteilung wird diejenige des Sohlenmaterials der Unterschicht eingesetzt. Bei Mehrkornmodellen bildet sich anschliessend je nach Auflandungs- oder Erosionsprozess an der Sohlenoberfläche eine feinere oder gröbere Kornverteilung aus, welche massgebend für die Transportkapazität ist. Mehrkornmodelle beziehen sich auf die Kornverteilung der Austauschschicht (Mixing Layer). Die Kornverteilung ändert sich über die Zeit. Der Mixing Layer ist eine Speicherschicht, in welcher die Austauschprozesse zwischen dem Unterschichtmaterial und dem laufenden Material bilanziert werden. Die Veränderung der Kornverteilung kann nach dem Konzept von Hirano[1] erfasst werden (Bild 2).

[1] Hirano, M., River Bed Degradation with Armoring, Transactions of JSCE, Vol. 3, Part 2, 1971



qBi_o	=	Geschiebezufuhr der Fraktion i in [m^3/s] pro Meter Breite
qBi_u	=	Geschiebeaustrag der Fraktion i in [m^3/s] pro Meter Breite
$f_i \Delta q_B$	=	Geschiebezufuhr der Fraktion i aus der Unterschicht in die Austauschschicht in [m^3/s] pro Meter Breite
$F_i \Delta q_B$	=	Geschiebeabgabe der Fraktion i aus der Austauschschicht an die Unterschicht in [m^3/s] pro Meter Breite
Δz	=	Sohlenveränderung in [m]
Δx	=	Diskretisation in Fliessrichtung in [m]
δ	=	Dicke der Austauschschicht in [m]

Bild 2: Modellvorstellung einer Austauschschicht nach Hirano (1971)

3 Gebirgsbäche

Prozesse: Der Transport in Gebirgsbächen unterscheidet sich grundsätzlich von den Transportprozessen in den Talflüssen. Bei steilen Gewässern ist die Verfügbarkeit des Geschiebes für die Geschiebefracht massgebend und nicht die Transportkapazität. Letztere ist oft wesentlich grösser als die Geschiebezufuhr, sodass sich die Gewässer in einem latenten Erosionszustand befinden. Eine Sohleintiefung wird jedoch durch eine stabile Deckschicht, welche sich aus grobem Sohlenmaterial generiert, verhindert. Der Transport erfolgt mehrheitlich durch die Ablagerung und Mobilisierung von feinem Material über der Deckschicht. In diesem Fall ist nicht das Sohlenmaterial, sondern das laufende Material für die Transportkapazität massgebend. Das laufende Material wird durch das Material der feinen Geschiebebänke, welche die Deckschicht überlagern, charakterisiert.

Modellierung: Die Transportkapazität kann wiederum mittels einer Transportformel berechnet werden, als Kornverteilung muss aber das laufende Material eingesetzt werden. Da die Transportkapazität dann grösser als die Geschiebezufuhr sein kann, muss im Modell die Sohle gegen Tiefenerosion künstlich stabilisiert werden. Der Typ Gebirgsbäche wird mit fixierter Sohle modelliert.

Weiterentwicklungen der HYDRO_AS-2D-Produkte

Dipl.-Math. Benedikt Rothe, Prof. Dr.-Ing. Alpaslan Yörük, Hydrotec, benedikt.rothe@hydrotec.de, alpaslan.yoeruek@hydrotec.de

Abschließend werden einige für die nächsten Monate und Jahre geplanten Entwicklungen thematisiert. Im Rahmen des Anwendertreffens erhoffen wir uns von den Teilnehmern Hinweise und Anregungen zu einer angemessenen Schwerpunktsetzung.

Für das Anwendertreffen erhoffen wir Anregungen und Anforderungen, die uns bei der angemessenen Schwerpunktsetzung für weitere Entwicklungsschritte, führen können.

1 SMS-Variantenhaltung (DMI)

SMS bietet in den neueren Versionen ausgereifte Konzepte zur Variantenhaltung. Variante Daten wie unterschiedliche Randbedingungen, Brücken, Deichbreschen werden mit diesem Konzept in SMS bearbeitet ohne jeweils das vollständige Modell zu kopieren. Stattdessen wird das Netz vorgehalten und die unterschiedlichen Randbedingungen, Bauwerke, etc. in „Simulationen“/Varianten zusammengestellt.

Diese Änderung reduziert nicht nur den zu verwendenden Speicherplatz, sondern wird die Qualität der Modelle deutlich verbessern. Fehler, die durch Inkonsistenzen nach dem Kopieren einer Basisvariante entstehen werden strukturell vermieden.

2 Stoff- und Geschiebetransport

Die HYDRO_AS-2D-Familie enthält Varianten mit denen Stoff- und Geschiebetransport berechnet werden können. Diese Modelle sollen auf die „HYDRO_AS-2D 4“-er Schiene hochgezogen werden. Es ist zu erwarten, dass sie von verbesserter Parallelisierung und den performanteren Ausgabedateiformaten besonders gut profitieren werden. Es ist unser Ziel ab der Version 4.3 oder 4.4 die Programmvarianten eng zu verzahnen. Anschließend ist die Erweiterung der aktuellen Ansätze geplant. Durch die Wahl mehrerer Geschiebetransportansätze soll der Anwendungsbereich erweitert werden.

3 Schneller und größer

Die Entwicklung in der Modellierung zeigt, dass die Modelle an Größe (FKM und Knotenzahl) stetig zunehmen. Gleichzeitig ist der Zeitdruck im Projekt häufig sehr groß, wodurch eine Optimierung der Simulationszeiten stets eine aktuelle Fragestellung bleibt.

4 Sensitivtätskarten

Der Lehrstuhl der RTWH Aachen „Software and Tools for Computational Engineering“ entwickelt in Zusammenarbeit mit der „Numerical Algorithms Group“ (NAG)“ Techniken zur sogenannten „Algorithmischen Differentiation“. In Abstimmung mit dem Lehrstuhl wird von Hydrotec momentan eine prototypische HYDRO_AS-2D-Variante entwickelt, die diese Techniken nutzbar macht.

Diese Ansätze erlauben es performant und in einem einzigen Rechenlauf Sensitivitäten „Rückwärts“ zu rechnen: Welche Knoten/Rauigkeiten/Bauwerksabmessungen haben welche Auswirkungen auf Wasserstände/Abflüsse an bestimmten Stellen? Wo sind welche Änderungen vorzunehmen, um ein Absenkung/Erhöhung zu erreichen?

Die hier verfolgten Ansätze besitzen Forschungscharakter.

5 LASER_AS-2D

Die in LASER_AS-2D implementierten Algorithmen zur Ausdünnung von Laserscandaten bleiben im Wesentlichen erhalten. Die programmiertechnische Umsetzung haben wir weitgehend erneuert und modernisiert.

Mit der kommenden Version werden die Anwender die folgenden Verbesserungen erhalten:

- Deutlich kürzere Rechenzeit durch Parallelisierung
- Einfachere Bedienung
- Verarbeitung von variablen Rasterweiten
- Dokumentation mit Empfehlungen für Vorgehensweise und Parameterwahl

LASER_AS-2D wird voraussichtlich Ende 2016 fertiggestellt.

HYDRO_AS-2D

2D-Simulation von Fließgewässern

HYDRO_AS-2D ist die ideale Software für die hydrodynamisch-numerische Simulation von Fließgewässern. Das flexibel anwendbare Programm liefert verlässliche Ergebnisse für Ihre Projekte in den Bereichen Hochwasserschutz, Gewässerentwicklung und Sturzflutvorsorge.

Zusatzmodule

HYDRO_FT-2D

Erweiterung zur 2D-Simulation von Transportprozessen

HYDRO_FT-2D berechnet den Geschiebetransport mit bis zu zwölf Kornfraktionen. Das Modell berücksichtigt den Einfluss der Flusskrümmung, der Sohlform sowie der Längs- und Querneigung der Gewässersohle. Es berechnet Sohlenveränderungen infolge Sedimenterosion und -ablagerung.
Weiterhin ist die Modellierung des Schwebstoff- und Schadstoff-transports getrennt oder gekoppelt möglich.

HYDRO_WT-2D

Wärmetransport in Fließ-gewässern modellieren

Flussschlauchgenerator

Berechnungsnetz für den Flussschlauch aus Profildaten erstellen

JabPlot

Querprofile und Längs-schnitte aus Ergebnissen und Modellen erzeugen

LASER_AS-2D

Laserscandaten intelligent ausdünnen und hochwertige Berechnungsnetze erstellen

Hydrotec
Ingenieurgesellschaft für
Wasser und Umwelt mbH

Kompetenz für die Wasserwirtschaft

- Gewässerhydraulik
- Hydrologie
- Gewässerentwicklung
- Hochwasserschutz
- Hochwasservorhersage
- Stadtentwässerung
- Softwareprodukte
- Softwareentwicklung
- Öffentlichkeitsarbeit

Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbh
Bachstraße 62-64
52066 Aachen
☎ 0241 94689-0
✉ mail@hydrotec.de
www.hydrotec.de