

Projekt HYDRAULOGIE - übergreifende Weiterentwicklung der Methoden aus Hydrologie und Hydraulik für den nachhaltigen Einsatz in der Wasserwirtschaftsverwaltung

Frank Michel, Simon P. Seibert, Oliver Chmiel, Michael Weber, Alexander Neumann und Andreas Rimböck

Zusammenfassung

Im Projekt HYDRAULOGIE werden die Fachbereiche **Hydraulik** und **Hydrologie** des Bayerischen Landesamts für Umwelt eng verknüpft. Vorgesehen sind gemeinsame Pilotprojekte mit den Wasserwirtschaftsämtern zunächst im Bereich kleiner Einzugsgebiete und vor dem Hintergrund wiederkehrender Starkregenserien.

Dazu wird u. a. auf vorausgegangene Forschungsergebnisse wie dem TUM-Projekt HiOS sowie dem VieWBay-Vorhaben, Erfahrungen anderer Bundesländer und Erkenntnissen aus der Ingenieurpraxis mit dem Sonderförderprogramm „Integrale Konzepte zum kommunalen Sturzflut-Risikomanagement“ aufgebaut. Im Fokus steht die Frage, wie die Ergebnisse und Erkenntnisse der bislang untersuchten hydrologisch-hydrodynamisch-gekoppelten Modellierungen operativ für die Wasserwirtschaftsverwaltung nutzbar gemacht werden können. Für die Überführung in die Anwendungspraxis sollen Modellierungskonzepte und Anwendungsleitlinien (weiter-)entwickelt und etabliert werden.

Motivation und Ziele des Vorhabens:

- Fachliche Vorgaben für hydrologische und hydrodynamische Modelle müssen dem Stand der Technik entsprechen. Ein Ziel ist daher die Evaluierung, Weiterentwicklung und Abstimmung bestehender und neuer Methoden. Dadurch sollen Planungsgrundlagen im Bereich der Gewässer 3. Ordnung und kleiner Einzugsgebiete, Grundlagen für die Erstellung gerichtsfester Gutachten, sowie Standards für die Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie weiterentwickelt oder aktualisiert werden.
- In den letzten Jahren sind viele neue Datengrundlagen entstanden, die es nun in einer gemeinsamen, fachübergreifenden Art und Weise effektiv zu berücksichtigen und zu integrieren gilt (Chancen und Erfordernisse der Digitalisierung). Dadurch kann auch den steigenden Anforderungen bzgl. der Komplexität der verwendeten Verfahren z. B. durch Berücksichtigung zusätzlicher Prozesse oder einer Erhöhung der Auflösung Rechnung getragen werden.
- Durch den Klimawandel verschwimmen die Grenzen zwischen pluvialem und fluvialem Hochwasser. Methoden und Verfahren sollten konsistent und gleichermaßen für den Einsatz im Wasserbau, die Bemessungspraxis und die Hochwasservorhersage geeignet sein. Das Vorhaben versucht diesbezüglich, einheitliche Standards zu schaffen.

In dem Beitrag werden die Ausgangshypothesen, Hauptarbeitsbereiche und anvisierten Meilensteine zur Diskussion gestellt. Auch auf Kooperationen und Möglichkeiten für eine stärkere Verankerung wissenschaftlicher Erkenntnisse in der wasserwirtschaftlichen Praxis soll eingegangen werden.

1 Einführung

Hochwasserereignisse wurden in der Vergangenheit fast ausschließlich als Flusshochwasser aufgefasst, bei dem sich eine Hochwasserwelle in Form einer zeitlich ansteigenden Abflussganglinie im Fließgewässer fortpflanzt. Je nach Geometrie von Fließgewässer und Aue, der seitlichen Zuflüsse und der Steuerung von Bauwerken und Speichieranlagen kann die Hochwasserwelle entlang des Fließgewässers ausufern und Überflutungen verursachen.

Zur Abbildung und Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Prozesses (vgl. Abb. 1) existieren in Bayern am Landesamt für Umwelt (LfU) wie auch an den Wasserwirtschaftsämtern (WWA) die üblicherweise getrennten Fachbereiche »Hydrologie« und »Hydrodynamik« (vereinfacht Hydraulik). Am LfU ist in ersterem beispielsweise die ingenieurhydrologische Bemessungspraxis, aber auch der Hochwassernachrichtendienst angesiedelt. Dort werden u. a. auf Basis von Niederschlag-, Boden- und Landnutzungsdaten hydrologische Planungsgrundlagen oder bei konkreten Ereignissen, Echtzeitabfluss- und Wasserstandprognosen für Vorhersagepegel mithilfe von Niederschlag-Abfluss-Modellen generiert. Hierbei stehen die Abflussbildungs- und Abflusskonzentrationsprozesse innerhalb der Einzugsgebiete im Vordergrund, da die Fließprozesse in den Gerinnen vereinfacht abgebildet werden. Lediglich an einigen wenigen, bedeutsamen Gewässerabschnitten kommen (1D-) hydrodynamische Verfahren zum Einsatz.

Hochwasserganglinien für Planung, Prüfung oder Bau von Hochwasserschutzmaßnahmen werden nach ihrer ingenieurhydrologischen Erstellung z. B. zur (in-)stationären Ermittlung von Überschwemmungsgebieten an den Fachbereich Hydraulik übergeben. Dieser ist für die möglichst genaue Berechnung der Wellenfortpflanzung im Fließgewässer zuständig. Zur Modellierung des Wellenablaufs werden dort üblicherweise hochaufgelöste 2D-Modelle verwendet, deren Modellierungen auf den 2D-Flachwassergleichungen basieren. In diesen Modellen werden das Gewässerbett, das Vorland sowie Bauwerke und Gebäude sehr detailreich modelliert, sodass genaue Aussagen über Überflutungsflächen und -tiefen sowie über die Fließgeschwindigkeiten möglich sind. Der Fachbereich Hydrologie liefert demnach Eingangsdaten für den Fachbereich Hydraulik und beide Bereiche agieren bisher weitgehend unabhängig voneinander.

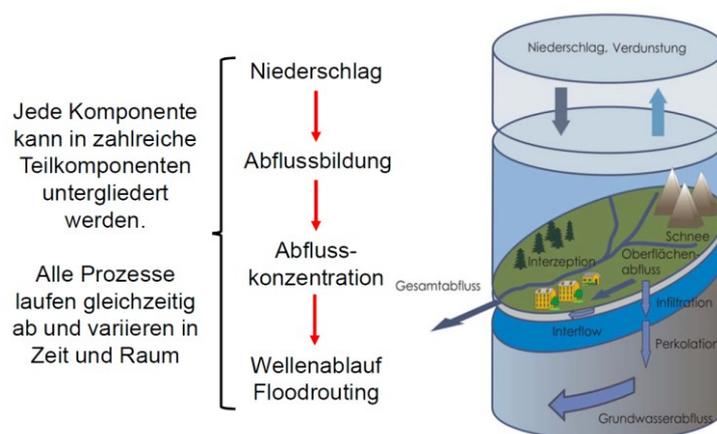


Abb. 1 Schema zur Verdeutlichung der räumlich und zeitlich gleichzeitig ablaufenden Prozesse

Diese Gliederung der Aufgabenbereiche hat sich für Fragestellungen im Zusammenhang mit fluvialen Ereignissen (Flusshochwasser) gut eingespielt und etabliert, wie u. a. aus der flächendeckenden Erstellung der Hochwassergefahrenkarten im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements

gements hervorgeht. Jedoch zeigte sich bereits in der Vergangenheit immer wieder Optimierungspotential, da beispielsweise die 2D-hydrodynamischen Modelle zur Ermittlung von Überschwemmungsgebieten den in den hydrologischen Modellen zum Einsatz kommenden Routingverfahren deutlich überlegen sind, die Möglichkeiten dieser Modelle bisher aber weder in der Bemessungspraxis noch im Vorhersagebetrieb genutzt werden können.

Weiterer Bedarf für eine stärker integrierte Betrachtung von hydrologischen und hydrodynamischen Verfahren hat sich zuletzt aus dem Starkregenrisikomanagement ergeben. Erzeugt Starkregen Oberflächenabfluss (auch als wild abfließendes Wasser oder pluviales Hochwasser bezeichnet), der abseits dauerhaft wasserführender Gerinne Schäden durch Überflutungen verursacht, kann dies mit hydrologischen Modellen i. d. R. nicht abgebildet werden. Hierzu ist eine Simulation des Oberflächenabflusses mit hydraulischen Verfahren erforderlich, welche wiederum keine Abflussbildungsprozesse simulieren können. Bei der Abbildung pluvialer Ereignisse treffen Hydrologie und Hydraulik daher unmittelbar aufeinander. Während die Bestimmung der Abflussbildung als Überschuss der Bodeninfiltration eine typisch hydrologische Fragestellung ist, ist die Berechnung des Strömungsgeschehens (Fließtiefe und Strömungsgeschwindigkeit) eine typisch hydrodynamische Aufgabenstellung.

Eine derartig überlappende Schnittstelle zwischen den Fachbereichen führt sinnvollerweise zur Anwendung der hydrologisch-hydrodynamisch gekoppelten Modellierung. Hierbei sind allerdings noch etliche Herausforderungen zu bewältigen, z. B. bzgl. der Definition und Platzierung von Bemessungsniederschlagszellen zur Ermittlung pluvialer Gefahren, der Darstellung pluvialer und fluvialer Überflutungsbereiche oder der Festlegung von Datenübergabe- oder Modellkopplungspunkten für Ereignisse mit pluvialer wie fluvialer Komponente (Abb. 2).

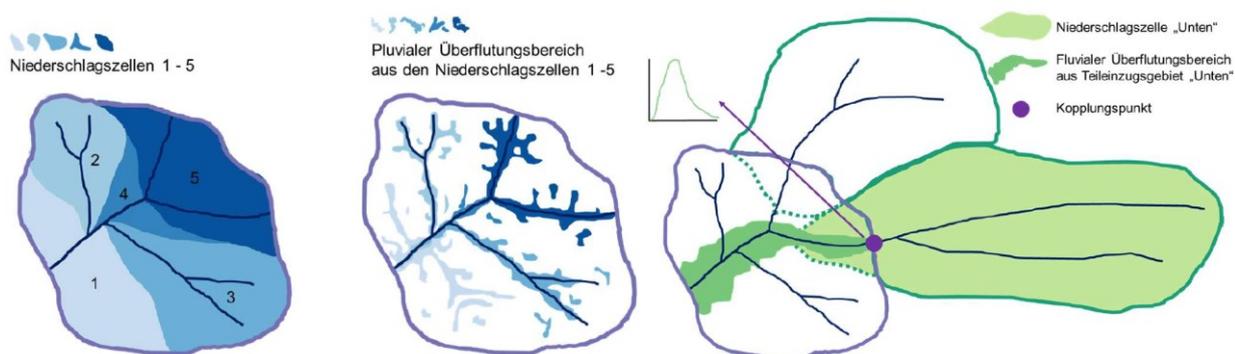


Abb. 2 Schematische Darstellung unterschiedlicher Herausforderungen in hydrologisch-hydraulisch gekoppelten Simulation pluvialen und fluvialer Szenarien [1]

2 Vorbereitung

Lokale Starkregenereignisse und das damit einhergehende erhöhte Schadenspotential führten in den letzten Jahren zu einer Häufung der Forschungsarbeiten in diesem Bereich. Hinzu kommen die insgesamt steigenden Rechenleistungen der Hardware, zunehmende Parallelisierungsmöglichkeiten von Software sowie die Nutzung des High-Performance-Computing (HPC) auf Superrechnern oder Clustern. Eine Übersicht der zu Projektbeginn gesichteten Literatur und Projekte ist in Tab. 1 dargestellt. Ausgewählt wurden hydrologisch-hydraulisch gekoppelte Vorhaben mit Schwerpunkten auf:

- 1) der modelltechnischen Beschreibung des Simulationsgebiets für die hydrologischen sowie die hydrodynamischen Berechnungen.
- 2) der Art und Weise der Kopplung und des Informationsaustausches.

Tab. 1 Überblick ausgewählter Forschungsprojekte [4-20] zur hydrologisch-hydraulisch gekoppelten Modellierung. Zur Beschreibung des Simulationsgebiets wird zwischen den Kategorien 'Catchment Area' (CA, das gesamte Einzugsgebiet), 'Sub-Catchments' (SC, Teileinzugsgebieten) und 'Hydraulic Zones' (HZ, Teilbereiche, die hydraulisch gerechnet wurden) unterschieden. Bei der Kopplung wird zwischen einer externen (EK) ohne und einer internen Kopplung (IK) mit Rückkopplungsmöglichkeiten und für die Art des Informationsaustauschs zwischen punktuellen Übergaben von Ganglinie (HY) oder Wasserstand (WL) bzw. einer flächigen Übergabe von Effektivniederschlag (NE) differenziert.

Name	Jahr	Simulationsgebiet Hydrologie	Simulationsgebiet Hydraulik	Art der Kopplung	Informationsaustausch via
Hyd ³ Flow	2009 - 2011	SC	HZ	EK	HY
Bonnifait et al.	2009	CA + SC	HZ	X	X
Kim et al.	2012	CA	CA	EK	HY
SYNOPSIS (I/II)	2013 - 2019	CA + SC	X	X	X
ProNaHo	2015 - 2020	CA	HZ	EK	HY
Nguyen et al.	2015	CA + SC	CA	EK	HY
Ciliverd et al.	2016	CA	HZ	IK	WL
Rainman	2017 - 2020	X	CA	EK	NE
HiOS	2017 - 2021	CA	HZ	EK + IK	HY + NE
Pontes et al.	2017	CA + SC	X	X	X
Schneider	2018	CA	HZ	EK	NE
ViewBay - TP1	2018 - 2022	CA	HZ	EK	HY
LF BaWü	2019	CA	HZ	EK	NE
Liu et al.	2019	CA + SC	HZ	EK	HY
Wang et al.	2020	CA	CA	EK	NE
Hofmann et al.	2020	SC	SC	IK	NE
Yang et al.	2020	CA	CA	EK	NE + HY
KLIMPRAX	2016 - 2019	X	HZ	EK	NE ?

In Tab. 1 ist zu erkennen, dass die Modelle, die beide Fachbereiche koppeln, meistens nicht auf einem gemeinsamen Rechengitter arbeiten, sondern in hydrologische und hydraulische Simulationsgebiete unterteilen. Dabei werden die hydrologischen Berechnungen oft für das gesamte Einzugsgebiet (CA) gerechnet oder es erfolgt eine Unterteilung in Teileinzugsgebiete (SC). Die hydraulischen Berechnungen werden dann in den meisten Fällen in eigens definierten hydraulischen Bereichen (Risikobereiche, o.Ä.) durchgeführt. Es werden jedoch auch Modelle beschrieben, die die hydraulische Modellierung auf Einzugsgebiets-Skala durchführen. Hydraulische Berechnungen für das gesamte Einzugsgebiet werden meist aufgrund des hohen Berechnungsaufwands nicht oder auf Basis vereinfachter 2D-Flachwassergleichungen durchgeführt, jedoch ist hier mit dem Fortschritt des HPC in Zukunft ein Wandel zu erwarten.

Bei der Kopplung der hydrologischen und hydraulischen Modelle ist zwischen der externen und der internen Kopplung zu unterscheiden. Bei der externen Kopplung werden jeweils verschiedene Modelle für die hydrologischen und die hydraulischen Berechnungen verwendet. Die Ergebnisse der hydrologischen Modellierung werden daraufhin in Form eines Übergabeparameters (Ganglinie, Effektivniederschlag, Wasserstand) an bestimmten Positionen an das hydraulische Modell übergeben. Eine Rückkopplung des hydraulischen Modells auf die Ergebnisse des hydrologischen Modells ist dabei bisher in der Regel nicht möglich. Man spricht somit auch von einer »unidirektionalen Kopplung«. Eine echte »bidirektionale Kopplung«, bei der Wasser, das aus einem Gewässer in die Aue ausfert oder Oberflächenabfluss, der entlang des topographischen Fließweges in den Untergrund infiltriert, berücksichtigt wird, kann gegenwärtig nur in wenigen Forschungsmodellen, z. B. RoGeR [2], umgesetzt werden.

3 Überblick Arbeitsbereiche und Inhalte

Kernaufgaben des Projektes HYDRAULOGIE sind die Koordination, fachliche Erarbeitung, Begleitung und Umsetzung, sowie die Betreuung von Vergaben für die Erstellung bayernweiter Datensätze, Modellierungen und Werkzeuge. Insgesamt gliedert sich das Vorhaben in 3 Arbeitsbereiche (Abb. 3).

Arbeitsbereich 1: Gemeinsame Modell- und Methodenweiterentwicklung				
AP 1.1. Aktualisierung der Grundlagen				
1.1.1 Abflussbildung	1.1.2 Abflusskonzentration	1.1.3 Multivariate statistische Verfahren	1.1.4 LARSIM Hybridmodelle (NA und WHM-Modus)	1.1.5 Weiterentwicklung Präprozessing (Rasterdaten, Bauwerke)
AP 1.2. Pluviale Hochwasser				
1.2.1 Hydraulik	1.2.2 Rauheiten / Verluste	1.2.3 Unidirektionale Kopplung	1.2.4 Bidirektionale Kopplung	
AP 1.3. Fluviale Hochwasser				
1.3.1 Operationelle Vorhersage von Überflutungsflächen	1.3.2 Weiterentwicklung HN-Modelle für HWRM / operat. Vorhersage	1.3.3 Weiterentwicklung Bemessungskonzept/ Szenarien für HW-Schutz	1.3.4 Ü-Gebiete an Risikogewässern GW3	1.3.5 Weiterentwicklung Gefahrenanalyse Wildbach
Arbeitsbereich 2: Digitalisierung der Prozesse und Datenmanagement			Arbeitsbereich 3: Zusammenarbeit mit anderen Bundesländern, Instituten, Wissenschaft	
2.1. Grundlagendaten	2.2. Datenmanagement/ Datenverfügbarkeit	2.3 Darstellung und Visualisierung der Daten	3.1 Mitarbeit in Arbeitsgruppen	3.2 Zusammenarbeit mit Forschungsprojekten und Wissenschaft

Abb. 3 Übersicht der Arbeitsbereiche und fachlichen Inhalte im Projekt HYDRAULOGIE

Der Arbeitsbereich 1, die gemeinsame Modell- und Methodenentwicklung, soll das gegenseitige Verständnis für die fachlichen Zusammenhänge verbessern und die Basis bilden, um integrale Ansätze zwischen Hydrologie und Hydraulik zu entwickeln. Die methodischen Entwicklungen, die sich u. a. durch eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung und die Kopplung hydro-

logischer und hydraulischer Modelle ergeben, bieten Verbesserungspotential für viele Aufgabenbereiche, z. B. für die Bemessungspraxis in kleinen (Wildbach-)Einzugsgebieten, in der Hochwasservorhersage oder für das Hochwasserrisikomanagement. Dabei sollen Ergebnisse aus Vorgängerprojekten wie HiOS, PraWe oder VieWBay sowie Erfahrungen aus Nachbarländern oder dem Pilotförderprogramm für das kommunale Sturzflut-Risikomanagement berücksichtigt und für die Verwaltung nutzbar gemacht werden. Aufgrund ihres Querschnittscharakters und mit dem Ziel, möglichst viele Synergien zu erzielen, wurden alle methodischen Entwicklungen in diesem breit angelegten Grundlagenaufgabenbereich zusammengefasst, der verschiedene Arbeits- (APs) und Unterarbeitspakete (UAPs) beinhaltet.

Der **Arbeitsbereich 2** des Vorhabens widmet sich den Anforderungen der Digitalisierung. Dabei geht es um die Verbesserung der verfügbaren Datengrundlagen, die Umsetzung eines integrierten Datenmanagements zwischen Hydrologie und Hydraulik (inkl. der Archivierung von Berechnungsergebnissen) sowie um die Digitalisierung der Arbeitsprozesse. So lässt sich die Arbeit in der Wasserwirtschaft effektiver gestalten und eine einheitliche Qualität sichern. Ebenso Teil dieses Arbeitsbereiches ist die Darstellung der Daten für die Öffentlichkeit in Webinformationsangeboten, z.B. vom Hochwassernachrichtendienst.

Der **Arbeitsbereich 3** des Projektes dient der Vernetzung und dem Austausch mit anderen Bundesländern, Institutionen und Forschungsprojekten, um einen abgestimmten Stand der Technik sicherzustellen. Insbesondere beim Sturzflut-Risikomanagement gibt es derzeit viele Aktivitäten, um Methoden (weiter-) zu entwickeln und zu etablieren. Gleichzeitig sollen (die knappen) Ressourcen gebündelt werden, z.B. durch gemeinsame Softwareentwicklungen.

4 Durchführung des Vorhabens

Aufbauend auf eigenen Überlegungen, Erfordernissen der Praxis und Erkenntnissen aus den oben genannten Vorarbeiten werden zunächst Workflows für die unterschiedlichen Kopplungsmöglichkeiten bzw. hydrologischen Verfahren in der Anwendungspraxis der Wasserwirtschaftsverwaltung erarbeitet. Darin enthalten sind zum einen die jeweils benötigten Eingangsdaten zur Topographie inkl. Vermessung, Hydrologie sowie Land- und Bodennutzung. Zum anderen werden der Modellaufbau zwischen der hydrologischen und der hydraulischen Komponente bzw. die Infiltrationsvarianten und Ansätze zur Visualisierung (Abb. 4) beschrieben.



Abb. 4 Visualisierungsbeispiel für eine Kopplung von 2D-Abflussmodellen mit Infiltrationsansätzen [3]

Abb. 5 zeigt beispielhaft das Vorgehen und die Abhängigkeiten bei der Konzeptionierung der Varianten für die unidirektionale Kopplung. Ausgehend von der Bearbeitung mit Bordmitteln (Variante 1), also anhand bereits jetzt verfügbarer Modellsoftware und den vorhandenen Eingangsdaten, wird zunächst eine externe Kopplung von Hydrologie und Hydraulik umgesetzt. In einem zweiten Schritt erfolgt eine interne Kopplung durch Implementierung des konzeptionellen SCS-CN-Abflussbildungsverfahrens im hydrodynamischen Modell (Variante 2).

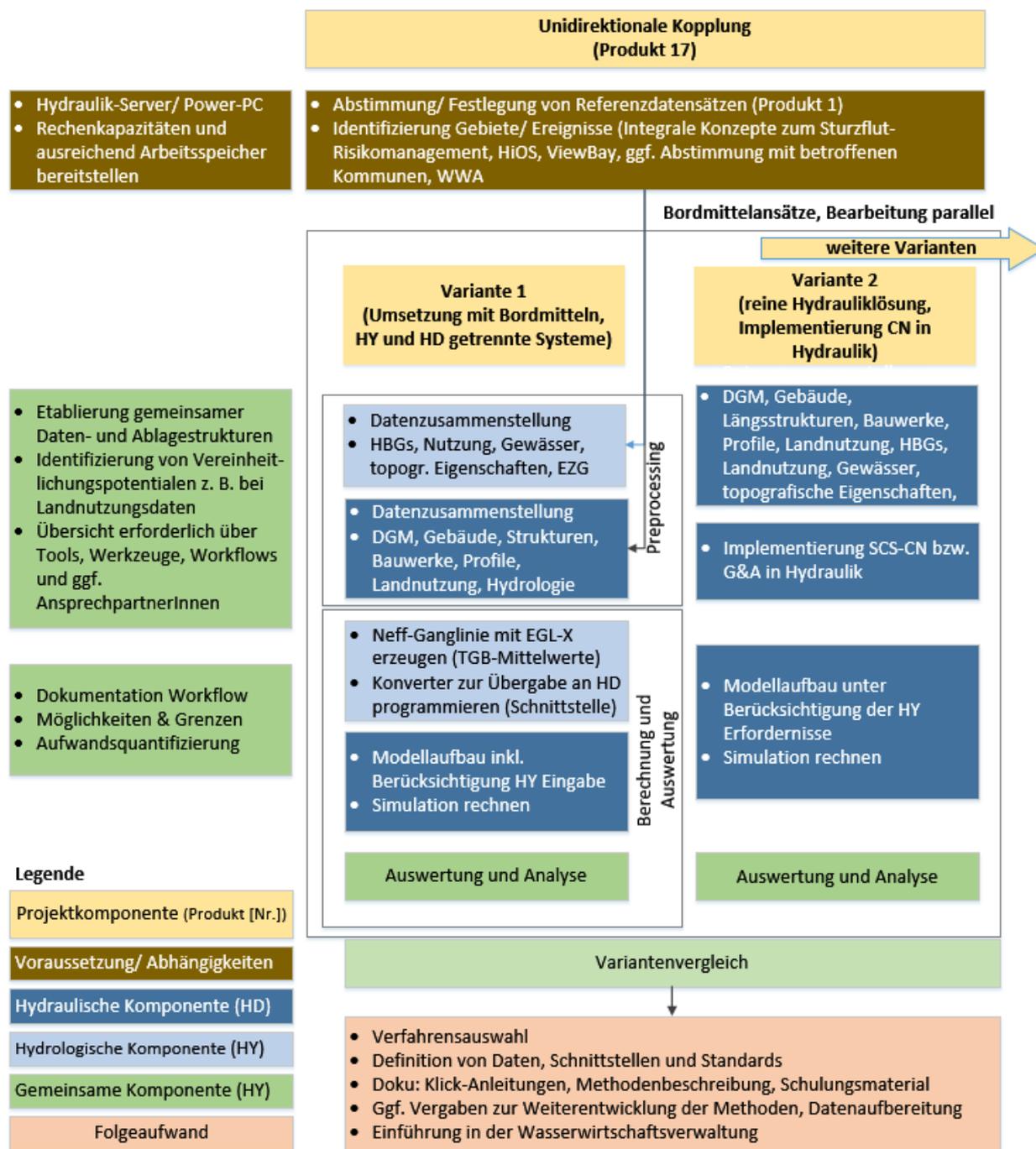


Abb. 5 Beispiel für die Konzeptionierung von Arbeitsabläufen innerhalb des Projektes anhand des Themas *unidirektionale Kopplung*

Neben den etablierten Verfahren werden hierbei verschiedene Kopplungsvarianten getestet und ggf. weiterentwickelt. Ziel ist es, eine erste, möglichst belastbare Standardmethode sowie Ein-

gangsdaten für den (pluvialen) Standardfall herauszuarbeiten. Hierzu wird auf geeignete Pilotgebiete, für die schon Untersuchungen - und möglichst ein abgelaufenes Hochwasserereignis - vorliegen, zurückgegriffen. Nach Etablierung entsprechender Workflows und dem verwaltungsinternen Aufbau eines effektiven, gemeinsamen Datenmanagements soll in weiteren Varianten und mit externen hydrologischen Modellen Schritt für Schritt die Komplexität der Abflussbildungs-komponente z. B. durch die Green&Ampt- oder Richardsgleichung erhöht werden. Dadurch kann das Potential stärker physikalisch basierter, hydrologischer Prozessabbildungen hinsichtlich einer Verbesserung der Simulationsgüte beurteilt werden. Falls diese signifikant ist, werden die hydrologischen Werkzeuge zum Ende der Projektlaufzeit fortgeschrieben, so dass die Vorteile nicht nur in der pluvialen Modellierung, sondern auch in der Bemessungspraxis und Hochwasservorhersage genutzt werden können. Parallel zu den pluvialen Betrachtungen in kleinen Einzugsgebieten sind in Pilotgebieten und durch Kooperationen mit externen Partnern auch großflächige hydrologisch-hydrodynamische Modellierungen für pluviale wie fluviale Hochwasser (in Echtzeit für Vorhersagezwecke) in Planung. Dazu sollen sowohl Berechnungen auf unstrukturierten Modellnetzen als auch rasterbasierte Modellierungen durchgeführt werden.

Im Zuge der Modellierung von Starkregenereignissen tritt ein weiteres Problem auf: Die Abbildung von Dünnschichtabfluss in hydrodynamischen Modellsystemen. Eine adäquate Modellierung dessen ist von großer Bedeutung, weil dieser ganz am Anfang der Abflusskonzentration, unmittelbar nach der Abflussbildung, steht und weil bei einem Starkregenereignis nahezu der gesamte, in den Vorfluter gelangende Abfluss, wild abfließendes Wasser ist, das seinen Ursprung im Dünnschichtabfluss hat oder selbst Dünnschichtabfluss ist. Eine fehlerhafte Modellierung des Dünnschichtabflusses in Volumen und Fließgeschwindigkeit kann sich somit über das Gebiet zu erheblichen Fehlern aufsummieren und sich auf den Zeitpunkt und die Höhe des Hochwasserscheitels im Gewässer auswirken. Daher werden in diesem Projekt die in bisherigen Forschungsvorhaben veröffentlichten Rauheitsbeiwerte auf ihre Praxistauglichkeit und ihre Anwendungsgrenzen hin untersucht.



Abb. 5 Beispiel für Dünnschichtabfluss im Randbereich einer bayerischen Gemeinde

5 Ausblick

Durch die verstärkte Zusammenarbeit zwischen Hydrologie und Hydraulik am Bayerischen Landesamt für Umwelt sowie der Kooperation mit anderen Bundesländern und Forschungseinrichtungen lassen sich viele und hohe Synergieeffekte erzielen und die bestehende, historisch gewachsene Trennung der Fachbereiche überwinden. Darüber hinaus werden aktuelle Ergebnisse aus zahlreichen Projekten und Forschungsvorhaben zur Aktualisierung bestehender Verfahren berücksichtigt sowie hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit geprüft und, sofern sinnvoll und möglich, in das Methodenrepertoire der Wasserwirtschaftsverwaltung übernommen. Alle im Rahmen des Vorhabens weiterentwickelten Daten und Verfahren sind dadurch aufeinander abgestimmt und bilden so gemeinsam einen neuen, aktualisierten Stand der Technik. Durch die fachliche Abstimmung und Verbesserung der Datenverfügbarkeit soll wasserwirtschaftliche Planung effizienter und durch einheitliche Standards qualitätsgesichert abgewickelt werden können. Speziell die Wasserwirtschaftsämter sollen durch Vorgaben zur Methodik, durch zentral bereitgestellte Datensätze, Produkte und Werkzeuge entlastet werden, insbesondere auch bei der fachlichen Betreuung von Kommunen und Ingenieurbüros.

Literatur

- [1] Projekt HiOS (2022). T. Bericht, Fachbereich Hydrodynamik (2022), unveröffentlicht.
- [2] Steinbrich, A.; Leistert, H.; Weiler, M. (2021): RoGeR – ein bodenhydrologisches Modell für die Beantwortung einer Vielzahl hydrologischer Fragen. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft 14 (2), S. 94–101. DOI: 10.3243/kwe2021.02.004.
- [3] Projekt HORA 3, vrvs (abgerufen am 16.02.2023). Visualisierung von Starkregen und Flusshochwasser. <https://www.vrvs.at/forschung/forschungsprojekte/hora-3>
- [4] Massmann, S. et al. (2010). Hyd³Flow - Integrierte hydrologische und hydro-numerische Modellsysteme für eine verbesserte Hochwasservorhersage. ISBN: 978-3-941897-49-6
- [5] Bonnifait, L. et al. (2009): Distributed hydrologic and hydraulic modelling with radar rainfall input. Reconstruction of 2002 catastrophic flood event in the Gard region, France. In: Advances in Water Resources 32 (7), S. 1077–1089. DOI: 10.1016/j.advwatres.2009.03.007.
- [6] Kim, J. et al (2012): Coupled modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow. In: Advances in Water Resources 37, S. 104–126. DOI: 10.1016/j.advwatres.2011.11.009.
- [7] Bardossy, A. et al (2020): SYNOPSE – Deutschlandweite regionalisierte synthetische Niederschläge für die Stadtentwässerung. Proc. Aqua Urbanica 2020, 28.-29. September 2020, Innsbruck, Österreich
- [8] Teschemacher, S., Haas, S., Rieger, W. (2015). ProNaHo - Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie Dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit. DOI:10.13140/RG.2.2.26986.21444.
- [9] Nguyen, P. et al. (2016): A high resolution coupled hydrologic–hydraulic model (HiResFlood-UCI) for flash flood modeling. In: Journal of Hydrology 541, S. 401–420. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.047.
- [10] Clilverd, H. et al. (2016): Coupled Hydrological/Hydraulic Modelling of River Restoration Impacts and Floodplain Hydrodynamics. In: River Res. Applic. 32 (9), S. 1927–1948. DOI: 10.1002/rra.3036.

- [11] Achleitner, S.; Huber, A.; Lumassegger, S.; Kohl, B.; Spira, Y.; Weingraber, F. (2020): RAINMAN Pilotstudie Oberösterreich. Modellierung von Starkregenoberflächenabfluss/Hangwasser. [https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/Home/Projects/RAINMAN/Main-Project-outputs-/RAINMAN-LeitfadenEN-V1.0-20200623-\(1\).pdf](https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/Home/Projects/RAINMAN/Main-Project-outputs-/RAINMAN-LeitfadenEN-V1.0-20200623-(1).pdf)
- [12] Pontes, P. et al. (2017): MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. In: Environmental Modelling & Software 94, S. 1–20. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.03.029.
- [13] Schneider, J. (2018): Modellierung eines Sturzflutereignisses durch Kombination unterschiedlicher hydrologischer Abflussbildungsansätze mit einer flächenhaften hydraulischen 2D-Berechnung. Masterarbeit. Kath. Universität Eichstätt-Ingolstadt, unveröffentlicht.
- [14] Projekt VieWBay (2022). Virtueller Wasser-Raum Bayern - ein Ansatz für ganz Bayern. <https://viewbay.geographie-muenchen.de/projektinformation/.Endbericht>, unveröffentlicht.
- [15] LUBW Baden-Württemberg (2016) Karlsruhe. Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. ISBN 978-3-88251-391-2.
- [16] Liu, Z., Zhang, H., Liang, Q. (2019): A coupled hydrological and hydrodynamic model for flood simulation. In: Hydrology Research 50 (2), S. 589–606. DOI: 10.2166/nh.2018.090.
- [17] Wang, Y., Yang, X. (2020): A Coupled Hydrologic–Hydraulic Model (XAJ–HiPIMS) for Flood Simulation. In: Water 12 (5), S. 1288. DOI: 10.3390/w12051288.
- [18] Hofmann, Julian, Schüttrumpf, Holger (2020): Risk-Based and Hydrodynamic Pluvial Flood Forecasts in Real Time. In: Water 12 (7), S. 1895. DOI: 10.3390/w12071895.
- [19] Yang, Y. et al (2020): Linking a Storm Water Management Model to a Novel Two-Dimensional Model for Urban Pluvial Flood Modeling. In: Int J Disaster Risk Sci 11 (4), S. 508–518. DOI: 10.1007/s13753-020-00278-7.
- [20] Kuhnt, G. et al. (2019): Ausweisung von Starkregengefährdeten Gebieten in Hessen für Planungen zur Gefahrenabwehr auf Landes- und kommunaler Ebene. Abschlussbericht an HLNUG. Klimawandel in der Praxis – KLIMPRAX.

Anschrift der Verfasser

Frank Michel, Dr. Simon P. Seibert, Dr. Oliver Chmiel, Dr. Michael Weber, Alexander Neumann, Dr. Andreas Rimböck
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

frank.michel@lfu.bayern.de
simon.seibert@lfu.bayern.de
oliver.chmiel@wwa-don.bayern.de
michael.weber@wwa-wm.bayern.de
alexander.neumann@lfu.bayern.de
andreas.rimboeck@lfu.bayern.de