

Ein integrativer Ansatz zur Optimierung hydrologischer Modelle anhand hydraulischer Simulationen

Antonia Dallmeier, Markus Reisenbüchler und Nils Rüther

Zusammenfassung

Mit Hilfe hydrologischer Modelle können Niederschlag-Abfluss-Prozesse ganzer Einzugsgebiete räumlich und zeitlich verteilt recheneffizient ermittelt werden. Somit können Abflusswerte an beliebiger Stelle des betrachteten Gewässers berechnet und als Eingangsdaten für hydraulische Simulationen verwendet werden. Im Rahmen des Projektes „VieWBay – Virtueller Wasserraum Bayern“ wurde ein Konzept zur hydrologisch-hydraulischen Kopplung entwickelt, um den Wasserhaushalt und die Fließprozesse in Bayern zu modellieren. Dabei wurde das hydrologische Landoberflächenmodell PROMET mit dem zweidimensionalen hydraulischen Programm TELEMAC2D verknüpft. Durch die Kopplung können die verschiedenen Abflusskomponenten des hydrologischen Modells dem hydraulischen Modell an dynamisch wählbaren Modellgrenzen und entlang des Gerinnes zugegeben werden. Auf kleinskaliger Ebene wie im Pilotgebiet des Gewässers Schmutter wurden jedoch die Schwachstellen des aktuellen Ansatzes sichtbar. Die Abflussprozesse der Schmutter sind komplexer als sie mit den Standardansätzen in PROMET modelliert werden können, insbesondere da die Wellenausbreitung und -verzögerung auf vereinfachten, empirischen Gleichungen basiert. Entsprechend ergeben sich in der nachgeschalteten, detaillierten hydraulischen Modellierung größere Unterschiede im Vergleich zur Realität, da bereits in den Eingangsdaten große Abweichungen enthalten sind. Die folgende Studie beschreibt einen Ansatz zur Verbesserung der hydrologisch-hydraulischen Kopplung am Beispiel der Schmutter. Hierfür werden anhand hydraulischer, instationärer Simulationen eines charakteristischen Hochwasserabflusses an dem Gewässer Schmutter die Fließcharakteristika an definierten Stellen ausgewertet und in ein Speichermodell nach Muskingum überführt. Durch Integration des Speichermodells in PROMET wird erwartet, dass die Abflussprozesse im Einzugsgebiet genauer modelliert werden können.

1 Einleitung

Informationen über das Abflussgeschehen sind für hydrodynamische Simulationen essentiell. Diese werden in Form von Initial- und Randbedingungen definiert und ermöglichen es so, die tiefengemittelten zweidimensionalen hydrodynamischen Gleichungen zu lösen (Hervouet 2007; Ferziger und Perić 2002). Oftmals liegen jedoch an den gewählten Modellgrenzen keine Messwerte vor bzw. die Modellgrenzen können nicht immer so gewählt werden, dass Messwerte vorhanden sind, da das zur Folge haben kann, dass Modellgebiete größer werden als notwendig und so die Rechenleistung unverhältnismäßig steigt. Zudem kann es sein, dass an Pegelstellen im Fall von Hochwasserereignissen die hydrologischen Daten nicht erfasst werden (Patt und Jüpner 2020).

Hydrologische Modelle berechnen die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschlag-Abfluss-Prozesse recheneffizient über beliebig große Einzugsgebiete. Je nach räumlicher Auflösung der hydrologischen Modelle können somit an beliebigen Stellen Abflusswerte ermittelt werden und somit hydraulischen Modellen als Eingangsdaten dienen (Fohrer et al. 2016; Maniak 2010; Nützmann und Moser 2016). Im Rahmen des Projekts „VieWBay – Virtueller Wasserraum Bayern“ wurde ein Konzept zur automatisierten und effizienten Übermittlung von hydrologischen

Daten an hydraulische Modelle entwickelt. Hierfür wurden die Daten des hydrologischen Landoberflächenmodells PROMET (Mauser und Bach 2009) als Eingangsdaten für das zweidimensionale hydraulische Programm TELEMAC2D (Hervouet 2007) verwendet. Mit Hilfe dieser Ein-Wege-Kopplung können Modellumgriffe flexibel gewählt und die resultierenden Abflusskomponenten des hydrologischen Modells unterschiedlicher räumlicher Diskretisierung (50 bis 1000 m) als Randbedingungen im hydraulischen Modell definiert werden. Auf kleinskaliger Ebene wie im Pilotgebiet Schmutter wurden jedoch Schwachstellen dieses Ansatzes sichtbar. So kann das hydrologische Modell PROMET die komplexen Abflussprozesse der Schmutter standardmäßig nicht detailliert genug abbilden. Entsprechend weichen die Ergebnisse der anschließenden hydraulischen Simulationen erheblich von den Messwerten ab.

Anhand einer Ortsbegehung sowie hydraulischer Simulationen wurde ersichtlich, dass es bereits bei Hochwasserabflüssen geringer Jährlichkeit (HQ_1) zu Ausuferungen im Einzugsgebiet der Schmutter kommt. Die komplexe Abflusscharakteristik der Schmutter im Hochwasserfall, die ein Resultat des gewundenen Verlaufs sowie der zahlreichen Querbauwerke ist, konnte durch das hydrologische Modell PROMET bisher nicht korrekt abgebildet werden. Um die Dämpfung sowie Verzögerung der Hochwasserwelle in PROMET besser berechnen zu können, wurde deshalb bereits ein vereinfachtes Speichermodell in das hydrologische Modell PROMET integriert. Dabei wird an einem Abflussknoten des hydrologischen Modells ein Grenzabfluss definiert. Wenn der Abfluss im Gerinne größer als der Grenzabfluss ist, wird der Abfluss auf diesen Maximalwert gedrosselt und der überschüssige Abfluss wird in einem fiktiven, unendlich großen Speicher temporär zurückgehalten. Die mathematische Beziehung wird durch die folgenden Formeln ausgedrückt:

$$Q_{out}(t) = \min\left(Q_{BV}, Q_{in}(t) + \frac{V_S(t-1)}{dt}\right) \left[\frac{m^3}{s}\right] \quad [1]$$

$$V_S(t) = (Q_{in}(t) - Q_{out}(t)) * dt [m^3] \quad [2]$$

Anhand vorläufiger Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Implementierung des einfachen Speichermodells die Translation sowie Retention des Abflusses in PROMET bereits verbessert (Rutschmann et al. 2022). Dennoch besteht weiteres Potenzial für Verbesserung.

Die folgende Studie beschreibt die Methodik und Ergebnisse der weiterführenden Untersuchungen zur Verbesserung der Abbildung der Abflussprozesse im hydrologischen Modell PROMET unter der Verwendung hydraulischer Simulationen. Dabei werden zunächst das Vorgehen und die verwendeten Konzepte bzw. Formeln beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick für zukünftige Entwicklungen gegeben.

2 Projektgebiet

Das Projektgebiet umfasst das Gewässer Schmutter und liegt westlich der Stadt Augsburg im bayerischen Voralpenraum. Die Schmutter (Gewässer 2. Ordnung) hat ein Einzugsgebiet von 498 km² mit einer gesamten Fließlänge von ca. 76 km und drei Pegelstationen Fischach, Achsheim und Druisheim (Aufzählung in Fließrichtung). Der Verlauf des Flusses ist durch zahlreiche Brücken- sowie Wehrbauwerke geprägt, welche einen maßgebenden Einfluss auf die Hochwasserretention haben. Im mittleren Bereich weist die Schmutter zudem einen stark gewundenen Verlauf auf, der im Hochwasserfall schnell überströmt wird und die angrenzenden Wiesen und Auenvegetation weitläufig überflutet. Vor allem die Straßendeiche, die das Überschwemmungsgebiet der Schmutter quer zur Fließrichtung schneiden, wirken wie Staudämme und erzeugen

im Hochwasserfall eine Speicherwirkung. In Abb. 1 ist ein Abschnitt der Schmutter mit Überschwemmungen dargestellt. Anhand der Abbildung kann sowohl die Retentionswirkung der Bauwerke als auch der gewundene Verlauf erkannt werden. Zudem sind die zahlreichen Quer- und Sohlbauwerke durch farbige Symbole dargestellt. (Reisenbüchler und Dallmeier 2022)

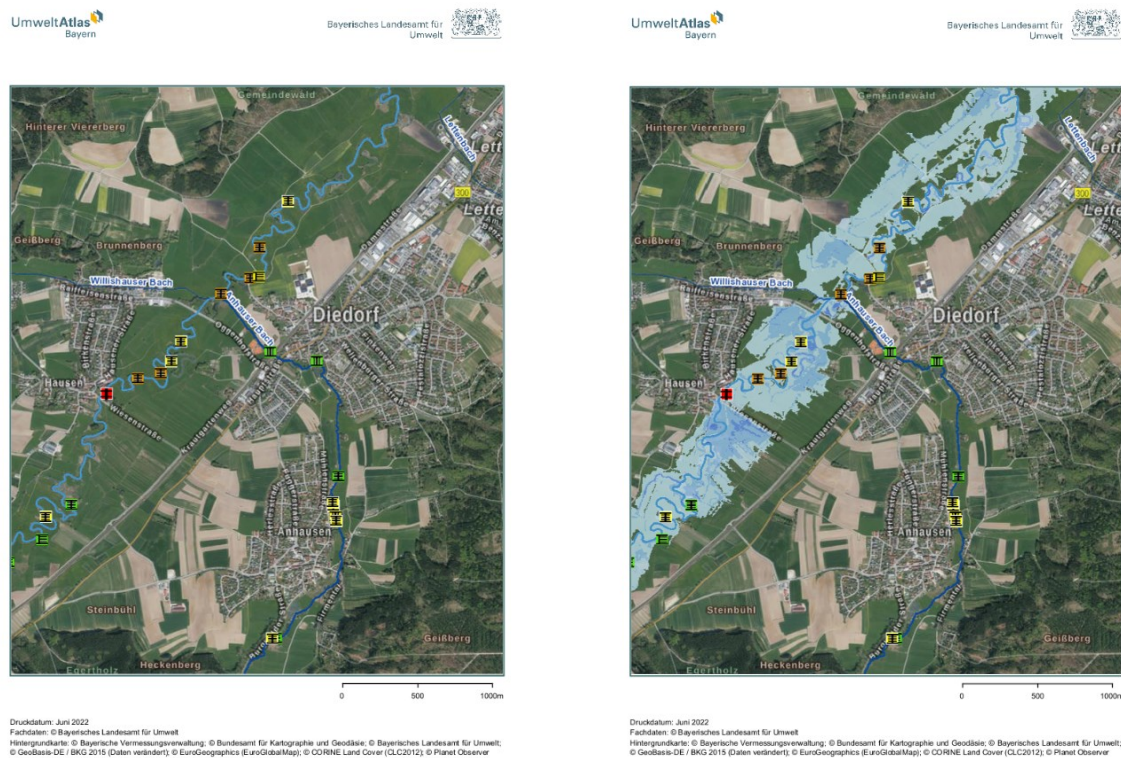


Abb. 1 Abschnitt der Schmutter bei Diedorf zur Veranschaulichung ohne (links) und mit (rechts) Überschwemmungsfläche (Quelle: Reisenbüchler und Dallmeier 2022)

3 Methodik

Die Implementierung des einfachen Speicherkonzeptes in PROMET hat die Berechnung des Abflusses an dem Gewässer Schmutter zwar deutlich verbessert (Rutschmann et al. 2022), doch auch gleichzeitig weiteres Verbesserungspotential aufgezeigt. Deshalb wird in dieser Studie die Möglichkeit der Verwendung des Speichermodells nach Muskingum untersucht (Wittenberg 2011). Für die Studie werden entlang der Schmutter drei größere Speicher definiert (vgl. Abb. 2 und Tab. 1), welche mittels hydrodynamischer Simulationen parametrisiert werden.

Zunächst wird ein detailliertes hydraulisches Modell zwischen den Pegelstationen Fischach und Druisheim an der Schmutter erstellt. Bei der Erstellung wird insbesondere auf die Einbindung der Querbauwerke wie Brücken, Wehre sowie Straßendeiche, aber auch der Gebäude geachtet. Die Lage und Steuerparameter der Querbauwerke werden auf Grund fehlender Daten aus den bereitgestellten Hydro_AS-2D Modellen der Hochwassergefahrenkarten (HWGK-Modell-ID: 2089 und 2090) entnommen. Die Bathymetrie des Flussschlauches wird mit Hilfe des automatischen Mesherstellungswerkzeuges TUMesh (Rutschmann et al. 2022) aus vermessenen Querprofilen erzeugt und zusammen mit den Höhen eines Digitalen Geländemodells (DGM) der Auflösung

1x1 m auf das hydraulische Modell interpoliert. Die Rauheitswerte in Form von Stricklerwerten werden ebenfalls den HWGK-Modellen entnommen.



Abb. 2 Lage und Ausdehnung des Speichers 1

Tab. 1 Räumliche Eigenschaften der drei Speicher im Modellgebiet (Quelle: Reisenbüchler und Dallmeier 2022)

Speicher	Fläche [km ²]	Fließlänge [km]	Mittleres Gefälle [%]
1	7,068	17,066	0,12
2	6,901	15,159	0,09
3	22,421	23,288	0,14

Um die empirischen Parameter des Muskingum-Speichermodells bestimmen zu können, werden drei instationäre Simulationen mit dem zweidimensionalen hydrodynamischen Programm TELEMAC2D (Hervouet 2007) durchgeführt. Aus Voruntersuchungen, bei denen stationäre Simulationen mit Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeit (MQ – HQ₂₀) durchgeführt wurden, geht hervor, dass es bereits ab einem Abfluss von 4 m³/s zu weitläufigen Ausuferungen kommen kann (Rutschmann et al. 2022). Deshalb werden drei instationäre Simulationen mit künstlich generierten Abflussganglinien durchgeführt. Wie in Abb. 3 dargestellt ist, weisen die drei Ganglinien den gleichen Spitzenabfluss von 10 m³/s auf, der so gewählt ist, dass es in allen Bereichen der Schmutter zu Ausuferungen kommt. Die Ganglinien unterscheiden sich im Abflussvolumen, da der Spitzenabfluss in 6 h, 12 h und 24 h erreicht wird. Dieses Vorgehen wird gewählt, damit sich die Speicher im Gebiet unterschiedlich schnell füllen bzw. leeren. Für die Bestimmung der Parameter des Muskingum-Speichermodells werden der zeitliche Verlauf des Abflusses in den Speicher (Q_{in}), die Ganglinie des Abflusses aus dem Speicher (Q_{out}) sowie das Speichervolumen der hydraulischen Simulationen am Speicherauslass ausgewertet. Anschließend werden die Muskingumparameter so angepasst, dass sie der simulierten Ganglinien am Speicherauslass ent-

sprechen. Die Qualität der Abbildung wird sowohl durch visuellen Vergleich als auch die statistische Größe NSE belegt. Für die Definition und Berechnung der NSE wird an dieser Stelle auf Moriasi et al. (2007) verwiesen.

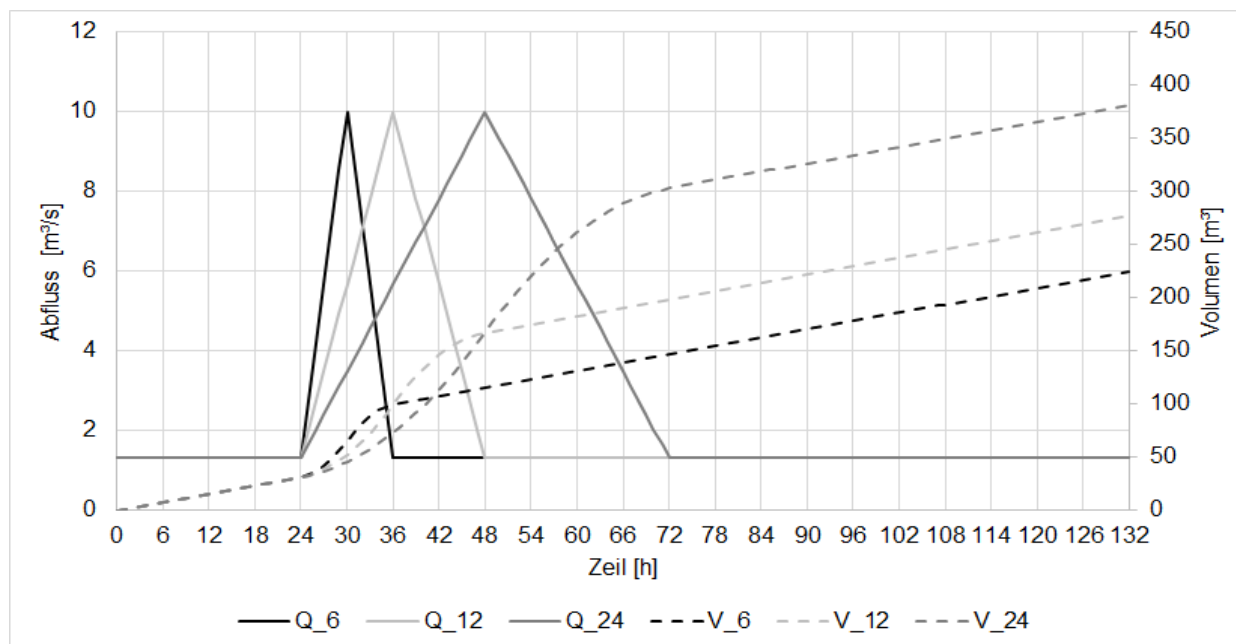


Abb. 3 Abflussganglinien der drei instationären Simulationen mit zugehörigem Speichervolumen (Quelle: Reisenbüchler und Dallmeier 2022)

Die Formeln 3-6 zeigen die Berechnung der Muskingumparameter sowie des Abflusses aus einem Speicher. Die Parameter c_0 , c_1 und c_2 sind von der Retentionskonstante k , dem dimensionslosen Koeffizienten x sowie dem Zeitschritt dt abhängig. Die Ermittlung des Abflusses aus dem Speicher (vgl. Formel 3) kann anschließend in das hydrologische Modell integriert werden. In PROMET werden insgesamt drei Speicher implementiert, die in Lage und Größe dem einfachen Speichermodell entsprechen. Folglich werden für diese drei Speicher die Muskingumparameter bestimmt.

$$Q_{Out}(t) = c_0 \cdot Q_{In}(t) + c_1 \cdot Q_{In}(t-1) + c_2 \cdot Q_{Out}(t-1) \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [3]$$

$$c_0 = \frac{(-k \cdot x + 0,5 \cdot dt)}{(k \cdot (1-x) + 0,5 \cdot dt)} \quad [4]$$

$$c_1 = \frac{(k \cdot x + 0,5 \cdot dt)}{(k \cdot (1-x) + 0,5 \cdot dt)} \quad [5]$$

$$c_2 = \frac{(k \cdot (1-x) - 0,5 \cdot dt)}{(k \cdot (1-x) + 0,5 \cdot dt)} \quad [6]$$

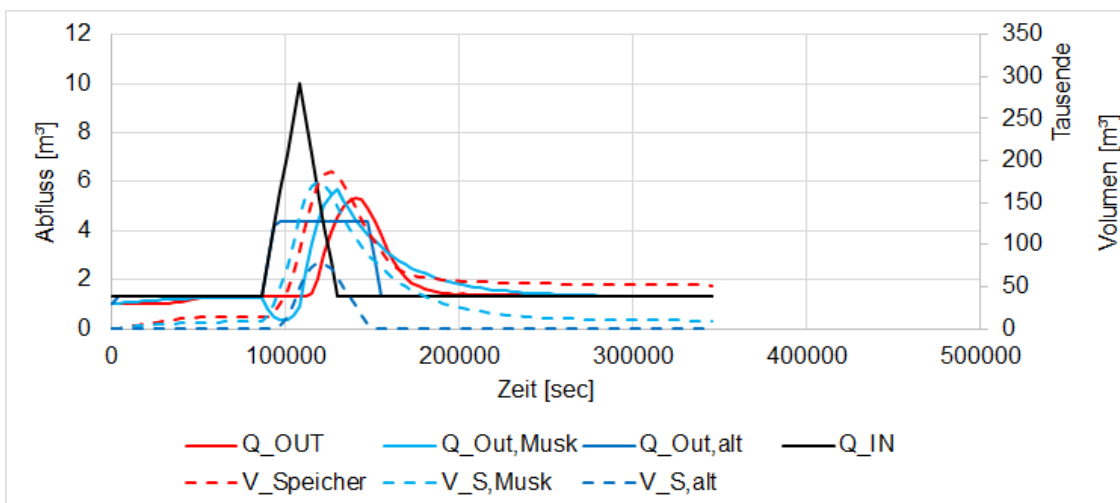
Nachdem das Muskingum-Speichermodell in PROMET in das hydrologische Modell der Schmutter implementiert worden ist, wird die Leistungsfähigkeit des neuen Ansatzes anhand eines realen Hochwasserereignisses (30.05.2013 6:00 Uhr – 06.06.2013 23:00 Uhr) überprüft. Dieses Ereignis wurde gewählt, da es statistisch einem HQ₅ entspricht und somit aufgrund deutlicher Ausuferungen eine Aktivierung der Speicher zu erwarten ist. Abschließend werden die hydrologisch simulierten Ganglinien mit Messwerten der Pegelstationen Fischach und Druisheim verglichen.

4 Ergebnisse

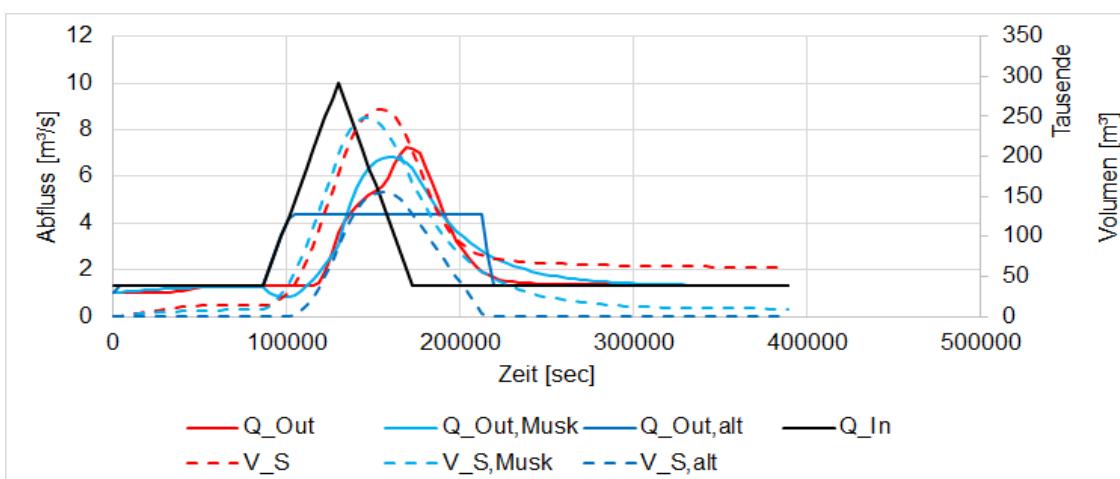
Im Folgenden werden die Ergebnisse des Speichers 1 dargestellt. Die Lage und Ausdehnung des Speichers kann Abb. 2 entnommen werden. Speicher 1 ist der oberstromige Speicher und befindet sich aufgrund des Reliefs in einem relativ schmalen Bereich des Modellgebiets. Die räumliche Ausdehnung der Überschwemmungsflächen ist deshalb begrenzt. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der Parametrisierung der Speicher 2 und 3 kann Reisenbüchler und Dallmeier (2022) entnommen werden.

In Abb. 4 ist die Auswertung der Speicherparametrisierung der drei instationären Simulationen des Speichers 1 dargestellt. Da beim einfachen Speichermodell lediglich der bordvolle Abfluss die Befüllung des Speichers definiert, entsteht ein Zeitversatz beim Befüllen und Entleeren sowie eine deutliche Abweichung der Abflussganglinie. Im Vergleich dazu wird die simulierte Ganglinie durch die empirisch ermittelten Parameter des Muskingum-Modells für alle drei Szenarien gut angenähert. Unter Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung des Gebiets, das der Speicher 1 umfasst, kann mit dem Muskingum-Modell die Retention genauer angenähert werden als mit dem bisherigen, einfachen Ansatz. Dies belegt auch die statistische Größe NSE, die in Tab. 2 für das einfache sowie das Muskingum-Speichermodell für die drei Speicher dokumentiert ist.

a)



b)



c)

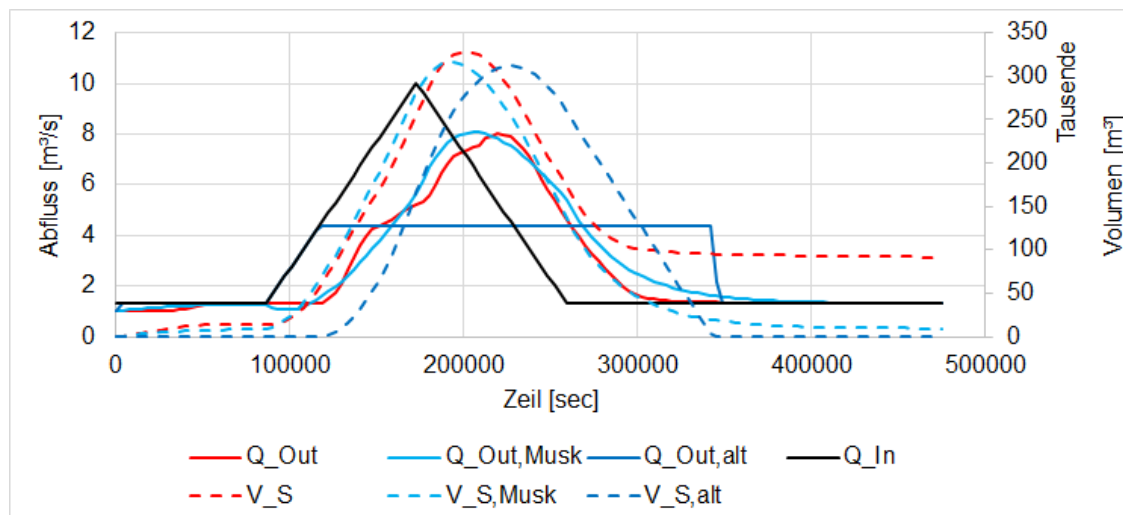


Abb. 4 Auswertung der Speicherparametrisierung des Muskingum-Verfahrens des Speichers 1 anhand a) 6 h Ganglinie, b) 12 h Ganglinie und c) 24 h Ganglinie. Q_{In} bezeichnet die Zuflussganglinie, Q_{Out} die Auslaufganglinie des Speichers des einfachen, alten Speichermodells ($Q_{out,alt}$), des Muskingum Modells ($Q_{out,Musk}$) und der hydrodynamischen Simulation (Q_{out}). V_S bezeichnet das vorhandene Wasservolumen im Speicher des einfachen Speichermodells ($V_{S,alt}$), des Muskingum Modells ($V_{S,Musk}$) und der hydrodynamischen Simulation (V_S) (Quelle: Reisenbüchler und Dallmeier 2022)

Tab. 2 Statistische Auswertung der berechneten Abflusswerte aus dem Speicher. NSE (1 – 0,75 sehr gut, 0,75 – 0,65 gut, 0,65 – 0,50 akzeptabel, kleiner 0,50 unbefriedigend) (Quelle: Reisenbüchler und Dallmeier 2022)

NSE	Speicher 1		Speicher 2		Speicher 3	
	einfach	Muskingum	einfach	Muskingum	einfach	Muskingum
6 h	0,518	0,850	0,362	0,946	0,732	0,820
12 h	0,585	0,938	0,695	0,956	0,389	0,816
24 h	0,423	0,966	0,597	0,914	0,191	0,845

In Abb. 5 ist der Vergleich der simulierten sowie gemessenen Ganglinien an den Pegeln Fischach (Modellzulauf) und Druisheim (Modellauslauf) für das Referenzhochwasserereignis dargestellt. Hierbei werden die simulierten Ganglinien des hydrologischen Modells der Schmutter **ohne** Speichermodell, mit **einfachem** Speichermodell und mit dem Muskingum-Speichermodell (**optimierter** Speicher) verglichen. Da der Pegel Fischach den Modellbeginn markiert und oberstrom des Pegels und somit des Modellgebiets kein Speicher im hydrologischen Modell implementiert ist, ist am Pegel Fischach erkennbar, dass die drei simulierten Ganglinien identisch sind. Am Pegel Druisheim am Modellauslauf ist jedoch eine große Diskrepanz der simulierten Abflussganglinien von der gemessenen erkennbar. Die Abflussganglinie des hydrologischen Modells ohne Speicher weist eine ähnliche Form am Pegel Druisheim wie am Pegel Fischach auf. Die Ganglinie

behält ihre Form bei und überschätzt den Spitzenabfluss deutlich. Die Fließprozesse sowie Retention werden folglich in dem hydrologischen Modell ohne Speicher nicht korrekt abgebildet. Die Abflussganglinie des hydrologischen Modells mit einfachem Speichermodell überschätzt im Vergleich dazu die Retention, sodass die Hochwasserwelle zu stark gedämpft wird. Auch hier wird zudem die Translation nicht richtig abgebildet, da die simulierte Hochwasserspitze deutlich früher als die Gemessene auftritt. Zudem entleeren sich die Speicher nicht schnell genug, sodass der Abfluss zum Ende des Hochwasserereignisses deutlich überschätzt wird. Jedoch kann auch das hydrologische Modell mit dem neuen Muskingum-Speichermodell das Hochwasserereignis nicht richtig abbilden. Die Retention ist hier zudem noch stärker als im hydrologischen Modell mit einfachem Speicher, sodass das Volumen der Hochwasserwelle signifikant unterschätzt wird. Auch hier wird die Translation nicht richtig abgebildet, da der Abflussscheitel deutlich früher als tatsächlich auftritt.

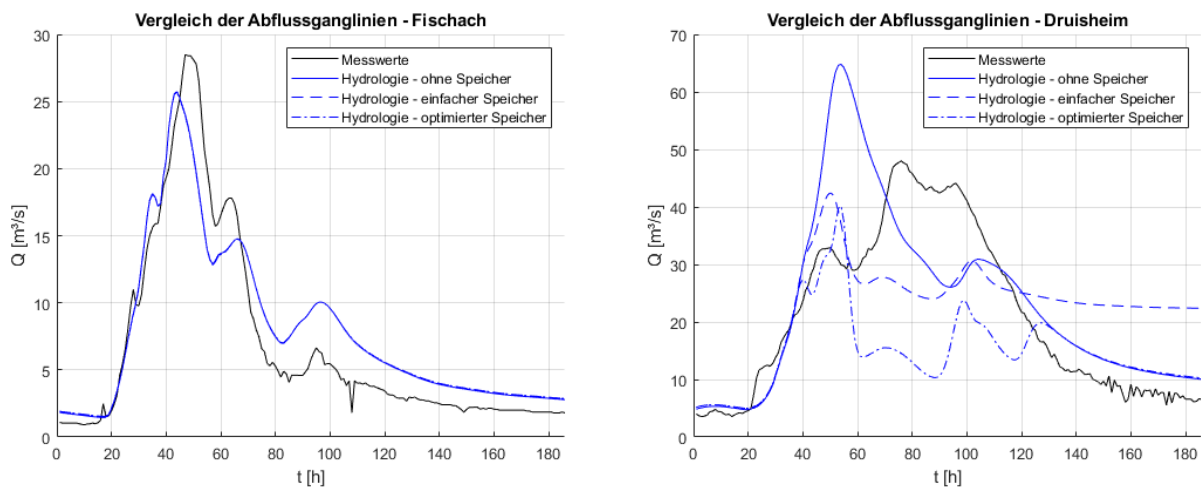


Abb. 5 Vergleich der gemessenen Abflussganglinien (Messwerte) mit den Abflussganglinien des hydrologischen Modells ohne Speicher (Hydrologie – ohne Speicher), des hydrologischen Modells mit einfachem Speicher (Hydrologie – einfacher Speicher) und des hydrologischen Modells mit optimiertem Speicher (Hydrologie- optimierter Speicher) am Pegel Fischach / Modellzulauf (links) und Pegel Druisheim / Modellauslauf (rechts) (Quelle: Reisenbüchler und Dallmeier 2022)

5 Diskussion

Obwohl die instationären Ganglinien zur Bestimmung der Muskingum-Parameter durch diese deutlich besser als mit dem bisherigen Ansatz angenähert worden sind, konnte die Qualität der Zwischenergebnisse nicht auf die Simulationsergebnisse eines echten Hochwasserereignisses übertragen werden. Diese Abweichung der Simulationsergebnisse von realen Messwerten wird im Folgenden diskutiert.

Zum einen können die Abweichungen in der grundsätzlichen Eignung des Muskingum-Speichermodells begründet sein. So kann es sein, dass das Modell aufgrund seiner Einfachheit die komplexen Abfluss- und Speicherprozesse des Modellgebiets Schmutter nicht umfassend darstellen kann. Hierfür sollten weitere, alternative Speichermodelle in ihrer Eignung überprüft werden. Ebenso sollte auch der Zeitschritt des hydrologischen Modells mit dem Zeitkoeffizienten des Muskingum-Speichermodells auf Konsistenz überprüft werden. Weitere Simulationen mit einer größeren Variation an instationären Abflussganglinien sowohl mit veränderlichem Spitzenabfluss

als auch Dauer des Hochwasserereignisses könnten hierbei weitere Sicherheit bei der Festlegung der Speicherkonstante k und des dimensionslosen Koeffizienten x bringen.

Außerdem wird die Anzahl der Speicher einen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse haben. In dieser Studie wurden zur Vergleichbarkeit mit den bisherigen Arbeiten lediglich drei Speicher in dem Modellgebiet implementiert. In Tab. 1 sind Fläche, Fließlänge und Gefälle der drei Speicher dargestellt. Jeder der drei Speicher umfasst mehrere Kilometer an Fließlänge und Modellgebiet. Wie in Abb. 2 erkennbar ist, kreuzen in jedem Speicherbereich mehrere Straßendeiche das Gebiet und unterteilen es wiederum in mehrere kleine Speicher. Demnach kann es sein, dass die große flächenhafte Ausdehnung, die mit der geringen Anzahl an implementierten Speichern einhergeht, die tatsächlich stattfindenden Speicherprozesse in dem Modellgebiet nicht korrekt abbildet. Hier wäre weiterhin zu untersuchen, inwiefern eine Erhöhung der Anzahl der implementierten Speicher die Qualität der simulierten Retentionseffekte verbessert.

Zu guter Letzt sollte auch die Qualität des hydraulischen Modells in die Diskussion miteinbezogen werden. Aufgrund fehlender Daten der Querbauwerke sowie Wasserspiegelfixierungen für die Kalibrierung wurde auf Daten bereits bestehender Modelle zurückgegriffen. Zudem konnten einige Wehre und Abstürze aufgrund der Datenlage nicht in das hydraulische Modell integriert werden. Dies kann einen Einfluss auf die hydraulischen Simulationsergebnisse haben, mit deren Hilfe die Parameter des Muskingum-Speichermodells bestimmt wurden.

6 Fazit

In dieser Studie wurde untersucht, wie mit Hilfe hydraulischer Simulationen das Speicherkonzept des hydrologischen Modells PROMET verbessert werden kann. Hierfür wurde ein hydraulisches Modell des Gewässers Schmutter zwischen den Pegeln Fischach und Druisheim erstellt. Bei der Erstellung wurde vor allem auf die Integration von Gebäuden, abflusswirksamen Querbauwerken sowie Deichstrukturen geachtet. Anschließend wurden fiktive, instationäre Szenarien hydraulisch simuliert. Anhand dieser Simulationen wurden die Parameter des Muskingum-Speichermodells hergeleitet, die wiederum in das hydrologische Modell der Schmutter in PROMET implementiert worden sind. Abschließend wurde das Hochwasserereignis Anfang Juni 2013 hydrologisch simuliert und mit Messwerten verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Implementierung des Muskingum-Speichermodells keine Verbesserung im Vergleich zum bereits bestehenden einfachen Speichermodell ergab. Dies kann zum einen am Muskingum-Modell liegen, das möglicherweise nicht das passende Speichermodell ist. Zum anderen kann aber auch die Anzahl der betrachteten Speicher einen signifikanten Einfluss haben. Letztendlich kann auch das hydraulische Modell, das für die Ermittlung der Parameter des Muskingum-Modells verwendet worden ist, einen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Weitere Untersuchungen und Berechnungen würde hier Klarheit schaffen. Dennoch liefert die vorgestellte Studie bereits interessante Erkenntnisse über die Speichercharakteristika sowie die Optimierung hydrologischer und hydraulischer Simulationen. In weiterführenden Studien sollten die Translations- und Retentionsprozesse an einem kleineren Modellgebiet mit weniger Freiheitsgraden umfassend untersucht werden. Dabei könnte der Einfluss von Querbauwerken, die Anzahl der Speicher sowie der Mäandereffekt genauer quantifiziert und so die Abflussvorhersage mit Hilfe hydrologischer Modelle optimiert werden.

Anerkennung

Diese Studie wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz im Rahmen des Forschungsprojektes „VieWBay – Virtueller Wasserraum Bayern“ gefördert.

Literatur

- Ferziger, J. H.; Perić, M. (2002): Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fohrer, N.; Bormann, H.; Miegel, K.; Casper, M.; Bronstert, A.; Schumann, A.; Weiler, M. (2016): Hydrologie. Stuttgart, Deutschland: utb GmbH.
- Hervouet, J.-M. (2007): Hydrodynamics of Free Surface Flows: Wiley.
- Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Mauser, W.; Bach, H. (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. In: Journal of Hydrology 376 (3-4), S. 362–377. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.046.
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007): Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. In: Transactions of the ASABE 50 (3), S. 885–900. DOI: 10.13031/2013.23153.
- Nützmann, G.; Moser, H. (2016): Elemente einer analytischen Hydrologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Patt, H.; Jüpner, R. (Hg.) (2020): Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. Springer Fachmedien Wiesbaden. 3., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Reisenbüchler, M.; Dallmeier, A. (2022): VieWBay - Virtueller Wasserraum Bayern. Simulation hydromorphologischer Gerinneprozesse (TP1). Ergänzungsbericht: 01.01.2022 – 30.06.2022. Lehrstuhl für Wasserbau, Technische Universität München. München. Unveröffentlicht
- Rutschmann, P.; Bui, M. D.; Liepert, T.; Reisenbüchler, M.; Dallmeier, A.; Aguirre, D. et al. (2022): VieWBay - Virtueller Wasserraum Bayern. Simulation hydromorphologischer Gerinneprozesse (TP1). Schlussbericht: 01.01.2018 – 31.12.2021. Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München. München. Unveröffentlicht.
- Wittenberg, H. (2011): Speicher. In: Hartmut Wittenberg (Hg.): Praktische Hydrologie. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, S. 49-58.

Anschrift der Verfasser*innen

M.Sc. Antonia Dallmeier
 Lehrstuhl für Hydraulic Engineering, TU München
 Arcisstraße 21, D-80333 München
 antonia.dallmeier@tum.de

Prof. Dr. Nils Rüther
 Lehrstuhl für Hydraulic Engineering, TU München
 Arcisstraße 21, D-80333 München
 nils.ruether@tum.de

Dr. Markus Reisenbüchler
 Lehrstuhl für Hydraulic Engineering, TU München
 Arcisstraße 21, D-80333 München
 markus.reisenbuechler@tum.de