

GIS- ANWENDUNGEN IM HOCHWASSERRISIKOMANAGEMENT – VON DER HYDROLOGISCHEN BELASTUNG ZUR ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG

David Nijssen & Andreas Schumann, Ruhr-Universität Bochum

1 EINLEITUNG

Die Umsetzung der EU- Hochwasserrisikomanagementrichtlinie erfordert die Betrachtung von Hochwasserszenarien, für die Gefahren- und Risikokarten und letztlich Pläne für risikomindernde Maßnahmen zu entwickeln sind. Das Ziel der Risikomanagementrichtlinie besteht darin, die „möglichen“ nachteiligen Hochwasserfolgen zu ermitteln. Gerade für große Flussgebiete ist es notwendig, eine größere Anzahl von Hochwasserszenarien und Versagensfälle zu betrachten, um die Vielfalt möglicher hydrologischer Belastungen abzubilden, die sich aus sehr unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Niederschlagsverteilungen ergeben können. So wird z.B. die Koinzidenz von Hochwasserwellen der Teilgebiete ebenso in Szenarien zu berücksichtigen sein wie die räumlich unterschiedliche Wirksamkeit technischer Hochwasserrückhaltesysteme, die entsprechend der raum-zeitlichen Variabilität der Niederschlagsbelastung ereignisspezifisch stark schwanken kann. Die Hochwasserrisiken, die sich im Ergebnis einer Betrachtung vielfältiger Belastungsszenarien ergeben, zeigen dabei oftmals starke räumliche Differenzierungen, die sich insbesondere aus den ereignisspezifischen Überschwemmungsgebieten ableiten. Bei einer integralen Betrachtung eines Einzugsgebietes werden diese Unterschiede bisher oftmals vernachlässigt. Im Gegensatz dazu erfordert das Risikomanagement die Beurteilung der Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen im räumlichen Kontext.

Um Hochwasserschäden für eine Vielzahl von Belastungsszenarien abzubilden sind 2D-Abflusssimulationen erforderlich. Wenn eine große Anzahl von hydrologischen Belastungsszenarien untersucht werden soll müssen hierzu effiziente rechentechnische Umsetzungen gefunden werden, die häufig mit einer Vergrößerung der rasterbasierten räumlichen Auflösung der 2D- Überflutungsberechnungen einhergehen. Dies kann zu erheblichen Unsicherheiten oder sogar Fehlern führen. Mit Hilfe GIS- basierter Ansätze ist es jedoch möglich, auf der Grundlage relativ grober räumlicher Auflösungen der Überflutungsgebiete belastbare Aussagen zu potentiellen Hochwasserschäden zu ermitteln.

Hochwasserschutzmaßnahmen haben unterschiedliche räumliche Wirkungsbereiche, die im Rahmen der Entscheidungsfindung differenziert zu berücksichtigen sind. Der Einsatz von GIS beschränkt sich hierbei nicht nur auf die Aufbereitung der hydraulischen Grundlagen oder die Darstellung der Simulationsergebnisse sondern beinhaltet erlaubt es, bei Entscheidungen die Raumbezüge mit zu beachten. Leider erfolgt die Anwendung derartiger räumliche Entscheidungsunterstützungssysteme (SDSS) eher selten [12] . Hier wird einem GIS- basierten Ansatz dargestellt, mit denen räumlich ungleich verteilte Lösungen grafisch dargestellt werden können.

2 METHODIK DER RÄUMLICHEN BEWERTUNG VON HOCHWASSERSCHUTZMASSNAHMEN

2.1 Überblick

Extreme Überschwemmungen sind per Definition sehr selten. Eine Einschätzung des Hochwasserrisikos kann sich deshalb meist nicht auf Beobachtungsdaten stützen. Selbst wenn Überflutungsflächen aus der Vergangenheit bekannt sind wäre eine Extrapolation auf die Zukunft auf Grund veränderter Bedingungen des Hochwasserablaufes und der Systemeigenschaften sehr unsicher. Diese Unsicherheit kann durch den Einsatz von Niederschlag- Abfluss-Modellen in Kombination mit hydraulischen Modellen vermindert werden [9]. Allerdings besteht im Bereich der hydraulischen Simulation meist ein rechentechnischer Engpass bei der Ermittlung der Überflutungsflächen. Die Wahl eines einzigen Hochwasserereignisses zur Risikoermittlung ist mit sehr großen Unsicherheiten verbunden, wenn dieses Ereignis meist nur durch einen einzigen Kennwert, durch die Jährlichkeit des Scheitels, definiert wird und andere Eigenschaften wie Form und Fülle nicht näher spezifiziert werden können. Die Unsicherheit der hydrologischen Belastung dominiert meist die Gesamtunsicherheit derartiger Risikoabschätzungen [1; 5]. Um diese Unsicherheit der hydrologischen Belastungen zu berücksichtigen sollte das Hochwasserrisiko für eine größere Anzahl von stochastisch generierten Szenarien berechnet werden, was allerdings für größere Flussgebiete von mehreren 100 km² Einzugsgebietsfläche durch die verhältnismäßig hohe rechentechnischen Anforderungen der hydraulischen Simulationstechnik [8] oftmals nicht möglich ist. Eine Verringerung der Auflösung der gekoppelte 1D-2D hydraulische Modelle bringt zwar eine erhebliche Reduktion des Rechenaufwandes mit sich, führt aber zu Ungenauigkeiten in der Modellierung der Überflutungsflächen. Somit ist eine Abwägung zwischen den Aufwendungen zur Berücksichtigung zusätzlicher hydrologischer Belastungsszenarien in Relation zu der Unsicherheit der Schadensabschätzung in Folge reduzierter hydraulischer Simulationsmodelle erforderlich. Durch geeignete Anwendungen Geographischer Informationssysteme kann die Aussagefähigkeit derartiger Analysen partiell erhöht werden. Insbesondere ist es notwendig, das rasterbasiert ermittelte Überflutungsvolumen anhand eines höher aufgelösten DGM umzuverteilen, um so die Überflutungsflächen und –tiefen differenzierter zu ermitteln und eine exaktere Berechnung der Schäden zu ermöglichen.

Die Anwendung von GIS in der Maßnahmeplanung muss sich nicht auf die Bereitstellung von Eingangsdaten oder die Visualisierung von flächenverteilt ermittelten Berechnungsergebnissen beschränken. Die Wirksamkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen hat einen starken Ortsbezug. So werden z.B. Maßnahmen des technischen Hochwasserrückhalts lokal wirksam, verlieren jedoch mit zunehmendem Zuwachs des unterliegenden Einzugsgebietes an Bedeutung. Künstliche Flutpolder sind mit der Eindeichung natürlicher Retentionsflächen verbunden und haben deshalb je nach Hochwassersituation räumlich unterschiedliche Wirkungen. Die GIS-basierte Auswertung dieser Effekte erlaubt einen Überblick über die Verteilung der bevorteilten und benachteiligten Gebiete. Mit Hilfe Desktop-basierter GIS- Anwendungen sind so schnelle Rückschlüsse auf etwaige, räumlich ungleich verteilte Lasten und Vorteilen von Hochwasserschutzmaßnahmen möglich, die die Verteilungen der Befürworter/Gegner der jeweiligen Maßnahme beeinflussen können. Es erscheint

sinnvoll, diese zur Maßnahmeplanung erforderlichen Analysen direkt in das GIS zu integrieren.

Nachfolgend werden GIS- Anwendungen vorgestellt, die sowohl die Darstellung und Analyse der Primäresultate (Überflutungsflächen) als auch deren Aufbereitung in entscheidungsrelevante abgeleitete Kriterien darstellen.

2.2 GIS- basierte Aufbereitung der Ergebnisse von Überflutungsberechnungen bei unterschiedlichen räumlichen Auflösungen

Für große Flussgebiete werden häufig gekoppelte 1D- und 2D- Simulationsmodelle verwendet, die auf der Übertragung der Wasserstände im Flusslauf auf die Auenflächen auf der Grundlage einer Abschätzung der Einstauvolumina beruhen. Im Ergebnis vergleichender Untersuchungen zeigte sich, dass die Plausibilität der ermittelten Überschwemmungshöhen (und dadurch auch die berechneten Hochwasserschäden) wesentlich verbessert werden kann, wenn die zugewiesenen Volumina in den einzelnen Rasterzellen eines groben Rasters auf der Grundlage detaillierterer Höhendaten innerhalb der jeweiligen Zelle umverteilt werden. Hierzu erfolgt zunächst die Verschneidung der hydraulischen Ergebnisse, die mit einem Raster mit niedrigerer Auflösung ermittelt wurden mit einem digitalen Geländemodell der höchstmöglichen Auflösung. Die Abhängigkeit der berechneten Überflutungsflächen und der Einstauhöhen von der Auflösung des verwendeten DGM- Rasters ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

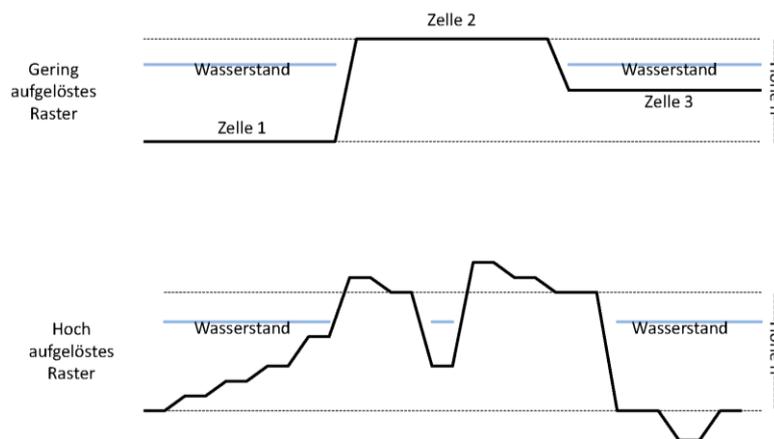


Abbildung 1: Abhängigkeit der ermittelten Überflutungsflächen und Einstauhöhen von der Auflösung des DGM

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Höhen h_{Ta} jedes Elements des groben Rasters (Fläche A_G) als flächengewichtetes Mittel der Höhen h_{Ti} der Teilflächen A_i des feineren Rasters ergeben (Abbildung 2):

$$h_{Ta} = \frac{A_i}{A_G} \cdot \sum_{i=1}^n h_{Ti} \quad (1)$$

Die Wasserspiegellage über dieser mittleren Höhe ergibt sich zu h_{Wa} . Je nach räumlicher Auflösung werden bei detaillierterer Betrachtung einzelne, höher gelegene Teilflächen nicht mehr überflutet. Zwei Fälle können hierbei unterschieden werden:

- die maximale topografische Höhe der Teilflächen A_i ($\max(h_{Ti})$) die mit hoher Auflösung innerhalb der größeren Rasterzelle (R_g) ermittelt wurde, ist gleich oder niedriger als die Summe aus der mittleren Höhe (h_{Ta}) der Rasterzelle R_g und dem Wasserstand (h_{Wa}); d.h. die größere Zelle und alle eingebettete kleinere Rasterfläche sind jeweils vollständig überflutet (Fall 1, Abbildung 2 links) oder
- die höhere Auflösung zeigt, dass Teilflächen A_i des größeren Rasters nicht überflutet sind ($\max(h_{Ti}) > h_{Ta} + h_{Wa}$) (Fall 2, Abbildung 3, rechts).

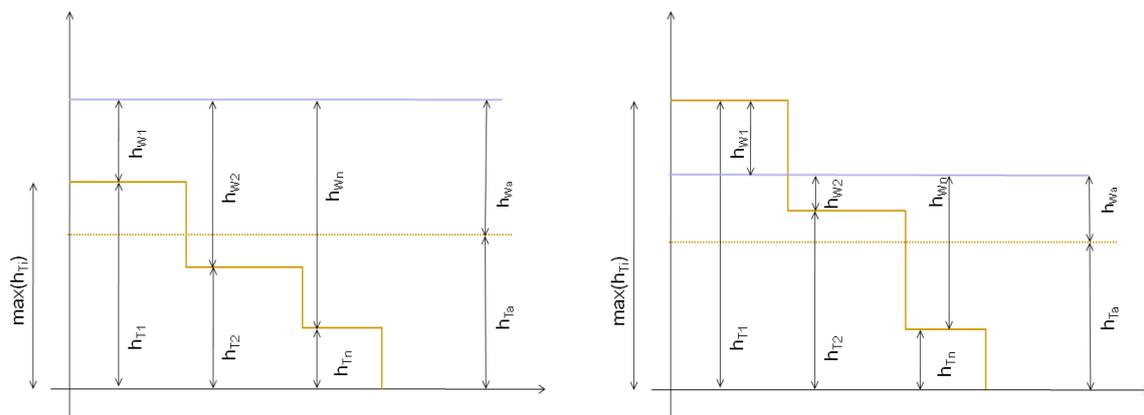


Abbildung 2: Schematische Darstellung der, je nach räumlicher Auflösung vollständig (links) oder teilweise (rechts) überschwemmten Rasterzellen

Im ersten Fall können die Wasserstände der Teilflächen h_{Wi} einfach als Differenz zwischen h_{Wa} und h_{Ti} ermittelt werden. Komplizierter ist die Umrechnung der Höhen im zweiten Fall. Wenn innerhalb des groben Rasters negative Wasserstände auftreten, d.h. Teilflächen der Zelle nicht mehr als überflutet erscheinen, ist eine nochmalige Korrektur des Wasserstandes erforderlich. Auf Grund der volumenbezogenen hydraulischen Berechnung ist der Wasserstand der überfluteten Teilflächen nicht etwa zu erhöhen, sondern zu vermindern. Teilflächen, die höher als der berechnete Wasserstand lagen, wurden in der Rechnung mit den über dem Wasserspiegel liegenden Volumenanteilen berücksichtigt (Abbildung 3, rechts). Im Beispiel der Abbildung 3 tritt für die Teilfläche 1 demzufolge zunächst ein negativer Wasserstand auf, wenn die Differenz $h_{Wa} - h_{Ti}$ berechnet wird. Das Volumen $V_{W1} = A_1 \cdot (h_{Wa} - h_{Ti})$ wurde bei der Volumenbilanzrechnung mit berücksichtigt und muss nun für die einzelnen Teilflächen rückgerechnet werden. Falls nur die Teilfläche A_1 nicht eingestaut ist, ergibt sich das korrigierte Einstauvolumen V'_{W2} der Teilfläche A_2 proportional zur Gesamtfläche A_g wie folgt:

$$V'_{W2} = V_{W2} - \frac{A_2}{A_g - A_2} V_{W1} \quad (2)$$

Falls die Anzahl der nichtüberstauten („trockenen“) Teilflächen mit n_t bezeichnet wird, wird das dort fälschlicherweise berücksichtigte Einstauvolumen flächenproportional von allen nicht überstauten Teilflächen j abgezogen:

$$V'_{wj} = V_{wj} - \frac{A_j}{\sum_{i=1}^n A_i - \sum_{i=1}^{n_t} A_i} \sum_{i=1}^{n_t} V_{wi} \quad (3)$$

mit

n_t - Zahl der nichtüberstauten Teilflächen innerhalb einer Zelle des größeren Rasters,

n - Anzahl aller Teilflächen

V_{wj} Einstauvolumen der Zelle j

V'_{wj} korrigiertes Einstauvolumen der Zelle j (siehe Abbildung 3)

Durch die Reduzierung der Überstauvolumina werden die Einstauhöhen aller n_t Teilflächen automatisch zu Null. Das Einstauvolumen, welches durch die Betrachtung der mittleren Höhe fälschlicherweise als negatives Volumen diesen Teilflächen zugeordnet war, wird mit Gl. (3) nun flächenproportional auf die anderen Flächen verteilt, wodurch die Volumenbilanz als Grundlage der hydraulischen Berechnung erhalten bleibt.

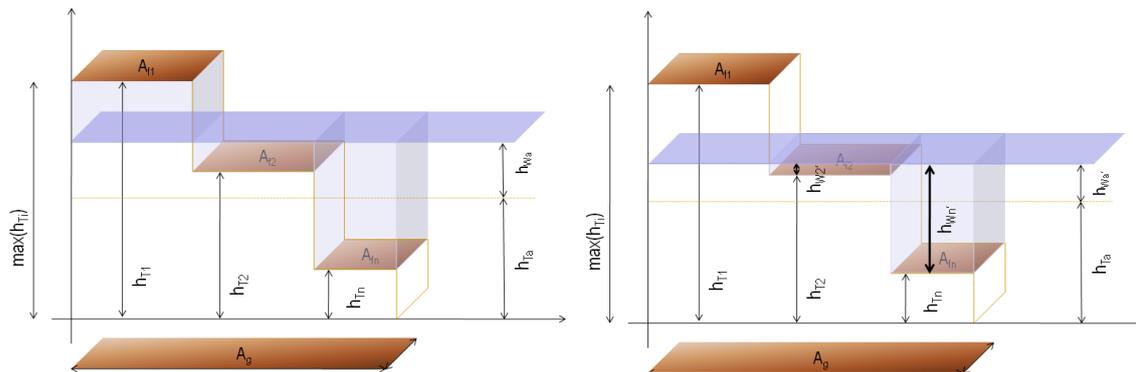


Abbildung 3: Schematische 3D-Darstellung der Teilweise überschwemmten Rasterzellen vor (links) und nach (rechts) Umverteilung des Überschwemmten Volumen

Nachfolgend ein Beispiel um die Vorteile dieser Vorgehensweise zu verdeutlichen. Betrachtet wurde die Unstrut, ein Nebenfluss der Saale, die auf einer Strecke von 192 km durch Thüringen und Sachsen-Anhalt fließt. Im Rahmen des RIMAX- Projektes „Entwicklung eines integrativen Planungssystem für den technischen Hochwasserschutz am Beispiel des Flussgebiets der Unstrut“ wurden Hochwasserrisikoabschätzungen mit 31 Hochwasserszenarien und einem gekoppelten 1D-2D- hydraulischen Modell [7] durchgeführt. Um die Hochwasserschäden zu ermitteln wurde der o.g. Umverteilungsalgorithmus angewandt. Zu dessen Entwicklung und Prüfung wurden zwei Teilgebiete von 4 km² detailliert analysiert:

- eine Fläche mit einem geringen Relief an der mittleren Unstrut im Bereich Sömmerda, etwa 15 Flusskilometer unterhalb des HRB Straußfurt und
- eine Fläche mit deutlichen Reliefunterschieden durch einen durchbrochenen Höhenzug bei Oldisleben.

Die Überflutungssituationen in beiden Bereichen wurden mit Mike FLOOD simuliert, welches dem Abfluss im Gerinne in 1D (Mike 11) und die Ausbreitung des Wassers bei Ausuferung in 2D (Mike 21) berücksichtigt. Es wurden drei unterschiedliche Rasterauflösungen von 20m, 80m und 160m Rasterlänge und sechs unterschiedliche Jährlichkeiten der hydrologischen Belastungsszenarien, bezogen auf den Scheitelwert angenommen ($T= 25,50,100,200,500$ und $1000a$). Je nach verwendeter Auflösung des Geländemodells ergaben sich große Abweichungen zwischen den simulierten Wasserstandshöhen bei Verwendung der Rasterweiten von 20, 80 oder 160 m ($hM20$, $hM80$, $hM160$). Durch den Umverteilungsalgorithmus sollten diese Abweichungen minimiert werden. Er wurde in ArcGIS 9.3- Model Builder programmiert. Das GIS Modul verteilt die Einstauvolumina der 80 m- und 160 m- Raster in ein 20m- Raster um (Abbildung 4). Bei visueller Überprüfung fällt die sehr hohe Ähnlichkeit zwischen der hoch aufgelösten Modellierung und dem Ergebnis der Umverteilung auf: Gräben, Senken und Straßen erscheinen nach der Umverteilung auch bei großen Rasterweiten.

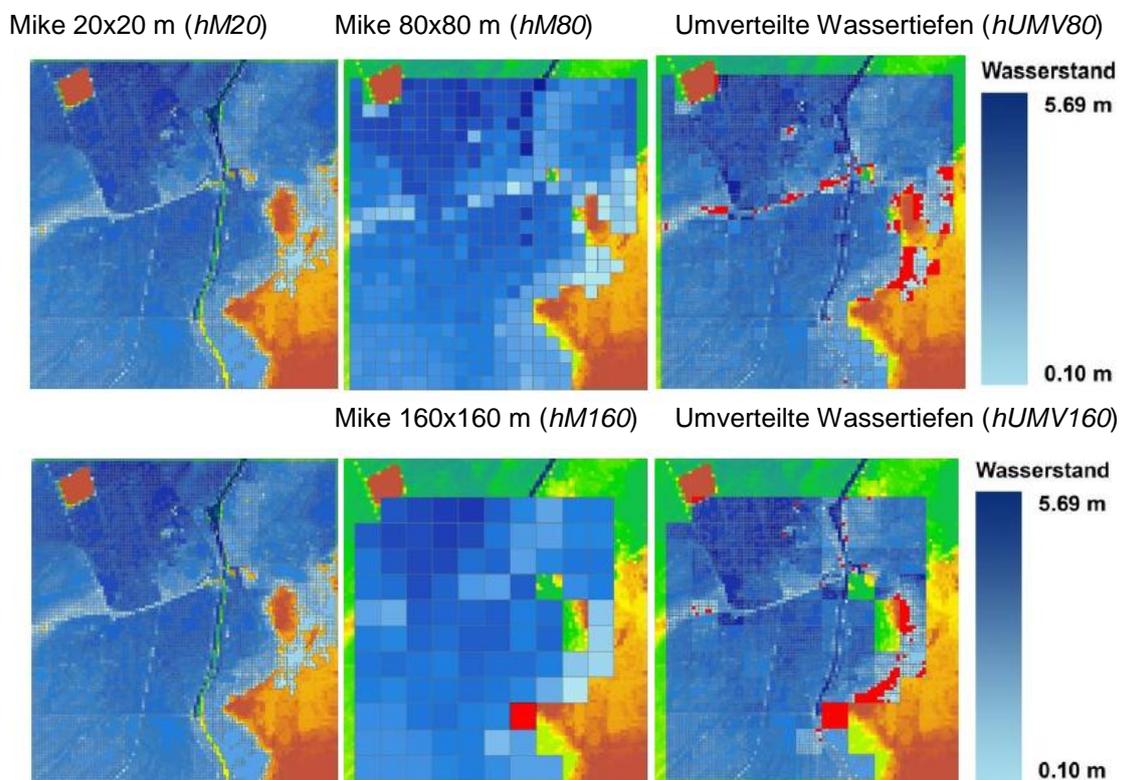


Abbildung 4: Veränderungen durch Umverteilung HQ 200 für das Gebiet Sömmerda. Flächen die im Ergebnis der Umverteilung trockenfallen sind rot markiert.

Der Nutzen der Umverteilung folgt aus der verringerten Rechenzeitanforderungen der hydraulischen Simulation. Diese dauert in einem 20m Raster etwa fünf Mal länger als in einem grob aufgelöstem Raster von 80m und etwa acht Mal länger als in einem 160m Raster. Der Rechenaufwand des GIS- Umverteilungsmoduls für die betrachteten 4 km² bewegt sich in Vergleich zur hydraulischen Berechnungen, die Stunden benötigen kann, damit im Minutenbereich. Die Unterschiedlichen Rechenzeitanforderungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Grob aufgelösten Raster werden im hydraulischen Modell

deutlich schneller durchgerechnet (Tab.1). Reliefstrukturierte Gebiete wie Oldisleben dauern etwas länger, weil mehr Iterationen erforderlich sind.

Tabelle 1: Rechenzeiten der hydraulischen Modelle in Mike und das Umverteilungsmodul in GIS bei verschiedenen hydrologischen Belastungen

Teilgebiet	Raster	Hydraulische Modellierung			GIS-Umverteilungsmodul		
		Mittelw. [s]	Min [s]	Max [s]	Mittelw. [s]	Min [s]	Max [s]
Oldisleben	20	5150	964	9319	-	-	-
	80	966	368	1531	121	96	184
	160	732	333	1089	93	74	148
Sömmerda	20	4702	288	11349	-	-	-
	80	819	232	2071	171	106	214
	160	548	213	1514	138	82	153

Um die summarischen Effekte abzuschätzen, wurde eine Gesamtstrecke von ca. 160 km Länge und mit 385 km² potentieller Überflutungsflächen simuliert. Für die Ermittlung der Überflutungsflächen wurde im Sinne der gewählten mesoskaligen Betrachtungsweise eine räumliche Modellauflösung von 150m Kantenlänge gewählt [10]. Dennoch dauerte der Rechenaufwand für die hydraulische Modellierung einer einzigen Hochwasserwelle je nach Größe des Ausuferungsbereiches mehrere Tage bis zu einer Woche, die darauffolgende Umverteilung der Überschwemmungsflächen auf ein 20m Raster dagegen nur einige Stunden. Eine Modellierung mit dem 20m Raster erwies sich als rechentechnisch nicht praktikabel. Bei einer Erhöhung der Detaillierung steigen die rechentechnischen Anforderungen des GIS-Moduls in deutlich geringerem Maße als die der hydraulischen Module.

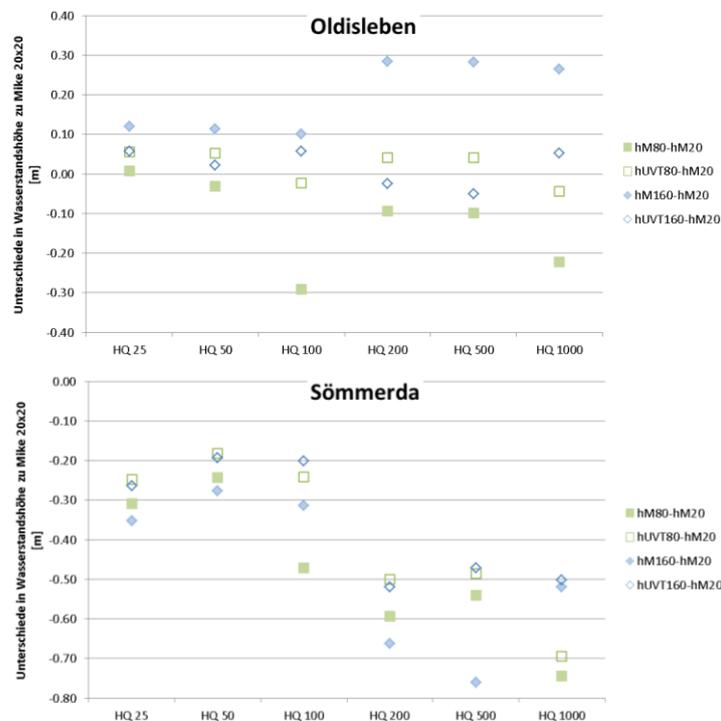


Abbildung 5: Darstellung der Effektivität des Umverteilungsmoduls mittels flächengewichtete Unterschiede in Wasserstand zwischen hydraulische Analysen mit niedrige Auflösungen und der höchste Auflösungen [in m].

Noch bedeutsamer als die Reduzierung der Rechenzeit ist die Verringerung der Fehler, die auftreten, wenn hydraulische Modelle mit einem zu großen Raster gerechnet werden. In Abbildung 5 ist der Unterschied zwischen den Wasserstandshöhen für die verschiedenen hydraulischen Belastungsszenarien und unterschiedliche Rasterweiten mit und ohne Verwendung des Umverteilungsmoduls dargestellt. Diese werden mit der Größe des Hochwassers (d.h. der überfluteten Flächen) zwangsläufig größer. Ersichtlich wird das bei einem ausgeprägten Relief der Umverteilungsalgorithmus die Abweichungen deutlich verringert.

Die Auswirkungen der korrigierten Wasserstände auf die Schadensabschätzungen sind in der Abbildung 6 dargestellt. Ersichtlich wird eine Annäherung an hochauflösende Betrachtungen im Ergebnis der Umverteilung der Einstauvolumina.

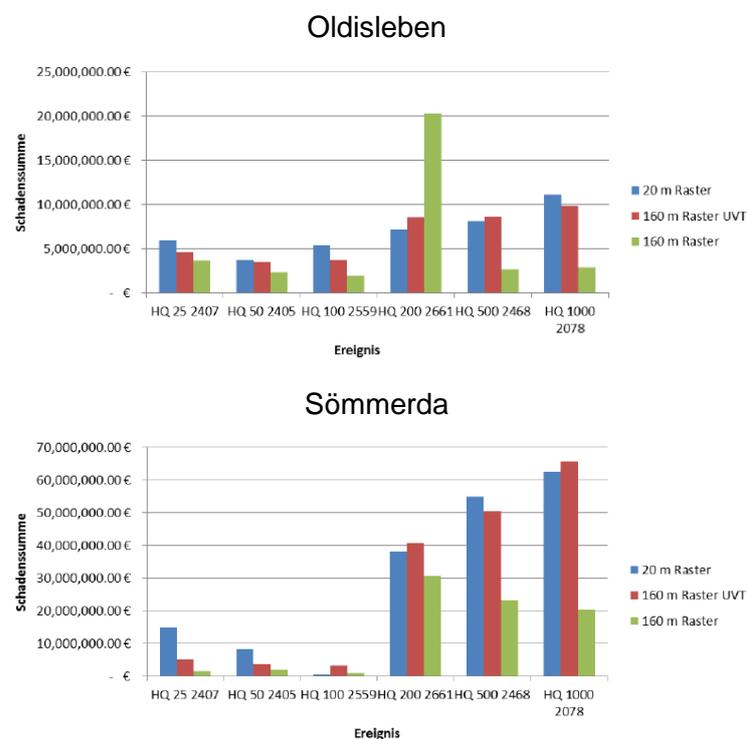


Abbildung 6: Effekte des GIS-Umverteilungsmoduls auf die Schadensbestimmung für die 160m Raster Ausgangsdaten.

2.3 GIS basierte Ergebnisanalyse als Teil der Maßnahmeplanung

Für eine vergleichende Beurteilung verschiedener Planungsalternativen erfolgt häufig eine Aggregation der Kriterien über den Raum, womit der räumliche Bezug, der bei Simulationsrechnungen berücksichtigt wurde, verloren geht [6]. Ein multikriterieller Vergleich der verschiedenen Alternativen kann mit räumlich aggregierten Kriterien mit Hilfe von Algorithmen wie z.B. Fuzzy-AHP [3] oder Fuzzy-TOPSIS [2; 4; 11] erfolgen. Gerade bei Planungen von Hochwasserschutzmaßnahmen ist es aber sinnvoll die räumliche Verteilung der Vor- und Nachteile der einzelnen Alternativen zu berücksichtigen umso eine flächendifferenzierte Bewertungen in die Entscheidungsfindung einfließen zu lassen.

Im Rahmen der Hochwasserschutzplanung der Unstrut wurde eine grafische Oberfläche in VBA in ArcGIS9.3 programmiert, die räumlich differenzierte Entscheidungsgrundlagen liefert. Durch diese Einbindung in das GIS können sowohl Entscheidungen an Hand des Gesamtgebietes als auch auf der Grundlage differenzierter Betrachtungen von Teilgebieten (hier: der Gemeinden) unterstützt werden. Als entscheidungsrelevante Kriterien wurden die ökonomischen Schäden in Abhängigkeit von der Hochwasserintensität, der Flächenverbrauch der Hochwasserschutzmaßnahmen, die Zahl der betroffenen Personen, differenziert nach der demographischen Struktur, die Zahl der betroffenen, besonders verwundbaren Einrichtungen (z.B. Krankenhäuser, Altenheime usw.) sowie die Bau- und Betriebskosten der Maßnahmen berücksichtigt. Durch flächendifferenzierte Anwendung der multikriteriellen Entscheidungsunterstützungsverfahren (hier mit Fuzzy-TOPSIS) kann die in

Abbildung 7 dargestellte Akzeptanz der verschiedenen Planungsalternativen (sechs verschiedene Hochwasserschutzmaßnahmen in diesem Flussgebiet) flächendifferenziert abgeschätzt werden (in der Abbildung am Beispiel einer hydrologischen Belastung mit dem HQ(100)). Die in einzelnen Maßnahmen können in verschiedenen Teilgebieten (grün dargestellt) die höchste Akzeptanz aufweisen, in anderen Gebietsteilen jedoch abgelehnt werden (rot dargestellt). Durch entsprechende Zoom- Funktionen können die Ursachen dieser geringen Akzeptanz (z.B. geringe Wirksamkeit oder zu hohe Kosten) ermittelt werden. Kompromisslösungen sind als solche ebenso erkennbar wie Lösungen, die in Folge ihrer geringen Akzeptanz in

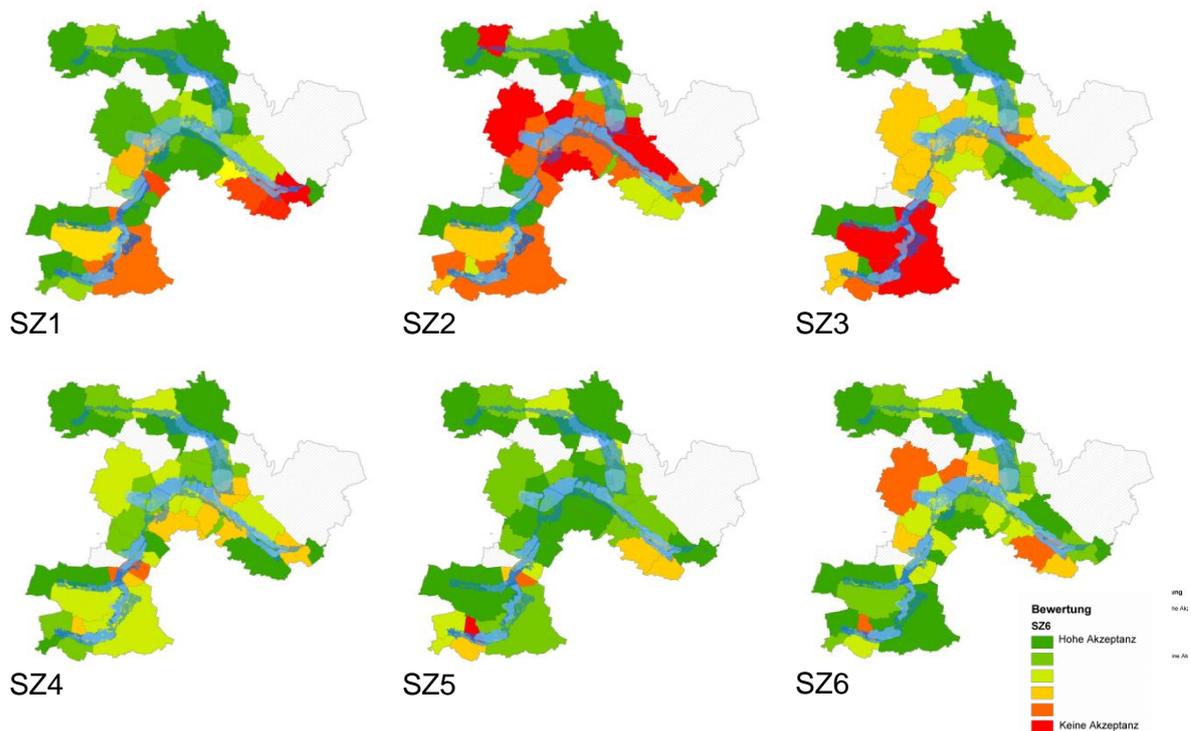


Abbildung 7: Räumlich differenzierte Bewertung von sechs Planungsalternativen des technischen Hochwasserschutzes an Hand eines, mit Hilfe von F-TOPSIS ermittelten Gesamtkriteriums „Akzeptanz“ bei Betrachtung eines HQ(100) als hydrologische Belastung vereinzelter Teilgebieten nachgebessert werden sollten.

3 DISKUSSION

Ein risikoorientierter Planungsansatz ist in größeren Flussgebieten nur mit Hilfe flächenverteilt arbeitender Simulationsmodelle umsetzbar. Die erforderlichen hydraulischen Berechnungen zur Ermittlung der Überflutungsflächen und die Bewertung der möglichen Schäden unter Berücksichtigung der Flächennutzungen setzen hierbei allerdings rechentechnische Grenzen. Aufgrund beschränkter Rechnerkapazitäten ist die räumliche und zeitliche Auflösung der hydraulischen Modelle bei Betrachtung einer größeren Menge von Belastungsszenarien oftmals zwangsläufig niedrig. Diese geringen Auflösungen führen zu Ungenauigkeiten in der Modellierung von Überflutungsflächen und der Ermittlung der resultierenden Schäden. Es wurde gezeigt, dass Geographische Informationssysteme zumindest partiell die Aussagefähigkeit derartiger Analysen erhöhen können, in dem das Überflutungsvolumen anhand eines höher aufgelösten DGM umverteilt wird, um so die Überflutungsflächen und –tiefen differenzierter zu ermitteln und eine exaktere Berechnung der Schäden zu ermöglichen.

Geographische Informationssysteme können auch in der Entscheidungsunterstützungsphase des Hochwasserrisikomanagements wichtige Beiträge liefern. Zu oft wird die mögliche Nutzung räumlicher Informationen in dieser letzten Phase der Vorplanung vernachlässigt. Die von der EU geforderte Bürgerbeteiligung setzt jedoch die differenzierte Erfassung der zu erwartenden positiven und negativen Effekte voraus, die zumindest für politische Verwaltungseinheiten spezifiziert werden sollte.

Hier wurde die Anwendung von GIS nur in zwei Bereichen aufgezeigt: bei der Schadensermittlung mit variabler Rasterweite und der räumlich differenzierten Entscheidungsunterstützung. Beide Beispiele belegen, wie durch die Anwendung von GIS die Umsetzung der EU- Hochwassermanagementrichtlinie wesentlich effektiver und auf einem qualitativ höheren Niveau erfolgen kann.

4 LITERATUR

- [1] H. Apel, A.H. Thieken, B. Merz, and G. Bloschl, Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2004) 295-308 2004.
- [2] A. Behzad, H. Farzad, M. Ahmad, and M. Golam ali, Extension of fuzzy TOPSIS method based on interval-valued fuzzy sets. *Appl. Soft Comput.* 9 (2009) 457-461.
- [3] D.-Y. Chang, Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, Beijing, 1996.
- [4] C.-T. Chen, Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems* 114 (2000) 1-9.
- [5] G. Di Baldassarre, G. Schumann, P.D. Bates, J.E. Freer, and K.J. Beven, Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal* 55 (2011) 364-376.

- [6] J. Dietrich, and A.H. Schumann, Werkzeuge für das integrierte Flussgebietsmanagement - Ergebnisse der Fallstudie Werra. - Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft Weißensee, Berlin, 2006.
- [7] P. Kamrath, M. Disse, M. Hammer, and J. Köngeter, Assessment of Discharge through a Dike Breach and Simulation of Flood Wave Propagation. *Natural Hazards* 38 (2006) 63-78.
- [8] M. Musall, P. Oberle, and F. Nestmann, Hydraulic Modelling. in: A.H. Schumann, (Ed.), *Flood Risk Assessment and Management*, Springer, 2011, pp. 187-209.
- [9] D. Nijssen, A.H. Schumann, M. Pahlow, and B. Klein, Planning of technical flood retention measures in large river basins under consideration of imprecise probabilities of multivariate hydrological loads. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9 (2009) 1349-1363.
- [10] M. Pahlow, A.H. Schumann, D. Nijssen, B. Klein, M. Kufeld, H. Schüttrumpf, J. Hirschfeld, and U. Petschow, Risikobasierte Analyse zu Planung und Bewertung technischer Hochwasserschutzmaßnahmen am Beispiel des Flussgebiets der Unstrut. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 53 (2009) 179-184.
- [11] F. Torfi, R.Z. Farahani, and S. Rezapour, Fuzzy AHP to Determine the Relative Weights of Evaluation Criteria and Fuzzy TOPSIS to Rank the Alternatives. *Applied Soft Computing* 10 (2010).
- [12] O. Uran, and R. Janssen, Why are spatial decision support systems not used? Some experiences from the Netherlands. *Computers, Environment and Urban Systems* 27 (2003) 511-526.