

Johannes Wesemann, Markus Eder, Helmut Habersack, Karl Hogl, Lukas Löschner, Ralf Nordbeck, Patrick Scherhauser, Bernhard Schober, Walter Seher, Nina Zahnt & Mathew Herrnegger

Regionale Entwicklung des Hochwasserrisikos unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen

Regional development of flood risk under consideration of future development

Die Planung von Hochwasserschutzprojekten und -maßnahmen erfordert die Abschätzung komplexer Auswirkungen und deren Umsetzbarkeit auch auf regionaler Ebene, um eine Integration in ein ganzheitliches Hochwasserrisikomanagementkonzept zu gewährleisten. Die vorgestellte Methode der Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) stellt hierfür einen integrativen, interdisziplinären Ansatz dar. Mit Hilfe von sieben Parametern werden die Hochwassergefährdung, die Exposition und das Schadenspotenzial für verschiedene Planungsvarianten und Szenarien bewertet. Ergebnisse eines Anwendungsbeispiels an der Raab in Österreich zeigen, wie zwei Varianten mit 1) geplanten Schutzmaßnahmen und Infrastrukturprojekten sowie 2) einer weiteren Siedlungsentwicklung zwar eine Reduzierung des Hochwasserrisikos bringen, kleinräumig jedoch stark negative Auswirkungen auf das Hochwasserabflussgeschehen haben können. So zeigt sich der Nutzen des Hochwasserschutzes zum Beispiel durch eine Reduktion des Schadenspotenzials bei einem HQ_{100} um bis zu 72 % verglichen zum Status Quo, jedoch bei gleichzeitiger Erhöhung und Beschleunigung der Abflusswelle im anschließenden Gewässerabschnitt. Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels in einem Worst-Case-Szenario mit einer Erhöhung des Abflussscheitels um 10 % sind lokal sehr unterschiedlich und zeigen die Empfindlichkeit des Gesamtsystems. So werden projektierte Maßnahmen im Anwendungsbeispiel vom Klimawandelzuschlag meist nicht beeinflusst, es kommt jedoch teilweise zu Überflutung im Bestand, sodass Siedlungs- und Industriegebiete überflutet werden, was wiederum zu einer Erhöhung der potenziellen Schäden führt. Die Methodik der RegioFEM wurde im Zuge eines Scientist-Stakeholder-Workshops evaluiert und deren mögliche Integration in bestehende Konzepte überprüft. Hierbei wurde vor allem der fächerübergreifende und regionale Ansatz positiv bewertet und eine mögliche Berücksichtigung im Zuge der Erstellung von Gewässerentwicklungs- und Risikomanagementkonzepten (GERM) angedacht.

Schlagwörter: Hochwasserrisiko, Schadenspotenzial, Klimawandel, Raumplanung, Landnutzungsänderung

The planning of flood protection projects requires a thorough analysis of the impacts of the measures and their feasibility also on a regional level in order to guarantee an integrated flood risk management concept. The presented method of the Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) is an integrative, interdisciplinary approach taking this into consideration. On the basis of seven parameters, the flood hazard, the hazard exposure and the damage potential are estimated for different planning variants and scenarios. The results of the application for a river reach of the river Raab in Austria for the two variants with 1) projected flood defence measures and infrastructure projects and 2) future settlement development, show that the flood risk is decreasing but is also leading to a strong negative impact on the runoff behaviour on a smaller scale. The benefit of the flood protection measures can clearly be seen by the decrease in damage potential by up to 72 % for the HQ_{100} compared to the status quo, but at the same time this leads to an increase and to the acceleration of the flood wave in the adjacent river section. The possible impacts of climate change in a worst-case scenario (increased runoff-peak of 10 %) vary quite strongly on the local scale, which highlights the sensitivity of the whole system. The newly developed protection measures in the Raab case study are mostly unaffected by climate change, but existing structures in residential and industrial areas can be flooded, leading to an increase of the damage potential.

The RegioFEM method has also been evaluated in a scientist-stakeholder workshop, where the integration into existing concept was also analysed. There, the interdisciplinary approach and the regional assessment has been stressed out as a very important aspect and a possible integration of the RegioFEM in the design of river development and risk management concepts (GERM) was also emphasised.

Keywords: Flood risk, damage potential, climate change, spatial development, land use change

1 Einleitung und Zielsetzung

Trotz ihres Gefährdungspotenzials durch Überflutungen werden flussnahe Gebiete seit jeher besiedelt und intensiv genutzt. Der Fluss als Transportweg, die Auenlandschaften als fruchtbare Bewirtschaftungsflächen und die Verfügbarkeit von Wasser zur Bewässerung sind Gründe für die verstärkte Siedlungstätigkeit entlang der Flüsse (HOHENSINNER et al., 2004; MAUCH und ZELLER, 2008; DI BALDASSARRE et al., 2013). Damit stieg jedoch auch das Erfordernis, hochwertige Nutzungen durch technische Schutzmaßnahmen gegen wiederkehrende Hochwasserereignisse zu schützen. Solche Schutzmaßnahmen führten jedoch auch zu einer erhöhten Siedlungs- und Wirtschaftsentwicklung, welche in weiterer Folge und trotz dieser Maßnahmen zu einer Zu-

nahme der Hochwasserschäden in Europa und der Welt führten (BARREDO, 2009; UNISDR, 2011).

Die Notwendigkeit eines integrativen Managements, welches nicht nur die technische Hochwasserabwehr berücksichtigt, sondern auch Aspekte wie den natürlichen Wasserrückhalt und die weitergehende Hochwasservorsorge (Berücksichtigung des Restrisikos, Flächen-, Bau-, Verhaltens- und Risikovorsorge), wurde in Deutschland bereits im Jahr 1995 durch die "Leitlinie für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz" gefordert (LAWA, 1995). Mit der EG-Hochwasserrichtlinie (EG-HWRL) (EG, 2007) wurde für diese Ansätze auf europäischer Ebene der rechtliche Rahmen für einen veränderten Umgang mit Hochwassergefahren geschaffen. Auch hier tritt anstelle der vorwiegend technischen, lokalen

Schutzmaßnahmen ein breiterer Ansatz des Hochwasserrisikomanagements in den Vordergrund. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei das Flussgebietsmanagement, eine überregionale Betrachtung auf Einzugsgebietsebene, um die Auswirkungen von Maßnahmen über die Gemeinde-, Bundesländer- oder Staatsgrenzen hinaus abschätzen zu können. Grundlage dafür bildet eine Analyse aller wichtigen Einflussfaktoren, neben den technischen Maßnahmen auch der Verlust von natürlichen Retentionsflächen, die zunehmende Siedlungsentwicklung sowie die Vermeidung und Verringerung nachteiliger Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten. Des Weiteren wird die technische, finanzielle und politische Überprüfung von geplanten Maßnahmen und Entwicklungen gefordert.

Um eine Bewertung von Hochwasserrisikokonzepten und Auswirkungen von Schutzmaßnahmen durchführen zu können, wurden bereits verschiedene, multikriterielle Ansätze (multicriteria approach – MCA) entworfen. Hierbei wird oft eine Kombination aus ökonomischen, ökologischen und sozialen Indikatoren verwendet, wie sie auch von KIENBERGER et al. (2009) entwickelt wurden. Ziele solcher Ansätze sind unter anderem die Erstellung von Risikokarten (MEYER et al., 2009), die Schaffung von Grundlagen für Kosten-Nutzen-Analysen (BROUWER und VAN EK, 2004), die Untersuchung der Einflüsse auf verschiedene Stakeholdergruppen (KUBAL et al., 2009) oder die zusätzliche Bewertung und Integration der Anpassungsfähigkeit (SCHEUER et al., 2011). Entscheidend bei diesen Verfahren ist jedoch die notwendige Skalierung und Gewichtung der verschiedenen Indizes (PAPAIOANNOU et al., 2014), was zu einem Verlust der Objektivität der Beurteilung führt, da jede Gewichtung auch eine Wertentscheidung ist. Vor allem bei Entscheidungen hinsichtlich lokaler und regionaler Hochwasserschutzmaßnahmen kann die Bewertung je nach Hintergrund der EntscheidungsträgerInnen durchaus unterschiedlich sein. Die Verwendung dieser Methoden in wissenschaftlichen Studien und umfangreichen Analysen ist trotzdem empfehlenswert und wurde in Österreich mit Hilfe der Floodplain Evaluation Matrix (FEM) angewendet (HABERSACK et al., 2015). Erfahrungen und Rückmeldungen von Stakeholdern und politischen Entscheidungsträgern zeigen jedoch auch, dass durch die Komplexität und die erforderlichen Fachkenntnisse eine breite Anwendung sowie eine Integration in Planungsprozesse und zu Prognosezwecken schwierig ist.

In diesem Beitrag wird daher die RegioFEM, eine Adaptierung der ursprünglichen FEM, als interdisziplinäre und integrative Methode zur Untersuchung des Hochwasserrisikos und der Bewertung von Planungsmaßnahmen am Beispiel eines ausgewählten Flussabschnittes der Raab in der Steiermark (Österreich) vorgestellt. Ziel des Beitrags ist es, anhand der praktischen Anwendung der Methode die Vorteile und Herausforderungen einer fachübergreifenden und vorausschauenden Bewertung von Hochwasserrisiken auf regionaler Ebene darzustellen und die langfristigen Auswirkungen unterschiedlicher Planungs- bzw. Entwicklungsvarianten, auch unter der Berücksichtigung des Klimawandels, in einem längeren Flussabschnitt zu ermitteln. Eine Bewertungsmatrix, als eines der Ergebnisse der Methode, welche Indizes und deren Ausprägungen in den verschiedenen Planungsvarianten und -szenarien darstellt, bildet die Grundlage für eine gemeinsame Entscheidungsfindung der verschiedenen Fachbereiche zur Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Dadurch können

auch sektorübergreifende Herausforderungen und Erfordernisse der (horizontalen) Politikkoordination aufgezeigt sowie anhand der Bewertung von Oberlieger-Unterlieger-Zusammenhängen einzugsgebietsbezogene Planungen unterstützt werden. Hierbei werden bewusst Indikatoren verwendet, die bei Bedarf komplexer oder detaillierter gestaltet werden können, sowie Datengrundlagen genutzt, die in ähnlicher Form im gesamten deutschsprachigen Raum vorliegen. Dadurch entsteht eine flexible und einfach zu übertragende Methodik. Eine Anwendung von Planern und den für die (über-) regionale Betrachtung (einzelne bis mehrere Bezirke/Landkreise) zuständigen Behörden (Wasserwirtschaftsämter/Landesbehörden) wird dadurch ermöglicht sowie bei Bedarf eine Präzisierung zugelassen. In diesem Beitrag werden weiterhin noch das Schadenspotenzial und die mittlere jährliche Schadenserwartung detaillierter analysiert, da diese als integrative, monetäre Bewertungsparameter gesehen werden und die Gesamtwirkungen auf das Hochwasserrisiko zusammenfassen.

2 Die Methodik der RegioFEM am Fallbeispiel Raab

Die Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) ist eine Weiterentwicklung der FEM-Methode (HABERSACK et al., 2015). Sie ist als fachübergreifende Methode zur integrierten Bewertung von verschiedenen Planungsvarianten und Szenarien im Überflutungsflächenmanagement konzipiert und verfolgt das Ziel, Planungsentscheidungen im regionalen Hochwasserrisikomanagement zu unterstützen.

Die RegioFEM basiert auf folgenden Grundsätzen:

- **Regionaler Ansatz:** Vermeintlich lokale Lösungen im Hochwasserschutz (z. B. lineare Schutzmaßnahmen, Rückhaltebecken) haben Auswirkungen auf flussabwärts gelegene Gebiete. Einerseits kann die Abkoppelung von Überflutungsflächen u. a. Abflussspitzen und -geschwindigkeiten erhöhen, andererseits trägt der flächige Hochwasserrückhalt zu einer Minderung des Gefahrenpotenzials im Unterliegerbereich bei. *Die RegioFEM ermöglicht eine Berücksichtigung dieser positiven wie negativen Effekte entlang von Flussläufen durch eine regionale Bewertung von Überflutungsflächen.*
- **Interdisziplinärer Ansatz:** Ein regionales Überflutungsflächenmanagement erfordert Fachkenntnisse hinsichtlich (i) der hydrologischen/hydraulischen Wirksamkeit von Hochwasserrückhaltegebieten, (ii) der räumlichen Verteilung von hochwassere exponierten und schadensanfälligen Nutzungen, (iii) der Verfügbarkeit von Überflutungsflächen sowie (iv) der Kooperationsstrukturen zwischen den Anrainern in Flusseinzugsgebieten. *Ausgehend von einem interdisziplinären Grundverständnis verbindet die RegioFEM natur-, technik- und sozialwissenschaftliche Expertise und liefert disziplinübergreifende Bewertungs- und Entscheidungsgrundlagen für die Umsetzung unterschiedlicher Planungsvarianten.*
- **Sektorübergreifender Ansatz:** Die Schaffung von Überflutungsflächen wie auch deren Verlust gehen mit Landnutzungsänderungen in Flussgebieten einher. Die Bereitstellung von Überflutungsflächen ist in der Regel mit Nutzungseinschränkungen verbunden (z. B. Verbot von Baulandwidmung).

gen, Auflagen bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmethoden); hingegen hat die Hochwasserfreistellung von ehemaligen Überflutungsbereichen meist erhöhte Siedlungstätigkeiten in "hochwassergeschützten" Bereichen zur Folge. Die RegioFEM bietet eine Möglichkeit, die sektorübergreifende Abstimmung insbesondere zwischen den Fachbereichen Hochwasserschutz, Raumplanung sowie Land- und Forstwirtschaft zu forcieren, um die Wechselwirkungen zwischen Hochwasserschutz und Landnutzung in Planungsprozessen konsequenter berücksichtigen zu können.

- **Vorausschauender Ansatz:** Entscheidungen im Hochwasserschutz sowie landnutzungsbezogene Entscheidungen sollten langfristig orientiert sein. Sie wirken oft über mehrere Jahrzehnte hinaus. In diesem Zeitraum können klimawandelbedingte Veränderungen im Wasserkreislauf das Hochwassergeschehen (Gefahrenpotenzial) nachteilig beeinflussen. Aufgrund sozio-ökonomischer Dynamiken in den Flusseinzugsgebieten finden in potenziellen Überflutungsbereichen Siedlungstätigkeiten und Veränderungen der Landnutzung statt, die ebenfalls das Schadenspotenzial erhöhen können. Die RegioFEM berücksichtigt eine zukünftige Baulandentwicklung bzw. zu erwartende Klimawandeleffekte innerhalb des Planungshorizonts. Sie ermöglicht dadurch ein vorausschauendes Überflutungsflächenmanagement und die Anpassung an zukünftige Hochwasserrisiken.

Die RegioFEM umfasst vier aufeinander aufbauende Teilschritte, mit denen eine Entscheidungsgrundlage für ein regionales Überflutungsflächenmanagement geschaffen wird (Abb. 1).

2.1 Schritt I: Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

Die RegioFEM wurde für die Untersuchung von Flussstrecken entwickelt. Gemäß des Skalenansatzes der Floodplain Evaluation Matrix, FEM (HABERSACK et al., 2015) ist diese meso-skalige Betrachtungs- und Bearbeitungsebene zwischen makro-skaligen Ansätzen (ganze Flusssysteme) und mikro-skaligen Ansätzen (einzelne Überflutungsflächen) angesiedelt. Dem meso-skaligen Ansatz entsprechend wird das Untersuchungsgebiet in einzelne Flussabschnitte unterteilt. Deren Abgrenzung erfolgt durch das

Setzen von Kontrollpunkten unter Berücksichtigung der vorherrschenden Topographie (Talmorphologie, Gefälle), Hydrologie (Grenzziehung bei wichtigen Zubringern) und Raumnutzung (Siedlungsgebiete) (Abb. 2).

Entsprechend dieser meso-skaligen Betrachtung können beliebig lange Flussstrecken mit einer variablen Anzahl von Streckenabschnitten als Untersuchungsgebiet der RegioFEM definiert werden. Folglich ist die Anwendung der Methode auch für die sogenannten "Gebiete mit potenziellem signifikantem Hochwasserrisiko" (APSFR) geeignet, die in Österreich eine durchschnittliche Länge von 6,8 km aufweisen (BMLFUW, 2011). Die RegioFEM ermöglicht aber auch Untersuchungen an längeren Flussabschnitten, wie Fallstudien an der Salzach (HOGL et al., 2018) und an der Raab, welche zur Entwicklung der Methode verwendet wurden, gezeigt haben.

Das Einzugsgebiet der Raab, einem rechtsufrigen Zubringer der Donau, liegt größtenteils innerhalb des Bundeslands Steiermark im Südosten Österreichs. Es hat eine Gesamteinzugsgebietsfläche von 986,5 km² und eine Flusslänge von 298 km, wobei davon ca. 100 km innerhalb Österreichs verlaufen. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von km 266 bis km 228 und befindet sich somit im Mittellauf der Raab. Die Abflussverhältnisse am Pegel Feldbach sind in Tabelle 1 dargestellt. Spitzenabflüsse sind in der Vergangenheit jahreszeitunabhängig aufgetreten (WISA, 2019), der Scheitel der Inputwelle für das HQ₁₀₀ beträgt 303 m³/s. In den letzten Jahrzehnten wurden im Bereich des Untersuchungsgebietes einige Hochwasserschutzmaßnahmen umgesetzt, vor allem in den größeren Städten Gleisdorf (LAND STEIERMARK, 2019) und Feldbach (LAND STEIERMARK, 2013). Nichtsdestotrotz wird das Gesamtrisiko in dem Flussabschnitt, insbesondere in der Gemeinde Feldbach, im Hochwasserrisikomanagementplan 2015 als sehr hoch bewertet (BMLFUW, 2015), wobei hier besonders die menschliche Gesundheit und die wirtschaftliche Tätigkeit als Schutzgüter stark gefährdet gesehen werden. Zur Erweiterung des Hochwasserschutzes sind daher weitere Maßnahmen geplant sowie die Integration des länderübergreifenden Hochwasserprognosemodells der gesamten Raab (LAND STEIERMARK, 2019) in ein Frühwarnsystem (RAAB FLOOD 4CAST, 2019).

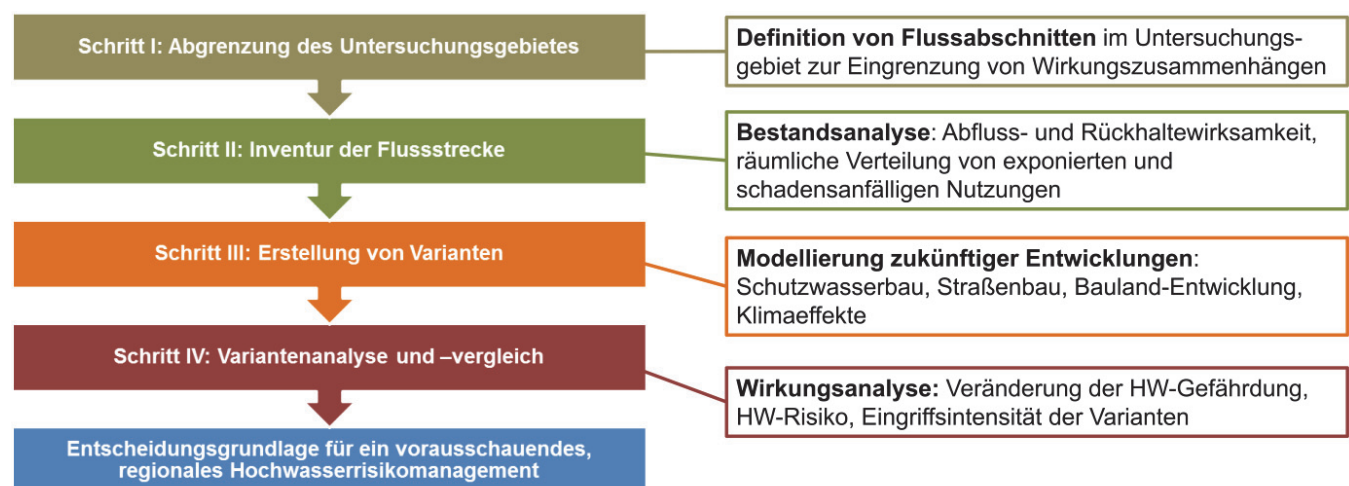


Abbildung 1

Abfolge der Teilschritte der RegioFEM.
Methodological steps of the RegioFEM.

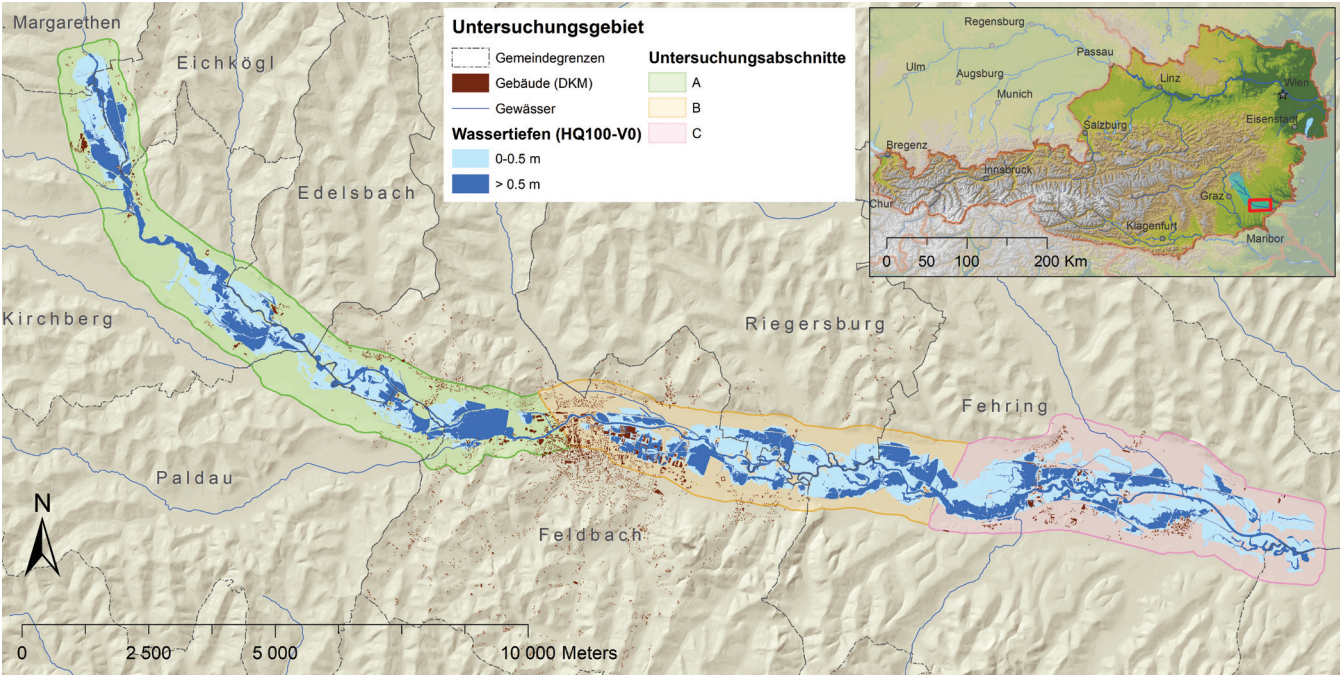


Abbildung 2
Flussstrecke des Raab-Untersuchungsgebietes mit drei definierten Flussstreckenabschnitten (A, B, C).
River segment of the Raab case study with three defined river sections (A, B, C).

Die Retentionswirkung der einzelnen Überflutungsflächen im Untersuchungsgebiet wurde bereits von POLLAK (2014) mittels der ursprünglichen FEM auf ihre Wirkung zur Reduktion der Hochwassergefährdung überprüft. Eine Abflussuntersuchung bildet die Grundlage für die hydraulischen Modellierungen. Als Untersuchungsgebiet für die RegioFEM wurde ein 38 km langer Abschnitt der Raab zwischen St. Margarethen an der Raab und Neumarkt an der Raab gewählt, welcher neun Gemeinden umfasst. Der überwiegend größte Teil der Überflutungsflächen bei einem HQ_{100} sind landwirtschaftlich genutzte Flächen (82,0 %) und nur kleine Teile werden als Betriebsflächen/Industrie (4,8 %), Infrastruktur (2,8 %) und als Siedlungsgebiet (1,3 %) genutzt. Die restliche Überflutungsfläche liegt im Gewässer selbst und dessen Uferbereichen (9,2 %).

Das Untersuchungsgebiet wurde im ersten Schritt in drei Abschnitte unterteilt. Die Knotenpunkte wurden hierbei primär unter Berücksichtigung hydraulischer Aspekte so gewählt, dass der Abfluss an den Knotenpunkten bei HQ_{100} -Fall hauptsächlich im Flussschlauch stattfindet. Der erste Abschnitt (ca. 14 km) reicht bis kurz vor dem Stadtgebiet Feldbach, der zweite Abschnitt

(ca. 8 km) umschließt das Stadtgebiet Feldbach sowie die nachfolgenden Industriegebiete. Der dritte Abschnitt (ca. 8 km) befindet sich weiter flussabwärts, primär in der Gemeinde Fehring (Abb. 2).

2.2 Schritt II: Inventur der Flussstrecke

Ausgangsbasis der Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) ist eine Inventur der Flussstrecke (V0: Status Quo) für 30-, 100- und 300-jährliche Hochwasserabflussereignisse (HQ_{30} , HQ_{100} und HQ_{300}). Sie beinhaltet drei Komponenten: (i) die Bewertung der Hochwassergefährdung und der Abfluss- und Rückhaltewirksamkeit, (ii) die Ermittlung der Hochwasserexposition sowie (iii) die Erfassung des Schadenspotenzials. Folgende Parameter werden hierfür verwendet, welche in Schritt IV auch für die Bewertung von Varianten ausgewertet und nachfolgend genauer beschrieben werden (Tab. 2).

2.2.1 Hochwassergefährdung

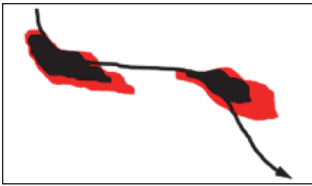
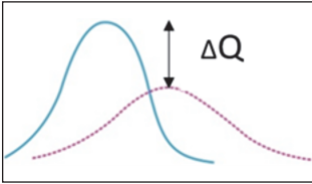
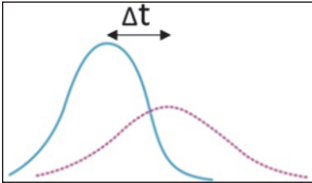
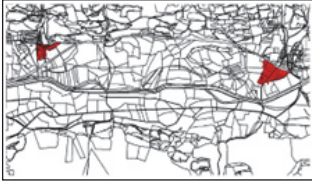
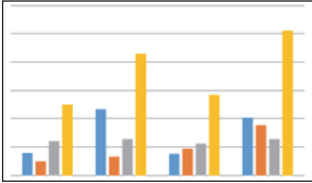
Überflutungsflächen haben abhängig von der Größe eines Hochwassers unterschiedliche Einflüsse auf das Abflussverhalten und den Rückhalt der Hochwasserwelle. Diese Auswirkungen werden mit drei hydraulischen und hydrologischen Parametern bewertet. Die Datengrundlage bildet hierbei, wie bei der Raab, meist eine hydraulische Modellierung des Untersuchungsgebiets, welche vorab anhand gemessener Hochwasserwellen und Überflutungsflächen kalibriert werden muss (HABERSACK et al., 2015).

Der erste Parameter ("Überflutungsfläche") zeigt die Ausbreitung des Hochwassers bei einem bestimmten Wiederkehrintervall und wird in ha angegeben. Dadurch können Regionen mit großen und natürlichen Überflutungsflächen hervorgehoben und hydro-morphologische Engstellen im Flusslauf aufgezeigt werden.

Tabelle 1	
Hydrologische Kennzahlen in m³/s des Untersuchungsgebiets aus der langjährigen Reihe des Pegels Feldbach/Raab (WISA, 2019).	
Hydrological key figures in m³/s for the study area from the long-term time series at the Felbach/Raab gauging station (WISA, 2019).	
NNQ	0,048
MJNQ	1,60
MQ	5,78
MJHQ	98,7
HHQ	200

Tabelle 2

Bewertungsparameter der RegioFEM und Datengrundlagen.
Parameters of the RegioFEM and data sources.

	Parameter	Datengrundlagen
Hochwassergefährdung	 Überflutungsfläche [ha]	- hydraulische Modellierung - Datenbanken (z. B. HORA) - Abflussuntersuchungen
	 Reduktion des Hochwasserscheitels [m³/s]	- hydraulische Modellierung - Abflussuntersuchungen
	 Zeitliche Verzögerung des Hochwasserscheitels [h]	- hydraulische Modellierung - Abflussuntersuchungen
Hochwassereposition	 Anzahl der betroffenen Gebäude [-]	- Überflutungsfläche verschnitten mit Gebäudeinformationen: - Digitale Katastralmappe - Flächenwidmungsplan - Gemeindeinformationen
	 - überflutetes Bauland [ha] - überflutete landwirtschaftliche Flächen [ha]	- Überflutungsfläche verschnitten mit Flächeninformationen: - Digitale Katastralmappe - Flächenwidmungsplan - Örtliche Entwicklungskonzepte
Schadenspotenzial	 Schadenspotenzial für Gebäude und Flächen [€]	Überflutete Flächen und Gebäude kombiniert mit Schadensfunktionen für die jeweilige Nutzungsart

Der zweite Parameter ("Scheitelreduktion") beschreibt die Veränderung der Hochwasserwelle entlang des Flusslaufs und zeigt, welchen Einfluss Hochwasserschutzmaßnahmen (lineare Dämme, Rückhaltebecken) und natürliche Rückhalteflächen auf die Hochwasserspitze haben. Er wird aus der Differenz des maximalen Abflusses am Beginn und dem Spitzenabfluss am Ende des simulierten Abschnittes für ein gegebenes Ereignis (z. B. HQ₁₀₀) berechnet und in m³/s angegeben. Je höher dabei der Wert, umso positiver sind die Auswirkungen auf die Hochwassergefährdung, da der Spitzenabfluss im Abschnitt stärker reduziert wird. Eine prozentuelle Steigerung der Scheitelreduktion ist demnach auch als positiv zu bewerten.

Der dritte Parameter ("Scheitelverzögerung") beschreibt die zeitliche Verschiebung des Auftretens der Hochwasserspitze entlang des Flusslaufs. Zusammen mit der Scheitelreduktion beschreibt dieser hydrologische Parameter die Retentionswirkung entlang des Flussabschnittes. Zusätzlich ist der Parameter wichtig zur Einschätzung der Möglichkeit von Akutmaßnahmen im Hochwasserfall (z. B. mobile Hochwasserschutzsysteme), da mit einer größeren zeitlichen Verschiebung der Hochwasserspitze längere Vorwarn- und Vorbereitungszeiten einhergehen. Der Parameter wird, ähnlich im Fall der Scheitelreduktion, durch die Differenz des Auftretenszeitpunkts des Spitzenabflusses am Beginn und am Ende der Fließstrecke berechnet und in Stunden angegeben. Auch hier ist daher eine Erhöhung der Scheitelverzögerung als

positiv zu bewerten. Eine Verknüpfung dieses Parameters mit den Schadensfunktionen und somit eine Monetarisierung ist derzeit nicht vorgesehen.

2.2.2 Hochwassereexposition

Zur Bewertung der Auswirkungen eines Hochwassers auf einen Flussabschnitt wird die Hochwassereexposition bestimmt, welche zusammen mit der Sensitivität die Vulnerabilität wiedergibt (MERZ, 2006). Im Falle der RegioFEM wird die Exposition über die Parameter "Anzahl der betroffenen Gebäude" sowie "überflutetes Bauland" und "überflutete landwirtschaftliche Flächen" dargestellt. Diese Parameter werden aus der Verschneidung der Überflutungsflächen mit der digitalen Katastralmappe (DKM) für die Lage und Ausdehnung der Gebäude und Grundstücke sowie mit dem Flächenwidmungsplan, welcher die Art der Widmung (und damit auch geplanter zukünftiger Nutzungen) wiedergibt, gewonnen. Die Daten können in Österreich über die GIS-Portale der Bundesländer, Fachabteilungen der Länder bzw. der Gemeinden oder (kostenpflichtig) über das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen bezogen werden. Die Aktualität der DKM-Daten ist jedoch stark abhängig von der Regelmäßigkeit der Aktualisierungen, weshalb eine Validierung der Daten mit Hilfe von Orthophotos sinnvoll sein kann (BRENNER et al., 2015). Um eine Übertragbarkeit und leichte Anwendbarkeit der Methode zu gewährleisten, wurde diesen Datenquellen gegenüber genaueren, georeferenzierten, aber nicht frei verfügbaren Datensätzen wie dem Adress-, Gebäude- und Wohnungsregister (AGWR) der Statistik Austria (2015) der Bundesanstalt Statistik Österreich, der Vorzug gegeben. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die fehlende Prognostizierbarkeit dieser sehr spezifischen Daten, weshalb auch auf die Angabe von betroffenen Personen verzichtet wurde, da hierzu weitere Modelle notwendig wären und zusätzliche Unsicherheiten eingeführt würden.

2.2.3 Schadenspotenzial

Das Hochwasserrisiko wird definiert als die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Hochwassers mit den damit verbundenen möglichen Schäden. Diese werden als das Schadenspotenzial bezeichnet. Das Schadenspotenzial wird in weiterer Folge zur Berechnung der mittleren, jährlichen Schadenserwartung genutzt. Grundsätzlich kann im Zuge einer Bewertung mit der Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) jegliche Art der Schadenspotenzialermittlung angewandt und der Detailgrad der Berechnungen an die speziellen Gegebenheiten angepasst werden.

Die Berechnung des Schadenspotenzials wurde bereits in verschiedenen Regionen, Skalen und Detaillierungsgraden in Österreich durchgeführt. So untersuchten NEUHOLD und NACHTNEBEL (2012) die verschiedenen Skalenaspekte. Deren Ergebnisse wurden im Zuge des Projekts "Antizipatorisches Hochwasserrisikomanagement unter Berücksichtigung von Klimawandelszenarien, RiskAdapt" (HOGL et al., 2015) unter anderem von NACHTNEBEL und APPERL (2015) sowie LÖSCHNER et al. (2017) umgesetzt. Die entwickelten Verfahren konnten in verschiedenen oberösterreichischen Einzugsgebieten angewendet werden (SCHULZ et al., 2014; SCHULZ et al., 2018).

Die Vorgehensweisen in diesen Studien sind grundsätzlich sehr ähnlich und liefern die Basis für die hier durchgeführte Methode. Dabei werden lediglich die direkten Vermögensschäden als Gebäudeschäden und Flächenschäden berücksichtigt. Zunächst

wurde hierzu eine Klassifizierung der verschiedenen Landnutzungen erstellt und die Exposition aus der Verschneidung der Überflutungsfläche und der Überflutungstiefe mit den klassifizierten Gebäuden und den flächigen Landnutzungen gewonnen. Ein Gebäude wird als betroffen gewertet, sobald 10 % der Fläche überflutet sind. In diesem Fall wurde die gesamte Gebäudefläche zur Berechnung des Schadens verwendet, da im Regelfall von einer Ausbreitung des Hochwassers innerhalb des Gebäudes ausgegangen werden kann. Dies soll auch zu einem gewissen Grad die Bauvorsorge widerspiegeln. Gleiches gilt für den erhöhten Schadensfunktionswert (Überflutungstiefe > 0,5 m), da ein weiteres Eindringen des Wassers ins Gebäude durch Stufen oder lokale Maßnahmen schwieriger verhindert werden kann. Bei den Schadensfunktionen kann grundsätzlich aus einer Vielzahl an Möglichkeiten gewählt werden (HUTTENLAU et al., 2015). Sowohl bei den bereits erwähnten Studien als auch bei SCHNEEBERGER et al. (2019) zeigten die Schadensfunktionen der BUWAL (1999) realistische Ergebnisse für eine Hochwasserrisikobewertung. Daher wurden diese einfachen Schadensfunktionen, basierend auf NACHTNEBEL et al. (2013), mit nur zwei Überflutungshöhen für die RegioFEM verwendet und eine Aufzinsung auf das Jahr 2018 durchgeführt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die verwendeten Landnutzungsklassen und die korrespondierenden Schadensfunktionen. Grundsätzlich muss jedoch beachtet werden, dass aufgrund der Homogenisierung in der Exposition und der Unsicherheiten hinsichtlich der Aktualität und Genauigkeit der Eingangsdaten die Ergebnisse nicht zwangsläufig die realen Werte darstellen (MERZ et al., 2004). Bei einer Erhöhung des Detaillierungsgrades der Schadenspotenzialermittlung können auch genauere Schadensfunktionen wie Berücksichtigung von Bauvorsorge, detailliertere Funktion der Überflutungshöhe, größere Anzahl an Schadens-/Nutzungsklassen wie z. B. beim Hochwasseraktionsplan Diemel (STUA BIELEFELD, o. D.) in der RegioFEM eingesetzt werden. Da jedoch für alle Varianten die gleichen Eingangsdaten herangezogen werden und eine einfache Übertragbarkeit auf andere Untersuchungsgebiete gewährleistet sein soll, erscheint die Abschätzung der Unterschiede zwischen Varianten auf Basis der hier verwendeten und in der Praxis erprobten Werte legitim.

Der Schadenserwartungswert kann zusätzlich, wie hier in der Studie angewendet, als integrativer monetärer Parameter über

Tabelle 3
Schadensfunktionen für Gebäude- (oben) und Flächenschäden (unten).
Damage functions for buildings (upper part) and damage to land by use (lower part).

Gebäudeschadenklasse	Niedrige Intensität (≤ 0,5 m)	Hohe Intensität (> 0,5 m)
Siedlungsfläche	149 €/m ²	829 €/m ²
Siedlungsfläche dicht bebaut	127 €/m ²	750 €/m ²
Landwirtschaftliche Gebäude	200 €/m ²	964 €/m ²
Gewerbe/Industrie	272 €/m ²	1.463 €/m ²
Infrastruktur	272 €/m ²	1.463 €/m ²
Flächenschadenklasse		
Gewerbe/Industrie	41 €/m ²	41 €/m ²
Infrastruktur	0	59 €/m ²
Landwirtschaftliche Flächen	0,20 €/m ²	0,20 €/m ²

die verschiedenen Wiederkehrintervalle berechnet werden. Er gibt an, mit welcher jährlichen Schadenshöhe im langjährigen Mittel zu rechnen ist (NEUHOLD und NACHTNEBEL, 2012). "Dabei werden die bei einem bestimmten Ereignis zu erwartenden Schäden entsprechend ihrer Auftretswahrscheinlichkeit gewichtet und über alle möglichen Ereignisse summiert" (NACHTNEBEL und APPERL, 2015). Hierbei wurde auf eine vereinfachte Beziehung und folgende Formel zurückgegriffen:

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^k \frac{S_{i-1} + S_i}{2} * \Delta P_i$$

Dabei steht $\bar{S}$ für den Schadenserwartungswert, S_i für den erwarteten Schaden eines Ereignisses mit dem Wiederkehrintervall i und der Auftretswahrscheinlichkeit P_i .

2.3 Schritt III: Erstellung von Planungsvarianten

Die Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) zielt darauf ab, die Auswirkungen von Planungsvarianten in Flussabschnitten abzuschätzen. Auf Basis der Inventur der ausgewählten Flussstrecken und der Erfassung der Gefährdungs- und Risikosituation gemäß den bestehenden flussmorphologischen bzw. flussgeometrischen Bedingungen (Status Quo – V0) werden in einem nächsten Schritt unterschiedliche Planungsvarianten erstellt und in die Modellberechnungen eingearbeitet.

Die Planungsvarianten leiten sich vor allem aus den geplanten wasserbaulichen Maßnahmen sowie der zu erwartenden Siedlungsentwicklung bis zum Jahr 2030 ab. Dieser Zeitraum bildet einen angemessenen Planungshorizont, sowohl für die Realisierung geplanter Hochwasserschutzprojekte als auch für die

Entwicklung von Bauland. Des Weiteren erlaubt diese zeitliche Perspektive auf zu erwartende Veränderungen des Hochwasserrisikos zu reagieren, indem etwa projektierte Planungen bzw. eine geplante Baulandentwicklung abgeändert oder Anpassungsmaßnahmen in den betroffenen Gebieten gesetzt werden. Falls erforderlich, kann der Planungshorizont der RegioFEM auch erweitert werden, beispielsweise bis zum Jahr 2040 oder 2050. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Siedlungsentwicklungen nur bedingt für mehr als 10 bis 15 Jahre ausreichend verlässlich abgeschätzt werden können. Vorliegende Raumplanungsinstrumente enthalten in der Regel keine Aussagen über so lange Planungszeiträume.

Im Detail können die Planungsvarianten unterschiedliche Maßnahmen des Schutzwasserbaus beinhalten, z. B. Hochwasserrückhaltebecken, Flussaufweitungen oder Maßnahmen zur Wiederherstellung von Überflutungs- und Rückhalteflächen. Darüber hinaus können geplante bauliche Entwicklungen, insbesondere die Ausweisung von Siedlungserweiterungsgebieten, u. a. in Hochwassergefahrenbereichen, für die kein gesetzliches Widmungsverbot für Bauland definiert ist, in die vorausschauende Beurteilung einfließen. Die Maßnahmen der jeweiligen Planungsvarianten können die zu erwartenden Veränderungen realistisch widerspiegeln, indem sie tatsächlich projektierte wasserbauliche Planungen und/oder die bereits in den örtlichen und überörtlichen Planungsinstrumenten ausgewiesenen Siedlungserweiterungsgebiete abbilden.

Im Fallbeispiel Raab umfasst die Variante 1 (V1) alle bereits geplanten bzw. projektierten wasser- und straßenbaulichen Maßnahmen, wie z. B. die Linearmaßnahmen Feldbach Ost (gesamt: 2,6 km) und die Erweiterung der Landesstraße B 68 (7,3 km) mit

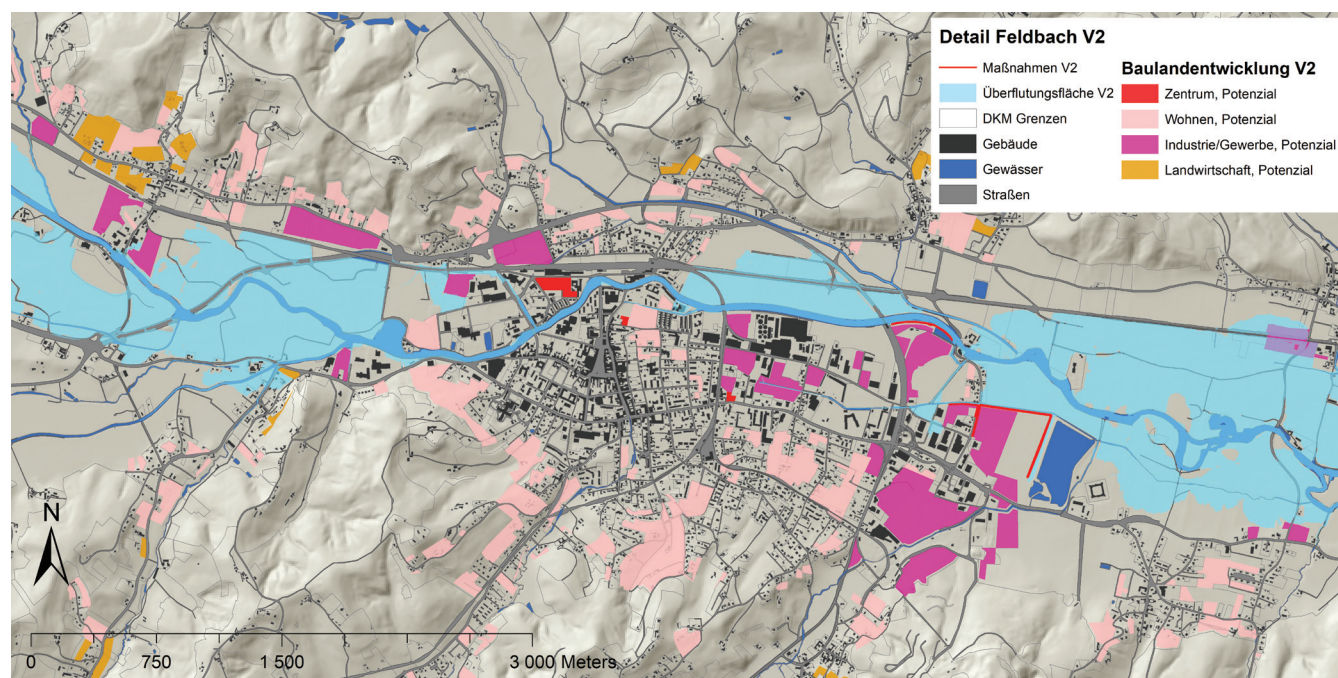


Abbildung 3

Darstellung der baulichen Entwicklungsgebiete und damit verbundener linearer Schutzmaßnahmen in der Gemeinde Feldbach sowie der korrespondierenden Überflutungsfläche (HQ₁₀₀) in Variante 2.

Depiction of projected settlement development and supporting flood protection measures around the town of Feldbach and the corresponding inundated area (HQ₁₀₀) for variant 2.

Tabelle 4

Neu ausgewiesene Gebiete zur baulichen Entwicklung in der Gemeinde Feldbach in Variante 2.
Designated building land in the town of Feldbach for the different land uses for variant 2.

Gebiete mit baulicher Entwicklung	Neu ausgewiesenes Bauland [ha]
Wohnnutzung	170,0
Gemischte Nutzung (Zentrum)	2,2
Landwirtschaftlich geprägte Siedlungsgebiete	29,2
Gewerbe/Industrie	86,7

der Umfahrung der Gemeinde Kirchberg a. d. Raab. Zusätzlich dazu integriert Variante 2 (V2) die Umsetzung von neu ausgewiesenen Gebieten baulicher Entwicklung und die dafür erforderlichen linearen Schutzmaßnahmen und Aufschüttungen. Der Schwerpunkt liegt in unserer Fallstudie in der Gemeinde Feldbach, die als regionales Zentrum fungiert. Hier ist mit intensiven Veränderungen zu rechnen, welche aus dem Flächenwidmungsplan abgeleitet werden können. Am Beispiel Feldbach wird der bereits geplante Zuwachs der Gebiete mit baulicher Entwicklung deutlich (Tab. 4 und Abb. 3).

Darüber hinaus bietet die RegioFEM die Möglichkeit, eine Sensitivitätsanalyse der jeweiligen Planungsvarianten in Bezug auf die zu erwartenden Klimawandeleffekte zu integrieren. Hierfür wird, bezogen auf die bestehenden Abflusswerte unterschiedlicher Bemessungsereignisse (z. B. $HQ_{30}/HQ_{100}/HQ_{300}$), ein Klimazuschlag i. d. H. von + 10 % vorgesehen. Dieser Wert leitet sich vom oberen Ende der laut BLÖSCHL et al. (2018) möglichen Entwicklungen der Hochwasserveränderungen für Österreich ab und stellt somit nach Stand des Wissens ein Worst-Case-Szenario für die möglichen klimainduzierten Veränderungen dar. Im Vorfeld wurde mit Daten von elf verschiedenen regionalen Klimamodellen als Input für ein kalibriertes Niederschlags-Abfluss-Modell eine mögliche Änderung der Hochwassergefährdung berechnet. Die Ergebnisse zeigen jedoch eine sehr große Bandbreite der möglichen Änderung. Sie liegen zwischen - 40 bis + 140 % Abflussveränderung, mehrheitlich mit einer Tendenz zur Abflusszunahme in der HQ_{100} -Auswertung, sodass keine eindeutige Wertbestimmung gemacht werden konnte (HERRNEGGER et al., 2018; BUTTINGER et al., 2018). Der gewählte Klimazuschlag von 10 % erlaubt jedenfalls auch, die Robustheit bestehender sowie

zukünftiger Hochwasserschutzkonzepte vereinfacht zu beurteilen, d. h. inwiefern Schutzmaßnahmen im Untersuchungsgebiet (Hochwasserschutzdämme, Rückhaltebecken) ihre Schutzfunktion unter (Klimawandelbedingt) erhöhten Abflusswerten aufrechterhalten würden. Grundsätzlich kann auch die Bewertung des Status Quo unter Klimawandel durchgeführt werden. Da im Fallbeispiel in der Variante 1 jedoch bereits fertig geplante und in der Umsetzung befindliche Maßnahmen und Projekte integriert sind, wird dies hier jedoch nicht durchgeführt, da diese Kombination so nie eintreten kann.

Tabelle 5 bietet einen Überblick über die gewählten Szenarien und Planungsvarianten der RegioFEM im Fallbeispiel Raab.

2.4 Schritt IV: Variantenanalyse und Bewertungsparameter

Der finale Schritt der Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) beinhaltet die Variantenanalyse bzw. einen Vergleich der Auswirkungen der Planungsvarianten für die ausgewählte Flusstrecke. Dabei werden (i) die zu erwartenden Auswirkungen der in den Varianten (V1, V2, ...) integrierten Faktoren auf die zukünftige Hochwassergefährdung bzw. das zukünftige Hochwasserrisiko untersucht und (ii) dem Status Quo (V0) bzw. anderen Varianten gegenübergestellt.

Die Variantenanalyse basiert auf den Untersuchungsparametern der vorangegangenen Inventur der Flusstrecke (Kap. 2.2). Folglich wird dargestellt, wie sich nach den Berechnungen die Umsetzung der Varianten auf

- den Hochwasserabfluss und -rückhalt,
- die Hochwasserexposition und
- das Schadenspotenzial

im Untersuchungsgebiet bzw. in den einzelnen Flusstreckenabschnitten auswirken.

Darüber hinaus kann neben den Parametern der Exposition ein weiterer Parameter für die Variantenanalyse herangezogen werden, der eine Einschätzung der Eingriffsintensität der jeweiligen Planungsvariante ermöglicht. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen die Verfügbarkeit erforderlicher Flächen voraussetzt. Tatsächlich stellt die Flächenverfügbarkeit ein wesentliches Kriterium für die Implementierung von Schutzkonzepten im Hochwasserrisikomanagement dar. Insbesondere die Flächenbereitstellung für flächenintensive Maßnahmen, wie z. B. Rückhaltebecken oder Flussbettauflweitungen, ist in der Praxis oft mit erheblichen Widerständen und Interessenskonflikten verbunden (KENYON et al., 2008; LÖSCHNER und SCHINDEL-EGGER, 2019). Mit dem Parameter "Anzahl der durch Maßnahmen betroffenen Grundstücke" liefert die RegioFEM einen ersten vorausschauenden Indikator für die Eingriffsintensität in öffentli-

Tabelle 5

Übersicht über die Szenarien und Planungsvarianten im Fallbeispiel Raab.
Overview of the scenarios and variants in the Raab case study.

Szenario		Planungsvariante	
Status Quo		V0	derzeitige Flussmorphologie/-geometrie und Landnutzung
zukünftige Entwicklungen	bauliche Entwicklungen (2030)	V1	projektierte wasserbauliche Maßnahmen und in der Umsetzung befindliche Verkehrsprojekte
		V2	V1 + zukünftige Baulandentwicklung, inkl. erforderlicher Schutzmaßnahmen (z. B. Lineardämme, Aufschüttungen)
	Klimawandel	V1+CC	V1 inkl. Klimawandelausschlag
		V2+CC	V2 inkl. Klimawandelausschlag

che Nutzungsansprüche (ausgewiesenes Bauland) und private Eigentums- und Nutzungsrechte. Da derzeit keine konkrete Umsetzung im Raab-Einzugsgebiet ansteht, wird dieser Parameter in weiterer Folge nicht ausgewertet. Auch wurde in der RegioFEM bewusst auf eine Abschätzung der Kosten verzichtet. Diese können zwar für aktuelle und projektierte Maßnahmen abgeschätzt werden, sind jedoch nur mit sehr vielen Unsicherheiten für die Zukunft und die langfristigen Planungsvarianten prognostizierbar.

3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden Ergebnisse der Anwendung der Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) am Beispiel des o. g. Flussabschnittes der Raab vorgestellt und eine genauere Analyse des Schadenspotenzials als essenzieller Teil der Hochwasserrisikobewertung durchgeführt.

3.1 Bewertungsmatrix der Regional Floodplain Evaluation Matrix, RegioFEM

Die Ergebnisse der Arbeitsschritte der Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) und die Werte der Parameter können über eine Bewertungsmatrix für das gesamte Untersuchungsgebiet und die einzelnen Teilabschnitte für unterschiedliche Wiederkehrintervalle (30, 100 und 300 Jahre) dargestellt werden. Die Ergebnisse der Inventur werden als Absolutwerte angeführt und die Veränderungen durch die verschiedenen Planungsvarianten als prozentuelle Abweichung vom Status Quo

$$\left(\frac{V_x - V_0}{V_0} \right)$$

dargestellt. Die Ergebnisse für den Fall HQ₁₀₀ mit einem Spitzenabfluss von 303 m³/s zeigt Tabelle 6 und werden im Folgenden diskutiert.

3.1.1 Status Quo

Die Bewertung der aktuellen Situation (V0) verdeutlicht den hohen Stellenwert der "unbeeinflussten" Fließstrecke zur Reduktion der Hochwassergefährdung. Die Hochwasserwelle wird in allen drei Abschnitten fast gleichmäßig reduziert und verzögert. Ein Vergleich mit dem sogenannten Flussschlauch-Modell, in welchem alle Retentionsflächen abgeschnitten werden und der gesamte Abfluss im Fluss stattfindet, hebt die Bedeutung noch einmal hervor. Bei einem (hypothetischen) Totalverlust der Überflutungsflächen käme es nahezu zu keiner Reduktion der Hochwasserspitze (1 m³/s) und lediglich zu einer Scheitelverzögerung von fünf Stunden im Gegensatz zu 28 m³/s Scheitelreduktion (~ 9 % des Spitzenabflusses) und 13,8 Stunden Verzögerung im Status Quo.

Bei der Exposition ist vor allem Abschnitt 1 als positiv hervorzuheben, da es hier bei der größten Überflutungsfläche (727 ha) die geringste Fläche an betroffenem Bauland (16 ha) gibt und ein sehr großer Teil in landwirtschaftlichen Flächen (616 ha) liegt. Im Gegensatz dazu wird in der Modellrechnung in Abschnitt 2 deutlich mehr Bauland überflutet (Gemeinde Feldbach; 67 ha), was sich auch in einem deutlich höheren Wert an betroffenen Gebäuden auswirkt.

Dies spiegelt sich auch in der Auswertung des Schadenspotenzials wider. Dieses ist mit 181 Mio. € für das HQ₁₀₀ sehr hoch,

auch aufgrund des hohen Anteils an überfluteten Industrie- bzw. Gewerbeflächen um die Gemeinde Feldbach in Abschnitt 2, auf den für sich genommen mit 118 Mio. € gleich 69 % des gesamten Schadenspotenzials der untersuchten Flussstrecke entfallen.

3.1.2 Variante 1

In Gegenüberstellung zum gegenwärtig hohen Schadenspotenzial (Status Quo; V0) zeigen die Modellergebnisse eine deutlich positive Wirkung der bereits geplanten Hochwasserschutzmaßnahmen, obwohl es aufgrund der linearen Maßnahmen zu einem Verlust von Überflutungsflächen kommt (- 7 %). Die Hochwasserscheitel wird gegenüber V0 um 11 % reduziert, also paradoxerweise verbessert, was im Wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass durch den Bau der Landesstraße B 86 und den damit verbundenen Flussquerungen, Dammaufschüttungen und Durchlässen ein Rückstau- bzw. Retentionseffekt entsteht. Des Weiteren werden durch den Hochwasserschutz die Exposition und das Schadenspotenzial deutlich verringert. Die Anzahl der betroffenen Gebäude sowie das betroffene Bauland werden um mehr als die Hälfte und das Schadenspotenzial um bis zu 72 % reduziert, vor allem in der Schadenskategorie Industrie/Gewerbe.

Hervorzuheben sind jedoch die deutlichen Unterschiede in den einzelnen Abschnitten. So kommt es in Abschnitt 1 zu einer starken Reduktion der Hochwassergefährdung und in den Abschnitten 2 und 3 zu einer Erhöhung. Bezüglich der Exposition und des Schadenspotenzials findet vor allem in Abschnitt 2 eine starke, in Abschnitt 3 eine deutliche und in Abschnitt 1 eine geringe Reduktion statt.

3.1.3 Variante 2

Die aus den örtlichen Raumplanungsinstrumenten (Örtliches Entwicklungskonzept und Flächenwidmungsplan) abgeleitete zukünftige Baulandentwicklung hat unterschiedliche Einflüsse auf die untersuchten Parameter. Durch die Umwandlung von landwirtschaftlichen Flächen in "hochwassergeschützte" Siedlungs- und Industriegebiete und die damit verbundenen linearen Schutzmaßnahmen und Aufschüttungen sowie Vorsorgemaßnahmen kommt es im Untersuchungsgebiet zu einer weiteren Verringerung der Überflutungsflächen (- 9 %) und einer etwas verminderten Scheitelverzögerung verglichen mit dem Status Quo. Ebenso wird die Verbesserung der Scheitelreduktion abgeschwächt, welche durch V1 erreicht wurde.

Bezüglich der Exposition können in allen Abschnitten eine weitere Verringerung des überfluteten Baulands und der landwirtschaftlichen Flächen erwartet werden. Auch sinkt die Zahl der betroffenen Gebäude gegenüber V1 etwas, ebenso das Schadenspotenzial, das bei dem in der Fallstudie angewandten Szenario mit einer Reduktion um 75 % noch weiter unter jenem von V0 liegt. Die erzielten Verbesserungen sind hierbei primär auf die Berücksichtigung des Hochwasserschutzes bei der Siedlungsentwicklung zurückzuführen, bei denen es bis zum Erreichen des Bemessungsereignisses (HQ₁₀₀) zu keinem Schaden kommt.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für einzelne Abschnitte entsprechen den jeweiligen Unterschieden der Ergebnisse für V1.

3.1.4 Einfluss des Klimawandels

Mit dem in der Fallstudie angewandten Szenario zur Berücksichtigung des Klimawandels mit einer 10%igen Steigerung des

Tabelle 6

Bewertungsmatrix der RegioFEM für die HQ₁₀₀-Analyse (Abfluss bei HQ₁₀₀ = 303 m³/s) im Fallbeispiel Raab. Die Auswertung erfolgt für die sieben Parameter für den gesamten Flussabschnitt (Gesamtbeurteilung) und die drei Abschnitte für den Status Quo als auch für die vier Varianten (jew. mit Veränderung zum Status Quo). Grüne Zellen bedeuten eine positive, orange Zellen eine negative Änderung, eine geringere Farbintensität eine schwächere Ausprägung der Änderung.

Comparative evaluation matrix of the RegioFEM for the HQ₁₀₀ (runoff at HQ₁₀₀ = 303 m³/s) in the Raab case study. The analysis is made for the seven parameters for the whole river reach ("Gesamtbeurteilung" overall assessment) and the three sections for the status quo and for the four variants (percentage of change compared to status quo). Green colouring indicates positive, orange colouring negative effects, a lower colour intensity a lower significance.

HQ ₁₀₀	Parameter		Status Quo	Varianten			
			V0	V1	V2	V1 + CC	V2 + CC
Gesamtbeurteilung	Hochwasser-gefährdung	Überflutungsfläche [ha]	1.950	- 7 %	- 9 %	± 0 %	- 2 %
		Scheitelreduktion [m ³ /s]	28	+ 11 %	+ 7 %	+ 25 %	+ 25 %
		Scheitelverzögerung [h]	13,8	± 0 %	- 2 %	- 11 %	- 13 %
	Exposition	Betr. Gebäude [-]	959	- 58 %	- 59 %	- 17 %	+ 9 %
		Überflutetes Bauland [ha]	118	- 53 %	- 67 %	- 30 %	- 36 %
		Überflutete landwirtschaftl. Fläche [ha]	1.579	- 4 %	- 5 %	+ 2 %	± 0 %
	Schadens-potenzial	Schadenspotenzial [Mio. €]	181	- 72 %	- 75 %	- 52 %	- 51 %
Abschnitt 1	Hochwasser-gefährdung	Überflutungsfläche [ha]	727	- 4 %	- 5 %	+ 6 %	+ 5 %
		Scheitelreduktion [m ³ /s]	11	+ 82 %	+ 82 %	+ 100 %	+ 100 %
		Scheitelverzögerung [h]	5,5	+ 18 %	+ 23 %	+ 59 %	+ 55 %
	Exposition	Betr. Gebäude [-]	165	- 6 %	- 4 %	+ 145 %	+ 174 %
		Überflutetes Bauland [ha]	16	- 4 %	- 15 %	+ 100 %	+ 87 %
		Überflutete landwirtschaftl. Fläche [ha]	616	- 4 %	- 5 %	+ 3 %	+ 2 %
	Schadens-potenzial	Schadenspotenzial [Mio. €]	17	- 4 %	- 7 %	+ 183 %	+ 146 %
Abschnitt 2	Hochwasser-gefährdung	Überflutungsfläche [ha]	598	- 10 %	- 16 %	- 6 %	- 11 %
		Scheitelreduktion [m ³ /s]	10	- 50 %	- 60 %	- 20 %	- 10 %
		Scheitelverzögerung [h]	4,0	- 19 %	- 38 %	- 38 %	- 50 %
	Exposition	Betr. Gebäude [-]	487	- 86 %	- 85 %	- 60 %	- 25 %
		Überflutetes Bauland [ha]	67	- 78 %	- 94 %	- 64 %	- 69 %
		Überflutete landwirtschaftl. Fläche [ha]	450	- 1 %	- 6 %	+ 2 %	- 4 %
	Schadens-potenzial	Schadenspotenzial [Mio. €]	118	- 92 %	- 94 %	- 89 %	- 81 %
Abschnitt 3	Hochwasser-gefährdung	Überflutungsfläche [ha]	625	- 7 %	- 7 %	- 2 %	- 3 %
		Scheitelreduktion [m ³ /s]	7	- 14 %	- 29 %	- 57 %	- 71 %
		Scheitelverzögerung [h]	4,5	- 6 %	- 11 %	- 28 %	- 22 %
	Exposition	Betr. Gebäude [-]	307	- 42 %	- 47 %	- 36 %	- 27 %
		Überflutetes Bauland [ha]	35	- 28 %	- 39 %	- 24 %	- 27 %
		Überflutete landwirtschaftl. Fläche [ha]	513	- 5 %	- 5 %	± 0 %	- 1 %
	Schadens-potenzial	Schadenspotenzial [Mio. €]	46	- 48 %	- 51 %	- 44 %	- 44 %

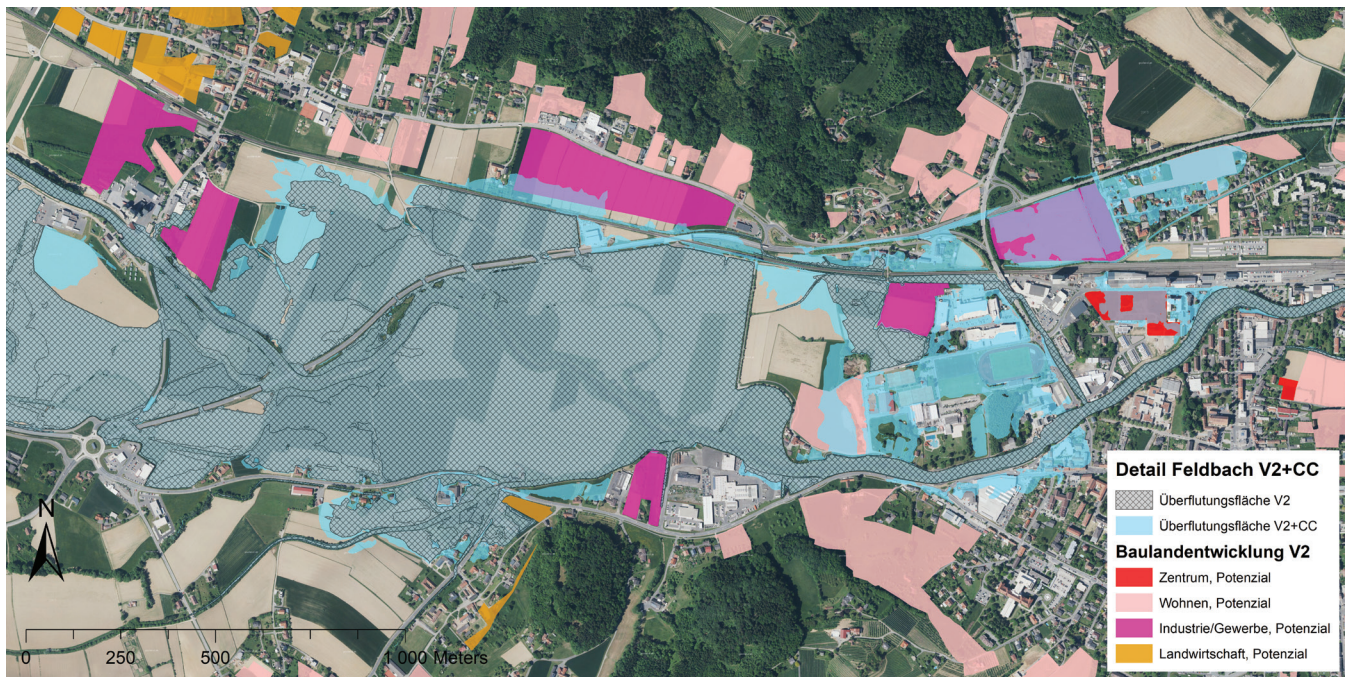


Abbildung 4

Über- und Umströmen von Hochwasserschutzmaßnahmen bei $HQ_{100}+CC$ als mögliche Auswirkung des Klimawandels am Ende von Abschnitt 1.
Overflow and bypassing of flood defence measures for $HQ_{100}+CC$ as possible effects of climate change at the end of section 1.

Hochwasser-Wellenscheitels kann von einer deutlichen Verschärfung des Hochwasserrisikos im Untersuchungsgebiet ausgegangen werden. Obwohl sich die Überflutungsfläche verglichen zu V_0 in beiden Varianten $V1+CC$ und $V2+CC$ in Summe kaum verändert, kommt es im Vergleich zu den Varianten V_1 und V_2 zu einer Erhöhung. Vor allem die Scheitelverzögerung wird deutlich reduziert.

Die positiven Wirkungen der in den Ausgangsvarianten integrierten Schutzmaßnahmen auf die Exposition und das Schadenspotenzial sind im Klimawandel-Szenario deutlich verringert. So kommt es in $V2+CC$ im Vergleich zu V_0 zu einem Zuwachs an betroffenen Gebäuden um 9 %. Verglichen zu den vom Klimawandel unbeeinflussten Szenarien nimmt das Schadenspotenzial deutlich zu (siehe auch Kapitel 3.2), was mit dem höheren Anteil an betroffenem Bauland einhergeht.

Bei Betrachtung der einzelnen Abschnitte zeigen sich vor allem für Abschnitt 1 markante Veränderungen der Ergebnisse: Exposition und Schadenspotenzial steigen extrem, um bis zu 183 % (Schadenspotenzial bei $V1+CC$ verglichen zu V_0). Bei detaillierter Betrachtung wird deutlich, dass dies durch Um- und Überströmen von bereits bestehenden Hochwasserschutzmaßnahmen und Überflutung von Bauland entsteht (Abb. 4). Die in den Varianten integrierten Maßnahmen zum Schutz des Siedlungsgebietes sind hingegen größtenteils auch gegenüber dem erhöhten Abfluss wirksam, auf Kosten eines erhöhten Anteils überfluteter landwirtschaftlicher Flächen.

3.2 Schadenspotenzialanalyse und Hochwasserrisiko

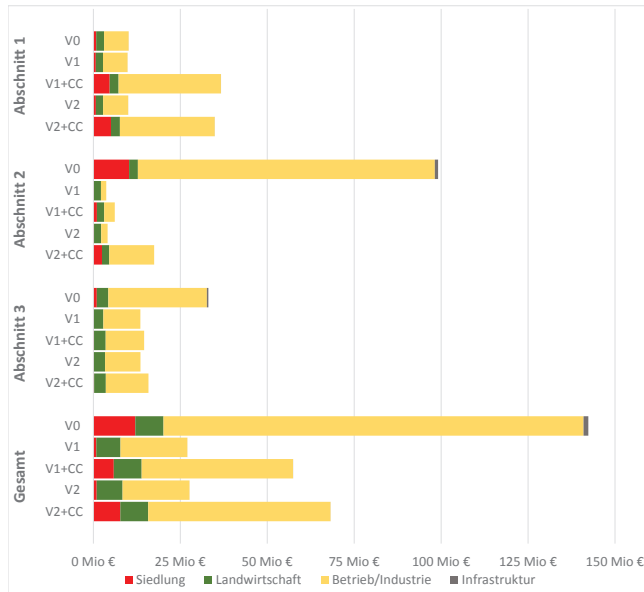
Das Schadenspotenzial ist ein essenzielles Kriterium im Hochwasserrisikomanagement und daher auch innerhalb der Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM). Es weist auf das Zusammenwirken von Gefährdung und Exposition für den Fall ei-

nes bestimmten Hochwasserereignisses hin und bietet eine monetäre Bewertung potenzieller Schäden bei einem definierten Ereignis. Ergebnisse zum Schadenspotenzial können Grundlage für Kosten-Nutzen-Analysen sein.

Im Fallbeispiel Raab zeigen sich die meist sehr positiven Auswirkungen gesetzter und geplanter Schutzmaßnahmen. Abbildung 5 beschreibt, dass es durch die Hochwasserschutzmaßnahmen vor allem in der Gemeinde Feldbach (Abschnitt 2) zu einer deutlichen Verbesserung der Gefahren- bzw. Risikosituation, dargestellt durch die potenziellen Gebäudeschäden, kommt. Vor allem das Schadenspotenzial im Siedlungsgebiet sowie Industrie- und Betriebsflächen wird hier fast gänzlich aufgehoben. Auch in Abschnitt 3 mindern die Schutzmaßnahmen das Schadenspotenzial deutlich und es wird durch die (sehr geringe) geplante Siedlungsentwicklung und den Klimawandelschlag in vergleichsweise geringem Ausmaß wieder erhöht. Das Klimawandelszenario zeigt vor allem, wie bereits erwähnt, in Abschnitt 1 mit der Zunahme der potenziellen Gebäudeschäden, eine deutliche Wirkung.

Die bisher vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf ein HQ_{100} -Ereignis, so wie es in Österreich zur Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen verwendet wird. Gemäß der EG-Hochwasserrichtlinie (EG, 2007) ist im "Fachlichen Leitfadens Hochwassergefahrenkarten" (BMLFUW, 2014) eine Bewertung der Hochwassersituation für Ereignisse mit niedriger (HQ_{300}), mittlerer (HQ_{100}) und hoher Wahrscheinlichkeit (HQ_{30}) vorgesehen. Dadurch soll die Wirksamkeit von Maßnahmen von HQ_{30} bis zu einem Bemessungsereignis ($< HQ_{100}$) und auch das Restrisiko darüber hinaus im Falle eines HQ_{300} abgeschätzt werden.

Abbildung 6 zeigt das Schadenspotenzial im Fallbeispiel an der Raab für die verschiedenen Varianten und Szenarien zusammen

**Abbildung 5**

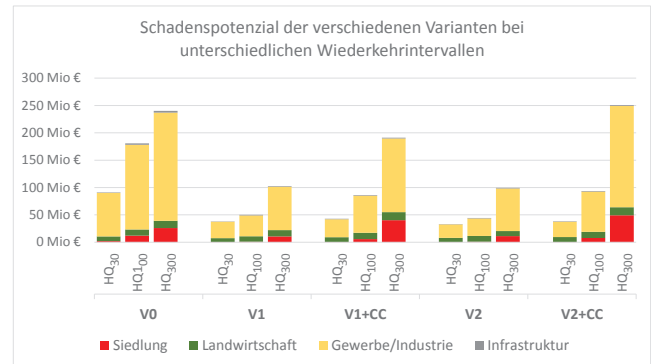
Potenzielle Gebäudeschäden bei HQ₁₀₀ als Teil des Schadenspotenzials im Untersuchungsgebiet der Raab.
Potential damage to buildings for a HQ₁₀₀ as part of the damage potential in the Raab river reach.

mit den drei Wiederkehrintervallen. Sie zeigt auch die Aufteilung des Schadenspotenzials auf die Schadensklassen "Siedlungsbe-
 reich" (inkl. dicht bebautem Gebiet), "landwirtschaftliche Gebie-
 te" (inkl. Hofstellen), "Gewerbe und Industrie" sowie "Infrastruk-
 tur".

Die Ergebnisse aus Abbildung 6 zeigen, dass die geplanten Hochwasserschutz- und Infrastrukturmaßnahmen in Variante 1 einen deutlich positiven Effekt im Falle aller drei Wiederkehrintervalle haben. Die positive Wirkung wird durch eine weitere hochwasserbewusste Siedlungsentwicklung (V2) tendenziell weiter verringert. Auffällig ist hierbei, dass sich das Verhältnis der Schadenspotenziale zwischen der Varianten V0 und V1 von HQ₃₀ zu HQ₁₀₀ von ca. 1 : 2 auf 3 : 4 ändert, sich die Werte also annähern. Im Gegensatz dazu verändert sich das Verhältnis der Schadenspotenziale der beiden Planungsvarianten von HQ₁₀₀ zu HQ₃₀₀ umgekehrt von rd. 3 : 4 auf 1 : 2. Dies belegt, dass mit der Umsetzung des auf HQ₁₀₀ ausgelegten Hochwasserschutzes ein großer Teil der schützenswerten Flächen bereits aus dem Überflutungsbe-
 reich genommen wird, das Restrisiko für Ereignisse eines HQ₃₀₀ dadurch aber keineswegs gleichermaßen reduziert wird.

Der Einfluss des Klimawandels auf das Schadenspotenzial ist für das HQ₃₀ in beiden Varianten gering, bei HQ₁₀₀ und besonders bei HQ₃₀₀ aber sehr deutlich erkennbar. Vor allem in V2 (d. h. mit Berücksichtigung geplanter Siedlungsentwicklung) steigt das Schadenspotenzial durch den Klimawandel (V2+CC) um 150 % und ist sogar höher als im Fall des Status Quo. Auch der Anteil betroffener Siedlungsfläche steigt in beiden Varianten (V1 und V2) durch den Klimawandelzuschlag, von 10 % und 12 % auf rund 20 %.

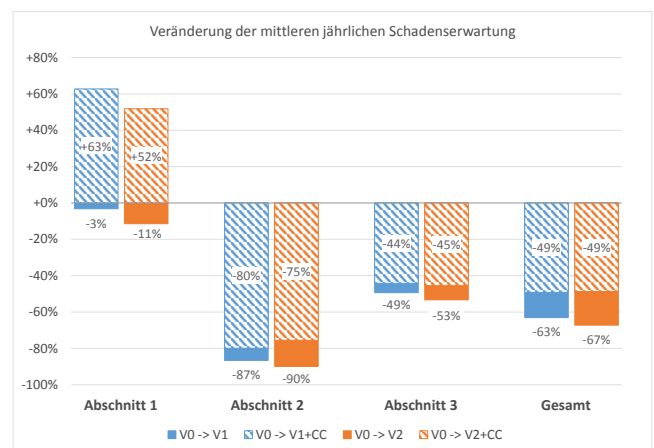
Aus den Ergebnissen kann, wie in Kapitel 2.2.3 vorgestellt, der Schadenserwartungswert (mittlere jährliche Schadenserwartung) errechnet werden. Aufgrund der geringen Anzahl analy-

**Abbildung 6**

Gesamt-Schadenspotenzial (Gebäude und Flächen) für die unterschiedlichen Wiederkehrintervalle und Planungsvarianten nach Schadensklassen, Fallbeispiel Raab.
Total damage potential (buildings and areal damage) for the different frequencies and all variants split in the different damage classes in the Raab case study.

sierter Wiederkehrintervalle, inklusive fehlender Werte für sehr häufige Ereignisse, werden bei der durchschnittlichen jährlichen Schadenserwartung im Folgenden bewusst keine Absolutwerte angegeben. Vielmehr werden die relativen Abweichungen der Varianten V1 und V2 von V0 (Status Quo) einmal mit und einmal ohne Klimawandelzuschlag dargestellt (Abb. 7). Durch letztere Analyse soll speziell die Sensibilität der zwei Varianten gegenüber dem Klimawandel aufgezeigt werden. Diese Vorgangsweise wurde, auch aufgrund der Unsicherheiten, im Rahmen des Scientist-Stakeholder-Workshops begrüßt (Kap. 4).

Aus Abbildung 7 ist erkennbar, dass in den Abschnitten 2 und 3 im Vergleich zum Status Quo (V0) die mittlere jährliche Schadenserwartung für V1 und V2 in etwa in der gleichen Relation sinkt. In Abschnitt 1 kommt es in beiden Varianten gegenüber

**Abbildung 7**

Relative Veränderung der mittleren jährlichen Schadenserwartung für die drei Abschnitte und das gesamte Untersuchungsgebiet. Die Varianten werden dabei mit dem Status Quo (V0) verglichen und die Varianten mit Klimawandelzuschlag den Unbeeinflussten überlagert.
Relative change of the mean expected annual damage for the three sections and the total river reach. The variants are compared to the status quo (V0) and the variants with climate change are displayed on top of the unchanged scenarios.

der Ausgangssituation zu vergleichsweise sehr geringen Reduktionen der mittleren jährlichen Schadenserwartung, trotz der Umsetzung des Straßenbauprojekts.

Die Berücksichtigung des Klimawandelzuschlags führt zu einer deutlichen Reduktion der positiven Entwicklung der Schadenserwartungen, vor allem in Abschnitt 1. Wie beschrieben, sind diese Zunahmen vor allem auf die Überflutung zuvor hochwasserfreier Flächen (ohne Klimawandel) zurückzuführen, insbesondere bei Modellierung eines HQ_{300} -Ereignisses. In Abschnitt 1 kommt es sogar zu einer deutlichen Zunahme der Schadenserwartung verglichen zum Status Quo.

4 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wird die neu entwickelte Methode der Regional Floodplain Evaluation Matrix (RegioFEM) am Fallbeispiel eines Untersuchungsgebiets an der Raab (Österreich) vorgestellt und deren Möglichkeiten zur Bewertung des Hochwasserrisikos aufgezeigt. Die RegioFEM, als fachübergreifendes und integratives Werkzeug konzipiert, liefert dabei durch Anwendung von ausgewählten Parametern in einer Bewertungsmatrix Grundlagen zur Analyse verschiedener Planungsvarianten und zeigt deren Auswirkungen auf verschiedene Abschnitte der untersuchten Flussstrecke. Durch die Integration eines Klimawandel-Szenarios (per Klimawandelzuschlag) kann die Sensibilität gesetzter und geplanter Maßnahmen, aber auch jene des gesamten Gebietes gegenüber dem veränderten Abflussverhalten abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen mit den verwendeten Ansätzen, dass die geplanten baulichen Entwicklungen (Hochwasserschutz, Verkehrsprojekte) teils zu sehr deutlichen Reduktionen des Hochwasserrisikos, vor allem bei HQ_{30} und HQ_{100} , führen. Das Hochwasserrisiko wird auch durch die Bauland- und Siedlungsentwicklung nicht verschärft, sondern tendenziell weiter verbessert.

Die Auswirkungen resultieren jedoch räumlich gesehen sehr unterschiedlich. Aufgrund des Verlusts von Überflutungsflächen zeigt die Modellierung auch eine Verringerung der Hochwasserretention und damit eine Erhöhung der Gefährdung durch Hochwasser. Auswirkungen des Klimawandels, die in der vorliegenden Fallstudie nach Stand vorliegender Erkenntnisse im Sinne eines Worst-Case-Szenarios durch einen 10%igen Aufschlag auf die Abflussspitze berücksichtigt wurden, sind unter diesen Annahmen räumlich sehr unterschiedlich. Zwar würden nach den vollzogenen Berechnungen die geplanten Schutzmaßnahmen durch den erhöhten Abfluss nicht überströmt (d. h. sie genügen einem 100-jährlichen Bemessungsereignis plus Klimawandelzuschlag), aber die Modellergebnisse zeigen in anderen Bereichen eine weitere Ausuferung der Hochwasserflächen in den Baulandbereich und daher einen Anstieg des Schadenspotenzials bzw. der mittleren jährlichen Schadenserwartung.

Bei der Entwicklung der Methode und dem vorgestellten Anwendungsbeispiel wurden bewusst möglichst kostenfreie und leicht verfügbare Eingangsdaten verwendet, die auch datenschutzrechtlich unproblematisch sind. Damit soll die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der Methode erleichtert werden. Ein hydraulisches Modell, welches auch für instationäre Betrachtungen geeignet ist, ist hierbei jedoch unumgänglich, liegt in Österreich

jedoch häufig bereits vor. Die in der vorgelegten Fallstudie angewandten sehr allgemeinen Schadensfunktionen führen für die Gruppe der Industrie- und Gewerbebetriebe zu sehr hohen Schadenerwartungen. Allerdings haben Untersuchungen zu den Schäden durch das Hochwasser des Jahres 2002 gezeigt, dass die in der Fallstudie ausgewiesenen Schadenspotenziale der Größenordnung nach durchaus plausibel sind (HABERSACK et al., 2003), auch wenn es sich damals um ein sehr seltenes Ereignis handelte. Bei diesem wurde ein Anteil der betrieblichen Hochwasserschäden am Gesamtschaden in Oberösterreich von 49 % ermittelt (HABERSACK et al., 2003). Dass einzelne, große Industriebetriebe, wie sie auch an der Raab zu finden und derzeit (V0) noch ungeschützt sind, zu sehr großen Schadenssummen führen können, wurde beim Extremhochwasser im Jahr 2002 auch in der Gemeinde Schwertberg (OÖ) ersichtlich: von den insgesamt rund 400 Mio. € entfiel auf einen einzigen Betrieb ein Hochwasserschaden von rund 150 Mio. € (ANSCHÖBER, 2012). Durch den Einsatz räumlich hochauflösender und fallspezifischer Daten (z. B. aus Felderhebungen), vor allem zu den Schadenspotenzialen in Industrie- und Gewerbebetrieben, könnte die Validität der angewandten monetären Bewertung von Planungsvarianten weiter gesteigert werden.

Neu einzuführende Bewertungsansätze für das Hochwasserrisikomanagement müssen sowohl in der Praxis umsetzbar, als auch an die bestehenden fachlichen und politischen Rahmenbedingungen geknüpft werden können. Vor diesem Hintergrund wurde der methodische Ansatz der RegioFEM und die Ergebnisse seiner Anwendung in der Fallstudie Raab in einem Scientist-Stakeholder-Workshop, wie er auch von WELP et al. (2006) und LÖSCHNER et al. (2016) empfohlen wird, mit lokalen und regionalen Fachleuten und EntscheidungsträgerInnen reflektiert. An dem Workshop nahmen 12 GemeindevertreterInnen sowie VertreterInnen des Landes Steiermark aus den Fachbereichen Wasserwirtschaft und Hochwasserschutz, Landwirtschaft, Raumplanung sowie Forstwirtschaft teil. Sie bestätigten die Bedeutung der Kombination von Ergebnissen zu regionalen und lokalen Auswirkungen von Planungsmaßnahmen. Die RegioFEM bietet hierzu eine Grundlage zur Erreichung einer strukturierten Maßnahmenplanung. Nichtsdestotrotz erscheint die Überprüfung von Einzelflächen wichtig, vor allem aus hydraulischer und hydrologischer Sicht, um auch sehr kleinräumige Effekte berücksichtigen zu können.

Die Anwendung eines Klimawandelzuschlags als Erweiterung der Planungsvarianten wurde von vielen TeilnehmerInnen des Scientist-Stakeholder-Workshops sehr kritisch gesehen. Zum einen sei die Bemessung von Schutzmaßnahmen ohnedies immer mit vielen Unsicherheiten verbunden, welche durch die Berücksichtigung des Klimawandelzuschlags weiter vergrößert würden. Zum anderen müsste die Annahme eines bestimmten Klimawandel-Anpassungsfaktors möglicherweise die Überprüfung bestehender Schutzmaßnahmen nach sich ziehen, was derzeit in der Praxis nicht umsetzbar und auch nicht erwünscht wäre. Zusätzlich wird jedes, auch noch so vereinfachte Szenario von AnwohnerInnen oft als ausführbare Planungsvariante verstanden, wodurch auch bei fehlender Notwendigkeit von Maßnahmen ein gewisser Umsetzungsdruck entstehen kann.

Abgesehen von der Frage der Anwendung von Klimawandel-Szenarien sehen viele Stakeholder, vor allem Vertreter der in Hochwasserschutz involvierten Landesabteilungen, gute Mög-

lichkeiten, mit der RegioFEM das (über-)regionale Hochwasserrisikomanagement und die Szenarienentwicklung zu stärken. Dazu sollte bzw. müsste die Methode jedoch in bestehende Planungswerkzeuge integriert werden. So könnte die RegioFEM zum Beispiel die Grundlage für die Gewässerentwicklungs- und Risikomanagementkonzepte bilden. Eine solche Integration ist denkbar und könnte nicht nur national und auf Landesebene umgesetzt werden, sondern würde auch die Planungsmöglichkeiten von Hochwasserschutzverbänden erweitern und stärken. Die RegioFEM ist hierbei kein Ersatz des klassischen Hochwasserrisikomanagements, sondern eine Erweiterung mit dem Ziel der besseren Prognostizierbarkeit der Auswirkung langfristiger Planungen.

Conclusion

This study presented the newly developed RegioFEM method for the Raab study area (Austria) and its potential to assess the flood risk in the region. The RegioFEM is designed as an interdisciplinary and integrative tool and provides, with its seven parameters in an evaluation matrix, the basis for an analysis of different planning variants and shows their impact on different sections of the investigated river reach. With the integration of a climate change scenario (with a climate change adaption factor) the sensitivity of the planned measures can be evaluated regarding changes in runoff behaviour.

The results in the case study show that, with the approaches used, the planned structural measures (flood protection, infrastructure projects) partially lead to a significant reduction of flood risk, especially for the HQ₃₀ and the HQ₁₀₀. Even in the land development scenario the risk does not increase but even improves slightly. Nevertheless, the impacts vary quite strongly in different parts of the river sections. To some extent, the further reduction of inundation area leads to a decrease of flood retention and an increase of flood exposure. The impact of climate change, estimated with an increase of the flood peak by ten percent as a worst-case scenario, can be quite different depending on the exact location examined. The projected defence measures are quite effective against the increased runoff (no overtopping in case of a 100-year flood event including the climate change factor) but further flooding of existing developed areas can be seen, leading to an increase of flood risk and the mean annual expected damage.

For the development of the method and the presented case study, freely available or easily accessible data was used, under consideration of data privacy aspects, in order to support transferability. A hydraulic model also considering instationary conditions is needed but is mostly already available in Austria. The presented, very universal chosen damage function leads to high values of damage potential, especially for the industrial/commercial damage class. These results correspond with findings from the analysis of the damages of the extreme flood event in 2002 (HABERSACK et al., 2003), despite that event being considered a highly rare occurrence. Also in that study, the share of the commercial sector in relation to the total damage in upper Austria reached 49 %. The high vulnerability of big industrial complexes, which are also present in the Raab case study and are currently (V0) still without flood defence structures, with their very high damage potential was also visible in the extreme flood event in 2002. There, a flood damage of

€ 400 m occurred solely in the community of Schwertberg in Upper Austria with one single company accounting for around € 150 m of that overall sum (ANSCHÖBER, 2012). However, through the integration of more fine-scale and case-specific data (e.g. from field examination), especially regarding the expected damages in industrial and commercial buildings, a significant improvement of the accuracy of the damage potential could be reached in the future.

The introduction of new evaluation approaches in flood risk management needs to be both practicable and linked to existing planning and political frameworks. Against this background, RegioFEM's methodological approach, as well as the results of the Raab study area, were reflected and discussed in a scientist stakeholder workshop with local and regional experts and decision-makers, as recommended by WELP et al. (2006) and LÖSCHNER et al. (2016). The workshop was attended by 12 local and regional representatives as well as representatives of the province of Styria from the departments of water management and flood protection, agriculture, spatial planning and forestry. They confirmed and reinforced the importance of the combination of results from regional and local impact assessments of existing and planned measures. RegioFEM can thereby deliver the basis for reaching a well-structured planning of projects. Nevertheless, a review of the individual inundation areas, especially from a hydraulic and hydrological point of view, is important in order to take small-scale effects into account.

The inclusion of a climate change factor for the analysis of variant was seen in a very critical light by the participants of the scientist-stakeholder workshop. On the one hand, the design of protective measures always involves many uncertainties which are bound to increase even more through the consideration of a climate adaption factor. On the other hand, the adoption of a specific adjustment factor could possibly lead to a review of existing safeguards, which is currently not feasible, nor wanted in practice. In addition, even very simplified scenarios are seen as an executable planning variant by local residents, which can also create a certain pressure to begin implementation, even for unnecessary measures.

Apart from application of the climate change scenario, many stakeholders, especially representatives of the state government and administration departments involved in flood risk management, see the RegioFEM as a good opportunity to strengthen a more integrative regional flood risk management. In order to gain practical relevance, this method should be incorporated into existing tools. Thus, the RegioFEM could become the basis for water development and risk management concepts. This conceivable integration is possible not only as a national and state implementation option but would also expand and improve the planning possibilities for flood protection associations. Nevertheless, the RegioFEM should not be seen as a substitute of traditional flood risk management but as an extension with the goal of better predictability of the impacts of long-term planning.

Danksagung

Die RegioFEM wurde im Zuge des Projektes "Regional Floodplain Management and Risk Transfer Mechanisms: assessing options for climate adaptation" (RegioFlood; KR15AC8K12549) erstellt. Die Autoren danken dem Klima- und Energiefonds für die Finanzierung des Projektes.

Anschriften der Verfasser

Dipl.-Ing. Johannes Wesemann
Grenzkraftwerke GmbH
Münchner Str. 48
84359 Simbach/Inn

Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Universität für Bodenkultur Wien
Muthgasse 18
1190 Wien
johannes.wesemann@boku.ac.at

Dipl.-Ing. Dr. Mathew Herrnegger
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Universität für Bodenkultur Wien
Muthgasse 18
1190 Wien
mathew.herrnegger@boku.ac.at

Mag. Dr. Lukas Löschner
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Walter Seher
Institut für Raumplanung, Umweltplanung und Bodenordnung
Universität für Bodenkultur Wien
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien
lukas.loeschner@boku.ac.at
walter.seher@boku.ac.at

Dipl.-Ing. Markus Eder
Dipl.-Ing. Bernhard Schober
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Helmut Habersack
Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung
Universität für Bodenkultur Wien
Muthgasse 107
1190 Wien
markus.eder@boku.ac.at
bernhard.schober@boku.ac.at
helmut.habersack@boku.ac.at

Mag. Dr. Patrick Scherhauser
Dr. Ralf Nordbeck
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Hög
Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik
Universität für Bodenkultur Wien
Feistmantelstraße 4
1180 Wien
patrick.scherhauser@boku.ac.at
ralf.nordbeck@boku.ac.at
karl.hog@boku.ac.at

Dipl.-Ing. Nina Zahnt
Amtssachverständige für Wasserbautechnik
Amt der NÖ Landesregierung
Gebietsbauamt I Korneuburg
Laaer Straße 23
2100 Korneuburg
nina.zahnt@noel.gv.at

Literaturverzeichnis

- ANSCHÖBER, R. (2012): INFORMATION zur Pressekonferenz mit Landesrat Rudi Anschöber am 15. Mai 2012 zum Thema "10 Jahre danach: Jahrhunderthochwasser 2002 und was der Hochwasserschutz des Landes seither geleistet hat". Amt der Oö. Landesregierung, Linz.
- DI BALDASSARRE, G., KREIBICH, H., VOROGUSHYN, S., AERTS, J., ARNB-JERG-NIELSEN, K., BARENDRECHT, M., BATES, P., BORGA, M., BOTZEN, W., BUBECK, P., MARCHI, B.D., LLASAT, C., MAZZOLENI, M., MOLINARI, D., MONDINO, E., MÅRD, J., PETRUCCI, O., SCOLOBIG, A., VIGLIONE, A. & P.J. WARD (2018): Hess Opinions: An interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection. *Hydrology and Earth System Science* 22, 5629–5637. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5629-2018>.
- DI BALDASSARRE, G., VIGLIONE, A., CARR, G., KUIL, L., SALINAS, J.L. & G. BLÖSCHL (2013): Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Science* 17, 3295–3303. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>.
- BARREDO, J.I. (2009): Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 97–104. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-97-2009>.
- BLÖSCHL, G., BLASCHKE, A.P., HASLINGER, K., HOFSTÄTTER, M., PARAJKA, J., SALINAS, J. & W. SCHÖNER (2018): Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein aktualisierter Statusbericht. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70, 462–473. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0498-0>.
- BMLFUW (2011): Vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos 2011. Bericht zur Umsetzung in Österreich. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BMLFUW (2015): Hochwasserrisikomanagementplan 2015 – Risikogebiet: Feldbach 6019, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BMLFUW (2014): Hochwasser Risikokarten – Fachlicher Leitfaden. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BRENNER, C., APPERL, B. & K. SCHULZ (2015): Integration von Orthofotos in die Abschätzung des Hochwasserschadenspotenzials. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 11–12, 412–421. <https://doi.org/10.1007/s00506-015-0271-6>.
- BROUWER, R. & R. VAN EK (2004): Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood protection measures in The Netherlands. *Ecological Economics* 50, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.01.020>.
- BUTTINGER, F., WESEMANN, J. & M. HERRNEGGER (2018): Potentielle, klimawandelbedingte Änderungen von Hochwasserextremwerten im Einzugsgebiet der Raab. In: Climate Change Centre Austria, 19. KLIMATAG, Tagungsband, Aktuelle Klimaforschung in Österreich.
- BUWAL (1999): Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern.
- COLLENTEUR, R.A., MOEL, H. DE, JONGMAN, B. & G. DI BALDASSARRE (2015): The failed-levee effect: Do societies learn from flood disasters? *Natural Hazards* 76, 373–388. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1496-6>.
- EG (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. OJ L 288/27. Europäische Gemeinschaft.
- GOULDBY, B., SAYERS, P., MULET-MARTI, J., HASSAN, M.A.A.M. & D. BENWELL (2015): A methodology for regional-scale flood risk assessment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* 161(3), 169–182. <https://doi.org/10.1680/wama.2008.161.3.169>.

- HABERSACK, H., FUCHS, H., SATTLER, S. & H. WIND (2003): Hochwasser 2002 – Datenbasis der Schadensbilanz 2002. Startclim.9 Endbericht, Zentrum für Naturgefahren und Risikomanagement, Wien.
- HABERSACK, H., SCHÖBER, B. & C. HAUER (2015): Floodplain evaluation matrix (FEM): An interdisciplinary method for evaluating river floodplains in the context of integrated flood risk management. *Natural Hazards* 75, 5–32. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0842-4>.
- HALL, J., ARHEIMER, B., BORGA, M., BRÁZDIL, R., CLAPS, P., KISS, A., KJELDSEN, T.R., KRIAUCIŪNIENĖ, J., KUNDZEWCZ, Z.W., LANG, M., LLASAT, M.C., MACDONALD, N., MCINTYRE, N., MEDIERO, L., MERZ, B., MERZ, R., MOLNAR, P., MONTANARI, A., NEUHOLD, C., PARAJKA, J., PERDIGÃO, R.A.P., PLAVCOVÁ, L., ROGGER, M., SALINAS, J.L., SAUQUET, E., SCHÄR, C., SZOLGAY, J., VIGLIONE, A. & G. BLÖSCHL (2014): Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. *Hydrology and Earth System Science* 18, 2735–2772. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014>.
- HALLEGATTE, S., SHAH, A., LEMPERT, R., BROWN, C. & S. GILL (2012): Investment Decision Making Under Deep Uncertainty. Policy Research Working Paper 6193. World Bank.
- HERRNEGGER, M., BUTTINGER, F., SCHULZ, K. & J. WESEMANN (2018): Do regional climate models contain reasonable information to estimate extreme floods?. In: American Geoscience Union, AGU Fall Meeting 2018, Washington.
- HOGL, K., HABERSACK, H., HERRNEGGER, M., SEHER, W., NORDBECK, R., LÖSCHNER, L., SCHERHAUFER, P. WESEMANN, J. & M. EDER (2018): Regional Floodplain Management and Risk Transfer Mechanisms: Assessing Options for Climate Adaptation (RegioFlood) – Interim Report. Klima- und Energiefonds, 92.
- HOGL, K., NACHTNEBEL, H.P., SCHULZ, K., APPERL, B., HERRNEGGER, M., SENONER, T., SEHER, W., LÖSCHNER, L., NORDBECK, R. & P. SCHERHAUFER (2015): Anticipatory Flood Risk Management under Climate Change Scenarios: From Assessment to Adaptation (RiskAdapt), Final report. Universität für Bodenkultur, Wien.
- HOHENSINNER, S., HABERSACK, H., JUNGWIRTH, M. & G. ZAUNER (2004): Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river–floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: the Danube River (1812–1991). *River Research and Applications* 20, 25–41. <https://doi.org/10.1002/rra.719>.
- HUTTENLAU, M., SCHNEEBERGER, K., WINTER, B., REISS, J. & J. STÖTTER (2015): Analysis of loss probability relation on community level: a contribution to a comprehensive flood risk assessment. In: SENER, S.M. & C.A. BREBBIA (Eds.) *Disaster management and human health risk IV*. WIT Transactions on the Built Environment 150, 171–182. <https://doi.org/10.2495/DMAN150161>.
- IPCC (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- KENYON, W., HILL, G. & P. SHANNON (2008): Scoping the role of agriculture in sustainable flood management. *Land Use Policy* 25, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2007.09.003>.
- KIENBERGER, S., LANG, S. & P. ZEIL (2009): Spatial vulnerability units – expert-based spatial modelling of socio-economic vulnerability in the Salzach catchment, Austria. *Natural Hazards and Earth System Science* 9, 767–778. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-767-2009>.
- KUBAL, C., HAASE, D., MEYER, V. & S. SCHEUER (2009): Integrated urban flood risk assessment – adapting a multicriteria approach to a city. *Natural Hazards and Earth System Science* 9, 1881–1895. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1881-2009>, 2009.
- LAND STEIERMARK (2013): Hochwasserschutz & Flussraumgestaltung Raab, Presseinformation. <http://www.wasseraktiv.at/resources/files/2013/5/28/4186/eroeffnung-hws-raab-feldbach.pdf>, Zugriff am 13.06.2019.
- LAND STEIERMARK (2019): Hochwasserschutz an der Raab. <http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/10007278/55195518/>, Zugriff am 13.06.2019.
- LAND STEIERMARK (2019): ProRaab(a) – Hochwasserprognosemodell Raab. <http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/11514709/4570277/>, Zugriff am 09.12.2019.
- LAWA (1995): Leitlinie für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz: Hochwasser – Ursachen und Konsequenzen, Stuttgart.
- LÖSCHNER, L., HERRNEGGER, M., APPERL, B., SENONER, T., SEHER, W. & H.P. NACHTNEBEL (2017): Flood risk, climate change and settlement development: a micro-scale assessment of Austrian municipalities. *Regional Environmental Change* 17 (2), 311–322. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1009-0>.
- LÖSCHNER, L., NORDBECK, R., SCHERHAUFER, P. & W. SEHER (2016): Scientist-stakeholder workshops: A collaborative approach for integrating science and decision-making in Austrian flood-prone municipalities. *Environmental Science & Policy* 55, 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.003>.
- LÖSCHNER, L. & A. SCHINDELEGGGER (2019): Compensation for Flood Storage. Policy Brief N° 3. International Water Resources Association.
- MAUCH, C. & T. ZELLER (2008): Rivers in history: perspectives on waterways in Europe and North America. University of Pittsburgh Press, Pittsburgh.
- MERZ, B. (2006): Hochwasserrisiken: Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- MERZ, B., KREIBICH, H., THIEKEN, A. & R. SCHMIDTKE (2004): Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4, 153–163. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-153-2004>.
- MEYER, V., SCHEUER, S. & D. HAASE (2009): A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Natural Hazards* 48, 17–39. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9244-4>.
- NACHTNEBEL, H.P. & B. APPERL (2015): Beurteilung des Hochwasser-Schadenspotenzials unter dynamischen Bedingungen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 67, 120–130.
- NACHTNEBEL, H.P. & B. APPERL (2013): Hochwasserrisikomanagement Gleisdorf. Pilotprojekt zur Umsetzung der EU-Hochwasserrichtlinie – Endbericht Teil A Methodik. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, A14 Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit.
- NEUHOLD, C. & H.P. NACHTNEBEL (2012): Beurteilung des Hochwasserrisikos: Skalenaspekte und Umsetzung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 64, 3231–328.
- PAPAIIOANNOU, G., VASILIADES, L. & A. LOUKAS (2014): Multi-Criteria Analysis Framework for Potential Flood Prone Areas Mapping. *Water Resources Management* 29, 399–418. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0817-6>.
- POLLAK, M. (2014): Bewertung von Überflutungsflächen mit der FEM-Methode am Beispiel der Raab und Krems als Beitrag zur Umsetzung der EU-Hochwasserrichtlinie. Masterarbeit - Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau (IWHW), Universität für Bodenkultur, Wien.
- RAAB FLOOD 4CAST (2019): RAAB FLOOD 4CAST – Website. <https://www.interreg-athu.eu/raabflood4cast/>, Zugriff am 09.12.2019.
- SCHEUER, S., HAASE, D. & V. MEYER (2011): Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: from a starting point view towards an end point view of vulnerability *Natural Hazards* 58, 731–751. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9666-7>.

- SCHNEEBERGER, K., HUTTENLAU, M., WINTER, B., STEINBERGER, T., ACHLEITNER, S. & J. STÖTTER (2019): A Probabilistic Framework for Risk Analysis of Widespread Flood Events: A Proof-of-Concept Study. *Risk Analysis* 39, 125-139. <https://doi.org/10.1111/risa.12863>.
- SCHULZ, K., LEBIEDZINSKI, K., BRENNER, C., APPERL, B. & F. KRATZERT, F. (2018): Hochwasserschadenspotential 2018: Evaluierung und Prognose der wasserwirtschaftlichen Entwicklung. Amt der Oö. Landesregierung, Linz.
- SCHULZ, K., SCHWINGSHANDL, A., APPERL, B., BRENNER, C., FORDINAL, I. & J. ROITHER (2014): Wasserwirtschaftliche Entwicklung in Überflutungsgebieten - Raumnutzung und Maßnahmenwirkung (Modul 1- Machbakeitsstudie). Abschlussbericht. Amt der Oö. Landesregierung, Linz.
- STATISTIK AUSTRIA (2015): Adress-GWR-Online. https://www.statistik.at/web_de/services/adress_gwr_online/index.html, Zugriff am 13.06.19.
- STUA BIELEFELD (o.D.): Hochwasseraktionsplan Diemel: Berichte Schadenspotential. Staatliches Umweltamt Bielefeld.
- THIEKEN, A.H., CAMMERER, H., DOBLER, C., LAMMEL, J. & F. SCHÖBERL (2016): Estimating changes in flood risks and benefits of non-structural adaptation strategies - a case study from Tyrol, Austria. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 21 (3), 343-376. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9602-3>.
- UNISDR (2011): Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Revealing Risk, Redefining Development. United Nations, Genf.
- WELP, M., DE LA VEGA-LEINERT, A., STOLL-KLEEMANN, S. & C.C. JAEGER (2006): Science-based stakeholder dialogues: Theories and tools. *Global Environmental Change* 16, 170-181. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.12.002>.
- WISA (2019): Hydrographisches Jahrbuch 2016 – Pegel Feldbach (Raab), Mst.-Nr.: 210989. Wasserinformationssystem Austria, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.