



HochwasserRisikozonierung Austria 3.0 (HORA 3.0)

Günter Blöschl · Jürgen Waser · Andreas Buttinger-Kreuzhuber · Daniel Cornel · Julia Eisl · Michael Hofer · Markus Hollaus · Zsolt Horváth · Jürgen Komma · Artem Konev · Juraj Parajka · Norbert Pfeifer · Andreas Reithofer · José Salinas · Peter Valent · Alberto Viglione · Michael H. Wimmer · Heinz Stiefelmeyer

Angenommen: 26. Januar 2022 / Online publiziert: 15. März 2022
© Der/die Autor(en) 2022

Zusammenfassung Der vorliegende Beitrag beschreibt die Konzeption und die methodischen Schritte des Projekts HORA 3.0, in dem Hochwasserrisikoflächen für ganz Österreich berechnet wurden. Die Analyseschritte umfassen: Qualitätskontrolle und Korrektur des Gewässernetzes und der Einzugsgebietsgrenzen; Berechnung der Abflussscheitel und Frachten gegebener Jährlichkeit; Erstellung eines digitalen Höhenmodells, das mit allen relevanten Hochwasserinformationen, einschließlich der Flussbettgeometrie, übereinstimmt; instationäre, zweidimensionale Simulation der Überflutungsflächen mit konsistenter Jährlichkeit. In jedem Schritt werden automatische und manuelle Verfahren kombiniert, um die lokalen hydrologischen und hydraulischen Bedingungen in einem bundesweiten Projekt möglichst zutreffend abzubilden. Die Hochwasserrisikoflächen mit einer Auflösung von 2 m für

eine Gesamtlängslänge von 32.000 km sind bereits auf der HORA-Plattform (www.hora.gv.at) veröffentlicht. Das entwickelte Instrumentarium kann für weiterführende Projekte verwendet werden, wie z. B. für Visualisierungen, Schadensauswertungen und in Zukunft für die Berechnung pluvialer Hochwassergefahren.

Schlüsselwörter

Hochwasserrisikomanagement · Gewässernetz · Hochwasserwahrscheinlichkeiten · Digitales Geländemodell · Hydrodynamische Modellierung · Überflutungsflächen

Flood risk zoning Austria 3.0 (HORA 3.0)

Abstract The present article summarises the strategy and methodology

ical steps of the HORA 3.0 project, in which flood risk zones have been calculated for all of Austria. The analysis steps include: quality control and correction of the stream network and the catchment boundaries; estimation of flood peaks and volumes of a given return period; establishment of a digital elevation model that matches all relevant flood information, including river bed geometry; unsteady, two-dimensional simulations of flood inundation patterns with consistent return periods. In each step, automatic and manual methods are combined in order to map the local hydrological and hydraulic conditions as accurately as possible in a nationwide project. The flood risk zones with a resolution of 2 m for a total river length of 32,000 km have already been published on the HORA platform (www.hora.gv.at). The methodologies developed can be used for further projects, e.g. for visualizations, damage evaluations and in the future for the mapping of pluvial flood hazards.

Keywords Flood risk management · Stream network · Flood probabilities · Digital terrain model · Hydrodynamic modelling · Inundation areas

1 Einleitung

In den Jahren 2004 und 2005 wurde das Projekt HORA 1.0 (Hochwasserrisikoflächen Österreich) durchgeführt (Merz et al. 2008). Dabei wurden Überflutungsgebiete für Hochwasserabflüsse gegebener Jährlichkeiten für ganz Österreich ausgewiesen und im Rahmen der HORA-Plattform (www.hora.gv.at) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht (Stiefelmeyer und Hlatky 2008). Die HORA-Plattform hat sich seitdem als Public-Private-Partnership-Projekt (PPP) von BMLRT und Versicherungsverband Österreich (VVO) weiterentwickelt. Sie enthält heute neben statischen Informationen zu Hochwasser, Erdbeben, Sturm, Blitz, Hagel und

Univ.-Prof. DI Dr. G. Blöschl (✉) · DI Dr. A. Buttinger-Kreuzhuber · DI Dr. Z. Horváth · DI Dr. J. Komma · PD J. Parajka, PhD · DI Dr. J. Salinas · Ing. P. Valent, MSc PhD
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich
bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

DI Dr. M. Hollaus · Univ.-Prof. DI Dr. N. Pfeifer · DI M. H. Wimmer
Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien, Wiedner Hauptstraße 8–10, 1040 Wien, Österreich

DI Dr. J. Waser · DI Dr. A. Buttinger-Kreuzhuber · DI Dr. D. Cornel · DI Dr. Z. Horváth · DI A. Konev
VRVis Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung Forschungs-GmbH, Donau-City-Straße 11, 1220 Wien, Österreich

DI DI J. Eisl · DI M. Hofer · Mag. A. Reithofer
Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Günter Humer GmbH – Ingenieurbüro für Kulturtechnik und Wasserwirtschaft, Geboltskirchen/Gmunden, Österreich

Prof. Dr. A. Viglione
Department für Umwelt-, Land- und Infrastrukturingenieurwesen, Technische Universität Turin, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Turin, Italien

DI Dr. H. Stiefelmeyer
Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Stubenring 1, 1010 Wien, Österreich

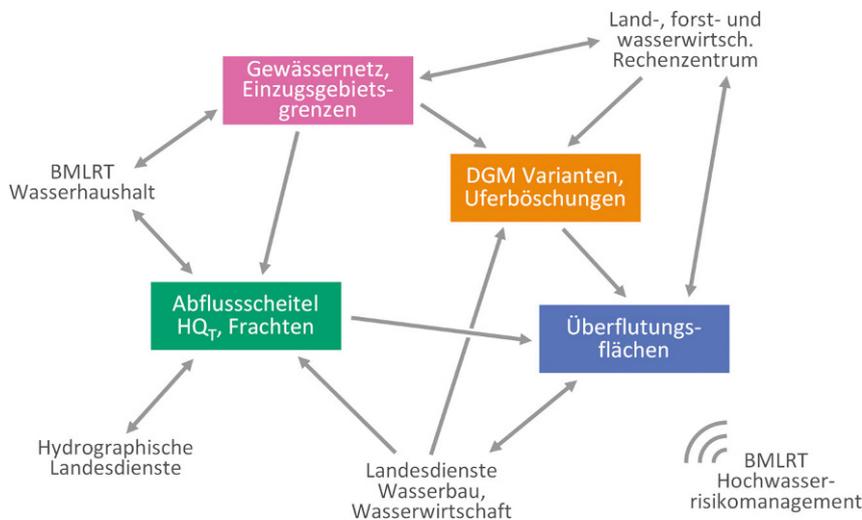


Abb. 1 Einbettung des Projekts HORA 3.0 in die entsprechende Fachlandschaft in Österreich

Schnee auch laufend aktualisierte und aktuelle Informationen zu Hochwasser, aktuellen Erdbebenereignissen und Sturm (Blöschl et al. 2022). Das HORA-Portal wird von den Bürgerinnen und Bürgern rege genutzt, wie die sehr hohen Zugriffszahlen belegen. Im langjährigen Durchschnitt sind es mehr als 200.000 Zugriffe pro Jahr auf die Homepage, wobei fast 80% der Nutzerinnen und Nutzern die Hochwasserkarten besuchen und sich dort auch länger aufhalten.

Seit der Studie aus den Jahren 2004/2005 ist es aus mehreren Gründen erforderlich geworden, die Ergebnisse des Projekts HORA 1.0 zu überarbeiten. Zum einen sind in Österreich in den letzten Jahren zahlreiche große Hochwasser aufgetreten, und es besteht die Sorge, dass die Hochwassergefahr zugenommen hat. In der Tat zeigen Abflussmessungen signifikante Trends, und Klimaprojektionen legen nahe, dass sich die Trends in ähnlicher Weise in die Zukunft fortsetzen könnten (Blöschl et al. 2018). Für den Zeitraum 1976–2014 zeigen 34% der gemessenen Abflussreihen nördlich des Alpenhauptkamms einen signifikanten steigenden Trend, während es im Süden 15% sind. Die Gründe für diese Änderungen wurden umfangreich analysiert (Blöschl et al. 2015a; Bertola et al. 2021; Merz et al. 2021) und es ist klar, dass der Klimawandel einen Beitrag leistet. Deshalb war es notwendig, die Hochwassergefahr auf Basis der aktualisierten Abflussdatenreihen neu zu bewerten.

Zum anderen sind in der Zwischenzeit auch andere Datengrundlagen aktualisiert bzw. wesentlich verbessert worden. So liegt jetzt beispielweise für ganz Österreich ein Digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 1 m vor. Zudem sind die methodischen Instrumente kontinuierlich verbessert worden. Die neuesten parallelisierten hydrodynamischen Modelle ermöglichen eine vielfache Rechengeschwindigkeit, wodurch für ganz Österreich eine Auflösung möglich geworden ist, die vor wenigen Jahren nur für lokale Studien machbar war (Horváth et al. 2020). Eine Neubewertung erlaubt es, all diese neuen Daten bzw. Technologien heranzuziehen, um genauere und aktuellere Hochwasserrisikoflächen zu bestimmen.

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Konzeption und die neuen Wege des Projekts HORA 3.0, in dem diese Neubewertung durchgeführt wurde. Das Ziel war es, Hochwasserüberflutungsflächen für Abflüsse mit einer Jährlichkeit von 30, 100 und 300 Jahren für das gesamte Bundesgebiet zu berechnen, sowie für eine hypothetische Situation mit einer Abflussjährlichkeit von 300 Jahren, bei der die Hochwasserschutzanlagen überströmt werden bzw. versagen. Die letztere Situation kann als Indikator für das Restrisiko angesehen werden. Die Ergebnisse sind bereits auf der HORA-Plattform (www.hora.gv.at) veröffentlicht.

2 Konzeption

Die Arbeiten zielten darauf ab, mit einem für ganz Österreich einheitlichen Verfahren die Hochwasserrisikoflächen möglichst genau zu bestimmen. Die Konzeption des Projekts HORA 3.0 orientierte sich an der Datenverfügbarkeit, an den technischen Möglichkeiten sowie an der Fachlandschaft in Österreich (Abb. 1). Dementsprechend wurde das Projekt in vier Module gegliedert.

Das erste Modul (in Abb. 1 rosa gekennzeichnet) befasst sich mit der Unterteilung des gesamten Bundesgebiets in Einzugsgebiete, die durch ein eindeutiges Gewässernetz verbunden sind, und damit die Grundlage für die Wasserbewegung in der Landschaft liefern. Das zweite (in Abb. 1 grün) ermittelt auf Basis von Pegelbeobachtungen die Hochwasserabflüsse HQ_T einer bestimmten Jährlichkeit T für dieses Gewässernetz. Das dritte Modul widmet sich der geometrischen Darstellung der Landoberfläche in Form von Digitalen Geländemodellen (DGMs) und anderen Datensätzen, z. B. zur Beschreibung der Kanten von Uferböschungen (in Abb. 1 orange). Das vierte Modul (in Abb. 1 blau) basiert auf den ersten drei, und führt zweidimensionale, instationäre hydrodynamische Simulationen der Überflutungsflächen für $T=30, 100$ und 300 Jahre sowie $T=300$ Jahre ohne Dämme, durch.

Die Herausforderung in allen Schritten bestand darin, die lokalen Besonderheiten der hydrologischen und hydraulischen Bedingungen in einem bundesweiten Projekt möglichst zutreffend abzubilden. Aus logistischen Gründen war es nicht möglich, Feldbegehungen durchzuführen, um Querprofile zu vermessen und Wasserbauten und andere relevante Maßnahmen zu erheben, denn die gesamte zu untersuchende Gewässerstrecke betrug 32.000 km. Deshalb wurden geeignete, an die österreichische Situation angepasste Verfahren entwickelt, um aus den vielfältigen vorhandenen Informationen ein Höchstmaß an Genauigkeit zu extrahieren. In Anlehnung an HORA 1.0 (Merz et al. 2008) wurden sie als kombinierte automatisch-manuelle Verfahren implementiert. Der Großteil der Gewässerabschnitte verhält sich in Hinblick auf die Abflussbildung und den Oberflächenabfluss in ähnlicher Weise und dafür wurden die entwickelten automatischen Verfahren eingesetzt. Manche Situationen

unterscheiden sich jedoch, und für diese wurden Expert:inneneinschätzungen getroffen. Dadurch wird einerseits der personelle Aufwand reduziert, und andererseits die Möglichkeit erschlossen, komplexe hydrologische und hydraulische Situationen zu erfassen.

Die Vorgangsweise wurde auch in die entsprechende Fachlandschaft in Österreich eingebettet (Abb. 1). Als Auftraggeber und externe Koordination des Gesamtprojekts fungierte die Abteilung Hochwasserrisikomanagement des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT). Die Abteilung Wasserhaushalt des BMLRT stellte hydrologische Daten zur Verfügung und diente auch als fachlicher Ansprechpartner betreffend Gewässernetz, Einzugsgebietsgrenzen und die generellen hydrologischen Berechnungen. Besonders viel Wissen über lokale hydrologische Besonderheiten ist bei den hydrographischen Landesdiensten vorhanden. Zu diesem Zusatzwissen zählen Informationen über historische Hochwasser und die lokale Hydrologie, die Einschätzung der Güte der hydrologischen Messdaten, vorangegangene Hochwasserstudien und Erfahrungen aus Gebietsbegehungen. Im Rahmen von Besuchen der Projektmitarbeiter:innen bei den hydrographischen Landesdiensten wurden deshalb die Abflussdaten gemeinsam interpretiert, Überlegungen zu wirksamen Prozessen angestellt und die daraus folgende Schätzung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten abgestimmt. Die wasserbau-

lichen bzw. wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Länder wurden eingebunden, einerseits indem sie gemessene Flussprofile, vorhandene Abflussuntersuchungen entlang des Gewässernetzes und Informationen über Wasserbauten (z. B. Rückhaltebecken) zur Verfügung stellten, soweit digital vorhanden. Andererseits wurden im Rahmen der Möglichkeiten gegen Projektende die berechneten Hochwasserrisikoflächen mit den zuständigen Mitarbeiter:innen diskutiert. Das Land-, forst- und wasserwirtschaftliche Rechenzentrum stellte zahlreiche Geodaten zur Verfügung, und übernahm auch die Implementierung der Endergebnisse des Projekts (d. h. der Hochwasserrisikoflächen) auf der Plattform HORA.

3 Gewässernetz und Einzugsgebietsgrenzen

Die wichtigsten Vektordatensätze waren das Berichtsgewässernetz gemäß Wasserrechtsgesetz und die Basiseinzugsgebiete (Version 12 vom Februar 2017). Der Datensatz der Einzugsgebiete enthielt 41.069 Polygone mit einer mittleren Fläche von 1,5 km². Jedes Polygon stellte ein Teileinzugsgebiet dar und enthielt eine Kennung zu den nächsten flussabwärts gelegenen Polygonen, wodurch die Topologie der Teileinzugsgebiete definiert ist. Meist gab es nur ein Unterliegergebiet, aber in 390 Fällen waren es zwei oder drei, wenn das Wasser in Kanälen (z. B. Mühlkanäle, Kanäle für Wasserkraft, Hochwasserschutz) ausgeleitet wird. Da die zur

Berechnung der Hochwasserabflüsse verwendete Methode eine eindeutige Topologie erfordert, wurde in solchen Fällen nur jenes Unterliegergebiet berücksichtigt, welches der dominanten Fließrelation bei großen Hochwassern entsprach, und die Kennung aktualisiert. Die Einschätzung erfolgte manuell unter Zuhilfenahme von Orthofotos und anderen Informationen. Mithilfe der Kennungen wurden aus den Teileinzugsgebieten Gesamteinzugsgebiete abgeleitet und abermals vollständig visuell geprüft.

In einem zweiten Schritt wurde der Gewässernetzdatensatz mit dem Einzugsgebietsdatensatz abgeglichen, und jedem Teileinzugsgebietspolygon wurde genau ein Gewässerabschnitt zugeordnet. Dadurch wurde eine vollständig konsistente Topologie von Einzugsgebieten und Gewässernetz ohne Schleifen oder Bifurkationen erzielt. Die bestehenden Kanäle im Gewässernetz wurden identifiziert und anschließend entweder entfernt (vor allem kleine Kanäle wie in Abb. 2a zu sehen), oder ihre stromaufwärts gelegene Verbindung zum Hauptgewässer wurde geschlossen (z. B. Marchfeldkanal, Leithakanal), wenn sie selbst ein größeres Gebiet entwässerten. Dabei handelte es sich um sehr aufwendige Arbeiten wegen der vielen Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen und den je nach Situation unterschiedlichen Korrekturen. Schließlich wurde dem Gewässernetz eine Fließrichtung hinzugefügt (Oberlieger- und Unterliegerknoten für jeden Abschnitt). Da

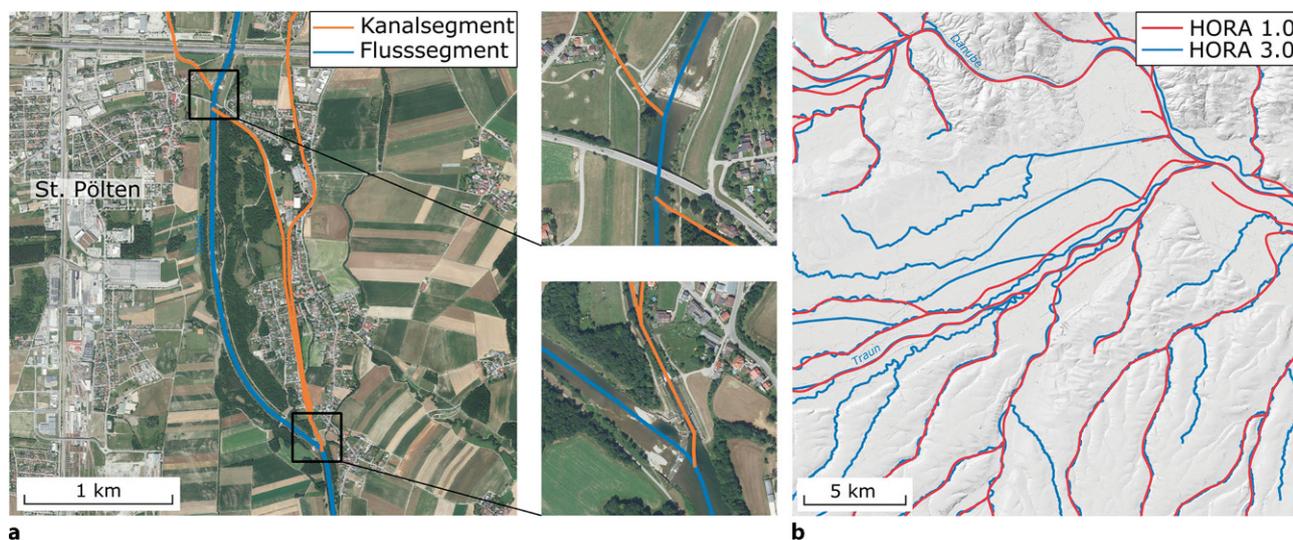


Abb. 2 a Entfernen der Kanalsegmente im Bereich der Traisen bei St. Pölten, um eine eindeutige Abflussrelation zu erzielen. b Vergleich des Gewässernetzes HORA 1.0 und HORA 3.0 im Bereich der Mündung der Traun in die Donau

im Rahmen des Projekts HORA 3.0 Überflutungsflächen nur für Gewässer mit Einzugsgebietsfläche $>10\text{ km}^2$ berechnet werden sollten, wurde das Gewässernetz entsprechend beschnitten, woraus sich aus einer ursprünglichen Gesamtlänge von 83.200 km eine Gesamtlänge von 32.000 km ergab, mit insgesamt 20.000 Gewässerabschnitten bzw. 21.000 Knoten. Der sich daraus ergebende HORA-3.0-Gewässernetzdatensatz ist viel detaillierter als das in HORA 1.0 verwendete Gewässernetz, wie in Abb. 2b zu erkennen.

4 Hochwasserabflussscheitel HQ_T und Frachten

Sämtliche in Österreich verfügbaren Reihen beobachteter Jahresmaxima der Abflüsse wurden verwendet. Für 80% der Pegel reichten die Reihen bis 2015, für 20% der Pegel sogar bis 2018 oder 2019. Alle Pegelstellen wurden logisch mit dem Gewässernetz und den Einzugsgebietsflächen verknüpft, größtenteils automatisch, teilweise manuell. Sodann wurden die Abflussdaten mit denen in HORA 1.0 abgeglichen bzw. die Unterschiede analysiert. In Abstimmung mit den Hydrographischen Landesdiensten (HDs) wurde die Unsicherheit in der Pegelbeobachtung auf Basis der Ortskenntnis und der Erfahrung mit dem Pegel und seinen Durchflusswer-

ten bei hohen Wasserständen eingeschätzt. Pegel mit zu großen Unsicherheiten wurden aus dem Datenkollektiv entfernt. Ebenso wurde festgelegt, ob die Beobachtungen an einem Pegel für die Region gültig sind oder nur lokale Gegebenheiten widerspiegeln. Extreme Beobachtungen der letzten 10 Jahre wurden diskutiert, von den HDs gegebenenfalls korrigiert und in HORA 3.0 übernommen. Daraus ergaben sich für HORA 3.0 in Summe 781 Pegel im Vergleich zu 698 Pegeln in HORA 1.0. Zudem waren die Reihen deutlich länger (Median von 44 Jahren im Vergleich zu 32 Jahren bei HORA 1.0).

Bei der Schätzung großer Jährlichkeiten muss in der Regel über den Bereich der bisher beobachteten Abflüsse hinaus extrapoliert werden. Die Abflussdaten im Hochwasserkollektiv beinhalten dafür oft nicht ausreichend Information. Deshalb wurde als konzeptionelle Grundlage für die Bestimmung der T-jährlichen Abflüsse an den Pegeln und am gesamten Gewässernetz die Extremwerthydrologie gewählt (Merz und Blöschl 2008a, b), bei der nicht nur eine statistische Auswertung der Abflussdaten erfolgt, sondern darüber hinausgehend in zeitlicher, räumlicher und kausaler Hinsicht erweiterte Informationen über das Hochwasserverhalten im betreffenden Gebiet verwendet werden. Das Ziel war dabei,

möglichst unterschiedliche Zusatzinformationen im Hinblick auf Annahmen und Daten zu berücksichtigen, um ein vollständigeres Bild zu erhalten. Diese Vorgangsweise entspricht einer zeitgemäßen Strategie zur Bestimmung der Hochwasser einer bestimmten Jährlichkeit (Blöschl und Merz 2008), wie im Regelblatt 220 des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbands und im Merkblatt M 552 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall empfohlen (ÖWAV 2019; DWA 2012).

Die statistische Schätzung aus den Abflussdaten an den Pegeln erfolgte mittels der Momentenmethode sowie durch die Bayesian Markov-Chain-Monte-Carlo (MCMC)-Methode für die Vertrauensbereiche unter Wahl einer Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) (Vigliano et al. 2013) (Abb. 3). Nach visueller Begutachtung der automatischen Schätzung wurden durch Einbeziehung von zeitlichen, räumlichen und kausalen Zusatzinformationen die statistischen Momente (Mittelwert MHQ , Variationskoeffizient CV , Schiefe CS) in Abstimmung mit den HDs festgelegt (Merz und Blöschl 2008c). Die zeitliche Informationserweiterung erfolgte durch Berücksichtigung historischer Hochwasserereignisse und Vergleich mit längeren Abflussreihen von Nachbargebieten; die räumliche

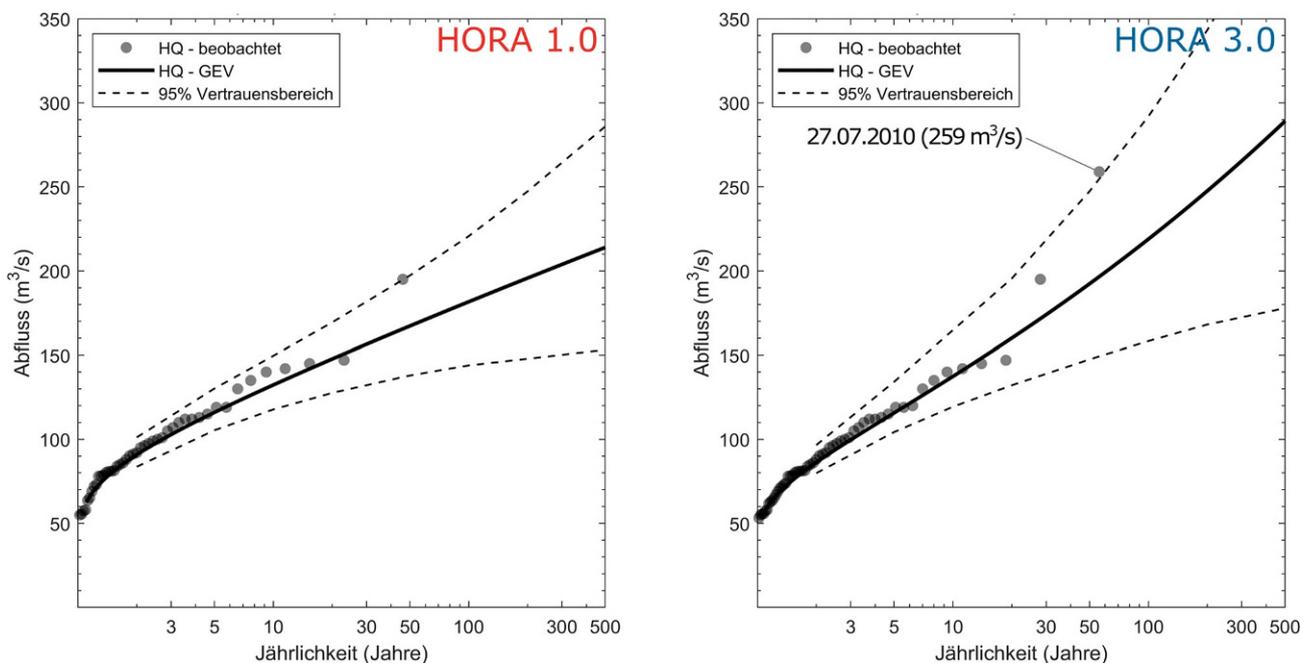


Abb. 3 Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für den Pegel Thal (Martinsbrücke) an der Rotach (84 km^2 Gebietsfläche), HORA 3.0 im Vergleich zu HORA 1.0. Durch das zusätzliche große Ereignis am 27.07.2010 erhöhte sich das HQ_{100} von 182 auf $220\text{ m}^3/\text{s}$

Informationserweiterung durch Einschätzung der räumlichen Situation mittels Abflussdaten der Nachbarpegel unter Verwendung von Karten, Hochwasserspendendiagrammen und Längenschnitten; und die kausale Informationserweiterung durch eine Einschätzung der Prozesse der Hochwasserentstehung mittels Vergleich mit z. B. Niederschlag, Geologie, Abflussbeiträgen und der Lage von Rückhaltebecken und Seen im Gebiet.

Die sich mit dieser Vorgangsweise ergebenden Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven wurden für alle Pegel mit denen von HORA 1.0 verglichen. Abweichungen wurden begründet, auf ihre Plausibilität geprüft und dokumentiert. Wenn in einem Gebiet in den letzten Jahren große Hochwasser aufgetreten sind, waren die berechneten Hochwasserabflüsse meist größer. Abb. 3 zeigt als Beispiel den Pegel Thal (Martinsbrücke) an der Rotach in Vorarlberg. Durch das zusätzliche große Ereignis am 27.07.2010 erhöhte sich das HQ_{100} von 182 auf 220 m³/s. In Einzelfällen wurde auch der Pegelschlüssel zufolge neuer Untersuchungen verändert. Eine Gegenüberstellung des 100-jährlichen Abflusses HQ_{100} von HORA 1.0 und HORA 3.0 aller Pegel zeigt Abb. 4. Wegen der erweiterten Datenbasis und der großen Hochwasser in den letzten Jahren sind die HQ_{100} in HORA 3.0 durchschnittlich um 8,7% größer als in HORA 1.0.

Für die instationären hydraulischen Berechnungen sowie für die Berücksichtigung des Einflusses von Was-

serbauten auf die HQ_T -Abflüsse war es notwendig, nicht nur die Scheitel, sondern auch zugehörige Hochwasserwellen abzuleiten. Dafür wurden die Auswertungen von beobachteten Hochwasserwellen auf Stundenbasis von Gaál et al. (2012), basierend auf der Methode von Merz et al. (2006), herangezogen und durch eine Gammafunktion angenähert.

Unter Verwendung der 752 als regional gültig angesehenen Pegel (29 Pegel waren nur lokal gültig) wurden sodann die Hochwasserscheiteldurchflüsse für die restlichen Knoten des Gewässernetzes ohne Pegel berechnet. Dies erfolgte in drei Schritten:

- (i) Automatische Berechnung der Hochwassermomente und daraus der HQ_T mittels des geostatistischen Verfahrens Top-kriging (Skøien et al. 2006) ähnlich wie in HORA 1.0, bei dem nicht nur die räumliche Distanz⁴, sondern auch die Fließrelationen entlang des Gewässernetzes berücksichtigt werden. Zudem gibt die Methode langen Abflussreihen mehr Gewicht als kurzen. Dies erhöht die Genauigkeit, da die Reihen eine unterschiedliche Länge von 5 bis 180 Jahren besitzen, und sich demnach auch ihre Zuverlässigkeit stark unterscheidet. Die automatische Berechnung berücksichtigte zudem die Flächenabhängigkeit der statistischen Hochwassermomente. Für das MHQ wurde eine Zunahme mit zunehmender Einzugsgebietsfläche mit einem Exponenten zwischen 0,75 am Alpennordrand und 0,55 im

Marchfeld angesetzt. Für den CV in Gebieten kleiner 100 km² wurde eine Zunahme mit abnehmender Fläche mit einem Exponenten von -0,1 angesetzt. Letzteres entspricht einem um 26% größeren Wert für 10 km² im Vergleich zu 100 km². Der dämpfende Effekt von Seen und Stauseen auf die Hochwasser wurde mittels des *FARL*-Index (Flood Attenuation by Reservoirs and Lakes) (FEH 1999) berücksichtigt. Zudem wurde in kleinen Gebieten mit hohem Jahresniederschlag das MHQ etwas erhöht, auf Basis von Regressionsanalysen in ganz Österreich. Als nächster Effekt wurde die beschränkte Speicherfähigkeit kleiner alpiner Einzugsgebiete berücksichtigt. Die HOWATI-Studie (Hochwasser-Tirol) (Rogger et al. 2012a, b) hatte gezeigt, dass in kleinen alpinen Einzugsgebieten die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve nicht immer entsprechend einer AEV-Verteilung verläuft, sondern eine Stufe aufweisen kann, und diese wurde analog HOWATI für Tirol berücksichtigt. Die Hochwasserwellen wurden in ähnlicher Weise wie die Scheitelabflüsse von den Pegeln auf das gesamte Gewässernetz regionalisiert.

- (ii) Automatische Berücksichtigung der Wirkung von Rückhaltebecken. 398 Rückhaltebecken mit einem Volumen von mehr als 10.000 m³ wurden für die Analysen herangezogen, deren Lage und Volumen bekannt waren, jedoch nicht die detaillierten Betriebsregeln. Deshalb wurde eine näherungsweise Wasserspiegellagenrechnung durchgeführt, bei der angenommen wurde, dass die Füllung bei einem Abfluss Q_F beginnt und dann die Abgabe linear zunimmt, mit einer geringeren Steigerung als der Zufluss. Die Abgabesteigerung wurde so gewählt, dass bei Erreichen der Beckenfüllung die Abgabe gleich dem Zufluss ist. Der Abfluss Q_F wurde aus vorhandenen Anlagedaten rückgerechnet. An den Knoten direkt unterhalb der Rückhaltebecken wurde mit dieser Vorgangsweise, im Vergleich zu einer hypothetischen Situation ohne Rückhaltebecken, das HQ_{100} im Durchschnitt um 32% reduziert.
- (iii) Manuelle Plausibilitätsprüfungen. Auch die Regionalisierung wurde manuell überprüft und zwar mittels Karten, Längenschnitten (Donau, Drau, Enns, Inn, March, Mur,

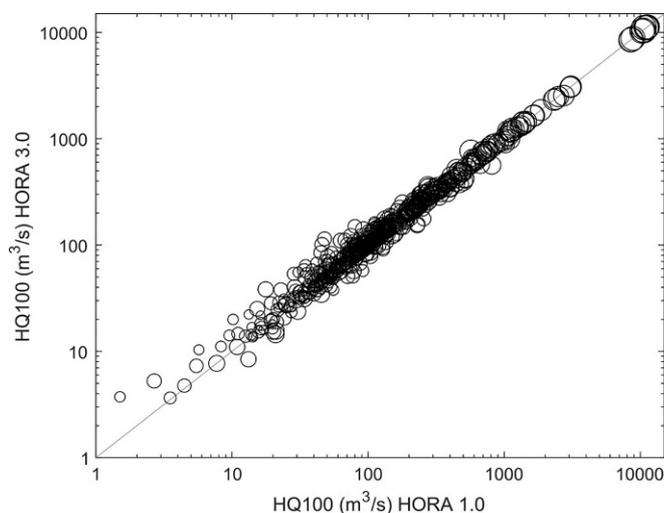


Abb. 4 Gegenüberstellung des 100-jährlichen Abflusses HQ_{100} von HORA 1.0 und HORA 3.0 an den Pegeln, doppellogarithmische Darstellung. Die Größe der Kreise gibt die Einzugsgebietsfläche der Pegel an

Rhein, Salzach, Thaya, Traun) und Spendendiagrammen getrennt nach Regionen. Abweichungen zu bestehenden Spendendiagrammen und Längenschnitten wurden in Hinblick auf eine Erklärung durch große Ereignisse in den letzten Jahren und unter Berücksichtigung aller hydrologischer Informationen einschließlich Abflussmessungen, Niederschlag, Geologie, Landnutzung, Wasserbauten und Seen sowie einer Expert:inneneinschätzung geprüft. Bei Bedarf wurden die Werte geändert und die Gründe der Änderung dokumentiert.

Abb. 5a zeigt die Ergebnisse für das gesamte Gewässernetz von 32.000 km, dargestellt als 100-jährliche Hochwasserspende ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) bezogen auf 100 km^2 , $Hq_{100, \text{norm}}$. Diese Darstellung wurde gewählt, um die über den Effekt der Einzugsgebietsfläche hinaus-

gehenden räumlichen Unterschiede zu zeigen. Zu erkennen ist, dass die größten Abflüsse (bezogen auf eine Gebietsfläche von 100 km^2) am Alpennordrand und in den Karawanken mit Werten über $1,8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ (entsprechend einem HQ_{100} von mehr als $180 \text{ m}^3/\text{s}$ bei 100 km^2 Fläche) auftreten. Die geringsten Abflüsse treten hingegen im Osten Österreichs wegen der geringeren Niederschläge und der durchlässigeren Böden auf, mit Werten unter $0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ (entsprechend einem HQ_{100} von weniger als $20 \text{ m}^3/\text{s}$ bei 100 km^2 Fläche). Abb. 5b zeigt das Verhältnis HQ_{300}/HQ_{100} als Maßzahl für die Steigung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve. Das Verhältnis zeigt eine kleinräumigere Variabilität, da dafür die lokalen hydrologischen Verhältnisse wichtiger sind als für die HQ_{100} -Werte selbst. Das kleinste Verhältnis tritt an der Donau auf (ca. 1,1), die größten nördlich der Donau (Weinviertel,

Waldviertel, Teile des Mühlviertels) mit Werten über 1,32. Die großen Verhältnisse ergeben sich aus dem großen Speichervermögen des Untergrunds im Vergleich zu den Extremniederschlägen (Merz et al. 2006). In diesen Gebieten können Extremhochwasser sehr viel größer als die üblichen Hochwasser sein, wie etwa das Ereignis August 2002 gezeigt hat (Komma et al. 2007).

5 DGM-Varianten, Flussachsen und Uferböschungen

In diesem Modul ging es um eine geometrische Darstellung der Landoberfläche in Form von digitalen Geländemodellen (DGMs) sowie der damit in Verbindung stehenden Vektordaten der Flussachsen und Uferböschungen. Als Grundlage dafür wurden ein Laserscanning-DGM vom Dezember 2015 mit einer räumlichen Auflösung von 1 m und ergänzend dazu ein digitales Oberflächenmodell (Dezember 2015, 1 m) sowie ein Orthofoto (April 2017, 0,2 m) inklusive Metainformationen verwendet. Die Überprüfung des DGMs ergab ein weitgehend homogenes Bild, wengleich gewisse Unterschiede zwischen Bundesländern bestanden, etwa bei Brücken über Gewässern und Wasseroberflächen. Die Grenzübergänge zwischen Bundesländern wiesen keine offensichtlichen Sprungstellen auf, mit Ausnahme von Wasserflächen, die ohnehin gesondert behandelt wurden (siehe unten).

Um für das Projekt HORA 3.0 einen möglichst konsistenten und qualitativ hochwertigen DATENSATZ zu erhalten, wurden die DGMs für eine Lagekorrektur der Flussachsen des Berichtsgewässernetzes (siehe Abschnitt 3.) herangezogen. Während bei größeren Flüssen weitgehend eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Flussachsen und dem DGM festzustellen war, waren bei kleineren Gewässern die Abweichungen oft wesentlich größer, teilweise im Bereich mehrerer Meter. Zur Lagekorrektur wurden dem Gewässerlauf abwärts folgend Profile quer zur Flussachse gelegt (gelb in Abb. 6) unter Anwendung folgender Kriterien in absteigender Priorität: Vermeidung oder zumindest Minimierung von Höhenanstiegen entlang der Flussachse; Wasser soll den tiefsten Punkt des Flussbetts im Querschnitt passieren; eine geringe Abweichung von der initialen Flussachse. Sodann wurden die Ergebnisse für das gesamte Flussnetz manuell kon-

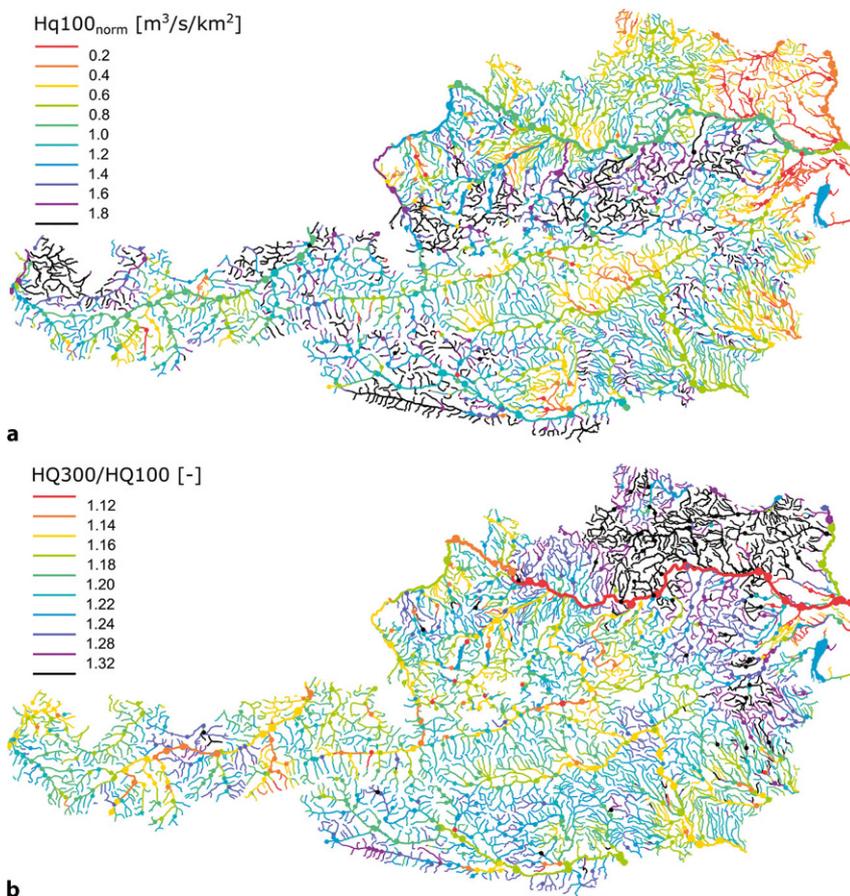


Abb. 5 **a** 100-jährliche Hochwasserspende ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) bezogen auf 100 km^2 , $Hq_{100, \text{norm}}$. Der 100-jährliche Abfluss (m^3/s) ergibt sich daraus gemäß $HQ_{100} = Hq_{100, \text{norm}} \cdot A^{0.7} \cdot 100^{0.3}$, wobei A die Einzugsgebietsfläche ist. **b** Verhältnis der 300- und 100-jährlichen Hochwasserabflüsse. Punkte zeigen die Werte an den Pegeln, Linien die auf das Gewässernetz regionalisierten Werte

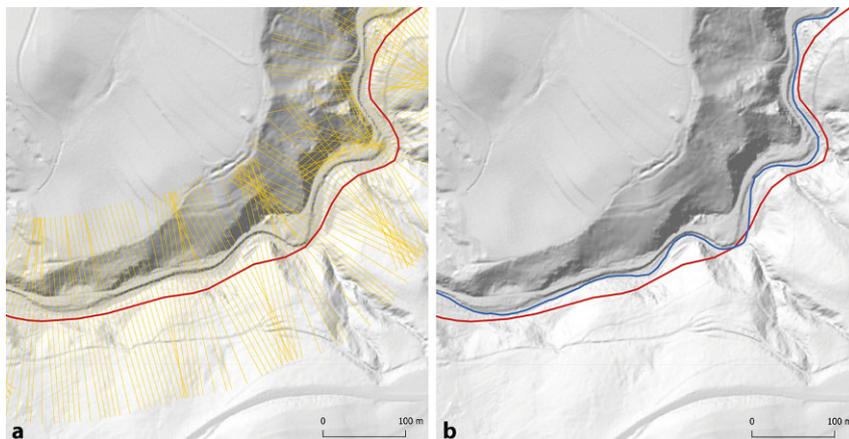


Abb. 6 Beispiel für den Flussachsenverlauf vor (*rot*) und nach (*blau*) der Lagekorrektur. **a** zeigt die Querprofile (*gelb*), die für die Lagekorrektur verwendet wurden: Kienbach kurz vor der Mündung in den Attersee, Fließrichtung von Osten nach Westen

trolliert und wo nötig verbessert. Das war erforderlich, da für rund 3 % aller Flussachsenabschnitte die automatische Korrektur keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielte. Gründe dafür sind raue oder nicht erkennbare Darstellung des Flussbetts im DGM, sehr große initiale Abweichungen oder längere unterirdische Gewässerverläufe. Durch die flächendeckende Kontrolle konnten die Flussachsen als korrekt hinsichtlich der Aufgabenstellung angenommen werden, was bei den folgenden Prozessierungsschritten eine deutlich zuverlässigere Automatisierbarkeit bewirkte.

In einem weiteren Schritt wurden Brücken bzw. andere Hindernisse im Flusslauf erkannt und beseitigt. Die Erkennung erfolgte mithilfe von Längsprofilen entlang der korrigierten Flussachsen. Das entsprechende Ver-

fahren verwendete primär die erste und zweite Ableitung der Höhenprofile in Kombination mit Annahmen über Gestalt und Mindestgröße von relevanten Hindernissen. Um ein Ausschneiden an unpassenden Stellen zu vermeiden (z.B. Durchlass unter einem anderen größeren Fluss), wurden alle automatisch detektierten Flussachsenabschnitte manuell nachkontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. Ein Verfahren zur Elimination der detektierten Brücken aus dem DGM wurde entwickelt, bei dem die einzelnen Querprofile parallel aneinander gereiht werden und nach einer Interpolation wieder in ihre originale Position entlang der Flussachse gebracht werden (Wimmer et al. 2021). An den größeren Flüssen waren meist Informationen über Brückenpfeiler und Kraftwerke vorhanden, und diese wurden bei der hydraulischen Modellierung

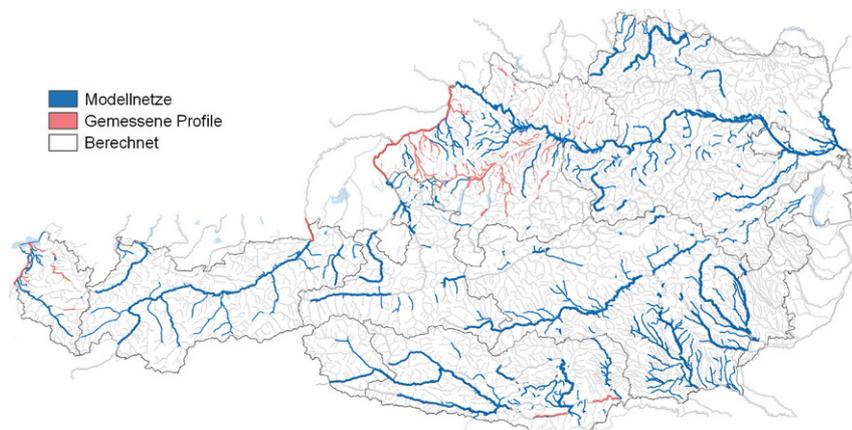


Abb. 7 Bestimmung der Gerinnegeometrie aus bestehenden hydraulischen Modellen (*blau*), mittels gemessener Profile (*rot*) sowie mit einem Näherungsansatz berechnet (*weiß*)

berücksichtigt, während an den kleinen Flüssen und Bächen die Brücken als nicht existent angesehen wurden. Insgesamt wurden österreichweit rund 42.500 Brücken oder Hindernisse detektiert und aus dem DGM entfernt. Knapp 1500 weitere Achsenabschnitte wurden als Durchlässe ausgewiesen. Ergänzend dazu wurden Böschungslinien und die Wasser-Land-Grenze detektiert und jeweils als ein Linienpaar pro Fluss gespeichert.

Das originale Geländemodell enthält auch nach der Brückenelimination die Wasseroberfläche zum Zeitpunkt der Datenaufnahme, aber nicht die Sohle der Gewässer. Letztere ist aber für die hydraulische Modellierung essenziell. Deshalb wurde das Flussbett in das DGM eingeschnitten, wobei je nach Datenverfügbarkeit verschiedene Ansätze gewählt wurden: Für große und mittelgroße Gewässer waren oft Modellnetze aus bestehenden hydraulischen Modellen vorhanden, die von den wasserbaulichen bzw. wasserwirtschaftlichen Abteilungen der Länder zur Verfügung gestellt wurden (16 % des Gewässernetzes) (Abb. 7). Für 2 % des Gewässernetzes wurden gemessene Querprofile zur Verfügung gestellt, die ebenfalls zu einem Rastermodell interpoliert und ins DGM eingefügt wurden (Mandlbürger 2000). Für 82 % aller Flusskilometer waren keine Messwerte verfügbar, sodass die Querschnitte basierend auf hydrologischen Annahmen näherungsweise bestimmt wurden. Ausgehend vom Wasserspiegel, der Gerinnebreite und dem Gefälle wurde der durchflossene Profilquerschnitt mittels der Fließformel nach Strickler als Funktion der Längsneigung, Rauigkeit und des gemessenen Abflusses abgeschätzt. Der Ansatz wurde anhand gemessener Profile und Wasserstände kalibriert und getestet. Gemessene Querprofile würden selbstverständlich die Genauigkeit erhöhen.

Schließlich wurden als Grundlage für das vierte Szenario (HQ_{300} ohne Dämme) Hochwasserschutzdämme identifiziert und entfernt. Da Hochwasserschutzzeilen derzeit nicht bundesweit georeferenziert erfasst sind, wurden Dämme aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften im DGM identifiziert. Dafür wurde ein gleitendes Mittel der Geländehöhen im HQ_{300} -Überflutungsbereich mit vorgegebener Fenstergröße gebildet, und dessen Differenz zum originalen DGM bestimmt. Dämme zeigen sich darin als erhabene



Abb. 8 Das quadratische Simulationsraster mit 2 m ermöglicht eine genaue Auflösung des DGM und der Gebäude und eine detaillierte Berechnung der Wassertiefen

ne Objekte. Die Fenstergröße wurde auf Basis von Testrechnungen mit 50 m festgelegt. Das Resultat ist ein Raster-Differenzmodell. Insgesamt wurden österreichweit Dämme mit einer Gesamtlänge von 3080 km detektiert.

6 Hydrodynamische Simulation der Überflutungsflächen

Im vierten Modul wurden instationäre, zweidimensionale hydrodynamische Berechnungen mit einer räumlichen Auflösung von 2 m durchgeführt (Abb. 8), um damit Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten zu berechnen. Die simulierten maximalen Wassertiefen im Bereich der Scheitel der Abflusswellen wurden als maßgebend für die Überflutungskarten angesehen.

Als Randbedingungen für die Berechnungen wurden die Abflusswellen mit Scheitel HQ_T in allen Knoten des Gewässernetzes verwendet (siehe Abschnitt 4.). In jedem Knoten wurde der Abfluss über den Querschnitt des Gerinnes unter Zuhilfenahme der Böschungsoberkanten verteilt. Die Simulationen wurden nicht für ein bestimmtes Ereignis durchgeführt, sondern für eine Jährlichkeit der Scheitelabflüsse von $T=30$, 100 bzw. 300. Der Scheitelabfluss und die zugehörigen Wasserstände entsprechen deshalb einem hydrologischen Längenschnitt entlang der Fließgewässer. Diese Methode unterscheidet sich von der bei lokalen hydraulischen Abflussberechnungen üblichen Vorgangsweise, bei der ein Ereignis simuliert wird, bei dem am Hauptfluss eine Abflusswelle auf einen Durchfluss von z. B. HQ_{100} ska-

liert wird, und für die Zubringer die bei einem derartigen Ereignis zu erwartenden Zuflüsse angesetzt werden, meist in der Größenordnung eines HQ_{10} . Die hier gewählte Methode erlaubt es – im Gegensatz zum traditionellen Vorgehen –, konsistente Überflutungsflächen der gleichen Jährlichkeit für eine große Region zu berechnen. Allerdings ist diese Methode nicht massenerhaltend, da nach einem Zusammenfluss die Summe der HQ_T der beiden Zubringer nicht gleich dem HQ_T unterhalb des Zusammenflusses ist. Dies ergibt sich daraus, dass in Realität die Scheitel der Zubringer selten gleichzeitig auftreten, und sich dadurch keine vollkommene Überlagerung ergibt. Um diesen Effekt effizient zu simulieren, wurde deshalb an Knoten Wasser entfernt bzw. hinzugefügt, und zwar in einem Ausmaß, dass die Bedingung einer räumlich konstanten Jährlichkeit des Scheitelabflusses (vorgegeben durch die hydrologische Regionalisierung wie in Abschnitt 4. beschrieben) erfüllt wird. Bei einem Zusammenfluss musste meist Wasser entfernt werden, um das nicht immer gleichzeitige Auftreten von Hochwasserwellen auszugleichen. Entlang des Gerinnes selbst wurde meist Wasser hinzugefügt, um die diffusen seitlichen Zuflüsse abzubilden. Die Entnahmen bzw. Zugaben erfolgten dynamisch, sodass nicht nur der Scheitelabfluss, sondern die gesamte vorgegebene Abflusswelle an den Knoten eingehalten wurde.

Die Rauigkeiten im Vorland wurden auf Basis der Landnutzungsdaten der Digitalen Katastralmappe (DKM) gewählt. Für die Pegelstellen wurden die

Rauigkeiten an die gemessenen Pegelschlüssel kalibriert und dann räumlich interpoliert, um die Rauigkeiten im Gerinne zu erhalten. Waren für einen Flussabschnitt hydraulische Detailstudien vorhanden, wurden die Rauigkeiten aus diesen Studien mit den zuvor ermittelten Werten im Vorland und im Gerinne durch Mittelbildung abgeglichen. Jedes Gebäude in Österreich, wie im 1-m-Oberflächenmodell enthalten, wurde als undurchlässige Wand modelliert.

Um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse weiter zu erhöhen, wurden die wichtigsten Durchlässe soweit identifizierbar berücksichtigt, und als freier Abfluss bzw. Abfluss unter Druck simuliert. Erfasste Kraftwerke wurden entweder direkt über die gegebene Wehrgeometrie im Falle von Flusskraftwerken oder mittels einer Wasserstands-Durchfluss-Beziehung an der Sperre im Falle von Speicherkraftwerken berücksichtigt. Flussabwärts wurden die Abflusswellen aus Abschnitt 4. angesetzt.

Die hydraulischen Berechnungen und ein großer Teil des Prozessierablaufs wurden mit der Simulationssoftware Visdom (Waser et al. 2011) durchgeführt. Es umfasst den Datenfluss von der automatisierten Generierung der Inputs für die Hydrauliksimulation über ihre Ausführung bis hin zur Nachbearbeitung. Die hydraulischen Simulationen lösen die vollständigen 2D-Flachwassergleichungen mit einer Finiten Volumenmethode (FVM) zweiter Ordnung (Buttinger-Kreuzhuber et al. 2019). Das Rechnernetz bestand aus einem quadratischen Gitter mit einer Zellgröße von 2 m. Die Algorithmen wurden parallelisiert (Horváth et al. 2016) und auf zehn NVIDIA Titan RTX Grafikkarten mit jeweils 24 GB Videospeicher implementiert. Österreich wurde in 182 Simulationsgebiete mit insgesamt ca. 20 Mrd. Zellen aufgeteilt. Der gewählte Zeitschritt hängt von den Fließgeschwindigkeiten ab, und ist typischerweise kleiner als 1 s. Mit dieser Implementierung betrug die Simulationszeit für das HQ_{100} beispielsweise 277 Tage (bezogen auf einen Prozessor). Die Simulationen wurden für drei unterschiedliche Hochwasserwahrscheinlichkeiten durchgeführt ($T=30$, 100, 300), sowie für ein Szenario $T=300$ ohne Dämme. Zusätzlich wurden die Simulationen wegen der iterativen Qualitätskontrolle zum Teil mehrmals wiederholt.

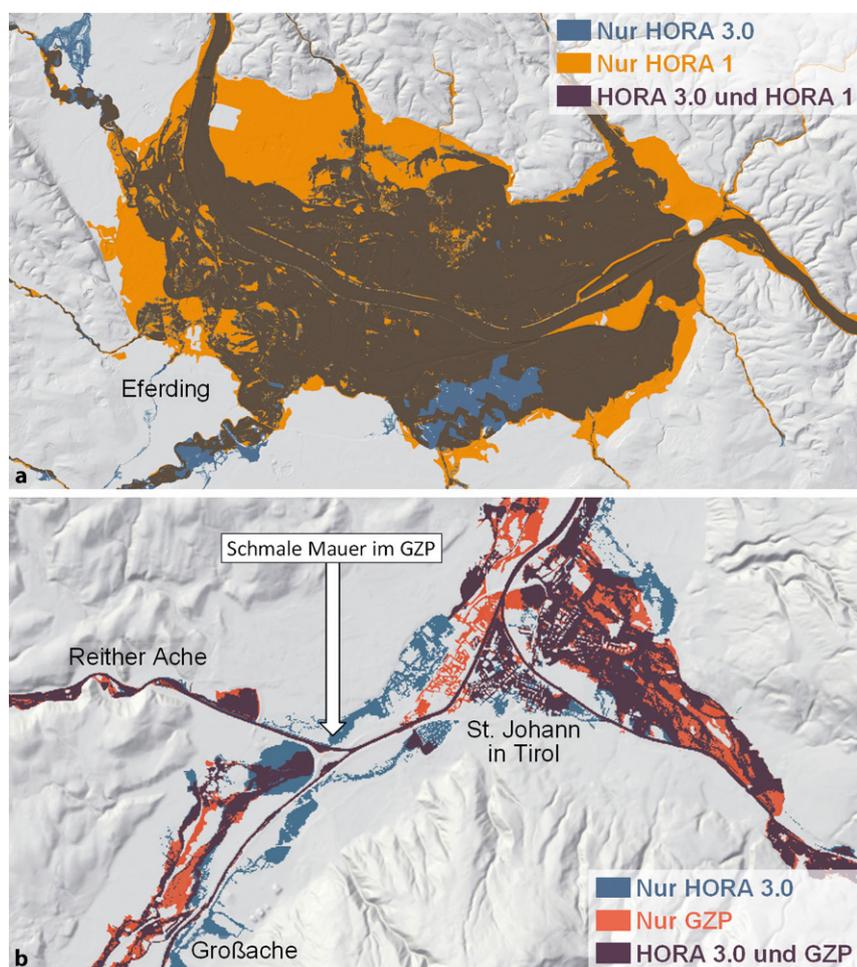


Abb. 9 Überflutungsflächen berechnet in HORA 3.0 im Vergleich zu **a** HORA 1.0. und **b** dem Gefahrenzonenplan (GZP)

Durch die instationäre zweidimensionale Simulation konnten die Überflutungsflächen in HORA 3.0 gegenüber den stationären eindimensionalen Simulationen von HORA 1.0 signifikant verbessert werden. Auch ist das hier verwendete DGM wesentlich genauer. Abb. 9a zeigt beispielsweise im Eferdinger Becken exaktere Anschlaglinien als bei HORA 1.0. Bei den HORA-3.0-Simulationen erfolgt die Füllung des Vorlands nur mit dem verfügbaren Wasservolumen der Hochwasserwelle und wird nicht wie bei stationären Simulationen völlig ausgespiegelt, es werden also Retentionseffekte berücksichtigt.

Die Ergebnisse wurden in mehrfacher Weise validiert. Zum einen wurden die simulierten Wasserstände mit den HQ_{100} -Wasserständen an Pegeln verglichen. Für die Pegel entlang des Inns zeigten sich beispielsweise meist nur Abweichungen von wenigen Zentimetern, mit Ausnahme von Jenbach-

Rotholz und Brixlegg mit um ca. 20 bis 30 cm niedrigeren Wasserständen, die sich teilweise durch nicht vollständig berücksichtigte Rückstauereffekte an Brücken erklären lassen. Ein weiterer Vergleich wurde mit den Überflutungsflächen aus dem Gefahrenzonenplan (GZP) durchgeführt, wo diese vorhanden waren. Da der GZP in Detailstudien gewonnen wurde, kann die Genauigkeit grundsätzlich als höher angesehen werden. Eine Übersicht über die Güte der Simulation liefert die Trefferquote, welche das Verhältnis der Anzahl der Treffer (Zelle nass in HORA 3.0 und im GZP) zur Anzahl der Zellen in GZP beschreibt. In Österreich wurden 81,2% der Überflutungsflächen der GZP in HORA 3.0 korrekt reproduziert, das bedeutet eine grundsätzlich gute Übereinstimmung. In Einzelfällen gibt es aber Abweichungen, die vorwiegend auf zwei Gründe zurückzuführen sind: Der erste besteht daraus, dass im GZP

meist mehr Detailinformationen zur Verfügung standen als im vorliegenden Projekt. Dazu zählen Mauern mit einer Breite $< 2\text{m}$, Durchlässe (die geschlossen oder offen angenommen werden können) sowie Kanäle. Beispielsweise werden in HORA 3.0 Flächen überflutet, die im GZP durch eine schmale Mauer geschützt sind. Der zweite Grund besteht in der unterschiedlichen Wahl der Jährlichkeit, denn im Projekt HORA 3.0 wurde wegen der regionalen Betrachtungsweise an allen Gewässern die gleiche Jährlichkeit angesetzt (z. B. ein HQ_{100}), während im GZP meist ein HQ_{100} am Hauptfluss angesetzt wurde und für die Zubringer eine kleinere Jährlichkeit (z. B. HQ_{10}). Als Beispiel wird in Abb. 9b die Situation in St. Johann in Tirol gezeigt. Im GZP ist eine schmale Mauer enthalten, die eine Ausuferung der Reither Ache verhindert, während es hier in HORA 3.0 zu einer Ausuferung kommt. In HORA 3.0 werden nach dem Zusammenfluss von Großsache und Reither Ache in der Großsache die Durchflüsse korrigiert, um ein HQ_{100} an der Großsache in St. Johann sicherzustellen. Daher tritt bei HORA 3.0 in St. Johann weniger Durchfluss auf, sodass der orografisch linke Stadtteil von St. Johann in HORA 3.0 nicht überflutet wird. In HORA 3.0 werden für alle Zuflüsse (Reither Ache, Großsache und Fieberbrunner Ache) HQ_{100} -Durchflüsse angesetzt. Die größere Ausuferung entlang der Großsache vor dem Zusammenfluss mit der Reither Ache ist mit dem Ansetzen eines HQ_{100} -Durchflusses als obere Randbedingung für die Großsache zu erklären.

Ein Beispiel für die berechneten Überflutungsflächen (Gail bei Feistriz) ist in Abb. 10 dargestellt. Die so ermittelten Hochwasserrisikoflächen mit einer Auflösung von 2m wurden auf der HORA-Plattform (www.hora.gv.at) in Kartenform veröffentlicht. Für die Flussabschnitte, in denen Überflutungsflächen aus dem Gefahrenzonenplan vorhanden waren, wurden diese statt der HORA-3.0-Flächen dargestellt.

7 HORA 3D und HORA Kumul

Die in HORA 3.0 berechneten Hochwasserrisikoflächen sind eine wertvolle, aktuelle Information und lassen sich deshalb für viele weitere Auswertungen nutzbringend verwenden. Zwei solcher zusätzlichen Auswertungen sollen hier kurz angerissen werden.

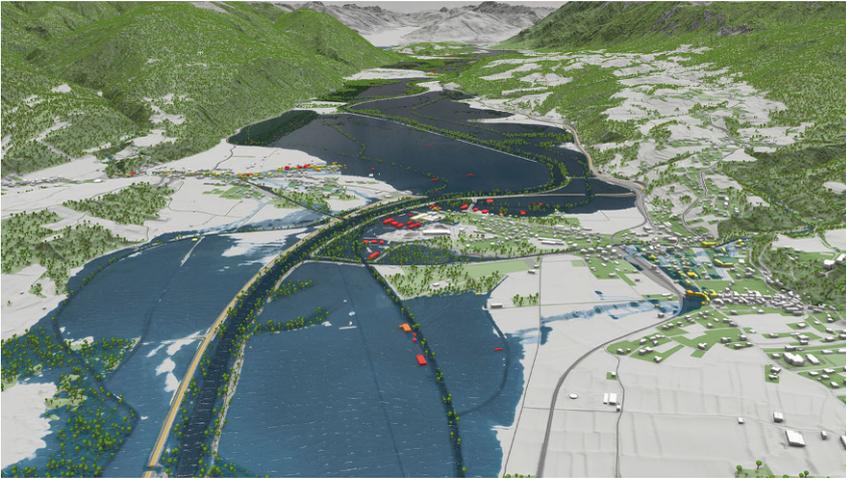


Abb. 10 Beispiel für die berechneten Überflutungsflächen (HQ_{100}), Gail bei Feistritz

Bei der ersten handelt es sich um ein Visualisierungsprojekt. Während derzeit die Überflutungsflächen auf der HORA-Plattform als Karten dargestellt werden, ist eine zusätzliche objektbezogene 3D-Visualisierung vorgesehen. Dafür wurde ein webbasiertes System entwickelt. Das System erlaubt es, die simulierten HORA-3.0-Wassertiefen und -Fließgeschwindigkeiten für ein Fokusgebiet zeitabhängig zu visualisieren, um die für einzelne Gebäude zu erwartenden Gefahren anschaulicher zu vermitteln. Der gewünschte Visualisierungsprozess beginnt mit der Eingabe einer Adresse oder der Auswahl eines Schwerpunkts auf einer eingebetteten Karte durch die Nutzer, mit dem

ein Grundstück und ein darauf befindliches Gebäude identifiziert werden. Ein Webdienst lädt alle erforderlichen Geodaten für die Darstellung des Gebäudes und der unmittelbaren Umgebung. Die objektbezogenen Wassertiefen und Geschwindigkeiten sowie weitere relevante Informationen, wie die am stärksten betroffenen Gebäudeteile, werden dann interaktiv am Fokusgebäude dargestellt, wie in Abb. 11a veranschaulicht. Die Visualisierung wird mit intuitiven Bedienelementen gesteuert.

Bei der zweiten Auswertung handelt es sich um das HORA-Kumul-Projekt, das zum Ziel hatte, durch fluviale Hochwasser verursachte Kumulschäden in Österreich zu berechnen. Ein

Kumul liegt im Versicherungswesen vor, wenn ein einziges Schadensereignis dazu führt, dass viele Versicherungsnehmer eines Versicherers gleichzeitig einen Schaden erleiden. Zu diesem Zweck wurden auf Basis langer Reihen von täglichen Abflussbeobachtungen in Österreich 132 österreichweite Hochwasserereignisse ausgewählt. Diese Ereignisse wurden sodann analysiert, um ein räumliches statistisches Modell aufzustellen, mit dem eine Vielzahl von synthetischen Ereignissen generiert wurde. Diese Ereignisse sind teilweise wesentlich größer als die bisher in Österreich aufgetretenen. Jedes Ereignis wurde mit den Überflutungsflächen aus HORA 3.0 und den Postleitzahlzonen verschnitten, wodurch sich angeben ließ, welcher Prozentsatz der Fläche bei jedem Ereignis überflutet war. Als Beispiel zeigt Abb. 11b die prozentuellen Überflutungsflächen für ein synthetisches Hochwasserereignis, das in manchen Flussabschnitten wesentlich größere Jährlichkeiten als die Hochwasser vom August 2002 und vom Juni 2013 aufweist. Der Unterschied zu HORA 3.0 besteht darin, dass in HORA 3.0 die lokale Hochwassergefahr (bzw. die Überflutungsflächen entsprechend einer bestimmten Wahrscheinlichkeit) ausgewiesen wurde. In HORA-Kumul wurde hingegen das gleichzeitige Auftreten eines Hochwassers an vielen Gewässerabschnitten analysiert, das für die Bestimmung regionaler Schäden verwendet werden kann.

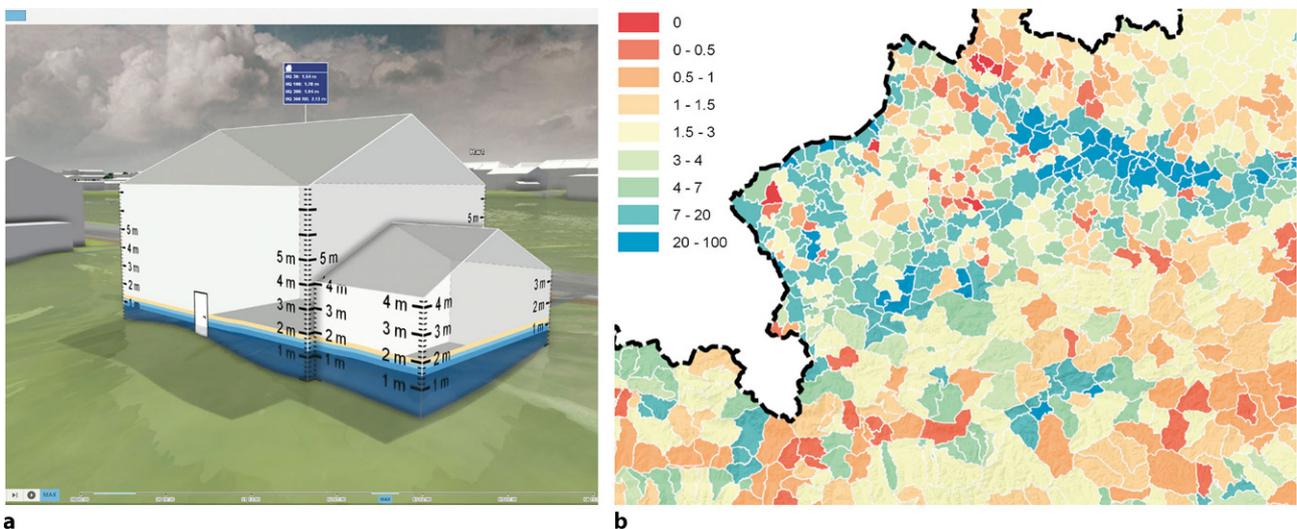


Abb. 11 a Objektbezogene Visualisierung mit den Anschlaglinien für vier Überflutungswahrscheinlichkeiten entlang der Gebäudefassade (heller werdende Blautöne sind das HQ_{30} , HQ_{100} , HQ_{300} ; gelb ist das HQ_{300} -Restrisiko). b Auswertung der prozentuellen Überflutungsflächen für ein synthetisches Hochwasserereignis mit Jährlichkeiten, die teilweise wesentlich über den größten beobachteten Hochwassern liegen

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse des Projekts HORA 3.0, publiziert auf der HORA-Naturgefahrenplattform, dienen vor allem zur Erhöhung des Risikobewusstseins. Eine Häufung von großen Hochwasserereignissen in den letzten beiden Dekaden hat zu einer zunehmenden Sensibilisierung der Bevölkerung geführt. Damit verbunden ist ein steigendes Interesse an öffentlich zugänglicher Information über Naturgefahren und deren Bewältigung erkennbar. Zudem dienen die Ergebnisse strategischen Überlegungen im Zusammenhang mit dem österreichischen Hochwasserrisikomanagementplan und der EU-Hochwasserrahmenrichtlinie (EU 2007).

Im Vergleich zu HORA 1.0 bringt HORA 3.0 eine höhere Genauigkeit und einen höheren Detaillierungsgrad. Dies wurde durch aktuellere und verfeinerte Daten sowie durch Anwendung der neuesten Berechnungsmethoden ermöglicht. Als Zwischenergebnis liegt für Gebiete $>10\text{km}^2$ eine Version des Berichtsgewässernetzes in Österreich vor, das eine wesentlich höhere Lagegenauigkeit aufweist als die Version vom Februar 2017 und zudem mit den jeweiligen Einzugsgebieten logisch verbunden ist. Für die Pegel Österreichs sowie das gesamte Gewässernetz liegen abgestimmte Werte der T -jährlichen Hochwasser sowie die dazugehörigen Bemessungswellen vor. Die HQ_{100} an den Pegeln sind wegen der in der Zwischenzeit aufgetretenen großen Hochwasser im Durchschnitt um 8,7% höher als die entsprechenden Werte in HORA 1.0. Diese Erhöhung ist in Übereinstimmung mit den in Blöschl et al. (2018) festgestellten Veränderungen der Hochwasserabflüsse, und ist teilweise auf eine veränderte klimatische Situation zurückzuführen (Blöschl et al. 2019; Bertola et al. 2021). Adaptierte Versionen des Geländemodells vom Dezember 2015 liegen vor, z. B. eine Version, in die die Flusssohlen eingeschnitten sind, und eine Version, in der Hochwasserschutzdämme entfernt wurden, um das Restrisiko abzuschätzen. Schließ-

lich wurden im Projekt Überflutungsflächen mit Jährlichkeiten von 30, 100 und 300 Jahren sowie die Situation des Restrisikos (HQ_{300} ohne Dämme) berechnet. Gegenüber HORA 1.0 sind auch dabei zahlreiche Neuerungen zu verzeichnen, unter anderem ein wesentlich genaueres Geländemodell, die Berücksichtigung von Wasserbauten, die Erfassung von Retention und räumlichen Interaktionen durch die instationäre zweidimensionale Modellierung sowie – wie erwähnt – das Restrisikoszenario.

Die Implementierung der hydraulischen Simulationen in der Software Visdom ermöglicht in einfacher Weise Aktualisierungen des HORA-3.0-Modells in Bezug auf neue oder detailliertere Daten, wie z. B. Mauern, Durchlässe oder Gewässerprofile, oder eine Veränderung der Hochwasserabflüsse. Zudem lässt sich das Gesamtsystem mit relativ wenig Aufwand für die Simulation von pluvialen Hochwassern erweitern, wobei hier die Schlüsselstelle die genaue Erfassung der Infiltration ist. Erste Testrechnungen für das Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) (Blöschl et al. 2016) haben gezeigt, dass der Ansatz dafür grundsätzlich geeignet ist. Vergleiche mit Pegelmessungen sind auch im Fall pluvialer Hochwasser unumgänglich, um realistische Werte zu erhalten.

Das integrierte Hochwasserrisikomanagement ist eine wichtige Aufgabe der öffentlichen Hand, die auf eine größtmögliche Sicherheit vor Hochwasser durch abgestimmtes Zusammenwirken raumplanerischer, bautechnischer und organisatorischer Maßnahmen auf allen Verwaltungsebenen und unter Einbeziehung der Betroffenen abzielt. Die Wissenschaft leistet wesentliche Beiträge (Blöschl et al. 2015b). Dabei ist die Einbettung in die entsprechende Fachlandschaft auf Landes- und Bundesebene von zentraler Bedeutung, um die vorhandene Expertise möglichst gut zu nutzen. Das Projekt HORA 3.0 ist ein Beispiel, bei dem diese Einbettung bestens funktioniert hat, wofür allen Dienststellen herzlich gedankt wird.

Danksagung Die Autoren danken allen Kooperationspartnern, vor allem dem BMLRT und den Landesdiensten im Bereich Wasserwirtschaft, Hydrographie und Wasserbau für die gute Zusammenarbeit. Das Projekt wurde durch das BMLRT finanziert. Methodische Vorarbeiten wurden vom Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (Projekte W1219-N28 und I 3174), dem European Research Council (291152) und von VRVis gefördert. VRVis wird gefördert durch BMK, BMDW, Steiermark, SFG, Tirol und Wirtschaftsagentur Wien im Rahmen von COMET – Competence Centers for Excellent Technologies (879730), das von der FFG verwaltet wird.

Funding Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>. ■

Literatur

- Bertola, M.A., Viglione, S., Vorogushyn, D., Lun, B., Merz and G. Blöschl (2021): Do small and large floods have the same drivers of change? A regional attribution analysis in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 25, 1347–1364.
- Blöschl, G. und R. Merz (2008): Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft*, 98 (11) 12–18.
- Blöschl, G., L. Gaál, J. Hall et al. (2015a): Increasing river floods: fiction or reality? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. <https://doi.org/10.1002/wat2.1079>
- Blöschl, G., Z. Horváth, A. Kiss et al. (2015b): Neue Methoden für das Hochwasserrisikomanagement. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ)*, 160, 15–27.
- Blöschl, G., A. P. Blaschke, M. Broer et al. (2016): The Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) in Petzenkirchen: a hypothesis-driven observatory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 227–255. <https://doi.org/10.5194/hess-20-227-2016>.
- Blöschl, G., A. P. Blaschke, K. Haslinger et al. (2018): Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein aktualisierter Statusbericht. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 70, pp. 462–473
- Blöschl, G., J. Hall, A. Viglione et al. (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573 (7772), pp. 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Blöschl, G., H. Stiefelmeyer, Th. Hlatky und J. Waser (2022): HORA – Richtige Naturgefahrenkommunikation schafft Risikobewusstsein. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 74, <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00838-9>
- Buttinger-Kreuzhuber, A., Z. Horváth, S. Noelle, G. Blöschl und J. Waser (2019): A fast second-order shallow water scheme on two-dimensional structured grids over abrupt topography. *Advances in Water Resources*, 127, pp. 89–108.
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt DWA-M 552, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, Deutschland
- EU (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union. L 288/27
- FEH (1999): Flood Estimation Handbook, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Gaál L., Szolgay J., Kohnová S., Parajka J., Merz R., Viglione A. and Blöschl G. (2012): Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water Resources Research*, 48(4) <https://doi.org/10.1029/2011WR011509>.
- Horváth, Z., A. Buttinger-Kreuzhuber, A. Konev, D. Cornet, J. Komma, G. Blöschl, S. Noelle und J. Waser (2020): Comparison of fast shallow-water schemes on real-world floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146, 05019005.
- Horváth, Z., R. A. P. Perdigo, J. Waser, D. Cornet, A. Konev und G. Blöschl (2016): Kepler Shuffle for Real-World Flood Simulations on GPUs. *International Journal of High Performance Computing Applications*. <https://doi.org/10.1177/1094342016630800>
- Komma, J., C. Reszler, G. Blöschl und T. Haiden (2007): Ensemble prediction of floods—catchment non-linearity and forecast probabilities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, pp. 431–444.
- Mandlbürger, G. (2000): Verdichtung von Echlot-Querprofilen unter Berücksichtigung der Flussmorphologie. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 88 (4), 211–214.
- Merz, R. and G. Blöschl (2008a): Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research*, 44 (8), article number W08432.
- Merz, R. and G. Blöschl (2008b): Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence. *Water Resources Research*, 44 (8), article number W08433.
- Merz, R. und G. Blöschl (2008c): Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52, (6) 300–309
- Merz, B., G. Blöschl, S. Vorogushyn et al. (2021): Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 592–609.
- Merz, R., G. Blöschl und G. Humer (2008): Hochwasserabflüsse in Österreich – das HORA Projekt. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60, (9–10) 129–138.
- Merz, R., G. Blöschl und J. Parajka (2006): Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (1), pp. 2–11.
- ÖWAV (2019): Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Regelblatt 220 des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV)
- Rogger, M., B. Kohl, H. Pirkl, A. Viglione, J. Komma, R. Kirnbauer, R. Merz und G. Blöschl (2012a): Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria—Do they tell a consistent story?. *Journal of Hydrology*, 456–457, pp. 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.068>.
- Rogger, M., H. Pirkl, A. Viglione, J. Komma, B. Kohl, R. Kirnbauer, R. Merz und G. Blöschl (2012b): Step changes in the flood frequency curve: Process controls. *Water Resources Research*, 48, W05544, <https://doi.org/10.1029/2011WR011187>.
- Sköien, J., R. Merz und G. Blöschl (2006): Top-kriging—geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, pp. 277–287.
- Stiefelmeyer H. und Th. Hlatky (2008): HORA—An Austrian Platform for Natural Hazards as a new Way in Risk Communication In: *Interpraevent 2008 Dornbirn*. Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser Muren und Lawinen. Tagungspublikation, Vol. 1. Klagenfurt, International Research Society INTERPRAEVENT, S. 229–236.
- Viglione, A., R. Merz, J. S. Salinas und G. Blöschl (2013): Flood frequency hydrology: 3. A Bayesian analysis. *Water Resources Research*, 49, <https://doi.org/10.1029/2011WR010782>
- Waser, J., H. Ribčić, R. Fuchs, C. Hirsch, B. Schindler, G. Blöschl, E. Gröller (2011): Nodes on Ropes: A Comprehensive Data and Control Flow for Steering Ensemble Simulations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17 (12), 1872–1881, pp. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2011.225>
- Wimmer, M. H., M. Hollaus, G. Blöschl, A. Buttinger-Kreuzhuber, J. Komma, J. Waser, N. Pfeifer (2021): Processing of nationwide topographic data for ensuring consistent river network representation. *Journal of Hydrology X*, 13, 100106, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydroa.2021.100106>

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.