

HEFT **40.18**



Starkregen und Sturzfluten – Erfassen, Erforschen, Evaluieren
Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018
an der Technischen Universität München

Markus Disse, Maria Kaiser (Herausgeber)



Hydrologische Wissenschaften

Fachgemeinschaft in der DWA

HEFT 40.18

Starkregen und Sturzfluten – Erfassen, Erforschen, Evaluieren

Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018

an der Technischen Universität München

Markus Disse, Maria Kaiser (Herausgeber)

Veranstalter:

≈ Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement

≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), Hennef



Hydrologische Wissenschaften

Fachgemeinschaft in der DWA

Markus Disse und Maria Kaiser (Herausgeber)

Starkregen und Sturzfluten – Erfassen, Erforschen, Evaluieren

Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018 an der Technischen Universität München

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 40.18

ISBN: 978-3-88721-665-8

DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.40.18

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2018

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Herausgeber:

Fachgemeinschaft Hydrologische

Wissenschaften in der DWA

Geschäftsstelle

Theodor-Heuss-Allee 17

D – 53773 Hennef

Tel.: 02242/872 – 161

Fax: 02242/872 – 184

info@fghw.de

www.fghw.de

Schriftleitung:

Dr. Christian Reinhardt-Imjela

Umschlaggestaltung:

Dorit Steinberger, Ohlstadt

Univ.-Prof. Dr. Markus Disse
Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA

Dr.-Ing. Uwe Müller
Hauptausschuss Hydrologie und
Wasserbewirtschaftung der DWA

© FgHW – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2018

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeber in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Die wissenschaftliche Richtigkeit der Texte, Abbildungen und Tabellen unterliegt nicht der Verantwortung der Herausgeber.

Vorwort

Während seit Einführung der EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie der Fokus auf der Gefährdungs- und Risikoanalyse von Flusshochwassern lag, ist in den letzten Jahren das Thema Starkregen und Sturzfluten zu einem wichtigen Schwerpunkt der Wasserwirtschaft, der Versicherungswirtschaft und der Forschung geworden. Die Problematik ist offensichtlich, da die durch Sturzfluten und wild „abfließendes Wasser“ verursachten Schäden deutschlandweit die gleiche Größenordnung haben wie die seltenen Hochwasser an den großen Flüssen.

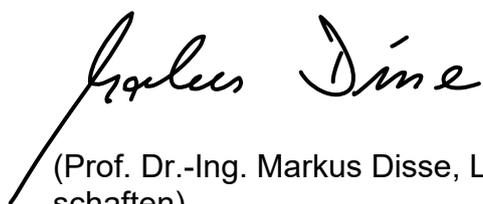
Aus wissenschaftlicher und aus praktischer Sicht sind dabei die besonderen Herausforderungen a) die (kleinräumige) Gefährdungsbestimmung von Gemeinden und b) die Erhöhung der Resilienz. Sturzfluten können überall in Deutschland auftreten und jedes Jahr sind einige Ortschaften betroffen – so wie vergangene Woche im Hunsrück, in Aachen oder in Wuppertal. Folgende Fragen ergeben sich daraus: Kann man die Vorwarnung vor Starkregen verbessern? Welche Vorhersagenzeiten von Sturzfluten sind möglich? Wie komplex müssen hydrologisch-hydraulische Modelle sein, um die Gefährdung ausreichend genau zu quantifizieren? Wie können das Risikomanagement und insbesondere die Risikokommunikation verbessert werden?

Diese und viele andere Fragen sollen auf dem FgHW-Seminar **Starkregen und Sturzfluten - Erfassen, Erforschen, Evaluieren** diskutiert und beantwortet werden. Das Seminar gibt einen Überblick der aktuellen Forschung in Deutschland und Österreich auf den Gebieten Klimawandel, Meteorologie, Niederschlagsstatistik, Prozessforschung, hydrologische und hydrodynamische Sturzflutmodellierung und –vorhersage sowie Starkregenvorsorge und -management – gewiss ohne den Anspruch auf Vollständigkeit.

Ich hoffe, dass die Veranstaltung dazu anregt, eine angeregte Diskussion zwischen Praktikern und Wissenschaftlern zu initiieren. Die Forschung muss Eingang in die Praxis finden und dieses Ziel verfolgt die Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA.

Ich freue mich auf spannende Vorträge, ein aktives Publikum und wünsche Ihnen eine erfolgreiche Erweiterung Ihrer Netzwerke.

Mit kollegialen Grüßen



(Prof. Dr.-Ing. Markus Disse, Leiter der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing Markus Disse; Maria Kaiser, M.Sc.

München, den
06. Juni 2018

Heft 40 2018 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Starkregen und Sturzfluten – Erfassen, Erforschen, Evaluieren

Jacobeit, J., Blöschl, G., Komma, J., Stahl, N., Hofstätter, M., Haslinger, K., Pistotnik, G.

WETRAX+: Welche Wetterlagen führen zu Sturzfluten? 5

Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A.

Neue radarbasierte Produkte des DWD zum präventiven Starkregenrisikomanagement in Deutschland 11

Müller, C., Iber, C., Nied, M., Hoy, A., Junghänel, T.

Starkregen und Klimawandel – Kooperation KLIWA 21

Broich, K., Kaiser, M., Lin, Q., Mitterer, J., Nguyen, H., Pflugbeil, T., von Trentini, F., Willkofer, F., Disse, M., Ludwig, R.

Das Projekt HiOS – Erstellung einer Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzfluten für bayerische Gemeinden 27

Hoy, A., Hübener, H.

Unterstützung kommunaler Starkregenvorsorge in Hessen 41

Fuchs, L., Berkhahn, S., Feng, Y., Graf, T., Haberlandt, U., Kreibich, H., Neuweiler, I., Peche, A., Rözer, V., Sämann, R., Sester, M., Shehu, B., Wahl, J.

Echtzeitvorhersage von Überflutung, Schadstofftransport und Schäden für Sturzflutereignisse am Beispiel Oberricklingen in Hannover 55

Gürke, S., Jensen, J., Bender, J.

Das Projekt SiSSi – Kombinierte Betrachtung von pluvialen und fluvialen Hochwasserereignissen in der Stadt Siegen 65

Grundmann, J., Schache, J., Lehmann, K., Röhm, P.

VEREINT - Kooperativ organisierter Bevölkerungsschutz bei extremen Wetterlagen: Starkregen & Sturzfluten im ländlichen Raum am Beispiel der Stadt Glashütte 77

WETRAX+: Welche Wetterlagen führen zu Sturzfluten?

Jucundus Jacobeit, Günter Blöschl, Jürgen Komma, Natalie Stahl, Michael Hofstätter, Klaus Haslinger, Georg Pistotnik

Zusammenfassung

Im Rahmen des praxisorientierten Forschungsprojektes WETRAX+ werden klimabedingte Änderungen des Wasserhaushaltes und der Abflussregime in Süddeutschland und Österreich untersucht. Neben den klassischen großräumigen Starkniederschlagsereignissen im Zuge von Frontpassagen, stehen insbesondere kleinräumige Starkregenereignisse konvektiver Natur und persistente Trockenphasen im Mittelpunkt der Analyse. Als innovativer methodischer Ansatz wird ein Wettergenerator mit atmosphärischen Zirkulationsmustern in Kombination mit Zugbahntypen von Tiefdruckgebieten gekoppelt und auf Klimamodellsimulationen angewandt. Die Erweiterung durch hydrologischen Methoden ermöglicht es konkrete Aussagen über beobachtete und erwartete zukünftige Änderungen der Abflussregime im oberen Donauraum zu machen. Damit sollen Entscheidungsträger im grenzübergreifenden Hochwassermanagement in der Planung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen bestmöglich unterstützt werden.

1. Einleitung

Bayern ist in besonderer Weise von Hochwässern bedroht, wobei auch die kleinen Gewässer bzw. Einzugsgebiete durch lokale Starkregenereignisse zu dieser Gefährdung beitragen. Eine außergewöhnliche regionale Sturzflut ereignete sich im Mai/Juni 2016 im bayerischen Simbach und war die Folge einer ortsfesten Starkregenzelle verbunden mit einem gradientschwachen Tief über Mitteleuropa (BLfU 2017). Die Wetterlage Tief über Mitteleuropa steht jedoch auch in engem Zusammenhang mit Vb- oder Vb-ähnlichen Zugbahnen im Bodenluftdruck und damit verbundenen großräumigen, flächigen Starkniederschlägen. So konnte die Hälfte der 20 größten Hochwasser (1959-2015) im Donaueinzugsgebiet dieser Wetterlage zugeordnet werden. Bezieht man Vb-Zugbahnen in die Betrachtung mit ein, erhöht sich der Anteil sogar auf knapp 75 Prozent (Stahl & Hofstätter 2018).

2. Wasserwirtschaftliche Relevanz

Da bestimmte Zirkulationsmuster und -abläufe systematisch und überproportional häufig mit Starkniederschlägen verbunden sind (Hofstätter et al. 2017), kann die Analyse dieser Wetterlagen und Zugbahnen genutzt werden, um atmosphärisch besonders risikoreiche Bedingungen für Starkregen frühzeitig zu erkennen und dadurch die Vorsorge vor extremen und hochwasserrelevanten Ereignissen zu unterstützen. Von besonderem Interesse ist dabei die Frage, wie sich diese Ereignisse zukünftig in Folge des Klimawandels verändern, sowohl hinsichtlich ihrer Häufigkeit als auch in ihrer Intensität und in zeitlich-räumlicher Abfolge. Die atmosphärischen Bedingungen sind für die Wasserwirtschaft jedoch nicht alleine von Bedeutung, sondern vor allem auch in ihrer hydrologischen Auswirkung, die z. B. durch die Vorfeuchte, die Infiltrationskapazität und die verschiedenen hydrologischen Speicher sowie das Gerinne bestimmt wird. Um diese Wirkungen zu beschreiben, bedarf es zusätzlich einer hydrologischen Modellierung. Die Umsetzung der bisherigen Erkenntnisse aus der Erforschung der starkniederschlagsrelevanten Wetterlagen und Zugbahnen von Tiefdruckgebieten, in Kombination mit einem stochastischen Niederschlagsgenerator und einer anschließenden hydrologischen Abflussmodellierung, wird im Rahmen der deutsch-österreichischen Kooperation WETRAX+ realisiert.

Viele heutige und zukünftige Fragen der Wasserwirtschaft lassen sich mit Modellierungen beantworten. Da Modellierungen immer mehr an Bedeutung gewinnen, werden Modelle und Daten aus verschiedenen Projekten mit Universitäten, aber auch aus der Wasserwirtschaft in Bayern in dem übergeordneten Container Wasser-Zukunft-Bayern zusammengefasst. Vom Wissens-Cluster Wasser-Zukunft-Bayern profitieren alle Projekte, da durch die gemeinsame Koordination wichtige Impulse gesetzt werden können und ein direkter Austausch einzelner Module erfolgen kann. Im Fokus steht dabei die konkrete wasserwirtschaftliche Anwendung der Forschungsergebnisse. Dabei ermöglicht die enge Zusammenarbeit mit dem Leibnitz-Rechenzentrum in Garching, auf der einen Seite sehr komplexe Berechnungen durchzuführen, auf der anderen Seite aber auch, die verschiedenen Projekte zu vernetzen, indem gemeinsame Schnittstellen und Datenhaltungen geschaffen werden. Bezüglich der Komponente Sturzfluten können Erkenntnisse aus WETRAX+ in die anderen Projekte, z. B. in das Sturzflutenprojekt HiOS (TUM, LMU und LRZ) einfließen, das sich im Gegensatz zu WETRAX+ vertieft mit der Simulation des wilden Abflusses an der Oberfläche beschäftigt. Andererseits können Erfahrungen aus KLIWA (BLfU) zur Auswahl der Klimamodelle eingebunden werden. Die Projekte HiOS und KLIWA werden in weiteren Beiträgen des Seminars vorgestellt.

3. WETRAX+

3.1 Vorstudie

Im Vorläuferprojekt WETRAX (Weather Patterns, CycloneTracks and related precipitation Extremes) – „Auswirkungen des Klimawandels auf großflächige Starkniederschläge in Süddeutschland und Österreich: Analyse der Veränderungen von Zugbahnen und Großwetterlagen“ stand die Klimawandelanalyse von Wetterlagen und Zugbahnen im Vordergrund, welche vor allem für die Entstehung von Hochwasserereignissen in mittleren und großen Flussgebieten von Bedeutung sind (2012-2015). Dabei wurden großräumige Zirkulationstypen (Wetterlagen) und Zyklonen-Zugbahnen analysiert und deren differenzierte Starkniederschlagsrelevanz als paralleler methodischer Ansatz untersucht. Die Untersuchungen bezogen sich auf (süddeutsche und österreichische) Gebiete ähnlicher Niederschlagsvariabilität (Homann 2017) und damit auf die regionale Skala im Zusammenhang Zirkulation-Starkniederschlag unter Ausblendung von kleinräumig-konvektiven Extremereignissen. Die beiden verschiedenen Analyseansätze (Wetterlagen – Zugbahnen) wurden zunächst separat durchgeführt und erst nachfolgend eine Zusammenführung und ein Vergleich der jeweiligen Ergebnisse vollzogen (Hofstätter et al. 2015).

3.2 Kombination von Zugbahnen und Zirkulationsmustern

Im Folgeprojekt WETRAX+ (Beginn 2018) sollen nun beide Komponenten der atmosphärischen Zirkulationsdynamik schon in der Analysenmethodik zusammengeführt werden und überdies auch der kleinräumig-konvektive Starkniederschlag mit einbezogen werden, der das Potential für sog. Sturzfluten beinhaltet. Ersteres wird dadurch bewerkstelligt, dass in der Klassifikation von großskaligen Zirkulationstypen die erfassten Zyklonen-Zugbahnen als Kovariate integriert werden. Dies kann auf unterschiedliche Art geschehen: in einfacher Form nur mit der nominalen Information der etwaigen Präsenz einer klassifizierten Zugbahn oder in erweiterter

Form mit der metrischen Information der räumlichen Position des zugehörigen Tiefdruckkerns oder Vorticity-Maximums. In der resultierenden Klassifikation atmosphärischer Zustandsformen sind damit beide zirkulationsdynamischen Komponenten beinhaltet: sowohl die großräumige Strömungskonfiguration, die bestimmte Zugbahntypen begünstigen kann (Beispiel zonale Westwetterlagen mit Präferenz atlantischer Zugbahnen), als auch die konkrete Verlaufsform (Zugbahn) eines speziellen Zirkulationsbestandteils (Zyklone), das seinerseits den vorherrschenden Zirkulationstyp indizieren kann (Beispiel Vb-Zyklone, die häufig in eine großräumige Strömungskonfiguration mit Höhentrog und resultierendem Cut-off Low im Alpenraum eingebettet ist). Der beispielhaft in Abbildung 1 wiedergegebene frühjährliche Zirkulationstyp zeigt etwa eine Auftrittshäufigkeit der Vb-Zugbahn, die rund fünffach höher als im langjährigen Mittel liegt.

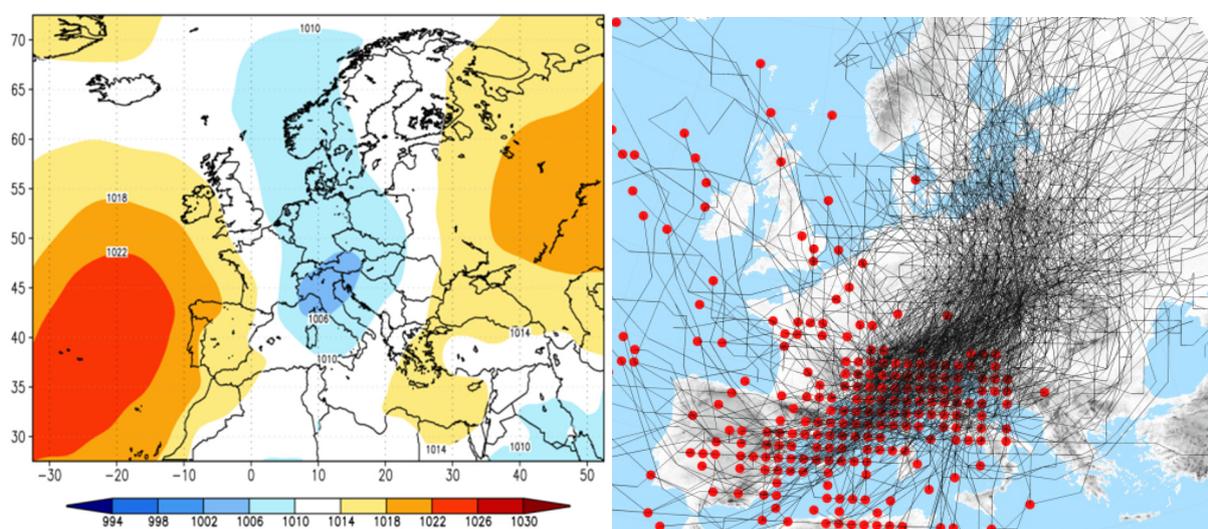


Abb. 1: Links: Luftdruck-Zentroid (hPa) eines starkniederschlagsrelevanten Zirkulationstyps (vgl. Jacobeit et al. 2017), der im Frühjahr 1951-2006 mit einer rund fünffach höheren Auftrittshäufigkeit der Vb-Zugbahn als im langjährigen Mittel verbunden gewesen ist. Rechts: Vb-Zugbahnen für den Zeitraum 1959-2015. Rote Punkte kennzeichnen den Startpunkt der jeweiligen Zugbahn. (Hofstätter et al., 2016 - modifiziert).

Die synchrone Klassifikation von Zugbahninformation und atmosphärischen Feldern (neben Luftdruck bzw. geopotentiellen Höhen auch Maße der Vertikalbewegung und thermodynamische Variablen wie Feuchtigkeitsgrößen) wird mit einer speziellen Variante der nicht-hierarchischen Clusteranalyse vorgenommen (Simulated Annealing and Diversified Randomization, siehe Philipp et al. 2007). Dabei sollen in Erweiterung früherer Analysen (z. B. Jacobeit et al. 2009) auch Persistenzen der Zirkulationstypen, Ereignis-Wiederholungen, wie sie gerade bei der Vb-Zugbahn häufig zu beobachten sind, zeitliche Instationaritäten im Zusammenhang Zirkulation-Starkniederschlag und typinterne Änderungen untersucht werden, die z. B. bei starkniederschlagsrelevanten Größen wie Feuchtigkeit und Hebung auftreten können und die Charakteristik von Zirkulationstypen zu ändern vermögen.

Um mit der skizzierten Methode der kombinierten Zirkulationstyp-Zugbahnen-Klassifikation auch Wetterlagen identifizieren zu können, die zu Sturzfluten führen, darf die Zielgröße ‚Starkniederschlag‘ nicht mehr wie im abgeschlossenen WETRAX-Projekt regional skaliert sein, sondern muss räumlich möglichst hochaufgelöst sein, d. h. mindestens auf Basis der individuellen Gitterboxen des WETRAX-Niederschlagsdatensatzes (Auflösung 6 km) oder jüngerer Stationsdaten mit auch zeitlich höherer Auflösung bis hin zu Stundendaten. Auch wenn sich damit kein ‚Wetterlagen-Katalog für Sturzfluten‘ generieren lässt, so lässt sich doch zumindest herausarbeiten, bei welchen großräumigen Strömungs- sowie vertikalen Feuchte- und Temperaturverhältnissen Sturzfluten bevorzugt zur Ausbildung gelangen und welche Ausprägung typinterne Parameter aufweisen müssen, um lokale Extremereignisse zur Folge zu haben. Die so identifizierten konvektions- und (konvektiv) starkniederschlagsrelevanten Kenngrößen werden auf etwaige Änderungen im Zuge des Klimawandels für die Vergangenheit und Zukunft untersucht. Weiterhin soll die entwickelte Zirkulationstyp-Identifizierung einschließlich typinterner Charakteristika für meteorologische Prognosefelder operationalisiert werden, um Einschätzungen des bevorstehenden Risikopotentials für Starkniederschläge vornehmen zu können. Schließlich soll (nach einschlägiger Modellvalidierung) die kombinierte Zirkulationstyp-Zugbahnen-Klassifikation auf ausgewählte regionale und globale Klimamodell-Läufe bis Ende des 21. Jahrhunderts angewendet werden, um mutmaßliche künftige Änderungen bei den starkniederschlagsrelevanten Zirkulationstypen abschätzen zu können. Wetterlagen mit Sturzflut-Potential sind jeweils Bestandteil dieser Arbeitsschritte und werden, soweit die inhärenten Unsicherheiten es erlauben, eigens einzugrenzen und zirkulationsdynamisch zu charakterisieren versucht.

3.3 Konditionierter stochastischer Wettergenerator

Im Weiteren werden in WETRAX+ meteorologisch-klimatologische Auswertungen durch hydrologische Methoden und Analysen erweitert, um konkrete Aussagen über die Auswirkung auf den Wasserhaushalt bzw. das Abflussregime machen zu können. Der spezielle Fokus ist dabei auf das Hochwassergeschehen in unterschiedlichen Einzugsgebieten gerichtet. Dabei werden lange Niederschlags- und Lufttemperaturzeitreihen (10.000 Jahre) mittels stochastischer Niederschlagsmodellierung generiert. Das Ziel ist es, synthetische kontinuierliche Niederschlagszeitreihen zu erzeugen, sodass die jährlichen Niederschläge, die Saisonalität der Niederschläge, und insbesondere Extremniederschläge, die an Stationen im Einzugsgebiet gemessen wurden, wiedergegeben werden. Dafür wird ein modifiziertes Modell von Bardossy & Plate (1992) verwendet, in dem der Niederschlag auf Stationsbasis als multivariater autoregressiver Prozess (mAr) im Normalraum modelliert wird und anschließend in einen Gamma-verteilten Raum transformiert wird. Im Gegensatz zum Modell von Bardossy & Plate (1992), mit dem die Niederschläge auf Tagesbasis modelliert werden, wird hier eine zeitliche Auflösung auf Stundenbasis verwendet. Der Vorteil des geringeren Zeitschrittes ist, dass auch in kleinen Einzugsgebieten die Charakteristik von hochwasserbildenden Niederschlägen besser abgebildet werden kann.

Das Niederschlagsmodell wird durch 2 Parameter der Gamma-Verteilung beschrieben, die anhand der täglichen Niederschlagsmenge und der Beziehung zwischen 6 h und 24 h Niederschlagssummen für eine gegebene zeitliche Korrelation an jeder Station definiert werden. Die Parameter variieren bedingt an der kombinierten Zugbahnen/Wetterlagen- Klassifikation. Dafür ist es notwendig, dass die Klassifikation trennscharf für die Niederschlagscharakterisierung ist. Die Parameter des Wettergenerators werden an Stationsdaten kalibriert, in den Einzugsgebieten Obere Donau, Main, Mur, Drau und die großen österreichischen Zubringer zum Alpenrhein. Zusätzlich werden virtuelle Stationen mit regionalisierten Parametern verwendet zur Erhöhung der Stationsdichte, die für konvektive Ereignisse wichtig ist.

Für eine aussagekräftige hydrologische Simulation der lokalen Hochwasserereignisse ist neben der korrekten Abbildung der Niederschläge an den einzelnen Stationen auch die plausible Abbildung der räumlichen Muster des Niederschlags notwendig. Dazu wird eine Analyse der raum-zeitlichen Verteilungen von relevanten Niederschlagsereignissen im Modellgebiet durchgeführt und die Variogramme verglichen. Nach der Validierung des Niederschlagsmodells werden mit dem stochastischen Niederschlagsmodell 10.000 Jahre stündliche Daten generiert, die anschließend im hydrologischen Modell als Input verwendet werden. Die hydrologische Niederschlag-Abfluss-Modellierung erfolgt mit einem flächendetaillierten, kontinuierlichen Modell mit stündlichem Rechenzeitschritt. Die Modellstruktur umfasst Schneeakkumulation und Schneeschmelze, Bodenfeuchtehaushalt und Abflussbildungsprozesse sowie die Abflusskonzentrationsvorgänge. Nach der Parameteridentifikation anhand beobachteter Pegeldata wird das hydrologische Modell mit den stochastisch generierten Niederschlägen und Lufttemperaturen betrieben und 10.000 Jahre an Durchflüssen simuliert. Durch die räumlich-zeitliche Analyse der Niederschlag-Abfluss-Simulationen sollen auslösende Prozesse und exponierte Regionen besser identifiziert werden. In weiterer Folge wird die Modellkette aus Wettergenerator und Niederschlag-Abfluss-Modell für einen ausgewählten Lauf der Klimazukunft verwendet, um exemplarisch die künftige Entwicklung von lokalen Extremereignissen hinsichtlich ihrer Häufigkeit and Intensität abschätzen zu können.

Abschließend werden ausgewählte Starkniederschlagsereignisse aus dem erweiterten historischen Zeitraum 1850-1950, in Gestalt der bestimmenden atmosphärischen Zirkulationsmuster und durch Identifizierung der relevanten Abläufe und Prozesse, analysiert. Die damit verbreiterte Datengrundlage ermöglicht eine robustere Einordnung und Bewertung der für die Klimazukunft simulierten Änderungen von Hochwasser- und Trockenereignissen.

Literatur

- Bardossy, A., Plate, E. J., 1992. Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns, *Water Resour. Res.*, 28(5), 1247-1259, doi:10.1029/91WR02589.
- Bayrisches Landesamt für Umwelt (BLfU), 2017. Sturzfluten- und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016. Online: www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_was_00127.htm
- Hofstätter, M., Lexer, A., Homann, M., Blöschl, G., 2018. Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *Int. J. Climatol*, 38: e497-e517. doi:10.1002/joc.5386

- Hofstätter, M., Chimani, B., Lexer, A., Blöschl, G., 2016. A new classification scheme of European cyclone tracks with relevance to precipitation, *Water Resour. Res.*, 52, doi:10.1002/2016WR019146
- Hofstätter, M., Jacobeit, J., Homann, M., Lexer, A., Chimani, B., Philipp, A., Beck, C., Ganekind, M., 2015. WETRAX – Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. *Geographica Augustana* 19, 239 Seiten.
- Homann, M., 2017. Auswirkungen des Klimawandels auf atmosphärische Zirkulationstypen und starke Gebietsniederschläge im südlichen Mitteleuropa. Dissertation Universität Augsburg, 153 Seiten.
- Jacobeit, J., Rathmann, J., Philipp, A., Jones, P.D., 2009. Central European precipitation and temperature extremes in relation to large-scale atmospheric circulation types. *Meteorologische Zeitschrift* 18, 397-410.
- Jacobeit, J., Homann, M., Philipp, A., Beck, C., 2017. Atmospheric circulation types and extreme areal precipitation in southern central Europe. *Advances in Science and Research* 14, 71-75.
- Philipp, A., Della-Marta, P.M., Jacobeit, J., Fereday, D.R., Jones, P.D., Moberg, A., Wanner, H., 2007. Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate* 20, 4065-4095.
- Stahl, N., Hofstätter, M., 2018. Vb-Zugbahnen und deren Auftreten als Serie mit Bezug zu den resultierenden Hochwassern in Bayern und Auswirkungen auf Rückhalteräume im Isarinzugsgebiet – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62, (2), 77-97; DOI: 10.5675/HyWa_2018,2_2

Neue radarbasierte Produkte des DWD zum präventiven Starkregenrisikomanagement in Deutschland

Tanja Winterrath, Christoph Brendel, Mario Hafer, Thomas Junghänel, Anna Klameth, Ewelina Walawender, Elmar Weigl, Andreas Becker

Zusammenfassung

Nicht zuletzt die Starkregenereignisse der vergangenen Jahre (Münster, 2014; Braunsbach, Simbach, 2016; Berlin/Oranienburg, 2017; Oststeinbeck, 2018) weisen auf die in Deutschland traditionell unterschätzten Naturgefahren Starkregen und Sturzfluten hin. Nach neuesten Erkenntnissen des DWD können gerade die extremen Starkregenereignisse überall auftreten und auch abseits von Gewässern zu schadenträchtigen Überflutungen führen. Da die weitere Verbesserung der Vorhersage sich in einem zunehmend ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis bewegt, sollte sich ein effizientes Management des Starkregenrisikos in Deutschland auch auf präventive Maßnahmen stützen. Diese erfordern zunächst ein gutes Lagebild über die Gefährdung und hierzu zeigen wir den erheblichen Nutzen einer inzwischen 16-jährigen radargestützten hochauflösenden (1 qkm, 1 h) Niederschlagsklimatologie des DWD auf. Sie liefert ein neues Lagebild zur Starkregengefährdung in Deutschland und ist essentielle Datengrundlage für eine deutschlandweite Starkregengefahrenhinweiskarte, welche die Hot Spots für weitergehende Untersuchungen zur Prävention auf regionaler Skala aufzeigen soll.

1. Starkregen im Klimawandel eine besondere Herausforderung auch für den DWD

Starkregen und Sturzfluten stellen eine notorisch unterschätzte Naturgefahr in Deutschland dar. So besteht aus Gründen der Kosteneffizienz ein Siedlungsentwässerungskomfort nur für Starkregenereignisse mit einer Wiederkehrzeit von maximal 20 Jahren. Häufig wird sogar nur für 10 oder 5-jährige Ereignisse bemessen. Somit gibt es auch ohne den Kontext des Klimawandels, eine geplante Überforderung der Siedlungsentwässerung, einhergehend mit einem unkontrollierten Abfluss der Wassermassen als Sturzfluten mit meist erheblichem Schadensgeschehen im Nachgang. Unter der in der Fachwelt als zunehmend plausibel angesehenen Prognose einer zunehmenden Anzahl und Intensität von Starkregenereignissen oberhalb der 20-Jährlichkeit, besteht somit eine hohe Vulnerabilität von Städten und Kommunen gegen den Klimawandel im Bereich der Starkregenvorsorge. Dies ist insofern bemerkenswert, weil Starkregenereignisse bis heute aufgrund ihrer hohen Variabilität und Kleinräumigkeit nicht rechtzeitig und hinreichend genau vorhergesagt werden können, um noch wirksame anlassbezogene Schutzmaßnahmen ergreifen zu können. Dabei sind die Grenzen der Vorhersagbarkeit nicht mehr durch die verfügbare Rechnerkapazität determiniert, sondern durch das immer größer werdende Anfangswertproblem bei der hochauflösenden numerischen Vorhersage, die inzwischen mit Auflösungen von 2 km oder höher auch beginnt den konvektiven Niederschlag teilweise direkt aufzulösen. Eine entsprechend hochaufgelöste Beschreibung des Anfangszustandes der Atmosphäre ist aber von Seiten der Beobachtung ohne die Integration zusätzlicher Beobachtungssysteme und Arten nicht leistbar. Somit befindet sich der DWD bei der Verbesserung seiner Vorhersagekapazität für Starkregenereignisse bereits in einem ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis. In Analogie zur Vorsorge gegen Erdbeben, liegt der Schlüssel bei der Naturgefahr Starkregen bzw. dem Starkregenrisikomanagement somit eher in der Prävention als in der Reaktion (auf Basis von Warnungen). Prävention, also die Vorbereitung und Vorhaltung von Ressourcen, die im akuten Ereignis schnell und effizient zum Einsatz kommen können, ist nur effizient, wenn sie gezielt angewendet wird. Daher ist eine

deutschlandweite lückenlose Erfassung der Starkregengefährdung und unter Hinzunahme der Wirkmodellierung (Abflussmodellierung) deutschlandweite Bestimmung der Sturzflutgefährdung in Form von sogenannten Starkregengefahrenhinweiskarten ein essentielles Werkzeug für eine gezielte und damit effiziente Prävention. Beide Karten gelingen nur, wenn sie sich auf einer flächendeckenden lückenlosen Erfassung aller Starkregenereignisse in der Vergangenheit stützen können. Messnetze, die sich nur auf Stationen stützen, können und konnten das nicht leisten. Im Folgenden soll daher die radarbasierte Niederschlagsüberwachung als Schlüsseltechnologie zur lückenlosen Erfassung und Vermessung von Starkregen und seinem Gefährdungspotential aufgezeigt werden.

2. Radarbasierte Niederschlagsüberwachung adressiert das Erfassungsproblem

Zur lückenlosen Erfassung extremer Niederschläge kurzer Andauerstufen von 6 h oder kürzer müsste ein rein auf Stationen basierendes Messnetz eine Dichte aufweisen, bei der die Abstände zwischen den Stationen die typischen Autokorrelationslängen bei Auftreten solcher Niederschläge unterschreiten. Diese liegen in der Größenordnung von 1 km, was bei der Fläche Deutschlands ein Stationsmessnetz von hunderttausenden Stationen erfordern würde, ein Aufwand welcher der Öffentlichkeit nicht vermittelbar wäre.

Stattdessen betreibt der DWD ein Messnetz von inzwischen knapp 2.000 zunehmend automatisierten und damit hochfrequent messenden Stationen und verwendet zur Regionalisierung der punktuellen Niederschlagsmessungen ein Interpolationsverfahren (REGNIE) welches sogenannte Hintergrundinformationen, wie der Topographie als Prädiktoren mit verwendet, eine Annahme deren Gültigkeit für extreme und kleinräumige Niederschläge ohne ein zusätzliches flächengebendes Messverfahren nicht nachgewiesen werden konnte.

Mit dem Wetterradarverbund des DWD steht nun erstmals eine flächendeckend hochauflösende Niederschlagsüberwachung zur Verfügung die erstmals deutschlandweit alle Niederschläge seit Anfang Januar 2001 erfasst hat. Dabei werden die im Verbund gemessenen Reflektivitäten nach ihrer Zusammensetzung für ein Deutschland-Komposit und Umrechnung über die Z/R Beziehung in eine quantitative Niederschlagsabschätzung (QPE Produkt) gegen die direkten Messungen von rund 2.000 Stationen angeeicht. Das dabei verwendete RADOLAN Verfahren (DWD 2004) wurde jedoch ursprünglich nur für die Echtzeitanwendung und die Zwecke der Hochwasservorhersage entwickelt.

3. Eine radarbasierte Niederschlagsklimatologie

Die Idee das Verfahren auch für klimatologische Zwecke zu verwenden wurde erstmals DWD intern im Jahre 2011 ernsthaft ins Auge gefasst. Die Fähigkeit einer retrospektiven Nachberechnung aller seit Anfang Januar 2001 erfassten Radardaten war seinerzeit aber nicht performant gegeben. Das Verfahren war optimiert für die Echtzeitanwendung, also die schnelle Berechnung eines relativ kurzen Zeitraumes. Die Anwendung der damaligen RADOLAN Version hätte für 15 Jahre etwa 3 Jahre Rechenzeit benötigt. Dank einer substantiellen Umstellung insbesondere der Abläufe (weniger I/O durch Datenbankabrufe für längere Zeiträume) und der Verteilung der Rechenaufwände auf einen Cluster vieler (> 20) multi-core Maschinen, kann der DWD heute dieselbe Aufgabe in einem guten Monat durchrechnen, was die Grund-

voraussetzung ist, überhaupt einen Datensatz jährlich aktualisieren zu können und dabei unterjährig genügend Zeit zu haben, um Verfahren und Verfahrensverbesserungen einzupflegen. Darüber hinaus bietet die offline Nachberechnung die Chance, die für die Qualität der Analyse essentielle Anzahl der Aneichstationen deutlich zu erhöhen und daher auch kleinräumige extreme Ereignisse wie jenes von Münster am 28. Juli 2014 vollständig zu erfassen und korrekt zu vermessen (Abbildung 1). Bei den Aneichstationen werden dabei sowohl die hochfrequenten Daten der automatischen Ombrometer des DWD und einiger Partnernetze mitberücksichtigt, als auch über ein Disaggregationsverfahren die Tageswerte der manuell betriebenen DWD Stationen als Pseudo-Stundenwerte hinzugenommen. Näheres zur Datengrundlage findet sich im gleichnamigen Kapitel 3 des Berichtes des DWD Nr. 251 (Winterrath et al. 2017).

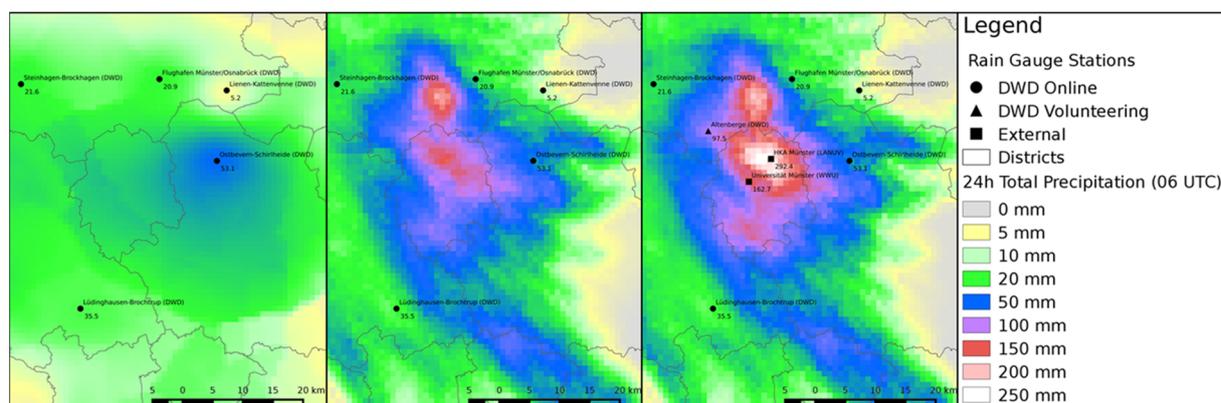


Abb. 1: Illustration der verbesserten Erfassung eines Starkregenereignisses durch die radarbasierte Niederschlagserfassung am Beispiel des Ereignisses in Münster am 28. Juli 2014. Links: Bodenmessnetz. Mitte: RADOLAN – online mit allen in Echtzeit verfügbaren Stationsdaten. Rechts: RADOLAN-Klima mit allen Stationsdaten wie in der “Radarklimatologie”.

3.1 Methode

RADOLAN Klima

Neben den vorbenannten Verbesserungen von Datengrundlage und Performanz des RADOLAN Verfahrens im Klimamode, mussten eine ganze Reihe von Verfahren zur Verbesserung der Qualität der Radardaten eingepflegt werden. Diese sind im Detail in Kapitel 4 von Winterrath et al. (2017) beschrieben. Die Wichtigsten sind bisher:

- Artefakt Korrektur (Helmert und Hassler 2006, Hengstebeck et al. 2010)
- Rangekorrektur (Korrektur der Entfernungs- und höhenabhängigen Signalreduktion, Wagner et al. 2014)
- Speichenkorrektur (Jacobi et al. 2014)
- Korrekturverfahren für die lokalen Daten der einzelnen Radarstandorte (Ringe, Clutter, German Pancake, Reverse Speckle)
- Qualitätskontrolle der lokalen Radardaten durch Quervergleiche mit Archivdaten des Qualitätssicherungsradars Hohenpeißenberg.

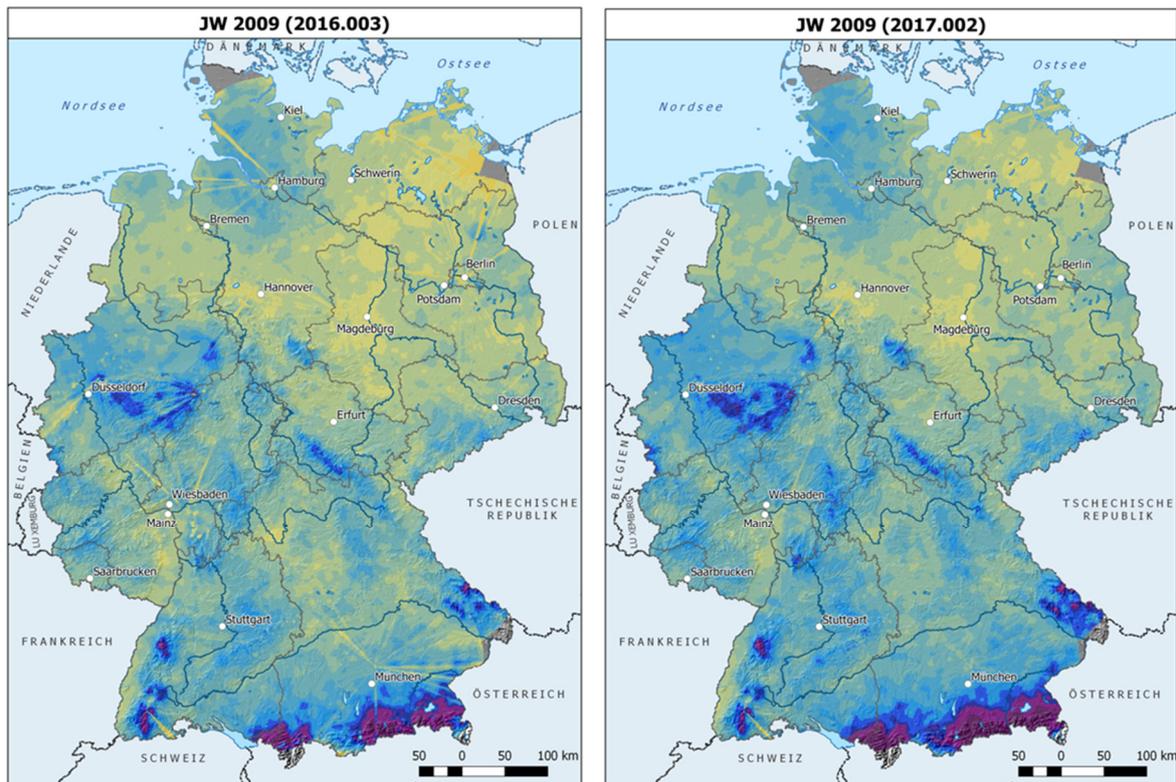


Abb. 2: Illustration des Gesamteffektes der für Verfahrensverbesserungen für die jüngste Ausgabe (Version 2017.002) der Radarklimatologie am Beispiel der Jahressumme des Niederschlages in 2009. Links: Vorgängerversion 2016.03. Rechts: Aktuelle Version 2017.002, die kaum noch Speichen, keine Unterschätzung in größeren Höhen und die Entfernung von Fehlechos insbesondere in urbanen Räumen aufweist.

Den Gesamteffekt dieser Verbesserungen illustriert Abbildung 2 für die Jahressumme des Niederschlages in 2009 berechnet in 2016 (links) und, unter Hinzunahme der vorbenannten Korrekturverfahren, in 2017 (rechts). Insbesondere sind Negativ-Speichen und die verminderte Unterschätzung in der Höhe (vor allem im Alpenraum) bemerkbar. Es bleiben aber weiterhin Artefakte, wie der Ausblend-Sektor südöstlich der Feldberges im Schwarzwald oder eine Negativspeiche vom Radarstandort Hannover erkennbar. Die kontinuierliche Verbesserung des RADOLAN Klima Datensatzes ist daher eine Daueraufgabe, welche der DWD mit der jährlichen Aktualisierung des Datensatzes übernommen hat, denn mit jeder Aktualisierung wird nicht nur das jüngste Jahr angehängt, sondern es erfolgt immer eine komplette Neuberechnung des gesamten Datensatzes mit dem aktuellen Verfahren, um so eine maximale Qualität und Homogenität über den gesamten Analysezeitraum zu erhalten.

3.2 Neue Erkenntnisse die ohne Radar verborgen geblieben wären

Statistischer Niederschlag

Der statistische Niederschlag, im moderaten Starkregenbereich auch Bemessungsregen genannt, gibt den spezifisch für die betrachtete Andauer, die Niederschlagshöhe an, die für eine bestimmte Seltenheit bzw. Wiederkehrzeit charakteristisch ist. Seine Berechnung auf Basis der radarbasierten Analyse erfolgte nach dem DWA-Arbeitsblatt 531 (DWA 2012). Dabei wurde die Zeitreihe eines jeden Pixels im 16-jährigen RADOLAN Klima Rasterdatensatz wie eine Station behandelt.

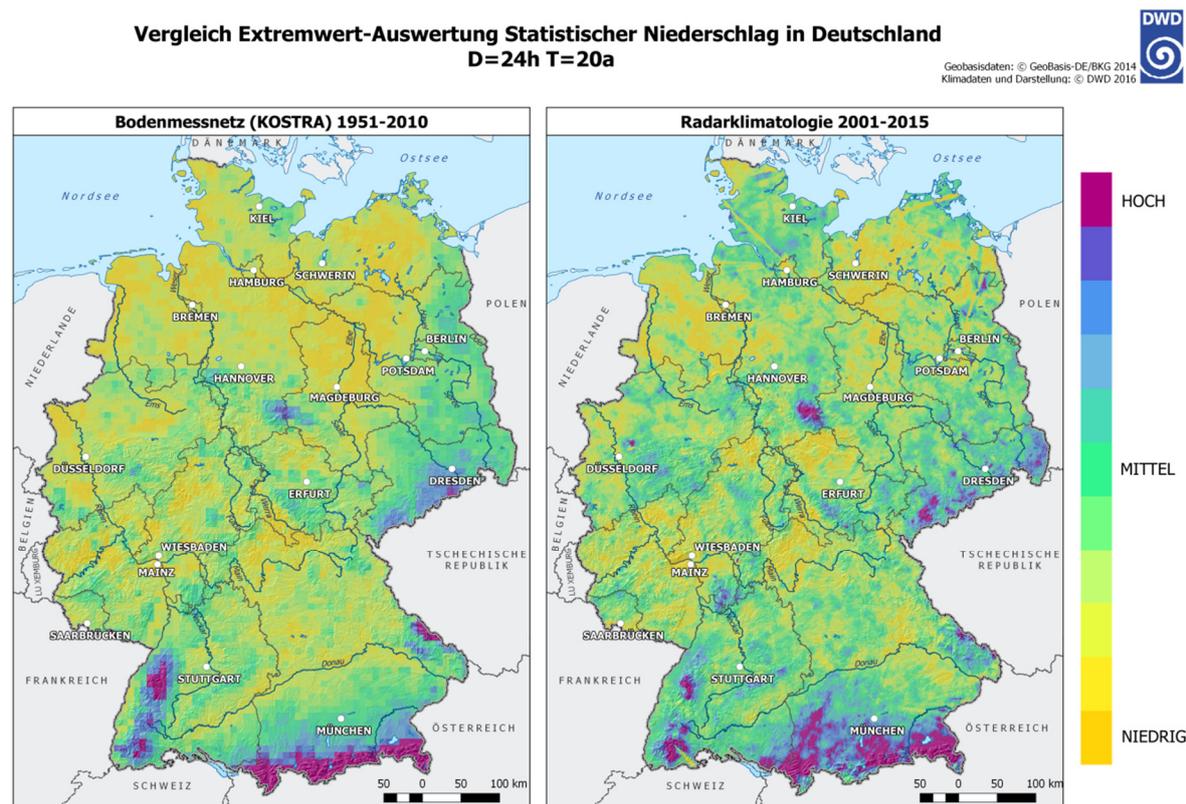


Abb. 3: Statistischer Niederschlag (Bemessungsniederschlag) in Deutschland für die Andauer 24 h und die Wiederkehrzeit 20 a aus Basis der stationsbasierten KOSTRA Analyse für den Zeitraum 1951-2010 (links) und für die radarbasierte Analyse („Radarklimatologie“) im Zeitraum 2001-2015 (rechts). Die Muster sind auffallend ähnlich und durch die Topographie Deutschlands geprägt.

Der Vergleich der Bemessungsniederschläge in dAbhängigkeit von der Andauer (Abb. 3 für 24 h; Abb. 4 für 1 h) und der Datengrundlage (Stationen in Abb. 3 und 4, links; Radar und Aneichstationen in Abb. 3 und 4, rechts) zeigt neben dem Auflösungsgewinn (~10 vs. 1 qkm) bei Verwendung der „Radarklimatologie“, dass die neue Methode bei den Tagesniederschlägen (Abb. 3) die bekannten Muster reproduziert. Bei den Stundenniederschlägen ergibt sich jedoch ein anderes Bild, bei dem die Bemessungsniederschläge in der hochauflösenden radar-basierten Analyse ein völlig anderes Muster zeigen, bei dem die Topographie nur noch eine untergeordnete Rolle spielt. Vielmehr zeigt sich, dass Starkregen der kurzen Andauern

deutschlandweit und damit auch in Regionen im Flachland, kaum seltener auftritt bzw. niedriger zu bemessen ist. Vor dem Hintergrund, dass die im Zuge von Unwettern und schweren Gewittern auftretenden Starkregeneignisse mit erheblichen Wirkgeschehen (Sturzfluten) meist für Andauern von 1 bis 3 Stunden aufweisen, sollte für Starkregenerisikomanagement und –prävention ein zusätzlicher Fokus auf das Flachland gelegt werden.

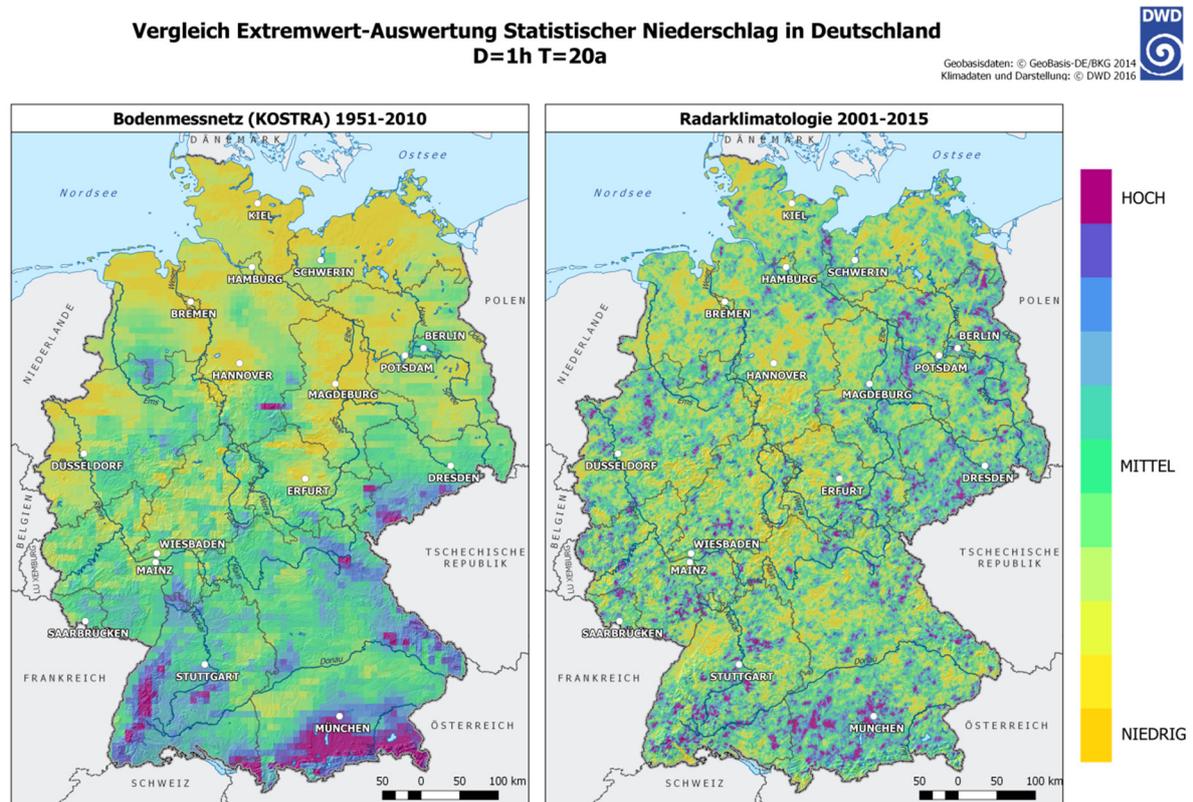


Abb. 4: Wie Abb. 3 aber für die Andauer 1 h. Die Muster bleiben bei der stationsbasierten Analyse von der Topographie geprägt, wogegen die radarbasierte Analyse auch im Flachland hohe Bemessungsniederschläge aufweist und die Muster nicht mehr von der Topographie Deutschlands abhängen. Insbesondere im Flachland NRWs, Schleswig-Holsteins, Sachsen-Anhalts und Brandenburgs sind die Unterschiede eklatant.

Das neue Lagebild für die extremen Niederschläge kurzer Andauern wird auch offenbar, wenn die Überschreitungzeiten von Schwellwerten betrachtet werden (Abb. 5). Auch hier sind die Muster für die extremen Starkregen (Stufen 3 und 4) deutlich weniger vom Relief in Deutschland geprägt als das bisher auf Basis von KOSTRA Analysen festgestellt wurde.

Darüber hinaus können aufgrund der um eine Größenordnung auf 1 qkm verbesserten Auflösung der kartierten Bemessungsregen auch für urbane Räume Stadtteile mit erhöhter Starkregengefährdung ausgemacht werden (DWD 2016).

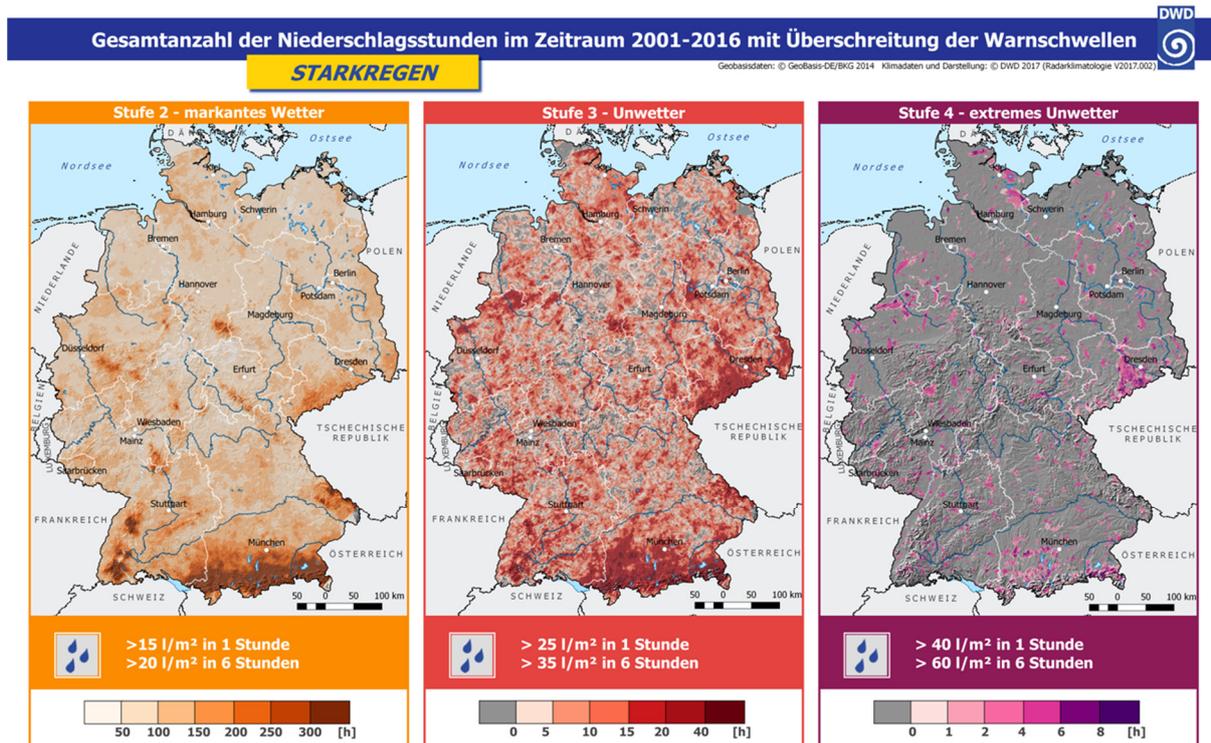


Abb. 5: Gesamtanzahl der Niederschlagsstunden im Zeitraum 2001-2016 mit Überschreitung der Warnschwellen der 1 h und 6 h-Summen, die der DWD für die Stufen 2 (markantes Wetter), 3 (Unwetter) und 4 (extremes Unwetter) anwendet.

3.3 Abgeleitete Produkte

Neben den Niederschlagssummen, den reinen Überschreitungsstatistiken und den Bemessungsniederschlägen, bietet die Radarklimatologie die Möglichkeit einer Reihe von weiteren Produkten in der Auflösung von 1 qkm und für alle Andauern ab 1 h abzuleiten, z. B.

- den R-Faktor, der die Erosivität des Niederschlags repräsentiert (Abb. 6). Dabei kann der Referenzzeitraum frei von 16 Jahren (Gesamtzeitraum der Radarklimatologie) bis auf 1 h (z. B. Ereignisbezogen) gewählt werden, was bei der Ereignisforensik beim Auftreten von pluvialer Erosion sehr nützlich ist, und
- den Vorregenindex, also die gewichtete Summe der Niederschläge, typischerweise für 21 oder 30 Vorregentage. Die Vorberegnung ist ein wichtiger Faktor bei der Bestimmung der Erosionsgefährdung durch nachfolgende Niederschläge.

3.4 Nutzung im Starkregenrisikomanagement

Durch Verschneidung der Gefährdungsinformation mit anderen georeferenzierten Informationen wie Besiedlungsdichte, Bodenversiegelung, Relief, Schadensstatistiken, können aufgrund der hohen nominalen Auflösung der Radarklimatologie weitere Erkenntnisse im Kontext des Starkregenrisikomanagements gezogen werden. Allerdings hängt die Qualität dieser Aussagen stark von der Repräsentativität (z. B. limitiert bei der Radarklimatologie) und der Homogenität (z. B. limitiert bei Schadendaten) ab und eine belastbare Kartierung der Gefährdung durch

Sturzfluten kommt nicht ohne eine explizite Wirkmodellierung der Fließwege und Überflutungshöhen aus.

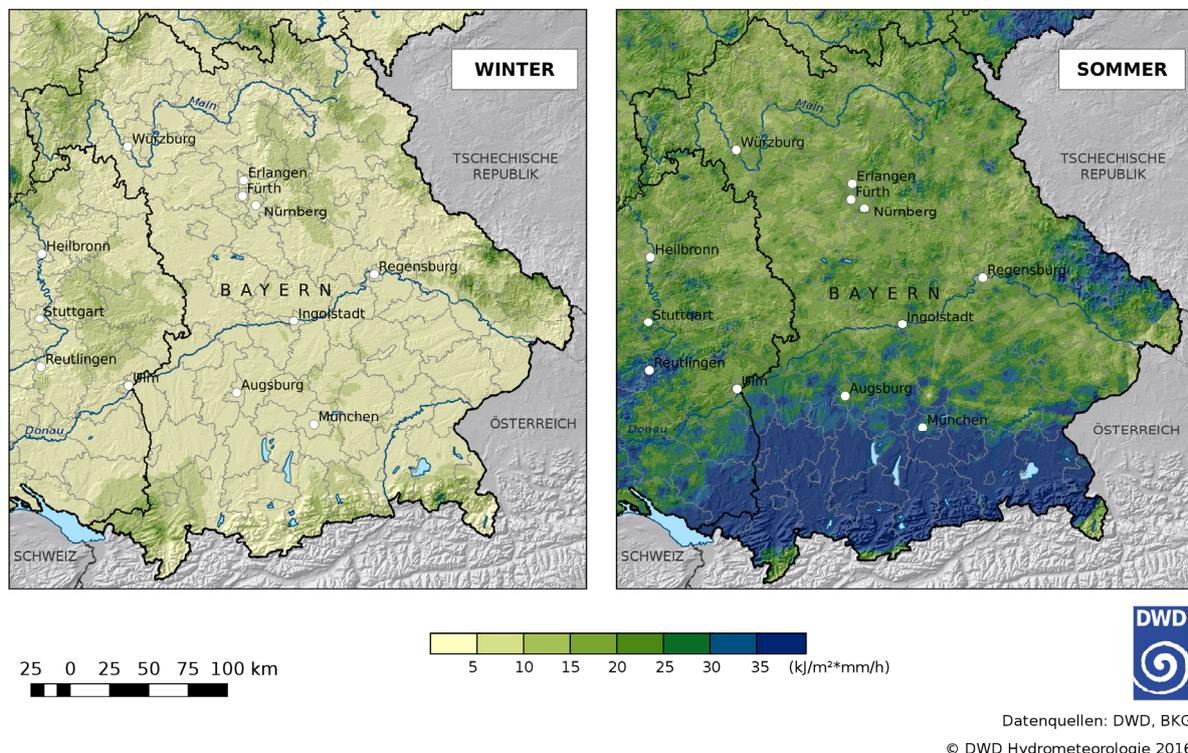


Abb. 6: Erosivität der Niederschläge in Bayern (R-Faktor) im Winter und im Sommer auf Basis der Radarklimatologie 2001-2015.

3.5 Das Vorhaben IRIS

Mit dem Vorhaben (IRIS: Innovative Karten für präventives **R**isikomanagement zur Starkregengefahrenabwehr in Deutschland) möchte der DWD eine bundesweite Starkregengefahrenhinweiskarte gemeinsam mit dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und einem KMU erstellen und leicht zugänglich und verwendbar machen. Dabei wird auf Basis einer aktualisierten Version der Radarklimatologie die Starkregenklimatologie Deutschlands das reliefgesteuerte Abflussgeschehen aufgrund von Starkregen für charakteristische Modellregen deutschlandweit berechnet. Die Karte wird somit eine deutschlandweite Kartierung der reliefgesteuerten Oberflächenabflüsse (Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten, Fließrichtungen) aufweisen und so als Hot Spot Karte Ländern und Kommunen eine Orientierung geben, wo ggf. auf regionaler Basis mit expliziter Modellierung und unter Berücksichtigung von Siedlungsentwässerung und Versickerung die Sturzflutgefährdung adressgenau zu bestimmen ist. Die IRIS-Map wird i. d. R. nur mit einem digitalen Geländemodell von 10 Meter Auflösung (DGM10) berechnet werden, einzelne abflussrelevante Objekte sollen auch auf DGM5 Auflösung berücksichtigt werden. Die resultierenden Karten sollen sowohl als Web-Service als auch als Stand-Alone Kartenmaterial zur Dissemination über das TOP Deutschland Kartenmaterial des BKG, z. B. in Navigationssystemen von Einsatzorganisationen oder Polizei zur Verfügung ste-

hen. Sie könnten so im Falle katastrophaler Niederschläge die Eigensicherung und eine gefährdungsinformierte optimierte Routenplanung in einfacher und damit belastbarer Weise unterstützen.

4. Fazit

Seit 2016 berechnet der DWD jährlich seinen mit dem Wort „Radarklimatologie“ abgekürzt beschriebenen Datensatz der ein nicht nur deutschlandweit, sondern in seiner Belastbarkeit und nachhaltigen Aufstellung auch weltweit einzigartige hochauflösende radarbasierte Analyse des Niederschlages in Deutschland repräsentiert. Aufgrund seiner nominalen und realen Auflösung von 1 qkm in Raum und 1 h in Zeit liefert der deutschlandweite Datensatz auch eine einmalige Aufzeichnung aller Starkregenereignisse in Deutschland seit 1. Januar 2001. Die gegenüber allen stationsbasierten Datensätzen substantiell verbesserte räumliche Erfassung kurzlebiger (konvektiver) Extremniederschläge ist bestens geeignet für Analysen und Folgeprodukte im Themenfeld Starkregenrisikomanagement wenn auch die inzwischen 17-jährige Zeitbasis noch zu kurz ist für eine belastbare Auswertung im Bemessungswesen. Allerdings sind Worst-Case-Szenarien und insbesondere die Gefährdungslage für extremste Niederschläge hiermit erstmals möglich und weisen prompt auf ein neues Lagebild für diese Art der Niederschläge hin, mit einem deutlich geringeren Bezug zur Topographie, als bisher angenommen. Das Potential der Nutzungen für den Datensatz ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft. An dieser Stelle ist die Verbesserung der Erosionsüberwachung durch eine schnelle Diagnose der Erosivität demonstriert worden. Weiter Nutzungsformen liegen im Bereich der Gefährdungs- und Risikoanalysen im Rahmen der Prävention für den Bevölkerungs- und Hochwasserschutz und im Rahmen der Landschafts- und Stadtplanung mit Bezug auf eine „wassersensible“ Herangehensweise. Insgesamt macht der DWD hiermit ein nachhaltiges Angebot im Kontext der Klimaanpassung und Prävention gegen die in Deutschland notorisch unterschätzte Naturgefahren Starkregen und pluviale Sturzfluten.

Literatur

- DWA, 2012. Arbeitsblatt DWA-A 531 – Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 29 S.
- DWD, 2004. Projekt RADOLAN – Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer), Abschlussbericht, 111 Seiten, https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/abschlussbericht_pdf.html
- DWD, 2016. Klima-Presskonferenz des Deutschen Wetterdienstes vom 8. März 2016, https://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2016/PK_08_03_2016/pressekonferenz.html
- Helmert, K., Hassler, B., 2006. Development and application of quality-index composit; Proc. 4th Europ. Conf. on Radar in Meteor. and Hydrol., Barcelona, Spain, 587–589.
- Hengstebeck, T., Helmert, K., Seltmann, J., 2010. RADARQS – a standard quality control software for radar data at DWD; Proc. 6th Europ. Conf. On Radar in Meteor. And Hydrol., Sibiu, Romania.

- Jacobi, S., Bronstert, A., Heistermann, M., 2014. Rain rate retrieval of partially blocked beams from single-polarized weather radar data; 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), Garmisch-Partenkirchen, Germany, September 2014.
- Wagner, A., Seltmann, J., Kunstmann, H., 2014. The German radar composite RX: Qualitative performance analysis for a precipitation climatology; Contribution to ERAD 2014 – The Eighth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology.
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigel, E., Becker, A., 2017. Erstellung einer dekadenischen radargestützten hochauflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenteren Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag. Berichte des DWD Nr. 251., https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_berichte/pdf_einzelbaende/251_pdf.html

Starkregen und Klimawandel – Kooperation KLIWA

Christoph Müller, Christian Iber, Manuela Nied, Andreas Hoy, Thomas Junghänel

Zusammenfassung

Süddeutschland war in den vergangenen Jahren immer wieder von teils extremen Niederschlagsereignissen betroffen. Das Thema Starkregen soll daher innerhalb der Länderkooperation KLIWA zukünftig ein stärkeres Gewicht erhalten. Bisher – KLIWA wurde 1999 ins Leben gerufen – wurden vor allem die bereits feststellbaren Veränderungen von Starkregenereignissen großer Dauer (≥ 24 Stunden) untersucht. Durch die neu gegründete Arbeitsgruppe „Starkregen“ sollen nun vor allem die Veränderungen kurzzeitiger, konvektiver Ereignisse untersucht werden. Im Bereich der vergangenen Veränderungen ist ein Positionspapier geplant, für diese können unter anderem Auswertungen 5-minütiger Messzeitreihen des MUNSTAR-Projektes, an dem der DWD beteiligt ist, genutzt werden. Die Möglichkeiten und Grenzen der hochaufgelösten Klimamodellierung hinsichtlich Aussagen zu zukünftigen Veränderungen kurzzeitiger, konvektiver Ereignisse soll ein von KLIWA organisierter Workshop diskutieren. Beispielhafte Ergebnisse zeigt eine erste hochaufgelöste Modellierung mit COSMO-CLM (KIT) für das KLIWA-Gebiet. Weitere relevante Ergebnisse werden aus anderen Projekten wie z. B. ClimEx erwartet.

1. Einleitung

Die Kooperation KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) wurde 1999 ins Leben gerufen. Ziel der Kooperation war und ist es, mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt und die Ökologie der Flussgebiete im Süden Deutschlands zu identifizieren, Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen zu erarbeiten.

Nicht nur der räumliche Umgriff – seit 2007 ist neben Baden-Württemberg und Bayern auch Rheinland-Pfalz vollwertiges Mitglied, zudem sind Hessen und Nordrhein-Westfalen, sowie der Deutsche Wetterdienst (DWD) regelmäßige Gäste – sondern auch die behandelten Themenbereiche wurden seitdem immer wieder um aktuelle Fragestellungen erweitert. Das Thema „Starkregen“ wurde bereits in der Vergangenheit in KLIWA beleuchtet. Hierbei handelte es sich um Auswertungen zum Langzeitverhalten des Niederschlags, mit Dauerstufen von einem Tag oder mehr.

Das KLIWA-Gebiet war in den vergangenen Jahren immer wieder von teils extremen Niederschlagsereignissen betroffen. Im rheinland-pfälzischen Donnersbergkreis fielen 2014 bis zu 140 mm Niederschlag in drei Stunden. 2015 waren Bretten, Bonndorf (beide Baden-Württemberg) und Oberstdorf (Bayern) Schauplätze extremer Niederschlagsereignisse. Mit Ausnahme des Ereignisses in Bonndorf hatten all diese Ereignisse eine statistische Wiederkehrzeit von mehr als 100 Jahren (KLIWA 2016). Im Mai und Juni 2016 wurden in Süddeutschland weitere extreme Niederschlagsereignisse, wie etwa in Simbach am Inn (Bayern) oder Braunsbach (Baden-Württemberg) verzeichnet (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2017).

Nach den teils extremen Niederschlagsereignissen der vergangenen Jahre soll ab 2018 der Frage, wie sich Starkregenereignisse unter dem Einfluss des Klimawandels verändert haben und verändern werden ein größeres Gewicht in KLIWA verliehen werden: Dies wird durch die Einrichtung einer eigenen Arbeitsgruppe „Starkregen“ deutlich. Neben den KLIWA-Partnerländern sind auch Hessen und der DWD in dieser Arbeitsgruppe vertreten.

Mit dem Klimawandel und der für die Zukunft projizierten Erwärmung steigt grundsätzlich auch das Potenzial für höhere Niederschlagsmengen und damit auch das Risiko für häufigere und extremere Niederschlagsereignisse. Um möglichst effektive Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen zu ergreifen, ist es daher unerlässlich auf diesem Gebiet weiterführende Untersuchungen durchzuführen. In KLIWA liegt der Fokus der Untersuchungen zukünftig auf den Veränderungen von kurzzeitigen, konvektiven Ereignissen.

Veränderungen von Zugbahnen und Großwetterlagen, die ebenfalls zu Starkregenereignissen (stratiforme Ereignisse) führen können, wurden und werden unter anderem beispielsweise in den Projekten WETRAX und der Fortführung WETRAX+ (Weather Patterns, Cyclone Tracks and related precipitation Extremes) für Süddeutschland beleuchtet.

Auf länderspezifische Auswertungen zum Thema soll an in diesem Beitrag nicht näher eingegangen werden. Es sei jedoch auf die Auswertungen und das Klimawandelinformationssystem des Kompetenzzentrums für Klimawandelfolgen in Rheinland-Pfalz hingewiesen, sowie auf Analysen in Hessen, die im Rahmen des Projektes KLIMPRAX-Starkregen durchgeführt werden. Besonders aus bayerischer Sicht sind außerdem die zu erwartenden Ergebnisse des Projektes ClimEx (www.climex-project.org) zum Thema Starkregen von großem Interesse.

2. Bisherige Auswertungen

Die erste gemeinschaftliche Veröffentlichung in KLIWA, die sich mit dem Thema „Starkregen“ beschäftigte, ist das KLIWA-Heft 8 „Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Bayern und Baden-Württemberg“ aus dem Jahr 2006. Im Rahmen dieser Studie wurden Niederschlagszeitreihen unterschiedlicher Länge ausgewertet. Für den Zeitraum 1931-2000 standen 415 Messreihen, für 1901-2000 derer 92 zur Verfügung. Bei der Auswertung verschiedener Ereignisdauerstufen zwischen 1 und 10 Tagen zeigten sich im hydrologischen Winterhalbjahr für beide Zeitreihenlängen überwiegend Zunahmen von Starkregenereignissen, sowohl in Intensität als auch Häufigkeit. Diese waren in vielen Fällen auch statistisch signifikant. Für das hydrologische Sommerhalbjahr konnte keine eindeutige Entwicklung abgeleitet werden. Der Anteil der Messreihen, die im Sommerhalbjahr eine Zunahme von Starkniederschlägen zeigen, liegt bei den längeren Zeitreihen höher (KLIWA 2006).

Eine Fortführung dieser Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Starkniederschlägen erfolgte im Rahmen der KLIWA-Monitoringberichte. Die jüngste Version des Monitoringberichts wurde im Jahr 2016 veröffentlicht. Hierbei wurden für 44 Untersuchungsgebiete die Maximalwerte der eintägigen Gebietsniederschlagshöhe im Zeitraum 1931-2015 auf Veränderungen untersucht. Im hydrologischen Winterhalbjahr wurden dabei überwiegend (hoch) signifikante Zunahmen festgestellt. Besonders ausgeprägt waren diese in Nordbayern und dem südlichen Baden-Württemberg. Im hydrologischen Sommerhalbjahr wurden ebenfalls mehr Zu- als Abnahmen festgestellt, nur wenige der Veränderungen waren jedoch signifikant (KLIWA 2016). Zusammenfassend konzentrierten sich die bisherigen gemeinschaftlichen Auswertungen zum Thema „Starkregen“ auf Auswertungen des Langzeitverhaltens von Starkregenereignissen mit einer Dauer von mindestens einem Tag. Konvektive Ereignisse, sowie die zukünftige Entwicklung von Starkregenereignissen wurden in KLIWA bisher nicht betrachtet.

3. Geplante Auswertungen

Nicht zuletzt durch die verheerenden Starkregenereignisse der vergangenen Jahre rückte das Thema „Starkregen“ stärker in die öffentliche Wahrnehmung. Auch in KLIWA soll dieser Thematik zukünftig größere Aufmerksamkeit zukommen.

Aus diesem Grund wurde in KLIWA ein Konzept zum Thema „Starkregen“ erarbeitet, auf dessen Basis die Veränderungen von Starkregenereignissen in der Vergangenheit und Zukunft in Süddeutschland untersucht werden sollen. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf konvektiven Ereignissen. Die Bearbeitung des Konzepts, wird von der neuen Arbeitsgruppe durchgeführt. Aus Sicht von KLIWA ergeben sich drei zentrale Fragen:

1. Haben Starkniederschläge in der Vergangenheit zugenommen?
2. Nehmen Starkniederschläge in Zukunft zu?
3. Welche Handlungsempfehlungen und –optionen existieren bereits?

Zur Beantwortung der Frage nach vergangenen Veränderungen soll zunächst ein Sachstandsbericht angefertigt werden, der den aktuellen Kenntnisstand zu Veränderungen von Starkniederschlägen in Süddeutschland widerspiegelt. In diesen fließen mögliche länderspezifische Auswertungen und Daten, sowie externe Untersuchungen zum Thema ein. Außerdem ist angedacht im Rahmen des Sachstandsberichts eine möglichst allgemein gültige Definition des Begriffs „Starkregen“ zu erarbeiten.

Im Bereich der vergangenen Veränderungen von Starkregenereignissen ist des Weiteren die Anfertigung eines KLIWA-Positionspapiers in Planung. Hierbei kann voraussichtlich auf Ergebnisse des MUNSTAR-Projektes zurückgegriffen werden, das unter anderem vom DWD bearbeitet wird. In dem Teilprojekt sollen dabei mithilfe von Niederschlagszeitreihen, die dem DWD ab 1951 in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten vorliegen, verschiedene Niederschlagsdauerstufen von bis zu 6 Stunden auf mögliche Veränderungen untersucht werden. Mit der Veröffentlichung dieses Positionspapiers ist ab 2019 zu rechnen.

Für die Untersuchung der zukünftigen Veränderungen von konvektiven Starkniederschlagsereignissen bedarf es regionaler Klimaprojektionen, auf Basis regionaler Klimamodelle deren räumliche Auflösung hoch genug ist, um den Konvektionsprozess abzubilden (konvektionserlaubende Modelle). Viele der derzeit vorliegenden Klimamodelle sind dazu nicht in der Lage. Für räumlich begrenzte Gebiete existieren zwar bereits erste Projektionen dieser Art. Ein großräumiges Ensemble konvektionserlaubender Projektionen wird derzeit aber erst sukzessive geschaffen.

Erste Untersuchungen mit dem Modell COSMO-CLM5.0 in einer räumlichen Auflösung von 2,8 km, wurden 2017 vom Karlsruher Institut für Technologie durchgeführt. Die Ergebnisse liegen für das gesamte KLIWA-Gebiet und Hessen vor. In Bezug auf Starkregen wurde die Veränderung verschiedener Niederschlagsjährlichkeiten (1, 10 und 100 Jahre) und Dauerstufen (1, 12 und 24 Stunden) der nahen Zukunft (2021-2050) und fernen Zukunft (2071-2100) im Vergleich zur Vergangenheit (1971-2000) untersucht. Die Klimaprojektion basiert auf dem Emissionsszenario RCP8.5 (Laube et al. 2017).

Die Veränderungen der Dauerstufe 1 Stunde sind für die einjährigen Niederschläge sowohl im Winter als auch im Sommer marginal. Gleiches gilt für die zehnjährlichen Niederschläge

(Dauerstufe 1 Stunde) im Winterhalbjahr. Im Sommerhalbjahr (Dauerstufe 1 Stunde, Jährlichkeit 10 Jahre) konnten in der nahen Zukunft sowohl Zu- als auch Abnahmen festgestellt werden. In der fernen Zukunft (Dauerstufe 1 Stunde, Jährlichkeit 10 Jahre) zeigt dagegen das gesamte KLIWA-Gebiet deutliche Zunahmen von bis zu +20 mm an. Der Trend der zehnjährlichen Niederschläge zeigt sich verstärkt in den hundertjährigen Ereignissen (Laube et al. 2017).

Für die übrigen Dauerstufen zeigen sich im Winterhalbjahr sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft eher geringe Veränderungen, die zudem große lokale Unterschiede aufweisen. Im Sommerhalbjahr ist die Veränderung verglichen mit dem Winterhalbjahr größer. Die räumliche Variabilität der Veränderung wächst mit zunehmender Jährlichkeit und Dauerstufe (Laube et al. 2017). Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass die Aussagen nur auf einem einzigen Modelllauf beruhen und daher nur beispielhafte Aussagen liefern können.

Dennoch sind die ersten Ergebnisse der Modellierung mit COSMO-CLM5.0 vielversprechend. Ob und inwieweit die Frage nach zukünftigen Veränderungen von konvektiven Starkniederschlägen in Süddeutschland mithilfe der hochaufgelösten Klimamodellierung klarer beantwortet werden kann, muss jedoch noch weitergehend geklärt werden. Hierzu plant KLIWA die Organisation und Ausrichtung eines Workshops, der Ende 2018 stattfinden soll. In diesem Workshop soll mit Vertretern verschiedener Modellierergruppen über die Möglichkeiten und Limitierungen der hochaufgelösten Klimamodellierung in technischer, fachlicher und analytischer Hinsicht diskutiert werden. Abhängig vom Ergebnis dieses Workshops soll das weitere Vorgehen in KLIWA in Bezug auf zukünftige Veränderungen von Starkniederschlagsereignissen abgestimmt werden. Sollte die hochaufgelöste Klimamodellierung Aussagen zum Starkregen erlauben, so sind Aussagen aus einem ausreichend großen Ensemble zu gewinnen. In Deutschland existieren auf kommunaler und Landesebene bereits eine Vielzahl an Leitfäden, welche Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Adressaten bereitstellen.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) hat eine bundesweite Sammlung veröffentlichter Leitfäden zusammengestellt, die mögliche Handlungsempfehlungen zum Thema „Starkregen“ enthalten. Diese soll ggf. im Rahmen von KLIWA weiterverwendet werden. Das weitere Vorgehen im Bereich Handlungsempfehlungen ist abhängig von den Ergebnissen, die sich aus den Untersuchungen zu vergangenen und zukünftigen Starkregenereignissen ergeben werden.

4. Fazit und Ausblick

Das Thema „Starkregen“ wird in KLIWA schon seit längerer Zeit betrachtet. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand bis dato aufgrund der bestehenden Datenverfügbarkeit und Zielsetzungen primär das Langzeitverhalten von Starkniederschlagsereignissen mit Dauerstufen von mindestens einem Tag. Dabei wurde im KLIWA-Gebiet vor allem im hydrologischen Winterhalbjahr eine verbreitete Zunahme von Starkniederschlägen festgestellt. Im Gegensatz zu den vergangenen Untersuchungen soll nun vor allem den Veränderungen von kurzzeitigen, konvektiven Starkniederschlägen in der Vergangenheit und Zukunft nachgegangen werden.

Bei der Untersuchung der Veränderungen von (konvektiven) Starkniederschlagsereignissen basierend auf Messstationsdaten muss immer die begrenzte räumliche Ausdehnung und Wirksamkeit solcher Ereignisse beachtet werden. Nicht alle (konvektiven) Ereignisse werden durch

Messstationen erfasst. Eine verbesserte Erfassung und damit eine belastbarere Datengrundlage für Trenduntersuchungen könnte durch die RADOLAN-Daten geschaffen werden. Im Projekt „Radarklimatologie“ reproduzierte der DWD Wetterradardaten mit einem optimierten RADOLAN-Verfahren zurück bis zum Jahr 2001 (Winterrath et al. 2017). Der neue Datensatz wird zudem jährlich fortgeschrieben. Dennoch wird es noch einige Jahre dauern, bis diese Daten eine eigene Grundlage für Trenduntersuchungen bieten können. Unterstützend können sie aber schon heute eingesetzt werden, z. B. um verschiedene Prozesse besser verstehen zu können. Dies ist auch im Rahmen von KLIWA nach Möglichkeit vorgesehen.

Für fundierte Aussagen zu zukünftigen Veränderungen von konvektiven Starkniederschlagsereignissen bleibt das Ergebnis des geplanten KLIWA-Workshops Ende 2018 abzuwarten. Erste Ergebnisse der Projektion mit COSMO-CLM5.0 (Auflösung: 2,8 km) zeigen beispielsweise im Sommer eine zukünftige Zunahme der zehnjährlichen Niederschläge für die Dauerstufe 1 Stunde. An dieser Stelle sind jedoch weitere Untersuchungen und die Auswertung weiterer Konvektionserlaubender Projektionen nötig.

Das weitere Vorgehen von KLIWA zum Thema „Starkregen“ ist von den Erkenntnissen abhängig, die 2018/2019 aus KLIWA aber auch aus anderen Projekten wie ClimEx zu erwarten sind.

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hg.), 2017. Sturzfluten- und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016. Wasserwirtschaftlicher Bericht (UmweltSpezial).
- Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (Hg.), 2006. Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.1.3 "Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse in Baden-Württemberg und Bayern". (KLIWA-Berichte, Heft 8).
- Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (Hg.), 2016. Monitoringbericht 2016. Klimawandel in Süddeutschland - Veränderung von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA.
- Laube, N., Panitz, H. J., Schädler, G., 2017. Auswertung regionaler COSMO-CLM-Klimasimulationen mit 2.8 km Auflösung für das KLIWA-Gebiet und die Klimazeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A., 2017. Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 251).

Das Projekt HiOS – Erstellung einer Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzfluten für bayerische Gemeinden

Karl Broich, Maria Kaiser, Qing Lin, Johannes Mitterer, Hai Nguyen, Thomas Pflugbeil, Fabian von Trentini, Florian Willkofer, Markus Disse, Ralf Ludwig

Zusammenfassung

Das Ziel des Projekts HiOS (Hinweiskarte Oberflächenabfluss und Sturzflut) ist die Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines Verfahrens zur Evaluierung und Klassifizierung der Gefährdung der bayerischen Kommunen durch Oberflächenabfluss und Sturzfluten. Mithilfe einer GIS-Anwendung soll die Ausprägung von oberflächenabfluss- und sturzflutbegünstigenden bzw. -auslösenden Faktoren abgefragt, verknüpft und bewertet werden. Diese GIS-Anwendung stellt die Grundlage für eine bayernweite Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzflut dar. Im Rahmen des Projekts sollen außerdem die Möglichkeiten und Grenzen der hydrologischen und hydrodynamischen Modellierung von Oberflächenabfluss und Sturzfluten untersucht werden. Zu diesem Zweck ist die Nachmodellierung von vergangenen Schadensereignissen unter Einsatz von Hochleistungsrechnern (High Performance Computing) vorgesehen. Dieser Beitrag fasst Ziele und erste Ergebnisse des Projektes zusammen.

1. Das Projekt HiOS

Die durch Starkregen verursachten Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre in Deutschland haben teils gravierende Schäden angerichtet. Besonders in Erinnerung blieben aufgrund ihrer Schwere die Ereignisse von Braunsbach und Simbach am Inn. Da die auslösenden Starkregenereignisse kleinräumig und sehr variabel sind, ist eine Vorhersage mit ausreichender Vorwarnzeit beinahe unmöglich. Infolgedessen gewinnt die Vorsorge umso mehr an Bedeutung.

Das Projekt HiOS (**H**inweiskarte **O**berflächenabfluss und **S**turzflut) befasst sich mit der Entwicklung und Umsetzung eines GIS-basierten Verfahrens zur Bewertung und Klassifizierung der Gefährdung bayerischer Kommunen durch Oberflächenabfluss und Sturzfluten. Die Erkenntnisse für das Klassifizierungsverfahren kommen aus der hydrologischen und hydrodynamischen Modellierung von Sturzfluten sowie der geostatistischen Auswertung vergangener Ereignisse. Außerdem werden verschiedene hydrologische und hydrodynamische Modelle anhand ausgewählter Kommunen und deren Einzugsgebiete auf ihre Eignung für die Modellierung von Oberflächenabfluss und Sturzfluten untersucht. Die Erkenntnisse aus den Modellvergleichen fließen anschließend in einen Vorschlag für einen standardisierten Modellierungsablauf ein, der auch auf andere Kommunen angewendet werden könnte.

2. Rechen- und Dateninfrastruktur in HiOS

Im Projekt wurde eine zentrale Datenablage und Ordnerstruktur erarbeitet, die die gemeinsame Nutzung und den Austausch der Daten und Ergebnisse zwischen den Fachgruppen der Hydrologie, Hydrodynamik und Geoinformatik vereinfacht. Der Netzwerkspeicher, als zugrundeliegendes System, stellt die nachhaltige Verfügbarkeit der im Projekt verwendeten meteorologischen, geologischen und hydrologischen Daten sicher. Mit dem Einsatz von virtuellen Maschinen in einer Cloud-Infrastruktur können die einzelnen Modelle in einer isolierten Umgebung betrachtet und analysiert werden. Bei Bedarf lassen sich diese Maschinen vielfältig duplizieren, sodass ausgehend von einem vorkonfigurierten System verschiedene Lösungsan-

sätze getestet werden können. Darüber hinaus erlaubt die Nutzung einer Hochleistungsrecheninfrastruktur, dass Modellierungen ausgeführt werden können, die die Rechenleistung und den Speicherbedarf eines Arbeitsplatzrechners übersteigen. Dies ist der Fall wenn Modelle wie WaSiM und TELEMAC-2D mit der Anzahl der Prozessorkerne skalieren und sich damit eine Reduzierung der Modellierungslaufzeit bemerkbar macht.

3. Benchmark-Tests der hydrodynamischen Modelle

Im Hinblick auf die Simulation von Oberflächenabfluss und Sturzfluten werden vier hydrodynamische Modelle miteinander verglichen (Tabelle 1). Zwei der ausgewählten Modelle werden kommerziell vertrieben (HYDRO_AS-2D und FloodArea), ein Modell ist frei verfügbar (TELEMAC-2D) und ein weiteres Modell wurde von einem Mitarbeiter des Lehrstuhls für Hydrologie und Flussgebietsmanagement der Technischen Universität München entwickelt (P-DWave).

Tab. 1: Für die Benchmark-Tests herangezogene hydrodynamische Modelle mit den jeweils verwendeten Grundgleichungen und Verfahren.

Modell	Entwickler	Grundgleichung	Lösungsverfahren	Zeitschrittverfahren
HYDRO_AS-2D	Firma Hydrotec (Nujic 2016)	Dynamische Welle	Finite Differenzen	Explizit
TELEMAC-2D	Konsortium (Artelia, BAW, EDF, CEREMA, HR Wallingford) (Ata 2017)	Dynamische Welle	Finite Differenzen / Finite Elemente	Implizit
P-DWave	Jorge Leandro (Leandro et al. 2014)	Diffusive Welle	Finite Differenzen	Explizit
FloodArea	Firma geomer (geomer 2017)	Kinematische Welle	Finite Volumen	Explizit

Der Vergleich der Modelle erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden vier vordefinierte Benchmark-Tests (BMT) durchgeführt. Diese sind in Hunter et al. (2015) (BMT 1) und Néelz & Pender (2013) (BMT 2 bis 4) beschrieben. Im zweiten Schritt werden die Hochwasserereignisse aus Starkregen von Baiersdorf im Juli 2007 und von Simbach am Inn im Mai/Juni 2016 mit den vier Modellen simuliert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der BMT vorgestellt, die mit den jeweiligen Modellentwicklern abgestimmt wurden.

3.1 Benchmark-Test 1 (Dambruch)

Der erste BMT bildet die eindimensionale Ausbreitung einer generalisierten Dambruchwelle auf einer 5.000 m langen ebenen Fläche ab. Die Modellauflösung beträgt 25 m. Als Randbedingung wird am linken Rand ein Wasserstand vorgegeben. Die Rauigkeit nach Manning beträgt überall $0,01 \text{ s/m}^{1/3}$. Die Besonderheit dieses BMT ist, dass die Modellergebnisse mit einer analytischen Lösung verglichen werden können, welche unter der Annahme einer lokalen Fließgeschwindigkeit von 1 m/s berechnet werden kann (Hunter et al. 2005). In Abbildung 1 sind die Ergebnisse für den BMT 1 nach einer Stunde dargestellt.

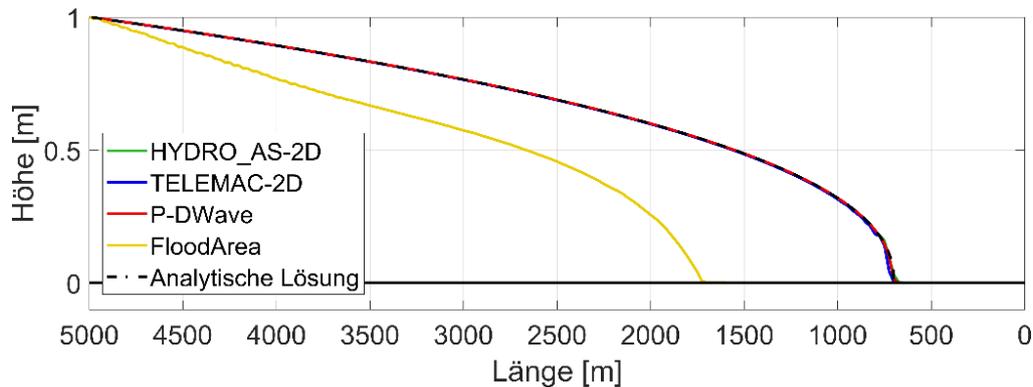


Abb. 1: Eindimensionale Ausbreitung einer Dammbrechwelle auf einer 5.000 m langen ebenen Fläche (Benchmark-Test 1). Dargestellt ist der simulierte Wasserstand nach 3.600 s.

Die Modelle HYDRO_AS-2D, TELEMAC-2D und P-DWave erreichen die analytische Lösung. FloodArea hingegen zeigt eine zu geringe Wellenausbreitung. Dies liegt zum einen daran, dass in FloodArea keine Anfangsgeschwindigkeit eingestellt werden kann. Zum anderen verwendet das Modell eine vereinfachte Form der Flachwassergleichung.

3.2 Benchmark-Test 2 (See)

Der zweite BMT untersucht das Füllen und Absenken zweier nicht verbundener Wasserkörper (Abbildung 2). Die Modellauflösung beträgt 10 m. Als Randbedingung wird ein Wasserstand von 9,7 m am linken Rand vorgegeben. Innerhalb von elf Stunden wird dieser Wasserstand auf 10,35 m angehoben und anschließend wieder auf 9,7 m abgesenkt. Die Schwelle zwischen den beiden Wasserkörpern liegt auf 10,25 m Höhe. Die Simulationsergebnisse in Abbildung 3 werden für die zwei Pegel aus Abbildung 2 dargestellt.

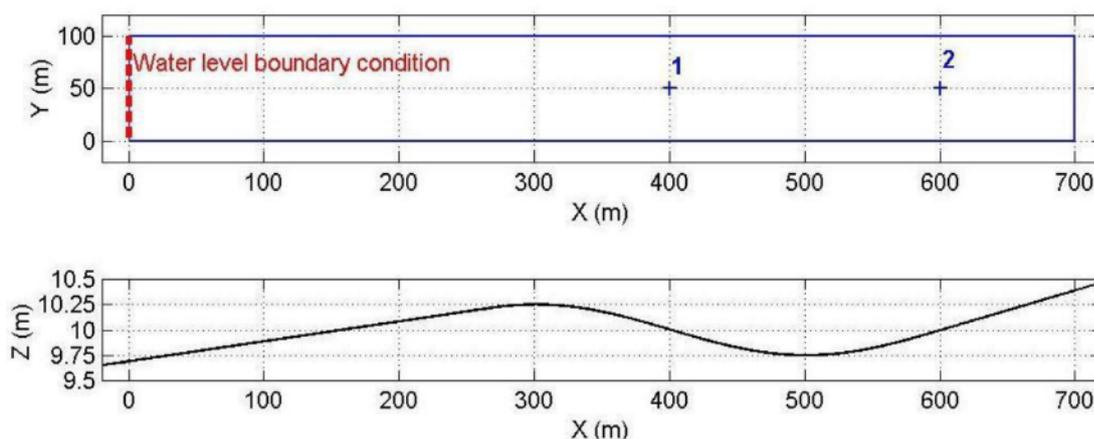


Abb. 2: Zwei nicht verbundene Wasserkörper (Querschnitt, unten) und die Lage zweier Pegel in der Senke (Draufsicht, oben) des Benchmark-Tests 2 (Néelz & Pender 2013).

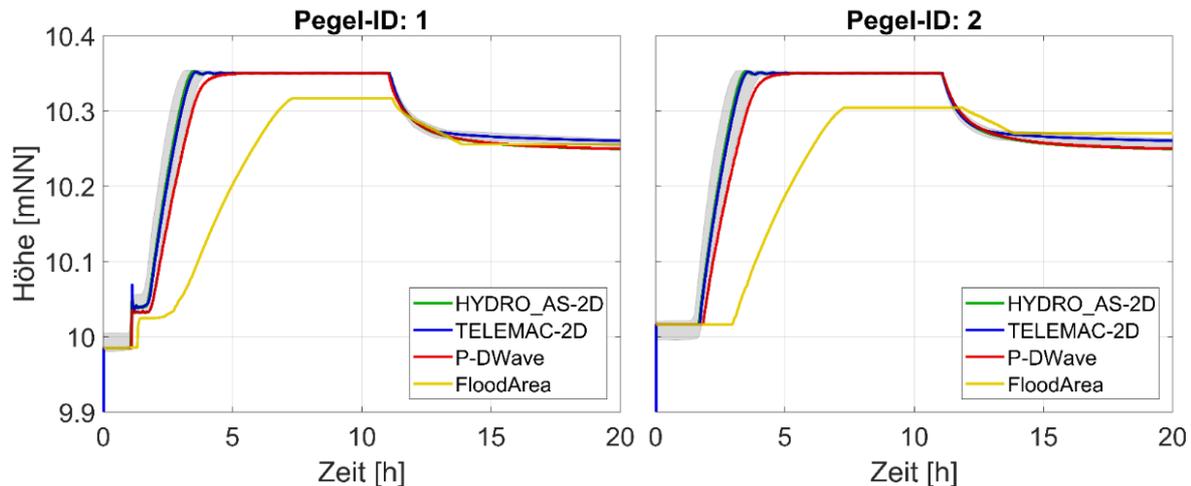


Abb. 3: Füllen und Absenken zweier nicht verbundener Wasserkörper (Benchmark-Test 2). Simulierte Wasserstände an zwei Pegelpunkten. Die grauen Bänder stellen die Modellergebnisse aus Néelz & Pender (2013) dar.

HYDRO_AS-2D und TELEMAC-2D bilden den Verlauf des An- und Abstiegs des Wasserstandes ähnlich wie die Modelle aus Néelz & Pender (2013) ab. P-DWave zeigt einen langsameren Anstieg, liegt aber noch nahe bei den anderen Modellen. FloodArea hingegen weicht stark von den anderen Modellen ab. Bei FloodArea erfolgt der Anstieg auf den Maximalwasserstand im See erst vier Stunden später und erreicht auch nicht die 10,35 m. Der Unterschied in den Maximalwasserständen bei FloodArea liegt daran, dass sehr geringe Wasserstandsdifferenzen ($\Delta W \approx 0,1 \text{ mm/m}$) modelltechnisch nicht mehr ausgeglichen werden. Der zu geringe Wasserspiegelanstieg im See lässt sich durch die vereinfachte Grundgleichung im Modell erklären. Nach einer Simulationszeit von 20 h erreichen nur HYDRO_AS-2D und P-DWave den exakten Endwasserstand von 10,25 m.

3.3 Benchmark-Test 3 (Senken)

Der dritte BMT bildet ein 2 x 2 km großes Gebiet mit 16 Senken ab (Abbildung 4). Die Modellauflösung beträgt 2 m. Das Gelände weist ein Gefälle von 1:1.500 in Nord-Süd-Richtung und ein Gefälle von 1:3.000 in West-Ost-Richtung auf. Die 16 Senken sind jeweils ca. 0,5 m tief und werden durch eine Cosinuswelle beschrieben. Als Randbedingung wird in der oberen linken Ecke ein Zufluss von 20 m³/s über den Zeitraum von ca. 85 min vorgegeben. Über die Simulationszeit werden Pegel an den tiefsten Stellen der Senken betrachtet. Die Modellierungsergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

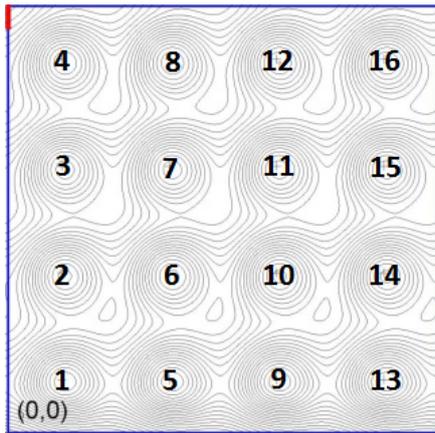


Abb. 4: Draufsicht auf ein Gebiet mit 16 Senken für den Benchmark-Test 3 (Néelz & Pender 2013).

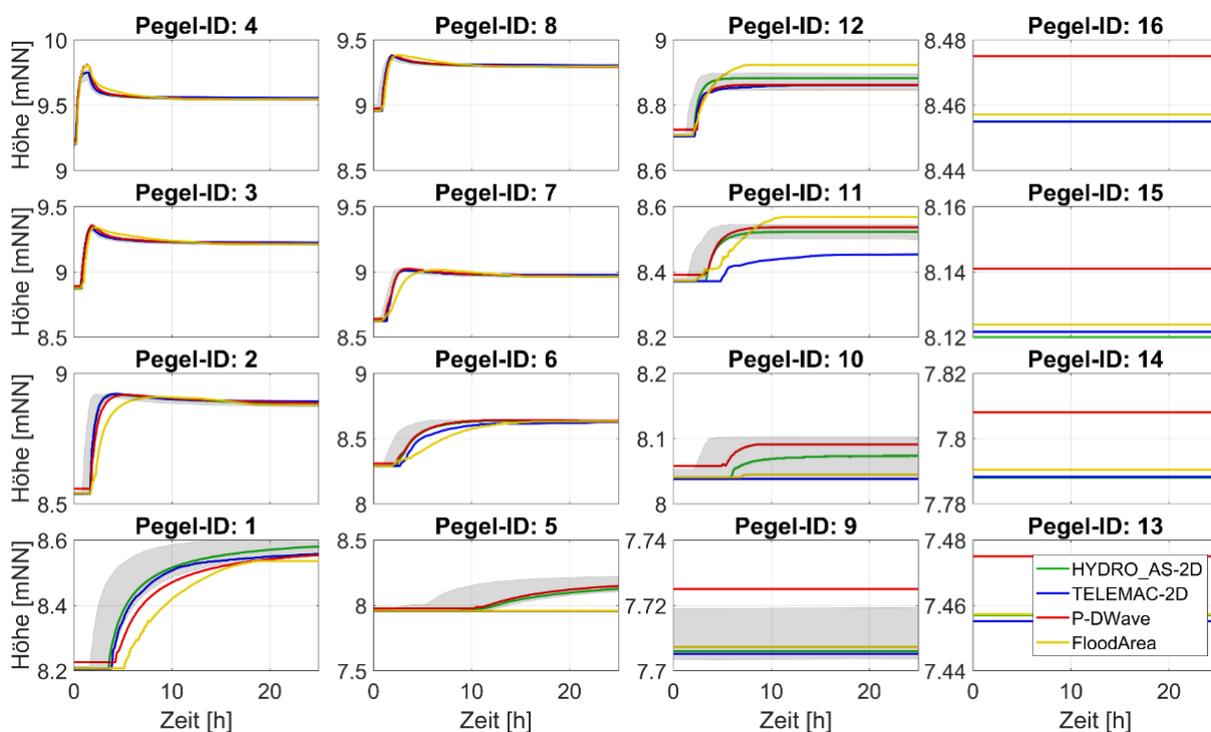


Abb. 5: Simulierte Wasserstände in den 16 Senken des Benchmark-Tests 3. Die grauen Bänder stellen die Modellergebnisse aus Néelz & Pender (2013) dar.

Die nahe dem Zufluss bei Senke 4 liegenden Pegel werden von allen Modellen ähnlich befüllt. Allein FloodArea zeigt einige Abweichungen. Die weiter weg liegenden Pegel zeigen deutlich größere Unterschiede in den simulierten Wasserständen. So befüllen TELEMAC-2D und FloodArea Senke 5 und 10 nicht. TELEMAC-2D zeigt bei Pegel 11 Abweichungen von den anderen Modellen. FloodArea befüllt die Senken generell später als die anderen Modelle. Auch die Modelle aus Néelz & Pender (2013) zeigen bei größeren Entfernungen von der Zugabestelle größere Bandbreiten an modellierten Wasserspiegellagen. Generell liegen die Abweichungen bei ca. 0,05 – 0,1 m.

3.4 Benchmark-Test 4 (Urbanes Gebiet)

Der letzte BMT untersucht ein reales Gebiet mit einer Größe von ca. 0,4 km² (Abbildung 6). Die Modellauflösung beträgt 2 m. Die Straßen und das Gelände werden mit unterschiedlichen Rauigkeiten belegt. Als Randbedingungen wird zuerst ein Niederschlagsereignis von 20 mm innerhalb von 3 min und danach ein Zufluss in der oberen rechten Ecke ($Q_{\max} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$) festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

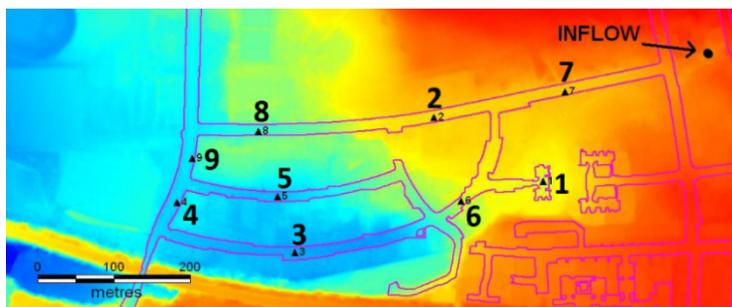


Abb. 6: Simulation eines Niederschlagsereignisses über einem urbanen Gebiet mit 9 Pegeln in Benchmark-Test 4 (Néelz & Pender 2013).

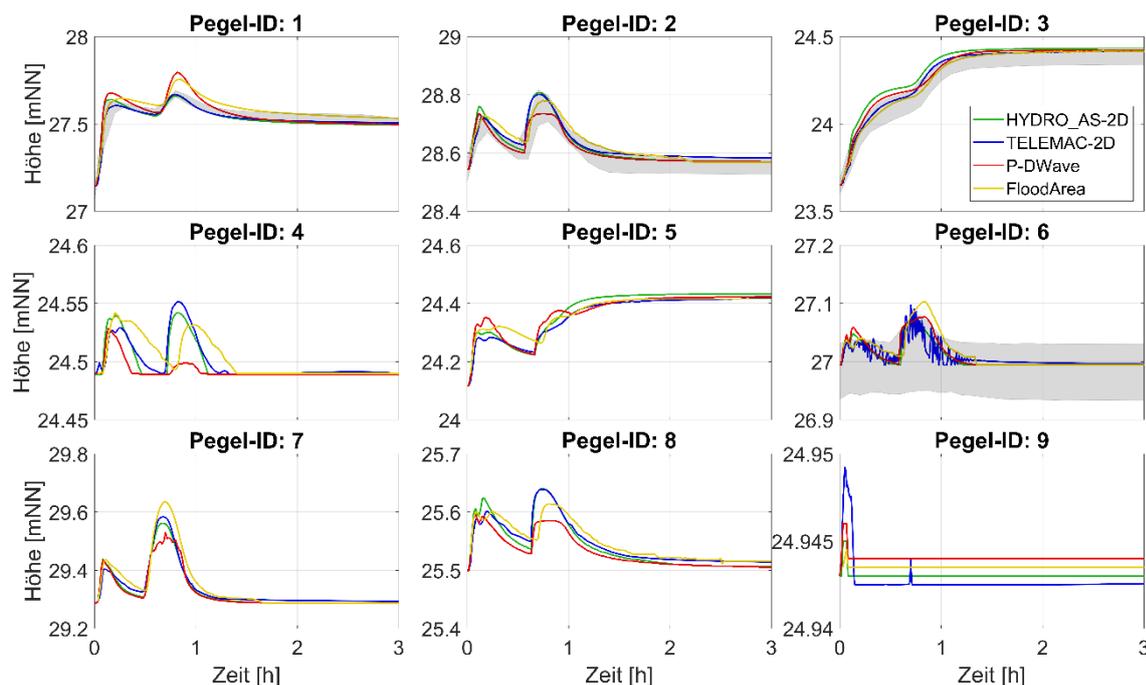


Abb. 7: Simulierte Wasserstände an den 9 Pegel des Benchmark-Tests 4. Die grauen Bänder stellen die Modellergebnisse aus Néelz & Pender (2013) dar.

Die erste Abflussspitze stellt die Wirkung des Niederschlags und die zweite Abflussspitze die Wirkung des Zuflusses dar. Alle vier Modelle können diese beiden Abflussspitzen wiedergeben, jedoch über- bzw. unterschätzen FloodArea und P-DWave vor allem die Zuflussspitze im Vergleich mit den anderen beiden Modellen und jenen aus Néelz & Pender (2013). Die Differenzen sind jedoch meist kleiner als 0,05 m. TELEMAC-2D weist aufgrund seines Nass-Tro-

cken-Algorithmus bei Pegel 6 Oszillationen auf. Generell können alle Modelle das Abflussverhalten wiedergeben, auch FloodArea, welches bei den Benchmarktests 1 bis 3 noch größere Abweichungen zu den anderen Modellen gezeigt hat.

4. Hydrologische Modellierung in HiOS

Die hydrologische Modellierung umfasst in HiOS mehrere Fragestellungen, die mit den im deutschsprachigen Raum weitverbreiteten Modellen LARSIM und WaSiM beantwortet werden sollen. Beide Modelle sind deterministische, rasterbasierte und damit flächenverteilte Wasserbilanzmodelle mit zumindest teilweise konzeptionellen Modulen.

Zu Beginn ist zu klären, welche Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Abbildung von Hochwasserereignissen infolge von Starkregen erfüllt sein müssen. Dazu gehören eine adäquate Wahl der räumlichen und zeitlichen Skalenebenen, sowie eine realitätsnahe Berechnung der maßgebenden Abflussprozesse (Kapitel 4.1). Beide Modelle erfordern eine multidimensionale Kalibrierung der hydrologischen Prozesse. Damit eine stabile Berechnung auch bei kleinen Einzugsgebieten ohne Pegelmessungen erfolgen kann, ist die bisherige Kalibrierungsstrategie unter den Rahmenbedingungen von Oberflächenabfluss- und Sturzflutereignissen zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen (Kapitel 4.2). Abschließend sind für Bemessungsverfahren maßgebende meteorologische und hydrologische Szenarien zu definieren, durch die Zufluss-Ganglinien für eine Risikoabschätzung mittels hydrodynamischer Modellierung erstellt werden können (Kapitel 4.3).

4.1 Skalenstudie und Modultests

Die räumliche und zeitliche Auflösung spielt bei der Modellierung von Sturzfluten und Oberflächenabfluss eine wichtige Rolle, da die auslösenden Starkniederschläge wenige Minuten bis Stunden dauern und lokal stark begrenzt sind, so dass eine schnelle und intensive Abflussreaktion aus dem Einzugsgebiet erfolgt. Mit zunehmender Komplexität der Modelle durch verfeinerte Raster und kleinere Zeitschritte erhöht sich jedoch auch der Datenbedarf. Dadurch steigt bei Extremereignissen, potentiell die resultierende Unsicherheit trotz verbesserter räumlicher und zeitlicher Abbildung. In HiOS wird der Einfluss verschiedener Auflösungskombinationen auf die Modellgüte sowohl auf die Wasserbilanz, als auch auf das Extremereignis untersucht. In einer Vorabstudie wurden Skaleneffekte für das Einzugsgebiet der Wertach (östlich von Kempten) bis zum Pegel Wertach (31,5 km²) und dem hydrologischen Modell WaSiM untersucht (Rosenauer 2017). Die hydrologischen Hauptwerte für diesen Pegel zeigen, dass das hier untersuchte Ereignis vom 20.07.2007 mit 68,8 m³/s den angegebenen HQ100 von 60 m³/s übertrifft. Das Modell wurde in einer Auflösung von 25 m und 3 Stunden für das hydrologische Jahr 2007 anhand der Nash und Sutcliffe Effizienz (Nash & Sutcliffe 1970; NSE) und der modifizierten Kling-Gupta Effizienz (Kling et al. 2012, KGE') kalibriert und validiert. Der hierbei gewonnene Parametersatz wurde anschließend auf weitere Auflösungskombinationen (50 m, 100 m, 1 h, 3 h) angewandt und der Einfluss auf die Gütekriterien untersucht. Zudem wurden diese Parameter verwendet, um ein stattgefundenes Hochwasserereignis im Einzugsgebiet nach zu modellieren. Hierbei zeigte sich, dass in WaSiM einige Parameterwerte aus der Modellkalibrierung für den Gesamtzeitraum, wie beispielsweise die Speicherkonstante für den Direktabfluss, für die Konzentration des Oberflächenabflusses angepasst werden müssen.

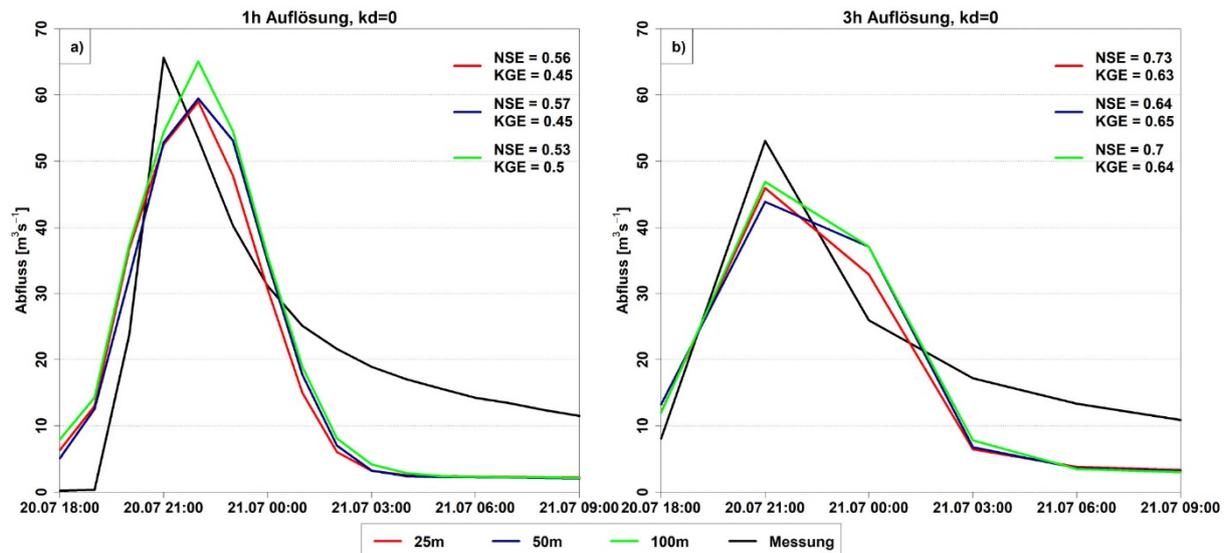


Abb. 8: Modellierung des Ereignisses vom 20.07.2007 im Einzugsgebiet der Wertach in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen (nach Rosenauer 2017).

Sowohl für die Wasserbilanz als auch für das Extremereignis wurde weiterhin festgestellt, dass die zeitliche Auflösung einen größeren Einfluss auf die Güte der Modellierung hat, als die räumliche (Tabelle 2).

Tab. 2: Güte der Wasserbilanz- und Ereignismodellierung mit WaSiM (nach Rosenauer 2017).

	Wasserbilanz				Sturzflutereignis			
	NSE		KGE'		NSE		KGE'	
	1 h	3 h	1 h	3 h	1 h	3 h	1 h	3 h
25 m	0.75	0.74	0.78	0.75	0.56	0.73	0.45	0.63
50 m	0.74	0.73	0.80	0.77	0.57	0.64	0.45	0.65
100 m	0.74	0.74	0.81	0.78	0.53	0.70	0.50	0.64

Im weiteren Verlauf des Projekts werden diese Skaleneffekte für zusätzliche Einzugsgebiete mit den Modellen WaSiM und LARSIM untersucht.

Die Evaluation der Modellkomponenten der Modelle LARSIM und WaSiM erfolgt naturgemäß angepasst an die verfügbaren Berechnungsmodule. Generell werden bei beiden die Module Abflussbildung, Abflusskonzentration und Gerinne-Abfluss untersucht. In LARSIM wird der Bodenspeicher und damit die Abflussbildung mit dem Xinanjiang-Modell vorgestellt von Zhao (1977) und Zhao et al. (1980) und modifiziert nach Dümenil & Todini (1992) und DKRZ (1994) abgebildet. Die Abflusskonzentration folgt dann innerhalb der Rasterzellen nach dem modifizierten Clark-Verfahren (Isochronenmodell und Einzellinearspeicher). Im Anschluss werden sämtliche Abflusskomponenten in jeder Rasterzelle ins Gerinne übergeben. Wellenverformungen und Abflussverhalten können dann mit dem Translations-Retentions-Verfahren, dem Verfahren nach Williams (1969) und nach Kalinin-Miljukov berechnet werden. In WaSiM werden sowohl das Verschlammungsmodul (siltng-up) und das Modul der Abflusskonzentration des Oberflächenabflusses (surface-routing) getestet. Das Verschlammungsmodul steuert dabei die Infiltration des Wassers in den Boden durch eine exponentielle Reduktionsgleichung.

Durch dieses Modul soll eine Berechnung der Infiltrationsrate in Abhängigkeit des Bodenzustands ermöglicht werden. Das Modul zur Simulation des Oberflächenabflusses wird für kleinkalige Anwendungen empfohlen. Der Oberflächenabfluss folgt dabei den Fließpfaden, bis ein vorab definiertes Flusspixel erreicht wird. Dadurch erhält WaSiM neben dem Grundwassermodul eine weitere laterale Komponente und eine realistischere Abflusskonzentration.

4.2 Kalibrierungsstrategien

Die Kalibrierung der beiden hydrologischen Modelle zur Anwendung auf Oberflächenabfluss- und Sturzflutereignisse stellt eine der großen Herausforderungen im Projekt dar, da die Modelle bisher lediglich zur Hochwassermodellierung auf deutlich größerer zeitlicher und räumlicher Skala verwendet wurden. Zum einen ist nicht klar, ob und in welcher Güte die Modelle jeweils in der Lage sind, die entscheidenden Prozesse einer Sturzflut abzubilden. Zum anderen lässt die oft spärliche Datenlage unter Umständen keine solide Kalibrierung auf Sturzfluten zu, so dass hier neue Wege gegangen werden müssen. Die Datenlage gestaltet sich insofern schwierig, da viele der zu untersuchenden Einzugsgebiete keinen eigenen Abflusspegel vorweisen und der nächste stromabwärts gelegene oft weit entfernt ist. Auch Niederschlags- und Bodenfeuchtemessungen liegen in der Regel nur unzureichend vor. In einigen Einzugsgebieten ist zudem eventuell gar keine Sturzflut in den Daten registriert worden – entweder da kein Ereignis stattgefunden hat oder da es nicht von den Messinstrumenten erfasst wurde. Die Strategie zur Kalibrierung von Sturzflutereignissen in HiOS baut daher auf zwei Bausteinen auf: Erstens werden mit Hilfe von RADOLAN Daten und Abflusspegeldaten Einzugsgebiete identifiziert, in denen eine Kombination aus Starkregen- und korrespondierendem Sturzflutereignis aufgezeichnet wurden. Hier werden dann Modelle erstellt, die zunächst auf den Wasserhaushalt hin kalibriert werden. In einem zweiten Schritt werden dann ereignisbasierte Parametrisierungen der Modelle kalibriert, um daraus Transformationsregeln für die Parametrisierung abzuleiten, die anschließend regionalisiert auch auf weitere Einzugsgebiete angewandt werden sollen, die aufgrund fehlender Daten lediglich auf Wasserbilanz kalibriert werden können.

4.3 Szenarien

Um eine Risikoabschätzung im gesamtbayerischen Raum zu ermöglichen, sind Rahmenbedingungen zur Simulation der Abflussganglinien bei Bemessungsaufgaben zu definieren. Dabei werden in HiOS die für Oberflächenabfluss und Sturzfluten maßgebenden Elemente berücksichtigt: Niederschlag und Bodenfeuchte. Die Wahl der Szenarien verfolgt drei unterschiedliche Ziele.

Zum einen werden, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, erfasste historische RADAR-YW-Datensätze von Starkregenereignissen betrachtet, um Informationen zu den hydrologischen Prozessen zu gewinnen. Zweitens werden als Grundlage der Risiko-Bewertung alle Dauerstufen der 100-jährlichen Niederschläge des KOSTRA-Atlas 2010R des Deutschen Wetterdienstes, sowie deren 1000-jährliche Extrapolation nach PEN (Verworn & Kummer 2003) herangezogen und räumlich interpoliert. Weiterhin werden zur perspektivischen Entwicklung einer Vorwarnung die gleichverteilten Starkregen-Warnstufen 3 und 4 des DWD für die Dauern von einer

und sechs Stunden betrachtet. Sämtliche genannte, räumlich definierte Summen werden anschließend auf vier zeitliche Verteilungen übertragen: anfangs-, mitten- und endbetonte Intensitätsverläufe, sowie nach DVWK.

Da für die Bodenfeuchte keine flächenverteilten verlässlichen Messwerte vorliegen, werden zwei Ansätze parallel verfolgt. Zum einen wird unabhängig der Landnutzung und der Bodeneigenschaften eine Gleichverteilung für trockene, feuchte und nasse Böden angenommen. Diese wird zusammen mit Experten der Land- und Forstwirtschaft näher spezifiziert. Um auch eine flächenverteilte Betrachtung zu ermöglichen, dienen Simulationen des Projektes ClimEx als Input. Dabei wurde mit WaSiM unter anderem der bayerische Bodenwasserhaushalt flächenverteilt zwischen 1980 und 2014 simuliert. Dieser Datensatz wird in HiOS geostatistisch ausgewertet und die 5%-, 50%- und 95%-Quantile als repräsentativer Zustand für trockene, feuchte und nasse Vorfeuchtebedingungen interpretiert.

In Kombination von Niederschlag und Vorfeuchte ergeben sich damit mehrere hundert Ganglinien je Einzugsgebiet, die als Ensemble ausgewertet werden. Die Ganglinien des höchsten und niedrigsten Scheitels, sowie des größten und kleinsten Abflussvolumens werden als Zufluss-Ganglinien an die hydrodynamische Modellierung übergeben, um die Bandbreite möglicher Überflutungen abzubilden.

5. Umfragen unter bayerischen Kommunen und Wasserwirtschaftsämtern

Die Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzflut soll die bayerische Wasserwirtschaftsverwaltung, sowie die Kommunen und Bürger bei der Umsetzung von lokalen Präventionsmaßnahmen unterstützen und als Grundlage für detailliertere Untersuchungen dienen. Damit die Hinweiskarte den Anforderungen von Experten wie auch Fachfremden gerecht wird, wurden Online-Umfragen unter den zu erwartenden Hauptnutzerguppen – der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung und den bayerischen Kommunen – durchgeführt. Nachfolgende Ausführungen stellen einen Auszug aus dem Projektbericht über die Umfrageergebnisse von Kaiser et al. (2018) dar.

Von 400 zufällig ausgewählten Kommunen haben 100 an der Umfrage teilgenommen (Abbildung 9). Die durchschnittliche Rückmeldequote war in Mittelfranken, Oberbayern und Niederbayern mit über 30 % am höchsten. Mehrheitlich haben Bürgermeister kleiner Gemeinden (< 5.000 Einwohner) teilgenommen. Von den Wasserwirtschaftsämtern (WWA) sind insgesamt 71 Rückmeldungen eingegangen, wobei sich Abteilungs- und Sachgebietsleiter am häufigsten beteiligt haben.

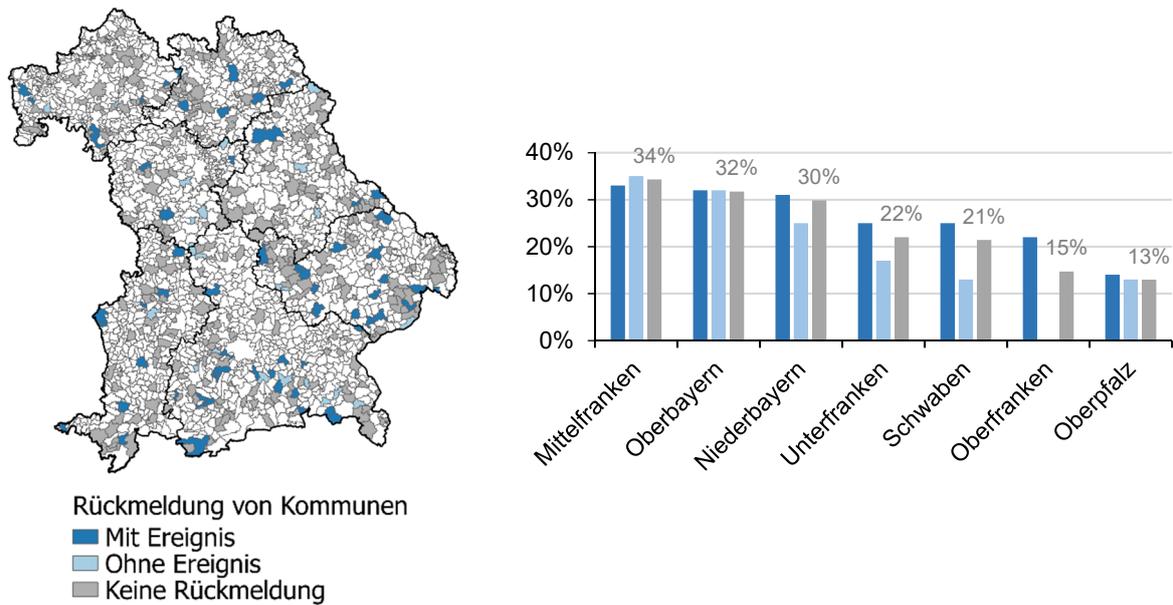


Abb. 9: Teilnehmerquote der Kommunen an der Umfrage aufgeschlüsselt nach Kommunen mit bekanntem Hochwasserereignis aus Starkregen und ohne bekanntem Ereignis (Kaiser et al. 2018)

Die Umfrageergebnisse zeigten, dass das Thema Hochwasser infolge von Starkregen in der Arbeit der WWA eine nicht unerhebliche Bedeutung hat. Viele Befragte gaben die Sommerereignisse von 2016, insbesondere das Ereignis von Simbach am Inn, als ausschlaggebend für eine verstärkte Auseinandersetzung mit der Thematik an. Im Allgemeinen existieren in den Kommunen grundlegende bis gute Kenntnisse über Hochwasser infolge von Starkregen. Dennoch gaben nur 13 Teilnehmer an, dass ihre Kommune Karten zu Sturzfluten bzw. Oberflächenabfluss aus einem Starkregenereignis besitzt. Unter den WWA verfügen nur neun von 17 WWA über solches Kartenmaterial. In der Folge geben über 90 % beider Nutzergruppen einen mittleren bis hohen Bedarf an der Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzflut an (Abbildung 10).

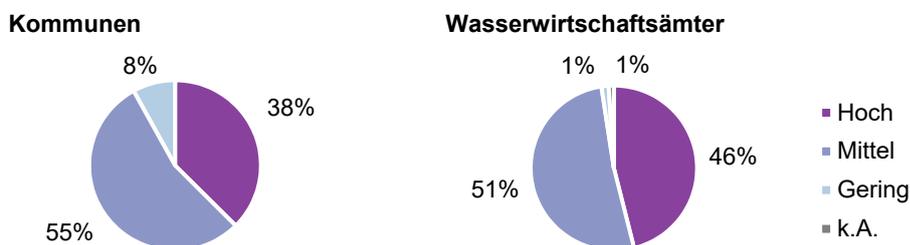


Abb. 10: Einschätzung des Bedarfs der Kommunen bzw. Wasserwirtschaftsämter an der Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzflut (Kaiser et al. 2018)

Beide Nutzergruppen konnten sich vielfältige Verwendungszwecke für die Hinweiskarte vorstellen (Abbildung 11). Die WWA sehen den Einsatz der Hinweiskarte vor allem in der Bauleitplanung (67 %) und der Kommunalberatung (38 %). Während die Kommunen die Hinweiskarte hauptsächlich zur Bestimmung gefährdeter Bereiche, für Veranschaulichungszwecke und zur Ableitung von Handlungsmaßnahmen nutzen möchten.

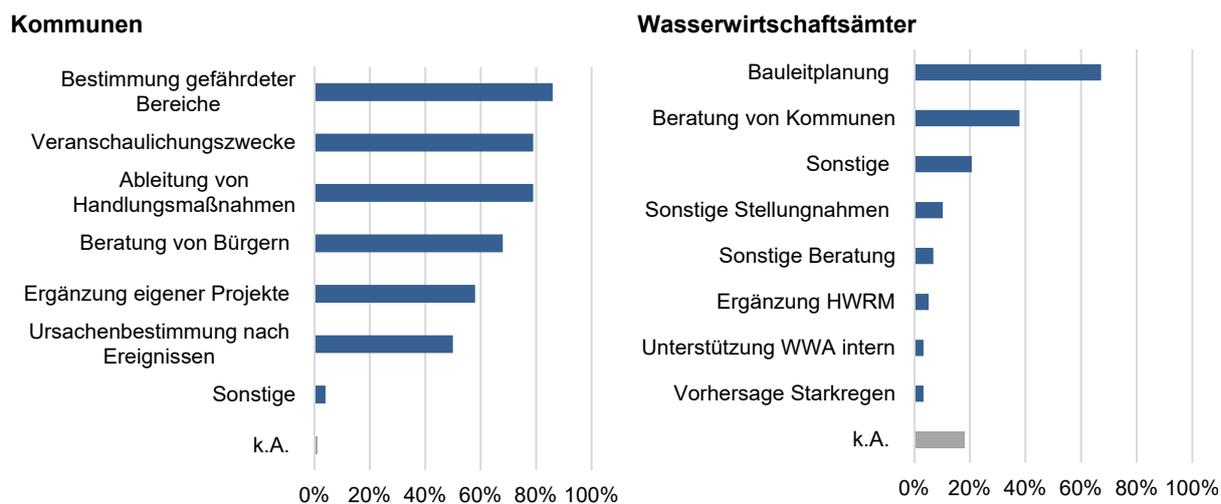


Abb. 11: Mögliche Verwendungszwecke der Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzflut aus Sicht der Kommunen und Wasserwirtschaftsämter (Kaiser et al. 2018)

Beide Gruppen wünschen sich in erster Linie die Darstellung von infrastrukturellen Engstellen und Siedlungsbereichen in der Hinweiskarte. Die Abbildung von Fließwegen wird ebenfalls gewünscht – dies ist jedoch nicht Aufgabe der Hinweiskarte, die in erster Linie eine Gefährdungszonierung der urbanen Gebiete vornimmt. Weniger wichtig sind den Befragten Informationen zu Bodeneigenschaften, Kanalnetzen oder land- und forstwirtschaftlichen Flächen. Verschiedene Kartenhintergründe und Zoomstufen sollte das Leistungsangebot der Hinweiskarte nach Meinung beider Gruppen umfassen. Die Umfrageteilnehmer wünschen sich außerdem ein Erläuterungsblatt, das den Karteninhalt beschreibt und über Anwendung, Zweck und Grenzen der Karte aufklärt. Trotz grundlegender Kenntnisse in den Kommunen sollten darin auch Schlüsselbegriffe wie Starkregen oder Sturzflut erklärt und voneinander abgegrenzt werden.

6. Fazit und Ausblick

Im Projekt HiOS wird ein breiter Ansatz zur Beantwortung von vielfältigen Fragestellungen verfolgt, der neben Ingenieurmethoden auch modellierungstechnische und soziologische Aspekte berücksichtigt. Die Modellierung von Oberflächenabfluss- und Sturzflutereignissen soll zuverlässig und effizient erfolgen. Dies erfordert den Einsatz verifizierter Simulationsmodelle auf einer optimierten Hardwareplattform (High Performance Computing). Hierbei kommen die hydrologischen Modelle WaSiM und LARSIM sowie die hydrodynamischen Modelle FloodA-

rea, Hydro_AS-2D, TELEMAC-2D und P-DWave zum Einsatz. Für die Kalibrierung der Modelle und für geostatistische Auswertungen wurden umfangreiche Datenbestände wie z. B. Niederschlagsdaten oder Ereignisinformationen gesammelt und aufbereitet.

Für den nachhaltigen Zugriff auf die Daten und Projektergebnisse wird von Beginn an ein Forschungsdatenmanagement betrieben, welches die Rechen- und Datenablageinfrastruktur optimiert. Die hydrodynamischen Modelle wurden in ersten, einfachen Benchmark-Tests miteinander verglichen. Alle geprüften Modelle sind prinzipiell zur Simulation von Sturzflutereignissen geeignet. Zur Vorbereitung der hydrologischen Berechnungen wurden Skalenstudien sowie Betrachtungen zur Szenarienauswahl und zur Kalibrierungsstrategie durchgeführt. In einer Umfrage unter den bayerischen Kommunen und Wasserwirtschaftsämtern konnte die Relevanz der Thematik und der Bedarf nach einer Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzflut festgestellt werden. Allerdings wurden auch die unterschiedlichen Ansprüche der zukünftigen Nutzer an die zu entwickelnde Hinweiskarte deutlich.

Als nächster Schritt ist ein detaillierter Vergleich der vier hydrodynamischen Modelle anhand von zwei realen und abgelaufenen Hochwasserereignissen geplant. Einige Teilmodule der hydrologischen Modelle LARSIM (Abflussbildung, Abflusskonzentration und Translation) und WaSiM (Abflussbildung und Abflusskonzentration inkl. Verschlammung und Oberflächenabflussrouting) werden auf ihre Anwendbarkeit in der Sturzflutmodellierung untersucht. Ein allgemeiner Modellvergleich anhand realer Ereignisse soll zudem deren generelle Eignung für die Modellierung von Hochwasserereignissen infolge von Starkregen zeigen. Auf Grundlage von aufbereiteten Ereignisinformationen werden geostatistische Auswertungen durchgeführt, um Erkenntnisse über die Einflussfaktoren auf Entstehung und Ausmaß von Oberflächenabfluss und Sturzfluten zu erlangen. Die Erkenntnisse aus Modellierung und Geostatistik werden anschließend in einem GIS-Tool zusammengeführt, mit dessen Hilfe die Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzflut entwickelt wird.

News zum Projekt sowie wissenschaftliche Publikationen und Projektberichte finden Sie auf der Projekthomepage www.hios-projekt.de.

Literatur

- Ata, R., 2017. Telemac2d User Manual, Version 7.2, Paris.
- DKRZ, 1994. The ECHAM 3 Atmospheric General Circulation Model. Deutsches Klimarechenzentrum, Technischer Bericht Nr. 6, Revision 3, Juli 1994, Hamburg.
- Dümenil, L., Todini, E., 1992. A rainfall-runoff scheme for use in the Hamburg climate model. In: *Advances In Theoretical Hydrology, A tribute to James Dooge*. European Geophysical Society Series on Hydrological Sciences, 1, Elsevier, S. 129-157.
- geomer GmbH (Hrsg.), 2017. FloodAreaHPC-Desktop – ArcGIS Erweiterung zur Berechnung von Überschwemmungsbereichen, Anwenderhandbuch, Version 10.3, Heidelberg.
- Hunter, N. M., Horritt, M. S., Bates, P. D., Wilson, M. D., Werner, M. G. F., 2005. An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. *Advances in Water Resources*, 28 (9), 975-991.

- Kaiser, M., Handelshäuser, E., Disse, M., 2018. Befragung bayerischer Kommunen und Wasserwirtschaftsämter zur Hinweiskarte für Oberflächenabfluss und Sturzflut. Zusammenfassung der Ergebnisse. Projektbericht. München.
- Kirpich, Z.P., 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering* 10, Nr. 6.
- Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M., 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. In: *Journal of Hydrology*, 424-425, S. 264-277.
- Leandro, J., Chen, A. S., Schumann, A., 2014. A 2D parallel diffusive wave model for floodplain inundation with variable time step (P-DWave). *Journal of Hydrology* 517, 250-259.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Volume 10, Issue 3, Pages 282-290, ISSN 0022-1694, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Néelz, S., Pender, G., 2013. Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages, Report – SC120002. Environment Agency, Bristol.
- Nujić, M., Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH (Hrsg.), 2016. HYDRO_AS-2D – 2D-Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis. Benutzerhandbuch, Version 4.2.1, Rosenheim.
- Rosenauer, C., 2017. Skalenabhängigkeit bei der hydrologischen Modellierung von Sturzfluten in Bayern. Masterarbeit. Department für Geographie, LMU München.
- Verworn, H.-R., Kummer, U., 2003. Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN). Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, LAWA-Projekt Abschlussbericht, August 2004, Hannover.
- Williams, J.R., 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the ASAE*, S. 100.
- Zhao, R.J., 1977. Flood forecasting method for humid regions of China. East China Institute of Hydraulic Engineering, Nanjing, China.
- Zhao, R.J., Zhang, Y.-L., Fang, L.-R., Liu, X.-R., Zhang, Q.-S., 1980. The Xinanjiang model. In: *Hydrological Forecasting (Proc. Oxford Symposium, April 1980)*, S. 351-356. IAHS Publ. 129, IAHS Press, Wallingford, UK.

Unterstützung kommunaler Starkregenvorsorge in Hessen

Andreas Hoy, Heike Hübener

Zusammenfassung

Kurzzeitige, heftige Starkregenereignisse schaffen es vor allem in den warmen Monaten immer wieder in die Schlagzeilen – auch wenn zumeist nur wenige Gemeinden oder Ortsteile massiv von ihnen betroffen sind. Diese Ereignisse können große Schäden verursachen und stellen die betroffenen Kommunen vor erhebliche Probleme, sowohl in der Vorbeugung gegen mögliche Schäden als auch in der Nachsorge. Klimaprojektionen für die Zukunft lassen erwarten, dass solche Ereignisse zukünftig sogar noch häufiger auftreten und auch heftiger werden können als heute. Daraus ergibt sich ein Handlungsbedarf für Kommunen, Unternehmen und Haushalte, um sich vor möglichen Schäden zu schützen. Das Projekt „Klimawandel in der Praxis – Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen“ des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie hat zum Ziel, besonders gefährdete Gebiete zu identifizieren und die Kommunen bei der Vorbeugung gegen Schäden durch Starkregen zu unterstützen.

1. Einleitung

Intensive, wenige Minuten bis Stunden andauernde Starkniederschläge fallen zumeist aus mächtigen Gewitterwolken oder –clustern, die vor allem von Mai bis September auftreten. Solche Niederschlagsereignisse können in bebauten Gebieten sogenannte „urbane Sturzfluten“ (DWA 2013) auslösen, da dort das gefallene Wasser aufgrund eines hohen Versiegelungsgrades kaum versickern kann und daher oberflächlich abfließt. Zeitpunkt und Ausmaß solcher Sturzfluten kommen häufig unerwartet, so dass die unmittelbare Reaktions- und Präventionszeit gering ist.

Die Begriffe Starkregen bzw. Starkniederschlag sind nicht einheitlich definiert. Existierende Definitionsansätze unterscheiden sich sowohl bezüglich klassifizierter Andauer und Intensität, als auch der Einbeziehung möglicher Folgeerscheinungen. So warnt der Deutsche Wetterdienst (DWD) z. B. in drei Stufen vor der Überschreitung bestimmter Niederschlagsmengen innerhalb einer Stunde bzw. sechs Stunden und gibt entsprechende Warnungen vor Starkregen heraus (DWD 2018). Gerade im Bereich der Bodenerosion sind jedoch noch deutlich kürzere Zeiträume (z. B. 1, 5 oder 10 Minuten) relevant, wie z. B. Müller und Pfister (2011) und Fiener et al. (2013) betonen. Das Projekt KLIMPRAX-Starkregen verwendet eine eigene Definition zur Erstellung von hessenweiten Starkregen-Hinweiskarten, die in Kapitel 4.1 vorgestellt wird.

Überschwemmungen infolge von Starkregen sind nicht mit Hochwasser gleichzusetzen. Hochwasser an Flüssen entsteht zumeist infolge von Niederschlag mit in der Summe großen Regemengen, der aber über einen längeren Zeitraum hinweg (24-48 Stunden, z. T. mehrere solche Ereignisse innerhalb weniger Wochen) fällt. Vor allem im Winter und Frühling kommen ggf. größere Abflussmengen infolge von Schneeschmelze hinzu. Hochwasser gefährdet die Kommunen „von unten“, d. h. der Pegel eines Flusses steigt an und führt in tiefer gelegenen Gebieten am Fluss zu Überflutungen. Im Unterschied dazu kommt bei von Starkregen ausgelösten urbanen Sturzfluten das Wasser „von oben“, d. h. oberhalb des betroffenen Geländes gefallenes Niederschlagswasser, welches dort nicht versickern konnte, fließt oberflächlich in die unterhalb gelegenen Flächen.

Die Hochwasserbetroffenheit größerer hessischer Fließgewässer ist durch amtlich festgesetzte Überschwemmungsgebiete erfasst. Demzufolge stellt das zuständige Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) Hochwassergefahrenkarten aus den Hochwasserrisikomanagementplänen für Gebiete mit signifikantem Hochwasserrisiko bereit (www.hlnug.de/themen/wasser/hochwasser.html). Dagegen besteht an kleineren Bachläufen oder abseits von Fließgewässern zumeist keine Erfassung der Gefährdung durch Oberflächenabfluss bei Starkregen. Kommunen in Tallagen sind dabei häufig besonders stark betroffen, z. B. auch durch Schlammlawinen und Erdbeben. Insbesondere solche Städte und Gemeinden, die nicht an größeren Gewässern liegen und daher nicht in den Hochwasserrisikomanagementplänen erfasst sind, sind oft nicht auf massiven Oberflächenabfluss und daraus folgende Überschwemmungen eingestellt. Hier setzt das vom HLNUG initiierte und geleitete Projekt „Klimawandel in der Praxis – Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen“ (im Folgenden kurz: „KLIMPRAX – Starkregen“; www.hlnug.de/?id=11199) an, welches in Kapitel 4 genauer vorgestellt wird.

2. Veränderungen im Starkniederschlagsregime in Vergangenheit und Zukunft

Zwei Niederschlagstypen bestimmen das Niederschlagsverhalten in den mittleren Breiten dieser Welt: a) großflächige und z. T. länger andauernde (Stunden bis z. T. wenige Tage), aber vergleichsweise weniger intensive stratiforme Niederschläge, sowie b) kleinskalige und zumeist kürzere (Minuten bis z. T. mehrere Stunden), aber z. T. hochintensive konvektive Niederschläge. Im Rahmen des vorgestellten Projektes interessieren uns vorrangig letztere Prozesse, sowie Veränderungen ihrer Häufigkeit und ihrer Intensität.

Für das europäische Festland weisen Fischer und Knutti (2016) anhand von Klimamodellsimulationen und Beobachtungen nach, dass es sowohl theoretisch begründet ist, als auch im Vergleich der Zeiträume 1981–2013 und 1951–1980 bereits beobachtet wurde, dass Starkniederschläge in ihrer Intensität und Häufigkeit zunehmen. Diese Zunahme ist umso größer, je intensiver und seltener die betrachteten Ereignisse sind. Für Russland und die früheren Sowjetrepubliken haben Ye et al. (2017) Anteile und Charakteristika von konvektiven und stratiformen Niederschlagstypen analysiert. Dabei konnten sie eine generelle Niederschlagszunahme von 7 % pro °C feststellen, die für konvektive Niederschläge allerdings im Mittel bei 18 % pro °C lag. Eine Zunahme der Häufigkeit konvektiver Ereignisse bedingte den Großteil des beobachteten Anstiegs, ein Anstieg der Intensität war für einen kleineren Teil verantwortlich. Der in den vergangenen Jahrzehnten auch in der früheren Sowjetunion beobachtete Temperaturanstieg ging also mit einem Rückgang stratiformer und einem Anstieg konvektiver Niederschlagsereignisse einher. Eine ähnliche Schlussfolgerung ist auch für Europa, basierend auf den Erkenntnissen von Fischer und Knutti (2016), zu vermuten.

Wissenschaftlich weithin akzeptiert ist die These, dass die Niederschlagsintensität – wenn genügend Feuchtigkeit zur Verfügung steht – um ca. 7 % pro °C Erwärmung zunimmt (u. a. Trenberth 1999, Trenberth et al. 2003), bezeichnet als Clausius-Clapeyron-Beziehung (Clapeyron 1834, Clausius 1850). Rezente Veröffentlichungen weisen jedoch darauf hin, dass nach Überschreiten eines bestimmten Temperaturlimits die Intensität extremer Niederschläge wieder zurückgeht. Wang et al. (2017) zeigen anhand von Stationsdaten, Reanalysen und verschiedenen Klimamodellen, dass solch ein Limit in den mittleren und hohen Breiten je nach Quelle

und Region in einem Bereich von ca. 10 bis 25 °C liegt. Allerdings zeigen die Autoren anhand von Klimamodellen, dass sowohl Temperaturlimit als auch Niederschlagsintensitätsmaximum mit zunehmender globaler Erwärmung ansteigen (in den mittleren und hohen Breiten gemäß der Clausius-Clapeyron-Beziehung).

Für Deutschland analysierten Berg et al. (2013) und Berg und Härter (2013) die Beziehung zwischen Temperatur und Niederschlag, getrennt nach stratiformen und konvektiven Niederschlagstypen. Sie fanden heraus, dass stratiforme Niederschlagsmengen entsprechend der Clausius-Clapeyron-Beziehung mit der Temperatur ansteigen. Der Anstieg liegt für konvektiver Niederschläge in einem Temperaturbereich von ca. 10 bis 20 °C allerdings deutlich über diesem Wert. Dieser Effekt wird auch als Super-Clausius-Clapeyron Phänomen bezeichnet, da der Anstieg bis zu 14 % pro °C Erwärmung betragen kann (z. B. Berg et al. 2013). Das zuvor erwähnte Temperaturlimit, über dem die Niederschlagsintensität nicht mehr ansteigt bzw. zurückgeht, liegt in diesen Studien bei ca. 23 °C.

Untersuchungen des Deutschen Wetterdienstes (Becker et al. 2016) zeigen, dass die Intensität von täglichen Niederschlagsereignissen im Winter im Zeitraum 1951–2006 in Deutschland um ca. 25 % zugenommen hat. Für den Sommer lässt sich eine solche Aussage aufgrund der starken Jahr-zu-Jahr Schwankungen nicht treffen. Für die Untersuchung von stündlichen Niederschlagswerten liegen noch keine sehr langen Datenreihen vor. Bisher scheint sich eine Intensivierung der stärksten Ereignisse (99. Perzentil, d. h. der Wert wird einmal in 100 Tagen überschritten) anzudeuten. Hier sind aber noch weitere Studien und längere Zeitreihen erforderlich, um wirklich belastbare Aussagen zu treffen (Becker et al. 2016).

Für Hessen deuten im Rahmen des Projektes KLIMPRAX-Starkregen durchgeführte Untersuchungen anhand hochaufgelöster Daten an, dass vor allem die intensivsten Starkregenereignisse im Vergleich der Perioden 1991–2015 und 1961–1990 zugenommen haben. Starke Änderungssignale treten vor allem bei fünfminütigen und stündlichen Daten auf, während für Tagesdaten kaum Änderungen finden sind. Auch in Nordrhein-Westfalen wurden sehr lange Zeitreihen extrem hochaufgelöster Niederschlagsdaten (ein- und fünfminütige Daten) ausgewertet und ein Anstieg vor allem der intensivsten Ereignisse beobachtet (Müller und Pfister 2011, Fiener et al. 2013). Weitere Analysen der Datengrundlagen müssen die Belastbarkeit der genannten Aussagen, vor allem die Beeinflussung der Trends durch immer genauere Messmethoden im Verlauf der Zeit klären. Die Trends in Richtung intensiverer Niederschläge vor allem sehr kurzer Dauerstufen würden sich jedoch gut in die erwähnten theoretischen und beobachteten Erkenntnisse für Deutschland (Berg et al. 2013) und Europa (Fischer und Knutti 2016) einordnen.

Durch den Klimawandel steigen die Temperaturen global weiter an, so dass die Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen und mehr Niederschlag fallen kann. Eine Studie, die die Ergebnisse von 22 globalen Klimamodellen aus dem CMIP5-Ensemble miteinander vergleicht, bestätigt diese Annahme: die genannte thermodynamische Komponente bewirkt weltweit eine Erhöhung des Starkniederschlagspotentials (Pfahl et al. 2017). Allerdings wird dieses Potenzial durch Effekte atmosphärischer Zirkulation (Wetterlagen) beeinflusst, so dass zwar global in den meisten Gebieten mehr und heftigere Starkniederschläge erwartet werden, in einigen Regionen dieser Effekt jedoch gedämpft oder sogar ins Gegenteil verkehrt werden kann (Pfahl

et al. 2017). Ein Beispiel dafür ist der Mittelmeerraum, der von der Ausdehnung der subtropischen Hochdruckgürtel in Richtung der Pole beeinflusst wird.

Ein großes Ensemble regionaler Klimasimulationen wurde für Deutschland und die Einzugsgebiete der großen, nach Deutschland entwässernden Flüsse im Projekt ReKliEs-De analysiert (<http://reklies.hlnug.de/startseite.html>; Hübener et al. 2017). Dieses Projekt führte die führenden Klimaforschungsinstitute Deutschlands mit dem Ziel robusterer Klimaprojektionen zusammen und wurde vom HLNUG geleitet. Untersuchungen anhand von 37 Simulationen für das Szenario RCP8.5 zeigen, dass die Anzahl von Tagen mit Niederschlägen von 20 mm oder mehr in fast allen Modellen für dieses Szenario zunimmt (Abbildung 1). Auch wenn diese Zunahme insgesamt nur wenige Tage umfasst (linke Grafik), so ist die prozentuale Zunahme doch deutlich (rechte Grafik).

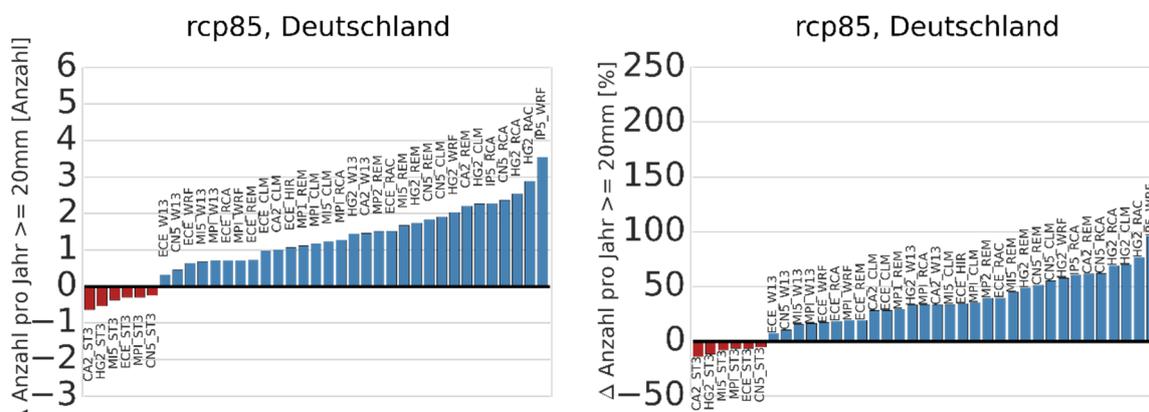


Abb. 1: Mittlere Änderung (links: in Absolutwerten, rechts: prozentual) der Anzahl der Tage mit Niederschlägen über 20 mm, gemittelt über Deutschland für den Zeitraum 2070–2100 minus 1971–2000 pro Saison und Jahr, Szenario RCP8.5. In blau sind Zunahmen, in rot Abnahmen dargestellt.

Zudem wurde die Niederschlagsmenge analysiert, die an den Tagen mit dem höchsten Niederschlag fällt. Abbildung 2 zeigt Karten des ReKliEs-De-Gebietes, mit dem Änderungssignal der Niederschlagsmenge an den 5 % der nassesten Tage. Die linke Karte zeigt das 5. Perzentil des Ensembles (d. h. 5 % der Simulationen liegen darunter), die mittlere Karte zeigt den Median (d. h. die Hälfte aller Simulationen liegt darunter) und die rechte Karte das 95. Perzentil (d. h. 5 % der Simulationen liegen darüber). Das bedeutet, dass für den untersuchten Zeitraum 2071–2100 im Szenario 8.5 nicht nur die Anzahl niederschlagsreicher Tage mit mehr als 20 mm pro Tag zunimmt, sondern an diesen Tagen auch die Niederschlagsmenge zunimmt.

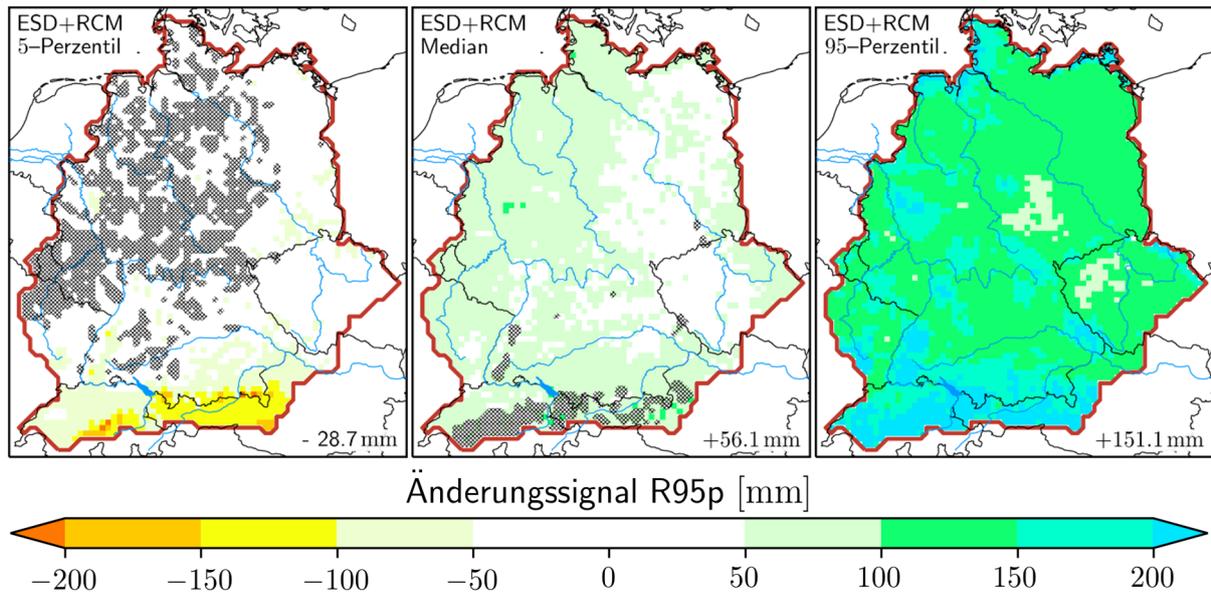


Abb. 2: Karten des ReKliEs-Gebiets für das Jahresmittel des 95. Perzentils der akkumulierten Niederschlagsmenge der Tage mit Niederschlag ($r95ptot$) für das Szenario RCP8.5. Dargestellt sind das 5. Perzentil (links), der Median (Mitte) und das 95. Perzentil (rechts) des Modelensemble, für Änderungen im Zeitraum 2070–2100 minus 1971–2000. Bereiche, in denen die Ergebnisse nicht signifikant sind, sind grau dargestellt.

Pendergrass et al. (2017) weisen in einer weiteren Multimodellstudie nach, dass wärmere Temperaturen global in den meisten Gebieten die Niederschlagsvariabilität erhöhen – bezogen auf Zeitskalen von 24 Stunden bis zu mehreren Jahrzehnten (Pendergrass et al. 2017). Eine für manche Gebiete postulierte gleichzeitige Zunahme von Trockenphasen und Starkniederschlagsereignissen ist vor diesem Hintergrund plausibel. Im Projekt ReKliEs-De wurde für Deutschland ermittelt, dass insbesondere im Szenario 8.5 im Sommer die Länge von Trockenperioden deutlich zunehmen kann (Hübener et al. 2017).

3. Auswirkungen von Starkregenfällen

In Wäldern kann Starkregen überwiegend in den Bäumen und vom Boden aufgenommen werden und führt daher meist nicht zu großen Schäden. Über einem Acker hat das gleiche Ereignis deutlich drastischere Auswirkungen, weil hier leicht Pflanzen, Saatgut oder Boden abgeschwemmt werden können. Im schlimmsten Fall gelangt der abgetragene Boden über versiegelte Fließpfade in anliegende Siedlungen (Abbildung 3). Das Thema Erosion erfährt daher im HLNUG besondere Aufmerksamkeit. Über den Bodenviewer (siehe <http://bodenviewer.hessen.de/mapapps/resources/apps/bodenviewer/index.html?lang=de>) können bereits hochaufgelöste Informationen zu Topographie, Bewuchs, Auswirkungen bestimmter landwirtschaftlicher Nutzung (Fruchtfolge, Mais und Winterweizen) sowie den Faktoren der allgemeinen Bodenabtragsgleichung abgerufen und von den Gemeinden als Informationsquelle genutzt werden.



Abb. 3: Erosion nach Starkregenereignis in Altstadt/Hessen (© Gemeinde Altstadt)

In bebauten Gebieten sind Versiegelung und verstärkter Oberflächenabfluss das Hauptproblem. Die Kanalisation kann typischerweise nur einen Bruchteil des Starkregens aufnehmen, der Rest fließt auf Straßen und anderen Pfaden weiter. Im Idealfall landet das Wasser in einem Fluss, der das Wasser aufnehmen kann ohne über die Ufer zu treten, oder in unversiegelten Mulden, in denen das Wasser schadfrei versickern kann. In weniger idealen Fällen fließt das Wasser in Keller, Unterführungen, Tiefgaragen oder ähnliches. Dadurch können Schäden an Hab und Gut, schlimmstenfalls sogar an Gesundheit und Leben der Bevölkerung eintreten. Starkregenereignisse oder urbane Sturzfluten stellen häufig die zuständigen kommunalen Verwaltungen wie auch die unmittelbar für die Beseitigung der aufgetretenen Schäden zuständigen Feuerwehren vor erhebliche Probleme (Kutschker und Glade, 2016). Neben überfluteten Straßen, Unterführungen, Kellern und Tiefgaragen ergeben sich insbesondere durch Heizöltanks und Stromverteiler besondere Risiken für mögliche Folgeschäden. Besonders gefährdete Infrastrukturen sind zudem Krankenhäuser oder Pflegeeinrichtungen.

4. Das Projekt KLIMPRAX-Starkregen

Das Projekt KLIMPRAX-Starkregen startete im Sommer 2015 und wird voraussichtlich zum Ende des Jahres 2019 abgeschlossen. Es wurde von der Hausleitung des HLNUG initiiert und wird durch das Fachzentrum Klimawandel Hessen betreut. Gleichzeitig bindet es die Expertise der im HLNUG vertretenen Bereiche Boden, Geologie und Wasser in den Projektverlauf ein. Weitere Projektpartner sind der Deutsche Wetterdienst, der Hessische Städtetag, der Hessische Städte- und Gemeindebund, das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz sowie das Hessische Ministerium des Inneren und für Sport. Zentrale Projektziele sind die Untersuchung der Betroffenheit hessischer Kommunen durch Starkregen sowie die Bereitstellung unterstützender Informationen, damit sich diese besser vor solchen Ereignissen schützen können.

Das Projekt gliedert sich in zwei parallel bearbeitete Projektteile, die aus mehreren aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen bestehen und von verschiedenen Institutionen für KLIMPRAX-Starkregen bearbeitet werden. Ziel des ersten Projektteils ist die Erstellung von hessenweiten Starkregen-Hinweiskarten. Diese identifizieren Gebiete, die aufgrund ihrer Topographie, ihrer Niederschlagsstatistik sowie bereits dokumentierter Katastrophenschutzmaßnahmen als besonders starkregengefährdet angesehen werden können. Diese Karten ermöglichen eine erste rudimentäre Einschätzung der Starkregengefährdung einer Kommune oder Region. Im Fall erhöhter Gefährdung sollten dort zusätzliche Schritte für eine genauere Gefährdungsbeurteilung unternommen werden. Ziel des zweiten Projektteils ist daher die Bereitstellung von Arbeitshilfen für Ingenieurhydrologen, die verbesserte lokale wasserwirtschaftliche Berechnungen ermöglichen sollen. Die hessischen Gemeinden sollen somit in die Lage versetzt werden, hochaufgelöste Starkregen-Gefahrenkarten auf Gemeinde- oder Ortsteilebene zu beauftragen. Solche lokalen Gefahrenkarten ermöglichen z. B. eine Optimierung kommunaler Kanalnetze und Flutschutzeinrichtungen.

4.1 Projektteil 1: Starkregen-Hinweiskarten für Hessen

Starkniederschlagsereignisse können prinzipiell überall auftreten. Aus den für die Vergangenheit vorliegenden Daten lassen sich jedoch Gebiete identifizieren, die besonders häufig oder intensiv betroffen waren. Zur Untersuchung der regionalen Betroffenheit wurden daher zunächst unterschiedliche Datensätze ausgewertet, die das Auftreten von Starkregen und daraus resultierende Schäden dokumentieren.

Die flächendeckende Erfassung von Starkniederschlägen ist anhand von Niederschlagsmessgeräten unmöglich, da konvektive Starkniederschlagsereignisse häufig lokal begrenzt sind. So können an einer Stelle extreme Niederschlagsmengen auftreten, während nur wenige Kilometer weiter kaum Niederschlag beobachtet wird. Die maximale Niederschlagsintensität eines Unwetters trifft dabei fast nie genau den Stationsstandort. Zur Identifizierung von Starkniederschlagsschwerpunkten in der Fläche nutzte der Deutsche Wetterdienst im Rahmen von KLIMPRAX-Starkregen daher

- a) die neue Version des KOSTRA-DWD-Atlas, basierend auf seit den 1950er Jahren vorliegenden Niederschlags-Stationsdaten in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten und einer räumlichen Auflösung im Raster von 8x8 km (Malitz und Ertel 2015, Jung-hänel et al. 2017) sowie
- b) radarklimatologische Daten aus dem RADOLAN-Projekt, die seit dem Jahr 2001 vorliegen, eine zeitliche Auflösung von fünf bzw. 60 Minuten sowie eine räumliche Auflösung im Raster von 1x1 km haben (Winterrath et al. 2017).

Zusätzlich wurden von der Universität Hannover Informationen zu beobachteten Starkregeneignissen und daraus resultierende Schäden aus verschiedenen Datenquellen zusammengetragen und in einer Datenbank systematisiert. Deren zeitliche Verteilung zeigt klar, dass die (konvektive) Starkregensaison mit den damit verbundenen Problemen in Hessen von Mai bis September dauert (Abbildung 4).

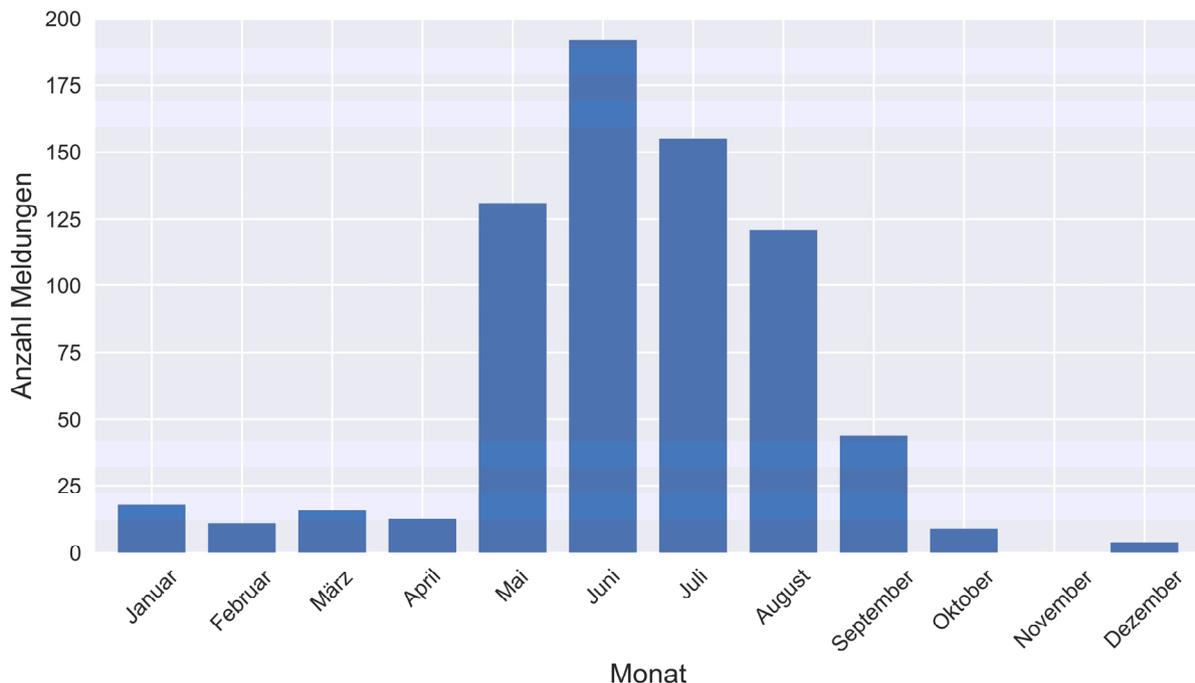


Abb. 4: Anzahl der Starkregenmeldungen in Hessen pro Monat im Zeitraum 2001–2016 (Quelle: Universität Hannover, Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie)

Weitere wichtige in die Gefährdungsbeurteilung einfließende Aspekte sind vor allem Hangneigung und Erosionsgefährdung. Erosion tritt vor allem auf vegetationsfreien Flächen im Zusammenhang mit kurzzeitigen, intensiven Starkregenereignissen auf und führt (selbst an Hängen mit relativ geringer Neigung) zur Bildung von Rillen und im Extremfall tiefen Gräben. Wichtige Faktoren der Erosionsgefährdung sind z. B. Hangneigung und –länge, Bewuchsart und –dichte sowie die Bodenbeschaffenheit. Liegen die beschriebenen Gefahren auf Flächen oberhalb von Siedlungsflächen, so ist das Gebiet als gegenüber Starkregenereignissen besonders gefährdet anzusehen.

Die genannten Eingangsdaten werden nun in einem nächsten Schritt durch die bearbeitenden Institutionen Universität Hannover und Forschungszentrum Jülich zueinander in Bezug gesetzt, sodass sich vier nach Ereignisstärke differenzierte hessenweite „Starkregen-Hinweiskarten“ ergeben. Diese basieren auf:

- a) der Berechnung von Intervallen definierter Dauerstufen auf Basis der 5-minütig aufgelösten RADOLAN YW-Daten (www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html),
- b) der Klassifizierung der Dauerstufen-Intervalle basierend auf der Überschreitung räumlich einheitlicher Schwellenwerte gemäß den hessenweiten Mittelwerten von KOSTRA-DWD-2010R (www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html) sowie
- c) der Ermittlung der Anzahl an Starkregenereignissen pro Klasse für jede Rasterzelle.

Die Abstände zwischen gezählten Intervallen werden in den Untersuchungen berücksichtigt, um eine statistische Unabhängigkeit der Ereignisse zu gewährleisten (der Mindestabstand zwischen zwei gezählten Ereignissen beträgt die Länge der Dauerstufe). Für drei Starkregen-

Hinweiskarten werden folgende niederschlagsbasierte Schwellenwerte für einen Zeitraum von 60 Minuten verwendet:

- 1) Häufiges Ereignis: Niederschläge der Wiederkehrintervalle 2 bis < 10 Jahre (21 mm/h – 33 mm/h); Auswirkung: Erster Kanalüberstau und Oberflächenabfluss z. B. auf Straßen in ländlichen Gebieten und Wohngebieten, noch keine Überflutungen
- 2) Seltenes Ereignis: Niederschläge der Wiederkehrintervalle 10 bis < 30 Jahre (>33 mm/h – 41 mm/h); Auswirkung: Überstau bei allen Kanalnetzen, Überflutungen in ländlichen Gebieten, evtl. auch in Wohngebieten
- 3) Außergewöhnliches Ereignis: Niederschläge der Wiederkehrintervalle > 30 Jahre (> 41 mm/h); Auswirkung: Überstau bei allen Kanalnetzen, Überflutungen in allen Gebieten möglich und wahrscheinlich

Zusätzlich wird eine vierte Starkregen-Hinweiskarte erstellt, die die Erosivität des Niederschlags als Auslöser von Bodenerosion für die maximale 30-minütige Niederschlagsmenge eines Ereignisses betrachtet.

Die vom HLNUG am Projektende bereitgestellten Starkregen-Hinweiskarten werden den Kommunen eine erste Orientierung bezüglich ihrer potentiellen Betroffenheit von Starkregenereignissen und ihren Folgen bieten. Sie erlauben, dass zukünftig hessenweit besonders starkregengefährdete Gemeinden oder Ortsteile identifiziert werden können. Diese können damit ihre eigene Gefährdungssituation besser einschätzen und ggf. weitere Untersuchungen durchführen sowie Maßnahmen zum Schutz gegen Starkregenfolgen einleiten. Auch im Rahmen von großräumigen Planungen (z. B. Flächennutzungsplänen) kann die „Starkregen-Hinweiskarte“ von großem praktischen Nutzen sein.

4.2 Projektteil 2: Arbeitshilfen für Ingenieurhydrologen und lokale „Starkregen-Gefahrenkarten“

Verbesserte lokale wasserwirtschaftliche Berechnungen sollen die Grundlagen für potentiell sehr hochaufgelöste „Starkregen-Gefahrenkarten“ auf kommunaler Ebene in Hessen bilden. Dafür werden den Ingenieurhydrologen, die für solche Berechnungen zuständig sind, im zweiten Projektteil von der Arbeitsgruppe „Starkregen und Sturzfluten“ am Wasserbaulaboratorium der Hochschule Rhein-Main in Wiesbaden zweierlei Arten von Arbeitshilfen bereitgestellt:

- a) Leicht anwendbare Einleseroutinen für Radardaten und Musterdatensätze vergangener Starkregenereignisse senken den Einarbeitungs- und Arbeitsaufwand bei der Verwendung von Radardaten. Diese sollen eine Verbesserung der Datengrundlagen hydrologischer Modelle und daher eine realistischere hydraulische Berechnung der Auswirkungen von Starkregenereignissen in Kommunen ermöglichen. Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes sind hier verfügbar: www.hlnug.de/?id=13182.
- b) Es werden Verfahren für kleine Einzugsgebiete entwickelt, die in hoher Auflösung realistischere Modellierungsergebnisse für einen flächenhaften Abfluss nach intensiven Niederschlagsereignissen abseits von Fließgewässern ermöglichen sollen. Diese Gebiete sind häufig durch eine hohe topographische Vielfalt geprägt. Herkömmliche Niederschlags-Abfluss-Modelle sind für solche räumlichen Verhältnisse in Kombination mit

Starkregenereignissen und den damit einhergehenden Fließverhältnissen nicht ausgelegt.

Auf beiden Arbeitshilfen basierende Starkregen-Gefahrenkarten sollen Abflusswege, Abflusstiefen und Wasserstände in von Starkregenabfluss betroffenen Bereichen gefährdeter Kommunen visualisieren können. Zur Verfügung stehende hochauflösende Laserscandaten lassen eine entsprechend detaillierte Geländeabbildung der urbanen Räume und deren Einzugsgebiete zu. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Ortsteile in Mittel- und Nordhessen als Pilotgebiete ausgewählt, für die potentiell gefährliche Hangflächen hydrologisch analysiert werden sollen, um Auswirkungen von Starkregenereignissen auf unterhalb gelegene potentiell gefährdete Flächen bestimmen zu können (Abbildung 5).

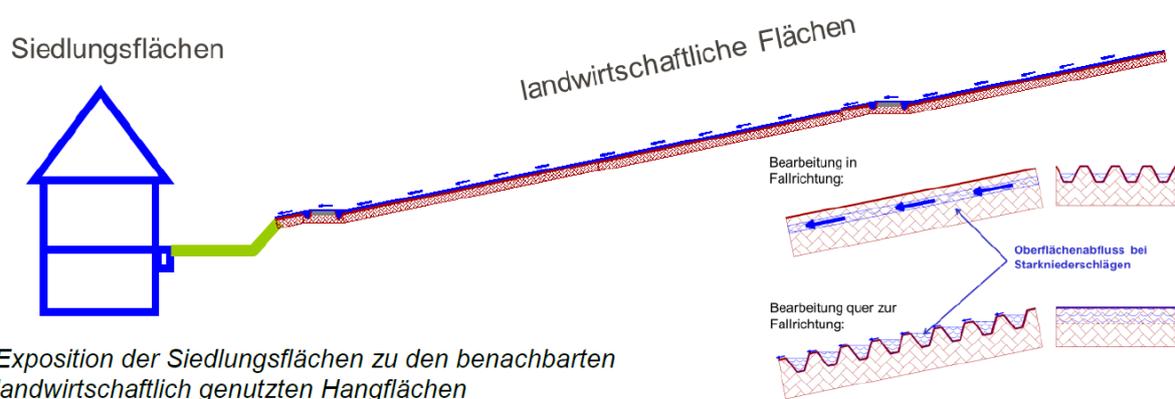


Abb. 5: Untersuchung des Starkregenabflusses aus landwirtschaftlichen Flächen in Siedlungsflächen (Quelle: Hochschule Rhein Main, AG Starkregen und Sturzfluten)

Kriterien für die Auswahl der Pilotgebiete waren:

- eine ländliche Prägung und Lage in den hessischen Mittelgebirgen
- ein kleines oberirdisches Einzugsgebiet < 50 km²
- ein kleines Gewässer mit einem Pegel unterhalb der Gemeinde ist vorhanden
- in der Vergangenheit aufgetretene Starkregenereignisse mit dazugehöriger Pegelaufzeichnung
- eine Sensibilisierung der Akteure in der Gemeinde für das Thema Starkregen/Hochwasser sowie
- eine Exposition der Siedlungsfläche zu den landwirtschaftlichen Flächen in der Gemeinde.

Starkregen-Gefahrenkarten sind für die wasserwirtschaftliche Planung von großem Interesse. Stadtplaner, Straßenplaner, Grünflächenplaner, Gebäudeplaner und Grundstückseigentümer bekommen so konkrete Hinweise auf Gefahrenpunkte durch Sturzfluten. Gerade im Rahmen von Bebauungsplänen oder Neubauprojekten können solche Abflusskarten zur Beurteilung der Abflusseigenschaften bei Starkregen herangezogen werden. Auch für den Katastrophenschutz sind diese Informationen sehr nützlich. Mit Hilfe solcher Detailkenntnisse können in den

Kommunen vorhandene Leitfäden zur Überflutungsvorsorge (siehe folgendes Kapitel) angewendet werden. Oft kann schon mit kleinen strategischen, baulichen oder pflegerischen Maßnahmen die vorhandene Gefährdung wesentlich entschärft werden.

4.3 Befragung hessischer Kommunen und Öffentlichkeitsarbeit

Die Vermittlung der Projektergebnisse an die Öffentlichkeit und ihre praktische Anwendbarkeit ist eines der Kernanliegen des Projektes. In einem ersten Schritt wurden im Auftrag des HLNUG im Sommer 2016 alle 426 hessischen Kommunen durch das Ingenieurbüro Infrastruktur & Umwelt Darmstadt anhand eines Online-Fragebogens zum Thema Starkregen und Katastrophenschutz befragt. Der Hessische Städtetag und der Hessische Städte- und Gemeindebund waren als Partner in die Vorbereitung und Durchführung eingebunden, wodurch eine verbesserte Mobilisierung erreicht werden konnte. Antworten gingen von 241 Kommunen ein, was einer sehr hohen Rückmeldequote von 57 % entspricht.

Die Befragung hatte mehrere Ziele. Zunächst sollte die Betroffenheit der Kommunen ermittelt werden, d. h. welche Kommunen hatten bereits Schäden durch Starkregen zu verzeichnen. Darüber hinaus wurde erfragt, ob die Kommune bereits Maßnahmen zum Schutz gegen Schäden durch Starkregen geplant oder ergriffen hat, um Vorbilder für andere Kommunen zu identifizieren. Ergänzend sollten die Kommunen angeben, welchen Unterstützungsbedarf sie durch das Land Hessen benötigen. Und schließlich sollte allein die Teilnahme an der Befragung die Kommunen für das Thema sensibilisieren sowie Handlungsfelder und Handlungsmöglichkeiten aufzeigen. Abschließend konnten sich die Befragungsteilnehmer eine Selbsteinschätzung als Auswertung ihres ausgefüllten Fragebogens ausdrucken und so die anstehenden Schritte zu mehr Schutz vor Schäden durch Starkregen planen.

Als Ergebnis der Befragung wurde ermittelt, dass sich die Kommunen folgende Unterstützung durch das Land Hessen wünschen:

- 1) Bereitstellung von Gefahren- und Risikokarten
- 2) Informationen zu Starkregenerenissen, ihren Folgen und Schutzmaßnahmen für Bevölkerung und Verwaltung sowie
- 3) Fördermittel für Baumaßnahmen (Regenrückhaltebecken, Flutmulden etc.), Risikoanalysen und Öffentlichkeitsarbeit

Alle drei genannten Punkte werden durch das Projekt abgedeckt. Maßnahmen in Verbindung mit Wunsch 1 wurden in den Kapiteln 4.1 und 4.2 ausführlich dargestellt. Die in Wunsch 2 angesprochenen Informationen werden durch eine aktive Öffentlichkeitsarbeit seitens des HLNUG vermittelt, die das Projekt während seiner Laufzeit begleitet. Diese umfasst eine aktuelle Berichterstattung über Projektfortschritt und –ergebnisse auf der Internetseite des Projektes, Veranstaltungen zur Information von Verantwortungsträgern und interessierten Bevölkerungsteilen sowie eine Arbeitshilfe, die eine umfassende Sammlung von existierenden Literaturquellen und auch eine Information zu Fördermöglichkeiten (Wunsch 3) umfasst.

Auf zwei vom HLNUG organisierten und mit zusammen über 200 Teilnehmern sehr gut besuchten Veranstaltungen im März 2017 in Kassel und Frankfurt am Main wurden erste Projektergebnisse der Öffentlichkeit vorgestellt. Die meisten Gäste waren Vertreter hessischer

Kommunen. Weiterhin nahmen Mitarbeiter von Stadtwerken, kommunalen Entsorgungsbetrieben, Feuerwehr und Polizei sowie Vertreter aus Kreisen, Regierungspräsidien, Ministerien und Landesämtern teil. Dabei kamen die Städte- und Gemeindevertreter auch selbst zu Wort: vier spannende Kurzvorträge und ein Diskussionsforum zeigten lokal erlebte Probleme mit Starkniederschlägen und mögliche Lösungsansätze dafür auf.

In einer vom HLNUG herausgegebenen und an die hessischen Kommunen gerichteten Arbeitshilfe werden existierende Leitfäden und Konzepte zur Starkregen-Vorsorge vorgestellt, die von Bundesländern, regionalen und lokalen Zusammenschlüssen und Verbänden in den vergangenen Jahren erstellt wurden (HLNUG 2018). Diese Veröffentlichung wird um gute Beispiele aus der Praxis und Fördermöglichkeiten für hessische Kommunen (z. B. Anpassungsmaßnahmen) ergänzt. Der Mehrwert einer Anpassung besteht für die Kommunen in der Möglichkeit der proaktiven Vorbeugung gegen potentielle Schäden. Dadurch können sie ihre Standorteigenschaften verbessern.

5. Fazit

Starkregenereignisse von kurzer Andauer aber hoher Intensität führen in Hessen vor allem zwischen Mai und Mitte September punktuell immer wieder zu Schäden an Infrastruktur und Eigentum. Ein verbesserter Katastrophenschutz und optimiertes Management von Starkregenerisiken hilft dabei, Gefahren und Kosten möglichst gering zu halten. Im Zuge höherer Temperaturen ist mit einer Verstärkung intensiverer Niederschlagsereignisse auch in Hessen zu rechnen. Im seit 2015 am HLNUG laufenden Projekt KLIMPRAX-Starkregen sollen daher besonders gefährdete Gebiete ermittelt werden und den Kommunen Hilfestellungen an die Hand gegeben werden, wie sie sich vor Schäden durch Starkregen schützen können.

Dazu werden hessenweite Starkregen-Hinweiskarten erstellt um Gebiete zu identifizieren, die aufgrund ihrer Topographie, ihrer Niederschlagsstatistik sowie bereits dokumentierter Katastrophenschutzsätze als besonders starkregengefährdet angesehen werden können. Mit diesen vom HLNUG herausgegebenen Karten wird damit zukünftig eine erste rudimentäre Einschätzung des regionalen Starkregenerisikos vorgenommen werden können. Im Fall erhöhter Gefährdung sollten in den identifizierten Gebieten zusätzliche lokale Analysen für eine genauere Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden. Diese lokalen wasserwirtschaftlichen Untersuchungen sind für die Kommunen zukünftig zu geringeren Kosten bei gleichzeitig höherer Qualität erhältlich – aufgrund der im Projekt verbesserten Arbeitshilfen für Ingenieurhydrologen. Damit werden die Grundlagen für die Erstellung hochaufgelöster Starkregen-Gefahrenkarten auf Gemeinde- oder Ortsteilebene gelegt, die letztendlich eine Optimierung kommunaler Kanalnetze und Flutschutzeinrichtungen ermöglichen.

Der aktuelle Fortschritt des Projektes KLIMPRAX-Starkregen, bereits vorliegende Projektergebnisse sowie im Zuge des Projektes erstellte Berichte und Veröffentlichungen sind auf der Projektseite www.hlnug.de/?id=11199 erhältlich.

Literatur

- Becker P., Becker, A., Dalelane, C., Deutschländer, T., Junghänel, T., Walter, A., 2016. Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland – Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160719_entwicklung_starkniederschlag_deutschland.pdf?__blob=publication-File&v=3 (Zugriff 30.04.2018)
- Berg, P., Härter, J.O., 2013. Unexpected increase in precipitation intensity with temperature — A result of mixing of precipitation types? *Atmos. Res.* 119: 56-61. doi: 10.1016/j.atmosres.2011.05.012
- Berg, P., Moseley, C., Härter, J.O., 2013. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nat. Geosci.* 6: 181-185. doi: 10.1038/ngeo1731
- Clapeyron, E., 1834. Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur. *J. l'Ecole Polytechnique XXIIIe Cahier, Tome XIV* 153-191. ISBN: 978-2-87647-283-9
- Clausius, R., 1850. Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. *Ann. Phys. (Berlin)* 155: 368-397. doi: 10.1002/andp.18501550306
- DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfälle e.V.), 2013. Starkregen und urbane Sturzfluten. Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge. In: DWA-Themen HW 4.2 – T1/2013. ISBN: 978-3-944328-14-0
- DWD (Deutscher Wetterdienst), 2018. https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html?nn=605882 (Zugriff 30.04.2018)
- Fiener, P., Neuhaus, P., Botschek, J., 2013. Long-term trends in rainfall erosivity—analysis of high resolution precipitation time series (1937–2007) from Western Germany. *Agric. For. Meteorol.* 171-172: 115-123. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.11.011
- Fischer, E.M., Knutti, R., 2016. Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nat. Clim. Change* 6: 686-991. doi: 10.1038/nclimate3110
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie), 2018. Klimawandel in Hessen – Schwerpunktthema Starkregen und kommunale Vorsorge. Im Druck
- Huebener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., Menz, C., Mohr, V., Radtke, K., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., Toussaint, F., Warrach-Sagi, K., Woldt, M., 2017: ReKliEs-De Ergebnisbericht. <http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmp/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf>
- Junghänel, T., Ertel, H., Deutschländer, T., 2017. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main. 30 S.
- Kutschker, T., Glade, T., 2016. Unwetter! Analyse von Einsatz- und Wetterdaten für die lokale Notfallplanung. *Notfallvorsorge* 2/2016: 1-8
- Malitz, G., Ertel, H., 2015. KOSTRA-DWD-2010 – Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010). Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main. 40 S.
- Müller, E.N., Pfister, A., 2011. Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *J Hydrol* 411 (3-4): 266-278. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.10.005

- Pendergrass, A.G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., Sanderson, B.M., 2017. Precipitation variability increases in a warmer climate. *Sci. Rep.* 7: doi:10.1038/s41598-017-17966-y
- Pfahl, S., O’Gorman, P.A., Fischer, E.M., 2017. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nat. Clim. Change* 7: 423-427. doi: 10.1038/nclimate3287
- Trenberth, K.E., 1999. Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change. *Clim. Change* 42 (1): 327-339. doi: 10.1023/A:1005488920935
- Trenberth, K.E., Dai, A., Rasmussen, R.M., Parsons, D.B., 2003. The changing character of precipitation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 84: 1205-1217. doi: 10.1175/BAMS-84-9-1205
- Wang, G., Wang, D., Trenberth, K.E., Erfanian, A., Yu, M., Bosilovich, M.G., Parr, D.T., 2017. The peak structure and future changes of the relationships between extreme precipitation and temperature. *Nat. Clim. Change* 7: 268-274. doi:10.1038/nclimate3239
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A., 2017. Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. *Ber. Dt. Wetterdienst* 251, Offenbach am Main, 71 S. ISBN: 978-3-88148-499-2
- Ye, H., Fetzer, E.J., Wong, S., Lambrigtsen, B.H., 2017. Rapid decadal convective precipitation increase over Eurasia during the last three decades of the 20th century. *Sci. Adv.* 3 (1): e1600944. doi: 10.1126/sciadv.1600944

Echtzeitvorhersage von Überflutung, Schadstofftransport und Schäden für Sturzflutereignisse am Beispiel Oberricklingen in Hannover

Lothar Fuchs, Simon Berkhahn, Yu Feng, Thomas Graf, Uwe Haberlandt, Heidi Kreibich, Insa Neuweiler, Aaron Peche, Viktor Rözer, Robert Sämman Monika Sester, Bora Shehu, Julian Wahl

Zusammenfassung

Im Rahmen des BMBF-Projekts EVUS (Echtzeitvorhersage urbaner Sturzfluten und damit verbundene Wasserkontamination) wurde ein Vorhersagemodell für urbane Sturzfluten und ihre Folgen entwickelt. Es besteht aus den Komponenten: kurzfristige Niederschlagsprognose, ein detailliertes 1D-Kanal- und 2D-Oberflächenmodell basierend auf einem digitalen Geländemodell, das mit einem Mobile Mapping Lidar verfeinert wurde; ein auf künstlichen neuronalen Netzen basierendes Überflutungsmodell zur schnellen Vorhersage von überfluteten Gebieten; ein 3D-Grundwassermodell für gesättigte und variabel gesättigte Grundwasserströmung gekoppelt mit dem 1D / 2D-Modell; ein auf Partikeln basierendes Transportmodell zur schnellen Vorhersage von Transportwegen und -zeiten von Kontaminationen auf der Oberfläche; und ein Überflutungsschadensmodell.

1. Einleitung

Extreme Niederschläge haben das Versagen des Entwässerungssystems zur Folge und führen zu einer Überflutung auf der Oberfläche (urbane Sturzfluten). Weitere Schadensereignisse während einer urbanen Sturzflut können durch die ungewollte Freisetzung von schädlichen Substanzen entstehen, die sowohl die Qualität von Oberflächengewässern als auch des Grundwassers beeinträchtigen können. Im Rahmen des von BMBF geförderten Projekts "Echtzeitvorhersage urbaner Sturzfluten und damit verbundene Wasserkontamination" wurde ein Vorhersagemodell für extreme Niederschläge, Abflüsse und Transport im Kanalnetz, auf der Oberfläche und im Untergrund des Stadtgebiets und eine schnelle Schadensvorhersage entwickelt.

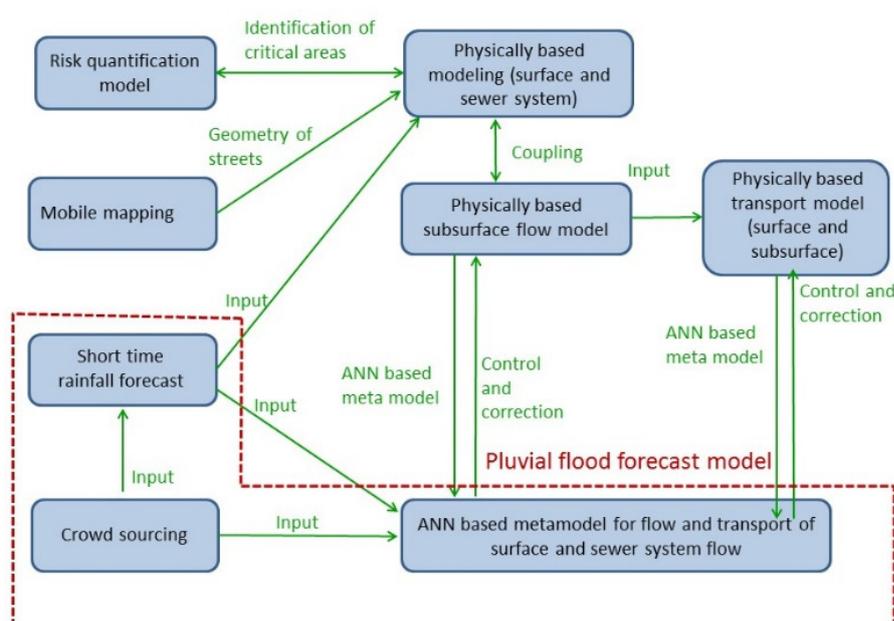


Abb. 1: Struktur des Vorhersagemodells

Zusätzliche Informationen über extreme Niederschläge und/oder Überflutungen werden mit Hilfe von Apps und durch die Auswertung von tweets gesammelt. Die Struktur des Vorhersagemodells ist aus der Abbildung 1 ersichtlich.

2. Erläuterung der Modellkomponenten

2.1 Niederschlagsvorhersage

Wegen ihrer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung, werden Radardaten als Input für Echtzeitvorhersagen verwendet (Achleitner et al. 2009, Li et al. 1995). Die räumliche Auflösung der Radardaten ermöglichen die Identifizierung von Ereignistypen, deren Verfolgung und zeitliche Extrapolation. Für konvektive, sich schnell entwickelnde Niederschlagsereignisse beträgt die Vorhersagezeit normalerweise Minuten bis maximal 2 Stunden. Im Rahmen des Projekts wurde, die Niederschlagsquantifizierung für urbane Sturzfluten verbessert, indem ein besseres Niederschlagsfeld durch die Merging verschiedener Arten von Niederschlagsquellen geschätzt wird, ein neues Niederschlagsvorhersagemodell für die Stadt Hannover mit verbesserter Vorlaufzeit entwickelt wurde und die Unsicherheit durch Erzeugung von Ensemblemitgliedern quantifiziert wurde.

Schwerpunkt war die Erzielung höherer Vorlaufzeiten für das Nowcasting von Niederschlägen durch die Verwendung von Mergingdaten als Input für den Tracking-Algorithmus. Zu diesem Zweck wurde die von Berndt et al. (2014) vorgeschlagene und später bei Fuchs et al. (2017) für die 5 min Auflösung getestete Methode verwendet. Der von Kraemer (2008) entwickelte Hyratrac-Algorithmus, der Niederschlagsereignisse identifiziert, verfolgt und linear extrapoliert, wird zur Vorhersage von Radarintensitäten bei unterschiedlichen Vorlaufzeiten von Minuten bis 2 Stunden eingesetzt. Die Ergebnisse von 86 ausgewählten Ereignissen innerhalb des Radarbereichs der Station Hannover für den Zeitraum 2006-2012 sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Vorlaufzeiten von weniger als 2 Stunden die Vorhersage der Mergingdaten deutlich besser ist als die von den Radarrohdaten. Allerdings ist die Vorhersage nur für maximale Vorlaufzeiten von 30 Minuten bis zu 2 Stunden besser. Bei einer Vorlaufzeit ab 2 Stunden, gibt es keinen klaren Unterschied zwischen Radar und Merging basierter Vorhersage. Dies deutet darauf hin, dass bei solch hohen Vorlaufzeiten der Vorhersagefehler unabhängig von der Eingabedatenqualität ist und stattdessen fast ausschließlich vom Extrapolationsfehler abhängt. Daher wird nunmehr eine Betrachtung von nichtlinearen Extrapolationen durchgeführt, d. h. es werden aus historischen Beobachtungen ähnliche Muster gesucht. Verwendet wird dafür ein KNN-Algorithmus, der in den Hyratrac-Algorithmus integriert und trainiert wird, um die Vorlaufzeiten zu erhöhen und Ensembleprognosen zu erstellen.

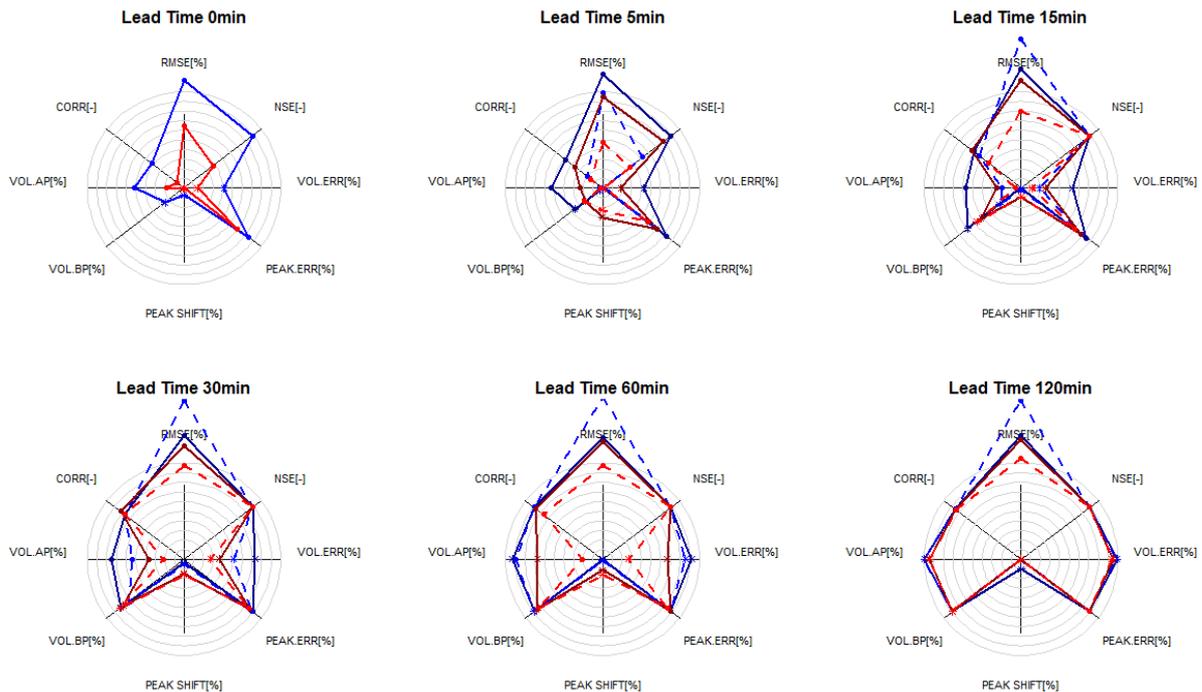


Abb. 2: Vergleich von Vorhersagegütekriterien. Radarrohdaten (blau) und Mergingdaten (rot) im Vergleich mit beobachteten Niederschlägen von Bodenstationen (dicke Linien) und mit beobachteten Radardaten (Strichlinie) gemittelt für die 86 ausgewählten Ereignisse und für verschiedene Vorlaufzeiten: 5, 15, 30, 60 und 120 min. Alle Gütewerte sind normalisiert und das Optimum (1 für Korrelation, NSE und Peak Timeshift, 100 % für alle anderen) steht im Mittelpunkt der Abbildung. Je näher am Zentrum, desto besser die Güte. Jeder graue Kreis zeigt einen Fehlerrückgang um 10 % oder 0,1 an.

2.2 Oberflächenabflussmodell

Ein gekoppeltes 1D/2d Kanalnetz und Oberflächenabflussmodell (HYSTEM-EXTRAN 2D, itwh 2017) wurde für die gesamte Stadt Hannover basierend auf einem 50 cm Digitalen Geländemodell (DGM) aufgestellt. Die Oberfläche wird mit einem unstrukturierten Berechnungsgittern bestehend aus Dreieckselementen diskretisiert. Für das Testgebiet in Hannover Ricklingen wurden die Straßen und angrenzende Bereiche bis zu ca. 200 m mit einem Mobile Mapping System (MMS) mit einer Auflösung von 10 cm erfasst. Das Ergebnis dieser Erfassung wurde mit Bodenfilterungsalgorithmen überarbeitet und in Abbildung 3a dargestellt. In Abbildung 3c ist der Bereich einer Straße mit einer Auflösung von 10 cm dargestellt. Dieses DGM wurde mit einem verfügbaren DGM mit 50 cm Auflösung zusammengeführt (Abbildung 3b), um die Bereiche abzudecken, die nicht vom MMS erfasst wurden. Dabei wurde eine Interpolation angewendet, um unerwartete Höhengsprünge an Verbindungsgrenzen von zwei DTMs zu glätten. Auf diese Weise wurde die Auflösung eines DGM mit 50 cm Auflösung im Straßenbereich auf 10 cm verbessert und die Vollständigkeit der Daten erreicht (Abbildung 3d).

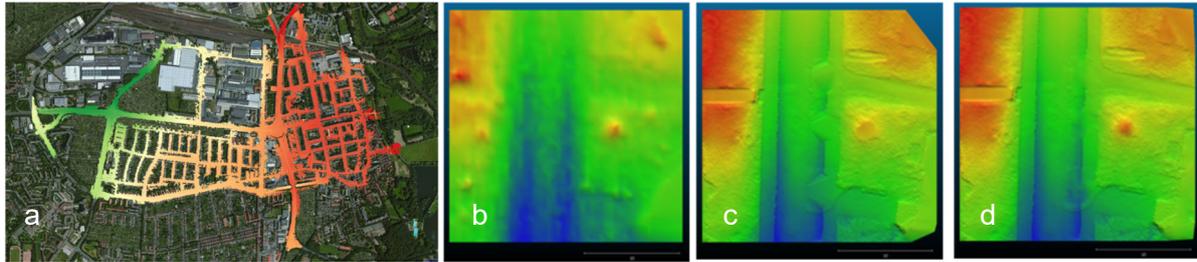


Abb. 3: Digitales Geländemodell (DGM) erzeugt aus dem Mobile Mapping System (a). verfügbares DGM mit einer Auflösung von 50 cm (b), DGM des Mobile Mapping System in 10cm Auflösung (c) und zusammengeführtes DGM (d).

Das Überflutungsmodell wird anhand von radarbasierten Niederschlagsmessungen, Feuerwehrschadensmeldungen und Informationen aus den sozialen Medien validiert. Parameterbedingte Modellunsicherheiten wurden über Sensitivitätsstudien analysiert (Tecklenburg et al. 2017)

Das beschriebene numerische Überflutungsmodell mit Kopplung an das Untergrundströmungsmodell wird verwendet um die Trainingsdaten für das künstliche neuronale Netz zur Echtzeitvorhersage von maximalen Wasserständen auf der Oberfläche zu generieren. Dafür wurden ca. 1500 Starkregenszenarien berechnet. Weiterhin bilden die im Kanalnetz und an der Oberfläche berechneten, zeitabhängigen Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten der Szenarien die Grundlage für das Schadstofftransportmodell.

2.3 Wasserstandsvorhersage

Aufbauend auf der Vorhersage der Niederschläge ist eine Echtzeitvorhersage Wasserständen innerhalb von wenigen Sekunden notwendig. Detaillierte physikalisch basierte Modelle können diese Anforderung nicht erfüllen. In Henonin et al. (2013) zeigt, dass die Auswahl vorsimulierter Szenarien die einzige Möglichkeit darstellt, Echtzeitvorhersagen mit detaillierten hydrodynamischen Modellen zu realisieren. Bermúdez et al. (2018) berechnet Szenarien werden mit einem detailliertem 1D-2D hydrodynamischen Modell, jedoch ist bei der Auswahl von vorsimulierten Szenarien keine Interpolation zwischen den Szenarien möglich. Unter Berücksichtigung der Variabilität von Regenereignissen und der Unsicherheit in der Regenvorhersage, ist die Möglichkeit der Interpolation bei der Umsetzung von Echtzeitvorhersagen unabdingbar. Das hier entwickelte Modell zur Vorhersage von maximalen Wasserständen besitzt die Fähigkeit der Interpolation. Mit Hilfe von vorsimulierten Szenarien (siehe 2.2) werden künstliche neuronale Netze trainiert. Die Eingabe in das Netz umfasst dabei die Regenvorhersage in fünf Minuten Zeitschritten und die Ausgabe der maximalen Wasserstände mit einer zweidimensionalen räumlichen Verteilung. Durch die Verwendung eines Ensembles von neuronalen Netzen wird die Interpolationsfähigkeit des Modells deutlich verbessert. Der konzeptionelle Aufbau des Modells ist in Abbildung 4 dargestellt.

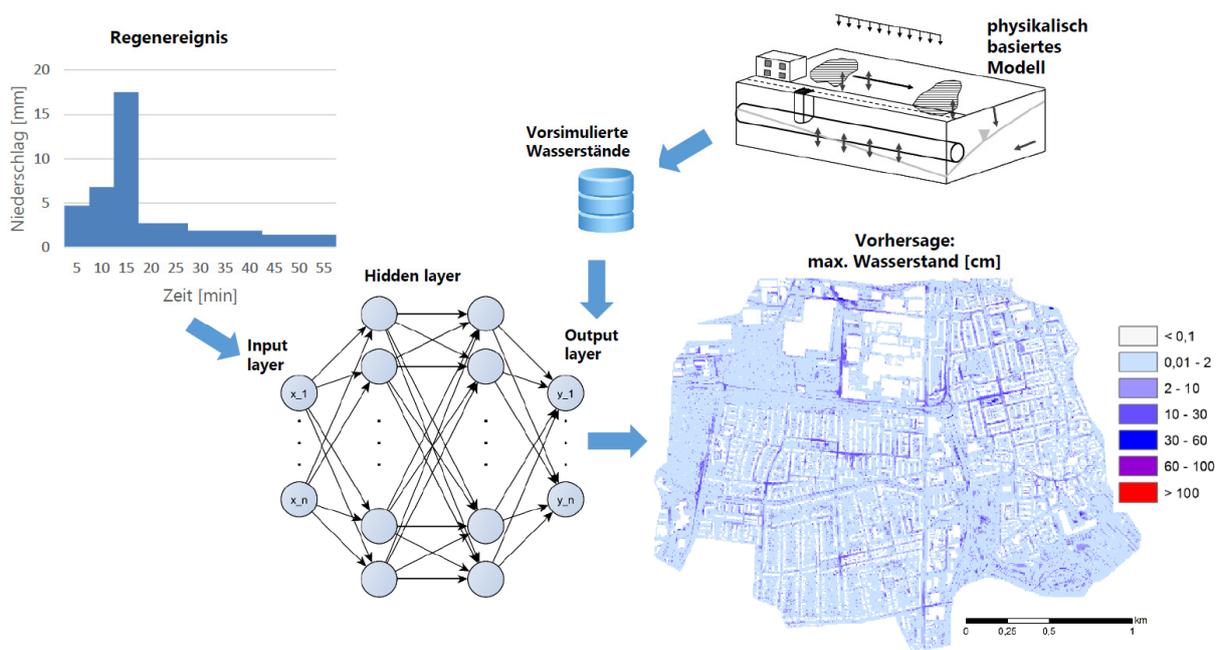


Abb. 4: Konzeptionelles Modell zur Vorhersage urbaner Sturzfluten

Das Vorhersagemodell ist ausführlich in Berkahn et al. (2018) erläutert. Die Rechenzeit des Modells liegt bei 2-3 Sekunden pro Regenereignis. Mit einem durchschnittlichen RMSE für ausgewählte Testereignisse von weniger als einem Zentimeter kann das Modell die Ergebnisse HE 2D sehr gut nachbilden.

2.4 Gekoppeltes Kanalnetz-Grundwassermodell

Um den Austritt von Abwasser in das Grundwasser bzw. den Eintritt von Grundwasser in das Kanalnetz abzubilden, wurde ein gekoppeltes Kanalnetz-Grundwassermodell erstellt. Dafür wurde der Grundwasserströmungssimulator OpenGeoSys [OGS] (Kolditz et al. 2012) mit dem hydrodynamischen Modell HYSTEM-EXTRAN [HE] (itwh 2014) zum Leckagemodell OGS-HE gekoppelt. Die bidirektionale, nicht-iterative Kopplung basiert auf der Aktualisierung von Quelltermen. Das Datentransfer-Schema wurde mit der, als effektiv geltenden (Laszewski & Nauduri 2011) FiFo Methode NamedPipes realisiert. Konzeptionelles Modell und Datentransfer sind schematisch in Abbildung 5 gegeben.

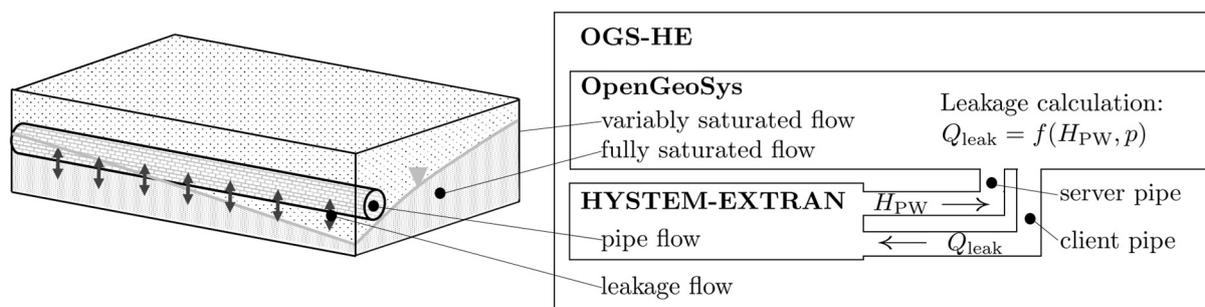


Abb. 5. Konzeptionelles Modell OGS-HE (modifiziert nach Peche et al. 2017).

Das gekoppelte Modell wurde erfolgreich validiert und verifiziert. Eine detaillierte Beschreibung von OGS-HE einschließlich mathematischem Modell, Kopplung, Validierung und Verifizierung ist in Peche et al. (2017) und Peche et al. (2018) gegeben.

Im Rahmen des EVUS-Projektes wird OGS-HE als Erweiterung des hydrodynamischen Modells HE2D für die präzise Berechnung von Überflutungsszenarien genutzt. Ergebnisse des gekoppelten Modells werden für das Training des Metamodells (siehe 2.3) verwendet.

2.5 Schadstofftransportmodell

Unfälle mit Lagerbehältern oder Verkehrsunfälle mit austretenden Schadstoffen stellen punktuelle Schadstoffeinträge dar. Eine schnelle Erfassung und Vorhersage der betroffenen Gebiete ermöglicht eine Eindämmung und Schutz vor weitreichender Kontamination. Dazu wurde Transportmodell für Schadstoffe entwickelt, welches schnell genug ist, um für eine Echtzeitvorhersage eingesetzt zu werden.

Das Transportmodell für Schadstoffeinträge aus lokal begrenzten Quellen wird über einen Partikelansatz umgesetzt. In dieser Lagrange'schen Betrachtungsweise wird der Schadstoff über viele Massepunkte dargestellt, die sich mit dem Strömungsfeld des Regenwassers bewegen und sich zusätzlich durchmischen. Als Grundlage für das Strömungsfeld werden Ergebnisse aus der hydrodynamischen Simulation genutzt, welche in einer Datenbank abgelegt sind.

Die Durchmischung der Partikel wird über die Random-Walk Methode umgesetzt (Kinzelbach 1988). Dabei erfährt jedes Partikel zusätzlich zu seiner advektiven Bewegung im dynamischen Strömungsfeld eine zufällige Bewegung quer und längs der Strömung.

Durch die Partikel-Betrachtungsweise wird der Schadstoff eindeutig verfolgt. Anders als bei gitterbasierten Methoden treten keine numerischen Effekte auf, welche zu einer Verschmierung der Konzentrationsfronten und zu einer Unterschätzung von Konzentrationsspitzen führen (Pathirana et al. 2011).



Abb. 6: Ausbreitungsgebiet eines Schadstoffeintrags. Kontamination der Kanalrohre durch Rotfärbung gekennzeichnet. Gradient der Oberflächenfärbung von gelb (schwach) bis rot (stark kontaminiert)

Für eine Auswertung des Verschmutzungspotentials werden alle Partikel auf ein Raster projiziert und die gebildete Massensumme mit dem Wasserstand verrechnet.

Die Simulation für ein Unfallereignis mit 20.000 Partikeln benötigt ca. 90 Sekunden. Da die Ausbreitung über zwei Stunden stattfindet, ist die Vorhersage ausreichend schnell genug, um eine Echtzeitvorhersage mit ausreichender Vorwarnzeit zu erstellen. Abbildung 6 zeigt eine beispielhafte Ausbreitungskarte.

2.6 Risikoquantifizierung

Zur Quantifizierung des Starkregenrisikos werden das Überflutungs- und Schadstofftransportmodell mit einem Schadensmodell gekoppelt. Ziel ist es auf Basis der Gefährdungsabschätzungen (Überflutungsflächen, Wassertiefen) eine probabilistische Abschätzung der zu erwartenden Schäden an Gebäuden zu geben. Dazu wurde auf der Basis empirischer Schadensdaten aus vergangenen Starkregenereignissen in Deutschland, ein probabilistisches multivariates Schadensmodell entwickelt. Mit Hilfe von maschinellen Lernen wurden zunächst die wichtigsten schadensbeeinflussenden Prädiktoren aus einem Set von 57 Eingangsvariablen bestimmt. Hierbei wurden zum einen Variablenkombinationen zur Erklärung der Schadenshöhe, sowie zum anderen der Schadenseintrittswahrscheinlichkeit identifiziert. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Schadenshöhe vor allem durch Gefährdungsvariablen wie Wasserstand oder Überflutungsdauer gesteuert wird; die Schadenseintrittswahrscheinlichkeit jedoch neben dem Wasserstand vor allem von Widerstandsparametern wie der Art des Gebäudes oder dem Wissen der Bewohner über das Starkregenrisiko beeinflusst wird.

In einem zweiten Schritt wurde auf Basis der als wichtig identifizierten Prädiktoren ein probabilistisches multivariates Schadensmodell auf Basis einer Bayesschen Beta-Regression entwickelt. Dabei wird der Schaden pro Gebäude in Relation zum Gebäudewert als Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Intervall (0 = kein Schaden; 1 = Totalschaden) geschätzt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird dabei als Kombination der zu erwartenden Schadenshöhe als auch der Schadenseintrittswahrscheinlichkeit bestimmt. Die probabilistische Schadensverteilung für jedes Gebäude wird individuell auf der Basis von Markov-Chain-Monte-Carlo (MCMC) Stichproben angenähert. Dadurch kann im Vergleich zu deterministischen Verfahren die Zuverlässigkeit der Schadensschätzung deutlich verbessert werden. Dies erlaubt eine Echtzeitvorhersage der zu erwartenden Schäden während eines Starkregenereignisses bei der die Unsicherheiten der Schätzung kommuniziert, sowie schrittweise reduziert werden können, sobald detaillierte Eingangsdaten vorliegen. Die Verwendung Bayesscher Verfahren erlaubt zudem die Integration von Expertenwissen in Form von a-priori Verteilungen zur Kalibrierung des Modells bei räumlichen und zeitlichen Transfers.

2.7 Crowdsourcing

Der Begriff Crowdsourcing bezeichnet eine aktuelle Methode zur Datenerfassung, die sich in den vergangenen Jahren schnell entwickelt hat und sich insbesondere darauf bezieht, Daten aus Sozialen Medien zu nutzen. Die über Crowdsourcing erhobenen Daten werden gemeinhin als Volunteered Geographic Information (VGI) bezeichnet. Das Ziel ist es, nützliche Informationen mit Ortsinformationen von freiwilligen Nutzern zu sammeln. Für das Projekt EVUS wurde eine Dateninfrastruktur entwickelt, die das Erfassen von Crowdsourcing-Informationen, den

Austausch notwendiger Informationen zwischen den Teilprojekten sowie die Visualisierung der Vorhersageergebnisse ermöglicht (Abbildung 7).

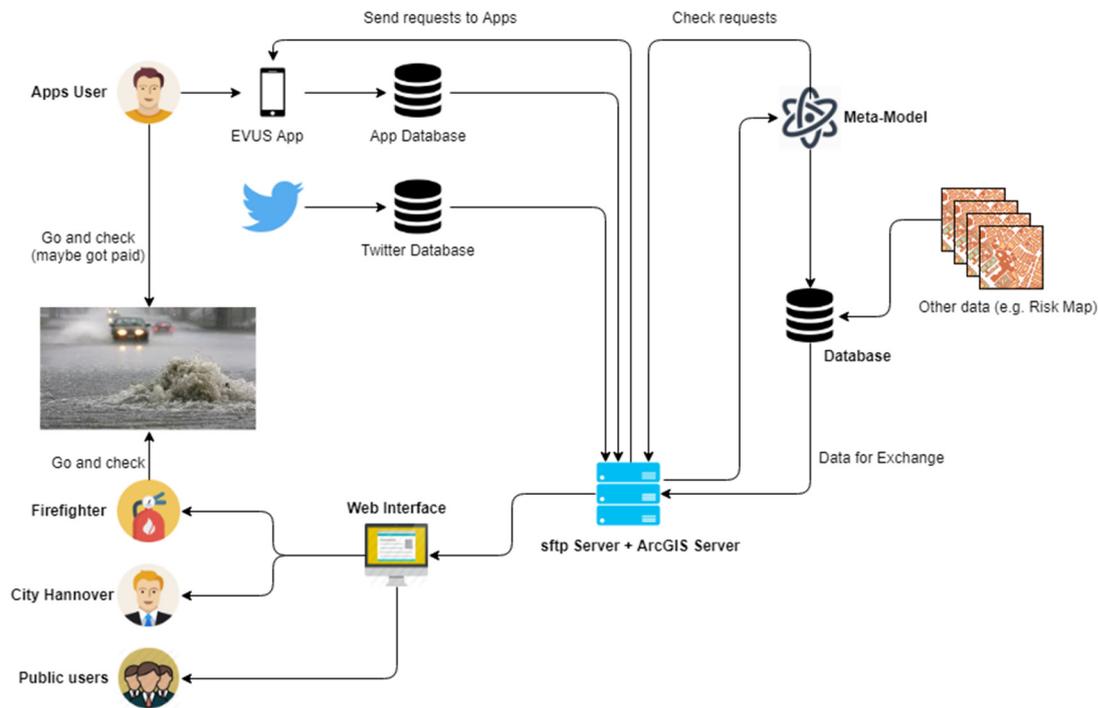


Abb. 7: Dateninfrastruktur für das Projekt EVUS.

Crowdsourcing-Methoden können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden: partizipativ und opportunistisch. Beide Kategorien werden im Projekt genutzt. Partizipative Methoden erfordern die bewusste und aktive Teilnahme der Nutzer. Zu diesem Zweck wurde eine Handy-App entwickelt, um Sturzflut-relevante Informationen von freiwilligen Nutzern zu sammeln. Es enthält den Standort des Benutzers und auch gewünschte Informationen wie Regenintensität, Überschwemmungsbereich und das Auftreten von Kontaminationen (s. Abbildung 8, links). Im Gegensatz dazu erfordern opportunistische Methoden keine aktive Beteiligung des Nutzers am Messvorgang. In diesem Zusammenhang wurde ein Ansatz zur Identifizierung und Lokalisierung von Niederschlags- und Hochwasserereignissen aus sozialen Medien durch die Analyse der benutzergenerierten Texte und Fotos entwickelt (Feng & Sester 2017, Feng & Sester 2018). Deep-Learning-Modelle werden trainiert, um relevante Beiträge von Nutzern in sozialen Medien zu identifizieren. Die einzelnen Beiträge werden durch ein raumzeitliches Clustering aggregiert, um regen- oder flutrelevante Ereignisse zu extrahieren (Abbildung 8, rechts). Die Crowdsourcing-Information dient als notwendiger Input für die Schadstoffbewegungsanalyse.

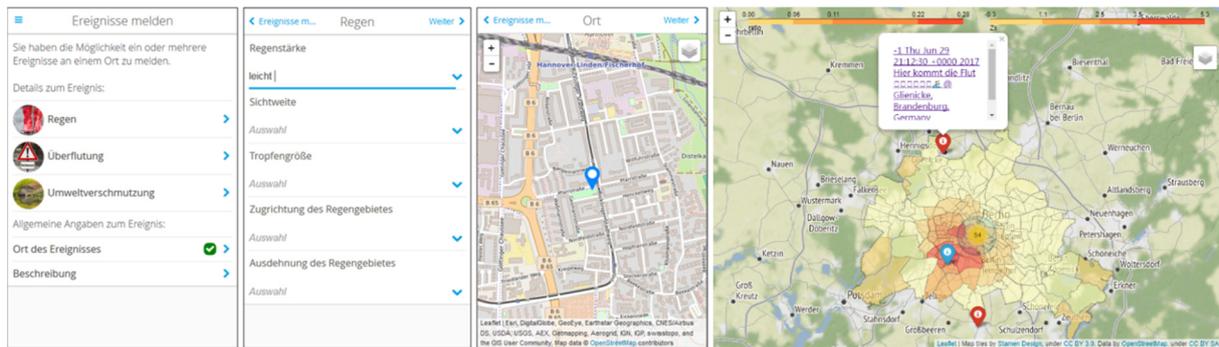


Abb. 8. Screenshots der Handy-App zur Datenerfassung (links). Extrahierte, raumzeitliche Cluster in Berlin am 29. Juni 2016 (rechts).

3. Zusammenfassung

Die Modellumgebung wurde für ein Teileinzugsgebiet entwickelt und getestet. Die einzelnen Modelle werden weiterentwickelt und weiter getestet, erweitert und validiert. Erste Experimente mit der Verarbeitung von Crowdsourcing von Niederschlagsereignisdaten wurden durchgeführt. Bilder von Social-Media-Plattformen werden mit Deep-Learning-Ansätzen analysiert, um ihr Potenzial für die Erkennung von Niederschlagsereignissen zu untersuchen. Ob das Modellierungssystem für die gesamte Stadt Hannover umgesetzt wird, ist derzeit noch offen.

Danksagung

Das Projekt wird im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojekts "EVUS - Echtzeit-Vorhersage urbaner Sturzfluten und damit verbundene Schadstoffkontaminationen" (BMBF, 03G0846B) gefördert. Radar- und Niederschlagsdaten wurden vom Deutschen Wetterdienstes (DWD), Luftbilder und Katasterkarten vom Amt für Geoinformation der Stadt Hannover zur Verfügung gestellt.

Literatur

- Achleitner, S., Fach, S., Einfalt, T., Rauch, W., 2009. Nowcasting of rainfall and of combined sewage flow in urban drainage systems. *Water Science and Technology*, 59: 1145-51.
- Ahlstrom, S., Foote, H., Arnett, R., Cole, C., Serne, R., 1977. Multicomponent mass transport model: theory and numerical implementation (discrete-parcel-random-walk version). Tech. rep., Battelle Pacific Northwest Labs., Richland, Wash. (USA).
- Berkhahn, S., Fuchs, L., Neuweiler, I. An ensemble neural network model for real-time prediction of urban floods. Manuscript in preparation.
- Bermúdez, M., Ntegeka, V., Wolfs, V., Willems, P., 2018. *Water Resour Manage* 32, 2801-2815. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1959-8>
- Berndt, C., Rabiei, E., Haberlandt, U., 2014. Geostatistical merging of rain gauge and radar data for high temporal resolutions and various station density scenarios. *Journal of Hydrology* 508, 88-101.
- Feng, Y., Sester, M., 2017. Social media as a rainfall indicator. In: Bregt, A., Sarjakoski, T., Lammersen, R. van, Rip, F. (Eds.). *Societal Geo-Innovation: short papers, posters and*

- poster abstracts of the 20th AGILE Conference on Geo-graphic Information Science, Wageningen, the Netherlands.
- Feng, Y., Sester, M., 2018. Extraction of Pluvial Flood Relevant Volunteered Geographic Information (VGI) by Deep Learning from User Generated Texts and Photos. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2), 39.
- Fuchs, L., Graf, F., Haberlandt, U., Kreibich, H., Neuweiler, I., Sester, M., Berkhan, S., Feng, Y., Peche, A., Rözer, V., Sämann, R., Shehu, B., Wahl, J., 2017. Real time prediction of pluvial floods and induced water contamination in urban areas. *Proceedings of International Conference of urban drainage*, 2017 Prague.
- Henonin, J., Russo, B., Mark, O., Gourbesville, P., 2013. Real-time urban flood forecasting and modelling - a state of the art. *Journal of Hydroinformatics* 15(3),717-736.
- itwh, 2014. Kanalnetzrechnung - Hydrodynamische Abfluss-Transport- und Schmutzfrachtberechnung. HYSTEM-EXTRAN 7 Modellbeschreibung, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH Hannover.
- itwh, 2017. HE2D – Urbane Sturzfluten, Modellbeschreibung, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH Hannover.
- Kinzelbach, W., 1988. The random walk method in pollutant transport simulation. In: *Groundwater flow and quality modelling*. Springer, pp. 227-245.
- Kolditz, O., Bauer, S., Bilke, L., Böttcher, N., Delfs, J. O., Fischer, T., Park, C. H., 2012. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences* 67(2), 589-599.
- Kraemer, S., 2008. Quantitative Radardatenaufbereitung für die Niederschlagsvorhersage und die Siedlungsentwässerung. *Mitteilungen Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover*, Heft 92, ISSN 0343-8090, Hannover, Germany.
- Li, L., Schmid, W., Joss, J., 1995. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. *J Appl Meteorol* 34, 1286-300.
- Pathirana, A., Maheng Dikman, M., Brdjanovic, D., 2011. A Twodimensional pollutant transport model for sewer overflow impact simulation. In: *Proceedings: 12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil. pp. 10-15.
- Peche, A., Graf, T., Fuchs, L., Neuweiler, I., 2017. A coupled approach for the three-dimensional simulation of pipe leakage in variably saturated soil. *Journal of Hydrology* 555, 569-585.
- Peche A., Graf, T., Fuchs, L., Neuweiler, I., Maßmann, J., Huber, M., Vassolo, S., Stoeckl, L., Lindenmaier, F., Neukum, C., Jing, M., Attinger, S., 2018. HH Processes. In: Kolditz O., Nagel T., Shao H., Wang W., Bauer S. (Eds) *Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Fractured Porous Media: Modelling and Benchmarking*. *Terrestrial Environmental Sciences*. Springer, Cham.
- Tecklenburg, J., Wachenhausen, J., Neuweiler, I., Fuchs, L., 2017. Framework for an automated sensitivity analysis for modelling urban flooding; *Proc. 17th ICUD*, Prague, 2017.

Das Projekt SiSSi – Kombinierte Betrachtung von pluvialen und fluvialen Hochwasserereignissen in der Stadt Siegen

Sebastian Gürke, Jürgen Jensen, Jens Bender

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Simulation von Starkniederschlägen im Stadtgebiet Siegen“ (SiSSi) des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen und des Entsorgungsbetriebs der Stadt Siegen (ESi) werden am Beispiel der Stadt Siegen methodische Ansätze entwickelt, die das zeitgleiche Auftreten von fluvialen und pluvialen Hochwasserereignissen in urbanen Gebieten berücksichtigen. Hierzu werden mittels multivariater statistischer Verfahren für bestimmte bivariate Jährlichkeiten verschiedene Kombinationen univariater Jährlichkeiten von Abfluss und Niederschlagshöhe auf Basis von hoch aufgelösten Beobachtungsdaten ermittelt. Die resultierenden Ereigniskombinationen dienen im Anschluss als Eingangsgrößen für detaillierte, bidirektional gekoppelte hydrodynamisch-numerische Modelle, um so potenziell gefährdete Bereiche zu ermitteln und potenzielle Schäden abzuschätzen.

1. Einleitung

Das Hochwasser im Sommer 2013 an Elbe und Donau hat gezeigt, wie verwundbar die Gesellschaft gegenüber hydrometeorologischen Extremereignissen ist. Allerdings stellen nicht nur die aus großflächigen Niederschlagsereignissen (advective Niederschläge) resultierenden Hochwasser in Flüssen eine Bedrohung dar, sondern auch lokale, durch Starkniederschläge (konvektive Niederschläge) verursachte Überflutungen bzw. Sturzfluten. Beispielhaft sind die Ereignisse im Juni 2016 im Landkreis Rottal-Inn in Niederbayern oder Ende Juni 2017 in Berlin zu nennen.

In den vergangenen Jahren wurden in Deutschland gemäß der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EU-HWRM-RL 2007) für Risikogebiete flächendeckend Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten erstellt, welche Bereiche an Gewässern ausweisen, die infolge von Hochwasserszenarien mit niedriger, mittlerer und hoher Eintrittswahrscheinlichkeit überschwemmt werden können. Sie beziehen sich jedoch ausschließlich auf Hochwasserereignisse in Flüssen (fluviale Ereignisse). Die Auswirkungen durch Starkregenereignisse, die entsprechend auch abseits der Gewässer und insbesondere in urbanen Gebieten zu Überflutungen führen können (pluviale Ereignisse), bleiben in solchen Karten, auch aufgrund fehlender gesetzlicher Grundlagen, bislang jedoch unberücksichtigt. Dabei resultieren rund 50 % der Überschwemmungsschäden in Deutschland aus Starkregenereignissen (GDV 2015). Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren vermehrt sogenannte Starkregengefahrenkarten erstellt, insbesondere aber in Kommunen, die bereits von Starkniederschlagsereignissen betroffen waren.

Aktuell liegen mit den Hochwassergefahrenkarten und den Starkregengefahrenkarten zwei Kartenprodukte vor, die allerdings jeweils nur die Wirkung von fluvialen oder pluvialen Ereignissen darstellen, d. h. nur einen Teil des hydraulischen Gesamtsystems abbilden und damit auch nur begrenzte Aussagekraft haben. Dabei kann eine statistisch-hydrologische Abhängigkeit unterstellt werden, da ein Starkregenereignis zumindest bei kleineren Gewässern auch immer zu einem fluvialen Hochwasser führt. Außerdem besteht eine direkte physikalische Abhängigkeit zwischen diesen beiden Gefahrenquellen. Ein Versagen der Ent-

wässerungsinfrastruktur bzw. einzelner Komponenten des Entwässerungssystems ist letztendlich aber auch möglich, wenn weniger extreme Ereignisse beider Gefahrenquellen zeitgleich auftreten bzw. sich überlagern. So kann ein mittleres Hochwasserereignis im Gewässer dazu führen, dass Niederschlagswasser nicht in ausreichendem Maße über die Kanalisation abgeschlagen werden kann und es infolgedessen zu einem Rückstau und somit zu Überflutungen kommt. Insofern stellt sich im Hinblick auf die Erarbeitung von Gefahrenkarten bzw. die den Karten üblicherweise zugrunde liegenden hydrodynamisch-numerischen Simulationen die Frage, welche Ereigniskombinationen von Abfluss H_{Q_T} (fluviales Ereignis) und Niederschlag h_N (D,T) (pluviales Ereignis) berücksichtigt werden müssen.

2. Das Projekt SiSSI

2.1 Hintergrund und Veranlassung

Auch die am Rande des Rothaargebirges im Südosten von Nordrhein-Westfalen gelegene 115 km² große Stadt Siegen mit ihren rund 105.000 Einwohnern war in der Vergangenheit mehrfach von Starkregenereignissen und auch Flusshochwassern betroffen. Im Gegensatz zu anderen betroffenen Städten waren diese Ereignisse bislang allerdings weniger intensiv und gingen relativ betrachtet nicht mit gravierenden Schäden einher. Zu den bedeutendsten Starkregen im Stadtgebiet zählt ein Ereignis im August 2002, bei dem innerhalb von zwei Stunden etwa 150 mm Regen fielen (Schulz 2013). Dies entspricht nach DWD (2015) einer Jährlichkeit von $T > 100$ a. Es entstanden Schäden in Höhe von mehreren 100.000 Euro an Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen (THW Siegen 2013). Für nationale Aufmerksamkeit in der Presse sorgte in diesem Zusammenhang der Siegener Stadtteil Kaan-Marienborn, in dem sich aufgrund der starken Niederschläge auf dem örtlichen Friedhofsgelände in einer Senke in kurzer Zeit so große Wassermengen sammelten, dass es zu einem Erdrutsch kam, bei dem rund 3.000 m³ Boden des Friedhofsgeländes abrutschten (Schulz 2013). Infolgedessen wurden nicht nur Keller und Wohnungen mit Wasser und Schlamm geflutet, sondern auch Gräber freigespült und Särge in das angrenzende Wohngebiet geschwemmt.

Der überwiegende Teil der urban geprägten Bereiche des Siegener Stadtgebietes liegt in einem von steilen Hanglagen umgebenen Talkessel, aus welchem zahlreiche Nebentäler abzweigen (Abbildung 1). Auch hier liegen die bebauten Gebiete vor allem in den Talsohlen, erstrecken sich aber zum Teil auch entlang der Hangbereiche. Siegen besitzt dabei eine mittelgebirgsähnliche Topografie mit Höhenlagen von rund 215 bis 500 m NHN, wobei rund 45 % des Gebietes Hangneigungen von über 20 % aufweisen. Mit einer Niederschlagshöhe von etwa 1.200 mm pro Jahr im langjährigen Mittel, zählt Siegen zu den niederschlagsreichsten Städten Deutschlands. In Bezug auf Starkregenereignisse bzw. potenziell daraus resultierende Sturzfluten ist an den stark geneigten Hanglagen mit entsprechend hohen Fließgeschwindigkeiten der Oberflächenabflüsse und der Bündelung einzelner Abflussströme in den flacheren, oftmals dicht bebauten und versiegelten Talsohlen zu rechnen. Während der hohe Anteil von über 50 % bewaldeten Flächen im Stadtgebiet zwar grundsätzlich einen großen Niederschlagsrückhalt begünstigt, muss insbesondere bei Starkregenereignissen und infolgedessen erschöpften Infiltrationskapazitäten aber auch mit dem vermehrten Transport von Laub und Astwerk und damit dem Zusetzen von Straßenabläufen gerechnet werden. Vor allem im

Stadtkern bergen zahlreiche verrohrte Gewässerabschnitte die Gefahr von Verkläuerungen an den Einläufen, wie es in der Vergangenheit mehrmals vorgekommen ist.

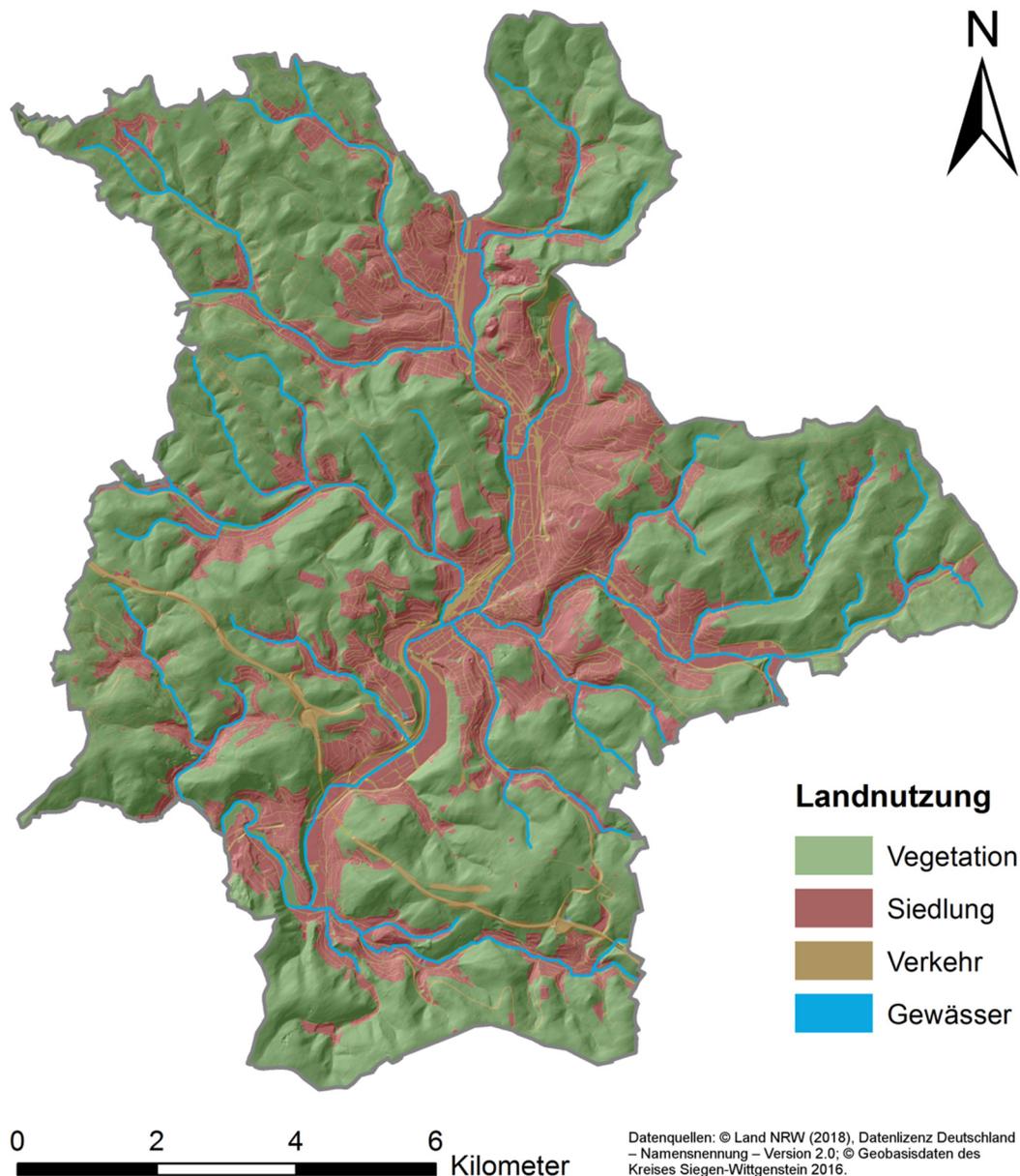


Abb. 1: Untersuchungsgebiet (Stadt Siegen) des Projekts SiSSi; digitales Geländemodell überlagert mit der Landnutzung in vier Kategorien (Vegetation, Siedlung, Verkehr, Gewässer).

Vor diesem Hintergrund und um den Gefahren von Starkregeneignissen im Allgemeinen zu begegnen sowie nicht zuletzt auch um zu handeln, bevor Schlimmeres passiert, wurde im Jahr 2016 das Kooperationsvorhaben „Simulation von Starkniederschlägen im Stadtgebiet Siegen“ (SiSSi) gestartet. Das Projekt stellt eine Kooperation zwischen dem Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen und dem Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen (ESi) dar. Im Rahmen des Projekts übernimmt das fwu die praktische Bearbeitung des Vorhabens,

wobei die Arbeiten in enger Abstimmung mit dem ESi durchgeführt werden, der dem fwu fachlich sowie beratend zur Seite steht und u. a. die Daten der Siegener Entwässerungsinfrastruktur zur Verfügung stellt.

2.2 Zielsetzung und Methodik

Wesentliches Ziel des Projekts SiSSi ist es, eine methodische Vorgehensweise zu entwickeln, mit der pluviale und fluviale Hochwasserereignisse zusammen betrachtet werden können. Basierend darauf werden im Anschluss die potenziell gefährdeten Bereiche und Gebäude im 115 km² großen Stadtgebiet von Siegen ermittelt und die potenziellen Schäden abgeschätzt. Hierzu wird zunächst für das gesamte Stadtgebiet eine topografische Gefährdungsanalyse durchgeführt (vgl. Kapitel 3), sodass mit relativ geringem Zeit- und Arbeitsaufwand zum einen erste Aussagen zur Gefährdung durch Starkregenereignisse getroffen werden können und zum anderen die vorhandene Datengrundlage deutlich besser beurteilt werden kann.

Ein zentraler Bestandteil der Untersuchungen ist die Entwicklung von methodischen Ansätzen, um die Gefahrenquellen Flusshochwasser und Starkniederschlag im Rahmen der anschließenden hydraulischen Gefährdungsanalyse auch kombiniert zu betrachten. Die Frage, die hierbei im Vordergrund steht, ist: Können durch die Überlagerung von zwei weniger extremen fluvialen und pluvialen Ereignissen mit definierter gemeinsamer Eintrittswahrscheinlichkeit größere Überschwemmungen entstehen, als durch ein einzelnes extremes fluviales oder pluviales Ereignis mit gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit? Kann also z. B. das zeitgleiche Auftreten von einem fluvialen und einem pluvialen Ereignis mit einer univariaten Jährlichkeit von jeweils z. B. $T < 100$ a, die zusammen eine kombinierte (bivariate) Jährlichkeit von 100 a aufweisen, größere Schäden entstehen, als wenn ein 100-jährliches Flusshochwasser oder ein 100-jährliches Starkregenereignis allein auftritt? Um diese Frage zu beantworten, werden zunächst langjährige und hoch aufgelöste Niederschlags- und Abflusszeitreihen untersucht und mittels multivariater statistischer Verfahren ausgewertet, um heutige Abfluss- und Niederschlagskombinationen auf Basis der Beobachtungsdaten zu ermitteln (vgl. Kapitel 4). Die bestimmten bemessungsrelevanten Kombinationen aus Abfluss und Niederschlag dienen im Anschluss als Eingangsgrößen für hydraulische Analysen.

Im nächsten Schritt werden hierzu detaillierte hydrodynamisch-numerische Modelle aufgestellt, welche sowohl das Kanalnetz als auch die Geländeoberfläche und die Fließgewässer abbilden (vgl. Kapitel 5). Mithilfe einer bidirektionalen Modellkopplung wird hierbei die physikalische Interaktion dieser drei Elemente untereinander möglichst realitätsnah abgebildet und die resultierenden Fließtiefen und -geschwindigkeiten berechnet. Abschließend wird auf Basis der Ergebnisse der hydraulischen Untersuchungen eine Hochwasserschadenspotenzialanalyse durchgeführt, um die potenziellen (monetären) Schäden an Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen abzuschätzen und diese als Grundlage für etwaige Maßnahmenplanungen zu nutzen.

3. Topografische Analyse der Geländeoberfläche

In den vergangenen Jahren haben zahlreiche Starkregenereignisse zu folgenschweren Überflutungen mit erheblichen Sachschäden und auch Todesopfern geführt. Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene grundsätzliche Vorgehensweisen und Methoden zur Ermittlung von Überflutungsgefährdungen infolge von Starkregenereignissen erarbeitet und definiert (z. B. DWA 2013, DWA 2016). Die Methoden reichen dabei von vereinfachten Gefährdungsabschätzungen, über topografische Gefährdungsanalysen bis hin zu hydraulischen Überflutungsanalysen. Dementsprechend unterscheiden sich diese Methoden damit nicht nur hinsichtlich des Bearbeitungsaufwandes, sondern auch in Bezug auf die erforderlichen Daten, die zugrundeliegenden Berechnungsansätze und damit letztendlich auch auf die Genauigkeit sowie die Aussagekraft der Ergebnisse.

Topografische Gefährdungsanalysen werden in der Regel mit Geoinformationssystemen (GIS) durchgeführt und deshalb auch als GIS-basierte Analysen bezeichnet. Sie dienen hauptsächlich zur Lokalisierung von Gefährdungsschwerpunkten, da die Ergebnisse vor allem Geländetiefpunkte bzw. potenziell überflutungsgefährdete Geländesenken und oberirdische Fließwege darstellen. Die Analysen basieren hierbei allein auf einer Auswertung der Höheninformationen des zugrundeliegenden Geländemodells. Die Ermittlung der Fließwege erfolgt unter der Annahme, dass die Fließrichtung und damit die Fließwege allein durch das Gefälle der Geländeoberfläche bestimmt werden. Im Vergleich zu hydraulischen Analysen können daher keine Überflutungstiefen/-flächen und Fließgeschwindigkeiten berechnet werden.

Für die stadtgebietsweite topografische Analyse im Projekt SiSSi wurde ein hoch aufgelöstes digitales Geländemodell mit 1 bis 4 Punkten pro m^2 (DGM1L) verwendet, welches u. a. durch 3D-Gebäudemodelle und Daten aus dem Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS® NRW) verfeinert wurde. Im Anschluss wurde das Geländemodell auf ein Raster mit einem Zellabstand von 0,5 m interpoliert und das Untersuchungsgebiet um Außengebiete erweitert, sodass letztendlich ein Raster mit einer Gesamtanzahl von 960 Mio. Höhenpunkten resultierte. Die Analysen selbst wurden im Wesentlichen mit der MATLAB®-basierten Topo-Toolbox 2 (Schwanghart & Scherler 2014) durchgeführt.

Die Ergebnisse der GIS-basierten Analyse, aber insbesondere die Geländesenken, konnten u. a. mit zahlreichen fotografischen Aufnahmen aus Presseberichten, Meldungen der Bürger und auch durch die Erfahrungen des ESi stichprobenartig verifiziert und validiert werden (vgl. Abbildung 2). Die ermittelten Geländesenken wurden anschließend hinsichtlich ihrer Tiefe klassifiziert und das jeweilige maximale Füllvolumen ermittelt. Im Anschluss wurden die Fließwege in Bezug auf ihre oberirdische akkumulierte Einzugsgebietsfläche klassifiziert (vgl. DWA 2016) und zusammen mit den Geländesenken und den im Stadtgebiet vorhandenen und verorteten Straßenabläufen verschnitten und letztendlich in Form von digitalen Karten aufbereitet. Die vorläufigen Ergebnisse des Projekts stellen für den ESi hilfreiche Informationen bereit, da zum einen die Gefährdung bestehender Straßenabläufe besser beurteilt werden kann. Zum anderen kann der ESi anhand der Fließwege und Geländesenken z. B. Meldungen verstopfter Straßenabläufe sowie überfluteter Straßen und Grundstücke besser nachvollziehen und beurteilen.



Abb. 2: Ein Starkregenereignis am 29.06.2012 führte u. a. zur Überflutung eines in einer Senke gelegenen Straßenbereiches in Siegen (links, wirSiegen.de 2012). Die Geländesenke konnte im Rahmen der GIS-basierten Analysen ebenfalls ermittelt werden und weist mehrere Fließ- bzw. Zuflusswege auf (rechts, Bildmitte).

Es gilt zu beachten, dass solche GIS-basierten Analysen grundsätzlich einige methodisch bedingte Vereinfachungen aufweisen, so kann beispielsweise die Geländeoberfläche lediglich in einer Ebene betrachtet werden, d. h. Fließwege sind beispielsweise entweder auf oder unter Straßenbrücken möglich. In solchen und ähnlichen Bereichen (Kanalisationen, Verrohrungen, Unterführungen etc.), die im Berechnungsraster nicht bzw. nicht korrekt abgebildet werden können, resultieren daraus entsprechende Unsicherheiten und eindeutige Fehler. Die Ergebnisse derartiger Analysen stellen somit, vor allem aufgrund der nicht zu ermittelnden Fließtiefen und –geschwindigkeiten, eine vereinfachte Beurteilung der Überflutungsgefährdung dar. Diese kann jedoch mit relativ geringem Aufwand für große Gebiete durchgeführt werden und stellt ein hilfreiches Instrument für daran anschließende Untersuchungen dar. Insbesondere im Hinblick auf die im Projekt nachfolgenden detaillierten hydraulischen Untersuchungen ist eine breite Veröffentlichung der Ergebnisse der topografischen Analysen nicht vorgesehen. Aufgrund der Unsicherheiten und um mögliche Fehlinterpretationen durch Laien zu vermeiden, ist dies im Allgemeinen auch nicht zu empfehlen.

4. Multivariate statistische Untersuchungen

Die kombinierte Hochwassergefahr aus fluvialen und pluvialen Ereignissen ist keineswegs als unabhängig zu betrachten. So besteht eine statistisch-hydrologische Abhängigkeit, da lokale Starkniederschläge häufig von großräumigen, aber weniger intensiven Niederschlagsfeldern begleitet werden (z. B. Großwetterlage von Ende Mai bis Mitte Juni 2016 über Mitteleuropa, vgl. Bachmair & Faust 2017). Des Weiteren bestehen direkte Schnittstellen und somit physikalische Abhängigkeiten zwischen dem Kanalisationssystem und der Vorflut in Form von Entlastungskanälen von Regenüberläufen, Klär- und Beckenüberläufen von Regenüberlaufbecken, Auslässen von Regenwasserkanälen etc. Die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kanalnetze ist damit eng mit der Abflusskapazität der Gewässer ver-

knüpft (DWA 2016). Dabei weisen Gewässer- und Kanalsysteme vollkommen unterschiedliche Bemessungsphilosophien auf. Während Gewässer in der Regel auf das hundertjährige Hochwasser (HQ_{100}) bemessen werden, werden bei der Dimensionierung von Kanälen üblicherweise Abflüsse mit 2- bis 10-jährlicher Wiederkehr zugrunde gelegt. Die Abhängigkeit zwischen fluvialen und pluvialen Ereignissen bzw. die Entwicklung der Abhängigkeit unterscheidet sich darüber hinaus auch von der Größe und Lage eines Einzugsgebietes. Während in kleinen Einzugsgebieten ein Starkregenereignis unmittelbar Auswirkungen auf den Hochwasserabfluss im Gewässer haben kann, kann das Abflussgeschehen in Flüssen mit einem größeren Einzugsgebiet als weitgehend entkoppelt von Starkregenereignissen angenommen werden.

Im Rahmen der statistischen Untersuchungen werden in Anlehnung an Bender et al. (2015) mittels eines Blockmodells zunächst die jährlichen Maximalwerte aus den vorhandenen Abflusszeitreihen herausgefiltert und auf Grundlage dieser Daten, zeitgleich bzw. im zeitlichen Bereich des Abflussereignisses aufgetretene Niederschlagsereignisse bestimmt. Auf Basis der Niederschlagszeitreihen werden hierzu über ein gleitendes Zeitfenster die Niederschlagshöhen für verschiedene Dauerstufen D ermittelt. Die zwei in Abhängigkeit zueinanderstehenden Zufallsvariablen (Abfluss und Niederschlag) werden im Anschluss jedoch nicht getrennt voneinander, sondern als zweidimensionale Zufallsvariable betrachtet. Für die Auswertung der Belastungszustände sind schließlich multivariate Verteilungsfunktionen notwendig, wobei hierfür seit einigen Jahren häufig Copula-Funktionen (Sklar 1959) verwendet werden. Im Gegensatz zu vielen anderen multivariaten Verteilungsfunktionen müssen die Zufallsvariablen bei der Verwendung von Copula-Funktionen nicht derselben Verteilung entsprechen. In der statistischen Modellierung von hydrologischen Variablen werden häufig Archimedische Copulas verwendet, da diese ein breites Spektrum an Abhängigkeitsstrukturen abbilden können (z. B. Bender et al. 2014).

Basierend auf den Abflüssen bzw. Niederschlagshöhen bestimmter univariater Jährlichkeit werden mittels der Copula-Funktionen Quantil-Isolinien, d. h. Kombinationen gleicher Jährlichkeit T bestimmt. Wie in Abbildung 3 beispielhaft anhand einer Quantil-Isolinie für $T = 100$ a schematisch dargestellt, ergeben sich für jede bivariate Jährlichkeit verschiedene Kombinationen univariater Jährlichkeiten von Abfluss und Niederschlagshöhe. Wird zunächst aber der Schnittpunkt der Quantil-Isolinie mit der Abszissenachse betrachtet, so stellt dies die aktuelle Vorgehensweise bei der Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten dar, d. h. es wird bei den Berechnungen allein der Gewässerabfluss berücksichtigt (hier: HQ_{100}). Im Gegensatz dazu entspricht die derzeitige Betrachtung von Starkregengefahrenkarten, d. h. die alleinige Betrachtung des Niederschlages (hier: $h_N(D, 100a)$), dem Schnittpunkt mit der Ordinatenachse. Eine kombinierte Betrachtung eines 5-jährlichen Hochwasserereignisses (HQ_5) mit einem 100-jährlichen Starkregenereignis der Dauerstufe D ($h_N(D, 100a)$) führt hingegen ebenfalls zu einer (bivariaten) Jährlichkeit von $T = 100$ a (Punkt A). Gleichwohl resultiert dieselbe bivariate Jährlichkeit aus der Kombination $HQ_{25}/h_N(D, 90a)$ (Punkt B) sowie aus $HQ_{60}/h_N(D, 70a)$ (Punkt C), $HQ_{95}/h_N(D, 10a)$ (Punkt D) und $HQ_{100}/h_N(D, 2a)$ (Punkt E).

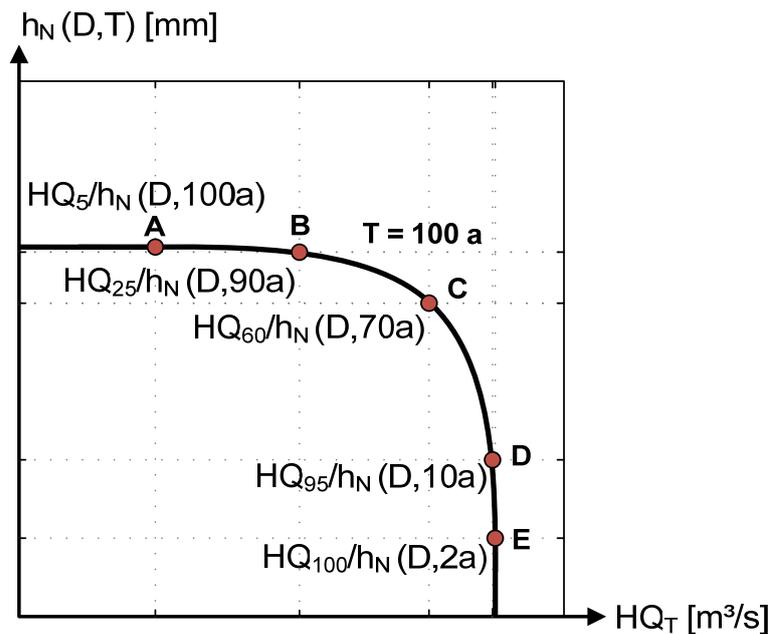


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung einer Quantil-Isolinie für die bivariate Jährlichkeit $T = 100 \text{ a}$ und resultierende Kombinationen univariater Jährlichkeiten von Abfluss (HQ_T) und Niederschlagshöhe ($h_N(D,T)$) (Punkte A bis E), nach Gürke et al. (2016).

Letztendlich kann also die kombinierte Betrachtung bzw. das zeitgleiche Auftreten von zwei weniger extremen Ereignissen dieselbe Auftrittswahrscheinlichkeit haben, wie wenn ein fluviales oder pluviales Ereignis allein auftritt und damit letztlich zu unterschiedlichen Gefährdungen führen. Um anschließend diejenigen Kombinationen einer Dauerstufe D zu ermitteln, die bei einer bestimmten bivariaten Jährlichkeit zu den maximalen Überschwemmungen führen, werden die mittels der multivariaten Verteilungsfunktionen bestimmten bemessungsrelevanten Kombinationen aus Abfluss und Niederschlag als Eingangsgrößen für hydrodynamisch-numerische Modellierungen genutzt.

5. Hydraulische Gefährdungsanalyse

Grundsätzlich existieren verschiedene Ansätze, um das Überflutungsverhalten von Starkregen hydraulisch zu berechnen und zu beschreiben (z. B. DWA 2013 & 2016). Bei gekoppelten Kanalnetz- und Oberflächenmodellen wird ein Kanalnetzmodell mit einem Oberflächenmodell über diverse Schnittstellen (z. B. Kanalschächte, Straßenabläufe) verbunden, wobei in bidirektional gekoppelten Modellen hierbei ein dynamischer Austausch zwischen beiden Modellen und jeweils in beide Richtungen stattfinden kann. Letztere stellen derzeit die rechenintensivsten Modelle dar, die der Wirklichkeit aber am nächsten kommen und dies insbesondere dann, wenn bei der Abflussbildung ein flächendifferenzierter Ansatz verfolgt wird (vgl. HSB 2017). Im Projekt SiSSi werden im Zuge der hydraulischen Gefährdungsanalyse jeweils für die Teileinzugsgebiete des Stadtgebietes solche bidirektional gekoppelten hydrodynamisch-numerischen Modelle bestehend aus einem 1D-Kanalnetzmodell und einem 2D-Oberflächenmodell aufgebaut. Um nicht nur die Interaktion der Geländeoberfläche mit dem Kanalisationssystem zu berücksichtigen, sondern auch die vorgenannten mit der Vorflut, werden die Gewässer in

das Oberflächenmodell detailliert eingearbeitet, sodass ein „2D-Oberflächen- und Gewässermodell“ entsteht.

Das 1D-Kanalnetzmodell bildet dabei die im Stadtgebiet verlaufende rund 600 km lange vorwiegend im Mischsystem entwässernde Kanalisation einschließlich der rund 18.000 Kanalschächte ab. Des Weiteren gehören zum Kanalnetz über 15.500 Straßenabläufe, 18 Regenüberlaufbecken, 55 Regenüberläufe und 15 Pumpwerke sowie zwei Kläranlagen, die entsprechend modelltechnisch abzubilden sind. Das 2D-Oberflächen- und Gewässermodell wird neben der Geländeoberfläche, aus der die vorhandenen Gebäude ausgespart werden, voraussichtlich insgesamt rund 155 km Fließgewässer abbilden, die zum Großteil basierend auf terrestrisch vermessenen Querprofilen eingepflegt werden. Längere, verrohrte Gewässerabschnitte werden dabei mit in das Kanalnetzmodell integriert und entsprechend eindimensional abgebildet. Das Kanalnetzmodell wird hierbei mit dem Programmpaket MIKE URBAN und das Oberflächen- und Gewässermodell mit MIKE 21 aufgebaut, wobei die dynamische Kopplung dieser beiden Programmpakete mittels MIKE FLOOD stattfindet.

Die detaillierten Teilmodelle bieten anschließend zahlreiche Möglichkeiten weiterer Untersuchungen, indem diese u. a. hinsichtlich der differenzierenden Topografie, Land- und Bodennutzung, Einzugsgebietsgröße sowie des Gewässereinflusses etc. analysiert und miteinander verglichen werden. Dabei soll im Rahmen der Modellierung auch der Einfluss bzw. die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kanalisation bei außergewöhnlichen Ereignissen (gemäß DWA 2016 T ≥ 50 a bzw. LUBW 2016 T > 50 a) näher untersucht werden. LUBW (2016) geht davon aus, dass der Kanalabfluss bei außergewöhnlichen und extremen Ereignissen in der Regel keine Rolle mehr spielt, da die Leistungsfähigkeit des Kanalsystems erreicht wird und entsprechend kein Wasser mehr in die Kanalisation eintreten kann. In Anbetracht der Tatsache, dass ein Wasseraustausch jedoch nicht nur von der Oberfläche in das Kanalnetz hinein, sondern Wasser auch aus dem Kanalnetz heraus auftreten kann, erscheint diese Betrachtung zu einseitig. Entsprechende detaillierte Untersuchungen (z. B. Tolkmitt & Wegner 2013) zeigen, dass sich beispielsweise die Abflüsse aus dem Kanalisationssystem und von Gewässern prinzipiell sowohl positiv als auch negativ beeinflussen können und das auch bei einer Jährlichkeit von T = 100 a.

Da keine gesetzlichen Vorgaben, sondern bislang nur Empfehlungen (z. B. DWA 2016) zur Aufstellung von Starkregengefahrenkarten existieren, werden die Karten zunächst analog zu den Hochwassergefahrenkarten für die drei Szenarien „niedrige, mittlere und hohe Eintrittswahrscheinlichkeit“ erstellt. Hierbei dienen die mittels der multivariaten statistischen Untersuchungen ermittelten Ereigniskombinationen als Eingangsgrößen bzw. Randbedingungen, wobei die entsprechenden Bemessungsabflüsse hierzu aus einem Niederschlags-Abfluss-Modell entnommen werden, welches ebenfalls im Rahmen des Projekts für das Einzugsgebiet der Stadt Siegen aufgestellt wird.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel der Stadt Siegen, die durch eine stark strukturierte Topografie geprägt ist und innerhalb des Stadtgebietes Höhenunterschiede von rund 285 m aufweist, werden im Rahmen des Projekts SiSSi die Auswirkungen von Starkregenereignissen untersucht. Im Fokus der Forschung steht hierbei insbesondere, wie das zeitgleiche Auftreten von fluvialen und pluvialen Hochwasserereignissen in urbanen Gebieten berücksichtigt und in methodische Ansätze überführt werden kann. Mittels einer topografischen Gefährdungsanalyse konnte für das rund 115 km² große Siegener Stadtgebiet zunächst eine vereinfachte Beurteilung der Überflutungsgefährdung erfolgen, indem potenziell überflutungsgefährdete Geländesenken und oberirdische Fließwege ermittelt wurden. Die Ergebnisse der GIS-basierten Analyse zeigen Gefährdungsschwerpunkte auf, stellen für den Entsorgungsbetrieb erste hilfreiche Informationen bereit und erleichtern die nachfolgenden detaillierten hydraulischen Untersuchungen. Um bei den hydrodynamisch-numerischen Modellierungen fluviale und pluviale Ereignisse kombiniert betrachten zu können, werden die vorhandenen Abfluss- und Niederschlagszeitreihen mittels multivariater statistischer Verfahren ausgewertet und untersucht. Hierzu werden unter Verwendung von Copula-Funktionen für bestimmte bivariate Jährlichkeiten verschiedene Kombinationen univariater Jährlichkeiten von Abfluss und Niederschlagshöhe für die relevanten Dauerstufen ermittelt. In den nächsten Schritten werden parallel zu den statistischen Untersuchungen und der Ermittlung der Ereigniskombinationen aus Abfluss und Niederschlag bidirektional gekoppelte hydrodynamisch-numerische Modelle aufgebaut. Besonderheit dabei ist, dass neben der Oberfläche und dem Kanalnetz auch die Gewässer im Modell detailliert abgebildet und gekoppelt werden. Die Ereigniskombinationen dienen im Anschluss als Randbedingungen für die Simulationen, um so die potenziell gefährdeten Bereiche ermitteln und potenzielle Schäden im Stadtgebiet abzuschätzen. Die Ergebnisse in Form von detaillierten Überflutungsflächen/-tiefen und Fließgeschwindigkeiten werden im Anschluss in Form von kombinierten Gefahren- und Risikokarten dargestellt.

Danksagung

Das Projekt SiSSi wird durch den Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen finanziert und unterstützt. Besonderer Dank gebührt Betriebsleiter Ulrich Krüger und Abteilungsleiter Planung Stephan Roth für die Realisierung und Begleitung des Projekts sowie die Bereitstellung der erforderlichen Daten.

Literatur

- Bachmair, S., Faust, E., 2017. Immer wieder Starkregen, in: Munich Re Topics Geo, Naturkatastrophen 2016, Analysen, Bewertungen, Positionen, Ausgabe 2017, 27-30.
- Bender, J., Wahl, T., Jensen, J., 2014. Multivariate design in the presence of non-stationarity, *Journal of Hydrology* 514, 123-130, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.017
- Bender, J., Wahl, T., Müller, A., Jensen, J., 2015. A multivariate design framework for river confluences, *Hydrological Sciences Journal* 61 (3), 471-482, doi: 10.1080/02626667.2015.1052816
- DWA, 2013. Methoden der Überflutungsberechnung. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.6., KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (60), Heft 6, 506–511.

- DWA, 2016. Merkblatt DWA-M 119, Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen, DWA-Regelwerk, November 2016, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.), Hennef, ISBN 978-3-88721-392-3.
- DWD, 2015. KOSTRA-DWD-2010, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010), - Abschlussbericht -, Deutscher Wetterdienst – Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach am Main.
- EU-HWRM-RL, 2007. Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Okt. 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.
- GDV, 2015. Naturgefahrenreport 2015, Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., September 2015.
- Gürke, S., Bender, J., Jensen, J., 2016. Entwicklung methodischer Ansätze zur kombinierten Betrachtung von fluvialen und pluvialen Hochwasserereignissen in urbanen Gebieten, in: Boes, R. (Hrsg.): 18. Treffen junger WissenschaftlerInnen wasserbaulicher Institute. ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 24.-26. August 2016, 13–15.
- HSB, 2017. Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen. Praxisleitfaden, erstellt im Rahmen des DBU-Forschungsprojekts "KLASII". Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hochschule Bremen, Oktober 2017.
- LUBW, 2016. Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, August 2016, Karlsruhe.
- Schulz, H., 2013. „Unwetter mit grausamer Geschichte“, 28.08.2013, in: <https://www.derwesten.de/staedte/nachrichten-aus-siegen-kreuztal-netphen-hilchenbach-und-freudenberg/unwetter-mit-grausamer-geschichte-id8369792.html>, Zugriff am 10.05.2018.
- Schwanghart, W., Scherler, D., 2014. TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences, Earth Surface Dynamics 2, 1-7, doi: 10.5194/esurf-2-1-2014
- Sklar, A., 1959. Fonction de répartition à n dimensions et leurs marges, Publications de Institut de Statistique Université de Paris 8, 229-231.
- THW Siegen, 2013. „Unwetter über Siegen / Erdbeben reißt Säрге in die Tiefe“, 06.04.2018, in: <https://www.thw-siegen.de/berichte/einsaetze/einsaetze-2002/71-unwetter-ueber-siegen-erdrutsch-reisst-saerge-in-die-tiefe>, Zugriff am 10.05.2018.
- Tolkmitt, L., Wegner, H., 2013. Stadt-Land-Fluss - Urbane Überflutungen und Gewässerauferungen, in: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 48, Wasserbaukolloquium 2013, Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz – Bauwerke, Anforderungen, Modelle, 57-64, ISBN 978-3-86780-318-2.
- wirSiegen.de, 2012. „Unwetter: 12 Wohnhäuser überflutet- Feuerwehr im Dauerstress“, 29.06.2012, in: <https://wirsiegen.de/2012/06/unwetter-feuerwehr-im-dauerstress/37244/>, Zugriff am 11.05.2018.

- VEREINT -

Kooperativ organisierter Bevölkerungsschutz bei extremen Wetterlagen: Starkregen & Sturzfluten im ländlichen Raum am Beispiel der Stadt Glashütte

Jens Grundmann, Judith Schache, Kerstin Lehmann, Patric Röhm

Zusammenfassung

Das Projekt VEREINT zielt auf eine verbesserte kooperativ organisierte Gefahrenabwehr und Bewältigung bei Starkregenereignissen und daraus erwachsendem Hochwasser speziell im ländlichen Raum. Hierfür werden Konzepte entwickelt und untersucht, um das Zusammenspiel zwischen professionellen und freiwilligen Einsatzkräften sowie ungebundenen Helfern und der Bevölkerung zu verbessern und zu erproben. Als Voraussetzung für eine Planung der Gefahrenabwehr dient eine Gefährdungsanalyse, die speziell für unbeobachtete Einzugsgebiete und kleinräumige Starkregenereignisse besondere Herausforderungen beinhaltet. Die hierfür gewählte Methodik eines auf Crowdsourcing basierenden Ansatzes zur Datenerhebung und Analyse sowie die modellbasierte Rekonstruktion von Hochwasserereignissen anhand empirischer Befunde werden im Rahmen des Beitrags vorgestellt.

1. Motivation und Zielstellung

Untersuchungen zum Klimawandel für die Region des Erzgebirges lassen eine Zunahme der Starkniederschläge erwarten (Bernhofer et al. 2011). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit existierende Strukturen des Bevölkerungsschutzes an die zunehmende Zahl von Extremwetterereignissen anzupassen. Analysen des Deutschen Komitees für Katastrophenvorsorge zeigen nach wie vor Bedarf in der Stärkung der Eigenvorsorge, Warnung und Katastrophenabwehr, der Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen professionellen und freiwilligen Einsatzkräften sowie der Einbindung freiwilliger Helfer und des Dialogs mit potenziell Betroffenen (Thieken 2015). In dem dreijährigen Projekt VEREINT „Kooperativ organisierter Bevölkerungsschutz bei extremen Wetterlagen“ (2016-2019) werden diese Handlungsfelder durch die TU Dresden aufgegriffen und ein pilothaftes Konzept zur Anpassung an den Klimawandel, insbesondere akut und lokal auftretender Starkregen-/Sturzfluten und daraus erwachsende Hochwasserereignisse in kleinen Einzugsgebieten am Beispiel der Stadt Glashütte und ihrer Ortsteile entwickelt und erprobt. Neben der Stadt Glashütte als Kooperationspartner unterstützen weitere assoziierte Partner das Vorhaben. Zu ihnen zählen u. a. das Amt für Bevölkerungsschutz in Pirna, das Landeshochwasserzentrum und die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen. Folgende Schwerpunkte werden bearbeitet:

- Konzept zur retrospektive Datenerhebung für Starkregen und resultierendem Hochwasser unter Einbezug der Bevölkerung (Crowdsourcing) sowie deren Analyse,
- Entwicklung eines webbasierten Hochwasser/Schaden-Erfassungstools für eine langfristige Datengewinnung,
- Modellbasierte Gefährdungsanalyse zur Präzisierung von Gefahrenhotspots, Rekonstruktion von Ereignisabläufen und der Verbesserung der Datenlage für die Planung von Katastropheneinsätzen,
- Untersuchung zu Möglichkeiten der Hochwasserwarnung für eine gezielte Katastrophenabwehr der Einsatzkräfte im Ereignisfall,

- Kooperatives Handeln von Einsatzkräften, um die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren zur Katastrophenbewältigung zu verbessern,
- Entwicklung eines Konzeptes zur Einbeziehung ungebundener Helfer in die Katastrophenabwehr- und –bewältigungsmaßnahmen,
- Training kooperativen Handelns, um das Verständnis für die Arbeit der anderen Einsatzkräfte zu entwickeln und zu erproben.
- Das Vorhaben wird im Rahmen der deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gefördert. Weitere Informationen finden Sie auf der der Projekthomepage: <http://vereint.cimtt.de>.

2. Das Untersuchungsgebiet

Das Gemeindegebiet der Stadt Glashütte umfasst 16 Ortsteile (inkl. Stadt Glashütte) und erstreckt sich über eine Fläche von 95,6 km² zwischen 260 bis 637 m.ü.NN. In der Gemeinde gibt es 10 Freiwillige Feuerwehren. Das Gemeindegebiet wird von der Müglitz durchflossen, einem Gewässer 1. Ordnung in Unterhaltungslast durch die Landestalsperrenverwaltung (LTV). Letzteres gilt auch für den Lockwitzbach ab dem Hochwasserrückhaltebecken Reinhardtsgrimma und den Briesnitzbach ab dem Hochwasserrückhaltebecken Glashütte. Für alle weiteren Fließgewässer im Gemeindegebiet ist die Gemeinde zuständig. Für eine pilothafte Untersuchung wurden die Ortsteile Johnsbach, Dittersdorf, Hirschbach und Reinhardtsgrimma ausgewählt. Kriterien für die Auswahl waren u. a., dass Überflutungen/Schäden infolge Starkregen hier schon bekannt waren, bauliche Maßnahmen zum Hochwasserschutz (z. B. im Nachgang des Hochwasser 08/2002) nicht oder nur in geringem Umfang durchgeführt wurden und Unterstützungsbedarf durch ungebundene Helfer seitens der Feuerwehr Glashütte besteht. Die zugehörigen Einzugsgebiete (Abbildung 1) sind zwischen 2,8 bis 10,3 km² groß und weisen eine unterschiedliche hydrologische Charakteristik auf, wobei eine landwirtschaftliche Nutzung dominiert.

3. Retrospektive Datenerhebung und Analyse von Starkregen und resultierendem Hochwasser im ländlichen Raum unter Einbezug der Bevölkerung

Für ein verbessertes kooperatives Handeln zur Hochwasserabwehr und -bewältigung sind Kenntnisse zu existierenden und möglichen Gefährdungen hilfreich und notwendig. Im Zuge einer retrospektiven Datenerhebung und Analyse in der Pilotregion Glashütte sollten folgende Ziele erreicht werden:

- Informationen/Messwerte zu Starkregen-/Sturzfluten und daraus erwachsender Hochwasserereignisse
- Erfassen resultierender Überflutungen und Schäden in den Ortsteilen
- Analyse, Bewertung und statistische Einordnung der Ereignisse

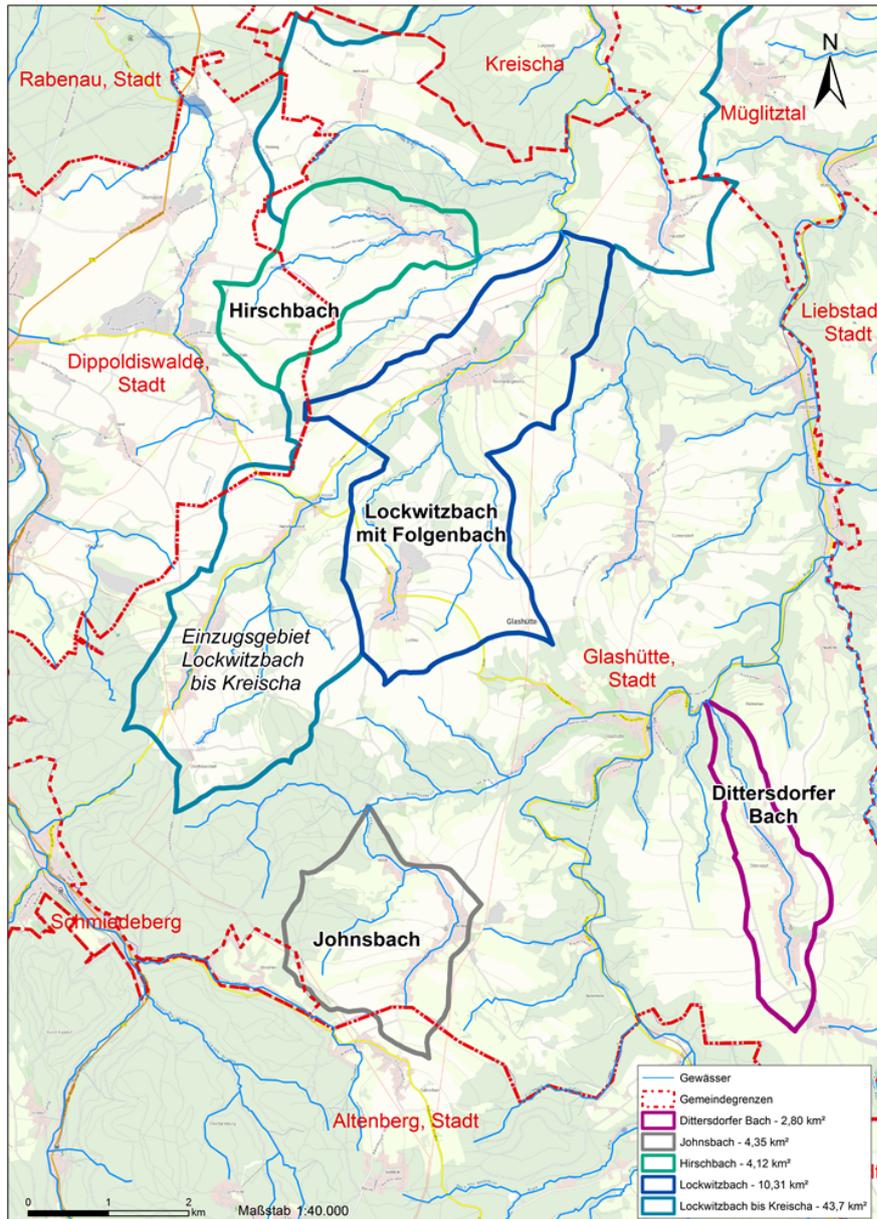


Abb. 1: Gemeindegebiet der Stadt Glashütte und ausgewählte Ortsteile mit Einzugsgebieten (Quelle Hintergrundkarte: GeoSN)

Primäre Zielobjekte sind die Gewässer in kommunaler Verantwortung. Da in kleinen Einzugsgebieten im ländlichen Raum selten zuverlässige Messdaten vorhanden sind, wurde für die Datenerhebung ein Ansatz unter Einbezug der Bevölkerung der Pilotkommune gewählt (Crowdsourcing). Neben überregionalen Hochwasserereignissen (z. B. 08/2002) galt das Augenmerk besonders den kleinräumigen, extremen Ereignissen seit 2002.

3.1 Methodik der Datenerhebung mittels Crowdsourcing und Analyse

Der Ansatz des Crowdsourcing beinhaltet ein Workshopkonzept für Gesprächsrunden in den Ortsteilen sowie ein webbasiertes lagegenaues Hochwasser/Schaden-Erfassungstool zur Datenerhebung. Erfasst und lagegenau verortet wurden Daten zu Niederschlägen und Unwettererscheinungen, Überflutungen und resultierenden Schäden sowie zur Hochwasserabwehr und

Bewältigung. Eine nachfolgende Analyse dient der Plausibilisierung der erhobenen Daten sowie deren statistischer Einordnung (soweit möglich).

3.1.1 Datenerhebung

3.1.1.1 Gesprächsrunden

Eine Gesprächsrunde umfasste 3 Phasen:

- Vorbereitungsphase: Organisation und Einladung von Einwohnern (mit Unterstützung der Stadtverwaltung und Ortschaftsräten)
- Durchführungsphase: Projektvorstellung und Datenerhebung
- Nachbereitungsphase: Daten-Nachlese, Gespräche mit Einwohnern und Ortswehrleitern zu einzelnen Aspekte der Gesprächsrunden, Auswertung

Die Datenerhebung selbst wurde mit einem ereignisbezogenen Erfassungsbogen und anhand einer digitalen Karte (bereitgestellt per Laptop) für die Verortung durchgeführt. Diese „offline“-Variante der Datenerfassung wurde gewählt, da nicht immer eine Internetanbindung gewährleistet werden konnte. Meist erfolgte das Ausfüllen des Erfassungsbogens zusammen mit den Einwohnern im direkten Gespräch. Zusätzlich wurden Informationen am Flipchart mittels analoger Karte erfasst. Die Gesprächsrunden wurden einer Evaluierung durch die Teilnehmer unterzogen.

3.1.1.2 Webbasiertes Hochwasser/Schaden-Erfassungstool

Im Rahmen des Projektes wurde ein webbasiertes Hochwasser/Schaden-Erfassungstool für eine langfristige Datengewinnung entwickelt. Das Tool richtet sich vor allem an die Bevölkerung, aber auch an Einsatzkräfte z. B. der Freiwilligen Feuerwehr, um mitzuhelfen, Daten zu Hochwasserereignissen, deren Ursachen und Auswirkungen sowie deren Bewältigung systematisch und zielorientiert zu erfassen. Im Fokus stehen dabei kleinräumige Extremereignisse wie akut und lokal auftretender Starkregen und Sturzfluten und daraus erwachsende Überflutungen und Schäden. Nach der Verortung der Überflutung/Schadstellen in der Karte werden die Informationen zum Ereignis mit einem einfachen Formular abgefragt. Zusätzlich können Fotos hochgeladen werden. Die erfassten Daten helfen Gefahrenhotspots im Gebiet abzuleiten sowie Ereignisabläufe besser zu rekonstruieren. Das Hochwasser/Schaden-Erfassungstool wurde pilothaft für die Stadt Glashütte erarbeitet. Bürgerinnen und Bürger der Stadt Glashütte können so Informationen zu Hochwasser und Starkregenereignissen im gesamten Gemeindegebiet hinzufügen (siehe Bekanntmachung im Amtsblatt 09/2017). Das Erfassungstool inklusive Kurzanleitung ist über die Projekthomepage <http://vereint.cimtt.de> zugänglich und besitzt einen Zugang zu Testzwecken. Abbildung 2 gibt einen Einblick in den Aufbau und zeigt die „mobile“ Variante auf einem Outdoor-Tablet.

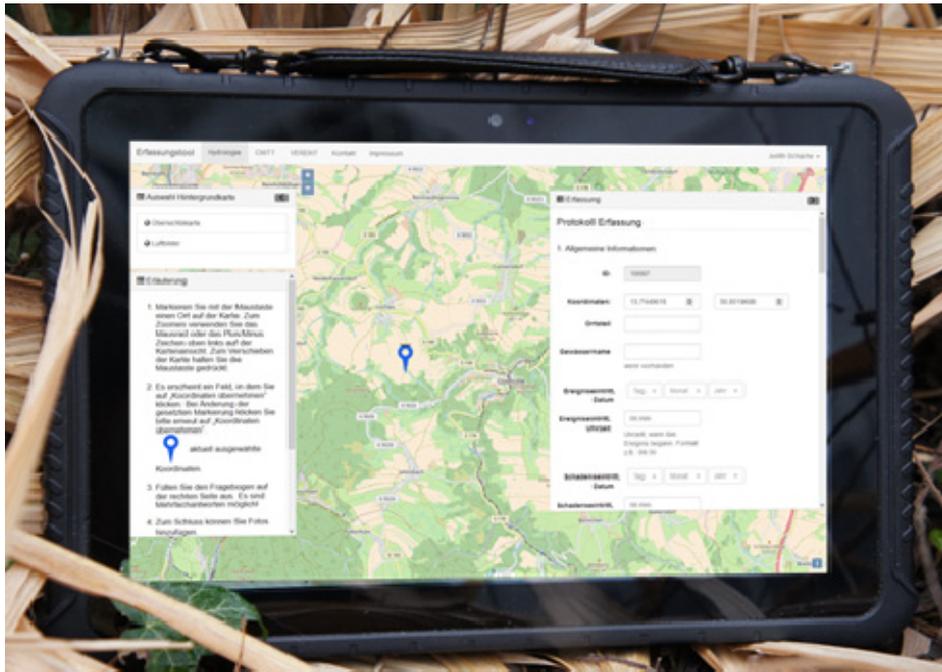


Abb. 2: Mobiles webbasiertes Hochwasser/Schaden-Erfassungstool

3.1.2 Datenauswertung

Zur Auswertung wurden die Informationen aus den unterschiedlichen Quellen (Gesprächsrunder, Erfassungsbogen, Erfassungstool, Informationen und Bildmaterial von Anwohnern, Informationen der Feuerwehr und Stadtverwaltung, ...) systematisch erfasst, verarbeitet und in einer gemeinsamen Projektdatenbank (Typ PostgreSQL) abgelegt. Diese bildete die Grundlage für die Analyse und Visualisierung der Ergebnisse der Bürgerbefragungen.

Weiterhin wurden die Einzugsgebiete der Fließgewässer in den Ortsteilen unter hydrologischen Gesichtspunkten auf Basis breitenverfügbarer Geoinformationen mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) analysiert. Hierzu zählen Analysen von Geländegefälle, Entwässerungsrichtung und Abflussakkumulation unterstützt durch Informationen zu Bodeneigenschaften und Landnutzung.

Ursache der Überflutungen sind von meteorologischer Seite meist extreme Niederschläge, die kleinräumig und von kurzer Dauer sein können. Entsprechende Niederschlagsmessstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind z. B. in Dippoldiswalde und Zinnwald vorhanden. Diese liegen allerdings außerhalb des Projektgebietes. Deshalb wurde das RADOLAN-RW Produkt des DWD verwendet (DWD 2018), um die Niederschlagsereignisse in ihrer räumlichen Ausdehnung und Intensität zu beschreiben und zu analysieren. Hierbei handelt es sich um Stundenwerte des Niederschlags in ca. 1 km² räumlicher Auflösung, die mit dem Regenradar gemessen und im Nachgang der Niederschläge mit den Messwerten von Bodenstationen korrigiert (angeeicht) wurden. Für eine abschließende Bewertung und statistische Einordnung der Ereignisse wurden die Gebietsniederschläge mit den KOSTRA-Daten des DWD verglichen (DWD 2015).

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Hochwasser und Starkregenereignisse im Überblick

Aufzeichnungen zu Hochwassern im Flussgebiet der Müglitz gehen bis in das 15. Jahrhundert zurück (Pohl 2003), wobei sich diese meist direkt auf die Müglitz beziehen. Im Hinblick auf das Untersuchungsziel, Informationen zu Hochwasser und Überflutungen auch als Folge von Starkregen und Sturzfluten speziell in den kleinen Nebenflüssen zu erheben, gibt Tabelle 1 eine Übersicht der erfassten Ereignisse sowie deren Typs in den ausgewählten Ortsteilen der Stadt Glashütte seit dem Hochwasser 2002.

Tab. 1: Hochwasserereignisse in ausgewählten Ortsteilen der Gemeinde Glashütte seit 2002

Hochwasser / Überflutung	Johnsbach	Dittersdorf	Hirschbach	Reinhardtsgrimma	Typ
12.08.2002	X	X	X	X	Großräumig
17.03.2005	X				Schneesmelze
Apr 2006		X			Schneesmelze
27.06.2006			X		Starkregen
09.07.2006				X	Starkregen
15.06.2009				X	Starkregen
01.07.2009				X	Starkregen
04.07.2009	X			X	Starkregen
16.06.2012	X	X			Starkregen
02./03.06.2013	X	X	X	X	Großräumig
09.06.2013			X	X	Starkregen

3.2.2 Analyse und statistische Einordnung der Niederschläge

Die Hochwasserereignisse im August 2002 und Juni 2013 wurden in allen Ortschaften registriert, wobei das Hochwasser 2002 aufgrund seiner verheerenden Auswirkungen und katastrophalen Zerstörungen am nachhaltigsten in Erinnerung blieb (Stadtverwaltung Glashütte, 2012). Bei beiden Ereignissen handelt es sich um großräumige, überregionale Ereignisse, die auch zu extremen Abflüssen und Wasserständen an der Elbe führten. Ursächlich für beide Ereignisse war eine sogenannte V(b)-Wetterlage, die über die Adria (Mittelmeer) nach Norden ziehend, besonders in den Sommermonaten große, warme, feuchte Luftmassen transportiert. Deren Hebung an den Gebirgsketten, wie z. B. dem Erzgebirge, begünstigt das Abregnen was mit großen Niederschlagsmengen einhergeht. Das Auftreffen auf eine von Norden heranziehende Kaltfront wie im Jahre 2002 kann zu zusätzlich verstärkenden Effekten führen. Insofern ist die Ursache der Ereignisse zwar ähnlich, deren Verlauf aber deutlich anders. Während im August 2002 bisher noch nie in der Region gemessene Niederschlagsmengen in kurzer Zeit fielen, führte eine Folge von intensiven Regenereignissen im Mai und Juni 2013 zu einer sukzessiven Aufwechtlung der Gebiete und letztendlich vollen Bachläufen und Überflutungen, wobei deren Zeitpunkt aufgrund räumlich und zeitlich variabler Niederschlagsintensitäten variierte. So zeigt die Auswertung der Messungen mit dem Regenradar im Stadtgebiet Niederschlagsmengen im Mai 2013 von bis zu 270 l/m² gefolgt von zwei Niederschlagsereignissen vom 01.06.-03.06.2013 und am 09.06.2013 mit Niederschlagsmengen von 134,5 l/m² resp. 67,5 l/m² (Radarzelle mit dem höchsten Wert). Bezogen auf die Dauer der Ereignisse zeigt die

Analyse der Jährlichkeit, dass derartige Mengen statistisch einmal in 10 resp. 20 Jahren auftreten können (Tabelle 2). Messungen des Niederschlags am Boden ergaben im Zeitraum 01.06.-03.06.2013 80 l/m² Niederschlag in Glashütte (Hanzsch 2014) und 130 l/m² in Johnsbach (Fiß 2013).

Tab. 2: Niederschlagsereignisse und Mengen sowie deren statistische Einordnung für ausgewählte Hochwasser im Gemeindegebiet

Hochwasser / Überflutung	Niederschlag Beginn (MEZ)	Niederschlag Ende (MEZ)	Dauer ¹ [h]	Maximale Niederschlagsmenge [mm]	statistische Jährlichkeit [a]
27.06.2006	27.06.2006 17:00	27.06.2006 19:00	2	48.7	20
09.07.2006	09.07.2006 11:00	09.07.2006 13:00	2	30.9	2 – 5
15.06.2009	15.06.2009 16:00	15.06.2009 19:00	3	23.5	1
01.07.2009	01.07.2009 16:00	01.07.2009 18:00	2	18	< 1
04.07.2009	04.07.2009 16:00	04.07.2009 18:00	2	50.4	20
16.06.2012	16.06.2012 15:00	16.06.2012 17:00	2	106	>> 100
02./03.06.2013	01.06.2013 05:00	03.06.2013 17:00	60	134.5	10
09.06.2013	09.06.2013 11:00	09.06.2013 18:00	7	67.6	20

In den Sommermonaten 2006, 2009, 2012 führten heftige Gewitter, teilweise verbunden mit Hagel, zu Überflutungen und Hochwasser in einzelnen Ortschaften. Insgesamt konnten 6 Starkregenereignisse im Zeitraum 2006 – 2012 durch die Befragungen erfasst und mit entsprechenden Niederschlagsmengen durch die Radarniederschläge des Radolan-RW Produktes belegt werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Zeiträume, Dauer und maximalen Niederschlagsmengen sowie deren statistische Einordnung. Derart konvektive Ereignisse sind typisch für die Jahreszeit. Sie sind von kurzer Dauer (3 h und weniger), besitzen eine geringe räumliche Ausdehnung und treten nur lokal auf, was z. B. gut an der Auswertung der Radarniederschläge zu erkennen ist. Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Ereignis vom 04.07.2009 und 16.06.2012. Entsprechend Tabelle 2 wurde die maximale Niederschlagsmenge für das Ereignis (Zellenwert) vom 04.07.2009 zu 50,4 mm bestimmt, was bei einem zweistündigen Niederschlag einer statistischen Jährlichkeit von 20 Jahren entspricht. Das Ereignis vom 16.06.2012 zeigt hier deutlich größere Werte, die allerdings mit Vorsicht bewertet werden müssen, da eine derart große Menge deutlich größere Auswirkungen hätte hinterlassen müssen. Ursächlich hierfür können auch Probleme der Niederschlagsmessung mit dem Radar sein, die in Expertenkreisen auch eher als Niederschlagsschätzung bezeichnet wird. Während das Ereignis vom 04.07.2009 gut durch lokale Beobachtungen am Boden referenziert werden kann, ist dies für das Ereignis vom 16.06.2012 nicht möglich. Dokumentiert sind hierfür z. B. Zerstörungen am Eselsweg (Fiß 2013), nicht jedoch in Dittersdorf, dem vermeintlichen Zentrum des Ereignisses gemäß Abbildung 3.

Bezogen auf die statistische Einordnung der Ereignisse ist festzuhalten, dass diese lediglich auf Basis der Niederschläge erfolgt und sich auf die Radarzelle mit der größten Niederschlags-

¹ Die Dauer wurde aus dem Radolan-RW Produkt abgeleitet. Da dieses nur in stündlicher Auflösung vorliegt, kann die tatsächliche Ereignisdauer durchaus kürzer sein.

menge bezieht. Die hierfür verwendeten KOSTRA-Daten basieren auf der statistischen Auswertung langjähriger Beobachtungen am Boden (Punktmessungen). Bezogen auf ein Gebiet können deshalb durchaus mehrere Ereignisse mit hohen Jährlichkeiten auftreten, wenn dies an unterschiedlichen Orten (resp. Radarzellen) passiert. Rückschlüsse auf die Jährlichkeit des Abflusses sind damit jedoch nicht möglich, da für die Abflussbildung auch der Gebietszustand (Vorfeuchte) von Bedeutung ist. Zudem sind im Gemeindegebiet keine kontinuierlichen Messungen des Durchflusses vorhanden, die eine statistische Analyse der Hochwasser in den Fließgewässern unterstützen würden.

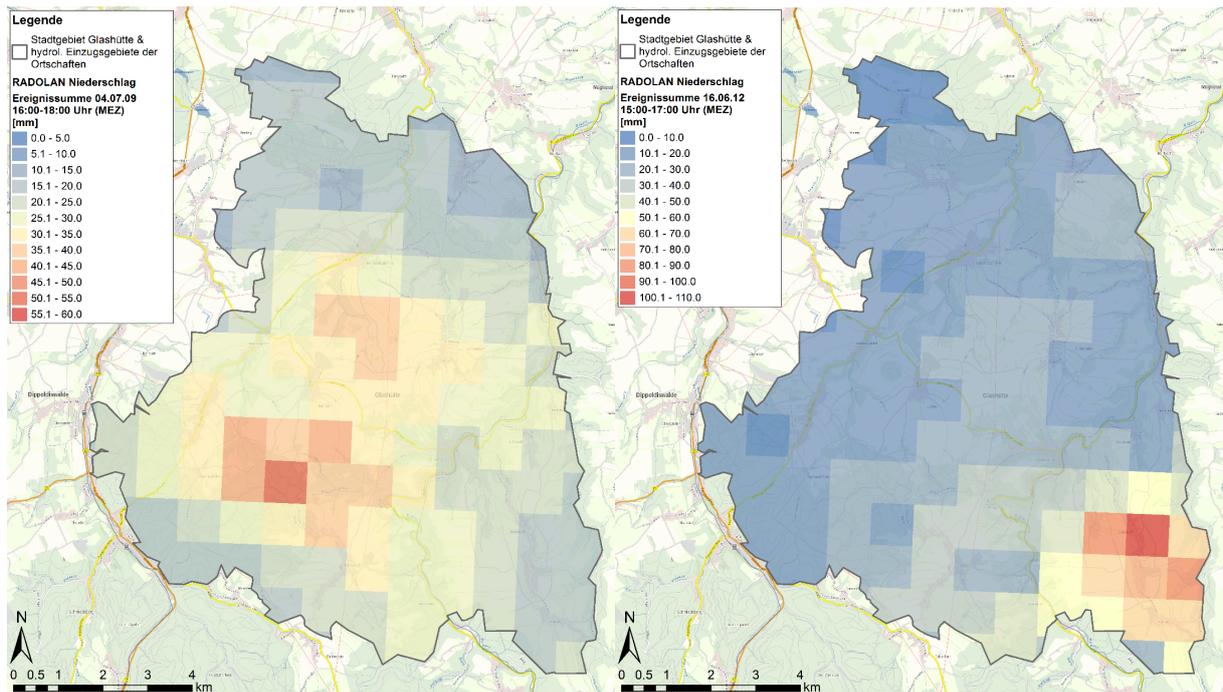


Abb. 3: Niederschlagsmenge und –verteilung für die Ereignisse vom 04.07.2009 (links) und 16.06.2012 (rechts) ermittelt aus dem RADOLAN-RW Produkt (Quelle Hintergrundkarte: GeoSN)

3.2.3 Auswirkungen der Niederschlagsereignisse in den Ortsteilen

Überflutungen und Schäden konnten durch die Datenerhebung in den Ortsteilen zahlreich erfasst werden. Die Datenbank weist hierzu über 80 Einträge auf. Aus den erfassten Daten können Gefahrenhotspots im Gebiet abgeleitet und Ereignisabläufe besser rekonstruiert werden. Auswertungskriterien hierfür waren die Ursachen von Überflutungen (Gewässer, Oberflächenwasser, Grundwasser etc.) und Schäden (Wasser, Schlamm, Geröll etc.) sowie Häufigkeit der Auswirkungen (überflutete vs. geschädigte Objekte). Im Hinblick auf Abwehr und Bewältigung interessierte vor allem mit welchen Mitteln die Einwohner bisher gegen Hochwasser agierten und in welchem Maß externe Hilfe durch Nachbarn und Einsatzkräfte vorhanden war. Zudem konnten wertvolle Hinweise zu Unwetterverläufen sowie Beobachtungen von Oberflächen- und Grundwasser erfasst werden. Diese empirischen Befunde zeigt beispielhaft Abbildung 4.



Abb. 4: Empirische Befunde zu Wettergeschehen, Oberflächen- und Grundwasser

Allgemein wurden Überflutungen hauptsächlich durch das Überlaufen der Bäche selbst (meist in Verbindung mit Rückstau an Durchlässen) sowie wild abfließendes Oberflächenwasser verursacht und führten teilweise zu Schäden an Grundstücken, Gebäuden (vollgelaufenen Kellern), Zuwegungen und Durchlässen/Brücken. Probleme mit aufsteigendem Grundwasser traten vereinzelt auf. Die Problemstellen sind der Freiwilligen Feuerwehr größtenteils bekannt. Allerdings finden speziell bei Starkregen Einsätze der Feuerwehr meist nach den Ereignissen statt, was mit der kurzen Ereignisdauer und fehlender Vorwarnung erklärbar ist.

Große Bedenken wurden seitens der Bevölkerung besonders hinsichtlich Starkregen und dem damit einhergehenden Risiko der Bodenerosion insbesondere in Verbindung mit Maisanbau geäußert. Beobachtungen dieses Phänomens wurden aus allen Ortsteilen berichtet. Weiterhin bewegte die Bürger die Leistungsfähigkeit der Durchlässe sowie die Gewässerunterhaltung.

4. Modellbasierte Rekonstruktion der Hochwasserereignisse

Die bisherigen Erhebungen und Analysen ermöglichen eine Bewertung der Gefährdung basierend auf den Erfahrungen der Bürger mit den Ereignissen der Vergangenheit. Sie erlauben jedoch keine umfassende, statistische Bewertung sowie Einschätzung zukünftiger Gefahren. Dies erfordert den Einsatz von hydrologischen Modellsimulationen mit Hilfe von Niederschlags-Abfluss Modellen. Allerdings handelt es sich bei den Gebieten durchweg um unbeobachtete Einzugsgebiete die keine Abflussbeobachtungen für eine für eine Modellkalibrierung aufweisen. Deshalb erfolgt anhand von Fotos und qualitativen Informationen der Bevölkerung zu beobachteten Oberflächenabflüssen die Rekonstruktion von Hochwassern. Basierend auf Vermessungen von Querprofilen und historischer Wasserstände sind Rückschlüsse auf die Durchflussmengen und eine Bewertung der Hochwassergefährdung möglich. Hierzu wird das hydrodynamisch/hydraulische Modell HecRas 5.0.3 (Brunner 2016) verwendet. Beispielhaft zeigt Abbildung 5 (links) das Hochwasser vom 4.7.2009 in Johnsbach mit einem Abfluss von ca. $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ um 17:45 Uhr. Die anschließende Simulation der Niederschlags-Abfluss Prozesse wird mit dem prozessorientierten, hydrologischen Modell WaSiM-ETH 10.00.03 (Schulla 2017) durchgeführt, das über ein 2D-Oberflächen-abflussmodul verfügt. Als Niederschlagsinput dient das RADOLAN-RW Produkt, für das ein Downscaling auf 5 min-Zeitschritte mit Hilfe der gemessenen Reflektivitäten des RADOLAN-RX Produktes erfolgte. Abbildung 5 (rechts) zeigt beispielhaft für das Ereignis am 4.7.2009 in Johnsbach die simulierten Oberflächenabflüsse auf einem 10m Raster mit WaSiM-ETH, deren Abgleich mit Beobachtungen (Abbildung 4) eine zusätzliche qualitative Bewertung der Modellkalibrierung und den Modelleinsatz zur Analyse der Hochwasserentstehung erlaubt.

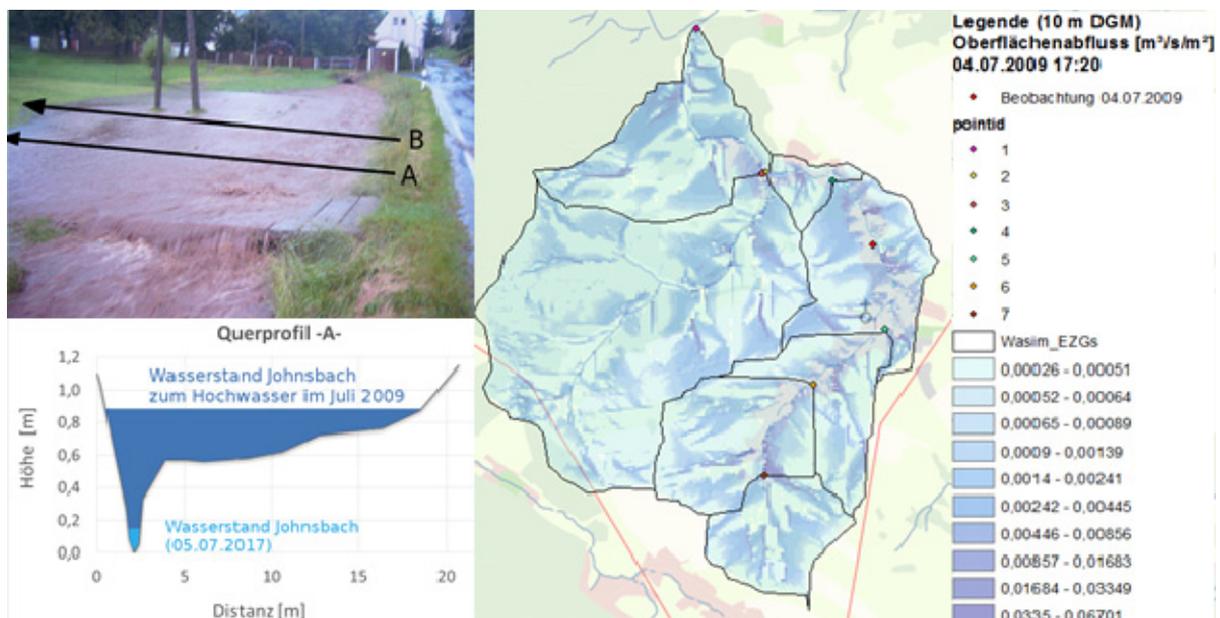


Abb. 5: Hochwasser 2009 in Johnsbach (oben links © Fiß) und rekonstruiertes Querprofil (unten links), sowie simulierte Oberflächenabflüsse (rechts)

5. Ausblick

Mit Hilfe der erarbeiteten Modelle wird eine Analyse Hochwasser auslösender Situationen resp. Wetterlagen durchgeführt, die eine Bewertung der Gefährdung für bisher unbeobachtete, extreme Ereignisse erlaubt. Darauf aufbauend werden einerseits Möglichkeiten der Hochwasserwarnung untersucht, die auch eine Verdichtung des Bodenmessnetzes sowie den Einsatz von Wetterbeobachtern beinhalten können. Andererseits dienen die Simulationsergebnisse der Entwicklung und Planung von Maßnahmen zur Hochwasserabwehr und Bewältigung zusammen mit der Gemeinde und der Feuerwehr. Hier setzt auch das Konzept zum Einbeziehen ungebundener Helfer an. Dabei wird auch die bisherige Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren zur (Katastrophen-) Bewältigung untersucht, um das kooperative Handeln von Einsatzkräften zu verbessern. Hierfür werden Trainingsszenarien entwickelt und bereitgestellt, mit deren Hilfe die Zusammenarbeit erprobt und das Verständnis für die Arbeit der Einsatzkräfte untereinander vertieft wird.

Literatur

- Bernhofer, C., Matschullat, J., Bobeth, A. 2011. Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden, Rhombos Verlag, Berlin.
- Brunner, G., 2016. HEC-RAS User's Manual CPD-68. Version 5.0.3.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) - Hydrometeorologie, 2015. KOSTRA-DWD-2010 Starkniederschlagshöhen für Deutschland, https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/bericht_kostra_dwd_2010_pdf.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) - Hydrometeorologie, 2018. Hoch aufgelöste Niederschlagsanalyse und –vorhersage auf der Basis quantitativer Radar- und Ombrometerdaten für grenzüberschreitende Fluss-Einzugsgebiete von Deutschland im Echtzeitbetrieb, https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/radolan_radvor_op_komposit_format_pdf.
- Fiß, W., 2013. Ortschronik Johnsbach. Eigenverlag.
- GeoSN, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen, 2015. Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). 27.04 2015.
- Hanzsch, V., 2014. Jahresbericht der Freiwilligen Feuerwehr Glashütte für das Jahr 2013. Freiwillige Feuerwehr Glashütte.
- Pohl, R., 2003. Hochwasser im Erzgebirge in der Vergangenheit, Institut für Wasserbau TU Dresden, Dresden.
- Schulla, J., 2017. Model Description WaSiM. Zürich.
- Stadtverwaltung Glashütte, 2012. Stadt Glashütte - Zehn Jahre nach der Jahrhundertflut 2002. [Hrsg.] Stadtverwaltung Glashütte. ISBN (13) 978-3-936642-12-4.
- Thieken, A., 2015. Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. [Hrsg.] Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Bonn, S. 207.

Verzeichnis der Autoren

Becker, Andreas, Dr., Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main, Email: andreas.becker@dwd.de

Bender, Jens, Dr.-Ing., Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57068 Siegen, Email: jens.bender@uni-siegen.de

Berkhahn, Simon, M.Sc., Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik im Bauwesen, Leibnitz Universität Hannover, Appelstraße, 9a, 30167 Hannover, Email: berkhahn@hydromech.uni-hannover.de

Blöschl, Günter, Prof. Dr., Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Vienna University of Technology, Karlsplatz 13, 1040 Wien, Email: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Brendel, Christoph, Dr., Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main, Email: christoph.brendel@dwd.de

Broich, Karl, Dr.-Ing., Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Arcisstraße 21, 80333 München, Email: karl.broich@tum.de

Disse, Markus, Univ.-Prof. Dr.-Ing, Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Arcisstraße 21, 80333 München, Email: markus.disse@tum.de

Feng, Yu, M. Sc., Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibnitz Universität Hannover, Appelstraße 9q, 30167 Hannover, Email: yu.feng@ikg.uni-hannover.de

Fuchs, Lothar, Dr.-Ing., Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Engelbosteler Damm 22, 30167 Hannover, Email: l.fuchs@itwh.de

Graf, Thomas, Prof. Dr.-Ing., Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik im Bauwesen, Leibnitz Universität Hannover, Appelstraße, 9a, 30167 Hannover, Email: graf@hydromech.uni-hannover.de

Grundmann, Jens, Dr., Technische Universität Dresden, Professur Hydrologie, Bergstraße 66, 01062 Dresden, Email: jens.grundmann@tu-dresden.de

Gürke, Sebastian, M. Sc., Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57068 Siegen, Email: sebastian.guerke@uni-siegen.de

Haberlandt, Uwe, Prof. Dr.-Ing., Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße, 9a, 30167 Hannover, Email: haberlandt@iww.uni-hannover.de

Hafer, Mario, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main, Email: mario.hafer@dwd.de

Haslinger, Klaus, Abteilung für Klimaforschung: Klimasystem und Klimafolgen, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 83, 1190 Wien, Österreich, Email: klaus.haslinger@zamg.ac.at

Hofstätter, Michael, Abteilung für Klimaforschung: Klimasystem und Klimafolgen, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 83, 1190 Wien, Österreich, Email: m.hofstaetter@zamg.ac.at

Hoy, Andreas, Dr. rer. nat., Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung, Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden, Email: andreas.hoy@hlnug.hessen.de

Hübener, Heike, Dr. rer. nat., Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung, Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden, Email: heike.huebener@hlnug.hessen.de

Iber, Christian, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz, Email: Christian.Iber@lfu.rlp.de

Jacobeit, Jucundus, Prof. Dr., Institute of Geography, University of Augsburg, Alter Postweg 118, 86159 Augsburg, Email: jucundus.jacobeit@geo.uni-augsburg.de

Jensen, Jürgen, Univ.-Prof. Dr.-Ing., Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57068 Siegen, Email: juergen.jensen@uni-siegen.de

Junghänel, Thomas, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main, Email: thomas.junghaenel@dwd.de

Kaiser, Maria, M. Sc., Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Arcisstraße 21, 80333 München, Email: maria.kaiser@tum.de

Klameth, Anna, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Messnetze und Daten, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main, Email: Anna.klameth@dwd.de

Komma, Jürgen, Dr., Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Vienna University of Technology, Karlsplatz 13, 1040 Wien, Email: komma@hydro.tuwien.ac.at

Kreibich, Heidi, PD Dr., GFZ Helmholtz Zentrum Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Email: kreib@gfz-potsdam.de

Lehmann, Kerstin, Dipl.-Ing., Technische Universität Dresden, CIMTT Zentrum für Produktionstechnik und Organisation, Bergstraße 66, 01062 Dresden, Email: kerstin.lehmann@tu-dresden.de

Lin, Qing, M. Sc., Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Arcisstraße 21, 80333 München, Email: tsching.lin@tum.de

Ludwig, Ralf, Prof. Dr., Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Luisenstraße 37, 80333 München, Email: r.ludwig@lmu.de

Mitterer, Johannes, M. Sc., Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Arcisstraße 21, 80333 München, Email: johannes.mitterer@mytum.de

Müller, Christoph, M. Sc., Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hans-Högn-Straße 12, 95030 Hof/Saale, Email: Christoph.Müller@lfu.bayern.de

Neuweiler, Insa, Prof. Dr. rer. nat., Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik im Bauwesen, Leibnitz Universität Hannover, Appelstraße, 9a, 30167 Hannover, Email: neuweiler@hydromech.uni-hannover.de

Nguyen, Hai, M. Sc., Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Boltzmannstraße 1, 85748 Garching bei München, E-Mail: Hai.Nguyen@lrz.de

Nied, Manuela, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Griesbachstraße 1, 76185 Karlsruhe, Email: Manuela.Nied@lubw.bwl.de

Peche, Aaron, M. Sc., Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik im Bauwesen, Leibnitz Universität Hannover, Appelstraße, 9a, 30167 Hannover, Email: peche@hydromech.uni-hannover.de

Pflugbeil, Thomas, M. Sc., Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Arcisstraße 21, 80333 München, Email: thomas.pflugbeil@tum.de

Pistotnik, Georg, Abteilung für Klimaforschung: Klimasystem und Klimafolgen, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 83, 1190 Wien, Österreich

Röhm, Patric, Dipl. Geograph, Technische Universität Dresden, Professur Hydrologie, Bergstraße 66, 01062 Dresden, Email: patric.roehm@tu-dresden.de

Rözer, Viktor, M. Sc., GFZ Helmholtz Zentrum Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Email: viktor.roezerb@gfz-potsdam.de

Sämman, Robert, M. Sc., Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik im Bauwesen, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße, 9a, 30167 Hannover, Email: saemann@hydromech.uni-hannover.de

Schache, Judith, M. Sc., Technische Universität Dresden, Professur Hydrologie, Bergstraße 66, 01062 Dresden, Email: judith.schache@tu-dresden.de

Sester, Monika, Prof. Dr.-Ing., Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9A, 30167 Hannover, Email: monika.sester@ikg.uni-hannover.de

Shehu, Bora, Dr.-Ing., Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße, 9a, 30167 Hannover, Email: shehu@iww.uni-hannover.de

Stahl, Natalie, Monitoring, Wasserhaushalt und Warndienste, Abteilung 5: Wasserwirtschaft und Bodenschutz, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Rosenkavalierplatz 2, 81925 München, Email: Natalie.Stahl@stmuv.bayern.de

von Trentini, Fabian, M. Sc., Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Luisenstraße 37, 80333 München, Email: fabian.trentini@lmu.de

Wahl, Julian, M. Sc., Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Engelbosteler Damm 22, 30167 Hannover, Email: j.wahl@itwh.de

Walawender, Ewelina, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main, Email: ewelina.walawender@dwd.de

Weigl, Elmar, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main, Email: elmar.weigl@dwd.de

Willkofer, Florian, M. Sc., Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Luisenstraße 37, 80333 München, Email: florian.willkofer@lmu.de

Winterrath, Tanja, Dr., Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main, Email: tanja.winterrath@dwd.de

Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Bisher erschienene Hefte

- Heft 01.02 Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleitern und Oberflächengewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2002 am 20./21. März 2002 in Suderburg
Herausgeber: Hartmut Wittenberg und Matthias Schöniger
210 Seiten, 63 Abbildungen, Format A4
ISBN: 3-936514-22-4 vergriffen
- Heft 02.02 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Beiträge zum Seminar am 7./8. November 2002 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
201 Seiten, 43 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-936514-26-7 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erschienen als Heft 02.03
Beiträge zum Seminar am 12./13. Juni 2003 in Weimar
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-58-3 vergriffen
- Heft 03.03 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 12./13. Mai 2003 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 32 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erscheinen als Heft 03.05
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
- Heft 04.03 Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2003 am 20./21. März 2003 in Freiburg i.Br.
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
Band1 Vorträge, 270 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 194 Seiten 105 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-59-1 vergriffen
- Heft 05.04 Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2004 am 22./23. März 2004 in Potsdam
Herausgeber: Axel Bronstert, Annegret Thieken, Bruno Merz,
Michael Rode, Lucas Menzel
Band1 Vorträge, 221 Seiten, 88 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 315 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-18-6 beide Bände zusammen 45 EUR
- Heft 06.04 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 17./18. Juni 2004 in Münster
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
172 Seiten, 61 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-19-4 vergriffen

Heft 07.04	<p>Niedrigwassermanagement Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Gero Koehler 172 Seiten, 82 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-47-X</p>	vergriffen
Heft 08.05	<p>Hochwasser-Gefahrenkarten Teil 1: Erarbeitung und Nutzung von Hochwassergefahrenkarten Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 24. November 2004 in Erfurt Teil 2: Zonierungssystem und Risikomodellierung in der Versicherungswirtschaft Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 140 Seiten, 34 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-48-8</p>	vergriffen
Heft 03.05	<p>Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund Aktualisierte Neuauflage von Heft 03.03 Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg 185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-924063-57-5</p>	vergriffen
Heft 09.05	<p>Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 159 Seiten, 44 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-67-4</p>	vergriffen
Heft 10.05	<p>Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft – von der Theorie zum Anwendungsfall Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005 am 22./23. März 2005 in Aachen Herausgeber: Heribert Nacken, Sabine Bartussek, Hani Sewilam 314 Seiten, 131 Abbildungen, 25 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-68-2</p>	42 EUR, CD 29 EUR
Heft 11.05	<p>Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte Beiträge zum Seminar am 2./3. Juni 2005 in Braunschweig Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon 200 Seiten, 75 Abbildungen, Format A4 ISBN 3-937758-80-1</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 12.05	<p>Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz Herausgeber: Matthias Adler und Hans-B. Kleeberg 172 Seiten, 120 Abbildungen, 8 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-90-9</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 13.05	<p>Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele Herausgeber: Axel Bronstert Monographie, 2005 148 Seiten, 81 Abbildungen, 12 Tabellen, Format A4 ISBN 3-937758-91-7</p>	38 EUR, CD 29 EUR

Heft 14.06	<p>Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen Aktualisierte Neuauflage Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz Herausgeber: Hans-B. Kleeberg 205 Seiten, Format A4 ISBN-10: 3-939057-30-4 ISBN-13: 978-3-939057-30-7</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 15.06	<p>Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006 am 22./23. März 2006 an der Universität der Bundeswehr München Herausgeber: Markus Disse, Karin Guckenberger, Sabine Pakosch, Alpaslan Yörük, Astrid Zimmermann Band 1 Vorträge 1, 278 Seiten Band 2 Vorträge 2, 338 Seiten Band 3 Poster, 280 Seiten ISBN-10: 3 939057-31-2 ISBN-13: 978-3-939057-31-4</p>	<p>beide Vortragsbände zusammen 50 EUR Posterband zusätzlich/alleine 15 EUR</p>
Heft 16.06	<p>Niederschlag-Abfluss-Modellierung Beiträge zum Workshop am 10./11. April 2006 in Trier Herausgeber: Markus Casper und Marcus Herbst 195 Seiten, Format A4 ISBN-10: 3-939057-55-X ISBN-13: 978-3-939057-55-0</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 17.06	<p>Dezentraler Hochwasserschutz Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg 188 Seiten, Format A4 ISBN-10: 3-939057-56-8 ISBN-13: 978-3-939057-56-7</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 18.06	<p>Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte Beiträge zum Seminar am 6./7. November 2006 in Stein bei Nürnberg Herausgeber: Hans-B. Kleeberg, Heribert Nacken 232 Seiten, Format A4 ISBN-10: 3-939057-57-6 ISBN-13: 978-3-939057-57-4</p>	45 EUR, CD 29 EUR
Heft 19.07	<p>Dezentraler Hochwasserschutz Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg 196 Seiten, Format A4 ISBN-13: 978-3-940173-03-4</p>	48 EUR, CD 29 EUR

- Heft 20.07 Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007 am 22./23. März 2007
an der Universität Rostock
Herausgeber: Konrad Miegel, Ellen-Rose Trübger, Hans-B. Kleeberg
Band 1 Vorträge, 276 Seiten
Band 2 Poster, 17 Seiten beide Bände zusammen 60 EUR, , CD 29 EUR
ISBN: 978-3-940173-04-1
- Heft 21.07 Verdunstung
Beiträge zum Seminar am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam
Herausgeber: Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg
252 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-05-8 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 22.07 EU-Hochwasserrichtlinie
Wohin geht die Reise beim Europäischen Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 19./20. November 2007 in Koblenz
Herausgeber: Heribert Nacken
126 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-44-7 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 23.08 Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung
– Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008 am 27./28. März 2008
an der Leibniz Universität Hannover
Herausgeber: Uwe Haberlandt, Bernd Riemeier,
Max Billib, Hans-Reinhard Verworn, Hans-B. Kleeberg
300 Seiten, Format A4, mit Poster-CD
ISBN: 978-3-940173-96-6 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 24.08 Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?
Beiträge zum Symposium am 24./25. Juni 2008 in Nürnberg
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
256 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-97-3 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 25.09 EU-Hochwasserrichtlinie
In drei Schritten zur Umsetzung
Beiträge zum Seminar am 19. Februar 2009 in Magdeburg
Herausgeber: Heribert Nacken
126 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941089-53-2 48 EUR, CD 29 EUR
- Heft 26.09 Hydrologische Systeme im Wandel
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2009 am 26./27. März 2009
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Herausgeber: Nicola Fohrer, Britta Schmalz,
Georg Hörmann, Katrin Bieger
196 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941089-54-9 48 EUR, CD 29 EUR

- Heft 27.10 Auen und Hochwasser
Beiträge zum Internationalen Symposium am 10./11. Februar 2010
in Ingolstadt
Herausgeber: Bernd Cyffka, Hans-B. Kleeberg
226 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-08-3 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 28.10 Abflüsse aus extremen Niederschlägen
Beiträge zum 2. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung
am 14./15. September 2009 in Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz
245 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-22-9 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 29.10 Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von
Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2010 am 25./26. März 2010
an der Technischen Universität Braunschweig
Herausgeber: Günter Meon
283Seiten, Format A4, mit Poster-CD
ISBN: 978-3-941897-49-6 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 30.11 Hydrologie & Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2011 am 24./25. März 2011
an der Technischen Universität Wien
Herausgeber: Günter Blöschl, Ralf Merz
394 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-941897-79-3 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 31.12 Wasser ohne Grenzen
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2012 am 22./23. März 2012
an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Herausgeber: Markus Weiler
413 Seiten, Format A4, mit Poster-CD
ISBN: 978-3-942964-38-8 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 32.13 Wasserressourcen im globalen Wandel: Hydrologische Grundlagen -
von der Messung zur Anwendung
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2013 am 4.-6. April 2013
an der Universität Bern
Herausgeber: Rolf Weingartner, Bruno Schädler
199 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-942964-89-0 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 33.13 Simulation hydrologischer Systeme – Wie nah kommen wir der Realität?
Beiträge zum 3. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 17./18.
September 2012 in Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz
212 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-944328-02-7 50 EUR, CD 29 EUR

- Heft 34.14 Wasser - Landschaft - Mensch in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 20./21. März 2014 an der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt
Herausgeber: Bernd Cyffka
274 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-944328-61-4 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 35.15 Aktuelle Herausforderungen im Flussgebiets- und Hochwassermanagement
Prozesse | Methoden | Konzepte
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 19./20. März 2015 an der Universität Bonn
Herausgeber: Mariele Evers, Bernd Diekkrüger
389 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-229-2
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.35.15
- Heft 36.16 Räumliche Heterogenität - Erkennen, Abbilden, Validieren oder Ignorieren?
Beiträge zum 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 5. und 6. Oktober 2015 in Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz
144 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-341-1
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.36.16
- Heft 37.16 Wasserressourcen – Wissen in Flussgebieten vernetzen
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 17./18. März 2016 in Koblenz, ausgerichtet von der Hochschule Koblenz und der Bundesanstalt für Gewässerkunde
Herausgeber: Gabriele Wernecke, Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Yvonne Strunck, Lothar Kirschbauer, André Müller
444 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-342-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.37.16
- Heft 38.17 Den Wandel messen – Wie gehen wir mit Nichtstationarität in der Hydrologie um?
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 23./24. März 2017 an der Universität Trier
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz, Rita Ley, Tobias Schütz
372 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-475-3
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.38.17
- Heft 39.18 M³ - Messen, Modellieren, Managen in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018 an der Technischen Universität Dresden
Herausgeber: Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Grundmann
393 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-606-1
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.39.18
- Heft 40.18 Starkregen und Sturzfluten – Erfassen, Erforschen, Evaluieren.
Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018 an der Technischen Universität München.
Herausgeber: Markus Disse, Maria Kaiser
92 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-88721-665-8
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.40.18

Mitglieder der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften erhalten auf den Preis einen Nachlass von 20 %
Ab 2015 erschienene Hefte sind unter <http://www.fghw.de> verfügbar.