

Gutachten

Verbesserung der Hochwasservorhersage für mittlere und kleine Fließgewässer, insbesondere im Mittelgebirge von Nordrhein-Westfalen

Auftraggeber: Landtag Nordrhein-Westfalen
PUA V - Hochwasserkatastrophe

Beweisbeschluss: Nr. 72 vom 25.02.2022

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach
Univ.-Prof. Dr. habil. Jorge Leandro
Univ.-Prof. Dr. Paolo Reggiani

Version: 1.0

Datum: 28.04.2022

Verfasser:

**Prof. Dr.-Ing.
Christoph Mudersbach**

Hochschule Bochum
Fachbereich Bau- und
Umweltingenieurwesen
Lehrgebiet Wasserbau und
Hydromechanik

und

ICM Ingenieurberatung
Prof. Dr. Mudersbach

Öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger
für Ingenieurhydrologie und Hydraulik
im Wasserbau (IHK Siegen)

Schelderberg 16A
57072 Siegen
Telefon: (0271) 313 429 68
E-Mail: cm@mudersbach-ing.de

**Univ.-Prof. Dr. habil.
Jorge Leandro**

Universität Siegen
Forschungsinstitut Wasser und
Umwelt (fwu)
Lehrstuhl für Hydromechanik und
Wasserbau

Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen
Telefon: (0271) 740-2172
E-Mail: jorge.leandro@uni-siegen.de

**Univ.-Prof. Dr.
Paolo Reggiani**

Universität Siegen
Forschungsinstitut Wasser und
Umwelt (fwu)
Lehrstuhl für Wasserwirtschaftliche
Risikobewertung und
Klimafolgenforschung

Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen
Telefon: (0271) 740-2162
E-Mail: paolo.reggiani@uni-siegen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Anforderungen an Hochwasservorhersagesysteme für kleine und mittlere Einzugsgebiete	2
3	Vorhersageunsicherheit	3
4	Klassen von Hochwasservorhersagesystemen und Voraussetzungen	5
4.1	Allgemeines	5
4.2	Modellbasierte Vorhersagesysteme	5
4.3	Datengetriebene Modelle	6
4.4	Eventbasierte und kontinuierliche Vorhersagesysteme	8
4.5	2D-Hochwasservorhersage	8
5	Hochwasservorhersagesysteme in NRW	9
5.1	Allgemeines	9
5.2	Landesweites Vorhersagesystem des LANUV NRW	10
5.3	Vorhersagesysteme der Wasserverbände	12
6	Hochwasservorhersagesysteme in anderen Bundesländern	13
6.1	Hessen	13
6.2	Rheinland-Pfalz	17
6.3	Baden-Württemberg	18
6.4	Bayern	21
6.5	Sachsen	25
7	Klimabedingte und anthropogene Veränderungen der Randbedingungen	26
8	Verbesserungspotenzial der Hochwasservorhersage in NRW für kleine und mittlere Einzugsgebiete	27
8.1	Allgemeines	27
8.2	Modellbasierte Vorhersagesysteme	29
8.3	Datengetriebene Niederschlag-Abfluss Modelle	30
8.4	Datengetriebene 2D Hochwasservorhersage	31
8.5	Verbesserung der Messdatenbasis	33
8.6	Kommunikation von Systemwarnungen an Entscheidungsträger	36
9	Fazit und Zusammenfassung	37

1 Einleitung

Auf seiner Sitzung am 25. Februar 2022 hat der vom Landtag NRW eingesetzte Parlamentarische Untersuchungsausschuss V (Hochwasserkatastrophe)¹ den Beweisbeschluss Nr. 72 gefasst und Prof. Dr. Christoph Mudersbach, Prof. Dr. Jorge Leandro und Prof. Paolo Reggiani Ph.D. mit der Erstellung eines gemeinsamen Gutachtens beauftragt zu dem Thema: **Verbesserung der Hochwasservorhersage für mittlere und kleine Fließgewässer, insbesondere im Mittelgebirge von Nordrhein-Westfalen.** Hierbei soll das bestehende Vorhersagesystem in NRW im Vergleich zum Stand der Technik anderer Bundesländern und die technische Weiterentwicklung dieser Systeme im Fokus stehen. Bei der Betrachtung der Weiterentwicklung der Systeme sollen klimabedingte Umweltveränderungen in den Blick genommen und entsprechender Bedarf bei der Klimafolgenanpassung skizziert werden.

Die Beauftragung durch den Vorsitzenden des Parlamentarischen Untersuchungsausschusses V, Herrn Witzel, erfolgte mit Schreiben vom 4. März 2022. Das Gutachten soll bis zum 30. April 2022 vorgelegt werden.

Das Hochwasserereignis vom 14./15. Juli 2021 führte trotz frühzeitiger Warnungen des Europäischen Flutwarnsystems EFAS² zu außergewöhnlichen Schäden und Menschenverlusten in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen. Auf eine detaillierte Beschreibung des Hochwasserereignisses selbst, dessen Entstehung und Auswirkungen wird in diesem Gutachten verzichtet und auf die einschlägigen Veröffentlichungen³ und Unterlagen des Untersuchungsausschusses⁴ verwiesen.

Im Zentrum des Gutachtens steht das oben beschriebene Beweisthema, wobei der vorgegebene Zeitrahmen zur Erstellung des Gutachtens keinen hohen Detaillierungsgrad der Ausführungen erlaubt. Insofern gibt das Gutachten zunächst einen Überblick über Vorhersagesysteme und deren Anforderungen (Abschnitte 2 und 4). Anschließend erfolgt eine kurze Beschreibung der Hochwasservorhersage in NRW und in anderen

¹ Einsetzungsbeschluss vom 9. September 2021, Drucksache 17/14944

² European Flood Awareness System: <https://www.efas.eu/en>

³ z.B. Junghänel et al. (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. Bis 19. Juli 2021, https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.pdf?__blob=publicationFile&v=6

⁴ z.B. Jüpner (2022): Gutachten zum Beweisbeschluss Nr. 16 vom 05. November 2021 zum Thema „Welche vorbeugenden Maßnahmen wären im Fall der zu untersuchenden Hochwasserkatastrophe ganz konkret bezogen auf den 14./15. Juli 2021 möglich gewesen, um die betroffenen Gebiete in NRW vor dem Hochwasser am 14./15. Juli 2021 zu schützen?“

Bundesländern (Abschnitte 5 und 6). Die Berücksichtigung von klimabedingten Veränderungen oder anderen veränderlichen Randbedingungen in der Hochwasservorhersage wird in Abschnitt 7 thematisiert. Schließlich wird das Verbesserungspotenzial der Hochwasservorhersage in NRW für kleine und mittlere Einzugsgebiete in Abschnitt 8 aufgezeigt, wobei die Autoren drei Punkte priorisieren würden (Abschnitt 9):

- Kurzfristiger Aufbau eines eventbasierten Hochwasservorhersagesystems und klimaresilienter Ausbau des Pegelmessnetzes.
- Mittelfristige Etablierung einer 2D Hochwasservorhersage (Prognose von Wasserständen und Überflutungsflächen)
- Verbesserung der administrativen Zuständigkeiten und Hochwassermeldeordnungen, sowie Einführung einer vereinheitlichten institutionellen und fachlichen Kommunikationsebene.

2 Anforderungen an Hochwasservorhersagesysteme für kleine und mittlere Einzugsgebiete

Ein System zur operationellen Hochwasservorhersage beruht auf einer Kette von verknüpften Rechenmodellen, welche den Abflussentstehungs- und Abflusskonzentrationsprozess (N-A-Prozess) in natürlichen und urbanen Einzugsgebieten belastbar simulieren. Ihre zentrale Aufgabe ist es, die Folge von Niederschlagsereignissen auf das Abflussverhalten von Einzugsgebieten in Gerinnen zu simulieren und die auftretenden Abfluss- oder Pegelstandswerte an kritischen Standpunkten zu prognostizieren. Dabei ist anzumerken, dass die entscheidende Größe fast immer der Pegelstand ist, da dieser mit der Höhe von Ufern oder Schutzvorrichtungen abgeglichen werden muss und den eigentlichen Gefahrenindikator darstellt. Kritische Warnpegelstände für einen Standort werden vorab bestimmt. Sobald der prognostizierte Pegelstand diese annähert, wird eine Warnung ausgerufen. Abflusswerte, wie sie von Niederschlag-Abflussmodellen errechnet werden, müssen anhand zuverlässiger Wasserstands-Abfluss-Beziehungen in Wasserstände umgewandelt werden, um sie mit den Warnpegelständen am Standort abzugleichen. Eine ständige Nachkalibrierung dieser empirischen Beziehungen ist somit essentiell für die operationelle Hochwasservorhersage und bedingt die Unterhaltung eines zuverlässigen hydrometrischen Messnetzes (Niederschlags- und Abflussmessstationen), welches die Datengrundlage des Hochwasservorhersagesystems bildet (vgl. Abschnitt 8.5).

Die oben erwähnte Modellkette wird mithilfe von Messdaten geeicht und von beobachteten und prognostizierten Niederschlags- und Temperaturdaten angetrieben. Letztere sind besonders im Zusammenhang mit der Schätzung von Verdunstung und Schneeschmelze von Bedeutung. Niederschlagsprognosen werden aus Wettermodellprognosen oder von Radar und Satellitenbildern abgeleitet, wobei die beiden letzten Produkte nur einen beschränkten Vorhersagezeitraum von wenigen Stunden gewährleisten. Darum ist in diesem Fall von „Jetzt-Vorhersage“ oder „Now-casting“ die Rede. Starkregenereignisse treten lokal auf und haben einen stark konvektiven Charakter, d.h. mit sehr hohen, kurzfristigen Niederschlagsintensitäten. Schwieriger ist die Vorhersage bei Bächen und Flüssen mit kleinem Einzugsgebiet. Hier steigt der Pegel sofort an und der Abfluss reagiert fast instantan auf den Niederschlag. Je größer das Einzugsgebiet, desto mehr spielen die hydrologischen Einzugsgebietsfaktoren eine Rolle. Hier können die meisten überregionalen Prognosen eine gute Vorhersage treffen. So ist zum Beispiel das Ereignis von Simbach im Jahr 2016 sehr schwer vorherzusagen gewesen. Das Einzugsgebiet ist nur 50 Quadratkilometer groß. Ein Donau-Hochwasser in Passau betrifft dagegen rund 50.000 Quadratkilometer und lässt sich damit besser prognostizieren.

Die Komplexität und Vielfalt der Daten verdeutlicht auch, wie schwierig es ist, genaue Prognosen zu erstellen. Neben den aktuellen Werten wie Wasserstand, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag werden weitere Faktoren und Prognosen berücksichtigt. Für jeden Fluss muss beispielsweise die Größe und Struktur des Einzugsgebietes bekannt sein, um für jeden Fluss Wasserhaushaltsmodelle (Hydrologie) erstellt zu können. In jedem Modell wird festgehalten, wie viel Wasser der Boden im Einzugsgebiet aufnehmen kann und wie voll der Bodenspeicher durch frühere Niederschläge ist. Dies ist wichtig, um die Aufnahmekapazität des Bodens und seine Fähigkeit, die Gesamtniederschlagsmenge zu reduzieren, abzuschätzen. Diese Modelle müssen ständig aktualisiert und kalibriert werden, da sonst die Gefahr von Fehlwarnungen steigt. Das ist auch der Grund, warum präzise Vorhersagen und Warnungen für kleinere Einzugsgebiete schwieriger werden. Hier wirken sich falsche Ausgangsbedingungen des Bodens viel stärker aus.

3 Vorhersageunsicherheit

Ein wichtiger Aspekt in der Prognose ist die Vorhersageunsicherheit, die entsprechend quantifiziert und eingeschränkt werden muss. Die Unsicherheit manifestiert sich darin, dass z.B. die Prognose eines Pegelstandes nicht als ein einzelner deterministischer Wert angenommen werden kann, sondern als eine um einen Mittelwert gestreute Größe zu verstehen ist, der bestimmte Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Diese Wahrscheinlichkeiten

müssen Entscheidungsträgern anschaulich und verständlich kommuniziert werden, um sie in der Entscheidungsfindung effizient zu unterstützen.

Die Ursachen der Unsicherheit sind unterschiedlich und liegen zum Einen in der unvermeidlichen Vereinfachung der Darstellung komplexer natürlicher Prozesse durch die Rechenmodelle, genannt epistemische Unsicherheit, und zum Anderen in der natürlichen Zufälligkeit der beschriebenen Prozesse, zusammengefasst als aleatorische Unsicherheit. Während die epistemische Unsicherheit prinzipiell durch bessere Modellbeschreibung eingeschränkt werden kann, ist die aleatorische Unsicherheit als gegeben hinzunehmen. Bedeutende Unsicherheiten entstehen vor allem in der Vorhersage des Niederschlags, in der Parametrisierung von N-A-Prozessen und in unvermeidbaren Messfehlern bei der Erhebung von Daten, die zur Modelleichung verwendet werden. Außerdem beruhen Rechenmodelle auf einer sehr starken Vereinfachung der Beschreibung komplexer physikalischer Prozesse, wie das N-A-Verhalten in gewöhnlich stark heterogenen Einzugsgebieten. Wie bereits erwähnt, wirken sich diese Unsicherheiten in kleineren Einzugsgebieten stärker aus als in großen, da sich in diesen die Prozessdarstellungsfehler eher ausgleichen statt aufschwingen.

Es ist auch selbstverständlich anzunehmen, dass mit zunehmender Länge des Vorhersagehorizonts die Streuung der Pegel- und/oder Abflussvorhersage entsprechend steigt, was vorwiegend der stark zunehmenden Unsicherheit in der Prognose des Niederschlags zuzuschreiben ist. Ein wichtiges Instrument zur Reduzierung der Vorhersageunsicherheit in der operationellen Hochwasservorhersage ist das Nachführen von Abfluss- und Niederschlagsmessungen in Echtzeit, mit deren Hilfe Modellzustände im Prognosesystem aktualisiert und entsprechend korrigiert werden können. Dadurch wird die Streuung der prognostizierten Pegel oder Abflusswerte an einem Standort erheblich reduziert und diese präziser geschätzt.

Wenn das Nachführen von Daten nicht möglich ist, kann alternativ mithilfe statistischer Verfahren die Streuung des Vorhersageergebnisses durch Miteinbeziehung des Erfahrungsverhaltens der eingesetzten Rechenmodelle entsprechend reduziert werden. Diese Vorgehensweise beruht auf Prinzipien der bayesianischen Statistik.

Zusammenfassend ist es notwendig, kontinuierlich die Unsicherheit der Hochwasserprognose zu quantifizieren, sie zu reduzieren und die Restunsicherheit den Verantwortlichen verständlich zu kommunizieren, um sie im Entscheidungsprozess zu unterstützen.

4 Klassen von Hochwasservorhersagesystemen und Voraussetzungen

4.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Modelltypen von Hochwasservorhersagesystemen kurz beschrieben und deren Vor- und Nachteile aufgeführt. Grundlage aller Modelltypen ist jedoch eine ausreichend zur Verfügung stehende Basis von Messdaten. Die Anwendung dieser Modelle in Gebieten, in denen keine belastbaren Daten zur Verfügung stehen, ist zwar teilweise theoretisch möglich, allerdings werden die Vorhersageunsicherheiten (vgl. Abschnitt 3) so groß, dass das notwendige Vertrauen in die Modellergebnisse nicht gegeben ist.

4.2 Modellbasierte Vorhersagesysteme

Modellbasierte Vorhersagesysteme beruhen auf der Verknüpfung von hydrologischen Modellen, welche der Simulation des Niederschlags-Abflussprozesses (N-A) dienen, und hydrodynamischen Modellen (HD), die den Abfluss im Gerinne abbilden. Der N-A-Prozess führt zur Konzentration des Abflusses in der Talsohle, von wo das Wasser im Gerinne zum Ausgangspunkt des Einzugsgebietes strömt. Das Zusammenspiel aus geologischer Beschaffenheit des Geländes, Landnutzung, sowie Neigung der Hänge ist entscheidend für die Konzentrationszeit eines Einzugsgebietes. Die Gerinnehydrodynamik hingegen beeinflusst die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Hochwasserwelle im Fluss durch Retentionseffekte, welche die Gerinnesohle auf das fließende Wasser ausübt, und somit die Wassertiefe an verschiedenen Standorten entlang des Flusslaufes. Diese Effekte müssen annähernd korrekt durch die Modelle wiedergegeben werden. Dies setzt eine Eichung der Modellparameter voraus, die zur Darstellung der beschreibenden physikalischen Prozesse erforderlich sind. Die verknüpften N-A- und HD-Modelle werden durch die meteorologischen Daten Niederschlag und Lufttemperatur angetrieben, wobei letztere Größe nur eine Rolle spielt, wenn Schneeschmelze von Bedeutung ist. Wenn die Simulationsperiode in der Vergangenheit liegt, können die meteorologischen Daten aus Bodenmessnetzen des Wetterdienstes oder der Landesbehörden bzw. Wasserverbände erhoben werden. Für einen zukünftigen Vorhersagezeitraum hingegen bestehen keine Beobachtungen und es müssen darum kurz- bis mittelfristige Wettervorhersagen herangezogen werden. Solche Wettervorhersagen beruhen auf den Ausgaben von hochgradig komplexen numerischen Atmosphärenmodellen, die das Wettergeschehen innerhalb einer Region mit einem Vorhersagehorizont von 3-10 Tage über räumlich unterschiedlich aufgelöste Gitter simulieren. Diese Modelle werden aufgrund ihrer Komplexität und dem erforderlichen rechnerischen Aufwand von Wetterdiensten betrieben, welche die

entsprechenden Ausgaben für Nutzer zugänglich machen. Selbstverständlich nimmt die Unsicherheit der Vorhersage mit der Länge des Vorhersagehorizonts zu.

Im operationellen Betriebsmodus bei Hochwasservorhersagezentralen werden mithilfe von Beobachtungen aus der Vergangenheit das N-A- und das HD-Modell eingeschungen und anschließend im Vorhersagemodus in die Zukunft angetrieben. Daraus werden zukünftige Vorhersagen von Abflussmengen und Gerinnewassertiefen errechnet, die in Echtzeit mit kritischen Pegelstandswerten an Standorten abgeglichen werden. Sollte es sich ergeben, dass ein prognostizierter Pegelstand sich an einem oder mehreren Standorten einem vorab festgelegten kritischen Pegelwert annähert, wird durch das System eine Warnung ausgelöst, die, wenn durch die Behörden als notwendig erachtet, zu einer Reihe von Schutzvorkehrungen bis hin zur Evakuierung der betroffenen Bevölkerung führt. Abbildung 1 veranschaulicht den Aufbau eines N-A-basierten Vorhersagesystems, das aus einer Forcierungsschicht durch die Meteorologie (blau), einer Datenverarbeitungsschicht (grün) und einer Vorhersageschicht von Abflüssen auf Geländeebene (braun) besteht.

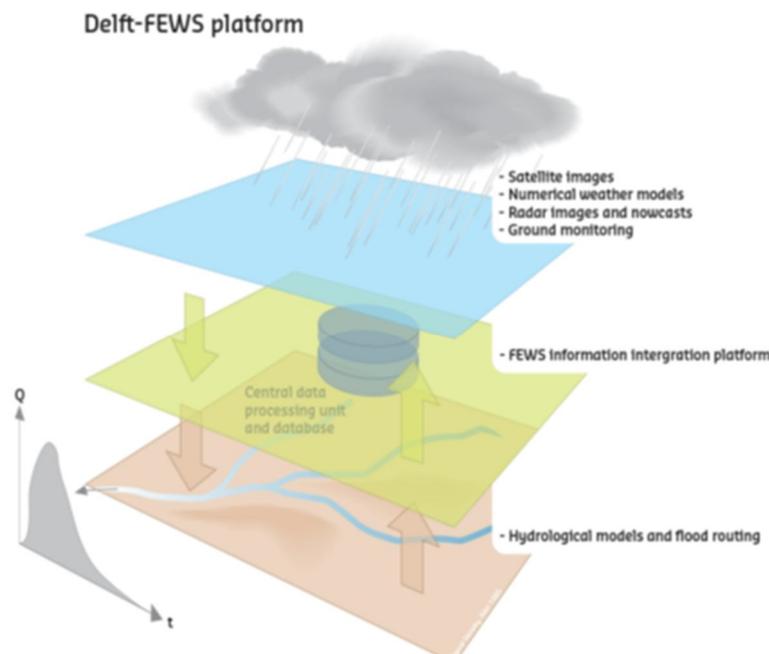


Abbildung 1: Aufbau eines Modell-basierten Vorhersagesystems beruhend auf Wettermodellen, N-A-Modell und Hydrodynamischem Modell. (Quelle: Deltares, Niederlande)

4.3 Datengetriebene Modelle

Datengesteuerte Modelle sind flexible und leistungsstarke Verfahren für hydrologische Vorhersagen, da sie keine physikalische Beschreibung der Einzugsgebiete anhand von Daten benötigen. Dank neuartiger Techniken des maschinellen Lernens und zunehmender Rechenleistung haben sich die

datengesteuerten Modelle so weit entwickelt, dass sie in der Lage sind, hochgradig nicht-lineare und komplexe Beziehungen zwischen Eingaben und Ausgaben abzubilden. Die gebräuchlichsten Beispiele für datengesteuerte Modelle für die Hydrologie sind die Einheitsganglinie⁵, die lineare Regression und der selbstregressive gleitende Durchschnitt (ARIMA). Jüngste Entwicklungen im Bereich der Computerintelligenz und des maschinellen Lernens (ML) haben die Möglichkeiten datengesteuerter Methoden mit Werkzeugen wie Support Vector Machine (SVM), Künstliche Neuronale Netzwerke (KNN), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS), Genetische Algorithmen (GA), Evolutionäre Programmierung und Chaostheorie erheblich erweitert. Auch wenn die Abflussvorhersage traditionell mit hydrodynamischen und konzeptbasierten Modellen durchgeführt wurde, sind datengesteuerte Modelle eine besonders nützliche Option in Gebieten, in denen die Erfassung geophysikalischer und topografischer Informationen über das Einzugsgebiet schwierig ist. Fortgeschrittene Modelle der künstlichen Intelligenz benötigen im Allgemeinen leichter verfügbare Messungen, um die komplexen Phänomene im Einzugsgebiet zu modellieren⁶. Ein entscheidender Schwachpunkt datengetriebener Modelle im Hochwasservorhersageeinsatz besteht darin, dass das Modell nur jene Art und Größe von Ereignissen belastbar wiedergeben kann, für die es kalibriert wurde. Extremereignisse, wie jenes, das im Juli 2021 in der Eifel aufgetreten ist, wäre in einem datengetriebenen Modell der betreffenden Region nicht in der Modelleichungsperiode vorgekommen, und somit mit diesem Verfahren auf dem gegenwärtigen Erkenntnisstand nicht zuverlässig prognostizierbar gewesen. Um diesen Nachteil zu vermeiden, können die datengetriebenen Modelle außerhalb der bekannten historischen Aufzeichnungen angelernt werden. Dies kann erreicht werden, indem die Modelle mit Datensätzen aus physikalisch basierten Modellen trainiert werden, die auf synthetischen oder historischen Ereignissen beruhen. Voraussetzung ist jedoch, dass die physikalisch basierten Modelle in der Lage sind, Extremsituationen belastbar berechnen zu können. Auf diese Weise ist das datengesteuerte Modell in der Lage, Vorhersagen auch außerhalb des Bereichs bekannter Extremereignisse zu treffen⁷.

⁵ Pechlivanidis, I G, B M Jackson, N R McIntyre, and H S Wheeler. 2011. "Catchment Scale Hydrological Modelling: A Review of Model Types, Calibration Approaches and Uncertainty Analysis Methods in the Context of Recent Developments in Technology and Applications." *Global Nest Journal*.

⁶ Adamowski, Jan, Hiu Fung Chan, Shiwu O. Prasher, and Vishwa Nath Sharda. 2012. "(20) (PDF) Comparison of Multivariate Adaptive Regression Splines with Coupled Wavelet Transform Artificial Neural Networks for Runoff Forecasting in Himalayan Micro-Watersheds with Limited Data | Jan Adamowski - Academia.Edu." *Journal of Hydroinformatics* 14.3: 731–44

⁷ Crotti, G., and Leandro, J., (2020) A 2D Real-Time Flood Forecast Framework Based on a Hybrid Historical and Synthetic Runoff Database, *Water*, 12 (1), 114

4.4 Eventbasierte und kontinuierliche Vorhersagesysteme

Event-basierte Vorhersagesysteme^{8,9} kommen dann zum Einsatz, wenn es sich um Einzugsgebiete handelt, die durch kurze Konzentrationszeiten des abfließenden Niederschlagswassers gekennzeichnet sind. Meist ist es in diesen Gebieten auch schwierig, ein belastbares N-A und/oder hydrodynamisches Modell zu implementieren, da es an ausreichenden Daten fehlt, die Modelle entsprechend aufzubauen und zu eichen. Darum eignen sich event-basierte Vorhersagesysteme für den Einsatz in schwach bemessenen Gebieten. Andererseits ist es im Falle solcher Einzugsgebiete, die in der Regel durch kurze und heftige Wetterereignisse von Hochwasser heimgesucht werden, meist völlig ausreichend, auf eine detaillierte N-A und hydrodynamische Simulation zu verzichten und stattdessen eine Vorwarnung dann auszulösen, wenn in Echtzeit ein Schwellenniederschlagsereignis ("threshold event") mit einer Intensität beobachtet wird, die im historischen Zusammenhang mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Überflutung geführt hat. Voraussetzung des guten Funktionierens eines solchen Systems ist das Bestehen einer ausreichenden und belastbaren Niederschlag- und Abflussdatenmenge für einen oder mehrere Standorte, mit deren Hilfe eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung von Niederschlag, Bodensättigung und Abfluss erstellt werden kann. Der Bodensättigungsgrad wird in der Regel mit einem einfachen Modell zur Bodenwasserbilanzierung kontinuierlich geschätzt. Das System funktioniert so, dass bei einem intensiven Niederschlagsereignis die Niederschlagsmengen mit der Ereignisstatistik abgeglichen wird, aus der dann abgelesen werden kann, ob erfahrungsgemäß einem solchen Niederschlagsereignis und Bodenwassergehalt im Einzugsgebiet mit entsprechender Wahrscheinlichkeit ein kritischer Abflusswert zugeordnet wird. Sollte daraus hervorgehen, dass einem in Echtzeit beobachteten Ereignis ein kritischer Pegelstand entspricht, wird durch das System eine Warnung ausgelöst, der entsprechende Maßnahmen zum Schutze der Bevölkerung folgen sollten.

4.5 2D-Hochwasservorhersage

Bestehende Vorhersagesysteme beschränken sich auf hydrologische Abflussganglinien für 12-18 Stunden ohne die Simulation von zweidimensionalen (2D) horizontalen Wellenausbreitungsmodellen zur Simulation von Überschwemmungen. Unglücklicherweise bilden die

⁸ Georgakakos, K.P., 2006: Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology* 317: 81-103.

⁹ Georgakakos, K. P., Modrick, T. M., Shamir, E., Campbell, R., Cheng, Z., Jubach, R., Sperflage, J. A., Spencer, C. R., & Banks, R. (2022). The Flash Flood Guidance System Implementation Worldwide: A Successful Multidecadal Research-to-Operations Effort, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(3), E665-E679

Überschwemmungsflächen die Grundlage für die Entscheidungsfindung im Hochwasserrisikomanagement. Das Hochwasserrisikomanagement erfordert Aussagen über die Hochwassergefahren anhand von Wassertiefe, Ausbreitung der überfluteten Gebiete sowie Fließgeschwindigkeit. Die dynamische Vorhersage der horizontalen Ausbreitung einer Überschwemmung ist schwierig, da die Erstellung solcher Hochwasserkarten in Echtzeit sehr rechenintensiv ist. Mit der Einführung von Multi-Core-CPU- und GPU-basierten Hardware-Architekturen konnte die Rechenleistung numerischer Modelle erheblich verbessert werden. Allerdings stellen der Ressourcenverbrauch und die regelmäßige Wartung einer solchen Infrastruktur eine große Herausforderung im operativen Einsatz dar. Daher haben sich solche Entwicklungen bisher noch nicht im operationellen Einsatz etabliert. Darüber hinaus ist es wichtig, Methoden zu entwickeln, um die Vorhersagezentren mit kostengünstigen und ressourcenschonenden Methoden auszustatten, die keine rechen- und zeitintensiven Berechnungen der 2D-Überschwemmungsmodelle in Echtzeit erfordern und es ihnen ermöglichen, Überschwemmungsmuster weit im Vorfeld von Notfällen zu erstellen und zu analysieren. Diese Herausforderung wurde in letzter Zeit von einigen Forschern erfolgreich angegangen (vgl. Abschnitt 8.4), aber noch nicht in die Praxis umgesetzt.

5 Hochwasservorhersagesysteme in NRW

5.1 Allgemeines

Als Hochwasservorhersagemodelle verstehen sich numerische Modelle, die auf der Basis von gefallenem Niederschlag und aktuellen Wasserständen an Oberliegerpegeln und unter Verwendung von prognostizierten Niederschlägen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Abflüsse¹⁰ für Pegel für die kommenden Stunden oder Tage berechnen (vgl. Abschnitt 2). Abhängig von der Güte der Eingangsdaten des Modells, sowie des Prognosezeitraumes enthalten die Vorhersagen kleinere oder größere Unsicherheiten (vgl. Abschnitt 3). Da die Modelle Abflüsse für Pegel berechnen, müssen diese Informationen für den betreffenden Pegelstandort mittels Abflusstafeln (Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen) oder hydrodynamischer Modelle in Wasserstände transformiert werden. Auf dieser Basis können dann Warnungen zu zu erwartenden Wasserständen ausgegeben werden.

¹⁰ Nach geltendem Regelwerk (z.B. LAWA-Leitfaden Hydrometrie des Bundes und der Länder, 2018) wird statt des Begriffes Abfluss der Begriff Durchfluss verwendet. Im vorliegenden Gutachten werden beide Begriffe synonym verwendet.

Von der Hochwasservorhersage abzugrenzen ist der Hochwassermeldedienst. Ein Hochwassermeldedienst warnt bei Erreichung oder zu erwartender Überschreitung einer oder mehrerer zuvor definierter Warnstufen (Wasserstände). Ein Hochwassermeldedienst ist somit ein häufiger Schritt im Anschluss an eine Hochwasservorhersage, allerdings kann ein Hochwassermeldedienst auch ohne vorgeschaltete Hochwasservorhersage betrieben werden, indem nur auf Basis aktueller Wasserstandsmesswerte an den Pegeln entsprechende Warnungen ausgegeben werden. Im letzteren Fall kann im allgemeinen weniger gut vorausschauend agiert werden und die Reaktionszeiten für entsprechende Maßnahmen des Hochwasserschutzes sind –insbesondere in kleineren Einzugsgebieten– stark limitiert.

5.2 Landesweites Vorhersagesystem des LANUV NRW

Derzeit betreibt das Land NRW einen umfangreichen Hochwassermeldedienst, der dezentral über die Bezirksregierungen und Kreise gemäß der jeweiligen Meldeordnungen organisiert ist. Der Meldedienst umfasst dabei die in Abbildung 2 dargestellten Pegel. Die Pegel sind in der Regel nur an mittleren und größeren Gewässern vorhanden. Hochwassermeldepegel an kleinen Gewässern sind eher selten gegeben. Auf den Internetseiten¹¹ des LANUV werden aktuelle Wasserstände an den Gewässern in NRW sowie Hochwassermeldungen bezogen auf Hochwassermeldepegel entsprechend der Hochwassermeldeordnung zur Verfügung gestellt. Im Hochwasserfall werden zusätzlich „Hydrologische Lageberichte“ erstellt und veröffentlicht. Ebenso sind Wetterinformationen abrufbar.

¹¹ <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/hochwasserschutz/hochwasser-meldedienst-nrw/>

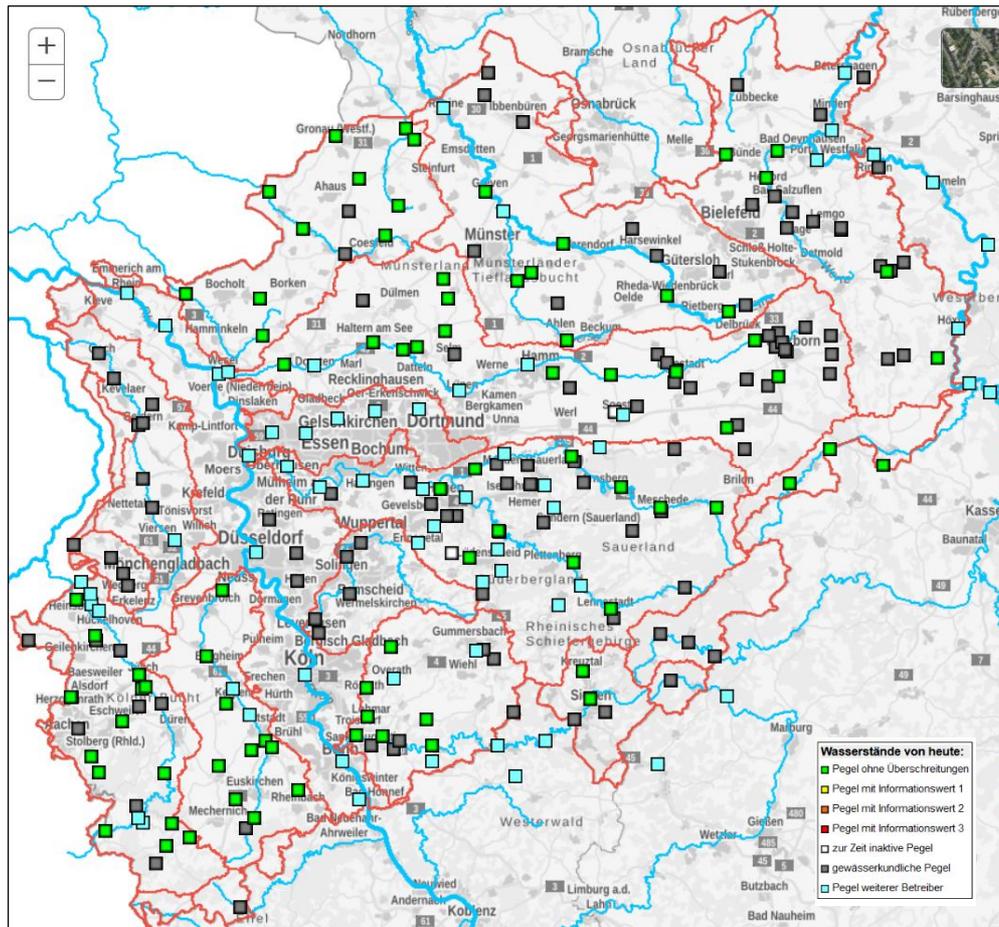


Abbildung 2: Hochwassermeldepegel in Nordrhein-Westfalen
(<https://luadb.it.nrw.de/LUA/hygon/pegel.php?interaktiv=P&einzug=on>)

Für das Land NRW ist in den vergangenen Monaten ein Hochwasservorhersagemodell auf Basis der Software LARSIM erstellt worden. Im Modell LARSIM werden die Durchflüsse auf Basis der hydrologischen Prozesse Interzeption und Evapotranspiration, Akkumulation und Ablation von Schnee, Bodenwasserspeicherung und Abflussbildung, laterale Wasserbewegung in der Fläche sowie die Translation und Retention in Gerinnen und Seen in den Teileinzugsgebieten simuliert¹². Dieses flächendeckende Modell ist in Teilen kalibriert und im nicht-operativen Testbetrieb. Die Integration der Ergebnisdaten erfolgt gemeinsam mit den Eingangsdaten (Messdaten der Pegel und Niederschlag sowie Vorhersagen des DWD) im System FEWS, das als Client-Server-Lösung zur Verfügung steht. Das Modell soll ab Mai 2022 zunächst in den operativen internen Betrieb überführt werden und ein Jahr später öffentlich verfügbar sein. Die Hochwasservorhersagen konzentrieren sich hierbei auf die bisherigen Hochwassermeldepegel.

¹² <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/band11.html>

Als Reaktion auf das Hochwasserereignis vom Juli 2021 hat das MULNV NRW im Januar 2022 eine Beratungsleistung zu Hochwasservorhersagesystemen ausgeschrieben¹³. Mit Hilfe der ausgeschriebenen Beratungsleistung soll ein Konzept entwickelt werden, wie möglichst schnell Hochwasservorhersagesysteme flächendeckend in NRW –unter Beachtung der existierenden Vorarbeiten – etabliert werden können.

Ein bedeutender Aspekt in der Ausschreibung liegt in der Ermittlung von Kriterien zur Bestimmung der relevanten Gewässer in NRW (Gewässerkulisse), an denen eine Hochwasservorhersage zukünftig erfolgen soll. Hier ist zu erwarten, dass auf Basis der Kriterien auch mehr kleinere Gewässersysteme in die Hochwasservorhersage einbezogen werden.

5.3 Vorhersagesysteme der Wasserverbände

Weiterhin existieren bei einigen Wasserverbänden Hochwasserinformationsdienste (HOWIS), die zur Hochwasservorhersage genutzt werden. Die Wasserwirtschaftsverbände Emschergenossenschaft/Lippeverband (EG/LV), Ruhrverband (RV), Wupperverband (WV) und Wasserverband Eifel-Rur (WVER) nutzen seit mehreren Jahren im Verbund mit anderen Verbänden und dem DWD eine Kooperation zur gemeinschaftlichen Nutzung wasserwirtschaftlicher und meteorologischer Daten. Die fünf oben genannten Wasserverbände betreiben zudem zur Weiterverarbeitung der bereitgestellten Daten eine Prognoseplattform auf Basis von Delft-FEWS¹⁴. Das von den Firmen Hydrotec (Aachen, D) und Deltares (Delft, NL) nach Anforderungen der Wasserverbände gemeinsam aufgebaute Client-Server-System liest die Stationsdaten der Verbände (Abfluss, Wasserstand, Niederschlag etc.), die Radardaten und die Stationsdaten des DWD sowie die Modellergebnisse der DWD-Wettervorhersagen ein.

Alle hydrometeorologischen Daten werden auf Pegel- und Teileinzugsgebietsebene aggregiert und stehen damit für grafische und tabellarische Analysen und modellgestützte Prognosen zur Verfügung. Diese Informationen werden im zentralen Delft-FEWS-Server aufbereitet und an die Clients der Verbände weitergeleitet. Ein Modelladapter bereitet diese Daten für die Simulationsrechnung auf und initiiert einen Simulationslauf. Etliche Verbände nutzen hierfür das Niederschlag-Abfluss-Simulationsmodell NASIM (Hydrotec, Aachen). Das Delft-FEWS-System übernimmt die vom Modell prognostizierten Abflüsse, berechnet daraus Wasserstände und gibt sie über die grafische Nutzeroberfläche sowie als Bericht aus.

¹³ MULNV: Vergabe-Nr. 22/003 vom 25.01.2022

¹⁴ <https://www.hydrotec.de/fews-nrw/>

In den jeweiligen Hochwasserportalen der Wasserverbände wird über die aktuelle und historische meteorologische und hydrologische Situation und über die Hochwasservorhersage in den Flussgebieten informiert¹⁵ (Abbildung 3). Es wird täglich ein Hochwasserlagebericht und eine Lageübersicht für die Einzugsgebiete erstellt, in denen die aktuelle Hochwassersituation und die prognostizierte Entwicklung der folgenden Tage dargestellt werden.



Abbildung 3: Darstellung des aktuellen Abfluss und der Prognose für den Pegel Manfort
(<https://hochwasserportal.wuppverband.de/>)

6 Hochwasservorhersagesysteme in anderen Bundesländern

6.1 Hessen

Die Hochwasserwarnung- und Meldung in Hessen obliegt dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). Es werden mindestens stündlich aktualisierte Wasserstands- und Abflusswerte für die 95 hessischen Pegel und die 44 Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren zur Hochwasservorhersage bereitgestellt¹⁶. Die örtlichen Wasserbehörden sind nach Hochwasserdienstordnungen (HWDO) dafür zuständig, die gefährdeten Anwohner vor drohender Hochwassergefahr zu warnen. Es gibt 5 HWDO in Hessen für die 5 Hauptflussgebietseinheiten (Rhein, Main, Lahn, Kinzig,

¹⁵ z.B. <https://howis.eglv.de/>

¹⁶ HLNUG (2016): Abfluss- und Wasserstandsvorhersage in Hessen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM. Ein Beitrag zum vorsorgenden Hochwasserschutz. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/hochwasser/Flyer/Flyer_LARSIM_2016.pdf.

hessischer Weserteil (Diemel)). In den HWDO sind Meldestufen für ausgewählte Pegel festgelegt. Bei jeweiligem Überschreiten der Wasserstände werden die entsprechenden Warnstufen aktiviert. Auch für ausgewählte Niederschlagsmessstationen gibt es festgesetzte Meldegrenzen. Für 25 weitere Gewässer in kleinen Einzugsgebieten (EZG) gelten dezentrale HWDO (DHWDO). Die Schwellenwerte zur Warnung werden individuell für jeden Pegel bzw. jedes EZG bestimmt. Aktuell wird in Hessen in drei Stufen gewarnt:

- Meldestufe 1: stellenweise kleine Ausuferungen
- Meldestufe 2: Flächenhafte Überflutung ufernaher Grundstücke, leichte Verkehrsbehinderungen auf Gemeinde- und Hauptverkehrsstraßen, Gefährdung einzelner Gebäude, Überflutung von Kellern
- Meldestufe 3: Bebaute Gebiete in größerem Umfang überflutet, Sperrung von überörtlichen Verkehrsverbindungen

Die Vorhersage für Abflüsse und Wasserstände basiert in Hessen auf dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell). Durch die laufende Aktualisierung der deterministischen Modelle erfolgt die Vorhersageberechnung immer auf den aktuellen hydrologischen und landnutzungsspezifischen Gegebenheiten der Flussgebietseinheit. Es werden aktuell vier Modelle in Hessen betrieben (Lahnmodell, Werremodell, Modell für hessischen Weseranteil, Modell für Rhein- und Mainzufluss).

Für kleinere Gewässer und Gewässerabschnitte ist wegen der meist sehr kurzen Vorlaufzeit und mit den derzeitigen Wettermodellen keine Vorhersage der Hochwasserwelle möglich. Mit LARSIM kann auch für nicht bepegelte Gewässer in kleinen Einzugsgebieten (bis ca. 200 km²) durch die ständige Simulation der (Boden-)Vorfeuchte und mit den Niederschlagsvorhersagen zumindest eine Hochwasserfrühwarnung bereitgestellt werden. So kann auch außerhalb von Hochwasserzeiten das Abflussvermögen des Bodens simuliert werden. Diese Warnungen haben einen Gültigkeitszeitraum von 24 h und werden pro Landkreis in einer Warnkarte dargestellt (Abbildung 4).

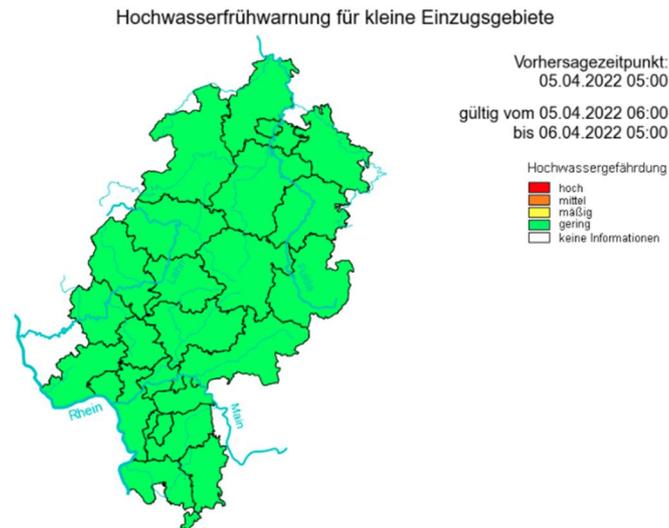


Abbildung 4: Hochwasserwarnkarte für kleine Einzugsgebiete in Hessen (www.hlnug.de)

Das LARSIM Modell deckt das gesamte Landesgebiet Hessens ab, einschließlich außerhessischen Anteilen an den Flussgebietseinheiten von Lahn, Eder, Diemel und Werra. Die Fläche wird in ca. 5000 Teilgebiete eingeteilt, mit einer Größe von je 4-5 km². Eingangsgrößen für die Simulation von Vorhersagen für mittlere und große Einzugsgebiete sind Pegelganglinien und Niederschlagsdaten, sowie weitere meteorologische Daten und Vorhersagemodelle vom DWD. In den Modellen wird zuerst die Abflussbildung in den einzelnen EZG berechnet (mit Hilfe von gefallenem Niederschlag, Interzeption, Transpiration, Schneeschmelze, Versickerung, Bodenwasserhaushalt). Anschließend wird die Abflusskonzentration berechnet. Zuletzt wird der Wellenablauf simuliert, mit der Gewässerslänge, dem Gefälleverhältnis, den morphometrischen Ausprägungen des Gewässers und dem Einfluss von Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren als Einflussgrößen.

Mit den Vorhersagemodellen des DWD als Eingangsgröße, kann das Wasserhaushaltsmodell Vorhersagen von bis zu 7 Tage in die Zukunft berechnen. Für die Vorhersage werden aktuell drei verschiedene deterministische Modelle verwendet (COSMO-D2, ICON-EU, ICON).

Weitere Eingangsgrößen für die Modelle sind:

- Messwerte zu Wasserständen und Abflüssen von Pegeln an Gewässern und Talsperren (stündlich aktualisiert) (Landesmessnetz Hessen, Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), Nachbarländer)
- Messwerte zu Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung von Niederschlags- und Klimamessstellen (Landesmessnetz Hessen, DWD, Nachbarländer)

In Abbildung 5 ist zu sehen, wie eine Gangliniengrafik mit den zusammengesetzten Vorhersagemodellen aussieht¹⁷. Diese Grafiken werden im Betrieb laufend erzeugt. Nur die ersten 6 h werden als „echte“ Vorhersage markiert. Da die Ergebnisse ständig aktualisiert werden, kann die weitere Prognose nur als Abschätzung verstanden werden. Die Prognosen sind also mit Unsicherheiten behaftet, da die Eingangsdaten ungeprüfte Rohdaten sind. Im Normalbetrieb werden die Vorhersagen mindestens dreimal täglich aktualisiert und im Hochwasserfall wird stündlich eine neue Vorhersage simuliert.

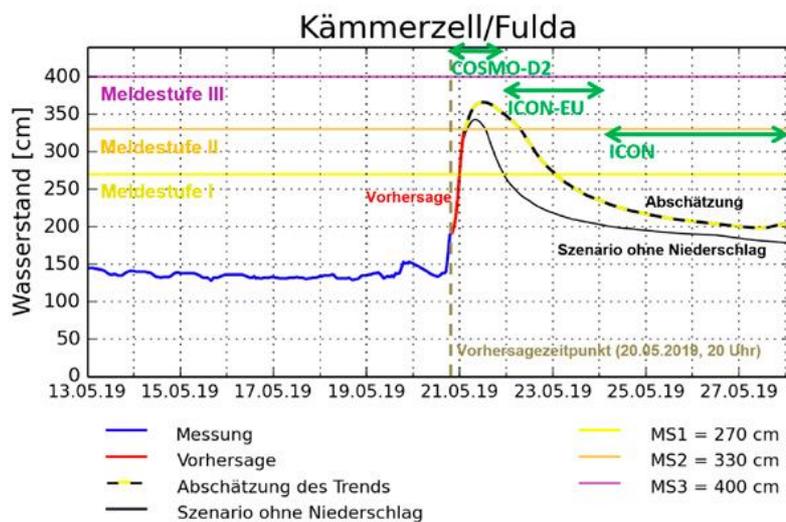


Abbildung 5: Beispiel für Wasserganglinie eines vorhergesagten Hochwassers (Pegel Kämmerzell, Fulda)

Die Ergebnisse der Vorhersagemodelle werden, sobald die in den (D)HWDO festgelegten Schwellenwerte überschritten werden, intern für das Umweltministerium, das Regierungspräsidium und die unteren Wasserbehörden bereitgestellt. Die Öffentlichkeit wird über das Internet (Hochwasserportal Hessen/der Länder, HLNUG Website), Radio, Presse und Fernsehen informiert. Außerdem werden die Ergebnisse für andere Bundesländer und Bundesbehörden (DWD, WSV, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), WISKI-Web) verfügbar gemacht.

¹⁷ Bastian, Dirk; Brahmer, Gerhard; Kremer, Matthias; Löns-Hanna, Cornelia (Hg.) (2020): 10 Jahre Hochwasservorhersagezentrale Hessen. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Stand: Oktober 2020. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz Umwelt und Geologie Dezernat W3 Hydrologie und Hochwasserschutz (Hydrologie in Hessen, Heft 21). Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/hochwasser/10-Jahre-Hochwasservorhersagezentrale-Hessen-HLNUG-2020.pdf>

6.2 Rheinland-Pfalz

Das Hochwasservorhersagesystem des Bundeslandes Rheinland-Pfalz (RLP) wird von dem Hochwassermeldedienst, welcher beim Landesamt für Umwelt in Mainz angesiedelt ist, betrieben. Das System umfasst die Flüsse Rhein (Ober-/Mittel- und Niederrhein in RLP), Mosel (Mosel/Saar/Sauer), Nahe/Glan, Lahn, Sieg sowie kleinere Nebenflüsse des Rhein, darunter die Ahr. Ähnlich dem hessischen Hochwasservorhersagesystem beruht das rheinland-pfälzische ebenso auf dem räumlich verteilten Wasserhaushaltmodell LARSIM, das eine prozess- und flächendetaillierte Simulation des landgebundenen Wasserhaushaltes ermöglicht. LARSIM rechnet auf einem räumlichen Gitter mit Auflösung 1x1 km. Die Simulationen stützen sich auf ein Netzwerk von 145 Pegelstationen, ausgestattet mit Sensoren, die die Wasserstände aller großen Flüsse des Bundeslandes kontinuierlich erheben. Darüber hinaus nutzt das Netz die Daten von weiteren 120 Messstationen, die dem Bund, Wasserverbänden oder den Nachbarländern gehören, um die Oberläufe zu überwachen. Jede Station misst im 5-Minutentakt automatisch den Wasserstand. Alle 15 Minuten wird der Durchschnittswert der letzten drei Messungen ermittelt und per Funk an die Datenbank des rheinland-pfälzischen Umweltamts übermittelt, wo eine teils automatisierte und teils assistierte Qualitätskontrolle der Zeitreihen stattfindet.

Zweimal täglich führt ein automatisiertes System eine Simulation der Niederschlag-Abflussprozesse auf Grundlage von LARSIM aus. Dabei läuft sich das Modell über einer Periode, angetrieben von Niederschlagsbeobachtungen, warm, wobei gemessene Abflussdaten zur Ausgabekorrektur in das Modell nachgeführt werden. Anschließend rechnet das System im Prognosemodus, angetrieben von numerischen 10-Tage Vorhersagen des DWD (auf Basis des Europäischen Lokalmodells ICON und der Ensemblevorhersagen COSMO-LEPS). Wenn Überschwemmungsgefahr besteht, wie im Juli 2021 für die Eifelregion prognostiziert, wird die Simulation zeitlich verdichtet und entsprechend alle drei Stunden ausgeführt. Wenn mittels LARSIM Abfluss- oder Wasserstandswerte ermittelt werden, die vorher festgelegte Pegelrichtwerte überschreiten, wird eine Meldekette ausgelöst, die grafisch aufbereitete Hochwasserinformationen an die jeweiligen Bezirksgemeinschaften, Kreise und Kommunen übermittelt. Abbildung 6 veranschaulicht die rheinland-pfälzischen Einzugsgebietseinheiten und das dazugehörige Flussnetzwerk, einschließlich der Messpegelstandorte.

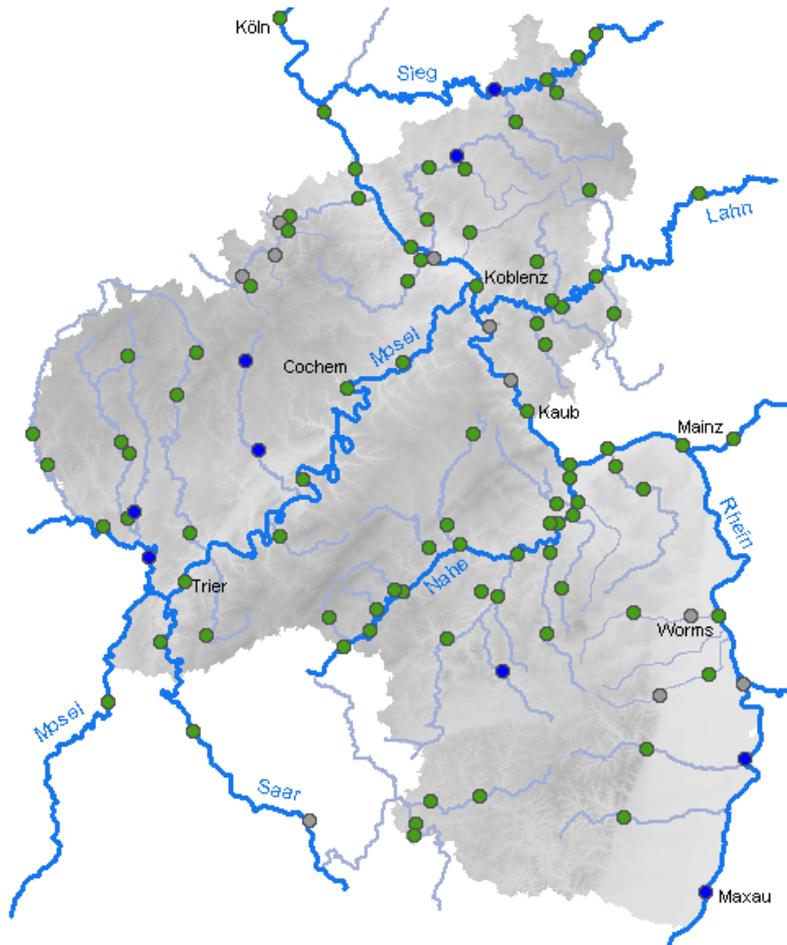


Abbildung 6: Das Flussnetzwerk und Pegelmessstandorte im Rheinland-Pfälzischen Hochwasservorhersagesystem, das vom Landesamt für Umwelt betrieben wird. (Quelle: www.hochwasser-rlp.de/)

6.3 Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg besteht die Hochwasservorhersage im Wesentlichen aus zwei Instrumenten. Die Hochwassermeldeordnung (HMO) soll als rechtliches Instrument sicherstellen, dass die zuständigen Behörden und Dienststellen über aufkommende Gefahren unterrichtet werden und gegebenenfalls erforderliche Maßnahmen einleiten können. Die Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) dient als informationstechnisches Instrument und ist hingegen für die Bereitstellung und Vorhersagen der hydrologischen Daten zuständig.

Die HVZ veröffentlicht für 111 Pegelmessstellen zugehörige Wasserstands- und Abflussdaten. Sie sind den Einzugsgebieten Bodensee, Hochrhein, Oberrhein, Donau, Neckar und deren wichtigen Zuflüssen sowie Main und Tauber zugeordnet. Für Niedrig- und Mittelwasser werden diese Werte stündlich aktualisiert und umfassen eine Vorhersage von bis zu 10 Tagen, welche täglich aktualisiert wird. Um den zugrundeliegenden Unsicherheiten zu begegnen und dennoch eine eindeutige Aussagen zu liefern, wird für den

zeitlich ersten Teil der Vorhersage eine bestmögliche Schätzung aus einer ausgewählten Kombination möglicher Wettervorhersagen berechnet. Dieser Zeitraum wird mittels roter Linie in einem Diagramm dargestellt (vgl. Abbildung 7). Im zeitlich hieran anschließenden Vorhersagezeitraum wird eine Tendenz mittels gestrichelter Linien angegeben. Zusätzlich wird noch mittels gelber Fläche die Bandbreite der wahrscheinlich auftretenden Wasserstands- oder Abflussentwicklung angegeben. Die Bandbreite liefert zwar Anhaltswerte auf Basis der verwendeten Wettervorhersagen, ist jedoch nicht als absolute Ober- bzw. Untergrenze für die mögliche Entwicklung anzusehen. Diese Informationen werden als unverbindliche Hochwasserfrühwarnung genutzt, sind also ohne Gewähr.

Bei der Ausbildung von überregionalen Hochwasserereignissen werden die Messwerte bis zu 15 Minuten und die Vorhersage stündlich aktualisiert. Für kleine Einzugsgebiete (unter 150 km²) sind aufgrund der fehlenden Genauigkeit von meteorologischen Niederschlagsvorhersagen keine „zentimetergenauen“ Wasserstandsvorhersagen möglich. In diesem Fall kommt ein regionalbezogenes Hochwasserfrühwarnsystem zum Einsatz¹⁸. Dieses klassifiziert aus einer kombinierten Anwendung von meteorologischen und hydrologischen Modellen die Hochwassergefährdung in den Stadt- und Landkreisen gemäß den verschiedenen Warnstufen: Gering, Mäßig, Mittel, und Hoch (vgl. Abbildung 7). Diese so berechnete Karte wird gemäß der kurzfristigen Vorhersage des Deutschen Wetterdiensts alle drei Stunden aktualisiert.

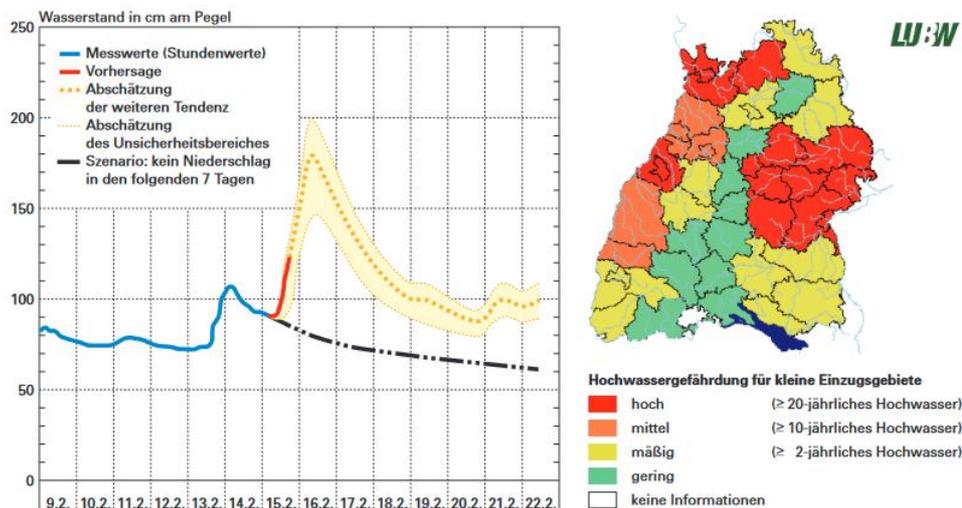


Abbildung 7: Beispiel für eine pegelbezogene (links) und eine landkreisbezogene (rechts) Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete (Quelle: LUBW).

Als Ergänzung zu den pegelbezogenen Vorhersagen und regionalen Warnstufen veröffentlicht die HVZ im Hochwasserfall regelmäßig aktuelle

¹⁸ <https://www.hvz.baden-wuerttemberg.de/pdf/HVZ%20Broschuere.pdf>

Lageberichte, die einen Überblick über das Hochwassergeschehen und den Verlauf des Ereignisses geben. Alle Daten werden gebündelt den zuständigen Verwaltungsstellen, der Bevölkerung und den Medien zugänglich gemacht und über Internet, Videotext, Rundfunk und eine automatische Telefonansage veröffentlicht. Zudem wird auf allen Ebenen der öffentlichen Verwaltung sowie den Wasserverbänden das webbasierte Fachsystem zur Informationsbereitstellung und Kommunikation FLIWAS 3 genutzt, wodurch Benachrichtigungen automatisiert werden.

Für lokale Überschwemmungen und Überflutungen infolge von Starkregen, werden keine Vorhersagen erstellt. Dies ist über einen Hinweis auf der Internetseite des HVZ zu entnehmen:

Hinweis: „Für lokale Überschwemmungen, wie sie z.B. durch örtlich begrenzte Starkregen oder Gewitter - auch unabhängig vom Gewässernetz - auftreten, können keine Vorhersagen erstellt werden.“

Zur Berechnung der Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen sind Messdaten für Niederschlag, Lufttemperaturen, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Luftdruck sowie Wasserstände an den Pegeln bis zum Vorhersagezeitpunkt notwendig. Diese Eingangsdaten werden mindestens stündlich an den Pegelmessstellen, sowie die meteorologischen Daten an den verschiedenen Messstellen der LUBW und des Wetterdienstes abgerufen und auf die Fläche umgerechnet. Auf Basis aller Mess- und Vorhersagedaten berechnet das Wasserhaushaltsmodell LARSIM im 1x1 km Raster flächendeckend die Schneedecke (sofern vorhanden), Verdunstung, Bodenfeuchte, Wasserabgabe aus den Einzugsgebieten, sowie den Wassertransport in Flüssen.

Neben der HVZ ist die HMO das zweite Instrument und regelt die Hochwasserwarnung/Alarmierung und Verantwortlichkeiten. Gemäß dieser Ordnung sind für alle Pegelstände Schwellwerte in Form von Wasserständen festgelegt. Liegt der beobachtete Wasserstand über diesem Schwellenwert, wird Hochwasseralarm ausgelöst. Die Alarmierung wird dabei in drei Phasen unterschieden:

- Überwachungsphase: Beobachtung und fachliche Beratung weiterer Wetter- und Hochwasserentwicklung.
- Voralarm: Alle Ämter, Dienststellen, Hilfsorganisationen und besonders die verantwortlichen Personen der hochwassergefährdeten Objekte werden informiert, falls sich aus der Beobachtung der Wetterlage und der relevanten Pegel auf eine zunehmende Hochwassergefahr schließen lässt.
- Hochwasseralarm: Der Schwellenwert aus der HMO wird überschritten.

Abbildung 8 stellt den Informationsfluss bzw. Abstimmungsprozess während eines Hochwasserereignisses dar. Die Hauptverantwortung liegt bei der Kommune, die sich selbstständig über die Wasserstände und deren Entwicklung während des Ereignisses informieren muss.

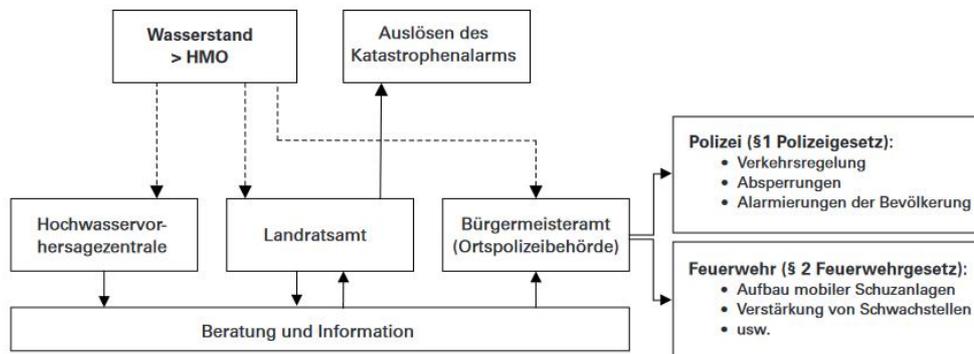


Abbildung 8: Informationsfluss während eines Hochwasserereignisses (Quelle: LUBW).

6.4 Bayern

Der Hochwassernachrichtendienst (HND) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LFU) in Augsburg ist für die Warnung der Bevölkerung vor Hochwasser in Bayer verantwortlich¹⁹. Es gibt fünf regionale Hochwasservorhersagezentralen, die für die Berechnung der Hochwasservorhersagen zuständig sind. Sie sind nach den Einzugsgebieten von Main, Donau, Isar, Iller/Lech und Inn aufgeteilt. Insgesamt berücksichtigt der Dienst 600 Pegelstände an verschiedenen Stellen verteilt über die bayerischen Gewässer. Von den 600 werden 570 Wasserstände im 15-Minuten-Intervall automatisch ausgelesen und in das HND aufgenommen. Online ermöglicht das HND, diese Informationen in Form von Warnungen, Tabellen und Karten abzurufen. Werden bestimmte Schwellenwerte erreicht, informiert das HND die zuständigen Wasserwirtschaftsämter. Von dort werden die Informationen über die Meldestellen der Landratsämter an die Städte und Gemeinden weitergeleitet. Abbildung 9 zeigt die Meldewege des HND und die Möglichkeiten der Bürgerinnen und Bürger, sich über Hochwasser zu informieren. Den Städten und Gemeinden kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie das letzte Glied im Meldeweg sind. In ihren Meldeplänen ist festgelegt, wer wann und wie zu warnen ist und welche Maßnahmen bei welchen Wasserständen zu ergreifen sind. Zu diesem Zweck führen die Gemeinden Lagepläne von gefährdeten Gebieten oder Objekten sowie Organisationspläne, die für den Hochwasserschutz notwendig sind.

¹⁹ <https://www.hnd.bayern.de/>

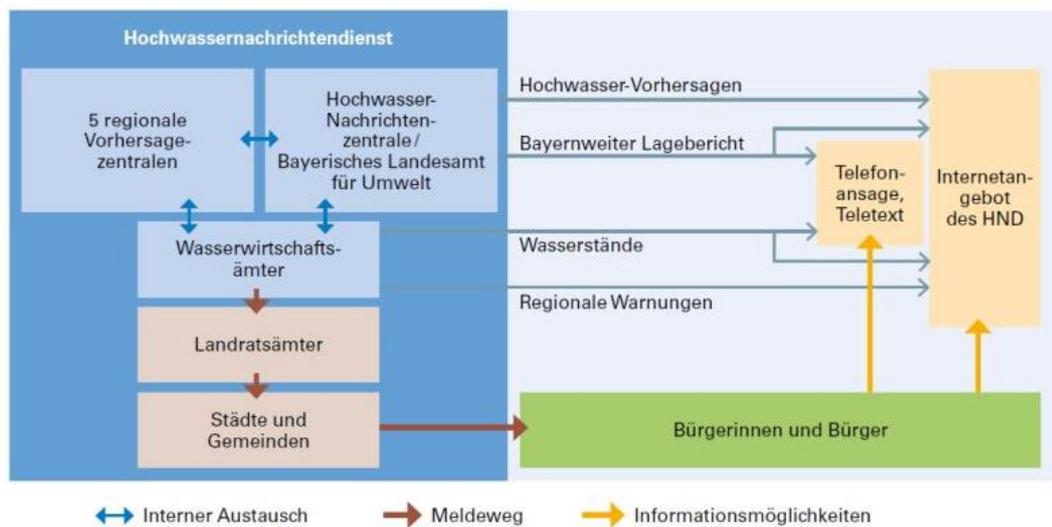


Abbildung 9: Meldewege des HND und die Möglichkeiten der Bürgerinnen und Bürger, sich über Hochwasser zu informieren (Quelle: LfU Bayern).

Die Hochwasserlage wird in vier Meldestufen angegeben:

- Meldestufe 1: Stellenweise kleinere Ausuferungen.
- Meldestufe 2: Land- und forstwirtschaftliche Flächen überflutet oder leichte Verkehrsbehinderungen auf Hauptverkehrs- und Gemeindestraßen.
- Meldestufe 3: Einzelne bebaute Grundstücke oder Keller überflutet oder Sperrung überörtlicher Verkehrsverbindungen oder vereinzelter Einsatz der Wasser- oder Dammwehr erforderlich.
- Meldestufe 4: Bebaute Gebiete in größerem Umfang überflutet oder Einsatz der Wasser- oder Dammwehr in großem Umfang erforderlich.

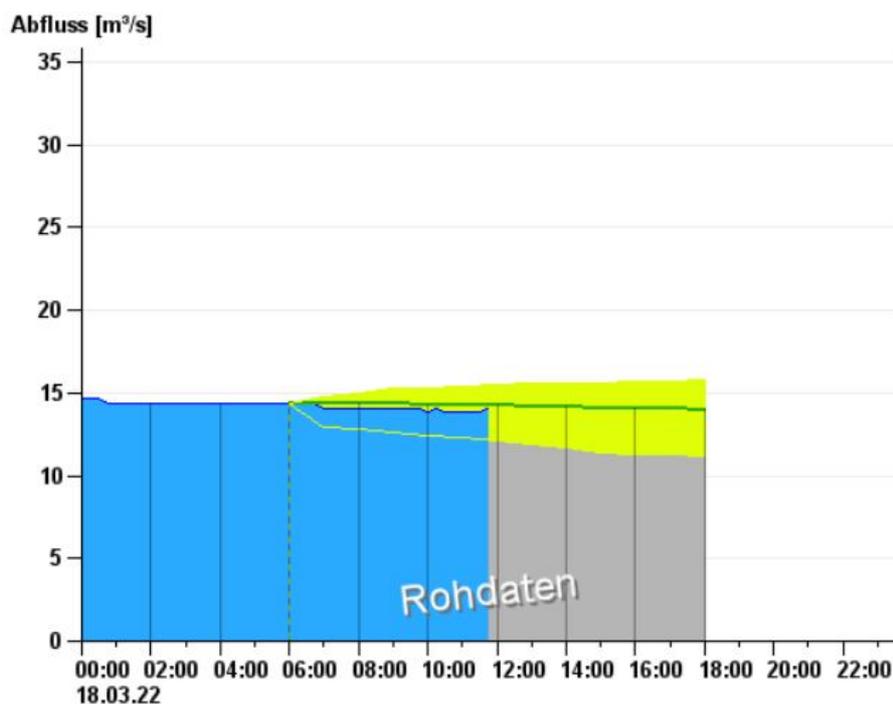
Die Warnungen sind ebenfalls in vier Kategorien eingeteilt:

- Vorwarnung Hochwassergefahr (hellorange)
- Warnung vor Ausuferungen und Überschwemmungen (orange)
- Warnung vor Überschwemmungen für bebaute Gebiete (rot)
- Entwarnung (grün)

Gewarnt wird vor Überschwemmungen, die durch Flüsse und Bäche verursacht werden. Gefahren durch Starkregen oder Gewitter sind ausgeschlossen. In jeder Warnung des HND wird ein Hinweis auf die Unmöglichkeit der Vorhersage von örtlich begrenzten Überschwemmungen aufgrund von Starkregen gegeben.

„Hinweis: Für lokale Überschwemmungen, wie sie z.B. durch örtlich begrenzte Starkregen (Gewitter) auftreten, können keine Warnungen und Vorhersagen erstellt werden.“

Die Vorhersage der Wasserstände oder des Abflusses kann für die nächsten 12 Stunden visualisiert werden. Während in blau die gemessenen Daten dargestellt sind, steht grün für die Prognose. Alternativ ist es möglich, den erwarteten Trend für den nächsten Tag zu sehen. Mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen (WHM), die an das jeweilige Einzugsgebiet angepasst sind, werden die zu erwartenden Wasserstände vorhergesagt. Je nach Wettervorhersage, Größe und Beschaffenheit des Einzugsgebietes können diese Prognosen mit größeren Unsicherheiten behaftet sein. Die Vorhersage wird durch eine dunkelgrüne Linie dargestellt. Der Vorhersagezeitpunkt, d. h. der Beginn der Vorhersage, ist durch eine vertikale, hell unterbrochene Linie gekennzeichnet. Die hellgrünen Bereiche markieren den Unsicherheitsbereich der Vorhersage. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für eine Abflussvorhersage für den Pegel Wolfsmünster (Fränkische Saale).



Vorhersage: keine | **12-Std.-Vorhersage** | 2-Tage-Trend
 Linien: keine | **Jährlichkeiten** (mehr) | historische Ereignisse (mehr)

- Unsicherheitsbereich der Vorhersage (Erläuterung)
- Vorhersage vom **18.03.22 06:00** Uhr (Publikation: 07:41 Uhr)
- Letzter Messwert vom **18.03.22 11:45** Uhr: **14,1** m³/s

Abbildung 10: Vorhersage mit Unsicherheitsbereich für die nächsten 12 Stunden für den Pegel Wolfsmünster (Fränkische Saale) (Quelle: www.hnd.bayern.de)

Wasserstand und Abfluss sind immer mit Unsicherheiten behaftet. Um einen Hinweis auf die mögliche Schwankungsbreite der Prognosen zu geben,

werden zusammen mit den beobachteten Daten zusätzliche Unsicherheitsbereiche dargestellt. Die Unsicherheitsbereiche werden durch eine statistische Analyse vergangener Beobachtungen ermittelt. Die Abweichungen vergangener Vorhersageergebnisse werden mit den gemessenen Werten verglichen. Die Quantile der Abweichungen werden auf der Grundlage einer statistischen Analyse über Verteilungsfunktionen abgeleitet. Das HND wendet die 10%- und 90%-Perzentile auf die zu visualisierenden Prognosen an.

Das kalibrierte LARSIM-Modell ist derzeit bei der HND des LFU im Einsatz. LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) ist ein konzeptionelles Wasserhaushaltsmodell (WHM), das die komplexen Prozesse im Wasserkreislauf mit einfachen mathematischen Gleichungen berechnet (Abbildung 11). Das Modell besteht aus einem Bodenmodul und einem Flächenreservoir, die die Aufteilung der Wasserversorgung zwischen Direktabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss regeln. Das Modell ermöglicht die Verknüpfung von kontinuierlichen Langzeitsimulationen des Wasserhaushaltes mit ereignisbezogenen Hochwasservorhersagen. Eingangsdaten des Modells sind meteorologische Mess- und Vorhersagedaten, räumlich verteilte Daten zu Landnutzung und Bodeneigenschaften sowie Abflussmessungen und Informationen zu wasserwirtschaftlichen Maßnahmen, wie z.B. dem Betrieb von Talsperren oder Rückhaltebecken.

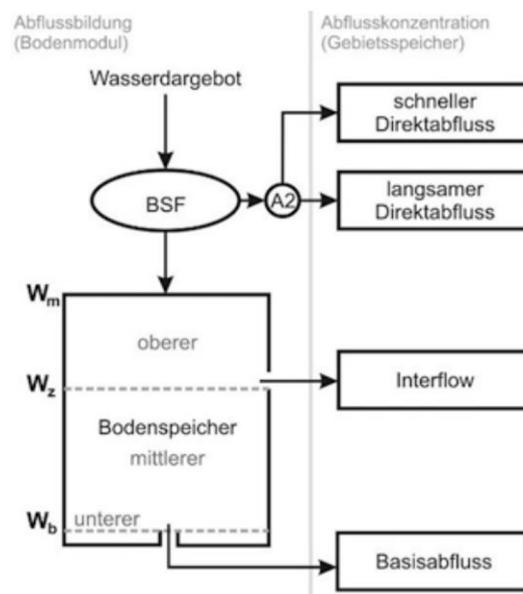


Abbildung 11: Schema des LARSIM-Wasserhaushaltsmodells

Die Vorhersage in Bayern ist in mehrere Einzugsgebiete mit jeweils eigenem kalibriertem LARSIM-Modell aufgeteilt. Zum Beispiel hat das Einzugsgebiet vom Oberen Main bis zum Pegel Kemmern eine Gesamtfläche von 4220 km².

Das Modell hat eine Diskretisierung eines $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Gitters und die Simulationen werden stündlich durchgeführt. Es wurde mit 47 Pegelstationen kalibriert. Als Kalibrierungszeitraum dienten die Jahre 2004 bis Juli 2011. Ziel der Kalibrierung war es, die bestmögliche Übereinstimmung zwischen den simulierten und gemessenen Abflussganglinien für den gesamten Abflussbereich (Niedrig-, Mittel- und Hochwasser) zu erreichen, wobei der Schwerpunkt auf der Simulationsqualität im Hochwasserbereich liegt.

6.5 Sachsen

Das bestehende Hochwasserinformations- und -managementsystem (HWIMS) des Freistaates wurde in mehreren Schritten nach der Flutkatastrophe von 2002 entwickelt. Grundlage für die Warnungen sind mehr als einhundert Hochwassermeldepegel. Mit dieser Zahl hat Sachsen, bezogen auf seine Fläche, im Bundesvergleich die höchste Dichte an Hochwassermeldepegeln, die in Abbildung 12 veranschaulicht sind. Hochwasserwarnungen, die auf dieser Grundlage ermittelt werden, verteilt das Landeshochwasserzentrum zielgenau mit Eilbenachrichtigungen. Bei Überschreiten festgelegter Werte werden die zuständigen staatlichen Behörden, Kommunen sowie weitere Empfänger automatisch durch das HWIMS benachrichtigt.

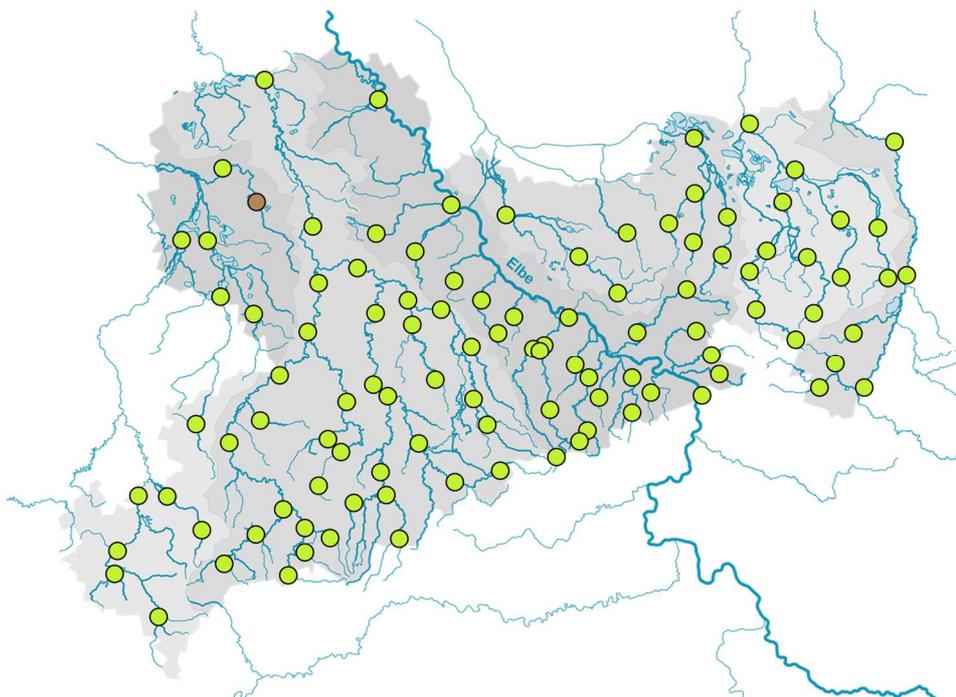


Abbildung 12: Pegelstandorte für das sächsische Hochwasservorhersagesystem (Quelle: www.umwelt.sachsen.de/)

Kernstück des Hochwasservorhersagesystems ist das hydrodynamische Modell der Elbe, dessen Erstellung durch die Flussgebietsgemeinschaft in Auftrag gegeben worden ist. Bei diesem 2018 fertig gestellten Hochwasservorhersagemodell handelt es sich um ein 1D-hydrodynamisch-

numerisches Modell auf Grundlage der Software SOBEK, welches das durch die BFG betriebene Vorgängermodell WAWOS-1D ersetzt. Das Modell beschreibt eine Laufstrecke von 1100 km der Elbe bis zur Mündung, wobei ein entscheidender Teil den Freistaat Sachsen betrifft. Die Zuflüsse aus kleineren Teileinzugsgebieten werden mit verschiedenen N-A-Modellen, teils aus lokaler Fertigung, ausgeführt.

Durch das LHWZ werden in regelmäßigen Abständen automatisch generierte, sowie bedarfsweise manuelle pegelbezogene hydrologische Vorhersagen für Wasserstände und Durchflüsse erstellt und diese für ausgewählte Pegel in Form von Gangliniengrafiken veröffentlicht.

Die Berechnung und Bereitstellung einer Vorhersage erfolgt stets nach dem Vorhersagezeitpunkt. Die vorhergesagten Werte bleiben bis zum Vorliegen einer neuen Vorhersage gültig, werden aber mit Voranschreiten der Zeit ab dem Vorhersagezeitpunkt sukzessive durch Messwerte überschrieben (durch den »Messwertbereich«). In kleinen Einzugsgebieten werden aufgrund der hohen Unsicherheiten keine pegelbezogenen Vorwarnungen erzeugt, sondern ausschließlich Starkregenwarnungen abgegeben.

7 Klimabedingte und anthropogene Veränderungen der Randbedingungen

Das Klimasystem, die Erdoberfläche und die Land- und Flächennutzungen unterliegen zeitlichen Veränderungen, sind also instationär. Die Ursachen dieser Änderungen sind vielfältig und reichen von natürlichen klimatischen Schwankungen, über den menschlich verursachten Klimawandel²⁰, der Flächenversiegelung, veränderter Land- und Flächennutzung bis hin zu Baumaßnahmen in den Einzugsgebieten. Die möglichen Änderungen all dieser Faktoren können von den unterschiedlichen Hochwasservorhersagemodellen nicht *a priori* erfasst und angemessen berücksichtigt werden. Die Modelle müssen daher fortlaufend überprüft und nachkalibriert werden (vgl. Abschnitt 3), wozu ausreichend Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen müssen (vgl. Abschnitt 8.5). In Bezug auf veränderliche Randbedingungen, wie z.B. Änderungen der Landnutzung, haben modellbasierte Systeme (vgl. Abschnitt 4.2) Vorteile gegenüber datengetriebenen Modellen (vgl. Abschnitt 4.3). In den

²⁰ IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

modellbasierten Vorhersagesystemen wird der Niederschlag-Abfluss-Prozess über physikalisch basierte Grundlagen und Berechnungsansätze prozessorientiert abgebildet, sodass auch Änderungen der Randbedingungen und interne Modellzustände wie Bodenfeuchte oder Abfluss im Modell laufend nachgeführt werden können. Die Modellgüte sollte dennoch in regelmäßigen Abständen anhand von Güteindikatoren kontrolliert und ggf. nachkalibriert werden. Datengetriebene Modelle (Input-Output oder Black-Box-Modelle) basieren allein auf statistischen Zusammenhängen zwischen der Input-Größe (z.B. Niederschlag) und der Output-Größe (z.B. Abfluss). Diese Zusammenhänge werden auf Basis von Beobachtungsdaten ermittelt. Änderungen von Randbedingungen oder Systemeigenschaften (z.B. extensive Rodungen zur Bekämpfung des Borkenkäfers), die den Zusammenhang zwischen Input- und Output-Größe signifikant und strukturell beeinflussen, können somit nicht vom Modell unmittelbar berücksichtigt werden. Finden solche Änderungen von Randbedingungen und Eigenschaften über bestimmte Zeiträume statt, müssen die entsprechenden statistischen Zusammenhänge neu ermittelt werden. Insofern weisen modellbasierte Vorhersagesysteme eine größere Flexibilität in Bezug auf veränderliche Randbedingungen auf. Allerdings sind datengetriebene Modelle aus diesem Grund nicht grundsätzlich zu verwerfen. Vielmehr ist zu prüfen, inwieweit auch eine Anpassung solcher Modelle unter Berücksichtigung gebräuchlicher Vorhersageunsicherheiten möglich ist.

8 Verbesserungspotenzial der Hochwasservorhersage in NRW für kleine und mittlere Einzugsgebiete

8.1 Allgemeines

Ausgehend von dem derzeitigen Stand der Hochwasservorhersage in NRW gibt es ein beachtliches Verbesserungspotenzial. Dieses Verbesserungspotenzial sollte konsequent erschlossen werden. Die Etablierung eines flächendeckenden und optimalen Hochwasservorhersagesystems in NRW ist eine längerfristige Aufgabe. Um auch zeitnah signifikante Verbesserungen erreichen zu können, sollten die Arbeiten in unterschiedlichen Phasen erfolgen (Abbildung 13). In **Phase I** sollte das bisher im Testbetrieb vorhandene Hochwasservorhersagesystem LARSIM zeitnah in den operationellen Betrieb übergehen. Zugleich sollte eine Risikoklassifizierung aller Einzugsgebiete in NRW erfolgen, um hierauf aufbauend eine Priorisierung der Maßnahmen vornehmen zu können. Im Zentrum sollten kleinere Einzugsgebiete stehen, die aufgrund ihrer topographischen Gesamtsituation (z.B. Gefällesituation) eine besondere Gefährdung aufweisen. Für diese Gebiete sollte zeitnah ein eventbasiertes

Hochwasservorhersagesystem (vgl. Abschnitt 4.4) etabliert werden. Als Beispiel könnte hier das Vorhersagesystem für kleine Einzugsgebiete in Hessen (vgl. Abschnitt 6.1) dienen.

Für den qualitativ hochwertigen Betrieb von Hochwasservorhersagesystemen muss die Messdatenbasis –insbesondere in kleinen und mittleren Einzugsgebieten– verbessert werden (vgl. Abschnitt 2). Aus diesen Grund sollten in einer **Phase II** erhebliche Anstrengungen unternommen werden, um das vorhandene Pegelmessnetz zu erweitern und klimaresilient auszubauen. Zur Etablierung von Hochwasservorhersagesystemen (Prognose des Abflusses) sollten Modellprojekte zur Validierung von datengetriebenen und modellbasierten Systemen initiiert werden. Zur Erreichung einer 2D-Hochwasservorhersage (Prognose der Wasserstände und Überflutungsbereiche) sollte der Investition in datengetriebene Vorhersagesysteme (siehe Abschnitt 8.2 und 8.3) Priorität eingeräumt werden. Im Gegensatz zu modellgestützten Vorhersagesystemen sind datengestützte Systeme nicht durch Rechenbeschränkungen begrenzt und haben das Potential, auf ganze Einzugsgebiete, einschließlich Stadtgebiete, ausgeweitet zu werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse kann in einer **Phase III** ein flächendeckendes operationelles Hochwasservorhersagesystem für kleine und mittlere Einzugsgebiete etabliert werden. Dieses System muss kontinuierlich überprüft und nachgeführt werden, wofür der nachhaltige Betrieb und Unterhaltung eines klimaresilienten Messnetzes essentiell ist.



Abbildung 13: Phasen zur Einführung eines operationellen Hochwasservorhersagesystems in NRW

Mit der Strategie wird sowohl auf einer kurzen Zeitskala (ca. 1 Jahr) ein erheblicher Mehrwert für den Hochwasserschutz und die Hochwasservorhersage in NRW erzielt, als auch ein mittelfristiger Weg (ca. 6

Jahre) für ein nachhaltiges und bestmögliches Hochwasservorhersagesystem in NRW aufgezeigt.

Zur Erreichung der Ziele müssen in NRW erhebliche Anstrengungen unternommen und Ressourcen aufgewendet werden. Insbesondere muss der Erkenntnisstand bei neuen Vorhersagesystemen ausgebaut werden. Während bei modellbasierten und eventbasierten Vorhersagesystemen von einem sehr guten Wissensstand ausgegangen werden kann, ist derzeit keine vergleichbare Wissensbasis bei datengetriebenen Modellen und 2D-Hochwasservorhersagesystemen gegeben. Beide Methoden weisen jedoch ein hohes Potenzial auf, weshalb nachfolgend der Wissensstand und der weitere Forschungsbedarf für diese Systeme detaillierter beschrieben wird als für modellbasierte Systeme. Weiterhin wird in einem Abschnitt der Verbesserungsbedarf für den Ausbau eines klimaresilienten Messnetzes aufgezeigt, sowie auf notwendige Verbesserungen in der Kommunikation hingewiesen.

8.2 Modellbasierte Vorhersagesysteme

Modellbasierte Hochwasservorhersagesysteme werden seit einigen Jahrzehnten in der Praxis eingesetzt. Der Wissensstand zu diesen Modelltypen ist sehr hoch²¹. Daraus kann jedoch nicht abgeleitet werden, dass hier kaum Forschungsbedarf bestünde. Die Herausforderungen der modellbasierten Hochwasservorhersage liegen insbesondere in den folgenden Bereichen:

- Die Qualität der Niederschlagsvorhersage bestimmt maßgeblich die Qualität der Hochwasservorhersage.
- Durch die Komplexität der Modelle werden hohe Rechnerleistungen benötigt, um Ergebnisse in angemessen kurzer Zeit produzieren zu können.
- Die stetige Nachführung der Modelle auf die aktuelle Datenbasis ist zeit- und ressourcenintensiv.
- In kleinen und unbeepeelten Einzugsgebieten stehen nicht ausreichend Daten für die Modellkalibrierung zur Verfügung.

Für allen genannten Bereichen ist nach wie vor ein Verbesserungspotenzial vorhanden, welches adressiert werden muss.

²¹ z.B. Sharad Kumar Jain, Pankaj Mani, Sanjay K. Jain, Pavithra Prakash, Vijay P. Singh, Desiree Tullos, Sanjay Kumar, S. P. Agarwal & A. P. Dimri (2018) A Brief review of flood forecasting techniques and their applications, International Journal of River Basin Management, 16:3, 329-344

8.3 Datengetriebene Niederschlag-Abfluss Modelle

Künstliche Neuronale Netzwerke (KNN) sind für ihre Fähigkeit bekannt, stark nichtlineare Phänomene zu beschreiben, und sind eine der vielversprechendsten *Machine Learning*-Techniken in der Hydrologie. Während die ersten Anwendungen der Methode für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung auf die 90er Jahre zurückgehen, wurde der Einsatz verschiedener KNN für die Hochwasservorhersage erst ein Jahrzehnt später umfassend erforscht^{22,23}. Ihre Anwendung für die Hochwasservorhersage ist noch recht jung und befindet sich in einem frühen Entwicklungsstadium²⁴. Der Stand der Technik bei neuronalen Netzen liegt in Bereichen wie der Bild- und Objekterkennung sowie -klassifizierung, oder der Verarbeitung natürlicher Sprache und der Spracherkennung. In diesen Bereichen kommen fortschrittliche und komplexe Architekturen zum Einsatz. Die Notwendigkeit von Genauigkeit und Effizienz in der Anwendung hat die Forschung zur Entwicklung eines breiten Spektrums an fortschrittlichen Optimierungs- und Feinabstimmungslösungen motiviert.

Die Forschung auf dem Gebiet des „Deep Learning“ hat sich weiterentwickelt, um physikalische Informationen zu nutzen, um damit numerische Prozessgleichungen zu lösen oder um rechnerbasierte Lösungsverfahren für Prozessgleichungen zu verbessern. Bei letzteren kommen neuronale Netze zum Einsatz, um die numerische Lösung der Prozessgleichungen zu unterstützen; dieser Bereich wird als Geometric Deep Learning bezeichnet. Raissi et al.²⁵ stellten das Physics-Informed Neural Network (PINN) vor. PINN ist in der Lage, jede physikalische Prozessbeschreibung anzunähern, die den Daten zugrunde liegt. PINNs sind Deep-Learning Verfahren, die zur Lösung der mathematischen Prozessgleichungen durch Annäherung der eigentlichen Prozesslösung verwendet werden. Die Hypothese für PINNs besteht darin, die Lücke zwischen klassischen Methoden und datengesteuerten neuronalen Netzen zu schließen, indem verfügbare physikalische Informationen genutzt werden. Das Physics Informed Neural Network (PINN) wurde kürzlich entwickelt und für die räumliche und zeitliche Vorhersage von Überschwemmungen auf einem 1D-Kanal eingesetzt. Es besteht aus einer neuronalen Netzarchitektur, die mit physikalischen oder a priori Informationen

²² Kim, G., and A P Barros. 2001. "Quantitative Flood Forecasting Using Multisensor Data and Neural Networks." *Journal of Hydrology* 246 (1–4): 45–62. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00353-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00353-5).

²³ Campolo, M., A. Soldati, and P. Andreussi. 2003. "Artificial Neural Network Approach to Flood Forecasting in the River Arno." *Hydrological Sciences Journal* 48 (3): 381–98. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.3.381.45286>.

²⁴ Mosavi, Amir, Pinar Ozturk, and Kwok-wing Chau. 2018. "Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review." *Water* 10 (11): 1536. <https://doi.org/10.3390/w10111536>.

²⁵ M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis (2019): Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics*, Volume 378, 686-707

kodiert ist, in diesem Fall mit den physikalisch-hydrodynamischen Prozessgleichungen. Dies ist eine elegante Lösung für Abfluss- und Wasserstandsprognosen, die im Gegensatz zu reinen N-A-Konzeptmodellen, sowohl Kontinuität als auch Dynamik in den Prognosen bewahrt²⁶. Die Forschung auf dem Gebiet der datengetriebenen hydrologischen Modell muss jedoch zwingend intensiviert werden.

8.4 Datengetriebene 2D Hochwasservorhersage

Derzeit gibt es kein Hochwasservorhersagesystem, das Überschwemmungen für kleine und mittelgroße Einzugsgebiete vorhersagen kann. Außerdem beschränken sich die bestehenden Systeme auf die Vorhersage von Abflüssen und/oder Wassertiefen. Die Prognose des horizontalen Ausmaßes einer Überschwemmungen, besonders in Echtzeit, gilt noch immer als offene Herausforderung. Es gibt jedoch Wege, die zur Verbesserung der bestehenden Vorhersagesysteme beschritten werden könnten. Die Verbesserung kann sowohl für bestehende Systeme auf Grundlage der N-A-Modellierung, als auch für die sogenannten ereignisbasierten und kontinuierlichen Vorhersagesysteme angestrebt werden. Sie kann aber auch darin bestehen, den Systemen neue Funktionen hinzuzufügen. Dazu gehört die Fähigkeit, zweidimensionale (2D) Überschwemmungsprognosen zu erstellen. Dies ist von größter Bedeutung, denn nur so kann der Betreiber einer Hochwasservorhersagezentrale das Hochwasserrisiko genau rekonstruieren. Nur mit dieser Art von Vorhersage ist es möglich straßenscharf zu wissen, welche Gebiete wie stark betroffen sein werden.

In der Regel sind die für die Hochwasserkartierung erforderlichen 2D hydrodynamische Wellenausbreitungsmodelle sehr rechenintensiv und daher nicht für die Hochwasservorhersage in Echtzeit geeignet. Wissenschaftlich wurde sich in letzter Zeit auf die Entwicklung neuer Methoden für die hydrodynamische Hochwasservorhersage konzentriert. Diese fokussieren auf die Erstellung von vorgefertigten Szenarien und Datenbankabfragen zur Auswahl geeigneter Hochwasserkarten in Echtzeit. Bei dieser Alternative wird ein Satz von vorberechneten Hochwasserkarten in eine Datenbank eingelagert. Dann werden spezifische erkenntnisbasierte Verfahren angewandt, um die wahrscheinlichsten Karten und Szenarien in Echtzeit abzurufen. Die Methode kann zum Beispiel die Echtzeit-Abflussvorhersage an flussaufwärts gelegenen Messstation (unter Verwendung konventioneller Modelle) als Eingabe verwenden und sie mit den vorab aufgezeichneten Szenarien mit belegtem Erkenntniswert abgleichen. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sie ein effizientes Frühwarnsystem mit klarer

²⁶ Mahesh, Ragini Bal, Jorge Leandro, and Qing Lin. 2022. For Spatial-Temporal Flood Forecasting. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-5501-2>.

Darstellung der Hochwasserausdehnung bietet, da die Offline-Auswahl der Hochwasserkarten in kurzer Zeit erfolgt.

Das dazu eigens entwickelte Tool FloodEvac verfolgt den Ansatz, die hydrodynamischen 2D-Berechnungen für viele Hochwasserszenarien im Voraus durchzuführen (Abbildung 14) und stündlich zu speichern²⁷. Im Falle eines Hochwassers werden diese Karten dann angezeigt. Bei Bedarf können diese auch in Abhängigkeit von den zuvor berechneten (Szenario-)Ganglinien interpoliert werden. Auf diese Weise können stündliche 2D-Überschwemmungsvorhersagekarten auch mit einem Standard-PC erstellt werden.

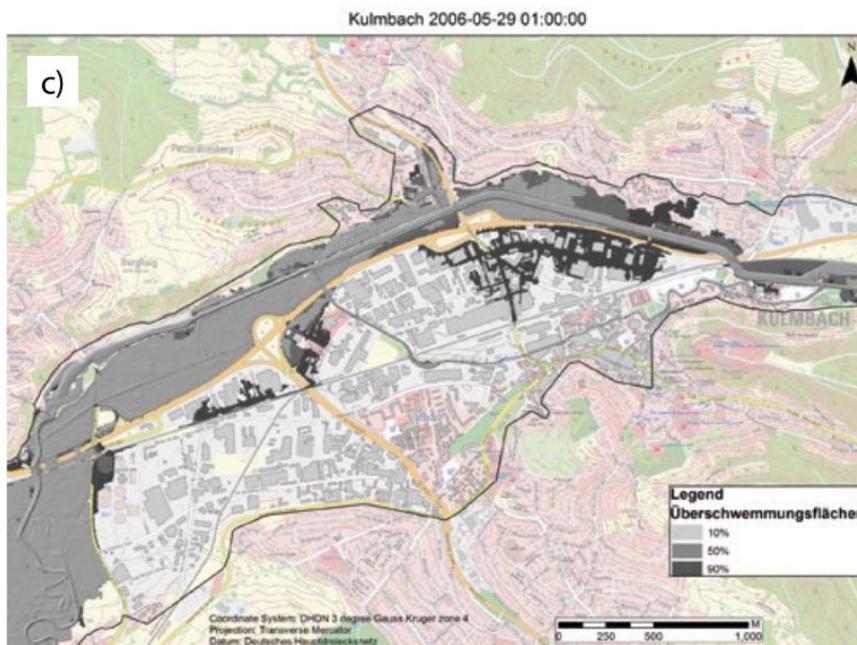


Abbildung 14: FloodEvac-Vorhersage durch 2D Hochwasserkarten (Lin, Leandro et al. (2020))

Eine weitere Alternative besteht darin, KNN zur Erstellung von Überschwemmungsvorhersagen in Echtzeit anzuwenden. Das Konzept sieht vor, dass ein KNN darin angeleitet werden kann, ein 2D-hydrodynamisches Modell nachzubilden, um später in der Vorhersagephase verwendet werden kann. Berkahn et al. (2019)²⁸ wendeten ein KNN für eine zweidimensionale (2D) Vorhersage des Ausmaßes von Überschwemmungen in Städten an. Lin, Leandro et al. (2020)²⁹ verwendeten später ein rückwärts propagierendes

²⁷ Bhola, Punit Kumar, Jorge Leandro, and Markus Disse. 2018. "Framework for Offline Flood Inundation Forecasts for Two-Dimensional Hydrodynamic Models." *Geosciences* 8 (9): 1–19. <https://doi.org/10.3390/geosciences8090346>.

²⁸ Berkahn, Simon, Lothar Fuchs, and Insa Neuweiler. 2019. "An Ensemble Neural Network Model for Real-Time Prediction of Urban Floods." *Journal of Hydrology* 575 (May): 743–54

²⁹ Lin, Q., J Leandro, W. Wu, P. Bhola, and M. Disse. 2020. "Prediction of Maximum Flood Inundation Extents with Resilient Backpropagation Neural Network: Case Study of Kulmbach." *Frontiers in Earth Science* 8 (August): 1–8.

Netzwerk für die Vorhersage des maximalen Überschwemmungsausmaßes wobei eine Genauigkeit, die einem physikalisch-hydrodynamischen Modell in nichts nachsteht, erreicht wird. Das KNN-Modell war in der Lage, 2D-Überschwemmungsvorhersagen mit einer sehr feinen Auflösung von 4x4 m in Echtzeit durchzuführen. Unlängst³⁰ wurde das Modell durch mehrstufige Vorhersagen weiter verbessert, die sich darum für die Planung der zeitlichen Reihenfolge zur Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen eignen.

8.5 Verbesserung der Messdatenbasis

Die wesentliche Grundlage aller Hochwasservorhersagen sind belastbare Datengrundlagen zu Niederschlägen, Durchflüssen und Wasserständen. Diese Daten werden benötigt, um die Modelle erstellen, kalibrieren und betreiben zu können. Je weniger Daten für diese Aufgaben zur Verfügung stehen, umso größer sind die resultierenden Unsicherheiten in den Modellergebnissen. Daher bedarf es neben einer Verbesserung der modelltechnischen Ansätze und Infrastruktur auch zwingend einer Verbesserung der hydro-meteorologischen Messnetze. Während das Messnetz von Niederschlagsstationen in Nordrhein-Westfalen recht gut ausgebaut ist und diese Datenbasis zusätzlich durch Radar-Daten des DWD³¹ verbessert und räumlich höher aufgelöst werden kann, ist das Pegelmessnetz an Fließgewässern deutlich weniger stark ausgebaut. Nach dem Messnetzkonzept des LANUV NRW³² werden die Pegel in die Kategorien Grundmessnetz, Verdichtungsmessnetz und Sondermessnetz eingeteilt. Im wasserwirtschaftlichen Informationssystem HYGON des LANUV NRW können die aktuellen hydrologischen Rohdaten von 175 Pegeln abgerufen werden. Während des Hochwasser-Ereignisses vom Juli 2021 wurden an 40 von 175 Pegeln an NRW-Gewässern stark erhöhte Wasserstände gemessen, die teilweise die bisher bekannten Hochwassermarken um bis zu einem Drittel überschritten.³³ Auswertungen zu dem Hochwasser-Ereignis an der Ahr in Rheinland-Pfalz zeigen, dass die gemessenen Abflusswerte zu weiten Teilen sowohl weit über den bisher gemessenen Spitzenwerten liegen, als auch über den HQ_{100} -Werten³⁴. Diese wurden bis zu einem Faktor von ca. 2,0 überschritten, woraus sich Jährlichkeiten in der Größenordnung von 10.000 Jahren ableiten lassen. Es ist davon auszugehen, dass sich in NRW nach detaillierteren Analysen vergleichbare Ergebnisse zeigen. Es hat sich während

³⁰ Lin, Qi., J. Leandro, S. Gerber, and M. Disse. 2020. "Multistep Flood Inundation Forecasts with Resilient Backpropagation Neural Networks: Kulmbach Case Study." *Water (Switzerland)* 12.

³¹ <https://www.dwd.de/DE/leistungen/radarprodukte/radarprodukte.html>

³² LANUV NRW (2013): Messnetzkonzept Hydrologie NRW – Teil Pegel

³³ <https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/historisches-unwetter-wassermassen-zwei-tagen-wie-sonst-drei-juli-monaten>

³⁴ https://www.cedim.kit.edu/download/FDA_HochwasserJuli2021_Bericht1.pdf

und nach dem Ereignis gezeigt, dass zum einen bestimmte Pegel durch das Hochwasser selbst beschädigt oder zerstört wurden. Zum anderen musste festgestellt werden, dass die bauliche Gestaltung einiger Pegel, sowie die installierte Messtechnik in einigen Fällen nicht geeignet waren, um die extremen Hochwasserabflüsse angemessen aufzeichnen zu können. Hierdurch gehen wertvolle Informationen verloren, die für eine eingehende Analyse des Hochwasser-Ereignisses und daraus abgeleitete Erkenntnisse wichtig wären. Das LANUV NRW hatte bereits im September 2021 ein erstes Gutachten³⁵ zur Analyse der Auswirkungen des Hochwasser-Ereignisses vom 12.-19. Juli 2021 auf das Pegelwesen in Nordrhein-Westfalen erarbeiten lassen. Darin werden Handlungsfelder für das Pegelwesen in NRW definiert (Abbildung 15), wobei der Ausgestaltung eines klimaresilienten Pegelmessnetzes eine besondere Bedeutung zukommt.

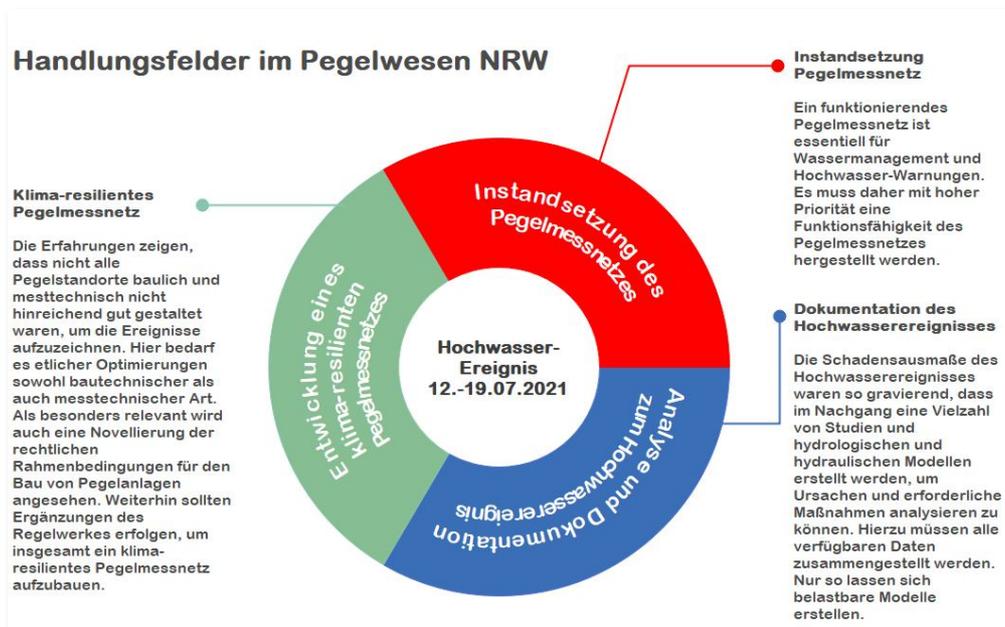


Abbildung 15: Definierte Handlungsfelder im Pegelwesen in NRW nach Hochwasser-Ereignis vom 14.07.2021 (Mudersbach, 2021)

Hierzu sollte das vorhandene „Messnetzkonzept Hydrologie NRW – Teil Pegel“ auf die Anforderungen, welche sich aus der Analyse des Hochwasser-Ereignisses vom Juli 2021 ergeben, angepasst werden.

Ferner sollte ein Klassifizierungssystem für alle Pegel in NRW eingeführt werden, was der Aufgabe und der wasserwirtschaftlichen Bedeutung des jeweiligen Pegels Rechnung trägt. Dabei greift eine Klassifizierung anhand der Gewässerordnungen zu kurz. Selbstverständlich hat ein Pegel an einem

³⁵ Mudersbach, C. (2021): Maßnahmen zur Bewältigung der Auswirkungen des Hochwasser-Ereignisses vom 12.-19. Juli 2021 auf das Pegelwesen in Nordrhein-Westfalen, Gutachten im Auftrag des LANUV NRW (unveröffentlicht)

Gewässer 1. Ordnung eine wichtige wasserwirtschaftliche Bedeutung, aber auch ein Zuflusspegel zu einer Talsperre bzw. Hochwasserrückhaltebecken oder ein Pegel oberhalb einer besonders gefährdeten Ortslage an einem Gewässer 3. Ordnung hat eine herausragende wasserwirtschaftliche Bedeutung. Für Pegel mit besonderen wasserwirtschaftlichen Bedeutungen sollten zum einen die Anforderungen an Gestaltung und Betrieb höher sein, zum anderen sollte aber auch im Rahmen des Genehmigungsverfahrens der ordnungsgemäßen Auslegung und dem Betrieb Vorrang eingeräumt werden. Dies impliziert, dass im Einzelfall dem ordnungsgemäßen Pegelbetrieb Vorrang vor den Anforderungen der EU-WRRL gegeben werden sollte. Um hier jedoch auf Seiten der Planenden, Pegelbetreiber und Genehmigungsbehörden Planungs- und Rechtssicherheit zu schaffen, bedarf es eines entsprechenden Klassifizierungssystems, welches mindestens durch Verordnungen geregelt ist.

Um die Pegel selbst klimaresilient auszulegen, sollte jeder Pegel mit einer besonderen wasserwirtschaftlichen Bedeutung über eine erosionssicher ausgebaute Messtrecke verfügen. Zudem sollten häufige Durchflussmessungen erfolgen (vgl. Pegelhandbuch³⁶). Zudem ist eine ausfallsichere und redundante Messtechnik vorzusehen. Begleitend sollten für diese Pegel 2D-hydroneurische Modelle erstellt und fortgeführt werden, um W/Q-Beziehungen absichern und das Strömungsverhalten im Umfeld des Pegels analysieren zu können. Der Ausbau der Pegelstrecken sollte so erfolgen, dass –wenn möglich– auch sehr extreme Abflussereignisse im Pegelprofil abgeführt werden können. Eine Auslegung auf ein HQ₁₀₀ wird hier als nicht ausreichend angesehen.

Die Erfahrungen der Hochwasser-Ereignisse haben gezeigt, dass klassische Messsysteme zur Erfassung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten (z.B. Drucksonde, stationäre Doppler-Sensoren) bei sehr extremen Abflussbedingungen zum Ausfall neigen können, da diese mit dem Wasser direkt in Kontakt sind oder die hohen Wasserstände nicht erfassen können. Manuelle Messungen sind bei Hochwasserlagen an Pegeln häufig entweder aufgrund von Kapazitätsproblemen oder Arbeitssicherheitsvorschriften nicht möglich. Aus diesem Grund ist es wichtig, die messtechnische Ausstattung hinsichtlich möglicher Alternativen, wie z.B. berührungsloser Messsysteme in ausreichender Höhenlage (z.B. Radar und/oder Kamera), zu überprüfen. Etwaige größere Unsicherheiten bei der Durchflussermittlung durch solche Methoden können toleriert werden.

Hochwasser-Ereignisse betreffen nicht nur große Flüsse und urbane Räume. Auch an kleineren Gewässern und im ländlichen Raum ergeben sich

³⁶ https://www.lawa.de/documents/02_anhang_2_lawa_pegelhandbuch_2_3_1552303807.pdf

gravierende Folgen. Insofern sollte eine Verdichtung bzw. Ausweitung des Pegelmessnetzes in die kleineren Einzugsgebiete erfolgen.

Schließlich sollten Anstrengungen unternommen werden, um die Unsicherheiten bei Durchflussmessungen –insbesondere bei Hoch- und Niedrigwasser– zu verringern, um nach und nach Datenqualitäten zu erhöhen.

8.6 Kommunikation von Systemwarnungen an Entscheidungsträger

Eine zentrale Herausforderung in einem operationellen Hochwasservorhersagesystem besteht in einer zeitnahen und für den institutionellen Entscheidungsträger unmittelbar verständlichen Weitergabe eines Alarmsignals, damit diese darin unterstützt werden, entsprechende und für die zivile Sicherheit ausreichende Maßnahmen einzuleiten. Dabei spielt auch die Vorhersageunsicherheit eine wichtige Rolle. Da die Modellprognose aus Gründen, die in Abschnitt 3 erläutert wurden, inhärent unsicher ist, ist es erforderlich, den Entscheidungsträger, welcher mit der Verantwortung eines Evakuierungsbefehls oder der Umsetzung einer Schutzmaßnahme konfrontiert ist, darin vorzubereiten und zu unterstützen, um ihn nicht mit der Entscheidung alleine zu lassen. Gerade dieser Aspekt scheint im Falle der Ahrflutkatastrophe eine entscheidende Rolle gespielt zu haben. Um dem entgegenzuwirken ist eine regelmäßige Schulung erforderlich, die darin befähigen sollte, wie ein Warnsignal in der operationellen Vorhersage in einem bestimmten räumlichen und zeitlichen Kontext zu interpretieren ist. Dabei spielen besonders die Art des Einzugsgebietes (groß/klein, steil/flach, städtisch/ländlich) und des Niederschlagsereignisses (Stark-/Landregen) eine entscheidende Rolle. Während z.B. die Dynamik einer Flutwelle an einem großen Fluss wie der Rhein zeitlich wie räumlich sehr genau prognostizierbar ist, treten Hochwasserereignisse in kleineren Einzugsgebieten plötzlich und in ihrem Ausmaß völlig überraschend ein. Die Ereignisse sind dabei von erheblichen und oft völlig unterschätzten Prognoseunsicherheiten geprägt, mit denen im eintretenden Extremfall im Interesse der Sicherheit pragmatisch umzugehen ist. Eine Voraussetzung dafür ist eine einheitliche und transparente, sowohl fachliche wie institutionelle Kommunikationsebene. Ebenso ist ein Abgleich der Hochwasserprognosen mit anderen verfügbaren Systemen (z.B. EFAS) zu empfehlen, um Vorhersageunsicherheiten bewerten und interpretieren zu können.

9 Fazit und Zusammenfassung

Das vorliegende Gutachten befasst sich mit dem Thema der Verbesserung der Hochwasservorhersage für mittlere und kleine Fließgewässer, insbesondere im Mittelgebirge von Nordrhein-Westfalen.

Das Gutachten zeigt die Anforderungen und Herausforderungen auf, die für operationelle Hochwasservorhersagesysteme in kleinen und mittleren Einzugsgebieten erfüllt bzw. bewältigt werden müssen. Es zeigt sich, dass aufgrund der in NRW vorhandenen Randbedingungen (hydrometrisches Messnetz, personelle Ressourcen, etc.) kurzfristig die Einführung eines flächendeckenden operationellen Hochwasservorhersagesystems für kleine und mittlere Einzugsgebiete nicht realistisch erscheint. Allerdings können in mit einem mehrschrittigen Konzept (vgl. Abschnitt 8.1) sowohl kurzfristig erhebliche Verbesserungen in der Hochwasservorhersage als auch mittelfristig ein auf dem aktuellen Stand der Technik basierendes Hochwasservorhersagesystem etabliert werden.

Nach Meinung der Verfasser sollten die folgenden drei Punkte bei der Verbesserung der Hochwassersysteme für mittlere und kleine Fließgewässer vorrangig berücksichtigt werden, nämlich:

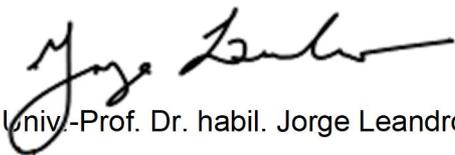
- **Kurzfristig** kann über ein **eventbasiertes Hochwasservorhersagesystem**, welches auf dem zeitnah in den operationellen Betrieb übergehenden LARSIM-Modells basiert, eine Verbesserung der Hochwasservorhersage erreicht werden. In weiteren Schritten sollten dann jedoch die Grundlagen für ein auf dem aktuellen Stand der Technik basierendes Hochwasservorhersagesystem gelegt werden. Dazu gehört die **Erweiterung** und der **klimaresiliente Ausbau des Pegelmessnetzes**.
- Für mittlere und kleine Fließgewässer ist die Genauigkeit der Vorhersagen von größerer Bedeutung. Das betroffene Gebiet kann mitunter nur sehr klein sein. Daher ist es wichtig, dass die Hochwasservorhersagezentren mit Instrumenten ausgestattet sind, die die Folgen eines Hochwasserereignisses mit einem hohen räumlichen Detaillierungsgrad vorhersagen können. In diesem Fall sind datenbasierte Modelle, die 2D-Hochwasserkarten vorhersagen können, die einzige Möglichkeit, dies zu verwirklichen. Bisher gibt es in NRW kein solches System, so dass die Ausweitung der **Vorhersage auf 2D-Hochwasserüberflutungen** als eines der Ziele angesehen wird, um den Status Quo wesentlich zu verändern.
- Neben den fachlich-technischen Verbesserungen zur Erreichung einer optimierten Hochwasservorhersage in NRW sind aber auch erhebliche Anstrengungen erforderlich, um die Vernetzung und die

administrativen Zuständigkeiten zu verbessern. So ist beispielsweise eine intensive Vernetzung mit dem europäischen Hochwasservorhersagesystem EFAS und den Hochwasservorhersagediensten der angrenzenden Bundesländer empfehlenswert. Zum anderen müssen **Hochwassermeldeordnungen** für die kleinen und mittleren Einzugsgebiete erstellt und Zuständigkeiten im Hochwasserfall optimiert werden. Hochwasservorhersagesysteme können in ihrer Gesamtheit nur dann als effiziente Bausteine zur Hochwasserkatastrophenvorsorge betrachtet werden, wenn Alarmsignale, die vom System emittiert werden, institutionelle Entscheidungsträger erreichen und diese auch darin unterstützen, zeitlich richtige Maßnahmen, wie z.B. die Entscheidung zur Evakuierung der Bevölkerung aus einem gefährdeten Gebiet, einzuleiten. Dabei muss die inhärente Unsicherheit der Prognose berücksichtigt werden und der Entscheidungsträger darin unterstützt werden, wie Warnsignale im Interesse der zivilen Sicherheit in solchen Fällen interpretiert werden sollen. Dies erfordert unter anderem eine vereinheitlichte institutionelle und fachliche **Kommunikationsebene**.

Siegen und Bochum, 28.04.2022



Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach



Univ.-Prof. Dr. habil. Jorge Leandro



Univ.-Prof. Dr. Paolo Reggiani