



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil II: Eingehende Darstellung

### Verbundname:

Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete mit innovativen Methoden der Niederschlagsmessung und -vorhersage (HoWa-innovativ)

### Teilvorhaben:

Probabilistische Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete

### Projektleitung:

Prof. Dr. Niels Schütze  
Technische Universität Dresden  
Professur Hydrologie  
01062 Dresden  
Tel: +49 351 463 36380  
Fax: +49 351 463 37162  
Niels.Schuetze@tu-dresden.de

### Autor:

Dr. Jens Grundmann  
jens.grundmann@tu-dresden.de  
Tel: +49 351 463 35556

### Förderhinweis:

Das Vorhaben wurde im Rahmen der Bekanntmachung Zivile Sicherheit – „Anwender - Innovativ: Forschung für die zivile Sicherheit“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Laufzeit: 01.08.2018 – 31.10.2021

Förderkennzeichen: 13N14825

## Inhalt

Arbeitsplanung des Projektablaufs .....	3
Ausführliche Darstellung der Arbeiten.....	4
Festlegung der Testgebiete .....	4
Aufbau Verdichtungsmessnetz und technische Infrastruktur.....	5
Niederschlags-Abfluss(N-A)-Modellierung für kleine Einzugsgebiete.....	5
Retrospektive Analyse der Niederschlagsfelder.....	7
Ensemblevorhersagen .....	7
Probabilistisches Frühwarn-Tool.....	10
Demonstrator Hochwasserfrühwarnung kleine Einzugsgebiete.....	13
Operationeller Testbetrieb.....	16
Ereignis vom 24.05.2018 .....	16
Ereignis vom 13.-14.10.2020.....	17
Ereignis vom 13.07.2021 .....	19
Ereignis vom 17.7.2021 .....	21
Schulungs- und Trainingskonzept.....	23
Publikationen.....	24



## Ausführliche Darstellung der Arbeiten

### Festlegung der Testgebiete

Mit Projektbeginn erfolgte die Auswahl der Testgebiete zusammen mit den Projektpartnern und unter Einbeziehung lokaler Einsatzleitungen des Katastrophenschutzes, um die Methoden für den Demonstrator „Hochwasserfrühwarnsystem kleine Einzugsgebiete“ bestmöglich zu entwickeln und zu validieren. Kriterien für die Auswahl waren (a) hohes Schadenspotential und Vulnerabilität gegenüber Starkregen und resultierendem Hochwasser, (b) bekannte Probleme bezüglich der Niederschlagsmessung (z.B. Überlappungsbereich von Regenradaren) und (c) das Vorhandensein von CML (Commercial Microwave Link) Datensätzen. Im Ergebnis wurden die Flussgebiete der oberen Weißen Elster (Vogtland), der Müglitz (Osterzgebirge) und der Mandau (Oberlausitzer Bergland) ausgewählt. Abbildung 2 zeigt die Lage der Gebiete innerhalb Sachsens, Tabelle 3 gibt Auskunft zu den enthaltenen Beobachtungspegeln mit den zugehörigen Einzugsgebietsgrößen.

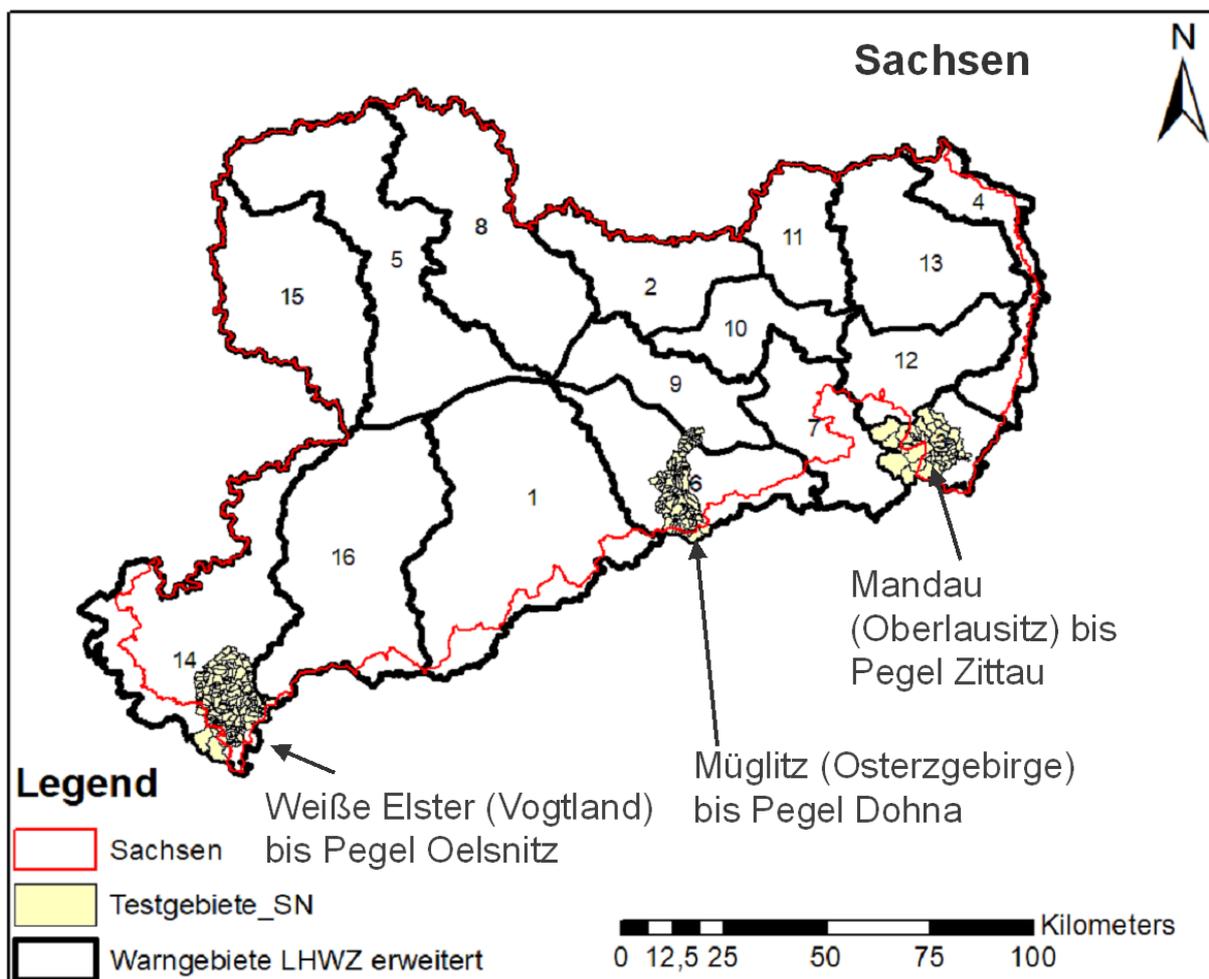


Abb. 2: Lage der Testgebiete in Sachsen

Die Gebiete befinden sich in 3 verschiedene Regionen in Sachsen, die unterschiedliche Landschaftsformen und damit verbundene hydrologische Charakteristiken aufweisen. Dadurch ergibt sich eine breitere Testbasis für die entwickelten Methoden und eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung eines Hochwasserereignisses im operativen Testbetrieb.

## Aufbau Verdichtungsmessnetz und technische Infrastruktur

Aufbauend auf den Recherchen zu existierenden Abfluss- und Niederschlagsmessungen in den Testgebieten und übergeordneten größeren Gebieten erfolgte eine Verdichtung des existierenden Messnetzes, um speziell die kleinräumige Dynamik von Hochwasserereignissen besser beobachten zu können. Dazu wurden die Testgebiete bereist und geeignete Standorte für zusätzliche Messstellen zusammen mit den örtlichen Einsatzleitungen des Katastrophenschutzes identifiziert. Entsprechend notwendige Genehmigungen wurden eingeholt, geeignete Messtechnik beschafft, getestet und installiert. Beispielfhaft zeigt Abbildung 3 den Wasserstandssensor des Verdichtungsmessnetzes „Abfluss“ in Markneukirchen / Vogtland am Schwarzbach. Zusätzlich zur Verdichtung des Messnetzes „Abfluss“ erwies sich eine Verdichtung des existierenden Niederschlagsmessnetzes als notwendig, um speziell kleinräumige Niederschlagsereignisse messtechnisch besser zu erfassen. Hierfür wurden im Osterzgebirge zusätzliche Niederschlagsmesser installiert, die Daten in Echtzeit basierend auf einer IoT-Lösung lieferten. Beispielfhaft zeigt Abbildung 3 den installierten Niederschlagsmesser bei der Freiwilligen Feuerwehr in Luchau / Osterzgebirge. Die Wartung und Pflege der Messtechnik des Verdichtungsmessnetzes und des HoWa-Regenmessnetzes unter den CML-Links (installiert durch die Uni Augsburg) sowie die Durchführung von Abflussmessungen gehörten zu den wiederkehrenden Daueraufgaben während der Projektlaufzeit.



Abb. 3: Wasserstandssensor in Markneukirchen / Vogtland am Schwarzbach (links), Niederschlagsmesser in Luchau / Osterzgebirge (rechts)

Neben dem Verdichtungsmessnetz wurde die technische Infrastruktur für die Projektbearbeitung etabliert. Diese umfasst die Beantragung, Einrichtung und Wartung entsprechender IT-Ressourcen, die durch das ZIH der TU Dresden bereitgestellt wurden. Dazu zählen u.a. virtuelle Maschinen zum kontinuierlichen Prozessieren von Vorhersage- und Beobachtungsdaten (Server), Webserver zur Publikation der Vorhersagen im Internet sowie Netzwerkdatenspeicher zur Datensicherung und Aufnahme großer Datenmengen. Zudem wurden Schnittstellen zu den Datenprodukten des DWD entwickelt und der kontinuierliche Datenabruf eingerichtet.

## Niederschlags-Abfluss(N-A)-Modellierung für kleine Einzugsgebiete

Ziel der N-A-Modellierung ist eine flächendifferenzierte und gebietsspezifische Modellierung der Hochwasserentstehung sowie der Simulation von Ereignisabläufen für hochwasserauslösende Wetterlagen in den Testgebieten. Dazu wurden für die Testgebiete mit der Software DeHM (Deterministische hydrologische Modellierung, Eigenentwicklung der TUD) N-A-Modelle aufgebaut und an historischen Daten kalibriert und validiert. Bei DeHM handelt es sich um ein ereignisbasiertes, konzeptionelles, hydrologisches Modell mit flexibler Topologiestruktur. Es enthält unterschiedliche Modellansätze für die

Berechnung der Abflussbildung und Konzentration sowie des Abflustransports (Routing) im Fließgewässer, um eine bestmögliche Anpassung an lokale Gebietseigenschaften und regionalspezifische hydrologische Prozessmuster zu erreichen. Der Simulationszeitschritt beträgt 15 min.

Die N-A-Modelle der Testgebiete wurden in die nächst größeren bepegelten Einzugsgebiete eingebettet und ermöglichen so eine umfassendere regionale Analyse. Für den Aufbau der N-A-Modelle wurde folgenden Datenquellen verwendet:

- Digitales Geländemodell DGM 10
- Fließgewässernetz mit Pegelstandorten, Gewässerkennzahlen und zugehörigen Teileinzugsgebieten
- Bodenkarte BK 50
- Landnutzung nach CORINE

Die Daten wurden mit einem geografischen Informationssystem aufbereitet und zur Parametrisierung der Modelle herangezogen. Die Parameter der N-A-Modelle wurden im anschließenden Prozesse der Kalibrierung derart variiert, dass der simulierte Abfluss bestmöglich mit der Abflussbeobachtung (Messwerte, bereitgestellt durch das LHWZ) übereinstimmt. Beispielhaft zeigt Abbildung 4 das Ergebnis der nachfolgenden Validierung, bei der das Modell an einem Datensatz überprüft wird, der nicht in der Modellkalibrierung zum Einsatz kam. Dargestellt ist der Vergleich zwischen der Abflussbeobachtung (rot) und der Simulation (grün - solid) anhand des N-A-Modells des Vogtlandes für das Hochwasserereignis im Mai 2018.

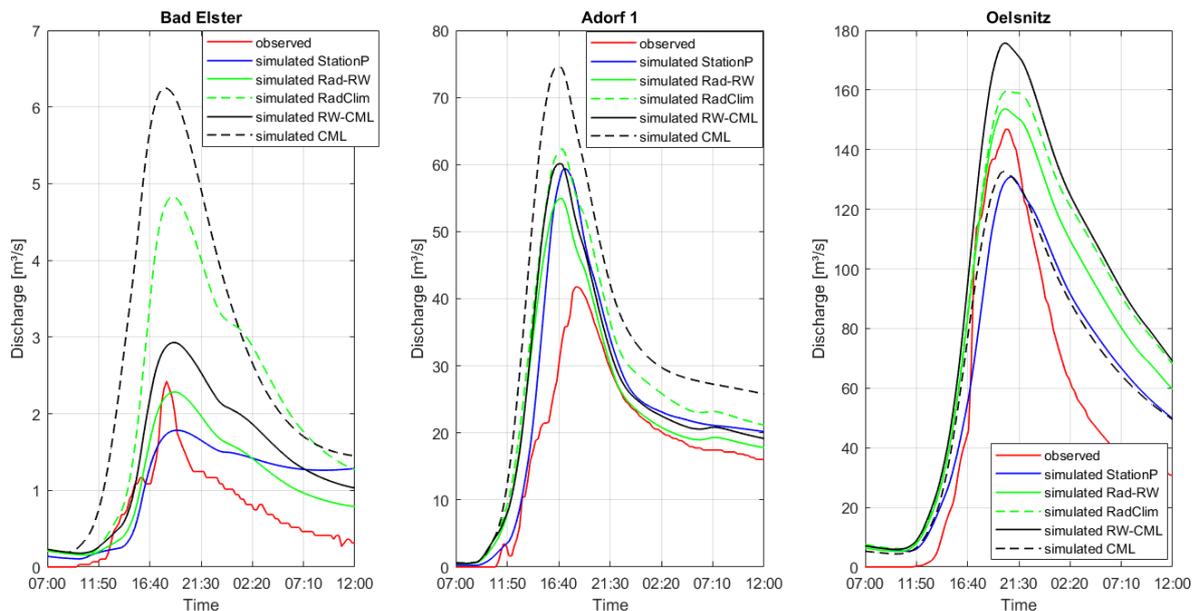


Abb. 4: Ergebnisse der Abflusssimulationen für unterschiedliche Niederschlagsprodukte (Stationsniederschläge (StationP), Radolan-RW (Rad-RW: angeeichter Radarniederschlag), Radar-Klimatologie (RadClim: korrigierter, angeeichter Stationsniederschlag), Radolan-CML (RW-CML: Kombination aus Radar und CML), interpolierte CML-Daten (CML)) im Vergleich zur Beobachtung (rot – observed) für die Pegel Bad Elster (links), Adorf 1 (Mitte) und Oelsnitz (rechts) an der Oberen Weißen Elster im Vogtland.

Dabei ist eine gute Übereinstimmung zwischen den Ganglinien für die Pegel Bad Elster und Oelsnitz zu erkennen. Am Pegel Adorf 1 ist dies nicht der Fall, allerdings zeigen hier auch die Ergebnisse der Simulationen mit anderen Niederschlagsprodukten, zum Teil noch deutlichere, Abweichungen. Abbildung 4 verdeutlicht zudem die Problematik einer korrekten raum-zeitlichen Niederschlags-schätzung (und der darin enthaltenen Unsicherheit), die letztendlich eine Annäherung an den tatsächlich unbekannt

Messwert darstellt. Im Rahmen der Kalibrierung und Validierung der N-A-Modelle wurden die Daten des Produkts Radolan-RW des DWD verwendet. Dabei handelt es sich um an Bodenstationen angeeichte Radarniederschläge in stündlicher Auflösung, die auch operationell durch den DWD angeboten werden und so eine gute Referenz mit Blick auf eine Hochwasserfrühwarnung darstellen.

### Retrospektive Analyse der Niederschlagsfelder

Eine retrospektive Analyse erfolgte für die CML-Felder in den Testregionen. Dabei wurden mit Hilfe der N-A-Modelle die Auswirkungen unterschiedlicher Niederschlagsprodukte auf den Gebietsabfluss simuliert. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für das Ereignis im Mai 2018 im Vogtland. In dieser Region traten Starkregenereignisse im Zeitraum der retrospektiven Analyse im Vergleich zu den anderen Testgebieten häufiger auf. Neben den CML-Feldern wurden folgende Niederschlagsprodukte verwendet: an Bodenmessungen angeeichte Radarniederschlag Radolan-RW des DWD<sup>1</sup> (Rad-RW), fehlerkorrigierte Radarniederschläge aus der Radar-Klimatologie des DWD<sup>2</sup> (RadClim), Stationsdaten von Niederschlagsmessstöpfen unterschiedlicher Betreiber (StationP, bereitgestellt durch das LHWZ). Die Ergebnisse zeigen, dass alle Niederschlagsprodukte für die untersuchten Zeiträume/Ereignisse Niederschläge aufweisen wenn auch in unterschiedlicher Quantität. Bei den CML-Feldern (CML) zeigt sich insbesondere das Problem der Interpolation des Niederschlags in die Fläche, so dass das Niederschlagsverhalten an vom CML-Link entfernten Orten nicht adäquat repräsentiert wird. Eine Erhöhung der Messnetzdichte (zusätzliche CML-Links) oder kombinierte Produkte wären hier von Vorteil. Speziell in den Testgebieten, die direkt von den CML-Links überstrichen werden, zeigen sich die Vorteile der kombinierten Daten. Im Vergleich zu den (angeeichten) Daten des Niederschlagsradars (Rad-RW) weist die Kombination aus Radar und CML-Daten (RW-CML) bezüglich der simulierten Abflüsse eine ähnliche Performance auf. Allerdings sind die CML-Daten im operativen Fall frühzeitiger verfügbar, da sie nicht nachgeführt (angeeicht) werden müssen. Die Verwendung interpolierter CML-Niederschlagsfelder führt angesichts der geringen Anzahl an CML-Links in den Testregionen zu Fehlern. So werden z.B. die Abflüsse in kleinen Einzugsgebieten überschätzt und in großen Einzugsgebieten eher unterschätzt.

### Ensemblevorhersagen

Ensemblevorhersagen sind die Voraussetzung für die Ableitung probabilistischer Vorhersageprodukte. Abbildung 5 illustriert das Grundprinzip hydro-meteorologischer Ensemblevorhersagen.

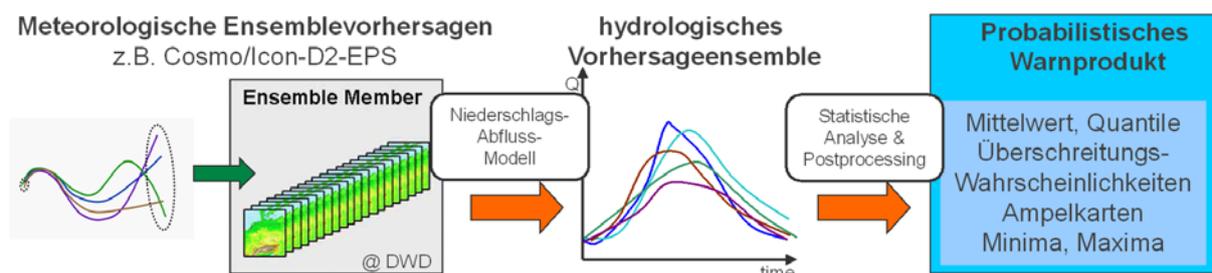


Abb. 5: Grundprinzip hydro-meteorologischer Ensemblevorhersagen

<sup>1</sup> Weigl, E., und Winterrath, T.: Radargestützte Niederschlagsanalyse und –vorhersage (RADOLAN, RADVOR-OP), promet, Jahrg. 35, Nr. 1/2, 78-86, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2017012510513>, 2009.

<sup>2</sup> Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Lengfeld, K., Walawender, E., Weigl, E., und Becker, A.: RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar-data, one-hour precipitation sums (RW) DOI: [10.5676/DWD/RADKLIM\\_RW\\_V2017.002](https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002), 2018.

Ausgangspunkt sind die Niederschlagsensembles des numerischen Wettermodells (NWP) Cosmo-D2-EPS des DWD<sup>3</sup>, das 20 Ensemble-Member aufweist. Die Ensemble-Member beschreiben die Unsicherheit in der meteorologischen Vorhersage. Sie werden gebildet durch Variation der Rand- und Anfangsbedingungen des NWP, die aus dem übergeordneten NWP Icon-EU abgeleitet werden, sowie durch Parametervariation der Modellphysik des NWP. Zusätzlich zum Ensemble steht der deterministische Hauptlauf des Cosmo-D2 Wettermodells zur Verfügung. Er beinhaltet die Vorhersage, die den NWP-Betreiber am wahrscheinlichsten erscheint. Die Ensemblevorhersagen und der Hauptlauf des Niederschlags werden mit Hilfe der N-A-Modelle der Testgebiete in Abfluss-Ensemble umgerechnet. Die Simulationen erfolgen retrospektiv und nur für Zeiträume mit prognostizierten Starkregenereignissen. Hierfür wurde eine Vorprozessierung der Cosmo-D2 Daten entwickelt. Die enthaltenen Softwareroutinen (Schnittstellen) ermöglichen den Bezug aktueller und historischer Daten der NWP, die Selektion und Ablage der Daten für Sachsen im netCDF-Format, die Prüfung bezüglich des Auftretens von Starkregenereignissen sowie die Aufbereitung der Vorhersagedaten in das entsprechende Datenformat des N-A-Modells. Das nachgeschaltete Postprocessing beinhaltet Softwareroutinen für eine erweiterte Ergebnisausgabe der Niederschlags- und Abflussensemble für unterschiedliche Gebietseinheiten (z.B. Sachsen, beobachtete Testgebiete, unbeobachtete Teileinzugsgebiete).

Die Evaluierung der Ensemblevorhersagen in Bezug auf die Trefferrate und Vorhersagbarkeit von Ereignissen erfolgt anhand der Beobachtungen von Niederschlag und Abfluss an den Pegeln der Testgebiete. Hierfür dient niederschlagsseitig das Radolan-RW-Radarprodukt des DWD als Referenz und für den Abfluss die gemessenen Werte an den amtlichen Beobachtungspegeln in Sachsen. Für die retrospektive Analyse (Hindcasts) der Ensemblevorhersagen wird die Methode der ROC-Kurve verwendet (Peterson et al. 1954)<sup>4</sup>. Diese bewertet die Trefferrate True Positive Rate (TPR) und False Positive Rate (FPR) für das Erreichen vorzugebender Schwellenwerte. Die Durchführung erfolgte auf drei verschiedenen Ebenen:

- P-zellweise: Vergleich der Zellenwerte des Niederschlags von Cosmo-D2(-EPS) vs. Radolan-RW
- P-EZG: Vergleich der Gebietsmittelwerte des Niederschlags von Cosmo-D2(-EPS) vs. Radolan-RW
- Q: Vergleich der simulierten (mittels Cosmo-D2(-EPS)) und beobachteten Abflüssen

Tabelle 2 gibt einen Überblick der verwendeten Ereignisse. Bedingt durch die mehrjährige Trockenperiode in den Jahren 2019 & 2020 lag nur eine geringe Anzahl an zumeist kleineren Hochwasserereignissen für die Analyse vor. Lediglich während des Ereignisses im Mai 2018 wurde die Hochwasserwarnstufe 1 überschritten.

Tab. 2: Starkregen und Hochwasserereignisse für die Evaluierung der Ensemblevorhersagen

Testgebiet	Startzeit	Endzeit
<b>Vogtland (Weiße Elster)</b>	22.05.2018, 09:00	24.05.2018, 21:00
	11.07.2019, 09:00	12.07.2019, 18:00
	08.09.2019, 03:00	09.09.2019, 15:00
<b>Osterggebirge (Müglitz)</b>	31.08.2019, 09:00	01.09.2019, 15:00
	07.09.2019, 21:00	09.09.2019, 18:00
	27.06.2020, 09:00	28.06.2020, 15:00
<b>Ostsachsen (Mandau)</b>	11.06.2019, 15:00	13.06.2019, 03:00
	08.09.2019, 03:00	09.09.2019, 06:00
	12.06.2020, 09:00	13.06.2020, 15:00
	17.06.2020, 09:00	18.06.2020, 21:00
	26.06.2020, 18:00	27.06.2020 15:00

<sup>3</sup> M. Baldauf, C. Gebhardt, S. Theis, B. Ritter, C. Schraff: Aktuelle Beschreibung des operationellen Kurzzeitvorhersagemodells COSMO-D2 und COSMO-D2-EPS und seiner Ausgabe in die Datenbanken des DWD. Version 1.0, Stand: 02. Mai 2018

<sup>4</sup> Peterson, W., Birdsall, T., & Fox, W. (1954). The theory of signal detectability. *Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory*, 171-212.

Beispielhaft gibt Abbildung 6 einen Einblick in die Ergebnisse anhand des zellweisen Vergleichs der Niederschläge. Dargestellt ist die Entwicklung des AUC-Wertes (Fläche unter der ROC-Kurve) über die Vorhersageweite (1 bis zu 27 Stunden) für unterschiedliche statistische Kenngrößen des Niederschlagsensembles und dem deterministischen Hauptlauf aus Cosmo-D2. AUC-Werte größer 0.5 weisen auf eine Verbesserung der TPR gegenüber der FPR hin.

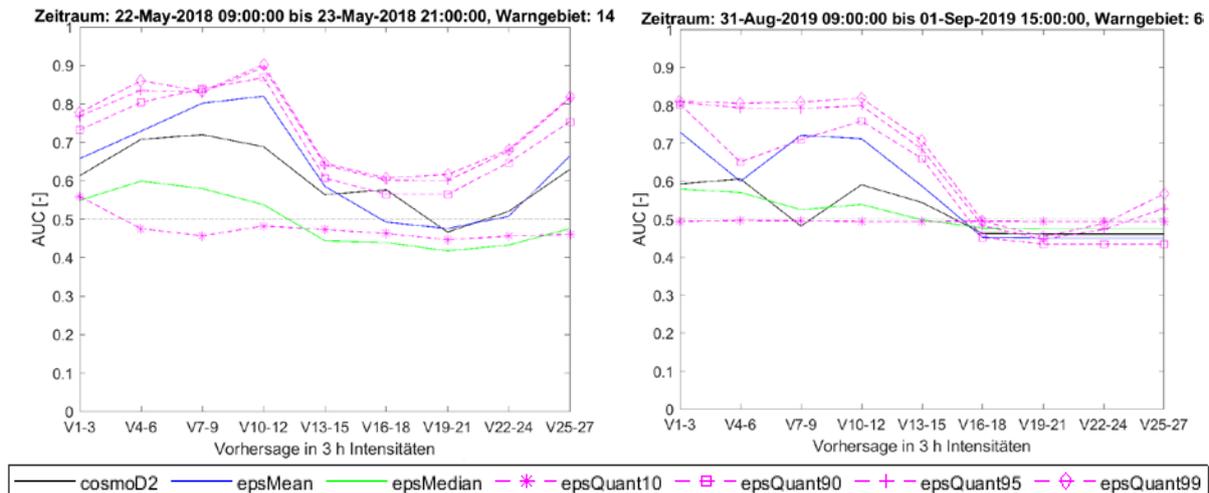


Abb. 6: Evaluierung der Ensemblevorhersagen anhand des zellweisen Vergleichs des Niederschlags von Cosmo-D2-EPS vs. Radolan-RW für zwei ausgewählte Starkregenereignisse mit Hochwassererscheinungen, durchgeführt mit der ROC/AUC-Methode.

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

Hindcast-Analyse Niederschlag: Der AUC-Wert ist vorwiegend größer als 0.5 sowohl für die zellweise als auch die gebietsweise Auswertung. Speziell für Vorhersagen bis zu 12 Stunden zeigen die Ergebnisse eine gute Trefferquote allerdings mit abnehmenden Trend beim zellweisen Vergleich. Der gebietsweise Vergleich zeigt erwartungsgemäß eine geringere Streuung im Ensemble, was auf die Gebietsmittelbildung zurück zu führen ist. Auch hier zeigen die Vorhersagen bis zu 12 Stunden eine gute Trefferquote bei einem weniger ausgeprägten Trend hin zu längeren Vorhersageweiten. Zudem zeigen großräumigere Ereignisse resultierend aus zyklonalen Wetterlagen bessere Ergebnisse in Bezug auf die TPR und damit die Vorhersagbarkeit als kleinräumige Starkregenereignisse.

Hindcast-Analyse Durchfluss: Auch hier ist der AUC-Wert vorwiegend größer als 0.5. Für Vorhersageweiten größer 12 Stunden sind in den Analysen für die Gebiete Oberlausitz und Osterzgebirge fallende Trends erkennbar. Inwiefern es sich dabei um spezifische Einflüsse der regionalen hydrologischen Charakteristik, der Einzugsgebietsform oder der Charakteristik des Starkregen-Hochwasserereignisses handelt, kann aufgrund der geringen Ereignisanzahl nicht abschließend bewertet werden. Ebenso kann das eingesetzte N-A-Modell Einfluss auf die Ergebnisse haben, da es methodisch speziell für kleine Gebiete ausgelegt ist und Abflüsse in größeren Gebieten tendenziell überschätzt.

Im Ergebnis der Hindcast-Analysen kann festgestellt werden, dass Ensemblevorhersagen auch in kleinen Einzugsgebieten einen Mehrwert bieten. Um hier jedoch robustere Ergebnisse zu erzielen ist die Analyse einer größeren Anzahl an Ereignissen nötig, die sich naturgegeben allerdings erst über die Zeit ansammeln. Da in diesen Zeiträumen auch technische Entwicklungen und Produktverbesserungen stattfinden, ist diese Aufgabe zusätzlich erschwert. So wurde z.B. das hier verwendete NWP-Produkt Cosmo-D2-EPS vom DWD im Frühjahr 2021 durch das NWP Icon-D2-EPS ersetzt. Diese Entwicklungen müssen bei der Evaluierung der Ensemblevorhersagen zukünftig Berücksichtigung finden. Im Rahmen

des Projektes konnte diese nicht mehr durchgeführt werden. Insofern gelten die hier gezeigten Ergebnisse und abgeleiteten Aussagen ausschließlich in Bezug auf das NWP-Produkt Cosmo-D2(-EPS). Erste Erfahrungen mit dem Nachfolger Icon-D2(-EPS) deuten allerdings auf eine weitere Verbesserung der Vorhersagbarkeit hin.

## Probabilistisches Frühwarn-Tool

Ausgehend von dem erwartbaren Mehrwert probabilistischer Vorhersagen, auch für kleine Einzugsgebiete, erfolgte eine Weiterentwicklung des Postprozessors der Ensemblevorhersagen mit geeigneten statistischen Verfahren (siehe Abb. 5). Darüber hinaus erforderte die Entwicklung und Umsetzung des probabilistischen Frühwarn-Tools den Entwurf und die Bereitstellung eines technischen Systems zur operationellen Vorhersage sowie die Entwicklung geeigneter Visualisierungs- und Darstellungsformen zur Kommunikation der Unsicherheiten. Im Folgenden wird zunächst das technische System beschrieben und in Abbildung 7 illustriert.

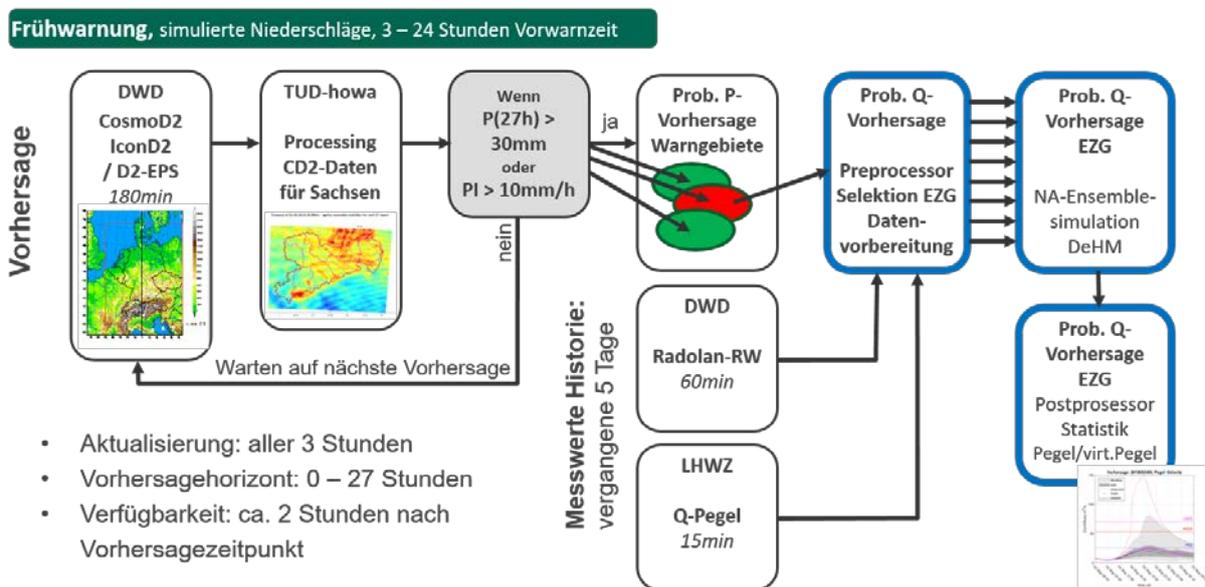


Abb. 7: technische Struktur des probabilistischen Frühwarn-Tools

Das System umfasst:

- den Download und die Aufbereitung der Niederschlagsvorhersage für Sachsen des deterministischen Hauptlaufs des NWP-Modells Cosmo-D2 des DWD, sobald eine neue Vorhersage verfügbar ist (aller 3 Stunden);
- den Download und die Aufbereitung der Ensemble-Niederschlagsvorhersagen für Sachsen des NWP-Modells Cosmo-D2-EPS des DWD, sobald eine neue Vorhersage verfügbar ist (aller 3 Stunden);
- die Prüfung der Vorhersagen, ob Niederschlagsintensitäten größer 10 mm/h (Starkregenkriterium) oder Niederschlagsmengen größer 30 mm/27 h (Dauerregenkriterium) vorhergesagt werden. Ist dies nicht der Fall, wird auf die nächste Vorhersage gewartet, ansonsten erfolgt die weitere Abarbeitung gemäß Abbildung 7;
- die Prüfung, ob die Niederschlagskriterien in den Testgebieten überschritten werden. Ist dies nicht der Fall, erfolgt lediglich eine sachsenweite Visualisierung und Analyse der Niederschlagsvorhersagen. Andernfalls erfolgt die weitere Abarbeitung gemäß Abbildung 7;

- das Auslösen von Abflusssimulationen für die Testgebiete, sobald für das zugehörige Warnggebiet Grenzwerte der Niederschlagssumme bzw. Intensität überschritten werden. Notwendig hierfür sind das Vorhandensein aktueller und historischer Messwerte aus den vergangenen 5 Tagen, um den Anfangszustand des Gebietes (Vorfeuchte, Abflussbereitschaft) zum Vorhersagebeginn zu bestimmen;
- den Download und die Aufbereitung der Niederschlagsbeobachtung für Sachsen des Radolan-RW-Produktes des Niederschlagsradars des DWD;
- den Download und die Aufbereitung der Abflussbeobachtung für die Pegel in den Testgebieten des LHWZ, sobald eine Abflusssimulation ausgelöst wird;
- die Durchführung von Abflussvorhersagen mit dem Modell DeHM. Hierfür müssen die Antriebsdaten (Niederschlag und Abfluss) entsprechend aufbereitet werden. Das Modell startet mit einem Vorlauf von 24 Stunden und assimiliert zur Laufzeit die vorhandenen Beobachtungsdaten. Dazu wurde das DeHM-Modell um einen Kalman-Filter erweitert, um speziell die Abflussdaten zu assimilieren;
- die Auswertung und Visualisierung der probabilistischen Niederschlagsvorhersagen als Übersichtskarte für Sachsen und im zeitlichen Verlauf für die Warnggebiete und ausgewählte Teilgebiete in den Testregionen.
- die Auswertung und Visualisierung probabilistischer Abflussvorhersagen im zeitlichen Verlauf für Pegelstandorte und virtuelle Pegel in den Testregionen.

Das probabilistische Frühwarn-Tool wurde softwareseitig in einer Kombination von Python und Matlab-Skripten realisiert. Es wurde komplett operationalisiert, d.h. es arbeitet kontinuierlich. Seitens des DWD werden für die Vorhersagezeitpunkte 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 und 21 Uhr UTC neue Vorhersagen gerechnet und den Nutzern zur Verfügung gestellt. Bedingt durch die Simulations- und Bereitstellungszeiten beim DWD sind die Ensemble-Vorhersagen erst ca. 2 Stunden nach dem Vorhersagezeitpunkt verfügbar, während der Hauptlauf bereits nach ca. 1 Stunde erhältlich ist. Für das anschließende Prozessieren und die Visualisierung der hydrologischen Ensemble-Vorhersagen werden bei voller Auslastung (Vorhersagen für alle drei Testregionen) nochmals ca. 10 Minuten benötigt. Im Zuge des Wechsels des NWP-Produktes seitens des DWD (siehe vorheriges Kapitel) wurde auch das Frühwarn-Tool auf das NWP-Produkt Icon-D2 bzw. Icon-D2-EPS umgestellt. Hierfür war einiger Aufwand in der Datenvorbereitung zu stemmen, da Icon-D2 nicht mehr auf einem regulären Gitter, sondern auf einem Dreiecksgitter arbeitet. Dazu wurde eine Interpolationsroutine basierend auf dem Inverse Distance Weighting entwickelt, um die Icon-D2 Vorhersagedaten auf ein reguläres Gitter zu überführen.

Für die Analyse probabilistischer Vorhersagen werden unterschiedliche statistische Kenngrößen prozessiert wie z.B. Maxima, Minima, Median, Mittelwert, Quantile und Wahrscheinlichkeiten. Grundlegend ist dabei zwischen Quantilstatistik, d.h. Niederschlags- oder Durchflusswert, der für eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit erreicht wird, und Schwellwertstatistik, d.h. die Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmter Niederschlags- oder Durchflusswert (Schwell- oder Grenzwert) erreicht wird, zu unterscheiden. Letztere lässt sich z.B. gut für bereits etablierte Warnkriterien verwenden, wie sie z.B. für den Niederschlag definiert durch den DWD oder für den Abfluss in Form von Hochwasserwarnstufen vorliegen. Ein Beispiel hierzu zeigt Abbildung 8 in der Gegenüberstellung von Quantilstatistik (links) und Schwellwertstatistik (rechts).

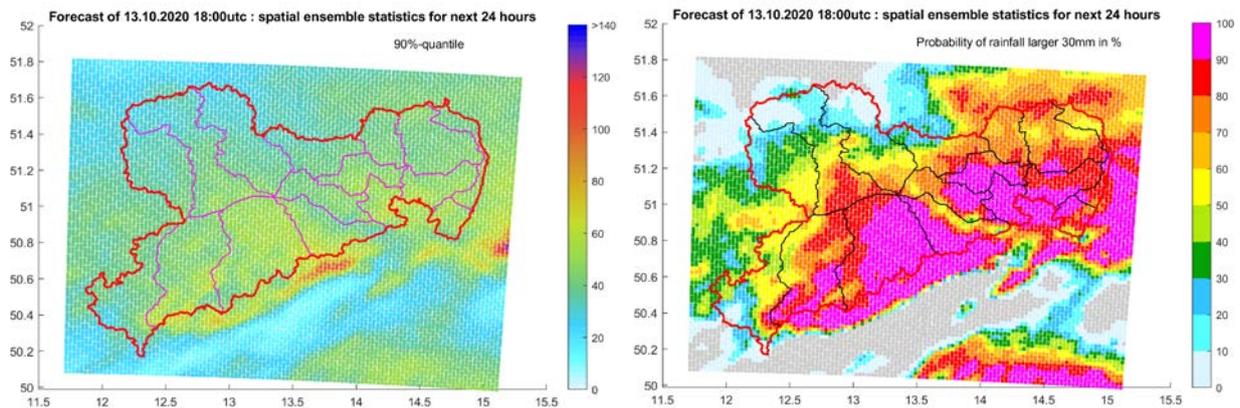


Abb. 8: Vergleich von Quantilstatistik (links) und Schwellwertstatistik (rechts). Dargestellt ist das 90 % Quantil der Niederschlagsmenge in mm, die in den nächsten 24 Stunden fallen soll (links) und die Wahrscheinlichkeit (rechts) mit der eine Niederschlagsmenge von 30 mm in den nächsten 24 Stunden erreicht oder überschritten wird.

Die statistische Analyse kann sowohl räumlich, pixelbasiert in Form einer Karte über alle Ensemble-Member zu einem Zeitpunkt oder über einen Zeitraum erfolgen. Sie kann aber auch zeitlich, ortsbezogen über eine Zeitreihe (z.B. einen Pegelstandort) erfolgen. Auch hier gibt es unterschiedliche Darstellungsformen, wie Abbildung 9 zeigt. Daraus ergibt sich eine große Vielfalt an möglichen Visualisierungs- und Darstellungsformen. Im Hinblick auf die Entwicklung eines webbasierten Demonstrators mit einem möglichst nutzerfreundlichen und anwendernahen Design wurden diese für den Anwender-Nutzer-Dialog entsprechend erarbeitet und aufbereitet und mit den Nutzern und Anwendern (Einsatzkräfte des Katastrophenschutzes und der Wasserwehr, Verantwortliche für das Hochwassermanagement in den unteren Wasserbehörden und Gemeinden der Testgebiete) im Rahmen einer Serie von Workshops diskutiert und bewertet.

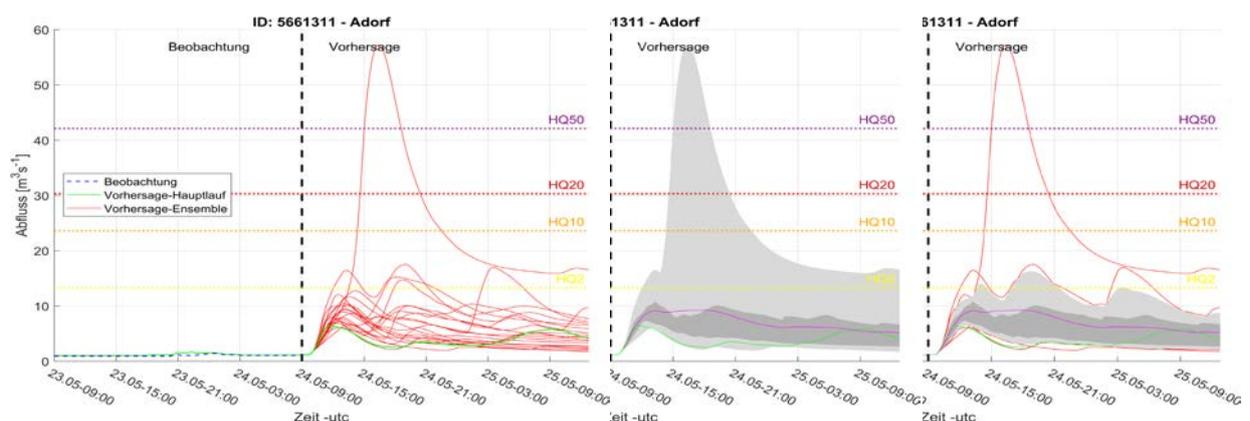


Abb. 9: Unterschiedliche Darstellungsformen für probabilistische Vorhersagen am Beispiel des Abflusses bestehend aus Spaghettiplot (links), Quantilplot (Mitte) und einer Mischform (rechts)

## Demonstrator Hochwasserfrühwarnung kleine Einzugsgebiete

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines webbasierten Demonstrators „Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete“ (Abb. 10). Die Konzeption und das Layout der Webanwendung wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Landeshochwasserzentrum Sachsen durchgeführt. Die technische Umsetzung erfolgte durch die TU Dresden, die auch den Host für die Webseite bereitstellt.

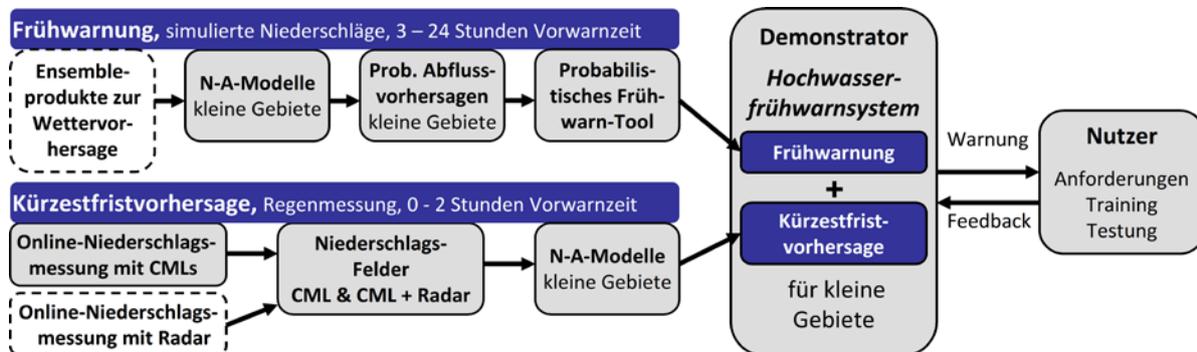


Abb. 10: Komponenten des Demonstrators „Hochwasserfrühwarnsystem kleine Einzugsgebiete“

Im Demonstrator wurde die Frühwarnung basierend auf dem probabilistischen Frühwarn-Tool mit einer Kürzestfristvorhersage verknüpft. Diese Kürzestfristvorhersage basiert auf aktuellen und zurückliegenden Messungen des Niederschlags, die mit den N-A-Modellen in Abflüsse umgerechnet werden. Dabei ergibt sich eine Vorwarnzeit für den Hochwasserabfluss, die der Reaktionszeit des Einzugsgebietes entspricht und von dessen Größe abhängig ist. Als Antrieb für die Kürzestfristvorhersage dient das Produkt Radolan-RW, das durch den DWD operationell bereitgestellt wird. Dabei handelt es sich um Messungen des Niederschlagsradars, die an Messwerte der Bodenstationen angeeicht werden. Das Produkt Radolan-RW wird stündlich aktualisiert und ist ca. 25 min nach der Messung operationell verfügbar. Eine Alternative zu Radolan-RW stellt die im Rahmen des Projektes durch den Projektpartner Uni Augsburg entwickelte Radar-CML-Aneichung dar. Allerdings erwies sich eine operationelle Bereitstellung der Radar-CML-Aneichung für die Kürzestfristvorhersage als technisch hochkomplex und konnte im Rahmen der Projektlaufzeit nicht realisiert werden.

Konzeption und Layout der Webanwendung basieren auf den Erkenntnissen und den Umfrageergebnissen der Nutzerworkshops. Einerseits wurden die Nutzer nach ihren Erfordernissen und Inhalten einer Hochwasserfrühwarnung befragt und andererseits standen den Nutzern verschiedene Darstellungsformen probabilistischer Vorhersagen zur Abstimmung. Die Befragungen wurden durch den Projektpartner LHWZ durchgeführt und dokumentiert. Im Ergebnis wurden folgende Inhalte festgelegt:

- Kartendarstellung der Überschreitungswahrscheinlichkeit der vorhergesagten 24 Stunden Niederschlagssumme für 30, 50, 80 mm
- Kartendarstellung der vorhergesagten 24 Stunden Niederschlagssumme für das 10 %, 50 % 90 % Quantil, sowie den Maximalwert (worst case)
- Zeitlicher Verlauf der Niederschlagsintensität und der Niederschlagssumme für den Gebietsniederschlag der Einzugsgebiete der realen und virtuellen Pegel beginnend 24 Stunden vor der Vorhersage mit einem Vorhersagehorizont von 27 Stunden
- Ampelkarte der realen und virtuellen Pegel, dessen Farbgebung die Überschreitung eines Hochwassers mit definierter Jährlichkeit signalisiert (z.B. HQ2, HQ10, HQ20, HQ50)
- Zeitlicher Verlauf der Niederschlagsintensität und des Abflusses der Einzugsgebiete realer und virtueller Pegel beginnend 24 Stunden vor der Vorhersage mit einem Vorhersagehorizont von 27 Stunden
- Kartendarstellung der zurückliegenden, gemessenen 24 Stunden Niederschlagssumme.

Die technische Umsetzung erforderte folgende Arbeitsschritte:

- Die Implementierung stündlicher Updates des Demonstrators: Mit Vorliegen neuer Messdaten (stündlich) wird das Vorhersagesystem für die aktuell vorliegende Ensemble-Vorhersage (3-stündige Updates) erneut gerechnet. Dabei wird die Vorhersage mit der Beobachtung am Beobachtungszeitpunkt verknüpft und über eine konstante Vorhersageweite von 27 Stunden berechnet.
- Definition einer Organisationsstruktur für die Demonstrator-Webpage: Die Demonstrator-Webpage basiert auf einer Kombination aus einem html-file für den organisatorischen Aufbau der Webseite, JavaScript Leaflet-Anwendungen für die dynamische, räumliche Kartendarstellung und Bilddateien für die Zeitreihendarstellungen. Die Organisationsstruktur wurde als Template angelegt und wird für jede neue Vorhersage befüllt. Eine entsprechende Verknüpfung der Vorhersage auf einer übergeordneten HoWa-Vorhersage-webpage ermöglicht gleichzeitig eine Archivierung der Vorhersagen (siehe Abb. 11).
- Erzeugen der Fachinhalte der Demonstrator-Webpage: Der Arbeitsschritt umfasst die Programmierung der entsprechenden Darstellungsformen für deren automatisierte Erstellung im Vorhersageprozess. Dazu zählen die statistischen Analysen der räumlichen Niederschlagsfelder und deren Speicherung im geotiff-Format für die dynamischen Kartendarstellungen, die statistischen Analysen der Zeitreihen beobachteter und vorhergesagter Zeitreihen für Gebietsniederschlag und Durchfluss und Speicherung im png-Format sowie die Analyse der Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Durchfluss-Ensembles für die Darstellung der Ampelkarten und Ablage im geojson-Format.
- Festlegung und Implementierung der HoWa-Ereignissteuerung: Durch die HoWa-Ereignissteuerung erfolgt die Verlinkung zusammengehöriger Vorhersagen auf der HoWa-Vorhersage-Webpage, die Festlegung des Endzeitpunktes der Ereignisvorhersage, sowie die Archivierung der Vorhersagen und Ereignisse. Dabei wird durch gebietsspezifisch einstellbare Nachlaufzeiten sichergestellt, dass Vorhersagen auch dann gerechnet werden, wenn sie nicht den Kriterien der Frühwarnung entsprechen (siehe Abb. 7). Dies ist z.B. bei größeren Gebieten mit längeren hydrologischen Reaktionszeiten der Fall, so dass ein Ende der Vorhersage noch vor Erreichen des Hochwasserscheitels vermieden wird. Die HoWa-Vorhersage-Webpage wird mit Vorliegen jeder neuen Vorhersage aktualisiert bzw. vermeldet den Status, wenn keine Gefährdung durch Starkregen und Hochwasser vorliegt.
- Festlegen der administrativen und technischen Infrastruktur für das Hosten der Webseite. Hier wurde auf eine strikte Trennung zwischen dem Webserver, dem Simulationsserver und der Datenablage und Sicherung geachtet.

Zusammenfassend wurde der Demonstrator zur Hochwasserfrühwarnung für 3 Pilotregionen in Sachsen implementiert und liefert Vorhersagen des Gebietsniederschlags und des Durchflusses für die in Tabelle 3 gelisteten realen und virtuellen<sup>5</sup> Pegel. Zudem werden die vorhergesagten Niederschlagssummen für Sachsen in einer 2 km-Rasterauflösung bereitgestellt.

---

<sup>5</sup> Berechnungsknoten im N-A-Modell mit besonderer Relevanz für den Katastrophenschutz

Tab. 3: Reale und virtuelle Pegel in den Testregionen

Region	Pegel / Bezeichnung	Fluss	Gewässer-kennzahl	Pegel	Longitude	Latitude	A [km²]
Oberlausitz	Niederoderwitz	Mandau	67414651	ja	14.72888178	50.95364092	28.9
Oberlausitz	Seifhennersdorf	Mandau	67414311	ja	14.60723938	50.92462151	75.5
Oberlausitz	Grossschoenau	Mandau	67414511	ja	14.66998459	50.89699922	163.0
Oberlausitz	Zittau	Mandau	67414799	ja	14.79345845	50.89481489	278.0
Oberlausitz	Grundwasser	Grundwasser	6741464	nein	14.711554	50.969807	6.9
Oberlausitz	Spitzkunnersd-Wasser	Spitzkunnersdorfer Wasser	6741466	nein	14.7325553	50.9513133	11.9
Oberlausitz	Landwasser	Landwasser	6741469	nein	14.744145	50.927	51.4
Oberlausitz	Bertsdorfer-Wasser	Bertsdorfer Wasser	67414765	nein	14.76026	50.899726	10.0
Oberlausitz	Eibau	Landwasser	6741461	nein	14.67949686	50.97483434	10.8
Osterzgebirge	Geising 1	Weisse Mueglitz	5371823	ja	13.78756	50.76267	26.3
Osterzgebirge	Lauenstein 4	Mueglitz	5371831	ja	13.815305	50.786816	75.7
Osterzgebirge	Dohna	Mueglitz	53718979	ja	13.853621	50.953833	199.0
Osterzgebirge	Biela	Biela	5371849	nein	13.788671	50.814279	16.8
Osterzgebirge	HRB Briessnitz	Briessnitzbach	5371865	nein	13.7534727	50.8444067	15.3
Osterzgebirge	Schlottwitzgrundbach	Schlottwitzgrundbach	53718929	nein	13.811789	50.892332	8.5
Osterzgebirge	Lauenstein ZP	Mueglitz	53718153	nein	13.850013	50.76727	26.8
Osterzgebirge	Trebnitzbach	Trebnitzbach	5371889	nein	13.81514466	50.86954506	19.3
Vogtland	Bad Elster 1	Weisse Elster	56611313	ja	12.24530213	50.27127335	47.7
Vogtland	Adorf 1	Weisse Elster	5661311	ja	12.25825183	50.32943867	170.0
Vogtland	Oelsnitz	Weisse Elster	5661371	ja	12.17990546	50.40406866	328.0
Vogtland	Schoenlind	Haarbach	56611665	nein	12.33266	50.28277	9.4
Vogtland	Markneukirchen	Schwarzbach	5661253	nein	12.34784	50.31002	22.6
Vogtland	Sohl	Rauner Bach	5661169	nein	12.29189239	50.27687019	45.5
Vogtland	Wuerschnitzbach	Wuerschnitzbach	5661349	nein	12.2183	50.366406	30.6
Vogtland	Goernitz	Goernitzbach	5661369	nein	12.1844951	50.40056856	45.9
Vogtland	Leubetha	Eisenbach	56613329	nein	12.2372237	50.3470058	20.2

Der Live-Modus des Demonstrators ist erreichbar unter: <http://howa-innovativ.hydro.tu-dresden.de/WebDemoLive/> (Abb. 11, links). Falls aktuell keine Gefährdung durch Starkregen und Hochwasser vorliegt, kann zur Anschauung auf ein historisches Ereignis zurückgegriffen werden unter <http://howa-innovativ.hydro.tu-dresden.de/WebDemo/> (Abb. 11, rechts). Zusätzlich wurde ein Erklär-Video produziert, das über die HoWa-innovativ Projektwebseite abrufbar ist (<https://www.howa-innovativ.sachsen.de/download/howa-WebDemo.mpg>).

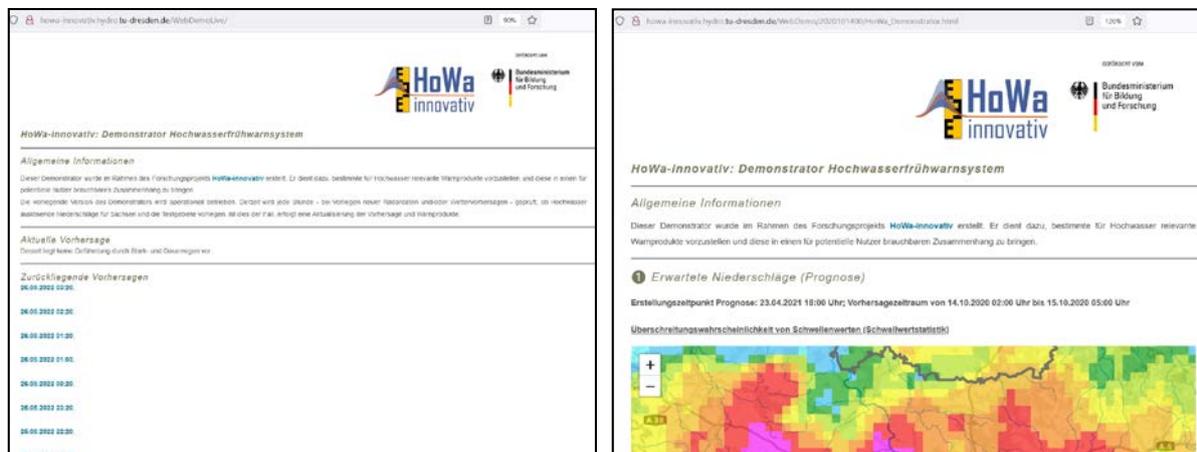


Abb. 11: Webansicht der HoWa-Vorhersage-Webpage (links) und der Demonstrator-Webpage (rechts)

## Operationeller Testbetrieb

Der operationelle Testbetrieb wurde mit der Fertigstellung des probabilistischen Frühwarntools gestartet. Zum 30.04.2021 wurde der Demonstrator zur Hochwasserfrühwarnung in den Testbetrieb überführt und die erstellten Vorhersagen auf der Webpage veröffentlicht.

Ziel des Testbetriebs war eine kontinuierliche, überwachte Prozessierung von Vorhersagen und Warnungen in Echtzeit unter Praxisbedingungen. Dabei wurden gleichzeitig neue Daten gewonnen, die zur Justierung der Methoden verwendet wurden. Mit dem Testbetrieb wurden folgende Aufgaben durchgeführt:

- Die Überwachung und das Sicherstellen der Datenflüsse, Visualisierungen und Warnungen im automatischen Betrieb sowie Wartungsarbeiten des Systems, um die Ausfallsicherheit zu erhöhen.
- Die Reanalyse der erstellten Warnungen und Vorhersagen in Bezug zur Beobachtung, um anhand der neu gewonnenen Daten die Systemperformance zu bewerten.
- Die Berücksichtigung und Einarbeitung der Nutzer- und Anwenderrückmeldungen, um Anpassungen und Erweiterungen des Demonstrators durchzuführen, die eine Verbesserung der Handhabung und Funktionalität erwarten lassen.

Im Zuge des Testbetriebs wurde der Demonstrator automatisch für eine Reihe von Ereignissen gestartet. Bedingt durch die länger anhaltende Trockenheit in den Jahren 2019 und 2020 ist die Ereignisanzahl insgesamt jedoch überschaubar. Sämtliche Ereignisse wurden einer Reanalyse unterzogen, die die Performance des Demonstrators den Beobachtungsergebnissen gegenüberstellt. Für ausgewählte Ereignisse unterschiedlichen Typs werden diese Ergebnisse im Folgenden präsentiert.

### Ereignis vom 24.05.2018

Das Ereignis weist die Charakteristik eines extrem heftigen Starkregens auf und führte in der Region Vogtland zu zahlreichen Überflutungen und dem Überschreiten der Hochwasserwarnstufen. Abbildung 12 (links) zeigt die gemessene 24-stündige Niederschlagssumme des Radolan-RW Produktes für den Zeitraum 24.-25.05.2018. Dem gegenüber ist die korrespondierende Ensemble-Vorhersage des Niederschlags für den 9:00 UTC Lauf dargestellt anhand des 90 % Quantils des Ensembles (Abb. 12, Mitte) und der Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine Niederschlagssumme von 30 mm in den nächsten 24 Stunden (Abb. 12, rechts). Die Vorhersage fand unmittelbar vor Ereigniseintritt statt und detektiert das Ereignis sehr gut. Allerdings zeigen vorherige Vorhersagen nicht diese klaren Signale. Abbildung 13 zeigt die zugehörige Ensemble-Vorhersage des Abflusses für den Pegel Oelsnitz im Vergleich zur Abflussbeobachtung. Deutlich wird hier zum einen das Ausmaß des Ereignisses, das sämtliche Schwellwerte des Durchflusses überschreitet, und zum anderen die Tatsache, dass lediglich ein Ensemble-Member dieses extreme Signal beinhaltet.

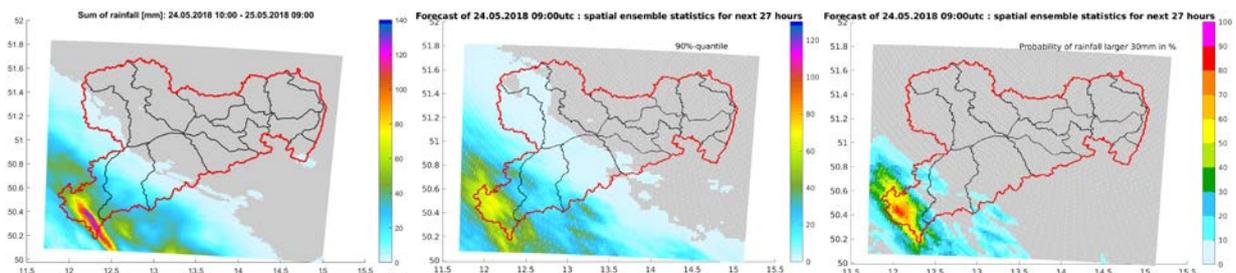


Abb. 12: 24-Stunden Niederschlagssummen der Beobachtung mit Radolan-RW für den Zeitraum 24.-25.05.2018 (links) und korrespondierende Ensemble-Vorhersage des Niederschlags für den 9:00 UTC Lauf dargestellt anhand des 90 % Quantils des Ensembles (Mitte) und der Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine Niederschlagssumme von 30 mm in den nächsten 24 Stunden (rechts).

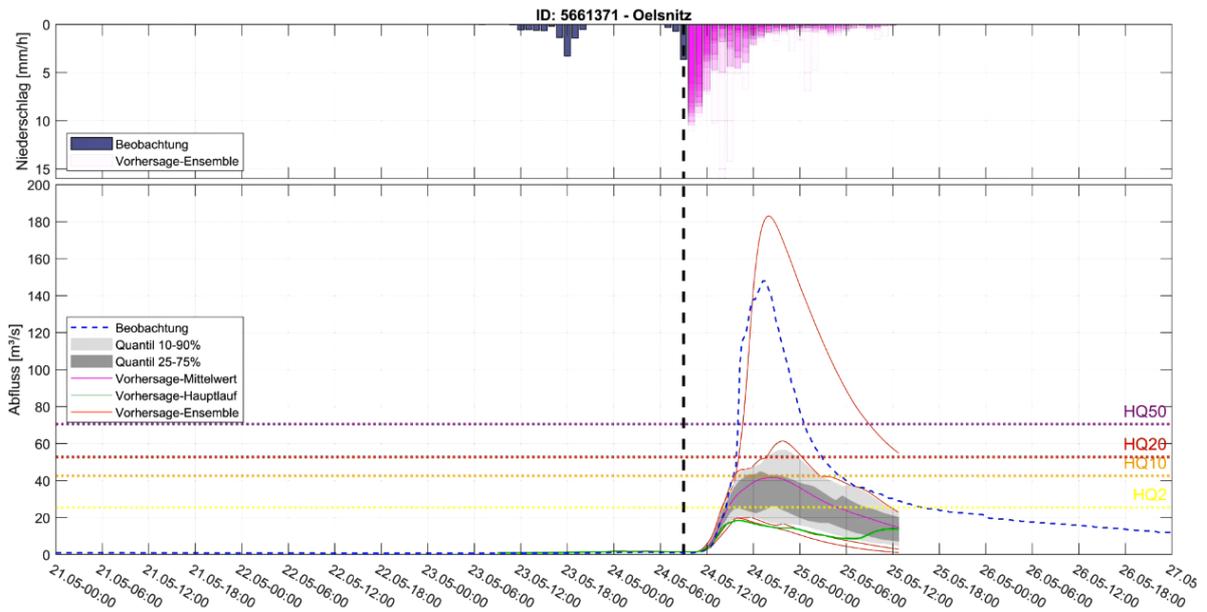


Abb. 13: Ensemble-Vorhersage des Abflusses vom 24.05.2018, 9:00 UTC für den Pegel Oelsnitz im Vogtland im Vergleich zu Abflussbeobachtung (unten) sowie gemessener und vorhergesagter Gebietsniederschlag (oben).

### Ereignis vom 13.-14.10.2020

Entsprechend der Klassifikation des DWD entspricht das Ereignis einem extrem ergiebigen Dauerregen mit Niederschlagssummen > 100mm in 24 Stunden. Entsprechende Warnsignale im Demonstrator waren besonders für die Regionen Vogtland und Oberlausitz vorhanden (Abb. 14, Mitte und links).

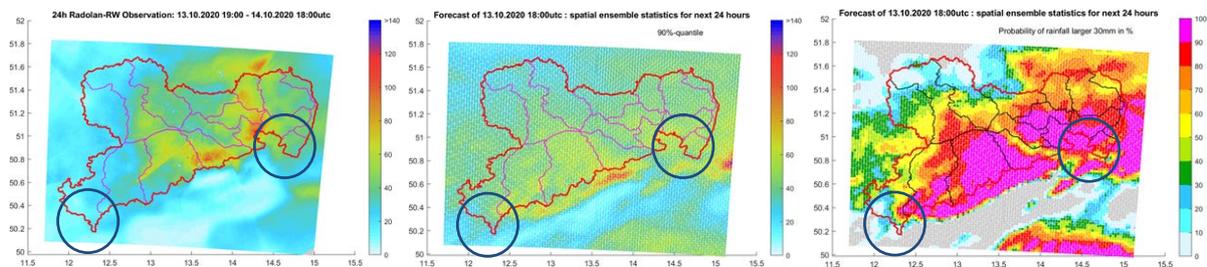


Abb. 14: 24-Stunden Niederschlagssummen der Beobachtung mit Radolan-RW für den Zeitraum 13.-14.10.2020 (links) und korrespondierende Ensemble-Vorhersage des Niederschlags für den 18:00 UTC Lauf dargestellt anhand des 90 % Quantils des Ensembles (Mitte) und der Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine Niederschlagssumme von 30 mm in den nächsten 24 Stunden (rechts).

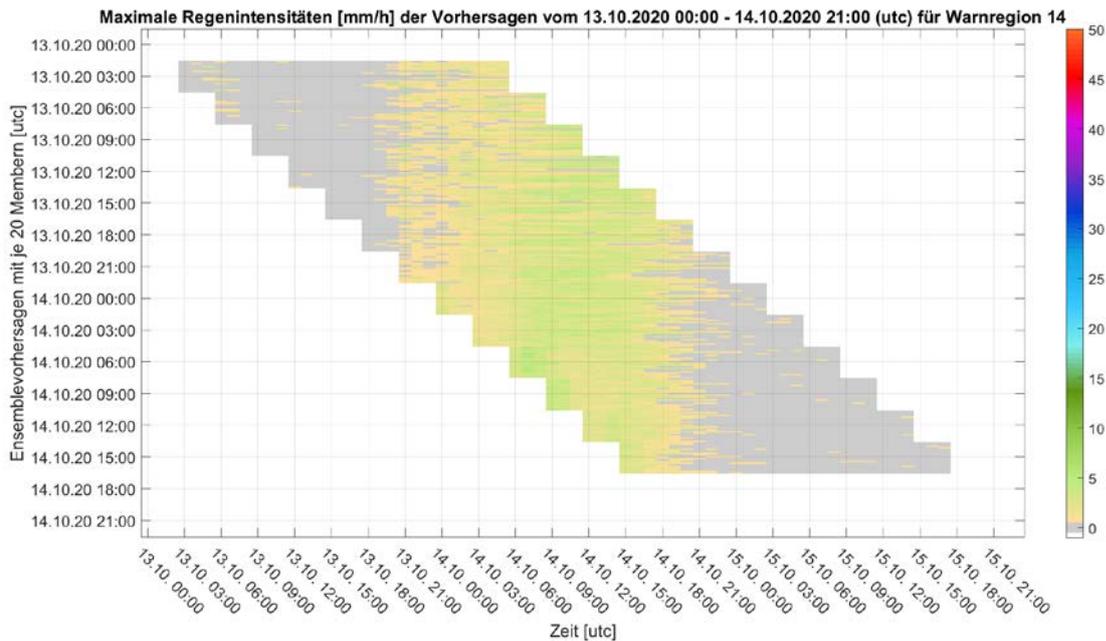


Abb. 15: maximale Regenintensitäten [mm/h] der Ensemblevorhersagen für die Region Vogtland im Zeitraum 13.-14.10.2020. Der grau hinterlegte Bereich entspricht der Vorhersagelänge.

Abbildung 15 zeigt, dass diese Signale in nahezu allen Ensemble-Mitgliedern vorhanden sind und die typische Charakteristik eines Dauerregens (geringe Niederschlagsintensitäten, lange Dauer) aufweist. Das Ereignis wurde bereits sehr frühzeitig bezüglich seines Eintrittszeitpunktes und der Ausprägung vorhergesagt und durch nachfolgende Vorhersagen stets bestätigt. Speziell in der Region Oberlausitz zeigten die vorhergesagten Abflüsse eine gute Übereinstimmung mit der Beobachtung in der Reanalyse (Abb. 16). In der Region Vogtland wurde jedoch zu viel Niederschlag vorhergesagt, so dass die zugehörigen Abflüsse durch das hydrologische Modell (stark) überschätzt wurden (Abb. 17). Erst durch das Vorliegen aktueller Niederschlagsbeobachtungen des Radars sowie aktueller Abflussbeobachtungen an den Pegeln konnte dieses Verhalten korrigiert werden.

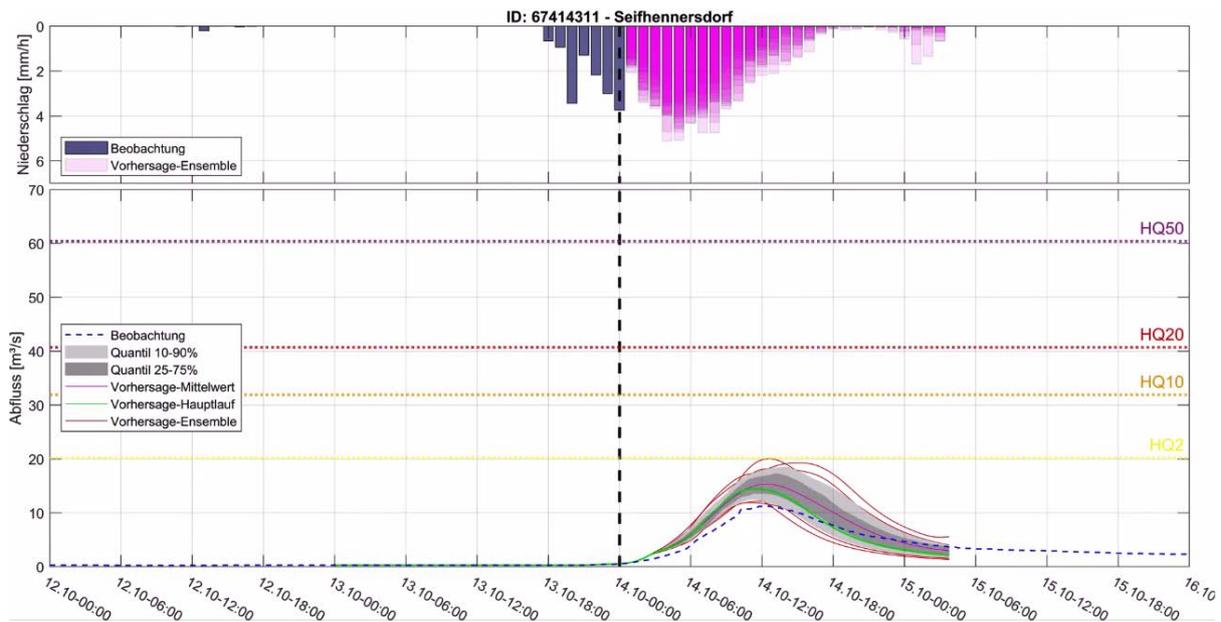


Abb. 16: Ensemble-Vorhersage des Abflusses vom 14.10.2020, 0:00 UTC für den Pegel Seifhennersdorf in der Oberlausitz im Vergleich zu Abflussbeobachtung (unten) sowie gemessener und vorhergesagter Gebietsniederschlag oben.

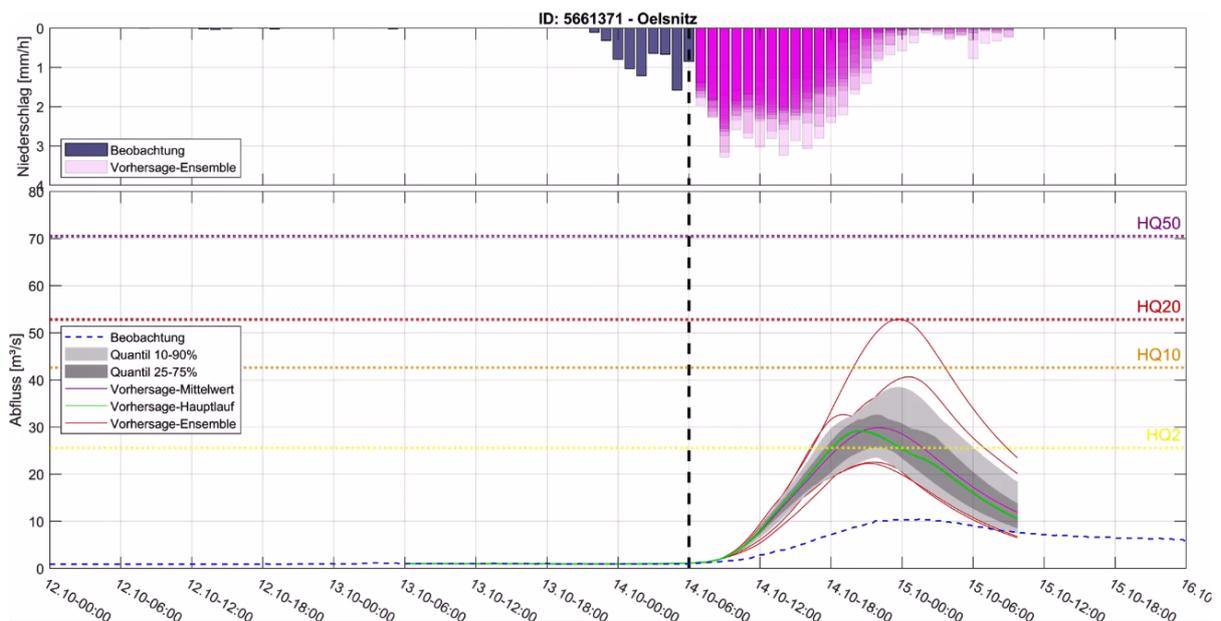


Abb. 17: Ensemble-Vorhersage des Abflusses vom 13.10.2020, 6:00 UTC für den Pegel Oelsnitz im Vogtland im Vergleich zu Abflussbeobachtung (unten) sowie gemessener und vorhergesagter Gebietsniederschlag oben.

### Ereignis vom 13.07.2021

Ein Ereignis mit einer deutlich anderen Charakteristik ist der Starkregen in der Region Vogtland vom 13.07.2021. Dabei handelt es sich um einen Ausläufer des Tiefs „Bernd“ das tags darauf für die extremen Niederschläge und Überschwemmungen im Westen Deutschlands verantwortlich war. Entsprechend der Klassifikation des DWD entspricht das Ereignis einem extrem heftigen Starkregen mit Niederschlagsintensitäten > 45 mm/h. Abbildung 18 zeigt erneut die Gegenüberstellung der Niederschlagsbeobachtung und Vorhersage. Speziell die Darstellung der Überschreitungswahrscheinlichkeit (Abb. 18, rechts) weist mit Werten von über 50 % entsprechende starke Signale in der Frühwarnung auf,

die in mehr als die Hälfte der Ensemble-Member vorliegen. Das derart dynamische, zyklonale Wetterlagen in der Regel schwieriger vorhersagbar sind bezüglich Niederschlagsmenge und Eintrittsort als großräumige Frontensysteme, ist Abbildung 19 zu entnehmen. Es werden zwar bereits sehr frühzeitig hohe Niederschlagsintensitäten vorhergesagt, allerdings nur für einen Teil der Ensemble-Member mit einer großen Streuung innerhalb des Ensembles. Der Eintrittszeitpunkt des Ereignisses wurde interessanterweise gut getroffen, so dass bereits 15 Stunden vor Ereigniseintritt entsprechende Warnsignale im Abflussensemble für ein sehr großes Hochwasser (Überschreitung des HQ 50) vorlagen (Abb. 20). In seiner tatsächlichen Ausprägung verursachte das Ereignis zahlreiche Überflutungen in der Ortschaft Bad Elster, die mit Einsätzen der Feuerwehr verbunden waren.

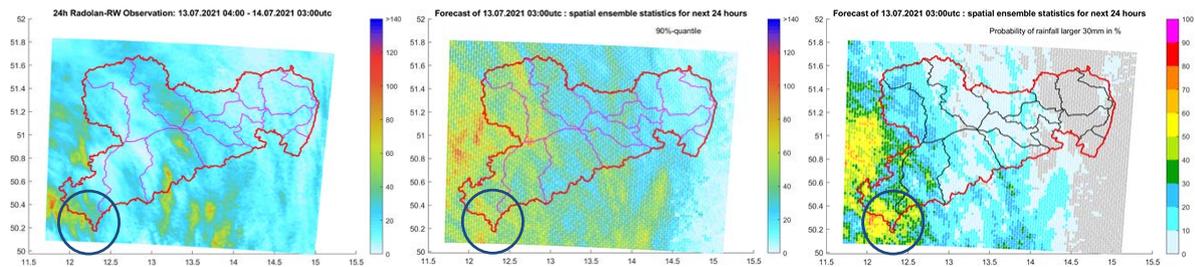


Abb. 18: 24-Stunden Niederschlagssummen der Beobachtung mit Radolan-RW für den Zeitraum 13.-14.07.2021 (links) und korrespondierende Ensemble-Vorhersage des Niederschlags für den 3:00 UTC Lauf dargestellt anhand des 90 % Quantils des Ensembles (Mitte) und der Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine Niederschlagssumme von 30 mm in den nächsten 24 Stunden (rechts).

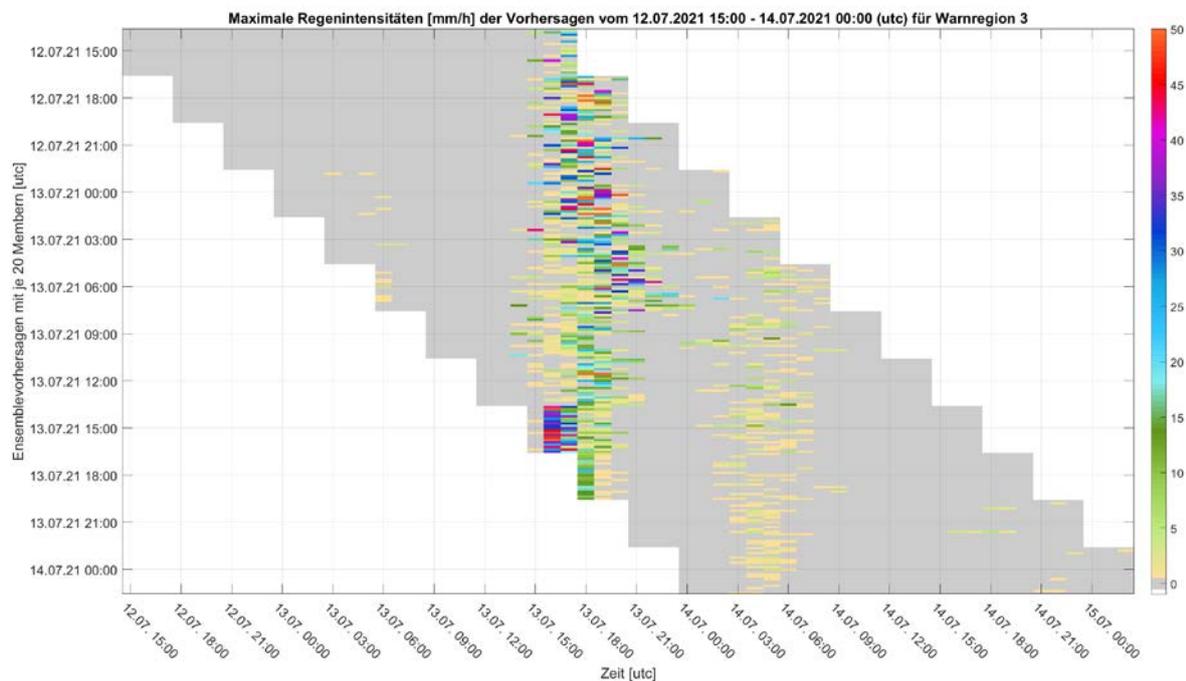


Abb. 19: maximale Regenintensitäten [mm/h] der Ensemblevorhersagen für die Region Vogtland im Zeitraum 12.-14.07.2021. Der grau hinterlegte Bereich entspricht der Vorhersagelänge.

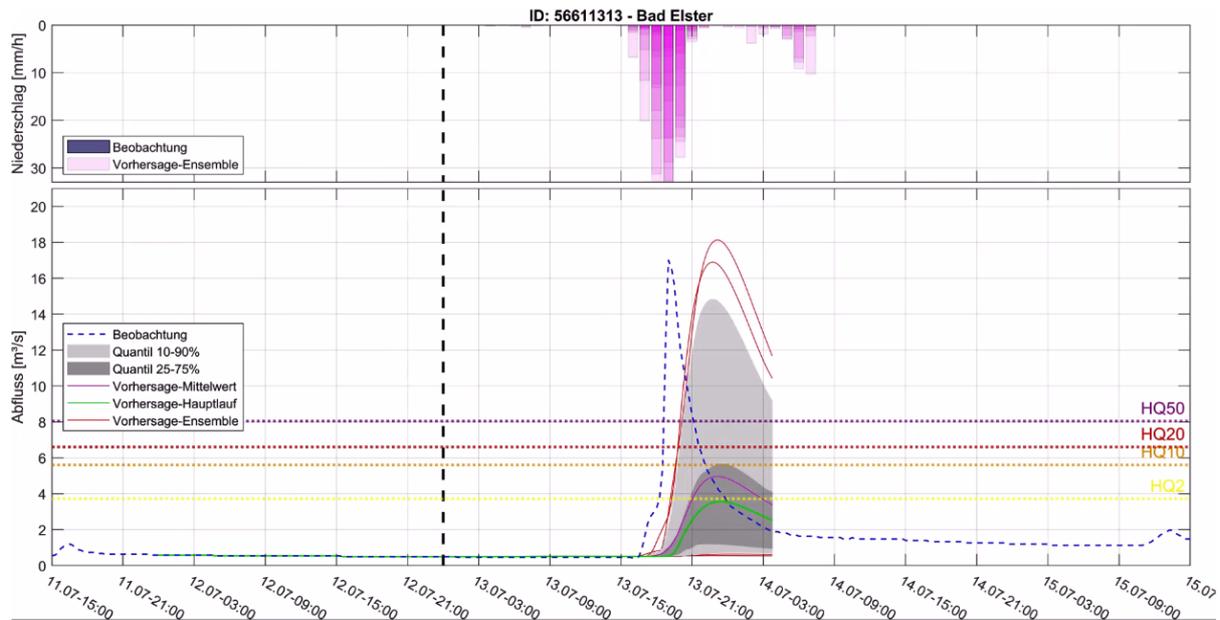


Abb. 20: Ensemble-Vorhersage des Abflusses vom 13.07.2021, 0:00 UTC für den Pegel Bad Elster im Vogtland im Vergleich zu Abflussbeobachtung (unten) sowie gemessener und vorhergesagter Gebietsniederschlag (oben).

### Ereignis vom 17.7.2021

Das Tiefdruckgebiet „Bernd“ kehrte am 17.7.2021 nach Sachsen zurück. Erneut entsprach die Klassifikation der eines extrem heftigen Starkregens. Allerdings war lange Zeit nicht vorhersagbar, in welcher Region das Ereignis niedergeht. Anhand Abbildung 21 wird ersichtlich, dass entsprechende Signale in großen Teilen Sachsens vorlagen, letztendlich aber nur ein geringer Teil betroffen war. Die größten Schäden traten in der Region Sächsische Schweiz auf, die ca. 50 km westlich der Oberlausitz liegt. Die hohe Dynamik, die dem Ereignis innewohnt, zeigt Abbildung 22 für die Region der Oberlausitz. Die Ensembles weisen für die einzelnen Vorhersagezeitpunkte eine hohe Streuung auf. Ein klarer Eintrittszeitpunkt ist nicht ersichtlich. Neun Stunden vor Scheiteleintritt des Abflusses verdichteten sich die Signale und wiesen auf ein kleines Hochwasser am Pegel Großschönau in der Oberlausitz mit überschreiten des HQ2 hin. (Abb. 23)

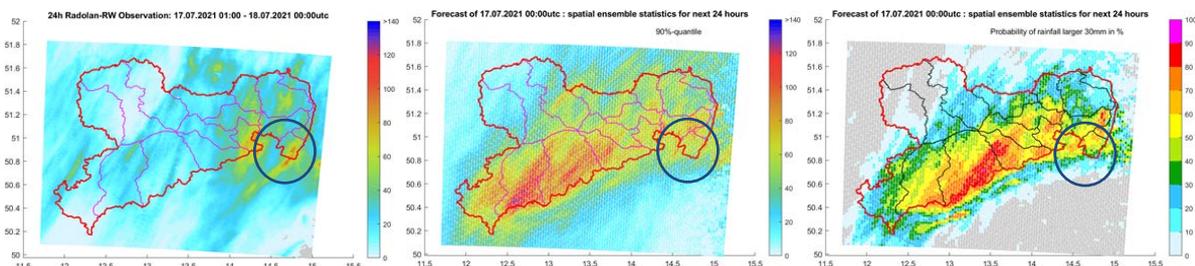


Abb. 21: 24-Stunden Niederschlagssummen der Beobachtung mit Radolan-RW für den Zeitraum 17.-18.07.2021 (links) und korrespondierende Ensemble-Vorhersage des Niederschlags für den 0:00 UTC Lauf dargestellt anhand des 90 % Quantils des Ensembles (Mitte) und der Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine Niederschlagssumme von 30 mm in den nächsten 24 Stunden (rechts).

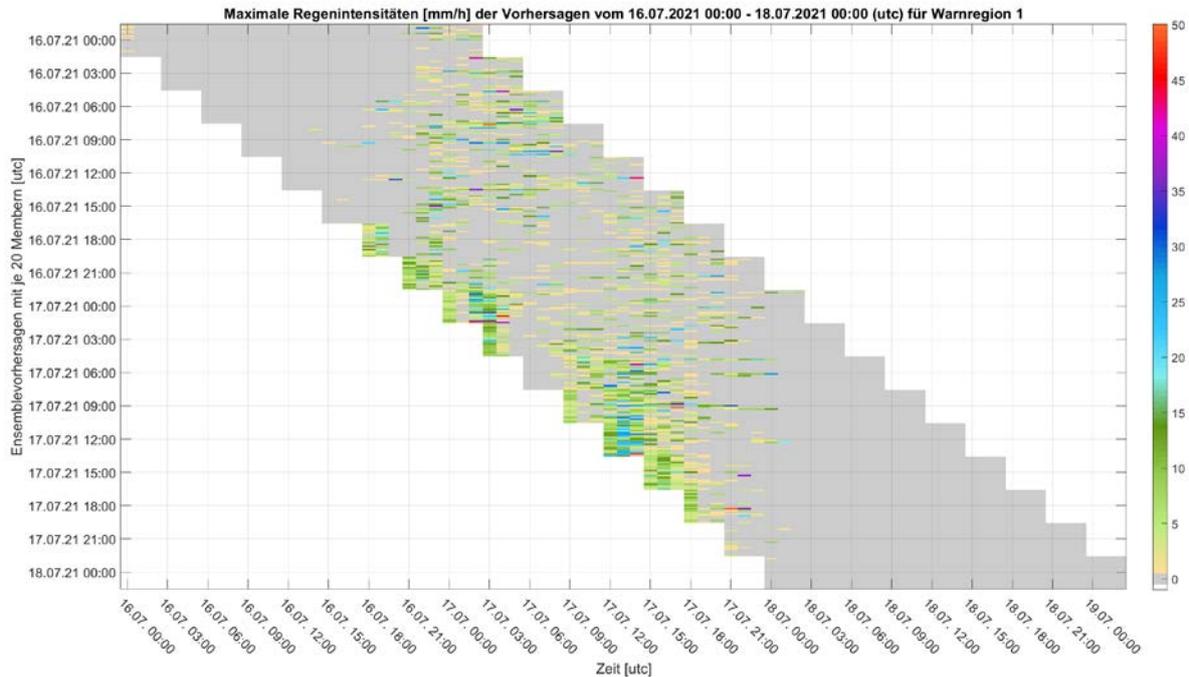


Abb. 22: maximale Regenintensitäten [mm/h] der Ensemblevorhersagen für die Region Vogtland im Zeitraum 16.-18.07.2021. Der grau hinterlegte Bereich entspricht der Vorhersagelänge.

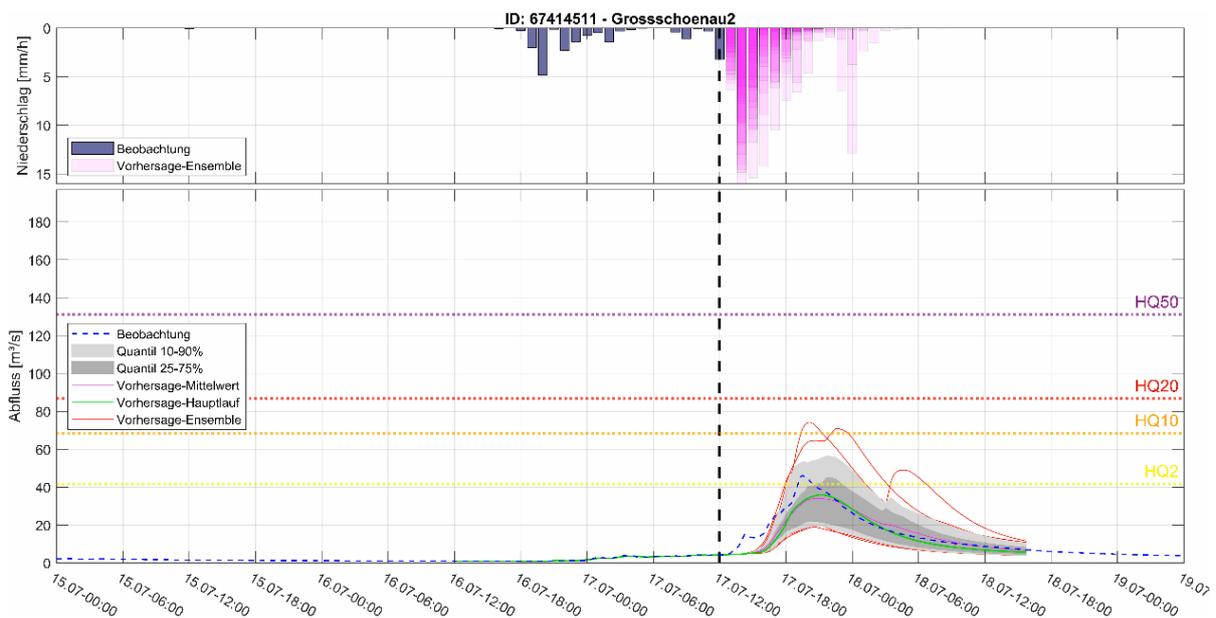


Abb. 23: Ensemble-Vorhersage des Abflusses vom 17.07.2021, 9:00 UTC für den Pegel Großschönau in der Oberlausitz im Vergleich zu Abflussbeobachtung (unten) sowie gemessener und vorhergesagter Gebietsniederschlag (oben).

Im Ergebnis des Testbetriebs zeigt sich, dass hydro-meteorologische Ensemblevorhersagen auch für kleine Einzugsgebiete einen Mehrwert in Bezug auf die Hochwasserfrühwarnung liefern. Konkrete Aussagen zur Güte der Vorhersage oder dem Auftreten von Fehlalarmen lassen sich aufgrund der erst kurzen Verfügbarkeit des Icon-D2-(EPS) Modells noch nicht treffen. Hier wäre eine deutlich größere Ereignisanzahl wünschenswert. Vor diesem Hintergrund wird der Demonstrator auch nach Projektende weiter betrieben, um einerseits zusätzliche Daten und Erkenntnisse zu gewinnen und andererseits die Einsatzkräfte in den Testregionen im Ereignisfall zu unterstützen.

## Schulungs- und Trainingskonzept

Die TU Dresden beteiligte sich an einem breit angelegten Anwender-Nutzer-Dialog im Rahmen des Arbeitspaketes „Schulungs- und Trainingskonzept“, geleitet vom Projektpartner LHWZ. Hauptziel des Arbeitspaketes war es, die potentiellen Nutzer an die Thematik Unsicherheiten in Vorhersage und Warnung heran zu führen sowie die Nutzer in die Entwicklung des Demonstrators mit geeigneten, verständlichen Visualisierungsformen einzubeziehen. Aus diesen Erfahrungen heraus sollte ein erster Entwurf eines Schulungs- und Trainingskonzeptes zum Thema Unsicherheiten in Vorhersage und Warnung entstehen. Das Konzept bestand aus einer Serie von Workshops in den Pilotregionen. Die Workshop-Serie war dreistufig aufgebaut:

- Serie 1 beinhaltet die Kommunikation der Projektidee und die Einführung in die Thematik der Unsicherheiten. Es erfolgten Umfragen zu den Anforderungen und den Wünschen der Anwender und Nutzer an eine Frühwarnung. Zudem wurden wichtige Hinweise auf spezielle lokale Eigenheiten der Testregionen gegeben. Im Ergebnis konnten der Modellaufbau der hydrologischen Modelle überprüft, der Gebietszuschnitt für die Vorhersagemodelle festgelegt und erste potentielle „Warnprodukte“ entwickelt werden.
- In Serie 2 wurden den Nutzern verschiedene Visualisierungsformen vorgestellt (siehe Abb. 8 und 9). Es erfolgte eine Umfrage zu geeigneten Visualisierungsformen und Warnprodukten, so dass ein erstes Design des Web-basierten Demonstrators festgelegt werden konnte.
- Serie 3 diente dem Nutzerfeedback. Hier wurden erste Erfahrungen der Nutzer im Einsatz mit dem Demonstrator zurück gespiegelt und potentielle Verbesserungen angeregt.

Das AP wurde durch die TUD wissenschaftlich begleitet und der Projektpartner LHWZ im Design, der Planung, Durchführung und Auswertung der Workshops unterstützt. Die TUD nahm an allen Workshops und Diskussionsrunden teil und arbeitete entsprechende fachliche Inhalte zu. Es wurden z.B. für die unterschiedlichen Regionen spezifische Ereignisse analysiert, visualisiert und für die Präsentationen aufbereitet. Zudem wurden unterschiedliche Visualisierungsvarianten für den Demonstrator erarbeitet und für eine webbasierte Kommunikation mit den Nutzern/Anwendern während der Workshops bereitgestellt sowie im Nachgang der Veranstaltungen den Teilnehmern zugänglich gemacht. Bedingt durch die Covid19-Pandemie kam es zu Verzögerungen bei der Durchführung der Workshops, da diese auf ein komplett digitales Format umgestellt werden mussten. Detaillierte Ergebnisse zu den Umfrageergebnissen sind im Bericht des Projektpartners LHWZ zu finden.

## Publikationen

### Artikel

Grundmann, J.: Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete mit innovativen Methoden der Niederschlagsmessung und Niederschlagsvorhersage. 12. Forum Hochwasserrisikomanagement, Jena (Germany), 2020.

Grundmann, J., C. Chwala, A. Six, A. Philipp, N. Schütze, H. Kunstmann and U. Müller: Perspektiven für die Vorhersage und Warnung vor Extremniederschlägen und Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten in Sachsen. Tag der Hydrologie, Potsdam (Germany), 2020.

Grundmann, J., S. Hörning and A. Bardossy: Stochastic reconstruction of spatio-temporal rainfall patterns by inverse hydrologic modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019.

### Vorträge

Grundmann, J., A. Six and A. Philipp: Communicating uncertainties for flood warning in small catchments using ensemble hydrological forecasting. EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 19, EMS2022-679, 2022, EMS Annual Meeting 2022.

Müller, U., A. Philipp, J. Grundmann, J.: Niederschlagbasiertes Hochwasserfrühwarnsystem „HoWa-innovativ“. 45. Dresdner Wasserbaukolloquium, Dresden (Germany), Juni 2022.

Müller, U., A. Philipp, J. Grundmann, J.: HoWa-innovativ - Frühwarnung mittels Mobilfunknetzdaten. XII. Mittweidaer Talsperrentag, Mittweida (Germany), Juni 2022.

Grundmann, J. and A. Philipp: Analysis of ensemble forecasts over successive forecast lead times for decision support in flood management. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-6373, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-6373>, 2022.

Grundmann, J. and A. Philipp: Entscheidungsunterstützung im Hochwassermanagement mit hydro-meteorologischen Ensemblevorhersagen. Tag der Hydrologie, München (Germany), März 2022.

Grundmann, J., A. Six, A. Philipp and U. Müller: Kommunikation von Unsicherheiten bei der Vorhersage von Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten anhand hydrologischer Ensemblevorhersagen. Tag der Hydrologie 2021.

Grundmann, J., A. Six and A. Philipp: A web based demonstration platform for flood warning in small catchments using ensemble hydrological forecasting. EGU General Assembly, 2021.

Grundmann, J., A. Six and A. Philipp: Ensemble hydrological forecasting for flood warning in small catchments in Saxony, Germany. EGU General Assembly, 2020.