

Anwender – Innovativ: Forschung für die zivile Sicherheit

## HoWa-innovativ

### Hydrologische Ensemblevorhersagen für kleine Einzugsgebiete

Dr. Jens Grundmann, TU Dresden, [jens.grundmann@tu-dresden.de](mailto:jens.grundmann@tu-dresden.de)



Bertsdorf-Hörnitz, SN

07.08.2010

Foto: Olaf Menges



# Motivation

- Lokale **Starkregen** und als Folge kleinräumige (extreme!) Hochwasser **nehmen zu** (Klimawandel) → auch **Schäden an Leib und Leben!**
- **HW-Vorhersage und -Warnung** für kleine Gebiete
  - nicht möglich auf Basis von Pegelmessungen
  - Ausreichende Vorwarnzeiten mit numerischen Wettermodellen
  - Aber: Niederschlagsvorhersagen meist unsicher
  - Mehrwert für kleine Gebiete?
  - Wie lassen sich die Unsicherheiten verständlich an die Akteure des KatS vermitteln?



2010: Bertsdorf, SN © O. Menges | 2013: Reichstädt, SN © R. Kämmerer | 2016: Braunsbach, BW © WetterOnline | 2016: Simbach, BY © DPA | 2017: Spitzkunnersdorf, SN © YouTube



# Motivation

## ■ Ziele:

- Quantifizierung und Kommunikation der meteo. Vorhersageunsicherheit in hydrologischen Ensemblevorhersagen für kleine Gebiete (10 – 200 km<sup>2</sup>)
- Entwicklung und Test geeigneter Visualisierungen für eine Frühwarnung in Zusammenarbeit mit den Akteuren des KatS (Anwender & Nutzer)

## ■ Lösungsansatz:

- hydrologischen Ensemblevorhersagen für kleine Gebiete
- Web-basierter Demonstrator “Hochwasserfrühwarnung“ für 3 Pilotregionen in Sachsen



2010: Bertsdorf, SN © O. Menges | 2013: Reichstädt, SN © R. Kämmerer | 2016: Braunsbach, BW © WetterOnline | 2016: Simbach, BY © DPA | 2017: Spitzkunnersdorf, SN © YouTube

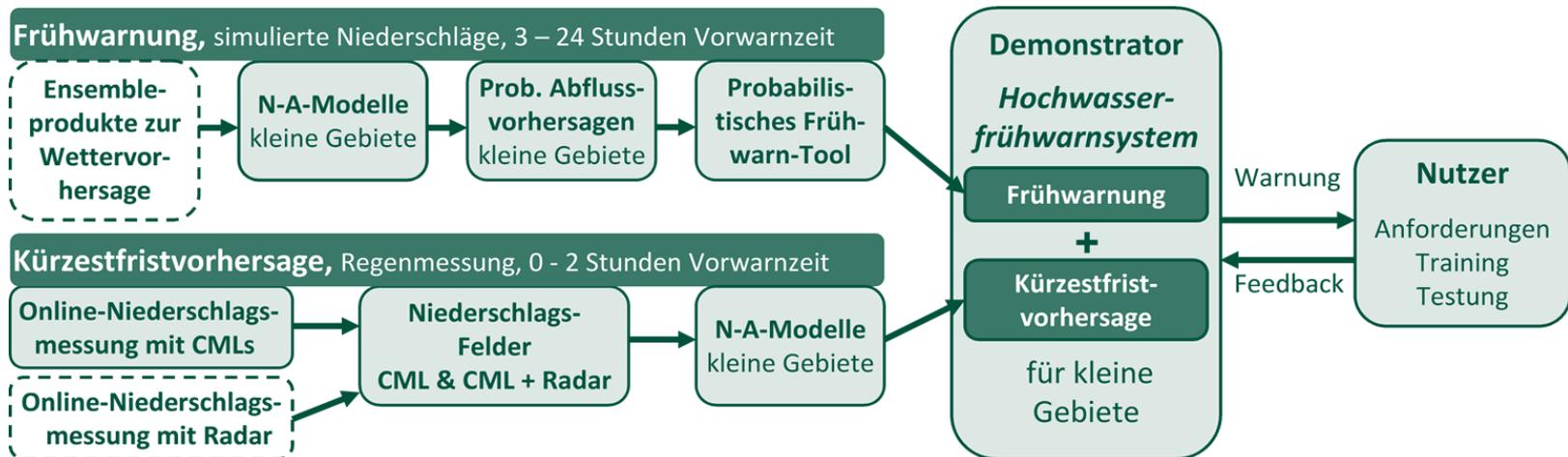
# Hydrologische Ensemblevorhersagen für kleine Gebiete

## Inhalt

- Zielstellung
- Methodik: Probabilistische Vorhersagen und Warnungen
- Niederschlags-Abfluss-Modellierung für kleine Gebiete
- Postprocessing der Ensemblevorhersagen
- Web-basierter Demonstrator “Hochwasserfrühwarnung“
- Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen
- Performance der Hochwasserfrühwarnung
- Fazit & Ausblick

# Zielstellung

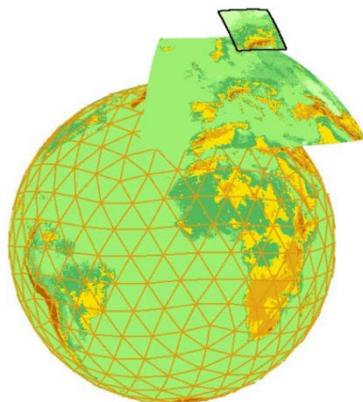
## Demonstrator „Hochwasserfrühwarnung kleine Einzugsgebiete“



# Probabilistische Vorhersagen und Warnungen

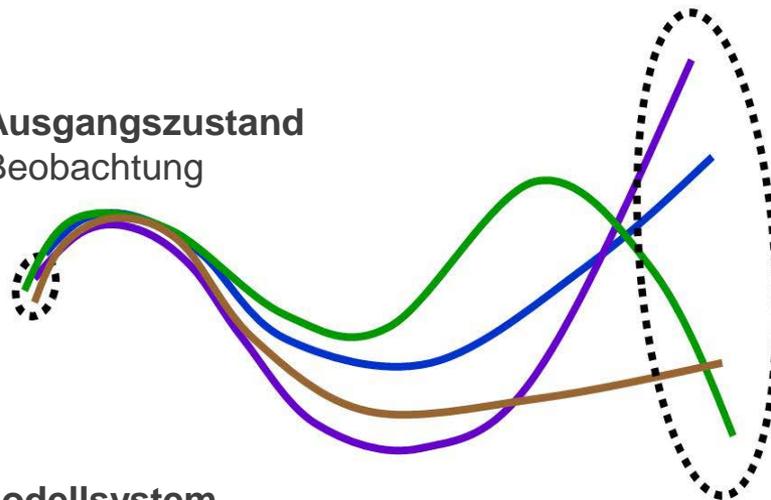
## Meteorologische Ensemblevorhersagen

Was machen die Meteorologen?



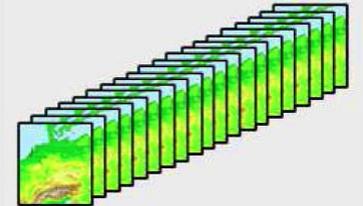
Modellkette des DWD

Ausgangszustand  
Beobachtung



**Meteorologische  
Ensemblevorhersagen**  
z.B. DWD:  
COSMO-D2-EPS  
(20 Realisationen)

**Ensemble Member**



**Variation im Modellsystem**

- Randbedingungen
- Anfangsbedingungen
- Modellphysik

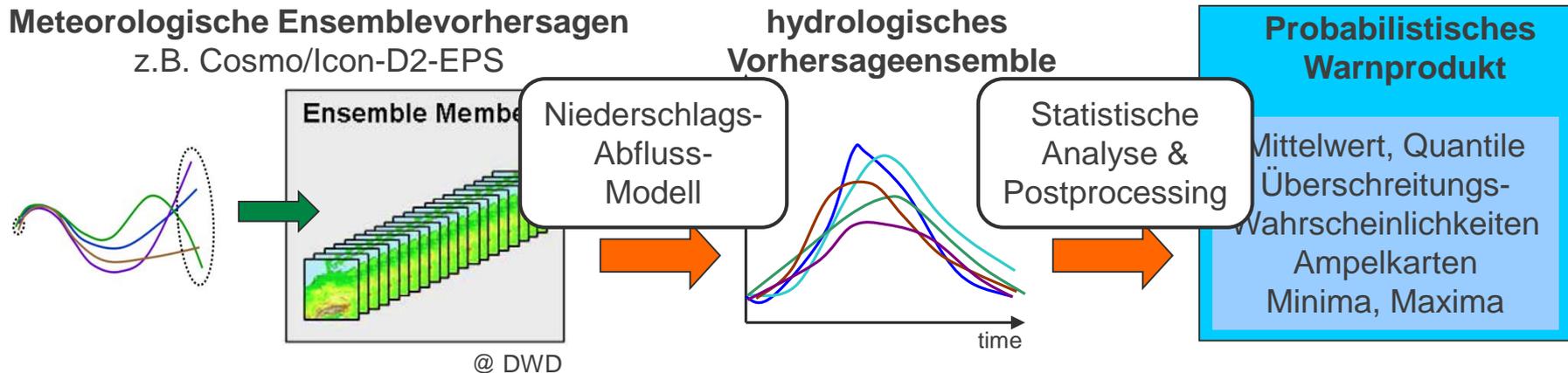
**Mögliche Zustände in der Zukunft**

- Vorhersage
- charakterisieren Unsicherheit

Abbildungen Quelle DWD

# Probabilistische Vorhersagen und Warnungen

## Zielstellung: Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete

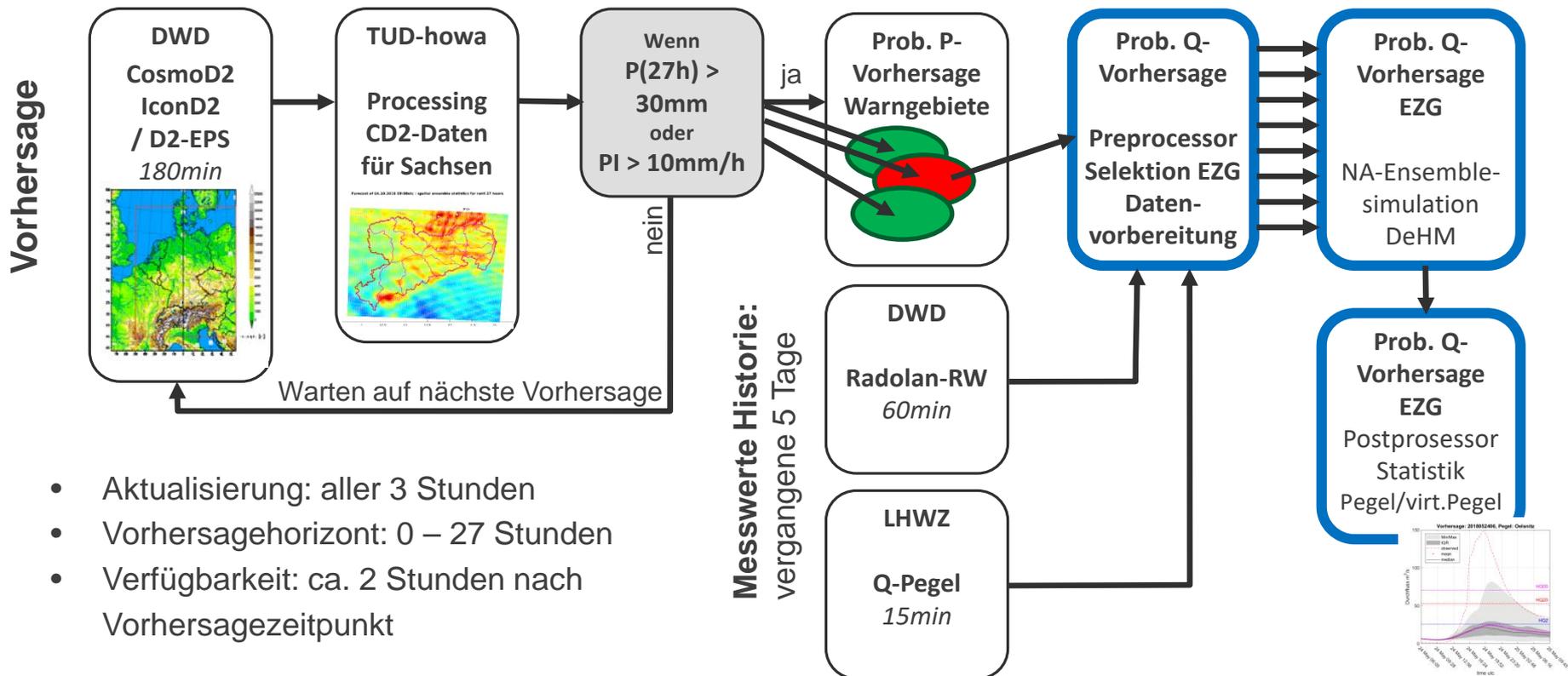


- **Unsicherheiten** in der meteorologischen Vorhersage sollte (muss) in die Hochwasserwarnung und Vorhersage einbezogen werden!
- Große Datenmengen → **Robuste und schnelle Prozessierung** erforderlich

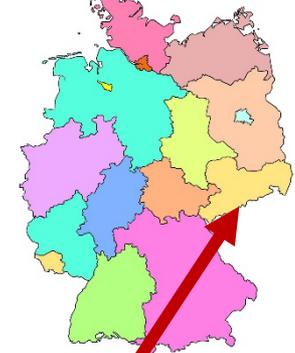
# Probabilistische Vorhersagen und Warnungen

## Zielstellung: Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete

**Frühwarnung**, simulierte Niederschläge, 3 – 24 Stunden Vorwarnzeit



- Aktualisierung: aller 3 Stunden
- Vorhersagehorizont: 0 – 27 Stunden
- Verfügbarkeit: ca. 2 Stunden nach Vorhersagezeitpunkt



# Probabilistische Vorhersagen und Warnungen

## Zielstellung: Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete

Räumliche Struktur:



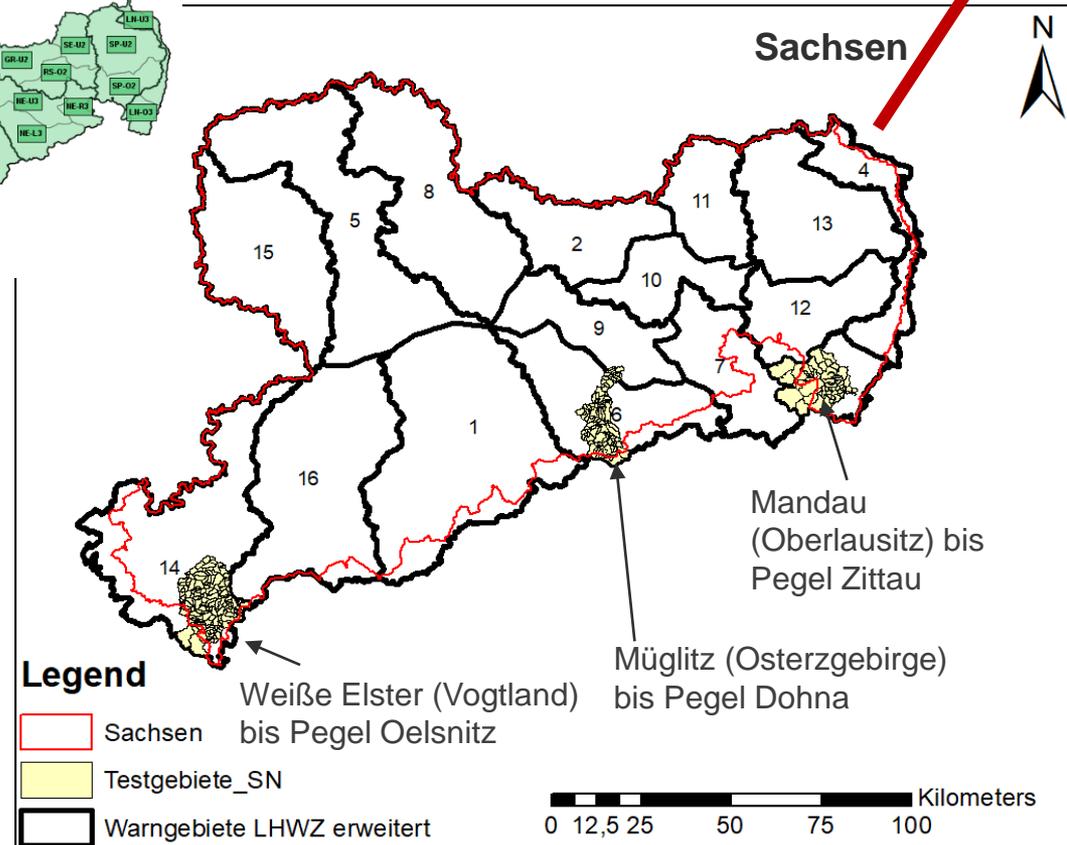
**Warnggebiete**  
(wie LHWZ-Frühwarnung)  
**Niederschlag**



**Einzugsgebiete**  
(beobachtete Pegel)  
**Niederschlag & Abfluss**

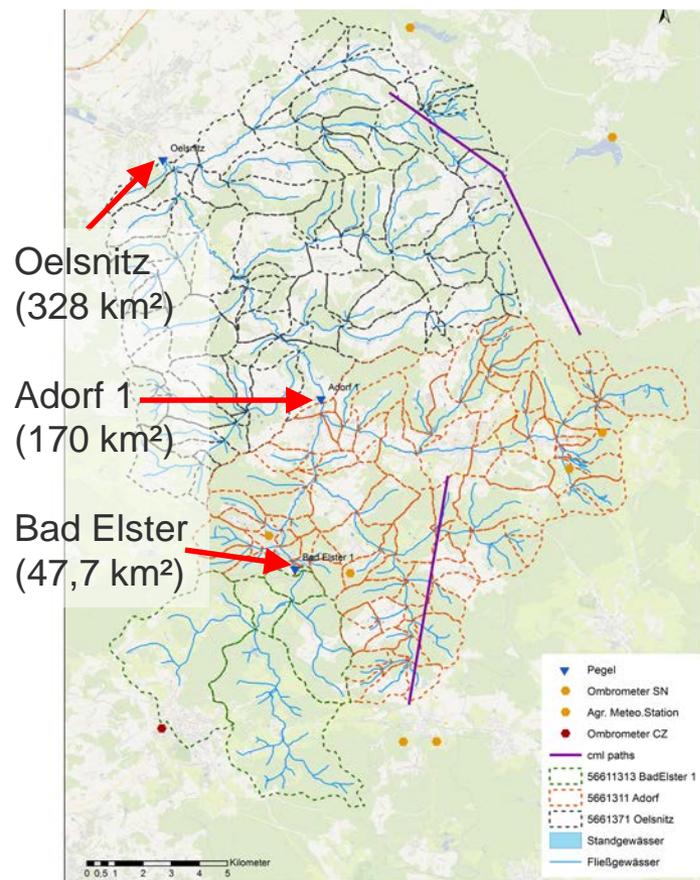


**Teileinzugsgebiete**  
(unbeobachtet)  
**Niederschlag & Abfluss**



# Niederschlags-Abfluss-Modellierung für kleine Gebiete

## Testgebiete Vogtland & Oberlausitzer Bergland

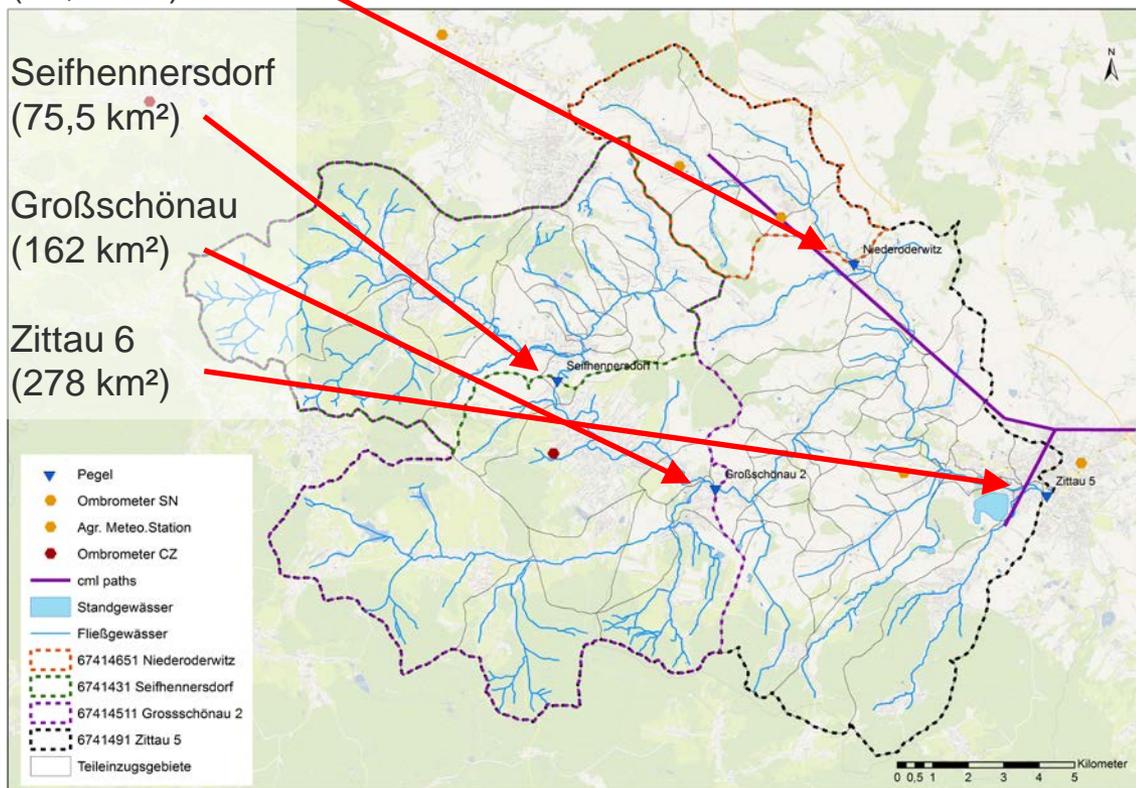


Niederoderwitz  
(29,1 km<sup>2</sup>)

Seiffhennersdorf  
(75,5 km<sup>2</sup>)

Großschönau  
(162 km<sup>2</sup>)

Zittau 6  
(278 km<sup>2</sup>)

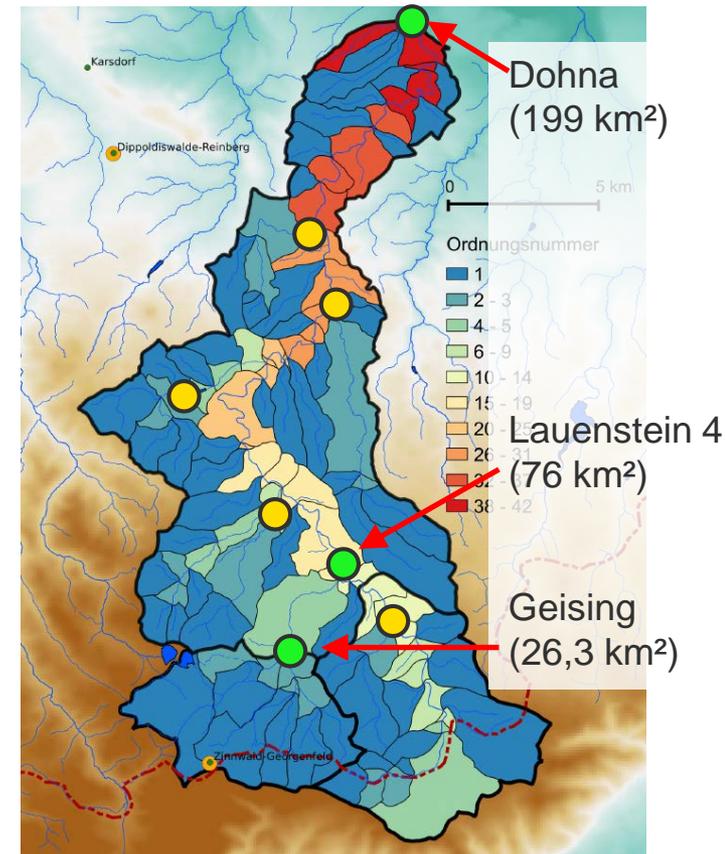


# Niederschlags-Abfluss-Modellierung für kleine Gebiete

## Methodik

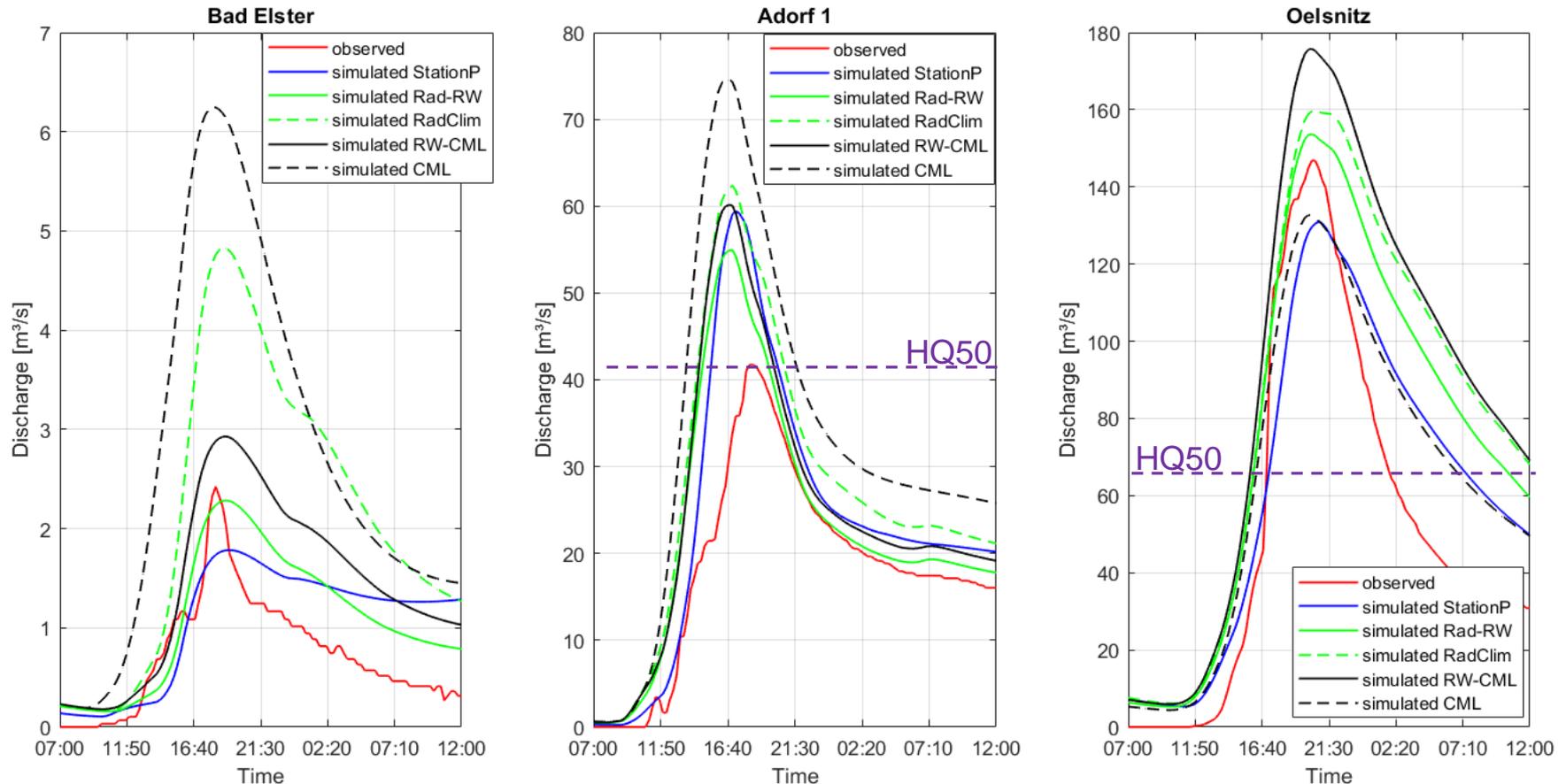
### Testgebiet Osterzgebirge

- DeHM (Deterministische hydrologische Modellierung)
- Konzeptionelles hydrol. Modell, ereignisbasiert
- Topologie basiert auf TEZGs mit Gewässerkennzahlen → Knoten (-schema)
- Abflussbildung: ● SCS Curve Number
- Abflusskonzentration: ● Speicherkaskade
  - Doppelspeicherkaskade ● empirische Impulsantwort
  - Flächenlaufzeitfunktion
- Routing: ● Translationsgerinne ● Speicherkaskade
  - Muskingum ● Translations-Diffusionsansatz
- Speichermodell: ● konst. Abgabe ● ungesteuerte Abgabe
  - Abgabe als Funktion vom Inhalt
- Datenassimilation: ● Kalman-Filter
- dt = 15 min



# Niederschlags-Abfluss-Modellierung für kleine Gebiete

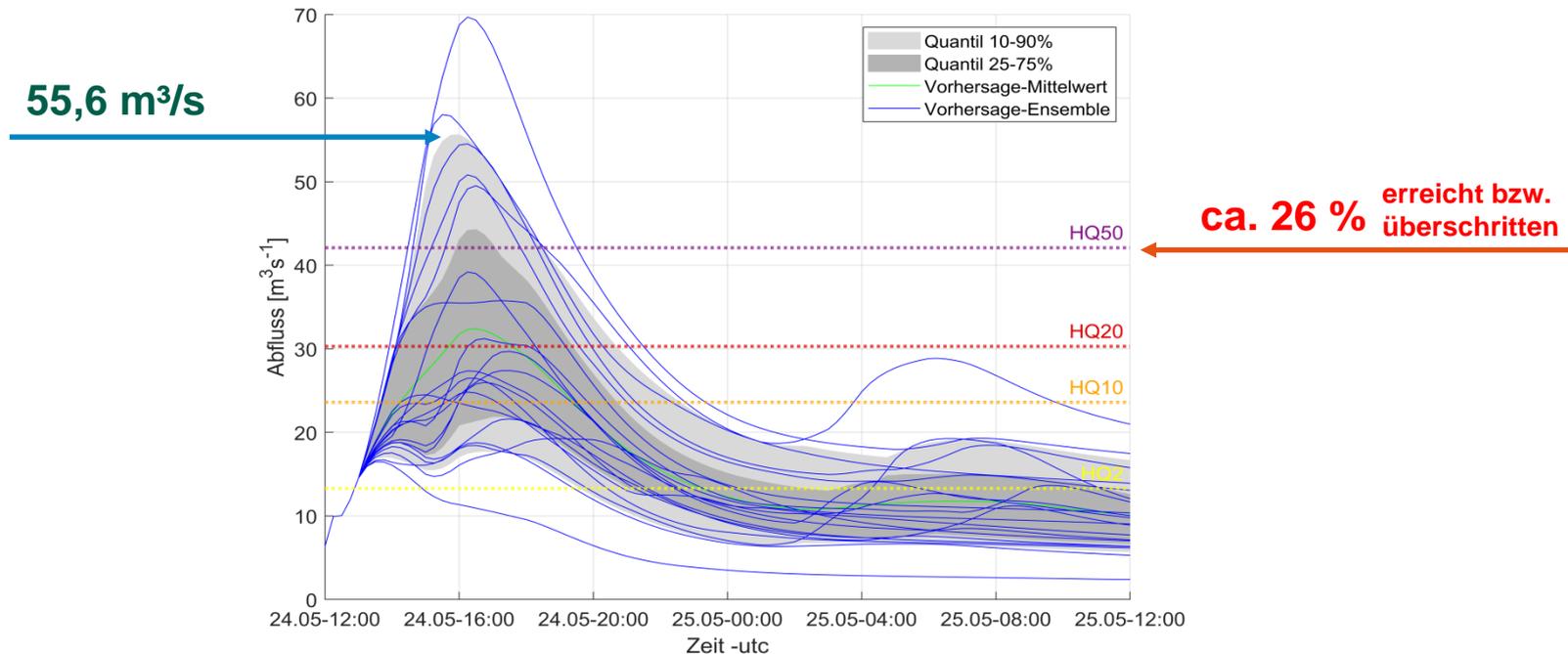
## Ereignis vom 24.5.2018, Obere Weiße Elster → Validierung CML



# Postprocessing der Ensemblevorhersagen

## Statistische Analyse & Visualisierung

- Quantilstatistik:** Niederschlags- oder Durchflusswert, der für eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit erreicht wird
- Schwellwertstatistik** (oder Grenzwertstatistik): Wahrscheinlichkeit mit der ein bestimmter Niederschlags- oder Durchflusswert (Schwellwert) erreicht wird



# Postprocessing der Ensemblevorhersagen

## Schwellwerte Hochwasser

| Merkmal                | HQ-Werte für Pegel und unbeobachtete Querschnitte | Alarmstufen als Alternative für Meldepegel in Sachsen                           |   |
|------------------------|---|---|---|
| Kleines Hochwasser     | ≥ 2-jährliches Hochwasser (HQ 2)                  | Alarmstufe 1: Beginn der Ausuferung   |  |
| Mittleres Hochwasser   | ≥ 10-jährliches Hochwasser (HQ 10)                | Alarmstufe 2: Überschwemmung von land- & forstwirtschaftlicher Flächen          |  |
| Großes Hochwasser      | ≥ 20-jährliches Hochwasser (HQ 20)                | Alarmstufe 3: Überschwemmung von Bebauung und überörtlicher Infrastruktur       |  |
| Sehr großes Hochwasser | ≥ 50-jährliches Hochwasser (HQ 50)                | Alarmstufe 4: Überschwemmung mit hohen Schäden, Gefährdung für Menschen & Tiere |  |

- HQ-Werte aus: Wasserhaushaltsportal Sachsen → Durchflusskennwerte (aus Statistik und Regionalisierung)
- Alarmstufen: Pegel-bezogene Festlegung gemäß Hochwassermeldeordnung
- Quelle: <https://www.hochwasserzentralen.de/info.html>

# Postprocessing der Ensemblevorhersagen

## Schwellwerte Niederschlag

- Warnkriterien des DWD (Auswahl aus [www.dwd.de/warnkriterien](http://www.dwd.de/warnkriterien))

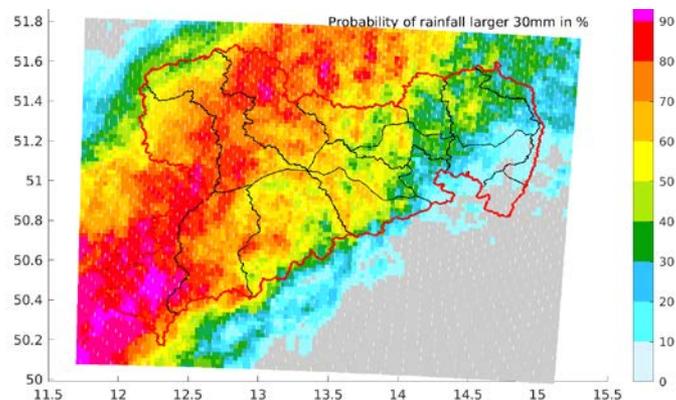
| Starkregen                    |   |
|-------------------------------|---|
| Warnereignis                  | Schwellenwert                           |
| Starkregen                    | 15 - 25 l/m <sup>2</sup><br>in 1 Stunde |
| Heftiger<br>Starkregen        | 25 - 40 l/m <sup>2</sup><br>in 1 Stunde |
| Extrem heftiger<br>Starkregen | > 40 l/m <sup>2</sup><br>in 1 Stunde    |

| Dauerregen                      |   |
|---------------------------------|---|
| Warnereignis                    | Schwellenwert                             |
| Dauerregen                      | 30 - 50 l/m <sup>2</sup><br>in 24 Stunden |
| Ergiebiger<br>Dauerregen        | 50 - 80 l/m <sup>2</sup><br>in 24 Stunden |
| Extrem ergiebiger<br>Dauerregen | > 80 l/m <sup>2</sup><br>in 24 Stunden    |

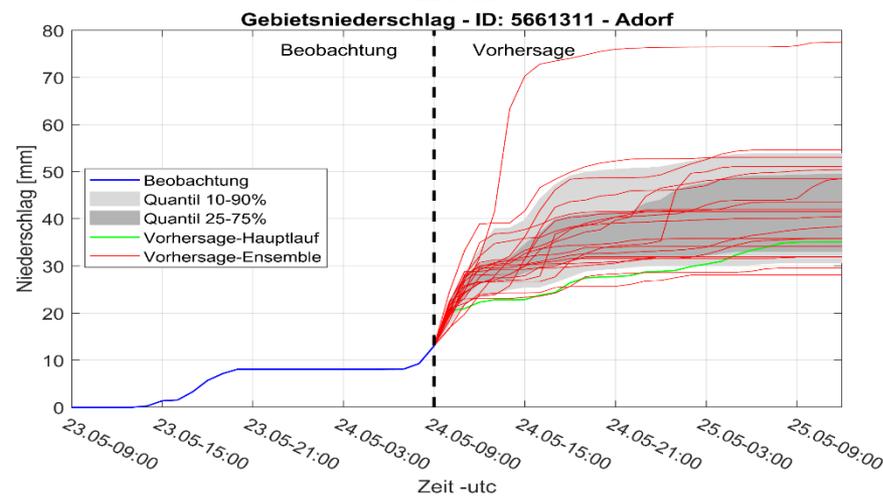
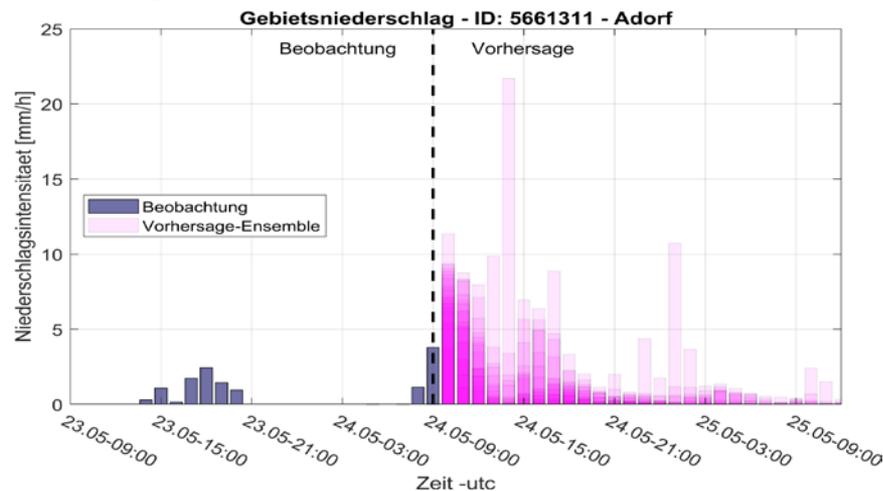
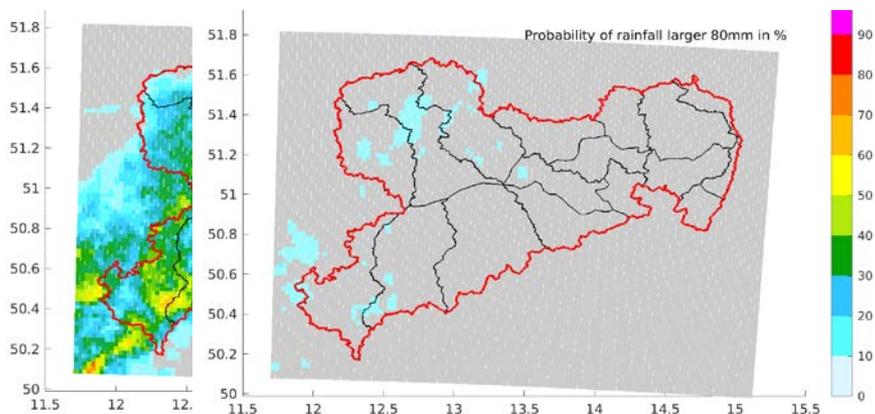
# Postprocessing der Ensemblevorhersagen

## Visualisierungen: Beispiel Niederschlag

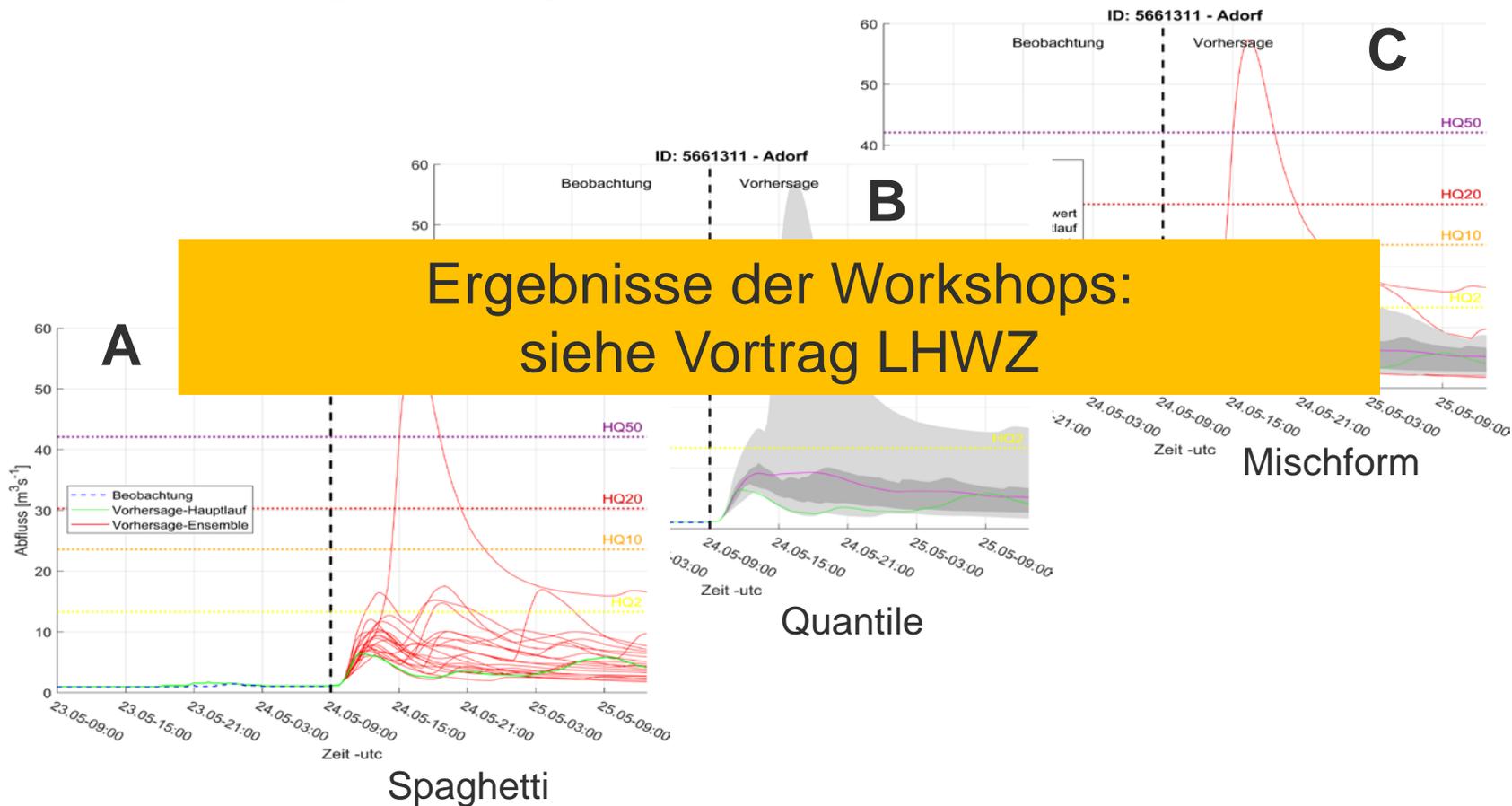
Ü-Wahrscheinlichkeit von 30 mm/24 hr



Ü-Wahrsch Ü-Wahrscheinlichkeit von 80 mm/24 hr

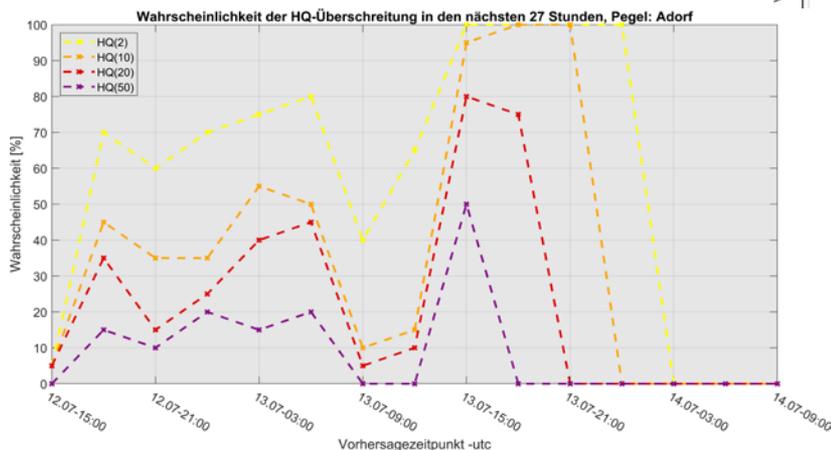
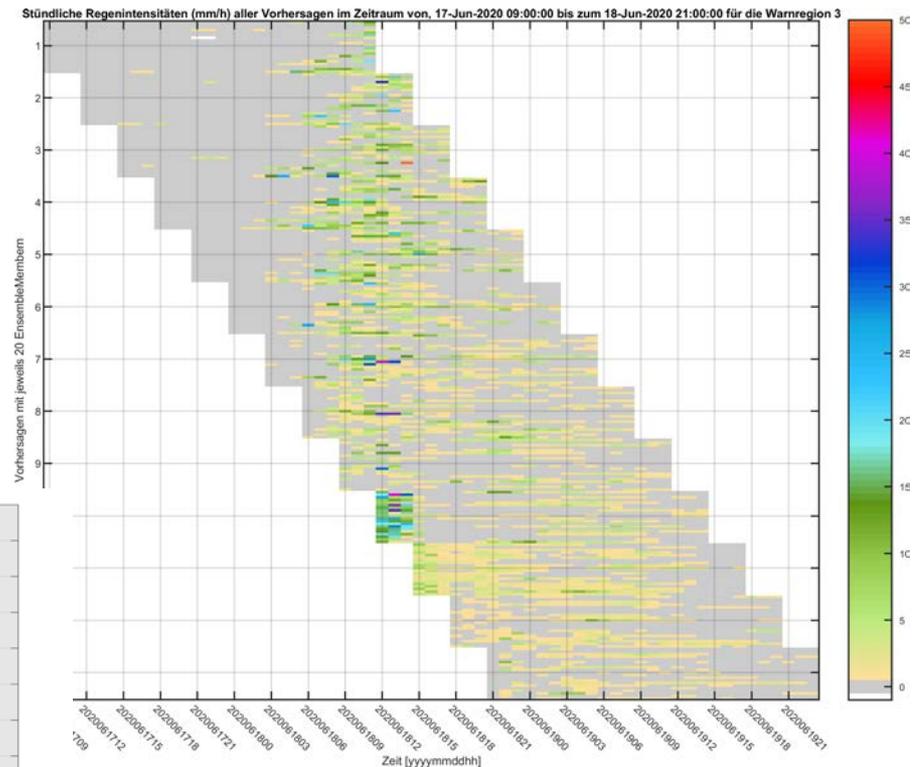
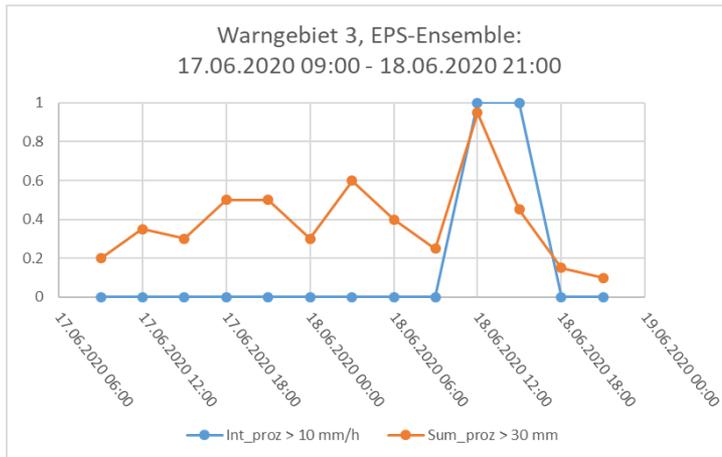


# Postprocessing der Ensemblevorhersagen Visualisierungen: Beispiel Abfluss



Ergebnisse der Workshops:  
siehe Vortrag LHWZ

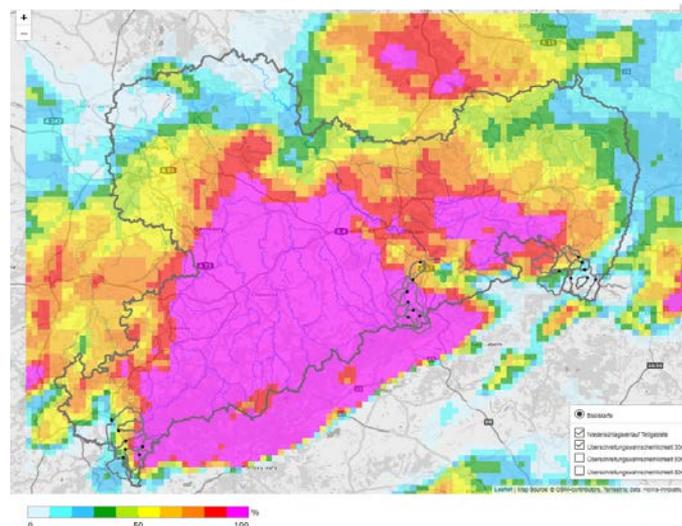
# Postprocessing der Ensemblevorhersagen Visualisierungen: Beispiel zeitliche Entwicklung



# Web-basierter Demonstrator "Hochwasserfrühwarnung"

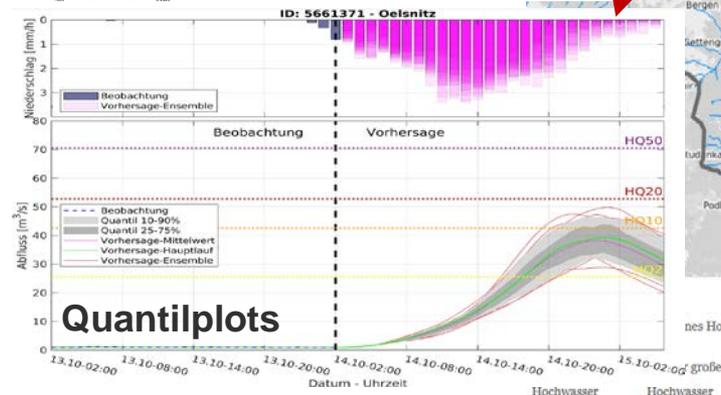
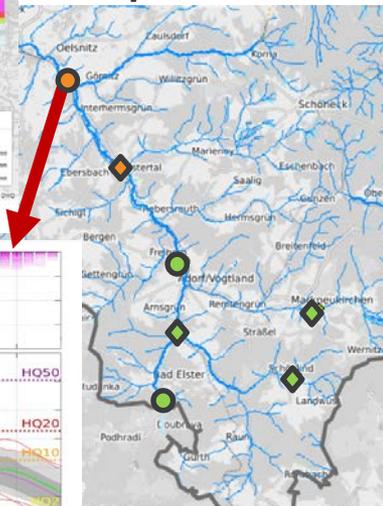
- Warnung vor Extremniederschlägen in Sachsen
- Abflussvorhersage für 3 Pilotregionen (Vorhersageweite: 27h)
- Historie der letzten 24h
- Stündliche Aktualisierung
- Live-Modus  
<http://howa-innovativ.hydro.tu-dresden.de/WebDemoLive/>
- Ereignisse der Vergangenheit  
<http://howa-innovativ.hydro.tu-dresden.de/WebDemo/>

## Überschreitungswahrscheinlichkeit



explore event

## Ampelkarte



# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

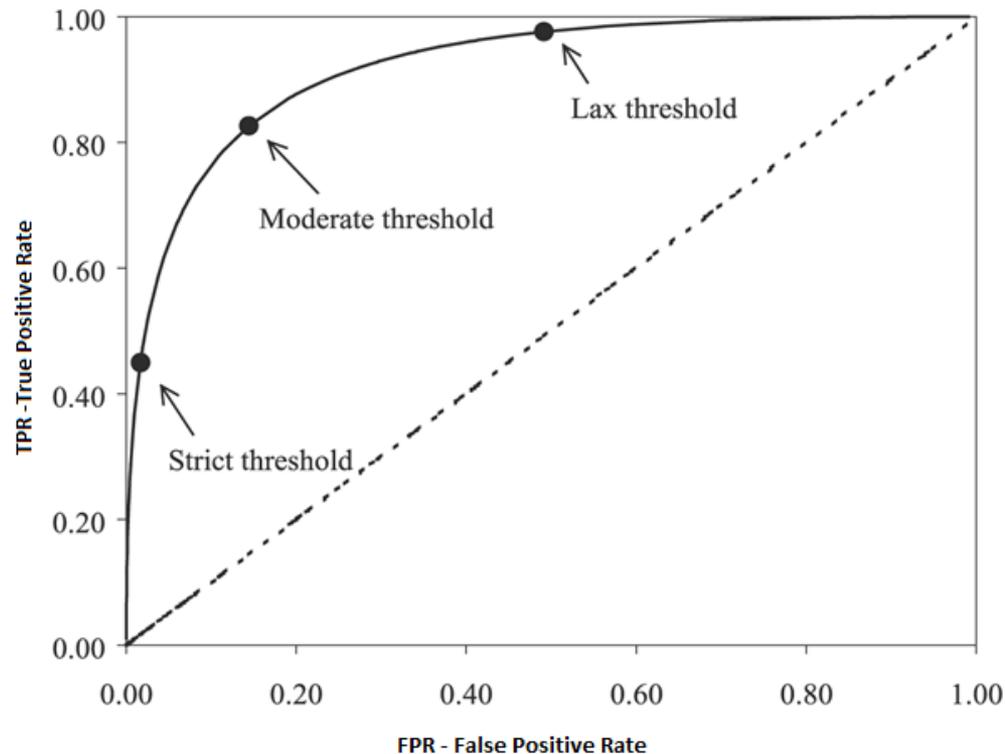
## Haben prob. Vorhersagen einen Mehrwert?

- Hindcast-Analyse CosmoD2(eps) Vorhersagen
- Methode: ROC/AUC
- Durchführung:
  - P-zellweise: Vergleich zwischen Zellenwerten CosmoD2(eps) vs. Radolan-RW
  - P-EZG: Vergleich Gebietsmittelwerten CosmoD2(eps) vs. Radolan-RW
  - Q: Vergleich zwischen simulierten (CosmoD2(eps)) und beobachteten Abflüssen
  - Ereignisse: siehe Tabelle

| Testgebiet              | Startzeit         | Endzeit           |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| Vogtland (Weiße Elster) | 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 |
| Osterzgebirge (Müglitz) | 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 |
| Ostsachsen (Mandau)     | 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  |

# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

## Methode: ROC/AUC



@ Braga, 2003

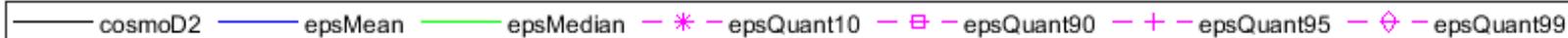
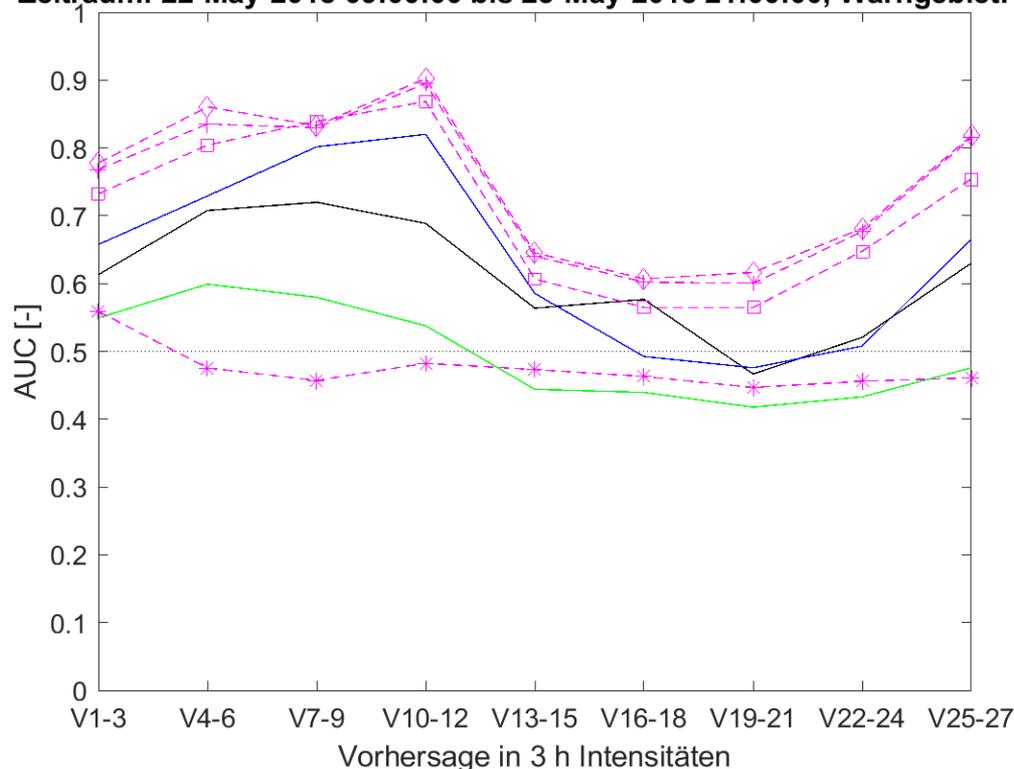
Beispiel einer ROC-Curve: für vorgegebene Schwellenwert werden True Positive Rate (TPR) und False Positive Rate (FPR) ermittelt.

# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

## Haben prob. Vorhersagen einen Mehrwert?

- P-zellweise:  
Vergleich  
zwischen  
Zellenwerten  
CosmoD2(eps)  
vs. Radolan-RW

Zeitraum: 22-May-2018 09:00:00 bis 23-May-2018 21:00:00, Warngbiet: 14

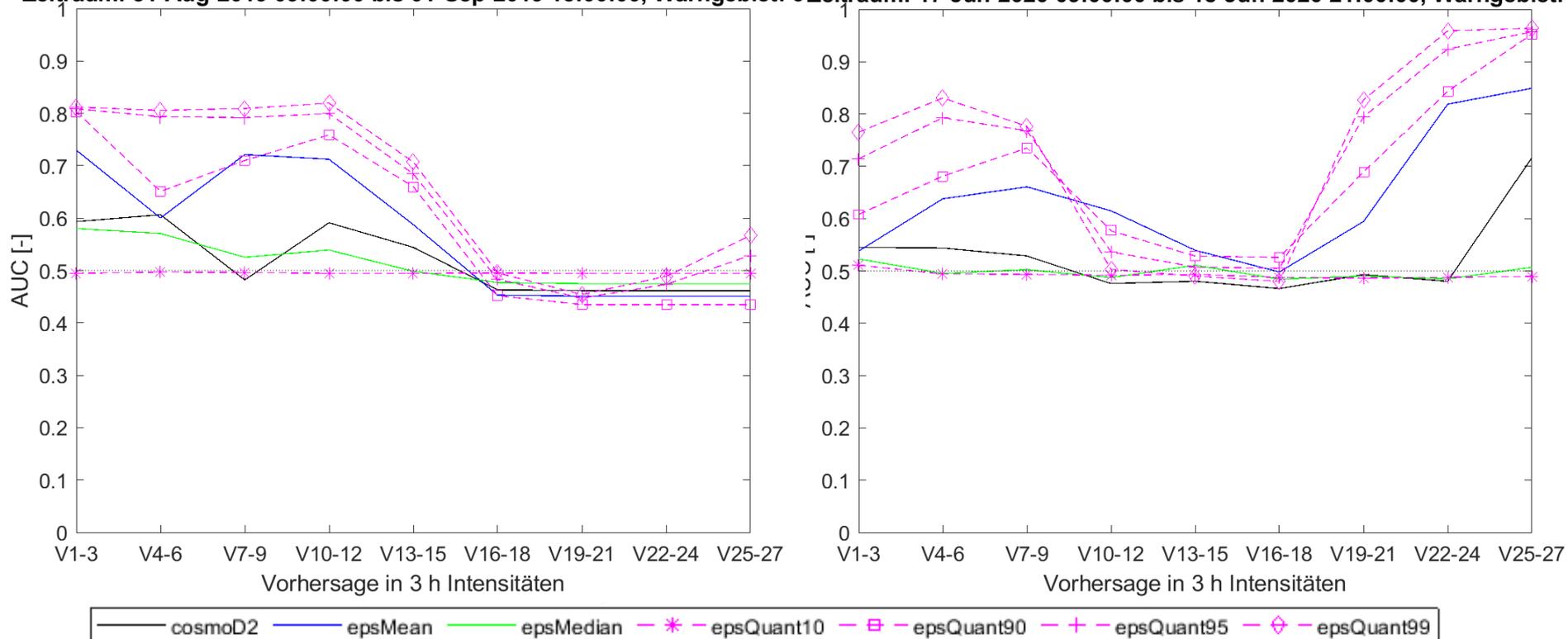


# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

## Haben prob. Vorhersagen einen Mehrwert?

■ P-zellweise: Vergleich zwischen Zellenwerten CosmoD2(eps) vs. Radolan-RW

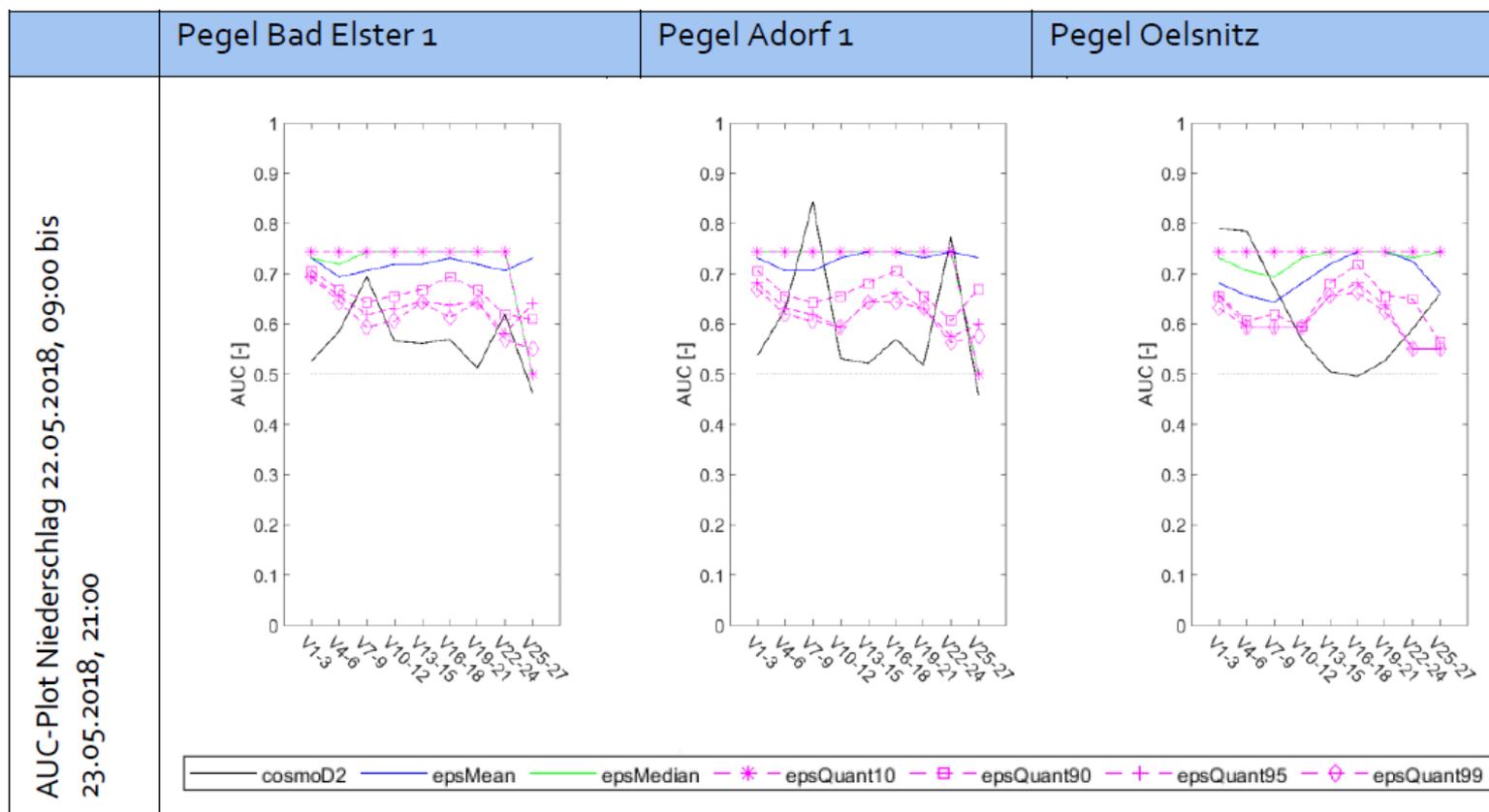
Zeitraum: 31-Aug-2019 09:00:00 bis 01-Sep-2019 15:00:00, Warngebiet: 6    Zeitraum: 17-Jun-2020 09:00:00 bis 18-Jun-2020 21:00:00, Warngebiet: 3



# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

## Haben prob. Vorhersagen einen Mehrwert?

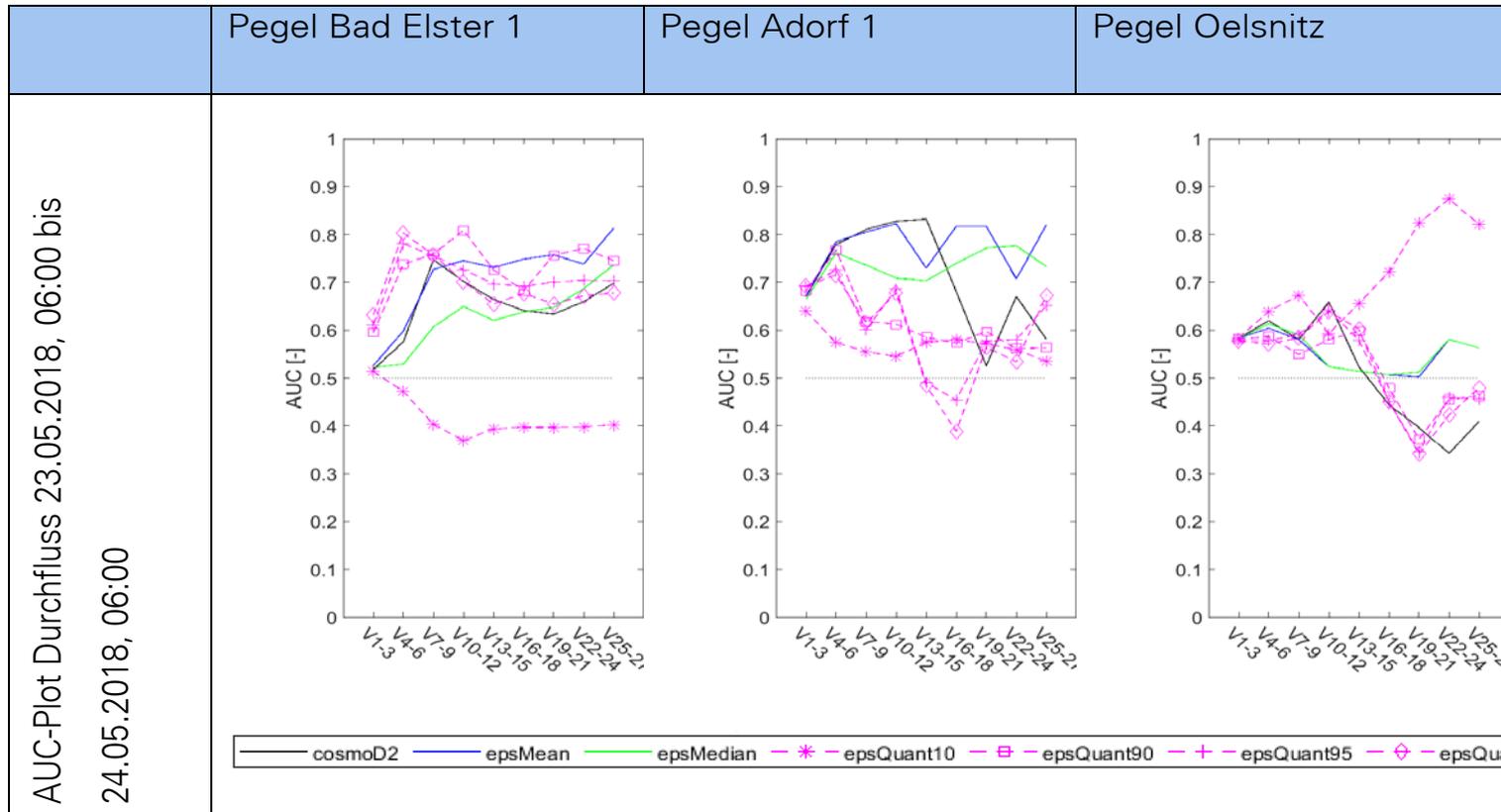
### I P-EZG: Vergleich Gebietsmittelwerten CosmoD2(eps) vs. Radolan-RW



# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

## Haben prob. Vorhersagen einen Mehrwert?

Q: Vergleich zwischen simulierten (CosmoD2(eps)) und beobachteten Abflüssen



# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

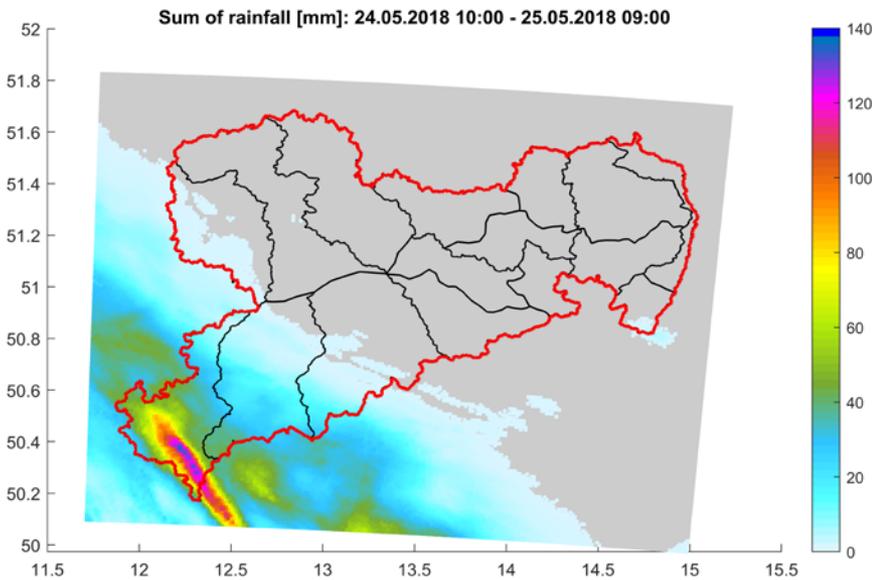
## Erstes, vorläufiges Fazit

- Hindcast-Analyse Niederschlag:
  - AUC vorwiegend  $> 0.5$ ; für zellweise & gebietsweise Auswertung
  - Kein klarer Trend der Vorhersageweite bei gebietsweise Auswertung zu beobachten
  - Unterschiede bei advektiven & konvektiven Ereignissen zu beobachten
- Hindcast-Analyse Durchfluss:
  - AUC vorwiegend  $> 0.5$
  - Fallender Trend der Vorhersageweite in Gebiet Oberlausitz & Osterzgebirge erkennbar
  - Gebietspezifische Form vorhanden → Einfluss NA-Modell / Region / Ereignistyp?
- Hindcast-Analyse Allgemein:
  - Mehrwert vorhanden
  - Werkzeug entwickelt → „Feintuning“ und kritische Überprüfung nötig (Gebietsgröße, Wahl der Grenzwerte, ...)
  - Ergebnisse vorläufig → mehr Ereignisse & IconD2-EPS Analyse nötig

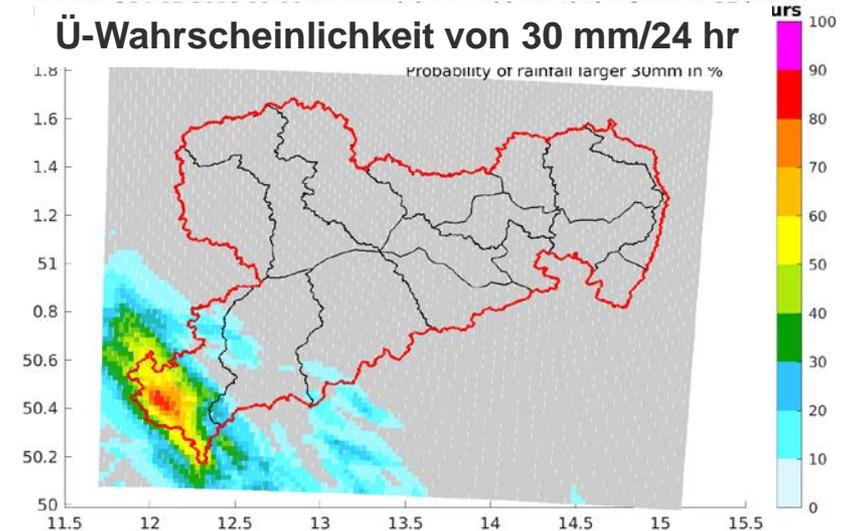
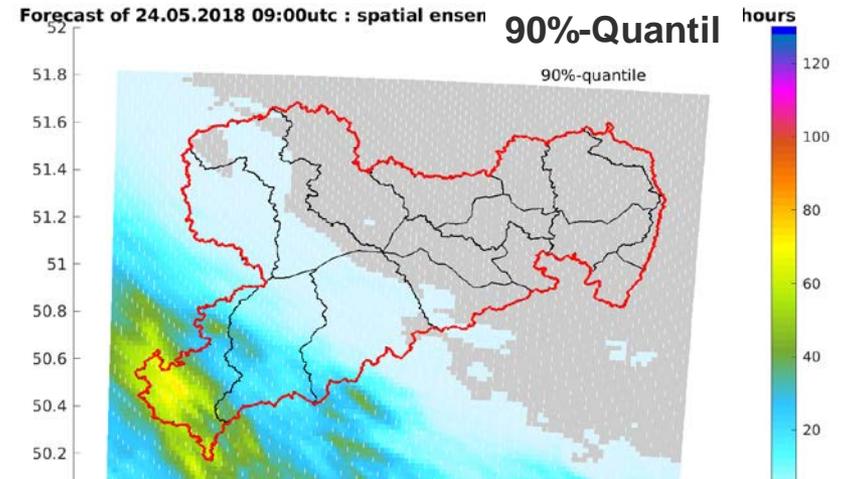
# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis 24.5.2018

Extrem heftiger Starkregen

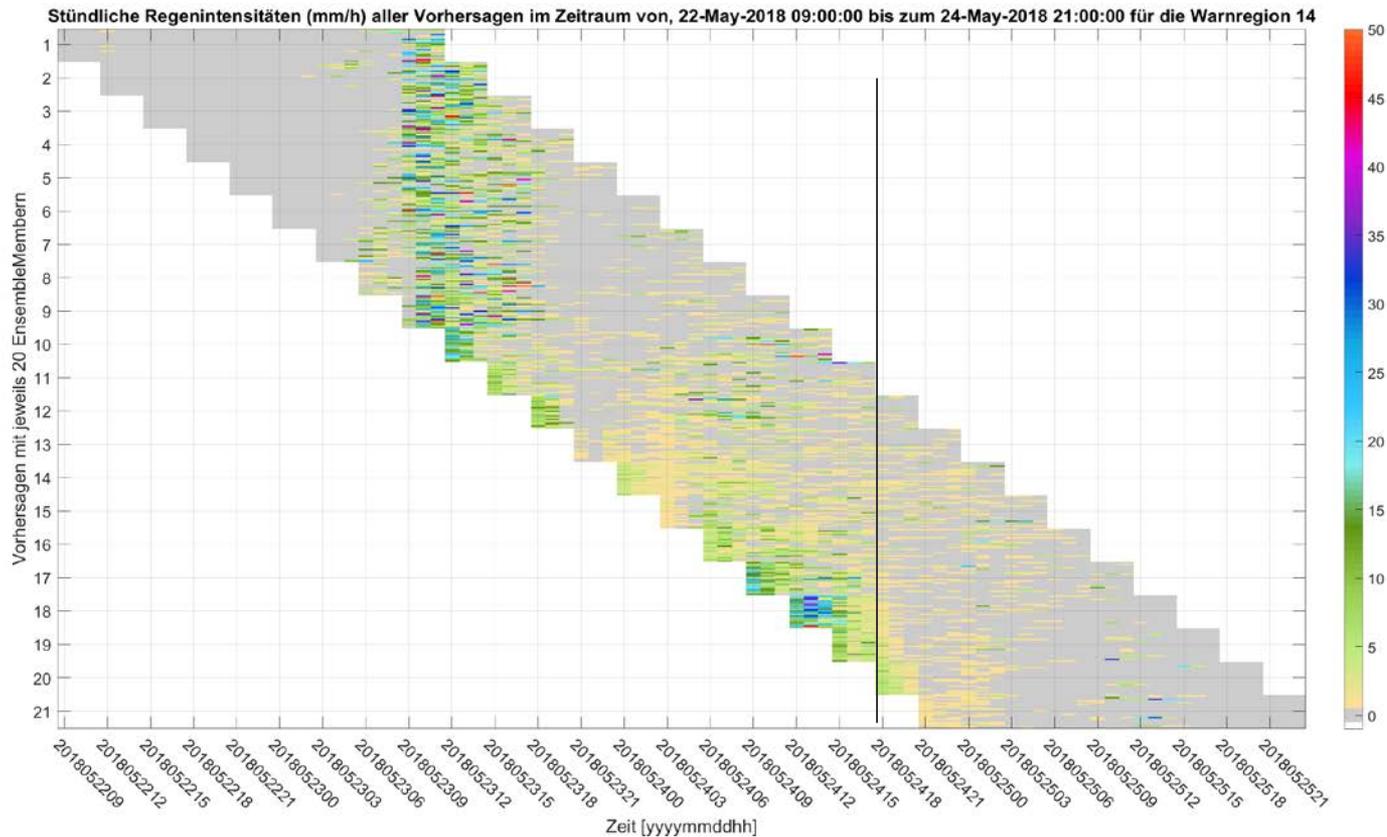
Beobachtung Radolan-RW



Vorhersage CosmoD2eps →  
24.05.2018, 9:00utc



# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis 22.-24.5.2018, Vogtland



# Performance der Hochwasserfrühwarnung

## HW-Ereignis (24.5.2018), Vogtland, Pegel Oelsnitz, $A_E = 358\text{km}^2$

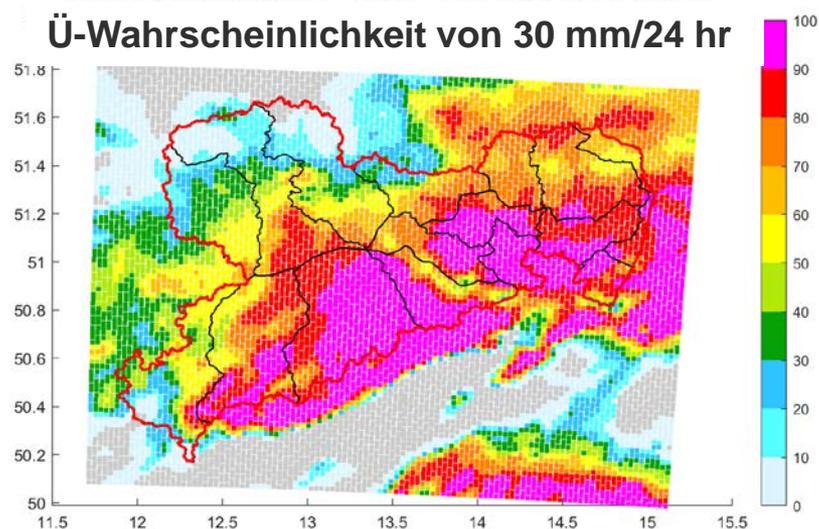
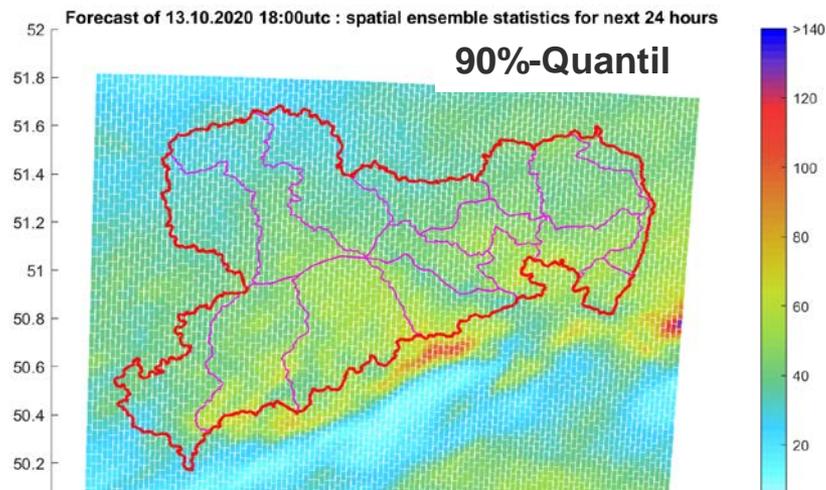
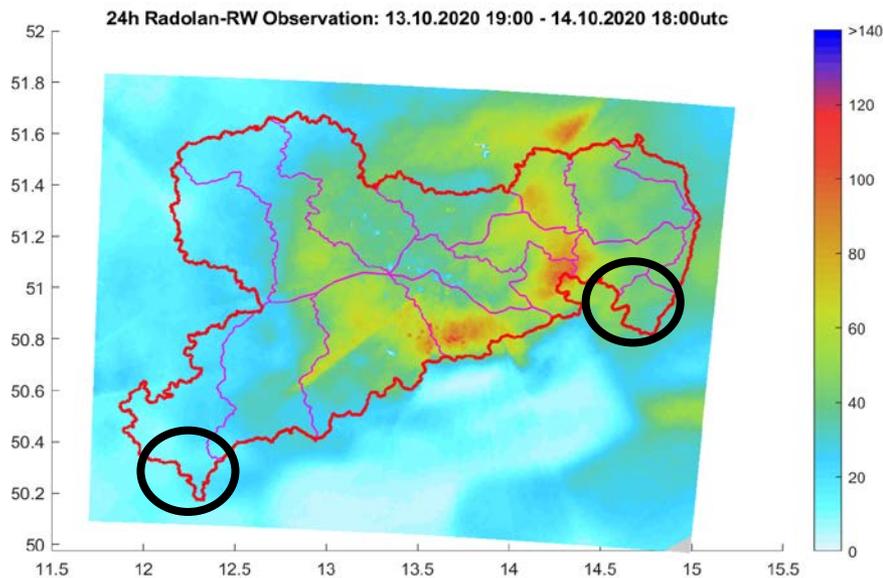


# Performance der Hochwasserfrühwarnung

## Ereignis 13.-14.10.2020

Extrem ergiebiger Dauerregen

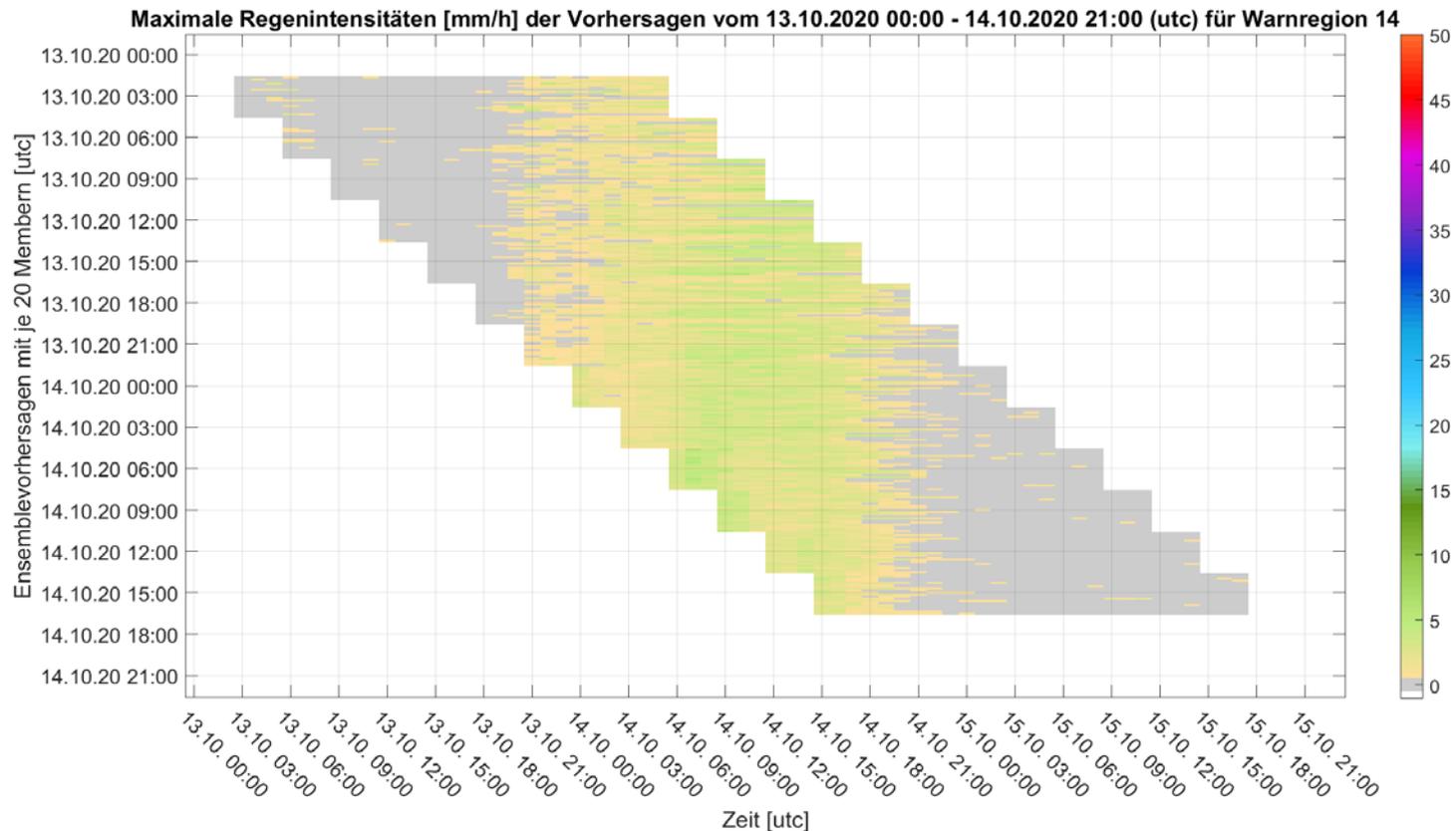
## Beobachtung Radolan-RW



Vorhersage CosmoD2eps →  
13.10.2020, 18:00utc

# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis 13.-14.10.2020, Sachsen

Extrem ergiebiger Dauerregen



# Performance der Hochwasserfrühwarnung

## HW-Ereignis (14.10.2020), Oberlausitz, Seifhennersdorf, $A_E = 75,5\text{km}^2$



# Performance der Hochwasserfrühwarnung

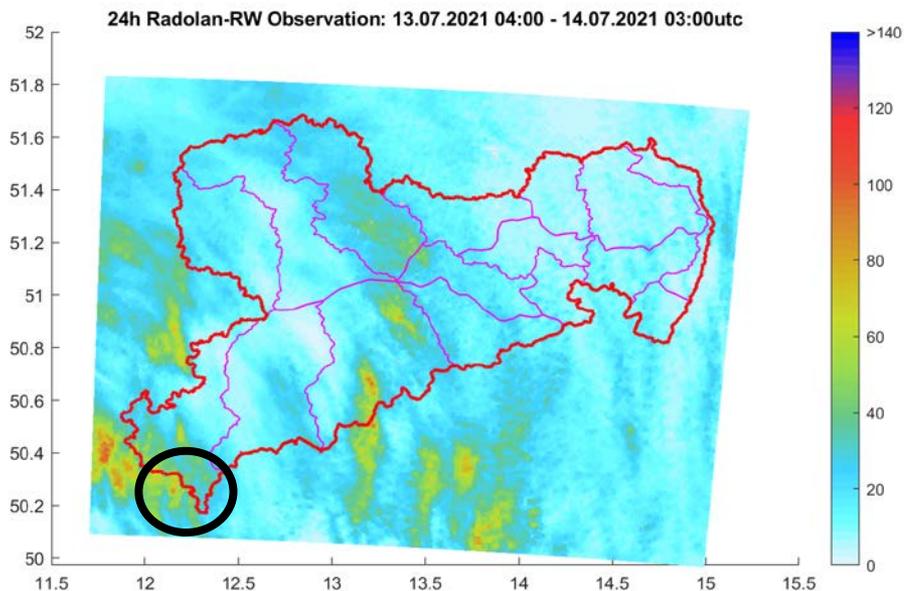
## HW-Ereignis (14.10.2020), Vogtland, Pegel Oelsnitz, $A_E = 358\text{km}^2$



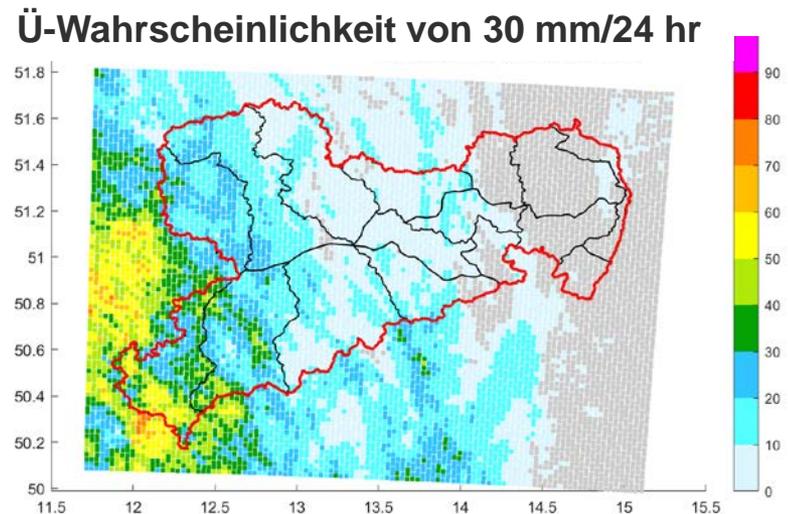
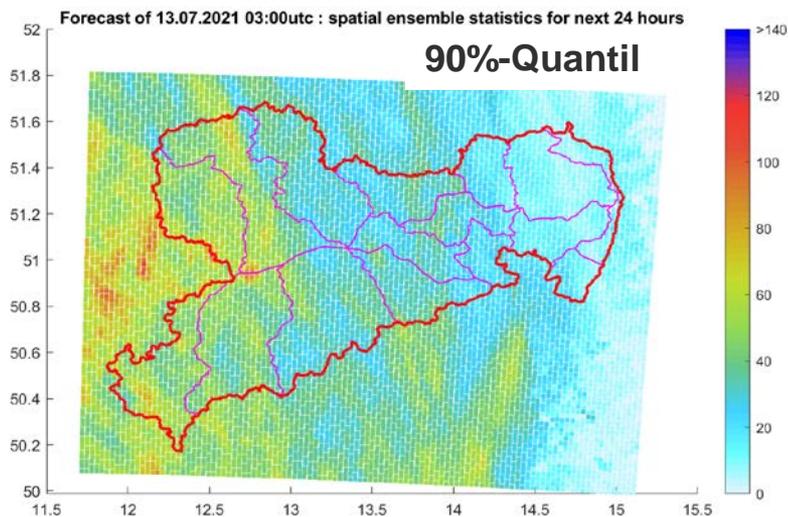
# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis (13.7.2021), Vogtland

Extrem heftiger Starkregen

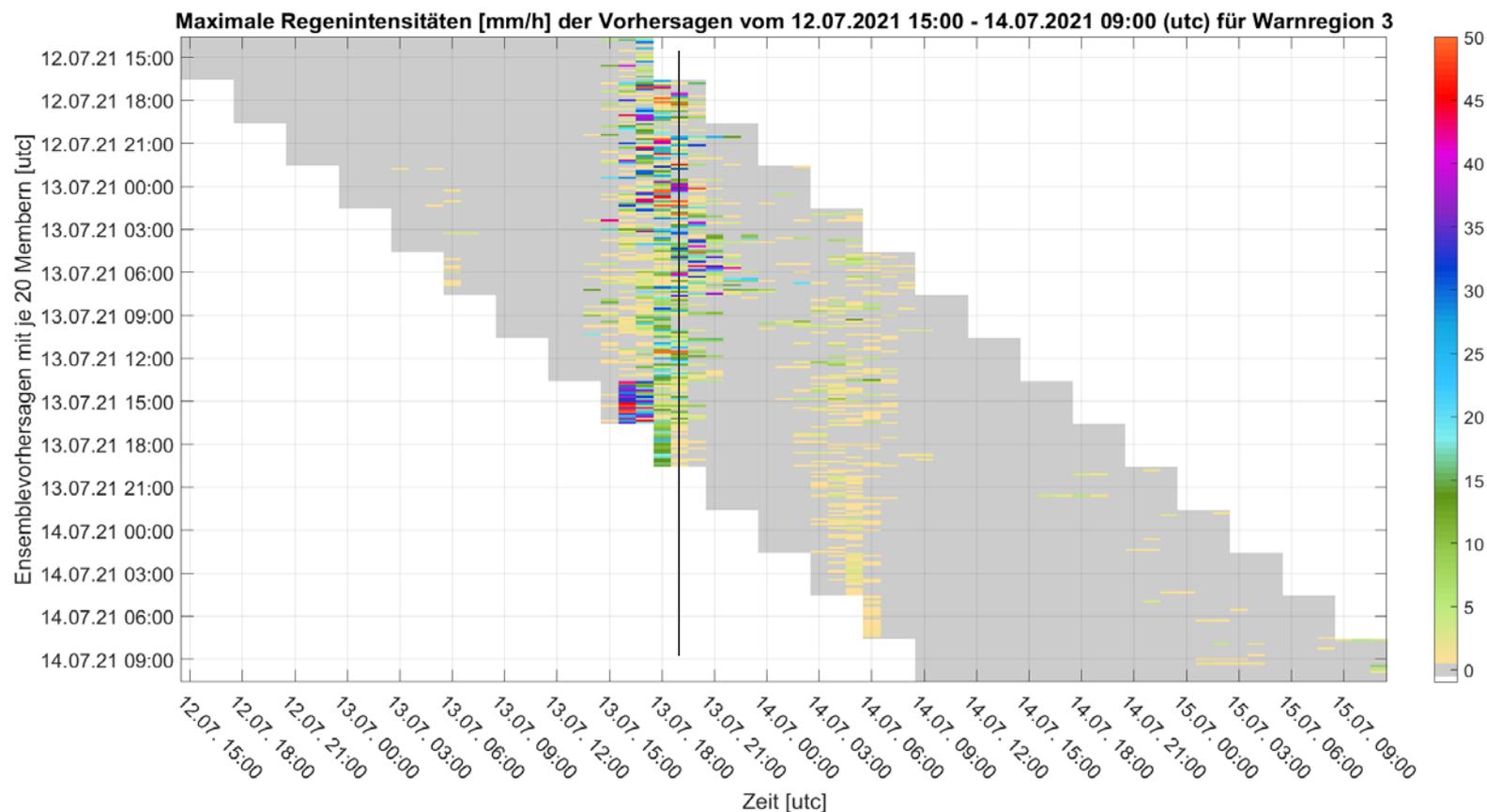
Beobachtung Radolan-RW



Vorhersage Icon-D2-eps →  
13.07.2021, 03:00utc

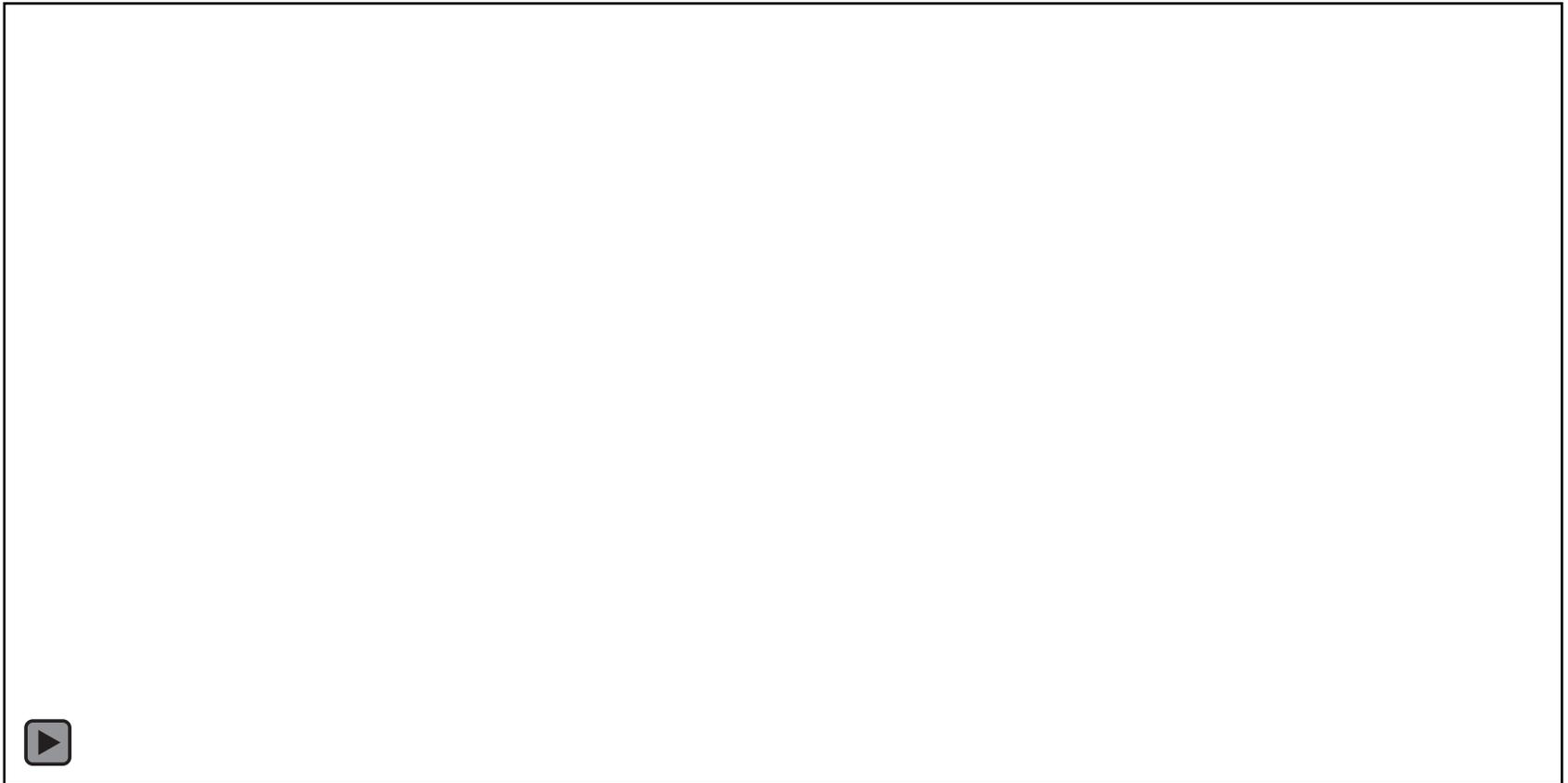


# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis (13.7.2021), Vogtland



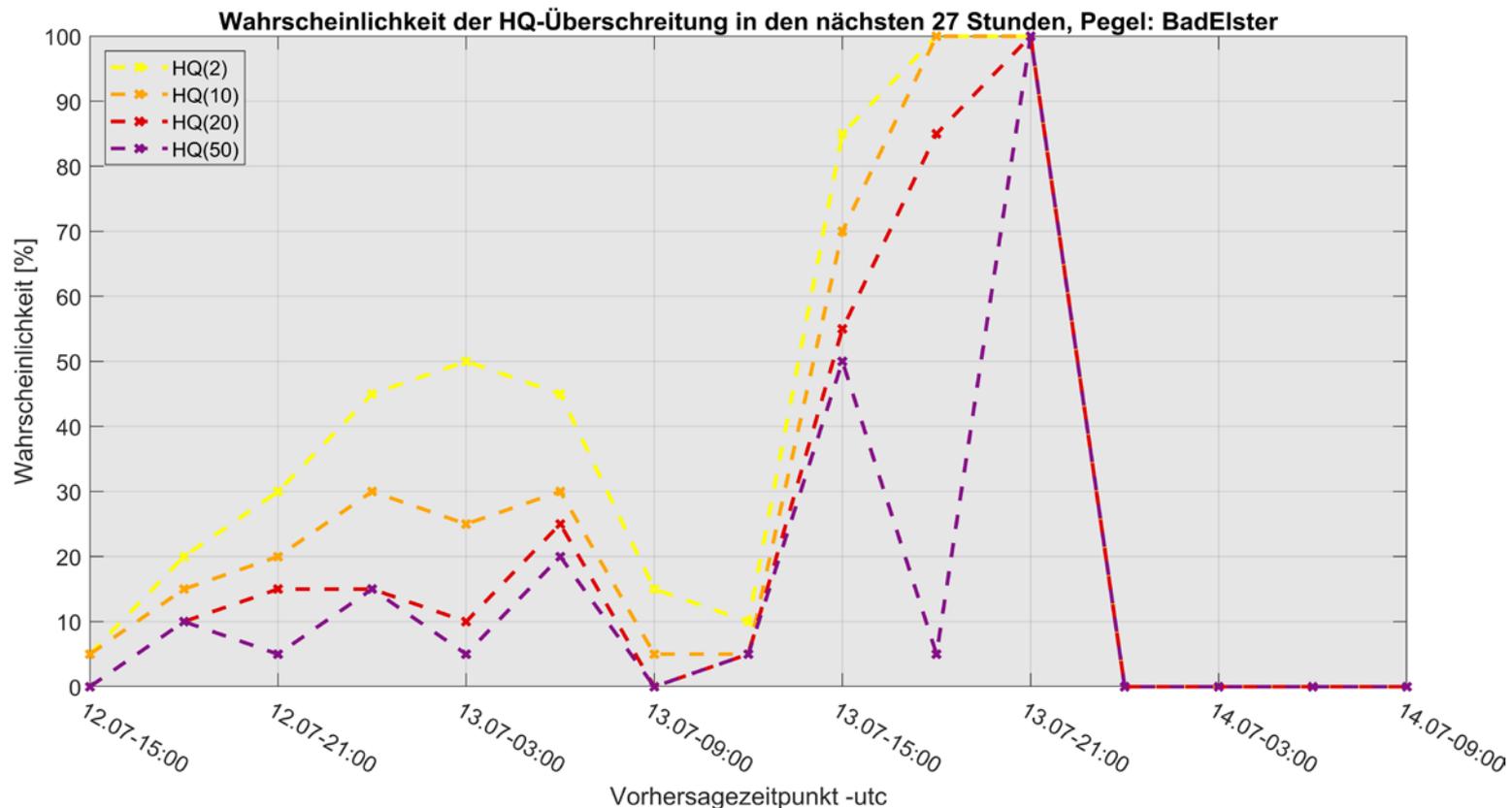
# Performance der Hochwasserfrühwarnung

## HW-Ereignis (13.7.2021), Vogtland, Pegel Bad Elster, $A_E = 47,7\text{km}^2$



# Performance der Hochwasserfrühwarnung

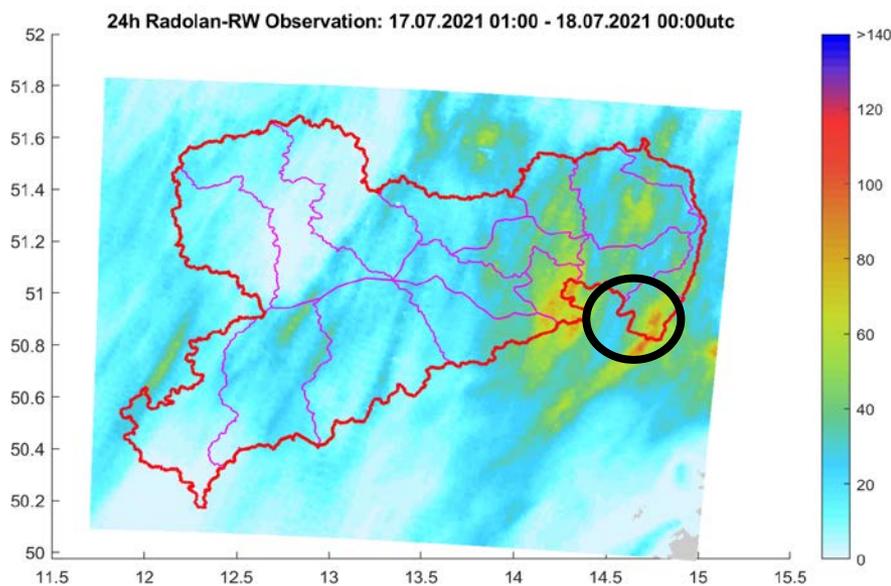
## HW-Ereignis (13.7.2021), Vogtland, Pegel Bad Elster, $A_E = 47,7\text{km}^2$



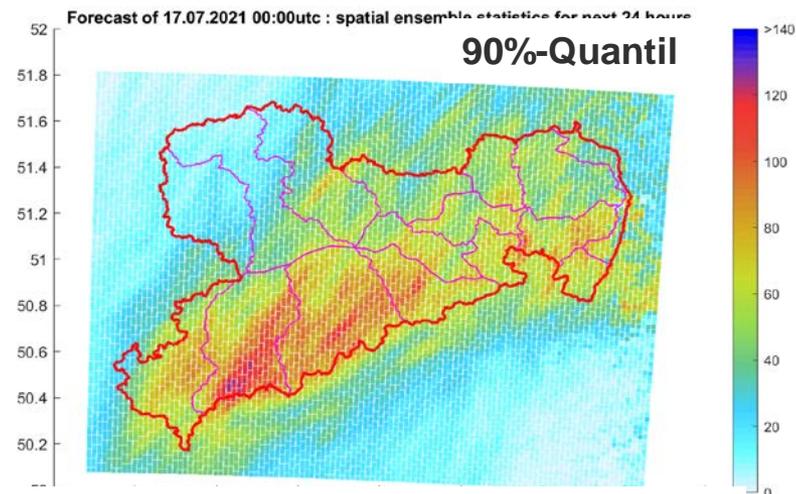
# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis (17.7.2021), Oberlausitz

Extrem heftiger Starkregen

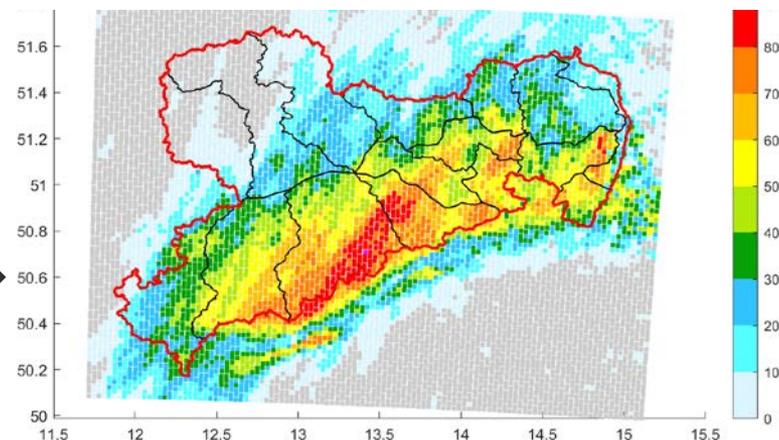
Beobachtung Radolan-RW



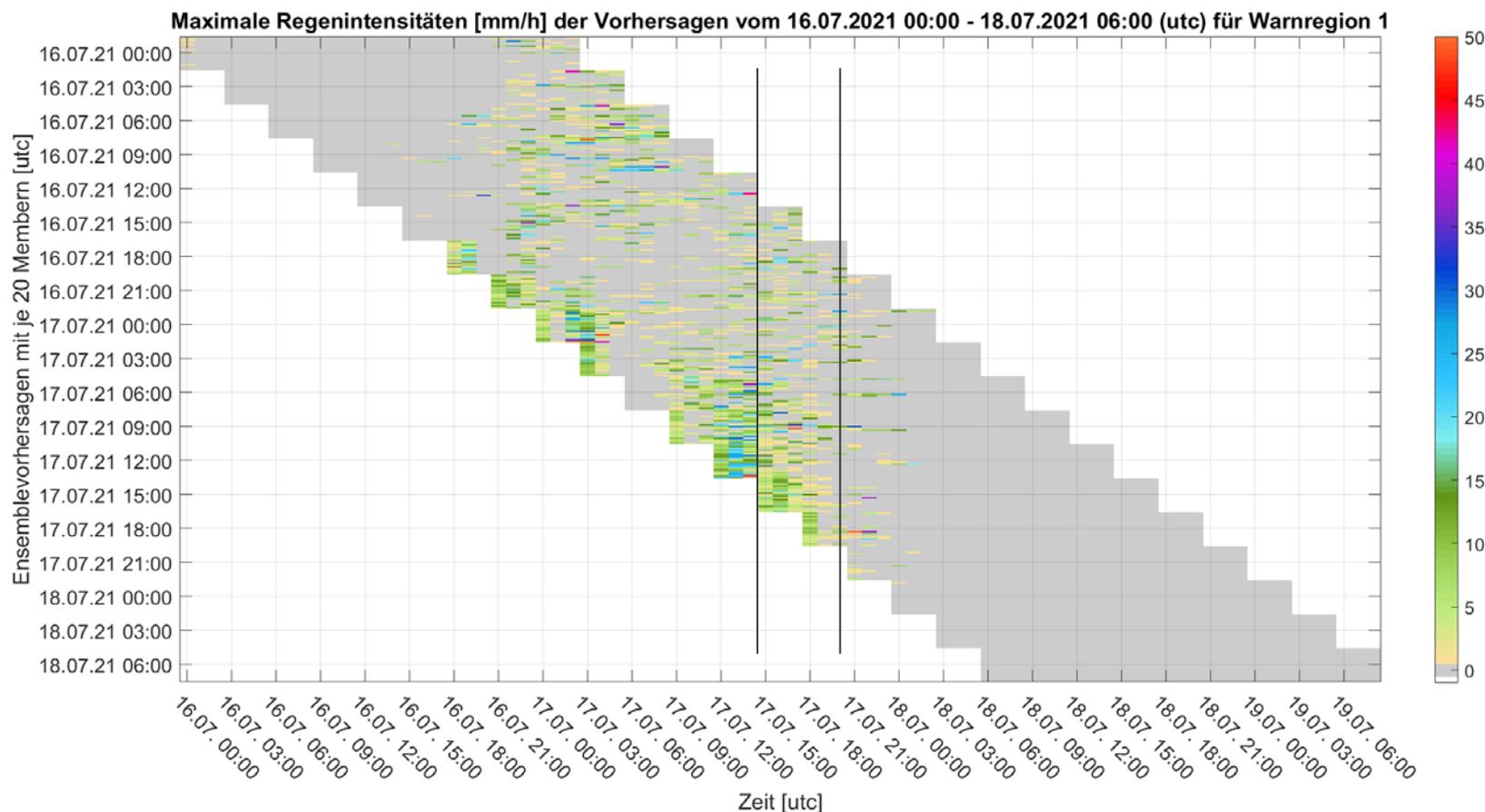
Vorhersage Icon-D2-eps →  
17.07.2021, 00:00utc



Ü-Wahrscheinlichkeit von 30 mm/24 hr

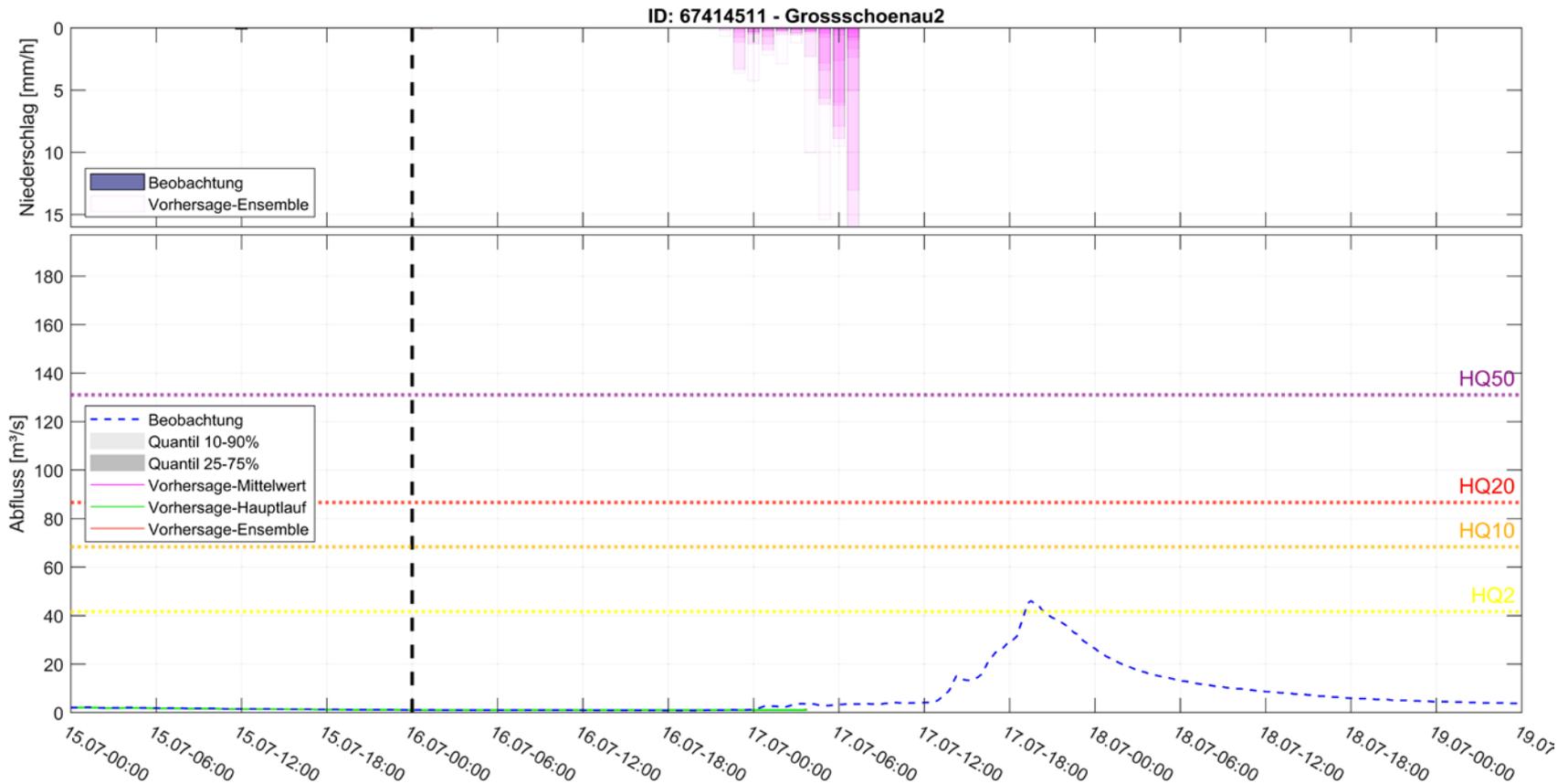


# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis (17.7.2021), Oberlausitz



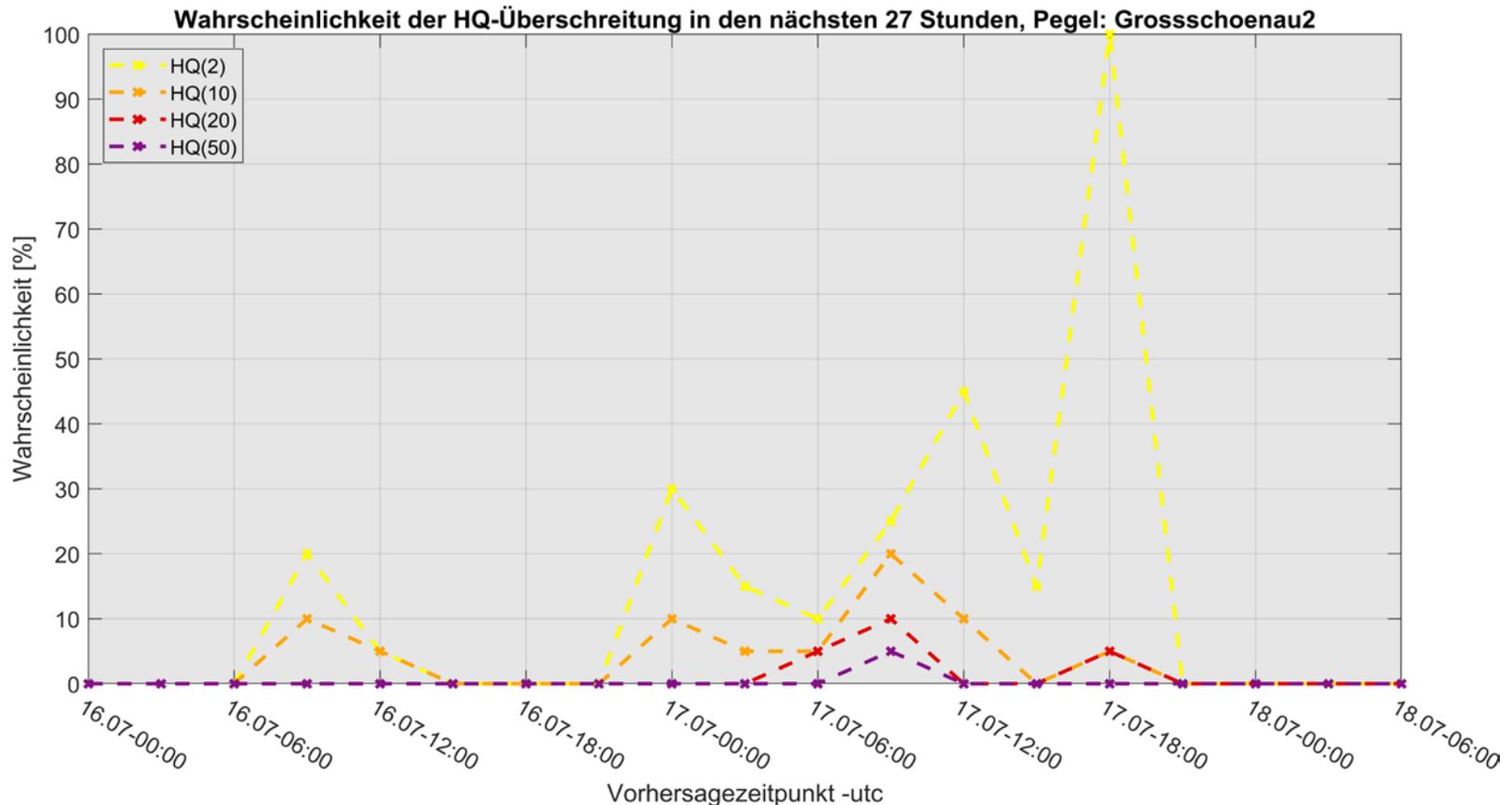
# Performance der Hochwasserfrühwarnung

## HW-Ereignis (17.7.2021), Oberlausitz, Großschönau, $A_E = 162\text{km}^2$



# Performance der Hochwasserfrühwarnung

## HW-Ereignis (17.7.2021), Oberlausitz, Großschönau, $A_E = 162\text{km}^2$



## Fazit & Ausblick

- Ensemblevorhersagen:
  - Bewertung differenziert nach Ereignistypen → Mehrwert vorhanden
  - Evaluierung IconD2-eps → Trefferquote, ROC/AUC, etc.
- Demonstrator:
  - Integration der CML-Daten-Produkte & Nowcasting
  - Weiterentwicklung der Visualisierung: → Nutzerfeedback
  - Weitere Regionen & Gebiete
- Niederschlags-Abfluss-Modellierung:
  - Modellverbesserungen + Unsicherheiten
  - Test & Einsatz von KI
- Training mit Akteuren des KatS an realitätsnahen Szenarien
  - Ableiten von Maßnahmen der Hochwasserabwehr

*Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !*

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung