

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

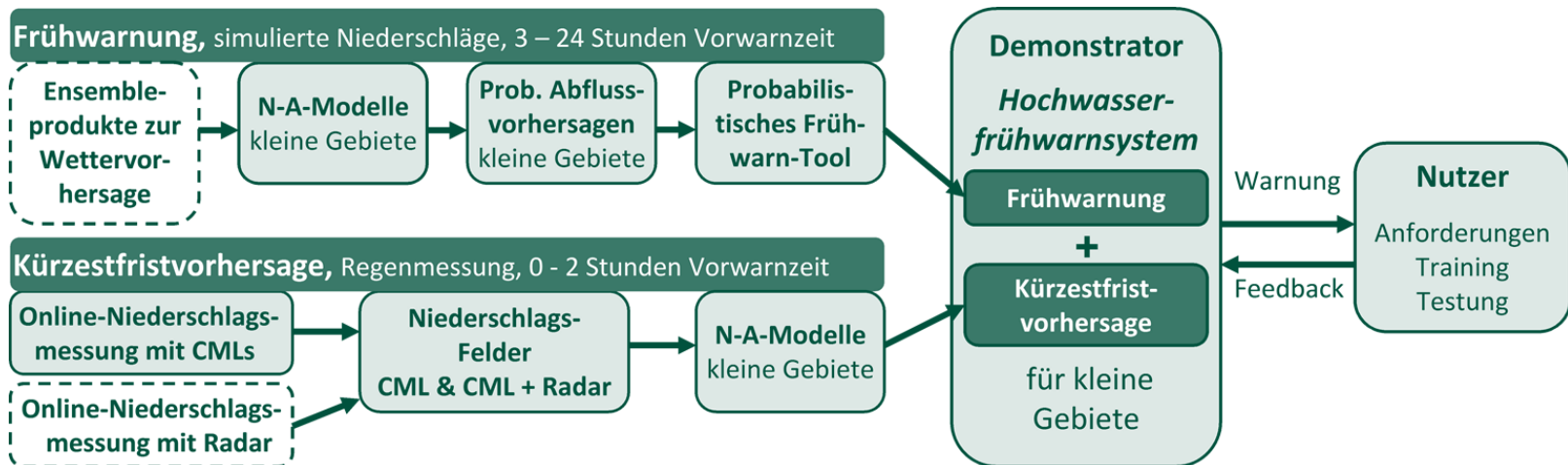
## Inhalt

- 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

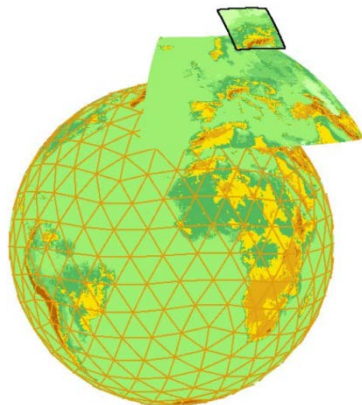
## Demonstrator „Hochwasserfrühwarnung kleine Einzugsgebiete“



# Probabilistische Vorhersagen und Warnungen

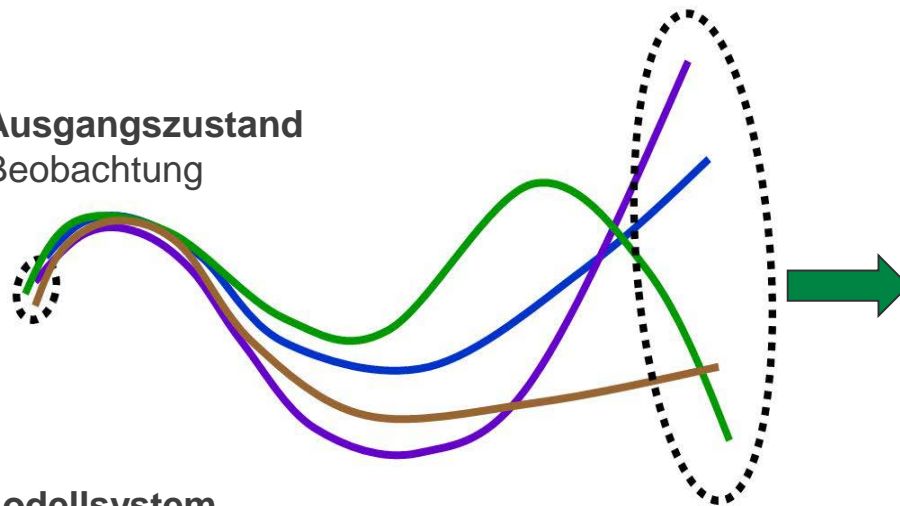
## Meteorologische Ensemblevorhersagen

Was machen die Meteorologen?



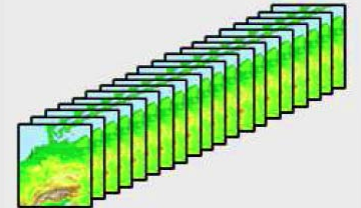
Modellkette des DWD

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**

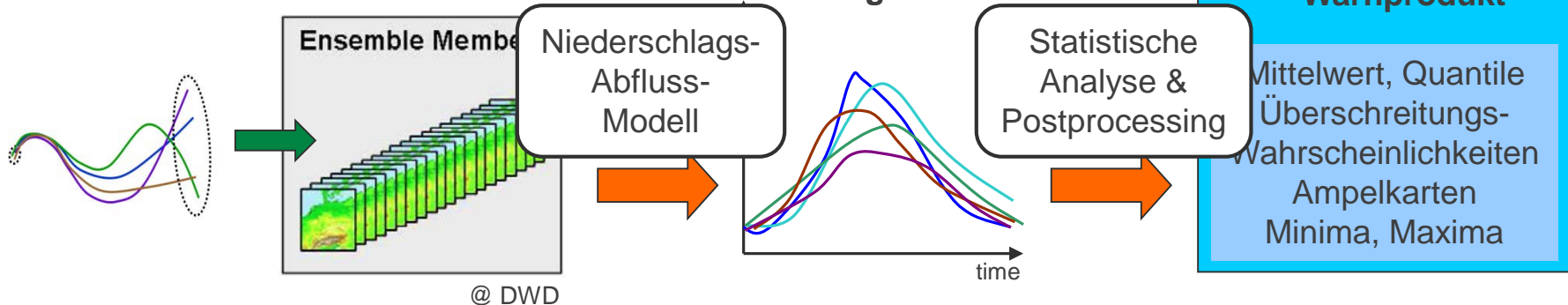
- Vorhersage
- charakterisieren Unsicherheit

Abbildungen Quelle DWD

# Probabilistische Vorhersagen und Warnungen

## Zielstellung: Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete

Meteorologische Ensemblevorhersagen  
z.B. Cosmo/Icon-D2-EPS



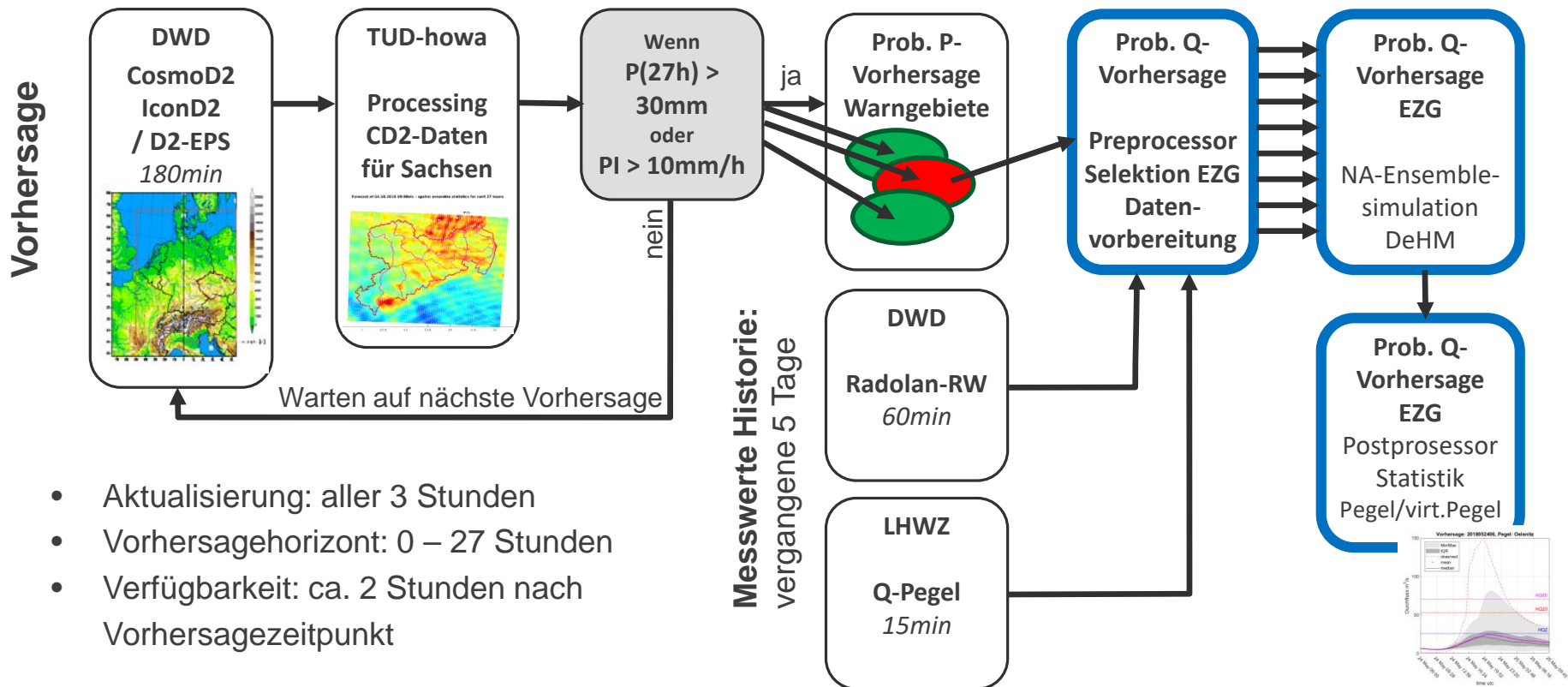
- **Unsicherheiten** in der meteorologischen Vorhersage sollte (muss) in die Hochwasserwarnung und Vorhersage einbezogen werden!
- Große Datenmengen → **Robuste und schnelle Prozessierung** erforderlich



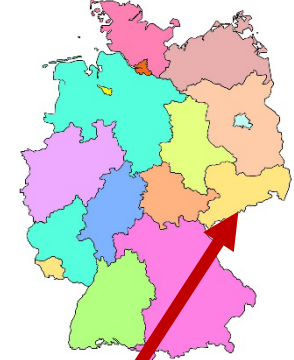
# Probabilistische Vorhersagen und Warnungen

## Zielstellung: Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete

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



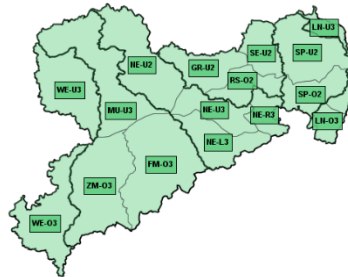
- Aktualisierung: aller 3 Stunden
- Vorhersagehorizont: 0 – 27 Stunden
- Verfügbarkeit: ca. 2 Stunden nach Vorhersagezeitpunkt



# Probabilistische Vorhersagen und Warnungen

## Zielstellung: Frühwarnung für kleine Einzugsgebiete

Räumliche Struktur:



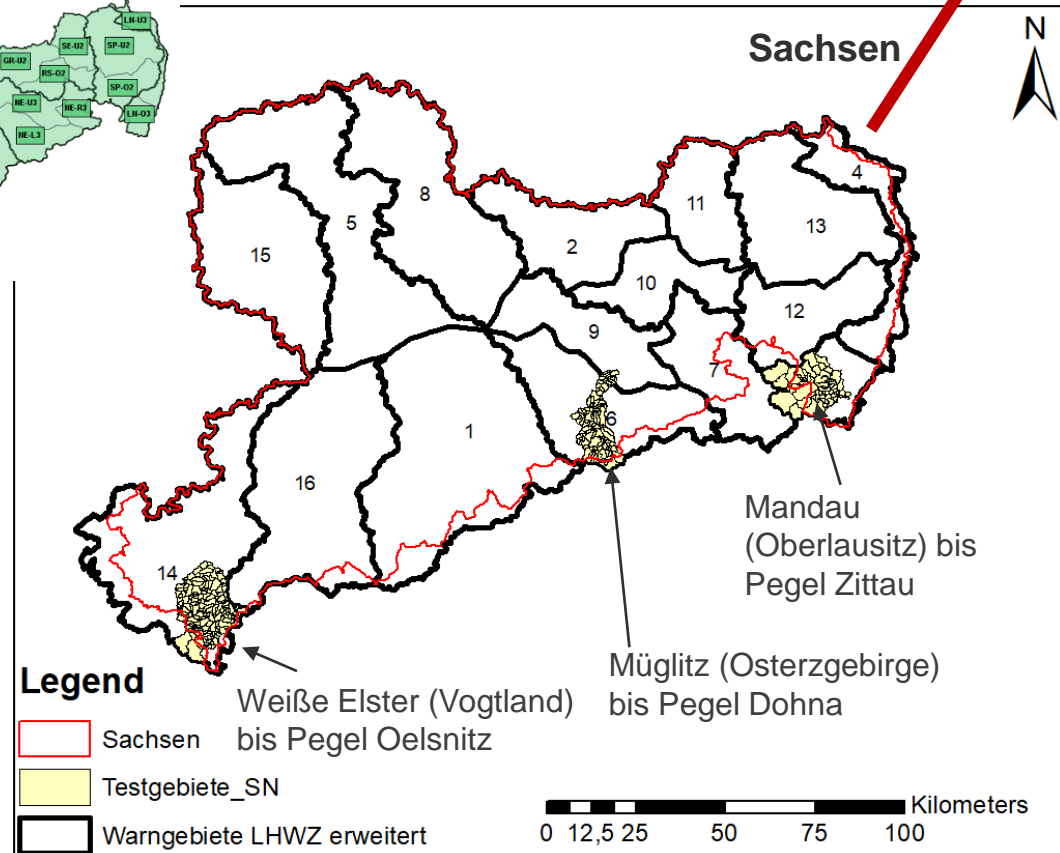
**Warnggebiete**  
(wie LHWZ-Frühwarnung)  
**Niederschlag**



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

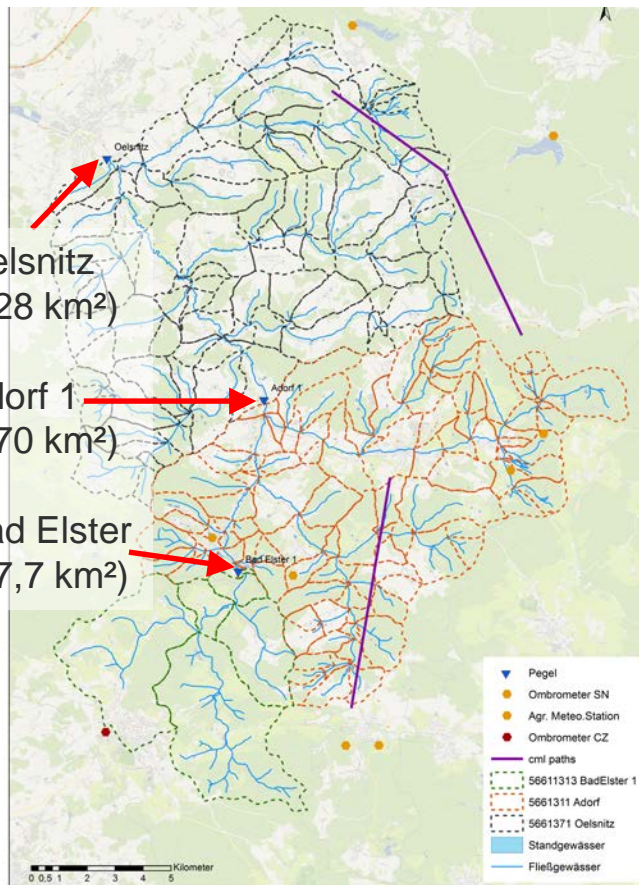


**Teileinzugsgebiete**  
(unbeobachtet)  
**Niederschlag & Abfluss**



# 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>)



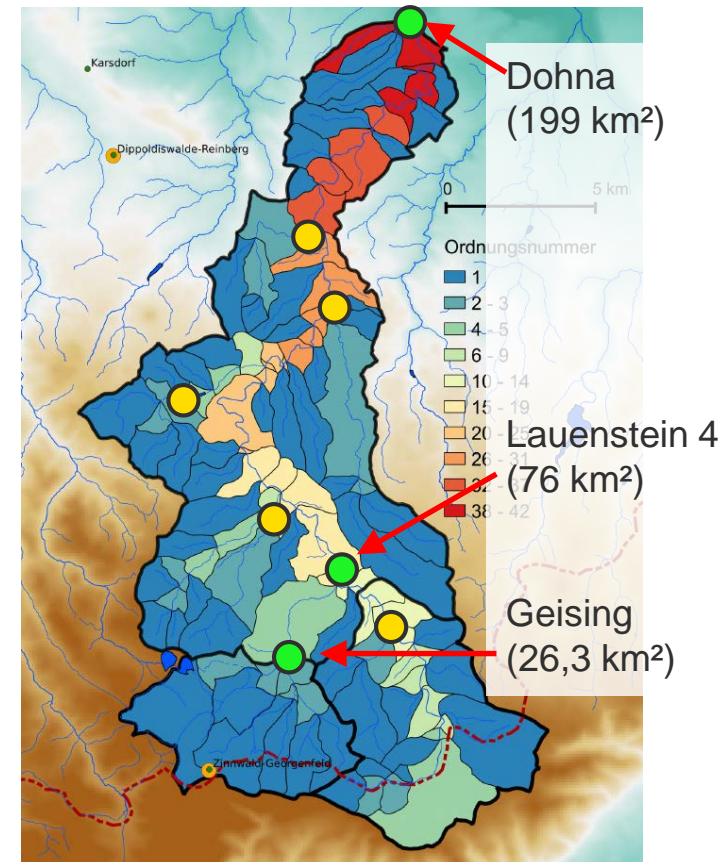


# Niederschlags-Abfluss-Modellierung für kleine Gebiete

## Methodik

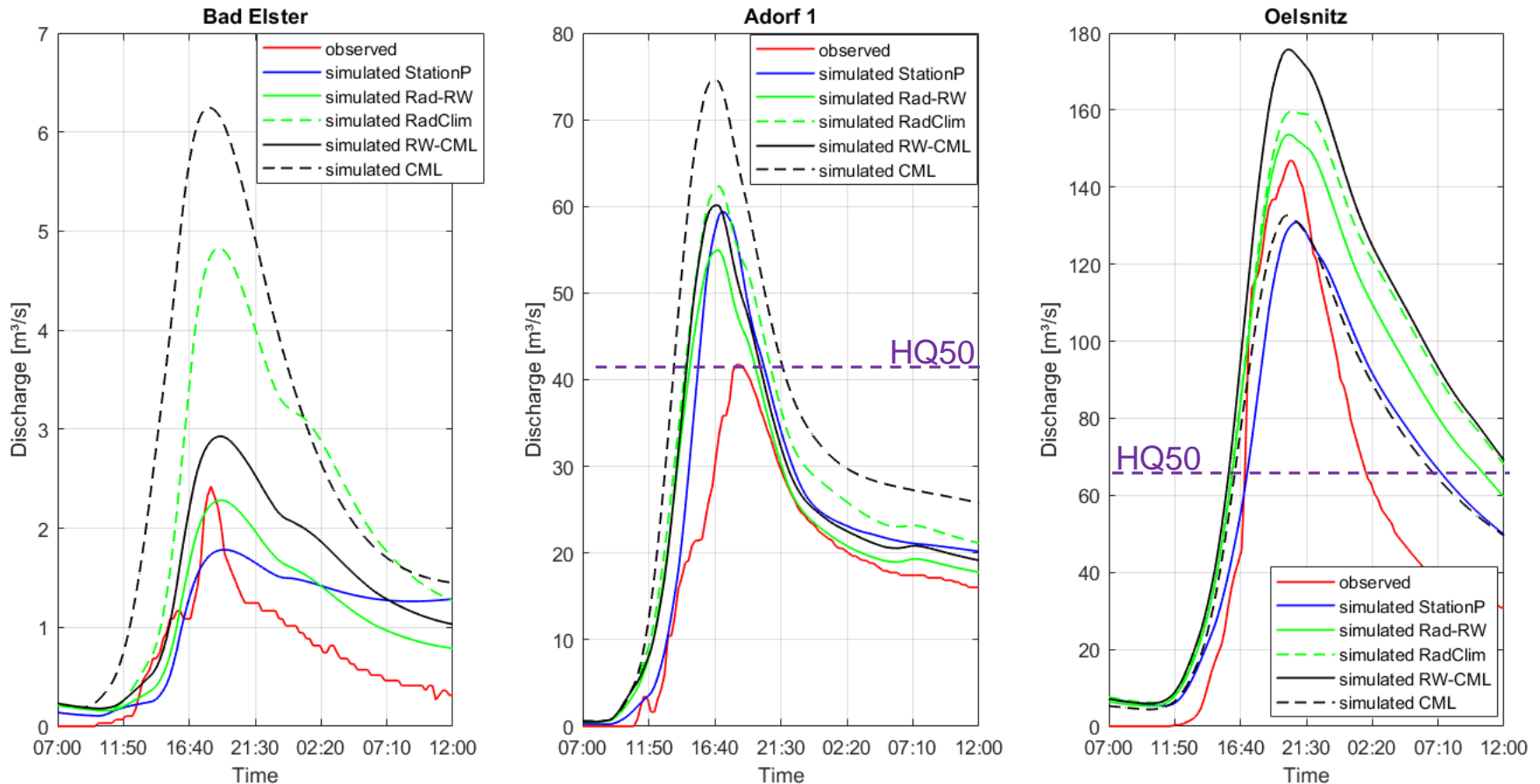
### Testgebiet Osterzgebirge

- 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

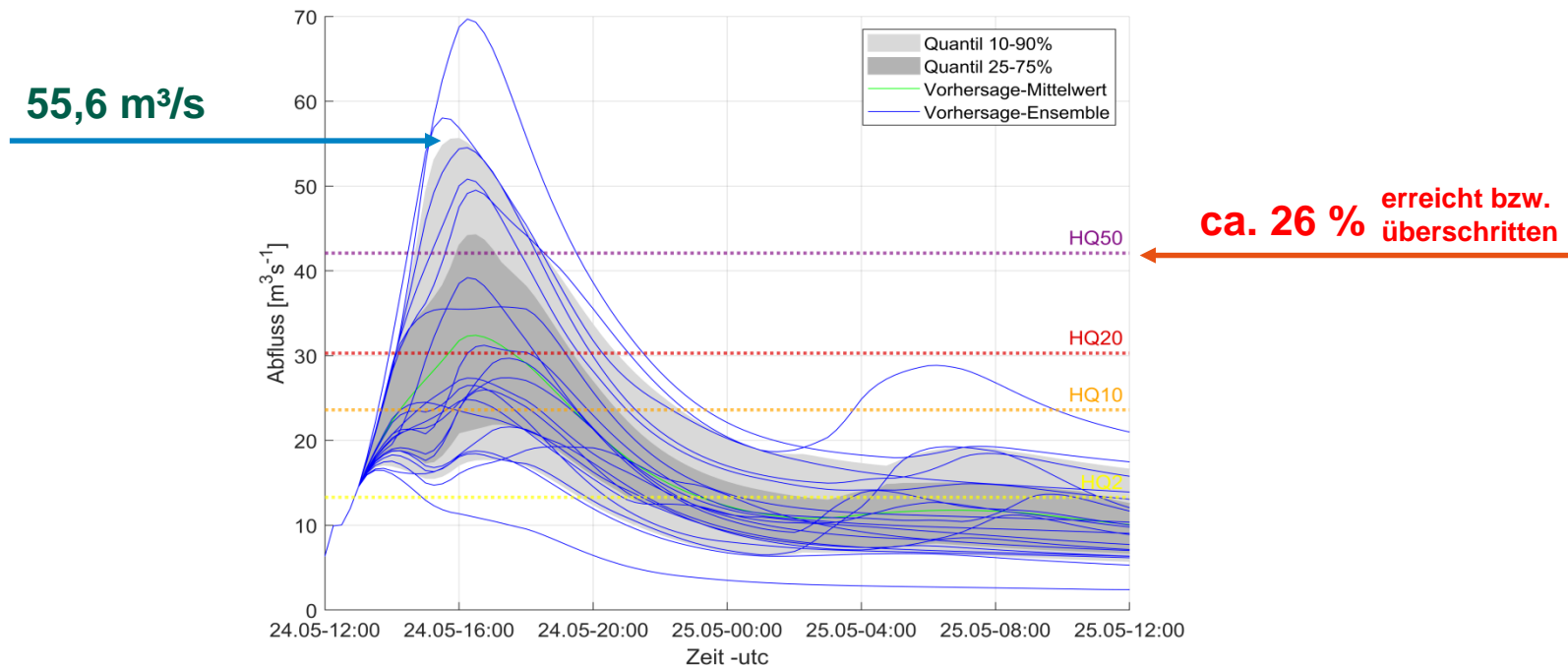
## Ereignis vom 24.5.2018, Obere Weiße Elster → Validierung CML



# 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

## Schwellenwerte Niederschlag

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

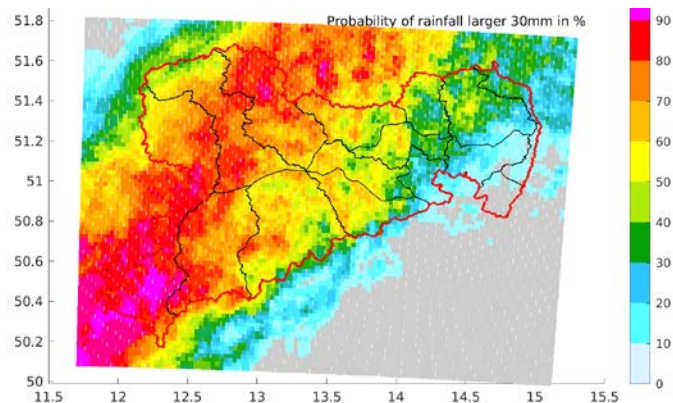
Starkregen	
Warnereignis	Schwellenwert
Starkregen	15 - 25 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde
Heftiger Starkregen	25 - 40 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde
Extrem heftiger Starkregen	> 40 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde

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

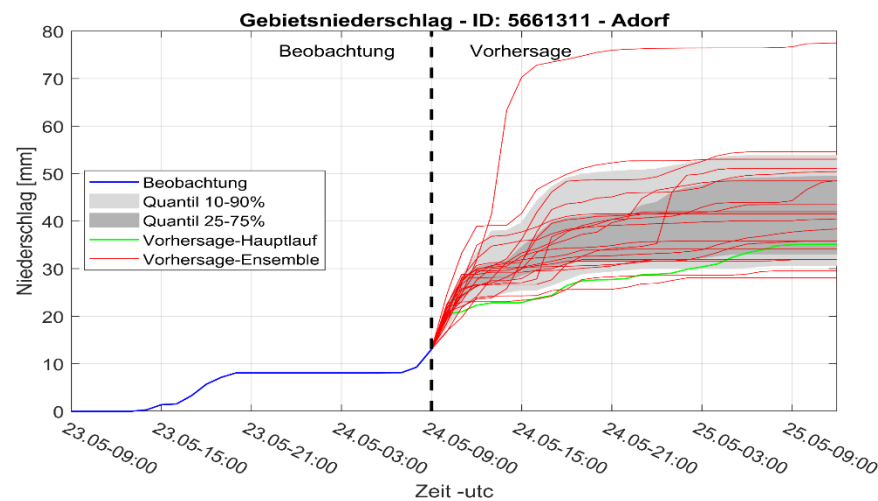
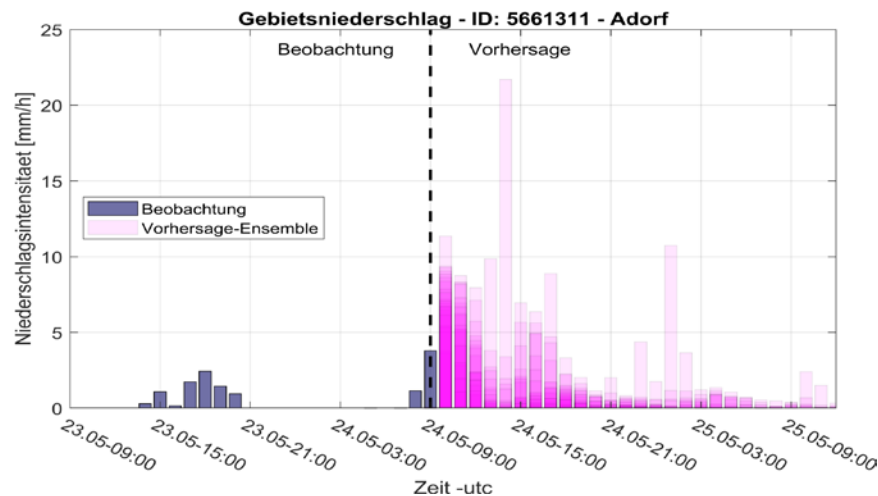
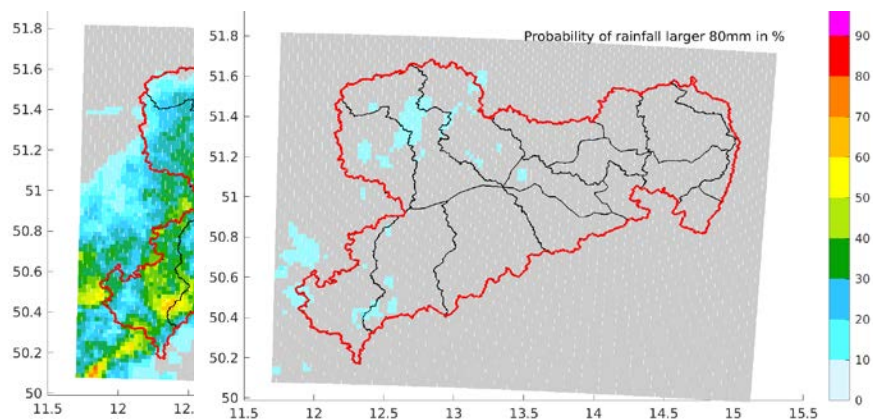
# Postprocessing der Ensemblevorhersagen

## Visualisierungen: Beispiel Niederschlag

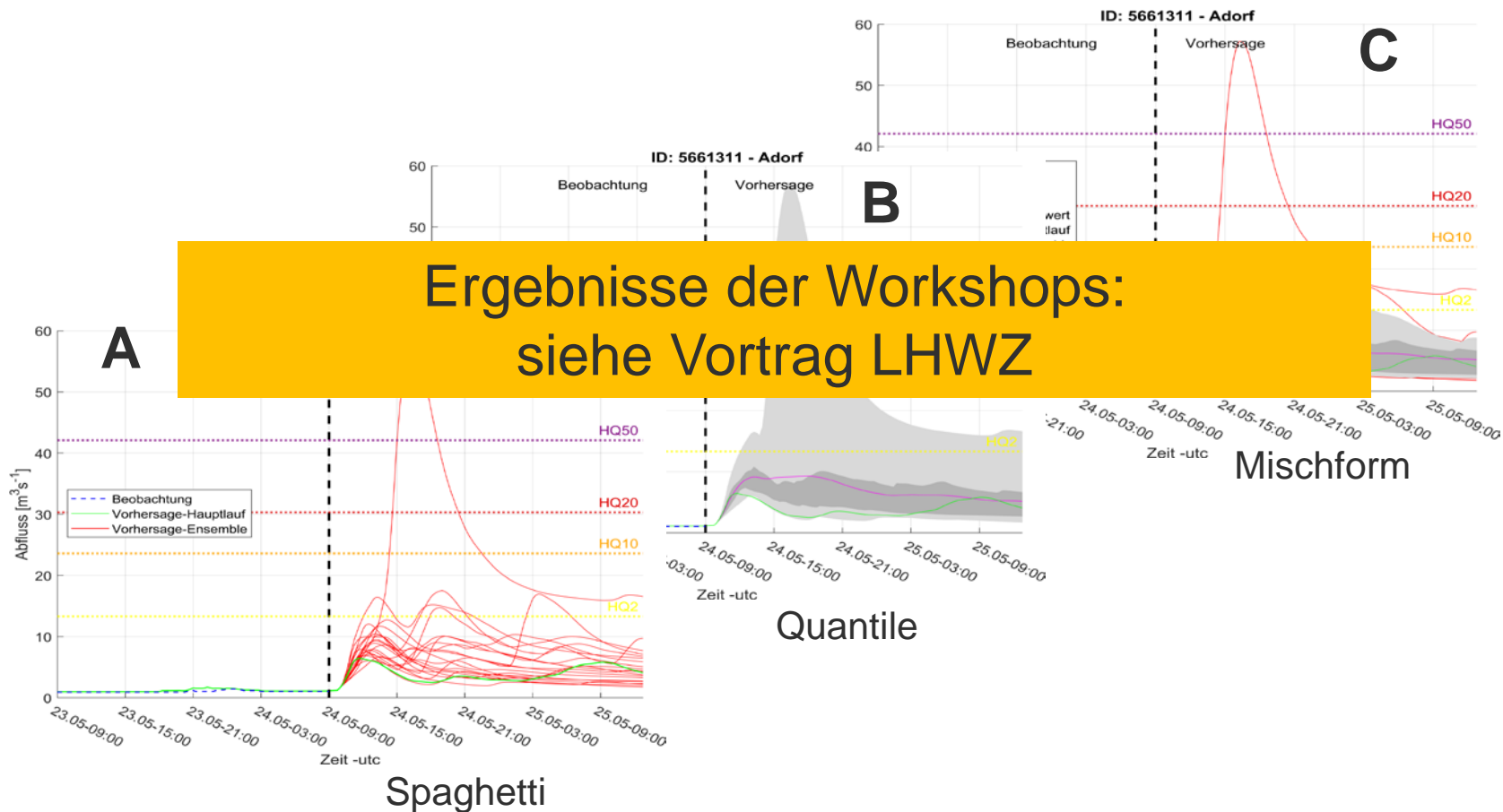
Ü-Wahrscheinlichkeit von 30 mm/24 hr



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



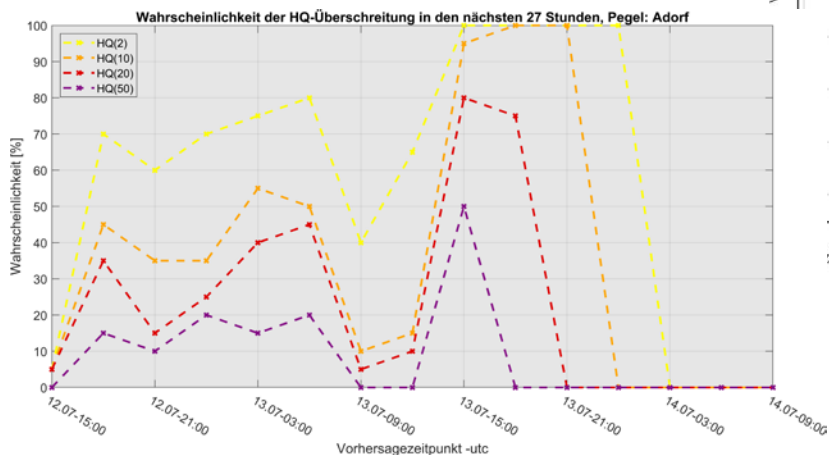
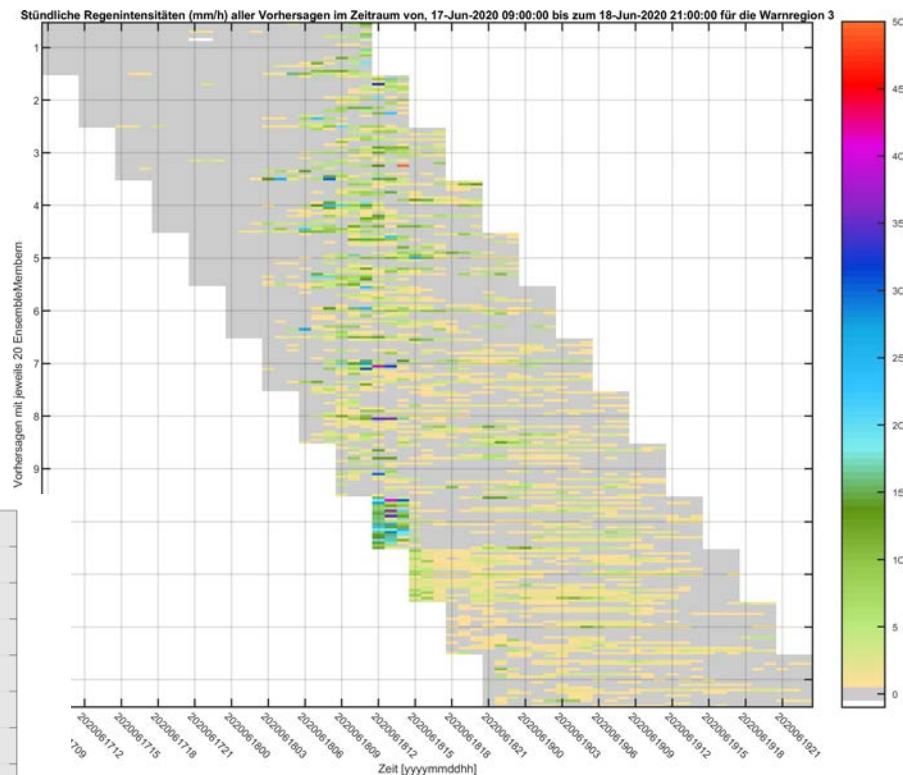
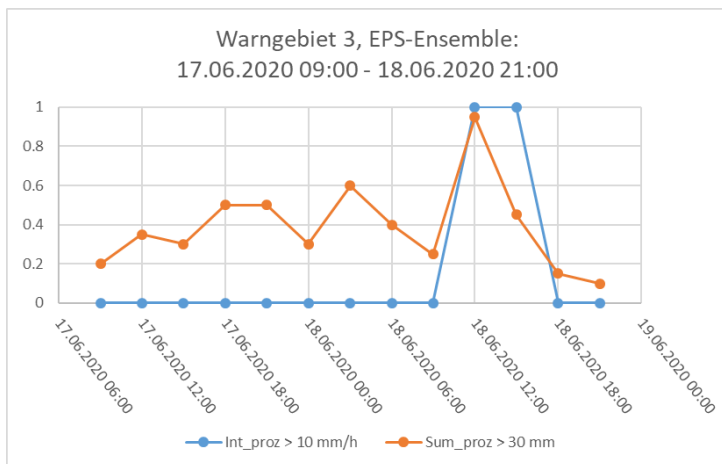
# Postprocessing der Ensemblevorhersagen Visualisierungen: Beispiel Abfluss





# Postprocessing der Ensemblevorhersagen

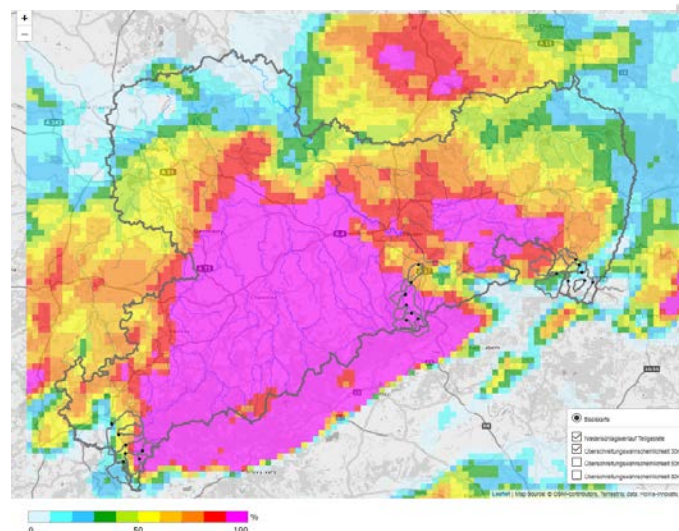
## Visualisierungen: Beispiel zeitliche Entwicklung



# Web-basierter Demonstrator "Hochwasserfrühwarnung"

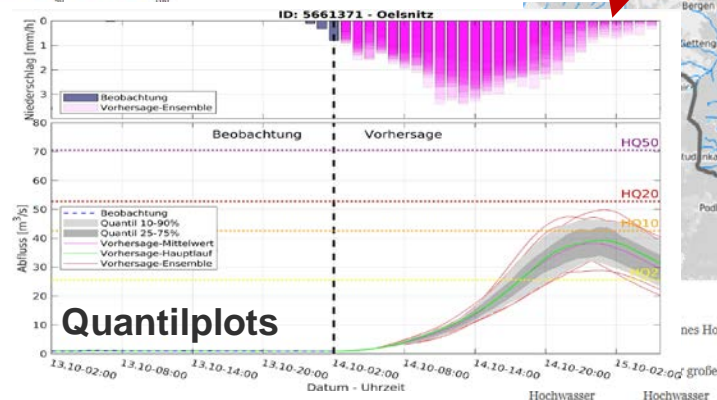
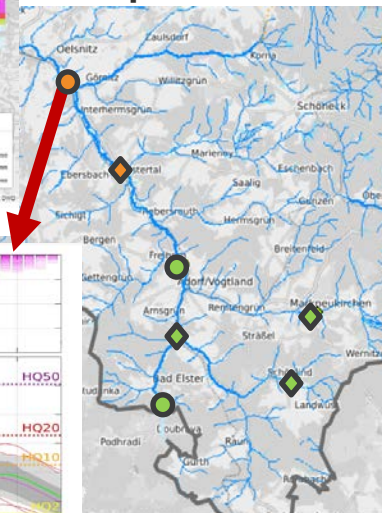
- Warnung vor Extremniederschlägen in Sachsen
- Abflussvorhersage für 3 Pilotregionen (Vorhersageweite: 27h)
- Historie der letzten 24h
- Stündliche Aktualisierung
- Live-Modus  
<http://howa-innovativ.hydro.tu-dresden.de/WebDemoLive/>
- Ereignisse der Vergangenheit  
<http://howa-innovativ.hydro.tu-dresden.de/WebDemo/>

## Überschreitungswahrscheinlichkeit



explore event

## Ampelkarte



● Mittleres Hochwasser  
● Realer Pegel  
● Keine aktuellen Daten  
◇ Virtueller Pegel

# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

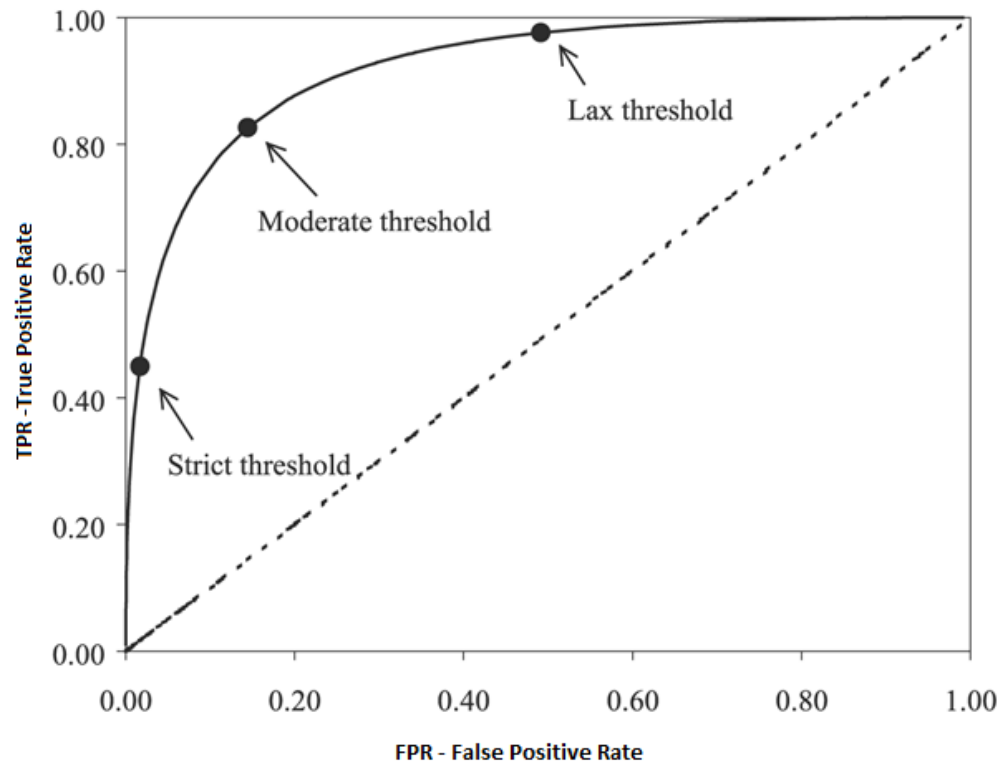
## Haben prob. Vorhersagen einen Mehrwert?

- 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.

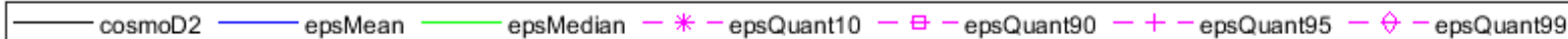
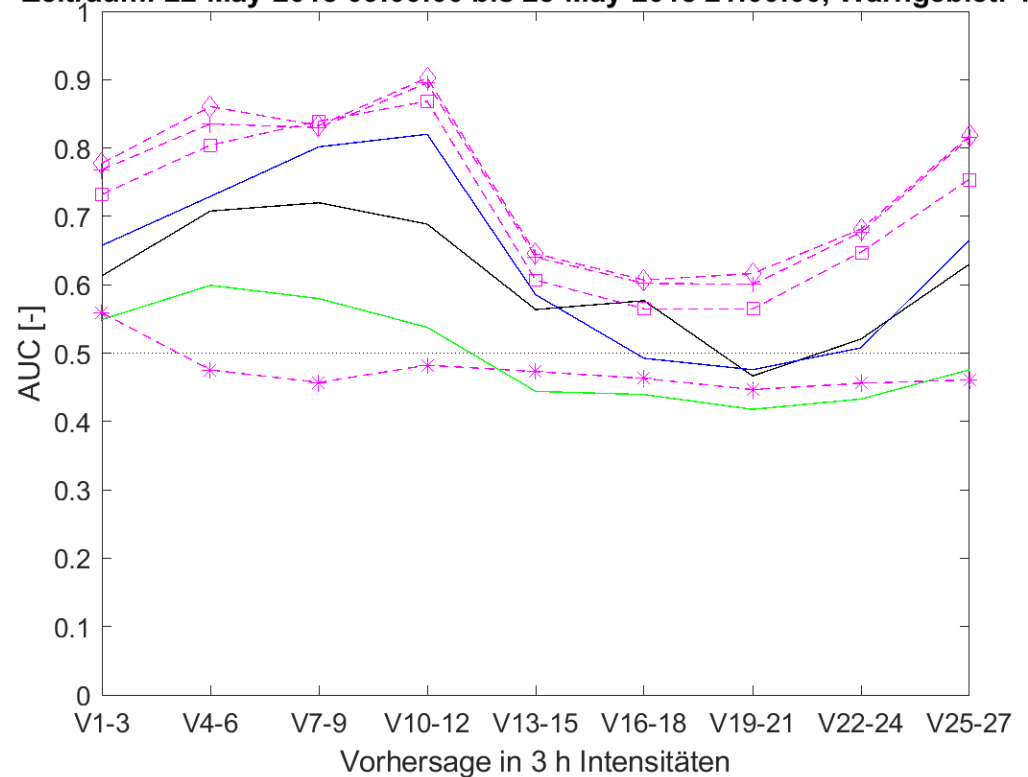


# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

## 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

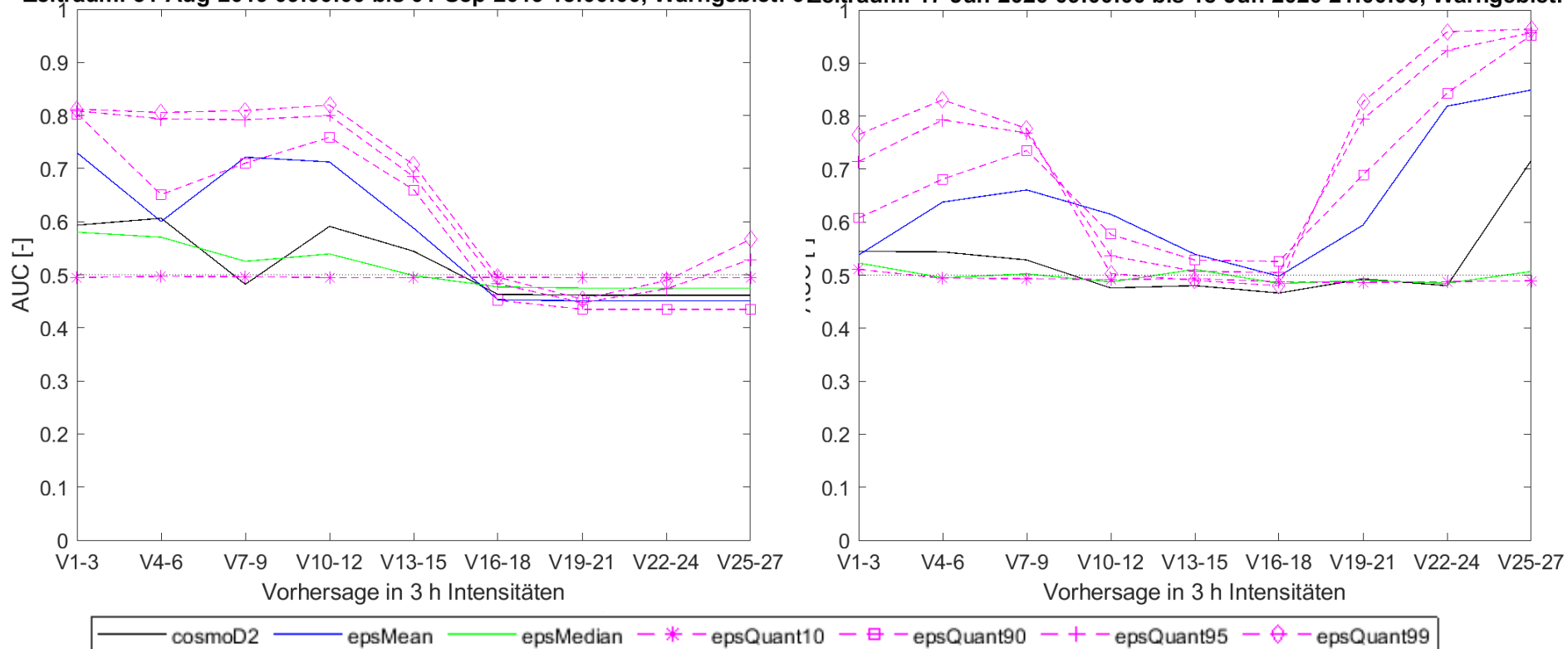


# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

## 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?

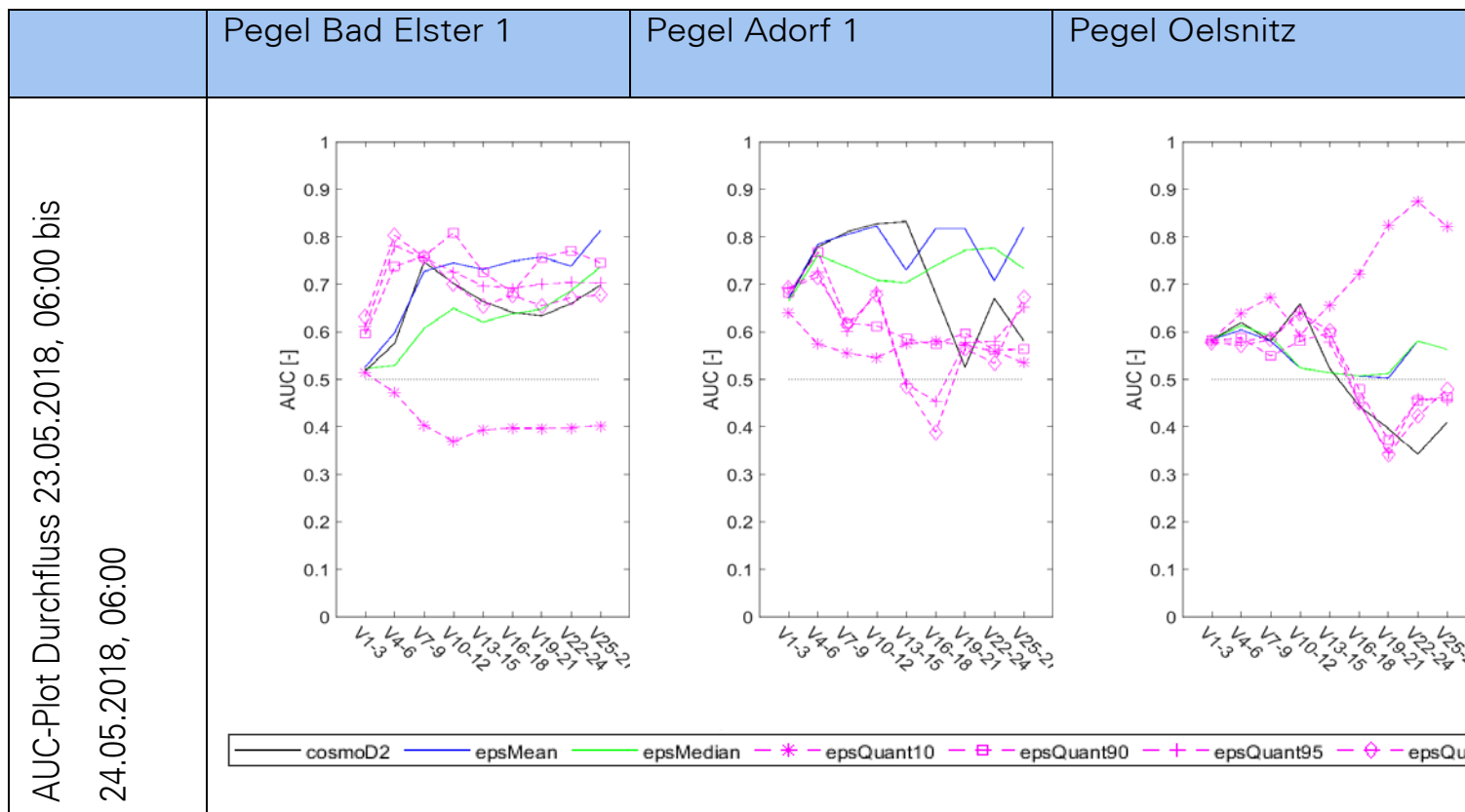
### I P-EZG: Vergleich Gebietsmittelwerten CosmoD2(eps) vs. Radolan-RW



# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

## Haben prob. Vorhersagen einen Mehrwert?

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





# Retrospektive Analyse der Ensemblevorhersagen

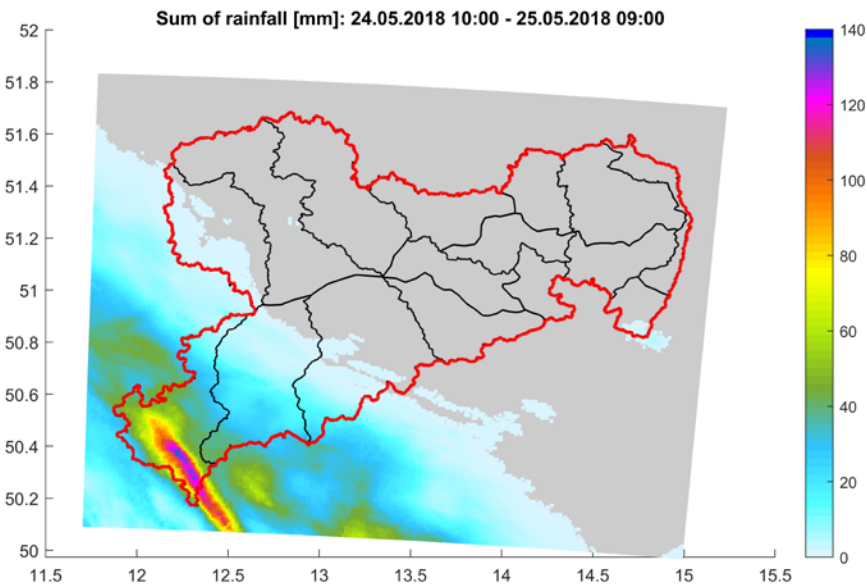
## Erstes, vorläufiges Fazit

- 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

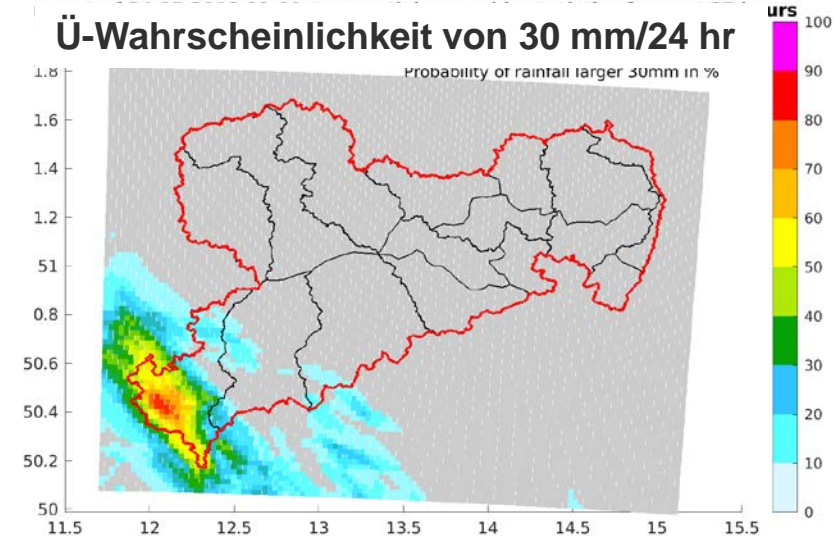
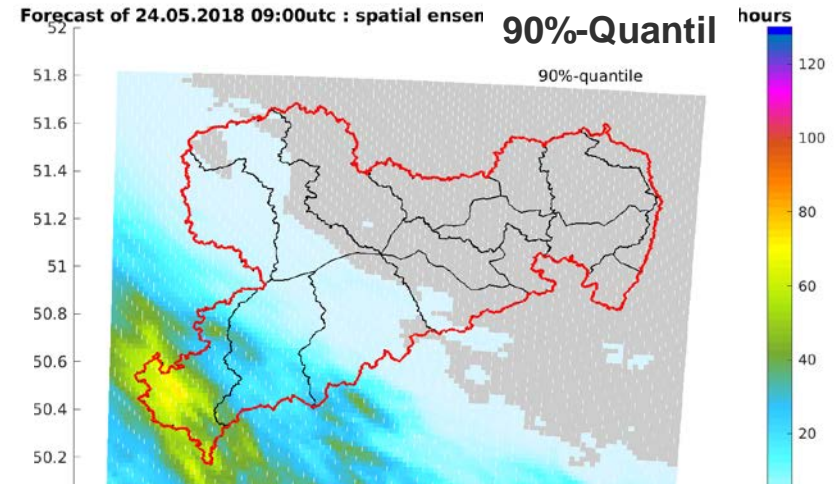
Extrem heftiger Starkregen

Beobachtung Radolan-RW

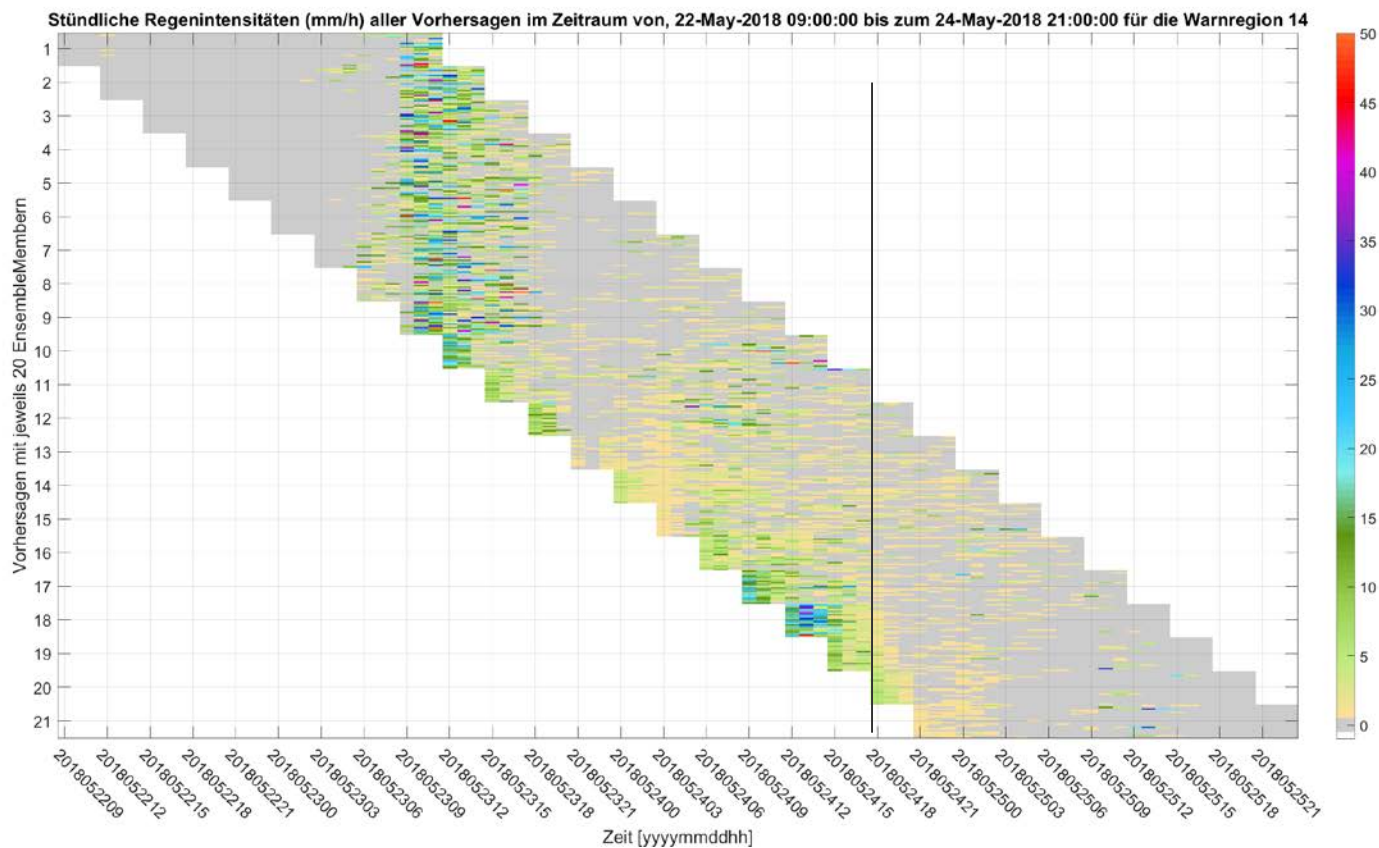


Vorhersage CosmoD2eps →

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, $A_E = 358\text{km}^2$



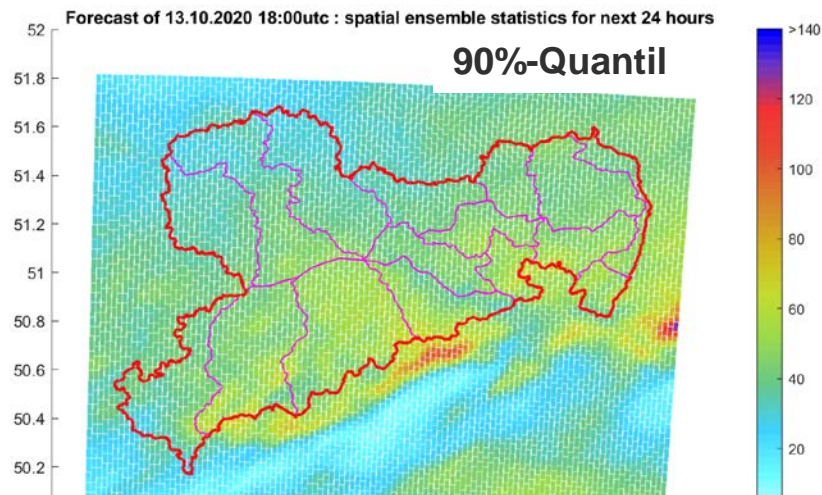
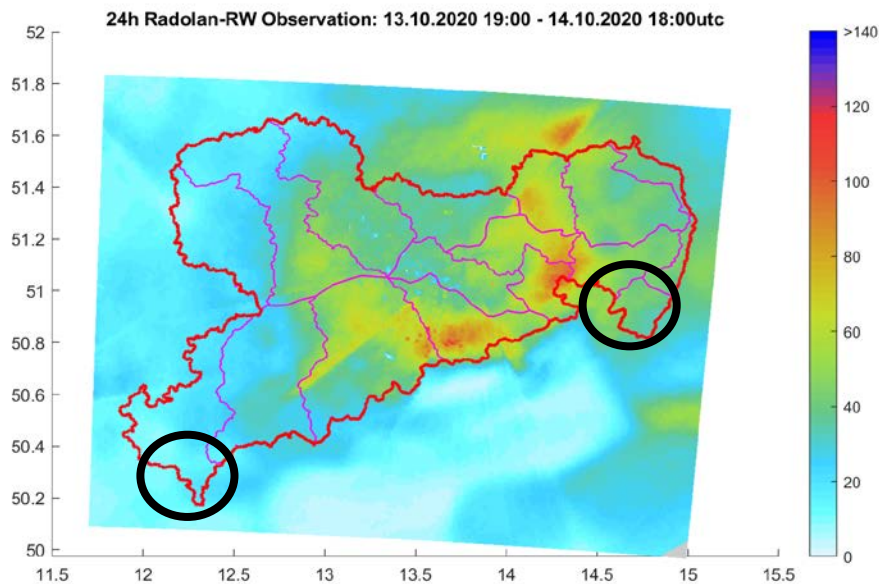


# Performance der Hochwasserfrühwarnung

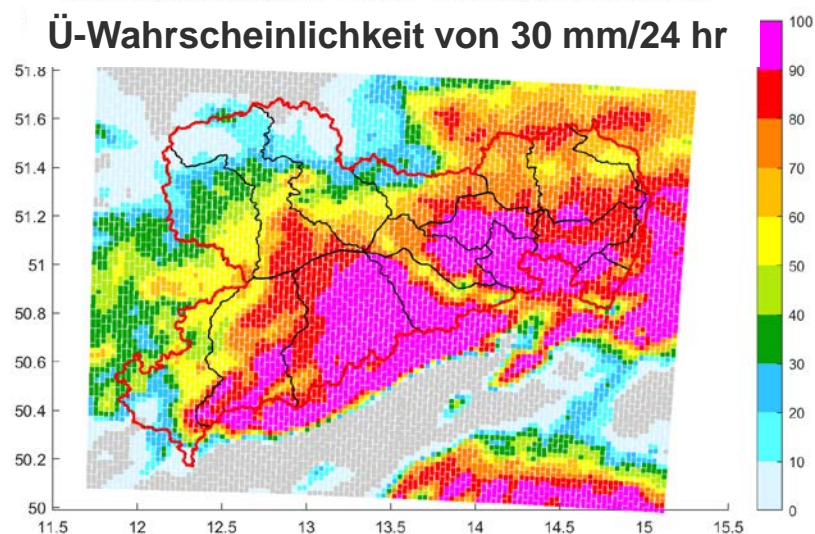
## Ereignis 13.-14.10.2020

Extrem ergiebiger Dauerregen

## Beobachtung Radolan-RW

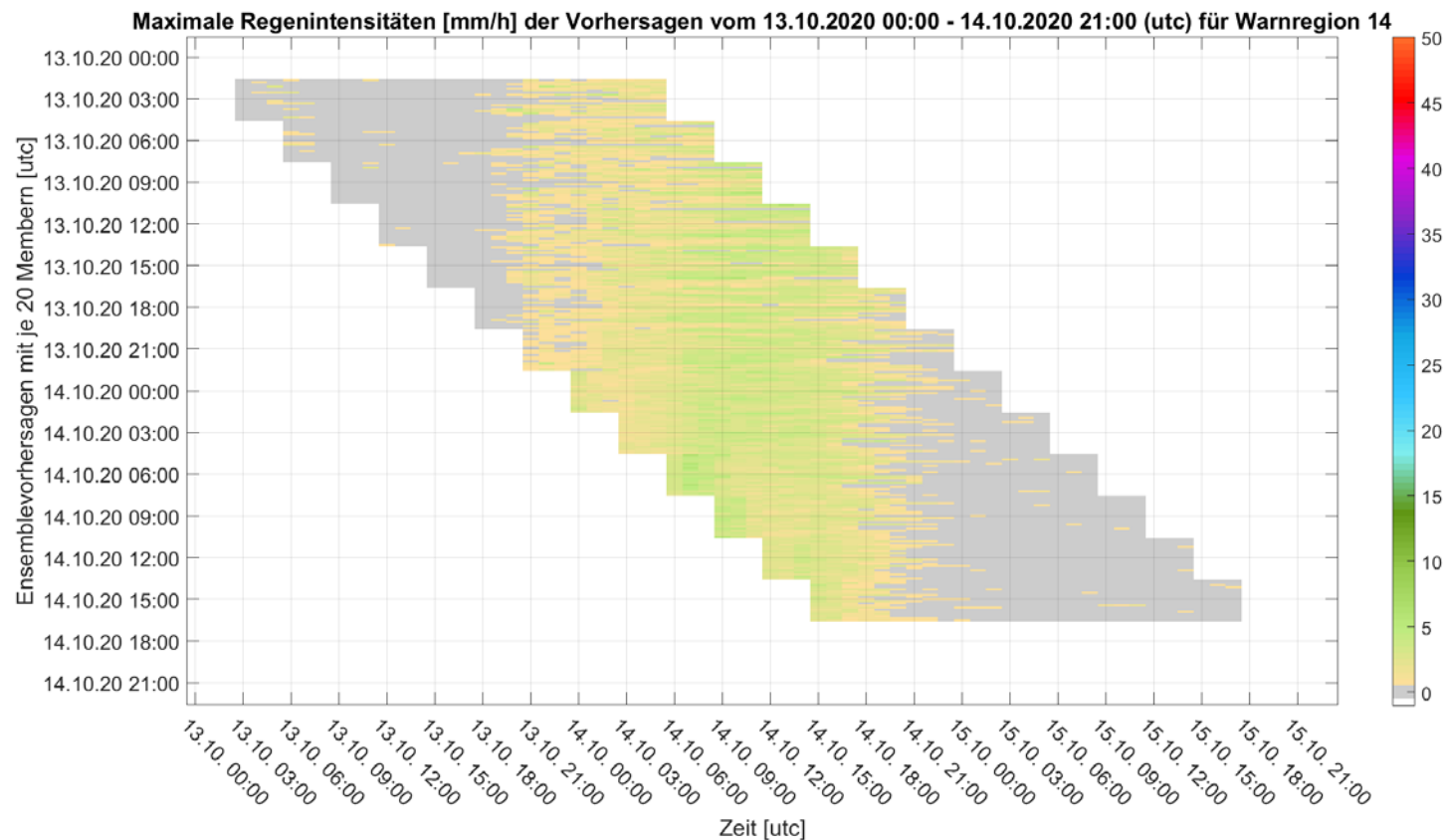


Vorhersage CosmoD2eps →  
13.10.2020, 18:00utc



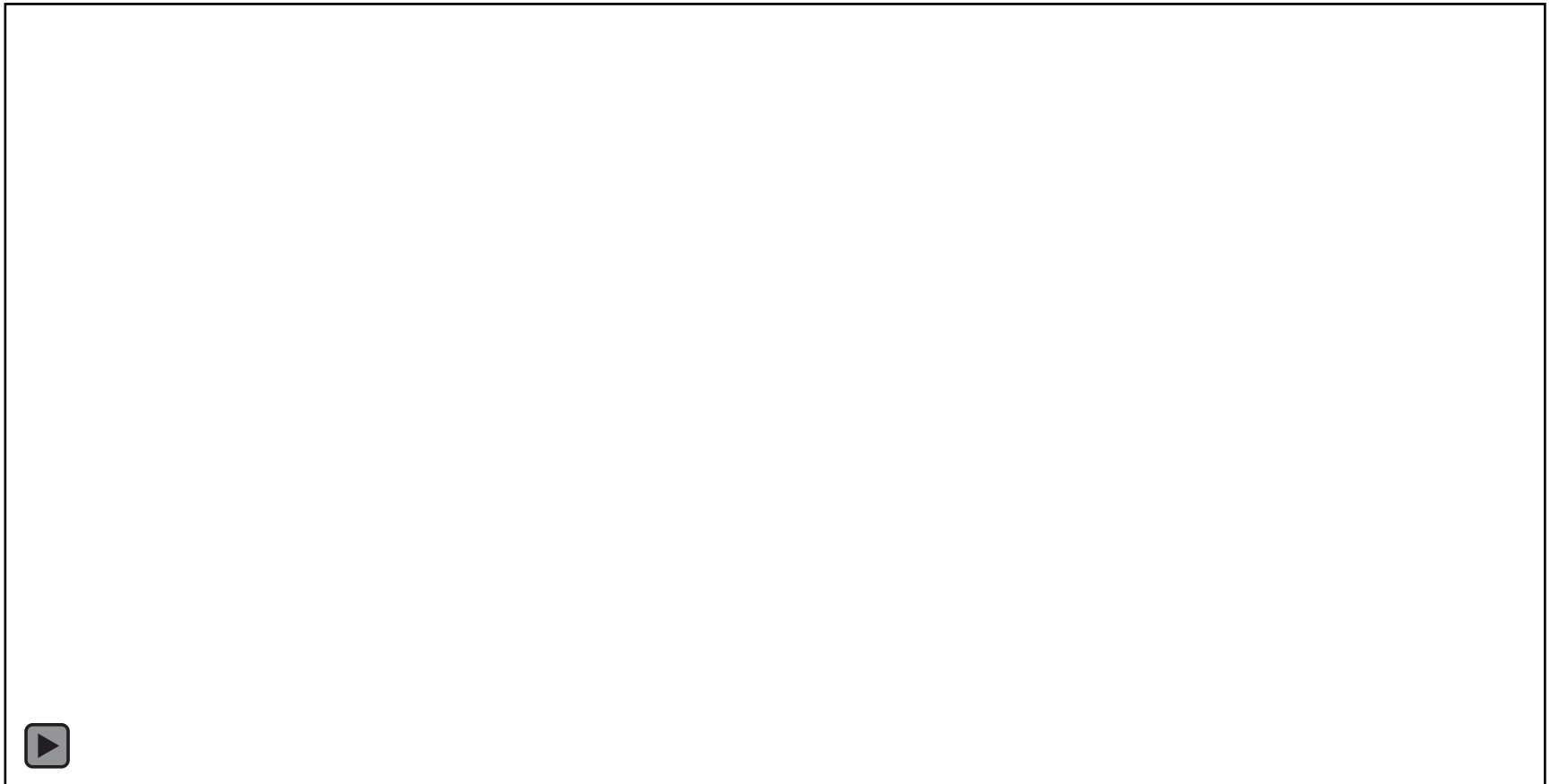
# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis 13.-14.10.2020, Sachsen

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, $A_E = 358\text{km}^2$

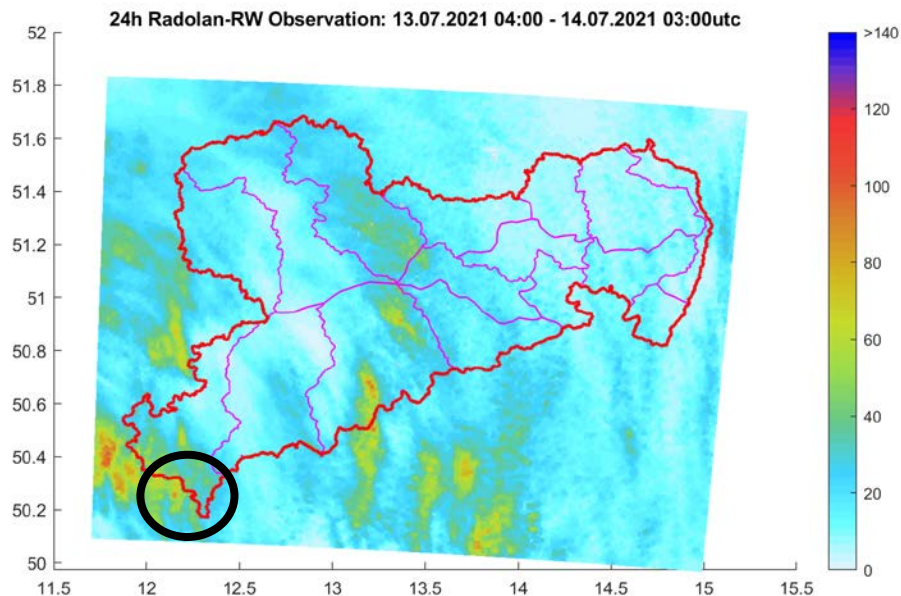




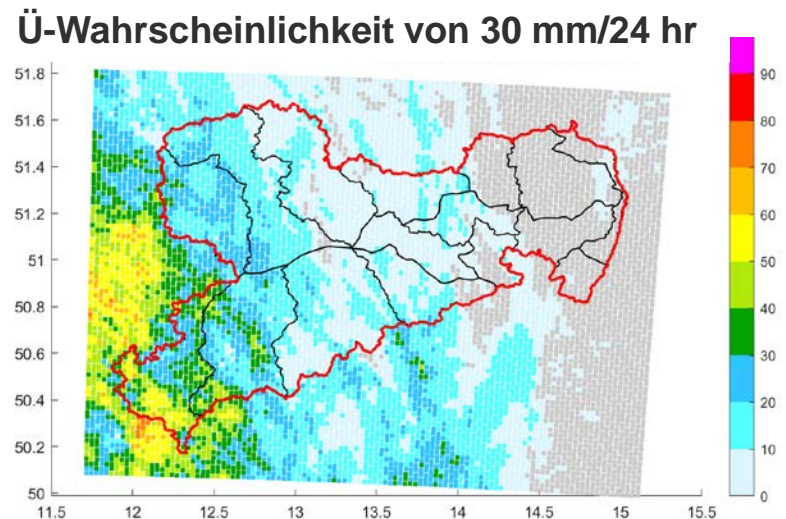
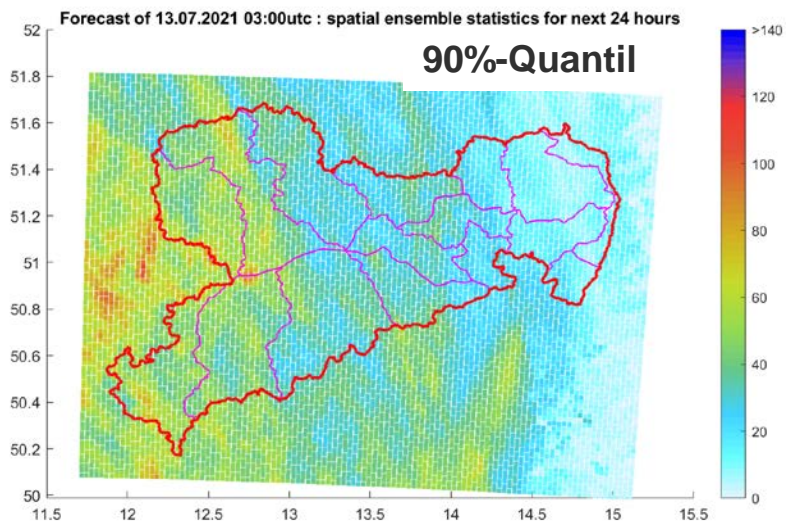
# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis (13.7.2021), Vogtland

Extrem heftiger Starkregen

Beobachtung Radolan-RW

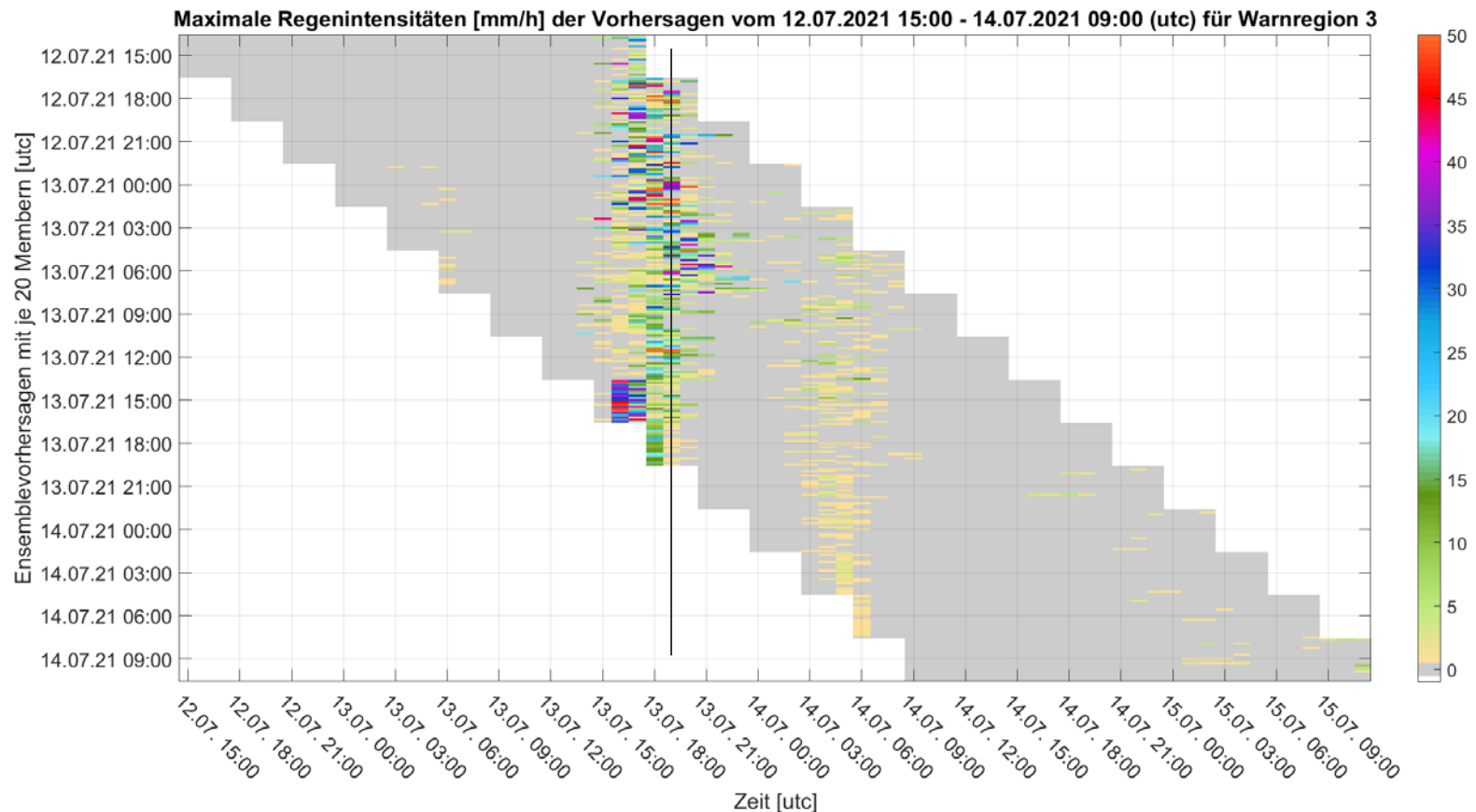


Vorhersage Icon-D2-eps →  
13.07.2021, 03:00utc



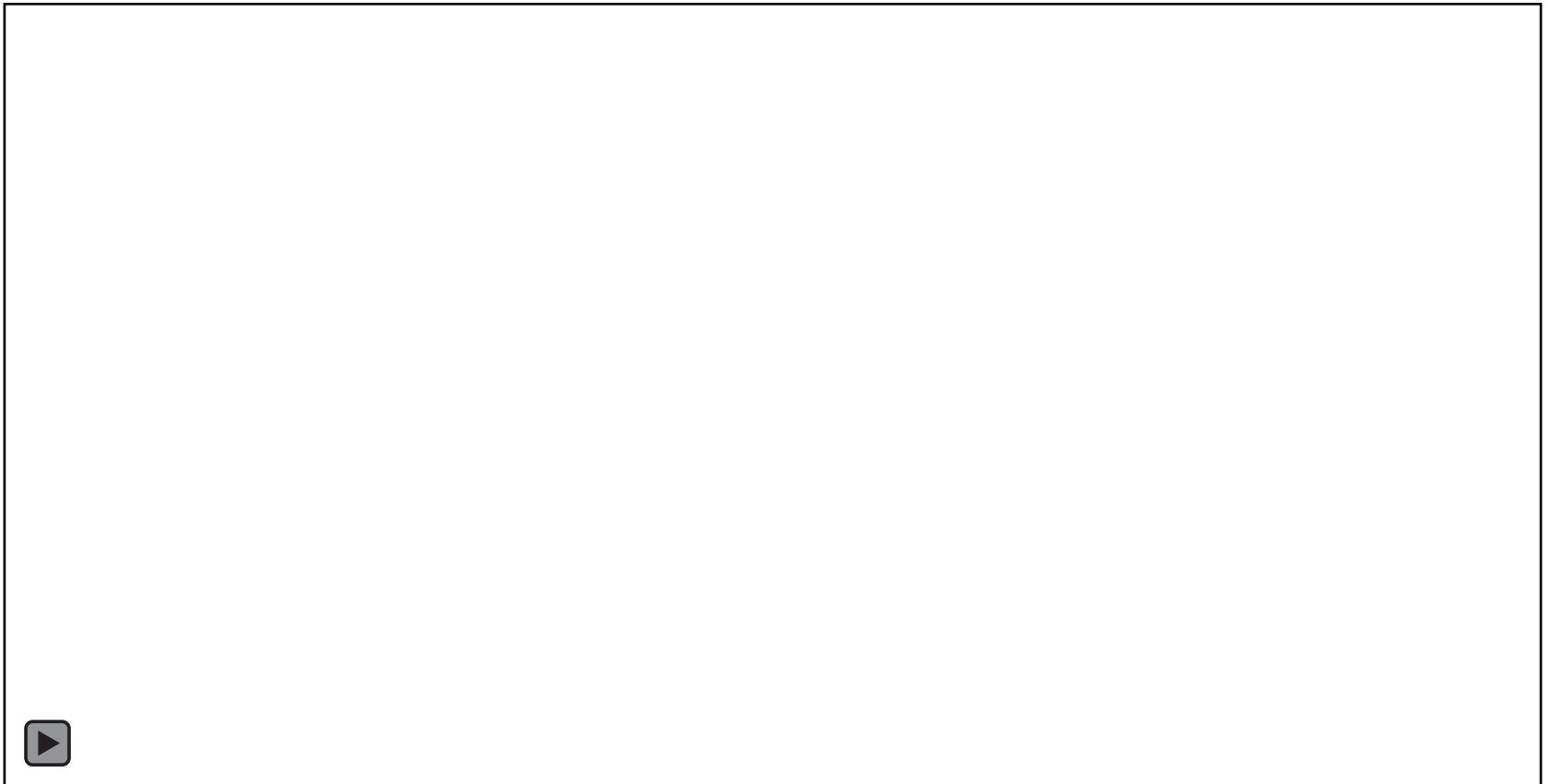


# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis (13.7.2021), Vogtland



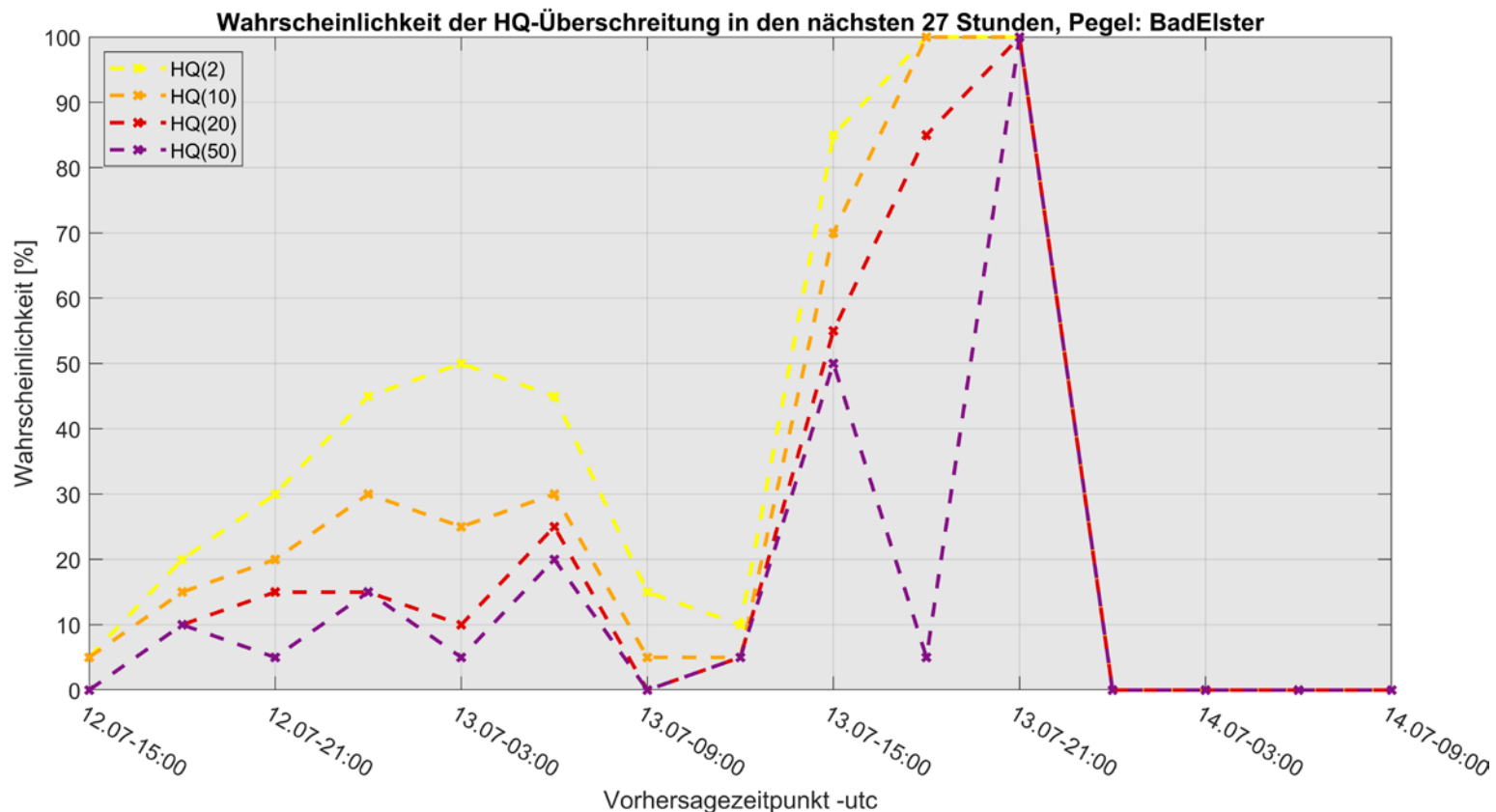
# Performance der Hochwasserfrühwarnung

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



# Performance der Hochwasserfrühwarnung

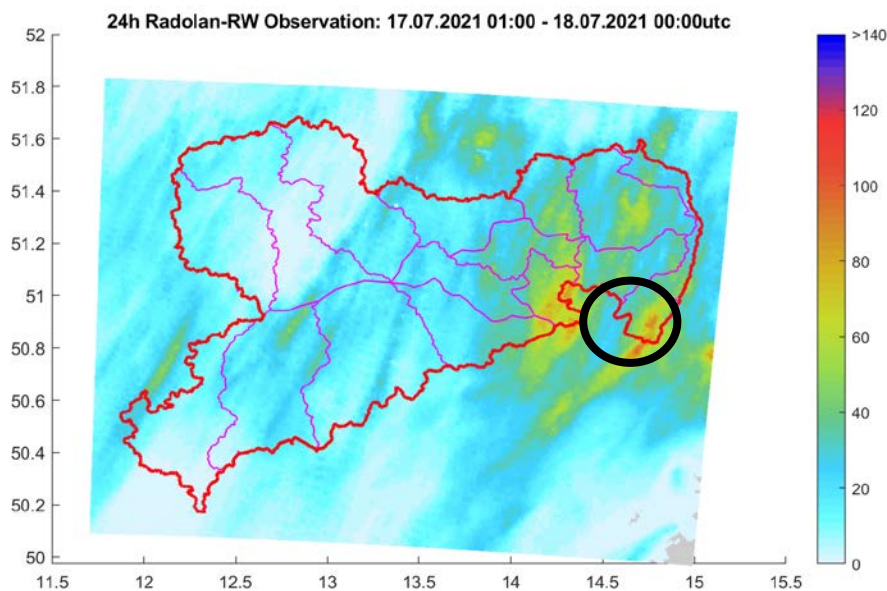
## HW-Ereignis (13.7.2021), Vogtland, Pegel Bad Elster, $A_E = 47,7\text{km}^2$



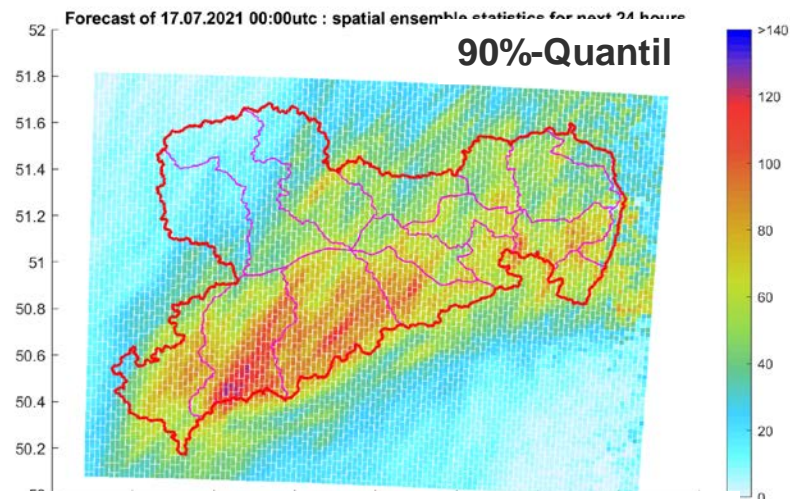
# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis (17.7.2021), Oberlausitz

Extrem heftiger Starkregen

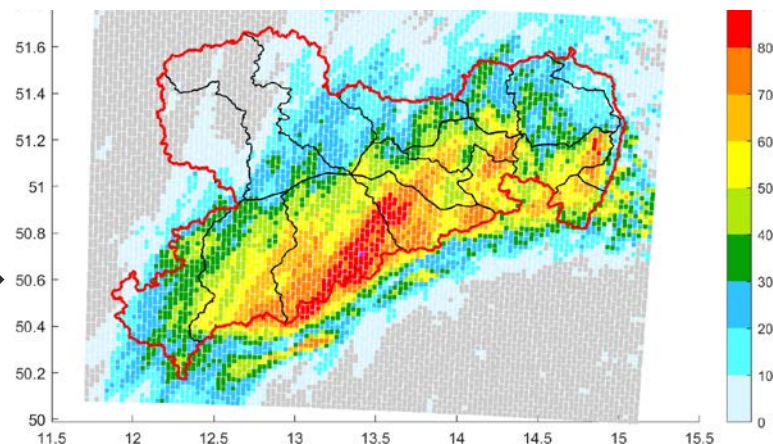
Beobachtung Radolan-RW



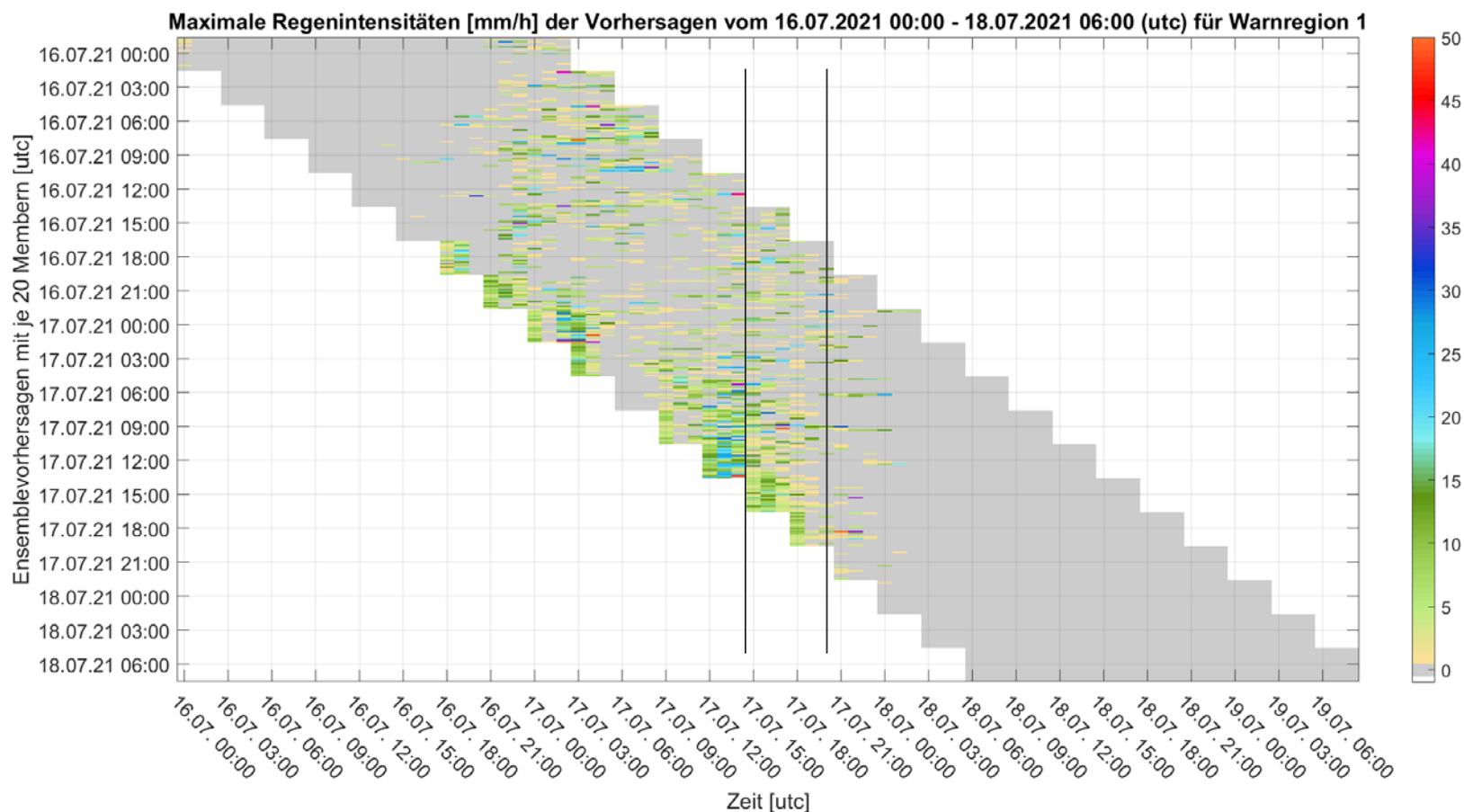
Vorhersage Icon-D2-eps →  
17.07.2021, 00:00utc



Ü-Wahrscheinlichkeit von 30 mm/24 hr



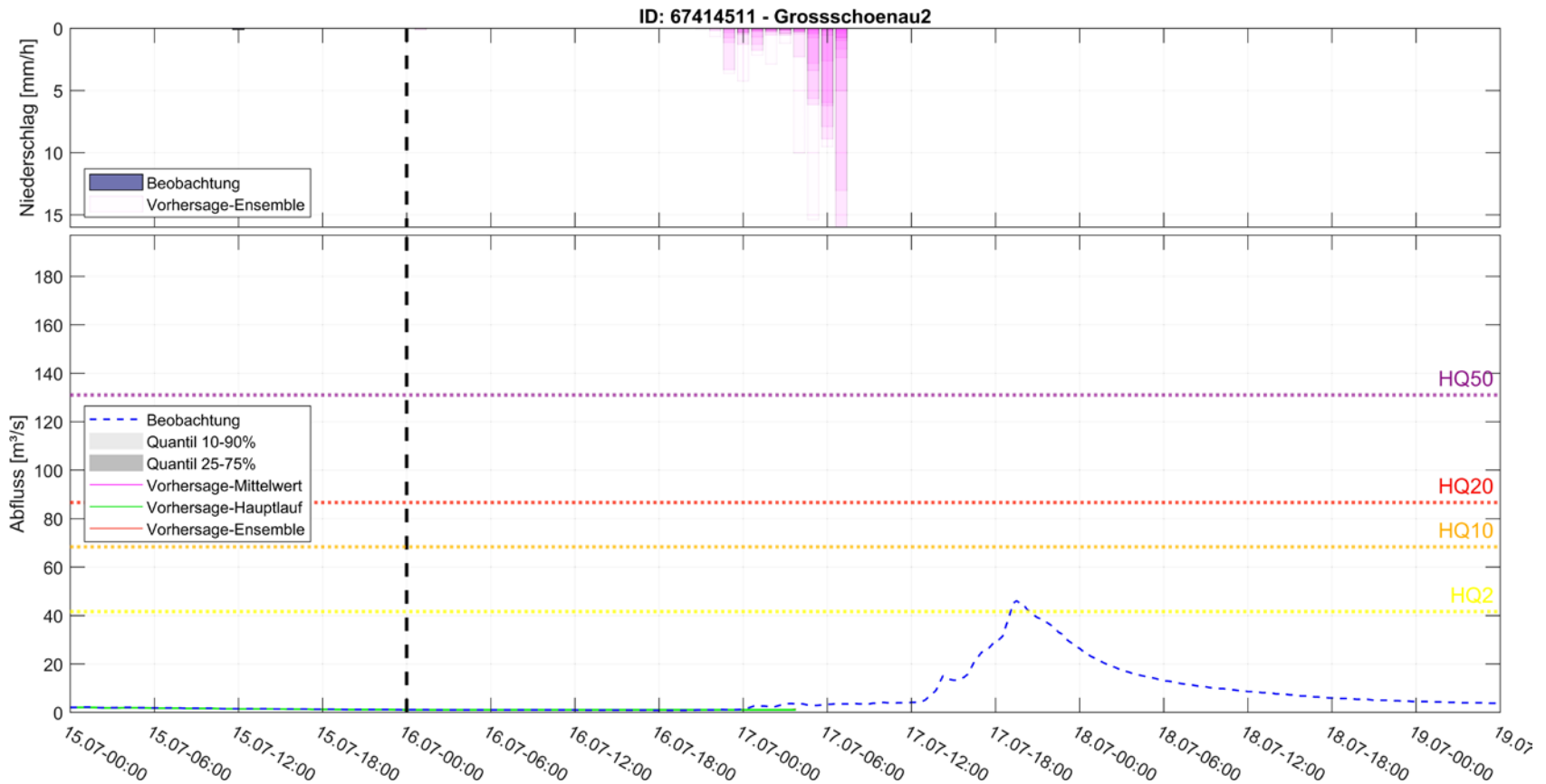
# Performance der Hochwasserfrühwarnung Ereignis (17.7.2021), Oberlausitz





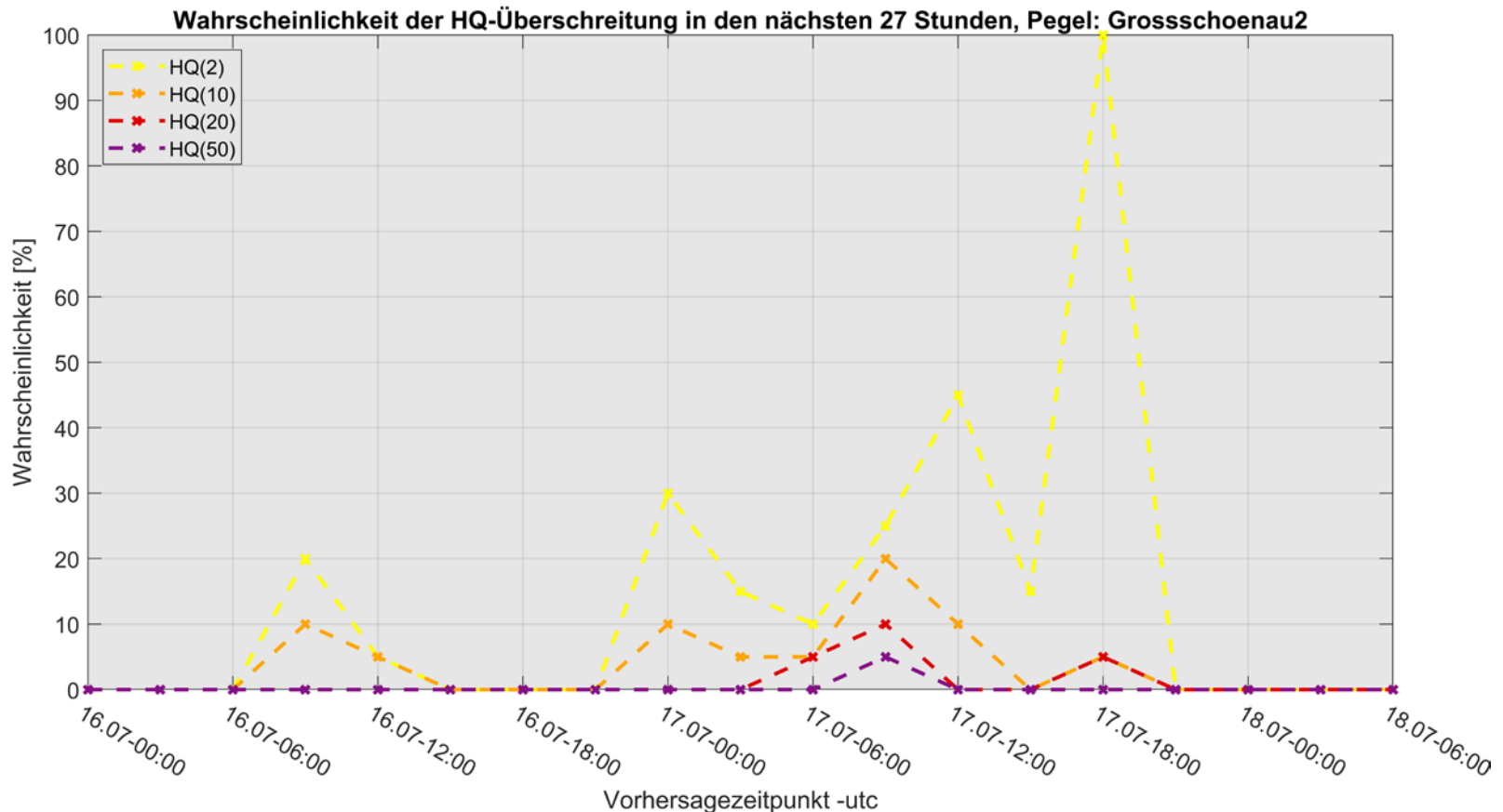
# Performance der Hochwasserfrühwarnung

## 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