



Auswirkungsbasierte Vorhersage von Starkregen und Sturzfluten auf verschiedenen Skalen: Potentiale, Unsicherheiten und Grenzen

Koordination: Markus Weiler



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Projektpartner AVOSS



- Universität Freiburg, Professur für Hydrologie (HyFR, Koordination)
 - **Markus Weiler**, Andreas Hänslar, Andreas Steinbrich, Hannes Leistert, Max Schmit
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik (ISU)
 - **Insa Neuweiler**, Arne Reinecke
- Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
 - **Heidi Kreibich**, Ravi Guntu
- BIT Ingenieure AG, Freiburg (BIT)
 - **Thomas Brendt**, Bettina Huth, Nico Binder
- HYDRON GmbH, Karlsruhe (Hydron)
 - **Ingo Haag**, Julia Krumm
- Forschungszentrum Jülich GmbH, Agrosphere (FZJ)
 - **Harrie-Jan Hendricks Franssen**, Yan Liu
- Kachelmannwetter
 - **Jörg Kachelmann**, Janek Zimmer
- **Assoziierte Praxispartner**
 - LUBW
 - LfU Rheinland-Pfalz
 - HLNUG
 - LfU Bayern
 - RP Stuttgart
 - Landratsamt Rastatt
 - Verschiedene Gemeinden

universität freiburg



Leibniz
Universität
Hannover



BIT | INGENIEURE



Projektlaufzeit: April 2022 bis Sept 2025

Übergeordnetes Projektziel



Ziel von AVOSS ist die stringente Verknüpfung von Starkregenereignis, davon ausgehenden Sturzflutgefahren und potentiell resultierenden Schäden auf verschiedenen räumlichen Skalen.

AVOSS ist ein Beitrag, um bestehende Lücke bei der Warnung von lokal auftretenden Sturzflutereignissen zu schließen

AVOSS arbeitet prototypisch auf verschiedenen räumlichen Skalen

APA



AP B



AP C



AP D

- Anwenderorientierte **Vorhersage von Starkregenereignissen** basierend auf Radar-basierten Niederschlagsvorhersagen
- Entwicklung eines hydrologischen Sturzflutindex (SFI) für eine regionale **Sturzflutvorhersage** durch Kombination von Radarvorhersage und SFI
- Entwicklung und Test eines Verfahrens, um **in Quasi-Echtzeit** kontinuierliche und räumlich hochaufgelöste **Vorhersagen zum oberirdischen Abflussgeschehen** zu erhalten
- Entwicklung und Praxistest von **Risikokarten zur quantitativen Schadensvorhersage** bei Starkregen- und Sturzflutereignissen



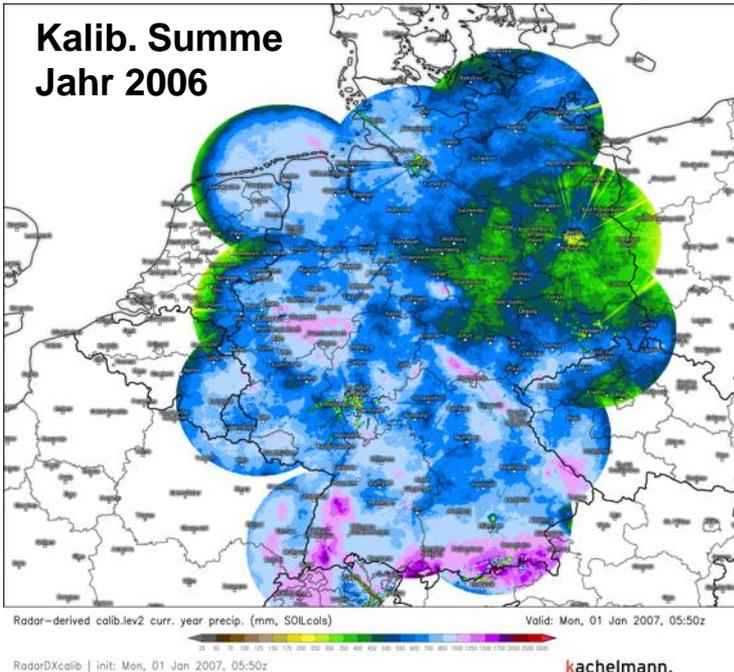
Radar-basierte Niederschlagsvorhersage

APA

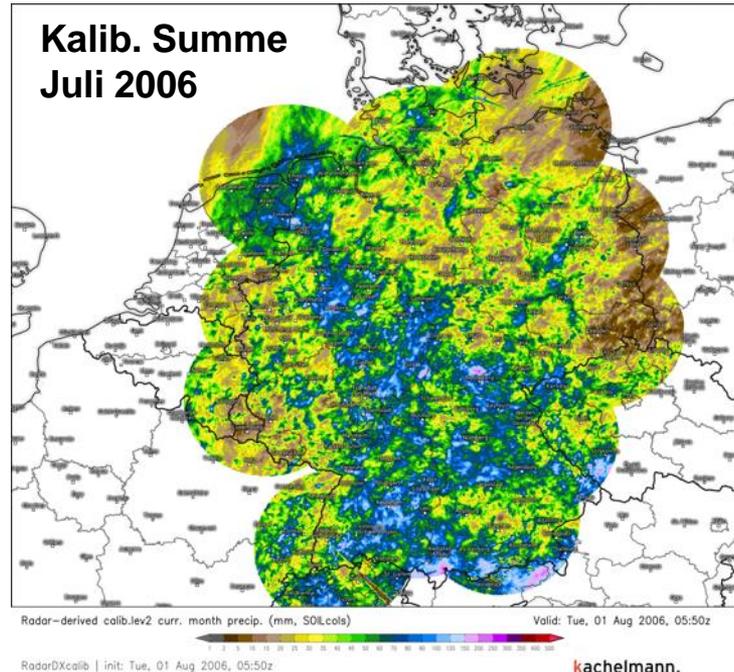


- Radardaten mit Stundenmesswerten durch nicht-lokales Verfahren kalibrieren
- 5min-Daten von 16-18 DWD-Radarstandorten als Grundlage (2006-2024)
- Berechnung von Monats- und Jahressummen

Kalib. Summe Jahr 2006



Kalib. Summe Juli 2006



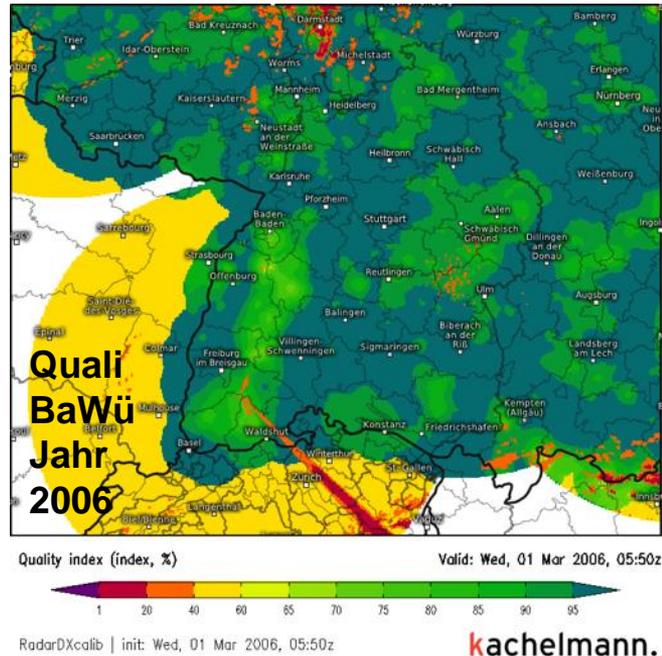
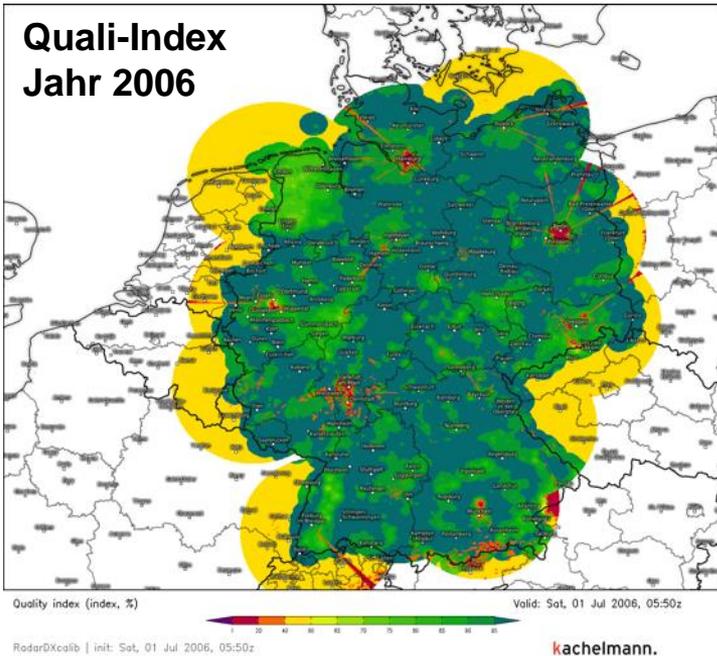
Abdeckung:
Nahezu ganz DE
(Ausnahme Randbereiche
S-H, MVP, BY)

**Klarer Vorteil im
Sommerhalbjahr** ggü.
Interpolierten Messwerten
(z.B. DWD-HYRAS)

**Kalibrierverfahren
übertragbar** auf
kommende 1-2 Stunden
(für Radarprognose),
DWD-Radolan nicht

Radar: Quantifizierung der Unsicherheiten

- Detektion und Beseitigung von Störechos
 - v.a. frühere Jahre (bis etwa 2009) im Radarumfeld mit Störechos (Clutter)
 - Berücksichtigung gefundener Fehlpixel während Kalibrierung
 - Erstellung von Jahreskarten als Qualitätsindex (Abdeckung, Stationsdichte)



Quali-Index-Legende:

- <20%: starke/regelmäßige Clutter/Filter-Probleme (z.B. Feldbergspeiche)
- <40%: zeitweise Clutter/Filter-Probleme
- <60%: keine Stationen zum Kalibrieren im Umkreis
- 60..100%: Radarrohdaten meist gut, Qualitätsprobleme je nach Standort (Entfernung zum Radar oder Gebirgs(dämpfungseffekte))

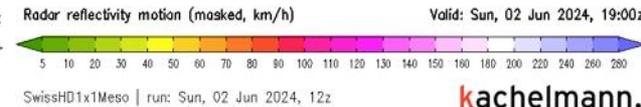
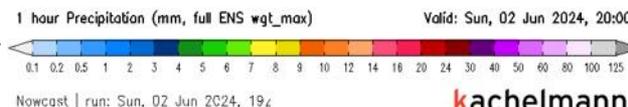
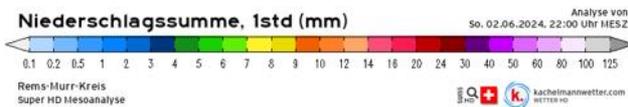
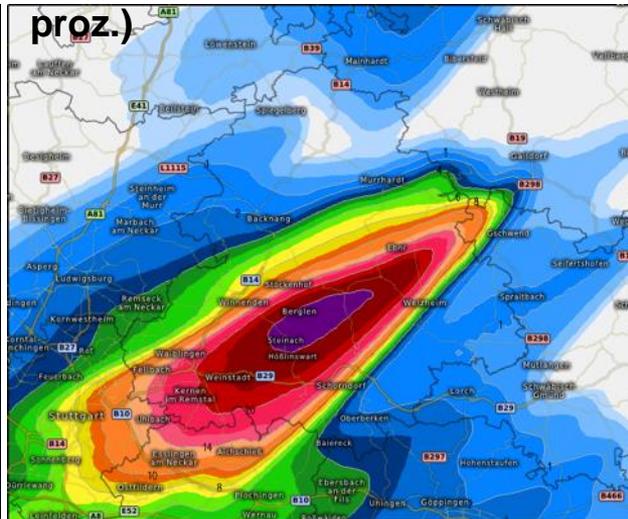
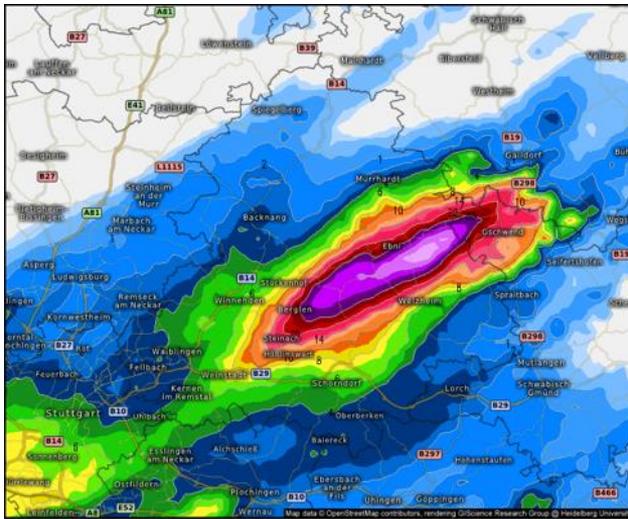
Radarvorhersage (max. +2h) inkl. Ensemble

- Testfall mit Variation von 25 Ensemble-Membnern
- Sturzflut im Wieslauf-Tal (Rems-Murr-LK) am 02. Juni 2024 (50-60 mm/h)
- Prognose mit radar-diagnostizierter Verlagerung zu niedrig und zu gestreckt

1km, kalib. RR1h

Prognose +1h (ENS post-proz.)

Zugvektoren (Radardiagnose)



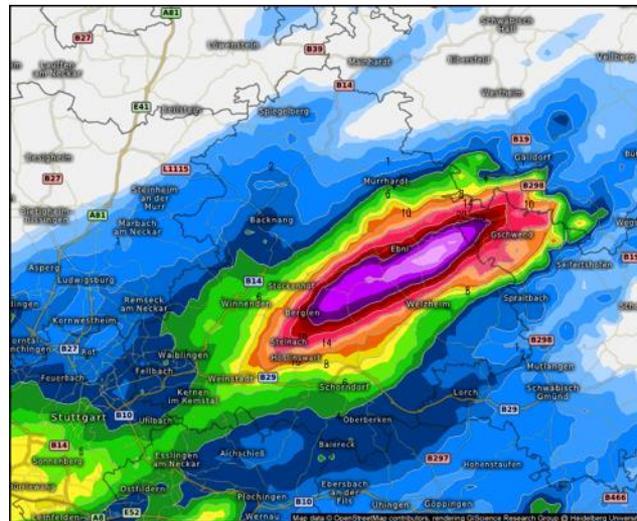
Radarvorhersage (max. +2h) inkl. Ensemble

APA

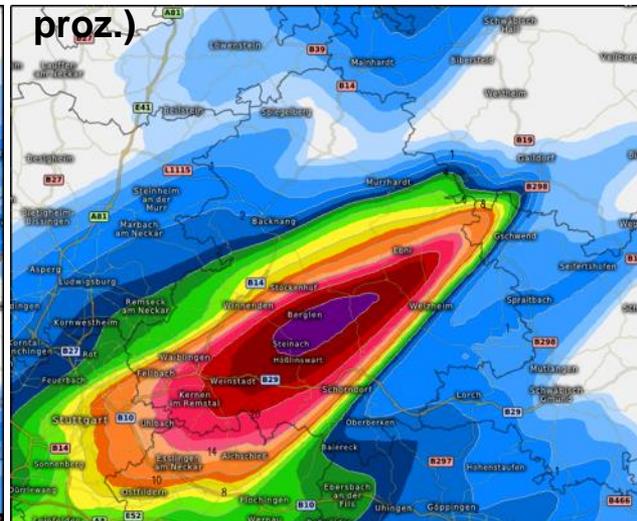


- Modifikation der originalen Ensemblemember
- Sturzflutereignisse oft durch „back-building“ (BB), also rückseitige Neubildung
- mit modellbasierter Wahrscheinlichkeit für back-building (Verlangsamung)

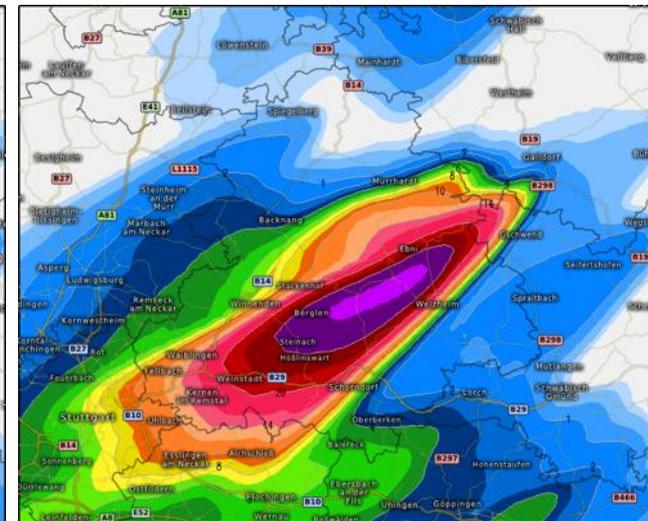
1km, kalib. RR1h



Prognose +1h (ENS post-proz.)



Prognose +1h (ENS mit BB)



Niederschlagssumme, 1std (mm)

Analyse von
So, 02.06.2024, 22:00 Uhr MESZ

1 hour Precipitation (mm, full ENS wgt_max)

Valid: Sun, 02 Jun 2024, 20:00Z

1 hour Precipitation (mm, full ENS wgt_max)

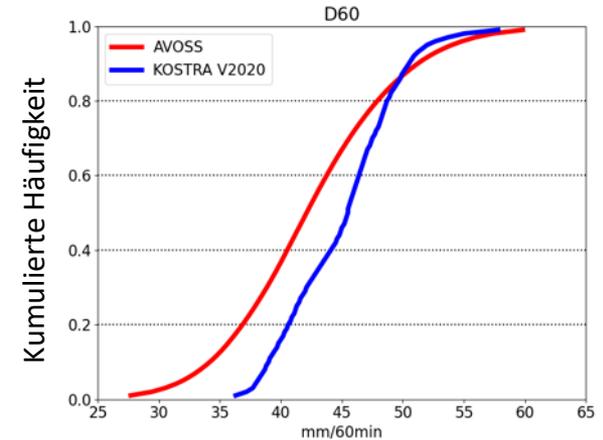
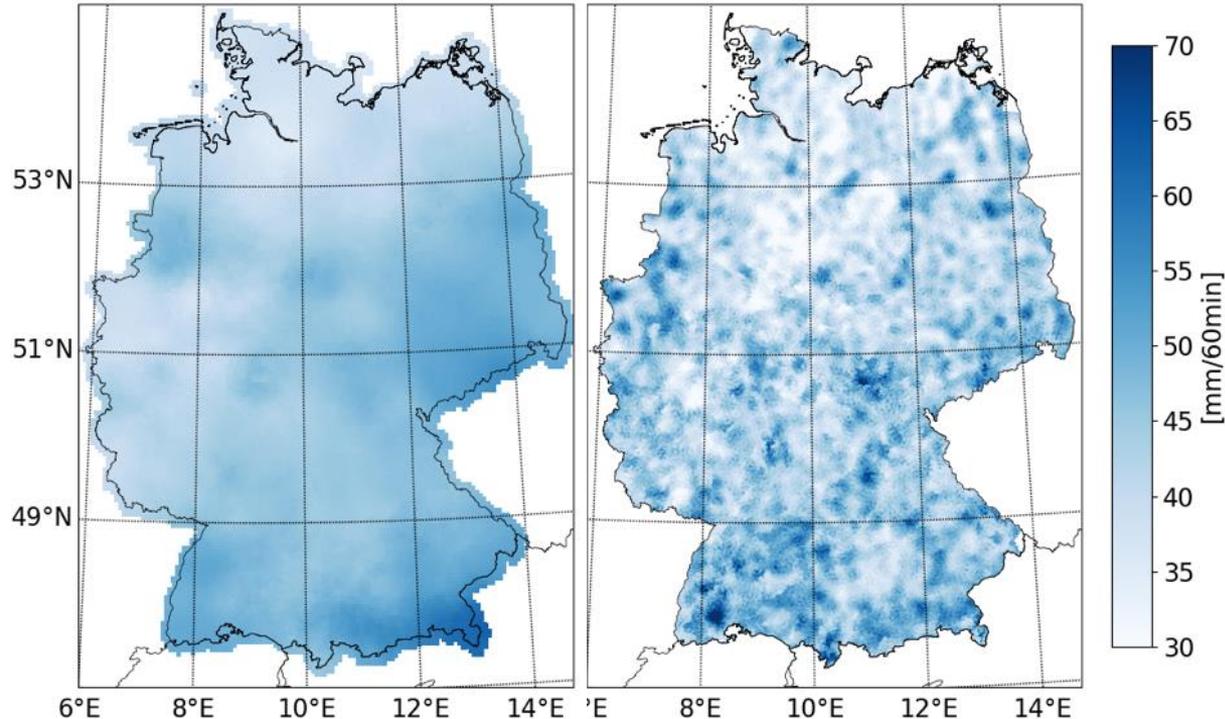
Valid: Sun, 02 Jun 2024, 20:00Z

Bemessungsniederschläge aus Radardaten

Konsistente Aufbereitung der Radardaten von 2006 bis 2023 erlaubt bundesweite Ableitung von Bemessungsniederschlägen basierend auf räumlichem Resampling

KOSTRA V2020

AVOSS



Beispiel für ein 100-jährliches Niederschlagsereignis,

Dauer 60 min

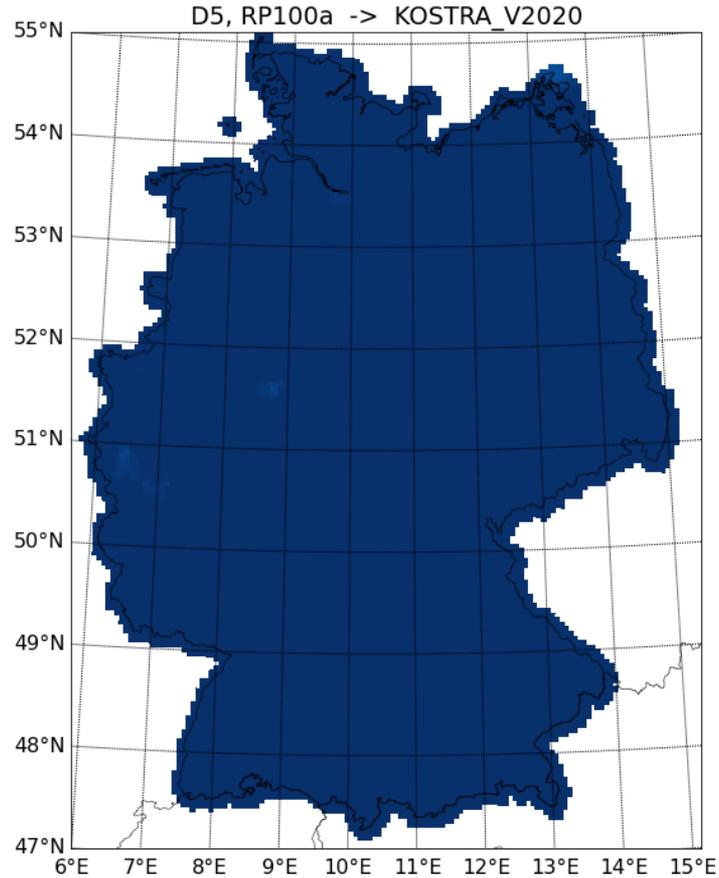
AVOSS und RADKLIM sind jeweils Ensemblemittel (5000 Member)

Bemessungsniederschläge aus Radardaten

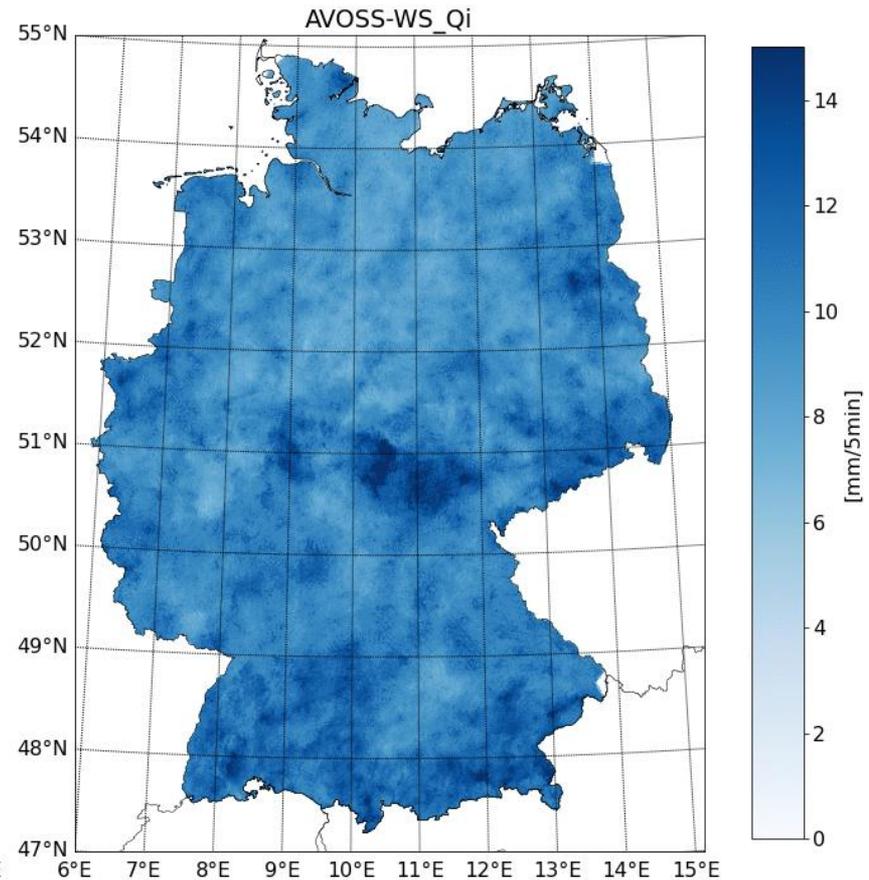
APA



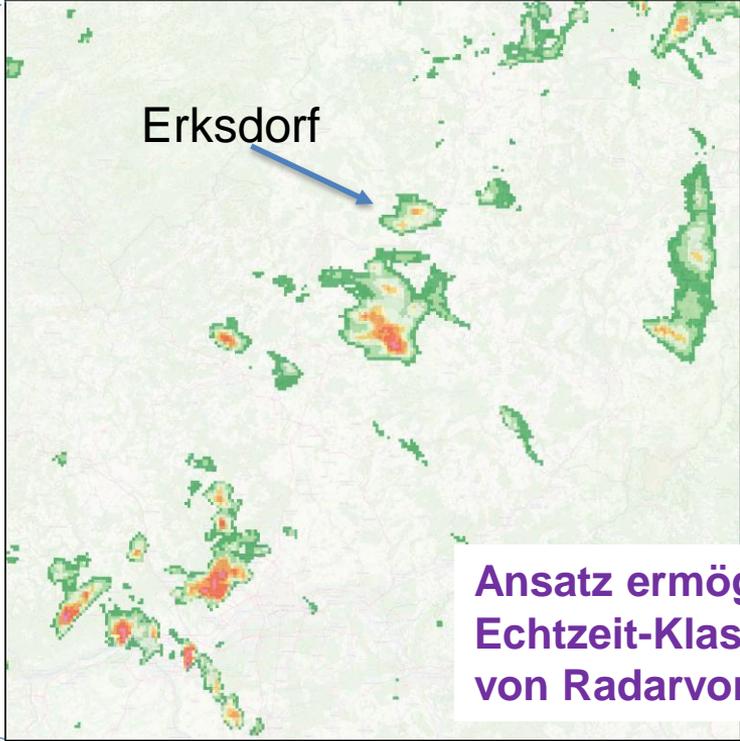
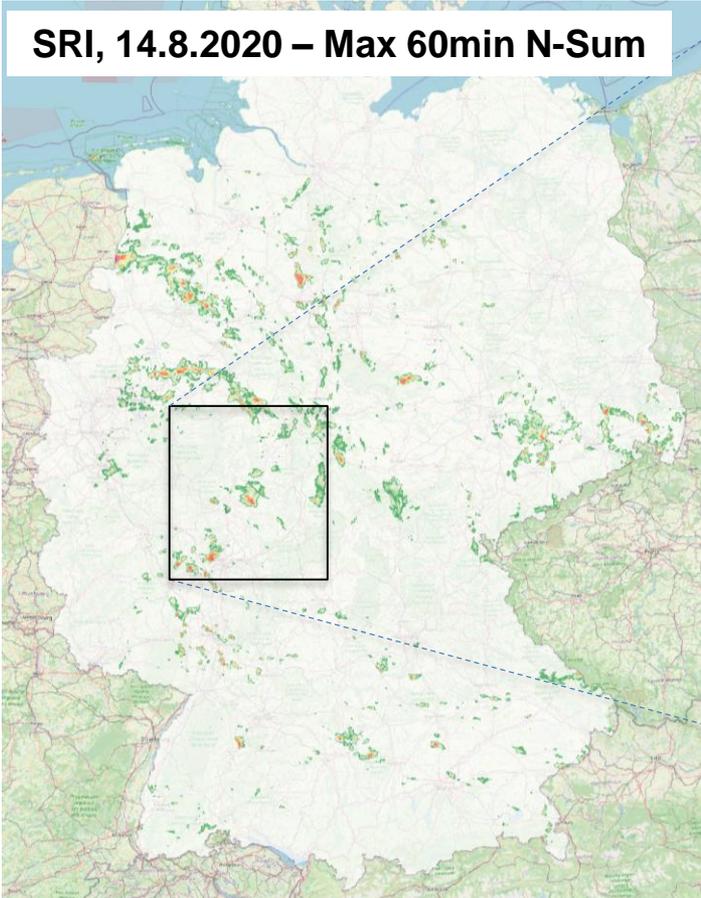
KOSTRA V2020



AVOSS



Starkregenindex (SRI) aus konsistenten Bemessungsdaten



Ansatz ermöglicht quasi-Echtzeit-Klassifizierung von Radarvorhersagen



Sturzflutindex (SFI)

AP B



Bezugsphänomen für die Sturzflutgefahr:

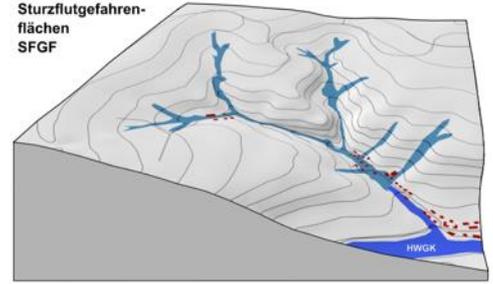
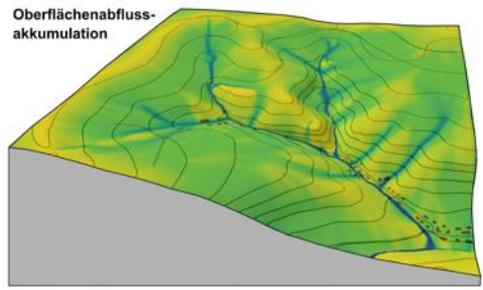
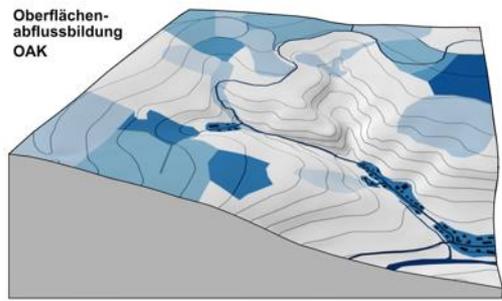
- Sturzflut = pluviales (i. d. R. lokales) Ereignis
- Hauptgefahrenquelle **wild abfließendes Wasser** (außerhalb der Gewässer)
- Führt auch zu Hochwasser in (kleineren) Gewässern
- Abgrenzung zu Flusshochwasser muss berücksichtigt werden

→ SFI – Bezugsphänomen: wild abfließendes Wasser



Quelle: Weiler et al. (2023)

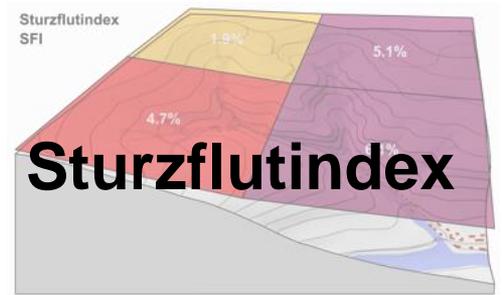
Vorgehen Sturzflutindex



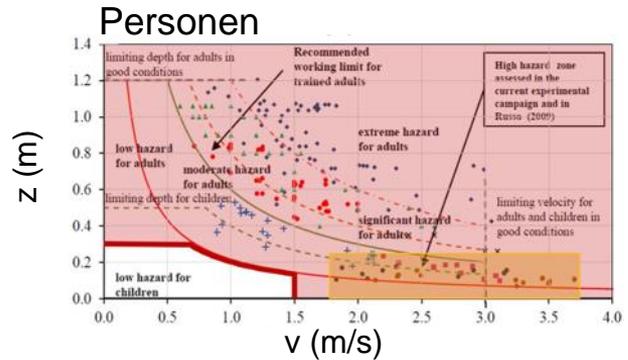
Verteilte, prozessbasierte hydrologische Modelle die alle relevanten Abflussprozesse berücksichtigen (z.B. RoGeR, LARSIM)

Div. hydraulische Modelle oder neu entwickeltes Modell

- Sturzflut-Gefahrenflächen (SFGF)
- SFGF-Abgrenzung: Fläche, auf der Fußgänger oder Autos gefährdet sind



$$SFGF = \left\{ v \geq 1.5 \frac{m}{s} \right\} \cup \left\{ z \geq 0.3 m \right\} \cup \left\{ q \geq 0.2 \frac{m^3}{s * m} \right\}$$



Sturzflut-Index (SFI)

- vereinfachte, dimensionslose Kennzahl
- Klassifikation anhand von absoluten Schwellenwerten (SFGF Flächenanteil)

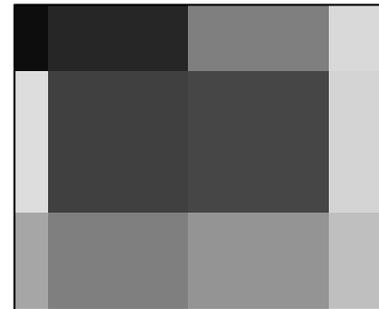
Flächenanteil SFGF	SFI	Gefährdung
< 0.5 %	0	Gering
≥ 0.5 %	1	Mittel
≥ 2.0 %	2	Hoch
≥ 5.0 %	3	Extrem

Absoluter Schwellenwert:

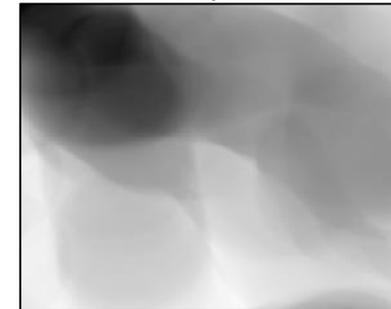
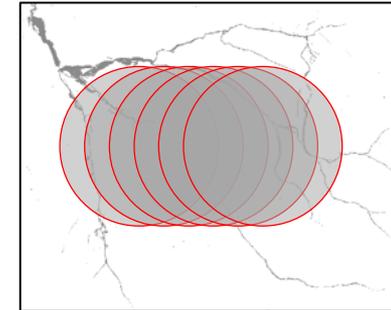
- Absolut: Prozentsätze SFGF-Anteile als Schwellenwerte
- Relativ: anhand von Jährlichkeiten
- Im Gegensatz zu Flusshochwassern liegen für Sturzfluten keine Jährlichkeiten vor (kein HQ_{100} -Sturzflutschutz)
- In Gebieten, die sehr „sturzflutanfällig“ sind, kann ein Ereignis geringer Jährlichkeit große Auswirkungen haben
- Die Sturzflut-Gefahr bemisst sich primär am absoluten Ausmaß (betroffene Fläche, Wasserstand, Fließgeschwindigkeit)

Räumliche Darstellung

Mittelwert Grid



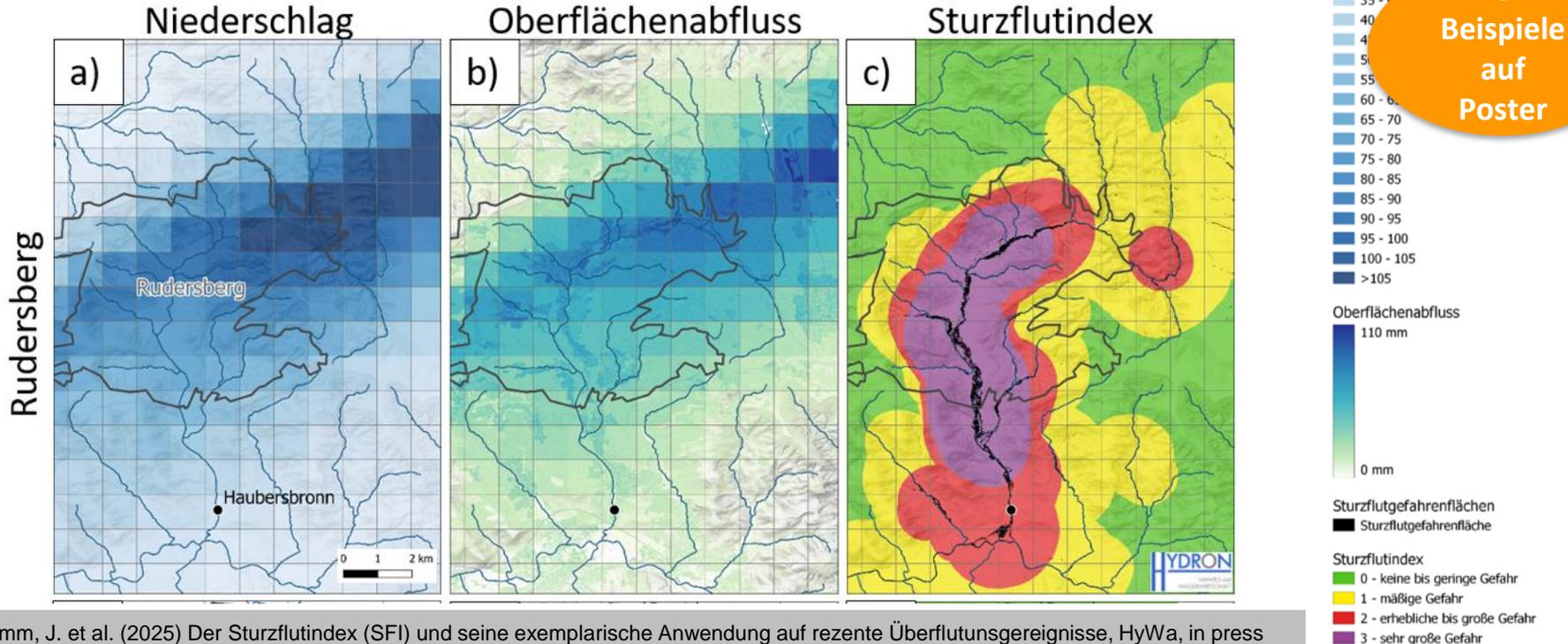
gleitender mittlerer Kreiswert



SFI zur Sturzflutwarnung (Wieslauf/Rudersberg 6/24)

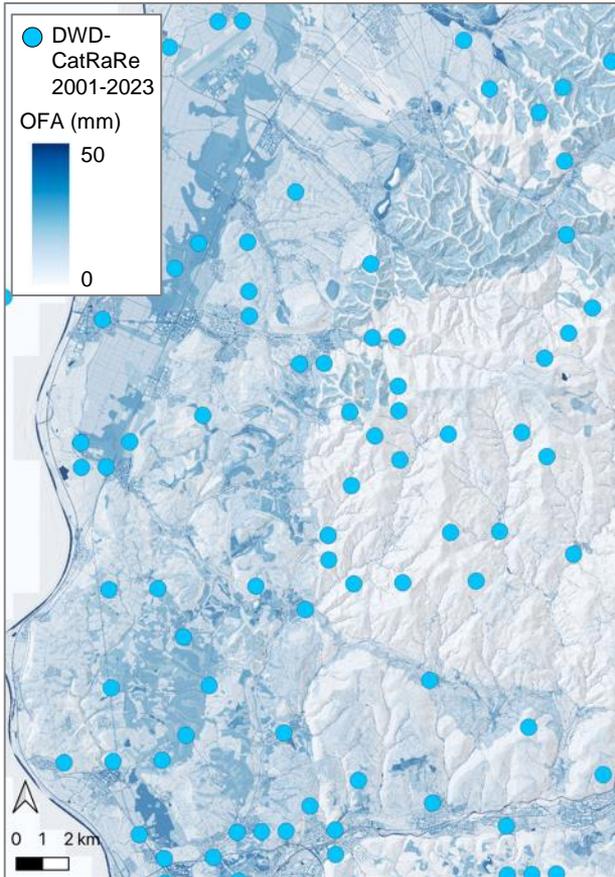


- Niederschlagsradardaten im 5-Min-Zeitschritt
- LARSIM: Anfangsbedingungen und Abflussbildung
- Berechnung der Abflussakkumulation (hier: AccRo) und Ermittlung SFGF und SFI

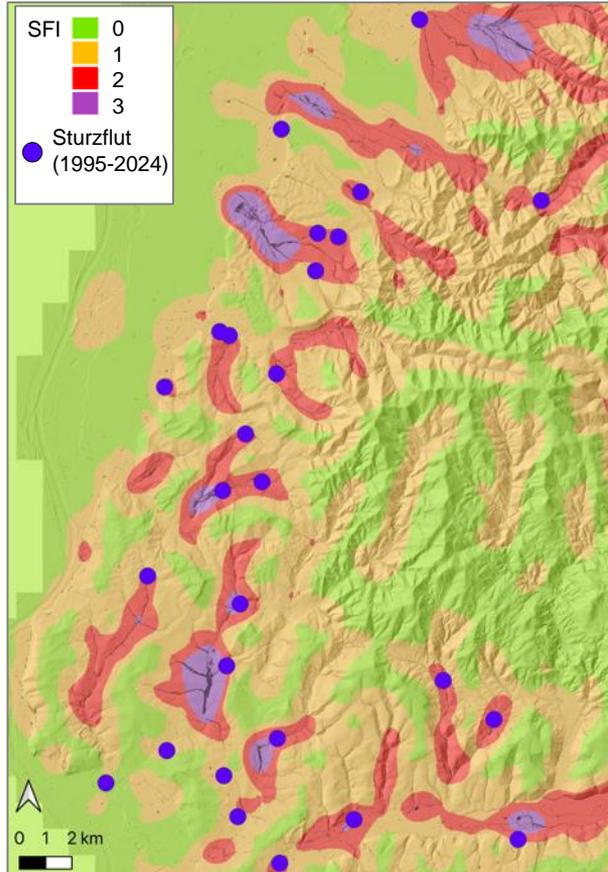


SFI zur Bewertung der großräumigen Sturzflutanfälligkeit

Oberflächenabfluss und beobachtete Starkregenereignisse



Beobachtete Sturzflutereignisse und SFI



- SFI für Szenario ‚außergewöhnlich‘ des Kommunalen Starkregenrisikomanagements (SRRM) von Baden-Württemberg (BW)
- Basis ist ein 100 jähriger Niederschlag der Dauerstufe 1h
- Oberflächenabflussbildung mit Modell RoGeR; Bodenfeuchte Median der Sommerbodenfeuchten
- SFI kann großräumig Kommunen identifizieren, für die ein detailliertes SRRM prioritär ist



SFI Demonstrator und Presse



SFI Demonstrator

The flash flood index can be used to demonstrate the different regional impacts of pluvial flash flood events using fictitious scenarios. However, it can also be used as a warning index in real events. Here in the interactive web demonstrator, you can discover both possible applications for selected test regions.

The blue flow chart abstracts the underlying methodology (more information under Method). It also allows you to select the individual data levels for visualization.

In the "Event selection" menu, you can switch spatially between regions and in terms of content between real events and fictitious scenarios. In the scenarios, you can independently change the parameters influencing the flash flood in order to see their effects on the regional impact.

https://apps.hydro.uni-freiburg.de/en/sfi_demo/



Presse

- Badische Zeitung
- B_I Medien GmbH, Kiel
- ZDF Heute Journal
- ARD Radio-Interview, SWR 1, SWR3 Top Thema, DLF dpa - Dt. Presse Agentur: Zeit, Stern, Geo, SZ, FR, StZ, ...
- Hochschul- und Wissenschafts kommunikation, Uni-Freiburg

System zur Vorhersage von Sturzfluten



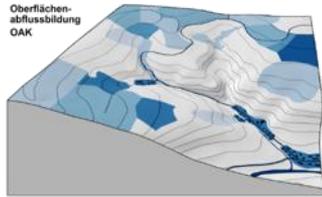
von Anton Jany

Mit einer KI sollen Daten wie Gelände- und Bodenverhältnisse aus Städten und Gemeinden mit dem Wetterradar verknüpft werden. Das Ziel: eine möglichst frühe Sturzflutwarnung.



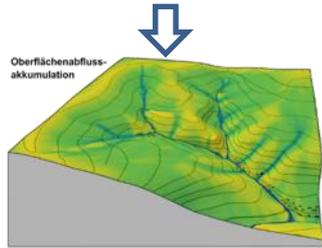
Mehr vom heute journal

SFI – Herausforderung: Echtzeitvorhersage



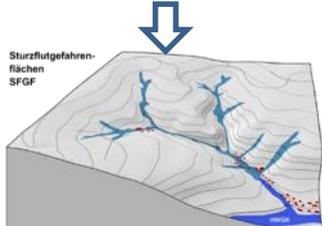
Hydrologie:
Bildung von
Oberflächenabfluss

Op. LARSIM ✓



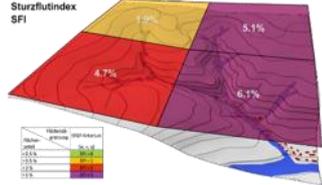
Hydraulik:
Akkumulation von
Oberflächenabfluss

HN-Modelle zu
langsam (auch
Visdom, RIM2D)



Ermittlung SFGF:
Anwendung Kriterien

✓



SFI:
Anwendung SFGF
Schwellen

✓

Alternativen aus AVOSS:

AccRo (Accumulated
Runoff Model) ✓

KI (siehe AP C, benötigt
aber immer Trainingsdaten)

AccRo (Accumulated Runoff Model)

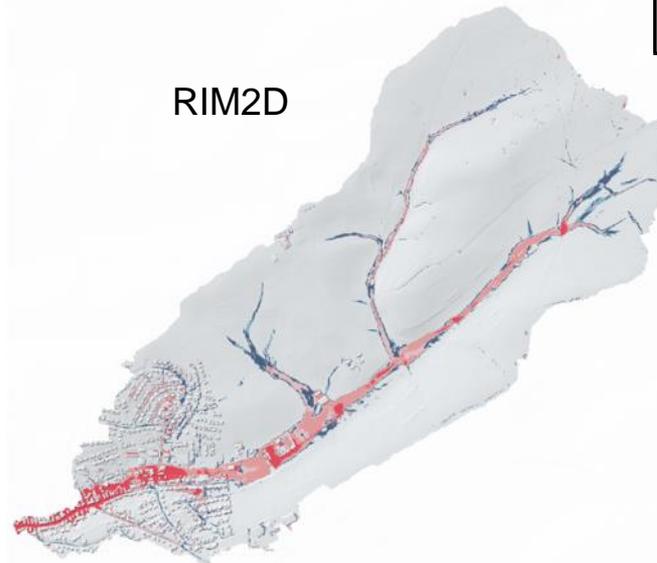
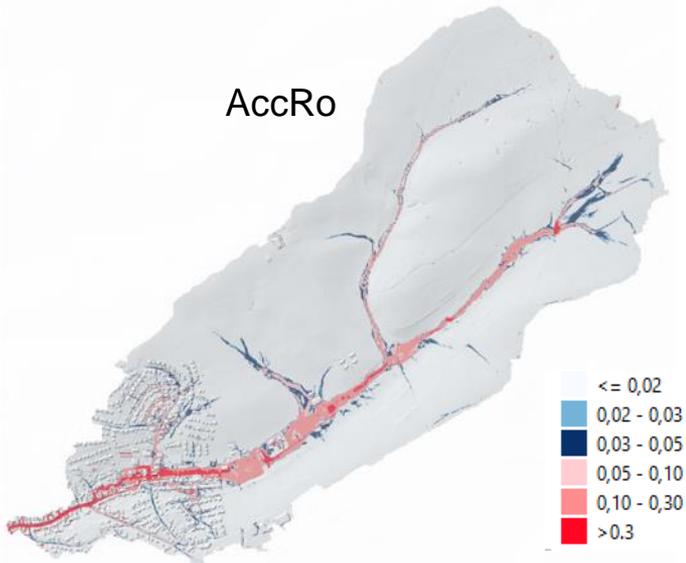
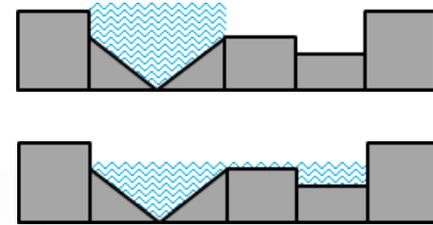


In AVOSS entwickelte Methode schnell und belastbar die Oberflächenabflusskonzentration zu berechnen inclusive:

- Maximalem Wasserstand
- Maximale Geschwindigkeit
- Maximaler spezifischer Abfluss

Zeitvergleich: AccRo = multiple GPU hydraulischem Modell >8, HydroAS >100
Durchschnittliche Rechenzeit für ein Gebiet mit 1 Mio. Zellen (Zellgröße irrelevant): 90 Sekunden

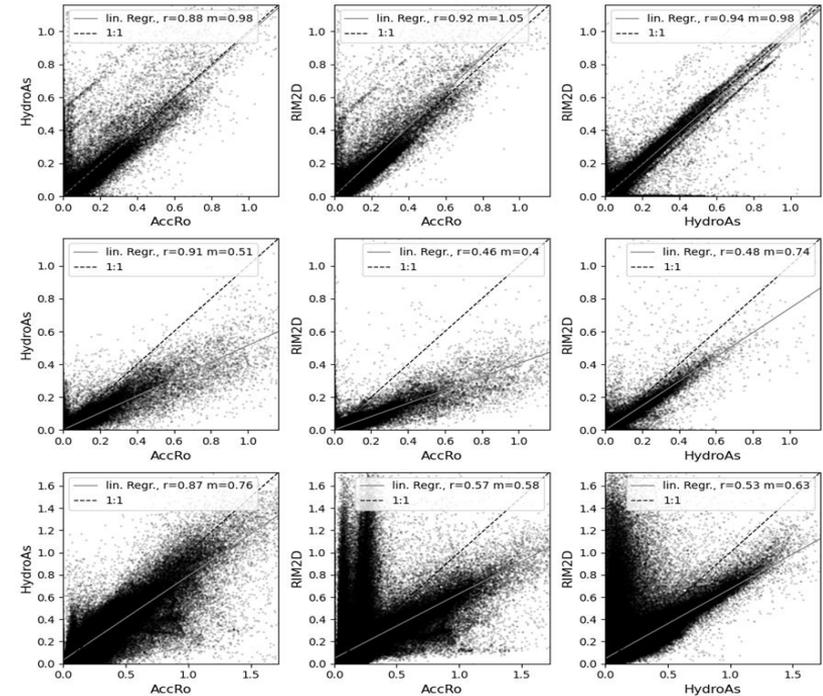
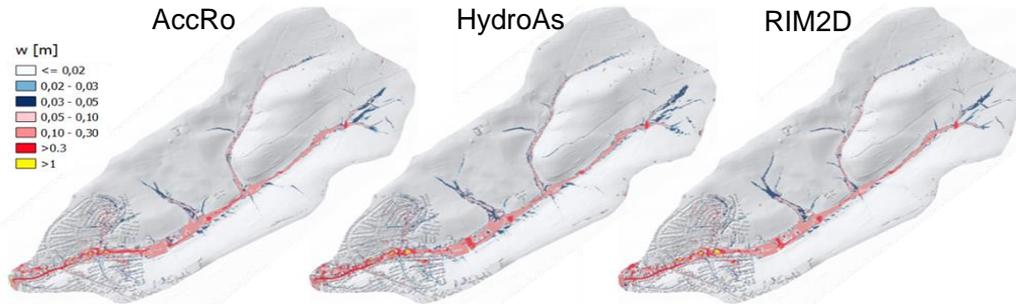
Neues Modell für eine quasi-hydraulische Simulation von Oberflächenabfluss



Beispiel Wasserstand in Meter:
Einzugsgebiet Riedgraben (3km²), SOA = 19.5mm, Ereignisdauer: 135 min
Links AccRo, Rechts RIM2D (GPU basiertes hydraulisches Modell)

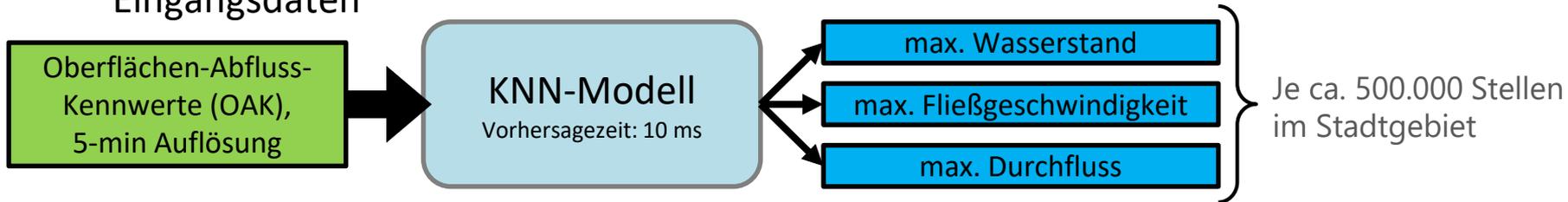
AccRo – Umfangreich evaluiert

- Großräumige Vorhersage in wenigen Minuten möglich (Bundesland)
- Auch sehr gut geeignet für Großräumige Sturzflutanfälligkeit (SFI)
- Sehr gut im Vergleich zu etablierten Modellen wie RIM2D oder HydroAS



KI-Überflutungsvorhersage mit KNN

- Künstliche neuronale Netze (KNN) für zwei Einzugsgebiete (Emmendingen, Karlsbad) trainiert
 - Einzugsgebietsfläche je > 25 km², urbane Vorhersagegebiete 3 – 10 km²
 - 2D-hydraulisch berechnete Überflutungsdatenbank mit >> 100 Ereignisse
- Modellarchitektur:
 - 3 Neuronale Netze (max. Wasserstand, max. Fließgeschwindigkeit, max. Durchfluss)
 - Räumliche Oberflächenabflusskennwerte (100m*100m, 5 min) als Eingangsdaten



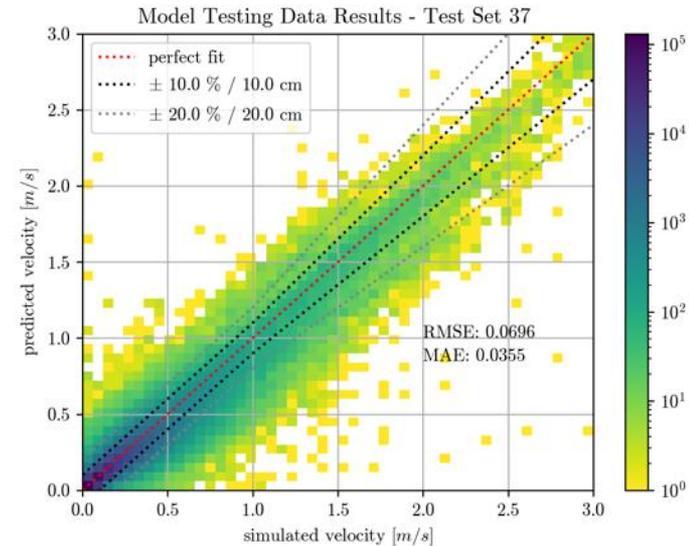
- **Erstmals Vorhersage von Fließgeschwindigkeiten und Durchflüssen mittels KNN**

Evaluierung der KNN

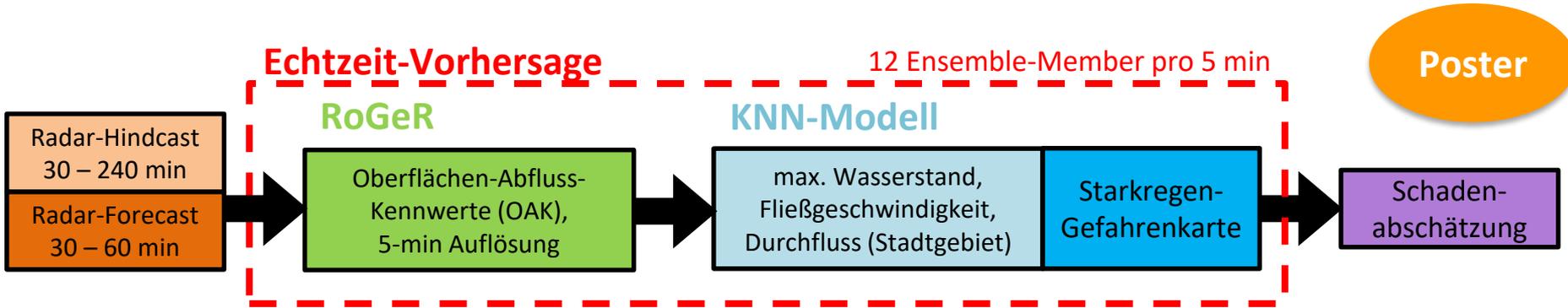
Vergleich max. Fließgeschwindigkeiten: **KNN** - 2D-Hydraulik (HydroAS):



Vergleich an allen 500.000 Stellen:

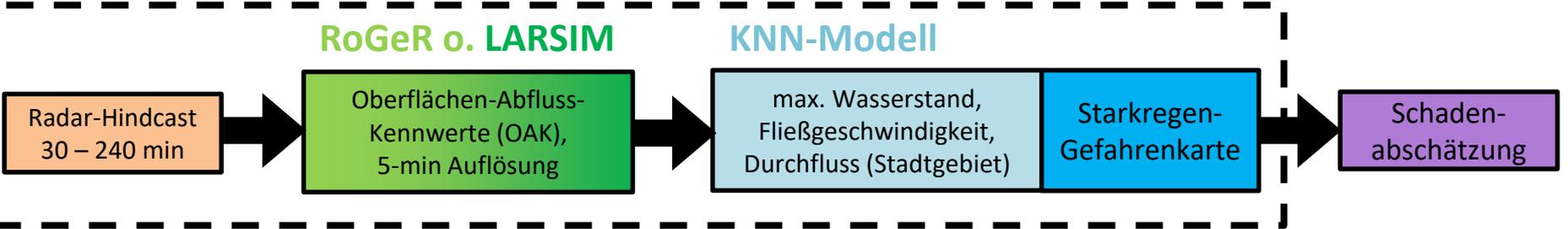


Vorhersageunsicherheit: Modellkette zur Echtzeit-Vorhersage



Unsicherheits-Quantifizierung:

> 2500 Ensemble-Member pro Tag

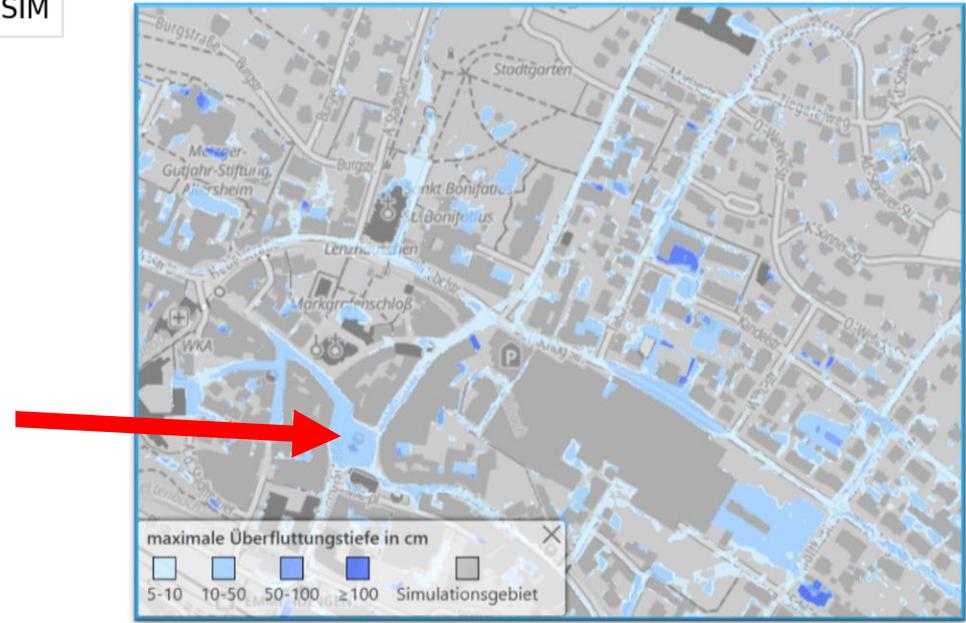
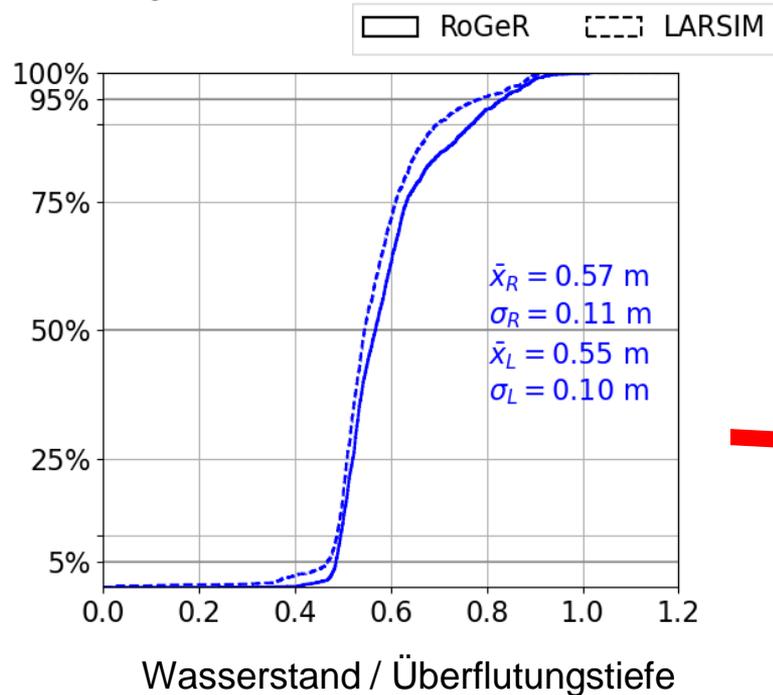


Vorhersageunsicherheit: Modellkette zur Echtzeit-Vorhersage



Beispiel: Unsicherheit des Wasserstandes am Markplatz in Emmendingen

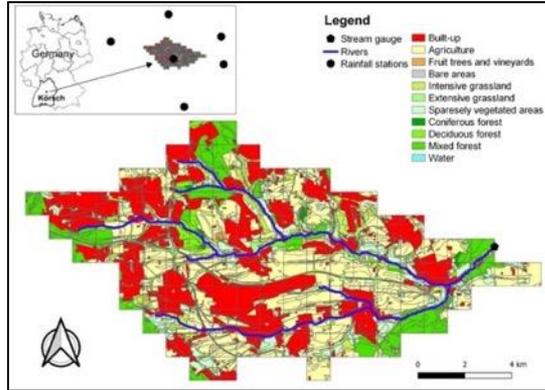
Einflussfaktoren auf die Unsicherheit:
Niederschlag (84%),
Bodeneigenschaften (14%),...



Daten-Assimilierung und Unsicherheitsreduktion

Körsch EZG

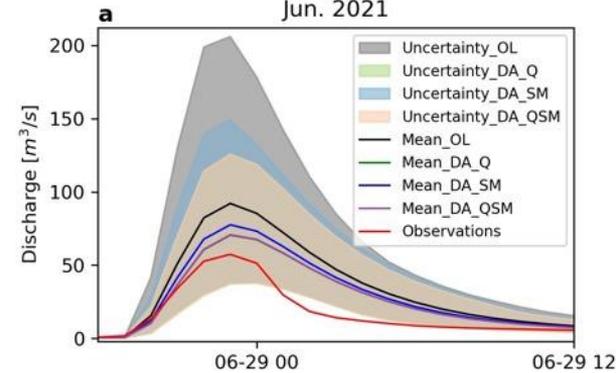
- **Verstädtertes EZG**, 123 km²
- **anfällig** für die Entstehung von **Sturzfluten**
- 1km reguläres **LARSIM-Gitter** mit hydrologische Reaktionseinheiten



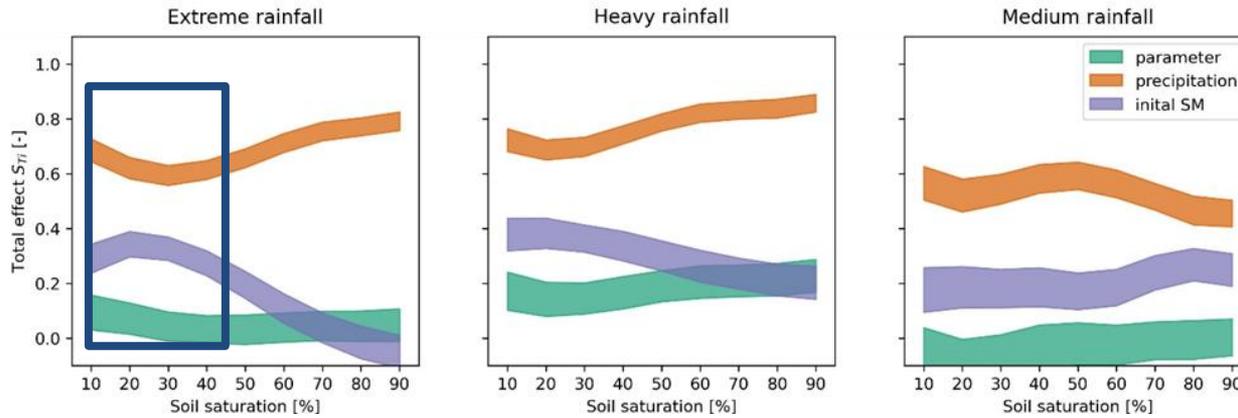
Datenassimilierung (DA)

mit einseitiger Vorbedingung

- **Messungen:** Bodenfeuchtigkeit (SM), Abflussmenge (Q)
- **Methoden:** Ensemble-Kalman-Ansatz
EnKF → SM, EnKS → Q
- → **Aktualisierung** der anfänglichen Bodenfeuchtigkeit



Sensitivity analysis on peak discharge



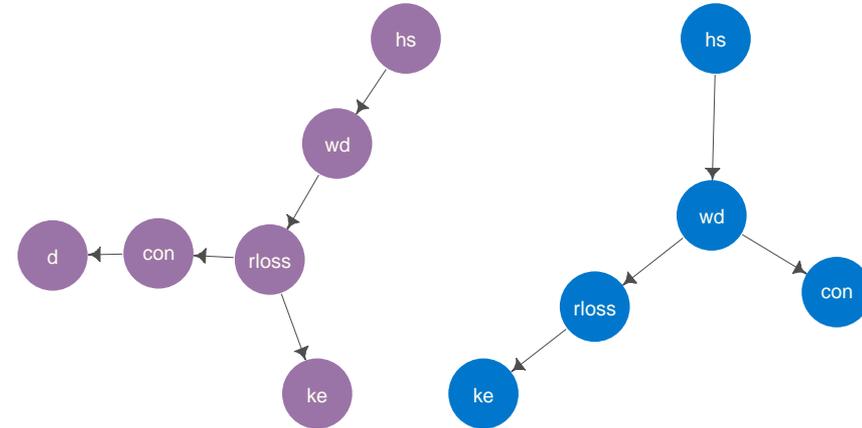
Wann ist Datenassimilierung (DA) sinnvoll?

- Varianzbasierte **Sobol'-Indizes**
- **Gesamteffekt S_{T_i}** : Direkt + Interaktionen → Modellausgabe
- **drei Unsicherheiten**: Parameter, Niederschlag, anfängliche SM
- **Extremniederschläge**: trockene Vorbedingung → **große Auswirkungen** von anfängliche SM

Kernaussagen

- Angesichts der zunehmenden Schäden durch Sturzfluten, besteht ein dringender Bedarf an verlässlichen Risikobewertungen und effektivem Management.
- Wir stellen $FLEMO_{flash}$ vor, ein neuartiges multivariates probabilistisches Modell zur Abschätzung monetärer Schäden durch Sturzfluten.

Schadensmodelle

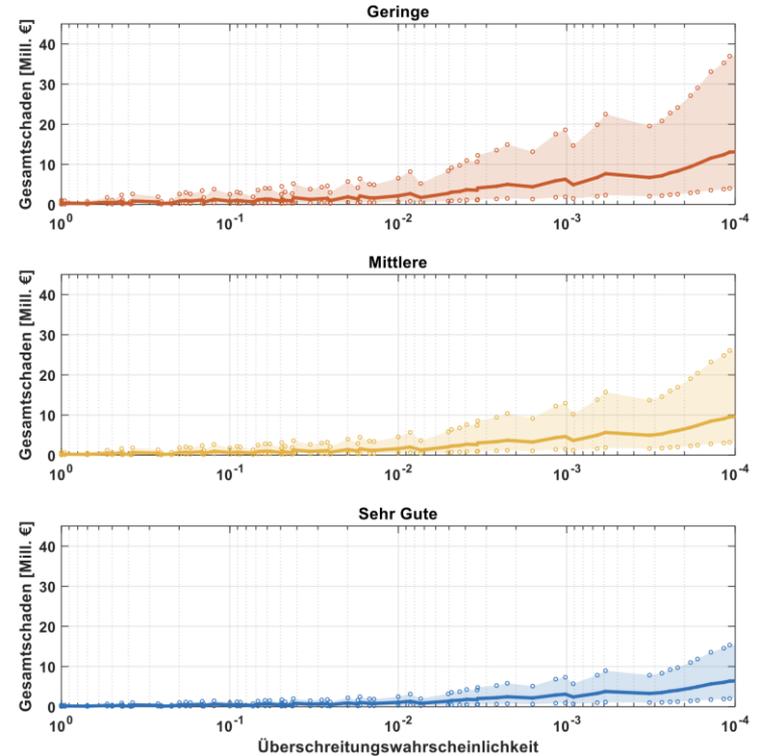
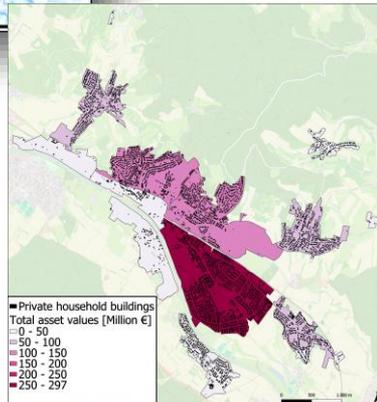
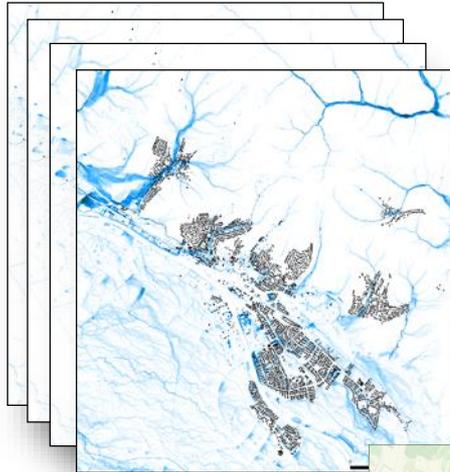


Auf Bayesschen Netzen basierende Schadensmodelle für Wohngebäude (links) und Hausrat (rechts)

Poster

Risikokarten zur quantitativen Schadensvorhersage

z.B. Risikoanalyse in Emmendingen



Sehr gute Kenntnisse über Vorsorgemaßnahmen können die Schäden privater Haushalte bei seltenen Ereignissen um bis zu 50 % reduzieren.

- Neue Radarprodukte ermöglichen verbesserte Analysen von vergangene Ereignissen und Ableitung von Bemessungsniederschläge
 - aber Radar-Vorhersage ist weiterhin unsicher und erlaubt eher nur räumlich ungenaue Warnungen.
- Potential des Sturzflutindex (SFI) nutzen (Warnungen, Vorhersage, Klimawandel, Sturzflutanfälligkeit = Starkregenvorsorge).
 - Niederschlag und Hydraulikmodelle allein sind nicht ausreichen (bundesweite Hinweiskarten Starkregen sind sehr problematisch!)
- Prozessbasierte Ansätze (AccRo) vs. KI Methoden
 - Augenmaß
- Neue probabilistischen Schadensmodelle für Sturzfluten ermöglichen Schadensvorhersage auf Basis der entwickelten Methoden
 - Priorisierung in der Vorsorge

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Projektlaufzeit: April 2022 bis Sept 2025

Projekt-Team

universität freiburg



Leibniz
Universität
Hannover



Assoziierte Praxispartner

LUBW

LfU Rheinland-Pfalz

HLNUG

LfU Bayern

RP Stuttgart

Landratsamt Rastatt

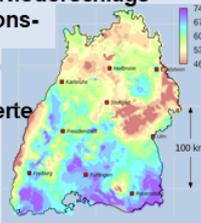
Verschiedene Gemeinden

Übersicht der APs

AP A



A1: Historische Niederschlagsradar und Stationsdaten



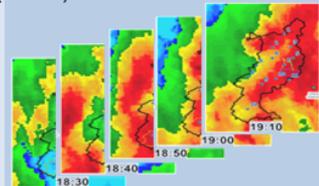
A2: Regionalisierte Starkregensbemessungsniederschläge (KombStRA)

A3: Pluvialer Starkregenindex (SRI)

Kategorie	Kategorie		Kategorie		Kategorie		Kategorie	
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A1

A4: Hindcasting (Radar) inkl. Unsicherheiten



AP B



A4

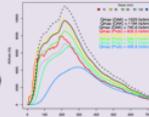
B1: Vorfeuchtebedingungen für Bemessung und Echtzeit-Vorhersage



A2

B2: Hydrologische Starkregen Modellierung

Szenarien für Bemessungsereignisse T_x f(Dauerstufe, Vorfeuchte) -> Abflussvolumen -> Spitzenabfluss



Hydrologischer Sturmflutindex (SFI)

SRI # 4	Überschneidungsbereich			
	0%	20%	50%	80%
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0

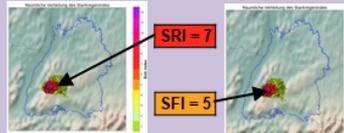
A2

B3: Vorhersage SRI und SFI inkl. Unsicherheiten

A3

Prototyp Sturmflut Warnung

B1

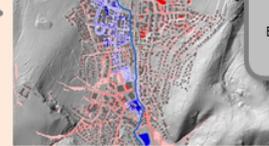


AP C



A4

C1: Ermittlung Starkregengefahrenkarten

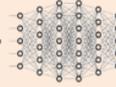


Benchmarkdatensatz
Beobachtungen (Feuerwehr, Videos, HRB)

B2

C2: Neuronale Netze als Echtzeitvorhersage

$z, v(x,y) = f(N\text{-Eigenschaften, Vorfeuchte})$ inkl. Unsicherheiten



A4

C3: Reduzierung der Unsicherheit durch Assimilierung lokaler Daten und Optimierung der Messnetze

B1

B2

Aktuelle Messungen
Fernerkundung, lokale Messungen

Prototyp Echtzeit Überflutungsmodell



AP D



D1: Probabilistische Multi-paramter Schadenmodelle für Gebäude



D2: Risikokarten zur Unterstützung einer effektiven Risikokommunikation



A4

D3: Schadensbasierte Vorhersage und Schadensschwerpunkte

B3

C3

Risikokarten mit quantitativer Schadenskartierung

