



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

Koordination: Markus Weiler



Projektpartner AVOSS



- Universität Freiburg, Professur für Hydrologie (HyFR, Koordination)
 - **Markus Weiler**, Andreas Hänsler, 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



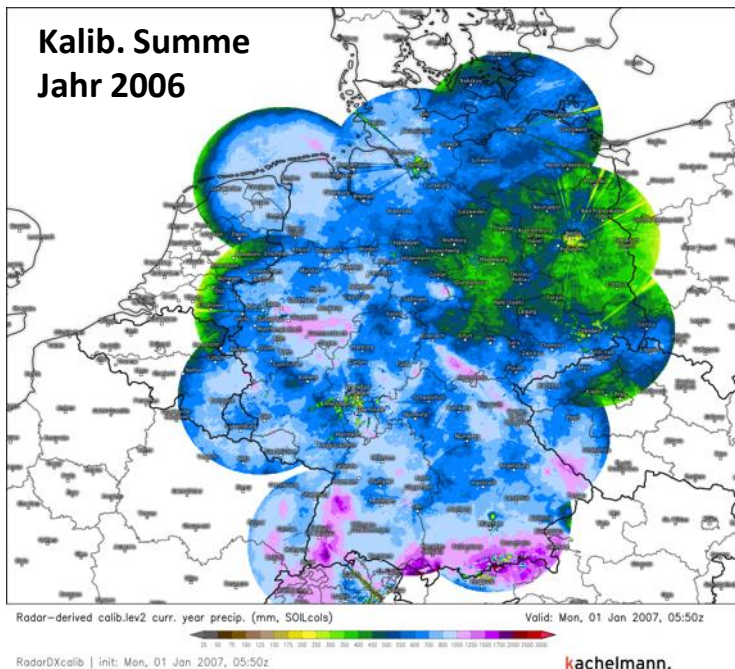
Radar-basierte Niederschlagsvorhersage

APA

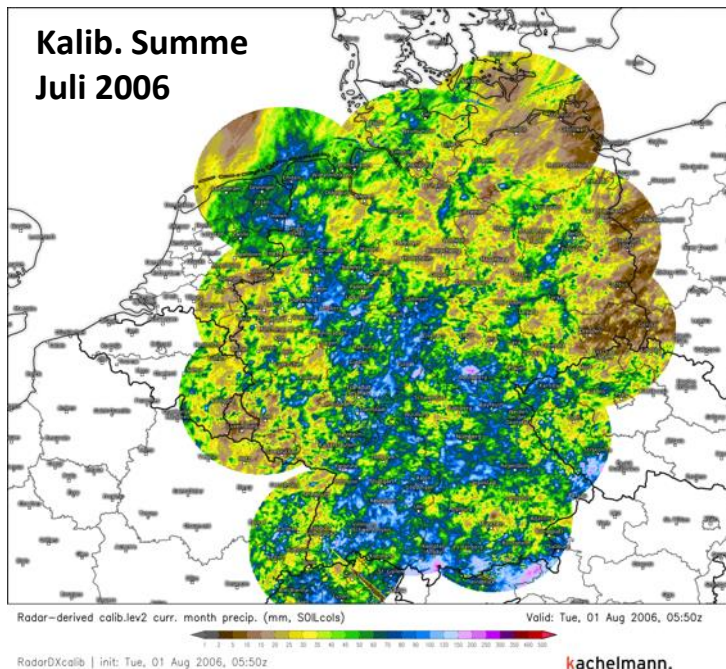


- Radardaten mit Stundenmesswerten durch nicht-lokales Verfahren kalibrieren
- 5min-Daten von 16-18 DWD-Radarstandorten als Grundlage (2006-2024)
- Berechnung von Monats- und Jahressummen

**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

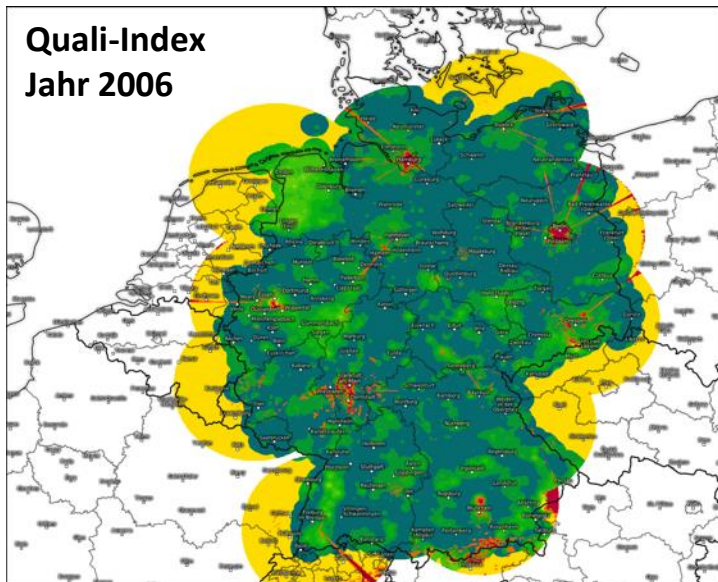
Radar: Quantifizierung der Unsicherheiten

APA



- 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
Jahr 2006**

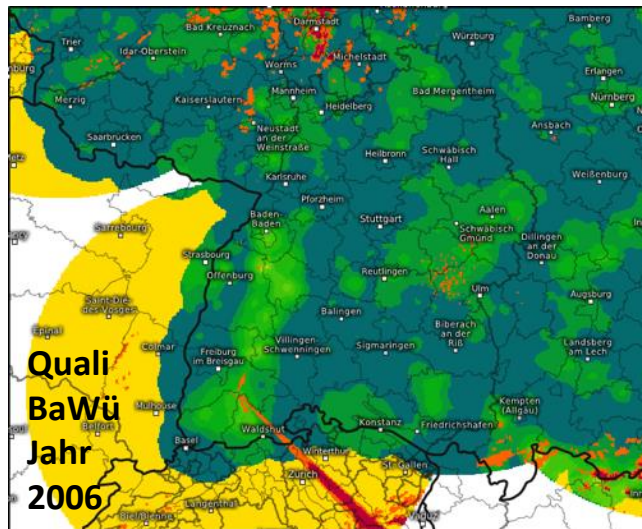


Quality index (index, %)

Valid: Sat, 01 Jul 2006, 05:50z

RadarDXcalib | init: Sat, 01 Jul 2006, 05:50z

kachelmann.



Quality index (index, %)

Valid: Wed, 01 Mar 2006, 05:50z



RadarDXcalib | init: Wed, 01 Mar 2006, 05:50z

kachelmann.

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(dämpfungs)effekte)

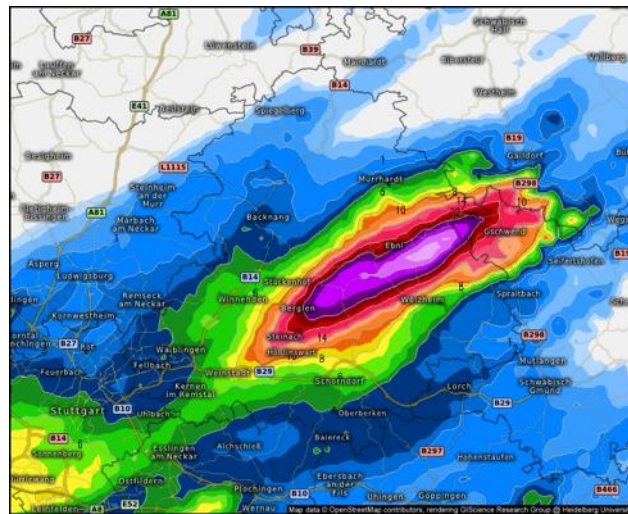
Radarvorhersage (max. +2h) inkl. Ensemble

APA

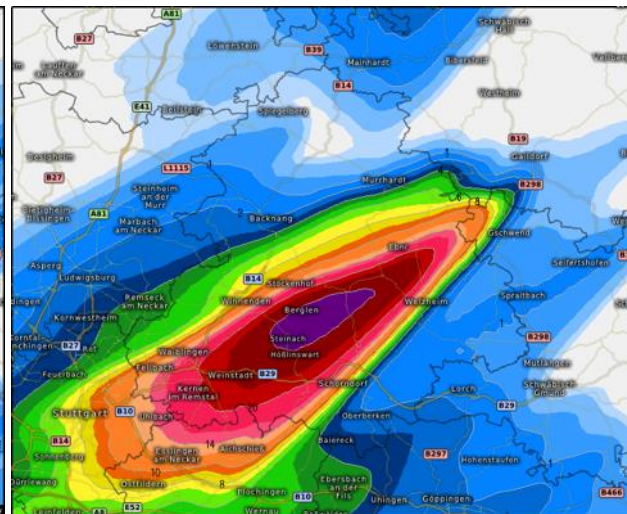


- Testfall mit Variation von 25 Ensemble-Membren
- Sturzflut im Wieslauf-Tal (Rems-Murr-LK) am 02. Juni 2024 (50-60 mm/h)
- Prognose mit radar-diagnostizierter Verlagerung zu niedrig und zu gestreckt

1km, kalib. RR1h



Prognose +1h (ENS post-proz.)



Zugvektoren (Radardiagnose)



Niederschlagssumme, 1std (mm)

1 hour Precipitation (mm, full ENS wgt_max)

Radar reflectivity motion (masked, km/h)

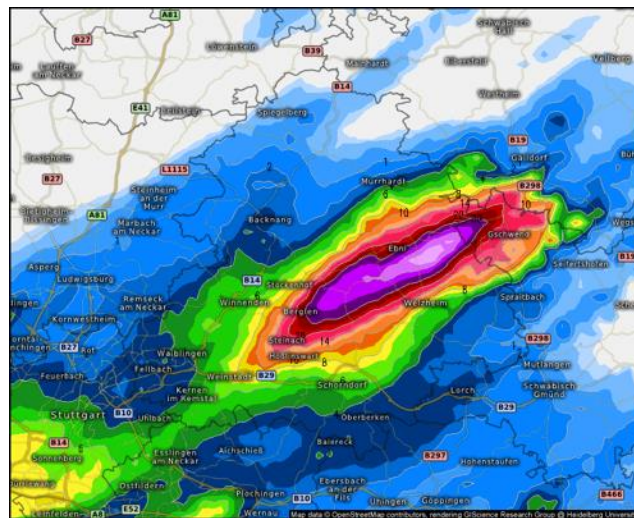
Radarvorhersage (max. +2h) inkl. Ensemble

APA

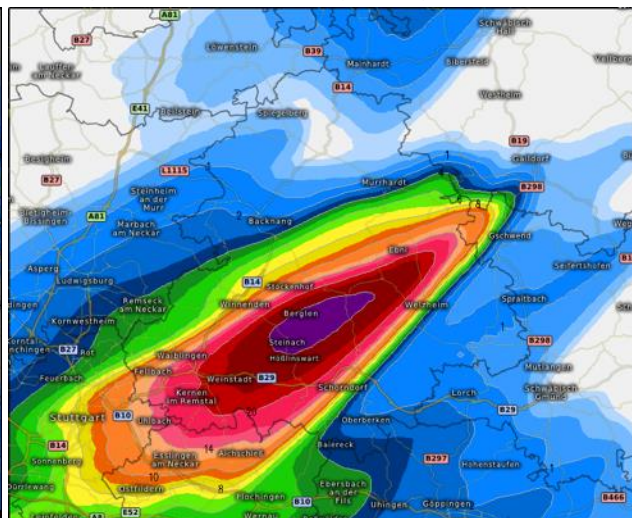


- Modifikation der originalen Ensemblemember
- Sturzflutereignisse oft durch „back-building“ (BB), also rückseitige Neubildung
- mit modellbasierter Wahrscheinlichkeit für back-building (Verlangsamung)

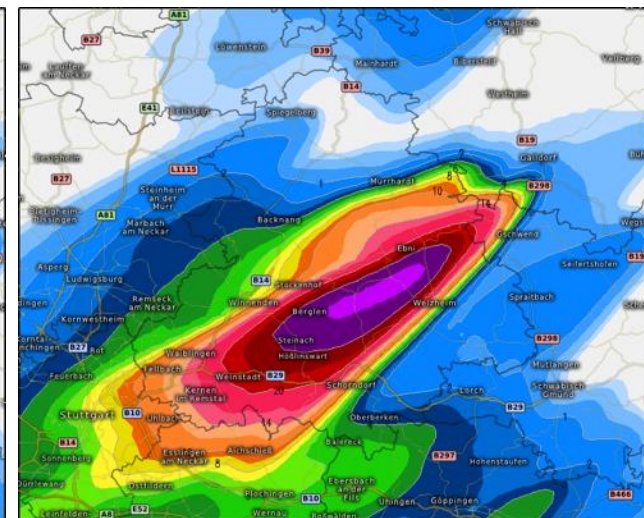
1km, kalib. RR1h



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

Rems-Murr-Kreis
Super HD Mesoanalyse

Q & K
kachelmannwetter.com
NETTER HD

Nowcast | run: Sun, 02 Jun 2024, 19Z

kachelmann.

Nowcast | run: Sun, 02 Jun 2024, 19Z

kachelmann.

Bemessungsniederschläge aus Radardaten

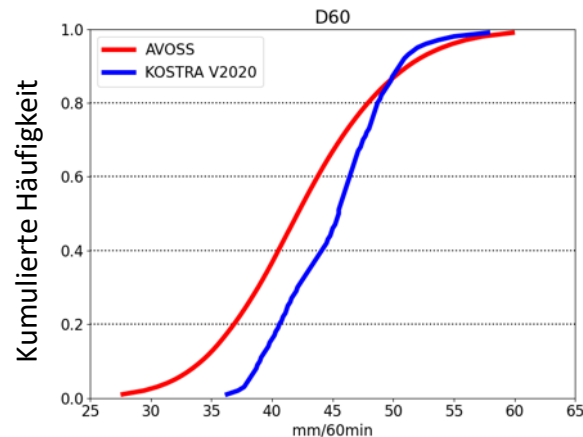
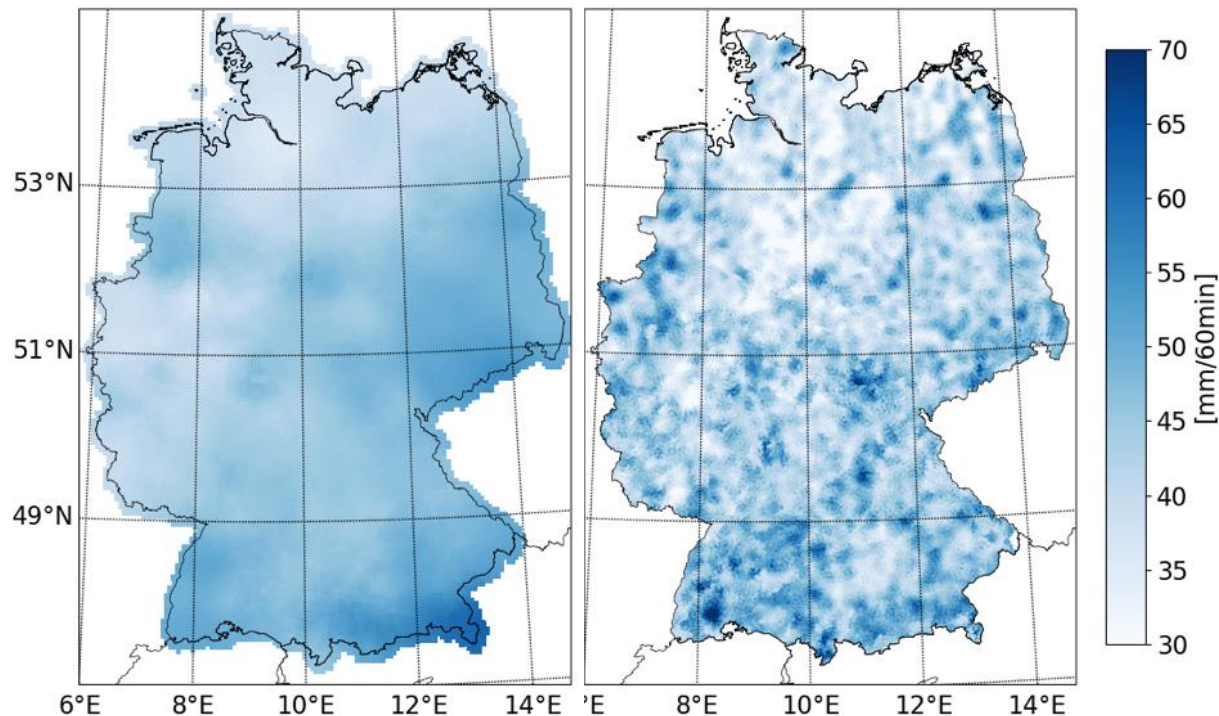
APA



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 und Starkregenindex (SRI)

APA



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

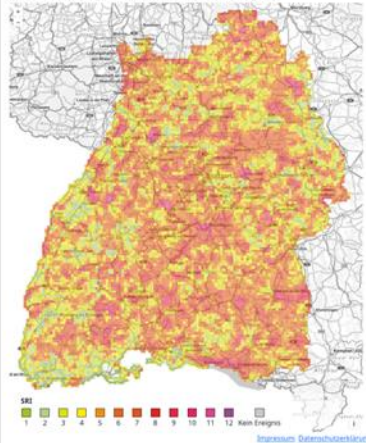
Ansatz ermöglicht quasi-Echtzeit-Klassifizierung von Radarvorhersagen

Ereignis im EZG der Wieslauf (BW) vom 02.Juni 2024

Niederschlagssumme

SRI

Klassifizierte Starkregenereignisse
Karte des Starkregenindex (SRI) vom Top 1 Ereignis



Ereignis-Parameter

Wählen Sie die Starkregen-Daten aus, die auf der Karte angezeigt werden sollen, um für einen spezifischen Punkt eine Übersicht aller klassifizierten Starkregenereignisse zu erhalten. Klicken Sie einfach auf die Rasterzelle in der Karte. Mehr Informationen zu den zugrundeliegenden Daten und der Klassifizierung finden Sie unter [Methoden](#).

Parameter: Starkregenindex (SRI) des Ereignisses

Ereignis: 1

Hintergrund & Transparenz

Hintergrund: Grau-BaseMap.de

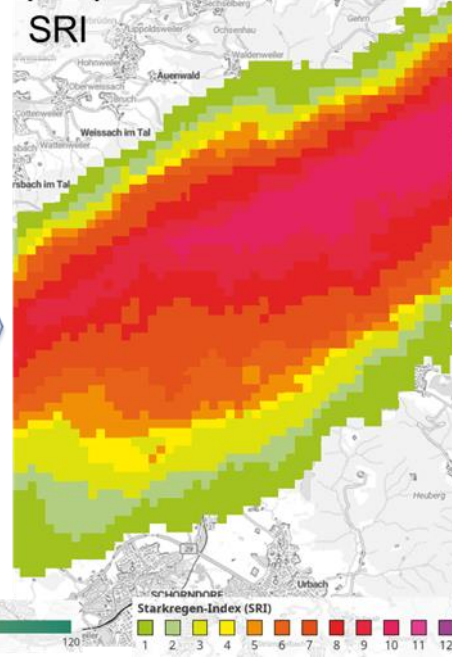
Deckkraft: 57



SRI-BW
Klassifizierung von
Starkregenereignissen für Baden-
Württemberg

Niederschlagssumme in mm

0 24 48 72 96 120



el für ein
hrliches
schlags-
s

S und
IM sind

blemittel
Member)

Sturzflutindex (SFI)

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

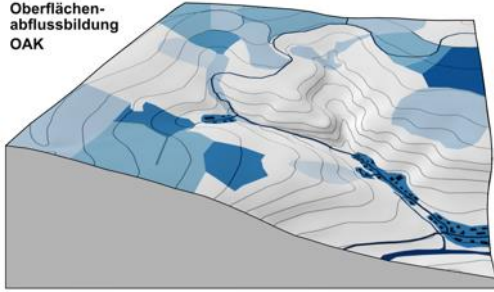


Vorgehen Sturzflutindex

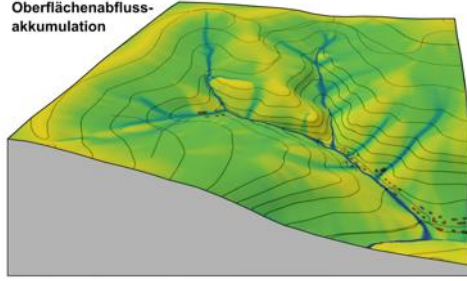
AP B



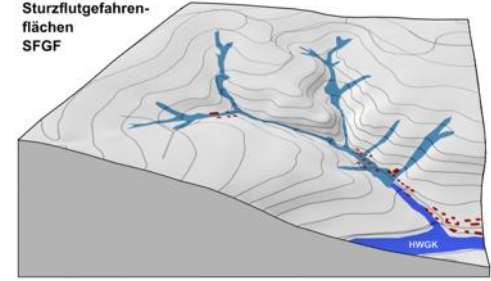
Oberflächen-
abflussbildung
OAK



Oberflächenabfluss-
akkumulation



Sturzflutgefahren-
flächen
SFGF

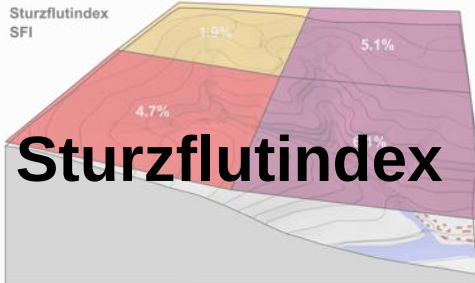


Verteilte, prozessbasierte hydrologische Modelle die alle relevanten Abflussprozesse berücksichtigen (z.B. RoGeR, LARSIM)

Div. hydraulische Modelle oder neu entwickeltes Modell

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

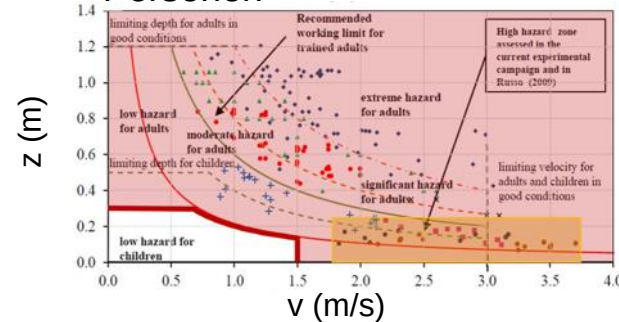
Sturzflutindex
SFI



Sturzflutindex

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

Personen



Sturzflut-Index (SFI)

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

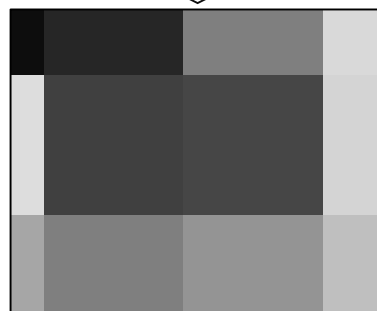
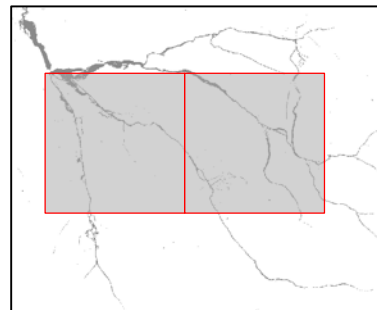
Flächenanteil SFGF	SFI	Gefährdung
< 0.5 %	0	Gering
≥ 0.5 %	1	Mittel
≥ 2.0 %	2	Hoch
≥ 5.0 %	3	Extrem

Absoluter Schwellenwert:

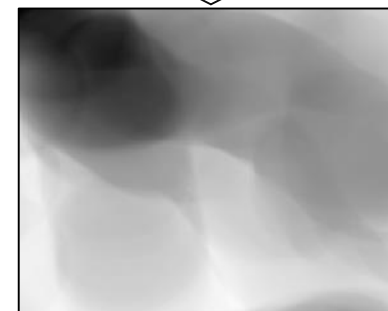
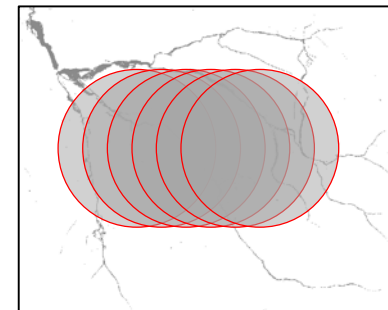
- Absolut: Prozentsätze SFGF-Anteile als Schwellenwerte
- Relativ: anhand von Jährlichkeiten
- Im Gegensatz zu Flusshochwassern liegen für Sturzfluten keine Jährlichkeiten vor (kein HQ_{100} -Sturzflutschutz)
- In Gebieten, die sehr „sturzflutanfällig“ sind, kann ein Ereignis geringer Jährlichkeit große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

Räumliche Darstellung

Mittelwert Grid



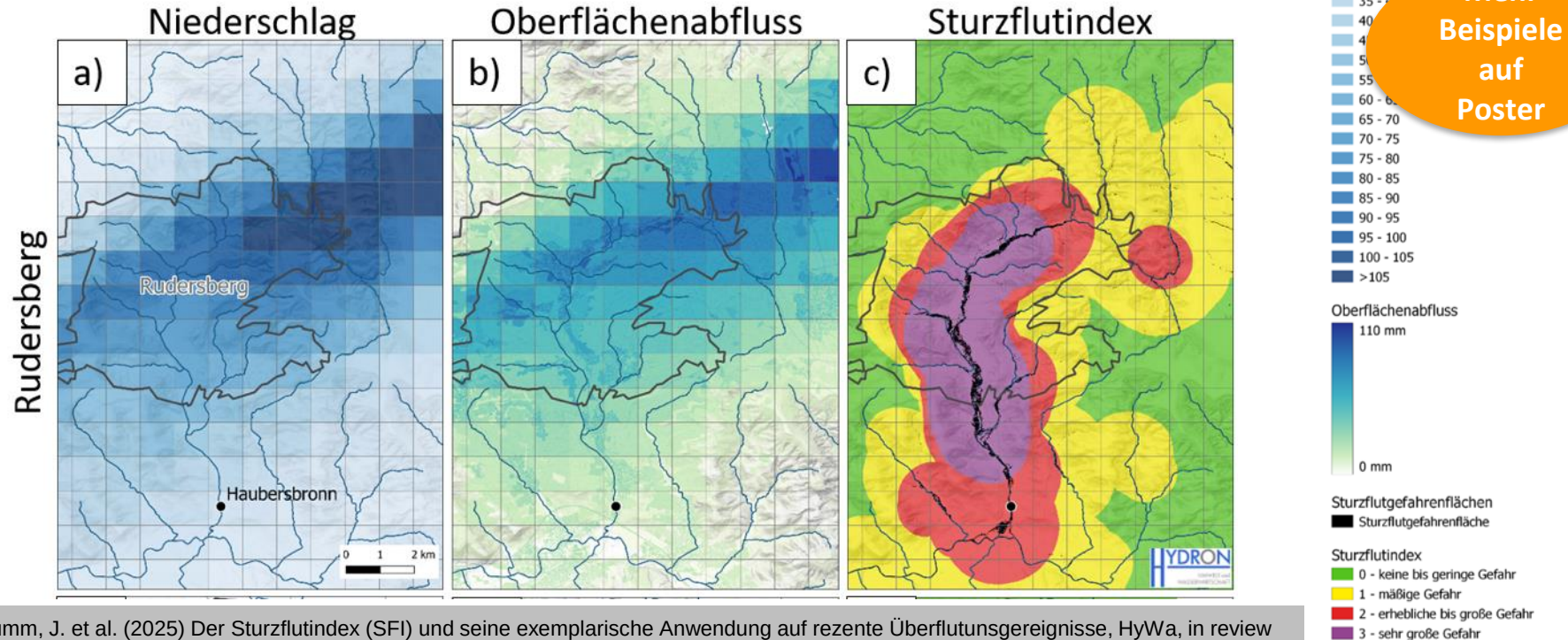
gleitender mittlerer Kreiswert



SFI zur Sturzflutwarnung (Wieslauf/Rudersberg 6/24)

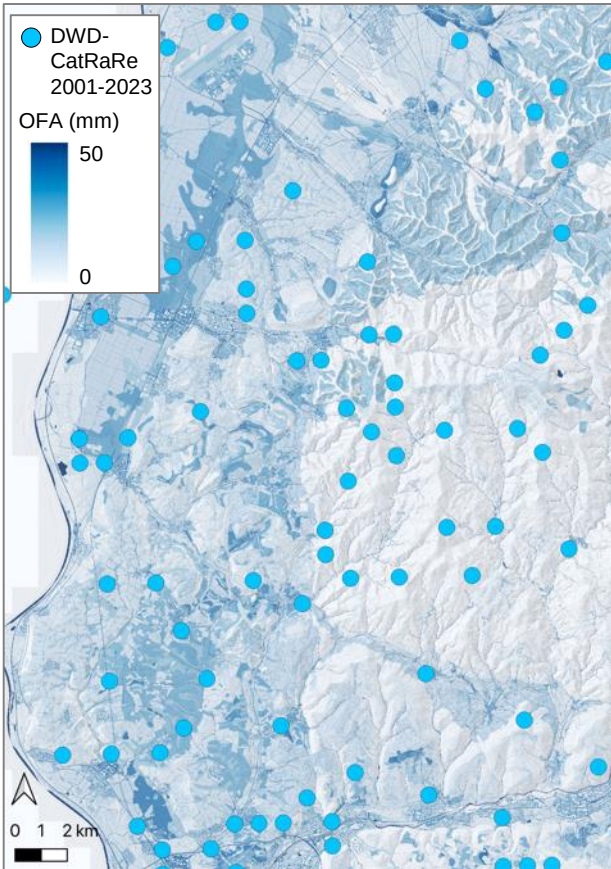


- Niederschlagsradardaten im 5-Min-Zeitschritt
- LARSIM: Anfangsbedingungen und Abflussbildung
- Berechnung der Abflussakkumulation (hier: AccRo) und Ermittlung SFGF und SFI

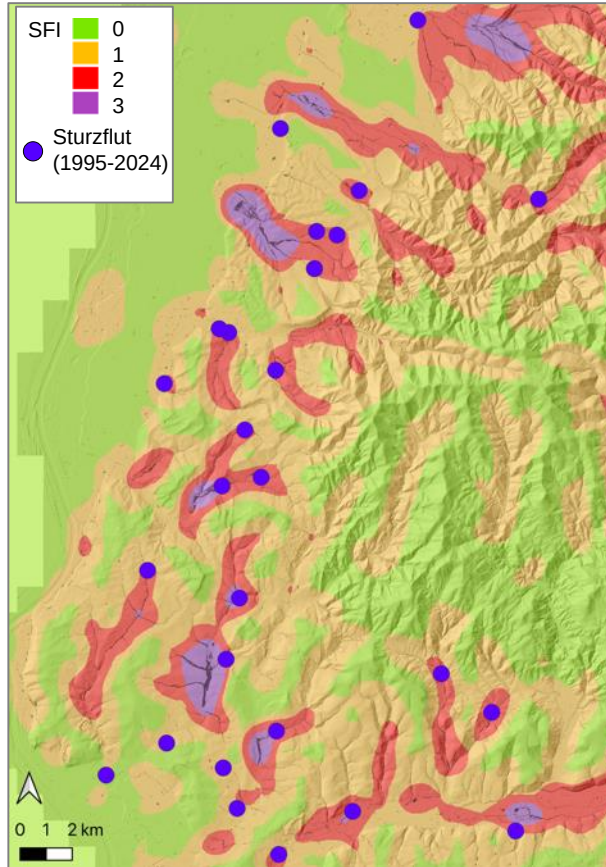


SFI zur Bewertung der großräumigen Sturzflutanfälligkeit

Oberflächenabfluss und beobachtete Starkregenereignisse



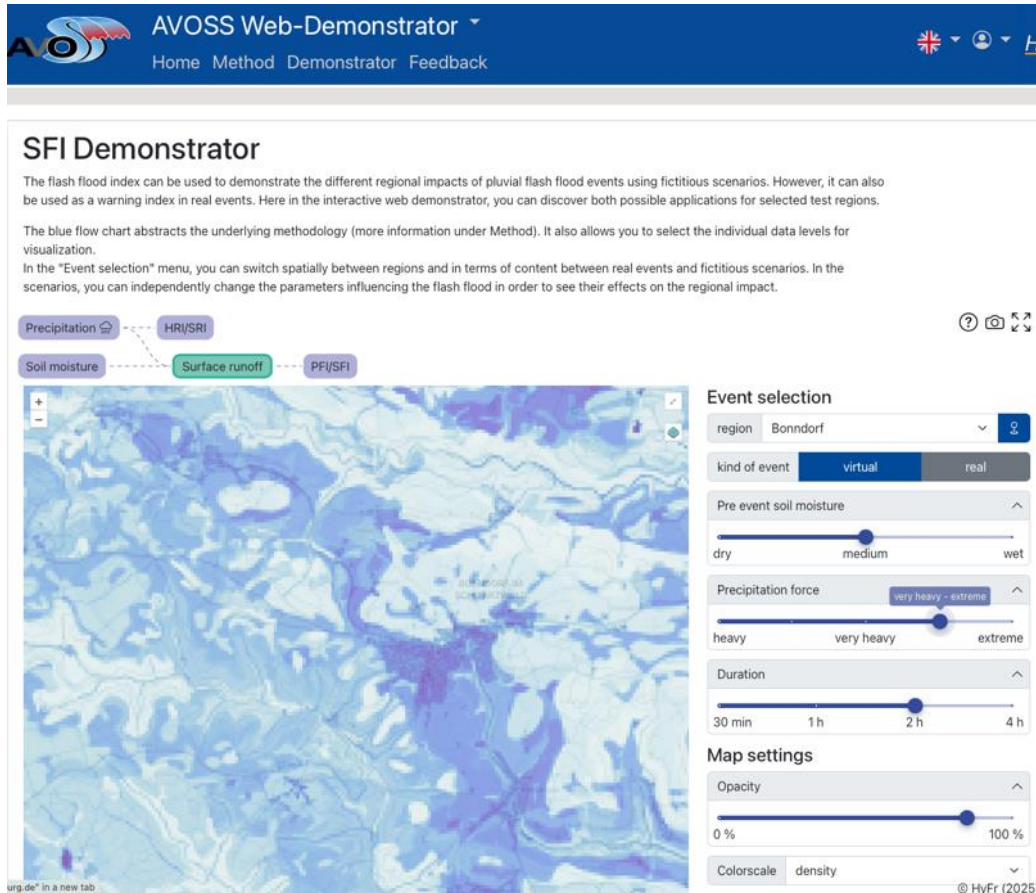
Beobachtete Sturzflutereignisse und SFI



- 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



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

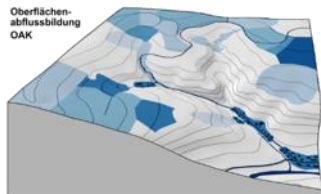
Demo

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

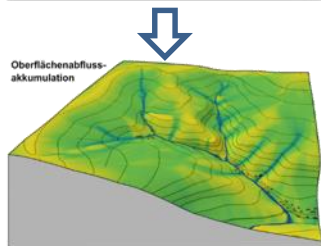


SFI – Herausforderung: Echtzeitvorhersage



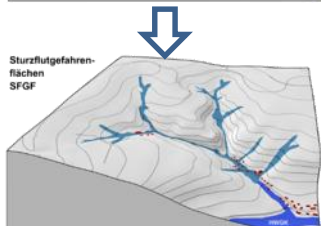
Hydrologie:
Bildung von
Oberflächenabfluss

Op. LARSIM ✓

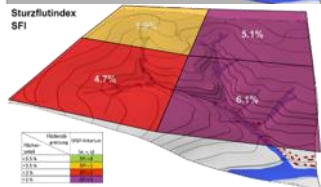


Hydraulik:
Akkumulation von
Oberflächenabfluss

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

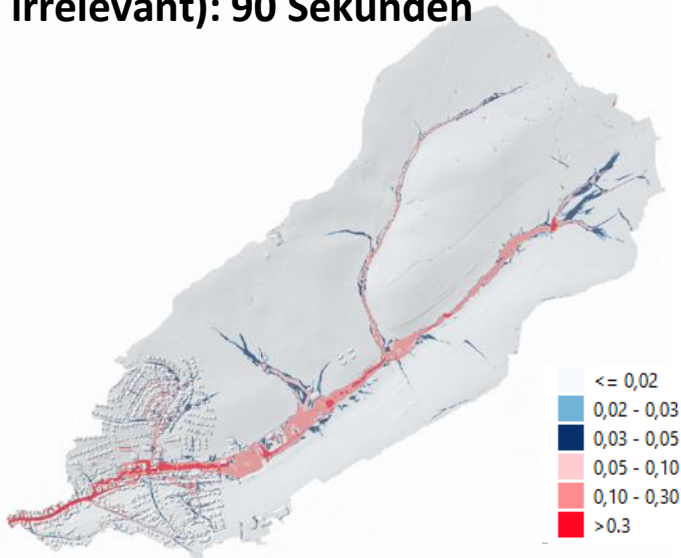
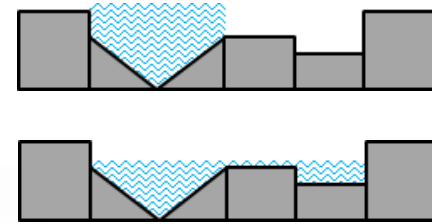
Maximale Geschwindigkeit

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

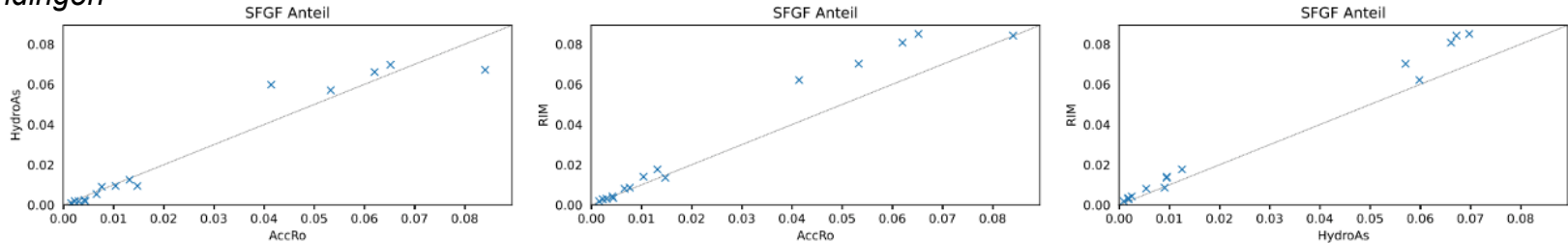


Beispiel Wasserstand in Meter:
Einzugsgebiet Riedgraben (3km²), SOA = 19.5mm, Ereignisdauer: 135 min
Links AccRo, Rechts RIM2D (GPU basiertes hydraulisches Modell)

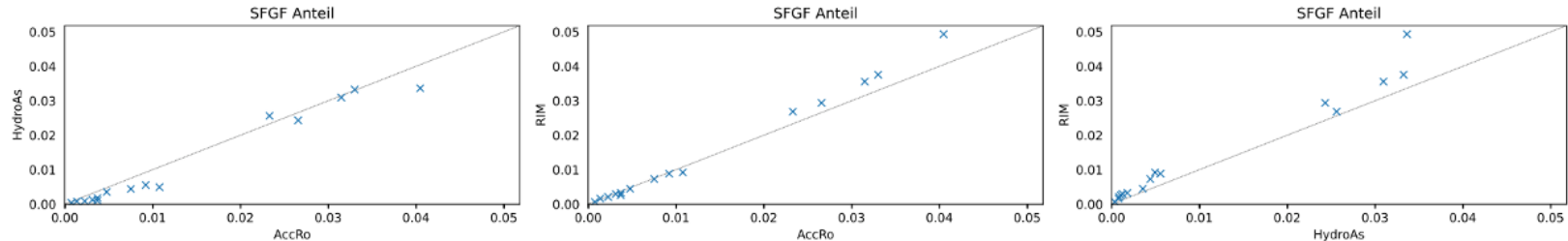
Großräumige Vorhersage in wenigen Minuten möglich (Bundesland)
Auch sehr gut geeignet für Großräumige Sturzflutanfälligkeit (SF)
Sehr gut im Vergleich zu etablierten Modellen wie RIM2D oder HydroAS

Demo

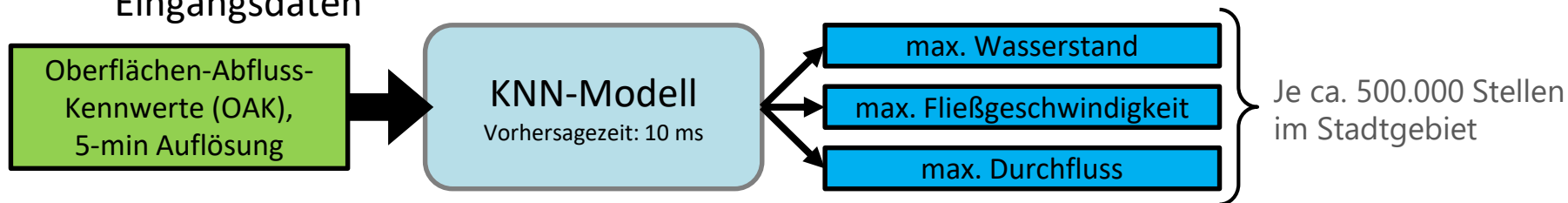
Emmendingen



Bonndorf



- Künstliche neuronale Netze (KNN) für zwei Einzugsgebiete (Emmendingen, Karlsbad) trainiert
 - Einzugsgebietsfläche je $> 25 \text{ km}^2$, urbane Vorhersagegebiete $3 - 10 \text{ km}^2$
 - 2D-hydraulisch berechnete Überflutungsdatenbank mit $\gg 100$ Ereignisse
- Modellarchitektur:
 - 3 Neuronale Netze (max. Wasserstand, max. Fließgeschwindigkeit, max. Durchfluss)
 - Räumliche Oberflächenabflusskennwerte ($100\text{m} \times 100\text{m}$, 5 min) als Eingangsdaten



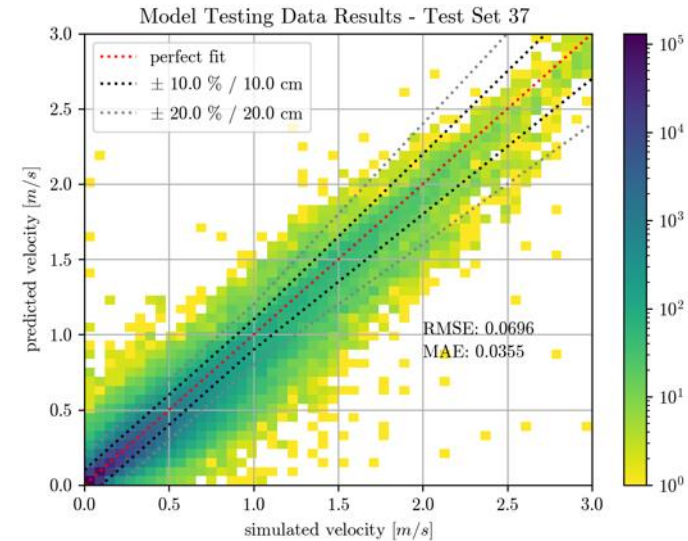
- **Erstmals Vorhersage von Fließgeschwindigkeiten und Durchflüssen mittels KNN**

Evaluierung der KNN

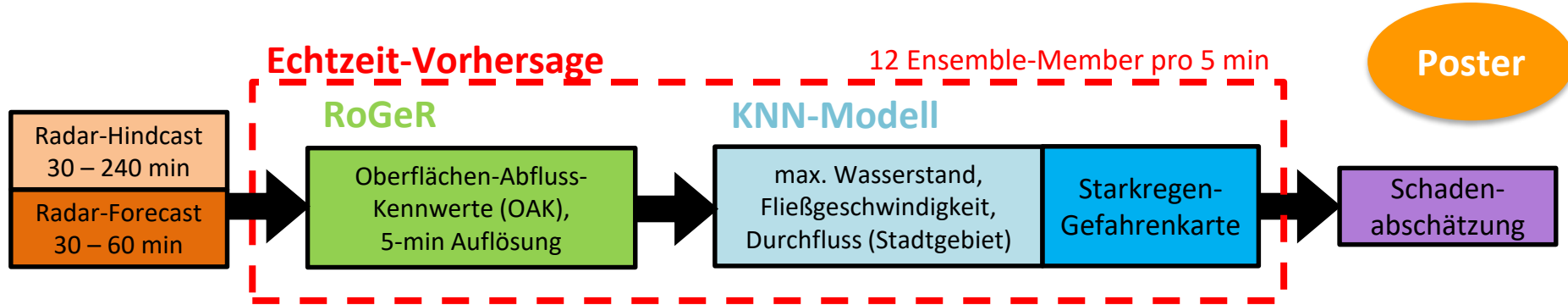
Vergleich max. Fließgeschwindigkeiten: **KNN** - 2D-Hydraulik (HydroAS):



Vergleich an allen 500.000 Stellen:

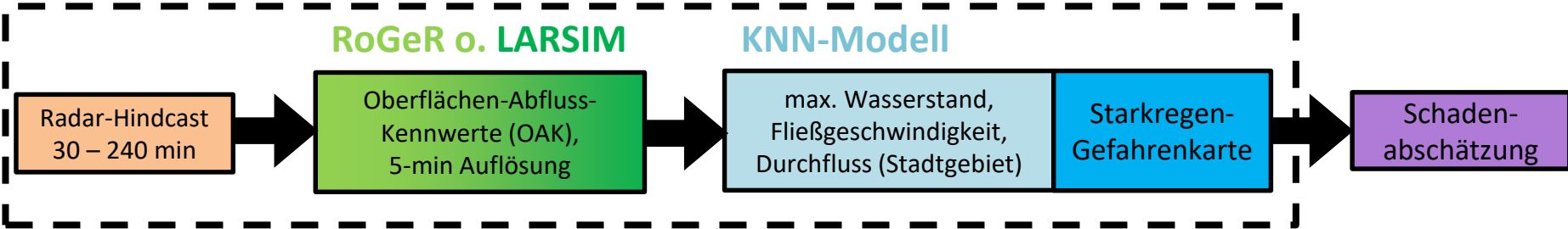


Vorhersageunsicherheit: Modellkette zur Echtzeit-Vorhersage



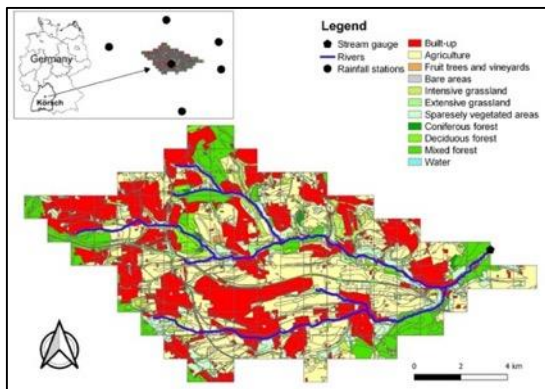
Unsicherheits-Quantifizierung:

> 2500 Ensemble-Member pro Tag



Körsch EZG

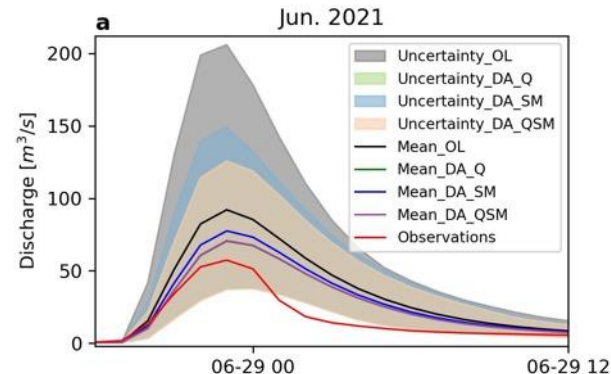
- **Verstädtertes EZG**, 123 km²
- **anfällig** für die Entstehung von **Sturzfluten**
- 1km reguläres **LARSIM-Gitter** mit hydrologische Reaktionseinheiten



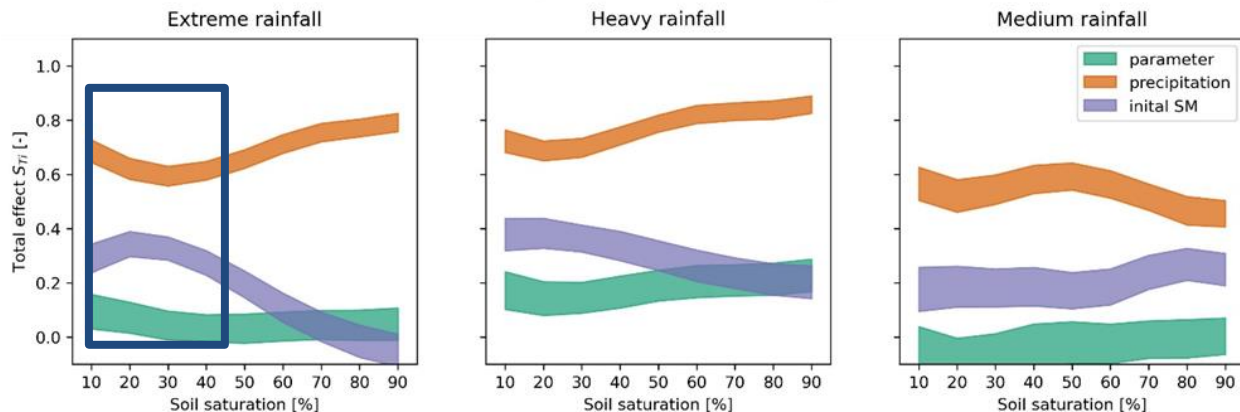
Datenassimilierung (DA)

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



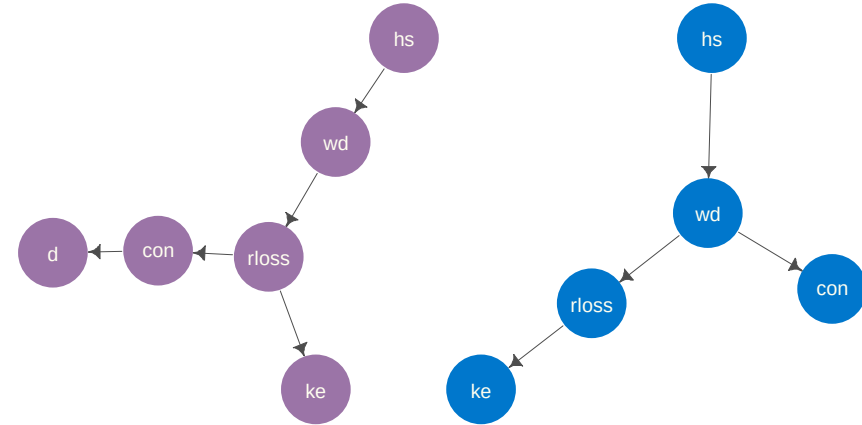
Wann ist Datenassimilierung (DA) sinnvoll?

- Varianzbasierte **Sobol'-Indizes**
- **Gesamteffekt S_{Ti}** : 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)

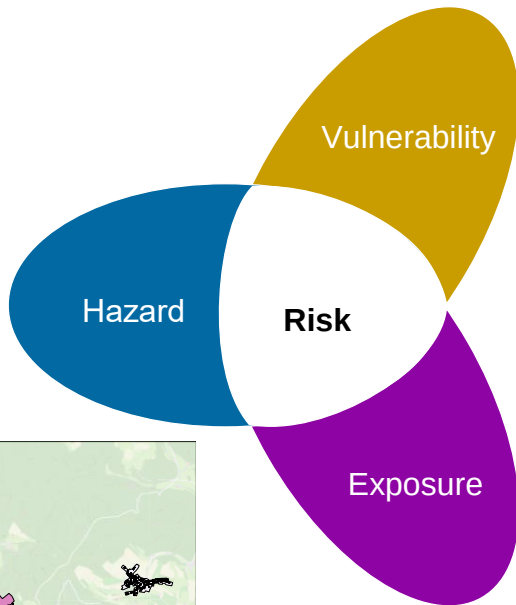
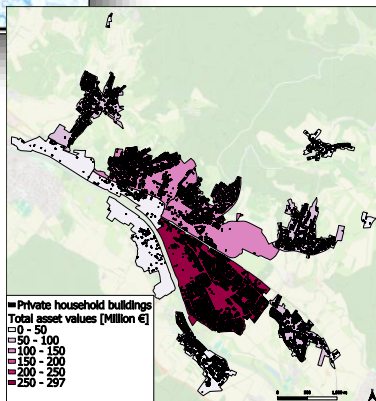
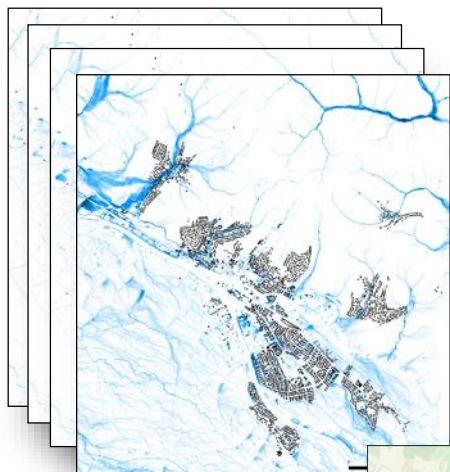
Poster

Risikokarten zur quantitativen Schadensvorhersage

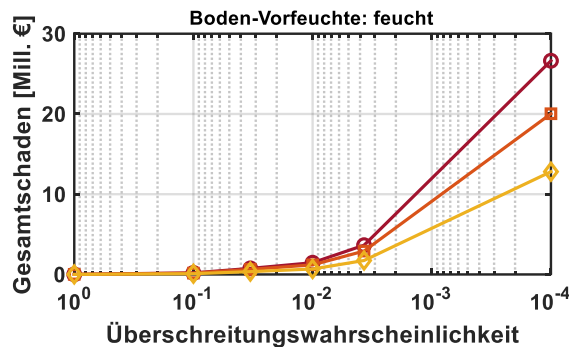
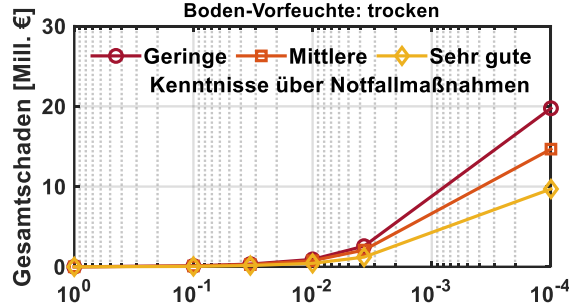
AP D



Risikoanalyse in Emmendingen



Risikokurven - Privathaushalte in Emmendingen
Boden-Vorfeuchte: trocken



Sehr gute Kenntnisse über Notfallmaßnahmen 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 ist 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 VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



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

