

Workshop

Potential des Sturzflutindex SFI für die operationelle Vorhersage und Warnung

Julia Krumm, Ingo Haag und das gesamte AVOSS Team



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1) Einführung: Der Sturzflutindex SFI

- Motivation, Anforderungen, Konzeption

2) Mögliche Sturzflutwarnung für die breite Öffentlichkeit auf Basis des SFI

- Werkzeuge für mögliche operationelle Anwendung
- Beispielergebnisse Nachrechnung von Ereignissen
- Beispielergebnisse für Vorhersagetests
- Umgang mit Unsicherheiten
- Verständnisfragen & Diskussion

Der Sturzflutindex SFI Motivation, Anforderungen, Konzeption

Motivation: Wozu brauchen wir einen Sturzflutindex

Bestehende Systematik für **Starkregen** – z.B. **Starkregenindex (SRI)**:

- Bezieht sich auf Jährlichkeit des Niederschlags
- Aber nicht jeder Starkregen erzeugt eine Sturzflut

→ Ob eine Sturzflut auftritt ist neben dem Niederschlag stark von **hydrologischen / hydraulischen Einflüssen** abhängig

Bestehende Systematik für **Flusshochwasser (fluviale HW)**:

- HQ-Jährlichkeiten + Hochwasser-Vorhersage / -Warnung
- Bezieht sich auf Überschwemmung aus dem Gewässer
- Es gibt auch lokale Sturzfluten, die zu keinem signifikanten Hochwasser in (größeren) Gewässern führen

→ Bei der Sturzflut geht die Gefährdung nicht primär vom Gewässer aus sondern von **wild abfließendem Wasser** in der Fläche

- Es gibt noch keine geeignete Systematik für die Klassifikation von Sturzfluten
- Der Sturzflutindex SFI soll diese Lücke schließen
- Ein zentrales Ziel ist dabei die großräumige operationelle Warnung



Auswertung historischer Ereignisse in
Baden-Württemberg (Hengst, 2019)



- keine Sturzflut und kein Fluss-HW
- nur Sturzflut
- nur Flusshochwasser
- Sturzflut und Flusshochwasser

Anforderungen an den SFI und Konsequenzen

Herausforderungen für einen aussagekräftigen Sturzflut-Gefahrenindex

Allgemein:

- Wie kann die Gefahr einer Sturzflut quantitativ bewertet werden?
- Sturzfluten sind das Resultat einer komplexen Prozesskette

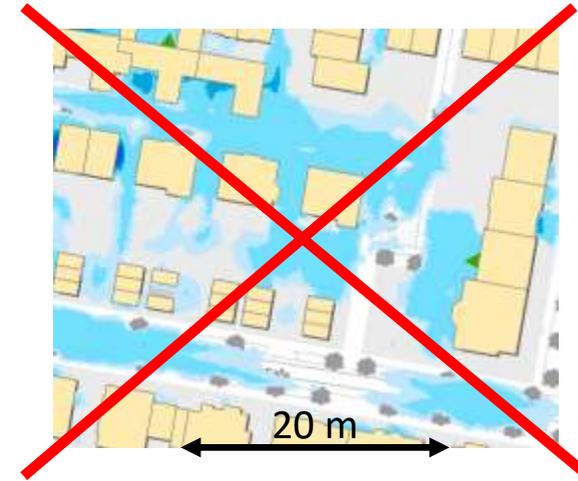
Operationelle Warnung:

- Große Unsicherheiten vor allem bei der Niederschlags-Vorhersage (Menge und Lage)
- Extrem kurze Vorwarnzeiten bei Vorhersagen

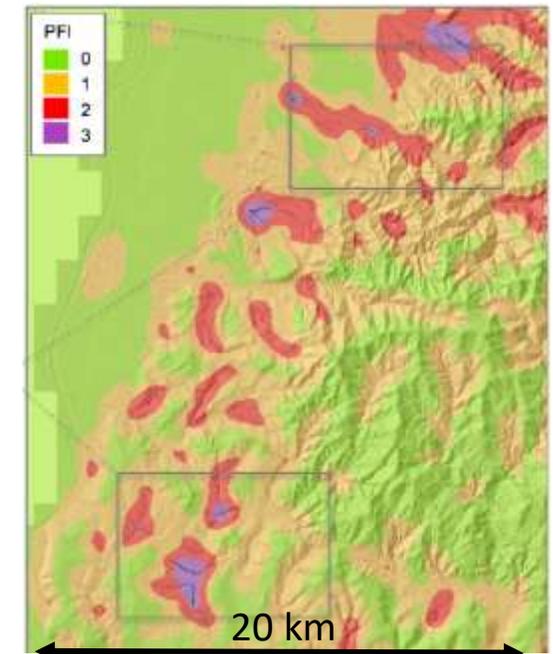
Konsequenzen für den neuen Sturzflutindex SFI

- Bezug auf Gefahr durch wild abfließendes Wasser
- Vollständige Prozess- /Modellkette: Nied. → Hydrologie → Hydraulik
- Einfacher, robuster Gefahrenindex (großräumig, räumlich unscharf, klassifiziert)
- Sehr recheneffiziente Modelle, ggf. mit zulässigen Vereinfachungen

Konzeption / Definition
des SFI



Quelle: Ausschnitt SRGK
der Stadt Karlsruhe



SFI eines Bodenfeuchte-Niederschlag-Szenarios
für einen ca. 1.500 km² großen Ausschnitt von
Baden-Württemberg (Weiler et al. 2025)

- ➔
1. Konzeption und Definition des SFI
 2. Modelle zur möglichen Sturzflutwarnung mit dem SFI → 2. Teil

SFI-Konzept: Bezug zur Gefahr durch wild abfließendes Wasser

- SFI soll die Gefahr erfassen, die durch wild abfließenden Oberflächenabfluss entsteht.
- Hierfür können keine Durchflüsse in Gewässern, Abflusshöhen o.ä. verwendet werden.
- Notwendig sind **Flächeninformationen** zur Gefährdung durch **wild abfließendes Wasser!**

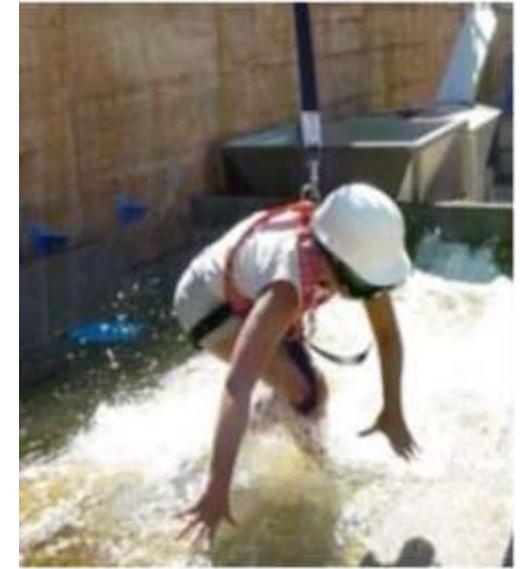
→ Definition von **Sturzflutgefahrenflächen (SFGF)**:

- die Sicherheit/Standfestigkeit von Fußgängern ist gefährdet
- die Stabilität von Autos ist gefährdet ist
- Experimentell ermittelte Grenzwerte für z-, v- und q-Kriterien wurden aus der Literatur entnommen und mit SRRM-Fachleuten abgestimmt

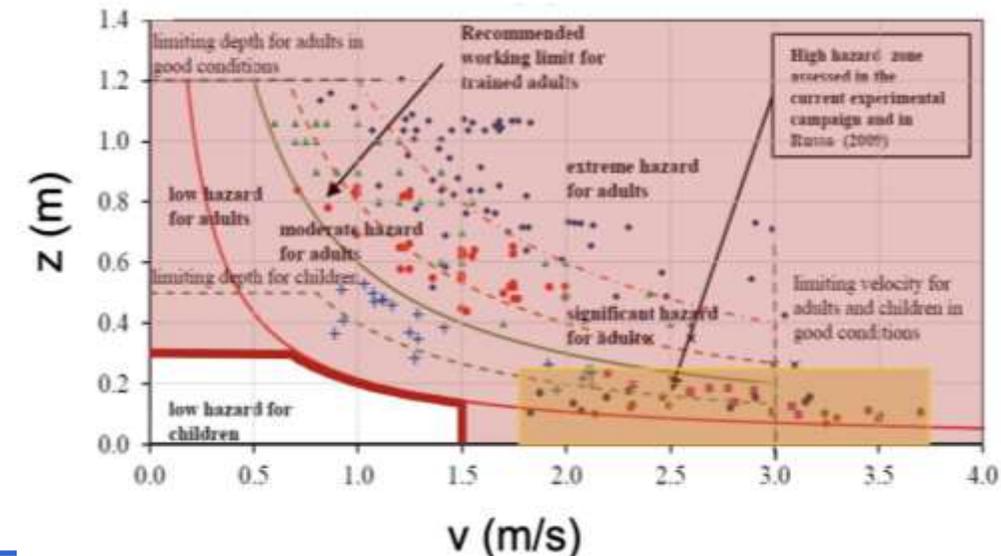
→ Gefahr durch wild abfließendes Wasser liegt vor, wenn der Grenzwert bei mindestens einem der Kriterien überschritten ist:

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

→ Unmittelbarer Bezug zur Gefährdung durch wild abfließendes Wasser



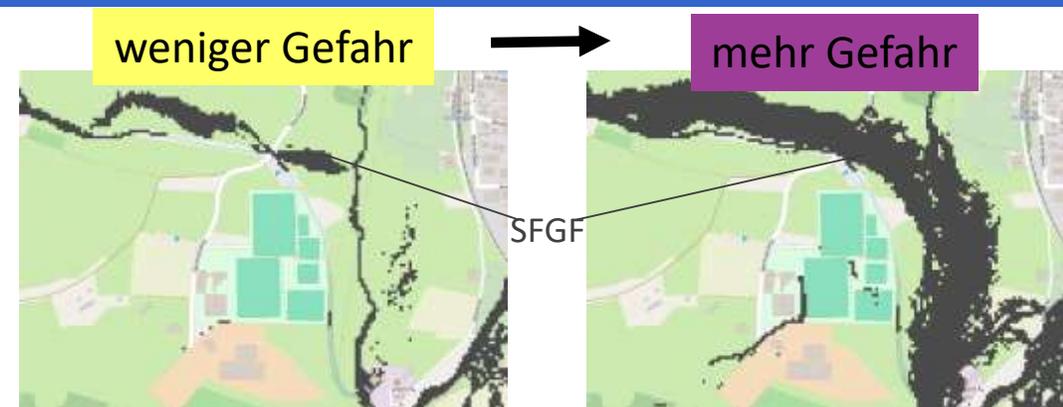
Experimentelle Ermittlung von Stabilitätskriterien für Fußgänger (Martínez-Gomariz et al., 2018)



Vergleich unserer Grenzwerte mit experimentellen Ergebnissen für Fußgänger aus Martínez-Gomariz et al. (2018)

SFI-Konzept: Von SFGF zum robusten Gefahrenindex SFI

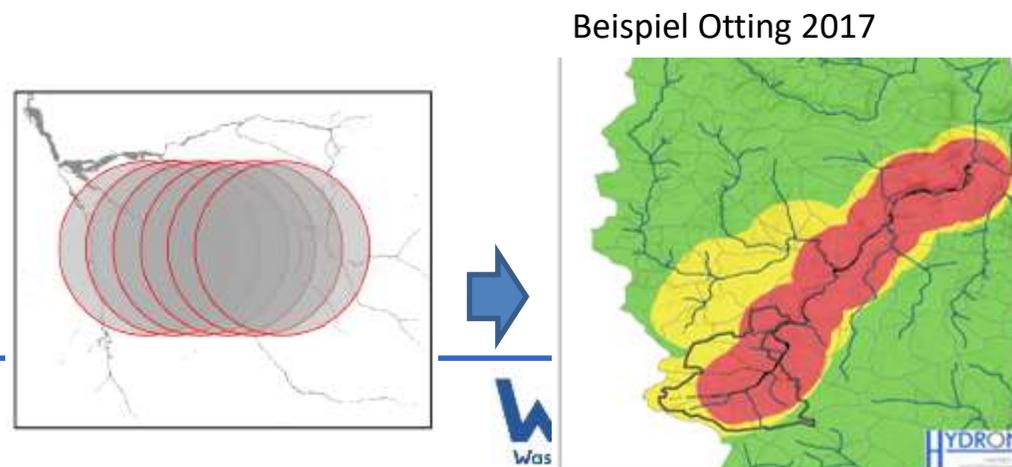
- Wie gelangt man von SFGF zu einem einfachen, robusten und großräumigen Gefahrenindex?
- Grundprinzip: Je mehr SFGF in einem Gebiet auftreten, umso größer ist dort die Gefahr
- Der Sturzflutindex (SFI) wird daher als Prozentanteil von Sturzflutgefahrenflächen (SFGF) an einer Bezugsfläche definiert



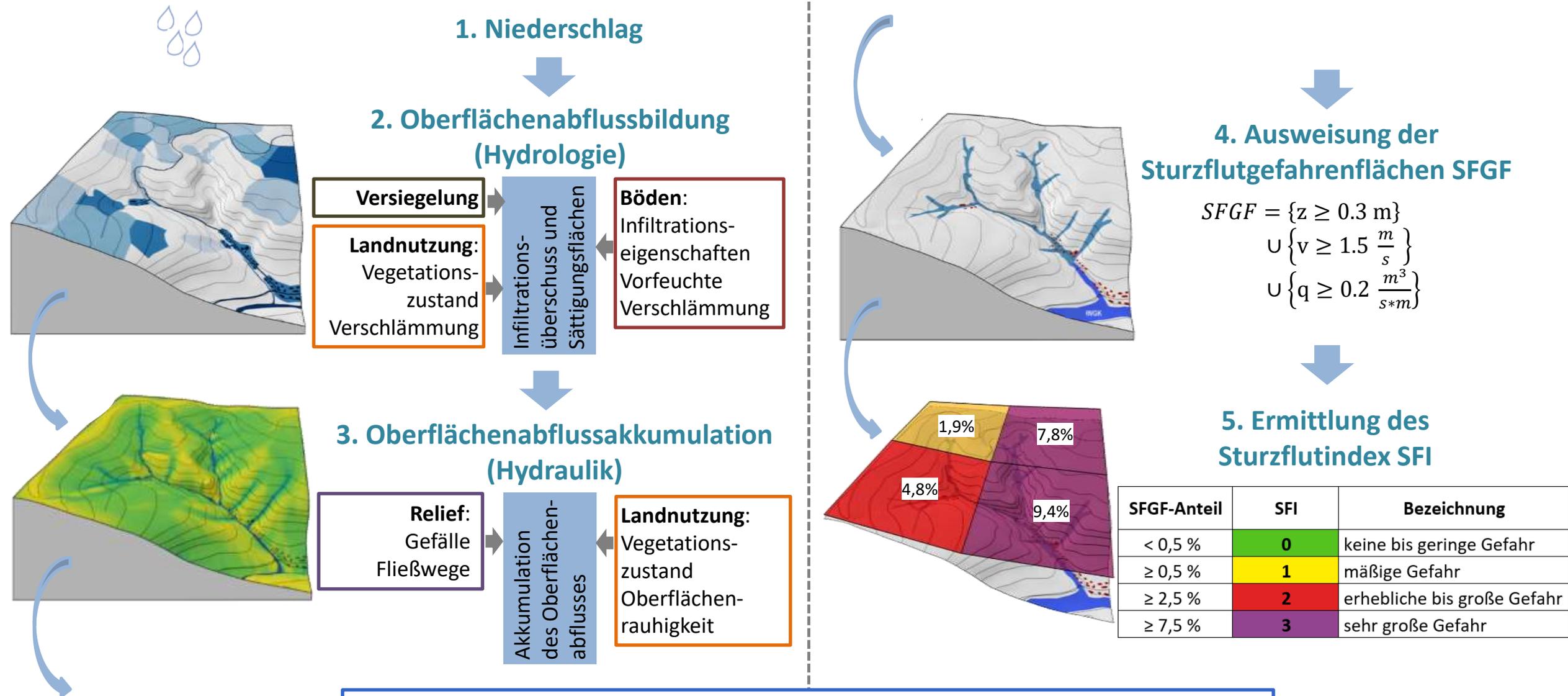
- Klassifikation mittels Schwellenwerten für **SFGF-Anteile** (Einordnung und Validierung an Ereignissen und Szenarien)
- SFI = klassifizierter, dimensionsloser Index (einfach; 4 Klassen; nutzerabgestimmt)
- Bezugsfläche: räumlich „gleitende“ Fläche einheitlicher Größe zur Vermeidung von Rand- und Skaleneffekten

| SFGF-Anteil | SFI | Bezeichnung |
|-------------|-----|-----------------------------|
| < 0,5 % | 0 | keine bis geringe Gefahr |
| ≥ 0,5 % | 1 | mäßige Gefahr |
| ≥ 2,5 % | 2 | erhebliche bis große Gefahr |
| ≥ 7,5 % | 3 | sehr große Gefahr |

→ **SFI**: Großräumiger (räumlich unscharfer) Gefahren-Index mit robuster Klassifikation



SFI-Konzept: Zusammenfassung



- SFI ist die Basis für eine mögliche operationelle Sturzflut-Warnung
- Nachfolgend: Weitere Grundlagen und Ideen zur möglichen Umsetzung

Mögliche Sturzflutwarnung für die breite Öffentlichkeit auf Basis des SFI

Herausforderungen Sturzflutvorhersage

Operationelle Warnung:

- Große Unsicherheiten vor allem bei der Niederschlags-Vorhersage (Menge und Lage)
 - Extrem kurze Vorwarnzeiten bei Vorhersagen
- Einfacher, robuster Gefahrenindex (großräumig, räumlich unscharf, klassifiziert)
 - Sehr recheneffiziente Modelle, ggf. mit zulässigen Vereinfachungen

- Unterschiede zu Starkregengefahrenkarten (offline, Szenarienbetrachtung)
- Ergänzung von Starkregengefahrenkarten im Starkregenfall → 3.Teil



Werkzeuge zur möglichen Echtzeit-Vorhersage des SFI

Haupt Herausforderung einer Echtzeit-Vorhersage: Hinreichende Genauigkeit, bei extrem kurzer Rechenzeit

1. Niederschlag



- Radardaten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung (5 oder 15 Min)
- Hauptquelle der Unsicherheit (räumlich und Menge)
- Unsicherheit steigt mit Vorhersagetiefe

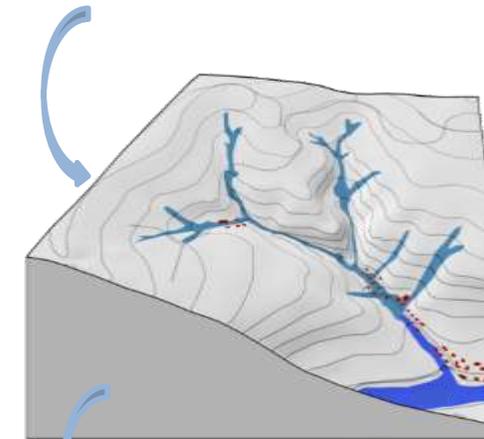
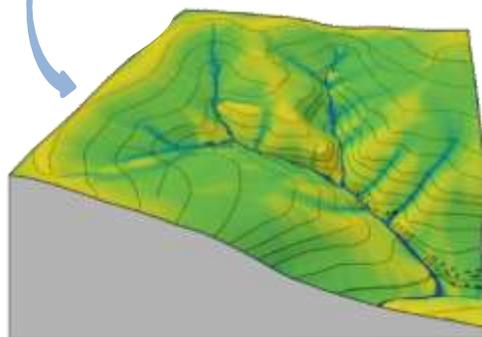
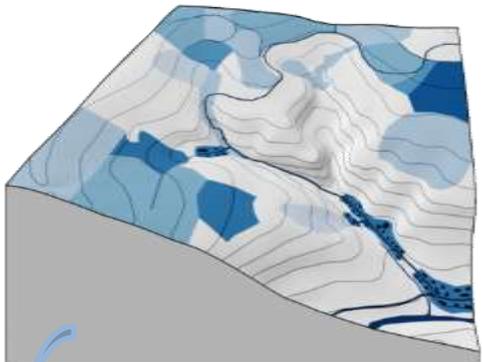
2. Oberflächenabflussbildung (Hydrologie)

→ z.B. LARSIM mit RoGeR-Infiltrationsmodul

- Räumliche Detailauflösung in Hydrotopen
- Zeitschrittweite variabel (hier: 5 Min.)
- Extrem recheneffizient
- Etablierte operationelle Datenflüsse
- Vorbedingungen werden operationell mitsimuliert

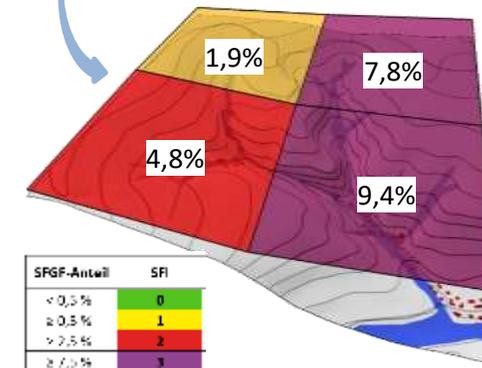
3. Oberflächenabflussakkumulation (Hydraulik)

- Etablierte Modelle haben zu lange Rechenzeiten (auch GPU-basierte wie RIM2D oder scenarify)
→ z.B. vereinfachtes Akkumulationsverfahren AccRo
- Gute Übereinstimmung mit etablierten 2D-Modellen
- Wesentlich recheneffizienter als etabl. 2D-Modelle



4. Ausweisung Sturzflutgefahrenflächen SFGF

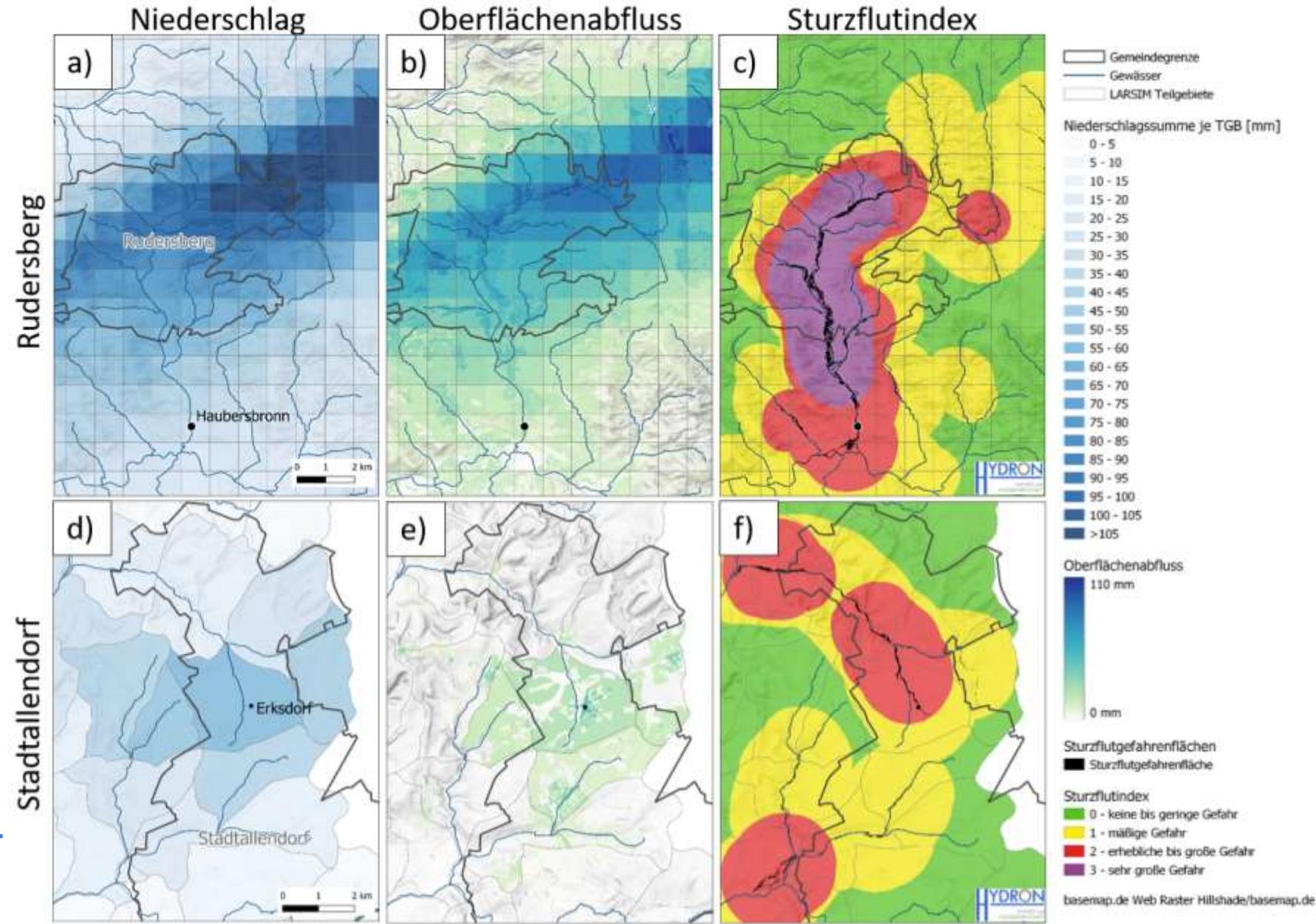
- Unmittelbares Ergebnis von AccRo
- Keine Rechenzeit



5. Ermittlung des Sturzflutindex SFI

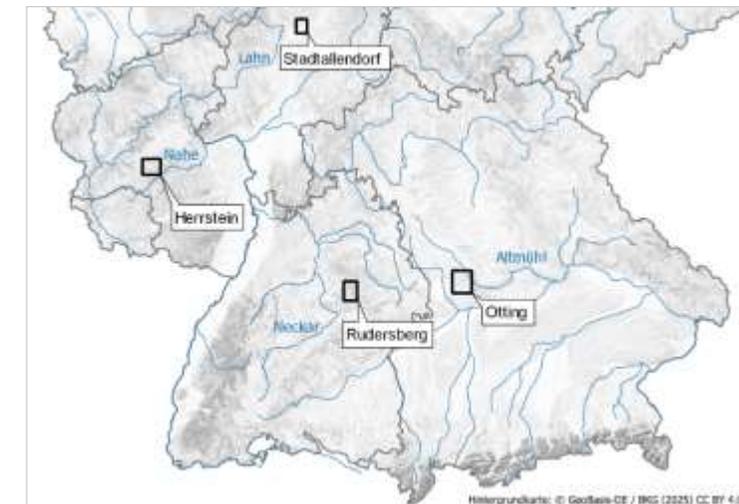
- Recheneffizientes Postprocessing
- z.B. Visualisierung als Karten

Beispielerggebnisse SFI: Hindcasts



Ermittlung des SFI für Ereignisse in vier Gebieten (100 – 300km²) in vier Bundesländern:

- Rudersberg 02.06.2024
- Stadtlendorf 11.08.2020
- Herrstein 27.05.2018
- Otting 15.08.2017



Folgerungen: Hindcasts

- Verwendete Werkzeuge sind recheneffizient
- Perspektivisch operationelle Anwendung der Modellkette realistisch
- untersuchten Ereignisse zeigen Einflussfaktoren jenseits der Niederschlagsintensität (z.B. Einfluss der Vorfeuchte -> Rudersberg, Lage der Niederschlagszelle -> Otting)
- SFI-Warnung hat einen Mehrwert gegenüber einer reinen Starkregenwarnung
- mit Methodik werden Ereignisse erfasst, die kein HW auslösen bzw. nicht am Pegel erfasst werden (z.B. Stadtallendorf)
- SFI-VHS könnte wie beabsichtigt HW-VHS ergänzen, Plausibilisierung flächenhafter Ergebnisse herausfordernd
- Ereignisse mit sowohl Sturzflut- als auch Hochwassercharakteristiken sind häufig
- Bewarnung mit Kombination aus Hochwasser- und Sturzflutwarnung sinnvoll
- aus Vergleich von SFI mit qualitativen Angaben zur Schwere der Ereignisse ergibt sich eine überwiegend realistische Klassifikation
- SFI als robuster Gefahrenindex geeignet, um flächendeckend Sturzfluten zu klassifizieren und zu bewarnen, Überprüfung anhand weiterer Ereignisse u. Szenarien notwendig

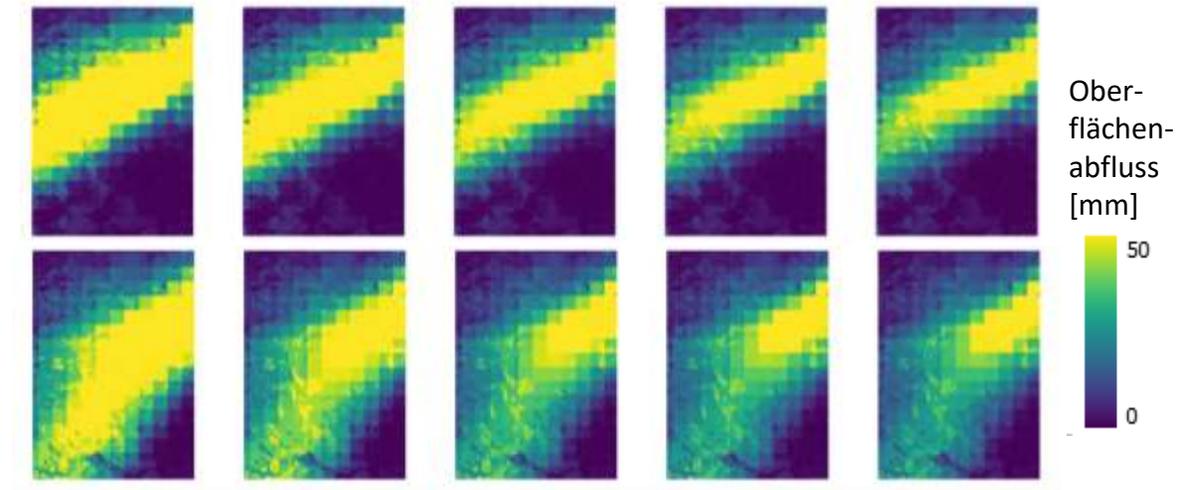
- aber für operationelle Sturzflutwarnung muss Unsicherheit der Niederschlagsvorhersagen zusätzlich berücksichtigt werden

*OA-Simulation & Post-prozessierung für Otting (300km²): < 60Sekunden
AccRo schneller als aktuelle GPU-basierte Modelle: wenige Minuten*

Nowcasts: Umgang mit Unsicherheiten

Verwendung von Nowcasts

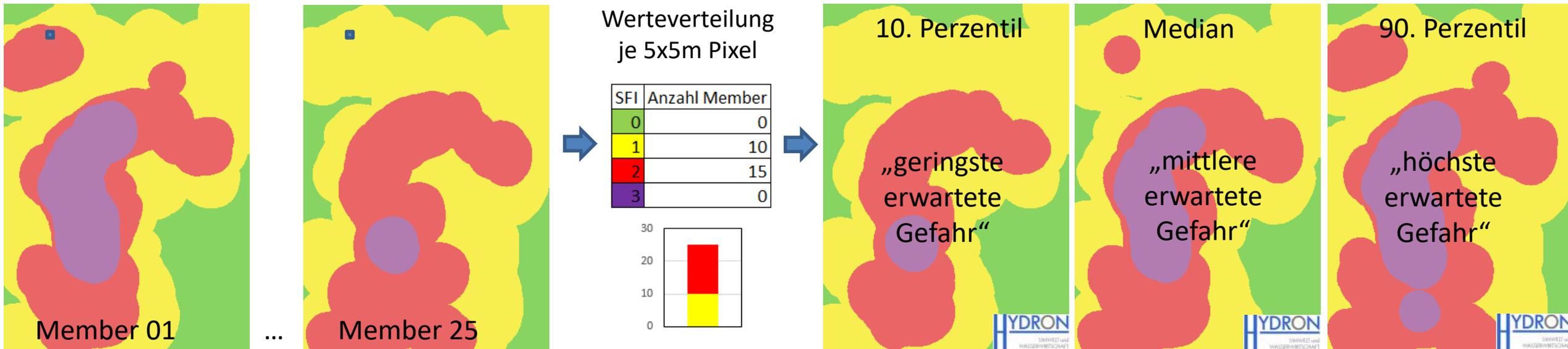
- 2h-Vorhersage (Kachelmann GmbH)
- Ensemble-Vorhersagen (25 Member)
- derzeit noch in Arbeit
- erste Ergebnisse (siehe auch Poster)
- Annahme, dass Niederschlagsunsicherheit weitgehend durch Ensemble abgedeckt ist



Nowcasts: Umgang mit Ensemble-Memberrn

Ansätze zum Umgang mit Memberrn:

- Verwendung aller Member -> erfordert optimierte Rechenzeit, ggf. parallele Berechnungen
- „Auswirkungsbasierte“ Vorauswahl von Memberrn -> erfordert gebietsspezifische Vorarbeiten, Auswirkung räumlich differenziert
- nicht Auswahl eines „repräsentativen“ Members, sondern Weiterverwendung mehrerer Member
- Ansätze zur Handhabung/Kommunikation der **flächenhaften** Bandbreiten/Unsicherheiten benötigt
- Warnung basierend auf Wahrscheinlichkeit, dass ein Gebiet getroffen wird

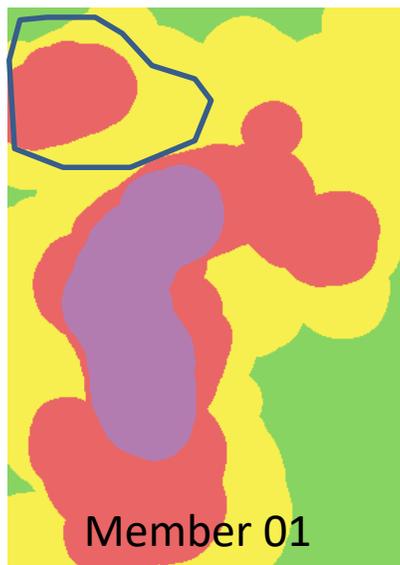


Nowcasts/Vorhersagen: räumliche Auflösung

Kartendarstellung kann für Nowcasts wie im dargestellten Beispiel sinnvoll sein, d.h.

- bei Vorhersagezeitpunkt kurz vor Ereignis
- wenn Ensemble-Member relativ gut übereinstimmen

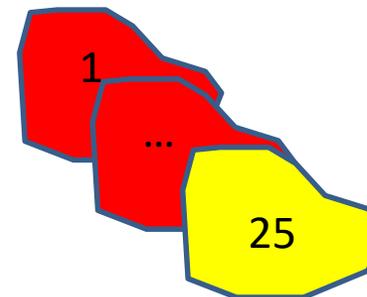
- Bei schlechter (räumlicher) Übereinstimmung der Member hochaufgelöste Warnung nicht zielführend
- Zumindest bei längeren Vorhersagehorizonten und damit größerer Unsicherheit zunächst **räumlich aggregierte** Warnung (Gemeinde, Einzugsgebiet, Landkreis, Warnregion) sinnvoll



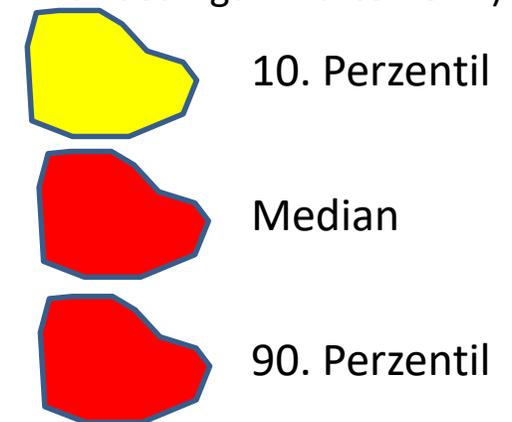
Verteilung aller Pixel in einem Gebiet u. einem Member



Regelbasierte Auswahl eines Wertes je Gebiet u. Member z.B. Maximum



Gebietsspezifische, probabilistische Warnung (nicht unbedingt in Kartenform)



Diskussionspunkte Teil 2

- Verständnisfragen
- Ist eine öffentliche Sturzflutwarnung prinzipiell wünschenswert?
 - Nowcasting 1 bis 2 h Vorwarnzeit vor Sturzfluten – für Bevölkerung sinnvoll?
 - Visuelle (kartenbasierte) Warnung der Öffentlichkeit sinnvoll? Alternativen?
- Umgang mit Unsicherheit und deren Kommunikation:
 - Erfahrung: Decken Ensemble reale Variabilität (Lage/Intensität) bei Starkregen ab?
 - Sollte die Kommunikation der Sturzflutgefahr nur anhand einer Karte/ eines Wertes erfolgen?
 - Oder ist die Kommunikation der Bandbreite/Unsicherheit anhand von zwei bis drei Karten oder eines Wertebereiches vorstellbar?
 - Oder kann sogar eine einfache Werteverteilung kommuniziert werden (nur bei einer räumlich aggregierten Warnung möglich)?

Quellen

- Hengst, A. (2019): Vergleich und Analyse vergangener Sturzflutereignisse und Starkregenniederschläge in Baden-Württemberg. Masterarbeit an der Professur für Hydrologie, Universität Freiburg.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., & Djordjević, S. (2018): Stability criteria for flooded vehicles: A state-of-the-art review. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S817-S826.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., & Russo, B. (2016): Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Natural hazards*, 82(2), 1259-1278.