



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN
Ufficio federale dell'energia UFE
Uffizi federal d'energia UFE



Le Rhin postérieur en crue le 27 août 2023: vidange à la centrale hydroélectrique à la sortie du lac de Sufers.
© Philippe Gyarmati, BAFU

EINFÜHRUNG IN DAS PROJEKT «**EX**tremhochwasser **Schweiz**» (EXCH)



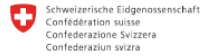
INHALT

1. Einführung
2. Projekt EXAR: extreme Hochwasser im EZG der Aare
3. Projekt EXCH: Ausweitung auf die ganze Schweiz
4. Perspektiven



EINFÜHRUNG

Aktuelle Anforderungen: Teil C2 der Richtlinie



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie
et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Surveillance des barrages

Directive sur la sécurité des ouvrages d'accumulation

Partie C2: Sécurité en cas de crue et abaissement
de la retenue

La dernière version remplace les versions précédentes

Version	Modification	Date
2.0	Révision totale de la directive de l'OFEG 2002	15.01.2017
2.01	Actualisation des références bibliographiques	15.02.2017
2.02	Adaptation chapitre 2.7.1	28.09.2018

Überprüfung der Sicherheit bei Hochwasser

- Gewährleistung der Sicherheit bei extremen Hochwassern:
Bemessungshochwasser (BHQ): $T = 1'000$ Jahre
Sicherheitshochwasser (SHQ): $T \gg 1'000$ Jahre
- Ermittlung des Hochwassers nach den Kriterien der Richtlinie:
 - zusätzliche Sicherheitsmargen
 - Ermittlungsmethode in Übereinstimmung mit der verfügbaren Datenbasis
 - Regelmässige Neubewertung der Hochwasserwerte

Hochwassermanagement

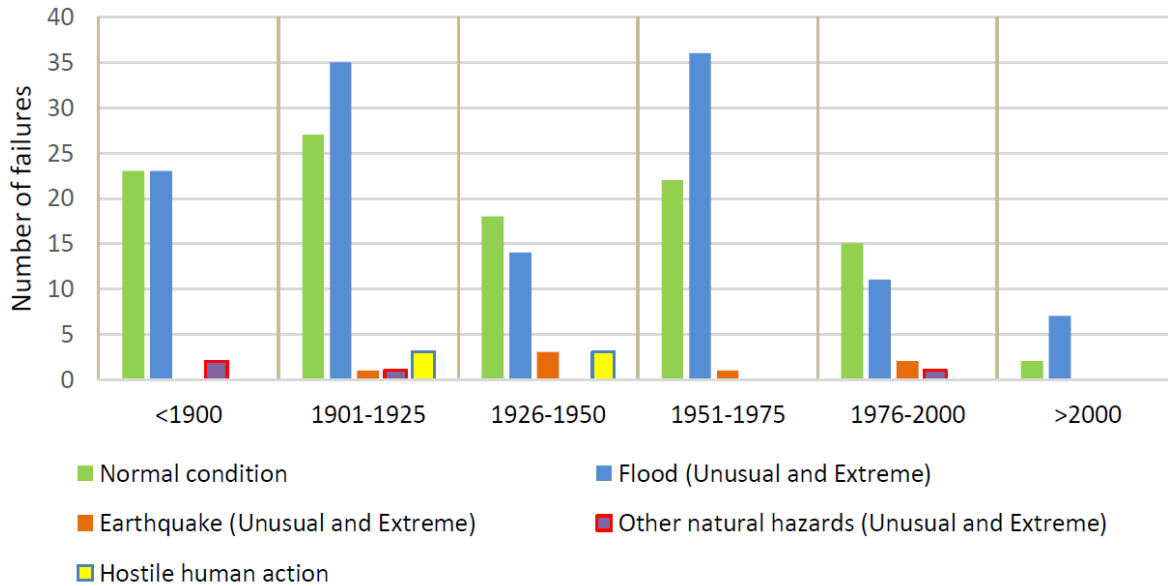
- Wehrreglement



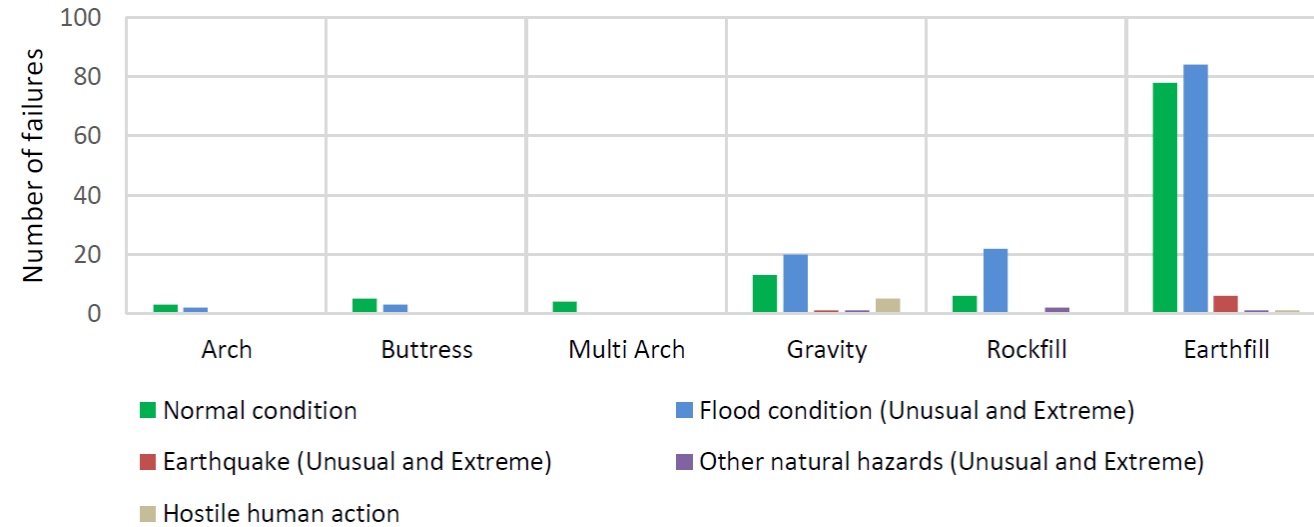
EINFÜHRUNG

Statistiken zu Stauanlagenbrüchen

Failure context versus construction year



Failure context versus dams' type



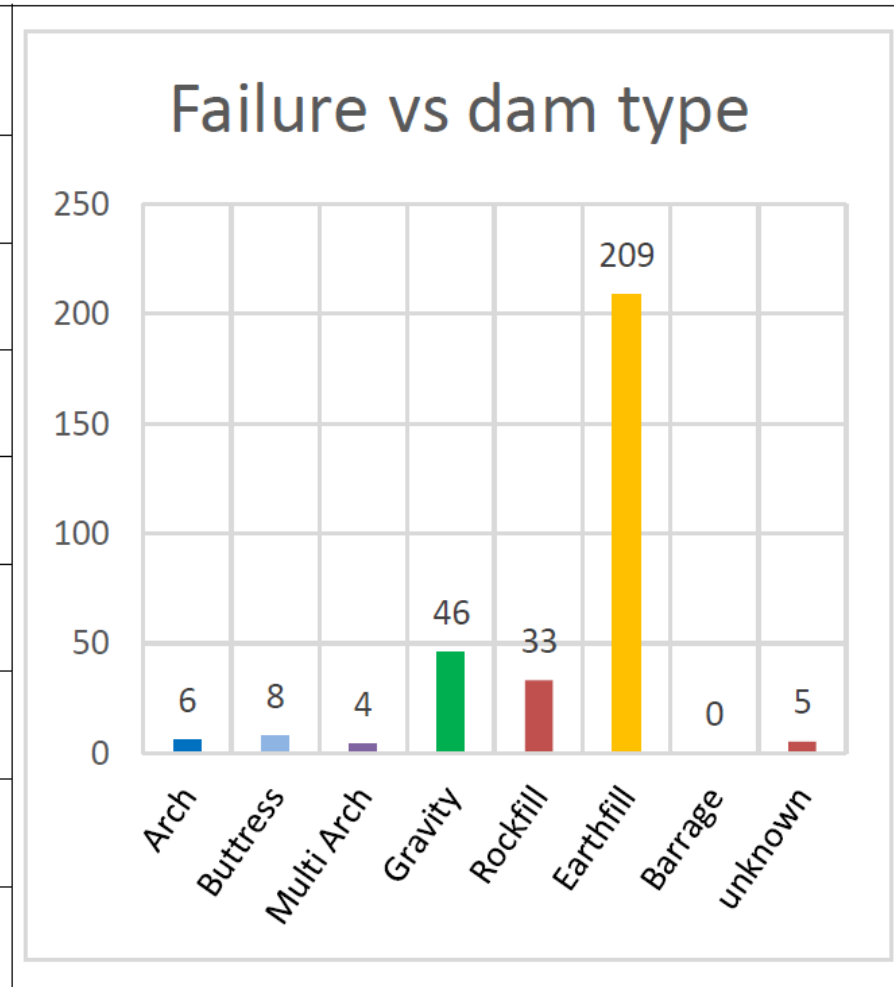
ICOLD Bulletin 99
(Final draft 2019)



EINFÜHRUNG

Statistiken zu Stauanlagenbrüchen

Dam type	Existing dams	failed	ratio
VA - Arch	890	6	0.67%
CB - Buttress	340	8	2.35%
MV - Multi Arch	105	4	3.81%
PG - Gravity	5571	46	0.83%
ER - Rockfill	2378	33	1.39%
TE - Earthfill	21977	209	0.95%
BM - Barrage	224	0	0.00%
XX - Unknown	715	5	0.70%

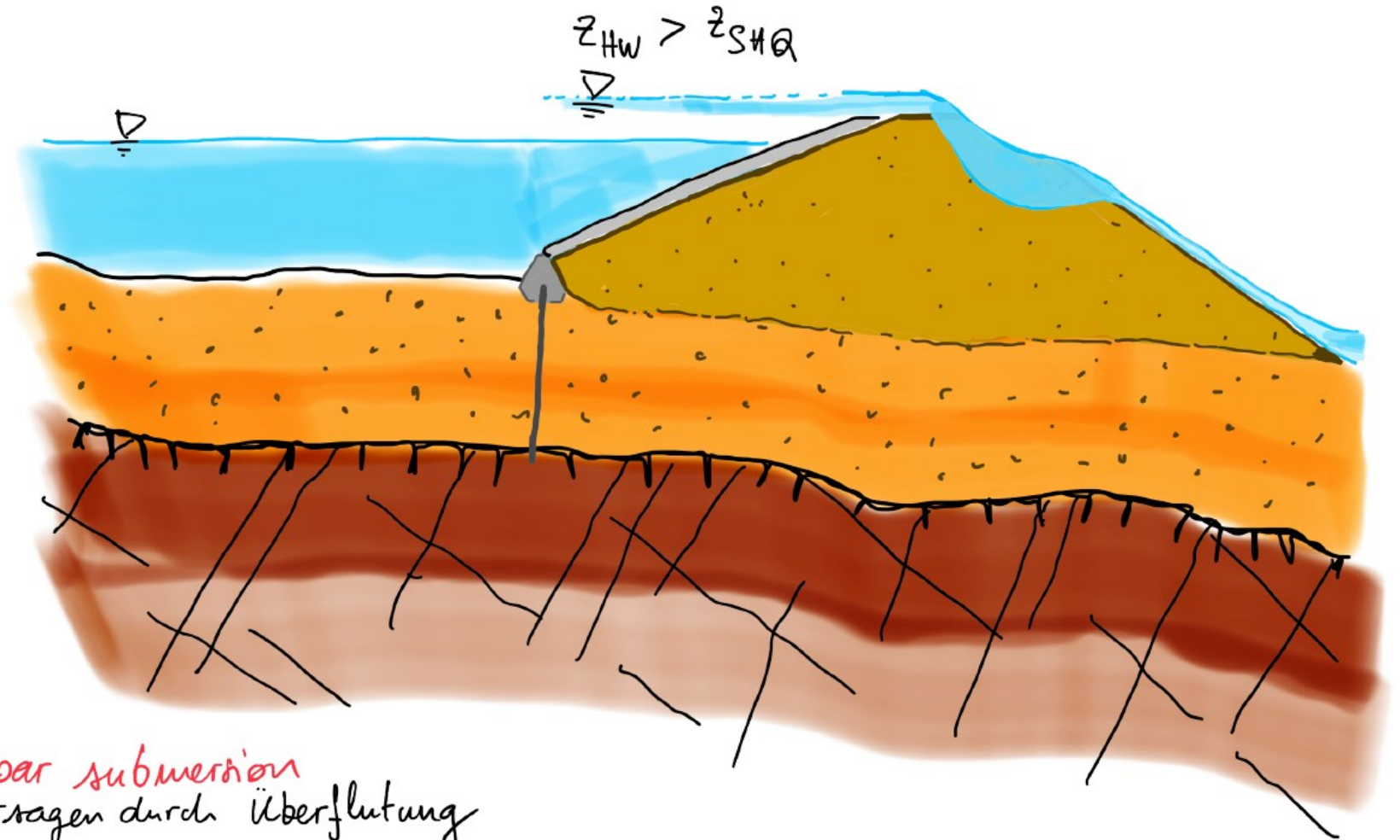


ICOLD Bulletin 99
(Final draft 2019)



EINFÜHRUNG

Illustration eines Dammbbruchs

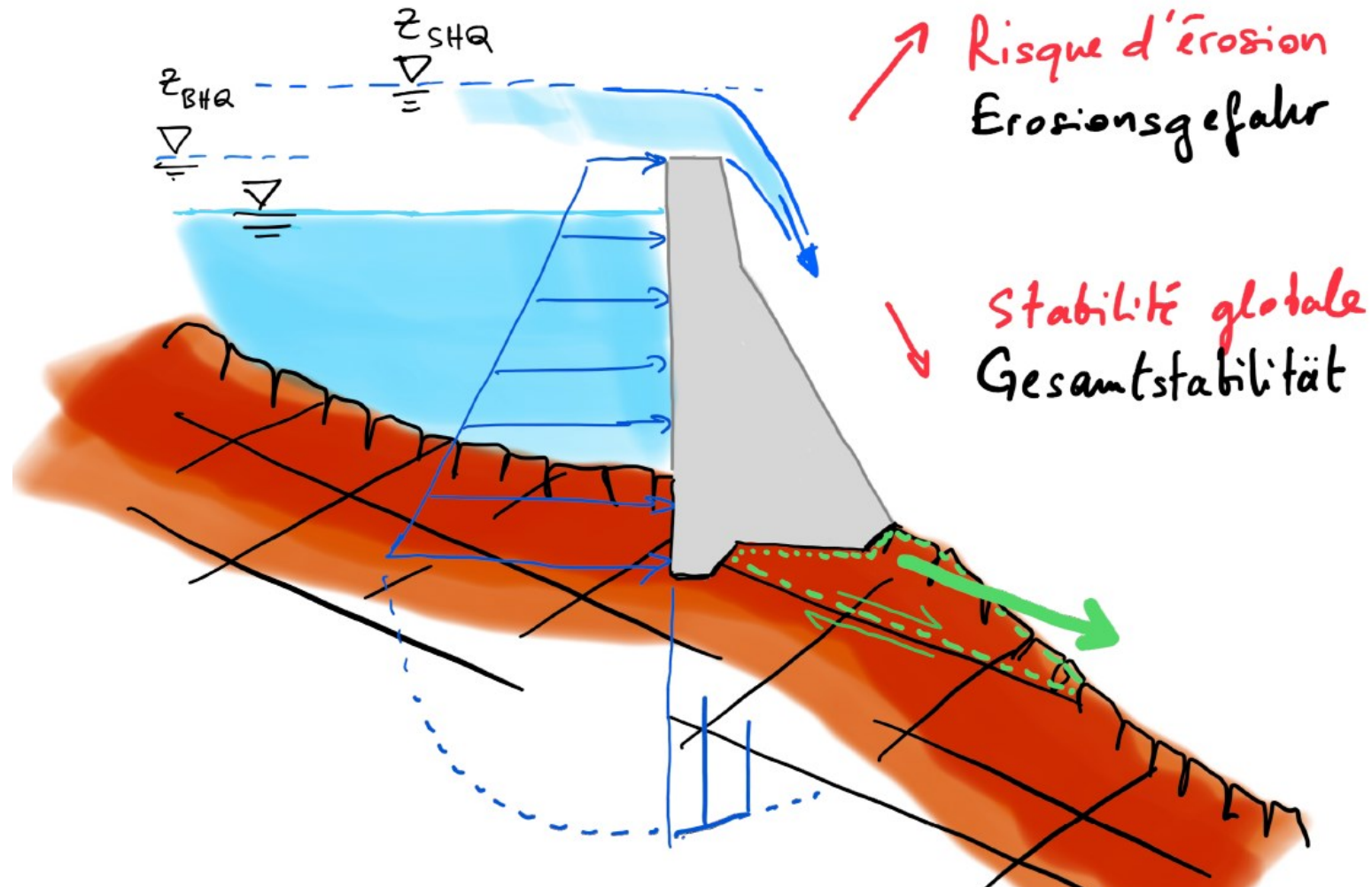


Exemple de rupture par submersion
Beispiel für einen Versagen durch Überflutung



EINFÜHRUNG

Illustration eines Gewichtsmauerbruchs





EINFÜHRUNG

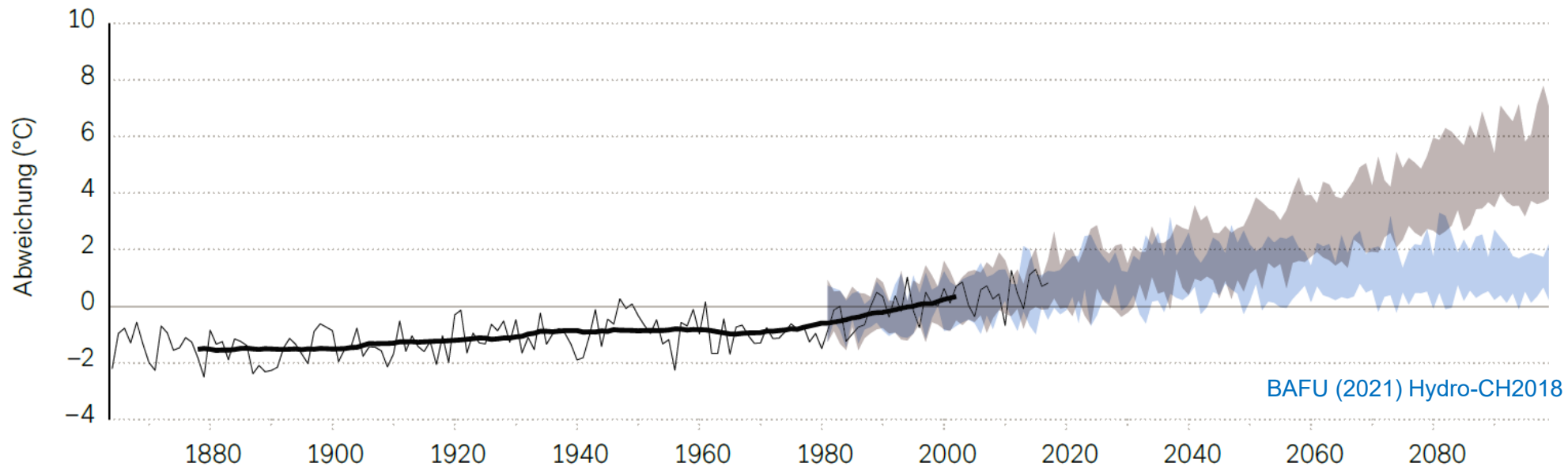
Zunahme von Starkniederschlägen

Schweiz
Jahresmittel

— Beobachtungen
— 30-jähriges gleitendes Mittel

mit Klimaschutz RCP2.6
ohne Klimaschutz RCP8.5

Veränderung der durchschnittlichen jährlichen Lufttemperatur am Boden in der Vergangenheit und in der Zukunft

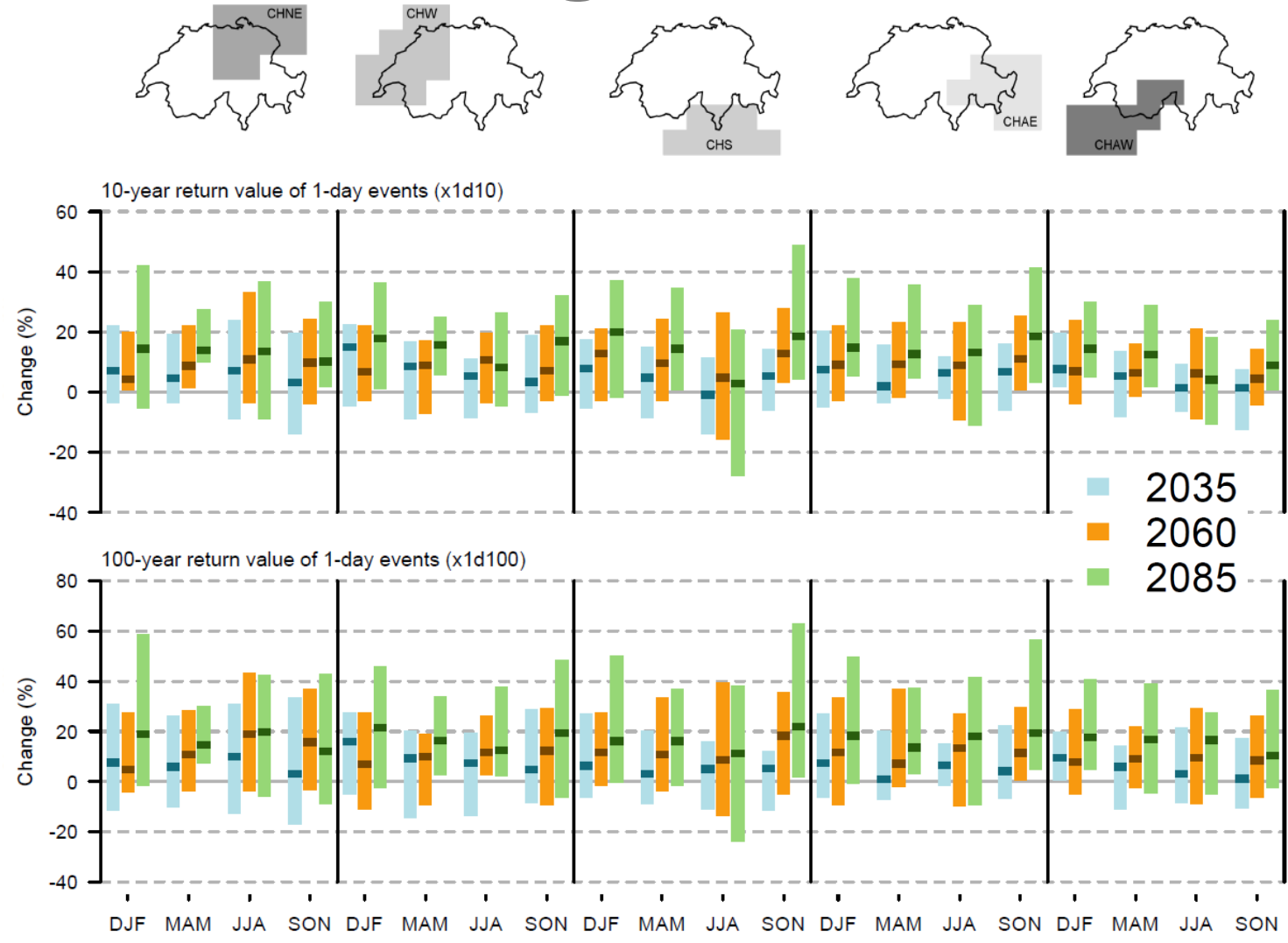
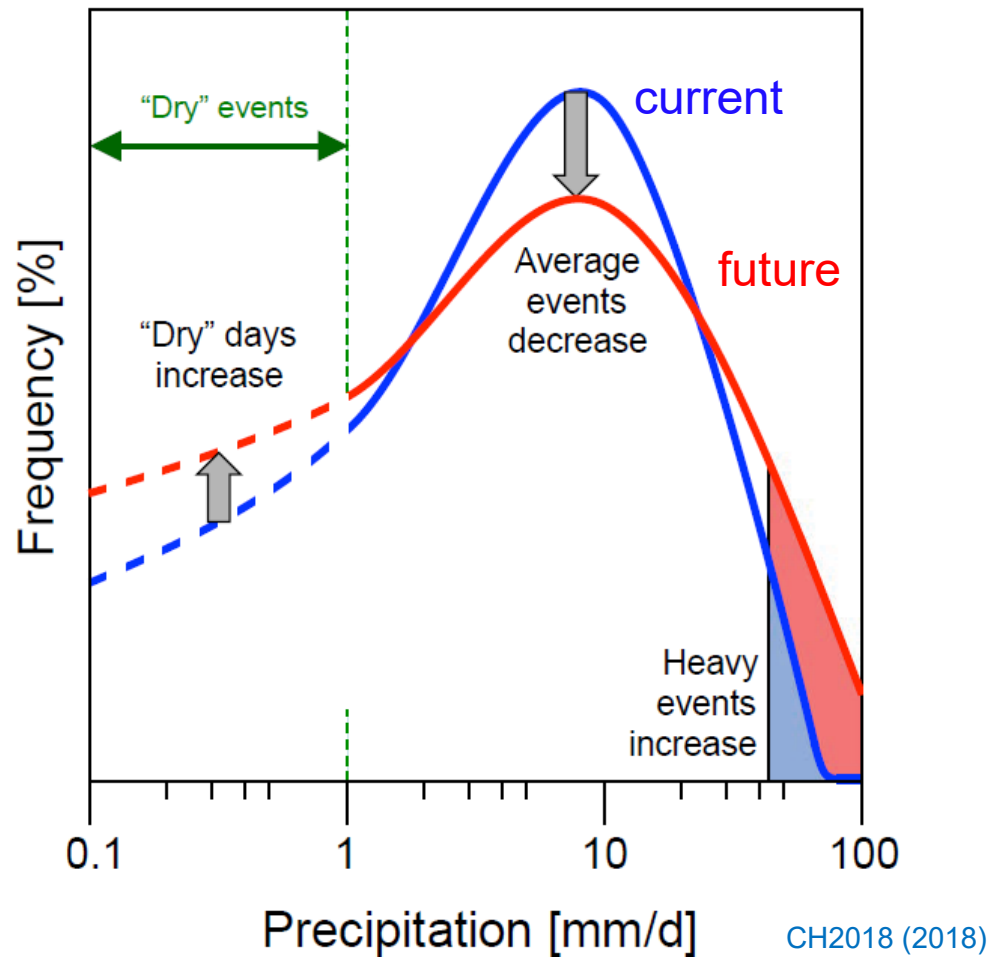


«Der mittlere Jahresniederschlag hat sich in der Schweiz seit Messbeginn kaum verändert, und auch in der Zukunft werden keine wesentlichen Veränderungen erwartet. Stark ändern wird jedoch die saisonale Verteilung der Niederschläge mit einer Abnahme der Niederschläge im Sommer und einem Anstieg im Winter. **Die bereits beobachtete Zunahme von Starkniederschlägen dürfte sich fortsetzen.**»



EINFÜHRUNG

Zunahme von Starkniederschlägen





EINFÜHRUNG

Stauanlagen und hydrologische Risiken im Jahr 2023



AFP, Bilder aus verschiedenen Online-Medien

Norwegen, 9. August 2023

Sturm "Hans"

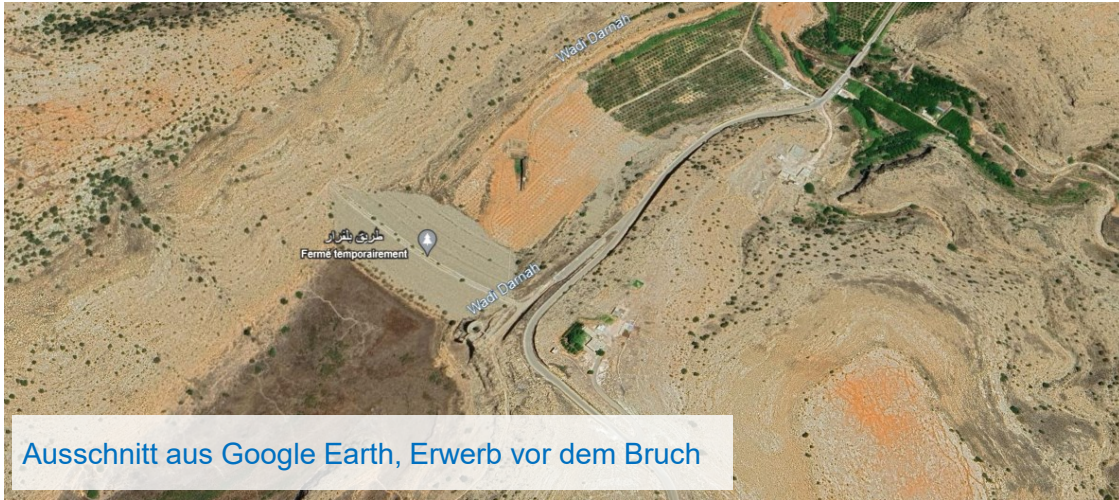
Teilweiser Bruch des Damms der Braskereidfoss-Anlage (Fluss Glomma)

- Öffnung der Entlastungsorgane fehlgeschlagen (?)
- Evakuierung der Bevölkerung, keine Verletzten



EINFÜHRUNG

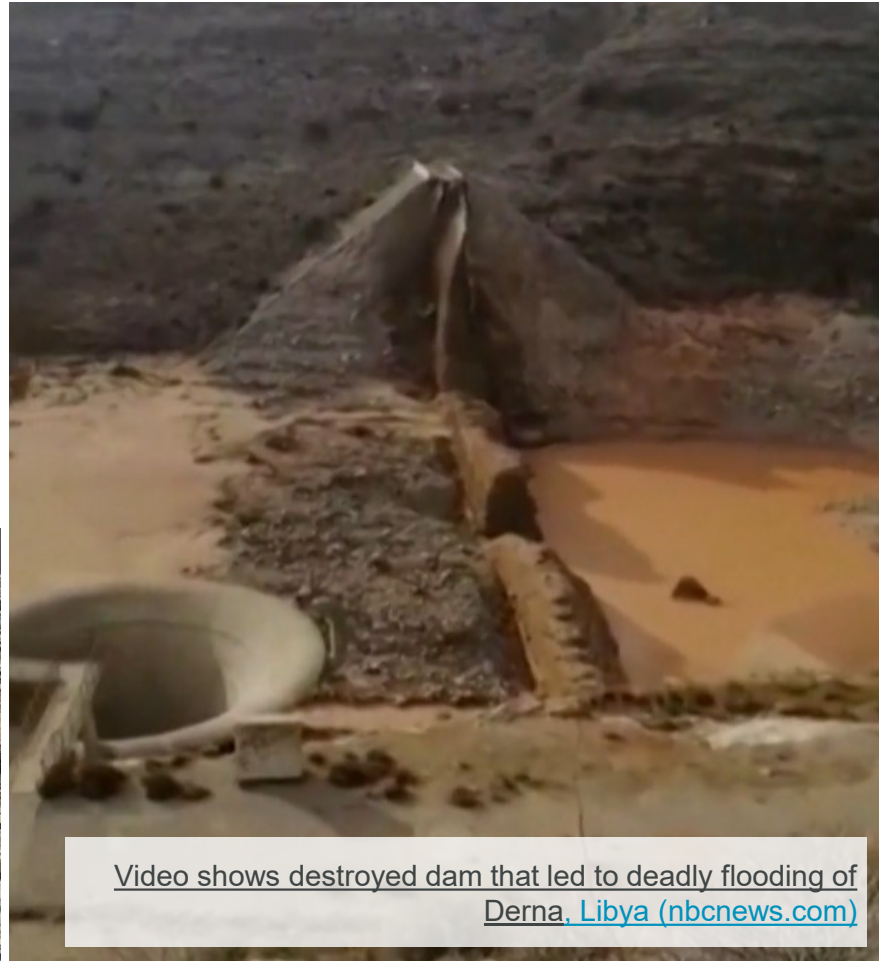
Stauanlagen und hydrologische Risiken im Jahr 2023



Ausschnitt aus Google Earth, Erwerb vor dem Bruch



[Le bilan à Derna monte à 11'300 morts, selon l'ONU - rts.ch - Monde](#)



[Video shows destroyed dam that led to deadly flooding of Derna, Libya \(nbcnews.com\)](#)

**Libyen, 10.-11.
September 2023**

**Sturm "Daniel"
Bruch von zwei
Dämmen oberhalb
der Stadt Derna**

- 10'000+ Tote und Vermisste (?)
- Fehlende Warnungen (?)

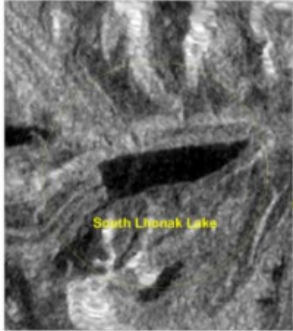


EINFÜHRUNG

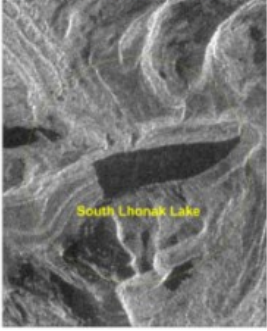
Stauanlagen und hydrologische Risiken im Jahr 2023

South Lhonak Lake Outburst - Pre and Post Scenario

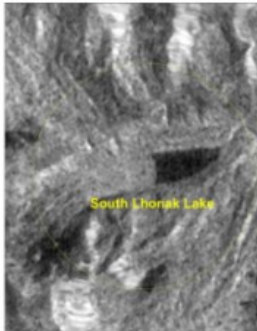
RISAT-1A, 17 Sep 2023
Area: 162.7 Ha (Approx.)



Sentinel-1A, 28 Sep 2023
Area: 167.4 Ha (Approx.)



RISAT-1A, 04 Oct 2023 (0600 Hrs)
Area: 60.3 Ha (Approx.)



Indien, 4. Oktober 2023

«Flash flood» durch «GLOF
(Glacial Lake Outburst
Floods)» (?)

**Vollständiger Bruch des
Chungthang-Damms
(Teesta-Fluss)**

- 100+ Tote und Vermisste (?)
- Multifaktorielle Aspekte
hydrologische und
hydrogeologische Risiken in
bestimmten Regionen

[Chungthang dam washed away in Sikkim: What caused the disaster, read details \(opindia.com\)](https://opindia.com)



EINFÜHRUNG

Anforderungen an die Hochwassersicherheit

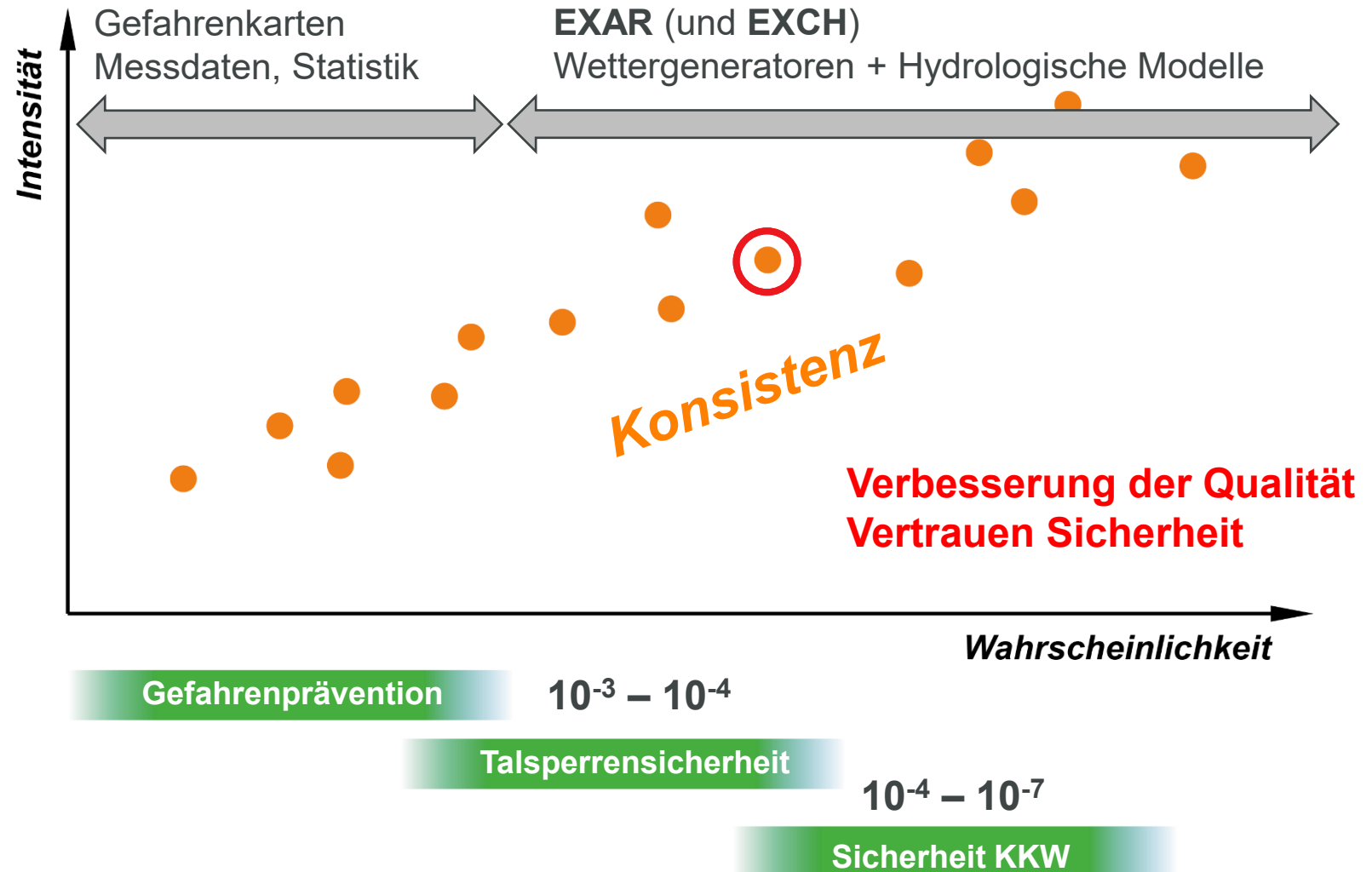
- Die Risiken, die mit der Hydrologie im weitesten Sinne verbunden sind, stellen einen wesentlichen Bestandteil der Sicherheit von Stauanlagen dar
- Bestehende Stauanlagen müssen regelmäßig überprüft werden, um geänderte Annahmen aus einer früheren Überprüfung zu berücksichtigen und um die inhärente Entwicklung des Standes der Technik zu berücksichtigen
- Die Richtlinie (Teil C2) muss auch die Entwicklung des Standes der Wissenschaft und Technik verfolgen, um Mindestsicherheitsanforderungen festzulegen, die relevant und robust sind



EXAR (2016-2021) – BAFU, BFE, ENSI, BABS, MeteoSchweiz

Ziele

- Entwicklung einer einheitlichen Grundlage für Hochwassersicherheitsnachweise für seltene bis extreme Ereignisse (Aare)
- Nach der Katastrophe von Fukushima initiiert, um die Überschwemmungsrisiken an kritischen Standorten entlang der Aare zu untersuchen

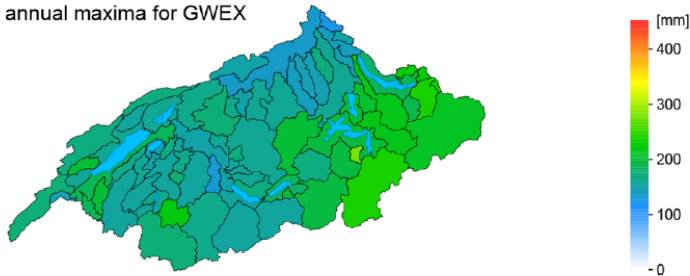




EXAR (2016-2021) – BAFU, BFE, ENSI, BABS, MeteoSchweiz

Methode, die eine Kette von Modellen einbezieht

(c) Mean annual maxima for GWEX



Wettergeneratoren

2 völlig unabhängige Generatoren:

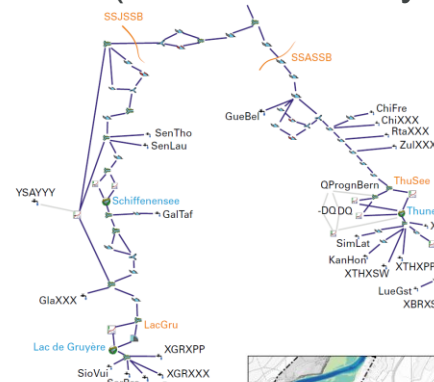
- GWEX: Generator of Weather EXtremes
- SCAMP: Sequential Construction of Atmospheric Analogs for Multivariate Weather Predictions

Evin et al. 2018, 2019

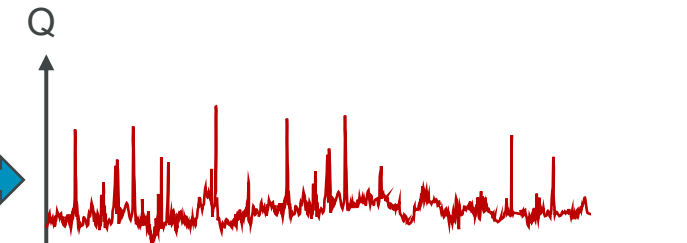
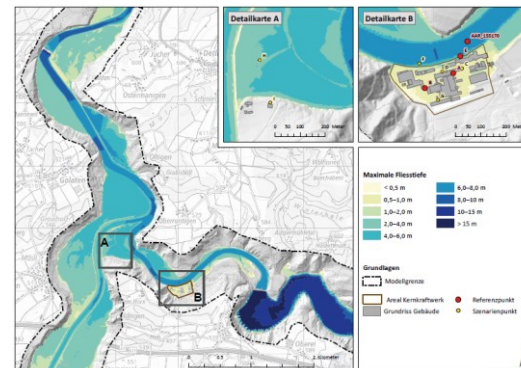
Raynaud et al. 2017, 2020

Chardon et al. 2018

Hydrologische Modellierung
(eventuell mit hydraulischen 2D-Modellen)



Hydraulische Modellierung



Zeitreihe von 300'000 Jahren

WSL 2021

WSL 2021

Viviroli et al. 2022



EXAR (2016-2021) – BAFU, BFE, ENSI, BABS, MeteoSchweiz

Extreme Hochwasser im Einzugsgebiet der Aare

1. Wettergeneratoren

- > stochastische Multisite-Generierung (GWEX)
- > Parametrisierung auf Beobachtungen (1930-2015)
- > stündliche Beobachtungen für Niederschlag (~100 Standorte) und Temperatur (~25 Standorte)
- > Modellierung von 300'000 Jahren
- > unabhängiger, alternativer Wettergenerator: SCAMP

2. Hydrologische Simulation

- > Modell HBV (inkl. Schnee und Gletscher)
- > ~90 Teileinzugsgebiete (Kalibrierung: ~50)
- > Kontinuierliche Simulationen von 300'000 Jahren

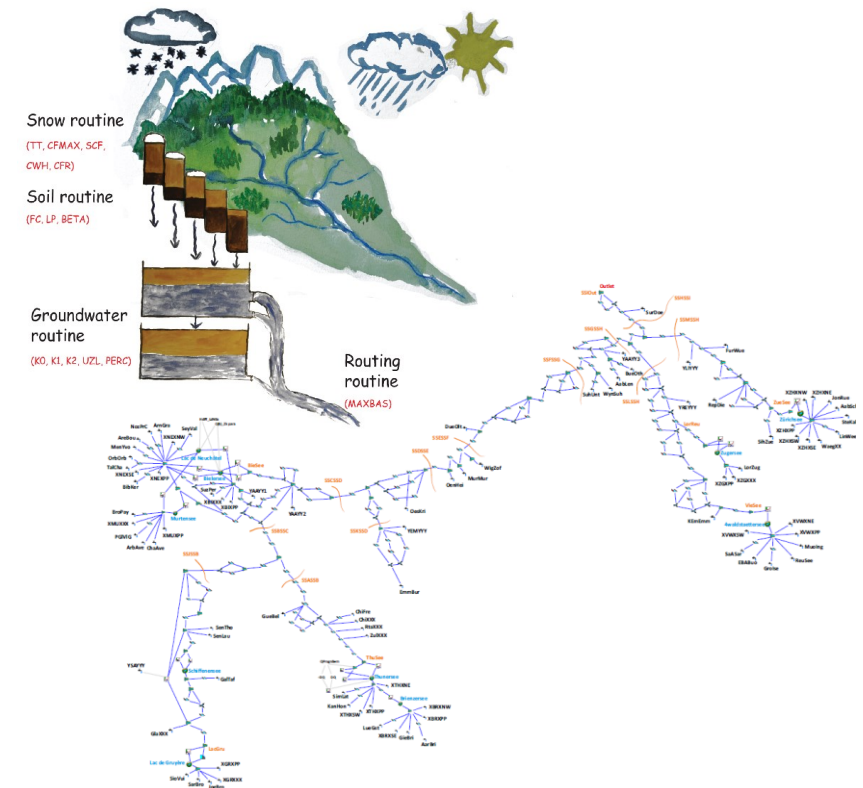
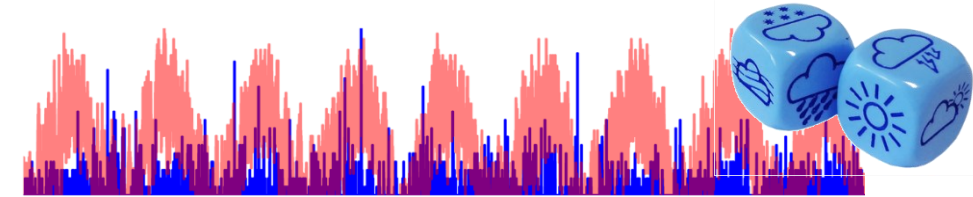
3. Hydrologisches «Routing»

- > RS Minerve
- > Inkl. Rückhalteeffekte von Seen, Regulierung, Betrieb von Stauanlagen, Überschwemmungen etc.

4. Integration der Risikoanalyse für Schlüsselstandorte

5. Ziele

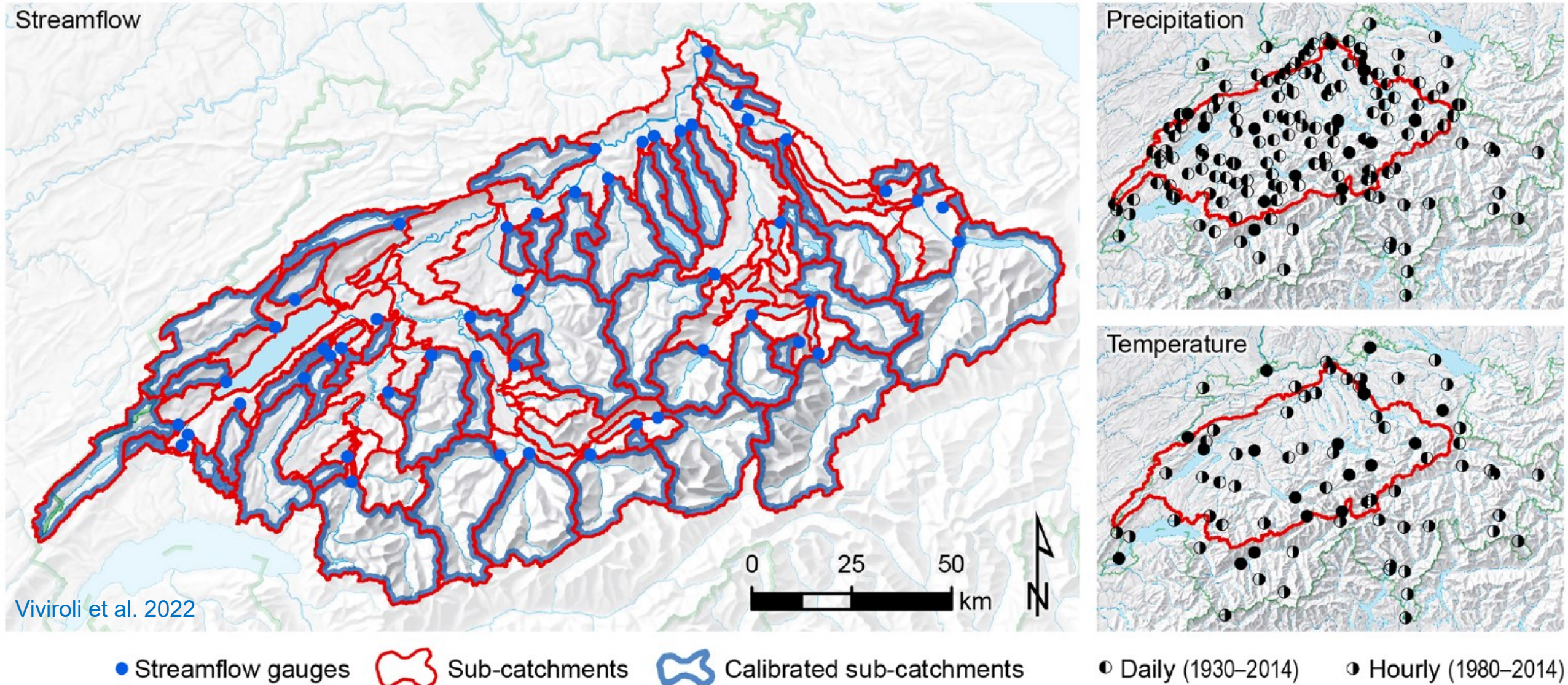
- > optimiert für Einzugsgebiete > 1'000 km²
- > Schätzung von Extremereignissen (T = 1'000 – 10'000 Jahre)





EXAR

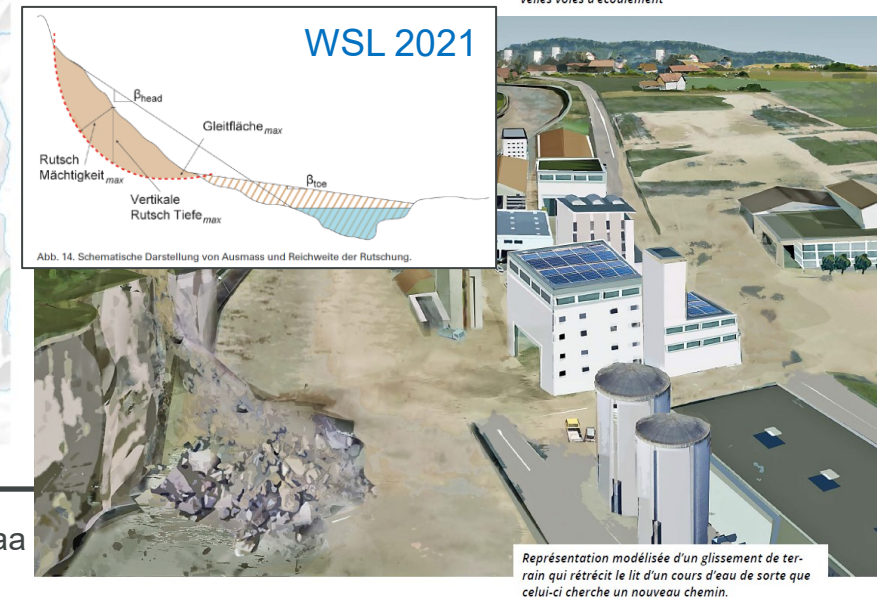
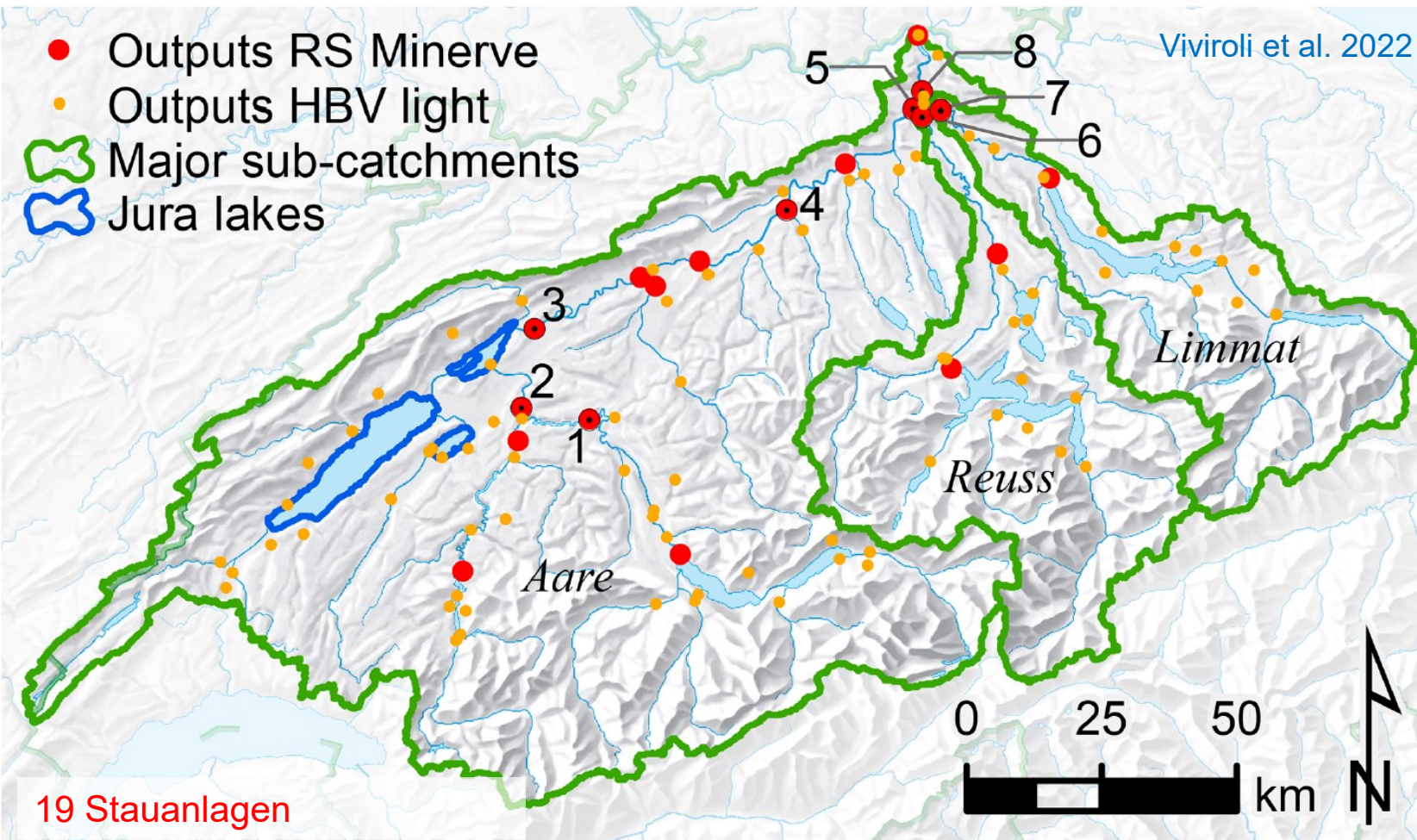
Unterteilung des Einzugsgebiets und Daten





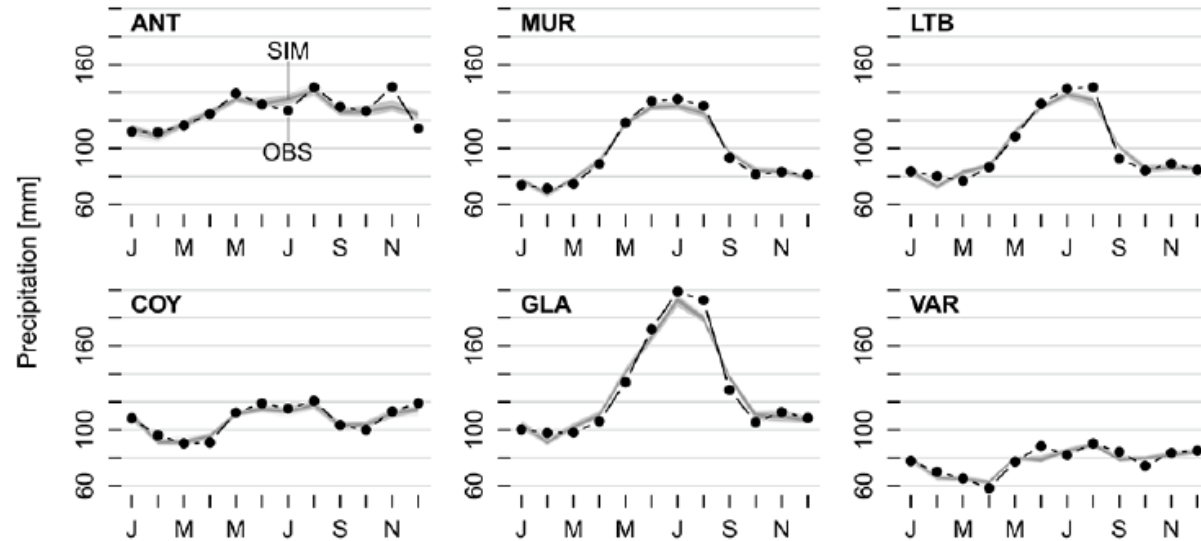
EXAR

Stauanlagen und Atomkraftwerke

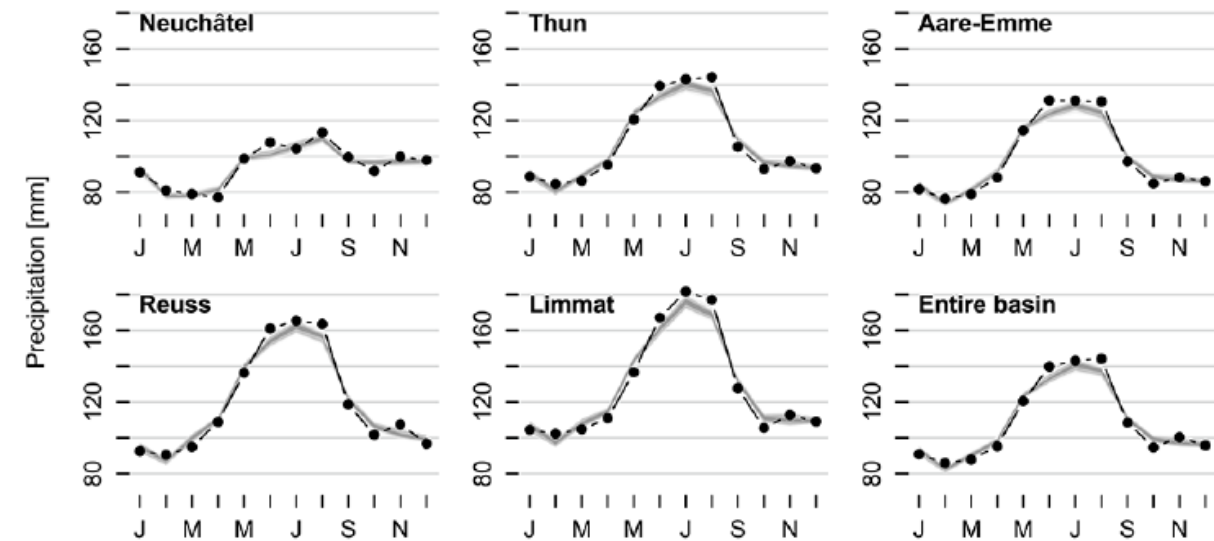


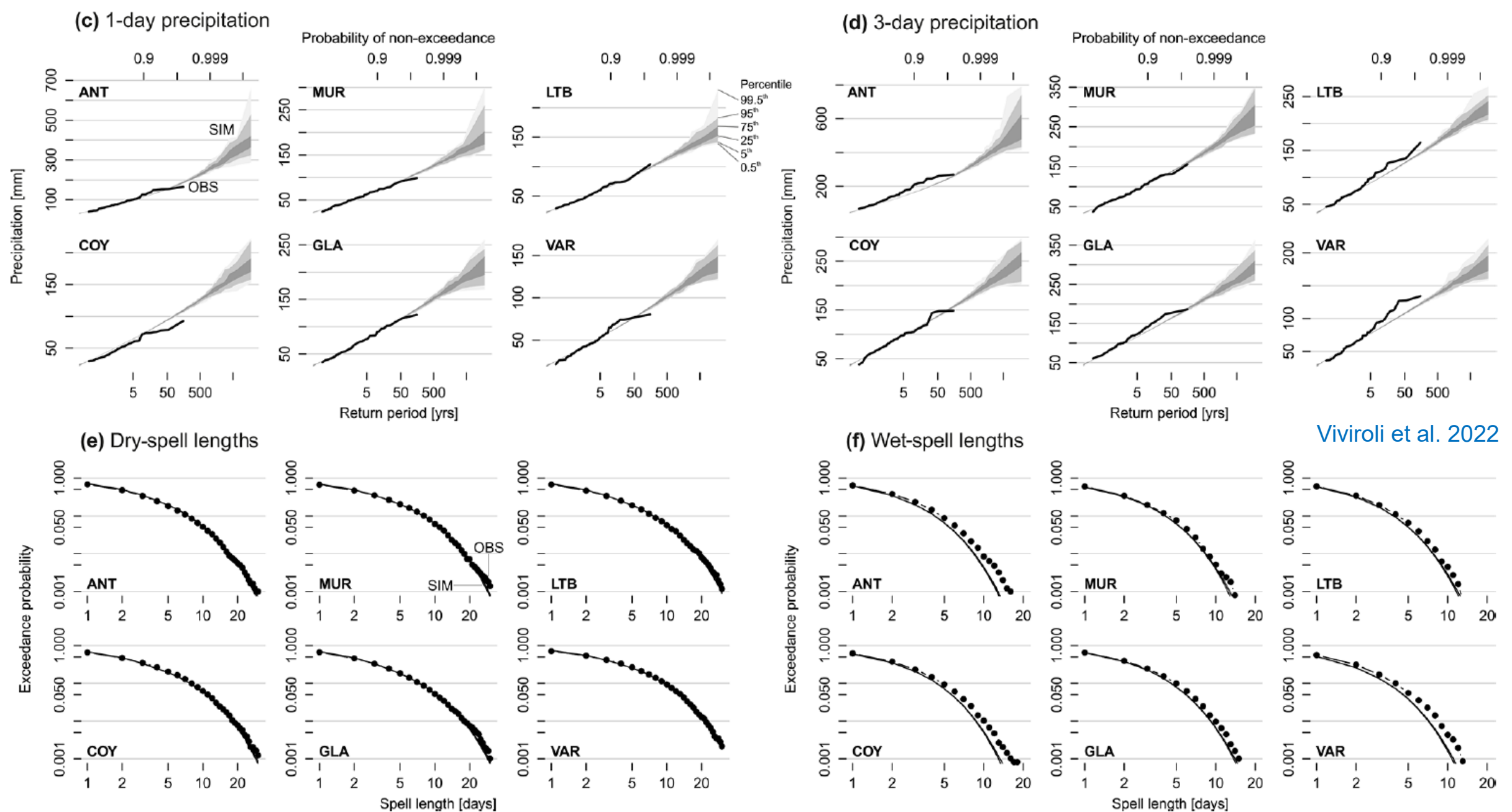


(a) Monthly mean precipitation (selected stations)



(b) Monthly mean precipitation (sub-regions and entire basin)

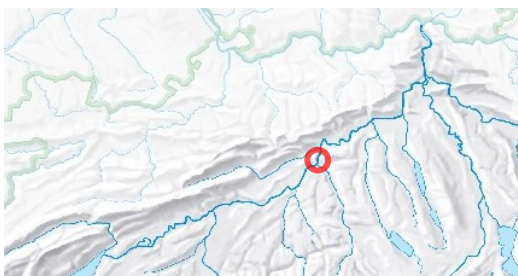




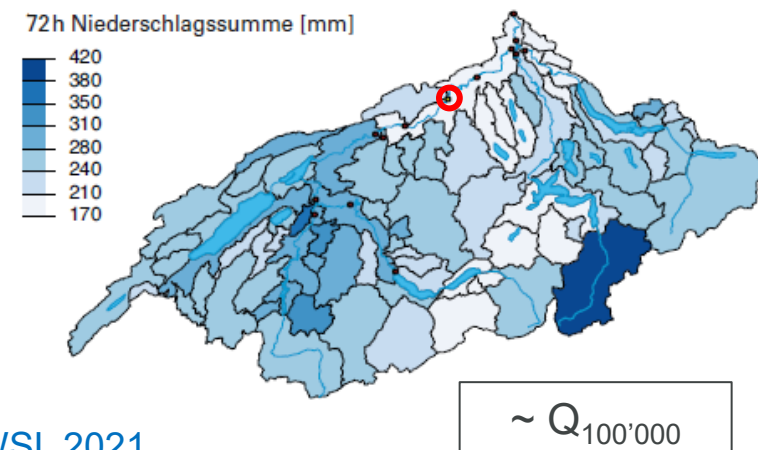
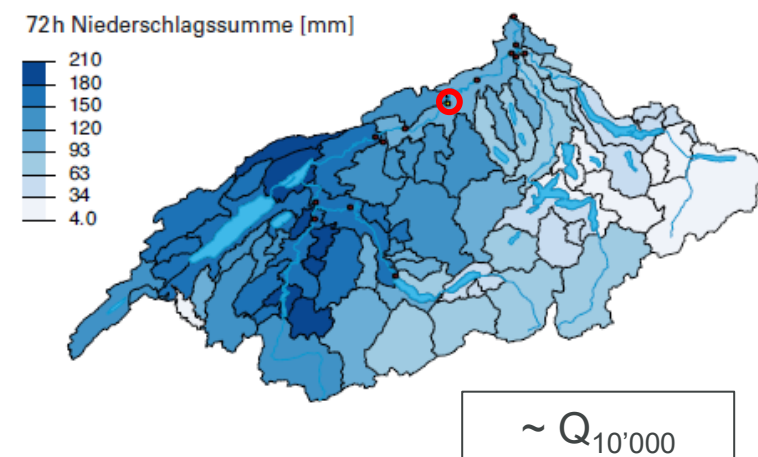
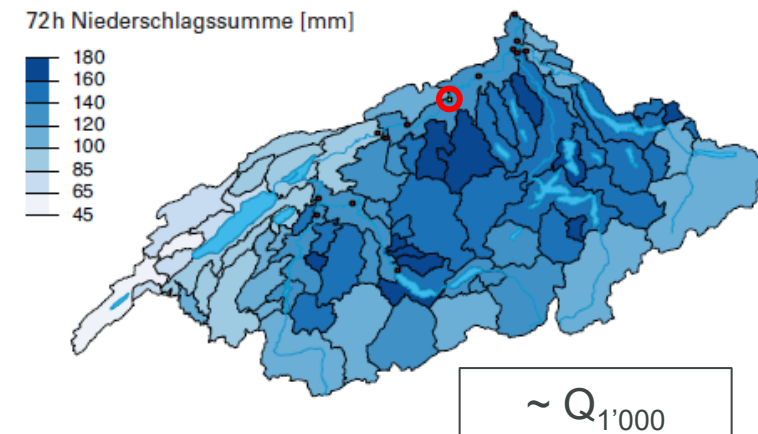
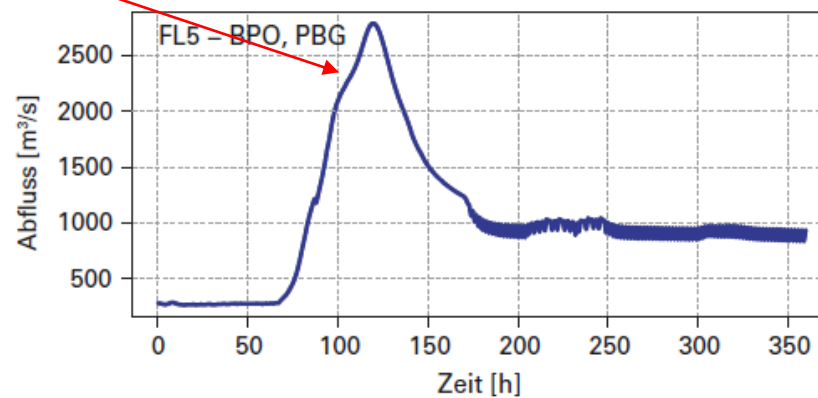
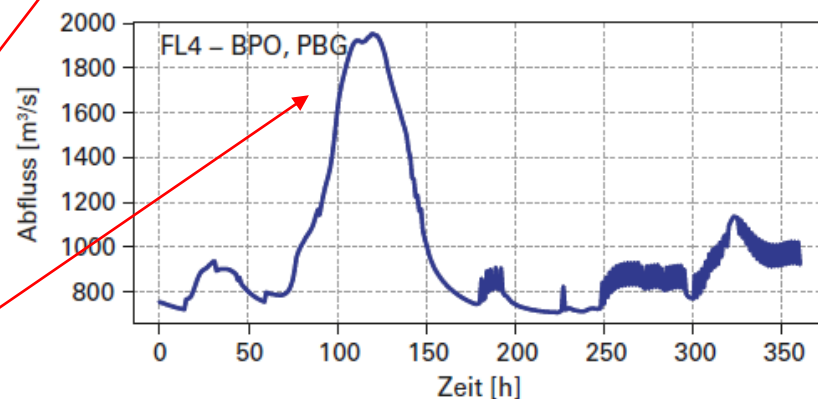
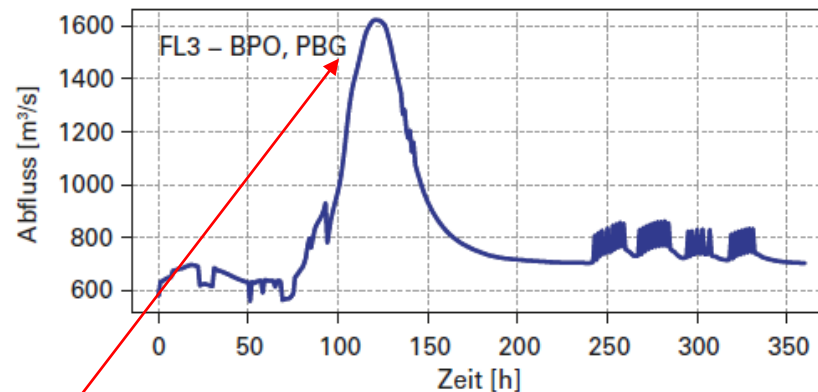
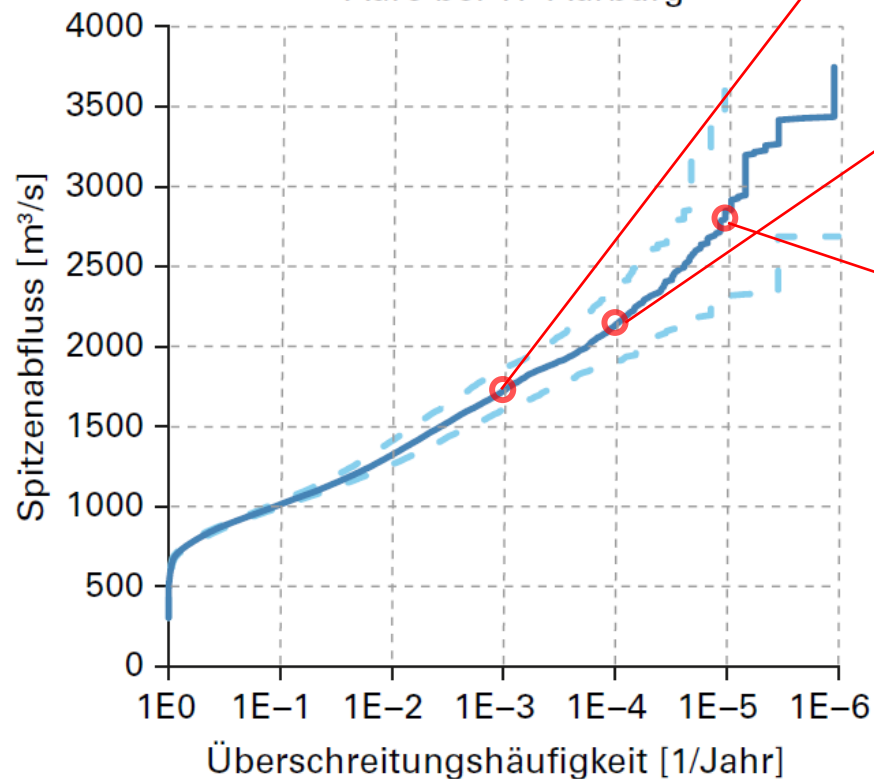


EXAR

z.B. Ergebnisse



Aare bei TP Aarburg





EXAR

Bestimmung repräsentativer Ganglinien

1

Routing EXAR
Ganglinien zu
Anlagen

2

Extraktion
Ereignisganglinien

3

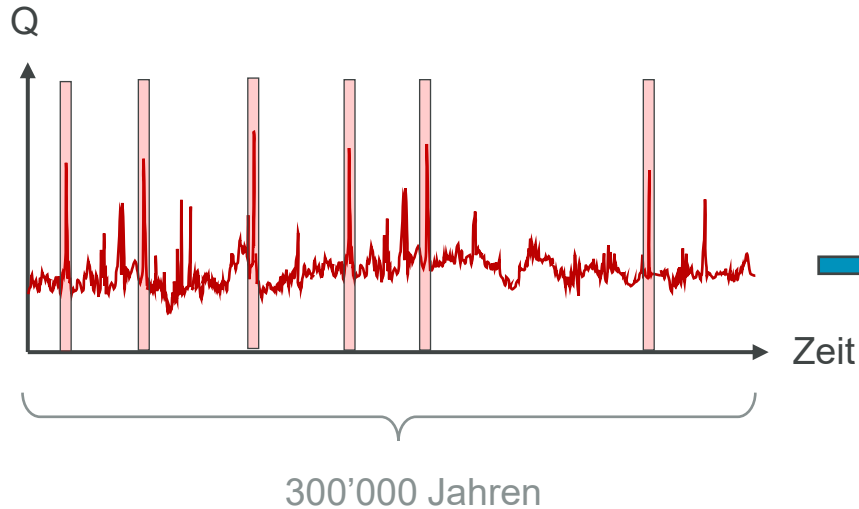
Zuweisung
Jährlichkeitsklasse

4

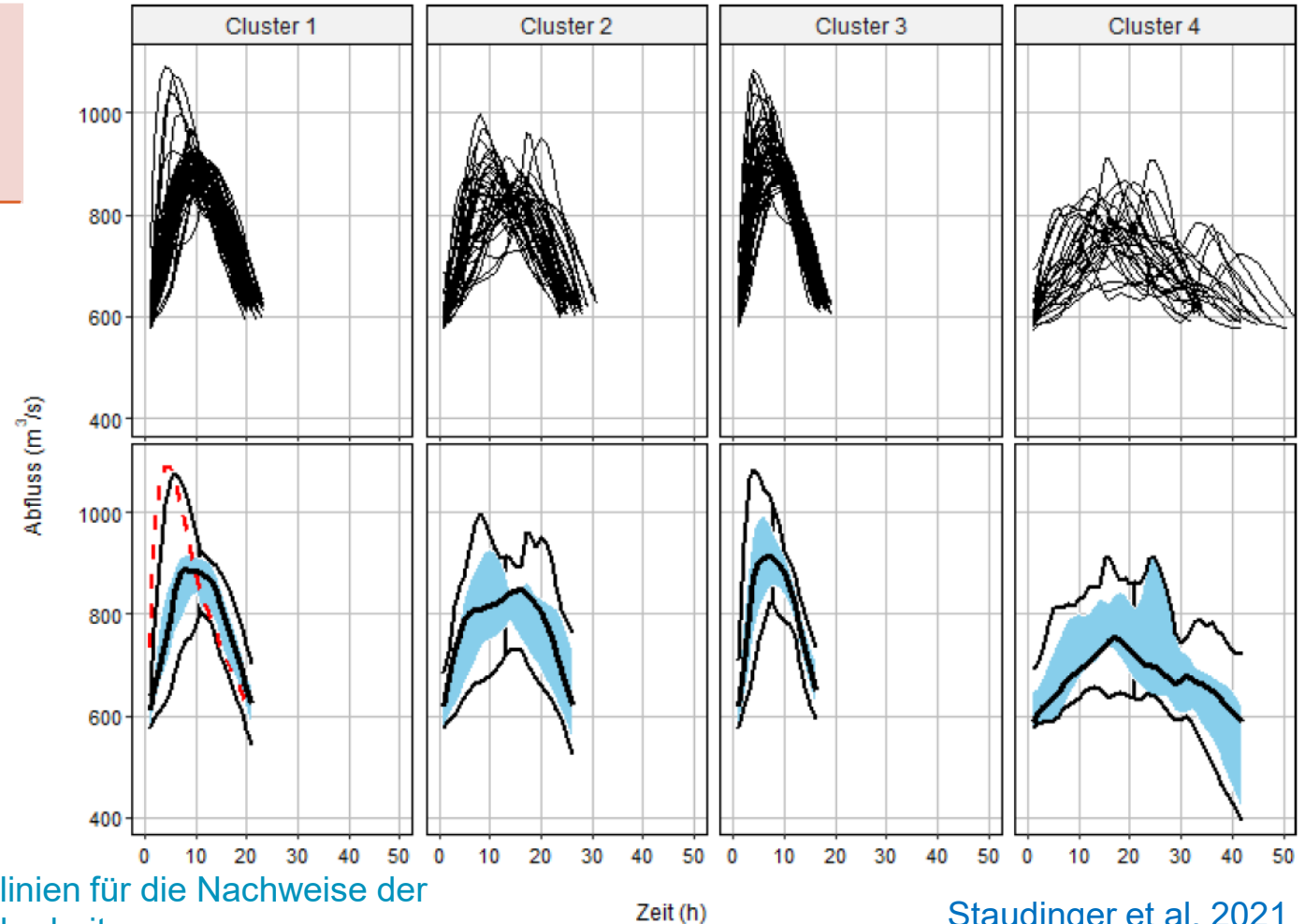
Clustering der
Ereignisse
innerhalb der
Jährlichkeitsklasse

5

Functional
boxplots



Von der
Langzeitsimulation...



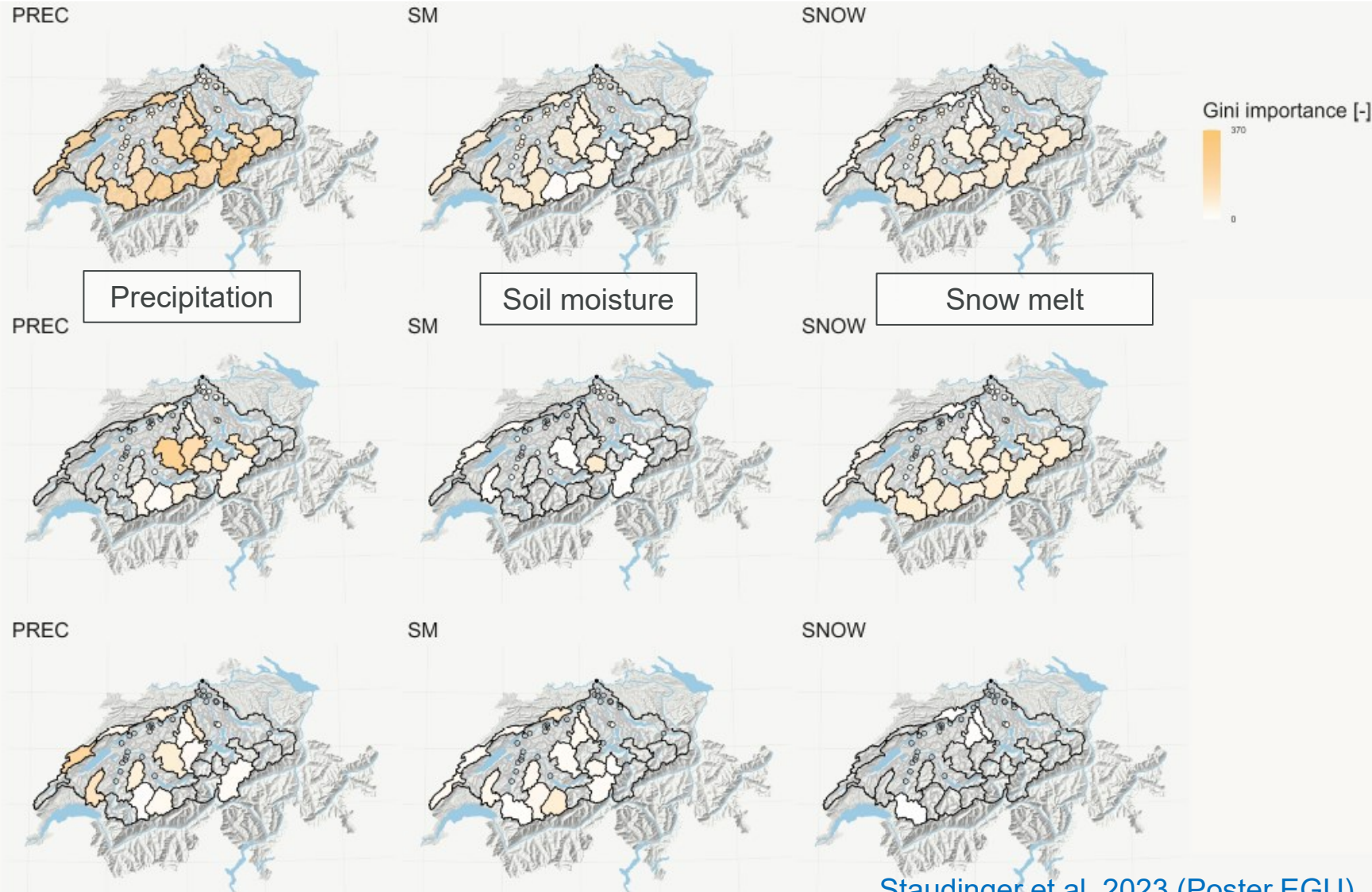
...zu den Ganglinien für die Nachweise der
Hochwassersicherheit

Staudinger et al. 2021



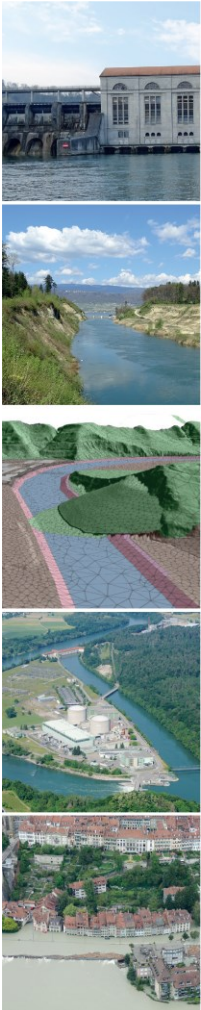
EXAR

Die Rolle der Vorbedingungen



- Verschiedene räumliche Muster können für unterschiedliche Wiederkehrdauern ausschlaggebend sein
- Nur relativ häufige Hochwasser können durch die Niederschläge im gesamten Einzugsgebiet erklärt werden
- Bei seltenen/extremen Hochwassern erklären nur die Variablen einiger EZG das Hochwasser am Ausfluss des grossen EZG der Aare

EXAR Weiterführende Informationen...



Heft 104, 2021
WSL Berichte
ISSN 2296-3456

Extremhochwasser an der Aare

Hauptbericht Projekt EXAR

Methodik und Resultate

Norina Andres, Nicolas Steeb, Alexandre Badoux und
Christoph Hegg (Ed.)



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

WSL 2021

 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Aufsicht Talsperren

Schlussbericht vom 29.11.2021

Hochwasserereignisse aus kontinuierlicher
Langzeitsimulation zur Überprüfung der Sicherheit der
Stauanlagen

Staudinger et al. 2021

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22, 2891–2920, 2022
<https://doi.org/10.5194/nhess-22-2891-2022>
© Author(s) 2022. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.



Natural Hazards
and Earth System
Sciences 

Comprehensive space–time hydrometeorological simulations for estimating very rare floods at multiple sites in a large river basin

Daniel Viviloli¹, Anna E. Sikorska-Senoner¹, Guillaume Evin², Maria Staudinger¹, Martina Kautzlaric^{3,4},
Jérémy Chardon⁵, Anne-Catherine Favre⁵, Benoît Hingray⁵, Gilles Nicolet⁵, Damien Raynaud⁵, Jan Seibert^{1,6},
Rolf Weingartner^{3,4}, and Calvin Whealton^{7,a}

¹Department of Geography, University of Zurich, Zurich, Switzerland

²Université Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, Grenoble, France

³Mobilair Lab for Natural Risks, University of Bern, Bern, Switzerland

⁴Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Bern, Switzerland

⁵Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France

⁶Department of Aquatic Sciences and Assessment, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

⁷Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland

^anow at: Booz Allen Hamilton, Lexington Park, Maryland, United States

Correspondence: Daniel Viviloli (daniel.viviloli@geo.uzh.ch)

Received: 17 March 2022 – Discussion started: 22 March 2022

Revised: 4 July 2022 – Accepted: 18 July 2022 – Published: 2 September 2022

Abstract. Estimates for rare to very rare floods are limited by the relatively short streamflow records available. Often, pragmatic conversion factors are used to quantify such events based on extrapolated observations, or simplifying assumptions are made about extreme precipitation and resulting flood peaks. Continuous simulation (CS) is an alternative approach that better links flood estimation with physical processes and avoids assumptions about antecedent conditions. However, long-term CS has hardly been implemented to estimate rare floods (i.e. return periods considerably larger than 100 years) at multiple sites in a large river basin to date. Here we explore the feasibility and reliability of the CS approach for 19 sites in the Aare River basin in Switzerland (area: 17 700 km²) with exceedingly long simulations in a hydrometeorological model chain. The chain starts with a multi-site stochastic weather generator used to generate 30 realizations of hourly precipitation and temperature scenarios of 10 000 years each. These realizations were then run through a bucket-type hydrological model for 80 sub-catchments and finally routed downstream with a simplified representation of main river channels, major lakes and relevant floodplains in a hydrologic routing system. Comprehensive evaluation over different temporal and spatial scales showed that the main features of the meteorological and hydrological obser-

vations are well represented and that meaningful information on low-probability floods can be inferred. Although uncertainties are still considerable, the explicit consideration of important processes of flood generation and routing (snow accumulation, snowmelt, soil moisture storage, bank over-flow, lake and floodplain retention) is a substantial advantage. The approach allows for comprehensively exploring possible but unobserved spatial and temporal patterns of hydrometeorological behaviour. This is of particular value in a large river basin where the complex interaction of flows from individual tributaries and lake regulations are typically not well represented in the streamflow observations. The framework is also suitable for estimating more frequent floods, as often required in engineering and hazard mapping.

1 Introduction

Rare to very rare floods (return periods of 1000–100 000 years) can cause extensive human and economic damage and need to be considered in assessing flood hazard and risk to major infrastructure, as well as in safety assessments for dams. Given the immense importance of flood estimates for security and costs of hydraulic engineering mea-

Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

Viviloli et al. 2022

EXCH (2020-2025) – BAFU, BFE **Ausweitung auf die ganze Schweiz**

1. **Projektziel:** Abschätzung extremer Hochwasser für die gesamte «hydrologische» Schweiz, inklusive realistischer Schätzungen für häufigere Hochwasser
2. **Anpassung** der Methodik zur Behandlung:

> «grosse» Einzugsgebiete (> 1'000 km²) – **Methodik aus EXAR**

> «kleine» Einzugsgebiete (ca. 10 – 1'000 km²) – **neue Entwicklungen in zwei Schritten:** IDAF und dann stochastischer Wettergenerator

Projektpartner:

- > Universität Zürich (Hydrologie, Leitung)
- > Université de Grenoble & INP (Meteorologie: WG)
- > Universität Graz (Meteorologie: Reforecasts)
- > Universität Bern (Hydrologie)

Überwachung und Bewertung durch ein
Expertengremium (4 unabhängige Mitglieder)



EXCH (2020-2025) – BAFU, BFE

Ausweitung auf die ganze Schweiz

1. Wettergeneratoren

- > stochastische Multisite-Generierung (GWEX)
- > Parametrisierung auf Beobachtungen (1930-2019)
- > stündliche Beobachtungen für Niederschlag (~450 sites) und Temperatur (~100 sites)
- > Modellierung von 300'000 Jahren
- > unabhängiger, alternativer Wettergenerator : SCAMP
- > [Machbarkeitsstudie zur Wettergenerierung mit «Reforecasts» \(ECMWF\)](#)

2. Hydrologische Simulation

- > Modell HBV (inkl. Schnee und Gletscher)
- > ~330 Teileinzugsgebiete (Kalibrierung: ~140)
- > Kontinuierliche Simulationen von 300'000 Jahren

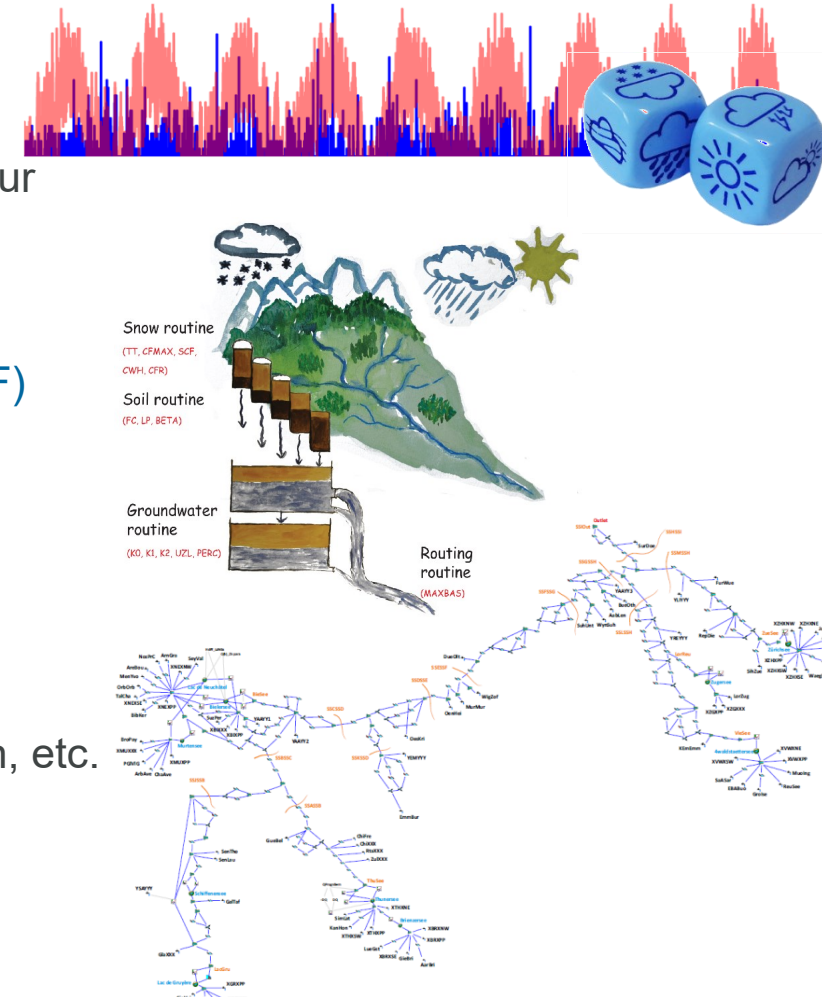
3. Hydrologisches «Routing»

- > RS Minerve
- > Inkl. Rückhalteeffekte von Seen, Regulierung, Betrieb von Stauanlagen, etc.

4. ~~Integration der Risikoanalyse für Schlüsselstandorte~~

5. Ziele

- > «grosse» (> 1'000 km²) und «kleine» (10 – 1'000 km²) EZG
- > Ermittlung von Extremereignissen (T = 1'000 – 10'000 Jahre)





EXCH Ziele

Projekt «EXAR»

Für **19** Stauanlagen unter Bundesaufsicht



Methoden / (Resultate für Stauanlagen)

Hydrologische Langzeitsimulation
(Hydrogramme für Nachweise)

Projekt «EXCH»

Für **32** Stauanlagen unter Bundesaufsicht
mit **EZG > 1'000 km²**



Hydrologische Langzeitsimulation
(Hydrogramme für Nachweise)

Für **110** Stauanlagen unter Bundesaufsicht
mit **10 km² < EZG < 1'000 km²**



Hydrologische Langzeitsimulation
(Hydrogramme für Nachweise)

Für **43** Stauanlagen unter Bundesaufsicht
mit **EZG < 10 km²**
sowie Anlagen unter kantonaler Aufsicht

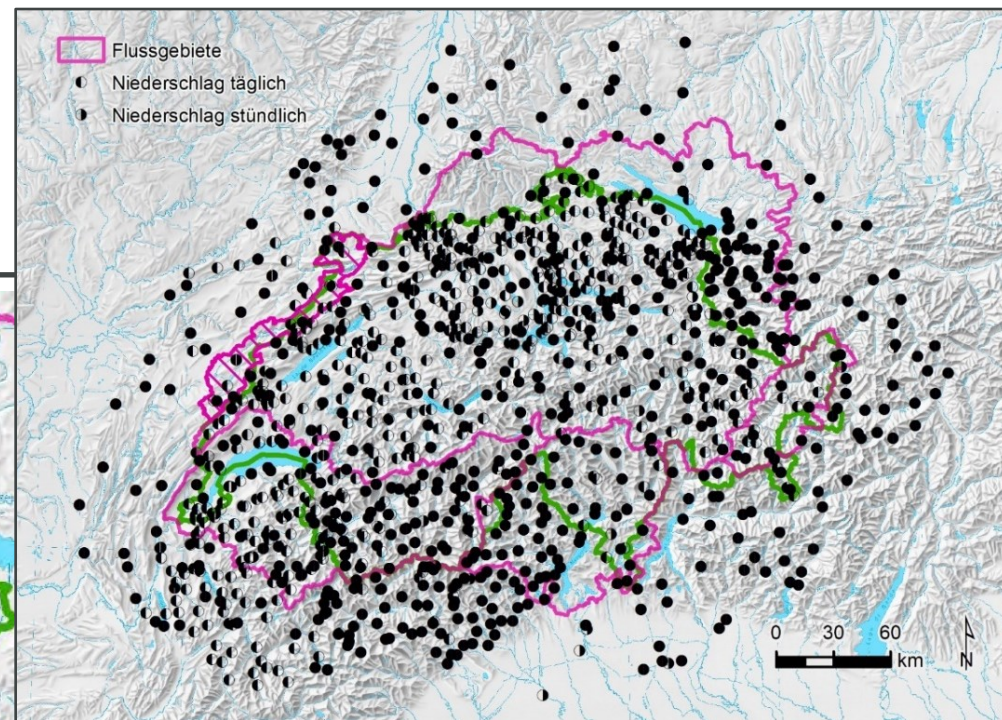
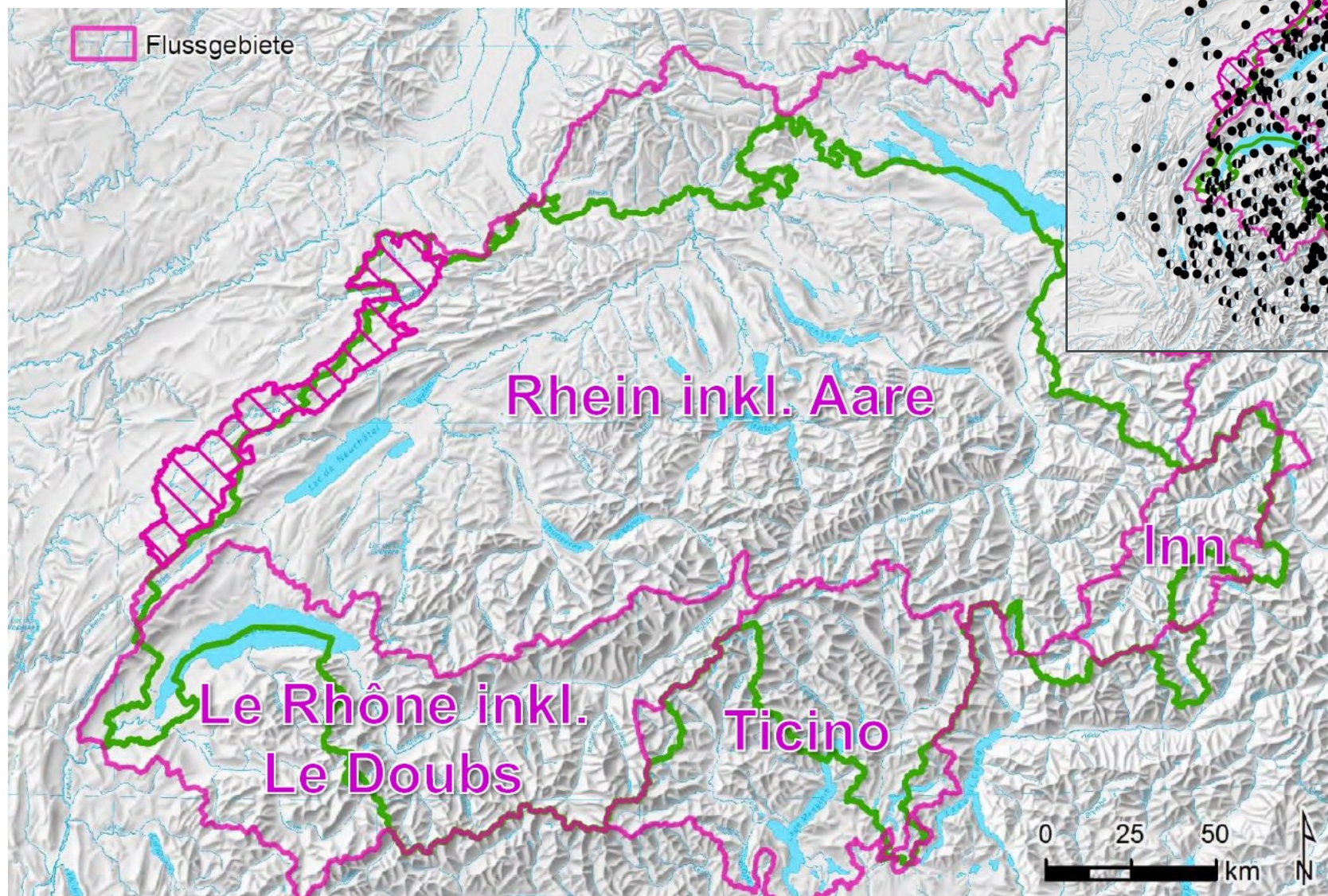


Meteorologische Charakterisierung
(Intensität des Gebietsniederschlags als Funktion der Dauer, IDAF)
Entwicklung eines Tools zur Bestimmung der IDAF-Kurven für jedes beliebige EZG in der Schweiz



EXCH

Ausweitung auf die ganze Schweiz

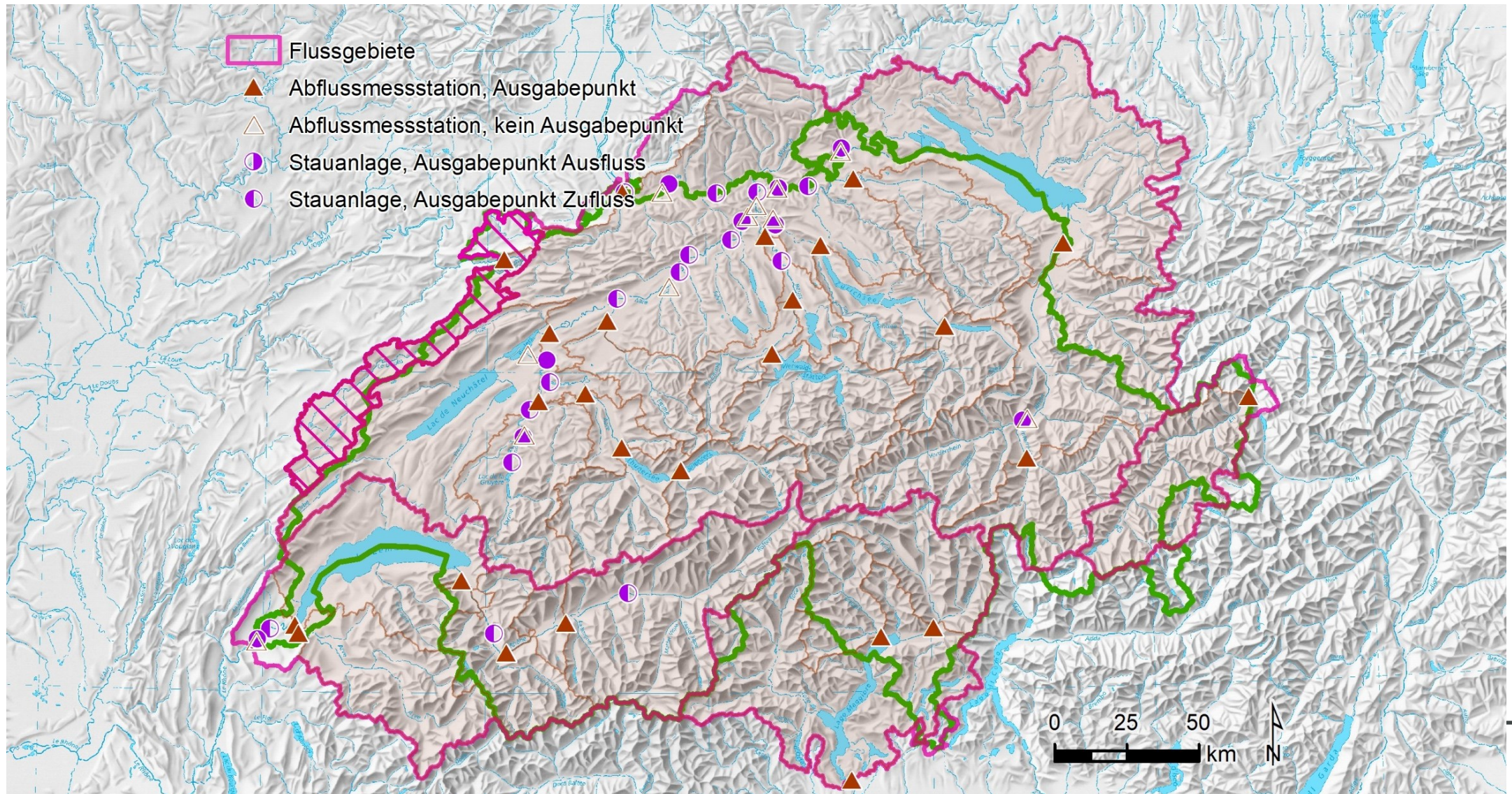


1'094 Stationen täglich
623 Stationen stündlich



EXCH

“grosse” Gebiete (> 1'000 km²)





EXCH

“kleine” Gebiete (ca. 10-1'000 km²)

Flussgebiete

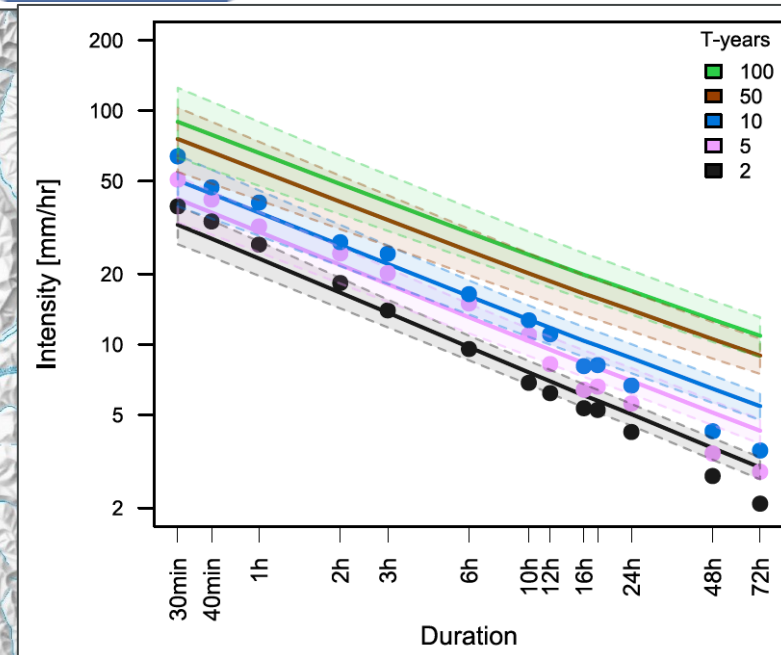
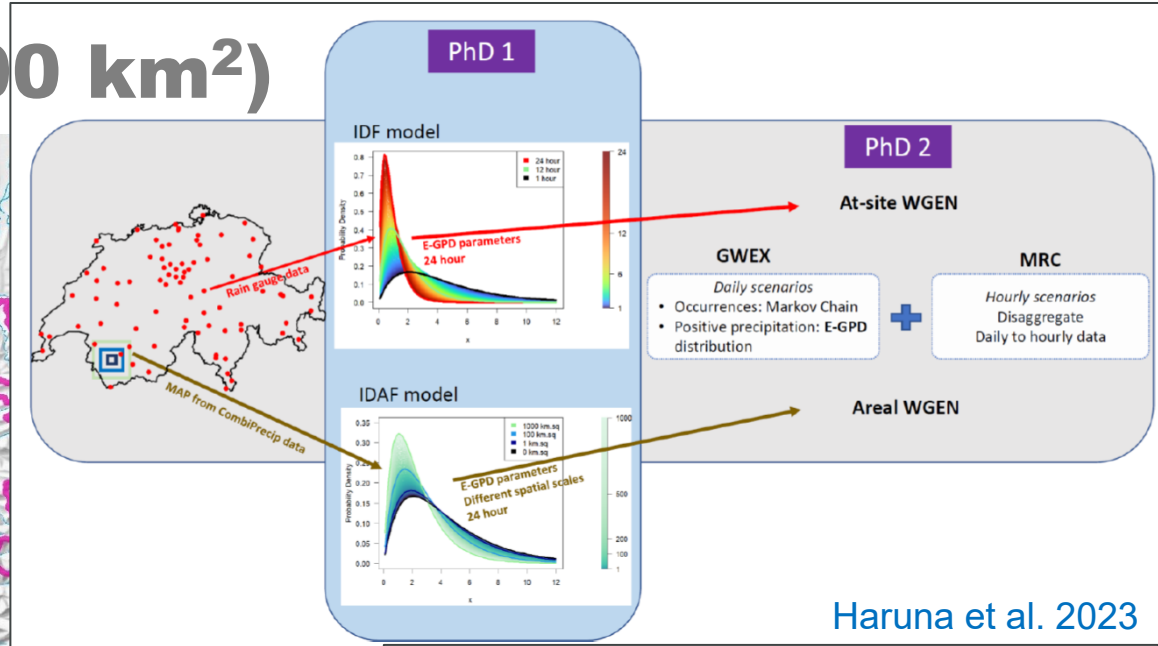
Einzugsgebiete 10–1 000 km²

Einzugsgebiete 5–10 km²

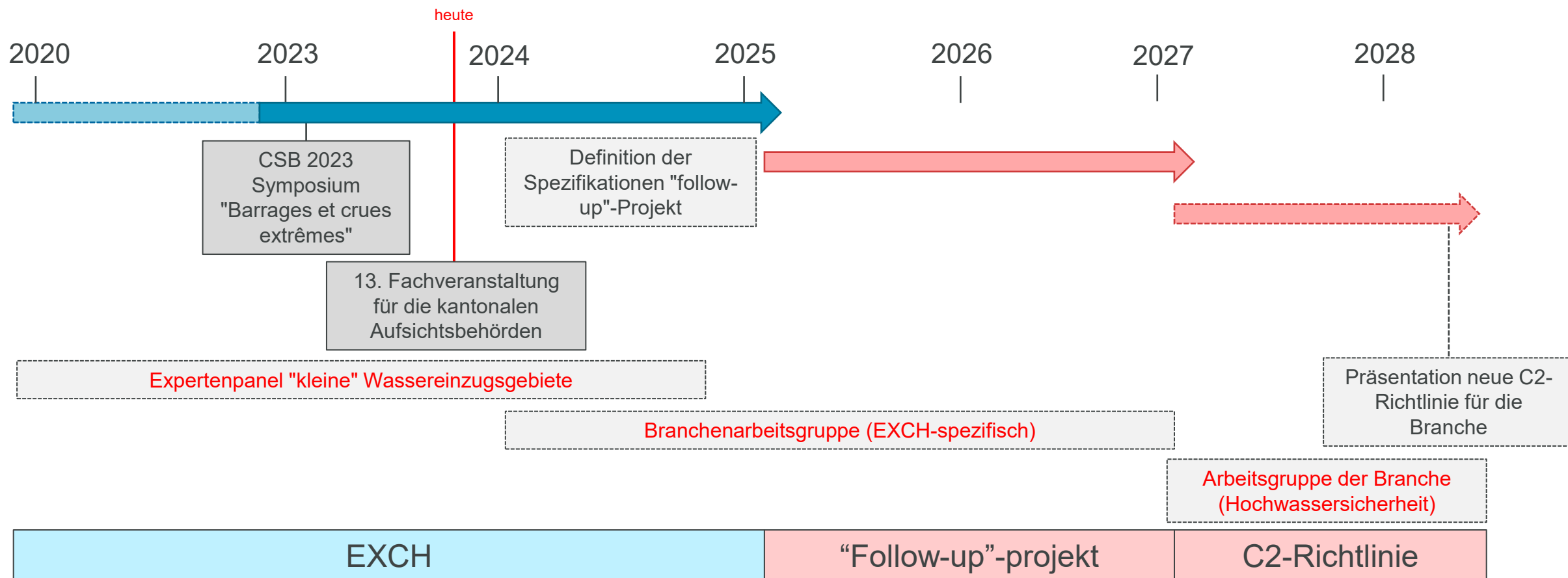
Einzugsgebiete 1–5 km²

Wettergenerator nur wenn robust

Kein Wettergenerator Wetter, sondern ID(A)F



AUSBLICK Roadmap



Das angekündigte Programm ist ein geplantes internes Programm. Die angekündigten Termine hängen von vielen Faktoren ab, u. a. vom Fortschritt anderer Projekte im Zusammenhang mit dem nächsten C2-Update.



REFERENZEN

-
- Andres, N.; Steeb, N.; Badoux, A.; Hegg, Ch. (Ed.)** *Extremhochwasser an der Aare. Hauptbericht Projekt EXAR. Methodik und Resultate. WSL Berichte 104, 2021.*
- Evin, G. et al.** Stochastic generation of multi-site daily precipitation focusing on extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(1):655-672, **2018**. [<https://doi.org/10.5194/hess-22-655-2018>]
- Haruna, A. et al.** Performance-based comparison of regionalization methods to improve the at-site estimates of daily precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences* 26(10):2797-2811, **2022**. [<https://doi.org/10.5194/hess-26-2797-2022>]
- Haruna, A. et al.** Modeling Intensity-Duration-Frequency curves for the whole range of non-zero precipitation: A comparison of models. *Water Resources Research* 59(6):e2022WR033362, **2023**. [<https://doi.org/10.1029/2022WR033362>]
- Haruna, A. et al.** Modeling areal precipitation hazard: a data-driven approach to model Intensity-Duration-Area-Frequency relationships using the full range of non-zero precipitation in Switzerland. *Water Resources Research* [preprint], **2023**. [<https://doi.org/10.22541/essoar.169111775.53035997/v1>]
- Maloku, K. et al.** Accounting for precipitation asymmetry in a Multiplicative Random Cascades Disaggregation Model. *EGUsphere* [preprint], **2023**. [<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-544>]
- Raynaud, D. et al.** Assessment of meteorological extremes using a synoptic weather generator and a downscaling model based on analogues. *Hydrology and Earth System Sciences* 24(9):4339-4352, **2020**. [<https://doi.org/10.5194/hess-24-4339-2020>]
- Staudinger, M. et al.** *Hochwasserereignisse aus kontinuierlicher Langzeitsimulation zur Überprüfung der Sicherheit der Stauanlagen.* Universität Zürich, Zürich, Switzerland, **2021**.
- Viviroli, D. et al.** Comprehensive space-time hydrometeorological simulations for estimating very rare floods at multiple sites in a large river basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22(9):2891-2920, **2022**. [<https://doi.org/10.5194/nhess-22-2891-2022>]
-



Fragen?

Merci pour votre attention

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Grazie per l'attenzione

Alexandre Pachoud

Dr Ing. civil, dipl. EPFL

Spécialiste Surveillance des barrages

Resp. principes de base pour la sécurité en cas de crue

alexandre.pachoud@bfe.admin.ch

Emmanuel Brocard

Dr ès sciences naturelles

Collaborateur scientifique hydrologie

emmanuel.brocard@bafu.admin.ch