



Hintergrundgespräch vom 22. Februar 2021

Extremhochwasser an der Aare

Methodik und Resultate

Dr. Christoph Hegg, Eidg. Forschungsanstalt WSL

Dr. Daniel Viviroli, Universität Zürich



Organisation der Studie

AP1 Synthese	AP2 Hydrometeorologie	AP3 Hydraulik & Morphologie	AP4 Bauwerksanalyse
<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtkoordination • Synthese Resultate • Ereignisbaumanalyse • Fortpflanzung von Unsicherheiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung Zeitreihen von Temperatur, Niederschlag und Abfluss • Statistische Auswertung • Vergleich mit historischen Hochwassern 	<ul style="list-style-type: none"> • Hydraulische Modellierung • Morphologische Prozesse • Analyse Schwemmgut 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse Bauwerke • Analyse Rutschungen • Versagenswahrscheinlichkeiten
			

Einzugsgebiet der Aare

- 288 km Fließstrecke
- 17'700 km² Fläche (43% der Schweiz)
- Diverse Städte an der Aare, z.B. Thun, Bern, Solothurn, Olten und Aarau
- 19 Stauanlagen, 3 Kernkraftwerke und nationale Verkehrswege (Strasse und Schiene)
- Mittlere Abflussmenge bei der Mündung in den Rhein: 560 m³/s



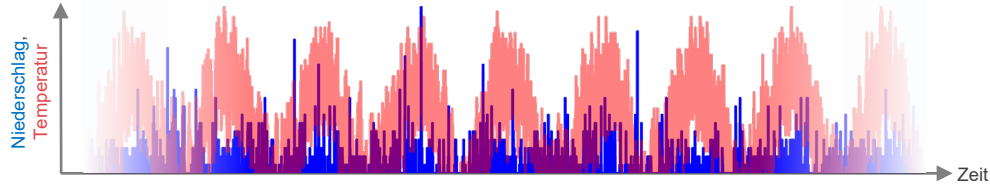


Methodik der Studie

- Simulation stündlicher **Temperatur- und Niederschlagszeitreihen** für 300'000 Jahre mittels Wettergeneratoren.
- Umwandlung des Niederschlags in **Abflüsse** für alle Fließgewässer im Einzugsgebiet der Aare mithilfe hydrologischer Modelle.
- Auswahl von niederschlagsbedingten Hochwasserganglinien mit Wiederkehrperioden von **100 bis 100'000 Jahren**.
- Identifikation von sechs **Schlüsselstellen** im Aare-System durch die Analyse von Bauwerksversagen.
- **Analyse der lokalen Gefährdung** durch Extremhochwasser an fünf Standorten, inklusive Versagen von Bauwerken, Rutschungen und morphologischen Prozessen. Visualisierung der Resultate mit **Gefährdungskurven** und **Überflutungskarten**.

Meteorologie und Hydrologie

Wetter-generator

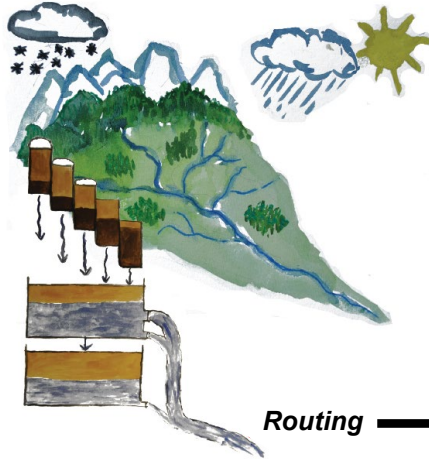


Grundlage: Stündliche Temperatur- und Niederschlagsdaten von 1930–2015

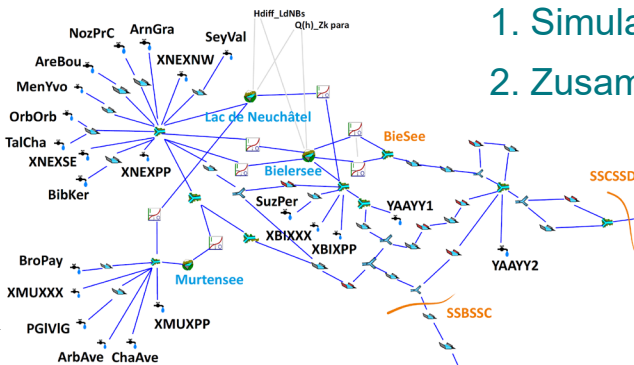
Abbildung heutiger Bedingungen

Hydrologisches Modell

Niederschlag
Gletscher
Schnee
Boden
Grundwasser



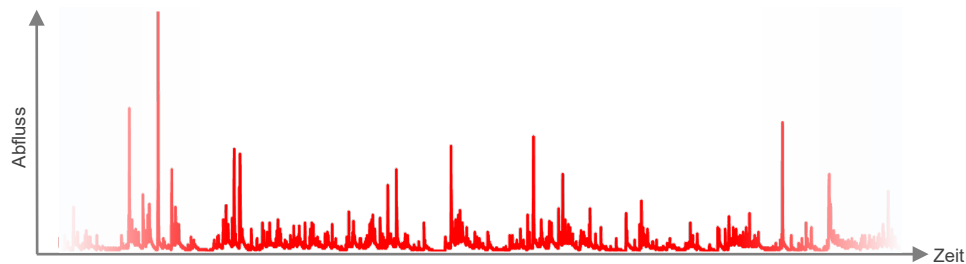
Routing



Zielgebiet: Wichtige Punkte im Aaregebiet

1. Simulationen für Einzugsgebiete mit Flächen $\sim 10\text{--}1'000\text{ km}^2$
2. Zusammensetzung zu grossen Einzugsgebieten

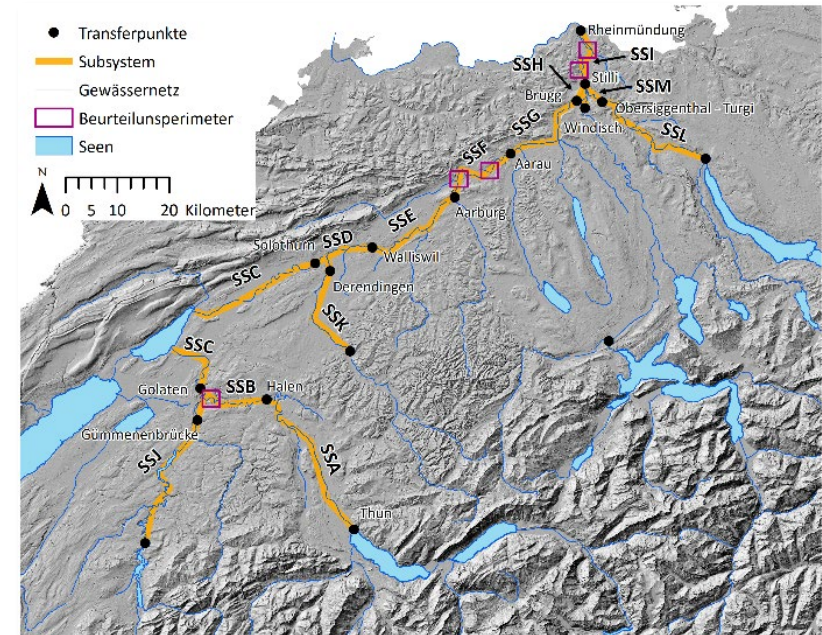
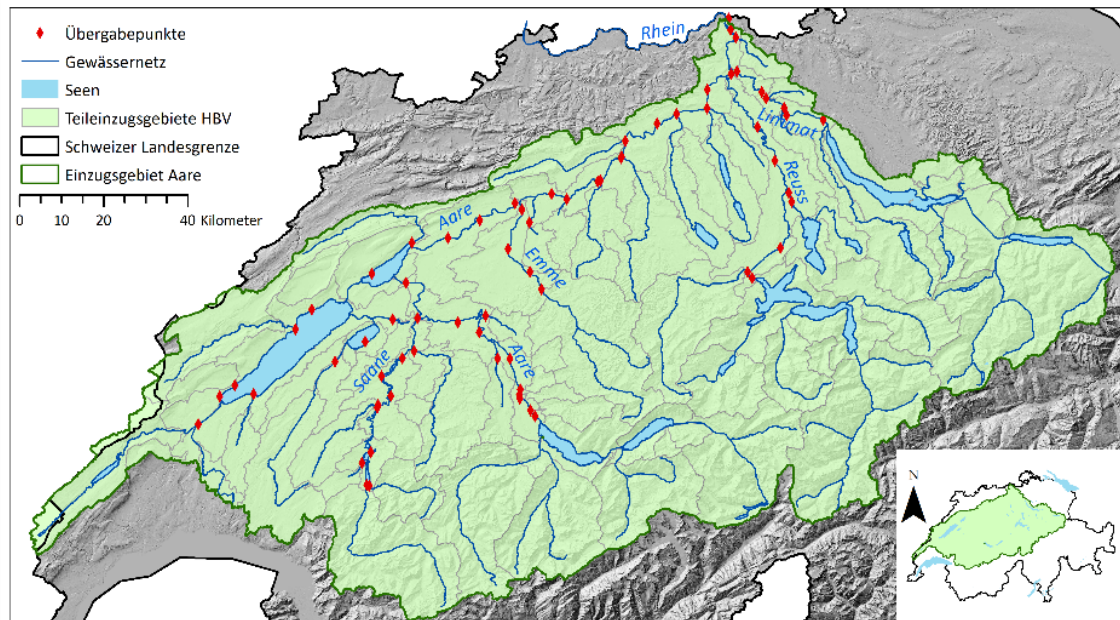
Zeitreihen



Zielgrösse: Schätzungen für sehr seltene Ereignisse, und realistisch für häufigere Ereignisse

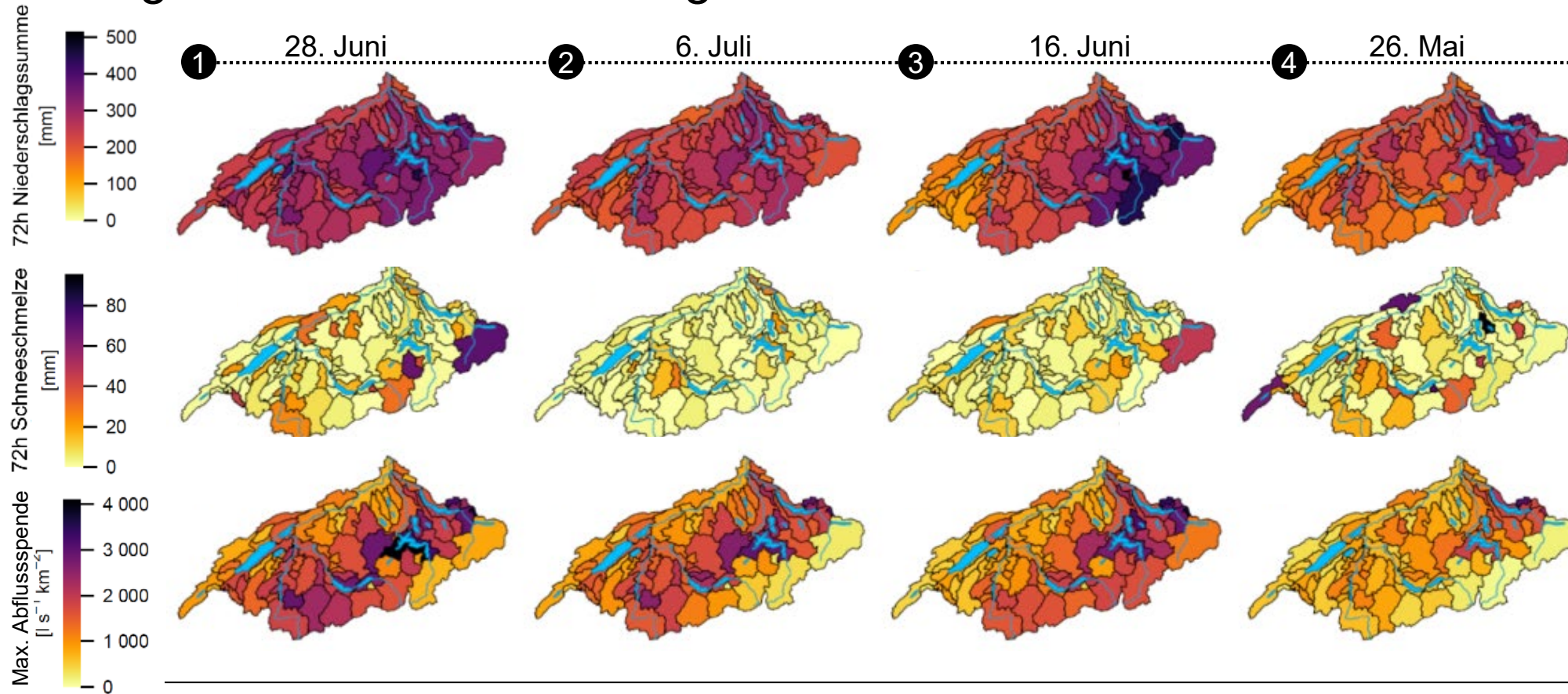
Meteorologie und Hydrologie

- Einteilung der Aare in 79 Teileinzugsgebiete
- An den **Übergabepunkten** werden die Daten vom hydrologischen Modell an das Routing-Modell (vereinfachte Hydraulik) transferiert.
- An den **Transferpunkten** werden Ganglinien ausgewählt und an das nächste **Subsystem** übergeben.



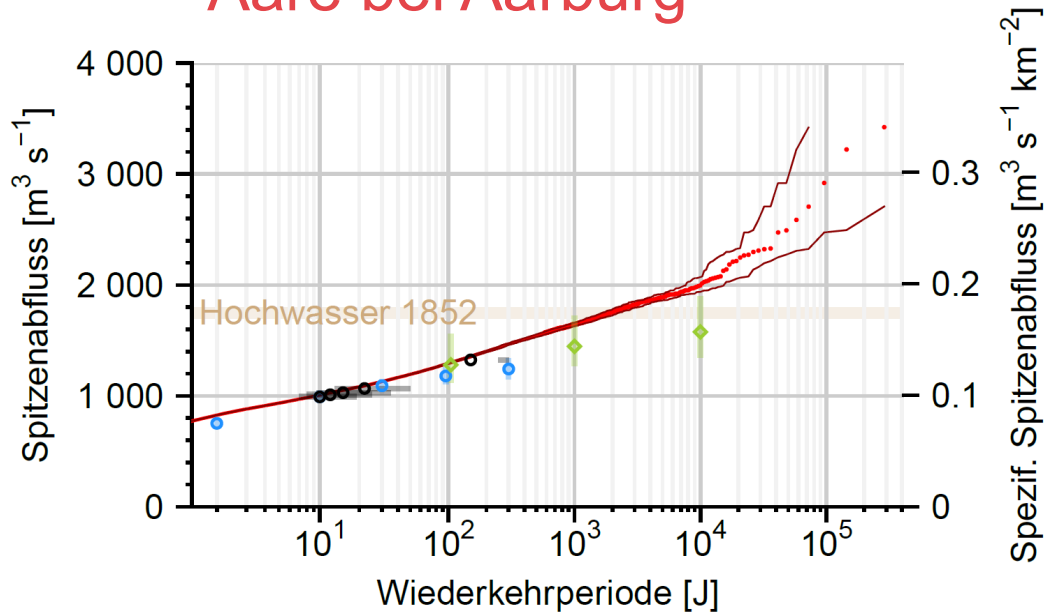
Meteorologie und Hydrologie

Beispiel der Simulationsergebnisse für die vier grössten Abflussereignisse der 300'000 Jahre langen Zeitreihe im Einzugsgebiet der Aare. Räumlich sind grosse Unterschiede möglich.

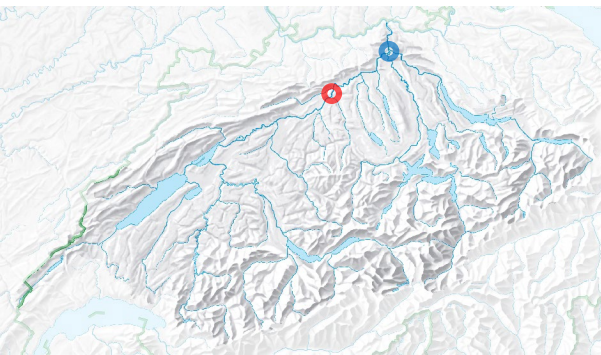
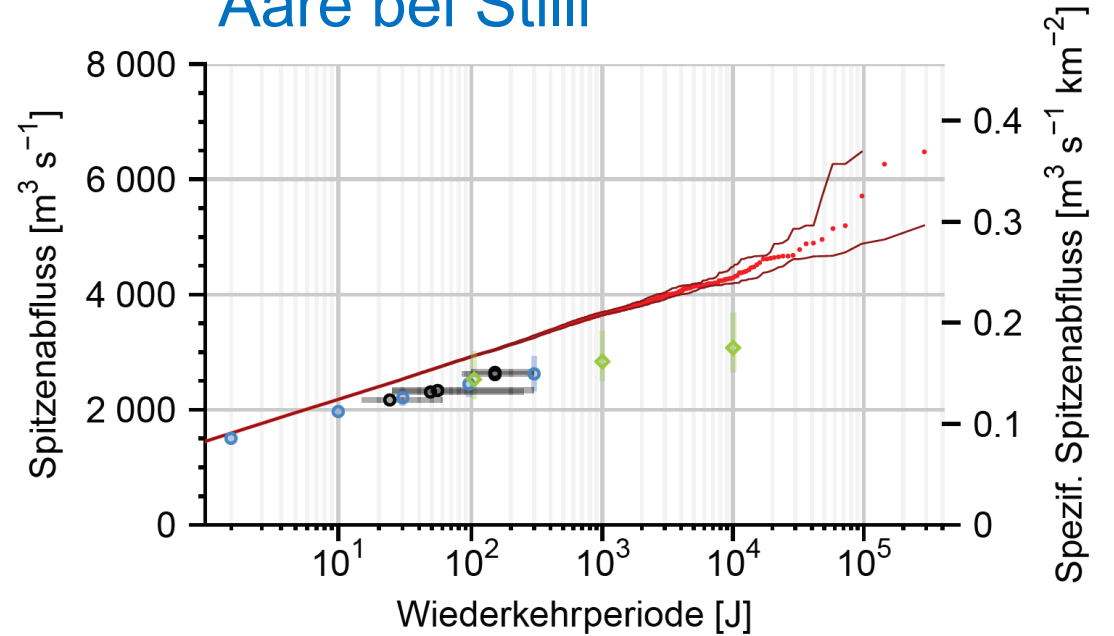


Bandbreite der Spitzenabflüsse

Aare bei Aarburg



Aare bei Stilli



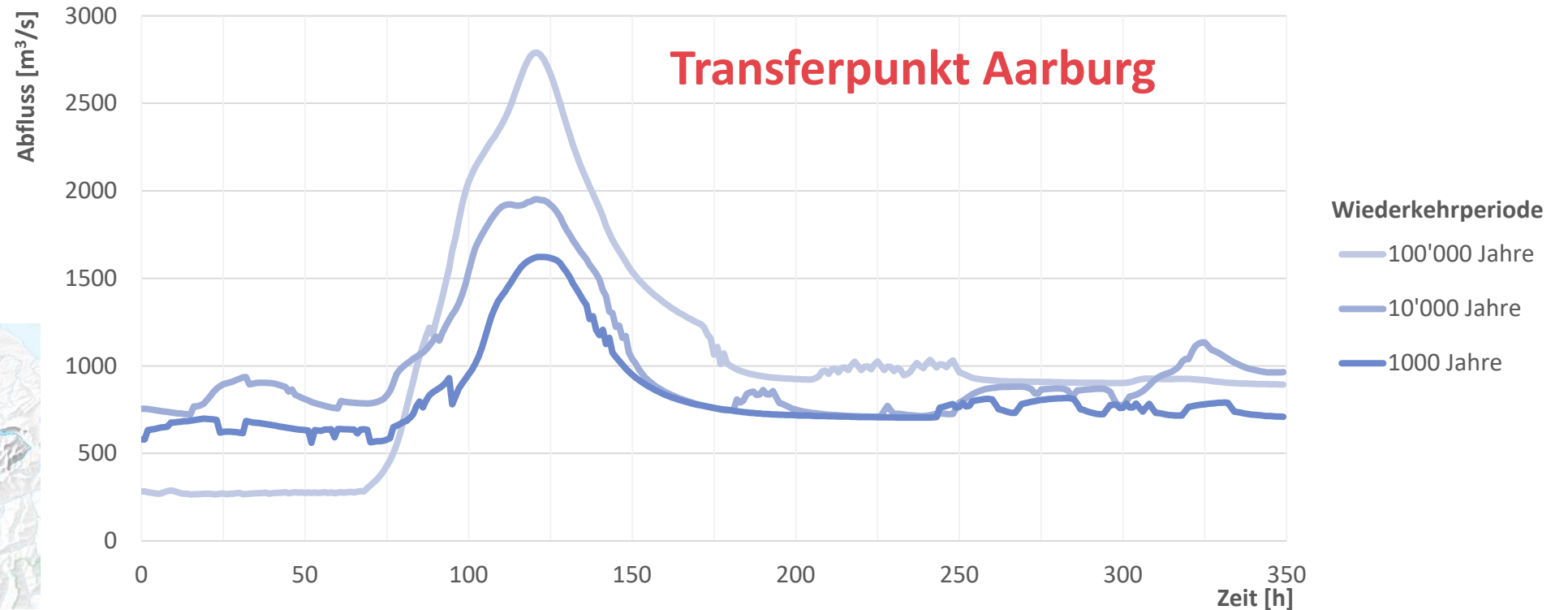
- Schätzung
- Beobachtung
- Hochwasserstatistik BAFU
- ◇— Hochwasserstatistik EPFL
- Schätzung historisch



Auswahl von typischen Hochwasserganglinien

Ausgewählte Ganglinien repräsentativ für das 1'000, 10'000 und 100'000 jährliche (durch das Wettergeschehen ausgelöste) Hochwasserszenario.

► Die Abflussganglinien dienen als hydrologische Grundlage für die Gefährdungsanalyse

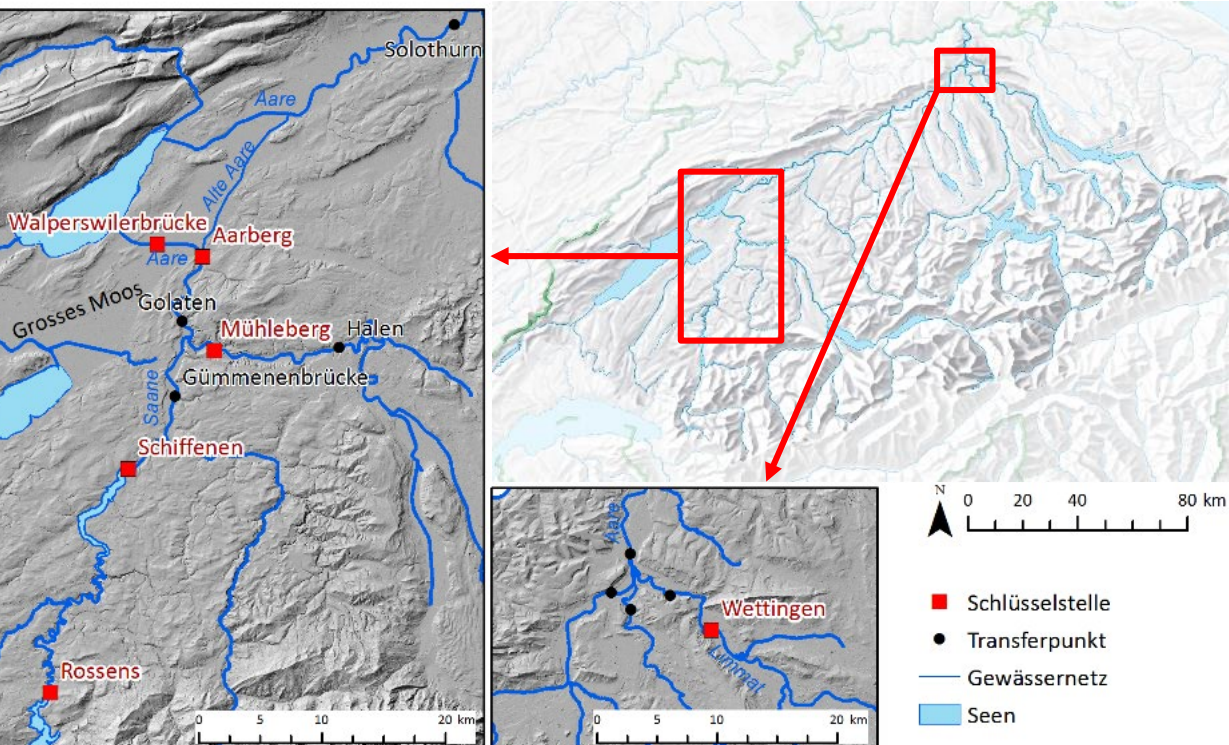


Verwendung der hydrometeorologischen Resultate

AP1 Synthese	AP2 Hydrometeorologie	AP3 Hydraulik & Morphologie	AP4 Bauwerksanalyse
<ul style="list-style-type: none">• Gesamtkoordination• Synthese Resultate• Ereignisbaumanalyse• Fortpflanzung von Unsicherheiten	<ul style="list-style-type: none">• Entwicklung Zeitreihen von Temperatur, Niederschlag und Abfluss• Statistische Auswertung• Vergleich mit historischen Hochwassern	<ul style="list-style-type: none">• Hydraulische Modellierung• Morphologische Prozesse• Analyse Schwemmgut	<ul style="list-style-type: none">• Analyse Bauwerke• Analyse Rutschungen• Versagenswahrscheinlichkeiten

Schlüsselstellen

Identifikation von **Schlüsselstellen** im Aare-System durch die Analyse von Bauwerksversagen



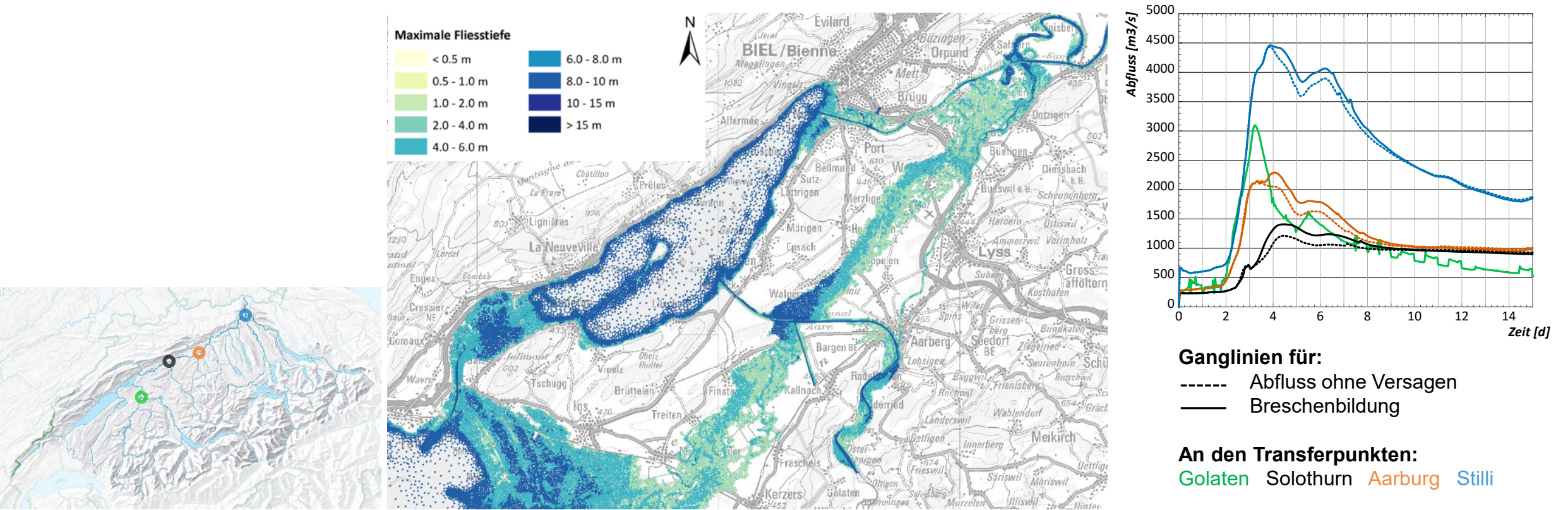
1. Sperrenbruch Stauanlage **Rossens**
2. Sperrenbruch Stauanlage **Schiffenen**
3. Sperrenbruch Stauanlage **Mühleberg**
4. Versagen an der Stauanlage **Aarberg**: (Teil-)Ausfall der Hochwasserentlastung oder Verklausung
5. Breschenbildung rechtsufrig am **Hagneckkanal** oberwasserseitig der Walperswilbrücke
6. Sperrenbruch Stauanlage **Wettingen** an der Limmat

5 der insgesamt 6 identifizierten Schlüsselstellen im Einzugsgebiet der Aare betreffen Gewässerabschnitte vor der Mündung des Flusses in den Bielersee.

Bedingt durch die Rückhaltevolumen im «Grossen Moos» und in den 3 Jurarandseen sind selbst grosse Flutwellen unterhalb von Solothurn stark gedämpft.

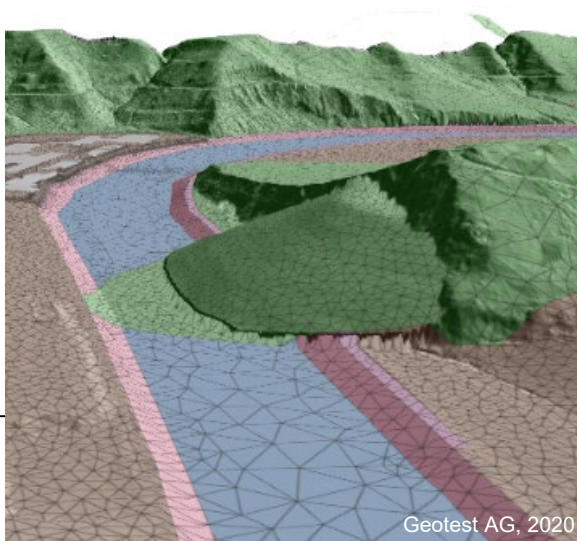
Schlüsselstellen

Beispiel **Hagneckkanal**: Breschenbildung rechtsufrig (oberwasserseitig der Walperswilbrücke) aufgrund Überströmen der Dammkrone führt zu einer Reaktivierung des alten Aarelaufs.

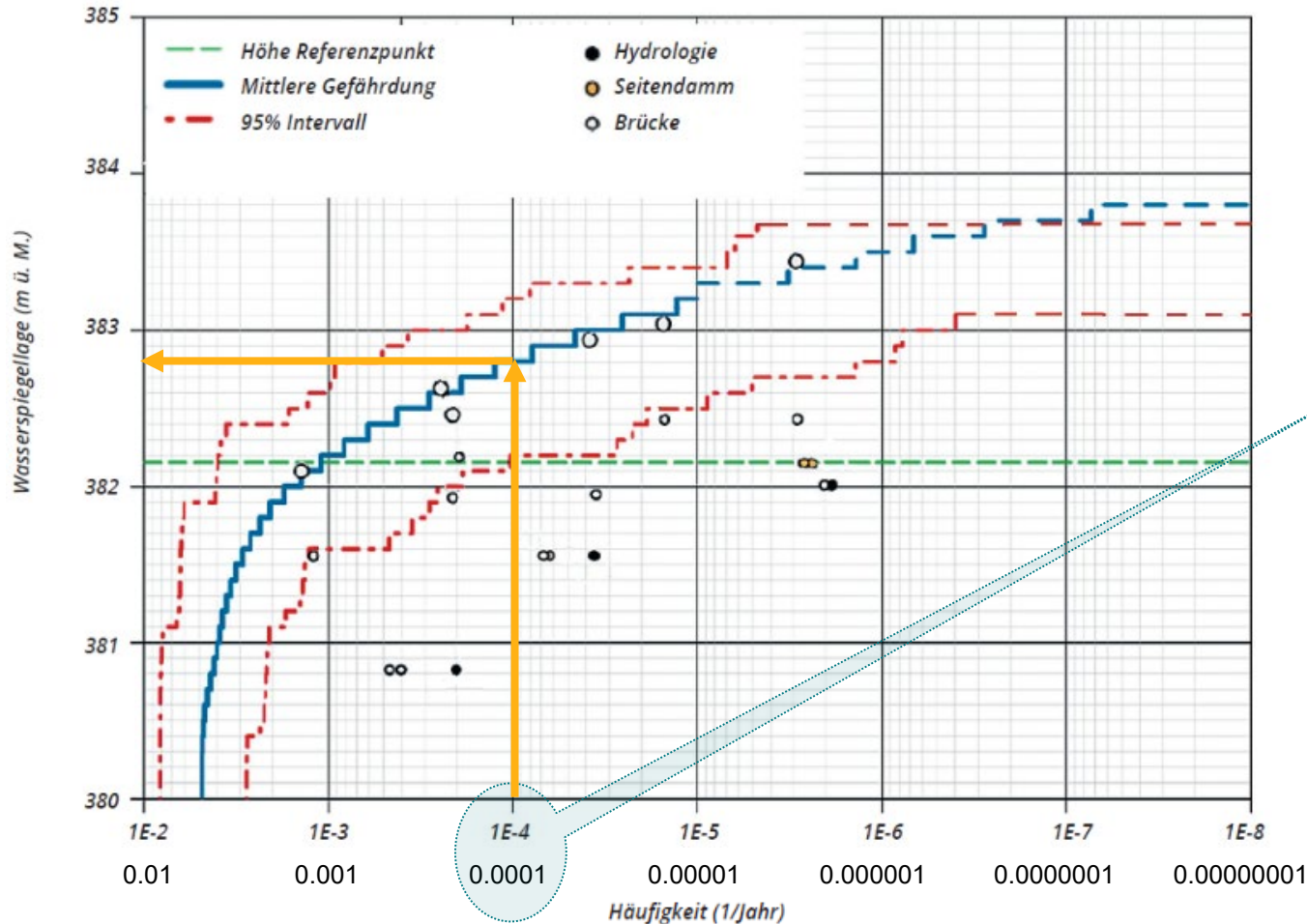


Lokale Untersuchung möglicher Gefahrenprozesse

- Wasserbauten (Stauanlagen, Seitendämme, Brücken)
- Rutschungen
- Schwemmholz
- Morphologische Prozesse (Schwebstofftransport, Ufererosion, Kolkbildung etc.)
- ▶ Gutachterliche **Szenarien-Kombination** mit ausgewählten Hochwasserabflüssen
- ▶ **Einordnung der Häufigkeit** mittels Ereignisbaumanalyse



Endprodukt Gefährdungskurve

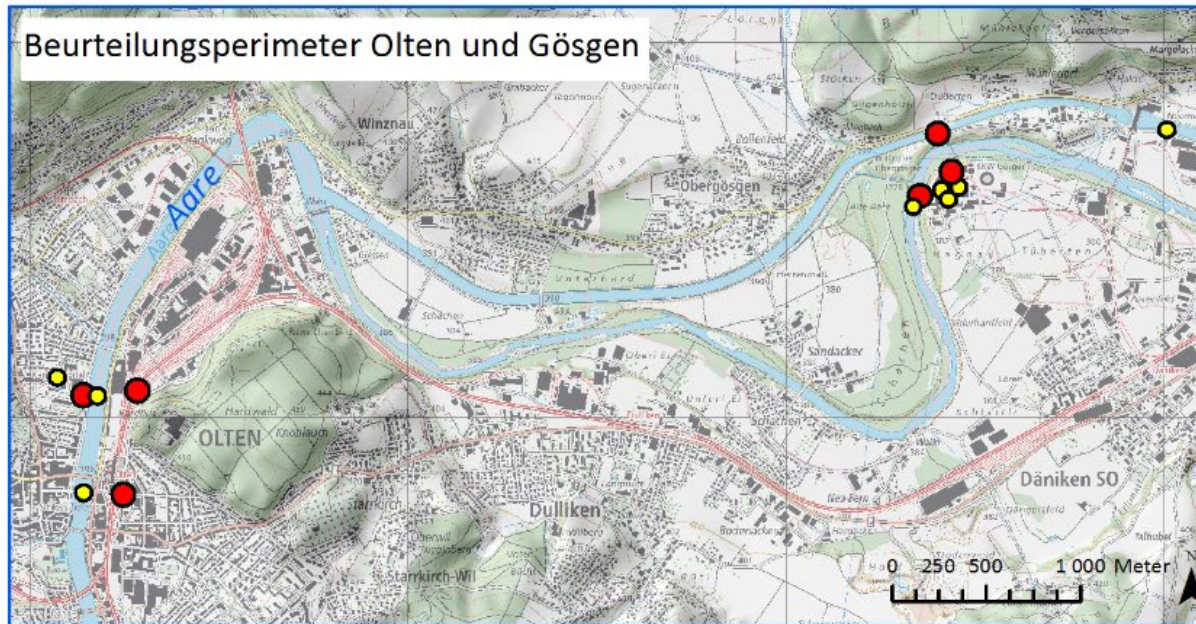
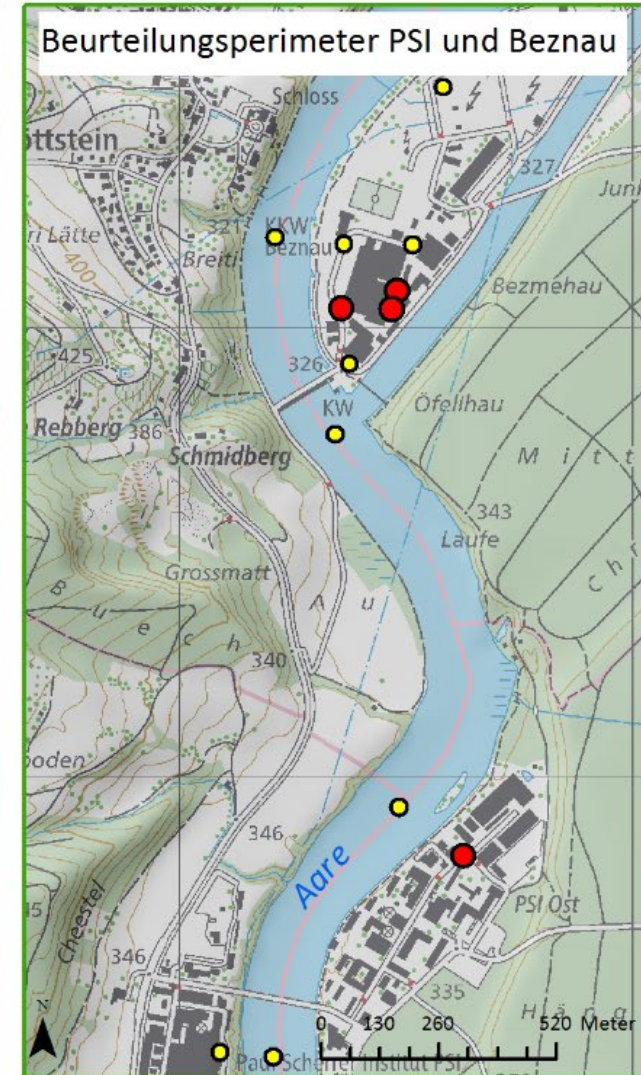
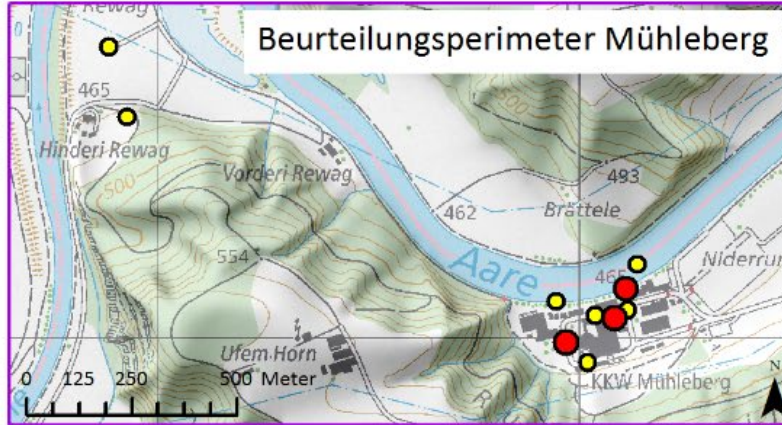


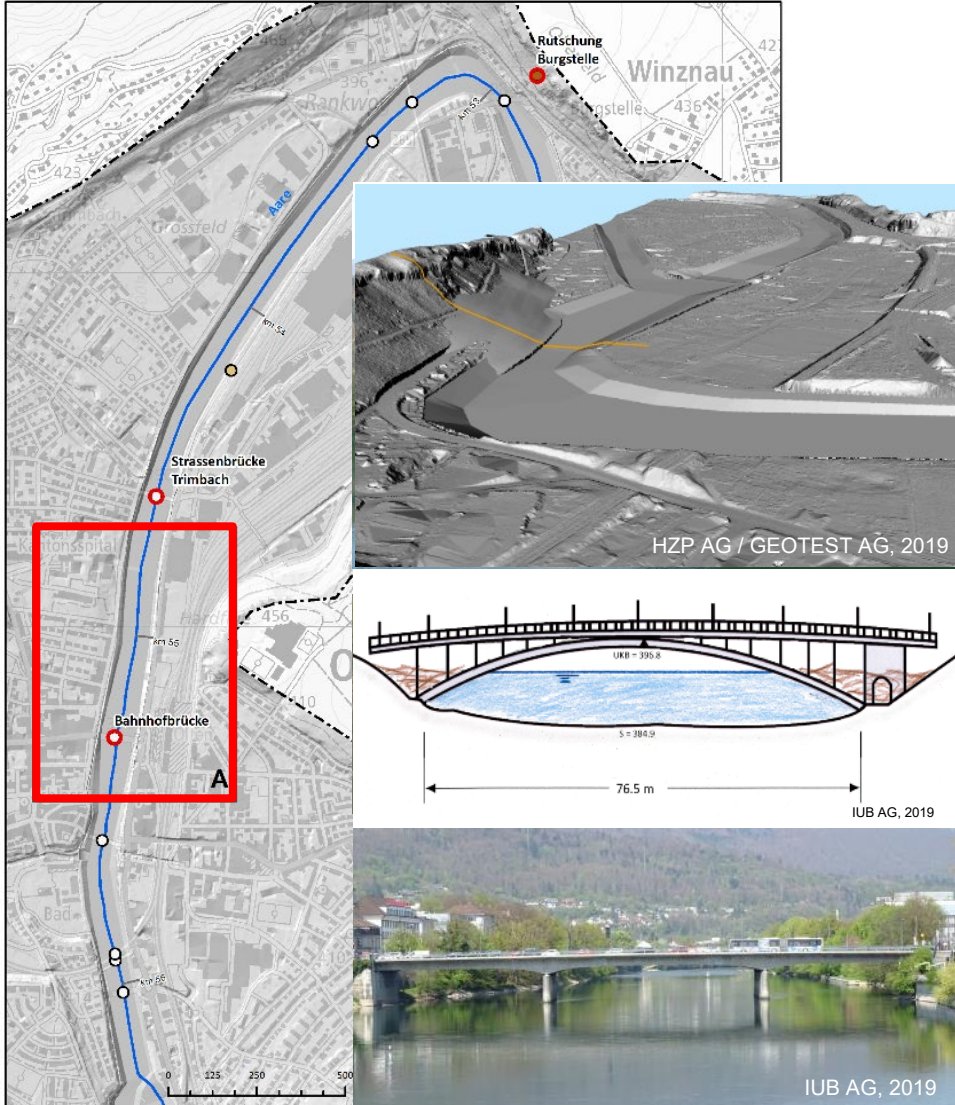
- Die Gefährdungskurve beschreibt wie häufig die **Wasserspiegellage** (WSPL) erreicht oder überschritten wird.
- Ein 95%-Intervall der **Unsicherheiten** ist mit roten gestrichelten Linien dargestellt.
- Aus der Kurve lässt sich die Wasserspiegellage für z.B. das **10'000-jährliche Hochwasser** ablesen.
- Die Gefährdungskurve ist das Resultat aus allen betrachteten **Szenarien**, welche Kombinationen von Hochwasserabflüssen und Phänomenen (wie z.B. Verklausungen oder Hangrutschungen) darstellen.
- Die Szenarien sind als **Punkte** in der Gefährdungskurve abgebildet und zeigen die Wasserspiegellage bei einer bestimmten Häufigkeit.

Fünf Standorte unter der Lupe



- Referenzpunkt
- Szenariopunkt

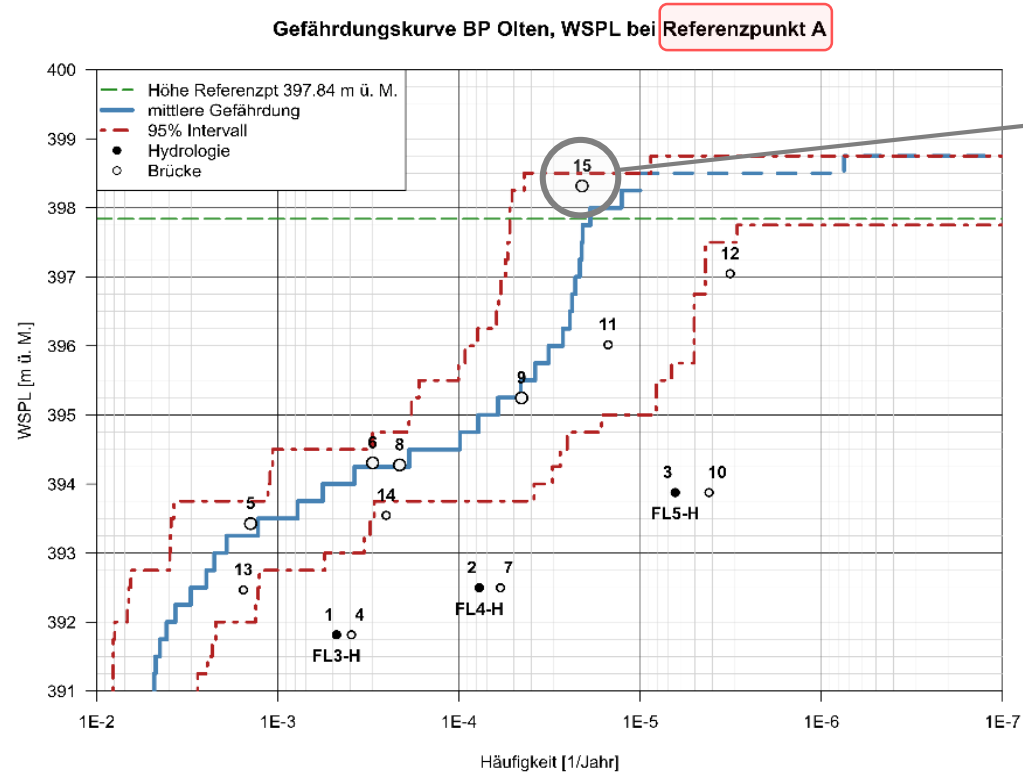




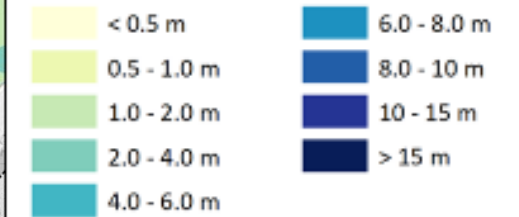
Eigenschaften Beurteilungssperimeter

- Analysestandorte / Bauwerke:
 - Zwei Brücken
 - Rutschung
- 1. Resultate aus dem hydrologischen Hochwasserszenario → Wasserspiegellage
- 2. Bauwerksversagen: Verkläuerungen und Rutschung
- 3. Ereignisbaumanalyse und Simulation mit Versagen

Gefährdungskurve Olten



Maximale Fließtiefe



Das Gebiet um den Bahnhof Olten wird nur dann überflutet, wenn ein 100'000-jährliches Hochwasserereignis mit einer Schwemmholtzverklausung zusammenfällt (Szenario 15 mit einer Häufigkeit von ca. 1 : 90'000 Jahren).

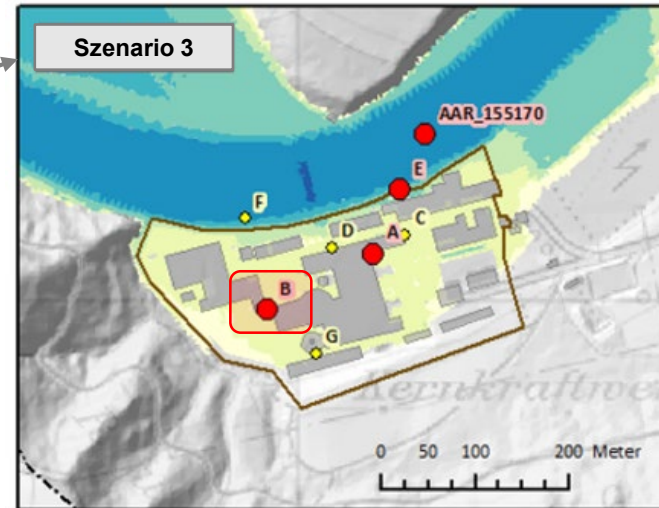
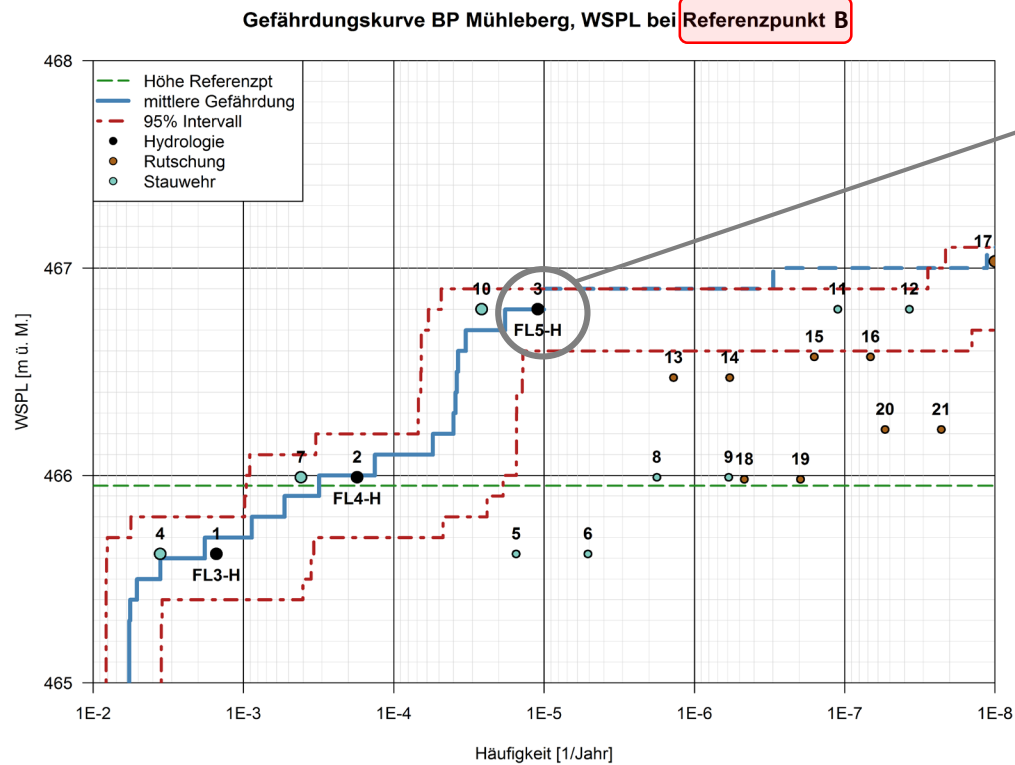
Die Überschwemmung würde bereits 1,8 km oberhalb der Brücke beginnen.

Das Industrieareal stünde teilweise über 2 m tief unter Wasser.

Das Gelände rund um den Bahnhof würde 50 cm (Referenzpunkt A) bis 3,1 m (Referenzpunkt C) hoch überflutet.

Gefährdungskurve Mühleberg

Folgend beziehen sich die Überflutungshöhen des Areals bei den Kernkraftwerken auf die **Standorte der Notstandsgebäude**.

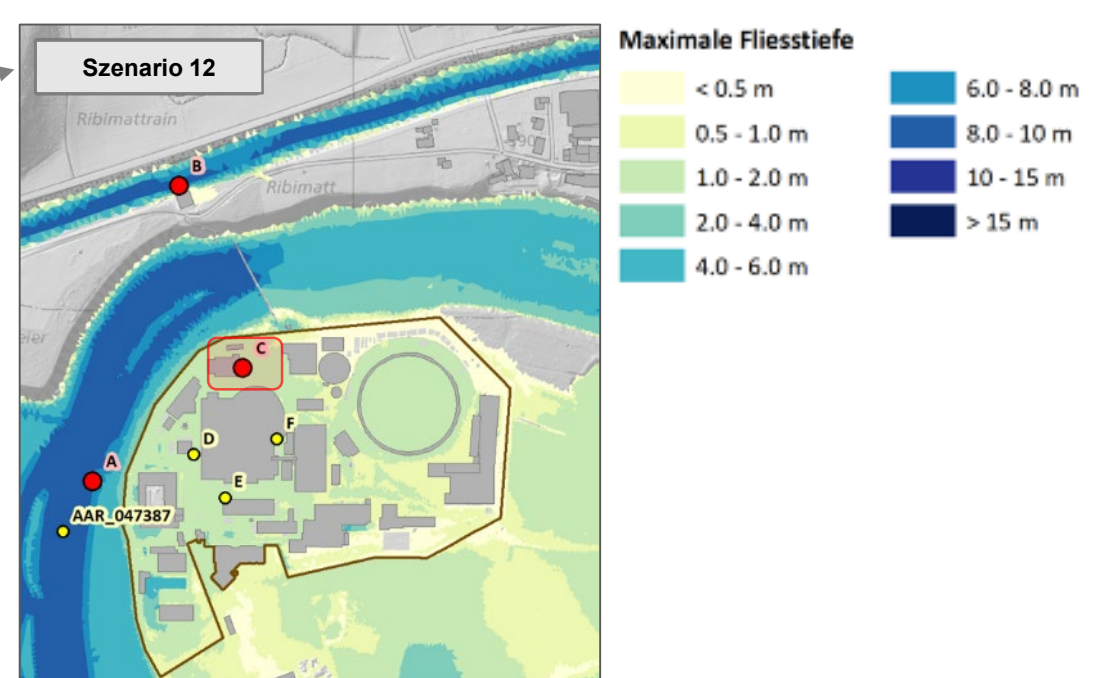
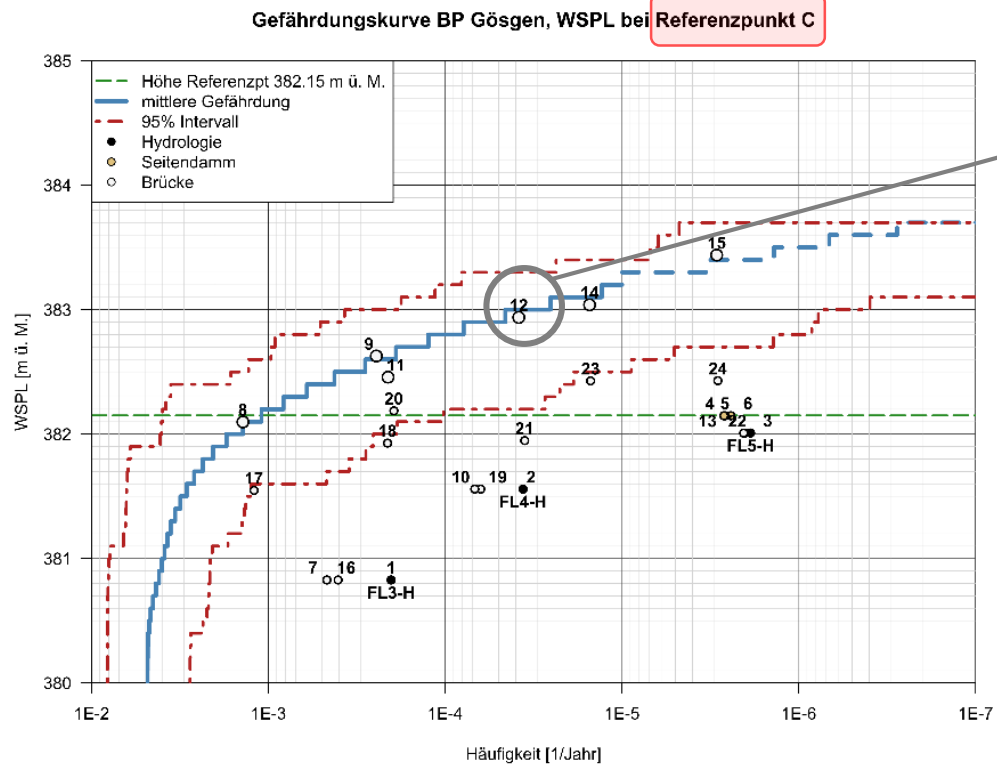


Beim 1000-jährlichen Hochwasser bleibt das Areal trocken.

Beim Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrdauer von 10'000 Jahren steht die Anlage 18 cm unter Wasser.

Dagegen würde ein 100'000-jährliches Hochwasser (repräsentatives Szenario 3) das Gelände knapp 1 m hoch überfluten.

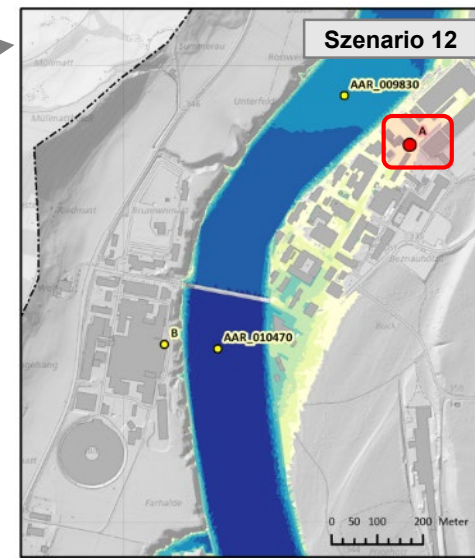
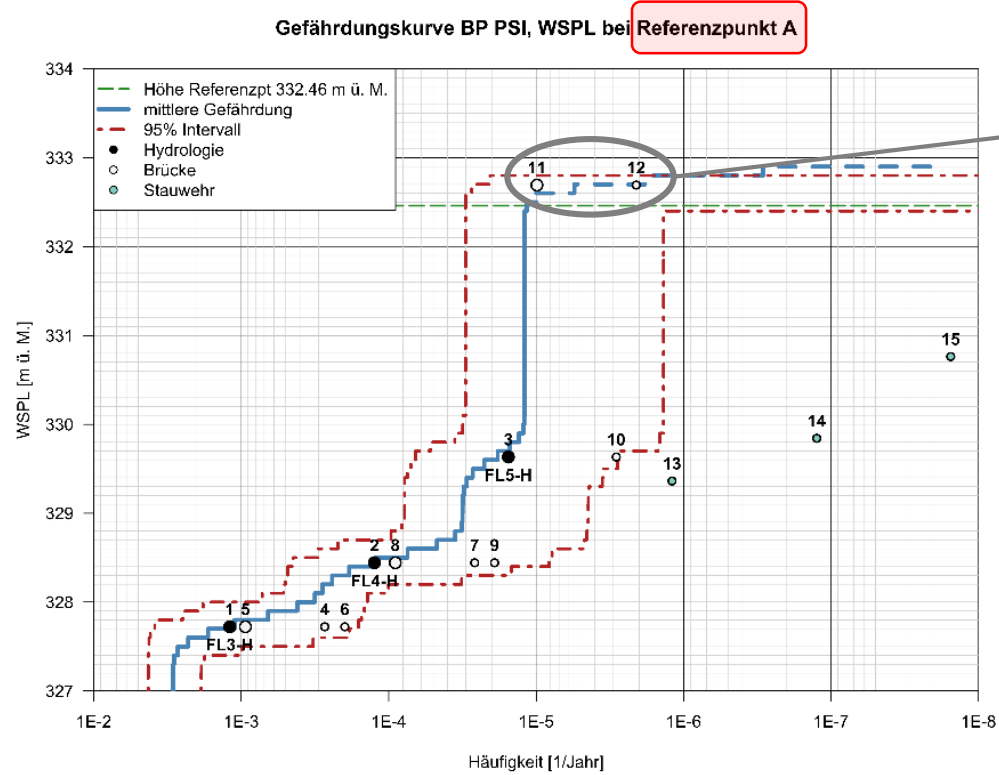
Gefährdungskurve Gösgen



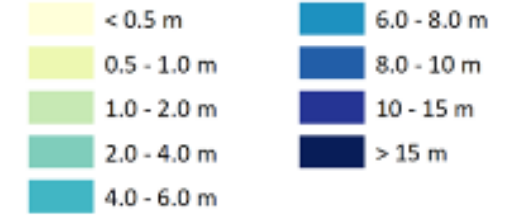
Für das 1'000- wie das 10'000-jährliche Hochwasser ist die Verklauung des Fussgängerstegs relevant. Die Überflutungshöhen betragen 5 bzw. 65 cm. Bei einem 100'000-jährlichen Hochwasser beträgt die Wassertiefe gar 1,15 m.

Für das Szenario 12 (mit einer Häufigkeit von ca. 1: 70'000 Jahren) resultiert eine Wasserspiegellage von 79 cm beim Notstandsgebäude.

Gefährdungskurve Paul Scherrer Institut



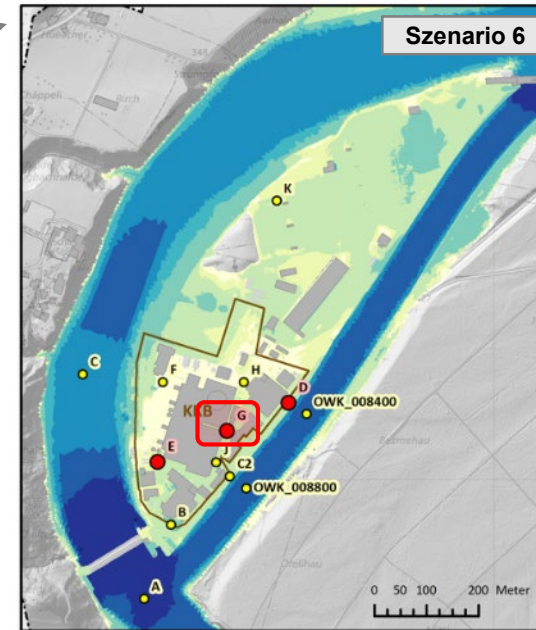
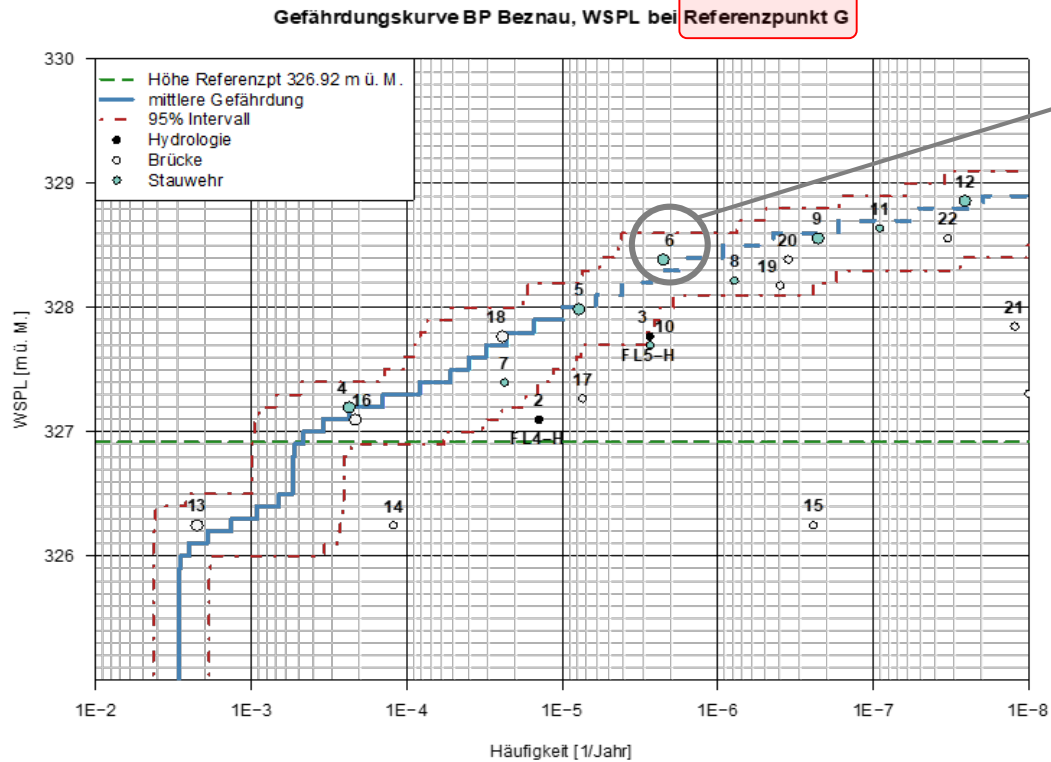
Maximale Fliesstiefe



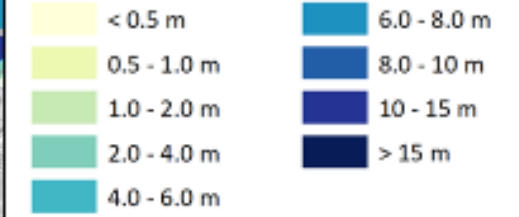
Zu einer Überflutung auf dem Areal kommt es nur, wenn die PSI-Stahlbetonbrücke bei einem 100'000-jährlichen Hochwasserabfluss gleichzeitig durch Schwemmholz verklaut wird (Szenario 11 und 12 ab einer Häufigkeit von ca. 1 : 100'000 Jahren).

Dabei würde der rechtsufrige Referenzpunkt mit einer Fliesstiefe von 20 bis 25 cm überflutet.

Gefährdungskurve Beznau



Maximale Fliesstiefe



Szenario 6: 1'000-jährlicher Spitzenabfluss mit Ausfall der Hochwasserentlastung am Stauwehr Beznau

Zu einer Überflutung des Kraftwerkareals kann es mit rein niederschlagsbedingten Abflüssen kommen, aber auch in Kombination mit Schwemmholzverklausungen oder durch (Teil-)Ausfälle der Hochwasserentlastung am Stauwehr Beznau.

Beim 1'000-jährlichen Hochwasser bleibt das Areal trocken. Das 10'000-jährliche Hochwasser führt beim Notstandsgebäude zu einer Überflutung von 38 cm und das 100'000-jährliche Hochwasser zu ca. 1,1 m.

Annäherung an die Realität

- **Modellkette** nach neustem Stand von Wissenschaft und Technik
- **Modularer Aufbau** der Modellkette erlaubt flexible Anwendung und Anpassungsmöglichkeiten
- **Physikalische Grenzen** des Niederschlags? Mit den vorliegenden Simulationen wohl noch nicht erreicht
- Die hydrologischen Simulationen wurden für **mittelgrosse Einzugsgebiete** durchgeführt. Eine Anwendung der Resultate auf kleinere Einzugsgebiete (wenige 10 km² Fläche) ist nur eingeschränkt möglich.
- **Modellvereinfachungen**, beispielsweise für das Versagen von Bauwerken
- **Expertenbeurteilungen** auf verschiedenen Stufen der Modellkette, beispielsweise für die Einschätzung von Rutschvolumen und Schwemmholz mengen

Umfassende Dokumentation auf www.wsl.ch/exar

- Hauptbericht
- Synthese (Deutsch, Französisch), Italienisch und Englisch demnächst
- Detailberichte und Resultatmappen:

Bericht	Titel
Detailbericht A	Hydrometeorologische Grundlagen
Detailbericht B	Historische Hochwasser
Detailbericht C	Rutschungen und Schwemmholz
Detailbericht D	Versagen wasserbaulicher Einrichtungen
Detailbericht E	Hydraulische Modellierungen
Detailbericht F	Morphologische Untersuchungen
Detailbericht G	Ereignisbaumanalyse und Gefährdungskurven
Resultatmappen	Teil 1 Kalibrierung / Validierung hydraulisches Modell Teil 2 Analysestandorte und Schlüsselstellen im Gesamtsystem Teil 3 Resultate der Beurteilungssperimeter bzgl. hydraulische Prozesse

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Universität
Zürich^{UZH}

ETH zürich



EPFL