



ENSI.CH-5201 Brugg

**Einschreiben mit Rückschein**

Kernkraftwerk  
Gösgen-Däniken AG  
Postfach  
4658 Däniken

Klassifizierung: **keine**

Ihr Zeichen: [REDACTED]

Unser Zeichen: [REDACTED]

Sachbearbeiter: [REDACTED]

**Brugg, 12. November 2021**

**Verfügung: Gefährdungsannahmen EXAR-2021 für die Standorte der Schweizer Kernanlagen an der Aare**

Sehr geehrte Damen und Herren

Im Rahmen der fortwährenden Weiterentwicklung der Sicherheitsanalysen der Schweizer Kernkraftwerke hat das ENSI zusammen mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) und den Bundesämtern für Energie (BFE), für Bevölkerungsschutz (BABS) und für Meteorologie und Klimatologie (Meteo-Schweiz) mit der Studie EXAR die Erarbeitung von Grundlagen für die Beurteilung der Gefährdung durch Extremhochwasser an Aare und Rhein in Auftrag gegeben.

Ziel des Projekts EXAR ist es, die bisher verwendeten Grundlagen für die Beurteilung der Gefährdung durch extreme Hochwasserereignisse an der Aare und, in einer zweiten Etappe, am Rhein unterhalb des Zusammenflusses der beiden Flüsse, zu überprüfen, allfällige Lücken zu identifizieren, sie zu schliessen und die Gefährdungsbestimmung zu harmonisieren. Die Resultate des ersten Teils der Studie (Aare) liegen nun vor.

**1 Erwägungen des ENSI**

**1.1 Rechtliche Grundlagen**

Gemäss Art. 22 Abs. 2 Bst. d des Kernenergiegesetzes vom 21. März 2003 (KEG; SR 732.1) ist der Bewilligungsinhaber verpflichtet, während der ganzen Lebensdauer der Kernanlage Nachprüfungen und systematische Sicherheits- und Sicherheitsbewertungen durchzuführen. Weiter muss er die Entwicklung von Wissenschaft und Technik verfolgen (Bst. h).



**Klassifizierung:**  
Betreff:

**keine**  
Verfügung: Gefährdungsannahmen EXAR-2021 für die Standorte der Schweizer Kernanlagen an der Aare

Gemäss Art. 36 Abs. 1 der Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (KEV; SR 732.11) hat der Bewilligungsinhaber die Entwicklung der fachbezogenen Wissenschaft, insbesondere Erkenntnisse aus der Forschung, zu verfolgen und zu prüfen, inwieweit daraus Erkenntnisse für die Sicherheit seiner Anlage abgeleitet werden können.

Bei neuen Gefährdungsannahmen oder bei Änderung der in der Baubewilligung zugrunde gelegten Gefährdungsannahmen hat der Bewilligungsinhaber die deterministische Störfallanalyse und die probabilistische Sicherheitsanalyse mit den neuen Annahmen durchzuführen und die Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage zu bewerten (vgl. Art. 13 der Verordnung des UVEK vom 17. Juni 2009 über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen [Gefährdungsannahmenverordnung]; SR 732.112.2).

Als Aufsichtsbehörde für nukleare Sicherheit und Sicherung prüft das ENSI eingereichte Projekte und wacht darüber, dass die Bewilligungsinhaber ihren gesetzlichen Pflichten nachkommen (Art. 70 Abs. 1 Bst. a i. V. m. Art. 72 Abs. 1 KEG). Es ordnet alle zur Einhaltung der nuklearen Sicherheit und Sicherung notwendigen und verhältnismässigen Massnahmen an (Art. 72 Abs. 2 KEG).

## **1.2 Neue Grundlagen für die Bestimmung der Hochwassergefährdungsannahmen**

Mit EXAR wurden neue, belastbare Grundlagen für die Bestimmung der Hochwassergefährdung an der Aare erstellt. Die Studie umfasst neben dem Hauptbericht verschiedene Detailberichte und Resultatmappen /1/.

Für den Standort Gösgen hat EXAR in einem zusätzlichen Bericht das 1'000- und das 10'000-jährliche Hochwasser weiter spezifiziert (/2/, beiliegend). Er bildet die Grundlage für die deterministischen Sicherheitsnachweise bezüglich Hochwasser.

Die EXAR-Studie zeigt auch, dass morphologische Prozesse eine grössere Rolle spielen, als bis anhin in den Sicherheitsnachweisen angenommen wurde, weshalb in neuen Sicherheitsnachweisen auch der Uferschutz zu analysieren sein wird.

Falls für die Sicherheitsnachweise zusätzliche Angaben aus den vorliegenden Modellen benötigt werden, können diese aus Sicht des ENSI bei EXAR angefragt werden.

Das ENSI erachtet die Resultate von EXAR als geeignete Grundlage zur Beurteilung der Hochwassersicherheit der Schweizer Kernanlagen an der Aare. Aufgrund der neuen Erkenntnisse erachtet das ENSI es als notwendig, die Sicherheitsnachweise entsprechend Dispositivziffer 2 zu aktualisieren.

## **1.3 Rechtliches Gehör**

Mit Schreiben vom 22. Februar 2021 hat das ENSI den Verfügungsentwurf der Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG (nachfolgend: KKG) im Sinne der Gewährung des rechtlichen Gehörs zur Stellungnahme zugesandt. Mit Schreiben vom 7. April 2021 /3/ hat das KKG zum Entwurf der vorliegenden Verfügung Stellung genommen. Die Erwägungen des ENSI zu den Vorbringen des KKG sind in einer separaten Stellungnahme /4/ dokumentiert.

Gestützt auf diese Erwägungen und unter Berücksichtigung der Vorbringen des KKG im Rahmen des rechtlichen Gehörs



**Klassifizierung:**  
Betreff:

**keine**  
Verfügung: Gefährdungsannahmen EXAR-2021 für die Standorte der Schweizer Kernanlagen an der Aare

**verfügt das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat:**

1. **Hochwassergefährdungsannahmen:** Bei der Hochwassergefährdung wird zwischen der Gefährdung durch die Wasserspiegellage (WSPL) sowie der Gefährdung durch Erosion<sup>1</sup> unterschieden.

Für den Standort des KKG gelten für das 1'000- und 10'000-jährliche Hochwasser die Gefährdungsannahmen gemäss dem Dokument «Extremhochwasser an der Aare. Szenariodokument Projekt EXAR. Beschreibung des 1'000- und des 10'000-jährlichen Hochwassers am Beurteilungssperimeter Gösgen» /2/ vom 23. September 2021.

Für auslegungsüberschreitende Betrachtungen gelten grundsätzlich sämtliche KKG-spezifischen Unterlagen von EXAR /1/, soweit sie nicht durch eigene gemäss dem Stand der Technik verfeinerte Analysen ersetzt werden.

2. **Sicherheitsnachweise:** Die Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG hat bis Ende 2022 für das KKG folgende Sicherheitsanalysen durchzuführen (Geschäft 17/21/012):

2.1 Deterministische Störfallanalysen:

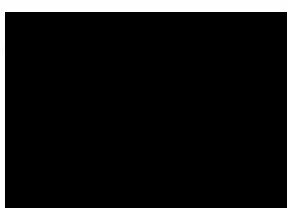
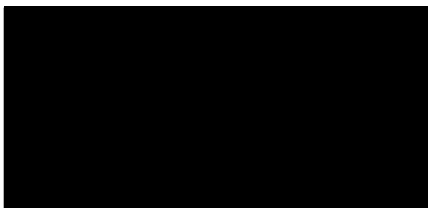
- a) Die Ufererosion für das 1'000- und 10'000-jährliche Hochwasser ist unter Berücksichtigung der standortspezifischen Eigenschaften (u. a. Ufersedimente und Uferverbauungen) zu untersuchen (Ufererosionsanalyse).
- b) Auf Basis der Ufererosionsanalyse ist für das 1'000- und das 10'000-jährliche Hochwasser der Uferschutz zu überprüfen und zu bewerten, ob Verbesserungsmassnahmen angezeigt sind.
- c) Die Auswirkungen der Erosion gemäss den Ergebnissen der Ufererosionsanalyse auf die Einrichtungen des KKG sind darzulegen und die Beherrschung für das 1'000- und das 10'000-jährliche Hochwasser gemäss Richtlinien ENSI-A01, ENSI-A08 und ENSI-G14 ist nachzuweisen. Die gemäss Ufererosionsanalyse auftretende WSPL ist beim Nachweis zu berücksichtigen.

2.2 Probabilistische Sicherheitsanalyse:

Die probabilistische Sicherheitsanalyse der Stufe 1 und der Stufe 2 betreffend Hochwasser ist zu aktualisieren sowie die Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage und insbesondere auf das Risiko zu bewerten. Hierbei gelten die Anforderungen gemäss Richtlinien ENSI-A05 und ENSI-A06. Zu betrachten ist der Leistungsbetrieb.

Freundliche Grüsse

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI



<sup>1</sup> Erosion umfasst Terrain- und Gerinneveränderungen infolge von fluvial bedingten morphologischen Prozessen (vgl. /2/, S. 4, Einleitung)



**Klassifizierung:**  
Betreff:

**keine**  
Verfügung: Gefährdungsannahmen EXAR-2021 für die Standorte der Schweizer Kernanlagen an der Aare

### **Rechtsmittelbelehrung**

Gegen diese Verfügung kann innert 30 Tagen seit Zustellung Beschwerde erhoben werden. Die Beschwerde ist beim Bundesverwaltungsgericht, Postfach, 9023 St. Gallen, einzureichen.

Die Frist steht still:

- a) vom 7. Tag vor Ostern bis und mit dem 7. Tag nach Ostern;
- b) vom 15. Juli bis und mit dem 15. August;
- c) vom 18. Dezember bis und mit dem 2. Januar.

Die Beschwerde ist mindestens im Doppel einzureichen und hat die Begehren, deren Begründung mit Angabe der Beweismittel und die Unterschrift des Beschwerdeführers oder seines Vertreters zu enthalten. Die Ausfertigung der angefochtenen Verfügung (oder eine Fotokopie) und die als Beweismittel angerufenen Urkunden sind beizulegen, soweit der Beschwerdeführer sie in Händen hat.

### **Beilage**

- Pfäffli, M., Irniger, A., Steeb, N., 2021: Extremhochwasser an der Aare. Szenariendokument Projekt EXAR. Beschreibung des 1'000- und des 10'000-jährlichen Hochwassers am Beurteilungssperimeter Gösgen. Birmensdorf: 34 S., rev. 23.09.2021

### **Referenzen**

- /1/ EXAR-Gesamtdokumentation (Hauptbericht, Detailberichte und Resultatmappen)
- /2/ Pfäffli, M., Irniger, A., Steeb, N., 2021: Extremhochwasser an der Aare. Szenariendokument Projekt EXAR. Beschreibung des 1'000- und des 10'000-jährlichen Hochwassers am Beurteilungssperimeter Gösgen. Birmensdorf: 34 S., rev. 23.09.2021
- /3/ KKG-Brief, [REDACTED] «Stellungnahme zur Verfügung EXAR», 07.04.2021
- /4/ ENSI-Brief, [REDACTED] 17KEX.HW; 17/21/012, «Stellungnahme des ENSI zur Anhörungsantwort der Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG betreffend Verfügung «Gefährdungsannahmen EXAR-2021»», 12.11.2021



## Extremhochwasser an der Aare

### Szenariendokument Projekt EXAR

Beschreibung des 1'000- und des 10'000-jährlichen Hochwassers am  
Beurteilungsperimeter Gösgen

**Impressum**

Datum: publ. 02.02.2021 / rev. 23.09.2021

**Herausgeber**

Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf

**Auftraggeber**

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

**Projektleitung**

Roni Hunziker (HZP), Severin Schwab (GEOTEST), Christoph Hegg (WSL)

**Redaktion**

Matthias Pfäffli (HZP), Andrea Irniger (HZP), Nicolas Steeb (WSL)

**Autoren und Mitarbeit**

HZP	Matthias Pfäffli, Andrea Irniger, Roni Hunziker
PSI	Vinh Dang, Calvin Whealton
WSL	Nicolas Steeb, Norina Andres

**Zitiervorschlag**

Pfäffli, M., Irniger, A., Steeb, N. 2021: Extremhochwasser an der Aare. Szenariendokument Projekt EXAR. Beschreibung des 1'000- und des 10'000-jährlichen Hochwassers am Beurteilungssperimeter Gösgen. Birmensdorf: 34 S.

**Hinweis**

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Einführung in den Beurteilungsperimeter .....	5
2.1	Angaben für das KKW Gösgen .....	5
2.2	Charakteristik der Aare im Beurteilungsperimeter .....	6
3	Repräsentative Szenarien für die Beschreibung des 1'000- bzw. 10'000-jährlichen Hochwassers... 7	
4	Gefährdung durch Überflutung.....	9
4.1	Wasserspiegellage des 1'000- und 10'000-jährlichen Hochwassers.....	9
4.2	Maximale hydraulische Belastungen im Beurteilungsperimeter .....	11
4.3	Zeitreihen beim Areal des Kraftwerks .....	14
4.3.1	Abflussganglinien beim Areal des Kraftwerks.....	15
4.3.2	Ganglinien von hydraulischen Parametern beim Areal des Kraftwerks .....	16
4.4	Zusätzliche Angaben zum zeitlichen Verlauf der Hochwasserganglinien .....	25
4.4.1	Extremwertstatistik an diversen Stellen im Oberlauf der Aare .....	25
4.4.2	Zeitabhängigkeit des 1E-3 und des 1E-4 Ereignisses.....	28
4.4.3	Informationen aus der hydrologischen Zeitreihe für den Beurteilungsperimeter Gösgen .....	30
4.4.4	Informationen aus den spezifischen Szenarien für den Beurteilungsperimeter Gösgen .....	32
5	Literatur.....	34

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes EXAR wurde die Gefährdung in den Beurteilungsperimetern durch verschiedene Hochwasserszenarien, kombiniert mit Versagensprozessen von wasserbaulichen Bauwerken, Rutschungen, Verklausungen und morphologischen Prozessen untersucht. Dabei wurde zwischen

- der Gefährdung durch die Wasserspiegellage (WSPL) und daraus folgende hydraulische Belastungen sowie
- durch Terrain- und Gerinneveränderungen infolge von fluvial bedingten morphologischen Prozessen

unterschieden.

Ziel dieses Dokuments ist es, das 1'000-jährliche und das 10'000-jährliche Hochwasser für das Kernkraftwerk (KKW) Gösgen zu beschreiben. Dazu wurde anhand der mittleren Gefährdungskurve die Wasserspiegellagen an den einzelnen Referenzpunkten auf dem KKW-Areal ermittelt, die mit der Häufigkeit 1E-3/Jahr bzw. 1E-4/Jahr erreicht oder überschritten werden (Kap. 4.1). Für die beiden durch die Wasserspiegellage derart definierten Hochwasser wird zusätzlich die jeweils zugehörige Gefährdung durch morphologische Prozesse dargelegt.

Um neben der Wasserspiegellage weitere Parameter zu beschreiben, wurden die Ergebnisse der hydraulischen Simulation von repräsentativ gewählten Szenarien verwendet. Die repräsentativen Szenarien weisen Wasserspiegellagen auf, die im Häufigkeitsbereich von 1E-3/Jahr bzw. 1E-4/Jahr liegen und sind insbesondere geeignet, hydraulische Belastung und Zeitreihen beim Beurteilungsperimeter aufzuzeigen (Kap. 4.2 bis 4.4).

Der Klarheit halber sei hier vermerkt, dass für das 1'000- bzw. 10'000-jährliche Hochwasser die Wasserspiegellage, die mit der Häufigkeit 1E-3/Jahr bzw. 1E-4/Jahr erreicht oder überschritten wird, massgebend ist. Die Häufigkeit bezieht sich also auf die Wasserspiegellage und nicht auf die Eintrittshäufigkeit der gewählten repräsentativen Szenarien.

### **Gefährdung durch Überflutung**

Die Gefährdung durch Überflutung wird durch die Wasserspiegel beschrieben. Dazu wurden mit einem hydraulischen 2D-Modell verschiedene Szenarien als instationäre Simulationen berechnet und daraus die maximalen Wasserspiegellagen herausgelesen. Die Auswirkungen auf die Wasserspiegel durch die morphologischen Prozesse wurden addiert oder subtrahiert. Die so berechnete maximale Wasserspiegellage wurde mit der für das Szenario relevanten Häufigkeit aus dem Ereignisbaum in einer



### **Gefährdung infolge morphologischer Prozesse**

Von den morphologischen Prozessen geht eine zusätzliche Gefährdung aus, welche durch die Wasserspiegel nicht abgebildet wird<sup>1</sup>. Im Rahmen der vorliegenden Dokumentation wird aber auf die Beschreibung dieser Gefährdung verzichtet, weil hierfür umfangreiche ortsspezifische Daten erhoben werden müssten und mit den für das Projekt definierten Mitteln nicht die gleiche Genauigkeit wie bei der Beurteilung der Strömungsprozesse erreicht werden kann. Im vorliegenden Dokument werden darum nur die mit dem Strömungsmodell berechneten hydraulischen Belastungen in Form von Schubspannung, Fliessgeschwindigkeiten und Fliesstiefen beschrieben. Es sind weitergehende Analysen mit ortsspezifischen Daten erforderlich, um das Ausmass der Erosion abzuklären.

## **2 Einführung in den Beurteilungsperimeter**

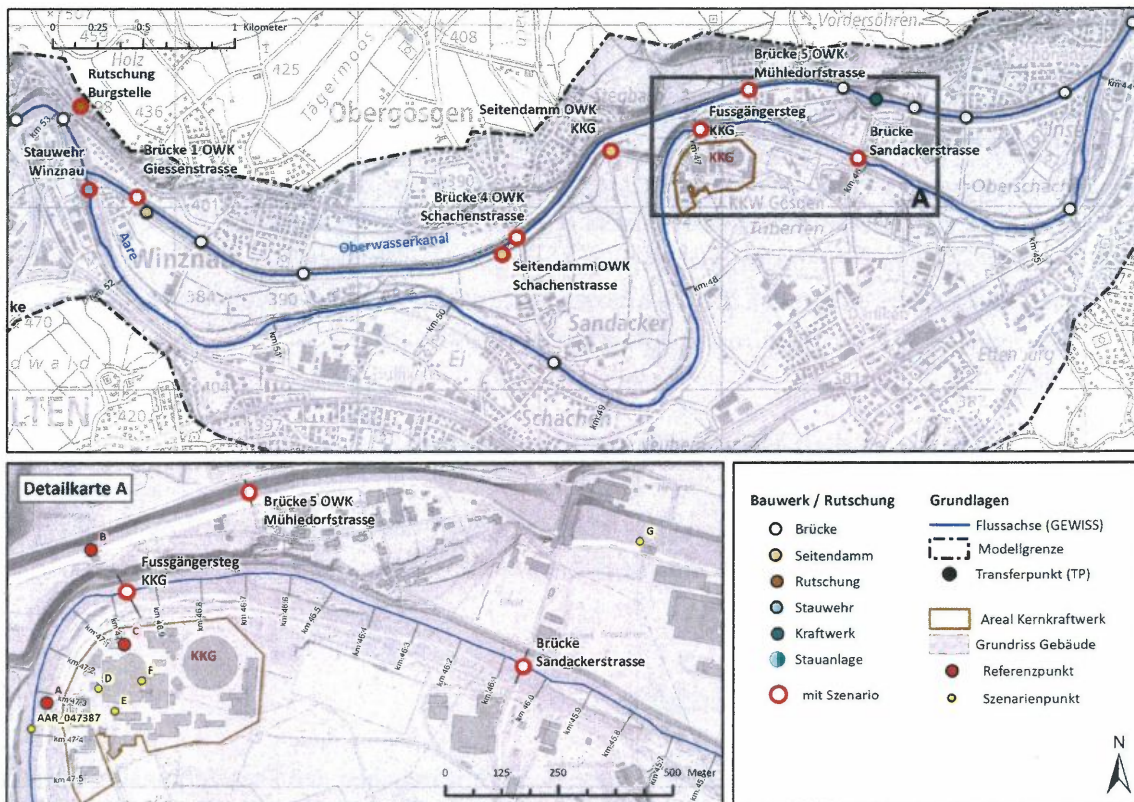
Im Bereich des Beurteilungsperimeters Gösgen befindet sich das Kernkraftwerk Gösgen (KKG), für dessen Areal eine Gefährdungsanalyse durchgeführt wurde.

### **2.1 Angaben für das KKW Gösgen**

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Kanton Solothurn zwischen den Transferpunkten Aarburg und Aarau (Abbildung 1). Die für das Kraftwerk relevanten Angaben beziehen sich auf die in der Detailkarte A dargestellten Referenzpunkte A, B und C. Für die Referenzpunkte A und C unterscheiden sich die örtlichen Verhältnisse nicht, weshalb dieselben Ereignisbäume für die Generierung der Gefährdungskurven verwendet wurden (Detailbericht G, Kap. 3.3). Referenzpunkt B befindet sich im Oberwasserkanal. Für diesen Punkt wurden separate Szenarien und Ereignisbäume sowie eine separate Gefährdungskurve entwickelt (Detailbericht G, Kap. 3.4). Für die Szenarienpunkte D, E und F sowie für den Hilfspunkt AAR\_047387 wurden die hydraulischen Parameter ausgewertet aber keine eigenen Gefährdungskurven entwickelt.

---

<sup>1</sup> Es wird zwischen den Auswirkungen der morphologischen Prozesse auf die Wasserspiegellagen (vgl. Kap. 4.1) und der Auswirkungen auf Gerinne- und Terrainveränderungen rund um das KKW unterschieden. Die Auswirkungen der morphologischen Prozesse auf die Wasserspiegellagen sind Bestandteil der vorliegenden Dokumentation, die Untersuchung von möglichen Gerinne- und Terrainveränderungen sind Bestandteil der EXAR-Studie. Eine allgemeine Beschreibung dieser Prozesse ist im EXAR Hauptbericht Kap. 14.4 sowie im Detailbericht F zu finden.



**Abbildung 1:** Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes mit dem Beurteilungsperimeter Gösgen (BP Gösgen), der durch den Nahbereich der Referenz- und Szenarienpunkte definiert wird. Punkte in der Hauptabbildung zeigen untersuchte Analysestandorte (Bauwerke und Rutschungen) und Transferpunkte. Rot eingekreist sind Analysestandorte, die näher untersucht wurden, ggf. mit hydraulischen 2D-Simulationen. In den Detailkarten sind nähere Ausschnitte mit den Referenz- (rot) und Szenarienpunkten (gelb) gegeben.

## 2.2 Charakteristik der Aare im Beurteilungsperimeter

Die Aare verläuft im Gebiet Gösgen in grossen Talmäandern, welche sich in den Niederterrassenschottern eingetieft haben und seitlich teilweise durch den anstehenden Fels begrenzt werden. Auf der Höhe des KKG steht in der linken Gerinnehälfte (Ufer und Sohle) der Fels an (Flussbau AG, 2016). Das KKG sowie die Gebiete flussauf- und -abwärts liegen auf einer künstlichen Aufschüttung, wobei der Fels auf einer Tiefe von ca. 20 - 30 m ansteht (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2019). Im naturnahen Zustand verlief die Aare in einem über 200 m breiten Gerinne, wobei Inseln das Gerinne in mehrere Teilgerinne aufteilten. Diese Flussmorphologie weist auf einen aktiven Geschiebetrieb und eine ausgeprägte morphologische Dynamik hin. Der Verlauf der Mäander ist mit dem heutigen Lauf vergleichbar. 2018 wurde das Gerinne der Restwasserstrecke des WKW Winznau verbreitert und mit Inseln neu gestaltet. Die Inseln sind teilweise bewachsen. Die Ufer sind mehrheitlich flach und so gestaltet, dass je nach Überschwemmungshäufigkeit mit dem Aufkommen einer standorttypischen Auenvegetation gerechnet werden kann. Das Ziel des Revitalisierungsprojekts war eine dynamische Flussraumgestaltung, bei welcher die Aare Kies aus den Böschungen und den Inseln abtragen und umlagern kann (IG HWS Niederamt, 2012). Gemäss den Unterlagen des Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojektes (IG HWS Niederamt, 2012) ist die Linkskurve flussaufwärts des KKG mit Blöcken gesichert. Das Gleitufer beim KKG selbst hat eine Interventionslinie, aber keine Ufersicherung.

### **3 Repräsentative Szenarien für die Beschreibung des 1'000- bzw. 10'000-jährlichen Hochwassers**

Um neben der Wasserspiegellage noch weitere Überflutungsparameter zu beschreiben, wurden die Ergebnisse der hydraulischen Simulation von repräsentativ gewählten Szenarien verwendet. Basierend auf der Gefährdungskurve für den Referenzpunkt C (Kapitel 14.3 im Hauptbericht) wurden für den Beurteilungsperimeter Gösgen das Szenario 8 für das 1'000-jährliche und Szenario 9 für das 10'000-jährliche Hochwasser als repräsentativ erachtet. Die Nummerierung der Szenarien entspricht derjenigen des Hauptberichts.

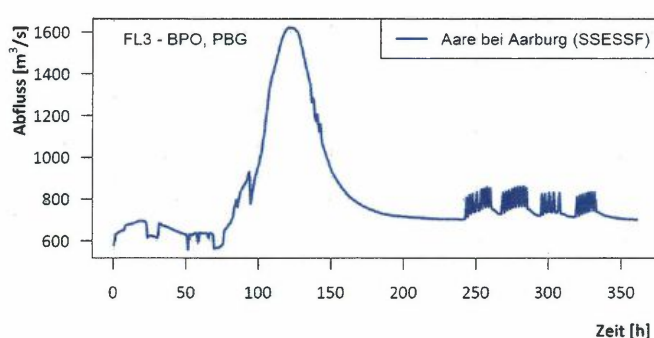
Beim Szenario 8 (Häufigkeit in der Grössenordnung von 1E-3/Jahr) handelt es sich um eine Kombination von einem FL3-Ereignis und einer Verklauung des Fussgängerstegs KKG mit einem 100-jährlichen Holzvolumen. Beim Szenario 9 (Häufigkeit in der Grössenordnung von 1E-4/Jahr) handelt es sich um die Kombination von einem FL3-Ereignis und einer Verklauung des Fussgängerstegs KKG mit einem 300-jährlichen Holzvolumen. Des Weiteren berücksichtigen die beiden Szenarien 8 und 9 einen Abfluss durch das Wasserkraftwerk Gösgen von 150 m<sup>3</sup>/s (Segelbetrieb der Turbinen).

Das hydrologische Initialereignis FL3<sup>2</sup> wurde aus der hydrologischen Extremwertstatistik für den Spitzenabfluss (jährlicher, maximaler Abfluss) ermittelt. Die gewählte Ganglinie entspricht einem effektiv berechneten Ereignis, welches am betrachteten Transferpunkt eine Form aufweist, die so gut wie möglich dem Median, resp., da die Streuung ungefähr symmetrisch ist, einem Mittelwert aller Ganglinien entspricht, die den gesuchten Spitzenabfluss erreichen (Kapitel 5.5 und 14.2 im Hauptbericht). Die Ganglinie und der Spitzenabfluss der Aare bei Aarburg sind in Abbildung 2 dargelegt.

Die Ganglinie erreicht nach 5 Tagen (d.h. bei 120 Stunden) den maximalen Abfluss. In der hydraulischen Simulation wurde jeweils der Bereich von einem Tag vor dem Spitzenabfluss bis ein Tag nach dem Spitzenabfluss berechnet (d.h. in den Simulationsresultaten entspricht der Startwert von 0 Stunden der Stunde 96 in Abbildung 2).

---

<sup>2</sup> Das Initialereignis FL3 beschreibt eine hydrologische Ganglinie mit einer Häufigkeit in der Grössenordnung von 1E-3/Jahr auf. Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Initialereignisses wurden sämtliche Ereignisse betrachtet, welche innerhalb eines definierten Intervalls des Spitzenabflusses liegen (Event-Klasse FL3, vgl. EXAR Hauptbericht, Kapitel 5.5 für weitere Erläuterungen).



Gerinne	Spitzenabfluss [ $m^3/s$ ]
Aare (Aarburg)	1622

**Abbildung 2:** *Ganglinie des hydrologischen Initialereignisses FL3 für die Kombination mit den Szenarien 8 und 9. Die Oszillationen der Ganglinie ab ca. 240 Stunden stammen aus dem flussaufwärts liegenden und regulierten Bielersee, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde. Der Abfluss aus dem Wehr Port ist bei der Simulationszeit von 240 Stunden immer noch so hoch, dass der Hochwasserbetrieb aufgrund der vereinfachten Regelung aktiviert resp. deaktiviert wird.*

Der Fussgängersteg KKG führt vom Dammweg ("alte Aareweg") am Oberwasserkanal direkt zum Gelände des Kernkraftwerks. Bei einem FL3 Ereignis ist noch ca. 1 m Freibord vorhanden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stück Schwemmholz am Brückentisch hängen bleibt, ist bei einem FL3 Ereignis relativ gering (0.2). Bei FL3 ist darum die Verklauungswahrscheinlichkeit an den Brückenpfeilern massgebend. So weist das Bauwerk insgesamt eine Verklauungswahrscheinlichkeit von  $p_H = 0.51$  (FL3) auf.

Für die Höhe des Aufstaus infolge Verklauung ist nebst den Zuströmbedingungen primär die verklauete Schwemmholzmenge massgebend. Die nachfolgend angegebenen Aufstauhöhen und Wasserspiegellagen sind theoretische Werte, die mit dem Verfahren nach Schalko (2018) ermittelt wurden. Der Aufstau am Fussgängersteg KKG beträgt  $\Delta h = 2.58$  m (FL3 und 100-jährliches Holzvolumen). Die Wasserspiegellage oberwasserseitig des Fussgängerstegs erreicht je nach hydrologischem Szenario und verklauter Schwemmholzmenge unterschiedliche Pegel. Bei einem FL3 Ereignis liegt der Wasserspiegel im aufgestauten Oberwasser auf 382.59 m ü.M. (100-jährliches Holzvolumen) bis 384.01 m ü.M. (300-jährliches Holzvolumen).

Im hydraulischen 2D-Modell wird die Brücke anhand von Pegel-Abfluss-Beziehungen (PQ-Beziehungen) abgebildet, wobei ein seitliches Ausuferen im Oberwasser direkt durch das Modell errechnet wird. Im Falle des Fussgängerstegs kommt es spätestens an der Oberkante der Brückenplatte (382 m ü.M.) zu Ausuferungen. Das seitliche Überströmen der Ufer wird im hydraulischen Modell und damit bei den in den Gefährdungskurven abgebildeten Wasserspiegellagen berücksichtigt.

Die Verklauung des Fussgängerstegs bewirkt an den Szenarien- und Referenzpunkten oberhalb des Fussgängerstegs eine stark erhöhte Wasserspiegellage im Vergleich zu den hydrologischen Ereignissen ohne Verklauung. So entsteht bereits bei einem FL3 mit 100-jährlichem Holzvolumen am Referenzpunkt A ein Aufstau von rund 1.3 m (300-jährlich: 1.8 m).

Weitere Informationen zu den Szenarien 8 und 9 finden sich in der Resultatmappe 3, BPG, Kapitel 3.4, IX.



## 4 Gefährdung durch Überflutung

### 4.1 Wasserspiegellage des 1'000- und 10'000-jährlichen Hochwassers

In diesem Kapitel sind die Wasserspiegellagen für das 1E-3/Jahr und das 1E-4/Jahr Hochwasser bei den Referenzpunkten A, B und C des Kernkraftwerks angegeben (vgl. Tabelle 1). Die Wasserspiegellagen entsprechen der mittleren Gefährdung (blaue Linie in den Gefährdungskurven) bei einer Überschreitungshäufigkeit von exakt 1E-3/Jahr bzw. 1E-4/Jahr. Änderungen der Wasserspiegellage infolge der morphologischen Prozesse sind darin berücksichtigt<sup>3</sup>.

Die Wasserspiegellage für Referenzpunkt C basiert auf der im Hauptbericht EXAR dokumentierten Gefährdungskurve (Abbildung 61 in Hauptbericht Kap. 14.3). Für die Referenzpunkte A (Abbildung 27 in Detailbericht G, Kap. 3.3.1) und B (Abbildung 34 in Detailbericht G, Kap. 3.4.1) gibt es separate Gefährdungskurven, aus denen die entsprechenden Wasserspiegellagen abgelesen wurden. Da die Gefährdungskurven nur für die Referenz- und nicht für die Szenarienpunkte erstellt wurden, kann für die Szenarienpunkte keine Wasserspiegellage bei einer Wiederkehrperiode von exakt 1E-3/Jahr resp. 1E-4/Jahr angegeben werden. Die Wasserspiegellagen bei den Szenarienpunkten, welche einer mittleren Gefährdung gemäss Gefährdungskurve entsprechen, wurden näherungsweise aus den detailliert beschriebenen, repräsentativen Szenarien (Kap. 4.2 ff.) übernommen.

Die in der Tabelle 2 angegebenen Wasserspiegellagen setzen sich aus dem Mittelwert der maximalen Wasserspiegellage aus der hydraulischen Modellierung (inkl. Unsicherheiten) und dem Mittelwert der Änderung der Wasserspiegellage infolge der morphologischen Prozesse (inkl. Unsicherheiten) zusammen.

---

<sup>3</sup> Die Wasserspiegel beinhalten auch die Auswirkungen der morphologischen Prozesse. Diese wurden mit Hilfe eines 2D-Geschiebmodells untersucht, wobei die morphologischen Simulationen des Referenzszenarios zeigten, dass flussaufwärts des Fussgängerstegs infolge der Gerinneveränderungen mit ca. 40 cm tieferen und vom Fussgängersteg flussabwärts mit leicht höheren (ca. 20 cm) Wasserspiegel gerechnet werden muss. Diese Änderung der Wasserspiegel durch morphologische Prozesse sind - inklusive der dazu gehörenden, nicht symmetrischen Unsicherheiten - in der Gefährdungskurve berücksichtigt, wodurch sie auch die Werte in den vorliegenden Tabellen 1 und 2 beeinflussen. Die Unsicherheiten sind im Detailbericht F, Kap. 10, Tabelle 14 übersichtlich dargestellt.

**Tabelle 1:** *Wasserspiegellagen aus der mittleren Gefährdungskurve bei einer Häufigkeit von 1E-3/Jahr und 1E-4/Jahr für die Referenzpunkte A, B und C beim Kernkraftwerk Gösgen (KKG).*

Referenzpunkt	Höhe Terrain [m ü. M.]	Wasserspiegellage für die mittlere Gefährdung mit Morphologie [m ü. M.]	
		1E-3/Jahr	1E-4/Jahr
KKG	A	_*	382.60
	B	388.75	388.10**
	C	382.15	382.20

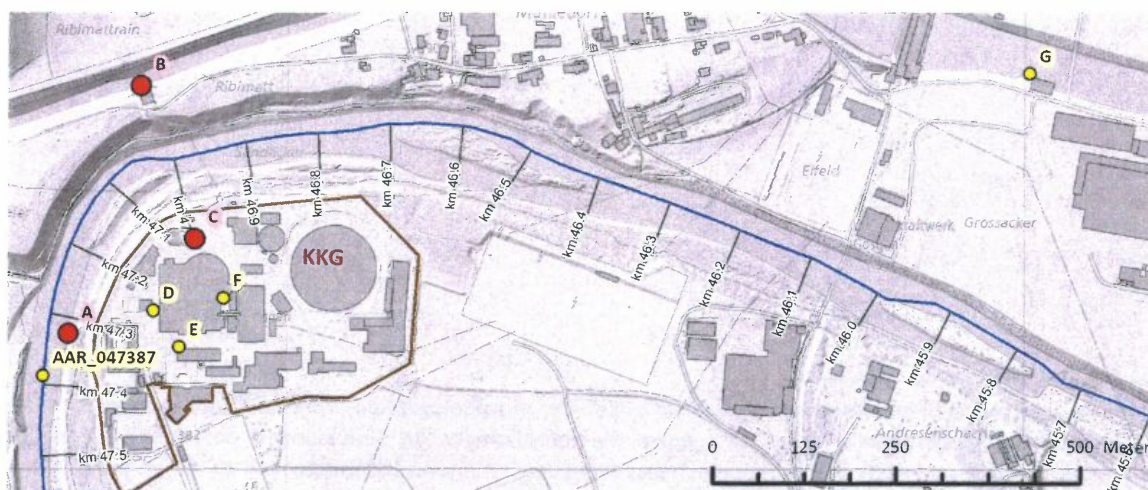
\* Der Punkt liegt in der Aare.

\*\* Wasserspiegellage liegt tiefer als die Terrainkote beim Referenzpunkt B. Der Referenzpunkt liegt in diesem Fall trocken.

**Tabelle 2:** *Mittelwerte der zu erwartenden Wasserspiegellagen der Szenarien 8 (repräsentativ für 1E-3/Jahr) und 9 (repräsentativ für 1E-4/Jahr) für die Szenarienpunkte D, E und F beim Kernkraftwerk Gösgen (KKG).*

Szenarienpunkt	Höhe Terrain [m ü. M.]	Wasserspiegellage für die mittlere Gefährdung mit Morphologie [m ü. M.]	
		1E-3/Jahr Szenario 8	1E-4/Jahr Szenario 9
KKG	D*	382.00	382.10
	E*	381.96	382.09
	F*	381.77	382.08

\* Für die Szenarienpunkte D, E und F wurden keine Gefährdungskurven entwickelt. Entsprechend lässt sich die Wasserspiegellage nicht für eine Häufigkeit von exakt 1E-3/Jahr bzw. 1E-4/Jahr bestimmen. Als Anhaltspunkt für diese Jährlichkeiten dienen die in Kap. 3 beschriebenen repräsentativen Szenarien 8 und 9.



**Abbildung 3:** *Detailkarte vom Kernkraftwerk Gösgen mit den Referenzpunkten (A, C, B) und den Szenarienpunkten (D, E, F, G).*

## 4.2 Maximale hydraulische Belastungen im Beurteilungsperimeter

Die folgenden Karten zeigen die maximalen Fliesstiefen, Fließgeschwindigkeiten und Schubspannungen für die Szenarien 8 und 9 im Beurteilungsperimeter Gösgen. Die Darstellungen zeigen die maximalen Werte pro Element im Berechnungsnetz über die gesamte Simulationsdauer (somit stellt die Karte unterschiedliche Zeitstände dar). Die Resultate sind Berechnungsergebnisse aus der hydraulischen Modellierung und beinhalten keine Korrekturen durch morphologische Veränderungen im Gerinne.

Die Simulationen zeigen, dass oberhalb des Fussgängerstegs bei beiden Szenarien höhere Schubspannungen ( $50 - 100 \text{ N/m}^2$ ) an der Kurveninnenseite auftreten können. Infolge der bei beiden Szenarien relevanten Verklauung des Fussgängerstegs staut sich das Wasser so stark auf, dass die Brücke auf beiden Seiten umströmt wird. Dabei treten Schubspannungen  $>100 \text{ N/m}^2$  auf (vgl. die maximale Schubspannungen insbesondere im Bereich des Fussgängerstegs in Abbildung 6 und Abbildung 9).

Gemäss den Simulationen treten beim Szenario 8 ausserhalb des Gerinnes weder grosse Fließgeschwindigkeiten (Abbildung 5) noch erhöhte Schubspannungen (Abbildung 6) auf. Das grössere Schwemmholumen beim Szenario 9 führt zu einer stärkeren Verklauung des Fussgängerstegs und somit zu einem höheren Aufstau. Als Folge davon, wird das Gelände des KKG stärker überströmt und es treten auf dem Areal erhöhte Belastungen auf (Abbildung 9).

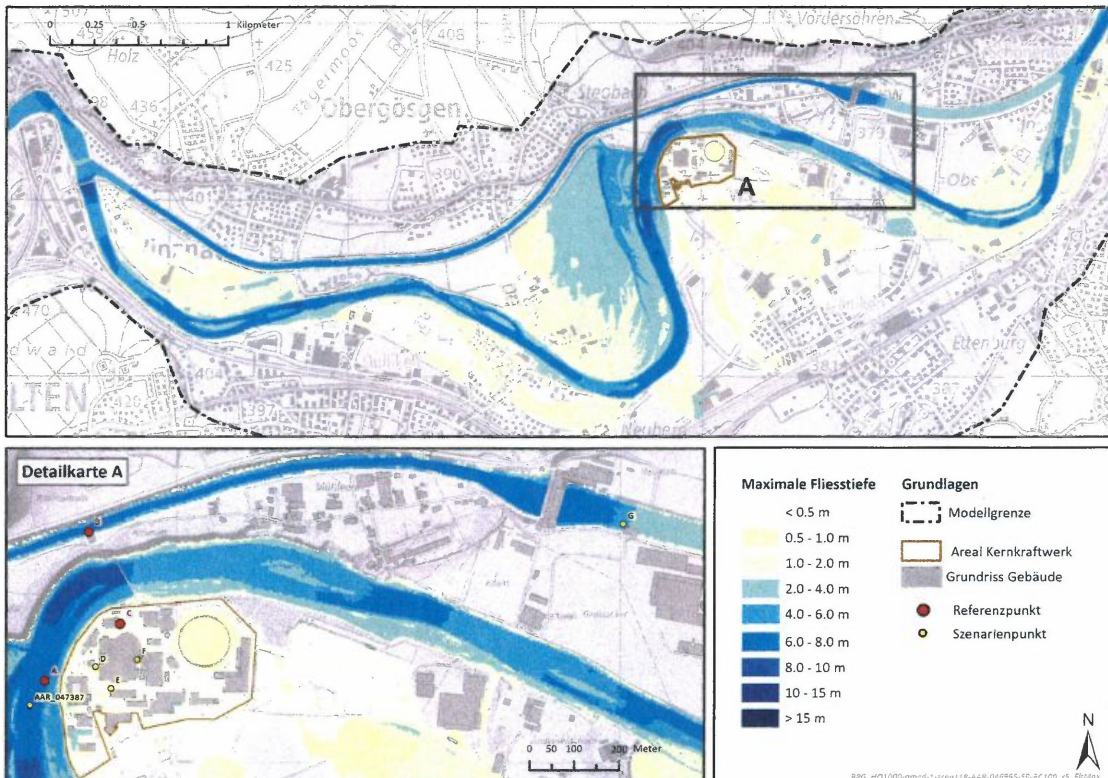


Abbildung 4: Maximale Fliesstiefen über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 8.



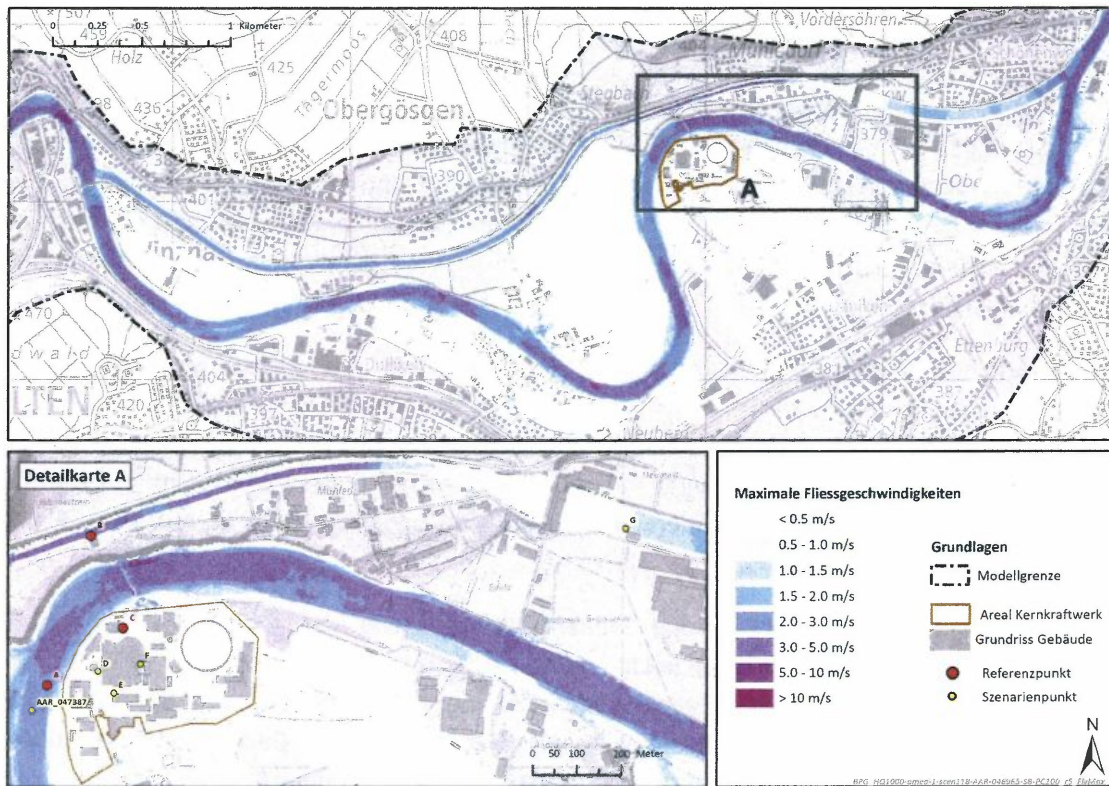


Abbildung 5: Maximale Fließgeschwindigkeiten über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 8.

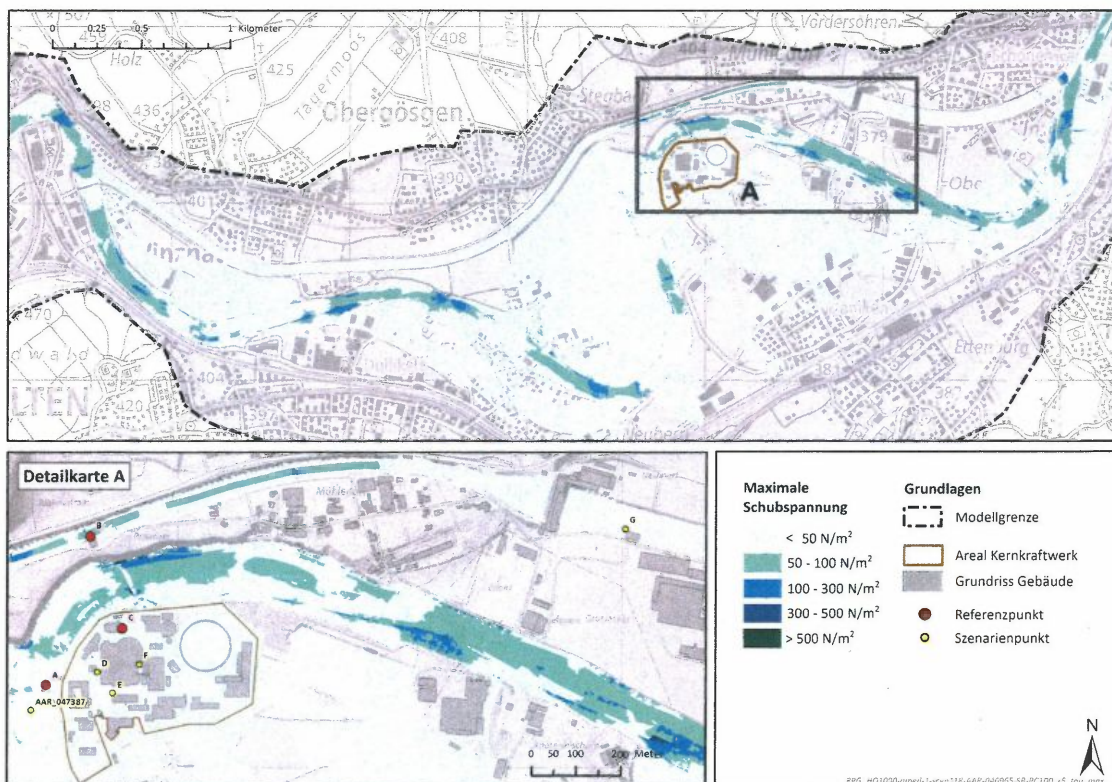


Abbildung 6: Maximale Schubspannungen über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 8.



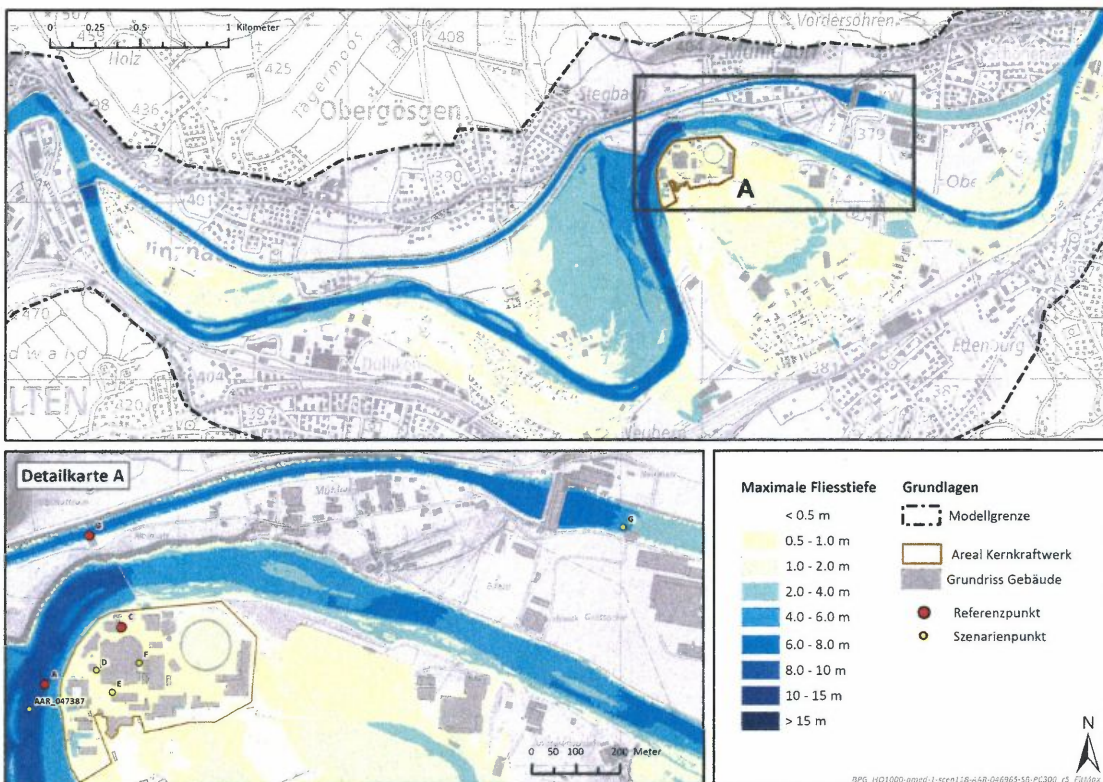


Abbildung 7: Maximale Fliesstiefen über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 9.

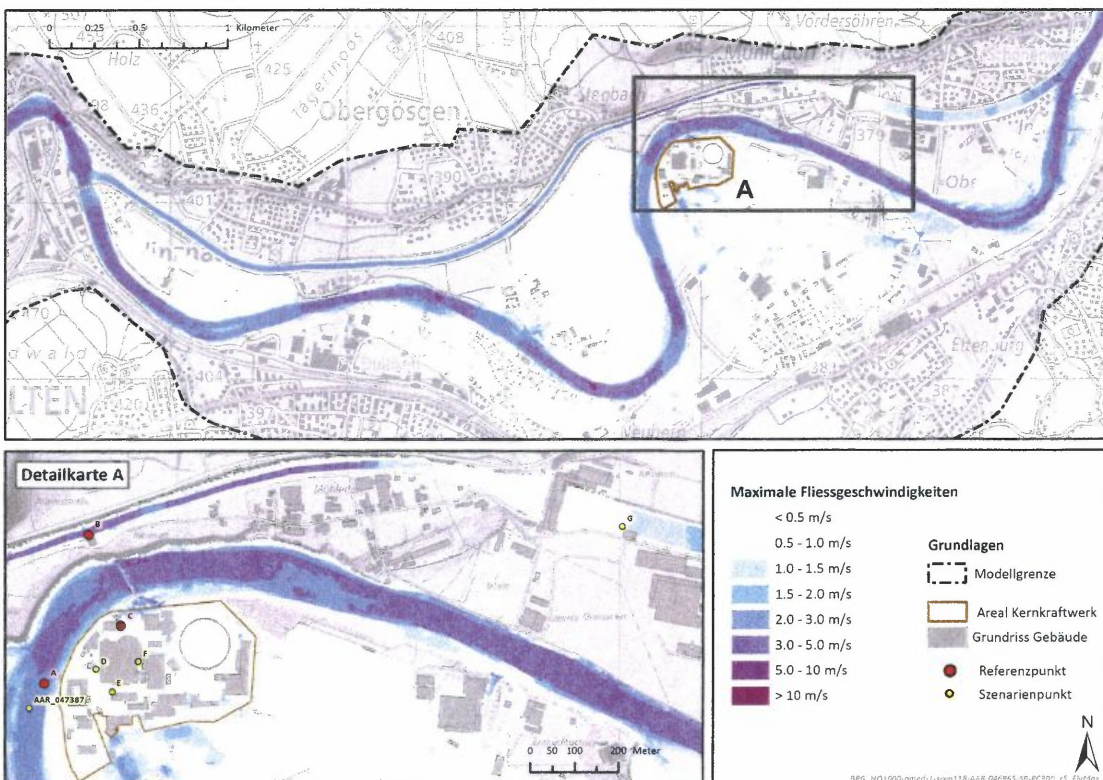


Abbildung 8: Maximale Fließgeschwindigkeiten über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 9.

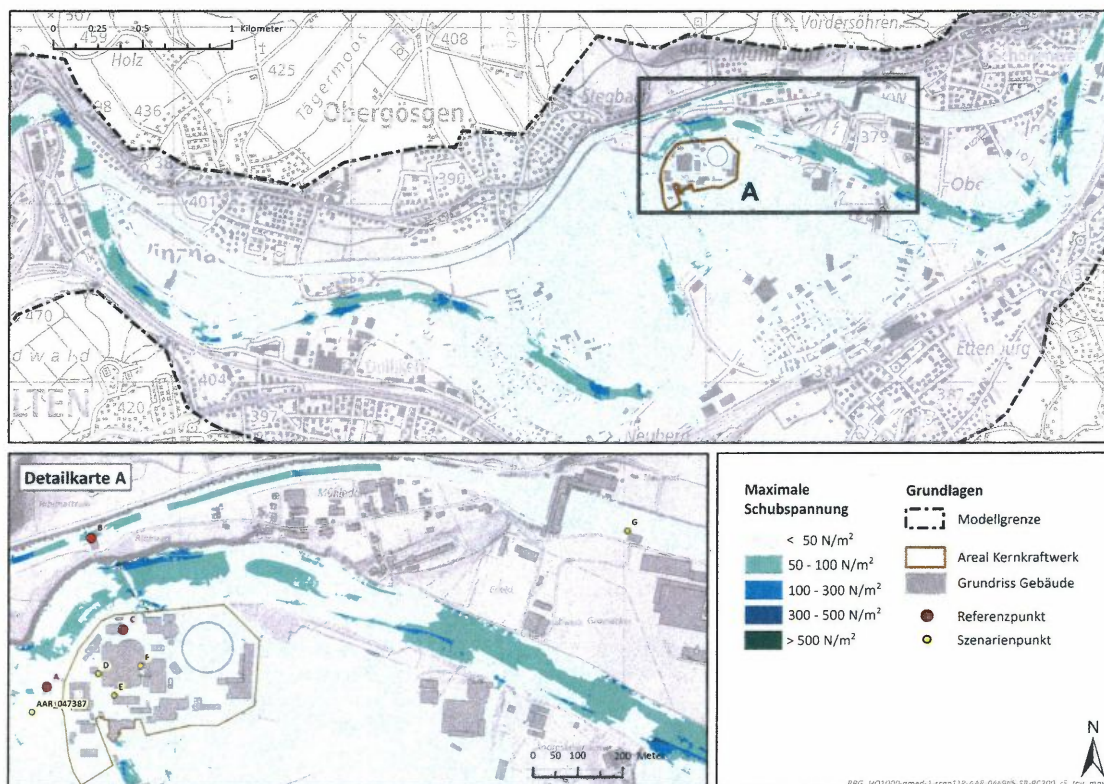


Abbildung 9: Maximale Schubspannungen über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 9.

### 4.3 Zeitreihen beim Areal des Kraftwerks

Neben der Angabe der relevanten Wasserspiegellagen aus der Gefährdungskurve (vgl. Kapitel 4.1) werden für die beiden Szenarien 8 und 9 weitere Resultate aus der hydraulischen Simulation angegeben. Für die Kraftwerksbetreiber ist das zeitliche Verhalten des Abflusses und der weiteren, hydraulischen Parameter von Interesse. Die folgenden Abbildungen zeigen die relevanten Zeitreihen für sämtliche, benetzten Punkte im Beurteilungsperrimeter. Die Resultate sind Berechnungsergebnisse aus der hydraulischen Modellierung und beinhalten keine Korrekturen durch morphologische Veränderungen im Gerinne. Eventuelle, morphologische Gerinneveränderungen sind für die Hydrographen irrelevant - die Morphologie führt nicht zu grossräumigen Veränderungen der Fließwege entlang der Aare (vgl. Hauptbericht EXAR, Kap. 11.2).



### 4.3.1 Abflussganglinien beim Areal des Kraftwerks

Der Abfluss beim KKG beim Querschnitt im Bereich des Referenzpunktes A hat für beide Szenarien einen ähnlichen Verlauf. Der Abfluss steigt bei beiden Szenarien auf rund 1'300 m<sup>3</sup>/s an, bevor es beim Fussgängersteg KKG zu einer Verklauung mit unterschiedlichen Holzvolumen kommt (Szenario 8: 100-jährliches Schwemmholtzolumen, Szenario 9: 300-jährliches Schwemmholtzolumen). Durch die Verklauung kommt es kurzzeitig zu einer Verringerung des Abflusses in der Aare, da wegen der Querschnittsreduktion bei der Brücke ein Rückstau entsteht. Da beim Szenario 8 der Querschnitt weniger verschlossen wird, fließt nach dem Füllen des Retentionsvolumens wiederum über 1'500 m<sup>3</sup>/s entlang der Aare. Beim Szenario 9 ist der Querschnitt stärker eingeschränkt und es kann nur noch etwas über 1'400 m<sup>3</sup>/s entlang der Aare fließen. Der restliche Abfluss fließt über das Areal des KKG.

Der Abfluss im Oberwasserkanal (Referenzpunkt B) ist bei beiden Szenarien identisch und beträgt mit 150 m<sup>3</sup>/s den möglichen Abfluss bei einem Segelbetrieb des Wasserkraftwerk Gösgen.

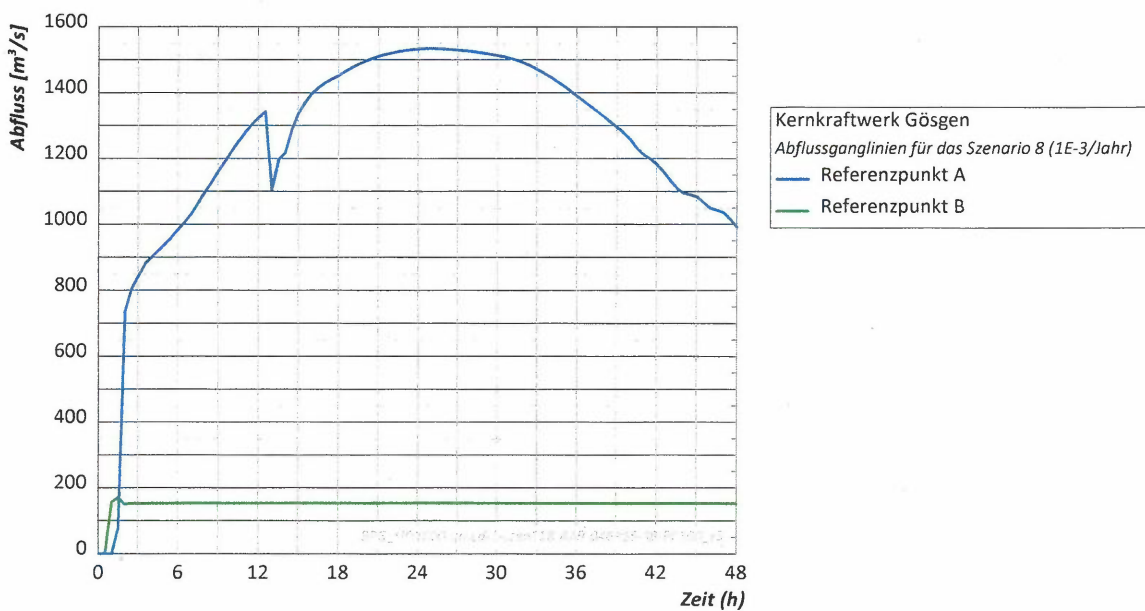


Abbildung 10: Abflussganglinie<sup>4</sup> für den Referenzpunkt A (Aare-Querschnitt auf der Höhe des KKG) und den Referenzpunkt B (Querschnitt des Oberwasserkanals mit konstantem Segelbetrieb von 150 m<sup>3</sup>/s) für das Szenario 8 (1E-3/Jahr).

<sup>4</sup> Die Abflussberechnung über einen beliebigen Querschnitt im hydronumerischen 2D-Modell ist aufgrund der Berechnungsweise der Massenbilanz mit Unsicherheiten behaftet, welche rund +/- 5 % des berechneten Abflusswerts betragen.

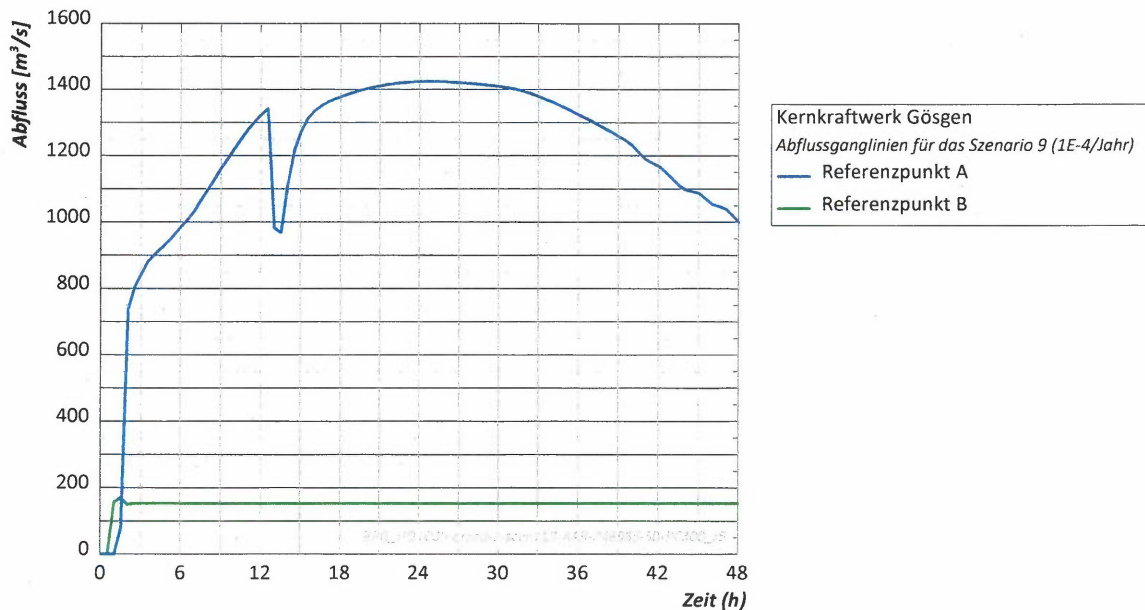


Abbildung 11: Abflussganglinie für den Referenzpunkt A (Aare-Querschnitt auf der Höhe des KKG) und den Referenzpunkt B (Querschnitt des Oberwasserkanals mit konstantem Segelbetrieb von 150 m<sup>3</sup>/s) für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Die Fussnote 4 (bei Abbildung 10) gilt auch für diese Darstellung des Abflusses.

#### 4.3.2 Ganglinien von hydraulischen Parametern beim Areal des Kraftwerks

Der zeitliche Verlauf der Wasserspiegellage (WSPL), der Geschwindigkeit ( $v$ ), der Energiehöhe (EH) und der Schubspannung ( $\tau$ ) ist für die beiden Szenarien 1E-3/Jahr (Szenario 8) und 1E-4/Jahr (Szenario 9) für die jeweils überfluteten Referenz- und Szenarienpunkte angegeben. Die nicht abgebildeten Punkte sind bei den Szenarien trocken.

Die Zeitreihen der hydraulischen Parameter zeigen dabei für beide der gewählten Szenarien einen ähnlichen Verlauf auf, wobei die Werte für das Szenario 9 leicht über den Werten des Szenario 8 zu liegen kommen. Die Fliessgeschwindigkeiten auf dem Areal des Kernkraftwerks liegen bei 0.3 bis 0.5 m/s und sind demnach gering. In der Aare betragen die Fliessgeschwindigkeiten, bevor die Brücke durch Schwemmholz verklaut wird, rund 3 m/s. Dadurch entstehen im Gerinne Schubspannungen von um die 30 N/m<sup>2</sup>. Sobald der Fussgängersteg KKG verklaut, bildet sich ein Aufstau und die Fliessgeschwindigkeit in der Aare nimmt auf rund 2 m/s ab.

Für die maximale Hochwassergefährdung durch die Wasserspiegellage (vgl. Kapitel 4.3.1) sind für beide Szenarien der Zeitpunkt bei rund 24h relevant. **Hinweis:** Die anfänglichen Schwankungen der Parameter liegt in der Anfangsbedingung der hydraulischen Simulation. Dargestellt ist die Länge der Simulationsdauer.

Ganglinien für das Szenario 8 (1E-3/Jahr)

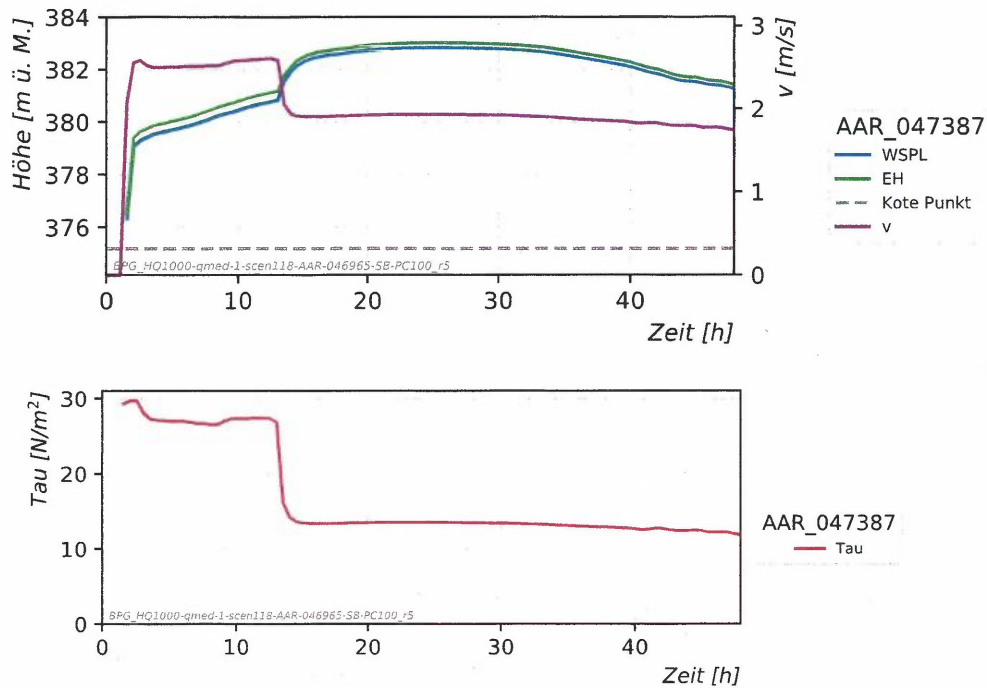


Abbildung 12: Verlauf der hydraulischen Parameter am Hilfspunkt AAR\_047387 für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

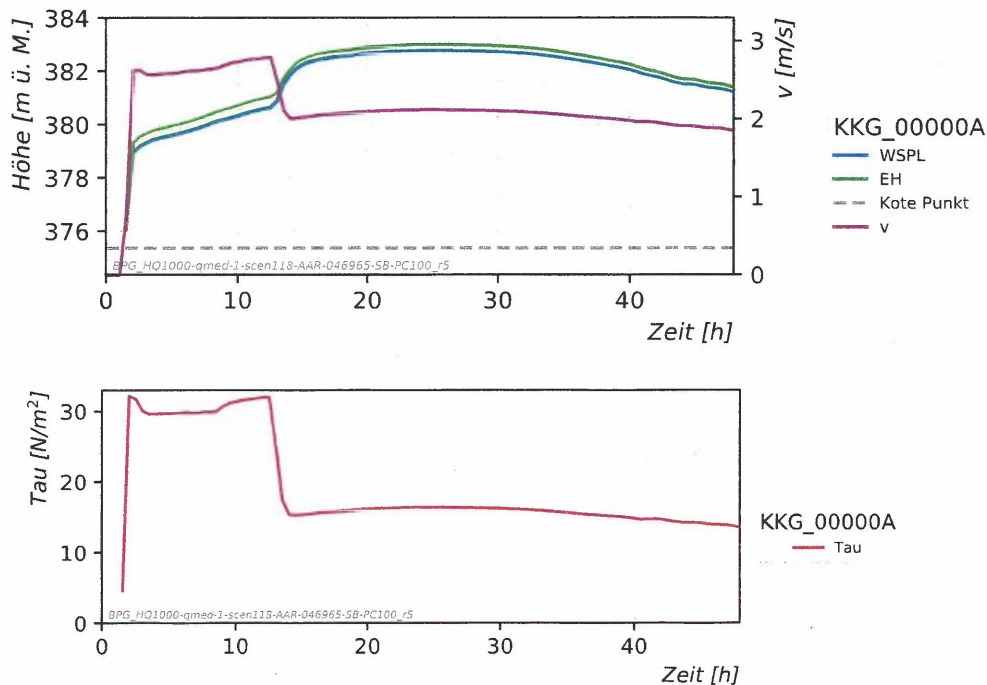


Abbildung 13: Verlauf der hydraulischen Parameter am Referenzpunkt A für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

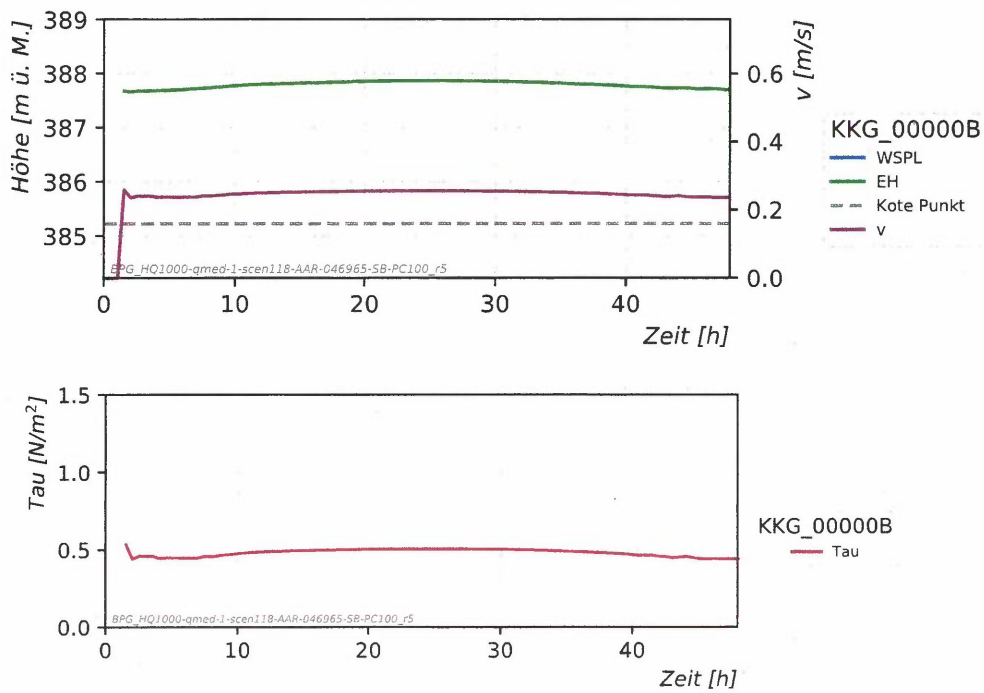


Abbildung 14: Verlauf der hydraulischen Parameter am Referenzpunkt B für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau; identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

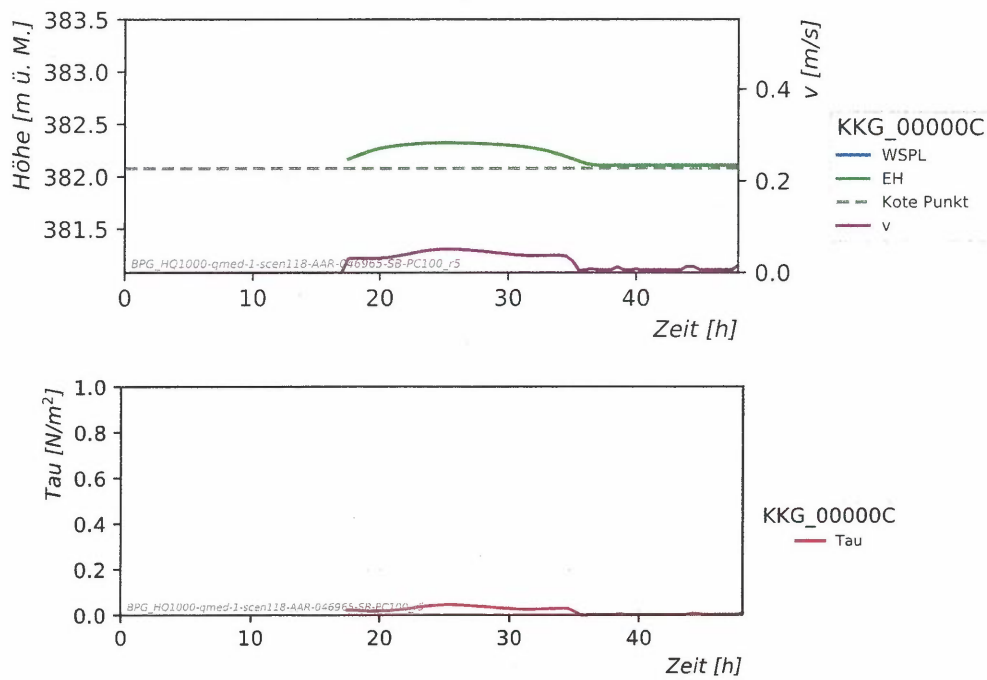


Abbildung 15: Verlauf der hydraulischen Parameter am Referenzpunkt C für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

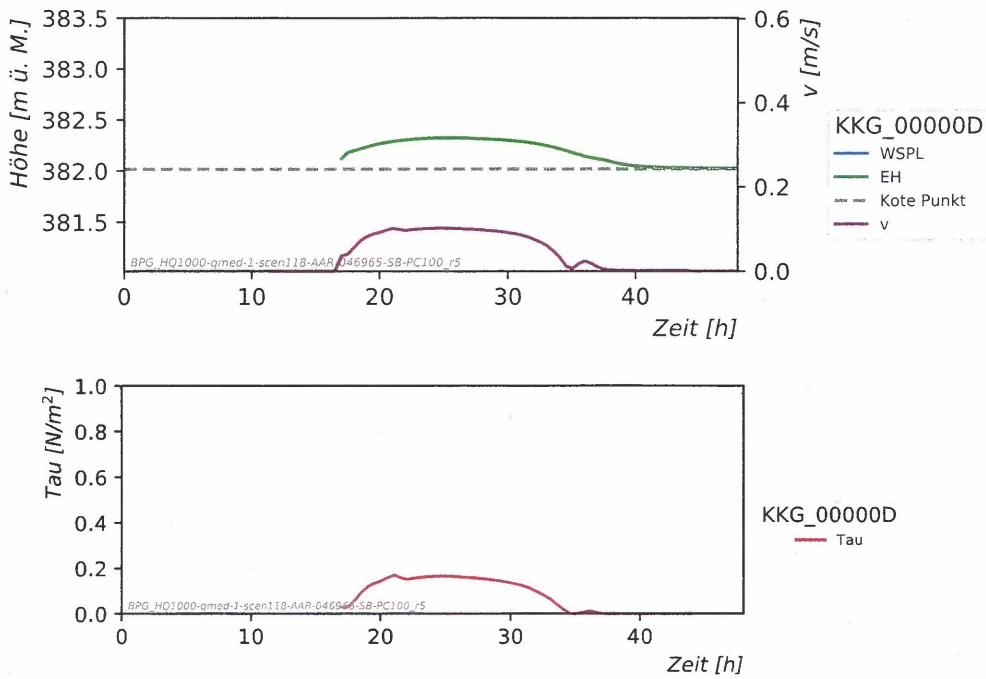


Abbildung 16: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienknoten D für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

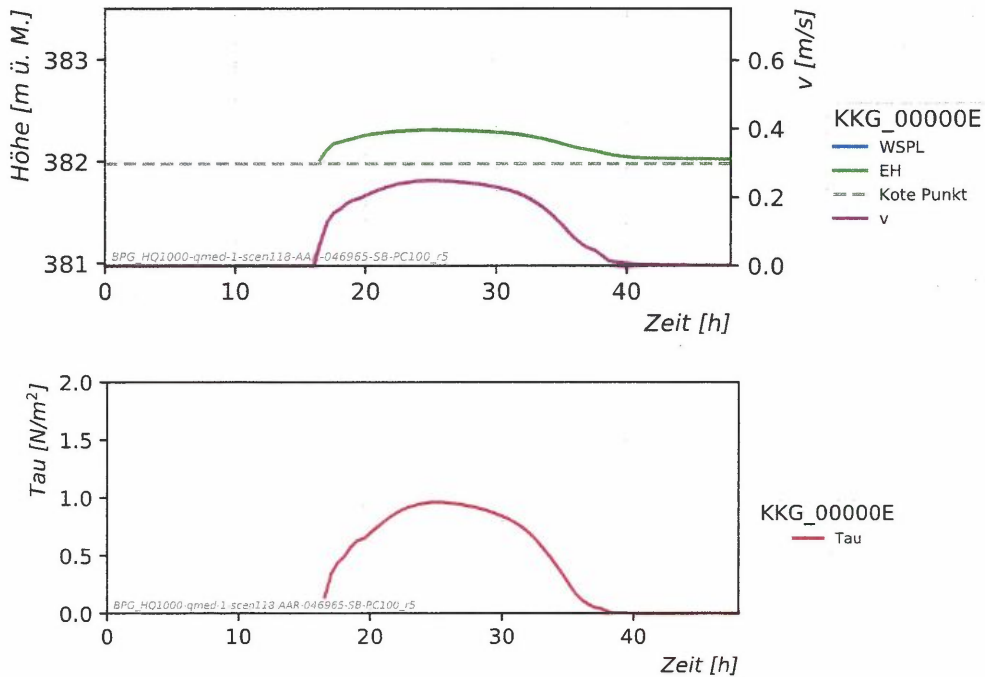


Abbildung 17: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienknoten E für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

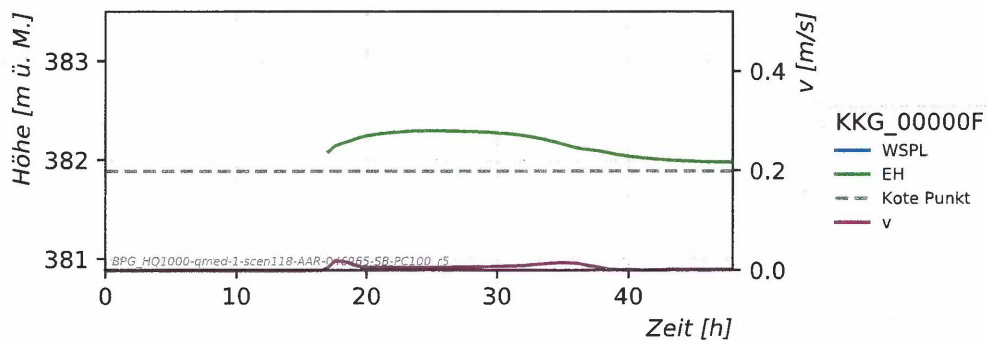


Abbildung 18: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienpunkt F für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Die Abbildung zeigt die Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün) und die Geschwindigkeit (v, violett). Dieser Punkt wird zwar benetzt, die Schubspannung ist aber wegen der sehr geringe Fliesstiefe und -geschwindigkeit vernachlässigbar klein.

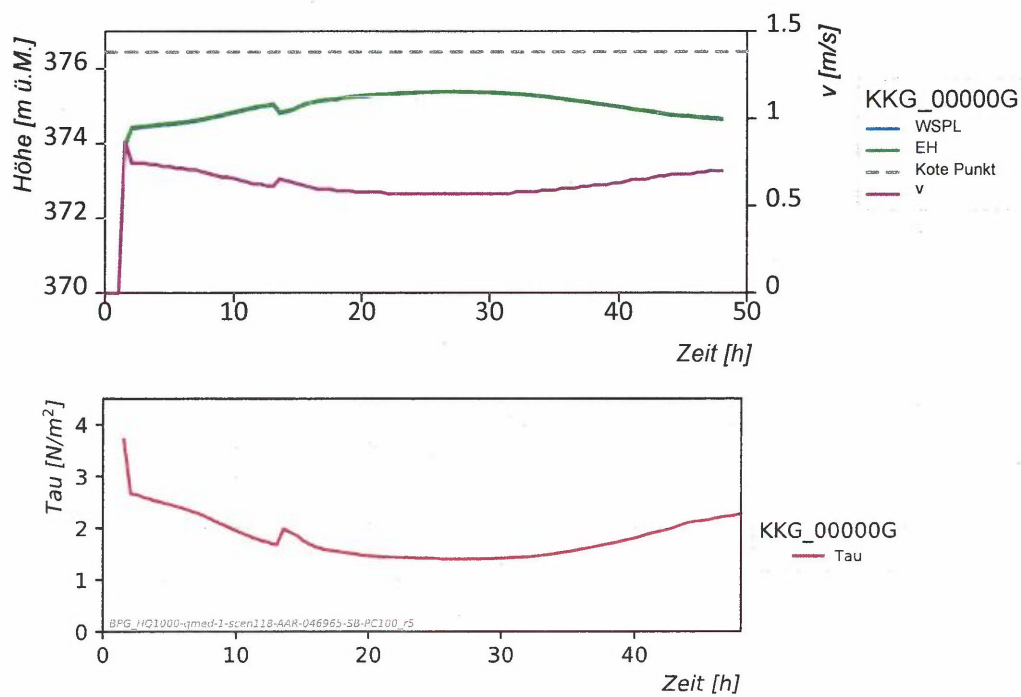


Abbildung 19: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienpunkt G für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).



Ganglinien für das Szenario 9 (1E-4/Jahr)

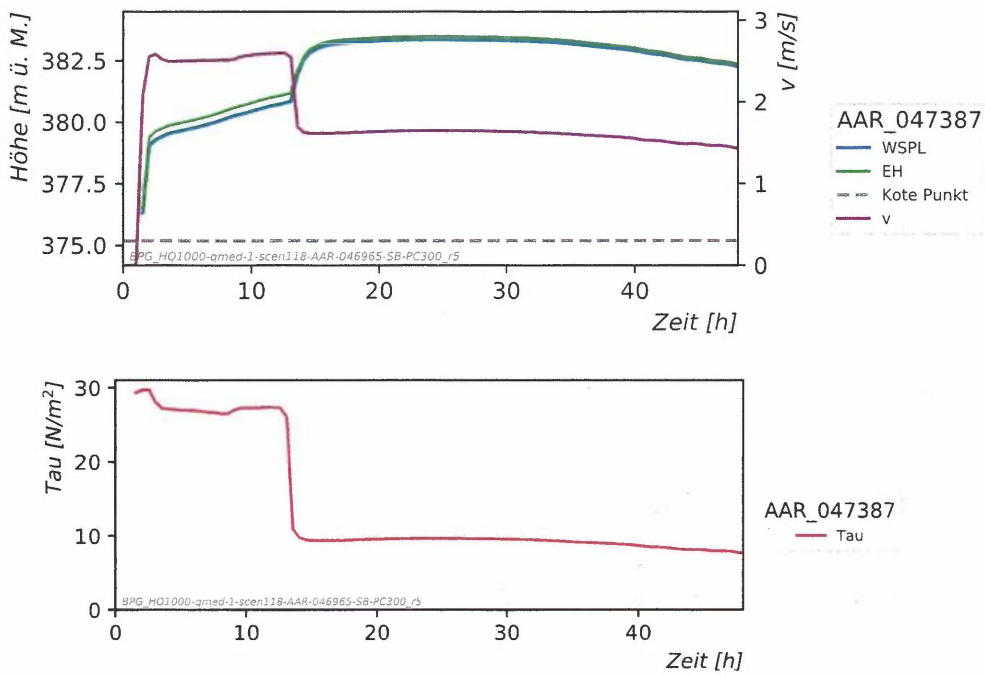


Abbildung 20: Verlauf der hydraulischen Parameter am Hilfspunkt AAR\_047387 für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

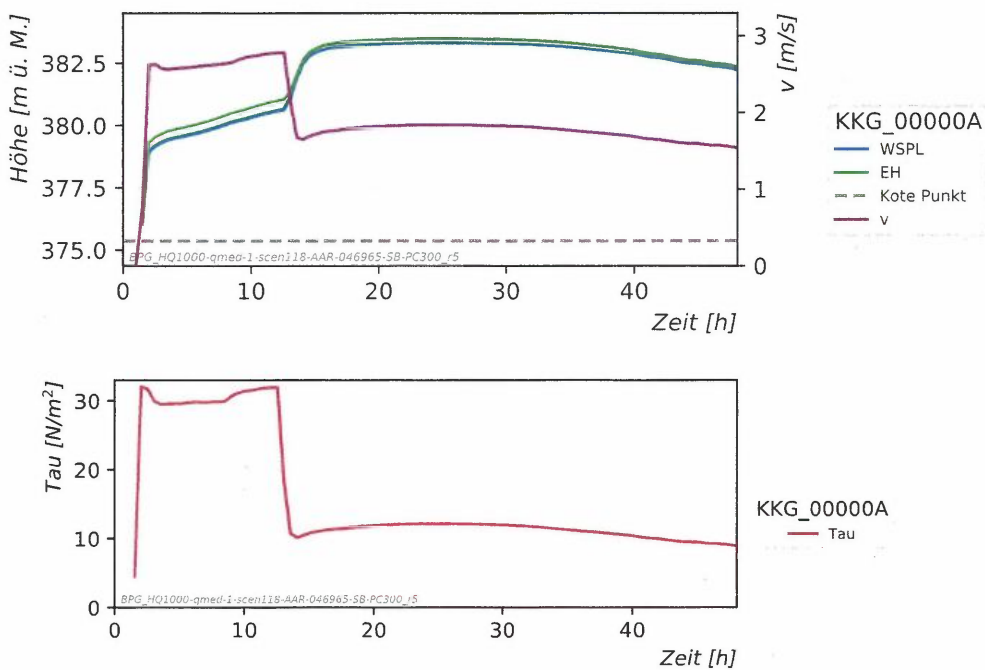


Abbildung 21: Verlauf der hydraulischen Parameter am Referenzpunkt A für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

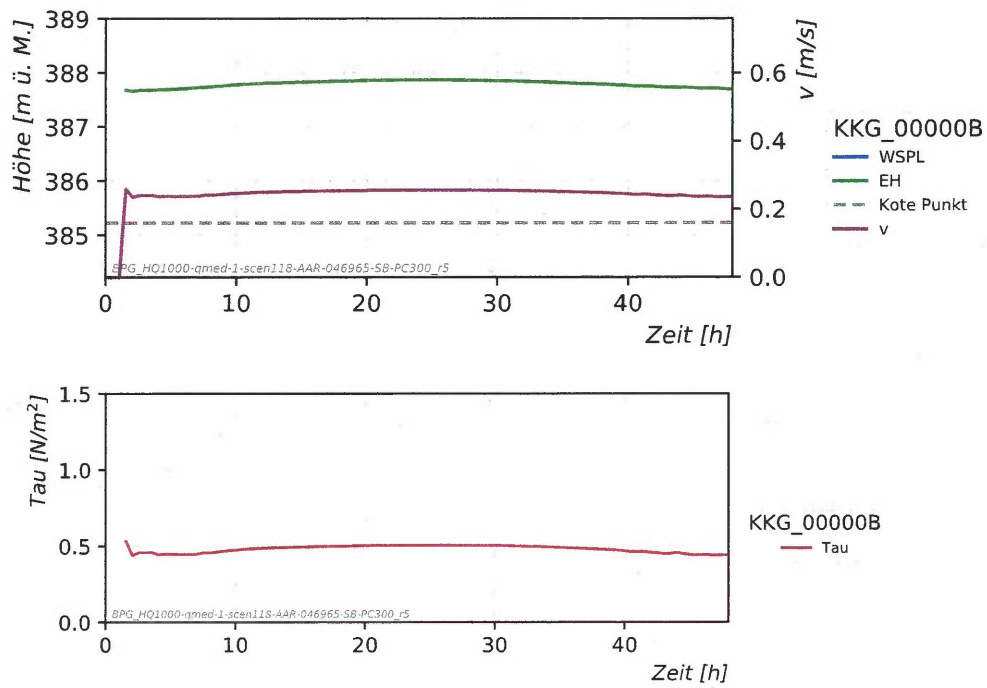


Abbildung 22: Verlauf der hydraulischen Parameter am Referenzpunkt B für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

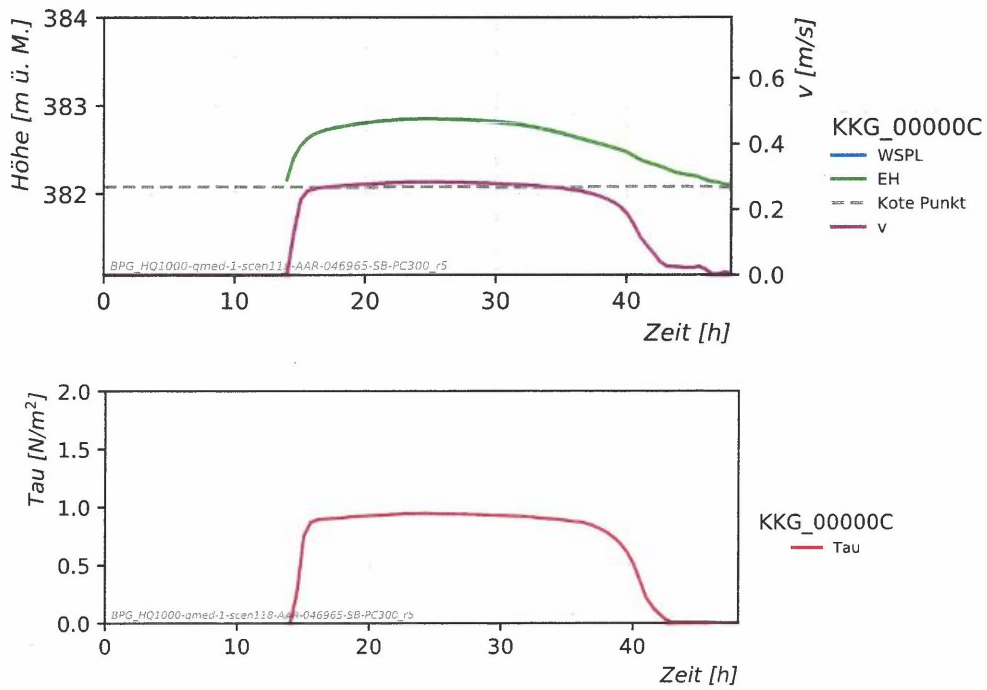


Abbildung 23: Verlauf der hydraulischen Parameter am Referenzpunkt C für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

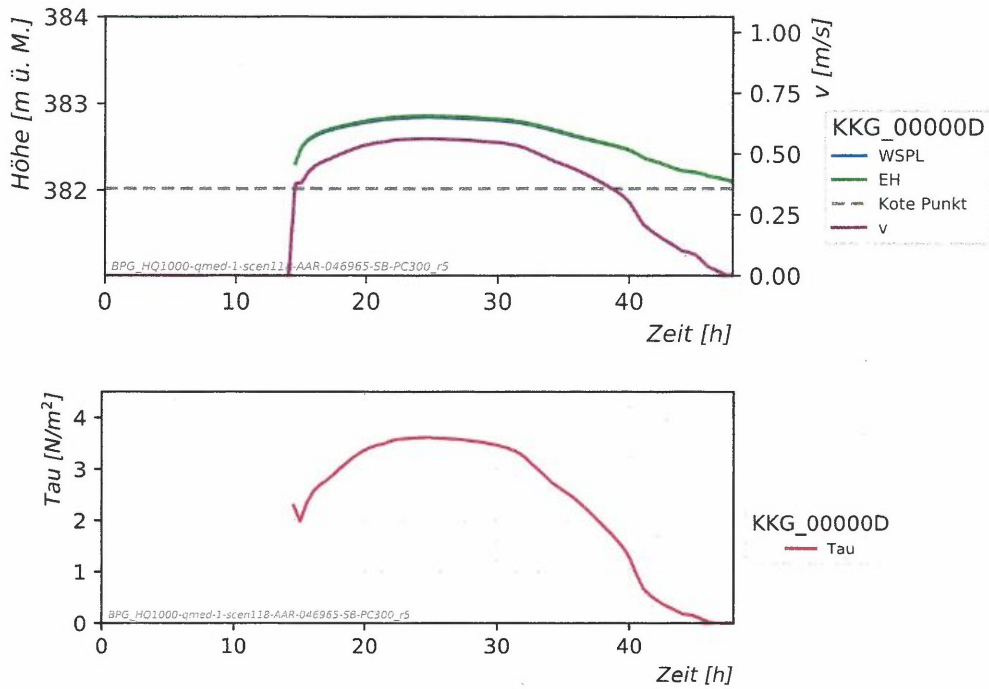


Abbildung 24: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienknoten D für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

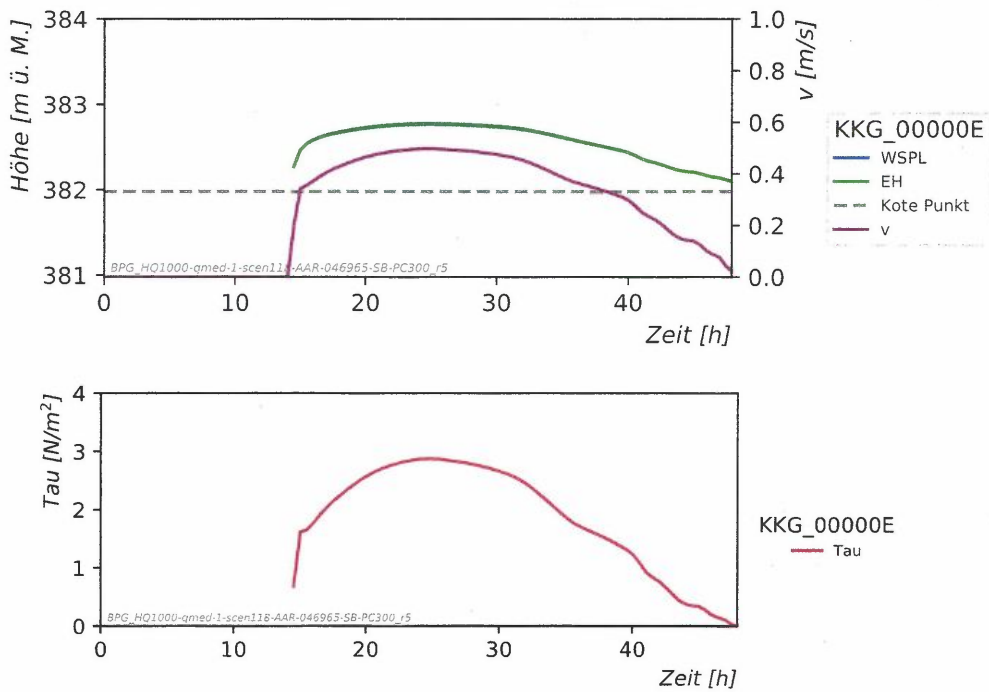


Abbildung 25: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienknoten E für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

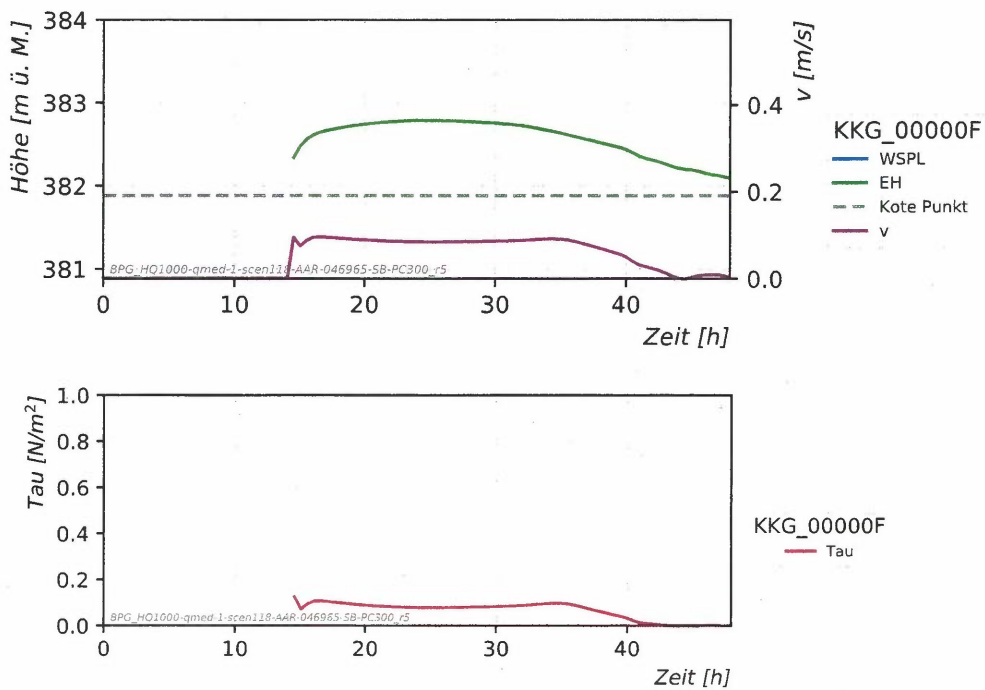


Abbildung 26: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienpunkt F für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

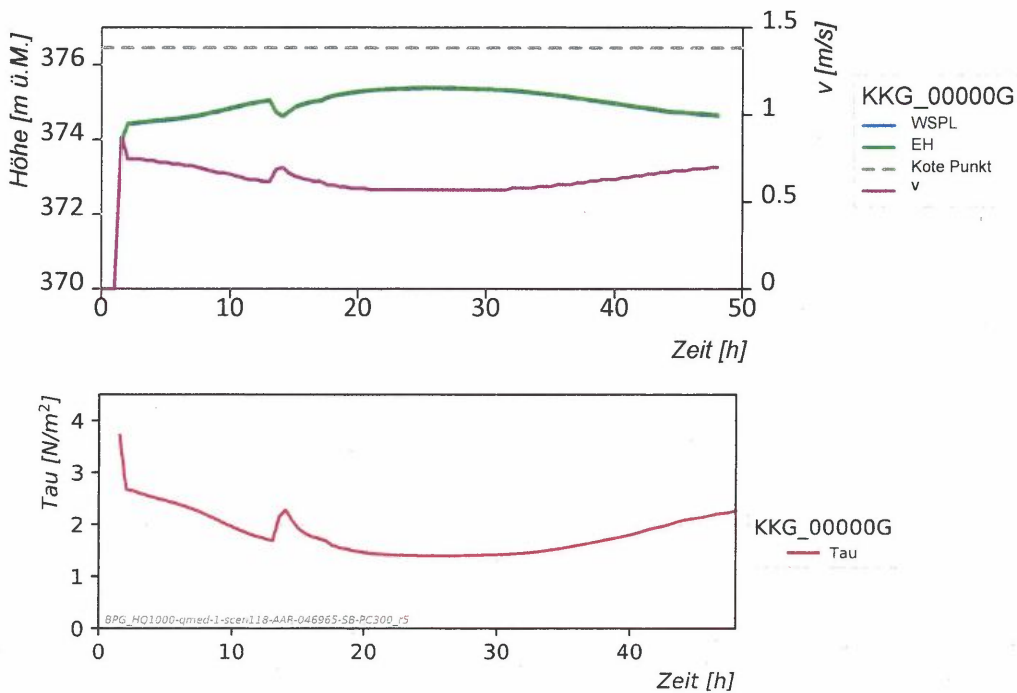


Abbildung 27: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienpunkt G für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

#### 4.4 Zusätzliche Angaben zum zeitlichen Verlauf der Hochwasserganglinien

Im Rahmen einer Zusatzanalyse wurden genauere Angaben über den zeitlichen Verlauf der Hochwasserereignisse gemacht, um damit weitere Grundlagen für den Sicherheitsnachweis der Kernkraftwerke zu schaffen.

Es werden folgende Eigenschaften der Hochwasserganglinie ausgewertet:

- Extremwertstatistik Flumenthal und Murgenthal
- Extremwertstatistik bei der Abflussaufteilung am Wehr Winznau
- Zeitabhängigkeit für ein Szenario, welches den Median, resp. den Mittelwert der Ereignisse abbildet
- Dauer des Anstiegs der Hochwasserwelle bis zum Spitzenabfluss
- Dauer des Spitzenabflusses
- Dauer des abfallenden Astes vom Zeitpunkt des Spitzenabflusses bis wieder ein Normalzustand im Gerinne ist

Als Normalzustand wird ein Zustand definiert, bei welchem sämtliches Wasser in der Aare abfließen kann und wo die hydraulischen Bauwerke im Gerinne in einem Normalbetrieb funktionieren. Als Vereinfachung wird angenommen, dass ein solcher Normalzustand bis zu einem Hochwasser, welches im Mittel alle 10 Jahre vorkommt (HQ10) eingehalten werden kann.

Die zum Zeitverlauf der Hochwasserganglinien zusätzlichen Angaben konnten im Rahmen einer Ergänzung aus den vorhandenen Grundlagen und Berechnungen der EXAR-Studie abgeleitet werden. Es wurden keine weiterführenden Modellrechnungen durchgeführt.

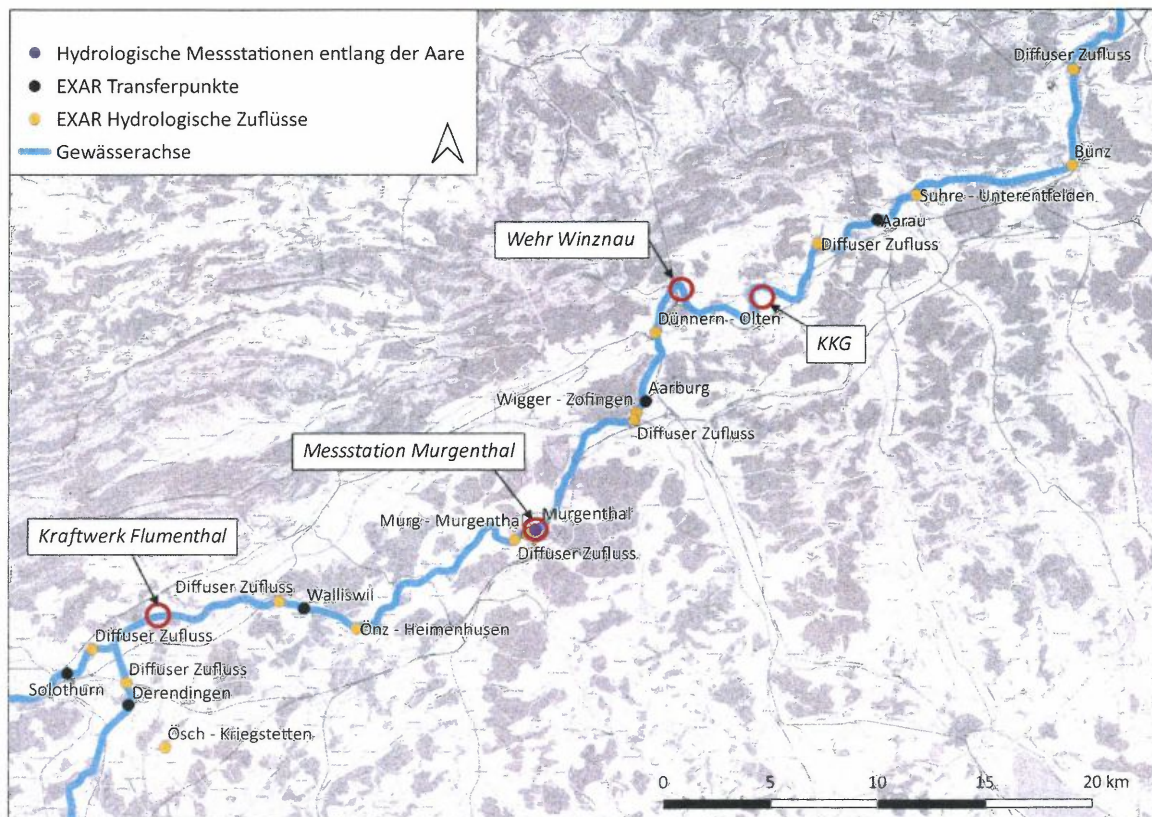
##### 4.4.1 Extremwertstatistik an diversen Stellen im Oberlauf der Aare

Die Extremwertstatistik für den Standort Flumenthal entspricht der Auswertung am Transferpunkt Walliswil (SSDSSE) in Abbildung 29. Das Wasserkraftwerk Flumenthal liegt unterhalb der Emme-Mündung, sodass die Emme-Hochwasser in der Extremwertstatistik eine Rolle spielen. Zwischen dem Wasserkraftwerk Flumenthal und dem Transferpunkt Walliswil (SSDSSE) wurde im Gesamtsystem lediglich ein diffuser Zufluss zugegeben, welcher für die Extremwertstatistik eine vernachlässigbare Rolle spielt.

Die BAFU Messstation Aare - Murgenthal (ID: 2063) liegt zwischen den Transferpunkten Walliswil und Aarburg (Abbildung 28). In diesem Subsystem gibt es oberhalb von Murgenthal zwei Zuflüsse, die Einzugsgebiete Önz und Murg sowie einen diffusen Zufluss. Unterhalb von Murgenthal gibt es einen grösseren Zufluss aus der Wigger und einen diffusen Zufluss, welcher das Gebiet der Pfaffnern abdeckt. Grundsätzlich könnten für die Messstation Murgenthal beide Transferpunkte für die Extremwertstatistik beigezogen werden. Da der Transferpunkt SSESSF jedoch bereits den grösseren Zufluss der Wigger berücksichtigt und eine Übertragung dieses Transferpunkts auf Murgenthal zu einer



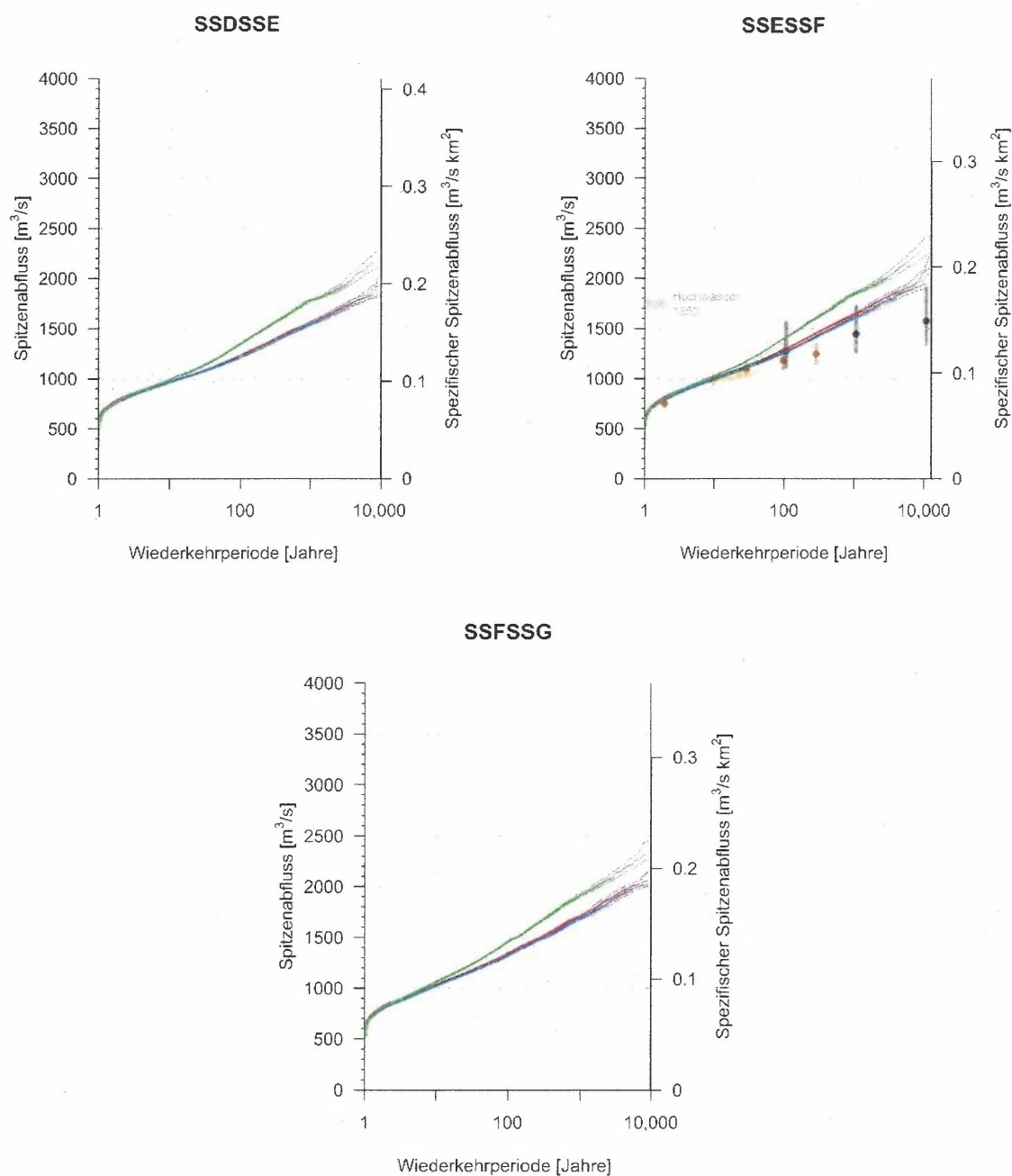
Überschätzung des Spitzenabflusses<sup>5</sup> führt, wird für die Messstation Aare - Murgenthal der Transferpunkt SSDSSE in Abbildung 29 als Referenz für die Extremwertstatistik verwendet.



**Abbildung 28:** Übersicht der verschiedenen hydrologischen Zuflüssen ins EXAR Modell (orange Punkte) im Vergleich mit den Transferpunkten (schwarze Punkte) und den Orten für zusätzliche Angaben für das KKG (rote Kreise).

Die Abflussaufteilung am Wehr Winznau liegt zwischen dem Transferpunkt Aarburg (SSESSF) und dem Transferpunkt Aarau (SSFSSG). Zwischen dem Transferpunkt Aarburg und der Wasserscheide fliesst die Dünern in die Aare. Unterhalb der Wasserscheide Winznau gibt es bis zum Transferpunkt Aarau nur noch einen diffusen Zufluss bei Erlinsbach. Für die Extremwertstatistik am Standort «Wasserscheide Winznau» wird der Transferpunkt Aarau verwendet, da dieser die Zuflüsse der Dünern berücksichtigt. Die Dämpfung des Spitzenabflusses in den Überflutungsflächen zwischen Olten und Aarau sind für Abflüsse in dieser Grössenordnung vernachlässigbar.

<sup>5</sup> Die Betriebs- resp. Hochwassersteuerung des KKG bezieht sich auf den Abflusswert in Murgenthal. Damit die Steuerung auf die für Murgenthal relevanten, hydrologischen Gegebenheiten der Aare abbildet, soll die Extremwertstatistik für Murgenthal die Hydrologie ohne den Zufluss der Wigger berücksichtigen.



**Abbildung 29:** Überschreitungsdigramme für die Transferpunkte Walliswil (SSDSSE), Aarburg (SSESSF) und Aarau (SSFSSG), Quelle: Detailbericht A, Kapitel 8. Beim Überschreitungsdigramm SSESSF sind zusätzlich noch Vergleichswerte aus verschiedenen Studien dargestellt (vgl. EXAR Hauptbericht, Kapitel 10.1 für weitere Erläuterungen).

Aus den Überschreitungsdiagrammen der drei Transferpunkte wurden auch die zugehörige Hochwasserstatistik<sup>6</sup> gebildet (Tabelle 3).

**Tabelle 3:** *Hochwasserstatistik der Spitzenabflüsse für ausgewählte Wiederkehrperioden aus den hydrologischen Langzeitganglinien für die Transferpunkte Walliswil (SSDSSE), Aarburg (SSESSF) und Aarau (SSFSSG).*

	HQ10 [m <sup>3</sup> /s]	HQ30 [m <sup>3</sup> /s]	HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	HQ300 [m <sup>3</sup> /s]	HQ1'000 [m <sup>3</sup> /s]	HQ10'000 [m <sup>3</sup> /s]
<b>Walliswil (SSDSSE)</b>	970	1081	1234	1396	1558	1916
<b>Aarburg (SSESSF)</b>	1007	1130	1293	1468	1644	1993
<b>Aarau (SSFSSG)</b>	1034	1174	1350	1515	1716	2090

#### 4.4.2 Zeitabhängigkeit des 1E-3 und des 1E-4 Ereignisses

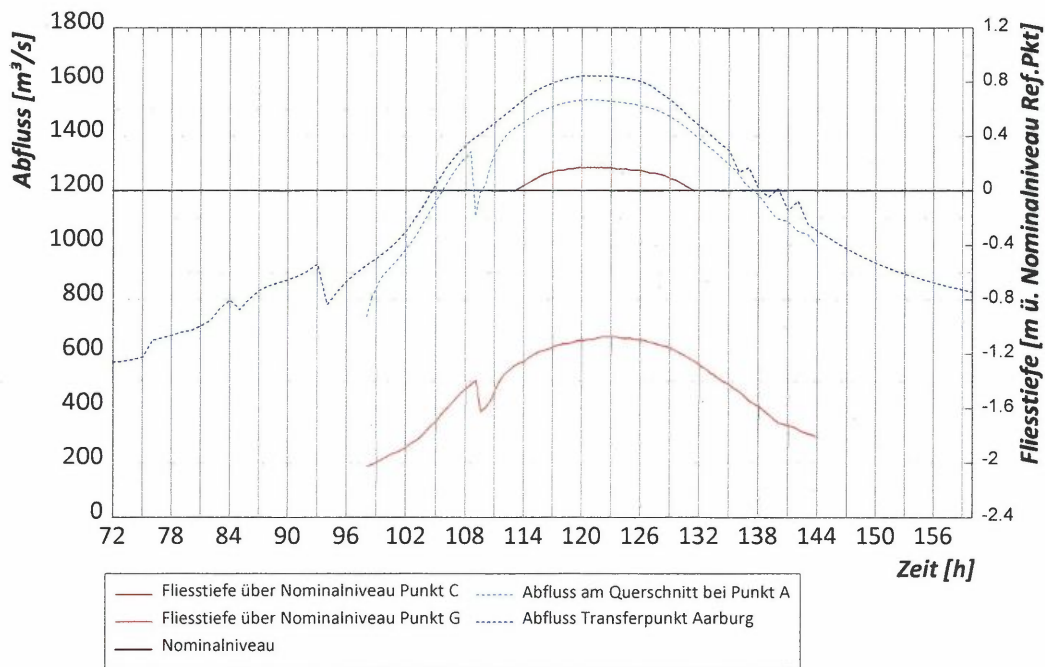
Da sich die Sicherheitseinrichtungen des KKG an verschiedenen Orten befinden, wurden für die beiden ausgewählten Szenarien 8 und 9 die Zeitabhängigkeit der Gefährdungen für verschiedene Punkte untersucht. Für beide Szenarien ergibt sich dabei ein ähnliches Bild, da das zugrunde liegende, hydrologische Ereignis für beide Szenarien das gleiche ist (FL3).

Aus der zeitabhängigen Darstellung der hydraulischen Modellierung der Szenarien 8 und 9 (ohne Berücksichtigung von Veränderungen durch die Morphologie) wird ersichtlich, dass bei beiden Szenarien nur der Referenzpunkt C überflutet wird. Der Wasserspiegel im Unterwasserkanal liegt jeweils unter der mittleren Terrainkote des Punkts G (376.45 m ü.M.). Für die angegebenen Fliesstiefen in Abbildung 30 und Abbildung 31 gilt zu beachten, dass diese - im Gegensatz zu den Angaben in Tabelle 1 - ohne Einfluss der Morphologie dargestellt werden.

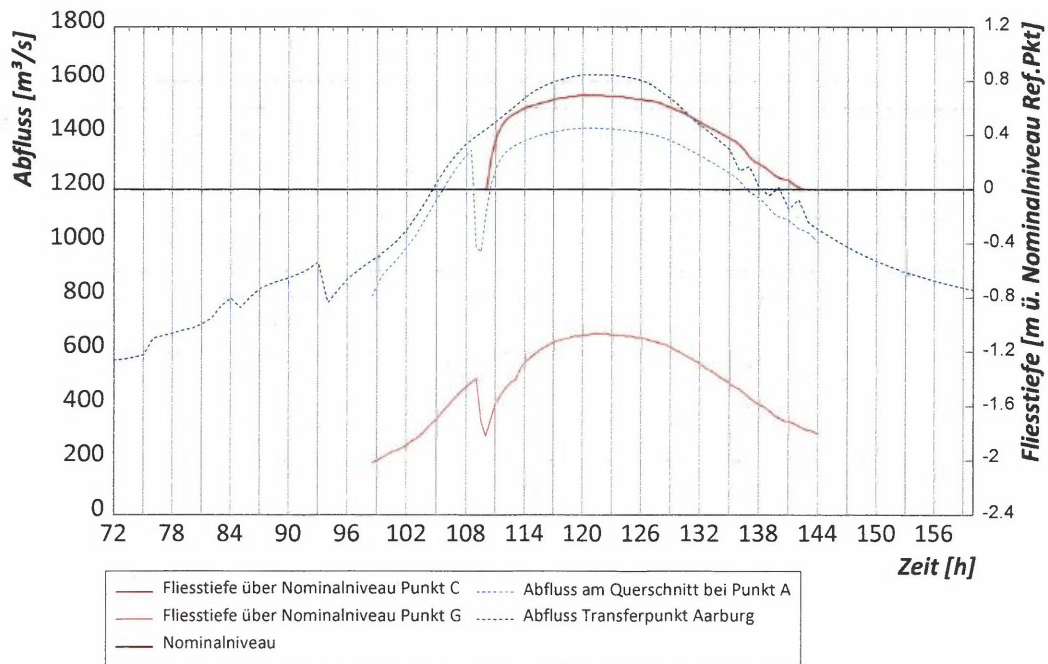
Zusätzlich wird aus den beiden Darstellungen ersichtlich, dass zwischen den beiden Punkten C und G die erhöhte Belastung in der gleichen Zeitspanne auftritt und es keine massgebenden, zeitlichen Verzögerungen gibt. Die Überflutungen treten zur gleichen Zeit auf und dauern jeweils mehrere Tage (1.5 Tage bei Szenario 8 und 2.5 Tage bei Szenario 9).

<sup>6</sup> Die Hochwasserstatistik basiert auf dem Median der jährlich berechneten Spitzenabflüssen über die gesamte Periode von 289'000 Jahren ohne Berücksichtigung von Bauwerksversagen. Die Methodik zur Herleitung der Eintretenswahrscheinlichkeit der Spitzenabflüsse ist in Detailbericht G, Kapitel 2.3.1 beschrieben.





**Abbildung 30:** Darstellung des Verlaufs der Fliesstiefe an zwei verschiedenen Referenzpunkten (Punkt C auf dem Areal des KKG und Punkt G im Unterwasserkanal des WKW Gösgen für das Szenario 8 (1E-3/Jahr). Das Szenario berücksichtigt einen Abfluss durch das Wasserkraftwerk Gösgen von 150 m³/s (Segelbetrieb der Turbinen).



**Abbildung 31:** Darstellung des Verlaufs der Fliesstiefe an zwei verschiedenen Referenzpunkten (Punkt C auf dem Areal des KKG und Punkt G im Unterwasserkanal des WKW Gösgen für das Szenario 9 (1E-4/Jahr). Das Szenario berücksichtigt einen Abfluss durch das Wasserkraftwerk Gösgen von 150 m³/s (Segelbetrieb der Turbinen).

#### 4.4.3 Informationen aus der hydrologischen Zeitreihe für den Beurteilungspereimeter Gösgen

Der Beurteilungspereimeter Gösgen (BPG) liegt an der Aare zwischen Olten und Aarau. Das Subsystem mit dem Beurteilungspereimeter Gösgen wird durch die Transferpunkte Aarburg (SSESSF) und Aarau (SSFSSG) begrenzt.

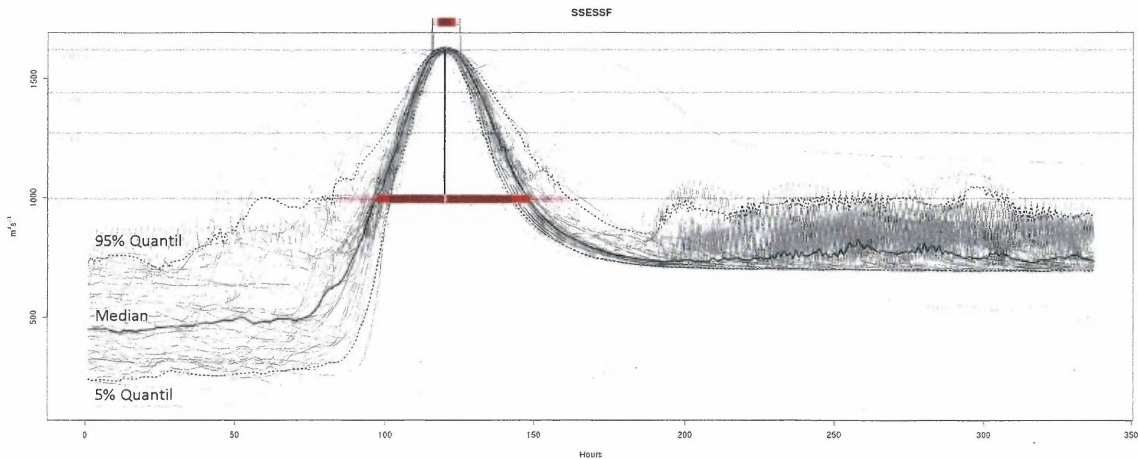
Für eine Beschreibung des zeitlichen Ablaufs der Hochwasserereignisse wird der Transferpunkt Aarburg (SSESSF) berücksichtigt (Abbildung 32). Die Hochwasserwelle verändert sich in ihrer Form zwischen dem Transferpunkt Aarburg und dem BPG kaum, da die Retentionseffekte bei Ereignissen in dieser Grössenordnung keine Rolle mehr spielen. Nachfolgende Analysen beziehen sich auf die hydrologische Ganglinie FL3 (Initialereignis für die Szenarien 8 und 9).

Als erster Schritt zur Bestimmung der Hochwasserdauer wurde die mögliche Streuung der Hochwasserereignisse aus der Langzeitsimulation (289'000 Jahre) ermittelt. Dafür wurden für den 1'000-jährlichen Spitzenabfluss je 50 Ereignisse aus den hydrologischen Langzeitsimulationen (289'000 Jahre) ausgewählt, die diesen Spitzenabfluss sehr genau erreichen. Unter diesen 50 Ereignissen liegt auch das ausgewählte Initialereignis für die Gefährdungsbeurteilung (das sog. FL3-Ereignis).

Aus den 50 Ereignissen kann ein 5%-Quantil, ein Median und ein 95% Quantil der Ganglinienschar gebildet werden (die schwarz ausgezogene Linie beschreibt den Median, die schwarz gepunkteten Linien jeweils den 5%- resp. 95%-Quantilwert). Für die folgenden Analysen wird davon ausgegangen, dass der Median ungefähr dem Mittelwert entspricht. Die Ganglinienschar in Abbildung 32 weist zwar nicht ganz eine symmetrische Form auf, die Abweichung zwischen Median und Mittelwert liegt jedoch im Bereich von wenigen Stunden. Somit können die Zeitangaben in Tabelle 4 für den Mittelwert übernommen werden.

In Abbildung 32 sind die Zeitspannen der erforderlichen Hochwasserdauer-Angaben für die verschiedenen Quantile angegeben (roter Balken mit unterschiedlicher Intensität). Die Zeitspanne beginnt, sobald die Quantilwerts-Kurve resp. die Median-Kurve den Grenzwert des HQ10 kreuzt.

Für die Auswertung der Dauer des Spitzenabflusses wurde nach dem gleichen Prinzip der Zeitraum beurteilt, in welchem sich der Abfluss der Ganglinienschar im Bereich des Grenzwerts des 1'000-jährlichen Spitzenabflusses bewegt. Die Dauer, in welcher der Abfluss im Bereich des Spitzenabflusses liegt, wurde - sofern sie eine relevante Grösse erreicht (> 5h) von der Anstiegszeit und der abfallenden Zeit subtrahiert.



**Abbildung 32:** Auswahl von 50 Ereignissen am Transferpunkt Aarburg, deren Spitzenabflüsse die grösste Ähnlichkeit mit der statistischen Wiederkehrperiode von 1'000 Jahren haben (Häufigkeit in der Grössenordnung von 1E-3/Jahr). Die schwarze Linie entspricht dem Median der 50 Ereignissen. Die schwarz gepunktete Linien stellen das 5% und das 95% Quantil der Ganglinienschar dar. Die dargestellten Oszillationen der Ganglinie stammen aus dem flussaufwärts liegenden und regulierten Bielersee, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde. Der Abfluss aus dem Wehr Port ist dabei so hoch, dass der Hochwasserbetrieb aufgrund der vereinfachten Regelung aktiviert resp. deaktiviert wird.

Aus den Angaben der Zeitspannen in der Abbildung 32 können allgemeine Angaben zu den erwarteten Zeitspannen für das hydrologische Ereignis FL3 gemacht werden (Tabelle 4).

**Tabelle 4:** Zusammenstellung der zu erwartenden Zeitspannen des Hochwasserereignisses FL3 am Transferpunkt Aarburg.

		5% Quantil	Mittelwert	95% Quantil
FL3 Transferpunkt Aarburg	Anstiegszeit Normalabfluss bis Spitzenabfluss	ca. 20 h	<b>20 - 30 h</b>	ca. 35 h
	Dauer des Spitzenabflusses	ca. 3 h	<b>ca. 6 h</b>	ca. 10 h
	Abfallende Zeit Spitzenabfluss bis Normalabfluss	20 - 30 h	<b>ca. 30 h</b>	35 - 45 h

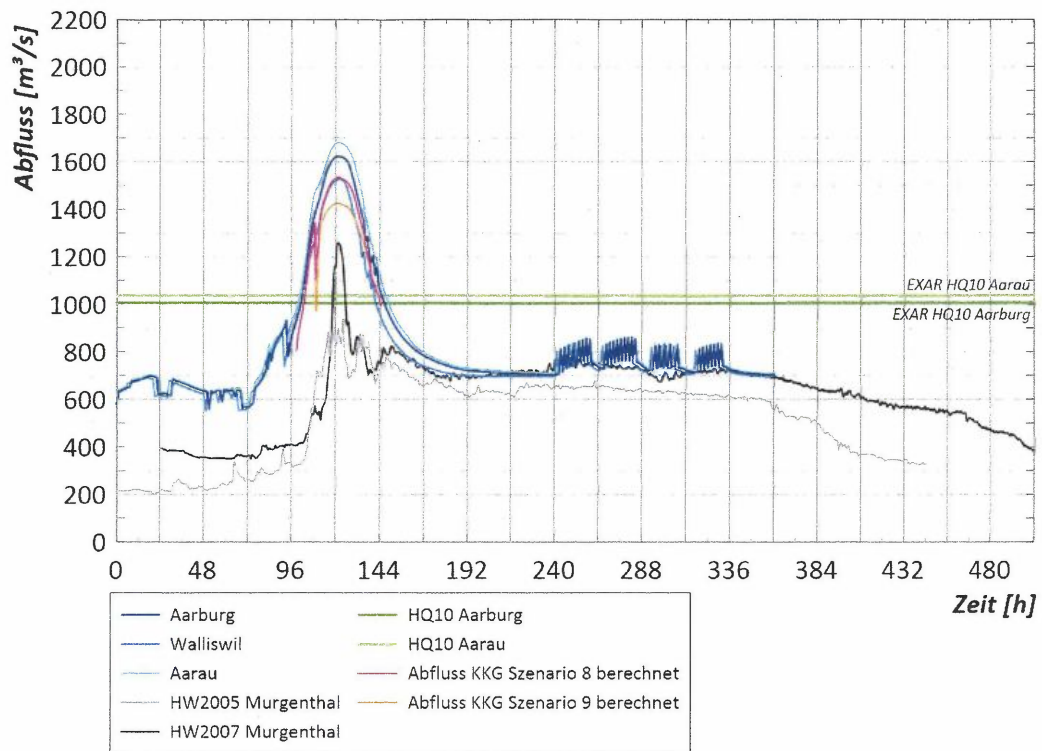
Die Auswertung zeigt zwischen den Quantilen nur eine geringe Streuung, was auch in der Darstellung der Ganglinienschar ersichtlich ist. Die überwiegende Zahl der Szenarien hat einen sehr ähnlichen Verlauf der Hochwasserwelle. Es gibt jedoch in der Ganglinienschar auch einige Spezialfälle: Ereignisse, welche länger andauern oder falls nach dem Ereignis noch ein zweites Hochwasserereignis auftritt.

#### **4.4.4 Informationen aus den spezifischen Szenarien für den Beurteilungspereimeter Gösgen**

Die spezifischen Szenarien wurden im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung so gewählt, dass die Ganglinie am Transferpunkt möglichst dem Median, resp. dem Mittelwert der Ganglinienschar (Abbildung 32) entspricht. Da die EXAR-Studie die Hochwassergefährdung vor allem aufgrund der Maximalwerte in den Beurteilungspereimetern untersuchte, wurde die Ganglinie beim KKG auf den Bereich des Spitzenabflusses zugeschnitten (von Stunde 96 bis Stunde 144).

Nachfolgend werden die hydrologischen Ganglinien des Initialereignisses FL3 an verschiedenen Standorten entlang der Aare dargestellt und mit dem berechneten Abfluss der Szenarien 8 und 9 im Bereich des KKG verglichen. Wenn die Ganglinie beim KKG eine ähnliche Form aufweist wie die Ganglinie am oberhalb liegenden Transferpunkt, kann die statistische Auswertung aus dem vorherigen Kapitel 4.4.3 für den KKG-Standort übernommen werden.

Der Vergleich der Ganglinien (Abbildung 33) zeigt, dass der berechnete Abfluss im Gerinnebereich des KKG grösstenteils der Ganglinie am oberhalb liegenden Transferpunkt folgt. Die Abflusdämpfung durch die Verklausung des Fussgängerstegs ist darauf klar ersichtlich - und die Verklausung durch ein 300-jährliches Volumen (1E-4-Ereignis) führt zu einer deutlich grösseren Abflusdämpfung. Die Zeitspannen, welche in Aarburg auftreten, können für den Standort des KKG übernommen werden.



**Abbildung 33:** Vergleich der Hochwasserganglinien FL3 der Szenarien 8 (1E-3/Jahr) und 9 (1E-4/Jahr) aus der Betrachtung der Transferpunkte Aarburg (dunkelblaue Linie), Walliswil (blaue Linie) und Aarau (hellblaue Linie), zusammen mit der berechneten Abflussganglinie im Bereich des Spitzenabflusses beim Beurteilungssperimeter Gösgen (pinke und orange Linie) und den Schwellenwerten für den Normalzustand (HQ10). Zusätzlich sind als Vergleich die gemessenen Hochwasserganglinien für das HW-Ereignis 2005 (graue Linie) und das HW-Ereignis 2007 (schwarze Linie) an der Messstation Aare - Murgenthal dargestellt. Die Oszillationen der Ganglinie ab ca. 240 Stunden stammen aus dem flussaufwärts liegenden und regulierten Bielersee, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde. Der Abfluss aus dem Wehr Port ist bei der Simulationszeit von 240 Stunden immer noch so hoch, dass der Hochwasserbetrieb aufgrund der vereinfachten Regelung aktiviert resp. deaktiviert wird.

Die Zeitspannen der Anstiegszeit und der abfallenden Zeit für die berechneten Szenarien 8 und 9 sind in Tabelle 5 dargestellt. Die erhaltenen Werte können gut in die möglichen Zeitspannen der Median, resp. Mittelwert-Ganglinie aus Kapitel 4.4.3 eingeordnet werden.

**Tabelle 5:** Zusammenstellung der zu erwartenden Zeitspannen der spezifisch ausgewählten Szenarien 8 und 9 am Transferpunkt Aarburg. Die Angaben sind für den Standort des KKG übertragbar. Die Ganglinie zeigt das Initialereignis FL3, welches gemäss der Beschreibung in Kapitel 3 als Mittelwert der Ganglinien in dieser Grössenordnung der Wiederkehrperiode angewendet werden kann.

		Szenario 8 und 9
Transferpunkt Aarburg	Anstiegszeit Normalabfluss bis Spitzenabfluss	ca. 15 h
	Dauer des Spitzenabflusses	ca. 10 h
	Abfallende Zeit Spitzenabfluss bis Normalabfluss	15 - 20 h

## 5 Literatur

- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. 2019. *Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25000*: Bezug: [www.map.geo.admin.ch](http://www.map.geo.admin.ch).
- Flussbau AG. 2016. *EXAR Grundlagen Extremhochwasser Aare Thunersee - Rhein. Morphologische und gerinnespezifische Grundlagen*. Zürich: Flussbau AG.
- IG HWS Niederamt. 2012. *Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekt Aare, Olten - Aarau: Teilstrecke 5 - Kernkraftwerk Gösgen, Massnahme B12, Querprofile 11:200*.
- Schalko, I. 2018. *Modeling hazards related to large wood in rivers*. Unpublished Dissertation, ETH Zürich, Zürich.