



ENSI, CH-5201 Brugg

**Einschreiben mit Rückschein**

BKW Energie AG  
Kernkraftwerk Mühleberg  
3203 Mühleberg

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 (MeteoSchweiz) 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).

Gemäss Art. 36 Abs. 1 der Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (KEV; SR 732.11) hat der Bewilligungsinhaber die Entwicklung der fachbezogenen Wissenschaft, insbesondere Erkennt-



**Klassifizierung:**  
Betreff:

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

nisse 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 (PSA) 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).

Das Kernkraftwerk Mühleberg (nachfolgend: KKM) befindet sich seit dem 20. Dezember 2019 nicht mehr im Leistungsbetrieb bzw. seit dem 15. September 2020 in der Stilllegungsphase 1 (Betriebszustand SP 1), was bei den Nachweisen zu berücksichtigen ist.

Die Nachweise, wie sie für das noch hängige Rechtsverfahren des KKM mit Blick auf den Leistungsbetrieb zu führen sind, sind vom vorliegenden Schreiben nicht betroffen.

## **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 Mühleberg 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 BKW Energie AG im Sinne der Gewährung des rechtlichen Gehörs zur Stellungnahme zugesandt. Mit Schreiben vom 9. April 2021 /3/ hat die BKW Energie AG zum Entwurf der vorliegenden Verfügung Stellung genommen. Die Erwägungen des ENSI zu den Vorbringen der BKW Energie AG sind in einer separaten Stellungnahme /4/ dokumentiert.

Gestützt auf diese Erwägungen und unter Berücksichtigung der Vorbringen der BKW Energie AG 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 KKM gelten für das 1'000- und 10'000-jährliche Hochwasser die Gefährdungsannahmen gemäss dem Dokument «Extremhochwasser an der Aare. Szenariendokument Projekt EXAR. Beschreibung des 1'000- und des 10'000-jährlichen Hochwassers am Beurteilungssperimeter Mühleberg» /2/ vom 2. Februar 2021.

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

2. **Sicherheitsnachweise:** Die BKW Energie AG hat bis Ende 2022 für das Kernkraftwerk Mühleberg folgende Sicherheitsanalysen durchzuführen (Geschäft 11/21/004):

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 KKM 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. Zu betrachten ist der Betriebszustand SP 1.

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 Betriebszustand SP 1.

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 Mühleberg. Birmensdorf: 28 S.

### **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 Mühleberg. Birmensdorf: 28 S.
- /3/ KKM-Brief, [REDACTED] «Gefährdungsannahmen EXAR-2021 für die Standorte der Schweizer Kernanlagen an der Aare; Verfügungsentwurf vom 22.02.2021; rechtliches Gehör», 09.04.2021
- /4/ ENSI-Brief, [REDACTED] - 11 KEX.HW; 11/21/004, «Stellungnahme des ENSI zur Anhörungantwort der BKW Energie AG betreffend Verfügung «Gefährdungsannahmen EXAR-2021»», 12.11.2021



Universität  
Zürich<sup>UZH</sup>

**GEOTEST** GEOLOGEN / INGENIEURE /  
GEOPHYSIKER /  
UMWELTFACHLEUTE

**IUB** Engineering

 **Hunziker, Zarn & Partner**  
*Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau*

**ETH** zürich



**EPFL**



UNIVERSITÉ  
Grenoble  
Alpes

## Extremhochwasser an der Aare

Szenariendokument Projekt EXAR

Beschreibung des 1'000- und des 10'000-jährlichen Hochwassers am  
Beurteilungssperimeter Mühleberg

**Impressum**

Datum: 02.02.2021

**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
GEOTEST	Patrick Baer, Andreas Sutter
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 Beurteilungsumperimeter Mühleberg. Birmensdorf: 28 S.

**Hinweis**

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Eidgenössischen 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 Mühleberg .....	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 .....	15
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 .....	21
4.4.1	Informationen aus der hydrologischen Zeitreihe für den Beurteilungsperimeter Mühleberg .....	21
4.4.2	Informationen aus den spezifischen Szenarien für den Beurteilungsperimeter Mühleberg .....	25
5	Literatur.....	28

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes EXAR wurde die Gefährdung in den Beurteilungspereimetern 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-jährlichen und das 10'000-jährliche Hochwasser für das Kernkraftwerk (KKW) Mühleberg 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 Beurteilungspereimeter 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 des Szenarios.

### Gefährdung durch Überflutung

Die Gefährdung durch Überflutung wird durch die Wasserspiegel beschrieben. Dazu wurden mit einem hydraulischen 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 Gefährdungskurve für die einzelnen Referenzpunkte in den Beurteilungspereimetern der KKW's Mühleberg, Gösigen und Beznau sowie an den Standorten PSI und Olten dargestellt. Die Gefährdungskurve zeigt die Überschreitungshäufigkeit der maximalen Wasserspiegellage an einem Referenzpunkt. Die Resultate der hydraulischen Untersuchungen beinhalten zudem quantitative Angaben zu den Fließgeschwindigkeiten, Fliesstiefen oder Schubspannungen.

### **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**

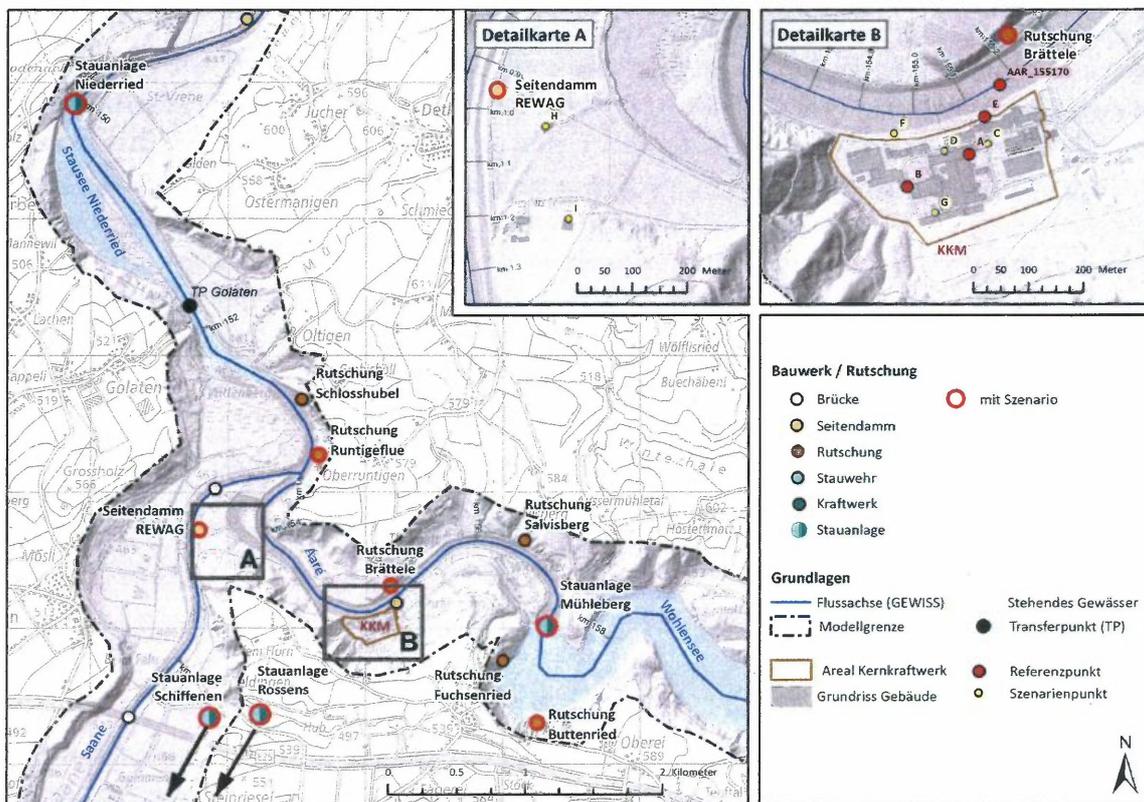
Im Bereich des Beurteilungsperimeters Mühleberg befindet sich das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM), für dessen Areal eine Gefährdungsanalyse durchgeführt wurde.

### **2.1 Angaben für das KKW Mühleberg**

Das Untersuchungsgebiet befindet sich zwischen den Transferpunkten Halen und Golaten im Kanton Bern. Der Transferpunkt Halen liegt bei der Halenbrücke am oberen Ende des Wohlensees, der von der Stauanlage Mühleberg eingestaut wird. Rund 1.9 km unterhalb des Wohlensees liegt das Kernkraftwerk Mühleberg am linken Aareufer, weitere 1.4 km flussabwärts fliesst die Saane in die Aare. Der Transferpunkt Golaten liegt unterwasserseitig der Saanemündung im Einstaubereich der Stauanlage Niederried (Abbildung 1). Die für das Kraftwerk relevanten Angaben beziehen sich auf die in der Detailkarte B dargestellten Referenzpunkte A, B und E. Da sich die Lage der Referenzpunkte nicht wesentlich unterscheidet, wurden dieselben Ereignisbäume für die Generierung der Gefährdungskurven verwendet. Für jeden Referenzpunkt wurde eine Gefährdungskurve erstellt. Für die Szenarienpunkte C, D, F und G 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. 12.4 sowie im Detailbericht F zu finden.



**Abbildung 1:** Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes mit dem Beurteilungsperimeter Mühleberg (BP Mühleberg), der durch den Nahbereich der Referenz- und Szenarienpunkte definiert wird. Punkte in der Hauptabbildung zeigen im Projekt EXAR 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 Mühleberg in grossen Talmäandern, wobei das Gerinne stark eingeschnitten ist. Das KKM liegt auf einer künstlichen Aufschüttung, der Fels steht im KKW-Areal auf einer Tiefe von ca. 7 - 9 m resp. ca. 2 m unterhalb der Gerinnesohle an (Quelle: Geologischer Atlas der Schweiz, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2019). Im naturnahen Zustand wies die Aare lokal eine deutlich grössere Breite sowie teilweise ein mehrarmiges Gerinne auf, was auf eine aktive morphologische Dynamik und Geschiebeführung hindeutet. Die grossräumige Lage der Mäander ist aber mit dem heutigen Lauf vergleichbar, ebenso die Gerinnebreite von ca. 90 - 100 m bei der Rechtskurve beim Kernkraftwerk Mühleberg. Durch den Bau der Stauanlage Mühleberg wurde die morphologische Dynamik der Aare verändert, da durch die Talsperre alles Geschiebe im Stauraum zurückgehalten wird. Zudem wird das morphologische System Mühleberg durch die Stauanlage Niederried, den Zusammenfluss der Aare mit der Saane und der flachen Talebene (<0.1%) entscheidend geprägt. Die fehlende Geschiebezufuhr sowie das, durch den Rückstau der Saane bedingte, flache Gefälle führen dazu, dass der Geschiebetransport sowie die morphologische Dynamik in der Aare begrenzt ist. Die Sohlenlage der Aare blieb zwischen der Stauanlage Mühleberg und der Saanemündung in den letzten Jahren stabil. Gemäss der Dokumentation der Flussbau AG (2016) sind im Abschnitt zwischen dem Wohlensee und der Stauanlage Niederried die Ufer mehrheitlich unverbaut. Auf der linken Uferseite beim KKM ist ein Uferschutz vorhanden, welcher aber beschädigt

ist, denn entlang des Geländes des KKM können lokale Erosionsnischen am Ufer festgestellt werden. Es sind Pfähle als Überreste von alten Uferverbauungen sichtbar. Die Uferböschung ist auf dem ganzen Abschnitt mit Gras/Hochstauden und Büschen/Bäumen bewachsen (Flussbau AG, 2016).

Der relevante Geschiebeeintrag wird von der Saane geliefert. Da linksseitig der Mündung der Saane in die Aare das Auengebiet Oltigenmatt liegt, welches häufig überflutet wird (kein Damm an dieser Stelle), bricht im Mündungsbereich der Saane die Transportkapazität zusammen und das mitgeführte Geschiebe bleibt liegen.

### **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 A (Kapitel 12.3 im Hauptbericht) wurden für den Beurteilungsumfang Mühleberg das Szenario 1 für das 1'000-jährliche und Szenario 2 für das 10'000-jährliche Hochwasser als repräsentativ angenommen. Die Nummerierung der Szenarien entspricht derjenigen des Hauptberichts.

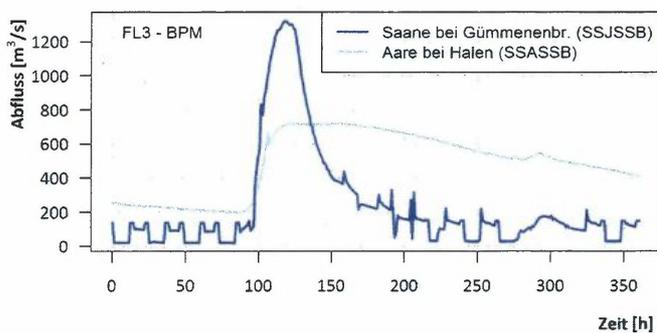
Bei den Szenarien 1 und 2 handelt es sich um hydrologische Szenarien ohne Bauwerksversagen, das heisst, die hydrologischen Initialereignisse FL3 und FL4 bilden die Grundlage für die Szenarien. Das bedeutet auch, dass sämtliche Bauwerke wie vorgesehen funktionieren. So wird bei der Stauanlage Mühleberg angenommen, dass sämtliche Wehrfelder offen stehen („n-0“), der Kraftwerksbetrieb bis zum definierten maximalen Wasserspiegel ohne Störung funktioniert und keine sonstigen Störungen im System auftreten. Weiter treten keine Rutschungen oder Verkläuerungen auf.

Die hydrologischen Initialereignisse<sup>2</sup> FL3 und FL4 wurden aus der 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 12.2 im Hauptbericht). Die Ganglinien und Spitzenabflüsse der Aare und Saane sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt.

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 zwei Tage und 14 Stunden nach dem Spitzenabfluss berechnet (d.h. in den Simulationsresultaten entspricht der Startwert von 0 Stunden der Stunde 96 in Abbildung 2 resp. Abbildung 3).

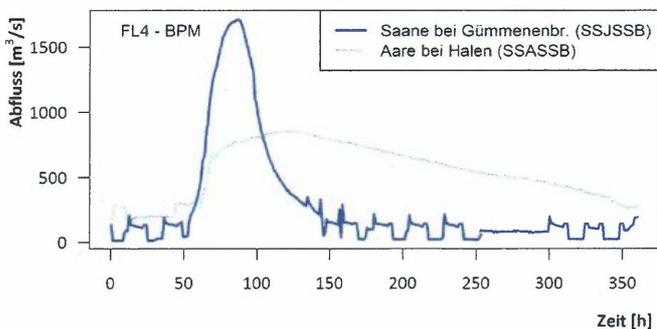
---

<sup>2</sup> Die Initialereignisse FL3 und FL4 beschreiben eine hydrologische Ganglinie mit einer Häufigkeit in der Grössenordnung von 1E-3/Jahr resp. 1E-4/Jahr. Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Initialereignisses wurden sämtliche Ereignisse betrachtet, welche innerhalb eines definierten Intervalls des Spitzenabflusses liegen (Event-Klasse FL3 resp. FL4, vgl. EXAR Hauptbericht, Kapitel 5.5 für weitere Erläuterungen).



Gerinne	Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]
Aare (Halenbücke)	722
Saane (Gümmentenbrücke)	1323

**Abbildung 2:** Ganglinie des hydrologischen Initialereignisses FL3 für die Kombination mit dem Szenario 1. Die Oszillationen der Ganglinie stammen aus dem oberhalb liegenden Kraftwerksbetrieb der Stauanlage Schiffenen, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde.



Gerinne	Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]
Aare (Halenbücke)	859
Saane (Gümmentenbrücke)	1714

**Abbildung 3:** Ganglinie des hydrologischen Initialereignisses FL4 für die Kombination mit dem Szenario 2. Die Oszillationen der Ganglinie stammen aus dem oberhalb liegenden Kraftwerksbetrieb der Stauanlage Schiffenen, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde.

Beim Szenario 1 entstehen insbesondere entlang der Saane grössere Überflutungsflächen (Abbildung 5). Da der Spitzenabfluss der Saane mehrheitlich vor demjenigen der Aare auftritt, vermag die Saane die Aare teilweise etwas zurück zu stauen. Die maximalen Fliessgeschwindigkeiten in der Aare sind im Vergleich zu denjenigen in der Saane über die gesamte Ereignisdauer deutlich tiefer, was auf das geringere Gefälle zurückzuführen ist. Das aus den Gerinnen ausgetretene Wasser weist meist Fliessgeschwindigkeiten von  $< 1.0$  m/s auf (Abbildung 6). Das Areal des KKM bleibt über die gesamte Ereignisdauer trocken, lediglich der nordöstlich der Anlage, leicht tiefer liegende Parkplatz wird überflutet.

Beim Szenario 2 entstehen entlang der Saane grössere Ausuferungsflächen als beim Szenario 1 (Abbildung 8). Da die Abflussspitze der Saane ebenfalls vor derjenigen der Aare auftritt, sind auch bei diesem Szenario Rückstauereffekte zu beobachten. Die maximalen Fliessgeschwindigkeiten in der Aare sind im Vergleich zu denjenigen in der Saane wiederum über die gesamte Ereignisdauer deutlich tiefer. Das aus den Gerinnen ausgetretene Wasser erreicht bei topografischen Engstellen Fliessgeschwindigkeiten von mehr als 1.0 m/s (Abbildung 9). Das Areal des KKM bleibt über die gesamte Simulation mehrheitlich trocken. Lediglich die dem Gerinne am nächsten gelegenen Gebäude und der leicht tiefer gelegene Parkplatz werden im Randbereich überflutet.

Die Referenzpunkte A und B werden bei den betrachteten Szenarien 1 und 2 nicht überflutet. Weitere Informationen zu den Szenarien 1 und 2 finden sich in der Resultatmappe 3, BPM, Kapitel 1.4, I.

## 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 Szenarien- und Referenzpunkten 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 den Referenzpunkt A basiert auf der im Hauptbericht EXAR dokumentierten Gefährdungskurve (Abbildung 44 in Hauptbericht Kap. 12.3). Für die Referenzpunkte B (Abbildung 12 in Detailbericht G, Kap. 3.1.1) und E (Abbildung 13 in Detailbericht G, Kap. 3.1.1) 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 Tabelle 2 angegebenen Wasserspiegellagen setzen sich aus dem Mittelwert der maximalen Wasserspiegel 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-Geschiebemodells untersucht. Die morphologischen Simulationen des Referenzszenarios zeigten, dass das von der Saane transportierte Geschiebe im Mündungsbereich abgelagert wird, was einen Rückstau erzeugt, weshalb mit ca. 20 cm höheren Wasserspiegeln beim KKM gerechnet werden muss. Diese Auswirkungen wurden - inklusive der dazu gehörenden, nicht symmetrischen Unsicherheiten - in der Gefährdungskurve mitberücksichtigt, 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 E beim Kernkraftwerk Mühleberg (KKM).*

Referenzpunkt	Höhe Terrain [m ü. M.]	Wasserspiegellage für die mittlere Gefährdung mit Morphologie [m ü. M.]		
		1E-3/Jahr	1E-4/Jahr	
KKM	A	465.95	465.70*	466.10
	B	465.92	465.70*	466.10
	E	463.50	465.70	466.10

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

**Tabelle 2:** *Maximale Wasserspiegellagen des Szenarios 1 (repräsentativ für 1E-3/Jahr) und des Szenarios 2 (repräsentativ für 1E-4/Jahr) für die Szenarienpunkte D, E und F beim Kernkraftwerk Mühleberg (KKM).*

Szenarienpunkt	Höhe Terrain [m ü. M.]	Wasserspiegellage für die mittlere Gefährdung mit Morphologie [m ü. M.]		
		1E-3/Jahr Szenario 1	1E-4/Jahr Szenario 2	
KKM	C*	465.67	465.62**	465.99**
	D*	465.74	465.62**	465.99**
	F*	459.00	465.60	465.98
	G*	465.68	465.62**	465.99**

\* Für die Szenarienpunkte C, D, F und G 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 1 und 2.

\*\* Hydraulische Simulationen resultieren in keiner Überflutung. Die WSPL werden am Hilfspunkt AAR\_155170 in der Aare abgelesen und die Änderung der WSPL infolge morphologischer Prozesse dazugerechnet. Bei Szenario 1 (1E-3/Jahr) sind die entsprechenden WSPL niedriger als das Terrain bei den Szenarienpunkten, weshalb die Standorte in diesem Fall trocken bleiben. Bei Szenario 2 (1E-4/Jahr) liegen die WSPL jedoch über dem Terrain bei den Szenarienpunkten.

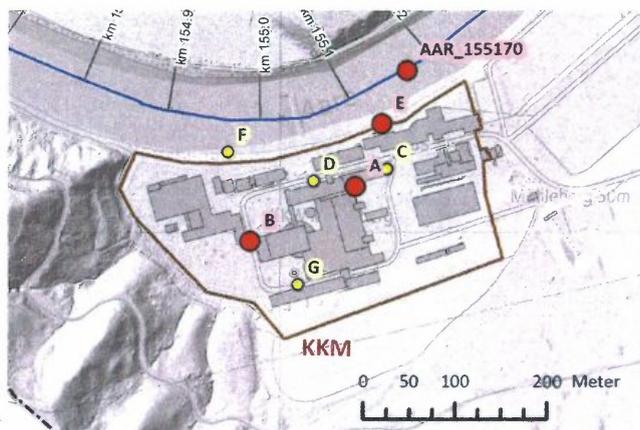


Abbildung 4: *Detailkarte vom Kernkraftwerk Mühleberg mit den Referenzpunkten (A, B, E), Szenarienpunkten (A, C, D, F, G) und dem Hilfspunkt in der Aare (AAR\_155170).*

## 4.2 Maximale hydraulische Belastungen im Beurteilungsperimeter

Die folgenden Karten zeigen die maximalen Fliesstiefen, Fließgeschwindigkeiten und Schubspannungen für die Szenarien 1 und 2 im Beurteilungsperimeter Mühleberg. 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.

Bei beiden Szenarien 1 und 2 werden im Gerinne abschnittsweise Fließgeschwindigkeiten  $> 2$  m/s berechnet (Abbildung 6 und Abbildung 9). Die Schubspannungen sind oberhalb des Zusammenflusses mit der Saane jedoch verhältnismässig gering, sie betragen  $< 50$  N/m<sup>2</sup>. Dies ist auf das flache Talgefälle sowie den Rückstau effekt der Saane zurückzuführen. Das Areal des KKM bleibt bei beiden Szenarien 1 und 2 mehrheitlich trocken. Die überfluteten Uferbereiche werden mit Schubspannungen  $< 50$  N/m<sup>2</sup> belastet (Abbildung 7 und Abbildung 10).

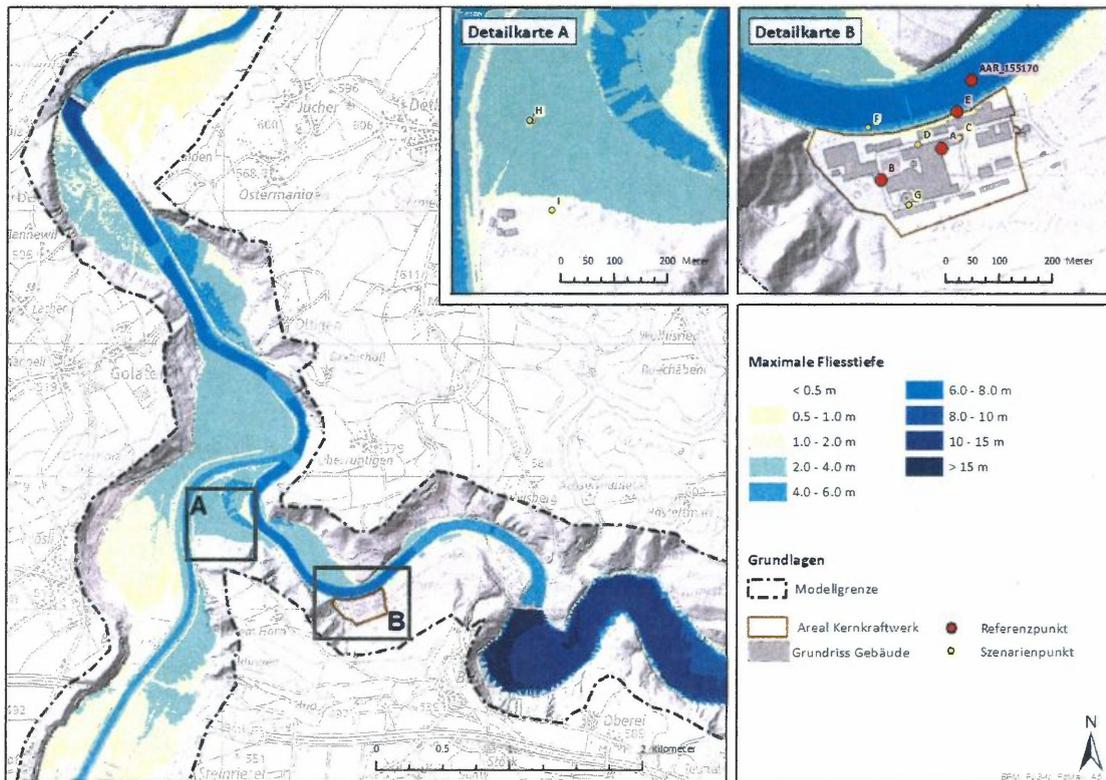


Abbildung 5: Maximale Fliesstiefen über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 1.

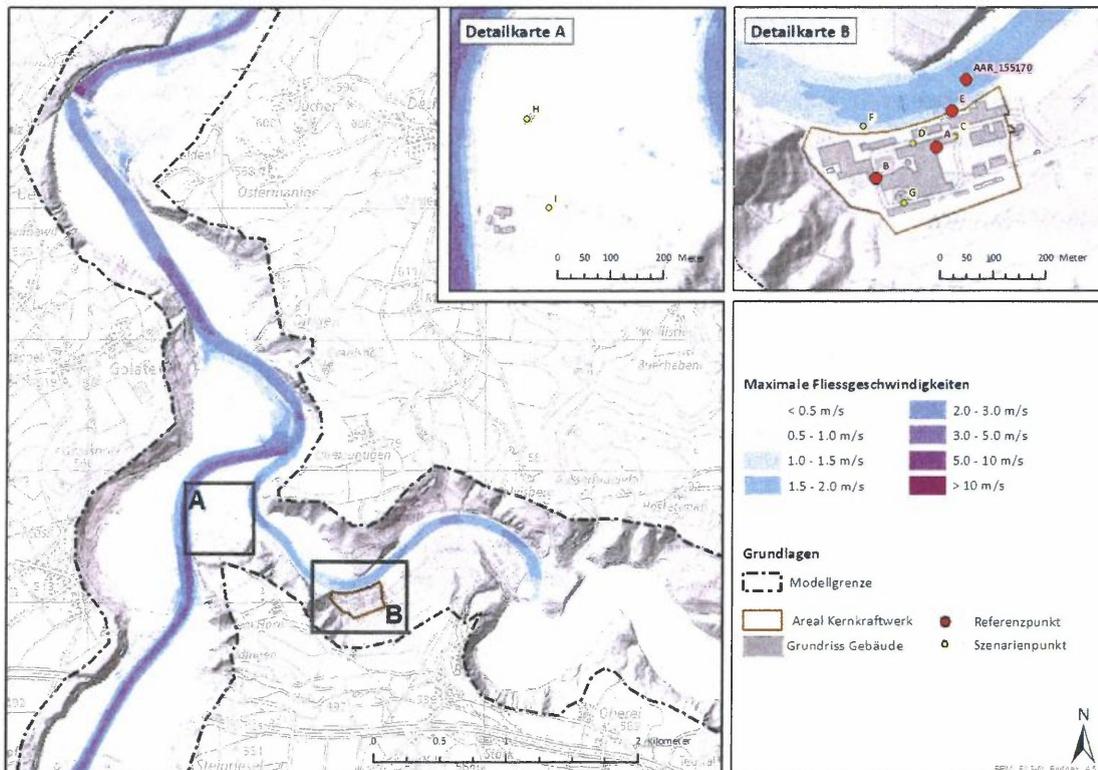


Abbildung 6: Maximale Fließgeschwindigkeiten über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 1.

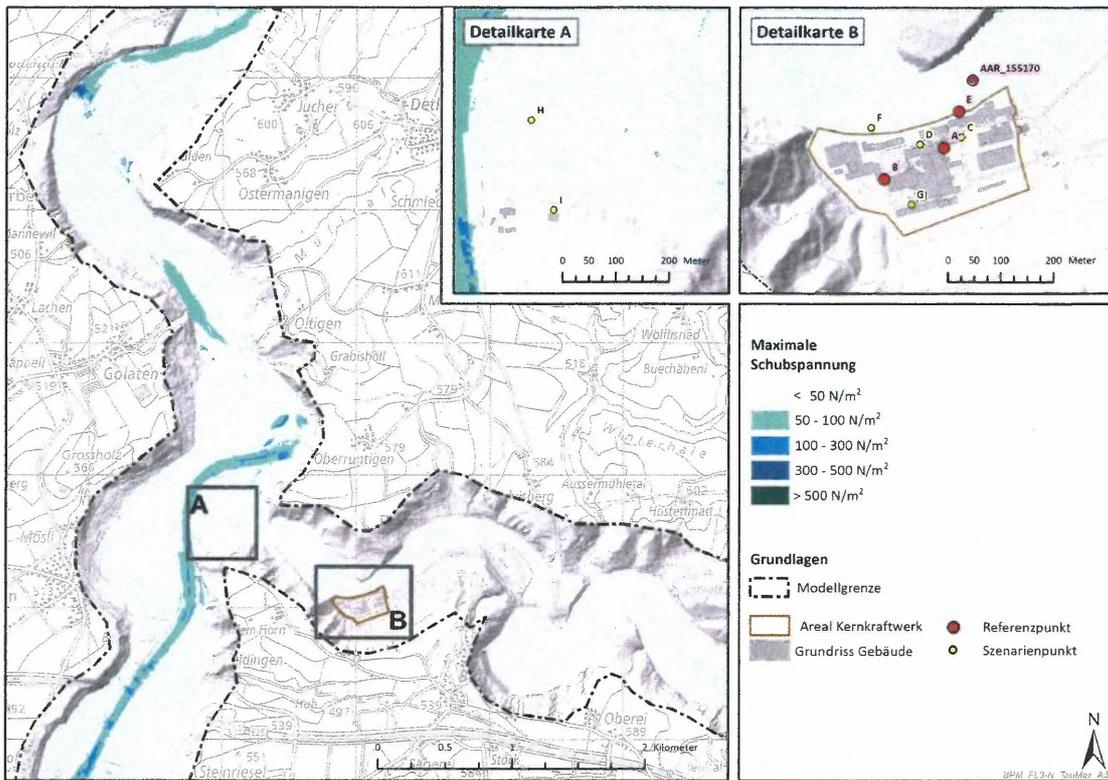


Abbildung 7: Maximale Schubspannungen über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 1.

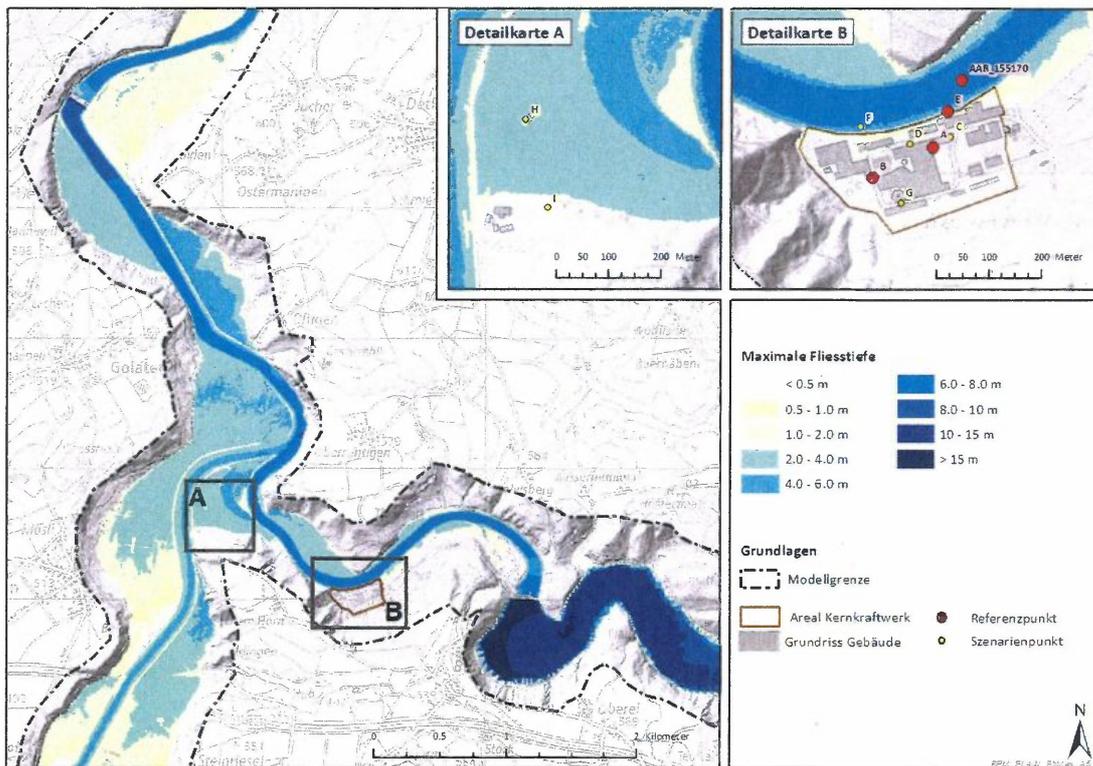


Abbildung 8: Maximale Fliesstiefen über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 2.

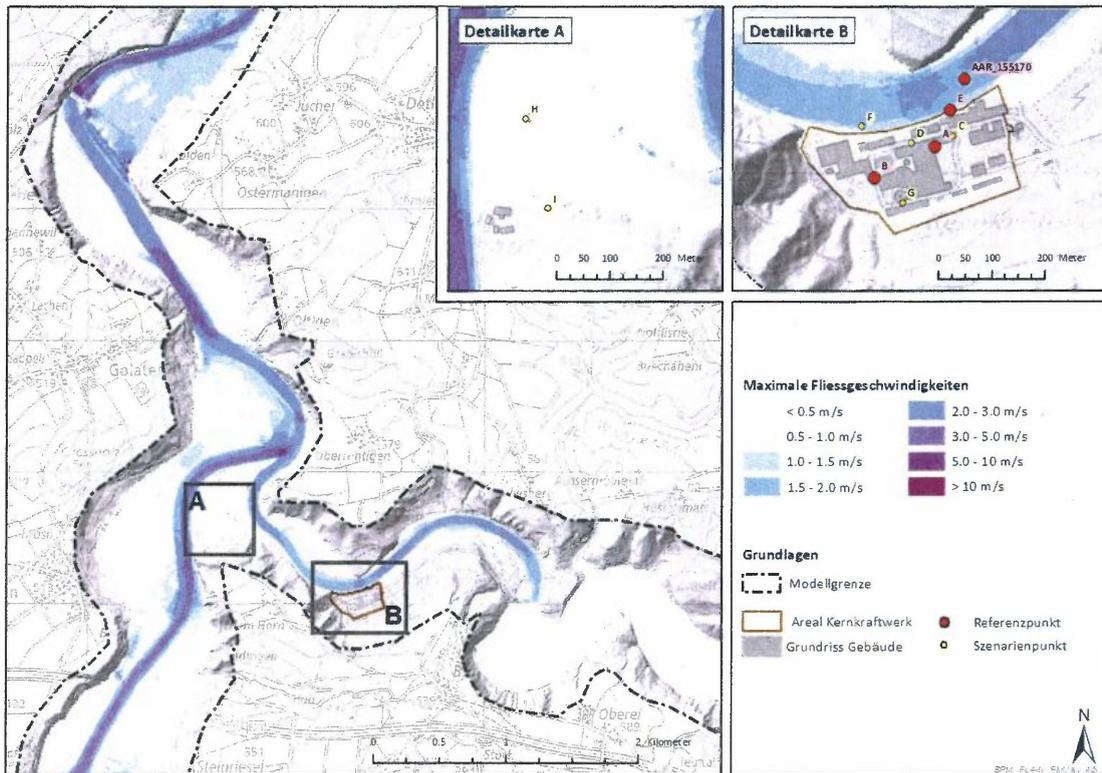


Abbildung 9: Maximale Fließgeschwindigkeiten über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 2.

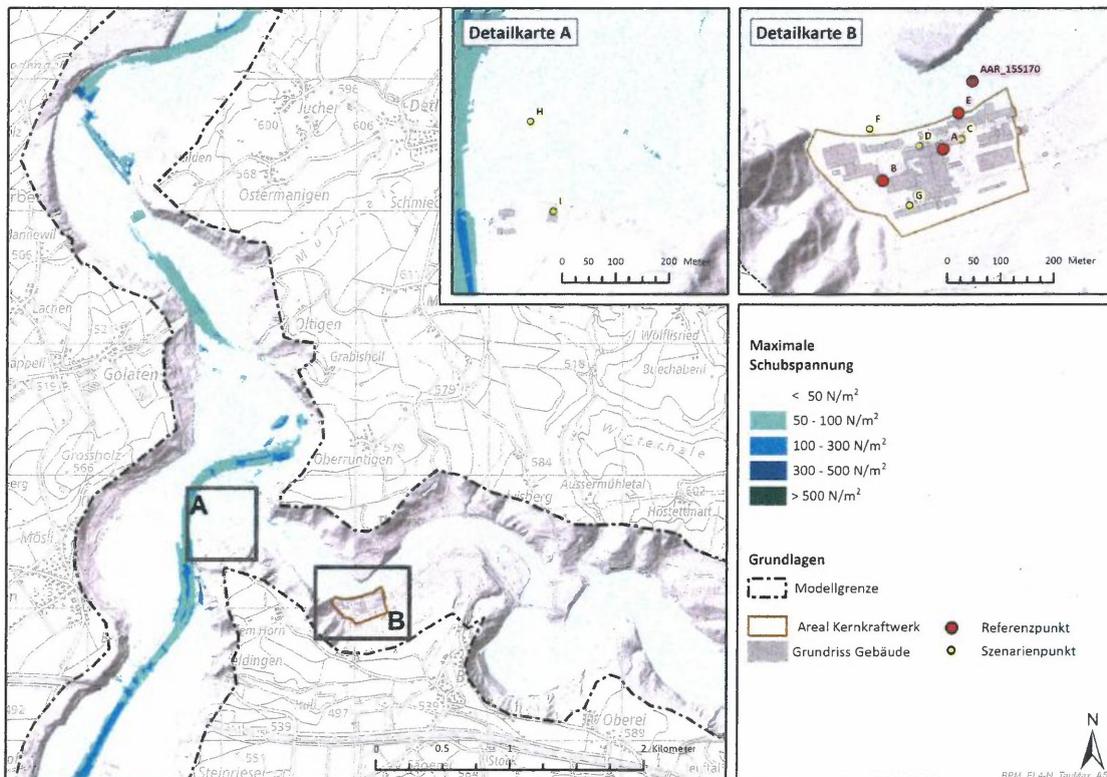


Abbildung 10: Maximale Schubspannungen über die gesamte Simulationsdauer für das Szenario 2.

### 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 1 und 2 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 Beurteilungsexperiment. 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 KKM am Aare-Querschnitt auf der Höhe des Punkts AAR\_155170 weist für beide Szenarien einen ähnlichen Verlauf auf. Die Ganglinie ist dadurch charakterisiert, dass bei den beiden Hochwasserszenarien ein starker und schneller Anstieg des Abflusses über ca. 20 Stunden stattfindet (Abbildung 11 und Abbildung 12). Danach bleibt der Abfluss während mehreren Tagen im Bereich des Spitzenabflusses und sinkt nur langsam wieder auf die normalen Niedrigwasserabflüsse ab. **Hinweis:** Die anfänglichen Schwankungen der Parameter liegt in der Anfangsbedingung der hydraulischen Simulation. Dargestellt ist die simulierte Zeitdauer.

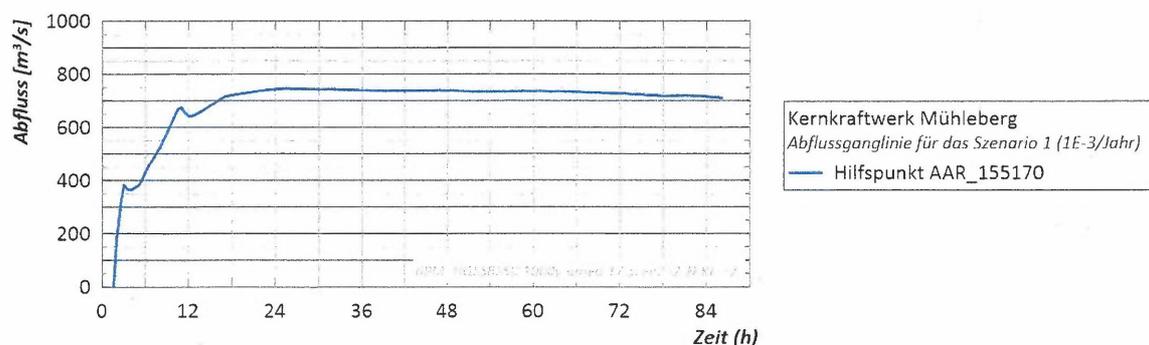


Abbildung 11: Abflussganglinie<sup>4</sup> beim Aare-Querschnitt auf der Höhe des Punkts AAR\_155170 für das Szenario 1.

<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.

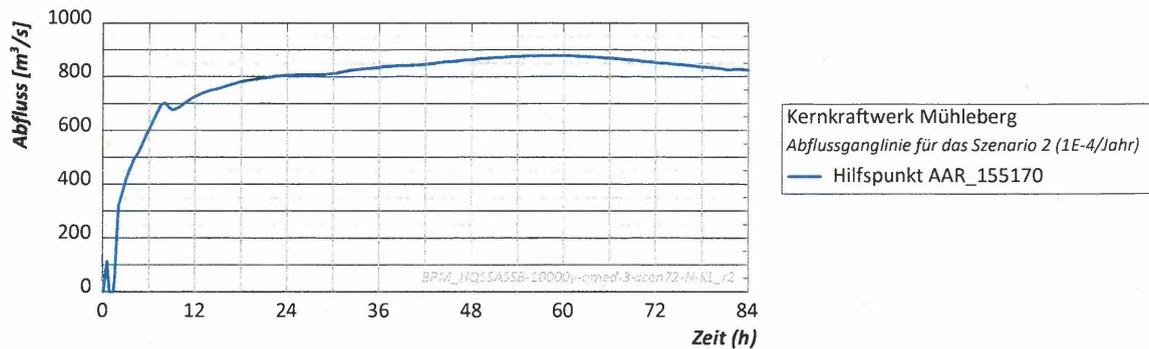


Abbildung 12: Abflussganglinie beim Aare-Querschnitt auf der Höhe des Punkts AAR\_155170 für das Szenario 2. Die Fussnote 4 (bei Abbildung 11) gilt auch für diese Darstellung des Abflusses.

#### 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 1) und 1E-4/Jahr (Szenario 2) für sämtliche benetzten Punkte im Beurteilungssperimeter Mühleberg abgebildet.

Die Zeitreihen der hydraulischen Parameter zeigen dabei für beide der gewählten Szenarien einen ähnlichen Verlauf auf, wobei die Werte für das Szenario 2 leicht über den Werten des Szenario 1 zu liegen kommen. Die Fliessgeschwindigkeiten an den Referenz- und Szenarienpunkten ausserhalb des Gerinnes liegen bei weniger als 1 m/s. In der Aare treten bei diesen beiden Szenarien Fliessgeschwindigkeiten von rund 1.5 - 2 m/s auf. Für die maximale Hochwassergefährdung durch die Wasserspiegellage (vgl. Kapitel 4.3.1) ist für das Szenario 1 der Zeitpunkt bei rund 24 h relevant und für das Szenario 2 der Zeitpunkt bei rund 60 Stunden. Für die Fliessgeschwindigkeit und die Schubspannung werden die maximalen Werte erst dann erreicht, wenn das Hochwasser aus der Saane wieder abklingend ist und dadurch der Rückstau in der Aare oberhalb der Mündung der Saane geringer wird. Die maximalen Belastungen für diese beiden Parameter treten im Zeitraum zwischen den Stunden 70 und 80 auf und bleiben anschliessend konstant (d.h. keine Zunahme der Belastung ausserhalb des berechneten Ausschnitts der hydrologischen Ganglinie). **Hinweis:** Die anfänglichen Schwankungen der Parameter liegt in der Anfangsbedingung der hydraulischen Simulation.

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

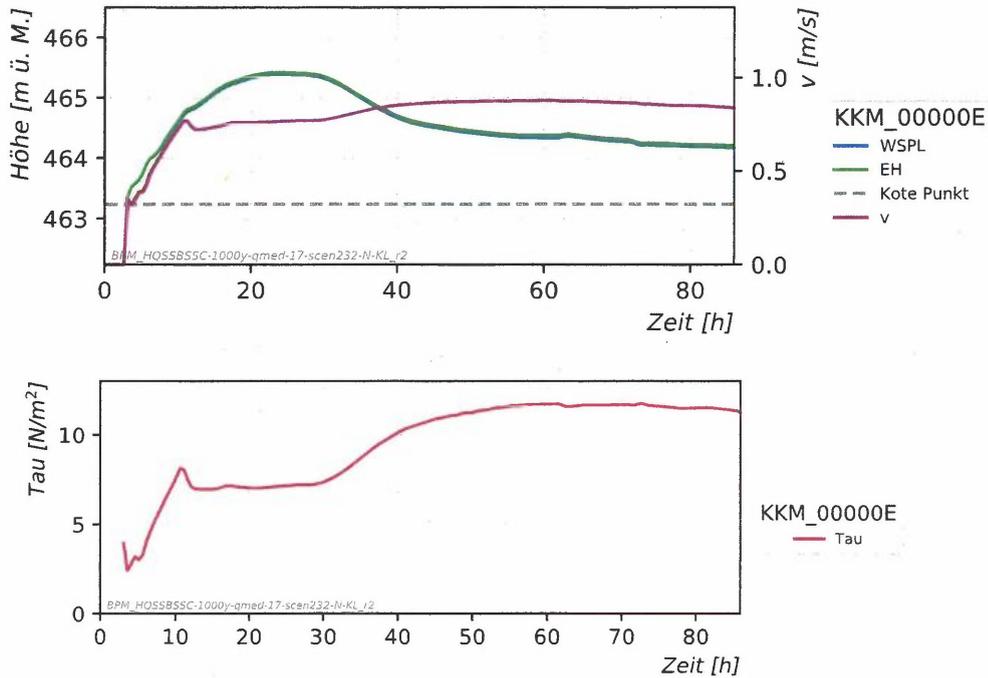


Abbildung 13: Verlauf der hydraulischen Parameter am Referenzpunkt E für das Szenario 1 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

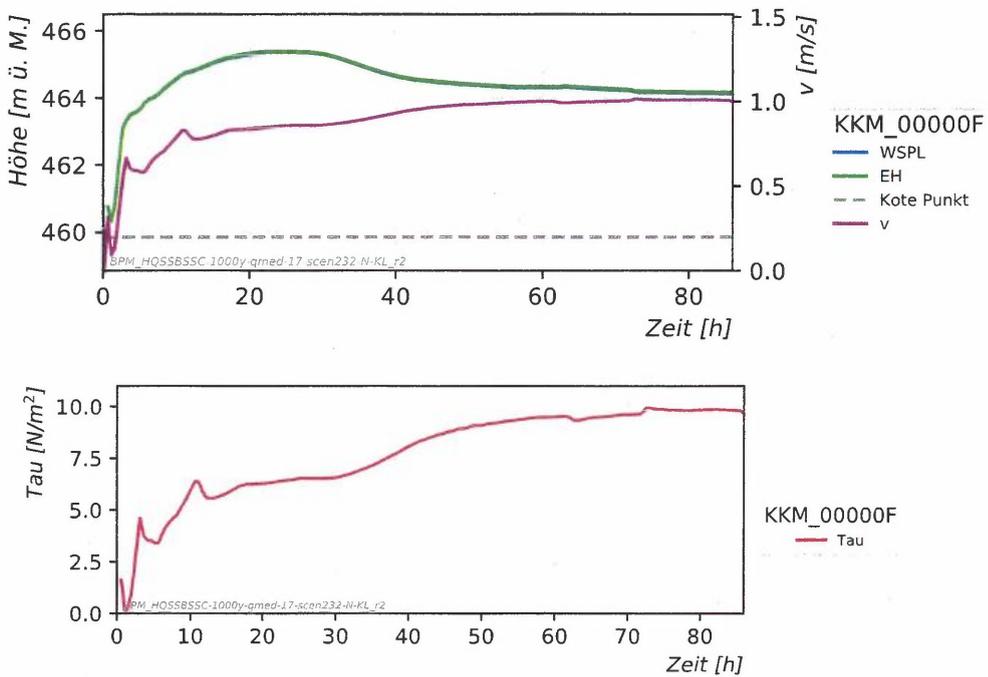
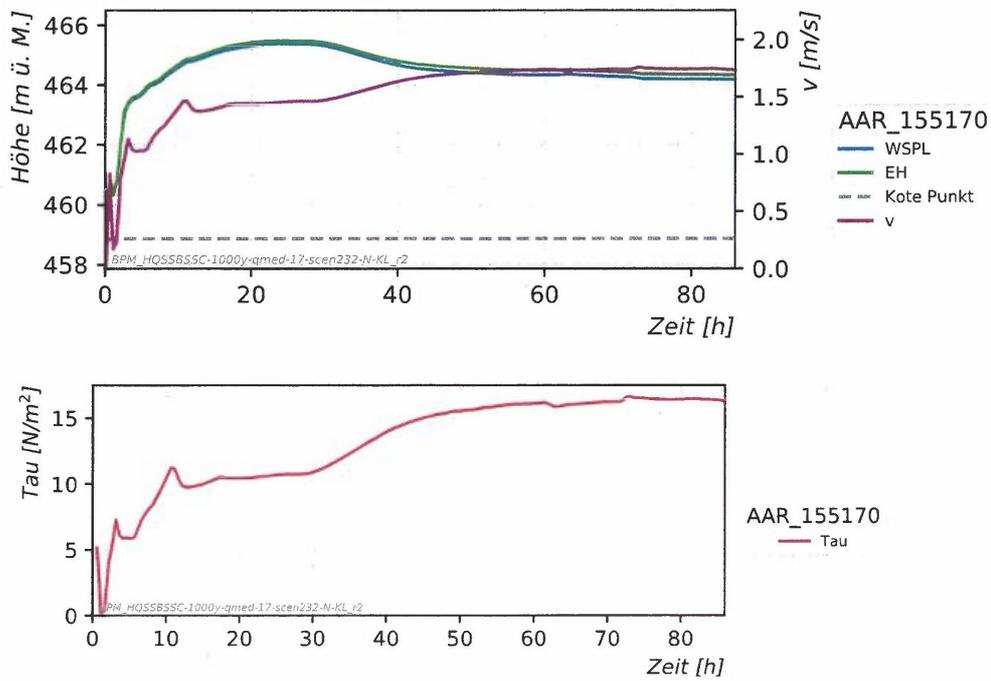


Abbildung 14: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenariopunkt F für das Szenario 1 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).



**Abbildung 15:** Verlauf der hydraulischen Parameter am Hilfspunkt AAR\_155170 für das Szenario 1 (1E-3/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

Ganglinien für das Szenario 2 (1E-4/Jahr)

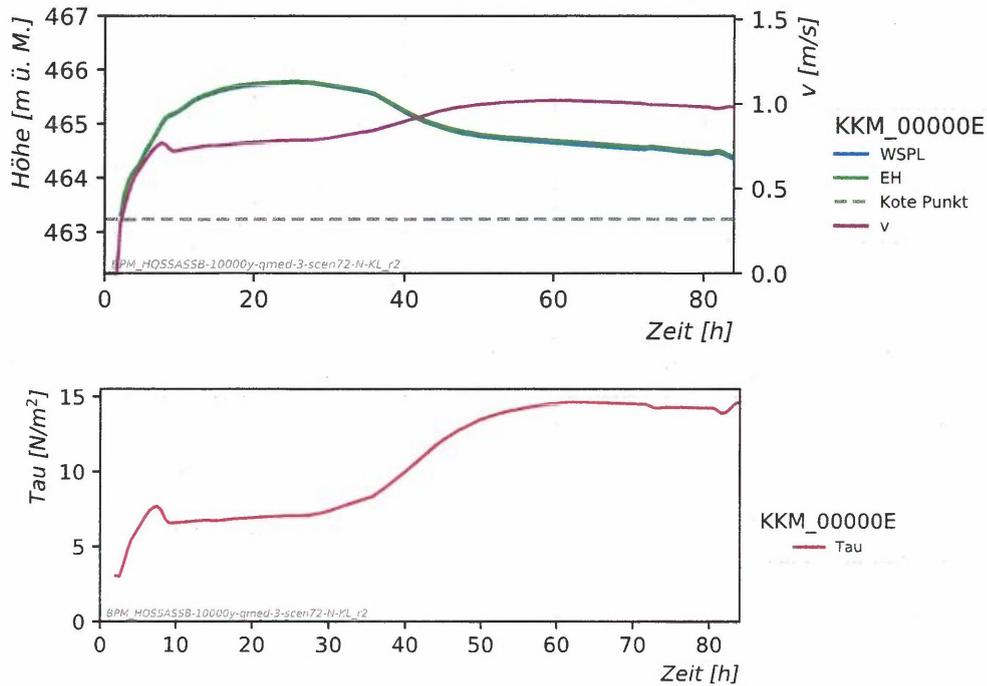


Abbildung 16: Verlauf der hydraulischen Parameter am Referenzpunkt E für das Szenario 2 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, beinahe identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

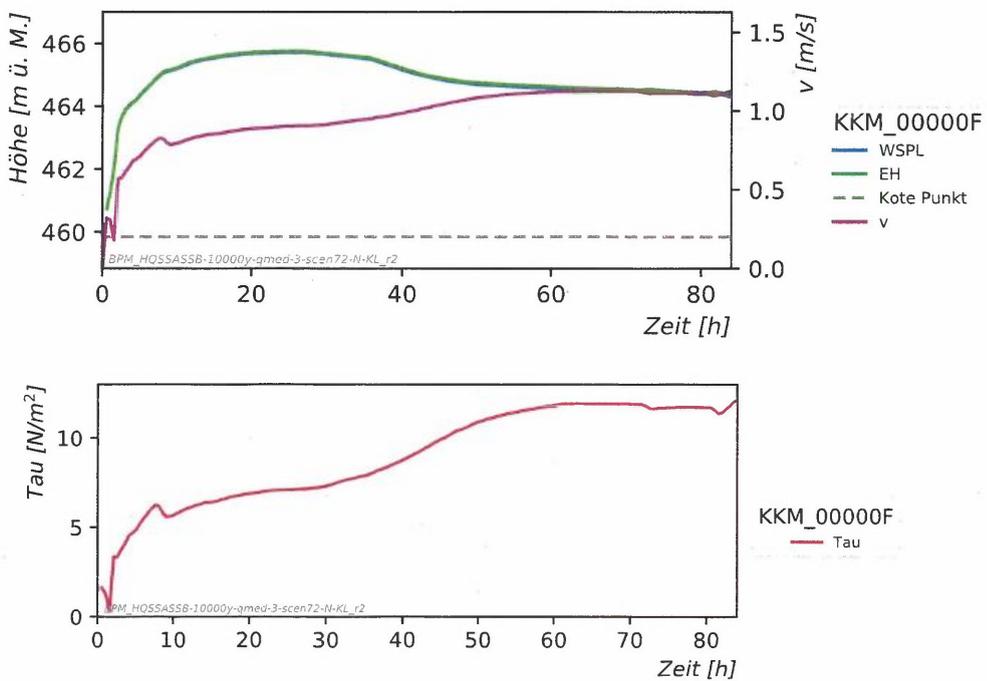


Abbildung 17: Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenariopunkt F für das Szenario 2 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

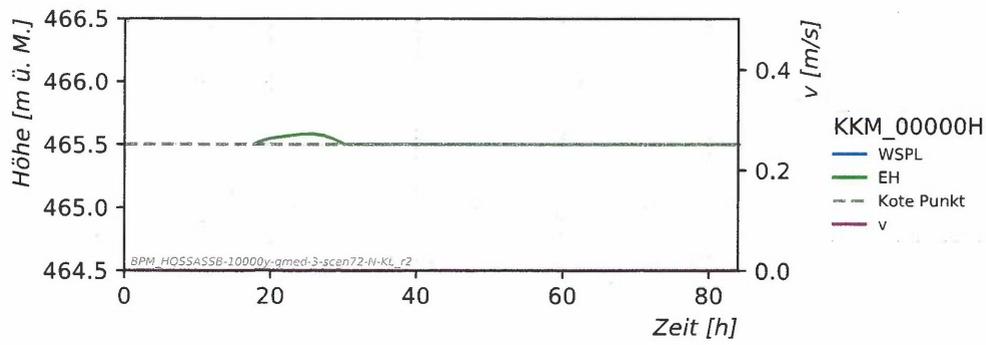


Abbildung 18. Verlauf der hydraulischen Parameter am Szenarienpunkt H für das Szenario 2 (1E-4/Jahr). Die Abbildung zeigt die Wasserspiegellage (WSPL, blau, identisch mit EH), Energiehöhe (EH, grün) und die Geschwindigkeit (v, violett). Dieser Punkt wird zwar benetzt, die Schubspannung ist aber wegen der sehr geringe Fliesstiefe und -geschwindigkeit vernachlässigbar klein.

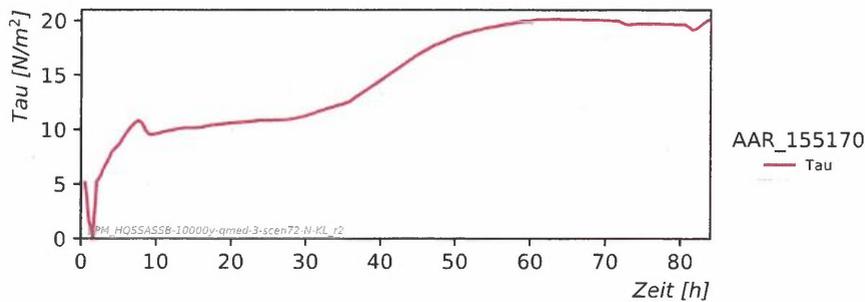
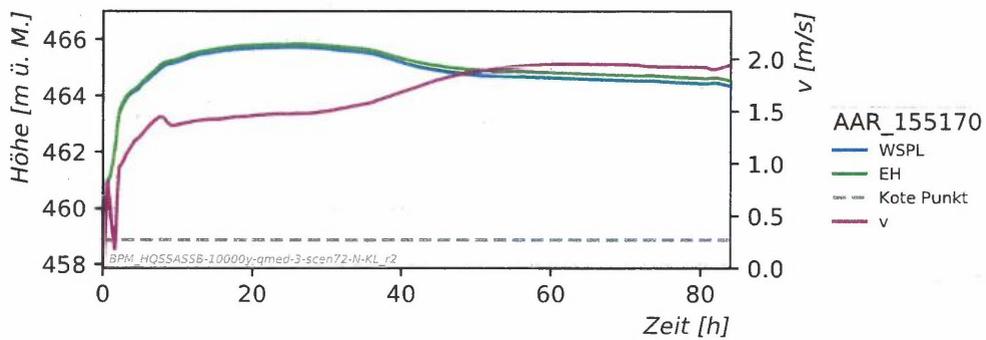


Abbildung 19: Verlauf der hydraulischen Parameter am Hilfspunkt AAR\_155170 für das Szenario 2 (1E-4/Jahr). Oben: Wasserspiegellage (WSPL, blau), Energiehöhe (EH, grün), Geschwindigkeit (v, violett). Unten: Schubspannung (Tau, purpur).

#### **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:

- 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 Informationen aus der hydrologischen Zeitreihe für den Beurteilungssperimeter Mühleberg**

Der Beurteilungssperimeter Mühleberg (BPM) liegt direkt an der Aare oberhalb der Mündung der Saane. Bei den Hochwasserereignissen der Größenordnung 1E-3/Jahr und 1E-4/Jahr wird die hydraulische Gefährdung für den BPM durch die Hochwasserwelle der Saane beeinflusst, da das Wasser aus der Saane in der Aare einen Rückstau verursacht.

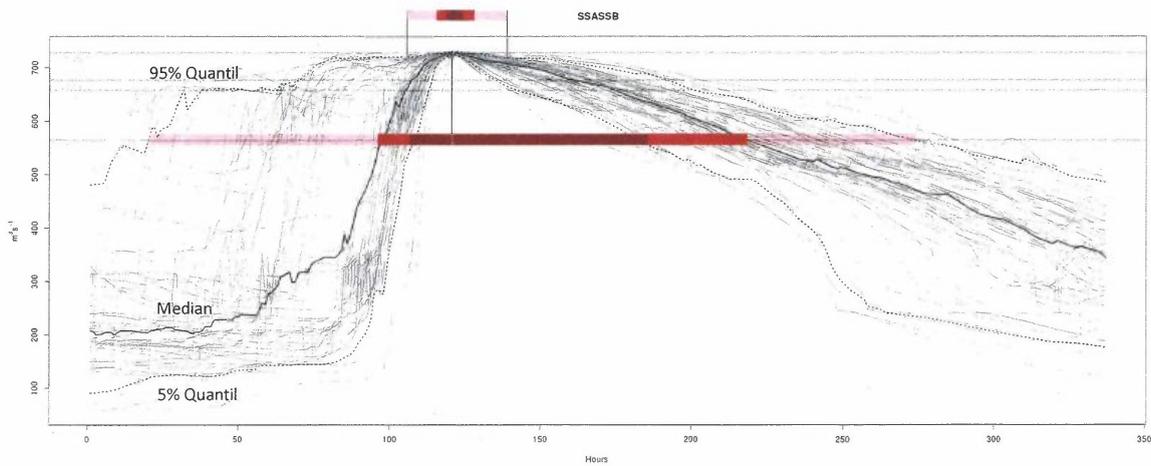
Für eine Beschreibung der zeitlichen Angaben der Hochwasserereignisse muss deshalb einerseits der Transferpunkt Halen (oberhalb des BPM an der Aare) aber auch der Transferpunkt Golaten (direkt unterhalb der Saane-Mündung in der Aare) betrachtet werden.

Als erster Schritt zur Bestimmung der Hochwasserdauer wurde die mögliche Streuung der Hochwasserereignisse aus der Langzeitsimulation der Hydrologie (289'000 Jahre) ermittelt. Dafür wurden für den 1'000- und 10'000-jährlichen Spitzenabfluss je 50 Ereignisse ausgewählt, die diesen Spitzenabfluss sehr genau erreichen. Unter diesen 50 Ereignissen liegt jeweils auch das ausgewählte Initialereignis für die Gefährdungsbeurteilung (das sog. FL3- und FL4-Ereignis).

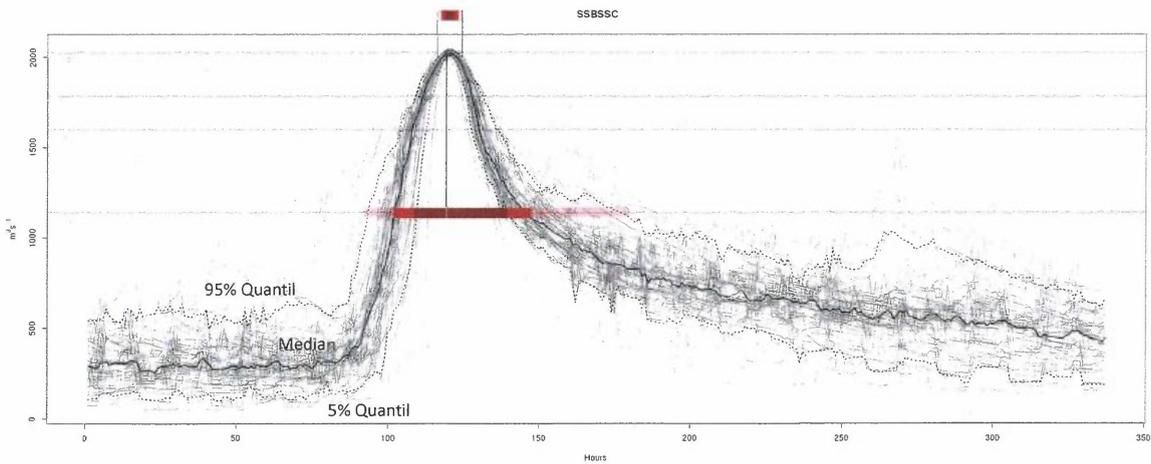
Aus den 50 Ereignissen kann ein 5%-Quantil, ein Median und ein 95% Quantil der Ganglinienschar gebildet werden (die schwarz ausgezogene Linie beschreibt den Median, die schwarz gepunkteten Linien jeweils den 5%- resp. 95%-Quantilwert). Für die folgenden Analysen wird davon ausgegangen, dass der Median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

In den folgenden Grafiken (Abbildung 20 bis Abbildung 23) 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.

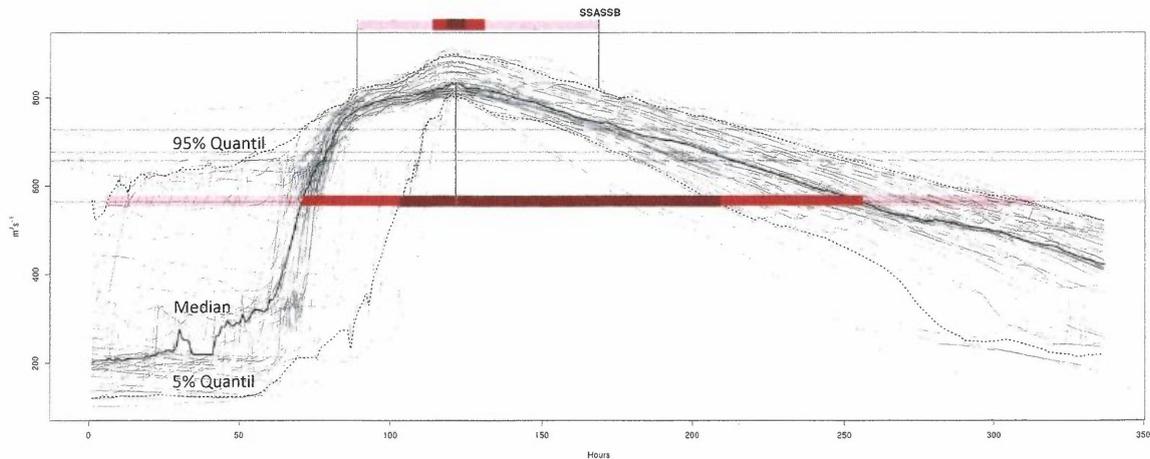
Für die Auswertung der Dauer des Spitzenabflusses wurde nach dem gleichen Prinzip der Zeitraum beurteilt, in welchem sich der Abfluss der Ganglinienschar im Bereich des Grenzwerts des 1'000- resp. 10'000-jährlichen Spitzenabflusses bewegt. Die Dauer, in welcher der Abfluss im Bereich des Spitzenabflusses liegt, wurde - sofern sie eine relevante Grösse erreicht (> 5h) von der Anstiegszeit und der abfallenden Zeit subtrahiert.



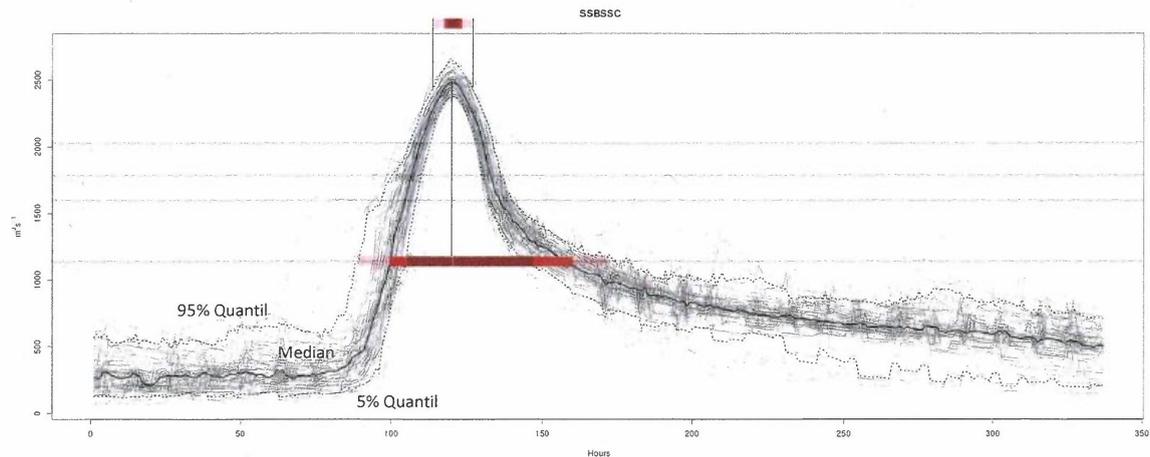
**Abbildung 20:** Auswahl von 50 Ereignissen am Transferpunkt Halen, deren Spitzenabflüsse die grösste Ähnlichkeit mit der statistischen Wiederkehrperiode von 1'000 Jahren haben (Häufigkeit in der Grössenordnung von 1E-3/Jahr). Die schwarz gepunkteten Linien stellen das 5% und 95% Quantil der Ganglinienschar dar.



**Abbildung 21:** Auswahl von 50 Ereignissen am Transferpunkt Golaten, 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 gepunkteten Linien stellen das 5% und 95% Quantil der Ganglinienschar dar. Die Oszillationen der Ganglinie ab ca. 175 Stunden stammen aus dem oberhalb liegenden Kraftwerksbetrieb der Stauanlage Schiffenen, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde.



**Abbildung 22:** Auswahl von 50 Ereignissen am Transferpunkt Halen, deren Spitzenabflüsse die grösste Ähnlichkeit mit der statistischen Wiederkehrperiode von 10'000 Jahren haben (Häufigkeit in der Grössenordnung von 1E-4/Jahr). Die schwarze Linie entspricht dem Median der 50 Ereignissen. Die schwarz gepunkteten Linien stellen das 5% und das 95% Quantil der Ganglinienschar dar.



**Abbildung 23:** Auswahl von 50 Ereignissen am Transferpunkt Golaten, deren Spitzenabflüsse die grösste Ähnlichkeit mit der statistischen Wiederkehrperiode von 10'000 Jahren haben (Häufigkeit in der Grössenordnung von 1E-43/Jahr). Die schwarz gepunkteten Linien stellen das 5% und das 95% Quantil der Ganglinienschar dar. Die Oszillationen der Ganglinie ab ca. 175 Stunden stammen aus dem oberhalb liegenden Kraftwerksbetrieb der Stauanlage Schiffenen, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde.

Aus den Angaben der Zeitspannen in der Abbildung 20 bis Abbildung 23 können allgemeine Angaben zu den erwarteten Zeitspannen für die Ereignisse FL3 (Tabelle 3) und FL4 (Tabelle 4) gemacht werden.

**Tabelle 3:** Zusammenstellung der zu erwartenden Zeitspannen des Hochwasserereignisses FL3 an den Transferpunkten Halen und Golaten.

		5% Quantil	Mittelwert	95% Quantil
1E-3/Jahr Transferpunkt Halen	Anstiegszeit Normalabfluss bis Spitzenabfluss	10 - 15 h	<b>15 - 20 h</b>	ca. 85 h
	Dauer des Spitzenabflusses	ca. 6 h	<b>10 - 15 h</b>	30 - 35 h
	Abfallende Zeit Spitzenabfluss bis Normalabfluss	60 - 70 h	<b>85 - 95 h</b>	ca. 130 h
1E-3/Jahr Transferpunkt Golaten	Anstiegszeit Normalabfluss bis Spitzenabfluss	10 h	<b>15 - 20 h</b>	15 - 25 h
	Dauer des Spitzenabflusses	ca. 3 h	<b>ca. 6 h</b>	ca. 8 h
	Abfallende Zeit Spitzenabfluss bis Normalabfluss	20 h	<b>20 - 25 h</b>	55 h

**Tabelle 4:** Zusammenstellung der zu erwartenden Zeitspannen des Hochwasserereignisses FL4 an den Transferpunkten Halen und Golaten.

		5% Quantil	Mittelwert	95% Quantil
1E-4/Jahr Transferpunkt Halen	Anstiegszeit Normalabfluss bis Spitzenabfluss	20 - 30 h	<b>45 - 55 h</b>	ca. 90 h
	Dauer des Spitzenabflusses	ca. 6 h	<b>ca. 15 - 20 h</b>	ca. 70 - 80 h
	Abfallende Zeit Spitzenabfluss bis Normalabfluss	75 - 85 h	<b>120 - 130 h</b>	140 - 160 h
1E-4/Jahr Transferpunkt Golaten	Anstiegszeit Normalabfluss bis Spitzenabfluss	10 - 20 h	<b>20 - 25 h</b>	25 - 35 h
	Dauer des Spitzenabflusses	ca. 4 h	<b>ca. 6 h</b>	ca. 10 - 15 h
	Abfallende Zeit Spitzenabfluss bis Normalabfluss	25 - 30 h	<b>35 - 40 h</b>	45 - 50 h

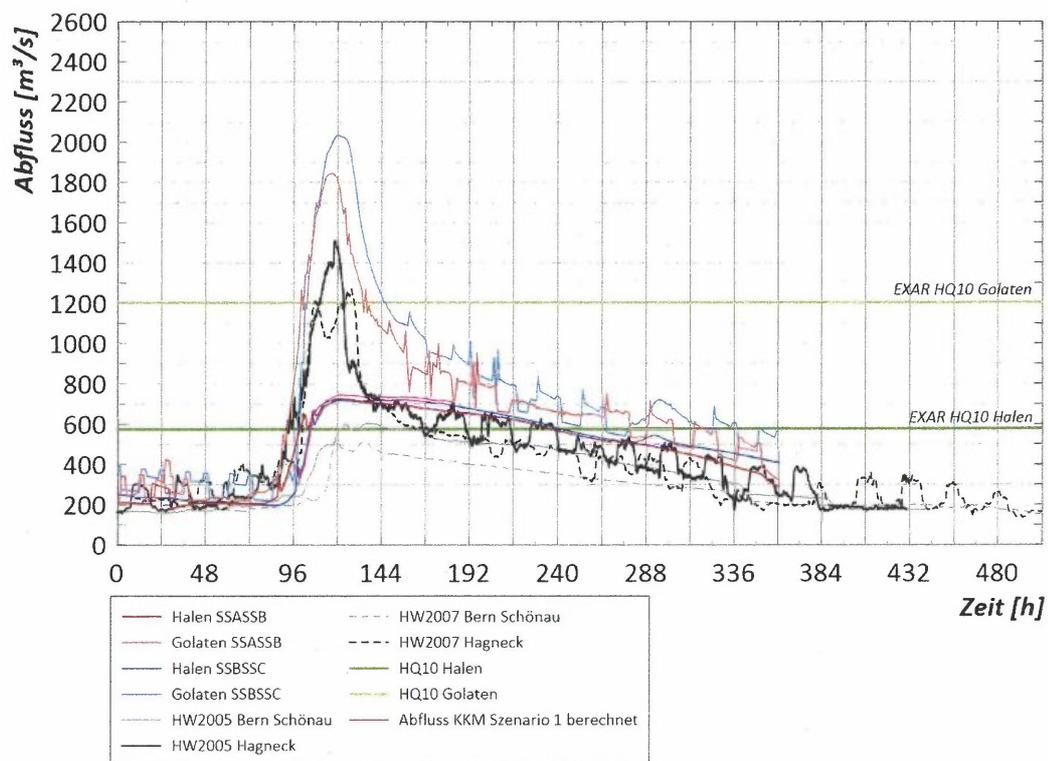
Die Auswertung der Zeitspannen zwischen den Quantilen für den Transferpunkt SSASSB (Halen) zeigt, dass eine grosse Variabilität der Ereignisdauer vorhanden ist. Die Variabilität ist für den Transferpunkt SSBSSC (Golaten) weniger stark ausgeprägt - die Ganglinien haben einen ähnlichen Verlauf, welcher durch die Ganglinie aus der Saane dominiert wird.

#### **4.4.2 Informationen aus den spezifischen Szenarien für den Beurteilungsperimeter Mühleberg**

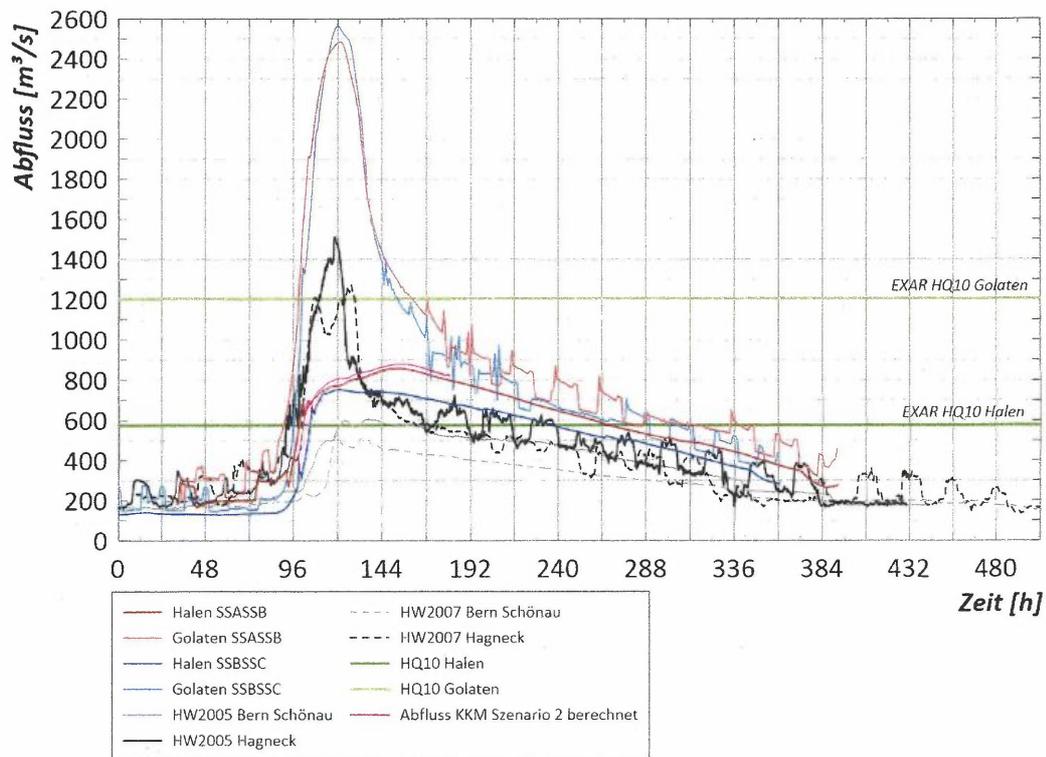
Die spezifischen Szenarien wurden im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung so gewählt, dass die Ganglinie am Transferpunkt möglichst dem Median bzw. dem Mittelwert der Ganglinienschar (Abbildung 20 bis Abbildung 23) entspricht. Da die EXAR-Studie die Hochwassergefährdung vor allem aufgrund der Maximalwerte in den Beurteilungsperimetern untersuchte, wurde die Ganglinie beim KKM auf den Bereich des Spitzenabflusses zugeschnitten (von Stunde 96 bis Stunde 180).

Nachfolgend werden die Ganglinien der spezifischen Ereignisse dargestellt und mit dem berechneten Abfluss im Bereich des KKM verglichen. Wenn der Abfluss beim KKM einen ähnlichen Verlauf aufweist wie die Ganglinie am ober- oder unterhalb liegenden Transferpunkt, kann die statistische Auswertung der An- und Abfallzeiten aus dem vorherigen Kapitel 4.4.1 für den KKM-Standort übernommen werden.

Der nachfolgende Vergleich der Ganglinien (Abbildung 24 und Abbildung 25) zeigt, dass der berechnete Abfluss im Bereich des KKM (pinke Linie) grösstenteils sehr ähnliche Werte aufweist wie der Abfluss am oberhalb liegenden Transferpunkt Halen. Die Zeitspannen, welche am Transferpunkt Halen auftreten, können deshalb für den Standort des KKM übernommen werden. Die Abflüsse der Saane spielen für den Abfluss in Mühleberg keine Rolle.



**Abbildung 24:** Vergleich der berechneten Abflussganglinien des Szenarios 1 (1E-3/Jahr) im Bereich des Areal des KKM (pinke Linie) mit den Hochwasserganglinien des Initialereignisses FL3. Aufgrund der Mündung der Saane in der Nähe des KKM-Areal werden die Ganglinien sowohl oberhalb der Mündung (Transferpunkt Halen) als auch nach der Mündung (Transferpunkt Golaten) mit der Abflussganglinie beim Areal des KKM verglichen. Das Initialereignis FL3, ausgewählt am Transferpunkt Halen, wird sowohl für Halen selbst (dunkelrot) als auch als resultierende Ganglinie in Golaten (hellrote Linie) dargestellt. Umgekehrt zeigt das gewählte Initialereignis FL3 in Golaten (hellblaue Linie) eine dazugehörige Abflussganglinie in Halen auf (dunkelblaue Linie), die sehr ähnlich ist wie die dunkelrote Ganglinie. Die Hydrologie des Standorts Halen ist somit mit beiden Initialereignissen konsistent und kann für den zeitlichen Vergleich am Standort Mühleberg übernommen werden. Der Schwellenwert für den Normalzustand (HQ10) wird sowohl für Halen als auch für Golaten dargestellt. Für den zeitlichen Vergleich ist der Schwellenwert in Halen massgebend. Zusätzlich sind als Vergleiche die gemessenen Hochwasserganglinien 2005 (durchgezogene Linien) und 2007 (gestrichelte Linien) der Messstationen Bern, Schönau (in grau) und Hagneck (in schwarz) dargestellt. Die Oszillationen der Ganglinie ab ca. 150 Stunden stammen aus dem oberhalb liegenden Kraftwerksbetrieb der Stauanlage Schiffenen, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde.



**Abbildung 25:** Vergleich der berechneten Abflussganglinien des Szenarios 2 (1E-4/Jahr) im Bereich des Areal des KKM (pinke Linie) mit den Hochwasserganglinien des Initialereignisses FL4. Aufgrund der Mündung der Saane in der Nähe des KKM-Areal werden die Ganglinien sowohl oberhalb der Mündung (Transferpunkt Halen) als auch nach der Mündung (Transferpunkt Golaten) mit der Abflussganglinie beim Areal des KKM verglichen. Das Initialereignis FL4, ausgewählt am Transferpunkt Halen, wird sowohl für Halen selbst (dunkelrot) als auch als resultierende Ganglinie in Golaten (hellrote Linie) dargestellt. Umgekehrt zeigt das gewählte Initialereignis FL4 in Golaten (hellblaue Linie) eine dazugehörige Abflussganglinie in Halen auf (dunkelblaue Linie), die sehr ähnlich ist wie die dunkelrote Ganglinie. Die Hydrologie des Standorts Halen ist somit mit beiden Initialereignissen konsistent und kann für den zeitlichen Vergleich am Standort Mühleberg übernommen werden. Der Schwellenwert für den Normalzustand (HQ10) wird sowohl für Halen als auch für Golaten dargestellt. Für den zeitlichen Vergleich ist der Schwellenwert in Halen massgebend. Zusätzlich sind als Vergleiche die gemessenen Hochwasserganglinien 2005 (durchgezogene Linien) und 2007 (gestrichelte Linien) der Messstationen Bern, Schönau (in grau) und Hagneck (in schwarz) dargestellt. Die Oszillationen der Ganglinie ab ca. 150 Stunden stammen aus dem oberhalb liegenden Kraftwerksbetrieb der Stauanlage Schiffenen, dessen Hochwasserbetrieb mit diskretisierten und Schwellenwert-basierten Regelungen im hydrologisch-hydraulischen Routing-System Modell RS Minerve vereinfacht berücksichtigt wurde.

Die Zeitspannen der Anstiegszeit und der abfallenden Zeit für die berechneten, spezifischen Szenarien 1 und 2 sind in Tabelle 5 dargestellt. Die erhaltenen Werte können gut in die möglichen Zeitspannen der Median-, resp. Mittelwert-Ganglinie aus Kapitel 4.4.1 eingeordnet werden. Bei der Dauer des Spitzenabflusses und bei der Dauer bis zum Abklingen des Hochwassers gibt es zu den Median- resp. Mittelwertganglinien kleinere Abweichungen im Bereich von 5 - 10 Stunden. Dies liegt daran, dass für die Berechnungen eine spezifische Ganglinie aus der Ganglinienschar ausgewählt wurde, welche die Median- resp. Mittelwertganglinie am besten repräsentiert. Die gewählte Ganglinie ist keine exakte Abbildung der Median- resp. Mittelwertganglinie und im Vergleich zur hydrologischen Ganglinie in Halen leicht höher. Die längere Dauer ist auf die Retentionswirkung des Wohlensees zurückzuführen, welcher zwischen dem Transferpunkt Halen und dem Beurteilungsperimeter Mühleberg liegt.

**Tabelle 5:** *Zusammenstellung der zu erwartenden Zeitspannen der spezifisch ausgewählten Szenarien 1 (1E-3/Jahr) und 2 (1E-4/Jahr) am Transferpunkt Halen. Die Angaben sind für den Standort KKM übertragbar. Die Ganglinien zeigen die Initialereignisse FL3 und FL4, welche gemäss der Beschreibung in Kapitel 3 als Mittelwert der Ganglinien in der jeweiligen Grössenordnung der Wiederkehrperioden angewendet werden können.*

		Szenario 1 (1E-3/Jahr)	Szenario 2 (1E-4/Jahr)
Transferpunkt Halen	Anstiegszeit Normalabfluss bis Spitzenabfluss	15 - 20 h	45 - 50 h
	Dauer des Spitzenabflusses	20 - 30 h	15 - 20 h
	Abfallende Zeit Spitzenabfluss bis Normalabfluss	ca. 100 h	ca. 100 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, Flussbau AG, Zürich.