



# ARBEITSBERICHT NAB 24-36

Hydrologische Verhältnisse am Standort  
der Brennelementverpackungsanlage

September 2024





# ARBEITSBERICHT

## NAB 24-36

Hydrologische Verhältnisse am Standort  
der Brennelementverpackungsanlage

September 2024

### **STICHWÖRTER**

Brennelementverpackungsanlage, BEVA, standortspezifische  
Gefährdungsanalyse, externe Überflutung, Hochwasser, Starkregen,  
Starkniederschlag, Oberflächenabfluss

**Nagra | Nationale Genossenschaft  
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**  
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz  
+41 56 437 11 11 | [info@nagra.ch](mailto:info@nagra.ch) | [nagra.ch](http://nagra.ch)

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Aktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen.

Copyright © 2024 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten. Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw.

## Zusammenfassung

Im Zuge des Rahmenbewilligungsgesuchs für die Brennelementverpackungsanlage (BEVA) am Standort Zwiilag (Würenlingen, Kt. AG) ist gemäss Kernenergieverordnung (KEV) als Teil der Gesuchsunterlagen ein Sicherheitsbericht einzureichen, in welchem nach Art. 23 KEV Angaben zu den Standorteigenschaften anzugeben sind. Dies betrifft unter anderem die standortspezifischen externen Gefährdungen, wozu gemäss Richtlinie A05 des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats auch die hydrologische Gefährdung in Form externer Überflutung zählt, die in einer Analyse zu erfassen und zu bewerten ist.

Zur Charakterisierung des Standortes in Bezug auf das Potenzial einer externen Überflutung werden die standortspezifischen Verhältnisse sowohl quantitativ (z.B. Ermittlung von Niederschlags- und Hochwasserextremwerten) als auch qualitativ (durch Plausibilisierung anhand historischer Ereignisse) beschrieben und ausgewertet. Basis der quantitativen Ermittlungen gefährdender Ereignisse ist eine Wiederkehrperiode von 10'000 Jahren. Ein konservativer Trend infolge Klimawandel wird berücksichtigt. Folgende Gefährdungen werden in diesem Bericht behandelt:

- Überflutung der Anlage durch Oberflächenabfluss aus dem umgebenden Einzugsgebiet, ausgelöst durch lokale Starkniederschläge
- Überflutung der Anlage infolge Ausuferung der Aare, ausgelöst durch grossräumige Starkniederschläge und/oder durch ein Versagen relevanter wasserbaulicher Einrichtungen in der Aare ober- oder unterhalb des Anlagestandorts
- Gravitative Gefahren, induziert durch Starkniederschläge oder als Folge extremer Abflüsse in anliegenden Flussgerinnen

Der Standort der BEVA – charakterisiert durch bestehende Kernanlagen vor Ort und in unmittelbarer Umgebung – ist seit Jahrzehnten Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen auch im Rahmen hydrologischer Gefährdungen und gilt damit als gut erfasst, untersucht und bewertet. Bei der Ermittlung der Gefährdung kann und wird daher auf bestehende Daten, Analysen und Auswertungen zurückgegriffen (beispielsweise Extremhochwasser in der Aare, Ufererosion) und durch eigene Analysen und Modellierungen (beispielsweise Oberflächenabfluss) ergänzt.

Starkniederschlagsereignisse führen zu keiner Gefährdung der Anlage. Ein möglicher Oberflächenabfluss aus der Umgebung fliesst topografisch bedingt nicht in bedeutenden Mengen zum Standort. Aufgrund der (streckenweise) erhöht liegenden Bahnlinie und der Döttingerstrasse wird der oberflächliche Abfluss aus dem oberen Einzugsgebiet auf der östlichen Ebene von Würenlingen zurückgehalten und erreicht somit den Standort nicht. Im flachen Unterwald bildet sich kaum oberflächlicher Abfluss, weil das Niederschlagswasser überwiegend versickert oder sich in Mulden akkumuliert, die bei Überlaufen nordwärts entwässern. Ausuferungen des Würenlinger Dorfbachs im Unterlauf westlich der Bahnlinie, auch infolge Verklausung der Durchlässe, gelangt ebenfalls in Retentionsmulden. Der Dorfbach mündet ausreichend nördlich des Standorts in die Aare. Durch Starkniederschläge induzierte gravitative Ereignisse wie grössere Hangrutschungen können infolge der lokalen geologischen Bedingungen ebenfalls ausgeschlossen werden; eine allfällige Oberflächenerosion ist in ihren Auswirkungen begrenzt. Gemäss der EXAR-Studie (Extremhochwasser Aare-Rhein) ist der Standort vor Hochwasser geschützt, auch bei extremen Wasserständen der Aare für Ereignisse mit einer Häufigkeit kleiner als  $10^{-4}$  pro Jahr. Dies gilt auch bei kombiniertem Versagen von wasserbaulichen Einrichtungen in der Aare. Folgeanalysen der Zwiilag und des PSI haben gezeigt, dass auch bei solchen Abflussszenarien im Uferbereich mit der gegenwärtigen Befestigung keine kritische laterale Erosion zu erwarten ist.

Die Ergebnisse der Analyse zeigen – zusammen mit den zahlreichen bereits bestehenden Studien – dass für den Standort keine für die Auslegung einer Kernanlage ungewöhnlichen Randbedingungen vorliegen. Der Standort ist für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet.



## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Figurenverzeichnis .....	IV
Abkürzungsverzeichnis .....	V
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Niederschlagbezogenes Gefährdungspotenzial des Anlagenperimeters .....</b>	<b>2</b>
2.1 Charakterisierung des Standorts .....	2
2.1.1 Einzugsgebietscharakteristik .....	2
2.1.2 Gelände um den Anlagenperimeter .....	2
2.1.3 Grundwasser .....	3
2.1.4 Hydrologische Besonderheiten.....	4
2.1.5 Folgerungen .....	4
2.2 Historische Ereignisse .....	4
2.3 Ermittlung des Niederschlags .....	6
2.4 Gefährdungspotenzial infolge Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen in Umgebung des Anlagenperimeters.....	9
2.4.1 Modellierung des Oberflächenabflusses.....	9
2.4.2 Fliesswege und Abflusstiefen .....	10
2.4.3 Abflussmengen .....	15
2.5 Gefährdungspotenzial infolge niederschlagsinduzierter gravitativer Gefahren.....	16
<b>3 Gefährdung durch Aare-Hochwasser .....</b>	<b>18</b>
3.1 Überflutung.....	18
3.2 Ufererosion .....	18
<b>4 Fazit und Bewertung .....</b>	<b>21</b>
<b>5 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>22</b>
<b>Anhang A Ermittlung der massgebenden Niederschläge.....</b>	<b>A-1</b>
A.1 Vorgehen .....	A-1
A.2 Datengrundlage.....	A-2
A.2.1 Generierte Niederschlagsereignisse.....	A-2
A.2.2 Probable Maximum Precipitation (PMP) .....	A-4
A.3 Analysen .....	A-5
A.3.1 Tagesniederschlag.....	A-5
A.3.2 Niederschlags-Intensitäts-Diagramme.....	A-7
A.3.3 Klimawandel.....	A-9
A.3.4 Ganglinie .....	A-9
A.4 Vorbedingungen beim Ereignis .....	A-9
A.5 Fazit .....	A-12

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Eingabewerte für die Modellierung des Oberflächenabflusses für die 10'000-jährlichen 24h-, 6h- und 1h-Niederschläge.....	8
Tab. A-1:	Mittlere 1'000- und 10'000-jährliche Wiederkehrwerte.....	A-4
Tab. A-2:	Geschätzte Wiederkehrwerte von Tages-/24h-Niederschlägen verschiedener Messstationen und Messperioden in der Umgebung des Anlagenperimeters.....	A-7
Tab. A-3:	Vergleich der Niederschlagsintensitäten der Messstationen Würenlingen und Beznau für unterschiedliche Niederschlagsdauern (ND), Werte für die beste Schätzung und das 95 %-Konfidenzintervall (KI), MeteoSchweiz (siehe Fussnote 14).....	A-8

## Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Gross- und kleinräumige topografische Situation um den Anlagenperimeter.....	3
Fig. 2-2:	Abgeleitete Intensitätskurve für den 10'000-jährlichen Punktniederschlag für das Einzugsgebiet des Anlagenperimeters.....	8
Fig. 2-3:	Höhenmodell und Einzugsgebiet des Anlagenperimeters .....	11
Fig. 2-4:	Niederschlagsereignis von 1 Stunde Dauer: 25 Minuten nach Ereignisbeginn.....	12
Fig. 2-5:	Niederschlagsereignis von 1 Stunde Dauer: 30 Minuten nach Niederschlagsende .....	13
Fig. 2-6:	Niederschlagsereignis von 6 Stunden Dauer (links) und 24 Stunden Dauer (rechts): etwa 3 Stunden nach Niederschlagsende.....	14
Fig. 2-7:	Wassertiefen zum Zeitpunkt des maximalen Zuflusses zum Anlagenperimeter .....	15
Fig. 2-8:	Situation des Anlagenperimeters mit Lokalisation der drei grössten Zuflüsse.....	16
Fig. 3-1:	Gefährdungskurve für den Beurteilungsperimeter PSI: Wasserspiegellage (WSPL).....	19
Fig. 3-2:	Maximale Fliesstiefen während der gesamten Simulationsdauer für ein Hochwasserszenarium mit einer Überschreitungshäufigkeit von ca. $10^{-4}$ /Jahr (Pkt. 2 in Fig. 3-1).....	20
Fig. A-1:	Probable Maximum Precipitation für den 24h-Niederschlag bei West-Nordwest-Wind .....	A-5
Fig. A-2:	Beobachteter Trend 1901-2014 der stärksten Eintagesniederschläge des Jahres .....	A-6
Fig. A-3:	Niederschlagsintensitätsdiagramm der Station Beznau für die Messperioden 1901 bis 1987 (punktierte Linien) und 1989 bis 2021 (ausgezogene Linien) .....	A-8

## Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BEVA	Brennelementverpackungsanlage
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EXAR	Extremhochwasser Aare-Rhein
KEV	Kernenergieverordnung
PMP	Probable Maximum Precipitation
PSI	Paul Scherrer Institut
Zwilag	Zwischenlager Würenlingen AG



# 1 Einleitung

Im Zuge des Rahmenbewilligungsgesuchs für die Brennelementverpackungsanlage (BEVA) am Standort Zwiilag (Würenlingen, Kt. AG) ist gemäss Kernenergieverordnung (KEV 2004) als Teil der Gesuchsunterlagen ein Sicherheitsbericht (Nagra 2025) einzureichen, in welchem nach Art. 23 KEV Angaben zu den Standorteigenschaften anzugeben sind. Dies betrifft unter anderem die standortspezifischen externen Gefährdungen, wozu gemäss Richtlinie A05 des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI 2018) auch die hydrologische Gefährdung in Form externer Überflutung zählt, die in einer Analyse zu erfassen und zu bewerten ist. Die Richtlinie gilt gemäss Kap. 7.2 der Richtlinie auch für eine BEVA. Der vorliegende Bericht beschreibt, untersucht und bewertet die hydrologische Gefährdung am Standort der BEVA.

Der Standort – charakterisiert durch bestehende Kernanlagen vor Ort und in unmittelbarer Umgebung – ist seit Jahrzehnten Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen auch im Rahmen hydrologischer Gefährdungen und gilt damit als gut erfasst, untersucht und bewertet. Bei der Ermittlung der Gefährdung kann und wird daher auf bestehende Daten, Analysen und Auswertungen zurückgegriffen (beispielsweise Extremhochwasser in der Aare, Ufererosion) und durch eigene Analysen und Modellierungen (beispielsweise Oberflächenabfluss) ergänzt.

In Abhängigkeit der Entstehung des Ereignisses und der betroffenen Einzugsgebietsfläche ergibt sich die Dauer und damit die Intensität des dafür massgebenden Niederschlags für eine bestimmte Wiederkehrperiode. Bei gleicher Wiederkehrperiode nimmt die Niederschlagsintensität mit zunehmender Dauer kontinuierlich ab und das Niederschlagsvolumen zu. Grundsätzlich sind vier Typen von Schadensereignissen infolge Starkniederschlägen möglich:

1. Für das Areal unmittelbar um ein Bauwerk: Hier stehen Gefährdungen bei Extremereignissen aus Rückstau der ordentlichen Entwässerung im Vordergrund. Das Einzugsgebiet ist sehr klein, die Flächen versiegelt oder stark verdichtet und die Konzentrationszeiten des Oberflächenabflusses entsprechend kurz. Somit stehen kurze Niederschlagsereignisse mit hohen Intensitäten als massgebende Gefährdung, d.h. Niederschlagsdauern von 0.5 bis etwa 2 Stunden, im Fokus. Die Charakterisierung dieser Gefährdung wird in einer separaten Untersuchung abgehandelt (siehe Nagra 2024b) und ist nicht Gegenstand des Berichts.
2. Aus dem umliegenden, natürlichen Gelände: Grundsätzlich sind Gefährdungen während Extremereignissen, verursacht durch flächigen Oberflächenabfluss, möglich. Bei solchen Ereignissen können auch benachbarte, lokale Vorfluter mit beschränkter Gerinnekapazität ausufernd, und das überfliessende Wasser kann zum Standort gelangen. Dabei sind in beiden Fällen nicht nur die zufließenden Wassermengen, sondern auch der ggf. damit verbundene Feststofftransport zu berücksichtigen. Bis sich auf natürlichen Flächen Oberflächenabfluss bildet, braucht es eine gewisse Niederschlagsdauer. Sowohl kurze als auch längere Niederschlagsereignisse sind zu beachten: die kurzen wegen der hohen Intensität und die langen wegen des grossen Volumens. Letzteres ist wesentlich, wenn auch grössere Retentionsräume erschöpft sind und dann zusätzlicher Niederschlag zum Abfluss kommt. Die Gefährdung infolge Oberflächenabfluss aus der Umgebung wird in Kap. 2 dargelegt und bewertet.
3. Aus einem anliegenden Fliessgewässer: Diese Gefährdung berücksichtigt eine Überflutung des Anlagenperimeters infolge eines ausufernden Hochwassers in einem Fliessgewässer mit grossem Einzugsgebiet. Für solche Ereignisse sind regionale Niederschläge von einem bis mehreren Tagen massgebend. Bei der Zwiilag wurden diese Szenarien für die Aare im Rahmen des Projekts Extremhochwasser Aare-Rhein (Pfäffli et al. 2021) ausgiebig behandelt. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Kap. 3 zusammengefasst; die Herleitung der hydrometeorologischen Grundlagen für das Projekt wird in Staudinger & Viviroli (2020) beschrieben.
4. Gravitative Gefahren, infolge Starkniederschläge oder extremer Abflüsse (siehe Kap. 2.5).

## **2 Niederschlagbezogenes Gefährdungspotenzial des Anlagenperimeters**

### **2.1 Charakterisierung des Standorts**

#### **2.1.1 Einzugsgebietscharakteristik**

Das hydrologische Einzugsgebiet für den Bereich des Anlagenperimeters<sup>1</sup> ist aus der Oberflächentopografie nicht überall deutlich erkennbar (vgl. Fig. 2-1). Östlich von Würenlingen ist die Begrenzung durch Hügelzüge gegeben und die Abgrenzung zum Gebiet mit dem Dorfbach als Vorfluter ist klar (vgl. violette Linie in Fig. 2-1). Im Gegensatz zu den Gebieten am gegenüberliegenden Aareufer ist das Gerinnenetz hier aber wenig ausgeprägt und beschränkt sich auf den Dorfbach und dessen Seitenarme Oberdorfbach und Eichgraben oberhalb des Siedlungsgebiets von Würenlingen. Westlich von Würenlingen in der grossen Ebene bis zur Aare sind weitere oberflächliche Fliesswege aus der Topografie nicht eindeutig erkennbar. Es gibt keine sichtbaren Punktzuflüsse zum Dorfbach. Auf den bewirtschafteten Flächen wird der Dorfbach vermutlich vor allem durch gerinnenaher diffuse Zuflüsse gespeist. Auf der ganzen Ebene, besonders im bewaldeten Teil westlich der Strasse bzw. der Bahnlinie, dürfte ein grosser Teil des Niederschlags versickern und entweder das Grundwasser anreichern oder teilweise direkt lateral (auch unterirdisch) in die Aare gelangen.

Im Fall eines Starkniederschlagsereignisses wird die Abflussmenge im Bach deshalb vor allem von den Zuflüssen aus dem oberen Teil des natürlichen Einzugsgebiets und denen aus der Siedlungsfläche dominiert. Im Unterlauf dürfte der Dorfbach nur lokal als Vorfluter wirken.

Gemäss der Oberflächentopografie der Landeskarte kommt deshalb für das Einzugsgebiet des Anlagenperimeters das Gebiet infrage, welches sich südlich des Dorfbachs (Anlagenperimeter – Althau – Iberig – Burris) erstreckt, mit Ausnahme der Abhänge im Westen, die offensichtlich direkt in die Aare entwässern (vgl. Fig. 2-1). Aus diesem Grund wird für die weiteren Analysen der Untersuchungsperimeter auch in südlicher Richtung genügend gross gewählt.

#### **2.1.2 Gelände um den Anlagenperimeter**

Für die Menge und Richtung von Oberflächenabfluss zum Anlagenperimeter sind die Gebietseigenschaften in der näheren Umgebung wichtig. Das unmittelbar benachbarte Gebiet ist westlich begrenzt durch die Aare und östlich durch eine kleine, steile, bewaldete Geländestufe von etwa 20 m Höhe. In dieser Geländestufe sind weder Gerinne noch Spuren von Oberflächenabfluss zu erkennen. Die Forschungsstrasse und ein Fussweg führen über die Stufe ins Gelände des Paul Scherrer Instituts (PSI) und die Zwiilag. Sie könnten im Fall von Starkniederschlag wasserführend werden (vgl. Fig. 2-1).

An der Oberseite der Geländestufe befindet sich eine weite, vorwiegend flache mit vielen Mulden versehene, ebenfalls bewaldete Fläche, welche im Osten durch die Bahnlinie begrenzt wird. Abgesehen vom Dorfbach, der in diesem Bereich künstlich angelegt wurde und nördlich des Anlagenperimeters in die Aare mündet, sind auch hier nirgends Gerinne zu erkennen.

Der Waldboden ist überall überdeckt von viel losem organischem Material (Blätter, Äste), welches an den geeigneten Geländeabschnitten durch starken Oberflächenabfluss mobilisiert und allenfalls Richtung Anlagenperimeter transportiert werden könnte.

---

<sup>1</sup> Auf dem Anlagenperimeter wird die BEVA gebaut und betrieben. Weiterer Informationen siehe Nagra (2025).

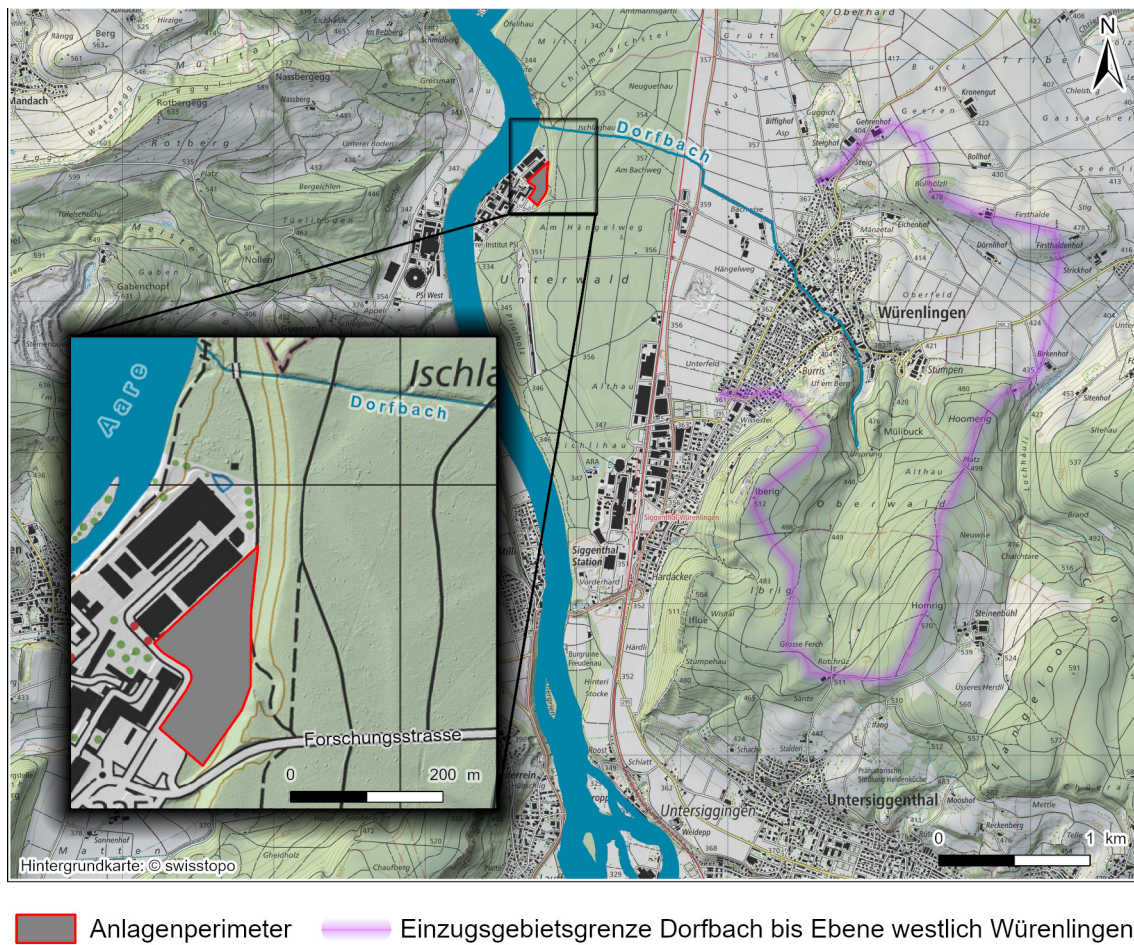


Fig. 2-1: Gross- und kleinräumige topografische Situation um den Anlagenperimeter

Das Einzugsgebiet des Würenlinger Dörfbachs bis zur Ebene westlich von Würenlingen ist durch die violette Linie abgegrenzt. Weiter im Westen ist die Abgrenzung des Einzugsgebiets vom Dörfbach und dem des Anlagenperimeters aus der Oberflächentopografie der Landeskarte kaum erkennbar. Die Vergrößerung zeigt die Topografie (Geländestufe) in der direkten Umgebung des Anlagenperimeters.

### 2.1.3 Grundwasser

Der östliche ebene Teil des Einzugsgebiets – etwa die Hälfte davon bewaldet – liegt über einem Grundwasserträger mit grosser Mächtigkeit und Durchlässigkeit. Die Durchlässigkeit im Schotter wird mit  $10^{-3}$  bis  $10^{-2}$  m/s angegeben (Nagra 2024a). Der Oberboden ist wenig mächtig. Die Aare exfiltriert im Bereich des PSI/Zwilag orografisch rechtsseitig ins Grundwasser. Der Grundwasserstand im Bereich der Zwilag wird seit 1991 mit vier Piezometern periodisch gemessen. Die Aufzeichnungen zeigen, dass das Grundwasser nur ausnahmsweise das Niveau des Aarewasserstands erreicht. Grosse Schwankungen des Grundwasserstands gehen vor allem mit der Niederschlagstätigkeit einher. Ein wesentlicher Teil der Alimentation des Grundwassers erfolgt also über den Niederschlag.

### 2.1.4 Hydrologische Besonderheiten

In der Vergangenheit gab es im Einzugsgebiet einige menschliche Eingriffe, die das natürliche hydrologische Regime beeinflusst haben. So entspricht der heutige Verlauf des Würenlinger Dorfbaches nach dem Dorfausgang nicht mehr der ursprünglichen Linienführung. Diese führte früher geradlinig in nordwestlicher Richtung in die Aare im Bereich Böttstein, etwas aareabwärts.

Vermutlich im Zusammenhang mit dem Bau des Wasserkraftwerks Beznau 1898 – 1902, wurde der Bach ab der Querung der Döttingerstrasse in den Wald geleitet (vgl. Fig. 2-1), wo er nun in gerader Linienführung nach Westen verläuft und nördlich des Zwilag-Geländes in die Aare mündet. In den 1930er Jahren wurde offenbar auch der Abschnitt zwischen dem Siedlungsgebiet und der Döttingerstrasse eingedolt. 2008 wurde der gleiche Abschnitt wieder freigelegt und renaturiert, mit neuer Linienführung dem Unterbodenweg und anschliessend der Döttingerstrasse entlang bis zum bestehenden Gerinne im Wald (vgl. Fig. 2-1). Seither verläuft der Bach in diesem Bereich in einem Trapezgerinne mit einer Sohlen- und Kronenbreite von ca. 8 m bzw. 15 m.

Der Dorfbach durchquert ab der Ortschaft Würenlingen einen grossen Grundwasserträger (vgl. Kap. 2.1.3). Vor allem nach dem Eintritt in den Wald sind die Infiltrationsmengen ans Grundwasser aus dem Gerinne offensichtlich erheblich; der Bach ist im Unterlauf in der Regel ausgetrocknet und auf weite Strecken verkrautet. Eine Infiltration des Dorfbaches ins Grundwasser wird auch auf Grund chemischer Analysen bestätigt (Jäckli & Ryf 1978).

### 2.1.5 Folgerungen

Bis zur Ortschaft Würenlingen wirkt der Dorfbach als Vorfluter für das anfallende Niederschlagswasser und leitet dies anschliessend eingedolt durch das Siedlungsgebiet.

Unterhalb des Siedlungsgebiets durchquert der Bach eine grosse Ebene. Sein Einzugsgebiet als Vorfluter ist auf die gerinnenahen Flächen und allenfalls auf Drainagezuflüsse beschränkt. Diese Ebene wird westlich von Strasse und Bahn abgegrenzt. Gerinnebildender Abfluss ist in dieser Ebene nicht erkennbar. Starkniederschläge sammeln sich in Mulden. Auch der in der Ebene westlich von Strasse und Bahn vor etwa hundert Jahren in den Wald umgeleitete Bachabschnitt zeigt keine natürlichen gerinnebildenden Zuflüsse. Es kann auch hier von einer grossen Infiltrationsrate und einem grossen Retentionspotenzial für Starkniederschläge ausgegangen werden, was die Bildung von flächigem Oberflächenabfluss über grössere Fliessstrecken und damit eine Gefährdung des Anlagenperimeters praktisch verunmöglicht.

## 2.2 Historische Ereignisse

Von extremen Niederschlagsereignissen gibt es in diversen Quellen dokumentierte Beobachtungen vom Geschehen, insbesondere von den damit verbundenen Schäden. Die kantonalen Gefahrenkartierungen führen solche Ereignisse im Ereigniskataster oder einer Ereigniskatasterkarte auf. Eine weitere Sammlung schweizweit führt das Sturmarchiv<sup>2</sup>, welches auch auf Informationsquellen hinweist. Solche Berichte über Schadensbilder im Zusammenhang mit dem Niederschlagsgeschehen geben zusätzlich zur kantonalen Gefahrenkarte<sup>3</sup> Hinweise für das Gefährdungspotenzial für den Anlagenperimeter.

Weder im Naturereigniskataster<sup>4</sup> noch im Sturmarchiv sind Einträge aufgrund von Starkniederschlagsereignissen im Einzugsgebiet des Würenlinger Dorfbachs vermerkt, obwohl in der Niederschlagsmessreihe der Station Beznau (und später auch Würenlingen/PSI) namhafte Ereignisse

---

<sup>2</sup> <https://www.sturmarchiv.ch/index.php?title=Hauptseite>

<sup>3</sup> <https://www.ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html>, Gefahrenkarte Hochwasser, abgerufen am 9.10.2023

<sup>4</sup> <https://www.ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html>, Naturereigniskataster, abgerufen am 9.10.2023

aufgezeichnet sind. Der höchste Tagesniederschlag in den letzten 120 Jahren wurde in Beznau 1931 verzeichnet. Spitzenwerte für kürzere Niederschlagsdauern, welche erst ab 1989 messtechnisch erfasst sind, traten in den Jahren 1990, 2009 und 2013 auf.

Das Ereignis vom 29. Juli 2013 ist insofern bedeutend, als es für beide Stationen, Beznau und Würenlingen/PSI, für verschiedene Niederschlagsdauern (3, 6, 12, 16 und 24 Stunden) Höchstwerte seit Beginn der Messreihen mit automatischen Messungen (1989 bzw. 1993) verzeichnet. Das Vorereignis begann am Nachmittag des 28. Juli nach einer niederschlagsfreien Periode von fast zwanzig Tagen mit einem vierstündigen Niederschlag von unauffälliger Intensität. Nach einem kurzen Unterbruch setzte das Hauptereignis ein, welches insgesamt etwa 16 Stunden dauerte und im letzten Drittel (Mittagszeit des 29. Juli) eine markante dreistündige Intensitätsspitze zeigte. Das Niederschlagsvolumen betrug für den beschriebenen Ereignisablauf 95 mm (Daten MeteoSchweiz, Station Beznau, Stundenwerte). Ausserordentliche Schäden gab es in Würenlingen und Umgebung anscheinend keine zu vermelden. In der Region wird eine Überschwemmung in Klingnau erwähnt, bei einem 24h-Niederschlag von offenbar 103 mm (Messung unbekannt, Die Botschaft 2013).

Das Extremereignis vom Mai 1931 im Bezirk Zurzach ist ausgiebig dokumentiert. So soll in der Nacht vom 29. auf den 30. Mai 1931 über das untere Aaretal ein Unwetter hereingebrochen sein, dessen Hergang in Die Botschaft (1931a, 1931b) ausführlich geschildert wird. Dem Gewitter gingen sehr hohe Temperaturen voraus, und es bildete sich eine Konvergenzzone über dem Bezirk. Sie liess einen mächtigen Gewitterkomplex entstehen, der ortsfest blieb. Das Ereignis begann gegen 22:30 Uhr mit einem etwa viertel- bis halbstündigen Hagelgewitter mit Körnern «gross wie Taubeneier». Der Hagel zerstörte praktisch alle Kulturen. Danach setzte «ein wolkenbruchartiger Regen ein, der bis 2 Uhr dauerte, dann etwas aussetzte, um dann noch fürchterlicher neu einzusetzen».

In Beznau wurden 110 mm Niederschlag in 24 Stunden (SMZA 1931) registriert, was dem höchsten je gemessenen Tagesniederschlag an dieser Station seit Beginn der Messungen im Jahr 1900 entspricht. Effektiv ist die gesamte Niederschlagsmenge aber in nur wenigen Stunden mit offenbar zwei Intensitätsspitzen gefallen; gemäss Quellen soll das Ereignis nur vier bis sechs Stunden gedauert haben. Die mittlere Intensität liegt in diesem Fall bei einer Wiederkehrperiode von deutlich über dreihundert Jahren. Vor diesem Hintergrund sind denn auch die dramatischen Schilderungen nachvollziehbar, ebenso der Hinweis, dass sich niemand der Betroffenen an ein derartiges Ereignis erinnern konnte.

In den benachbarten Messstationen Baden und Otelfingen wurden 62 bzw. 77 mm Tagesniederschlag gemessen, was für den betreffenden Monat nicht das Maximum war (SMZA 1931). In Die Botschaft (1931a) wird für das Ereignis eine Niederschlagsmenge in Kirchspiel (Leuggern) von 250 mm erwähnt. Die Herkunft dieses Werts ist jedoch unbekannt; er wird wiederholt rezipiert, ist aber angesichts der Messungen im Gebiet nicht plausibel.

Das Ereignis hat vor allem in Böttstein, Tegerfelden und Zurzach zu grossen Sachschäden geführt. Neben überfluteten Kellern wurden Strassen aufgerissen und unterspült, was zu meterhohen Gräben führte. Die Kulturen wurden mit Schutt überdeckt. Ursprung der Verwüstung waren feststoffführende Bäche aus den steilen Flanken und der Umstand, dass sich die Abflüsse an den Dorfeingängen konzentrierten. Das vorangehende Hagelereignis hatte zusätzlich die Bodenstrukturen der vernichteten Kulturen an der Oberfläche ungünstig beeinflusst.

In Bezug auf das Niederschlagsvolumen war das Ereignis mit demjenigen von 2013 vergleichbar. Möglicherweise war der Ereignisverlauf 1931 für die Umgebung der damals betroffenen Ortschaften aber ungünstiger. Neben einer grossen Niederschlagsmenge kann vermutet werden, dass die nachfolgend beschriebenen Begleitereignisse Schäden infolge Oberflächenabfluss förderten:

- ein initiales ausgiebiges Hagelereignis
- eine hohe Niederschlagsintensität mit kurzfristigen Intensitätsspitzen
- eine zweigipflige Niederschlagsganglinie
- mobilisierbare Feststoffe

Obwohl die umliegenden Gemeinden von diesem Unwetter schwer getroffen wurden, sind für Würenlingen auch bei diesem Ereignis neben überfluteten Kellern und dem ausufernden Dorfbach im Siedlungsgebiet keine schwerwiegenden Verwüstungen dokumentiert. Insbesondere im unteren flachen Gemeindeteil (Unterwald), wo Prozesse ausgelöst durch die Begleitereignisse wegen der morphologischen Gegebenheiten eher nicht stattfinden, sind keine Schäden aufgeführt.

## 2.3 Ermittlung des Niederschlags

### Vorgehen

Die nachfolgende Ermittlung der massgebenden Niederschlagswerte basiert auf Voraussetzungen und Randbedingungen:

- Die Abschätzung von Gefährdungen des Perimeters aus Oberflächenabfluss ist für eine Wiederkehrperiode von 1'000 bzw. 10'000 Jahren zu ermitteln. Es wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass das auslösende Niederschlagsereignis die gleiche Jährlichkeit hat.
- Das massgebende Niederschlagsereignis findet wegen der beschränkten Grösse des Einzugsgebiets (vgl. Kap. 2.1.1) lokal statt. Es werden Punktniederschläge betrachtet. Daten werden von Stationen im betrachteten Einzugsgebiet und von solchen in der Nähe beigezogen.

Ein derart seltenes Ereignis zu ermitteln, erfordert den Rückgriff auf Extremwertstatistiken. Vorhandene Extremwertstatistiken basieren auf Niederschlagsmessreihen von einigen zehn Jahren Länge, d.h. der gesuchte Wert befindet sich weit im Extrapolationsbereich mit den entsprechenden Unsicherheiten. Um dies zu umgehen, wird bei der Extrapolation auf Datenreihen von längerer Dauer abgestützt. Quellen der Unsicherheit sind bei dieser Fragestellung zudem nicht nur die Seltenheit der vorherzusagenden Ereignisse, sondern auch die Qualität der Messreihen, die Methoden der Auswertung, die äusseren Einflüsse während den vergangenen Beobachtungsperioden und die zukünftige Entwicklung. Eine breitere Betrachtung der Datenbasis soll dabei helfen, die Belastbarkeit der Resultate vernünftig einzuschätzen. Aus diesen Gründen fiel der Entscheid auf folgendes Vorgehen (siehe auch Anhang A):

- Bestehende Datenreihen bzw. deren diverse Auswertungen werden für eine generelle Einordnung des Starkniederschlagsgeschehens in der lokalen Umgebung des Anlagenperimeters zugezogen und die Unsicherheiten interpretiert.
- Ausgangspunkt dafür sind Tagesniederschläge bzw. 24h-Niederschläge<sup>5</sup>, weil die Datenbasis für diese Niederschlagsdauer am grössten ist (lange Messreihen).

---

<sup>5</sup> Tagesniederschlag: Niederschlagssumme von UTC 06:00 bis 06:00 Folgetag. 24h-Niederschlag: Niederschlagssumme über 24x1 Stunde. In diesem Berichtstext als gleichwertig verwendet. Der Jahreshöchstwert eines 24h-Niederschlags ist jedoch tendenziell höher als der des Tagesniederschlags.

- Um eine extreme Extrapolation zu umgehen, werden für die Abschätzung von 24h-Werten mit sehr hoher Jährlichkeit synthetisch generierte Datenreihen basierend auf Parametern von ausgewählten Messstationen aus dem Projekt «EXAR» verwendet (Daten EXAR 2023).
- Dieser Datensatz wurde für überregionale Ereignisse entwickelt und ist deshalb nur für längere Niederschlagsdauern verwendbar. Für Ereignisse von kürzerer Dauer werden die Werte ausgehend vom 24h-Niederschlag unter Verwendung von bestehenden Niederschlags-Intensitäts-Diagrammen abgeschätzt.
- Die physikalische Plausibilität der ermittelten Starkniederschläge wird durch den Vergleich der Ergebnisse mit dem maximal möglichen Punktniederschlag (PMP – Probable Maximum Precipitation) am gleichen Ort überprüft.

### Niederschlagswerte

Die extremen Tagesniederschlagswerte liegen für den Anlagenperimeter schweizweit im unteren Bereich und ausserhalb einer Zone mit grossen Gradienten. Sie sind deshalb auch nicht von grossen Unsicherheiten infolge unterschiedlicher Interpolationsmethoden zwischen Stationen betroffen. Der Trend zu extremeren Starkniederschlägen dürfte mit dem aktuellen Klimawandel anhalten. Bei der Wahl von Niederschlägen für zukünftige Ereignisse ist diesem Umstand mit einem Zuschlag Rechnung zu tragen. Bei den betrachteten Stationen haben sich die Parameter für den funktionalen Zusammenhang der Zunahme der Intensität mit abnehmender Niederschlagsdauer nicht wesentlich verändert.

Für die Abschätzung der Gefährdung des Anlagenperimeters durch Oberflächenabfluss werden die Werte gemäss Tab. 2-1 verwendet. Für die detaillierte Herleitung der Niederschläge und weitere Informationen wird auf Anhang A verwiesen. Aus den Werten in Tab. 2-1 ergibt sich die in Fig. 2-2 dargestellte Intensitätskurve für die 10'000-jährlichen Modellniederschläge<sup>6,7</sup>, die im Bereich des PMP im unteren Aaretal zu liegen kommen (vgl. Anhang A.2.2).

---

<sup>6</sup> Die Ableitung der Intensitäten von kürzeren Niederschlagsdauern basiert auf dem Wert des 95 %-Fraktils des 24h-Niederschlags und wird aus diesem hochgerechnet. Vom Mittelwert ausgehend ergäbe sich ohne Klimawandel-Zuschlag für die Station Beznau ein 2h-Niederschlag von 85 mm/2h, was den Vergleich mit anderen Datensätzen jedoch gleichen Randbedingungen zulässt (Beispiel: für den 2h-Niederschlag mit 80 mm/2h (Nagra 2024b)).

<sup>7</sup> Angaben zu den 1'000-jährlichen Niederschlägen sind im Anhang A dokumentiert. Das bzgl. der Gefährdung abdeckende Ereignis ist der 10'000-jährliche Niederschlag. Die Modellierung wurde aus diesem Grund auf diese Werte beschränkt.

Tab. 2-1: Eingabewerte für die Modellierung des Oberflächenabflusses für die 10'000-jährlichen 24h-, 6h- und 1h-Niederschläge

Ausgehend von den 24h-Niederschlägen orientieren sich die Intensitätszunahmen bei kürzeren Niederschlagsdauern an den Intensitätskurven der Referenzstationen (Beznau, Würenlingen). Blau hinterlegte Werte: Basis für Modellrechnungen (auf 10 mm gerundet).

Niederschlag	Wert bzw. Faktor (Intensitätsverhältnis: $iX/i24$ )	Zuschlag Klimawandel	Wert (inkl. Klimawandel)	Wert (gerundet)
24h	167 mm/24h (95%-Quantil aus Tab. A-1)	20 %	200 mm/24h	200 mm/24h
6h	3 ( $i6/i24$ , vgl. Anhang A.5)		150 mm/6h	150 mm/6h
1h	13 ( $i1/i24$ , vgl. Anhang A.5)		109 mm/h	110 mm/h

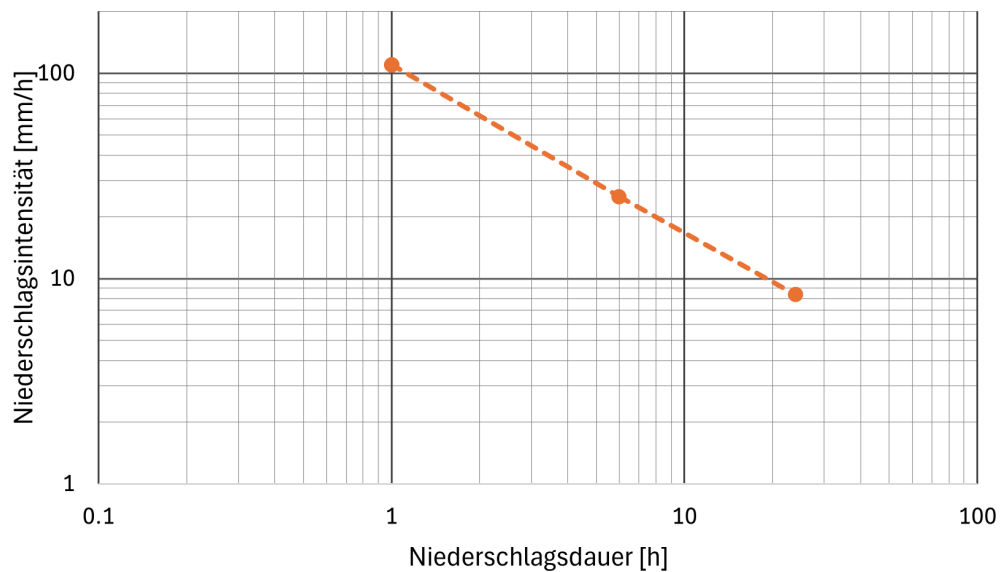


Fig. 2-2: Abgeleitete Intensitätskurve für den 10'000-jährlichen Punktniederschlag für das Einzugsgebiet des Anlagenperimeters

## 2.4 Gefährdungspotenzial infolge Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen in Umgebung des Anlagenperimeters

### 2.4.1 Modellierung des Oberflächenabflusses

#### Modellierung

Die Oberflächenabfluss-Modellierung basiert auf einer Reihe von Modellannahmen und benötigt verschiedene Eingangsparameter<sup>8</sup>. Für die Topografie, welche Richtung, Fließgeschwindigkeit und Wasserstand des abfließenden Wassers beeinflusst, wird das digitale Geländemodell von swisstopo (swissALTI<sup>3D</sup>) mit einer Rastergrösse von  $1 \times 1$  m verwendet. Der Anlagenperimeter wird topographisch als Senke modelliert («ausgestanzt»). Die gesuchte Überflutung ist der Wasserfluss, der als Folge des Niederschlagsereignisses über dessen Grenzen in diese Senke fließt.

Als weitere Senke wirkt die Aare als überregionaler Vorfluter mit ausreichender Abflusskapazität. Aus Gründen der Konservativität wird der Dorfbach nicht als Senke, sondern gemäss seiner Gerinnetopografie modelliert, womit auch Ausuferungszonen identifizierbar werden. Verkläunungen werden nur im untersten Gerinneabschnitt zugelassen. Damit wird der Zufluss im Dorfbach zum Bereich des Anlagenperimeters maximal und ist somit pessimistisch. Die kleine Kiesgrube im Aerbacher wird modelltechnisch der umgebenden Topografie angepasst.

Die Simulation wurde für Niederschlagsdauern von 1, 6 und 24 Stunden mit 10'000-jährlichen Intensitäten gemäss Tab. 2-1 und den in Anhang A.3.4 diskutierten Intensitätsverläufen durchgeführt. Um das grösste Schadenspotenzial abzuschätzen, werden mit den drei gewählten Niederschlagsdauern sowohl Spitzenintensitäten (Kurzereignisse, «Gewitter») als auch grosse Niederschlagsvolumen («Landregen») berücksichtigt.

Der Anteil des Niederschlags, der Oberflächenabfluss generiert, schwankt je nach Beschaffenheit des Bodens, insbesondere der Bodenoberfläche, des Bewuchses und der Steilheit und wird durch den Abflusskoeffizienten  $\Psi$  für jedes Rasterelement quantifiziert. Damit wird der Nettoniederschlag bestimmt ( $N_{\text{netto}} = \Psi \times N$ ), der gemäss Modell oberflächlich zum Abfluss kommt. Die Abflusskoeffizienten werden auf der Basis von Topografie und Bodenkarten ermittelt, so wie es aktuell bei der Erstellung von Oberflächenabflusshinweiskarten des Bundesamts für Umwelt (BAFU) in der Schweiz angewendet wird.

Aus den Simulationen resultiert der Verlauf von Abflusstiefen über die Simulationsdauer im betrachteten Modellperimeter und deren Darstellung im Gelände. Daraus werden Fließwege und deren Änderungen über die Zeit ersichtlich; sie geben im Wesentlichen die Topografie wieder. An markanten Geländepunkten lassen sich Abflussganglinien ermitteln. Im vorliegenden Fall interessiert insbesondere der Zufluss zum Anlagenperimeter.

---

<sup>8</sup> Die hier verwendete Methodik zur Abschätzung der Gefährdung durch Oberflächenabfluss entspricht dem Vorgehen des BAFU, vergleiche dazu:

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahregrundlagen/oberflaechenabfluss.html>

### **Konservativitäten**

Im Oberflächenabfluss-Modell werden bzgl. Abflussbildung die nachfolgenden Annahmen und Randbedingungen als konservativ eingeschätzt:

- Für den massgebenden Niederschlag werden aus den ermittelten Werten diejenigen mit einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 95 % gewählt (95%-Quantil).
- Die gemäss gängiger Praxis ermittelten Abflusskoeffizienten fallen angesichts der spezifischen Gebietsparameter tendenziell hoch aus. Der Anteil des Niederschlags, der zum Oberflächenabfluss beiträgt, ist demzufolge pessimistisch gewählt.
- Anfangsverluste (Interzeption und Benetzung) werden vernachlässigt. Die Annahme von feuchten / nassen Vorbedingungen an der Bodenoberfläche impliziert, dass der Abfluss sofort und verlustlos einsetzt.

Die Modellbedingungen sind vor allem ausserhalb des Siedlungsraumes von Würenlingen für die Oberflächenabfluss-Menge konservativ, weil mit den verwendeten Abflusskoeffizienten der Oberflächenabfluss angesichts der Infiltrationsverhältnisse eher überschätzt wird. Überdies führt der unberücksichtigte Infiltrationsverlust (d.h. eine simulierte Abdichtung der Oberfläche) während des Ereignisses auf der Ebene zwischen dem Siedlungsgebiet und der Aare zu grosser oberflächlicher Wasserakkumulation, obwohl die Versickerung insbesondere im Wald nachweislich hoch ist (vgl. Kap. 2.1.3).

Der renaturierte Abschnitt des Würenlinger Dorfbachs mit grosser Abflusskapazität wird anstatt als Senke entsprechend der Gerinnetopografie modelliert. Dadurch bleibt der Oberflächenabfluss dem System erhalten. Die Durchlässe des Bachs werden selektiv gesperrt modelliert, um den grösstmöglichen Abfluss Richtung Anlagenperimeter zu erhalten. Exfiltration aus der gesamten Gerinnestrecke des Dorfbachs wird nicht berücksichtigt.

### **2.4.2 Fliesswege und Abflusstiefen**

Im oberen Teil des Einzugsgebiets bis zum Siedlungsgebiet von Würenlingen sind die topografischen Verhältnisse gut sichtbar und die Fliesswege entsprechend ableitbar. Im westlichen Teil ausserhalb der Siedlung ist das Gelände jedoch ausgesprochen flach und oberirdische Fliessgewässer fehlen weitgehend. Eindeutige Fliesswege sind aus diesem Grund nicht einfach identifizierbar. Für die Interpretation der Ergebnisse aus der Modellierung des Oberflächenabflusses in Bezug auf den Anlagenperimeter ist jedoch dieses Kenntnis besonders wichtig.

Ein detailliertes Höhenmodell in Fig. 2-3 gibt diesbezüglich Auskunft. Es zeigt, dass die Flächen auf der Ostseite der Döttingerstrasse nördlich der Kiesgrube Aerbsacher grundsätzlich in nord-nordöstlicher Richtung entwässern. Weiter ist ersichtlich, dass die Döttingerstrasse und/oder die Bahnlinie für die aus Osten kommenden, flächigen Abflüsse eine Barrierewirkung aufweisen und dadurch in den Flächen östlich von Strasse und Bahn Retention erwirken. Im bewaldeten Gebiet westlich von Bahn und Strasse fällt die nord-nordöstliche Fliessrichtung in den beiden grossen Geländemulden entlang des Pflanzgartenwegs bzw. zwischen Bachweg und Döttingerstrasse besonders auf.

Die zwischen der Siedlungsgrenze (Aerbsacher) und dem nördlichen Ende des Anlagenperimeters verlaufende Wasserscheide zeigt, dass der Dorfbach zwischen Siedlungsgebiet und Aaremündung deutlich ausserhalb des topografischen Einzugsgebiets des Anlagenperimeters verläuft. Wasser infolge einer Ausuferung in diesem Abschnitt gelangt aus diesem Grund nicht in den Bereich des Anlagenperimeters.

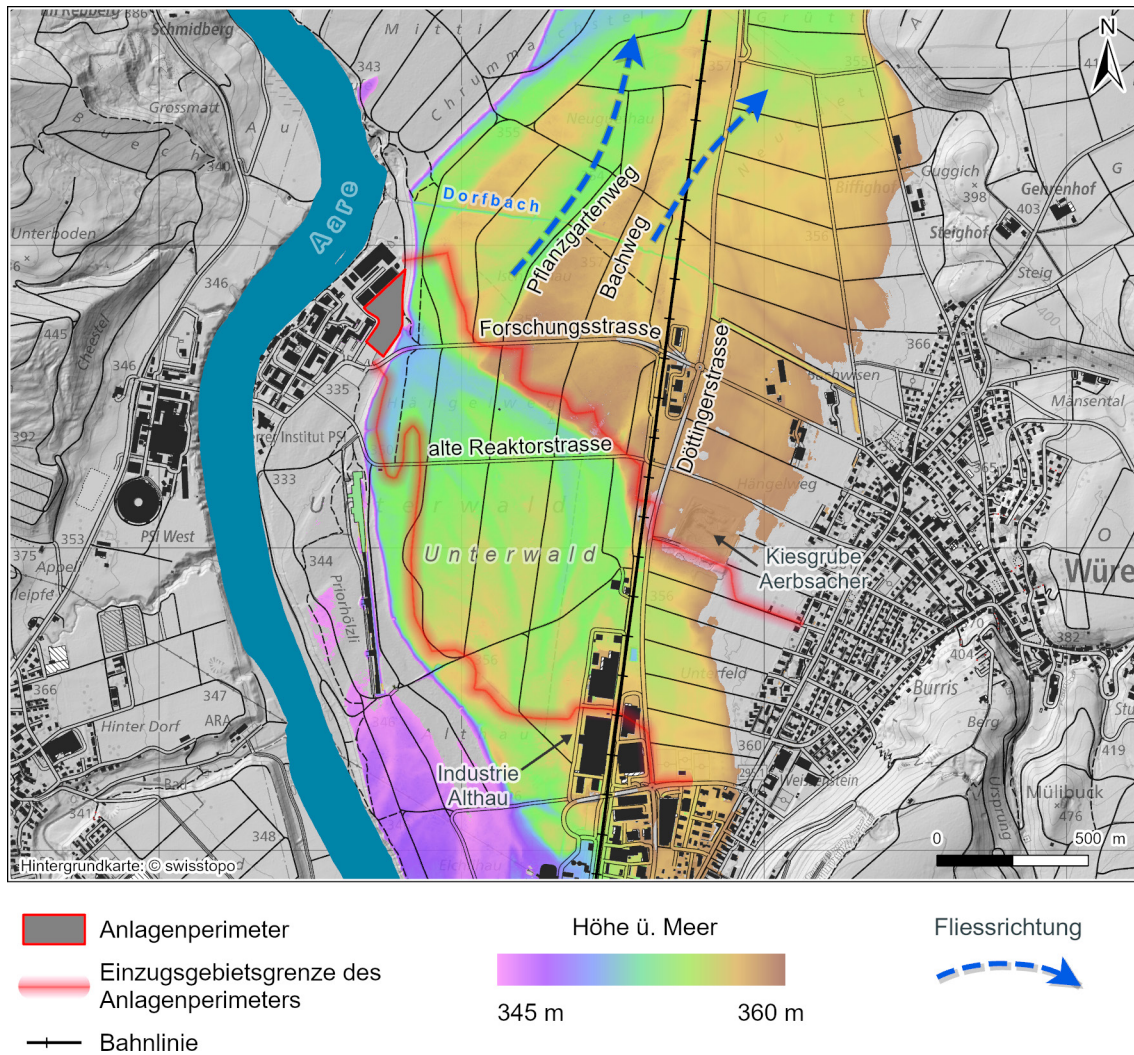


Fig. 2-3: Höhenmodell und Einzugsgebiet des Anlagenperimeters

Detailliertes Höhenmodell der Ebene zwischen Würenlingen und dem Gelände des Anlagenperimeters. Das effektiv zum Abfluss beim Anlagenperimeter beitragende Einzugsgebiet (rote Linie skizziert Begrenzung) ausserhalb des Siedlungsgebiets beschränkt sich gemäss dieser Oberflächentopografie auf das Gebiet Unterwald. Die oberflächlichen Fließrichtungen (blaue Pfeile) in den beiden grossen Geländemulden nördlich der Forschungsstrasse verlaufen in die nord-nordöstliche Richtung.

Wassertiefenkarten aus den Modellrechnungen widerspiegeln diesen Sachverhalt. Je nach Ereignisdauer und Zeitpunkt der Darstellung der Wassertiefen ergibt sich die Ausprägung der Fließwege und bestätigt die Oberflächentopografie. Fig. 2-4 zeigt für ein Niederschlagsereignis<sup>9</sup> von einer Stunde Dauer die Situation 25 Minuten nach Niederschlagsbeginn. Im Einzugsgebiet des Siedlungsbereichs von Würenlingen hat sich ein dichtes Netz von wasserführenden Gerinnen gebildet. Die verminderte Abflusskapazität des Dorfbachs an den Dorfeingängen führt zu Rückstau und Ausuferung. Unterhalb der Ortschaft sammelt sich das Wasser in den natürlichen Geländeebenen der Felder. Im bewaldeten Teil westlich der Döttingerstrasse sind vorerst auf der ganzen Fläche nur punktuell Wasseransammlungen ersichtlich, Fließwege sind bis auf die Geländestufe beim Anlagenperimeter praktisch nicht feststellbar.

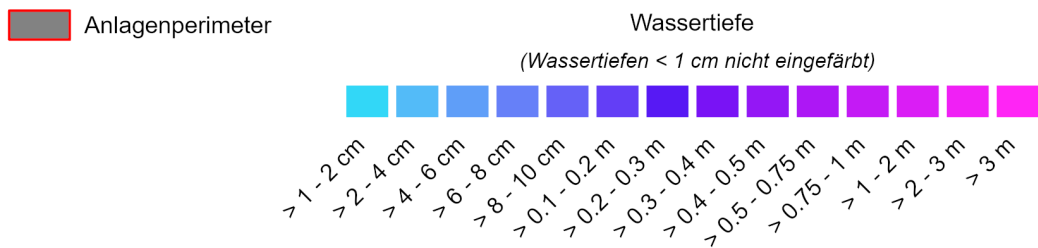
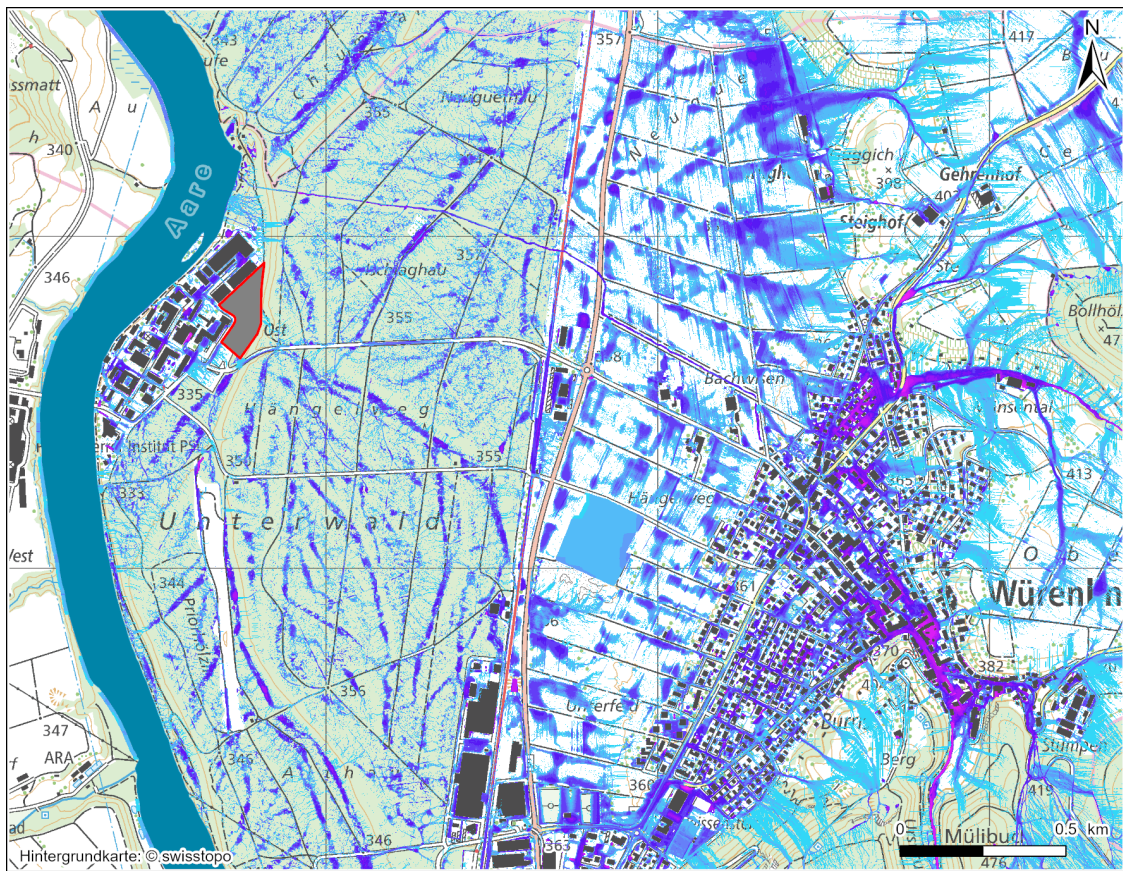
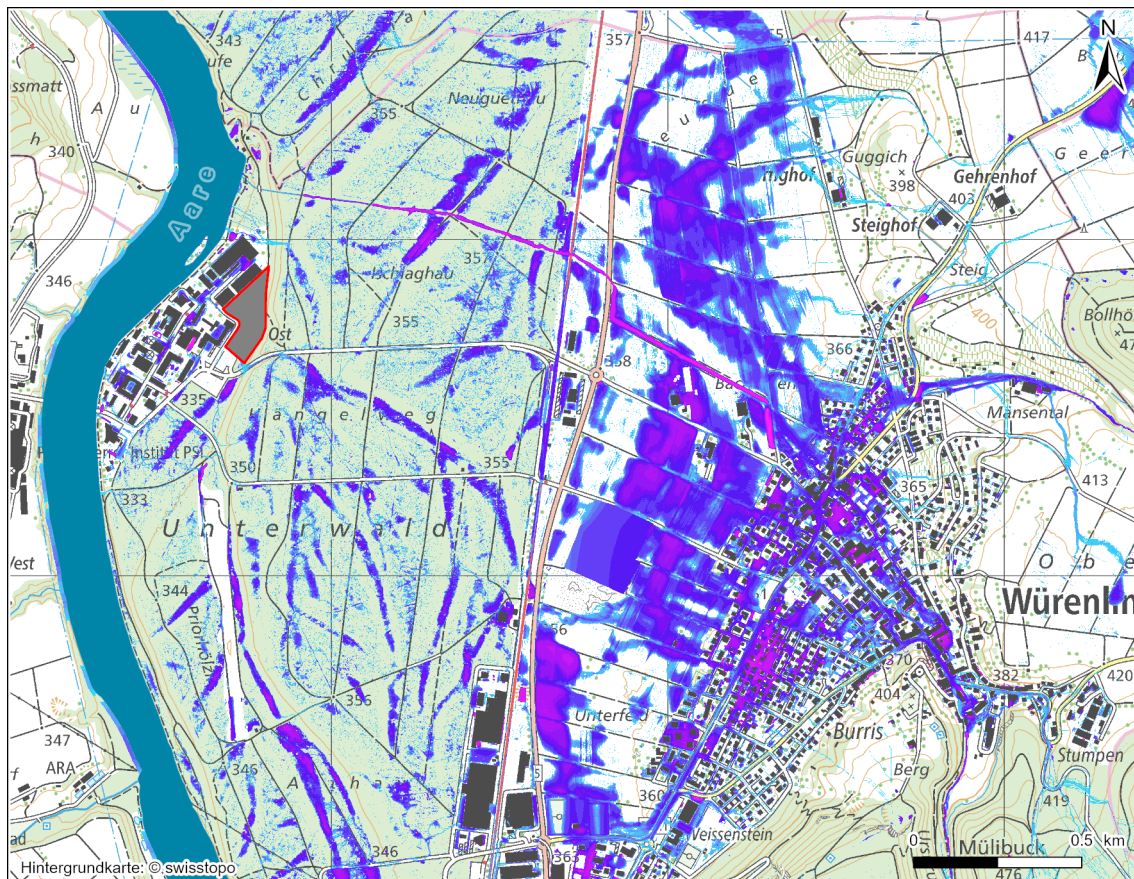


Fig. 2-4: Niederschlagsereignis von 1 Stunde Dauer: 25 Minuten nach Ereignisbeginn  
Im Gegensatz zum westlichen Teil, wo sich kleinräumig punktuell Wasser ansammelt, hat sich östlich der Döttingerstrasse ein dichtes Netz von wasserführenden Gerinnen gebildet.

<sup>9</sup> «Niederschlagsereignis» bezieht sich im vorliegenden Kapitel immer auf ein 10'000-jährliches Ereignis.

Nach Niederschlagsende zieht sich das Netz der wasserführenden Gerinne schnell zurück (vgl. Fig. 2-5). Östlich der Döttingerstrasse bleiben zahlreiche wassergefüllte Retentionsflächen zurück – anfangs zum Teil noch hydraulisch miteinander verbunden, später isoliert. Die Döttingerstrasse wird nirgends überflutet, dafür ist das Niederschlagsvolumen offensichtlich zu gering. Im Wald deuten die gefüllten länglichen Mulden die generelle Fließrichtung und insbesondere die Wasserscheide nach Norden an.



■ Anlagenperimeter

Wassertiefe

(Wassertiefen < 1 cm nicht eingefärbt)

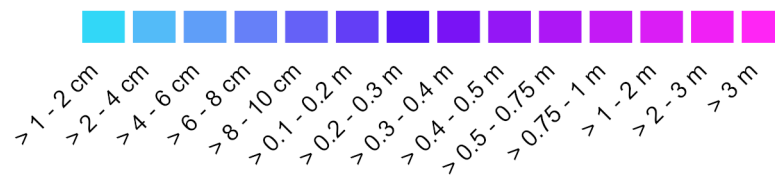


Fig. 2-5: Niederschlagsereignis von 1 Stunde Dauer: 30 Minuten nach Niederschlagsende

Das dichte Netz von wasserführenden Gerinnen oberhalb von Würenlingen hat sich weitgehend zurückgezogen, die Retentionsflächen unterhalb der Ortschaft haben sich weiter gefüllt.

Längere Niederschlagsdauern führen wegen des grösseren verregneten Volumens während des Ereignisses zu ausgedehnteren Wasserflächen in den Retentionsräumen (vgl. Fig. 2-6). Die generelle oberflächliche Fliessrichtung und die Wasserscheide westlich der Döttingerstrasse sind aus der Form der Retentionsräume besonders gut ersichtlich. Stellenweise wird die Döttingerstrasse überflutet (beispielsweise nordöstlich der Industriestrasse Althau), wodurch jetzt die Bahn als Barriere wirkt (siehe Fig. 2-6, rechts). Punktuell ist die Wirkung der Durchflüsse auf die andere Strassen- bzw. Bahnseite ersichtlich; sie erreichen den Anlagenperimeter jedoch wegen der noch nicht ausgeschöpften Retentionsmöglichkeiten im Wald nicht.<sup>10</sup>

Durch die spezielle Lage der Wasserscheide im Unterwald und die Rückhaltewirkung von Strasse und Bahn mit den ausgedehnten Retentionsflächen für Abflüsse aus dem obliegenden Gebiet reduziert sich das effektiv beitragende Einzugsgebiet für Zuflüsse zum Anlagenperimeter auf die bewaldeten Flächen westlich von Würenlingen.

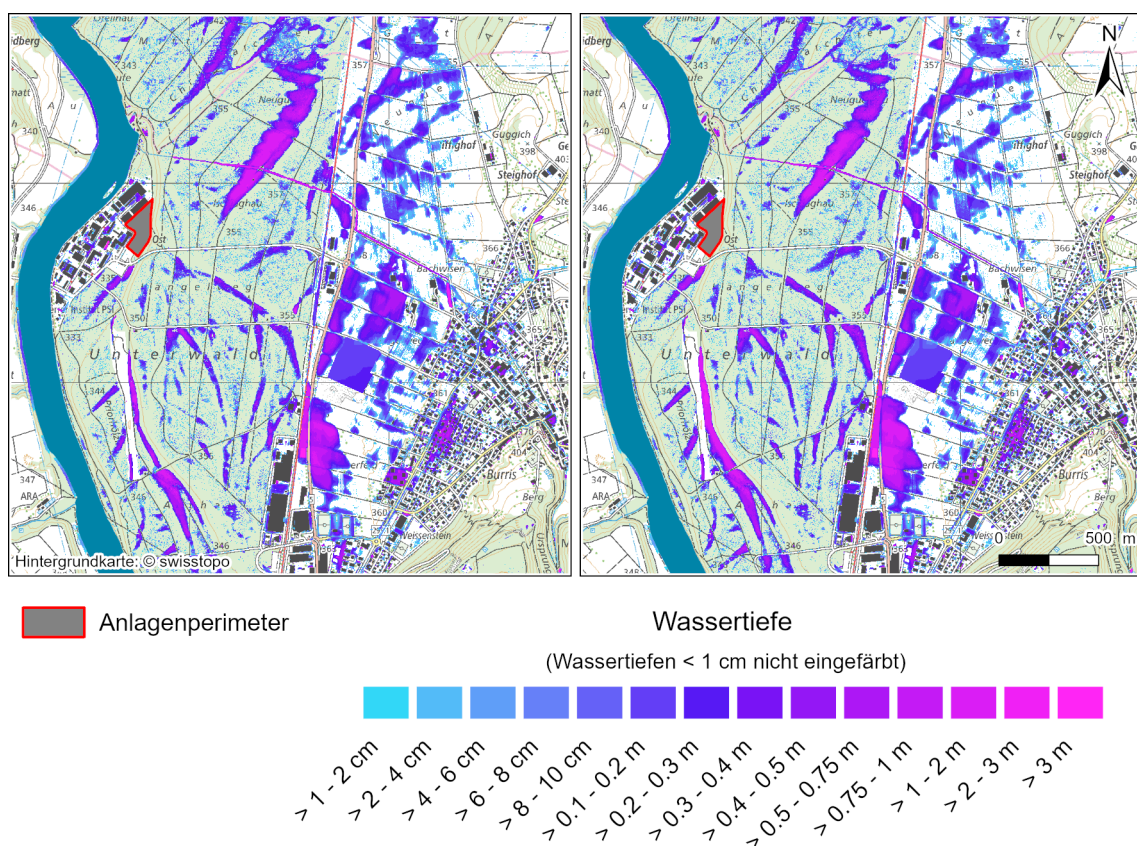


Fig. 2-6: Niederschlagsereignis von 6 Stunden Dauer (links) und 24 Stunden Dauer (rechts): etwa 3 Stunden nach Niederschlagsende

Es sind kaum mehr Fliessgewässer zu erkennen, jedoch haben die Wassertiefen in den Geländemulden zugenommen. Die Barrierewirkung von Döttingerstrasse und Bahn ist jetzt deutlich sichtbar.

<sup>10</sup> Die Figuren zeigen qualitativ das gleiche Bild wie die Gefährdungskarte Oberflächenabfluss des BAFU.

Da sich im bewaldeten Teil selbst bei hohen Intensitäten kaum wasserführende Gerinne bilden und sich keine grossen Retentionsräume in die entsprechende Richtung entleeren, ist der Zufluss zum Anlagenperimeter sowohl bei kurzen intensiven Niederschlägen als auch bei langen Ereignissen gemessen am potenziellen oberflächlichen Einzugsgebiet sehr gering. Zuflüsse via Forschungsstrasse<sup>11</sup>, Fussweg und Parkplatz sind zwar erkennbar, gehen aber mit zunehmender Niederschlagsdauer und abnehmender Niederschlagsintensität deutlich zurück (vgl. Fig. 2-7). Retentionsräume mit grossen Wassertiefen (Ischlaghau) entwässern in nordöstlicher Richtung.

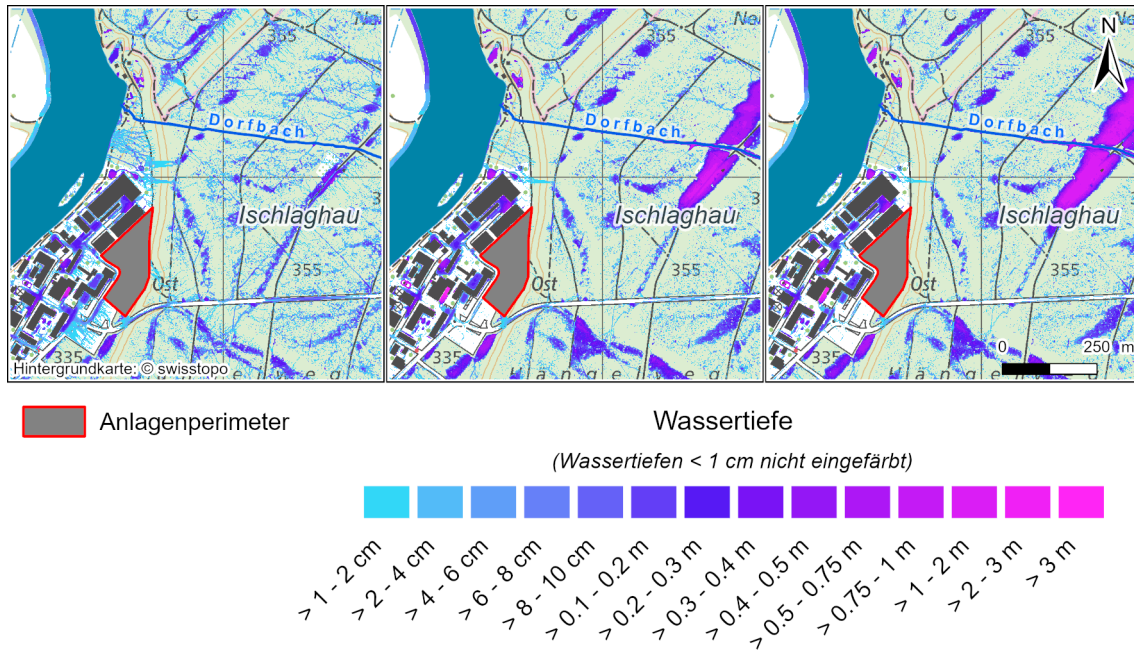


Fig. 2-7: Wassertiefen zum Zeitpunkt des maximalen Zuflusses zum Anlagenperimeter  
1h-Niederschlag 20 Minuten (links), 6h-Niederschlag etwa 3 Stunden (Mitte) und 24h-Niederschlag 12.5 Stunden (rechts) nach Niederschlagsbeginn. Mit zunehmender Niederschlagsdauer steigen die Wasserspiegel in den Retentionsräumen, die Zuflussspitzen nehmen jedoch stark ab.

### 2.4.3 Abflussmengen

Um eine Überflutung des Anlagenperimeters aus dem umliegenden Gelände bei einem extremen Niederschlagsereignis zu verhindern, können vorbeugende Massnahmen ergriffen werden, sofern dies erforderlich ist. Naheliegend ist eine Ableitung des zufließenden Wassers in die Aare; somit sind im vorliegenden Fall Spitzenabflüsse infolge eines 10'000-jährlichen Niederschlagsereignisses massgebend.

Wegen der beschriebenen speziellen topografischen und strukturellen Bedingungen (Verlauf Dorfbach, Bahn und Strasse) sind selbst bei intensivsten Niederschlägen nur geringe Zuflussmengen zum Anlagenperimeter zu erwarten. Ergebnisse aus der Modellierung zeigen, dass Punktzuflüsse vor allem via Parkplatz, Forschungsstrasse und den kleinen Fussweg über die östlich anliegende Geländestufe in den Anlagenperimeter gelangen (siehe Fig. 2-8).

<sup>11</sup> Die Forschungsstrasse ist nur im untersten Abschnitt Teil des Einzugsgebiets des Anlagenperimeters wirksam.

Die Zuflusswerte zum Anlagenperimeter erreichen beim 1h- bzw. 24h-Niederschlagsereignis knapp 700 l/s bzw. knapp 200 l/s, wobei der Zufluss über die Forschungsstrasse jeweils den grössten Beitrag liefert. Nördlich des Perimeters erreichen der Dorfbach und diffuse Zuflüsse aus dem Hang der Geländestufe das ebene Aare-nahe Gelände. Sie tangieren den Anlagenperimeter nicht. Diese Abflüsse entlang des Böschungsfusses bis Nietebuck erreichen beim 1h-Niederschlagsereignis etwa 300 l/s, bei den länger andauernden Niederschlagsereignissen deutlich weniger. Diese unter konservativen Annahmen abgeschätzten Wasserzuflüsse gefährden die nukleare Sicherheit der Anlage nicht.

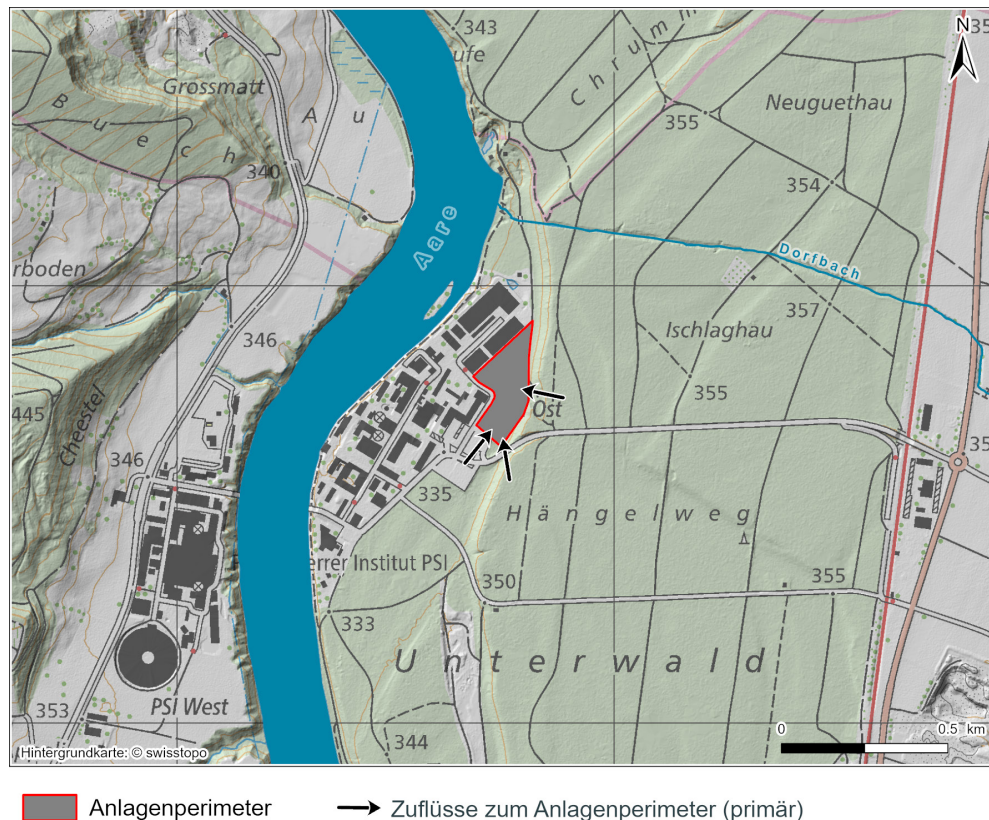


Fig. 2-8: Situation des Anlagenperimeters mit Lokalisation der drei grössten Zuflüsse

## 2.5 Gefährdungspotenzial infolge niederschlagsinduzierter gravitativer Gefahren

### Steinschlag, Fels- oder Bergsturz

In der Umgebung des Anlagenperimeters sind keine Felshänge/-böschungen vorhanden. Die westlich der Aare im Gebiet «Cheestel» vorhandenen Felsböschungen liegen bereits zu weit von der Aare entfernt, um bei einem allfälligen Bergsturzereignis überhaupt das westliche Ufer erreichen zu können. Daher können Gefahren durch Steinschlag, Fels- oder gar Bergsturz im Anlagenperimeter ausgeschlossen werden.

## **Rutschungen**

Permanente Rutschungen können aufgrund der Geländemorphologie sowie der Untergrundverhältnisse im Anlagenperimeter ebenfalls ausgeschlossen werden.

Bezüglich spontaner Rutschungen resp. Hangmuren gilt es zu berücksichtigen, dass der östliche Rand des Anlagenperimeters im Bereich einer (Schotter-)Terrassenkante verläuft. Diese weist eine Böschungshöhe von insgesamt knapp 20 m und eine Böschungsneigung von teilweise bis zu über 30° auf. Aufgrund der Untergrundverhältnisse (geringmächtige, natürliche Oberflächenschichten über mehr als 20 m mächtigem Niederterrassenschotter), der Materialzusammensetzung (Schotter bestehend grösstenteils aus dicht gelagertem, sauberem Kies mit reichlich Sand sowie Steinen und Blöcken), dem daraus resultierenden inneren Reibungswinkel von  $> 30^\circ$ , der guten Wasserdurchlässigkeit und dem tief liegenden Grundwasserspiegel ist das Potenzial für Hangmuren generell sehr gering. Lokale Hangmuren von feinkörnigeren, natürlichen Oberflächenschichten aus dieser Terrassenkante können bei extremen Niederschlägen aber nicht vollständig ausgeschlossen werden. Mit einfachen baulichen Massnahmen kann die Gefahr einer Rutschung jedoch beherrscht werden und stellt keine Gefahr für die BEVA dar. Aktuell ist die natürlich entstandene Terrassenkante bewaldet.

## 3 Gefährdung durch Aare-Hochwasser

### 3.1 Überflutung

Da der Anlagenperimeter unmittelbar rechtsufrig an der Aare liegt, kann ein Zufluss von Flusswasser nicht ausgeschlossen werden, falls die Aare in diesem Bereich über das Ufer tritt.

In der breit angelegten EXAR-Studie (Extremhochwasser Aare-Rhein) wurden die Grundlagen für die Beurteilung der standortspezifischen Hochwassergefährdung der Aare hergeleitet (Andres et al. 2021). Im Rahmen der EXAR-Studie wurden für 10'000-jährliche Niederschlagsereignisse die Auswirkungen möglicher Abflussszenarien im Einzugsgebiet der Aare an fünf sogenannten Beurteilungsperimetern entlang der Aare untersucht und anhand von Gefährdungskurven für einen Referenzpunkt in diesem Perimeter beurteilt. Einer dieser Perimeter ist das PSI-Gelände mit dem Referenzpunkt A. Der Referenzpunkt A liegt in direkter Nähe des Anlagenperimeters (siehe Fig. 3-2), ist aber etwas tiefer gelegen (Anlagenperimeter Null-Kote: 335.0 m ü M; Höhe Referenzpunkt A: 332.46 m ü M).

Die Abflussszenarien werden unterschieden zwischen ausschliesslich durch Niederschlagsereignisse ausgelöste Extremhochwasser (Initialereignisse) und solchen in Kombination mit Bauwerkversagens-<sup>12</sup>, Schwemmholtzprozessen und morphologischen Prozessen.

Die mittlere Gefährdungskurve für den Beurteilungsperimeter PSI in Fig. 3-1 zeigt, dass sämtliche Initialereignisse (hydrologische Hochwasserereignisse) im Gerinne der Aare abgeleitet werden können und gemäss Fig. 3-2 nicht zu einer Überflutung im Bereich des Anlagenperimeters führen. Für eine Häufigkeit bis  $10^{-4}$ /Jahr (Wiederkehrperiode 10'000 Jahre) gilt dies auch für das 95%-Vertrauensintervall der Gefährdungskurve.

Allerdings ist die obliegende PSI-Brücke über die Aare gemäss EXAR-Studie verklausungsgefährdet. Die möglichen Schwemmholtzfrachten sind sehr gross. Eine Verklausung führt jedoch nicht per se zu einer Überflutung der Aare. Nur für ausgewählte hydrologische Szenarien in Kombination mit einem 100-jährlichen Holzvolumen ist der Aufstau so hoch, dass das Wasser oberhalb der Brücke austritt und das PSI-Areal teilweise durchströmt. Nördlich des Referenzpunkts A fliesst es in die Aare zurück. Allerdings liegt diese resultierende Szenarienhäufigkeit bei maximal etwa  $10^{-5}$ /Jahr (vgl. Fig. 3-1). Auch bei diesem Szenarium findet kein Zufluss in den Anlagenperimeter statt. Der Anlagenperimeter ist auch bei extremen Wasserständen der Aare vor Hochwasser geschützt. Der Standort ist für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet.

### 3.2 Ufererosion

Das Projekt EXAR hat gezeigt, dass morphologische Prozesse während Extremhochwassern vermutlich eine grössere Rolle spielen könnten als bisher angenommen. Im Rahmen einer Folgeanalyse wurden deshalb Ausmasse von Seitenerosionen am Gerinnebett der Aare basierend auf numerischen Modellierungen bestimmt und kritische Uferbereiche entlang des Zwilag-Geländes identifiziert (Kuhlmann et al. 2022). Die Modellierung zeigt, dass auch bei einem 10'000-jährlichen Abflussszenarium im Bereich des Anlagenperimeters keine kritischen lateralen Erosionen zu erwarten sind. Es ist anzufügen, dass dafür – mindestens streckenweise – die gegenwärtige Schutzwirkung des Böschungsbereichs durch die Ufervegetation / Ufersicherung vorausgesetzt wird.

---

<sup>12</sup> Das Versagen wasserbaulicher Einrichtungen wurden ebenfalls im Rahmen der EXAR-Studie modelliert. Für den Beurteilungsperimeter PSI oder Beznau haben solche Ereignisse aber keine Auswirkungen. Beispielsweise würde die Flutwelle infolge eines Sperrenbruchs des Sihlsees spätestens bei den Sihl-Durchlässen am Hauptbahnhof Zürich zu einer grossflächigen Überschwemmung führen, wodurch stromabwärts beim Anlagenperimeter nur ein stark gedämpfter Anstieg des Abflusses der Aare zu erwarten wäre (Andres et al. 2021).

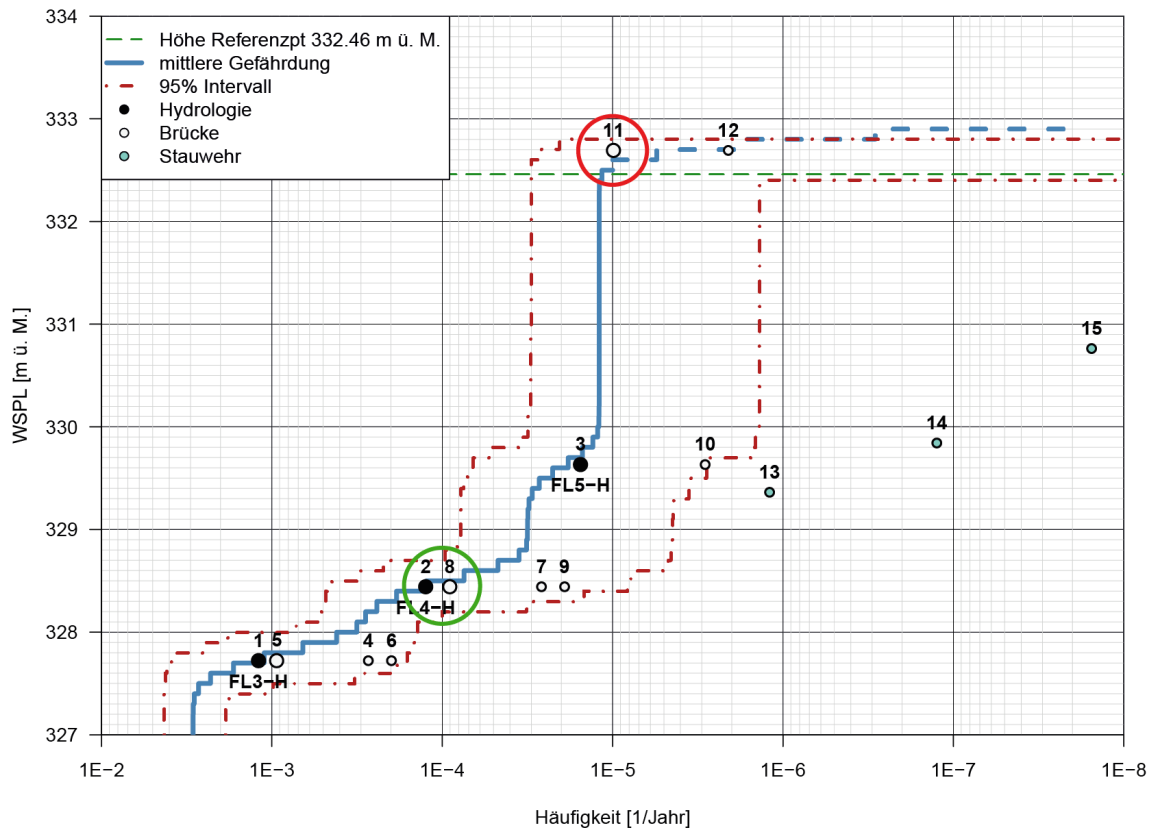


Fig. 3-1: Gefährdungskurve für den Beurteilungsperimeter PSI: Wasserspiegellage (WSPL)

Bei einer Überschreitungshäufigkeit von  $10^{-4}$ /Jahr (grün umrandet) gibt es kein Szenarium, das die Kote des Referenzpunkts erreicht (grün gestrichelt). In Kombination mit einer Verklauung der PSI-Brücke ist für ausgewählte Abflussszenarien jedoch eine Überflutung des Referenzpunkts (aber nicht des Anlagenperimeters) möglich. Die Überschreitungshäufigkeit dafür ist höchstens  $10^{-5}$ /Jahr (rot umrandet). Schwarze Punkte: Initialereignisse, weiße Punkte: Ereignisse mit Einbezug der Brücke (Andres et al. 2021).

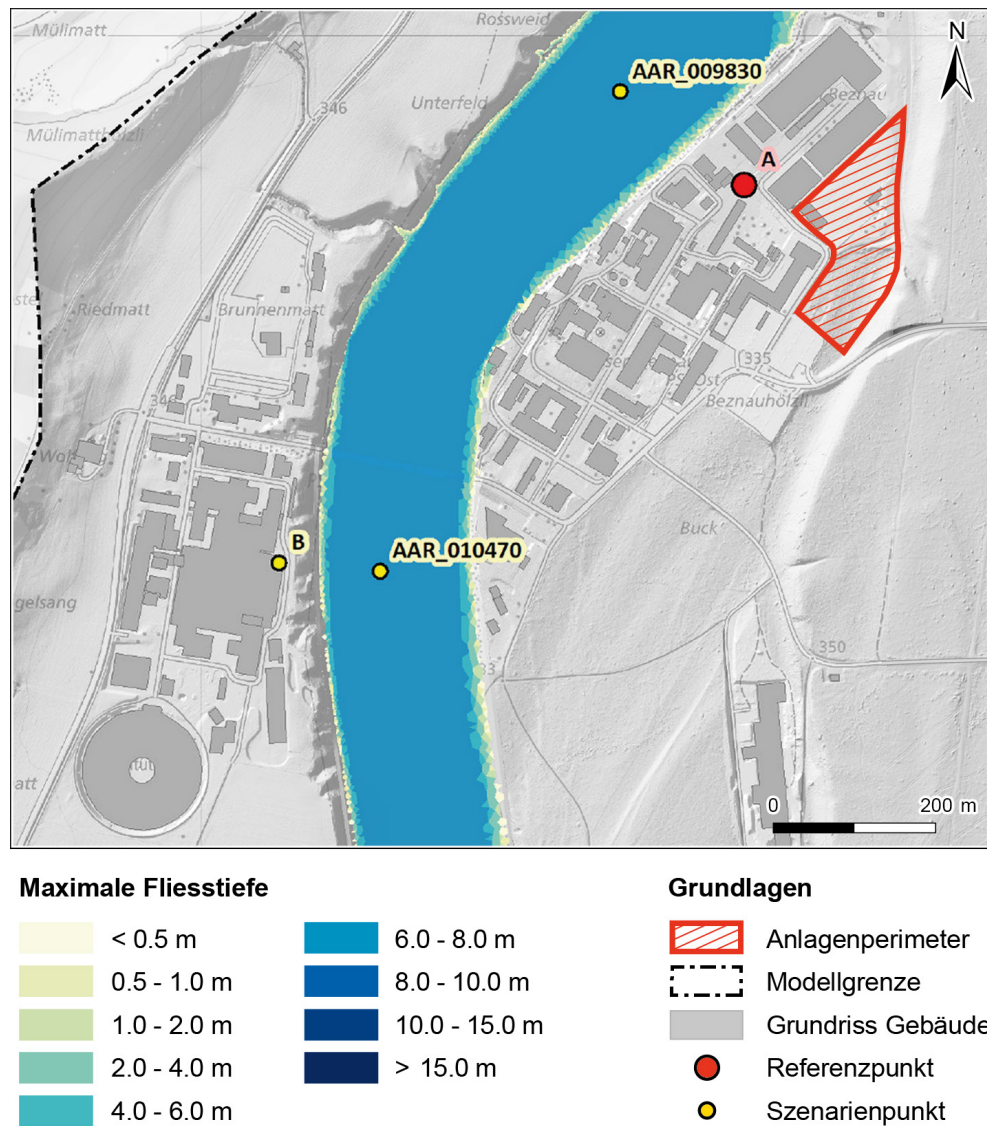


Fig. 3-2: Maximale Fliesstiefen während der gesamten Simulationsdauer für ein Hochwasser-szenarium mit einer Überschreitungshäufigkeit von ca.  $10^{-4}$ /Jahr (Pkt. 2 in Fig. 3-1)  
 Das Wasser wird ausschliesslich im Gerinne der Aare abgeleitet und führt nicht zu einer Überflutung im Bereich des Anlagenperimeters (Andres et al. 2021).

## 4 **Fazit und Bewertung**

Die Ergebnisse der vorliegenden Analyse zeigen – zusammen mit den zahlreichen bereits bestehenden Studien – dass für den Standort der Brennelementverpackungsanlage keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen vorliegen:

- Ein starkniederschlagsbedingter Oberflächenabfluss aus der Umgebung fliesst topografisch bedingt nicht in bedeutenden Mengen zum Anlagenperimeter.
- Durch Starkniederschläge induzierte gravitative Ereignisse wie grössere Hangrutschungen können infolge der lokalen geologischen Bedingungen ausgeschlossen werden
- Der Standort ist vor Hochwasser geschützt, auch bei extremen Wasserständen der Aare; dies gilt auch in Kombination mit dem Versagen von wasserbaulichen Einrichtungen.

Der Standort ist für den Bau und Betrieb einer BEVA geeignet.

## 5 Literaturverzeichnis

- Andres, N., Steeb, N., Badoux, A. & Hegg, C. (Hrsg.) (2021): Extremhochwasser an der Aare. Hauptbericht Projekt EXAR. Methodik und Resultate WSL Berichte 104. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- Daten EXAR (2023): Projekt «EXAR», Niederschlagsdaten des GWEX-Wettergenerators für die Stationen Beznau, Bülach, Kaiserstuhl, Laufenburg und Zürich Fluntern, übermittelt durch D.Viviroli (GI-UZH) am 5.4.2023.
- Die Botschaft (1931a): Die Unwetterkatastrophe vom 29./30. Mai. Die Botschaft 64/3.6.31.
- Die Botschaft (1931b): Schweres Unwetter über dem Bezirk Zurzach und Umgebung. Die Botschaft 63/1.6.31.
- Die Botschaft (2013): Nr. 88, 31.7.2013. Bürli Druck, Döttingen.
- ENSI (2018): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-A05/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- Fallot, J.-M., Hertig, J.-A., Receanu, R.G. & Zeimet, F. (2017): Détermination des précipitations et des crues extrêmes en Suisse à l'aide de la méthode PMP-PMF. BSGLG 68, 77-96.
- Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A. & Zeller, J. (1992): Hydrologischer Atlas der Schweiz – Tafel 2.4. Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. BAFU, Bern.
- Geo7 (2018): Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz. Technischer Bericht. BAFU, SVV & VKG.
- Grebner, D. & Roesch, T.: Flächen-Mengen-Dauer-Beziehungen von Starkniederschlägen und mögliche Niederschlagsgrenzwerte in der Schweiz. Projektschlussbericht NFP 31, ETH Zürich. Vdf Hochschul-Verlag.
- Jäckli, H. & Ryf, W. (1978): Die Grundwasserverhältnisse im unteren aargauischen Aaretal. Wasser Energie Luft 70/3-4, 53-61.
- Jensen, H., Lang, H. & Rinderknecht, J. (1997): Hydrologischer Atlas der Schweiz – Tafel 2.4<sup>2</sup>. Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. BAFU, Bern.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Februar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Kuhlmann, M., Ballmer, M., Vonwiller, L., Perona, P. & van Mol, R. (2022): Ufererosionsanalyse PSI/Zwilag. Numerische Modellierung basierend auf Gefährdungsszenarien der EXAR-Studie. Technischer Bericht ZWILAG Dok. Nr. ZWI 2510/D00288. TK Consult AG, Zürich.

- Messerli, A. (2014): Bedürfnis-Abklärung für eine Internet-Plattform für Niederschlags-Extremwert-Statistiken. Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 252. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz.
- Nagra (2024a): Geologische Prognose mit bautechnischer Empfehlung für den Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-40.
- Nagra (2024b): Meteorologische und klimatologische Verhältnisse am Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-35.
- Nagra (2025): Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage - Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-02.
- NCCS (2018a): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. Technical Report. National Centre for Climate Services NCCS, Zurich.
- NCCS (2018b): CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services NCCS, Zurich.
- (NCCS) (Hrsg.) (2021): Klimawandel im Kanton Zürich. Was geschah bisher und was erwartet uns in Zukunft? National Centre for Climate Services NCCS, Zürich.
- Pfäffli, M., Baer, P., Sutter, A., Irniger, A. & Hunziker, R. (2021): Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht E Projekt EXAR. Hydraulische Modellierungen. ARGE GEOTEST-HZP-IUB, Zollikofen, Aarau, Bern.
- SMZA (1931): Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt 1931. SMZA.
- Staudinger, M. & Viviroli, D. (2020): Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht A Projekt EXAR. Hydrometeorologische Grundlagen. Universität Zürich.
- Umbricht, A., Fukutome, S., Liniger, S., Frei, C. & Appenzeller, C. (2013): Seasonal Variation of Daily Extreme Precipitation in Switzerland. Scientific Report MeteoSwiss No. 97. Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss.
- Viviroli, D., Sikorska-Senoner, A.E., Evin, G., Staudinger, M., Kauzlaric, M., Chardon, J., Favre, A.C., Hingray, B., Nicolet, G., Raynaud, D., Seibert, J., Weingartner, R. & Whealton, C. (2022): Comprehensive space-time hydrometeorological simulations for estimating very rare floods at multiple sites in a large river basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22/9, 2891-2920. DOI: 10.5194/nhess-22-2891-2022.
- Wüthrich, C., Scherrer, S., Begert, M., Croci-Maspoli, M., Marty, C., Seiz, G., Foppa, N., Konzelmann, T. & Appenzeller, C. (2010): Die langen Schneemessreihen der Schweiz. Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 233. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz.
- Zeimetz, F., Schaepli, B., Artigue, G., Hernández, J.G. & Schleiss, A.J. (2018): Swiss Rainfall Mass Curves and their Influence on Extreme Flood Simulation. *Water Resources Management* 32/8, 2625-2638. DOI: 10.1007/s11269-018-1948-y.
- Zeller, J., Geiger, H. & Röthlisberger, G. (1992): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes Bd. 9. Schweizer Mittelland und Jura. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.



## Anhang A Ermittlung der massgebenden Niederschläge

### A.1 Vorgehen

Die nachfolgende Diskussion zur Ermittlung der massgebenden Niederschlagswerte basiert auf folgenden Voraussetzungen und Randbedingungen:

- Die Abschätzung von Gefährdungen des Perimeters aus Oberflächenabfluss ist für eine Wiederkehrperiode von 1'000 bzw. 10'000 Jahren zu ermitteln. Es wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass das auslösende Niederschlagsereignis die gleiche Jährlichkeit hat.
- Das massgebende Niederschlagsereignis findet wegen der beschränkten Grösse des Einzugsgebiets (vgl. Kap. 2.1.1) lokal statt. Es werden Punktniederschläge betrachtet. Daten werden von Stationen im betrachteten Einzugsgebiet und von solchen in der Nähe beigezogen.

Ein derart seltenes Ereignis zu ermitteln, erfordert den Rückgriff auf Extremwertstatistiken. Vorhandene Extremwertstatistiken basieren auf Niederschlagsmessreihen von einigen zehner Jahren Länge, d.h. der gesuchte Wert befindet sich weit im Extrapolationsbereich mit den entsprechenden Unsicherheiten. Um dies zu umgehen, wird bei der Extrapolation auf Datenreihen von längerer Dauer abgestützt. Quellen der Unsicherheit sind bei dieser Fragestellung zudem nicht nur die Seltenheit der vorherzusagenden Ereignisse, sondern auch die Qualität der Messreihen, die Methoden der Auswertung, die äusseren Einflüsse während den vergangenen Beobachtungsperioden und die zukünftige Entwicklung. Eine breitere Betrachtung der Datenbasis soll dabei helfen, die Belastbarkeit der Resultate vernünftig einzuschätzen. Aus diesen Gründen fiel der Entscheid auf folgendes Vorgehen:

- Bestehende Datenreihen bzw. deren diverse Auswertungen werden für eine generelle Einordnung des Starkniederschlagsgeschehens in der lokalen Umgebung des Anlagenperimeters zugezogen und die Unsicherheiten interpretiert.
- Ausgangspunkt dafür sind Tagesniederschläge bzw. 24h-Niederschläge<sup>13</sup>, weil die Datenbasis für diese Niederschlagsdauer am grössten ist (lange Messreihen).
- Um eine extreme Extrapolation zu umgehen, werden für die Abschätzung von 24h-Werten mit sehr hoher Jährlichkeit synthetisch generierte Datenreihen basierend auf Parametern von ausgewählten Messstationen aus dem Projekt «EXAR» verwendet (Daten EXAR 2023).
- Dieser Datensatz wurde für überregionale Ereignisse entwickelt und ist deshalb nur für längere Niederschlagsdauern verwendbar. Für Ereignisse von kürzerer Dauer werden die Werte ausgehend vom 24h-Niederschlag unter Verwendung von bestehenden Niederschlags-Intensitäts-Diagrammen abgeschätzt.
- Die physikalische Plausibilität der ermittelten Starkniederschläge wird durch den Vergleich der Ergebnisse mit dem maximal möglichen Punktniederschlag (PMP – Probable Maximum Precipitation) am gleichen Ort überprüft.

---

<sup>13</sup> Tagesniederschlag: Niederschlagssumme von UTC 06:00 bis 06:00 Folgetag. 24h-Niederschlag: Niederschlagssumme über 24x1 Stunde. In diesem Berichtstext als gleichwertig verwendet. Der Jahreshöchstwert eines 24h-Niederschlags ist jedoch tendenziell höher als der des Tagesniederschlags.

## A.2 Datengrundlage

Für dieses Vorgehen standen die folgenden Daten und Grundlagen zur Verfügung:

- Die sogenannten «Blauen Bände» (Zeller et al. 1992) mit Niederschlags-Intensitäts-Diagrammen aus Datenreihen bis in die 1970-er Jahre, Auswertungen ohne Vertrauensintervalle
- Der Hydrologische Atlas der Schweiz (HADES), basierend auf in Geiger et al. (1992) und Jensen et al. (1997) aufgeführten Datenreihen
- Die Extremwertanalysen von MeteoSchweiz<sup>14</sup> für Datenreihen ab 1960 bis heute und mit längster Messperiode (Stand 2022), Auswertungen mit Vertrauensintervallen
- Kartographische Darstellungen<sup>15</sup>, basierend auf in MeteoSchweiz aufgeführten Datenreihen
- Die generierten Niederschlagsdaten des Projekts «EXAR» in stündlicher Auflösung für ausgewählte Stationen (Daten EXAR 2023)
- Kartographische Darstellung des PMP für den 24h-Niederschlag (Rasterdaten in 2 × 2 km Auflösung), im Zusammenhang mit dem Projekt CRUEX++<sup>16</sup>
- Auswertungen von ausgewählten Datensets im Rahmen dieser Untersuchungen

### A.2.1 Generierte Niederschlagsereignisse

#### Wettergenerator

Für das Projekt EXAR wurde der Wettergenerator GWEX eingesetzt, mit dem Ziel, das statistische Verhalten von Wetterereignissen, insbesondere von extremen, zu reproduzieren, um eine sehr lange Zeitreihe von Niederschlägen zu simulieren. Ausgehend von 3d-Niederschlägen wurden für 105 Stationen im Einzugsgebiet der Aare 3'000 Szenarien mit einer Länge von je hundert Jahren generiert. Unter Verwendung von meteorologischen Analoga wurden die 3d-Ereignisse auf einen Tag und schliesslich auf stündliche Werte disaggregiert. Diese Granularität war notwendig für die in EXAR erforderliche Anwendung von Niederschlags-Abflussmodellen in den diversen kleineren Teileinzugsgebieten (Zubringer zur Aare).

Die 100-Jahr-Blöcke werden alle als unabhängige Realisierungen des Wettergenerators betrachtet und können beliebig zu längeren Reihen verbunden werden, was der Grund für ihre Verwendung für die vorliegende Fragestellung ist. Eine Aneinanderreihung von mehreren Blöcken wird im Folgenden als «Szenario» bezeichnet. Der Wettergenerator ist in Viviroli et al. (2022) und in den dort zitierten Quellen im Detail beschrieben.

---

<sup>14</sup> MeteoSchweiz, online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/laengste-zeitperiode.html> und <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/standardperiode.html>

<sup>15</sup> MeteoSchweiz, online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/ext/climate-extremes-maps.html>

<sup>16</sup> <https://cruex.crealp.ch>, diverse Abrufe

Für die Weiterverwendung der Daten aus dem Wettergenerator für die vorliegenden Betrachtungen sind die folgenden Limitationen wichtig:

- Der Wettergenerator basiert auf meteorologischen Beobachtungen 1930 – 2014. Diese lassen kein Abflachen und keine Tendenz hin zu einem Plateauwert erkennen, und folglich ist auch bei den erzeugten Starkniederschlagsszenarien kein solches Abflachen zu erwarten. D.h. die physikalischen Grenzen der verwendeten Parameterwerte werden nicht geprüft.
- Erfahrungsgemäss führen konvektive isolierte Kurzereignisse zu Spitzenintensitäten für Punktwerte. Sie sind oft nicht Teil eines längeren Niederschlagsereignisses (z.B. 3 Tage) und deshalb in den Basisdaten des Wettergenerators nicht enthalten<sup>17</sup>. Weil die Kurzereignisse in der Stichprobe fehlen, werden die GWEX-Daten für eine extremwertstatistische Auswertung von Niederschlagsdauern kleiner als 1 Tag nicht verwendet.

### Auswertungen der EXAR-Daten

Im grösseren Umfeld des Anlagenperimeters standen die von EXAR generierten Werte der Stationen Beznau, Laufenburg, Kaiserstuhl, Bülach und Zürich Fluntern in stündlicher Auflösung zur Verfügung (im Folgenden auch mit «Referenzstationen» bezeichnet). Diese Stundenwerte von 300'000 Jahren mussten zu Tageswerten re-aggregiert werden. Es wurden jeweils 100 Blöcke von je 100 Jahren Länge aneinandergereiht, wodurch sich für ein Szenario eine Länge von 10'000 Jahren ergibt. Aus der Gesamtheit der Daten liessen sich so 30 Szenarien bilden. Für jedes Szenario wurde der jährlich höchste 24h-Niederschlag gesucht. Die Aggregation erfolgte über die Aufsummierung der Stundenwerte innerhalb eines 24 Stunden-Fensters mit stündlicher Verschiebung. Die theoretischen Wiederkehrwerte wurden wie in der EXAR-Studie entsprechend der Gringorton plotting position festgelegt; der höchste simulierte Wert eines Szenarios entspricht in den vorliegenden Fällen einer Wiederkehrperiode von 18'000 Jahren.

Zur Ermittlung ausgewählter Wiederkehrwerte mit ihren Vertrauensintervallen / Quantilen steht mit 30 GWEX-Szenarien für die Ermittlung der Vertrauensintervalle / Quantile nur eine begrenzte Datenbasis zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde der Datensatz erweitert: Für jede der 30 Reihen der Jahresmaxima (10'000 Werte) aus den GWEX-Szenarien wurde eine GEV-Verteilung postuliert, deren Parameter bestimmt und 15 weitere Reihen mit je 10'000 random numbers rein stochastisch erzeugt. Somit standen neu pro Station 450 Datenreihen mit Jahresmaxima zur Verfügung. Mit dem neuen vergrösserten Stichprobenumfang liessen sich für die ausgewiesenen theoretischen Wiederkehrperioden (plotting positions) wiederum Mittelwert und ausgewählte Quantile der jeweils 450 Niederschlagswerte ableiten. Dabei wurde angenommen, dass diese Werte für die betrachteten Wiederkehrperioden wiederum einer GEV-Verteilung folgen.

In Tab. A-1 sind die Schätzungen aus dem erweiterten Datensatz für die Wiederkehrperioden 1'000 und 10'000 Jahre für die fünf Stationen zusammengestellt.

---

<sup>17</sup> MeteoSchweiz stellt für jede Station und jede Niederschlagsdauer eine Liste der Jahresmaxima mit Datum zur Verfügung. Stationen mit verfügbaren Min.-/Std.-Summen im Umfeld des Anlagenperimeters bestätigen, dass die Höchstwerte von kurzen (1 bis 3 Std.) Niederschlägen in der Regel nicht auf das gleiche Datum fallen wie die längeren (12 bis 24 Std.).

Tab. A-1: Mittlere 1'000- und 10'000-jährliche Wiederkehrwerte

Hergeleitet aus 450 rein stochastisch erzeugten random numbers-Reihen auf der Basis der 30 GWEX-Szenarien. Reihenlänge: 10'000 Jahre.

Station	Wiederkehrperiode 1'000 Jahre			Wiederkehrperiode 10'000 Jahre		
	Mittel	5%-Quantil	95%-Quantil	Mittel	5%-Quantil	95%-Quantil
	mm/24h					
Beznau	116	111	123	137	127	167
Laufenburg	122	118	134	144	134	170
Bülach	125	120	136	154	139	195
Kaiserstuhl	114	110	124	140	127	175
Fluntern	149	141	160	186	167	240

Die synthetischen random numbers-Szenarien haben zahlreiche neue Spitzenwerte generiert. Die höchsten liegen im Bereich des aktuell physikalisch Möglichen (PMP, vgl. Anhang. A.2.2). Die Streubreite ist entsprechend gross und wird als realistisch eingeschätzt.

## A.2.2 Probable Maximum Precipitation (PMP)

Betrachtungen von sehr seltenen Niederschlagsereignissen führen zur Frage, welches Niederschlagsvolumen bei einer gewissen Niederschlagsdauer physikalisch überhaupt möglich ist. Diese Frage wird besonders dann wichtig, wenn die oberen Vertrauensgrenzen der geschätzten Niederschlagsmengen sehr hohe Werte erreichen. Die Grösse ist bekannt unter dem Namen «Probable Maximum Precipitation» oder kurz PMP. Der PMP steht für eine physikalische Grenze einer Niederschlagsmenge ohne bekannte Wiederkehrperiode.

Für das Schweizer Mittelland werden in Grebner, D. & Roesch pauschal 280 mm für den PMP des Tagesniederschlags und 165 mm für den 3h-Niederschlag genannt. Diese Werte gelten für Punktwerte; sie nehmen mit zunehmender Grösse des berechneten Gebiets ab, wofür Abminderungskurven zur Verfügung stehen.

Regional differenziertere Werte für den PMP wurden mit atmosphärischen Simulationen, bzw. der Maximierung meteorologischer Parameter für die ganze Schweiz für einen Raster von  $2 \times 2$  km hergeleitet (Fallot et al. 2017). Es wurden drei Windrichtungen (Südost nach Südwest, Nord nach Nordost, West nach Nordwest) unterschieden, welche zu den sektoriell höchsten PMP-Werten führen. PMP-Karten aus Simulationsrechnungen wurden für den 24h- und den 3h-Niederschlag, sowohl für jede Windrichtung einzeln als auch für die zusammengeführten Maxima erstellt<sup>18</sup>. Der Anlagenperimeter befindet sich in einer Zone mit Werten von ca. 220 mm/24h (vgl. Fig. A-1). Die PMP-Angaben werden im Weiteren als mutmasslich oberer Grenzwert für die hergeleiteten 10'000-jährlichen Niederschlagswerte aus den vorhandenen Datenreihen verwendet.

<sup>18</sup> Die Karte stellt, mit Werten für drei Windrichtungen gleichzeitig, keine realistische Situation dar.

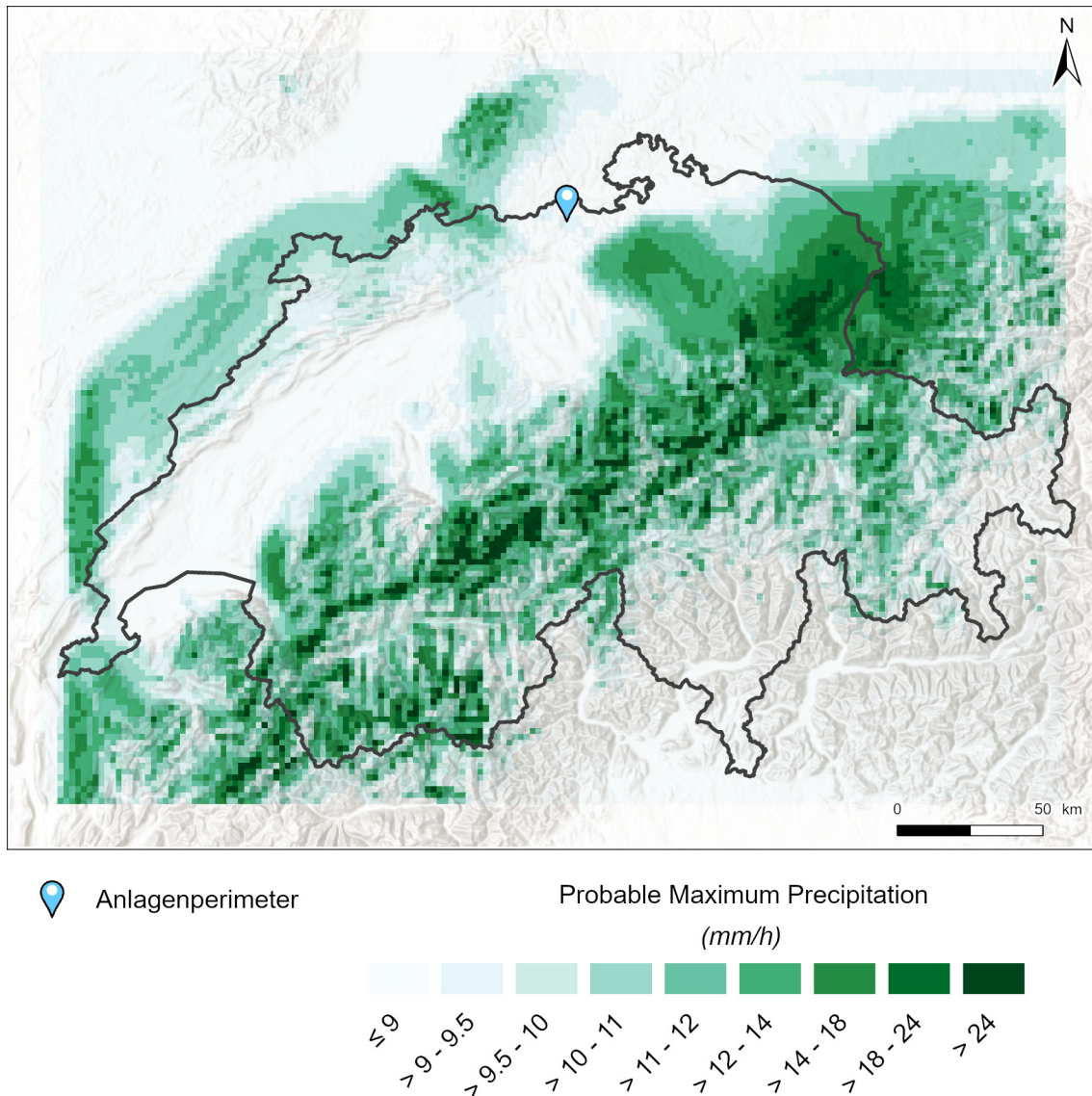


Fig. A-1: Probable Maximum Precipitation für den 24h-Niederschlag bei West-Nordwest-Wind

Punktwerte, Quelle Rohdaten: [cruex.crealp.ch/documentation](http://cruex.crealp.ch/documentation)

### A.3 Analysen

In den folgenden Kapiteln werden die Auswertungen der EXAR-Daten, des PMP und weiterer referenzierte Quellen in Hinsicht auf sehr seltene Niederschläge analysiert und die Unsicherheiten und allfällige Inkonsistenzen evaluiert.

#### A.3.1 Tagesniederschlag

Für den regionalen Überblick stehen kartographische Darstellungen von extremwertstatistischen Auswertungen von Tagesniederschlägen für seltene Wiederkehrperioden zur Verfügung. Der Vergleich einiger Beispiele zeigt, dass die ermittelten Niederschlagswerte je nach Quelle erheb-

lich variieren. Dies kann eine Folge der Datengrundlage (Messperiode), der Auswertemethode der Daten oder der Interpolationsmethode (Geiger et al. 1992 und Jensen et al. 1997) zwischen den Stationen sein.

Ein detaillierteres Bild von der Variabilität im engeren Umkreis des Anlagenperimeters geben die Wiederkehrwerte an den einzelnen Messstationen. In Tab. A-2 sind Werte für 24h-Niederschläge für Wiederkehrperioden von 10 bis max. 500 Jahre aufgeführt. Auffallend sind die Differenzen bei Stationen mit verschiedenen Auswerteperioden, besonders im Extrapolationsbereich (ab Wiederkehrperiode 100 Jahre). Zum einen gelten die Jahre 1901 – 1970, d.h. die Hauptbasis der «Blauen Bände», als «Desaster Gap» (Messerli 2014), denn die Datenreihen enthalten im Vergleich zu späteren Reihen weniger Extremereignisse. Zum anderen haben methodische Änderungen stattgefunden, z.B. haben andere Extremalverteilungen die früher verwendete Gumbel-Verteilung abgelöst.

Allerdings führen jüngere Datenreihen auch bei gleichen Quellen der Bearbeitung zu höheren Werten. Hier seien die Stationen Kaiserstuhl und Laufenburg erwähnt mit Differenzen von +15 bis +25 % für den 300-jährlichen Wert. Von diesem Trend ist offenbar die ganze Region NNO-Schweiz betroffen (siehe Fig. A-2), wie eine Untersuchung der Eintagesniederschläge 1901-2014 zeigt (NCCS 2018a).

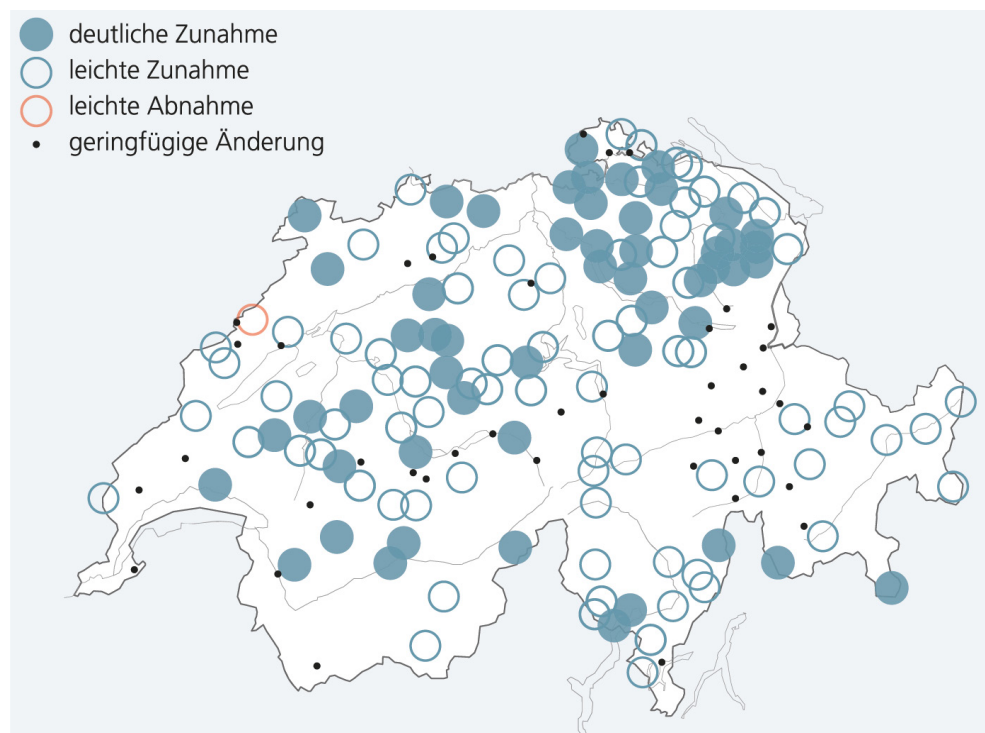


Fig. A-2: Beobachteter Trend 1901-2014 der stärksten Eintagesniederschläge des Jahres  
Zunahmen sind vor allem in der Region der Nordostschweiz zu erkennen (NCCS 2018b)

Tab. A-2: Geschätzte Wiederkehrwerte von Tages-/24h-Niederschlägen verschiedener Messstationen und Messperioden in der Umgebung des Anlagenperimeters

Auswertungen gemäss Zeller et al. (1992) und MeteoSchweiz (siehe Fussnote 14) bzw. Auswertungen im Rahmen dieser Studie (blau hinterlegt); \* Qualität aus Sicht MeteoSchweiz fragwürdig; \*\* mit der 2. Extremalverteilung beschrieben, \*\*\* GWEX Wettergenerator

Station	Messreihe	10a	50a	100a	300a	500a	Höchster gemessener bzw. generierter Tages-/24h-Wert	
		[mm/d]						Datum
Beznau	1901-1970	63	83	90	103	110	110	29.05.1931
Beznau	1901-2010	64	80	88	100	k.a.	k.a.	k.a.
Beznau	1989-2022	66	82	89	100	105	95	29.07.2013
Beznau	***	70	85	93	104	110	168	
Laufenburg	1914-1987	66	82	85	100	107	96	10.08.1945
Laufenburg	1915-2021	67	88	99	118	k.a.	97	10.08.1945
Laufenburg	1961-2011	70	99	116	150	k.a.	94	13.06.2000
Laufenburg	***	70	90	100	112	115	182	
Bözberg	1912-1987	60	75	87	95	99	90	20.06.1986
Bözberg*	1915-2021	62	80	88	k.a.	k.a.	136	18.05.1994
Brugg	1961-1987	67	76	82	94	98	68	07.08.1978
Ehrendingen	1976-2021	71	95	107	128	k.a.	95	18.05.1994
Ehrendingen	1961-2021	72	97	109	131	k.a.	95	18.05.1994
Baden	1901-1987	68	82	88	102	108	91	21.09.1968 & 20.05.1931
Otelfingen**	1924-1978	70	105	135	180	190	103	21.09.1968
Otelfingen	1963-2021	71	98	113	140	k.a.	103	21.09.1968

### A.3.2 Niederschlags-Intensitäts-Diagramme

Niederschlags-Intensitäts-Diagramme zeigen die Abhängigkeit der Niederschlagsintensität von der Niederschlagsdauer für einen bestimmten Punkt (Messstation). Solche Diagramme sind von den in den «Blauen Bänden» bis etwa 1970 ausgewerteten Datenreihen vorhanden (vgl. auch Tab. A-2), jedoch nur auf rudimentärer Basis, was die Niederschlagsdauern kleiner als 1 Tag anbelangt. Seitdem in den 1980-er Jahren das Messnetz automatisiert wurde, stehen nun auch permanent Minuten- und Stundensummen zur Verfügung. Bei umgerüsteten Stationen können somit alte Diagramme mit den neueren Daten verglichen und verifiziert werden. Im Umfeld des Standorts ist dies für die Daten der Station Beznau (und Würenlingen) möglich. Im Diagramm in Fig. A-3 sind die Intensitätskurven für die Jährlichkeiten 10, 50, 100 und 300 (neue Datenreihen) oder 500 (alte Datenreihen) aufgetragen. Die neueren Messreihen zeigen vor allem bei den höheren Jährlichkeiten eine Zunahme der Niederschlagsintensitäten. Der funktionale Zusammenhang zwischen Niederschlagsdauer und -intensität hat sich jedoch nicht fundamental verändert. Ein Hinweis auf allgemein anerkannte Differenzen bei Messung durch mehrere Stationen am gleichen Ort gibt der Vergleich der beiden benachbarten Stationen Beznau und Würenlingen, die 2 km auseinander liegen und die bei den kurzen Niederschlagsdauern doch erhebliche Differenzen zeigen (300-jährlicher 1h-Niederschlag knapp 30%, siehe Tab. A-3).

Zum Vergleich ist auch die Kurve des PMP eingezeichnet und liegt deutlich über den Kurven der Messreihen und beträgt das 1.6- bis 2-fache der 300-jährlichen Werte.

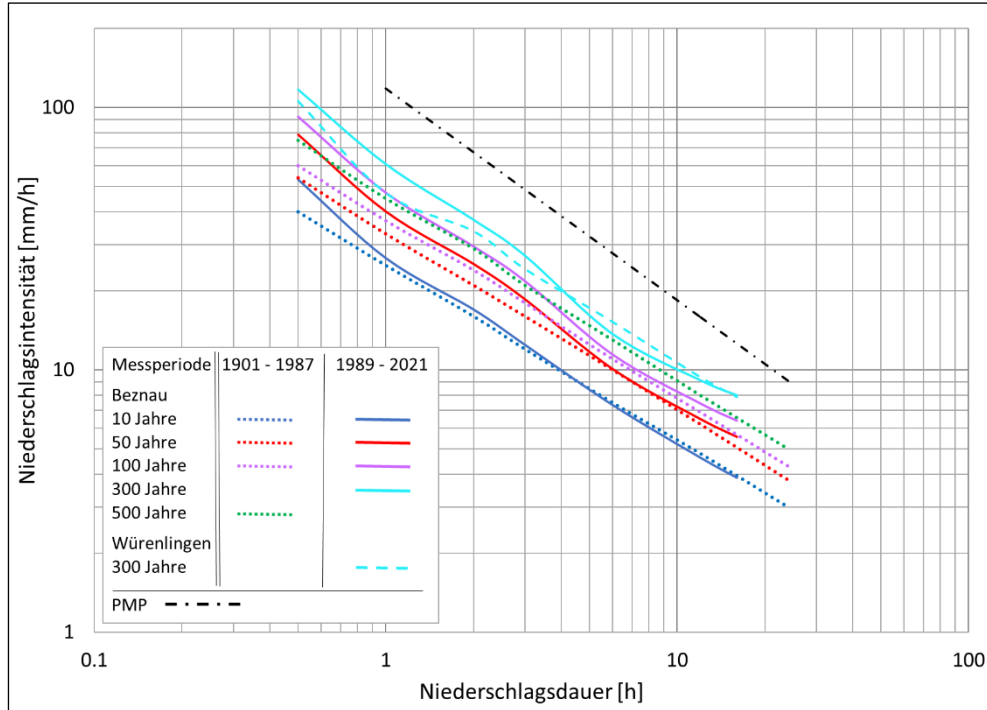


Fig. A-3: Niederschlagsintensitätsdiagramm der Station Beznau für die Messperioden 1901 bis 1987 (punktierte Linien) und 1989 bis 2021 (ausgezogene Linien)

Von der benachbarten Station Würenlingen (gestrichelte Linie) sind die 300-jährlichen Werte zum Vergleich ebenfalls eingetragen (Zeller et al. (1992) und MeteoSchweiz (abgerufen am 15.2.23, siehe Fussnote 14)).

Tab. A-3: Vergleich der Niederschlagsintensitäten der Messstationen Würenlingen und Beznau für unterschiedliche Niederschlagsdauern (ND), Werte für die beste Schätzung und das 95 %-Konfidenzintervall (KI), MeteoSchweiz (siehe Fussnote 14)

ND	Würenlingen				Beznau				Δ 100a / 300a
	100a	95%-KI	300a	95%-KI	100a	95%-KI	300a	95%-KI	
[h]	[mm/h]								[%]
0.5	82.6	60.8-146.6	105.6	69.6-224.0	92.2	66.4-166.4	117.0	76.4-242.4	12 / 11
1	38.1	28.4-65.1	47.1	32.3-95.3	47.3	34.6-85.6	60.8	39.3-133.7	24 / 29
2	27.2	19.3-49.7	33.7	21.8-76.3	29.5	20.8-55.2	37.3	23.2-87.5	8 / 11
3	19.7	14.6-35.2	24.2	16.3-51.8	21.8	15.2-40.2	27.2	16.9-62.1	11 / 13
6	12.2	8.7-22.0	15.2	9.8-34.1	11.4	8.7-19.9	13.7	9.7-28.2	-6 / -10
12	7.7	5.9-13.7	9.4	6.5-19.8	7.4	5.6-13.0	9.1	6.3-19.1	-4 / -3
16	6.5	4.9-11.5	7.9	5.4-17.1	6.4	4.6-10.7	8.0	5.2-15.7	-2 / 2

### A.3.3 Klimawandel

Die vorangegangenen Betrachtungen zu den Starkniederschlägen an den Stationen im grösseren Umfeld des Anlagenperimeters zeigen in den letzten 30 bis 50 Jahren bereits einen Trend zu höheren Intensitäten bei gleicher Niederschlagsdauer und Wiederkehrperiode. Für die Zukunft wird für Intensitäten von 1 bis 24h-Niederschlägen von einer Zunahme von 6 – 7 % pro Grad Temperaturerhöhung ausgegangen (NCCS 2018a).

Simulationen ausgehend von der Referenzperiode 1981-2010 haben ergeben, dass sich der 100-jährliche Tagesniederschlag in der Schweiz je nach Jahreszeit und Region bis 2085 um 10 – 25 % erhöhen wird (NCCS 2018a). In der Nordostschweiz sind es während der Sommermonate (Zeit der extremen Starkniederschläge) etwa 20 %. Die Unsicherheit bei dieser Abschätzung ist allerdings gross und reicht von -5 % bis +40 % des Mittels für das 95 % Vertrauensintervall.

Ob für Niederschläge mit noch selteneren Wiederkehrperioden und/oder kürzeren Ereignisdauern höhere Zunahmen zu erwarten sind, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Mit einem Zuschlag von 20 % bewegen sich die in Anhang A.5 tabellierten 10'000-jährlichen Werte beim Anlagenperimeter im Bereich des PMP, d.h. der aktuell physikalisch möglichen Intensitätsobergrenze. Ob sich diese Grenze zukünftig mit dem Klimawandel auch nach oben schiebt, linear oder sogar geografisch unterschiedlich, ist offen.

### A.3.4 Ganglinie

Aus Niederschlagsvolumen und -dauer ergibt sich die mittlere Niederschlagsintensität eines Ereignisses. Allerdings ist die Intensität variabel während eines Ereignisses. Bei der Modellierung von einem Niederschlag konstanter Intensität (Blockregen) auszugehen, vereinfacht deshalb die Realität stark. Andererseits ist die Variabilität der Niederschlagsverläufe zu gross, um diese detailliert in Modellganglinien abzubilden, weshalb man auf typische Charakteristika und Muster der Ganglinien zurückgreift. Feine Differenzierungen sind jedoch nicht möglich.

Untersuchungen geben Hinweise sowohl für keine spezifischen<sup>19</sup> als auch für tendenzielle Ganglinienmuster in Abhängigkeit der Niederschlagsdauer (Zeimetz et al. 2018), wobei hier auch regionale Unterschiede festzustellen sind. Kurze Ereignisse (Stundenbereich) sollen im Mittelland zu anfangsbetonten Niederschlagsganglinien tendieren, d.h. die Intensitätsspitze wird im ersten Drittel der Dauer erreicht. Längere Ereignisse (grösser 1 Tag) zeigen eher eine mittebetonte Ganglinie mit hohen Intensitäten erst nach einem längeren Vor-Regen.

Für die Gefährdungskarte «Oberflächenabfluss Schweiz» (Basis 100-jährlicher 1h-Niederschlag) wurde für die Modellrechnungen eine einheitliche anfangsbetonte Ganglinienform gewählt (Geo7 2018). Für die kurzen Modellniederschläge orientieren sich die in dieser Untersuchung verwendeten Intensitätsverläufe deshalb an dieser Form. Für die 24h-Varianten wird ein einfaches Schema eines mittebetonten Verlaufs gewählt.

## A.4 Vorbedingungen beim Ereignis

### Feuchtebedingungen

Die Feuchtebedingungen an der Oberfläche zu Beginn eines Ereignisses entscheiden, wie schnell der Abflussprozess einsetzen kann. Nach Trockenperioden ist ein bestimmtes Niederschlagsvolumen für die Benetzung erforderlich, damit Infiltration und Oberflächenabfluss überhaupt stattfinden können. Dieses Volumen (sog. Anfangsverlust) steht für den Oberflächenabfluss nicht

---

<sup>19</sup> <https://cruex.crealp.ch/>, abgerufen am 15.05.2024.

mehr zur Verfügung. Bei nassen Vorbedingungen, z.B. nach einem Vor-Regen, entfallen Anfangsverluste und die Verzögerungszeit bis zum Abflussbeginn.

Die standardisierten Annahmen im Oberflächenabfluss-Modell für die Vorbedingungen sind insofern konservativ, als dass grundsätzlich von nassen Vorbedingungen ausgegangen wird, d.h. die Interzeption und das Feuchtedefizit an der Oberfläche werden immer vernachlässigt.

## Schnee

Eine Schneedecke bietet sowohl Speicherwirkung für Niederschlagswasser als auch zusätzliches Wasseräquivalent. Zum einen dämpft sie die Abflussganglinie, zum andern generiert der Wärmeintrag des Regenwassers Schmelzwasser, das zusätzlich zum eigentlichen Niederschlag zum Abfluss beitragen kann, was an dieser Stelle besonders interessiert.

Eine Schneedecke vor Ereignisbeginn in den Gebieten des Anlagenperimeters setzt voraus, dass das extreme Niederschlagsereignis auf die Wintermonate fällt. In den Wintermonaten können hohe Tagesniederschläge erwartet werden. Gemäss Umbricht et al. (2013) liegt in der Nordostschweiz die Wahrscheinlichkeit eines 100-jährlichen Tagesniederschlags in den Monaten Mai bis Oktober bei 85 %, in den Monaten November bis April bei 15 %. Unter den zehn höchsten Ereignissen der Messreihen von 14 Stationen in der Nordschweiz<sup>20</sup> finden sich einzelne datiert zwischen November und April; die Niederschlagswerte stehen jedoch nicht an Spitzenpositionen, und auch die grossen Jährlichkeiten (grösser ca. 20 Jahre) werden nicht erreicht (MeteoSchweiz, siehe Fussnote 14). Bei 6 von den 14 Stationen wird kein Winterereignis unter den zehn höchsten gefunden. Extremereignisse kürzerer Dauer treten ausschliesslich in den Sommermonaten auf<sup>21</sup>. Dies bestätigen die Messreihen der Stationen mit verfügbaren Minuten-/Stundensummen in der Projektregion, wo beispielsweise für 2h-Niederschläge in den ersten zehn Rängen kein Ereignis auf die Wintermonate fällt (MeteoSchweiz, siehe Fussnote 14).

Die Kombination von extremem Niederschlagsereignis und bestehender Schneedecke ist aus diesem Grund höchstens für Tagesniederschläge (oder längere Niederschläge) von Bedeutung. Die (Kombinationen von) Randbedingungen zeigen jedoch, dass auch ein solches Szenario für die vorliegende Fragestellung unwahrscheinlich, bzw. vernachlässigbar ist:

- Die Anzahl Schneetage<sup>22</sup> ist dann am grössten<sup>23</sup> (Dezember bis Februar), wenn die Eintretenswahrscheinlichkeit eines extremen Niederschlagsereignisses am geringsten ist.
- Die Eintretenswahrscheinlichkeit eines extremen Niederschlagsereignisses ist dann erheblich (Frühlings- und Herbstmonate), wenn die Anzahl der Schneetage sehr gering ist<sup>24</sup>.
- Der 10'000-jährliche Niederschlag fällt bei vorhandener Schneedecke, d.h. in der kalten Jahreszeit, als Regen.
- Die durchschnittliche maximale Schneehöhe in einem Jahr liegt in Zürich Fluntern (1961-2008) bei 15 cm (Wüthrich et al. 2010). Bei einem mittleren Wasseräquivalent von 10 % ergibt sich eine zusätzliche Niederschlagsmenge aus Schmelze von 15 mm. Dieser Wert liegt im Streubereich der ermittelten 10'000-jährlichen Werte.

---

<sup>20</sup> Beznau, Laufenburg, Bözberg, Brugg, Ehrendingen, Baden, Otelfingen, Oberweningen, Dielsdorf, Kaiserstuhl, Zürich Kloten, Zürich Fluntern, Bülach und Wil bei Rafz

<sup>21</sup> Starkniederschläge - MeteoSchweiz (admin.ch), abgerufen am 27.10.2023

<sup>22</sup> Schneetag: Schneehöhe grösser 1 cm

<sup>23</sup> Klima-Indikatoren - MeteoSchweiz (admin.ch), abgerufen am 27.10.2023: Trendwert 2022 für Station Zürich Fluntern: Dezember bis Februar 23 Tage,

<sup>24</sup> Trendwert 2022 für Station Zürich Fluntern: März bis Mai und September bis November total 5 Tage (MeteoSchweiz, 2023. Applikation «Klimaindikatoren», abgerufen am 27.10.2023)

- Der Trend für (Neu-)Schneetage im Mittelland ist rückläufig<sup>25</sup>.
- Schneehöhen im Mittelland nehmen ab.

Die Kombination aus vorhandener Schneedecke und 10'000-jährlichem Niederschlag wird einerseits als wenig realistisch und in Bezug auf den Abflussbeitrag zu einem extremen längeren Niederschlag als eher unbedeutend eingeschätzt, umso mehr, als dass von einer generellen Abnahme der Schneebedeckung im Mittelland ausgegangen werden muss. Schneebedeckung zu Beginn des 10'000-jährlichen Niederschlagsereignisses wird deshalb bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

### **Bodenfrost**

Starker Bodenfrost kann die Bodenoberfläche versiegeln und damit die Infiltration von Niederschlagswasser verhindern, womit dieses hauptsächlich oberflächlich abfließt. Modelltechnisch müsste dieser Effekt mit Abflusskoeffizienten<sup>26</sup> in der Nähe von 1 für die betroffenen Flächen abgebildet werden. Um einen bedeutenden Effekt auf die Abflussmenge zu haben, müssten vor allem die Flächen mit aktuell tief modellierten Abflusskoeffizienten von Bodenfrost betroffen sein, also insbesondere bewaldete und landwirtschaftlich genutzte Flächen im ebenen Gelände.

Zusammenhängende grössere Flächen mit Bodenfrost, welche natürliche Oberflächen massgeblich abdichten, setzen Frost- oder Eistage<sup>27</sup> voraus. Solche sind in der Region des Anlagenperimeters im Winter zwar nicht aussergewöhnlich, werden aber auch schweizweit immer seltener<sup>28</sup>. In Zürich Fluntern wurden 1981 – 2010 im Mittel pro Jahr 75 Frost- und 23 Eistage beobachtet; sie treten im Oktober bis April (Frosttage) bzw. im November bis März (Eistage) auf (NCCS 2021). Für 2022 liegt der Trendwert (1961 – 2022) noch bei 65 Frost- und 13 Eistagen<sup>29</sup>, der Trend ist also rückläufig.

Grossflächiger starker Bodenfrost und das gleichzeitige Auftreten eines extremen Tagesniederschlags in Form von Regen ist in der Umgebung des Anlagenperimeters schwer vorstellbar. Einerseits müsste ein Wärmeeinbruch stattfinden, damit Regen und kein Schnee fällt. Andererseits dürften dieser Wärmeeinbruch und das Regenereignis nicht zu lang und zu extrem sein, weil der Bodenfrost sonst schmilzt und die Oberfläche freigibt. Kurzzeitige Extremniederschläge sind aber wie oben erwähnt in den Wintermonaten eher unwahrscheinlich. Die Kombination aus grossflächigem Bodenfrost und 10'000-jährlichem Niederschlag wird daher als unrealistisch eingeschätzt und deshalb bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

---

<sup>25</sup> <https://www.slf.ch/de/schnee/schnee-und-klimawandel/>, abgerufen am 27.10.2023

<sup>26</sup> Im Zusammenhang mit der nachfolgend verwendeten Modellierung bezeichnet der Abflusskoeffizient  $\Psi$  denjenigen Anteil des Niederschlages  $N$ , der oberflächlich zum Abfluss ( $Q_{Ob}$ ) gelangt ( $Q_{Ob} = \Psi * N$ ).

<sup>27</sup> Frosttag:  $T_{min} < 0$  °C; Eistag:  $T_{max} < 0$  °C [45]

<sup>28</sup> Wetter und Klima von A bis Z - MeteoSchweiz (admin.ch), abgerufen am 27.10.2023

<sup>29</sup> Klima-Indikatoren - MeteoSchweiz (admin.ch), abgerufen am 27.10.2023

## A.5 Fazit

Die extremen Tagesniederschlagswerte liegen für den Anlagenperimeter schweizweit im unteren Bereich und ausserhalb einer Zone mit grossen Gradienten. Sie sind deshalb auch nicht von grossen Unsicherheiten infolge unterschiedlicher Interpolationsmethoden zwischen Stationen betroffen. Der Trend zu extremeren Starkniederschlägen dürfte mit dem aktuellen Klimawandel anhalten. Bei der Wahl von Niederschlägen für zukünftige Ereignisse ist diesem Umstand mit einem Zuschlag Rechnung zu tragen. Bei den betrachteten Stationen haben sich die Parameter für den funktionalen Zusammenhang der Zunahme der Intensität mit abnehmender Niederschlagsdauer nicht wesentlich verändert.

Aufgrund des bisherigen Trends werden für die 24h-Niederschlagswerte das 95 %-Quantil gemäss Tab. A-2 gewählt. Für den zukünftigen Klimawandel wird ein Zuschlag von 20 % festgelegt. Aus den Intensitätskurven der Referenzstationen werden die Intensitätsverhältnisse für die gewünschten Niederschlagsdauern abgeleitet. Die Faktoren  $i_1/i_{24}$  bewegen sich zwischen 10 und 13, für  $i_6/i_{24}$  zwischen 2.6 und 3 und unterscheiden sich bei den betrachteten Referenzstationen in der Nordschweiz nicht wesentlich. Für die Abschätzung der Gefährdung des Anlagenperimeters durch Oberflächenabfluss werden die Werte gemäss Tab. 2-1 verwendet. Aus den Werten in Tab. 2-1 ergibt sich die in Fig. 2-2 dargestellte Intensitätskurve für die 10'000-jährlichen Modellniederschläge. Der Vergleich mit Fig. A-3 zeigt, dass die Intensitäten im Bereich des PMP der Station Beznau zu liegen kommen.