



ARBEITSBERICHT NAB 24-31

Hydrologische Verhältnisse am Standort
der Oberflächenanlage des geologischen
Tiefenlagers

September 2024



ARBEITSBERICHT NAB 24-31

Hydrologische Verhältnisse am Standort
der Oberflächenanlage des geologischen
Tiefenlagers

September 2024

STICHWÖRTER

Geologisches Tiefenlager, gTL, 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 | 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.

Zusammenfassung

Im Zuge des Rahmenbewilligungsgesuchs für das geologische Tiefenlager am Standort Haberstal (Stadel, Kt. Zürich) 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 die Möglichkeit einer externen Überflutung werden die standortspezifischen Verhältnisse sowohl quantitativ (z.B. Ermittlung von Abflüssen aus extremen Starkniederschlägen) 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 infolge von lokalen Starkniederschlägen im Bereich des Anlagenstandorts und in der Umgebung
- Gravitative Gefahren, induziert durch Starkniederschläge

Gefährdungen im Zusammenhang mit grossen anliegenden Fließgewässern haben für den Standort keine Bedeutung. Die Flüsse Glatt und Rhein liegen ausserhalb des topografischen Einflussbereichs; der Standort ist somit vor Flusshochwasser geschützt.

Für die hydrologische Gefährdungsanalyse infolge Oberflächenabfluss wird auf langjährige Datenerhebungen und Analysen zurückgegriffen und für die spezifische Fragestellung durch eigene Analysen und Modellierungen ergänzt.

Starkniederschlagsereignisse führen zu keiner Gefährdung der Anlage. Der Oberflächenabfluss aus der Umgebung wird teilweise in Geländemulden zurückgehalten oder fliesst topografisch bedingt durch die Talebene des Dorfbachs und kann mit geeigneten Massnahmen von der Anlage ferngehalten werden. Durch Starkniederschläge induzierte gravitative Ereignisse wie grössere Hangrutschungen können infolge der lokalen geologischen Bedingungen ausgeschlossen werden bzw. sind in ihrer Ausdehnung begrenzt. Eine Oberflächenerosion ist lokal möglich, ist aber mit entsprechenden Massnahmen zu beherrschen.

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass für den Standort keine für die Auslegung einer Kernanlage ungewöhnlichen Randbedingungen vorliegen. Der Standort ist für den Bau, Betrieb und Verschluss eines geologischen Tiefenlagers bzw. dessen Oberflächenanlage geeignet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Figurenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Niederschlagbezogenes Gefährdungspotenzial des Anlagenperimeters	2
2.1 Charakterisierung des Standorts	2
2.1.1 Einzugsgebietscharakteristik	2
2.1.2 Gelände beim Anlagenperimeter	4
2.1.3 Kiesabbau Rütifeld	4
2.1.4 Hydrologische Besonderheiten.....	4
2.1.5 Folgerungen	5
2.2 Historische Ereignisse	5
2.3 Ermittlung des Niederschlags	6
2.4 Gefährdungspotenzial infolge Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen im Einzugsgebiet des Anlagenperimeters.....	8
2.4.1 Modellierung des Oberflächenabflusses.....	8
2.4.2 Fliesswege und Abflusstiefen	10
2.4.3 Abflussmengen	12
2.5 Gefährdungspotenzial infolge niederschlagsinduzierter gravitativer Gefahren.....	15
3 Fazit und Bewertung	16
4 Literaturverzeichnis	17
Anhang A Ermittlung der massgebenden Niederschläge.....	A-1
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-8
A.3.4 Ganglinie	A-9
A.4 Vorbedingungen beim Ereignis	A-9
A.5 Fazit	A-11

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Eingabewerte für die Modellierung des Oberflächenabflusses für die 10'000-jährlichen 24h-, 6h-, 3h-, 2h- 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

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Fliessgewässernetz, Entwässerungsflächen sowie Lage des Anlagenperimeters	2
Fig. 2-2:	Bodenkarte des Einzugsgebiets des Anlagenperimeters	3
Fig. 2-3:	Abgeleitete Intensitätskurven für den 10'000-jährlichen Punktniederschlag für das Einzugsgebiet des Anlagenperimeters	7
Fig. 2-4:	Niederschlagsereignis von 2 Stunden Dauer	11
Fig. 2-5:	Niederschlagsereignis von 24 Stunden Dauer	12
Fig. 2-6:	Aus der Topografie abgeleitetes Einzugsgebiet des Stadler Dorfbachs bis zum Nordende des Anlagenperimeters	13
Fig. 2-7:	Abflusssituation beim Kontrollquerschnitt 2 bei einem extremen Hochwasserereignis zum Zeitpunkt der Abflussspitze	14
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 Zürich Fluntern für die Messperioden 1901 bis 1970 (punktierte Linien) und 1982 bis 2021 (ausgezogene Linien)	A-8

Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
EXAR	Extremhochwasser Aare-Rhein
KEV	Kernenergieverordnung
PMP	Probable Maximum Precipitation

1 Einleitung

Im Zuge des Rahmenbewilligungsgesuchs für das geologische Tiefenlager (gTL) am Standort Haberstal (Stadel, Kt. ZH) 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 ein gTL. Der vorliegende Bericht beschreibt, untersucht und bewertet die hydrologische Gefährdung am Standort der Oberflächenanlage des gTL.

Für den zu bewertenden Standort bestehen einschlägige Grundlagen, die seit Jahrzehnten erhoben werden. Für die hydrologische Gefährdungsanalyse infolge Oberflächenabfluss wird auf langjährige Datenerhebungen und Analysen zurückgegriffen und für die spezifische Fragestellung durch eigene Analysen und Modellierungen 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 klein, die Flächen z.T. 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 somit nicht Gegenstand des vorliegenden 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 ausufern, 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 wird durch eine Überflutung des Anlagenperimeters infolge eines ausufernden Hochwassers, ausgelöst durch grossräumige Starkniederschläge oder durch ein Versagen relevanter wasserbaulicher Einrichtungen ober- und unterhalb der Anlage verursacht. Diese Art von Ereignis ist für den Standort nicht relevant, weil dieser von keinem Fließgewässer mit grossem Einzugsgebiet durchflossen wird und auch nicht im Überschwemmungsgebiet eines solchen Fließgewässers liegt.
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

Der Anlagenperimeter liegt im Einzugsgebiet des Stadler Dorfbachs, welcher im Gebiet Horüti entspringt und von Westen bis zur Einmündung in die Glatt von einigen Seitenzubringern gespeist wird, wovon der Ast aus dem Raatertal und Schlatti (südlich bzw. nördlich des Hügels «Wormegg») der bedeutendste ist (vgl. Fig. 2-1). Östlich des Dorfbachs sind keine Fließgewässer an der Oberfläche erkennbar, was bedeutet, dass das Niederschlagswasser entweder diffus in den Dorfbach entwässert oder versickert und das grosse Grundwasservorkommen alimentiert.

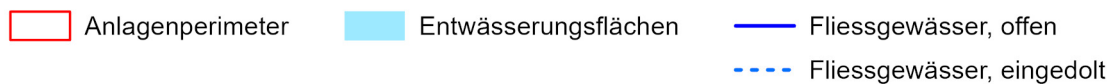
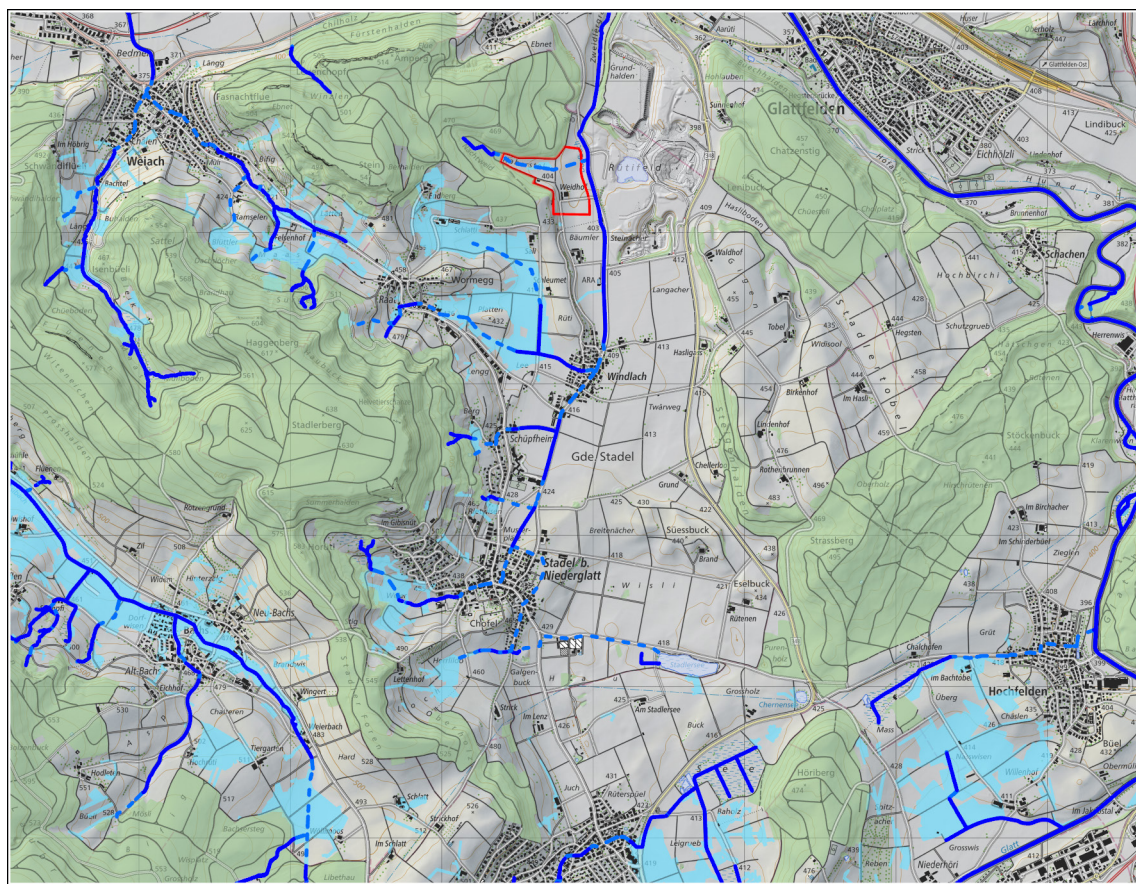
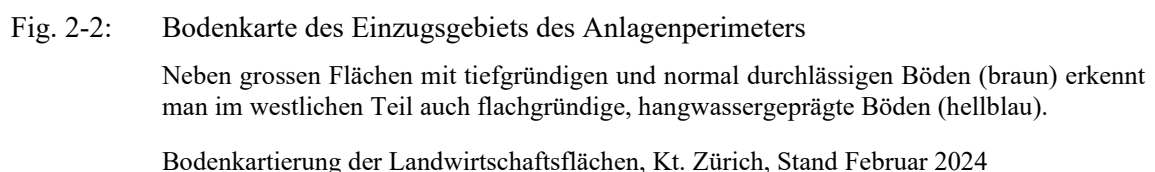


Fig. 2-1: Fließgewässernetz, Entwässerungsflächen sowie Lage des Anlagenperimeters
Öffentliche Oberflächengewässer, Kt. Zürich, Stand Juli 2024

Die Bodenkarte in Fig. 2-2 zeigt grossflächig tiefgründige, senkrecht durchwaschene Böden, teilweise stauwasserbeeinflusst. Im Gebiet westlich von Windlach Richtung Schlatti und Raat dominieren flachgründige, hangwassergeprägte Böden, häufig bis zur Oberfläche porengesättigt.



Der Stadler Dorfbach verläuft im Siedlungsgebiet vorwiegend eingedolt, ab Schüpfheim linksseitig entlang der Zweidlenstrasse offen in einem Gerinne mit trapezförmigem Querschnitt mit kleiner Sohlenbreite¹. Unmittelbar nach dem Anlagenperimeter unterquert der Bach die Strasse und fliesst in einem natürlichen Gerinne mit deutlich grösserem Gefälle zur Glatt (Zweidlergraben).

2.1.2 Gelände beim Anlagenperimeter

Das orografische Einzugsgebiet des Anlagenperimeters für Oberflächenabfluss beschränkt sich auf das kleine, steilere, bewaldete Tälchen beim Haberstal und ist östlich begrenzt durch den Stadler Dorfbach (vgl. Fig. 2-1). Im unteren Teil grenzt der Perimeter an ebene bewirtschaftete Flächen mit geringem Gefälle von Süden nach Norden.

Der Vorfluter dieses Tälchens, der Haberstalgraben, besteht aus einem offenen Gerinneabschnitt im Wald und einem eingedolten Gerinneabschnitt der Landwirtschaftsfläche. Beide wurden künstlich angelegt; der untere mit der Entwässerung des Talbodens im Rahmen der Melioration (1961-1976) und der obere gemäss Kartierungen vor einigen Jahren. Weitere Gerinne oder entsprechende Erosionsspuren sind nicht ersichtlich. Der Talboden wird als grund- und hangwasser-geprägt eingestuft, was auf diffus zufließendes Hangwasser hinweist. Das heute vorhandene Drainagenetz leitet dieses in den Dorfbach.

2.1.3 Kiesabbau Rütifeld

Seit den 1940er Jahre wird östlich des Haberstals der Talboden zwischen Dorfbach und der östlichen Talbegrenzung für den Kiesabbau genutzt, bewilligt mit maximaler Abbaukote bis 2 m über den Hochwasserstand des Grundwassers. Das Ende der Materialnutzung ist absehbar. Mit der 2020 bewilligten Endgestaltung soll das ursprüngliche Terrain vor Abbau wieder hergestellt werden (AfR ZH 2020).

Das Rekultivierungsziel sind normaldurchlässige Böden mit Schichtmächtigkeiten von 30 cm Oberboden und 70 cm Unterboden. Als naturnahes Gebiet wird etwa 15 % der rekultivierten Fläche ausgeschieden, der Rest ist Kulturland. Für dieses wird ein Netz von Sickerleitungen angelegt; die Sammler werden an zwei Stellen im Zweidlergraben in den Dorfbach geführt. Die Abschlussarbeiten an Entwässerungs- und Wegnetz und die Übergabe landwirtschaftlich nutzbarer Fläche finden in der letzten Rekultivierungsphase statt. Es ist anzunehmen, dass um 2040 die rekonstruierte Oberflächentopografie vorhanden ist.

2.1.4 Hydrologische Besonderheiten

Hydrologisch ist das Gebiet durch mehrere, z.T. bereits beschriebene Eingriffe geprägt:

- Drainagenetze
- künstlich angelegte Gerinne(-abschnitte) und -profile
- die teilweise veränderte Linienführung des Dorfbachs
- die Kiesnutzung im Rütifeld

Die ersten Entwässerungen wurden im Gebiet Schleumet – Schlatti angelegt und gehen auf die 1940er Jahre zurück. In diesem Zusammenhang wurden die Oberläufe von Schleumet- und Raaterbach eingedolt und der Unterlauf begradigt. Der Weiterausbau des Drainagenetzes, die Verlegung des Dorfbachs und die Aufhebung des alten Bachlaufs zwischen Windlach und dem

¹ Ab Windlach ist der Gerinnequerschnitt am grössten; die Tiefe beträgt dort etwa 1.7 m, die Sohlenbreite 0.5 – 1 m und die Kronenbreite etwa 7 m.

Zweidlergraben fand im Zuge der Melioration 1961-76 und dem Bau der Abwasserreinigungsanlagen (ARA, Inbetriebnahme 1970) statt.

Durch den Kiesabbau hat sich das Einzugsgebiet des Stadler Dorfbachs im Osten verkleinert. Zwischen der ARA und der Aarrütistrasse sammeln die Kiesgruben das aus Osten (Stadlertobel, Hasliboden) zufließende Wasser, wo es dann versickert oder diffus im Zweidlergraben in den Dorfbach exfiltriert. Es ist damit zu rechnen, dass mit der Rekultivierung der Kiesgruben gemäss rechtskräftigem Projekt die ursprünglichen Wasserwege wieder hergestellt werden und der obere Teil des Dorfbachs wieder als Vorfluter für entsprechende Teile der rekultivierten Flächen wirkt.

2.1.5 Folgerungen

Im direkten, kleinen, bewaldeten Einzugsgebiet des Anlagenperimeters deutet wenig auf eine intensive Abflussaktivität an der Oberfläche hin. Vielmehr scheint die Infiltrationskapazität des Waldbodens gross zu sein und den Abfluss entsprechend zu dämpfen. Im Landwirtschaftsland im und im Umfeld des Anlagenperimeters reichert überschüssiges Niederschlagswasser vor allem Grundwasser an oder es wird von Drainagenetzwerken gesammelt und abgeführt. Niederschläge, welche die Kapazität von Infiltration und Drainagen überschreiten, werden sich (vorübergehend) in Mulden akkumulieren. Hier bietet sich wegen der welligen Geländeoberfläche Retentionsraum.

Die Oberflächengerinne in der Ebene haben wenig Kapazität und sind vielerorts verwachsen oder es befindet sich organisches Material darin, z.B. Grasschnitt. Während Starkniederschlägen ist Material von den Feldern mobilisierbar und kann Durchlässe oder Engpässe verklausen. Die Gerinne bieten deshalb kaum die nötige Abflusskapazität, um Ausuferungen zu verhindern, insbesondere nicht im Bereich von Eindolungen. Je nach Abflussvolumen und Fliessrichtung sind als Retentionsräume davon nicht nur die direkt angrenzenden Flächen betroffen. Flächige Zuflüsse zum Anlagenperimeter aus dem umliegenden Gelände sind deshalb möglich.

2.2 Historische Ereignisse

Im Gebiet des Anlagenperimeters sind bis anhin grossflächige, einschneidende, extreme Schadensereignisse offenbar ausgeblieben². Im Kataster der kantonalen Gefahrenkarte (ARGE Holinger-Geotest 2012) werden folgende Befunde aufgeführt:

- überschwemmte Keller und Strassen in Stadel (diverse Ereignisse)
- rechtsseitige Ausuferung des Dorfbachs in Stadel infolge ungenügender Gerinnekapazität (Abfluss in Landwirtschaftszone) (ca. alle 2 Jahre)
- lokale Ausuferung des Dorfbachs in Schüpfheim (Engpass Brücke) (2009)
- Verklausung des Dorfbachs bei Schwarzwiesen (Stadel, unterhalb Horüti) durch Schwemmholtz und bei der Bachserstrasse (Beginn Eindolung) (2009)
- Verklausung des Raaterbachs (Raat, Durchlass) (2009)
- Hangmuren im Gebiet Hegi (Stadel) (1993)
- Häufig stehendes Wasser in Schleumet, Hasliboden und Stadlersee (alle 2 – 3 Jahre)
- Weitreichender Oberflächenabfluss aus dem Wald über den Hang westlich der Kaiserstuhlstrasse (Stadel – Schüpfheim) (2009)
- Permanente Rutschung westliche Hangflanke Stadler Berg: häufige, intensive Oberflächenabflüsse während Starkniederschlägen

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

Flächig stehendes Wasser auf den Feldern um Windlach wurde 1963 und 2018 dokumentiert (Wydrler & Kälin 2022). Erstaunlich ist, dass die aufgeführten Befunde mit Ereignisbezug nicht mit den höchsten Tagesniederschlägen korrelieren (gemäss Messstationen Kaiserstuhl und Bülach). Vermutlich spielt eine wesentliche Rolle, ob bei den Niederschlagsereignissen mit Folgeschäden Feststoffe im Spiel waren, welche anstelle der Gerinne zu neuen Abflusswegen führen, die das Wasser in die umliegenden Felder leiteten.

Es gibt kein systematisches Gefahrenkataster für den Gebietsbereich des Anlagenperimeters, weil er noch unbebaut und nicht Teil des Untersuchungsperimeters der Gefahrenkarte ist. Für die Einschätzung, ob der ausufernde Dorfbach dort zu einer bedeutenden Gefahrenquelle werden könnte, fehlt eine entsprechende Dokumentation. Die Engpässe in den obliegenden Siedlungen halten allerdings viel Wasser in den anliegenden Retentionsräumen zurück.

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. Dazu werden Daten von Stationen in der Nähe des Einzugsgebiets beigezogen; zur Prüfung der Konsistenz werden auch Daten von etwas weiter entfernten Stationen 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-Niederschläge³, 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).

³ 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.

- 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. 2-3 dargestellte Intensitätskurve für die 10'000-jährlichen Modellniederschläge^{4,5}, die im Bereich des PMP der Region des Anlagenperimeters zu liegen kommen (vgl. Anhang A.2.2).

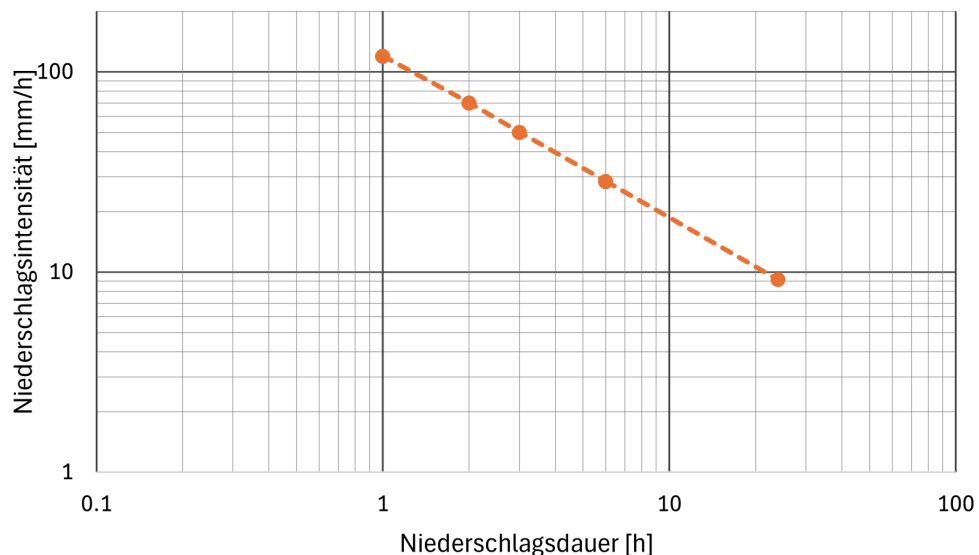


Fig. 2-3: Abgeleitete Intensitätskurven für den 10'000-jährlichen Punktniederschlag für das Einzugsgebiet des Anlagenperimeters

⁴ 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 den Standort ein 2h-Niederschlag von 92 mm/2h, was den Vergleich mit anderen Datensätzen jedoch gleichen Randbedingungen zulässt (Beispiel: für den 2h-Niederschlag mit 85 mm/2h (Nagra 2024b))

⁵ Angaben zu den 1'000-jährlichen Niederschlägen sind im Anhang A dokumentiert. Das bzgl. der Gefährdung abdeckende Ereignis ist der 10'000-jährlicher 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-, 3h-, 2h- und 1h-Niederschläge

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

Nieder-schlag	Wert bzw. Faktor (Intensitätsverhältnis: i_X/i_{24})	Zuschlag Klimawandel	Wert (inkl. Klimawandel)	Wert (gerundet)
24h	185 mm/24h (95%-Quantil aus Tab. A-1)	20 %	222 mm/24h	220 mm/24h
6h	3 (i_6/i_{24} , vgl. Anhang A.5)		167 mm/6h	170 mm/6h
3h	5.4 (i_3/i_{24} , vgl. Anhang A.5)		150 mm/3h	150 mm/3h
2h	7.5 (i_2/i_{24} , vgl. Anhang A.5)		139 mm/2h	140 mm/2h
1h	13 (i_1/i_{24} , vgl. Anhang A.5)		120 mm/h	120 mm/h

2.4 Gefährdungspotenzial infolge Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen im Einzugsgebiet des Anlagenperimeters

2.4.1 Modellierung des Oberflächenabflusses

Modellierung

Die Oberflächenabfluss-Modellierung basiert auf einer Reihe von Modellannahmen und benötigt verschiedene Eingangsparameter⁶. Für die Topografie, welche Richtung, Fliessgeschwindigkeit und Wasserstand des abfliessenden Wassers beeinflusst, wird das digitale Geländemodell von swisstopo (swissALTI^{3D}) mit einer Rastergrösse von 1×1 m verwendet. Der Anlagenperimeter wird topographisch als Senke modelliert («ausgestanzt»). Die aktuelle Topografie der Kiesgrube Rütifeld wird gemäss dem Gestaltungsplan für die Wiederauffüllung angepasst (vgl. Kap. 2.1.3). Der Anlagenperimeter wird topographisch als Senke modelliert («ausgestanzt»). Die gesuchte Überflutung ist der Wasserfluss, der als Folge des Niederschlagsereignisses über die Grenzen dieser Senke fliesst sowie der Abfluss durch den Stadler Dorfbach in Richtung Zweidlergraben⁷. Weitere Senken (z.B. grosse Vorfluter) gibt es im Modellperimeter nicht.

⁶ 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/gefahrengrundlagen/oberflaechenabfluss.html>

⁷ In diesem Bericht (Kap. 2.4.2) wird die Gefährdung bzgl. Wasserhöhen am südlichen Rand des Anlagenperimeters gezeigt. Auf die Darstellung der Wasserhöhen im Anlagenperimeter wird verzichtet, weil diese von der Gestaltung des Geländes und der Anordnung der Gebäude im Perimeter abhängen. Diese Planung erfolgt nach Kernenergiegesetz (KEG 2003) im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens. Wasserflüsse werden in geeigneten Querschnitten (siehe Fig. 2-7) erfasst und addiert.

Da die Gerinne im Einzugsgebiet durchwegs geringe Abflusskapazitäten und immer wieder Engpässe (Eindolungen) aufweisen, können sie selbst Abflüsse mit geringen Jährlichkeiten nicht bewältigen (ARGE Holinger-Geotest 2012). Zusätzlich ist dadurch die Gefahr der Verklausung und des Materialeintrags aus den Feldern ohne Weitertransport gross. Gerinne mit kleiner Abflusskapazität werden in den Simulationen nicht abgebildet, d.h. modelltechnisch ebenerdig aufgefüllt. Dies betrifft alle Fliessgewässer im Einzugsgebiet ausser dem Dorfbach im Zweidlergraben. Mit dieser Massnahme wird bis zum Anlagenperimeter maximaler Oberflächenabfluss erzeugt.

Die Simulation wurde für Niederschlagsdauern von 1, 2, 3, 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 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 Ψ 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 Landnutzung ermittelt, so wie es aktuell bei der Erstellung von Oberflächenabflusshinweiskarten des Bundesamts für Umwelt (BAFU) in der Schweiz angewendet wird. Eine Ausnahme bilden vernässte Flächen. Deren Oberflächenabflussbereitschaft wird an dieser Stelle höher eingeschätzt und der Abflusskoeffizient aus diesem Grund erhöht.

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 Gesamtabfluss beim Anlagenperimeter.

Die im Folgenden in Kap. 2.4.2 dargestellten Resultate basieren auf Simulationen mit dem vom BAFU verwendeten Oberflächenabflussmodell. Von unabhängiger Seite konnten die Ergebnisse mit einem alternativen Simulationsmodell plausibilisiert werden.

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 eher hoch aus. Der Anteil des Niederschlags, der zum Oberflächenabfluss beiträgt, ist demzufolge pessimistisch gewählt. Dies gilt insbesondere für die steileren bewaldeten Hänge.
- Anfangsverluste (Interzeption und Benetzung) werden vernachlässigt. Die Annahme von feuchten / nassen Vorbedingungen an der Bodenoberfläche impliziert, dass der Abfluss sofort und verlustlos einsetzt.
- Drainageeinrichtungen werden nicht berücksichtigt. Das potenzielle Drainagewasser bleibt im Modell an der Oberfläche und fliesst dort ab.

- (Kleine) Gerinne ohne ausgeprägte Topografie, welche potenziell als Vorfluter wirken könnten, werden modellhaft gefüllt oder als untiefe Geländeerinne modelliert. Damit ist die Abflusskapazität begrenzt, was zu mehr Oberflächenabfluss führt.
- Die Möglichkeit von Verklausungen von Durchlässen und Brückenöffnungen auch ausserhalb des Siedlungsraumes wird im Modell berücksichtigt, weil dadurch flächige Ausuferungen entstehen können. Engpässe vor Eindolungen im Siedlungsgebiet sind während Extremereignissen Fakt und werden immer als solche behandelt (d.h. verklaust).

2.4.2 Fliesswege und Abflusstiefen

Die Darstellungen von Fliesswegen und Abflusstiefen zu ausgewählten Zeitpunkten widerspiegeln das Abflussgeschehen an der Oberfläche. Dieses unterscheidet sich je nach Niederschlagsintensität und -dauer. Hohe Intensitäten (z.B. Niederschlagsereignis von 2-stündiger Dauer) verursachen ein flächiges Netz an Abflusswegen mit geringer Wassertiefe (Fig. 2-4, links), welches ebenso schnell wieder verschwindet, sobald die Intensitäten zurückgehen, bzw. das Ereignis endet (Fig. 2-4, rechts). Je länger das Niederschlagsereignis dauert (z.B. Niederschlagsereignis von 24-stündiger Dauer⁸) und umso kleiner die Niederschlagsintensität, desto weniger unterscheidet sich das Netz der sichtbaren Wasserwege am Anfang des Ereignisses von demjenigen zum Zeitpunkt des maximalen Ereignisabflusses beim Anlagenperimeter (vgl. Fig. 2-5).

Unabhängig von der Ereignislänge und der Verzweigung des aktiven Gewässernetzes zeigt sich, dass für den Zufluss zum Anlagenperimeter der Zufluss aus Windlach dominant ist. Dieser wird durch drei diskrete Hauptfliesswege gebildet:

- Zufluss aus Westen (Raar, Schlatti) mit Umlenkung in Windlach in den Talboden des Dorfbachs
- Zufluss von Süden (Stadel, Schüpfheim) entlang des Dorfbachs
- Zufluss aus Südosten (Kiesstrasse, im Grund, Twärweg) mit Umlenkung in Windlach in den Talboden des Dorfbachs

Die drei Hauptfliesswege, welche im Bereich von Windlach in den Dorfbach bzw. die anliegenden Flächen gelangen, sind ähnlich lang. Die damit verbundenen vergleichbaren Fliesszeiten begünstigen eine Kumulation zu einer einzigen Hochwasserwelle, welche sich ab Windlach talabwärts bewegt. Weitere namhafte, eher diffuse Zuflüsse gelangen von Osten nach Westen über den Talboden beim Anlagenperimeter, insbesondere über den südlichen Teil des Rütifelds, in den Hauptfliessweg. Die Hochwasserwelle aus dem direkten Einzugsgebiet des Perimeters (Habers-tal) ist wegen der kurzen Fliesszeiten der Hauptwelle im Talboden zeitlich deutlich vorgelagert. Der Beitrag zur Hauptwelle ist vernachlässigbar.

Die Zuflüsse aus dem Stadlertobel sind vom Abflussgeschehen beim Anlagenperimeter völlig entkoppelt. Das Wasser fliesst östlich des Rütifelds entlang der Kiesstrasse in Richtung Glatt. Ebenso kommen keine Abflussbeiträge aus dem flachen Gebiet im Umkreis und nördlich des Stadlersees. Es ist anzunehmen, dass hier das Oberflächenwasser nur lokal zur nächsten Senke fliesst und dort versickert.

Die Resultate in Fig. 2-4 und Fig. 2-5 zeigen, dass sich bei hohen Abflüssen / Starkniederschlägen in natürlichen Retentionsräumen Wasser sammelt. In den einen wird das Niederschlagswasser bleiben, in anderen vorerst zurückgehalten und anschliessend dosiert abgegeben. Diese Retentionsräume ergeben sich einerseits durch die spezielle Oberflächentopografie im Gebiet um den Hügel Wormegg (Raar – Windlach – Endberg), namentlich auch durch die Barrierewirkung der

⁸ Die Niederschlagsganglinie geht als «mittebetont» ins Modell ein. Das Intensitätsmaximum wird nach etwa 12 Stunden erreicht.

langgezogenen Geländeerhebung Rütli – Schleumet. Andererseits werden anliegende Wiesen und Felder durch Ausuferungen infolge Kapazitätsengpässen in den Gerinnen (insbesondere bei den Siedlungseingängen) als Retentionsflächen aktiviert. Abflüsse aus den Retentionsflächen ergeben sich nur ab einer gewissen Wassertiefe. Das Oberflächenabflussmodell zeigt bei allen Szenarien eine Seenbildung um Windlach, die auch bei Extremereignissen in der jüngeren Vergangenheit beobachtet wurde.

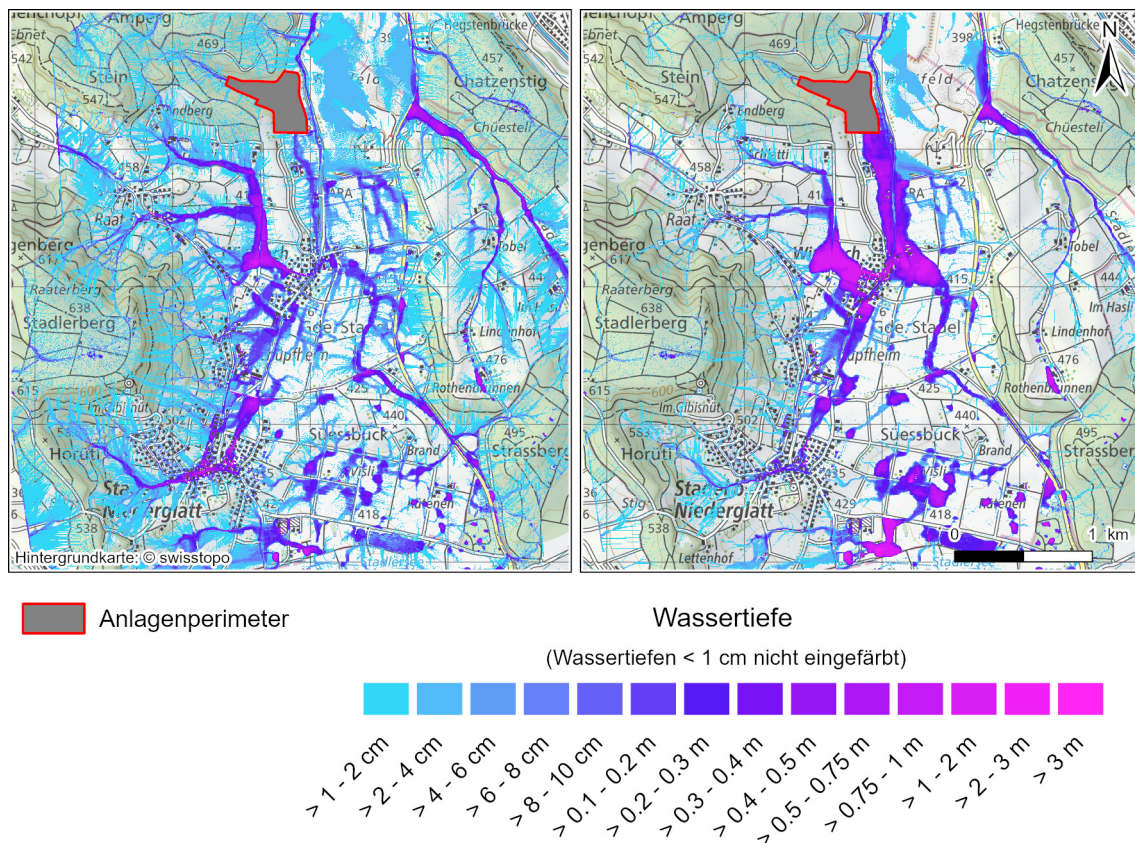


Fig. 2-4: Niederschlagsereignis von 2 Stunden Dauer

Wassertiefen 40 Minuten (links) und 120 Minuten (rechts) nach Ereignisbeginn. Der Abfluss erreicht beim Anlagenperimeter zu diesem Zeitpunkt das Ereignismaximum. Für diese Niederschlagsdauer ist die Abflussspitze beim Anlagenperimeter maximal.

Im Bereich des Anlagenperimeters treten grössere Wassertiefen nur an dessen Südende auf und sind durch lokale Geländevertiefungen bedingt (alter Bachlauf). Mit einfachen Geländeanpassungen lassen sich dort die Wassertiefen auf ein schadloses Mass reduzieren.

Einige Retentionsräume halten das Wasser über das Niederschlagsereignis hinaus ganz zurück, z.B. solche östlich von Stadel (Süessbuck, Stadlersee), wo das Wasser in lokalen Mulden liegen bleibt und in die Tiefe versickert⁹. Mit zunehmender Niederschlagsdauer steigt das Niederschlagsvolumen, somit halten diese abflusslosen Geländeunebenheiten bei Ereignissen zunehmender Länge bei gleicher Jährlichkeit auch zunehmend mehr Volumen zurück.

⁹ Aus Gründen der Konservativität berücksichtigt das Oberflächenabflussmodell keine Tiefensickerung. Die Wassertiefen in den abflusslosen Mulden nehmen deshalb bis zum Niederschlagsende zu.

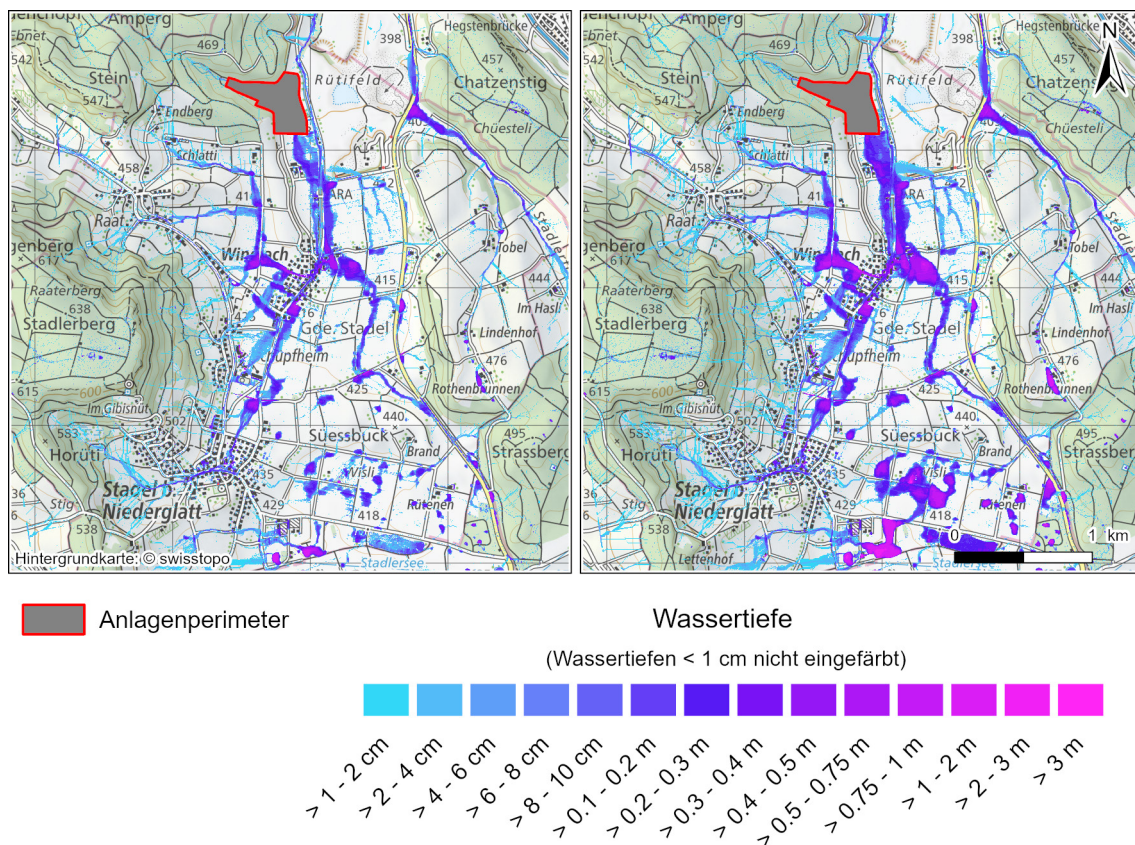


Fig. 2-5: Niederschlagsereignis von 24 Stunden Dauer

Wassertiefen 6 Stunden (links) und 12.5 Stunden (rechts) nach Ereignisbeginn. Der Abfluss erreicht beim Anlagenperimeter zu diesem Zeitpunkt das Maximum. Die kleinen Fliesswege sind jetzt am meisten ausgeprägt, da das Intensitätsmaximum des Niederschlags etwa gleichzeitig auftritt.

2.4.3 Abflussmengen

Um eine bedeutende Überflutung des Anlagenperimeters aus dem umliegenden Gelände bei einem extremen Niederschlagsereignis zu verhindern, können vorbeugende Massnahmen ergriffen werden, sofern dies erforderlich ist. Je nach Art der Massnahme orientieren sich diese am Spitzenabfluss oder am maximalen Abflussvolumen, im vorliegenden Fall infolge eines 10'000-jährlichen Niederschlagsereignisses. Massgebend ist der Abfluss beim Kontrollquerschnitt 2 (Fig. 2-6).

Wichtige Abflussanteile, die zum Gesamtabfluss beim Kontrollquerschnitt 2 (= Abfluss Dorfbach ohne Rückhalt durch Anlagenperimeter) beitragen, sind in Fig. 2-7 skizziert. Diese sind:

- der Zufluss aus dem direkten, kleinen Einzugsgebiet des Haberstalgrabens
- der Zufluss, der auf der Ostseite in den Anlagenperimeter gelangt
- der Zufluss aus dem Süden (Windlach), der in den Anlagenperimeter gelangt
- der Zufluss aus dem Süden und Osten, der neben dem Perimeter vorbeifliesst (v.a. Abfluss im Dorfbach)

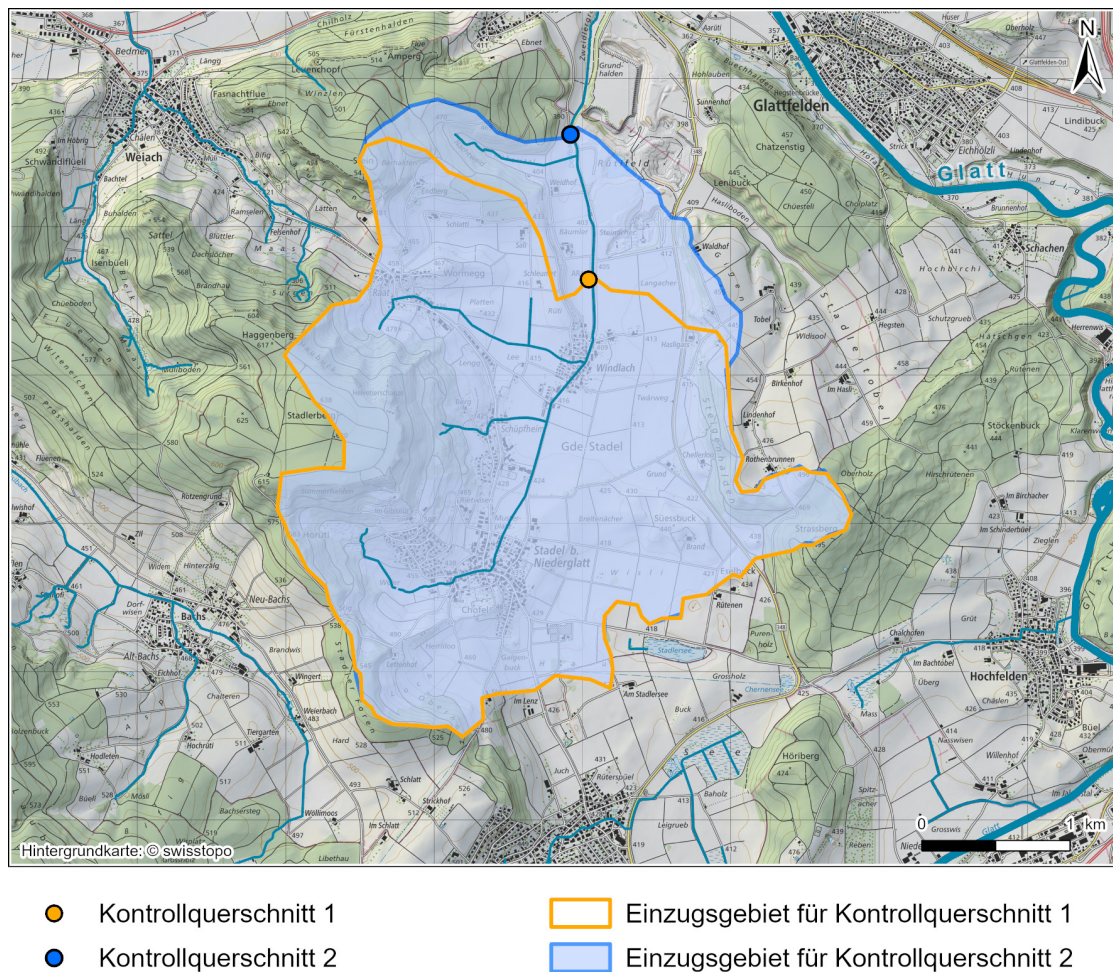


Fig. 2-6: Aus der Topografie abgeleitetes Einzugsgebiet des Stadler Dorfbachs bis zum Nordende des Anlagenperimeters

Die Abflussmenge durch Kontrollquerschnitt 2 ist Basis für allfällige Massnahmen zur Verhinderung einer Überflutung des Anlagenperimeters.

Bei Verwendung eines Oberflächenabflussmodells mit konservativ gewählten Parametersets erzeugen Niederschlagsereignisse von wenigen Stunden Dauer maximale Abflussspitzen beim Anlagenperimeter. Wegen der anfangsbetonten Niederschlagsganglinie treten die Abflussspitzen vor Ende der Niederschlagsdauer auf. Die höchsten Abflussspitzen werden durch Niederschlagsereignisse ausgelöst, welche zwischen einer und drei Stunden dauern. Um Unsicherheiten abzudecken, wurden für die quantitative Abschätzung mehrere Kombinationen von Geländeparametern berücksichtigt. Beim Kontrollquerschnitt 2 ergeben diese Modellrechnungen eine 10'000-jährliche Abflussspitze im Bereich von rund 50 bis 70 m³/s. Die Abflussspitze wird hauptsächlich (knapp 90 %) durch von Windlach vorbei an der ARA und Bäumler in Richtung Zweidlergraben oberflächlich abfliessendes Wasser gebildet, als Folge der Annahme, dass die Abflusskapazität im Dorfbach durch Schwemmmaterial stark reduziert wird. Die Beiträge zur Abflussspitze aus dem Osten, dem Dorfbach selber und dem Haberstalgraben sind entsprechend bescheiden.

Der direkte Zufluss aus dem Haberstal zum Anlagenperimeter ist bei einem einstündigen Niederschlagsereignis maximal. Er erreicht die Spitze kurz nach Ereignisbeginn und fällt dann rasch ab. Ungeachtet der Niederschlagsdauer trägt er wegen der kurzen Fliesszeit nur wenig zur Hauptabflussspitze bei.

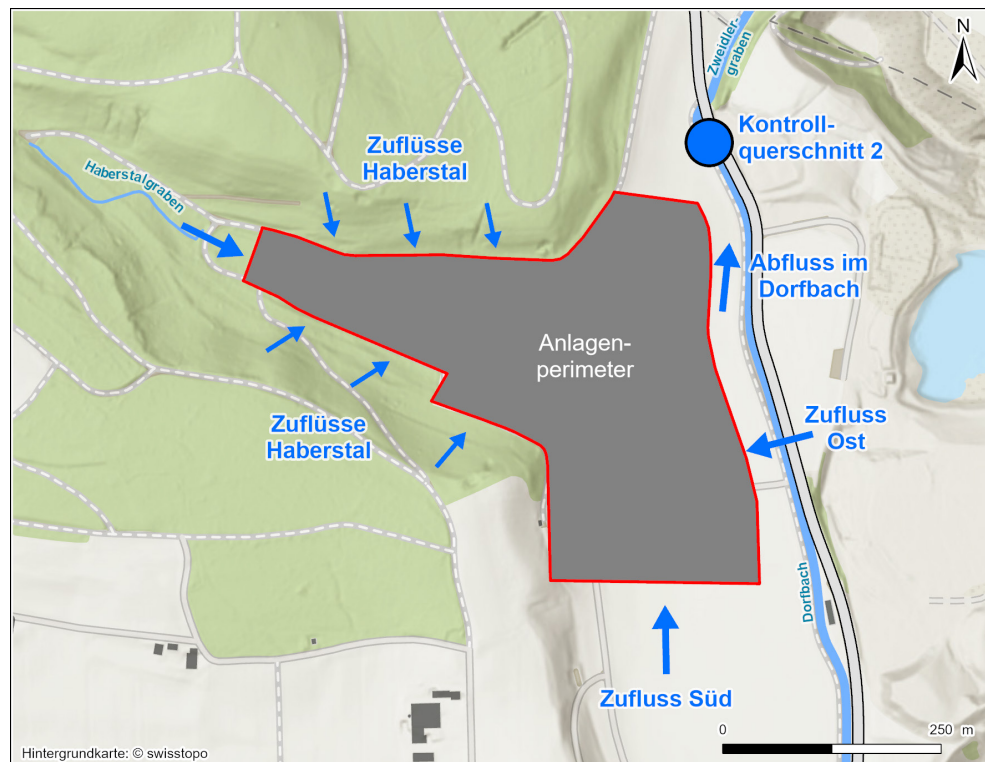


Fig. 2-7: Abflusssituation beim Kontrollquerschnitt 2 bei einem extremen Hochwasserereignis zum Zeitpunkt der Abflussspitze

Der Hauptbeitrag zur Abflussspitze erfolgt oberflächlich über die Talebene aus Süden. Die übrigen Zuflüsse aus dem Osten und dem Haberstalgraben tragen nur unwesentlich bei.

Nach dem Perimeter beim Übergang in den Zweidlengraben nehmen die Sohlenneigung des Dorfbachs und der verfügbare Durchflussquerschnitt des Gerinnes erheblich zu. Der Spitzenabfluss lässt sich darin ableiten und erreicht nach 1.6 bzw. 2.6 km grosse Vorfluter (Glatt und Rhein).

Inwieweit die simulierten Spitzenabflusswerte plausibel sind, kann mit den gängigen Hochwasserschätzverfahren nicht getestet werden, da die hier berücksichtigte Wiederkehrperiode von 10'000 Jahren weit ausserhalb des Anwendungsbereichs der Verfahren liegt. Allerdings lässt sich über Erfahrungswerte von flächenspezifischen Spitzenabflüssen mit kleineren Jährlichkeiten und Verhältniszahlen von Niederschlagsintensitäten eine grobe Einordnung vornehmen.

Der ermittelte Spitzenabflusswert entspricht einem spezifischen Abfluss von 5 bis 7 m³/s·km². Die höchsten in dieser Region je beobachteten Abflussspenden bei ähnlicher Einzugsgebietsfläche liegen meistens deutlich unter 3 m³/s·km². Einige höhere Werte stammen aus hydraulischen Rekonstruktionen alter Einzelbeobachtungen ohne Messreihen¹⁰. Der vom Oberflächenabflussmodell ermittelte Wert als extrem seltenes Ereignis liegt deutlich darüber und erscheint unter diesem Gesichtspunkt plausibel.

Im Rahmen der Gefahrenkartierung wurden für einen Kontrollquerschnitt 1 (siehe Fig. 2-6) Spitzenabflüsse für die Jährlichkeiten 30, 100 und 300 Jahre mangels Direktmessung mit Schätzformeln ermittelt (ARGE Holinger-Geotest 2012). Für diesen Kontrollquerschnitt im Dorfbach wurde ein 100-jährliches Hochwasser von etwa 11 m³/s ermittelt, was auf das Einzugsgebiet bis

¹⁰ https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/wasser--methoden/grosse_hochwasserabflusse-2.html, abgerufen am 4.2.2024

und mit Haberstal mit knapp 20 % mehr Fläche hochgerechnet rund 13 m³/s entsprechen würde. Damit ergibt der mit dem Oberflächenabflussmodell ermittelte Spitzenwert für das 10'000-jährliche Hochwasser etwa den 4- bis 5-fachen geschätzten 100-jährlichen Wert, während der Eingangswert für die mittlere Niederschlagsintensität über das Ereignis rund das 3-fache des 100-jährlichen Werts beträgt¹¹. Der Abfluss nimmt also überproportional zu. Dies ist plausibel, weil neben der Regenintensität auch die zum Abfluss beitragende Fläche zunimmt.

2.5 Gefährdungspotenzial infolge niederschlagsinduzierter gravitativer Gefahren

Steinschlag, Fels- oder Bergsturz

In der nahen Umgebung des Anlagenperimeters sind keine Felshänge/-böschungen vorhanden. Daher können Gefahren durch Steinschlag, Fels- oder gar Bergsturz im Anlagenperimeter ausgeschlossen werden.

Rutschungen

In der nahen Umgebung des Anlagenperimeters steht zum Teil schlecht zementierter Molassefels an. Aktuell ist das umliegende Gelände bewaldet. Permanente und mittel- resp. tiefgründige Rutschungen können aufgrund der Geländemorphologie, der Lagerungsverhältnisse sowie der Materialzusammensetzung ausgeschlossen werden.

Das Auftreten von flachgründigen, kleinräumigen, spontanen Rutschungen oder kleinräumigen Hangmuren können nicht vollständig ausgeschlossen werden, insbesondere im Zusammenhang mit extremen Niederschlagsereignissen. Diese Gefahren können jedoch mit einfachen baulichen und organisatorischen Massnahmen beherrscht werden.

¹¹ Eingabewert Modellierung für die Intensität des 10'000-jährlichen 1h-Niederschlags: 120 mm/h; Intensität des 100-jährlicher 1h-Niederschlag, Stationen Bülach/Kaiserstuhl (Zeller et al. 1977; 1992): 40 mm/h.

3 **Fazit und Bewertung**

Die Ergebnisse der vorliegenden Analyse zeigen – basierend auf den umfangreichen vorhandenen Unterlagen – dass für den Standort der Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen vorliegen:

- Ein starkniederschlagbedingter Oberflächenabfluss aus der Umgebung kann topografisch bedingt in grösseren Mengen zum Anlagenperimeter fliessen, aber durch entsprechende bauliche Massnahmen gut beherrscht, d.h. im Wesentlichen vorbeigeleitet werden. Nach dem Perimeter beim Übergang in den Zweidlengraben nehmen die Sohlenneigung des Dorfbachs und der verfügbare Durchflussquerschnitt des Gerinnes erheblich zu. Der Spitzenabfluss lässt sich darin ableiten und erreicht nach 1.6 bzw. 2.6 km grosse Vorfluter (Glatt und Rhein).
- Durch Starkniederschläge induzierte gravitative Ereignisse wie grössere Hangrutschungen können infolge der lokalen geologischen Bedingungen ausgeschlossen werden; eine Oberflächenerosion mit Feststoffeintrag in die Entwässerung bzw. in den Anlagenperimeter ist möglich, ist aber wegen der Geländeverhältnisse in ihren Auswirkungen begrenzt und kann durch Massnahmen gut beherrscht werden.
- Gefährdungen im Zusammenhang mit grossen anliegenden Fliessgewässern haben für den Standort keine Bedeutung. Die Flüsse Glatt und Rhein liegen ausserhalb des topografischen Einflussbereichs.

Der Standort ist für den Bau, Betrieb und Verschluss eines geologischen Tiefenlagers geeignet.

4 Literaturverzeichnis

- AfR ZH (2020): Glattfelden, Stadel. Kantonaler Gestaltungsplan. Kiesabbaugebiet Rütifeld, mit Umweltverträglichkeitsprüfung – Festsetzung. Verfügung 0501/19. Amt für Raumentwicklung, Kanton Zürich.
- ARGE Holinger-Geotest (2012): Gefahrenkartierung Naturgefahren Unteres Glattal. Technischer Bericht. AWEL, Zürich.
- 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.
- 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. BSGl 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.
- Jensen, H., Lang, H. & Rinderknecht, J. (1997): Hydrologischer Atlas der Schweiz – Tafel 2.4². Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. BAFU, Bern.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Februar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- 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): Hydrologische Verhältnisse am Standort der Brennelementverpackungsanlage. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-36.
- Nagra (2024b): Meteorologische und klimatologische Verhältnisse am Standort der Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-30.

- Nagra (2025): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – 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.
- 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.
- Wydler, V. & Kälin, R. (Hrsg.) (2022): Stadler Dorfblatt Unsere Bäche. 3/2022.
- 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. (1977): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes Bd. 2. Fürstentum Liechtenstein, St. Gallen, Appenzell-Innerrhoden, Appenzell-Ausserrhoden, Zürich südwestl. Teil. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.
- 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 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 und die äusseren Einflüsse während den vergangenen Beobachtungsperioden und der zukünftigen Entwicklung. Eine breitere Betrachtung der Datenbasis soll dabei helfen, die Belastbarkeit der Resultate vernünftig einzuschätzen. Aus diesen Gründen fiel der Entschied 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-Niederschläge¹², 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.

¹² 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. 1977, 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 MeteoSchweiz¹³ für Datenreihen ab 1960 bis heute und mit längster Messperiode (Stand 2022), Auswertungen mit Vertrauensintervallen
- Kartographische Darstellungen¹⁴, basierend auf in MeteoSchweiz (siehe Fussnote 13) 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++¹⁵
- 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.

¹³ 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>

¹⁴ MeteoSchweiz, online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/ext/climate-extremes-maps.html>

¹⁵ <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 enthalten¹⁶. 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.

¹⁶ 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 2×2 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 erstellt¹⁷. 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.

¹⁷ Die Karte stellt, mit Werten für drei Windrichtungen gleichzeitig, keine realistische Situation dar.

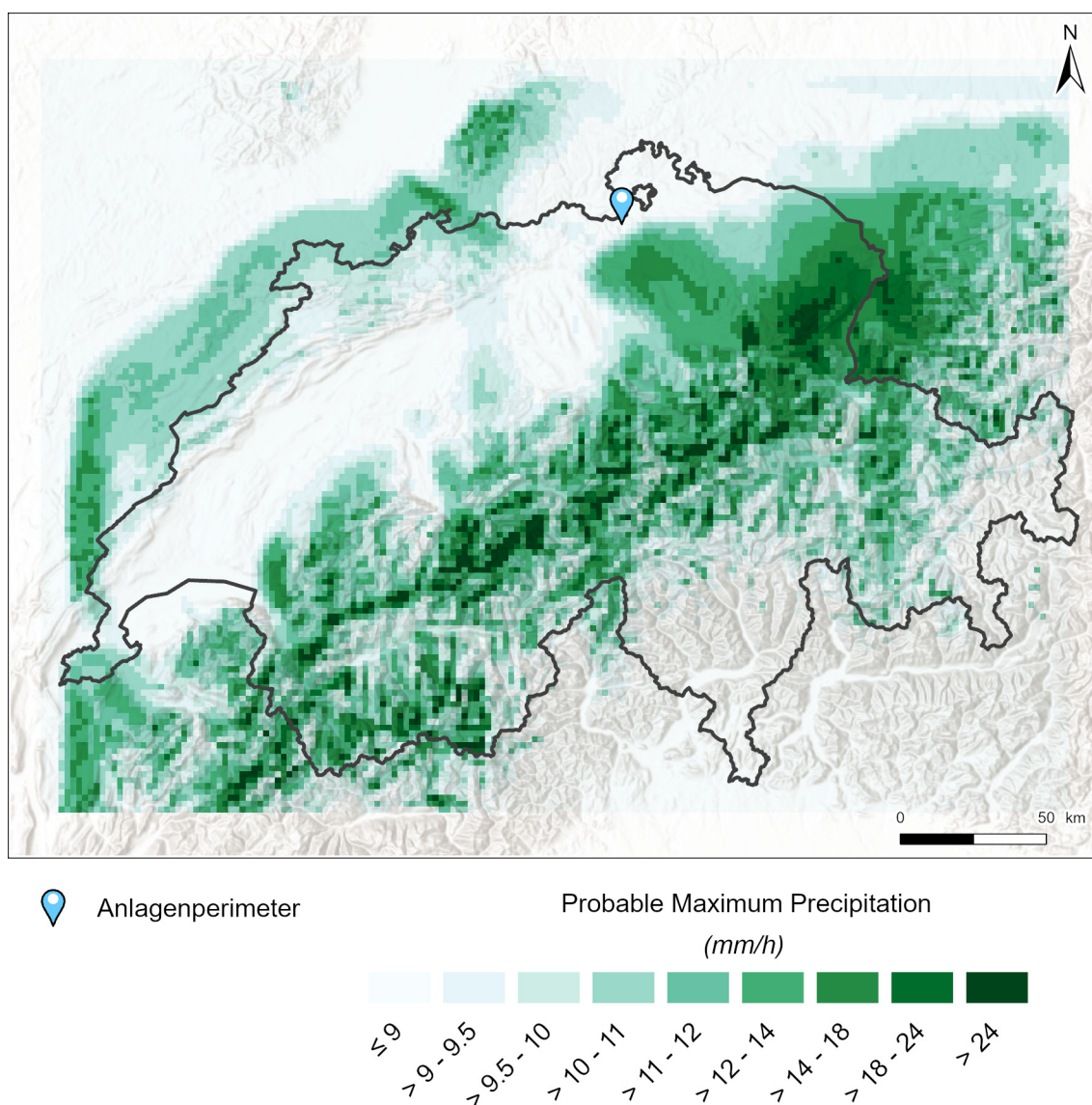


Fig. A-1: Probable Maximum Precipitation für den 24h-Niederschlag bei West-Nordwest-Wind

Punktwerte, Quelle Rohdaten: cruex.crealp.ch/documentation

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 erheblich 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 Bänder», 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).

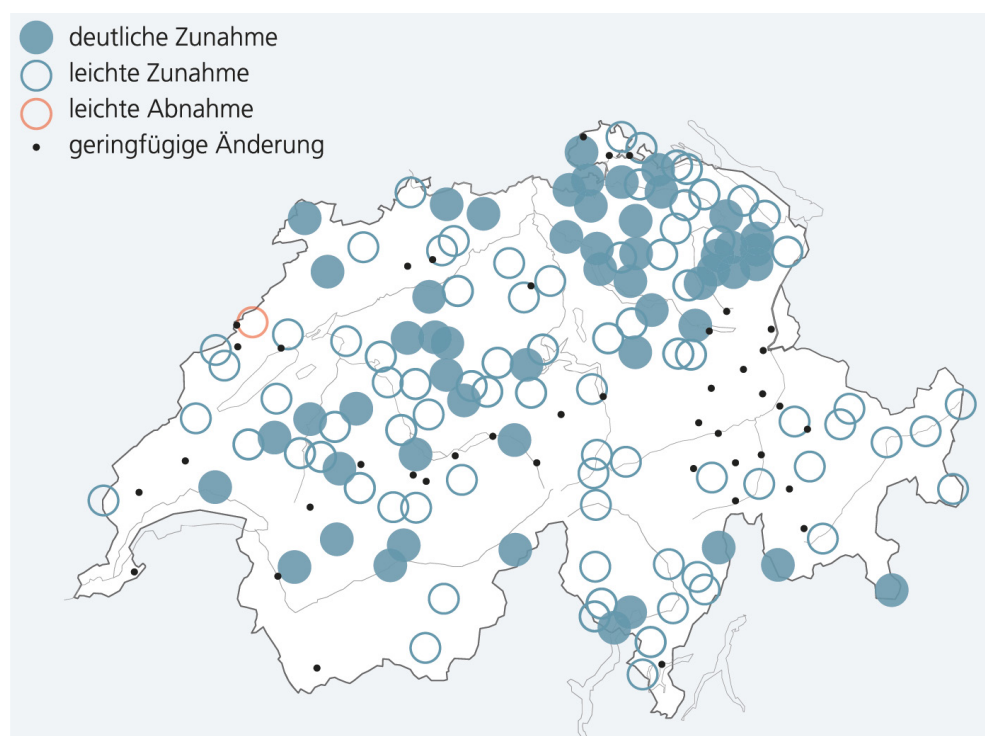


Fig. A-2: Beobachteter Trend 1901-2014 der stärksten Eintagesniederschläge des Jahres
Zunahmen sind vor allem in der Region der Nordostschweiz zu erkennen (NCCS 2018b)

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

Auswertungen gemäss Zeller et al. (1977, 1992) und MeteoSchweiz (siehe Fussnote 13) 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
Bülach	1901-1987	68	82	88	102	108	84	07.08.1978
Bülach	1901-2021	62	84	94	113	k.A.	85	07.08.1978
Bülach	1961-2021	67	93	105	129	k.A.	85	07.08.1978
Bülach	1901-2010	60	80	90	105	k.A.	85	07.08.1978
Bülach	1900-2022	60	76	83	93	98	85	07.08.1978
Bülach	***	65	83	95	108	110	225	
Wil bei Rafz	1901-1987	63	78	83	100	108	127	23.06.1975
Wil bei Rafz *	1901-2021	65	92	107	k.A.	k.A.	127	17.08.2010
Kaiserstuhl	1901-1970	60	72	77	86	90	77	25.06.1953
Kaiserstuhl	1902-2021	58	77	86	102	k.A.	77	25.06.1953
Kaiserstuhl	1961-2021	62	85	98	122	k.A.	75	18.05.1994
Kaiserstuhl	***	65	80	85	100	105	188	
Oberweningen	1902-1970	60	75	82	88	100	99	13.06.1930
Zürich Kloten	1949-1987	73	95	108	123	128	115	21.09.1968
Zürich Kloten	1950-2021	66	89	101	125	k.A.	115	21.09.1968
Zürich Kloten	1961-2021	67	91	105	131	k.A.	115	21.09.1968
Zh Fluntern	1961-2021	78	112	131	169	k.A.	103	21.09.1968
Zh Fluntern *	1865-2021	73	100	113	135	k.A.	171	11.06.1876
Zh Fluntern	***	75	100	110	125	130	256	
Dielsdorf **	1957-1987	70	105	130	170	180	110	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 Anlagenperimeters liegen zwei solcher Stationen (Kloten und Zürich Fluntern), in der weiteren Umgebung eine (Beznau). Im Diagramm am Beispiel der Station Zürich Fluntern (vgl. 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 in diesem Beispiel tendenziell

eine Zunahme der Niederschlagsintensitäten. Dieser Trend ist in den Daten von Kloten kaum ersichtlich, in Beznau jedoch bei kurzen Niederschlagsdauern besonders deutlich (vgl. Nagra (2024a)). Der funktionale Zusammenhang zwischen Niederschlagsdauer und -intensität hat sich bei den drei erwähnten Stationen nicht fundamental verändert.

Zum Vergleich ist auch die Kurve des PMP (für Standort Zürich Fluntern) eingezeichnet und liegt deutlich über den Kurven der Messreihen und beträgt in diesem Beispiel bis das 3-fache der 300-jährlichen Werte.

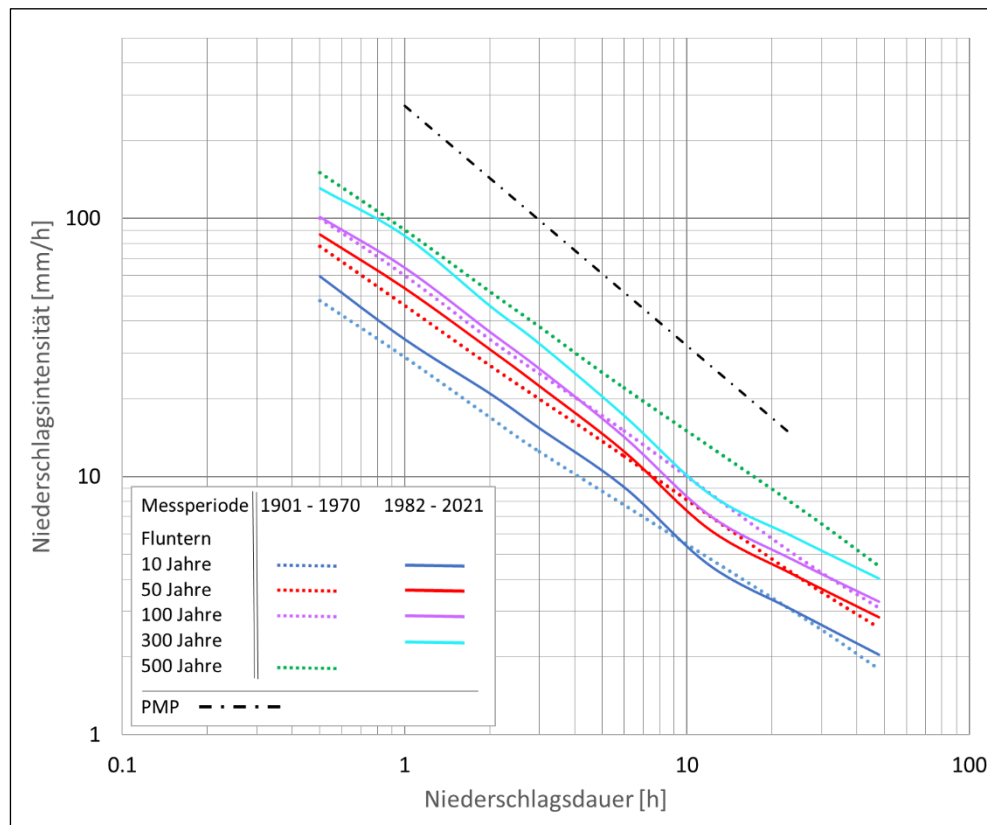


Fig. A-3: Niederschlagsintensitätsdiagramm der Station Zürich Fluntern für die Messperioden 1901 bis 1970 (punktierte Linien) und 1982 bis 2021 (ausgezogene Linien)

Zeller et al. (1977) und MeteoSchweiz (abgerufen am 15.2.23, siehe Fussnote 13).

Ein Hinweis auf allgemein anerkannte Differenzen bei Messung durch mehrere Stationen am gleichen Ort gibt der Vergleich der beiden in der weiteren Umgebung liegenden benachbarten Stationen Beznau und Würenlingen, die nur 2 km auseinander liegen und die bei den kurzen Niederschlagsdauern doch erhebliche Differenzen zeigen (300-jährlicher 1h-Niederschlag knapp 30%, vgl. Nagra (2024a)).

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 Tab. 2-1 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 spezifischen¹⁸ 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 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.

¹⁸ <https://cruex.crealp.ch/>, abgerufen am 15.05.2024.

Schnee

Eine Schneedecke bietet sowohl Speicherwirkung für Niederschlagswasser als auch zusätzliches Wasseräquivalent. Zum einen dämpft sie die Abflussganglinie, zum anderen 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 Nordschweiz¹⁹ 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 13). Bei 6 von den 14 Stationen wird kein Winterereignis unter den zehn höchsten gefunden. Extremereignisse kürzerer Dauer treten ausschliesslich in den Sommermonaten auf²⁰. 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 13).

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 Schneetage²¹ ist dann am grössten²² (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 ist²³.
- 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.
- Der Trend für (Neu-)Schneetage im Mittelland ist rückläufig²⁴.
- Schneehöhen im Mittelland nehmen ab.

¹⁹ Beznau, Laufenburg, Bözberg, Brugg, Ehrendingen, Baden, Otelfingen, Oberweningen, Dielsdorf, Kaiserstuhl, Zürich Kloten, Zürich Fluntern, Bülach und Wil bei Rafz

²⁰ Starkniederschläge - MeteoSchweiz (admin.ch), abgerufen am 27.10.2023

²¹ Schneetag: Schneehöhe grösser 1 cm

²² Klima-Indikatoren - MeteoSchweiz (admin.ch), abgerufen am 27.10.2023: Trendwert 2022 für Station Zürich Fluntern: Dezember bis Februar 23 Tage,

²³ 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)

²⁴ <https://www.slf.ch/de/schnee/schnee-und-klimawandel/>, abgerufen am 27.10.2023

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 Abflusskoeffizienten²⁵ 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 Eistage²⁶ voraus. Solche sind in der Region des Anlagenperimeters im Winter zwar nicht aussergewöhnlich, werden aber auch schweizweit immer seltener²⁷. 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 Eistagen²⁸, 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.

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.

²⁵ Im Zusammenhang mit der nachfolgend verwendeten Modellierung bezeichnet der Abflusskoeffizient Ψ denjenigen Anteil des Niederschlages N , der oberflächlich zum Abfluss (Q_{ob}) gelangt ($Q_{ob} = \Psi * N$).

²⁶ Frosttag: $T_{min} < 0^{\circ}C$; Eistag: $T_{max} < 0^{\circ}C$ [45]

²⁷ Wetter und Klima von A bis Z - MeteoSchweiz (admin.ch), abgerufen am 27.10.2023

²⁸ Klima-Indikatoren - MeteoSchweiz (admin.ch), abgerufen am 27.10.2023

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 bzw. Intensitätsverhältnisse 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. 2-3 dargestellte Intensitätskurve für die 10'000-jährlichen Modellniederschläge. Der Vergleich mit Kap. A.2.2 zeigt, dass die Intensitäten im Bereich des PMP für den Standort (220 mm/24h) zu liegen kommen.