



ARBEITSBERICHT NAB 24-30

Meteorologische und klimatologische
Verhältnisse am Standort der
Oberflächenanlage des geologischen
Tiefenlagers

Juli 2024



ARBEITSBERICHT NAB 24-30

Meteorologische und klimatologische
Verhältnisse am Standort der
Oberflächenanlage des geologischen
Tiefenlagers

Juli 2024

STICHWÖRTER

Geologisches Tiefenlager, gTL,
standortspezifische Gefährdungsanalyse, Meteorologie,
Klimatologie, extremes Wetter

**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 (gTL) am Standort Haberstal (Stadel, Kt. ZH) ist gemäss Kernenergieverordnung (KEV) als Teil der Gesuchsunterlagen ein Sicherheitsbericht einzureichen, in welchem nach Art. 23 KEV Angaben zu den Standorteigenschaften an der Erdoberfläche anzugeben sind. Dies betrifft unter anderem die standortspezifischen externen Gefährdungen, wozu gemäss Richtlinie A05 des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) auch meteorologische und klimatologische Gefährdungen zählen, die in einer Analyse abzubilden und zu bewerten sind.

Zur Charakterisierung des Standorts der Oberflächenanlage des gTL in Bezug auf das Potenzial meteorologischer und klimatologischer Gefährdungen werden die Verhältnisse sowohl qualitativ als auch quantitativ über die statistische Auswertung von Messdaten spezifischer Parameter beschrieben und ausgewertet. Dabei ist für durch Naturereignisse ausgelöste Ereignisse, wozu die meteorologischen und klimatologischen Gefährdungen zählen, jeweils von einem Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-3} bzw. von 10^{-4} pro Jahr auszugehen. Zu den zu bewertenden Gefährdungen zählen:

- Maximale und minimale Lufttemperatur
- Wind und Tornado
- Niederschlag (Starkregen, Schnee, Schneelasten, Hagel und vereisender Regen)
- Blitze

Bei der Ermittlung der Gefährdung wird teilweise auf bestehende Datensätze und Auswertung zurückgegriffen sowie neue extremwertstatistische Analysen mit erweiterten Datensätzen durchgeführt. Dabei werden insbesondere Messdaten von MeteoSchweiz betriebenen Messstationen bis Ende des Jahres 2022 berücksichtigt. Die Methode, Daten (inkl. Datenqualität) und Bewertung orientiert sich dabei am Vorgehen bestehender standortspezifischer Gefährdungsanalysen anderer Kernanlagen und berücksichtigen somit auch die Forderungen des ENSI, die sich aus ihren Prüfungen ergeben haben. Der spezielle Charakter sowie insbesondere das deutlich kleinere Gefährdungspotenzial eines gTL (im Vergleich zu KKW) wird bei der Auswahl und Bewertung der Parameter entsprechend berücksichtigt. Der Standort befindet sich weniger als 10 km bzw. 20 km von den Messstationen Zürich-Kloten bzw. der bestehenden Kernanlagen entfernt. Diese sind seit Jahrzehnten Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen auch im Rahmen meteorologischer und klimatologischer Gefährdungen und gelten damit als sehr gut erfasst, untersucht und bewertet. Der Messstandort Kloten wurde und wird auch für die Analysen der Kernkraftwerke verwendet.

Allgemein lässt sich feststellen, dass das Klima am vorgeschlagenen Standort den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage entspricht und darüber hinaus die Meteorologie am Standort typisch für die Region Nordschweiz bzw. das Schweizer Mittelland ist. Die Ergebnisse der Analyse zeigen zudem – zusammen mit den zahlreichen genannten bereits bestehenden Studien – dass für den Standort des gTL keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen bzgl. extremer meteorologischer und klimatologischer Verhältnisse, bei denen auch erwartbare Einflüsse des Klimawandels entsprechend berücksichtigt wurden, vorliegen. Die standortspezifischen Parameter liegen innerhalb der üblichen für die Auslegung von kerntechnischen Bauten und Strukturen festgelegten Grenzwerten.

Insgesamt ist der Standort somit durch stabile meteorologische und klimatologische Verhältnisse gekennzeichnet. Der Standort ist für den Bau und Betrieb eines gTL geeignet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Figurenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung und Grundlagen	1
1.1 Ziel und Inhalte.....	1
1.2 Gesetzliche und behördliche Rahmenbedingungen.....	1
1.3 Allgemeine Charakterisierung des Standorts.....	1
1.4 Historische Einordnung und Synergie zu bestehenden Untersuchungen	3
2 Auswahl der meteorologischen und klimatologischen Parameter	4
2.1 Auswahl und Einengung der Parameter.....	4
2.2 Messstationen und weitere Angaben	4
3 Methodik der statistischen Auswertung	6
3.1 Trends	6
3.2 Plausibilisierung	6
3.3 Unsicherheiten	7
4 Meteorologische und klimatologische Parameter	8
4.1 Lufttemperatur	8
4.1.1 Mittlere Lufttemperatur	8
4.1.2 Maximale Lufttemperatur.....	8
4.1.3 Minimale Lufttemperatur.....	10
4.1.4 Wertung	11
4.2 Wind und Tornado.....	11
4.2.1 Mittlere Windgeschwindigkeiten und Richtungen	11
4.2.2 Maximale Windgeschwindigkeiten	11
4.2.3 Tornados	12
4.2.4 Wertung	12
4.3 Niederschlag (Regen)	13
4.3.1 Mittlere Niederschlagswerte	13
4.3.2 Maximale Niederschlagswerte.....	13
4.3.3 Wertung	14
4.4 Schnee.....	14
4.4.1 Maximale Neuschneehöhen.....	14
4.4.2 Maximale Schneelasten	15
4.4.3 Wertung	16
4.5 Hagel.....	16
4.5.1 Mittlere Hagelkorngrössen	16

4.5.2	Maximale Hagelkorngrößen	16
4.5.3	Wertung	17
4.6	Vereisender Regen.....	17
4.6.1	Mittlere Vereisungsereignisse	17
4.6.2	Maximale Vereisungsereignisse	17
4.6.3	Wertung	18
4.7	Blitze.....	18
4.7.1	Maximale Blitzintensitäten.....	18
4.7.2	Wertung	18
5	Zusammenfassung und Fazit	19
6	Literaturverzeichnis	20
Anhang A	Messstationen	A-1
Anhang B	Block-Maxima-Methode.....	B-1
Anhang C	Unsicherheiten	C-1
C.1	Wahl der Messorte (Repräsentativität der Messpunkte).....	C-1
C.2	Datenprüfung durch MeteoSchweiz	C-1
C.3	Toleranzen der Messgeräte	C-2
C.4	Epistemische Unsicherheit.....	C-2
C.5	Bewertung.....	C-3
C.6	Unterschiede und Interpretation extremwertstatistischer Analysen	C-3
Anhang D	Ergebnistabellen	D-1
D.1	Lufttemperatur	D-1
D.2	Wind	D-2
D.3	Niederschlag (Regen)	D-3
D.4	Schneelasten	D-4

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Meteorologische und klimatologische Parameter sowie deren Einordnung.....	4
Tab. 5-1:	Gefährdungsannahmen (10^{-4} -jährlich) am Standort der gTL gemäss den Ergebnissen aus Kap. 4 und – zum Vergleich – gemäss ENSI (2022) für den KKB-Standort.....	19
Tab. A-1:	Messstationen und gemessene meteorologische und klimatologische Parameter.....	A-1
Tab. C-1:	Messgeräte am Standort Beznau und zugehörige Genauigkeit.....	C-2
Tab. D-1:	Extremwerte für die maximalen Tageslufttemperaturen 2 m (Kloten) und 10 m (KKW) über dem Boden, basierend auf extremwertstatistischen Analysen	D-1
Tab. D-2:	Extremwerte für die minimalen Tageslufttemperaturen 2 m (Kloten) und 10 m (KKW) über dem Boden, basierend auf extremwertstatistischen Analysen	D-1
Tab. D-3:	Extremwerte für die maximale Monatswindgeschwindigkeit 10 m über dem Boden, basierend auf extremwertstatistischen Analysen.....	D-2
Tab. D-4:	Extremwerte des 2h-Niederschlags, basierend auf extremwertstatistischen Analysen	D-3
Tab. D-5:	Extremwerte für die jährlichen maximalen Schneelasten (ohne Trend, Daten bis 31.12.2022)	D-4

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Übersichtskarte des Projektperimeters in der Gemeinde Stadel (oben) und Lage innerhalb des (grün gezeigten) Schweizer Mittellandes (unten).....	2
Fig. 3-1:	Veränderungen des Schweizer Klimas basierend auf Beobachtungen.....	7
Fig. B-1:	Darstellung des Konzeptes der Block-Maxima-Methode.....	B-1

Abkürzungsverzeichnis

ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EXAR	Extremhochwasser an der Aare
GEV	Generalized Extreme Value Distribution
GV	Gumbelverteilung
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
IAEA	International Atomic Energy Agency
KKB	Kernkraftwerk Beznau
KKW	Kernkraftwerke
PSI	Paul-Scherrer-Institut
SLF	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung
WMO	World Meteorological Organization
Zwilag	Zwischenlager Würenlingen AG

1 Einleitung und Grundlagen

1.1 Ziel und Inhalte

Im Zuge des Rahmenbewilligungsgesuchs für das geologische Tiefenlager am Standort Haberstal (Stadel, Kt. ZH) ist gemäss Kernenergieverordnung (KEV 2004) als Teil der Gesuchsunterlagen ein Sicherheitsbericht (Nagra 2025) einzureichen, in dem nach Art. 23 KEV Angaben zu den Standorteigenschaften an der Erdoberfläche anzugeben sind. Dies betrifft unter anderem die standortspezifischen externen Gefährdungen, wozu gemäss Richtlinie A05 des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI 2018) auch meteorologische und klimatologische Gefährdungen zählen, die in einer Analyse zu bewerten sind. Der vorliegende Bericht beschreibt und bewertet die meteorologischen und klimatologischen Verhältnisse am Standort des gTL sowohl qualitativ als auch quantitativ anhand statistischer Auswertung von Messdaten. Dabei wird auf bestehende Datensätze und Auswertungen zurückgegriffen sowie neue Analysen mit erweiterten Datensätzen durchgeführt, bei denen Messdaten bis Ende des Jahres 2022 berücksichtigt wurden. Die Methode und Bewertung orientiert sich am Vorgehen bestehender Gefährdungsanalysen anderer Kernanlagen (KKB 2014b, KKB 2014a, KKG 2014).

In Kap. 1 erfolgt – neben der Erläuterung des Berichtsziels – die Charakterisierung des Standorts, die gesetzlichen Grundlagen sowie die Einordnung und Synergie zu vorhandenen Gefährdungsanalysen anderer Kernanlagen. Die Auswahl und Einengung der zu betrachtenden Parameter und die Auswahl der verwendeten Messstationen wird in Kap. 2 dargelegt. In Kap. 3 wird die angewandte Methode und verwendete Software genannt. In Kap. 4 erfolgt die Beschreibung, Analyse und Bewertung der einzelnen Parameter inklusive Angaben zu den Trends und Plausibilisierungsbetrachtungen. Eine Zusammenfassung und ein abschliessendes Fazit finden sich in Kap. 5.

1.2 Gesetzliche und behördliche Rahmenbedingungen

Gemäss Art. 8 Abs. 4bis KEV ist bei durch Naturereignisse ausgelösten Störfällen jeweils von einem Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-3} bzw. von 10^{-4} pro Jahr auszugehen. Darüber hinaus gibt es für deterministische Nachweise der meteorologischen und klimatologischen Parameter Anforderungen und Regelungen, die bspw. die Festlegung der Parameter (Kap. 2.1), die Auswahl der relevanten Messorte (Kap. 2.2), Optionen zur statistischen Auswertung (Kap. 3), die Berücksichtigung des Klimawandels bzw. paläoklimatologische Daten (Kap. 3.1) sowie die Bewertung der Unsicherheit (Kap. 3.3) betreffen. Zudem sind die Gefährdungsannahmen für Extremwetterereignisse, welche das ENSI im Jahr 2022 neu festgelegt hat (ENSI 2022), zu beachten.

1.3 Allgemeine Charakterisierung des Standorts

Der Projektperimeter, der mit der Rahmenbewilligung raumplanerisch festgelegt wird und auf dem die Oberflächenanlage des gTL realisiert wird, befindet sich am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel, Kt. ZH). Eine Übersicht über den Projektperimeter ist in Fig. 1-1 oben gezeigt. Der Projektperimeter liegt in einem leicht nach Osten geneigten Kerbtal in der ost-west ausgerichteten Flur Haberstal und wird im Osten von der Landstrasse begrenzt. Die im Westen mit ausgedehnten Wäldern bestockte Erhebung des Ämpergs umrahmt die Flur Haberstal.

Die Schweiz und das Schweizer Mittelland, in dem sich der Standort befindet (siehe Fig. 1-1, unten), liegen klimatisch in einer Übergangszone zwischen dem atlantischen See- und dem Kontinentalklima. Vorherrschend ist die durch Westwinde vom Atlantik herangeführte feucht-milde Meeresluft. Die Alpen bilden eine markante Klimascheide zwischen dem Klima nördlich und südlich davon. Das Klima am Standort entspricht daher den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage. Darüber hinaus ist die Meteorologie typisch für die Region Nordschweiz bzw. das Schweizer Mittelland.

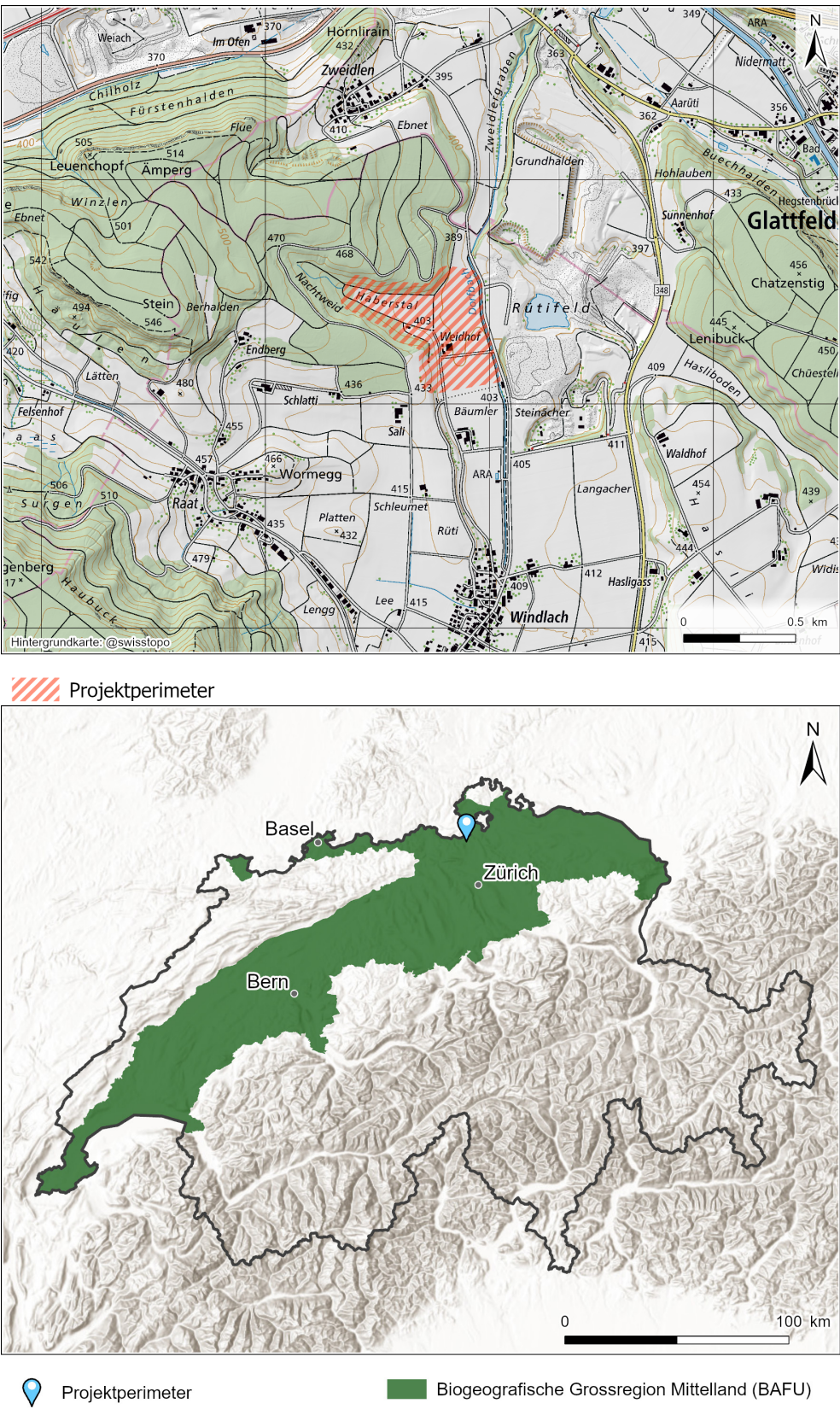


Fig. 1-1: Übersichtskarte des Projektperimeters in der Gemeinde Stadel (oben) und Lage innerhalb des (grün gezeigten) Schweizer Mittellandes (unten)

1.4 Historische Einordnung und Synergie zu bestehenden Untersuchungen

Bereits 1969 wurde für das Kernkraftwerk Beznau (KKB) ein Sicherheitsbericht erstellt, der klimatologische Informationen über den KKB-Standort, der 18 km vom Projektperimeter entfernt ist, beinhaltet. Der Bericht wurde regelmässig aktualisiert und die Abschnitte zur Meteorologie und Klimatologie weiter ausgebaut, so dass heute für das KKB und die umliegende Region eine umfassende Beschreibung der meteorologischen und klimatologischen Bedingungen vorhanden ist. Analoge Untersuchungen und Berichte liegen auch für das KKW Leibstadt sowie das Ersatz-KKW Beznau (Resun AG 2008) und Niederamt (KKN AG 2008) vor. Die Berichte wurden vom ENSI geprüft, wobei auch eigene in Auftrag gegebene Untersuchungen des ENSI (MeteoSchweiz 2009) in die Bewertung eingeflossen sind.

Im Juli 2012 erteilte das ENSI den Schweizer KKW die Auflage, eine (Neu)Bestimmung der meteorologischen und klimatologischen Gefährdungen durchzuführen (ENSI 2012). Aus den von MeteoSchweiz für die KKW und für verschiedene Vergleichsstandorte bereitgestellten Daten wurden standortspezifische Gefährdungen hergeleitet und dokumentiert sowie ein übergeordneter Bericht erstellt. Die Ergebnisse bzw. Berichte wurden durch externe Reviewer sowie das ENSI mehrmals geprüft und entsprechend den behördlichen Forderungen bzgl. Daten, Methode und Auswertung überarbeitet. Der die Forderungen des ENSI-Reviews entsprechend berücksichtigende übergeordnete Bericht (swissnuclear 2023) wurde im Jahr 2023 dem ENSI eingereicht. Neben den Messdaten von den KKW-Standorten existieren weitere Messstationen in grösserer Nähe zum gTL, wie die Messtation Zürich-Kloten – deren Winddaten auch in den Analysen des KKB ausgewertet und verwendet werden – oder Bülach, die ca. 9 bzw. 5 km entfernt sind.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass für die Umgebung des Standorts des gTL die Untersuchung und Bewertung meteorologischer und klimatologischer Parameter seit Jahrzehnten Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen ist und damit als sehr gut erfasst, untersucht und bewertet gelten kann. Die zahlreichen genannten Studien zeigten für die Extremwerte der Parameter keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen. Die in vorliegendem Bericht für den Standort des gTL verwendeten Methoden und Daten beruhen zu grossen Teilen auf diesen vorangegangenen Arbeiten und berücksichtigen somit auch die Forderungen des ENSI, die sich aus ihren Prüfungen ergeben haben.

Die angewandte Methode, Daten (und Datenqualität) als auch die Ergebnisse sind somit im Einklang mit den Analysen der KKW. Im Unterschied zu den KKW-Analysen wurden für diesen Bericht zeitlich aktualisierte Datensätze und weitere Messstationen verwendet.

2 Auswahl der meteorologischen und klimatologischen Parameter

2.1 Auswahl und Einengung der Parameter

Meteorologische und klimatologische Prozesse werden über eine Vielzahl von Parametern beschrieben. Das ENSI hat in verschiedenen Verfügungen (siehe z.B. ENSI 2022) festgelegt, welche Parameter für die deterministischen Nachweise der KKW zu erfassen und auszuwerten sind. In Tab. 2-1 sind diese Parameter aufgelistet und deren Bedeutung für ein gTL eingeordnet.

Tab. 2-1: Meteorologische und klimatologische Parameter sowie deren Einordnung

meteorologische und klimatologische Parameter	Bedeutung für gTL	Bedeutung für KKW
Min./Max. Lufttemperatur	Allgemeiner Parameter	Kühlung der BE / Wärmeabfuhr,
Wind und Tornado	Einwirkung auf Gebäude	
Niederschlag	Dacheinwirkung (Aufstau) und Überflutung des Geländes (Oberflächenabfluss)	
Flusstemperaturen	Nicht relevant	Wärmesenke für Reaktor
Schneehöhen und Lasten	Erreichbarkeit Gelände, Schneelasteinwirkung auf Gebäude	
Blitze	Blitzschutz, elektrische Anlagen	
Hagel	Einwirkung auf Gebäude	
Vereisender Regen	Einwirkung auf Gebäude, Erreichbarkeit Gelände und Gebäude	
Trockenheit	Nicht relevant	Kühlung Reaktor

Aufgrund der Tätigkeiten und insb. dem kleinen Gefährdungspotenzial eines gTL (im Vergleich zu KKW, vgl. Nagra (2025)) sind nicht alle Parameter notwendig, die das ENSI festgelegt hat. Für das gTL sind z.B. keine aktiven Auslegungs-Massnahmen zur Wärmeabfuhr notwendig und damit die Auswertung von Flusswassertemperaturen und Trockenheit nicht erforderlich.

2.2 Messstationen und weitere Angaben

Die Grundlage der Auswertung stellen die Daten dar, die durch das Messnetz des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie qualitätsgesichert erfasst, ausgewertet und bereitgestellt wurden. Dieses automatische Messnetz – SwissMetNet, das nationale meteorologische Bodenmessnetz des staatlichen Wetterdiensts MeteoSchweiz – zählt 160 automatische Messstationen. Diese Stationen liefern alle zehn Minuten eine Vielzahl an aktuellen Daten zu Wetter und Klima in der Schweiz. Rund 140 automatische Niederschlagsstationen ergänzen das Messnetz. Eine Diskussion der Repräsentativität der Stationen findet sich in Begert (2008).

Die Messstation Beznau zeichnet beispielsweise folgende meteorologischen und klimatischen Parameter auf:

- Windgeschwindigkeit und Windrichtung,
- Luft- und Bodenoberflächentemperatur,
- Luftfeuchtigkeit und -druck sowie Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und
- Niederschlag.

Für die extremwertstatistische Auswertungen wurden die in Tab. A-1 und in den folgenden Abschnitten aufgelisteten Stationen verwendet. Prinzipiell erfolgt die Auswahl der Messstationen nach zwei Kriterien: der geographischen Nähe bzw. meteorologischen und klimatologischen Vergleichbarkeit zum Standort und der Länge der Zeitreihe bzw. der Qualität der Daten¹.

Die konkrete Auswahl der repräsentativen Messstationen erfolgte gemäss folgenden Ansätzen:

- Bei den Temperaturen werden primär aufgrund der geringen räumlichen Entfernung die Daten der Messstation Beznau sowie Zürich-Kloten verwendet. Beznau besitzt Temperaturwerte auf Höhe von 10 m, Zürich-Kloten auf Höhe von 2 m über dem Boden. Zu Vergleichszwecken werden auch die Daten der Messstationen von Gösgen und Leibstadt verwendet.
- Bei den Niederschlägen wird eine höhere Anzahl Messstationen ausgewählt (vgl. Tab. A-1), um die hohe räumliche Variabilität zu berücksichtigen. Alle Messstationen liegen im Schweizer Mittelland auf einer Höhe zwischen 300 und 800 m. Die Messreihen sind jedoch unterschiedlich lang. Dabei wird auch die in Andres et al. (2021) durchgeführte Niederschlagssimulation in Kaiserstuhl, das ca. 5 km vom Standort entfernt liegt, genutzt.
- Die Windverhältnisse unterliegen den spezifischen orographischen Bedingungen am Standort, so dass die Ergebnisse anderer Standorte nicht ohne weiteres übertragbar sind. Die längste Messreihe liegt für die nahgelegenen Messstation Zürich-Kloten vor. Darüber hinaus werden als Vergleichsstationen die KKW-Standorte herangezogen.
- Im Schweizer Mittelland werden wenige systematische Schneemessungen durchgeführt. Insofern liegen hier keine gesicherten Untersuchungen für den Standort vor. Bei der Wahl der Stationen für die Schneelasten wird daher auf die Empfehlungen vom Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) für die KKW zurückgegriffen. Die Berechnung der jährlichen Maximalwerte der Schneelasten für den als vergleichbar angesehenen Standort Beznau erfolgte basierend auf Messwerten an den Standorten Basel, Bern-Zollikofen, Buchs, Aarau, Hallau, Wynau, Zürich-Kloten, Grenchen-Biel, Luzern, Koppingen, Zürich-Fluntern, Haidenhaus und St. Gallen. Die Messreihenlänge ist für diese Standorte unterschiedlich. Der Messbeginn reicht von 1931 bis 1986. An einigen Stationen wurden die Messungen eingestellt, wie z.B. Wynau 2009 und Haidenhaus 2012.
- Die Erfassung der Blitze erfolgt nicht an einzelnen Messstationen, sondern die Blitze werden über Triangulation erfasst. Als Kriterium gilt hier ein 30 km Radius um die Station Beznau. Daraus wird die Wahrscheinlichkeit für einen Blitz im 200 m Umkreis um das KKW berechnet. Es existieren verschiedene Anbieter von Blitzdaten, wie z.B. Siemens (BLIDS). Darüber hinaus gibt es einen Blitzstromzähler im KKB. In vorliegenden Fall umfassen die Daten für Beznau und Leibstadt auch den ca. 18 km entfernten Standort des gTL.
- Die Bestimmung von Hagel und vereisendem Regen erfolgt anhand von Gefährdungswerten aus dem Ausland (vgl. Kap. 4.5 und 4.6), so dass keine Messstationen ausgewählt werden.

In Kapitel 4 werden basierend auf den Daten der meteorologischen und klimatologischen Parameter der ausgewählten Messstationen (mit Daten bis Ende 2022) im Wesentlichen Mittelwerte sowie Extremwerte mit einer 10^{-3} oder 10^{-4} -jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit bzw. einer Wiederkehrperiode von 1'000 bis 10'000 Jahren angegeben. Die Extremwerte werden basierend auf extremwertstatistischen Analysen ermittelt (vgl. Kap. 3).

¹ Die Messstation Bülach befindet sich in einer Entfernung von weniger als 5 km zum gTL-Standort. Die Station ist seit Beginn des 20. Jahrhunderts in Betrieb, allerdings sind die Anforderungen für eine extremwertstatistische Analyse aus Sicht MeteoSchweiz nicht erfüllt, so dass diese Station nicht in den Auswertungen berücksichtigt wird.

3 Methodik der statistischen Auswertung

Das ENSI unterschied in seiner Forderung (ENSI 2012) zwischen quantitativen und qualitativen Auswertungen verschiedener meteorologischer und klimatologischer Parameter. Bei den quantitativen Auswertungen werden extremwertstatistische Analysen durchgeführt. Für die Parameter, für die eine qualitative Auswertung gefordert war, erfolgt eine Bewertung und – soweit erforderlich – eine Anpassung der bereits vorliegenden Untersuchungen.

Die Bestimmung der Extremwerte wurde in der vorliegenden Analyse mit Hilfe der Generalisierten Extremwertverteilung (GEV) und der Gumbelverteilung (GV) durchgeführt und die Block-Maxima-Methode verwendet (vgl. Anhang A). Die drei Parameter der GEV (Formparameter, Skalenparameter und Lageparameter) und der GV (Log und Skalenparameter) wurden mit der Software Python mit dem Paket pyextreme berechnet und werden jeweils in den Statistiken aufgeführt. Als unterer und oberer Vertrauensbereich werden die 2.5 % bzw. 97.5 % Quantile verwendet und angegeben.

3.1 Trends

Bezüglich der Berücksichtigung möglicher Trends und Veränderungen der meteorologischen und klimatologischen Parameter existieren Unterschiede zwischen den Kernkraftwerken und dem gTL. Während der kommerzielle Betrieb der Schweizer KKW nach aktuellem Stand die nächsten ca. 20 Jahre umfasst, sieht das aktuelle Entsorgungsprogramm (Nagra 2021) die Inbetriebnahme des geologischen Tiefenlagers im Jahr 2050 vor.

Aufgrund des langen Zeithorizonts bei Planung, Erstellung und Betrieb des gTL ist eine Berücksichtigung von beobachteten und zu erwartenden Veränderungen und Trends von meteorologischen und klimatologischen Parametern zwingend (siehe beispielsweise MeteoSchweiz² und Fig. 3-1). In der Schweiz liegen umfangreiche Untersuchungen historischer Wetter- und Klimabedingungen vor, beispielsweise Pfister (1999) oder Euro-Climhist³. Zusammen mit prognostizierten Veränderungen klimatologischer Parameter (NCCS 2018, IPCC 2021 oder ETH Land-Climate Diagnostic Atlas) sowie der Diskussion über potenzielle Auswirkungen dieser Änderungen (beispielsweise CLIMADA⁴) erfolgt in den jeweiligen spezifischen Kapiteln eine parameterspezifische Bewertung des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik zu solchen Trends. Um diese zu bestätigen bzw. zu ergänzen, wurden mit den aktualisierten Daten auch punktuell Trendanalysen⁵ abgeschätzt.

3.2 Plausibilisierung

Aufgrund der zahlreichen vorangegangenen Studien meteorologischer und klimatologischer Parameter, deren Begutachtung durch das ENSI und der umfangreichen vorliegenden Beobachtungsdaten aus der Umgebung erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse der neuen, erweiterten extremwertstatistischen Analysen mit den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen in den jeweiligen Kapiteln.

² <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel.html>

³ <https://www.euroclimhist.unibe.ch>

⁴ Economics of Climate Adaptation, <https://wcr.ethz.ch/research/climada.html>

⁵ beispielsweise lineare Trendanalysen oder Autoregressive Integrated Moving Averages (ARIMA) und SARIMA-Modelle

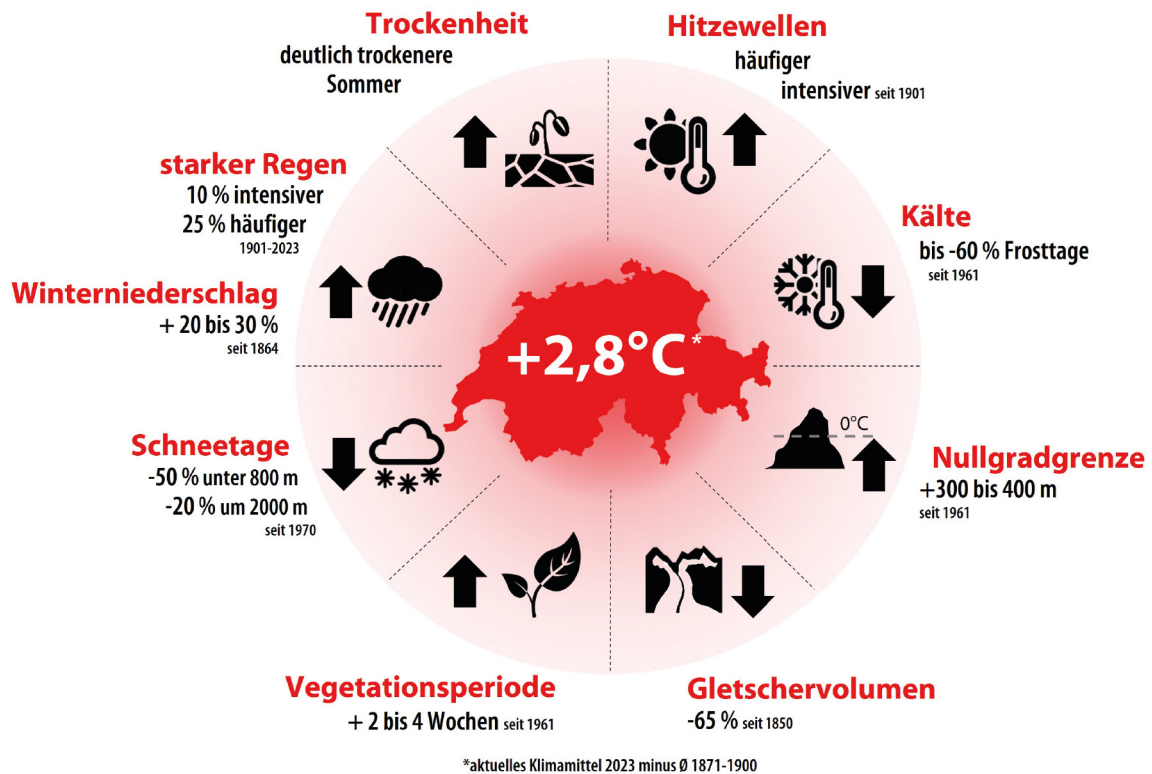


Fig. 3-1: Veränderungen des Schweizer Klimas basierend auf Beobachtungen
(MeteoSchweiz, <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel.html>)

3.3 Unsicherheiten

Die Ermittlung der Extremwerte mit einer Häufigkeit von 10^{-3} oder 10^{-4} pro Jahr aus den Daten der meteorologischen und klimatologischen Parameter weist gewisse Unsicherheiten auf. Solche Unsicherheiten umfassen z.B. Ablesefehler, Messfehler, die Wahl des Messstandorts, fehlerhafte Erfassung der Messdaten oder die epistemische Unsicherheit bei der statistischen Auswertung. Im Anhang C wird auf verschiedene Unsicherheiten und deren Umgang in der Studie eingegangen und nachfolgend zusammengefasst.

Die Unsicherheiten werden durch die Verwendung qualitätsgesicherter und nach dem aktuellen Stand der Technik erfasster Daten und durch die Verwendung bewährter statistischer Methoden soweit möglich begrenzt. Unabhängig davon lehnt sich diese Studie an die bereits genannten vorgegangenen Studien an, die durch die verschiedenen Betreiber erstellt und vom ENSI und Dritten geprüft wurden. Die intensive Diskussion in diesem kontinuierlichen Verbesserungsprozess begrenzt die verbleibenden Unsicherheiten derart, dass ihr Einfluss vernachlässigbar ist.

4 Meteorologische und klimatologische Parameter

In diesem Kapitel werden für den Standort (vgl. Kap. 1.3) die einzelnen meteorologischen und klimatologischen Parameter aus Kap. 2.1 im Detail beschrieben und bzgl. Mittel- und Extremwerten statistisch gemäss der Methode in Kap. 3 ausgewertet.

4.1 Lufttemperatur

4.1.1 Mittlere Lufttemperatur

Für das Schweizer Mittelland beträgt die Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1991 bis 2010 ungefähr 9 °C. Für den Standort Zürich-Kloten⁶ und Beznau (Zeitraum 1987 bis 2022) wird eine mittlere Jahrestemperatur von 9.4 °C bzw. 10.6 °C angegeben.

4.1.2 Maximale Lufttemperatur

Für den Zeitraum von 1901 bis 1989 betrug in der Schweiz das absolute Maximum der Temperatur 36.7 °C. Bis 2022 wurde das absolute Maximum der Temperatur auf der Alpennordseite am 13. August 2003 mit 37.5 °C erreicht. Allerdings erlebte die Schweiz in den letzten Jahren mehrere ausserordentlich heisse Sommer, wie z.B. 2015, 2017, 2018 und 2019 (MeteoSchweiz 2019). Am 19. Juni 2022 wurde in Beznau 2 m über dem Boden eine Tageshöchsttemperatur von 36.9 °C gemessen⁷. Die Schweiz blickt 2022 auf den zweitwärmsten Sommer seit Messbeginn 1864 zurück, nur der Sommer 2003 war heisser. Genf meldete am 4. August 2022 mit 38.3 °C den höchsten Wert des Schweizer Sommers 2022. Der höchste gemessene Wert auf der Alpennordseite stammt ebenfalls von Genf. Er lag bei 39.7 °C und datiert vom 7. Juli 2015. Den Schweizer Rekord hält Grono (Alpensüdseite) mit 41.5 °C am 11. August 2003 (MeteoSchweiz 2022a).

Extremwerte mit einer Häufigkeit von 10⁻³ und 10⁻⁴ pro Jahr

Die auf Basis extremwertstatistischer Analysen ermittelte maximale Lufttemperatur am Standort Zürich-Kloten sowie den KKW sind in Tab. D-1 angegeben. Für den Standort Zürich-Kloten und Beznau ergeben sich für eine Häufigkeit von 10⁻⁴ pro Jahr Werte von 41.1 °C bzw. 39.6 °C. Der Wert von Zürich-Kloten bezieht sich auf eine Höhe von 2 m über dem Boden (bei KKW sind es 10 m). Der Unterschied bei Tagesextremwerten auf 2 m und 10 m beträgt in Beznau ca. 0.5 °C. Der Unterschied auf 2 m in Basel und auf 10 m in Beznau lag zwischen 1 und 2 °C.

Trends

Trends der Temperaturveränderung werden umfassend sowohl international in IPCC (2021) als auch Schweiz-spezifisch in NCCS (2018) untersucht und bewertet. Basierend auf NCCS (2018) ergibt sich aus dem Simulationsmodell RCP^o8.5 ein mittlerer Temperaturanstieg pro Jahrhundert von ca. 6.5 °C. In Davidson (2014) wurde für die verschiedenen Kraftwerksstandorte ein mittlerer Temperaturanstieg zwischen 4.7 und 6.6 °C ermittelt. Eigene Untersuchungen mit den Daten bis 2022 zeigen mittlere Temperaturerhöhungen über 100 Jahre zwischen 3.0 und 7.0 °C.

Trends der mittleren Temperatur können nach heutigem Kenntnisstand aber auch zu Trends der Extremtemperaturen führen. Unter anderem in IAEA (2019) wird festgestellt, dass bei einem Anstieg der globalen mittleren Temperaturen extreme Temperaturen häufiger auftreten können.

⁶ <https://de.climate-data.org/europa/schweiz/zuerich/kloten-22308/>

⁷ <https://www.aargauerzeitung.ch/aargau/zurzibiet/369-grad-ist-rekord-der-hitze-kanton-nummer-eins-warum-es-im-aargau-im-juni-so-heiss-ist-wie-nirgendwo-sonst-ld.2307270?reduced=true>

Hitzewellen werden demnach länger, häufiger, intensiver und grossflächiger werden. Detaillierte Angaben zur unterschiedlichen Entwicklung von mittleren Temperaturen und Extremwerten findet sich z.B. in Müller & Remund (2023) für Basel. Dort treten sichtbare Veränderungen der Extremwerte erst ab dem Jahre 2050 auf. Dies wird auch von Deutschländer & Mächel (2017) allgemein und von Deutschländer & Dalelane (2012) für den süddeutschen Raum bestätigt: Demnach muss man für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit heute noch seltener Ereignisse mit sehr hohen Tageshöchsttemperaturen rechnen.

Zurzeit gibt es eine wissenschaftliche Diskussion, ob sich die maximalen Lufttemperaturen durch eine erhöhte Austrocknung des Bodens verändern und damit Temperaturregimes vergleichbar mit jenen am Mittelmeer auftreten können. Dafür liegen aber bisher noch keine oder keine ausreichend langen Messreihen vor. Solche Veränderungen werden bereits in den aktuellen Klimamodellen (z.B. RCP2.6 und RCP8.5 gemäss NCCS (2018)) berücksichtigt. Das ENSI schlägt daher anstelle der Verwendung statistisch beobachteter Trends die Berücksichtigung der Trends aus den Klimamodellen vor.

Für den Standort des gTL kann man allerdings davon ausgehen, dass durch die Bewaldung in der Umgebung und durch die Grundwasservorkommen eine Austrocknung des Bodens und damit eine Änderung des Temperaturregimes am Standort nicht zu erwarten ist.

Basierend auf der Diskussion erscheint ein Trend von $\Delta T_{KW} = +0.65 \text{ °C}$ pro Jahrzehnt infolge Klimawandel (KW) für den Standort eine nachvollziehbare Annahme und wird in der weiteren Betrachtung verwendet. Als Bezugsjahr wird das Jahr 2004 verwendet, das den mittleren Zeitpunkt der Messperiode 1987 – 2022 repräsentiert. Die Betrachtung historischer Ereignisse, wie den Sommer von 1540, der gemäss historischen Quellen (Wetter et al. 2014) durch extreme Temperaturen (mit Werten grösser 40.0 °C (Pfister 2018)) gekennzeichnet war, die nicht in den Messdatenreihen erfasst und bei der Analyse berücksichtigt sind, können den Trend zusätzlich beeinflussen. Analysen, die diese historischen Werte (HW) in erweiterten Datenreihen hinzunehmen⁸, zeigen eine Zunahme der maximalen Lufttemperatur von $\Delta T_{HW} = +1 \text{ °C}$.

Damit ergibt sich ein Extremwert für die Lufttemperatur mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr für Zürich-Kloten (korrigiert um $\Delta T_{10m} = 1 \text{ °C}$ auf 10 m Höhe) und das Jahr 2060 von:

$$T(t = 2060) = T_0(t = 2004) - \Delta T_{10m} + \Delta T_{KW} \times \Delta t / 10 + \Delta T_{HW}$$

$$T(t = 2060) = 41.1 \text{ °C} - 1 \text{ °C} + 0.65 \text{ °C} \times 6 + 1 \text{ °C} = \underline{\underline{45.0 \text{ °C}}}$$

Plausibilisierung

Wie bereits in der Einführung erwähnt, liegen für die Umgebung des Standorts zahlreiche, u.a. auch extremwertstatistische Untersuchungen der Lufttemperatur vor. Dabei liegen die 10^{-4} -jährlichen Werte für das Bezugsjahr 2004 zwischen ca. 38.0 °C (Resun AG 2008) und ca. 41 °C (Davidson 2014, KKB 2014a, KKB 2014b). Mit Berücksichtigung des Trends (Klimawandel) wurde für die Messstation Beznau ein Wert für das Bezugsjahr 2023/24 von ca. 41.5 °C (Davidson 2014, KKB 2014a) und 41.8 °C (KKB 2014b) ermittelt. Verwendet man als Zieljahr 2060 und berücksichtigt den Wert von 1 °C für die historischen Daten, so ergibt sich ein Wert für die Lufttemperatur von 44.8 °C , der mit dem neuen Wert von 45.0 °C für das gTL gut übereinstimmt. Prinzipiell muss man beim Vergleich derartiger Untersuchungen detailliert die Annahmen berücksichtigen und bewerten. So basieren beispielsweise die extremwertstatistischen Untersuch-

⁸ Dazu wurden die Stichprobenumfänge von Bern in Anlehnung an DHI (2007), erweitert (siehe auch Swain et al. 2004, Lebensministerium 2011 und Bayliss & Reed 2001) und eine Änderung des 10^{-4} -jährlichen Wertes mit und ohne die Stichprobe 40 °C berechnet.

ungen 2014 (Davidson 2014, KKB 2014a, KKB 2014b, KKG 2014, KKL 2014) auf der Verwendung monatlicher Maximalwerte über den Zeitraum Februar bis Oktober.

Die Festlegung des ENSI (ENSI 2022) für das KKB, welche die Klimaveränderungen bis zur Brennstofffreiheit berücksichtigt, beträgt für die Lufttemperatur 43.1 °C. Unterstellt man für den ENSI-Wert den gleichen Trend, so ergibt sich eine Lufttemperatur für 2060 von 45.7 °C.

Zusammen mit der Betrachtung der beobachteten Maximalwerte in der Schweiz, unter Berücksichtigung des klimatischen Trends zu höheren Temperaturen und im Vergleich mit den extremwertstatistischen Analysen anderer KKW-Standorte wird der ermittelte Wert für die maximale Lufttemperatur von 45.0 °C (in 10 m über dem Boden) als plausibel betrachtet.

4.1.3 Minimale Lufttemperatur

Für den Zeitraum von 1901 bis 1989 betrug in Beznau das absolute Minimum -24.3 °C. Genauere Messungen liegen in Beznau jedoch erst seit Februar 1987 vor. Bei grösseren Kältewellen in der Schweiz wurde der o.g. Wert deutlich unterschritten. So wurden Januar 1987 in La Brévine infolge der Bildung von Kaltluftseen Lufttemperaturen von -42.5 °C und in Tänikon im Kanton Thurgau wurden Lufttemperaturen von -29.9 °C gemessen. Eine ausführliche Diskussion der Messwerte an anderen Orten erfolgt bei der Plausibilisierung.

Extremwerte mit einer Häufigkeit von 10^{-3} und 10^{-4} pro Jahr

Die auf Basis extremwertstatistischer Analysen ermittelten maximalen Lufttemperaturen am Standort Zürich-Kloten sowie den KKW sind in Tab. D-2 angegeben. Für den Standort Zürich-Kloten (2 m über dem Boden) und Beznau (10 m über dem Boden) ergeben sich für eine Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr Werte von -23.1 °C bzw. -19.5 °C.

Trends

Prinzipiell geht man davon aus, dass mit einem Anstieg der mittleren Temperaturen auch ein Anstieg der extremen Minimaltemperaturen bzw. eine Verringerung der Tage mit Tiefsttemperaturen einhergeht (IAEA 2019). Die statistischen Analysen von Davidson (2014) wurden sowohl für den Fall eines Trends als auch ohne Trend durchgeführt. Es wurden die Werte mit den geringsten Temperaturen (Häufigkeit 10^{-4} pro Jahr, ohne Trend) verwendet. Untersuchungen mit aktuellen Daten bis 2022 zeigen einen schwachen Anstieg von ca. +0.03 °C pro Jahrhundert. Basierend auf diesen Ergebnissen wird konservativ kein Trend zu höheren Tiefsttemperaturen infolge Klimawandel unterstellt.

Plausibilisierung

Extremwertstatistische Auswertungen der Lufttemperaturmessreihen in der Nähe des Standorts zeigen 10^{-4} -jährliche Tiefsttemperaturen im Bereich von -20 bis -23 °C (siehe Tab. D-2). Die diesen Analysen (KKW-Standorte) zugrundeliegenden Datensätze beginnen jedoch erst im Februar 1987, so dass die grossen Kältewellen, wie z.B. der Januar 1987 mit -42.5 °C in La Brévine, für die KKW-Standorte nicht erfasst wurden. In Blumer (2018) wird eine minimale Lufttemperatur von -29.9 °C, wie im Januar 1987 in Tänikon (Thurgau) in 2 m Höhe gemessen, für den Standort Beznau für den Fall eines Kaltluftsees (analog wie in La Brévine) für möglich gehalten. Solche Temperaturen traten in den letzten Jahrhunderten verschiedentlich auf. In den Wintern 1709 und 1739/40 platzten Bäume in Deutschland und einigen Gebieten der Schweiz auf, wozu länger andauernde Tiefsttemperaturen von -25 bis -30 °C notwendig sind. Tatsächlich wurde z.B. am 12. Februar 1929 in Dresden (Deutschland) Werte von -27.4 °C gemessen.

Die Entstehung von Kaltluftseen in Senken und Flusstälern kann aufgrund der Lage des gTL-Standorts (nicht direkt an einem Fluss gelegen) sowie der Topographie (keine Senken vorhanden) ausgeschlossen werden. Aufgrund dieser Standorteigenschaften und insbesondere der für die extremwertstatistischen Auswertungen verwendete, länger zurückreichende und damit die Kältewellen erfassende Messreihe von Zürich-Kloten (Messbeginn 1959 und auf 2 m über dem Boden) sowie der Vernachlässigung des geringen klimatischen Trends zu höheren Temperaturen wird der statistisch ermittelte Wert für Zürich-Kloten von -23.1 °C als repräsentativ für den Standort betrachtet.

4.1.4 Wertung

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Lufttemperaturen am Standort des gTL den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage entsprechen. Darüber hinaus ist die Meteorologie am Standort typisch für die Region Nordschweiz bzw. das Schweizer Mittelland. Die Extremwerte der Lufttemperaturen am Standort beinhalten keine für die Auslegung kern-technischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen.

4.2 Wind und Tornado

4.2.1 Mittlere Windgeschwindigkeiten und Richtungen

Die häufigste Windrichtung in Bülach, welches knapp 5 km in südöstlicher Richtung liegt, ist ganzjährig Westen. Der Standort des gTL wird allerdings durch vier Molassenerhebungen⁹ umrahmt, u.a. direkt angrenzend am Projektperimeter in Richtung Westen (Ämperg, vgl. Fig. 1-1), während Bülach in einer nach Westen offenen Ebene liegt. Die mittlere Windgeschwindigkeit in Zürich-Kloten beträgt ca. 2.8 m/s. Die vorherrschende durchschnittliche Windrichtung in Zürich-Kloten beträgt ebenfalls Westen¹⁰.

4.2.2 Maximale Windgeschwindigkeiten

Extremwerte mit einer Häufigkeit von 10^{-3} und 10^{-4} pro Jahr

Die auf Basis extremwertstatistischer Analysen mit Messdaten der Messstation Zürich-Kloten ermittelten Werte für die maximale Windgeschwindigkeit sind in Tab. D-3 angegeben. Darüber hinaus werden zu Vergleichszwecken auch die Extremwerte für die KKW-Standorte aufgeführt. Für Kloten ergibt sich demnach für das Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr ein Monatsmaximalwert der Windgeschwindigkeit von 41.2 m/s (Vertrauensbereich: 36.4 m/s bis 47.6 m/s). Die Berücksichtigung historischer Werte des Sturmkatalogs¹¹ bei der extremwertstatistischen Auswertung der Daten vom Standort Zürich-Kloten führt zu einer Erhöhung des 10^{-4} -jährlichen Werts um ca. 5 m/s und damit einer Windgeschwindigkeit von 46.2 m/s.

⁹ Ämperg (511 m ü. M. im Westen), Stadlerberg (637 m ü. M. im Südwesten), Strassberg (495 m ü. M. im Südosten) und Chatzenstig (455 m ü. M. im Nordosten)

¹⁰ Klima für Kloten, Wetter nach Monat, durchschnittliche Temperatur (Schweiz) - Weather Spark

¹¹ Ein aus Schadensberichten (Stucki et al. 2014) zurückgerechneter Wert für den Standort Kloten beläuft sich auf ca. 46 m/s.

Trends

Die meisten Studien gehen davon aus, dass es zu einer Zunahme starker Zyklone mit einem häufigeren Auftreten von Starkwindereignissen kommen wird (Lieberwirth 2003, Pinto & Reyers 2016). Bisher lassen sich aber in den gemessenen Daten entweder keine Trends der Windgeschwindigkeiten nachweisen (Pfister 1999, Deutschländer & Dalelane 2012, MeteoSchweiz 2013, Shaw et al. 2016, IAEA 2019), die Trends werden als sehr klein (MeteoSchweiz 2022b) eingestuft oder als sehr unsicher bewertet (Pinto & Reyers 2016). Daher wird kein Trend berücksichtigt.

Plausibilisierung

Für den Standort des gTL werden im Schweizer Sturmkatalog geringere Böengeschwindigkeiten für die 300-jährliche Wiederkehrperiode dokumentiert als für den Standort Beznau und den Standort Zürich-Kloten. Die extremwertstatistische Auswertung in Tab. D-3 zeigt für den exponierten Standort Zürich-Kloten eine höhere Windgeschwindigkeit als Beznau. Die Berechnungen auf Basis der exponierten Messstation Kloten sind somit sehr wahrscheinlich nicht realistisch für den durch den Ämperg (wind)geschützten Standort des gTL und somit als konservativ anzusehen. Solche Abweichungen finden sich auch für andere Stationen, so ist die Station Rünenberg sehr stark windexponiert, so dass dort höhere Windgeschwindigkeiten beobachtet werden als bei der Station Buchs-Aarau mit deutlich geringeren Geschwindigkeiten.

Die höchsten Messwerte in der Schweiz, die bei 52.7 m/s im (exponierten) Flachland und bei 75 m/s im Bergland liegen, können für die Plausibilisierung nicht herangezogen werden. Diese Werte werden von allen bisher bekannten Analysen deutlich unterschritten und sind für den Standort nicht repräsentativ. Die Festlegung des ENSI (2022) für die maximale Windgeschwindigkeit unterscheidet sich nicht für die verschiedenen Standorte der KKW. Es wurde vom ENSI ein Wert von 63 m/s festgelegt, der auf den Ergebnissen der Tornadostudie beruht.

4.2.3 Tornados

Für den Standort Zwilag wurde eine Tornadoklasse EF2 mit einer mittleren Häufigkeit von ca. 10^{-4} pro Jahr basierend auf den Vorgaben der Richtlinie ENSI (2018) ermittelt (Zwilag 2022). Daraus ergeben sich Windgeschwindigkeiten von ca. 180 km/h (50 m/s). Diese Windgeschwindigkeiten werden aufgrund der Annahmen und Voraussetzungen bei der Berechnung als abdeckend für den Standort des gTL angesehen.

4.2.4 Wertung

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Windgeschwindigkeiten am Standort den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage entsprechen. Die Extremwerte der Windgeschwindigkeiten am Standort als auch die infolge eines Tornados abdeckend zu erwartenden Windgeschwindigkeiten beinhalten keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen.

4.3 Niederschlag (Regen)

4.3.1 Mittlere Niederschlagswerte

Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge am Standort Zürich-Kloten lag über die letzten 10 Jahre bei 1'040 mm (z.T. werden in der Literatur jährliche Niederschlagsmengen von 1'174 mm angegeben¹²) am Standort Beznau – ermittelt basierend auf Messungen über einen Zeitraum von 90 Jahren – beträgt der Jahresniederschlag 1'011 mm. Pro Jahr gibt es durchschnittlich 134.4 Regentage in Zürich und 130.4 Regentage in Beznau, d. h. Tage mit Niederschlagsmenge grösser 1.0 mm/d. Die für den Standort Zürich-Kloten dabei gemessenen mittleren jährlichen 1- und 2-Stunden-Niederschläge betragen 7.1 mm/h bzw. 9.9 mm/2h.

4.3.2 Maximale Niederschlagswerte

Das ENSI hat für die deterministischen Sicherheitsnachweise der Kernkraftwerke festgelegt, dass die Niederschlagshöhen über eine Dauer von zwei Stunden die repräsentativsten Werte für Kernanlagen sind. Damit soll die intensivste Regenphase abgedeckt werden und gleichzeitig können in diesem Zeitraum wirksame Gegenmassnahmen eingeleitet und umgesetzt werden (ENSI 2022). Im Folgenden werden somit extremwertstatistische Auswertungen für den 2h-Niederschlag (Starkniederschlag) dargelegt und bewertet.

Extremwerte mit einer Häufigkeit von 10^{-3} und 10^{-4} pro Jahr

Die auf Basis extremwertstatistischer Analysen mit Messdaten der Messstation Kloten ermittelten 10^{-3} und 10^{-4} -jährlichen Extremwerte für den 2h-Niederschlag am Standort werden in Tab. D-4 angegeben. Darüber hinaus werden zu Vergleichszwecken auch die Extremwerte für die Kernkraftwerksstandorte, die ebenfalls über eigene Messstationen verfügen, aber auch für weitere Standorte im Schweizer Mittelland aufgelistet (vgl. Tab. A-1).

Für den Standort Zürich-Kloten ergibt sich demnach für das 2h-Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr eine Niederschlagsmenge von etwa 85 mm (Vertrauensbereich: 69 mm bis 101 mm). Der Mittelwert aller aufgeführten Messstationen liegt bei ca. 88 mm, also ca. 3 mm höher.

Trends

Theoretische Modelle gehen von einer Erhöhung der Niederschläge aufgrund des Anstiegs der Lufttemperatur aus, wobei pro einem Grad Celsius höherer Lufttemperatur die Luft 7 % mehr Wasser aufnehmen kann. Allerdings lassen sich daraus nicht direkt Rückschlüsse auf die Häufigkeit, Dauer und Intensität der Niederschläge ziehen. Kurze Starkniederschläge sind durch konvektive Niederschlagsprozesse (Gewitter) geprägt, während länger andauernde Niederschläge durch advektive (Störungen, Stauniederschläge) geprägt werden. Bei Tageswerten sind konvektive und advektive Niederschlagsprozesse vermischt.

Die Beobachtungen der letzten Jahrzehnte bestätigen allerdings eine Zunahme, wobei gemäss NCCS (2018) Starkregen in der Schweiz seit 1901 um 12 % intensiver und um 30 % häufiger geworden sind (siehe auch Scherrer et al. 2016, Zeder & Fischer 2020, Fowler et al. 2021). Dies steht in Übereinstimmung mit verschiedenen Klimamodellen (Deutschländer & Dalelane 2012, Fischer et al. 2017, Scherrer et al. 2016).

So wurden in den letzten Jahren immer wieder neue Rekordwerte beobachtet, wie z.B. im Juni 2018 in Lausanne oder im August 2017 in Eschenz/TG wo ein 10-Minuten-Niederschlag von 41.1 mm bzw. von 36.1 mm gemessen wurde. Bemerkenswert ist, dass Eschenz und Lausanne

¹² Klima Kloten: Temperatur, Klimatabelle & Klimadiagramm für Kloten + Wetter (climate-data.org)

zur Klimaregion des Schweizer Mittellands gehören. Beim einem Niederschlagsereignis im Jahr 2005 wurde in Meiringen im Berner Oberland ein ca. 10^{-3} -jährliches Ereignis mit einem Tagesniederschlag von 110.9 mm beobachtet (MeteoSchweiz 2006). Allerdings ist im Augenblick der statistische Nachweis eines Trends schwierig, da Änderungen von Starkniederschlägen von der starken räumlichen Variabilität und der Verdichtung des Messnetzes für Niederschläge überlagert werden (Fischer et al. 2017, Blumer 2018). Es wird daher vorgeschlagen, einen konservativen Trend von 20 % Zunahme bis zum Jahr 2060 basierend auf den oben genannten beobachteten Zunahmen der Intensität um 12 % und der Häufigkeit um 30 % zu verwenden. Mit diesem Zuschlag und dem in Tab. D-4 ermittelten mittleren Wert des 2h-Niederschlag für Zürich-Kloten (85.3 mm) bzw. über alle Stationen (88.1 mm) erhält man als 10^{-4} -Extremwert 102.4 mm (Kloten) bzw. 105.7 mm (alle Messstationen).

Plausibilisierung

Im Gegensatz zu Temperatur und Wind hat das ENSI festgehalten, dass eine Berücksichtigung vorinstrumenteller Niederschlagsdaten aufgrund der geringen Granularitäten – meistens werden mittlere saisonale Niederschläge angegeben – nicht für extremwertstatistische Analysen verwendet werden können und sollen. Stattdessen sollen Ergebnisse aus der Studie *Extremhochwasser an der Aare* (EXAR, Andres et al. 2021) auch für extremwertstatistische Analysen verwendet werden. EXAR basiert auf Simulationen von Niederschlagsereignissen (Staudinger & Viviroli 2020) und umfasst 30 Simulationen über 10'000 Jahre. Basierend auf diesen Daten hat das ENSI den 10^{-4} -jährlichen Extremwert für den 2h-Niederschlag am Standort Beznau mit 79.5 mm und für den Standort Kaiserstuhl, der nur wenige Kilometer vom Standort des gTL entfernt liegt, mit 76.8 mm angegeben. Beide Werte stimmen mit dem eigenen Werten ohne Berücksichtigung des Trends überein. Aufgrund der Berücksichtigung des Mittelwerts aller Stationen und aufgrund der Berücksichtigung eines Trends sowie der Übereinstimmung mit den in Nagra (2024) ermittelten Werten für den 1 h, 6 h und 24 h Niederschlag ist der ermittelte 10^{-4} -jährliche Wert von ca. 105.7 mm für den 2h-Niederschlag plausibel.

Die Festlegung des ENSI (ENSI 2022) für das KKB, welche die Klimaveränderungen bis zur Brennstofffreiheit berücksichtigt, beträgt für den 2h-Niederschlag 145 mm und liegt deutlich oberhalb sowohl des neu ermittelten Werts für Beznau als auch des Mittelwerts aller Messstationen, auch unter Berücksichtigung der Effekte des Klimawandels. Der Wert von 145 mm kann, basierend auf den Ergebnissen der aktuellen Studie, auch für den Standort des gTL als konservativ abdeckend betrachtet werden, insbesondere da er im Bereich des theoretisch maximal möglichen Niederschlags von 130 - 150 mm für den 2 h-Niederschlag liegt (Kienzler et al. 2015).

4.3.3 Wertung

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Niederschläge am Standort den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage entsprechen. Die Extremwerte der Niederschläge am Standort beinhalten keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen.

4.4 Schnee

4.4.1 Maximale Neuschneehöhen

Die maximalen in der Schweiz gemessenen täglichen Neuschneehöhen von 1.3 m aus den Jahren 1999 am Berninapass und 2018 am Grimsel zeigen, dass trotz Klimaveränderungen Starkschneefälle möglich sind. Maximale 2- und 3-Tage Schneehöhen liegen bei ca. 2 m im hochalpinen Raum. Die grösste messtechnisch erfasste Schneehöhe in der Schweiz lag bei über 8 m (Blumer

2018). Diese maximal für die Schweiz ermittelten Schneehöhen sind aber für das Schweizer Mittelland und damit den Standort des gTL nicht relevant. Für den Standort (Schweizer Mittelland) können nach Blumer (2018) Extremwerte mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr von 80 bis 90 cm (1-Tageswert) bzw. 120 cm (5-Tageswert) angenommen werden.

Trends

Es gibt verschiedene Indizien für eine Verringerung der Neuschneehöhen. Insbesondere waren im Mittelland die letzten 30 Jahre schneearm. Der Trend zu schneearmen Wintern ist an den meisten Messstationen unterhalb 1'300 m ü. M. statistisch signifikant (NCCS 2018, Scherrer & Begert 2019, Bender et al. 2020). Konservativ wird für die weitere Betrachtung aber kein Trend unterstellt.

Plausibilisierung

Messstationen im nördlichen Flachland zeigen maximale tägliche Neuschneehöhen von 60 bis 80 cm, wobei regionale und messtechnische Besonderheiten zu beachten sind. Messungen aus alpinen Tälern mit höheren Werten sind aufgrund von Stauwirkungen und Niederschlagsabkühlungen nicht für den Standort repräsentativ (Blumer 2018). Statistisch extrapolierte Werte von 2 m Neuschneehöhe und mehr (MeteoSchweiz 2009) für 10^{-4} -jährliche Ereignisse erscheinen physikalisch im Schweizer Mittelland nicht möglich (Blumer 2018). Für den Standort Beznau wurden 1-Tages-Neuschneehöhen von 75 cm ermittelt (KKB 2014a, KKB 2014b). Das ENSI hat im Rahmen der Festlegung klimatologischer Gefährdungen keine Schneehöhen definiert.

5-Tages-Schneehöhen sind für den Standort nicht von Bedeutung, sondern werden im Wesentlichen im alpinen Raum verwendet, weil dort länger andauernde Frostperioden auftreten können. Diese sind im Mittelland nur mit Hochdruckgebieten aus Russland oder Skandinavien möglich, die wiederum nicht oder kaum zu Niederschlag führen (Blumer 2018). Für den Standort können konservativ die 10^{-4} -jährlichen Werte für die maximale tägliche Schneehöhe von ca. 80 bis 90 cm angenommen werden (Blumer 2018).

4.4.2 Maximale Schneelasten

Neben den Neuschneehöhen, die im Wesentlichen die Erreichbarkeit der kerntechnischen Anlage beeinflussen können, sind die Schneelasten für die baustatischen Nachweise von Belang. Neuschneehöhen sind nicht direkt in Schneelasten umrechenbar, da Schneelasten sogenannte Wasseräquivalente verwenden (Lieberwirth 2003). Aus diesem Grund wurden die maximalen jährlichen Schneelasten für die in Kap. 2.2 genannten Standorte durch das SLF zur Verfügung gestellt und mittels Regionalanalyse für den Standort Beznau berechnet. Aus diesen Jahresmaximalwerten wurde die Gefährdungskurve für Beznau bestimmt. Da die berechneten Schneelasten für die Standorte Beznau/Leibstadt nur geringfügig höher sind als der für das ca. 30 km entfernte Gösgen bestimmte Wert, kann für den ca. 18 km entfernten Standort des gTL der Wert von Beznau übertragen werden. Die ermittelten 10^{-3} und 10^{-4} -jährlichen Werte der Schneelasten (Standort Beznau) betragen 1.32 kN/m^2 bzw. 2.00 kN/m^2 (vgl. Tab. D-5).

Trends

Zur Prognose von Trends für die Schneelast unter den Bedingungen des Klimawandels wird hier auf Lieberwirth (2003) verwiesen. Dort heisst es, dass man nicht prinzipiell aus steigenden mittleren Jahrestemperaturen und Wintertemperaturen auf sinkende Schneelasten schliessen kann. Für bemessungsrelevante Schneelasten sind ungünstigen Kombination von Starkschneefall und Windverhältnissen notwendig, die auch in einem milden mitteleuropäischen Winter möglich sind. Insbesondere die geringe Dichte an Messstationen im Schweizer Mittelland und die hohe Streu-

ung der Schneelasten (Buchmann et al. 2021a, Buchmann et al. 2021b) führen ausserdem zu einer erheblichen Unsicherheit. Aus diesem Grund wird kein Trend zu geringeren Schneelasten angesetzt.

Plausibilisierung

Für den Standort liegt die charakteristische Schneelast gemäss SIA¹³ bei 0.9 kN/m². Der charakteristische Wert entspricht gemäss EN 1990 (2023) einem 50-jährlichen Wert. Der Bemessungswert ohne Berücksichtigung von Kombinationsbeiwerten ergibt sich aus dem Produkt von Teilsicherheitsfaktor (von 1.5) und charakteristischem Wert und beträgt 1.35 kN/m². Dieser Wert entspricht gemäss ISO 4354 (2009) einer Wiederkehrperiode von 1'000 bis 2'000 Jahren und ist damit vergleichbar mit dem in Tab. D-5 ermittelten 10⁻³-jährlichen Wert. Damit erscheint der Wert von 2 kN/m² für eine Häufigkeit von 10⁻⁴ pro Jahr ebenfalls plausibel.

Vorangegangene extremwertstatistische Analysen zu maximalen Schneelasten der KKW führten zu Werten im Bereich 1.9 kN/m² (KKB und KKL) und 2.0 kN/m² (KKG) und sind somit ebenfalls vergleichbar (Davidson 2014, KKB 2014a, KKB 2014b, KKL 2014, KKG 2014). Das ENSI hat im Rahmen der Festlegung klimatologischer Gefährdungen konservativere Belastungen von 2.7 kN/m² (KKB), 3.1 kN/m² (KKG) und 2.6 kN/m² (KKL) festgelegt (ENSI 2022).

4.4.3 Wertung

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Schneelasten am Standort den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage entsprechen. Die Schneelasten am Standort beinhalten keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen.

4.5 Hagel

4.5.1 Mittlere Hagelkorngrössen

In der Schweiz erreichen die Hagelkörner Durchmesser zwischen 0.5 cm und wenigen Zentimetern (Kantonale Gebäudeversicherungen 2007).

4.5.2 Maximale Hagelkorngrössen

Für die Schweiz wurde für ein 10⁻³- bzw. 10⁻⁴-jährliches Ereignis ein 7 bis 8 cm bzw. 15 cm grosses Hagelkorn ermittelt, aus dem zusammen mit einer Fallgeschwindigkeit von 53 m/s eine statische Ersatzlast von ca. 1.3 kN/m² bestimmt wurde (KKB 2014a, KKB 2018).

Trends

Zwar wurde in den letzten beiden Jahren in Europa eine erhöhte Hagelintensität als auch Hagelkorngrösse beobachtet, daraus kann aber noch kein Trend bestimmt werden. Dies gilt insbesondere für die hier untersuchten Extremereignisse. Zudem werden in der Schweiz extreme Winde und Hagel aufgrund der komplexen Topografie häufig durch sehr kleinräumige Prozesse wie beispielsweise Gewitter dominiert. Klimamodelle sind bisher nicht in der Lage, für solche Prozesse Trends zu erfassen (Kanton Luzern 2023). Ein Trend wird daher nicht angenommen.

¹³ <https://www.dlubal.com/de/loesungen/online-dienste/schnee-wind-erdbeben-lastzonen>

Plausibilisierung

Im süddeutschen Raum wurden bisher Hagelkorngrössen von 9.5 cm (München, 1984), 12 cm (Villingen-Schwenningen, 2006) sowie 14 cm (Reutlingen, 2013) beobachtet. In den USA hat man maximale Hagelkorndurchmesser von 17.8 cm (Aurora, 2003) und knapp 20 cm (South Dakota, 2010) gefunden. Allerdings unterscheiden sich die klimatischen Bedingungen in den USA gegenüber der Schweiz beträchtlich, so dass die zu erwartenden Hagelkorngrössen in der Schweiz geringer sind. In den offenen Landschaften des mittleren Westens der USA bilden sich viel mächtigere Gewittersysteme als in der Schweiz. Zusätzlich ist in den USA durch die Golfregion genügend feuchtwarme Luft vorhanden, um Gewitterzellen bzw. -superzellen deutlich länger am Leben zu halten als in der Schweiz. Dies gilt auch für das 2023 im norditalienischen Azzano Decimo beobachtete Hagelkorn mit einem Durchmesser von 19 cm¹⁴. In der Schweiz nördlich der Alpen ist die Lebensdauer solcher Zellen deutlich kürzer (KKB 2014b, KKB 2018).

Das ENSI (2022) hat ein Hagelkorn von 15 cm Durchmesser und eine Fallgeschwindigkeit von 55 m/s festgelegt. Dies entspricht dem für den Standort ermittelten Wert und erscheint plausibel.

4.5.3 Wertung

Die Hagelhäufigkeiten und -intensitäten entsprechen den Verhältnissen für Mitteleuropa und für das Schweizer Mittelland. Diese Verhältnisse beinhalten keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen.

4.6 Vereisender Regen

4.6.1 Mittlere Vereisungsereignisse

In MeteoSchweiz (2009) werden ca. 20 Ereignisse für einen Zeitraum von ca. 5 Jahren für die Station Zürich-Kloten aufgezählt. Leider erfolgen dort keine Angaben zu den Vereisungsdicken und Lasten. Eine mittlere Vereisungsdicke wurde daher nicht bestimmt.

4.6.2 Maximale Vereisungsereignisse

Für den vereisenden Regen wurden 10⁻³- und 10⁻⁴-jährliche Ereignisse in Anlehnung an kanadische Werte in Form von Eisdicken ermittelt (KKB 2014a, KKB 2018). Die Eisdicken können für das 10⁻³-jährliche Ereignis 2 bis 3 cm für vertikale und 6 cm für horizontale Flächen und für das 10⁻⁴-jährliche Ereignis ca. 5 cm für vertikale und 10 cm für horizontale Flächen betragen. Die daraus ermittelte 10⁻⁴-jährliche Flächenlast liegt bei 0.45 kN/m² und liegt deutlich unterhalb der Schneelast (vgl. Kap. 4.4.2). Eine 10⁻³-jährliche Flächenlast wurde daher nicht ermittelt.

Trends

Es liegen keine Informationen zur Bewertung eines Trends vor.

Plausibilisierung

Für verschiedene Vereisungsindizes liegen Angaben zu Vereisungsmengen vor, wie z.B. grösser 50 g/100 cm²/h für Vereisungsindex 5 (Fikke et al. 2006). Das entspricht – bei einer typischen Vereisungsdauer von vier Stunden¹⁵ – einer Flächenlast von 0.2 kN/m². Die aus der Gefährdungs-

¹⁴ Hail Record Broken Again - 19 cm Hailstone Confirmed in Italy, European Severe Storms Laboratory, 25.7.2023, <https://www.essl.org/cms/hail-record-broken-again-19cm-hailstone-confirmed-in-italy/>

¹⁵ Angaben zur Dauer für die nordöstliche USA und südöstliches Kanada finden sich z.B. in McCray et al. (2019).

kurve berechnete Eislast liegt etwa um einen Faktor 2 höher, wobei Anforderungen für den Vereisungsindex 5 für den Standort des gTL nicht erfüllt sind. Für einen Vereisungsindex 5 muss an mehr als 60 Tagen im Jahr eine Vereisung auftreten und die Dauer der Vereisung muss mehr als 20 % des Jahres betragen. Darüber hinaus erscheint die Anwendung kanadischer Werte mit den dort anderen klimatologischen Bedingungen als sehr konservativ und damit abdeckend.

4.6.3 Wertung

Die sehr konservativ abgeschätzten Einwirkungen aus vereisendem Regen auf Bauwerke liegen unterhalb der Einwirkungen von Wind oder Schnee. Sie werden daher nicht bemessungsrelevant. Vereisender Regen kann jedoch die Erreichbarkeit einschränken. Allerdings sind die Wetterlagen für die Entstehung von vereisendem Regen bekannt, so dass Vorsorgemassnahmen, falls notwendig, getroffen werden können. Diese Verhältnisse beinhalten jedoch keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen.

4.7 Blitze

4.7.1 Maximale Blitzintensitäten

Für die weitere Umgebung des Standorts liegen statistische Auswertungen von Blitzintensitäten bis 2012 von Davidson (2014) vor. Diese Daten erfassen einen Kreis um das Kernkraftwerk Beznau mit einem Radius von 30 km, in dem auch der Standort des gTL liegt. In den Analysen wurde ein Blitz von ca. 190 kA (Vertrauensbereich: 121 kA bis 415 kA) für eine Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr für einen Umkreis von 200 m um ein Bauwerk (Beznau) ermittelt. Die Auswertungen basieren auf Daten des Blitz-Informationsdiensts (BLIDS) von Siemens. Neue, bis 31.12.2022 vorliegende Daten von Siemens zeigen aussergewöhnlich grosse Blitzintensitäten von bis zu 1'300 kA. Nach Angaben von Siemens erfüllen solche Messdaten jedoch nicht die erforderlichen Qualitätsanforderungen und sollten nicht für extremwertstatistische Analysen verwendet werden. Aus diesem Grund wurde der Messwert (1'300 kA) nicht in der statistischen Auswertung verwendet. Auf Basis des verbliebenen Datensatzes ergibt sich ein Blitz mit einer 10^{-4} -jährlichen Intensität von 250.8 kA (Vertrauensbereich: 98.6 kA bis 718.7 kA).

Trends

Aktuelle Studien sehen eine Zunahme der Blitzhäufigkeit im alpinen Raum (Simon et al. 2023). Eine Zunahme der Blitzintensität ist mit den Daten von Siemens (BLIDS) nicht auszuschliessen, qualitätsgesicherte Angaben liegen aktuell aber nicht vor, so dass kein Trend unterstellt wird.

Plausibilisierung

Für den süddeutschen Raum werden maximal mögliche Blitzstärken von 400 kA genannt (Blumer 2018). Allerdings weisen das zentrale Baden-Württemberg und das südliche Bayern eine erhöhte Blitzhäufigkeit auf, die nicht direkt mit dem Schweizer Mittelland vergleichbar ist.

4.7.2 Wertung

Die untersuchten Daten beziehen sich auf einen Kreis mit einem Radius von 30 km. Sie sind damit für das Schweizer Mittelland massgebend, nicht nur für den Standort des gTL. Die Blitzhäufigkeit und Intensität am Standort entsprechen den typischen Verhältnissen des Schweizer Mittellands und beinhalten keine für die Auslegung einer Kernanlage ungewöhnlichen Randbedingungen.

5 Zusammenfassung und Fazit

Tab. 5-1 fasst die in Kap. 4 detailliert dargelegten quantitativen Ergebnisse extremer meteorologischer und klimatologischer Verhältnisse am Standort des gTL für Ereignisse mit einer Eintrittshäufigkeit von 10^{-4} pro Jahr zusammen. Zum Vergleich sind die vom ENSI festgelegten Gefährdungsannahmen für den Standort des KKB ebenfalls in Tab. 5-1 angegeben. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die ermittelten meteorologischen und klimatologischen Parameter sich nicht relevant von bisherigen Untersuchungsergebnissen unterscheiden bzw. diese bestätigen. Die Gefährdungsannahmen des ENSI decken die Ergebnisse dieser Studie konservativ ab.

Tab. 5-1: Gefährdungsannahmen (10^{-4} -jährlich) am Standort der gTL gemäss den Ergebnissen aus Kap. 4 und – zum Vergleich – gemäss ENSI (2022) für den KKB-Standort

Mit Berücksichtigung des Trends (Klimaveränderungen) bis zum Jahr 2060 (BEVA) bzw. bis zur Brennstofffreiheit (KKB)

Gefährdungen	Gefährdungsannahmen für den Standort	
	gTL (Kap. 4)	KKB (ENSI 2022)
Hohe Lufttemperatur	+45.0 °C	+43.1 °C
Tiefe Lufttemperatur	-23.1 °C	-30.0 °C
Extremer Wind	Tornado: 50 m/s, Wind: 46.2 m/s	Tornado: 63 m/s, Wind nicht angegeben
Starkregen	106 mm/2h	145 mm/2h
Schneelast	2.0 kN/m ²	2.7 kN/m ²
Hagel (Durchmesser // Geschwindigkeit)	15 cm // 53 m/s	15 cm // 55.0 m/s
Vereisender Regen (Flächenlast)	0.45 kN/m ²	
Blitze (Stromstärke)	250 kA	

Allgemein lässt sich feststellen, dass das Klima am Standort den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage entspricht und darüber hinaus die Meteorologie am Standort typisch für die Region Nordschweiz bzw. das Schweizer Mittelland ist. Die Ergebnisse der Analyse zeigen zudem – zusammen mit den zahlreichen genannten, bereits bestehenden Studien – dass für den Standort des gTL keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen bzgl. extremer meteorologischer und klimatologischer Verhältnisse, bei denen auch erwartbare Einflüsse des Klimawandels entsprechend berücksichtigt wurden, vorliegen. Die standortspezifischen Parameter liegen innerhalb der üblichen für die Auslegung von kerntechnischen Bauten und Strukturen festgelegten Grenzwerte. Die ermittelten Extremwerte sind nicht bemessungsrelevant, da sie mit erheblichen Sicherheitsmargen durch andere Einwirkungen (von aussen) auf bauliche Strukturen abgedeckt werden.

Insgesamt ist der Standort somit durch stabile meteorologische und klimatologische Verhältnisse gekennzeichnet. Der Standort ist für den Bau und Betrieb eines gTL geeignet.

6 Literaturverzeichnis

- Andres, N., Steeb, N., Badoux, A. & Hegg, C. (2021): Extremhochwasser an der Aare. Hauptbericht Projekt EXAR. Methodik und Resultate. Heft 104, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- Bader, S. & Bantle, H. (2004): Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001, Nr. 68. MeteoSchweiz, Zürich.
- Bayliss, A.C. & Reed, D.W. (2001): The use of historical data in flood frequency estimation. Report to MAFF. Centre for Ecology and Hydrology, Oxfordshire.
- Begert, M. (2008): Die Repräsentativität der Stationen im Swiss National Basic Climatological Network (Swiss NBCN). Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 217. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz.
- Bender, E., Lehning, M. & Fiddes, J. (2020): Changes in Climatology, Snow Cover, and Ground Temperatures at High Alpine Locations. *Frontiers in Earth Science* 8. DOI: 10.3389/feart.2020.00100.
- Blumer, F. (2018): Expertenbericht: Beznauspezifische Gefährdung durch klimatologische Parameter, 31. Juli 2018, Winterthur, Dr. Felix Blumer - Blumer Communication & Consulting GmbH.
- Buchmann, M., Begert, M., Brönnimann, S. & Marty, C. (2021a): Local-scale uncertainty of seasonal mean and extreme values of in-situ snow depth and snow fall measurements, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-918, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-918>.
- Buchmann, M., Begert, M., Brönnimann, S. & Marty, C. (2021b): Local-scale variability of seasonal mean and extreme values of in situ snow depth and snowfall measurements. *The Cryosphere* 15/10, 4625-4636. DOI: 10.5194/tc-15-4625-2021.
- Davidson, A.C. (2014): Extremal Analysis: Methods and Specific Considerations. Chair of Statistics, Institute of Mathematics, EPFL, KKB210D0005, 27. January 2014.
- Deutschländer, T. & Dalelane, C. (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Ein Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bundesanstalt Technisches Hilfswerk, Deutscher Wetterdienst, Umweltbundesamt, Offenbach am Main.
- Deutschländer, T. & Mächel, H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur, G., Jacob, D. & Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland*: Springer Spektrum, 47-56.
- DHI (2007): DHI-WASY GmbH HQ-EX 3.0 - Benutzerhandbuch, Programm zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Berlin, 2007. (Pugh, C.).
- EN 1990 (2023): Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken, 2023-08-30.

- ENSI (2012): Fukushima-Aktionsplan ENSI-AN-7844. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2018): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-A05/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2022): ENSI legt Gefährdungsannahmen für Extremwetter-Ereignisse neu fest, <https://www.ensi.ch/de/2022/07/14/ensi-legt-gefaehrungsannahmen-fuer-extremwetter-ereignisse-neu-fest/>, Stand am 28. August 2023.
- Fikke, S., Ronsten, G., Heimo, A., Kunz, S., Ostrozlik, M., Persson, P.-E., Sabata, J., Wareing, B., Wichura, B., Chum, J., Laakso, T., Sääntti, K. & Makkonen, L. (2006): COST 727: Atmospheric Icing on Structures Measurements and data collection on icing: State of the Art. Veröffentlichung MeteoSchweiz, 75.
- Fischer, E.M., Schär, C. & Seneviratne, S.I. (2017): Klima- und Wetterextreme, Brennpunkt Klima Schweiz, Grundlagen, Folgen und Perspektiven, 52-59.
- Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F., Westra, S., Allan, R.P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Do, H.X., Guerreiro, S., Haerter, J.O., Kendon, E.J., Lewis, E., Schaer, C., Sharma, A., Villarini, G., Wasko, C. & Zhang, X. (2021): Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment* 2/2, 107-122. DOI: 10.1038/s43017-020-00128-6.
- Fukutome, S., Schindler, A. & Capobianco, A. (2018): MeteoSwiss extreme value analyses: User manual and documentation. Technical Report MeteoSwiss, 255, 3rd Edition.
- Fülleemann, C., Begert, M., Croci-Maspoli, M. & Brönnimann, S. (2011): Digitalisieren und Homogenisieren von historischen Klimadaten des Swiss NBCN - Resultate aus DigiHom. Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 236.
- IAEA (2019): Adapting the Energy Sector to Climate Change. International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna.
- IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO 4354 (2009): ISO 4354, Wind actions on structures, Rev. 2, 68 Seiten.
- Kanton Luzern (2023): Starkniederschläge, https://klima.lu.ch/Folgen_des_Klimawandels/Niederschlag#:~:text=Keine%20Aussagen%20erlauben%20die%20neuen,klein%20umige%20Prozesse%20wie%20beispielsweise%20Gewitter, Zugriff: 1.9.2023.
- Kantonale Gebäudeversicherungen (2007): Wegleitung Objektschutz gegen meteorologische Naturgefahren. Herausgegeben von der Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen, Bern.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.

- Kienzler, P., Andres, N., Häf-Huber, D. & Zappa, M. (2015): Herleitung extremer Niederschläge und Hochwasser im Einzugsgebiet des Sihlsees für einen verbesserten Hochwasserschutz der Stadt Zürich, HW 59. 2015, H.2, Seite 48-58.
- KKB (2014a): Beznauspezifische Gefährdung durch qualitative klimatologische Parameter, TM-211-RN14016, Beznau, Rev. 0, 25.2.2014.
- KKB (2014b): Beznauspezifische Gefährdung durch quantitative klimatologische Parameter, TM-211-RN14015, Beznau, Rev. 0, 25.2.2014.
- KKB (2018): Beznauspezifische Gefährdung durch quantitative klimatologische Parameter, TM-211-RN14015, Beznau, Rev. 1, 26.6.2018.
- KKG (2014): Site Specific Hazards from Extreme Events of Natural Origin, Technical Report, 2679, February 2014, Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG.
- KKL (2014): Fukushima-Aktionsplan: Extreme Wetterbedingungen am Standort Leibstadt, Technischer Bericht, BET/14/0005, 24.2.2014, Kernkraftwerk Leibstadt.
- KKN AG (2008): Rahmenbewilligungsgesuch für ein neues Kernkraftwerk im Niederamt, Sicherheitsbericht, KKN AG Bericht: Ber-08-002, Juni 2008.
- Lebensministerium (2011): Leitfaden - Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten, Wien, Dezember 2011. (Pugh, C.).
- Lieberwirth, P. (2003): Ein Beitrag zur Wind- und Schneelastmodellierung. 1. Dresdner Probabilistik-Symposium – Sicherheit und Risiko im Bauwesen, 123-138.
- McCray, C.D., Atallah, E.H. & Gyakum, J.R. (2019): Long-Duration Freezing Rain Events over North America: Regional Climatology and Thermodynamic Evolution. Weather and Forecasting 34/3, 665-681. DOI: 10.1175/WAF-D-18-0154.1.
- MeteoSchweiz (2006): Starkniederschlagsereignis August 2005, Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 211,
- MeteoSchweiz (2009): Basisanalysen ausgewählter klimatologischer Parameter am Standort KKW Beznau, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 224, 135 pp. Basisanalysen ausgewählter klimatologischer Parameter am Standort KKW Gösgen, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 225, 136 pp. Basisanalysen ausgewählter klimatologischer Parameter am Standort KKW Leibstadt, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 227, 135 pp. Basisanalysen ausgewählter klimatologischer Parameter am Standort KKW Mühleberg, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 226, 136pp.
- MeteoSchweiz (2013): Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht, Fachbericht MeteoSchweiz, 243, 36 pp.
- MeteoSchweiz (2019): Klimabulletin Sommer 2019. Zürich.
- MeteoSchweiz (2022a): Klimabulletin Sommer 2022. Zürich.
- MeteoSchweiz (2022b): Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima (SIA 2028) – Schlussbericht der Projekte «Klimaangepasstes Bauen – Grundlagen für die Zukunft» und A.15 «Aktuelle Klimadaten für Bauplanende» Fachbericht MeteoSchweiz, 279, 124 pp.

- Mudelsee, M. (2007): Fehlergrenzen von Extremwerten des Wetters. In: Tetzlaff G, Karl H, Overpeck G (Eds.) Wandel von Vulnerabilität und Klima: Müssen unsere Vorsorgewerkzeuge angepasst werden? Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e. V., Bonn, 107–116.
- Mudelsee, M. (2020): Statistical Analysis of Climate Extremes, Cambridge University Press (14. Mai 2020).
- Müller, S. & Remund, J. (2023): Kommentare Bericht Swissnuclear, 30.6.2023, 8 Seiten.
- Nagra (2021): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.
- Nagra (2024): Hydrologische Verhältnisse am Standort der Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-31.
- Nagra (2025): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-01.
- NCCS (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. Technical Report. National Centre for Climate Services NCCS, Zurich.
- Perl, M., Häberli, C., Grüter, E., Musa, M., Küng, U. & Abbt, M. (2009): Werkzeuge für die Qualitätskontrolle und die Bearbeitung von Meteorologischen Daten, Datenarchitekturdokument 1f3, Version 2, 3. Juli 2009.
- Pfister, C. (1999): Wetternachhersage – 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995). Verlag Paul Haupt, Bern.
- Pfister, C. (2018): 5 The “Black Swan” of 1540: Aspects of a European Megadrought. In: Leggewie, C. & Mauelshagen, F. (Hrsg.): Climate Change and Cultural Transition in Europe. (Climate and Culture, 4), 156-194.
- Pinto, J.G. & Reyers, M. (2016): Winde und Zyklonen, Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken: Brasseur, Jacob, Schuck-Zöller, 2016, Springer.
- Pugh, C. (2004): Changing sea levels – effects of tides, weather and climate. Cambridge University Press, Cambridge. (Pugh, C.).
- Resun AG (2008): Sicherheitsbericht, Ersatz Kernkraftwerk Beznau. TB-042-RS080021, Version 2, Beilage zum Rahmenbewilligungsgesuch vom Dezember 2008. Ersatz Kernkraftwerk Beznau EKKB AG.
- Scherrer, S.C. & Begert, M. (2019): Effects of large-scale atmospheric flow and sunshine duration on the evolution of minimum and maximum temperature in Switzerland, Theoretical and Applied Climatology volume 138, pages 227–235.
- Scherrer, S.C., Fischer, E.M., Posselt, R., Liniger, M.A., Croci-Maspoli, M. & Knutti, R. (2016): Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 121: 2626–2637.

- Shaw, T.A., Baldwin, M., Barnes, E.A., Caballero, R., Garfinkel, E.L., Hwang, Y.-T., Li, E., O'Gorman, P.A., Riviere, G. & Simpson, R., Voigt, A. (2016): Storm track processes and the opposing influences of climate change» *Nature Geoscience*, Vol. 9, August 2016, pp. 656-664.
- Simon, T., Mayr, G.J., Morgenstern, D., Umlauf, N. & Zeileis, A. (2023): Amplification of annual and diurnal cycles of alpine lightning. *Climate dynamics* 61/9-10, 4125-4137. DOI: 10.1007/s00382-023-06786-8.
- Staudinger, M. & Viviroli, D. (2020): Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht A Projekt EXAR. Hydrometeorologische Grundlagen. Universität Zürich. Zürich: 383 S.
- Stucki, P., Brönnimann, S., Martius, O., Welker, C., Imhof, M., Wattenwyl, N. von & Philipp, N. (2014): A catalog of high-impact windstorms in Switzerland since 1859. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14/11, 2867-2882. DOI: 10.5194/nhess-14-2867-2014.
- Swain, R.E., England, J.F.JR., Bullard, K.L. & Raff, D.A. (2004): Hydrologic Hazard Curve Estimating Procedures, DSO-04-08, June 2004, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. (Pugh, C.).
- swissnuclear (2023): Diskussion der Auswirkungen historischer Daten und des Klimawandels auf die Gefährdungsanalyse klimatologischer Parameter der Schweizer Kernkraftwerke, FGK.14.007.GS, Oktober 2023, Olten, Rev. 2.
- Wetter, O., Pfister, C., Werner, J.P., Zorita, E., Wagner, S., Seneviratne, S.I., Herget, J., Grünewald, U., Luterbacher, J., Alcoforado, M.-J., Barriendos, M., Bieber, U., Brázdil, R., Burmeister, K.H., Camenisch, C., Contino, A., Dobrovolný, P., Glaser, R., Himmelsbach, I., Kiss, A., Kotyza, O., Labbé, T., Limanówka, D., Lützenburger, L., Nordl, Ø., Pribyl, K., Retsö, D., Riemann, D., Rohr, C., Siegfried, W., Söderberg, J. & Spring, J.-L. (2014): The year-long unprecedented European heat and drought of 1540 – a worst case. *Climatic Change* 125/3-4, 349-363. DOI: 10.1007/s10584-014-1184-2.
- Zeder, J. & Fischer, E.M. (2020): Observed extreme precipitation trends and scaling in Central Europe, *Weather and Climate Extremes*, Volume 29, September 2020, 100266.
- Zwilag (2022): Tornadohäufigkeit am Zwilag. Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG, ZWI8120/D00004.

Anhang A Messstationen

Tab. A-1: Messstationen und gemessene meteorologische und klimatologische Parameter

Messwert	Messstation	Beobachtungsdauer
Lufttemperatur [°C] • homogenes Tagesminimum (statistisch abgeleitet) • homogenes Tagesmaximum (statistisch abgeleitet)	Beznau (10 m über Boden)	01.02.1987-31.12.2022
	Gösgen (10 m über Boden)	
	Leibstadt (10 m über Boden)	
	Zürich-Kloten (2 m über Boden)	01.01.1959-31.12.2022
Niederschlag, grösste 2-Stundensumme des Monats [mm]	Beznau	01.12.1988-31.12.2022
	Gösgen	
	Leibstadt	
	Bern	01.01.1981-31.12.2022
	Buchs / Aarau	01.06.1984-31.12.2022
	Cham	01.11.1993-31.12.2022
	Zürich-Kloten	01.01.1981-31.12.2022
	Neuchâtel	01.01.1981-31.12.2022
	Paul-Scherrer-Institut	01.02.1992-31.12.2022
	Zürich / Affoltern	01.01.1981-31.12.2022
	Schaffhausen	01.07.1981-31.12.2022
	Zürich / Fluntern	01.01.1981-31.12.2022
	St. Gallen	01.08.1981-31.12.2022
	Aadorf / Tänikon	01.01.1981-31.12.2022
	Wädenswil	01.01.1981-31.12.2022
Böenspitze (Sekundenböe), Monatsmaximum in 10 m über Boden [m/s]	Beznau	01.07.2008-31.12.2022
	Gösgen	01.01.1987-31.12.2022
	Leibstadt	01.01.1987-31.12.2022
	Zürich-Kloten	01.01.1981-31.12.2022

Anhang B Block-Maxima-Methode

Bei der Block-Maxima-Methode unterteilt man den Beobachtungszeitraum in nichtüberlappende gleich lange Zeitbereiche und verwendet aus diesen nur den Extremwert als Stichprobe. Die Verteilung dieser Extremwerte aus den Zeitbereichen kann mit einer Extremwertverteilung beschrieben werden. Es existieren verschiedene Extremwertverteilungen, wie z.B. Gumbel- oder Weibullverteilung, die in einer generalisierten Extremwertverteilung zusammengeführt werden können. Das Konzept der Block-Maxima-Methode und die Beschreibung mittels Verteilung sind in Fig. B-1 dargestellt.

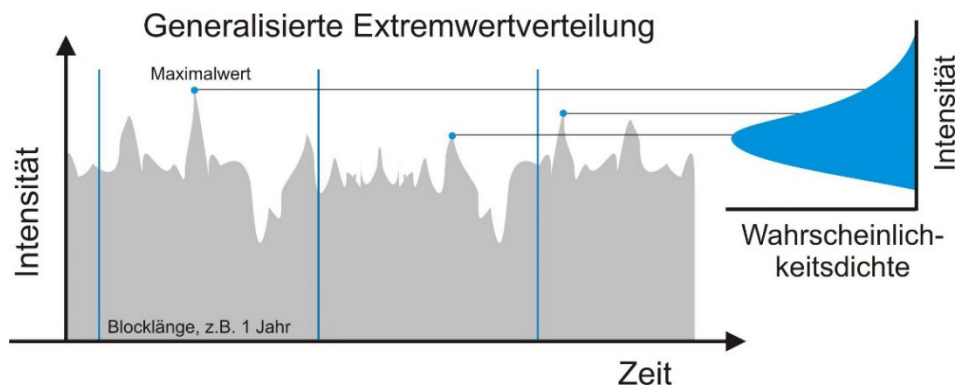


Fig. B-1: Darstellung des Konzeptes der Block-Maxima-Methode

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Maximums eines grossen Blocks von Zufallsvariablen kann unter milden Bedingungen, die in der Praxis häufig erfüllt sind (Davidson 2014), durch die verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) approximiert werden. Dies gilt auch für die zu untersuchenden meteorologischen und klimatologischen Parameter. Die GEV ist wie folgt definiert:

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \frac{z - \mu}{\sigma} \right]_+^{-\frac{1}{\xi}} \right\}, \text{ für alle } z, \text{ für die gilt: } 1 + \xi \frac{z - \mu}{\sigma} > 0 \text{ und } \sigma > 0$$

mit ξ = Formparameter, σ = Skalenparameter und μ = Lageparameter

Mittels verschiedener statistischer Verfahren, wie z.B. Maximum Likelihood Verfahren, können die Parameter der Extremwertverteilung aus den Beobachtungen bestimmt werden. Im Anschluss können Extremwerte für Wiederkehrperioden ausserhalb des Beobachtungszeitraums extrapoliert werden, wie beispielsweise 1'000- bzw. 10'000-jährlichen Werte. Allerdings sollte die Extrapolation beschränkt werden (Pugh 2004, DHI 2007). Dies ist aufgrund der bestehenden kurzen Zeitreihen für verschiedene meteorologische und klimatologische Parameter nicht möglich. Deshalb werden die Blocklängen verändert, um den Stichprobenumfang zu erhöhen. Während meistens Blocklängen von einem Jahr verwendet werden, kann man z.B. bei der Bestimmung maximaler und minimaler Temperaturen Tage oder Monate als Blocklänge verwenden und einen jährlichen Trend unterstellen. Minima können analysiert werden, indem die Minima als Maxima behandelt werden und dann die resultierenden Schätzungen des Parameters und aller Quantile negiert werden.

Die Block-Maxima-Methode ist zu bevorzugen, wenn die i. d. d.¹⁶ Annahme nicht oder nur eingeschränkt gültig ist. Dies ist beispielsweise die Saisonalität von Werten, aber auch Abhängigkeiten innerhalb eines Zeitblocks, beispielsweise ein erneutes Hochwasser nach einem Hochwasser. Ein weiterer Vorteil ist die Anwendbarkeit der Methode bei Datensätze mit Maximalwerten für einen Zeitraum (beispielsweise nur jährliche Maximalwerte). Zudem lassen sich Zeitbereiche (Blöcke, wie beispielsweise ein Jahr) leicht festlegen, im Gegensatz gestaltet sich die Festlegung eines Schwellwerts (Peaks-over-Threshold-Methode) anspruchsvoller. Unter Umständen treten aber auch mehrere «Grösstwerte» innerhalb eines Blockes auf, diese werden dann bei der Block-Maximal-Methode aber nicht erfasst. Hier kann die Ordnungsstatistik (r largest order statistic) helfen, wobei mehr als eine Stichprobe pro Block verwendet wird. Dieses Verfahren hat allerdings ebenfalls Nachteile, wie beispielsweise die eingeschränkte Unabhängigkeit der Stichproben, insbesondere bei kurzen Blöcken. Weiterführende Informationen zur Methode und deren Vor- und Nachteilen sowie Anwendungsbeispiele finden sich in Davidson (2014), Mudelsee (2007), Mudelsee (2020) oder Fukutome et al. (2018).

¹⁶ i. d. d. – independent and identically distributed (unabhängig und identisch verteilt)

Anhang C Unsicherheiten

Die Ermittlung der Extremwerte mit einer Häufigkeit von 10^{-3} oder 10^{-4} pro Jahr aus den Daten der meteorologischen und klimatologischen Parameter weist Unsicherheiten auf. Solche Unsicherheiten umfassen z.B. Ablesefehler, Messfehler, die Wahl des Messstandorts, fehlerhafte Erfassung der Messdaten oder die epistemische Unsicherheit bei der statistischen Auswertung. Nachfolgend wird auf verschiedene Unsicherheiten und deren Umgang kurz eingegangen.

C.1 Wahl der Messorte (Repräsentativität der Messpunkte)

Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) legt für die Erfassung der verschiedenen Parameter Rahmen- und Qualitätsanforderungen fest, um die Qualität und Vergleichbarkeit solcher Messwerte und -reihen sicherzustellen. Für die vorliegende Auswertung standen die Messdaten der ausgewählten meteorologischen und klimatologischen Parameter (Kap. 2.1) an den ausgewählten MeteoSchweiz-Stationen (Kap. 2.2) zur Verfügung. Die Erfüllung der Anforderungen der WMO wird durch die Zertifizierung der Messstationen von MeteoSchweiz nachgewiesen¹⁷.

C.2 Datenprüfung durch MeteoSchweiz

Die Messdaten werden durch MeteoSchweiz qualitätsgesichert ausgewertet (Perl et al. 2009, Fülleman et al. 2011), was beispielhaft für Niederschlags- und Winddaten beschrieben wird:

- Bestehende Niederschlagsstundenwerte werden mit den aus den 10-Minuten-Niederschlagswerten akkumulierten Stundensummen verglichen und Abweichungen erfasst und überprüft. Fehlerquellen können z.B. fehlerhafte Eichmessungen, Resetprobleme oder Bewässerungsniederschläge sein. Andere (Geräte)Fehler, wenn z.B. Geber verstopfen oder immer auf null bleiben, sind schwieriger zu identifizieren und wurden z.B. 2013 durch MeteoSchweiz bei der Bearbeitung der KKW-Stationen nicht behandelt. Es wurden keine räumlichen Konsistenztests durchgeführt. Der Einfluss dieser Fehler auf die Statistik ist jedoch nach Aussage MeteoSchweiz vernachlässigbar.
- Bei den Windmessungen wurden automatische Tests auf Limite durchgeführt, die abhängig von Station und Monat sind. Anschliessend erfolgten eine manuelle Begutachtung und Anpassung von Abweichungen. Auch hier wurden keine räumlichen Konsistenztests durchgeführt.

Neben Mess- bzw. Gerätefehler können sich auch die Bedingungen im Laufe der Zeit verändern, unter welchen die Messungen an einer Messstation erhoben werden. Ursachen solcher Veränderungen können u.a. Stationsverschiebungen, der Einsatz anderer Messgeräte oder Veränderungen der Umgebung sein. Durch solche Veränderungen können in den Messreihen künstliche Sprünge oder Trends entstehen, welche die wirkliche Entwicklung einer Messgrösse über die Zeit verfälschen. Mit der Methodik der Homogenisierung werden künstliche Veränderungen in den Messreihen entfernt (Blumer 2018, Fülleman et al. 2011). Die Homogenisierung wird überwiegend für Temperaturmessungen durchgeführt. Beispielsweise wurde für die Kraftwerksstandorte eine Homogenisierung der Temperaturdaten aufgrund der Verschiebung der Messhöhe von 10 m auf 2 m notwendig. Die Homogenisierung kann sich auf Monatsmittel oder andere Werte beziehen. Bis zum Jahr 2004 wurden z.B. die Temperatur auf Monatsmittel und die Niederschläge auf Monatssummen homogenisiert (Bader & Bantle 2004). Bei neueren Datenlieferungen, wie sie für die vorliegende Analyse verwendet wurden, wurde auf Tagesmaximalwerte homogenisiert.

¹⁷ <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/messsysteme/bodenstationen/automatisches-messnetz.html>,
Zertifizierung von Messstationen

C.3 Toleranzen der Messgeräte

Für die Erfassung der klimatologischen Parameter werden Messgeräte verwendet¹⁸, welche innerhalb verschiedener Fehlertoleranzen operieren. In Tab. C-1 werden beispielsweise die Messgeräte des Messortes Beznau und die zugehörigen üblichen Toleranzen aufgelistet. Für die Erfassung der verschiedenen Parameter können allerdings verschiedene Messverfahren und damit Messgeräte verwendet werden. Die Messgenauigkeit dieser Messgeräte ist hochspezifisch. Aus diesem Grund erfolgen hier keine weiteren Angaben, sondern es wird basierend auf der Zertifizierung der Messstationen davon ausgegangen, dass die Messgeräte die Anforderungen erfüllen. Die durch die Toleranzen verursachten Messfehler werden im Rahmen dieses Berichts in Anlehnung an die vorangegangenen extremwertstatistischen Analysen für Schweizer KKKW vernachlässigt.

Tab. C-1: Messgeräte am Standort Beznau und zugehörige Genauigkeit

Messung	Messgerät und Messhöhe	Messbereich und Genauigkeit
Windgeschwindigkeit, Windrichtung	Lambrecht L14512 (Windfahne, Potentionmeter) 10 m ü. B.	Messbereich: 0 ... 35 m/s Auflösung: 0.1 m/s, 1° Genauigkeit: $\pm 1 \dots 2 \%$ Anlaufwert: $< 0.3 \dots 1$ m/s
Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit	Thygan (Platin-Widerstands- Thermometer, Hygrometer) 2 m ü. B.	Messbereich: $-50 \dots 50$ °C Genauigkeit: ± 0.15 K von -20 °C bis $+50$ °C ± 0.25 K von -65 °C bis -20 °C
Bodenoberflächen- temperatur	PT100 (Platin-Widerstands- Thermometer) Boden	-
Globalstrahlung	Pyranometer CM21 2 m ü. B.	Messbereich: 305 ... 2800 nm Genauigkeit: nicht relevant
Luftdruck	PTB2020 1.4 m ü. B.	Messbereich: 500 ... 1100 hPa Genauigkeit: nicht relevant
Sonnenscheindauer	Hänni Solaar 111 B 2 m ü. B.	
Niederschlag	Lambrecht L15188H (Pluviometer) 1.5 m ü. B.	Messbereich: 0...20 mm/min bzw. 0...1200 mm/h Auflösung: 0.001 mm/min bzw. 0.001 mm/h

C.4 Epistemische Unsicherheit

Die statistische Unsicherheit beschreibt diejenige Unsicherheit, die sich aus begrenzten Stichprobenumfängen ergibt und damit zu einer eingeschränkten Aussagekraft der statistischen Parameter führt. Diese häufig als epistemische im Gegensatz zur aleatorischen Unsicherheit, also der dem Prozess tatsächlich innewohnenden Unsicherheit, bezeichnete Unsicherheit kann durch die Erweiterung des Stichprobenumfangs verringert werden. Im Rahmen von klimatologischen Untersuchungen kann man die Stichproben erweitern, indem man andere Standorte berücksichtigt. So ist die Datenreihe der Messstation Beznau seit knapp 40 Jahren in Betrieb, während z.B. an anderen Messorten deutlich längere Zeitreihen verfügbar sind (z.B. für die Lufttemperatur in Basel seit 1755 oder in Bern, Zürich und weitere seit 1863 (Blumer 2018)).

¹⁸ <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/messsysteme/bodenstationen/automatisches-messnetz/messinstrumente.html>

Allerdings ist die Übertragbarkeit dann durch Korrelationsanalysen zu belegen. Bei der Verwendung von historischen Proxyereignissen müssen die Granularität und die Qualität ausreichend sein. Jedes der Verfahren zur Erweiterung des Stichprobenumfangs besitzt Vor- und Nachteile. Im Rahmen dieser Studie erfolgte ein Vergleich mit vorangegangenen Studien und anderen (KKW) Standorten.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der epistemischen Unsicherheit ist die Erhöhung der Stichprobenumfänge durch Anpassung des statistischen Verfahrens. So kann man bei der Block-Maxima-Methode anstelle der jährlichen Maximalwerte auch monatliche Maximalwerte verwenden und einen Jahresverlauf der Temperatur unterstellen, um diese Werte innerhalb einer Grundgesamtheit zusammenzuführen. Diese Verringerung der Blocklänge führt zu einer Erhöhung der Stichproben und wurde beim Wind umgesetzt.

C.5 Bewertung

In diesem Abschnitt wurden verschiedene Unsicherheiten bei und für die Bestimmung der 10^{-3} und 10^{-4} -jährlichen Werte der meteorologischen und klimatologischen Parameter benannt. Die Unsicherheiten wurden durch die Verwendung qualitätsgesicherter und nach dem aktuellen Stand der Technik erfasster Daten und durch die Verwendung bewährter statistischer Methoden soweit möglich begrenzt. Unabhängig davon lehnt sich diese Studie an die bereits genannten vorangegangenen Studien an, die durch die verschiedenen Betreiber erstellt und vom ENSI und Dritten geprüft wurden. Die intensive Diskussion in diesem kontinuierlichen Verbesserungsprozess begrenzt die verbleibenden Unsicherheiten derart, dass ihr Einfluss vernachlässigbar ist.

C.6 Unterschiede und Interpretation extremwertstatistischer Analysen

Die Ergebnisse extremwertstatistischer Analysen hängen z.T. von den gewählten Randbedingungen, den gewählten Methoden und den Daten bzw. deren Aufarbeitung ab. Diese Abhängigkeit kann bei Analysen auch in abweichenden Ergebnissen (in einer gewissen Bandbreite) resultieren. Ursache für solche Abweichungen können sein:

- verwendete Methode und Verfahren
 - Analyse mit oder ohne Trend
 - verwendete Blocklänge (365.X Tage, 30.X Tage),
 - Berücksichtigung von Saisonalität
 - Gewählte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
- verwendete Software (R, Mathlab, Python, Pro-Gumbel)
- verwendete statistische Schätzer (Mittelwert, Best Estimate, Fraktilwert, ...)
- verwendete Granularität (Jahresmaximal, Monatsmaxima, Tagesmaxima, ...)
- verwendete Daten
 - Auswertungsunterschiede (Homogenisierte und nicht-homogenisierte Parameter, ...)
 - Stichprobenumfang (Länge der verwendeten Zeitreihen)
 - räumliche Variabilität (räumliche Variabilität bezeichnet allgemein die räumliche Veränderlichkeit von individuellen Stichproben in einer Grundgesamtheit; bestimmte klimatologische Parameter verfügen über eine hohe räumliche Variabilität, wie z.B. Niederschläge mit einer kurzen Granularität).
 - gewähltes Bezugsjahr (Ankerjahr, Trend)

Die Extremwertanalysen von 2014, durchgeführt mit der Software R (Davidson 2014), wurden mit der Python-Software (pyextreme) für genau dieselben Daten zum Vergleich und zur Einordnung wiederholt. So ergab sich für die 10^{-4} -jährliche Windgeschwindigkeit für den Standort Gösigen mit der Software R bzw. Python ein Wert von 36.8 m/s bzw. 37.2 m/s. Dieser Unterschied ist praktisch vernachlässigbar. Für den Standort Leibstadt ergab sich mit der Software R bzw. Python (GEV/Gumbel) ein Wert von 53.4 m/s bzw. 50.0 m/s (GEV) oder 56.5 m/s (Gumbel). Der Fehler beträgt hier ca. 6 % und wird als akzeptabel angesehen.

Diese Unterschiede bei der Ermittlung von Extremwerten müssen immer bei der Interpretation und dem Vergleich von Ergebnissen extremwertstatistischer Analysen beachtet werden. Zum Teil ist ein Vergleich nicht sinnvoll möglich. Dies ist auch bei der Plausibilisierung der Werte in diesem Bericht mit anderen Analysen zu berücksichtigen.

Anhang D Ergebnistabellen

D.1 Lufttemperatur

Tab. D-1: Extremwerte für die maximalen Tageslufttemperaturen 2 m (Kloten) und 10 m (KKW) über dem Boden, basierend auf extremwertstatistischen Analysen

Angaben ohne Trend, Jahresextremwerte, Stand der berücksichtigten Daten: 31.12.2022

Ort	Häufigkeit [Jahr]	Maximale Luft- temperatur [°C]	Vertrauensbereich [°C]		μ	ξ	σ
			2.5% Quantil	97.5% Quantil			
Kloten	10^{-3}	39.6	37.3	43.9	0.104	1.517	32.074
	10^{-4}	41.1	37.7	49.3			
Beznau	10^{-3}	38.9	36.8	42.2	0.2029	8.4762	12.136
	10^{-4}	39.6	36.8	44.8			
Gösgen	10^{-3}	38.1	36.5	41.8	0.2155	8.519	11.772
	10^{-4}	38.5	36.5	45.0			
Leibstadt	10^{-3}	38.4	36.9	41.8	0.2043	8.639	11.899
	10^{-4}	38.8	37.0	44.2			

Tab. D-2: Extremwerte für die minimalen Tageslufttemperaturen 2 m (Kloten) und 10 m (KKW) über dem Boden, basierend auf extremwertstatistischen Analysen

Angaben ohne Trend, Stand der berücksichtigten Daten: 31.12.2022

Ort	Häufigkeit [Jahr]	Minimale Luft- temperatur [°C]	Vertrauensbereich [°C]		μ	ξ	σ
			2.5% Quantil	97.5% Quantil			
Kloten	10^{-3}	-19.2	-13.4	-29.9	0.044	2.449	4.608
	10^{-4}	-23.1	-14.7	-45.2			
Beznau	10^{-3}	-18.6	-16.5	-21.5	0.1952	6.0798	-8.8404
	10^{-4}	-19.5	-17.1	-23.0			
Gösgen	10^{-3}	-19.5	-15.7	-23.5	0.1978	6.0216	-8.5985
	10^{-4}	-20.5	-15.7	-25.5			
Leibstadt	10^{-3}	-20.0	-16.8	-24.5	0.1901	6.0370	-8.6956
	10^{-4}	-21.2	-17.1	-27.1			

D.2 Wind

Tab. D-3: Extremwerte für die maximale Monatswindgeschwindigkeit 10 m über dem Boden, basierend auf extremwertstatistischen Analysen

Angaben ohne Trend, Stand der berücksichtigten Daten: 31.12.2022

Ort	Häufigkeit [/Jahr]	Maximale Wind- geschwindigkeit [m/s]	Vertrauenbereich [m/s]		μ	ξ	σ
			2.5% Quantil	97.5% Quantil			
Kloten	10^{-3}	38.6	34.9	43.0	0.107	3.538	17.775
	10^{-4}	41.2	36.4	47.6			
Beznau	10^{-3}	27.6	24.9	31.7	0.0088	2.9343	15.283
	10^{-4}	28.5	25.2	33.9			
Gösgen	10^{-3}	37.5	33.2	42.0	-0.0340	3.7610	16.920
	10^{-4}	39.8	34.4	46.1			
Leibstadt	10^{-3}	44.1	38.3	52.0	-0.1034	3.4283	16.574
	10^{-4}	49.3	41.3	60.9			

D.3 Niederschlag (Regen)

Tab. D-4: Extremwerte des 2h-Niederschlags, basierend auf extremwertstatistischen Analysen

Stand der berücksichtigten Daten: 31.12.2022

Ort	Häufigkeit [Jahr]	Niederschlag [mm/2h]	Vertrauenbereich [mm/2h]		Log	Scale
			2.5% Quantil	97.5% Quantil		
Zürich- Kloten	10 ⁻³	69.0	56.3	81.1	7.502	4.658
	10 ⁻⁴	85.3	68.9	100.7		
Beznau	10 ⁻³	63.9	47.5	82.1	8.089	4.650
	10 ⁻⁴	79.5	58.1	103.1		
Gösgen	10 ⁻³	76.9	64.0	86.0	7.585	4.925
	10 ⁻⁴	94.6	77.5	106.0		
Leibstadt	10 ⁻³	56.0	47.6	62.6	7.260	3.684
	10 ⁻⁴	68.5	57.8	77.2		
Bern	10 ⁻³	66.1	58.5	77.3	8.089	4.650
	10 ⁻⁴	80.8	71.2	95.3		
Buchs / Aarau	10 ⁻³	69.3	54.9	80.9	7.864	5.124
	10 ⁻⁴	85.1	66.2	100.2		
Cham	10 ⁻³	72.7	57.7	84.2	7.366	5.273
	10 ⁻⁴	90.6	70.6	105.5		
Neuchâtel	10 ⁻³	88.9	66.9	116.1	7.720	4.870
	10 ⁻⁴	111.6	83.1	147.0		
PSI	10 ⁻³	52.2	39.9	66.7	7.737	3.982
	10 ⁻⁴	63.7	47.5	82.6		
Zürich- Affoltern	10 ⁻³	67.7	56.8	80.5	7.697	4.974
	10 ⁻⁴	82.9	68.7	99.3		
Schaff- hausen	10 ⁻³	75.3	57.2	91.5	7.428	5.013
	10 ⁻⁴	93.5	70.4	114.2		
Zürich- Fluntern	10 ⁻³	74.6	59.9	90.5	8.058	5.458
	10 ⁻⁴	92.1	72.9	112.9		
St. Gallen	10 ⁻³	84.2	67.5	100.2	9.122	6.553
	10 ⁻⁴	103.9	82.1	124.7		
Aadorf / Tänikon	10 ⁻³	68.0	56.4	78.5	8.708	5.222
	10 ⁻⁴	82.9	68.1	96.4		
Wäders- wil	10 ⁻³	86.4	71.7	106.5	9.814	6.078
	10 ⁻⁴	106.6	87.1	132.6		
Mittelwert über alle	10 ⁻³	71.4	57.5	85.7		
	10 ⁻⁴	88.1	87.1	106.5		

D.4 Schneelasten

Tab. D-5: Extremwerte für die jährlichen maximalen Schneelasten (ohne Trend, Daten bis 31.12.2022)

Ort	Häufigkeit [/Jahr]	maximalen Schneelasten [kN/m ²]	Vertrauenbereich [m/s]		μ	ξ	σ
			2.5% Quantil	97.5% Quantil			
Beznau	10 ⁻³	1.32	0.859	2.425	-0.1699	0.16621	0.3161
	10 ⁻⁴	2.00	1.067	5.233			