

Leitung TR1213 220kV-380kV Niederwil-Obfelden
Swissgrid AG

Windanalyse, Windgeschwindigkeit und
Windrichtung entlang der Leitung

Kunde:

Axpo Grid AG
Parkstrasse 23
CH-5400 Baden

Kontakt:

Herr Jens Witzig
Tel.: +41 76 582 08 80
Jens.witzig@axpo.com

Datum:

19.12.2023

Dokument-Nr.:

68002800 TR 1213 Windanalyse

Version:

1.0

Technische Kontakte:

Nicola Guerrini
Tel.: +41 76 281 46 39
n.guerrini@bouygues-es.com

Karim Ganour
Tel.: +41 62 703 54 20
karim.ganour@bouygues-es.com

Kontaktdaten:

Unternehmen:**Axpo Grid AG****Parkstrasse 23
CH-5400 Baden****Ansprechpartner:**

Jens Witzig

Tel.: +41 76 582 08 80
Jens.witzig@axo.com**Unternehmen:****Bouygues E&S EnerTrans SA**Route des Flumeaux 45
CH-1008 Prilly
Tel.: +41 21 703 54 00
Fax: +41 21 703 54 01
bouygues-es-enertrans.ch**Kontaktpersonen:**

Nicola Guerrini

Tel.: +41 76 281 46 39
n.guerrini@bouygues-es.com

Karim Ganour

Tel.: +41 62 703 54 20
karim.ganour@bouygues-es.com

Inhaltsverzeichnis

1	Änderungsnachweis	4
2	Referenzdokumente	4
3	Einleitung	5
4	Winddatenerfassung und -verarbeitung	6
4.1	Station Buchs/Aarau	9
4.1.1	Winddatenanalyse	9
4.1.2	Hauptrichtung des Windes	9
4.2	Station Cham	11
4.2.1	Winddatenanalyse	11
4.2.2	Hauptrichtung des Windes	11
4.3	Station Mosen	13
4.3.1	Winddatenanalyse	13
4.3.2	Hauptrichtung des Windes	13
4.4	Station Lägern	15
4.4.1	Winddatenanalyse	15
4.4.2	Hauptrichtung des Windes	15
4.5	Station Uetliberg	17
4.5.1	Winddatenanalyse	17
4.5.2	Hauptrichtung des Windes	17
4.6	Station Würenlingen	18
4.6.1	Winddatenanalyse	18
4.6.2	Hauptrichtung des Windes	19
5	Leitungsverordnung LeV 734.31	20
6	CENELEC-Norm	21
7	Risikobeurteilung	22
7.1	Gefährdungs- und Schadensanalyse	22
7.2	Risikoeinschätzung, Wahrscheinlichkeit und Schweregrad	22
7.2.1	Schätzung des Schweregrads des Schadens	23
7.2.2	Schätzung der Schadenswahrscheinlichkeit	23
7.3	Risikobewertung	24
7.4	Massnahmen zur Risikominderung	25
8	Zusammenfassung	25
9	Schlussfolgerungen	26
10	Anhänge	28
Anhang 1:	Station Buchs/Aarau – Tagesdaten seit 1999	28
Anhang 2:	Station Cham – Tagesdaten seit 1999	29
Anhang 3:	Station Mosen – Tagesdaten seit 1999	30
Anhang 4:	Station Lägern – Tagesdaten seit 1999	31
Anhang 5:	Station Uetliberg – Tagesdaten seit 1999	32
Anhang 6:	Station Würenlingen – Tagesdaten seit 2005	33
Anhang 7:	Ausrichtungsindex der Leitung	34
Anhang 8:	Einzelheiten der Berechnungen der CENELEC-Norm	36

1 Änderungsnachweis

Version	Datum	Beschreibung	Autor	Genehmiger
0	19.12.2023	Dokumentation erstellt	GUENI	GAKAR
1	04.01.2024	Dokumentation angepasst	GUENI	GAKAR
2	16.01.2024	Übersetzung ins Deutsche	SPAAL	GAKAR

2 Referenzdokumente

- MétéoSuisse: CHA/MOS/BUA/LAG/UEB/PSI (Wetterdaten der Stationen Cham, Mosen, Buchs/Aarau, Lägern, Uetliberg, Würelingen)
- CENELEC-Norm: SNEN50341-1{2012}F
- Norm SIA 261_2014: 261_f
- Stromleitungsverordnung (LeV 1994) in Kraft (Stand am 1. Juli 2021)
- Technischer Bericht MétéoSuisse Nr. 268, "Der Wintersturm Eleanor/Burglind in der Schweiz"

3 Einleitung

Die Überprüfung der Abstände zwischen den Phasen, der Auslenkung der Ketten und der dem Wind ausgesetzten Schlaufen sind interne geometrische Überprüfungen, die im Rahmen der Dimensionierung einer Hochstromfreileitung durchgeführt werden müssen.

Gemäss der LeV 1994 beträgt der Winddruck, der auf die Leiter senkrecht zur Leitung ausgeübt wird, um diese Auslenkung zu überprüfen, 650 Pa für Masten mit einer Höhe bis zu 80 m. Die Höhe des Mastes ist für die Wahl des Winddruckes ausschlaggebend.

Dieser Winddruck ist verbindlich, Er kann den massiven Einsatz von Gegengewichten an den Tragmasten und von Hilfsketten an einem erheblichen Teil der Abspannmasten zur Folge haben. Dieser Wert, der nach der LeV 1994 senkrecht anzuwenden ist, berücksichtigt unter anderem nicht die tatsächlichen örtlichen Gegebenheiten und die Ausrichtung der Leitung.

Es ist möglich, gemäss der LeV 1994 für die statischen Nachweise der Tragfähigkeit einen von der Länge der Spannweite abhängigen Reduktionsfaktor zu berücksichtigen. Die Risikoanalyse ermöglicht es, ihren Einsatz auf die geometrische Prüfung für einen Betriebsgrenzzustand (ELS) auszudehnen und nachzuweisen, dass diese Überlegung angemessen ist. Der potenzielle Schaden ist geringer als bei statischen Berechnungen, daher ist es angemessen, die Verwendung dieses Reduktionsfaktors auf ELS-Prüfungen auszudehnen.

Im Rahmen einer Studie zur Verlegung des Leitungsverlaufs der AXPO AG wurde in der Nähe der 220-380kV Leitung Niederwil-Obfelden eine Windanalyse (Geschwindigkeit und Richtung) durchgeführt, um den Windeinfluss in der Gegend zu überprüfen. Ziel dieser Windstudie ist es, die von der LeV 1994 auferlegten theoretischen Windannahmen zu bewerten, um festzustellen, inwieweit der Winddruck für diese Überprüfungen angepasst werden könnte. Der Verlauf dieser Leitung ist teils oberirdisch (UW Niederwil $\leftrightarrow$ Mast 28 und Mast 44 $\leftrightarrow$ UW Obfelden) und teils unterirdisch (Mast 28 $\leftrightarrow$ Mast 44).

Diese Wahl muss von einer Risikoanalyse begleitet werden, die die Auswirkungen aussergewöhnlicher Ereignisse auf die Leitung berücksichtigt. Denn die Abstände zur geerdeten Teilen müssen eine zufriedenstellende dielektrische Festigkeit der Anlage in den verschiedenen angenommenen Klimabedingungen (Ruhe und Ausschwingen) ermöglichen. Diese Bedingungen sollten in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wetterereignissen und Schäden definiert werden. Es ist zu beachten, dass die Überprüfung der elektrischen Abstände eine Überprüfung im Betriebsgrenzzustand ist. Diese Überprüfung ermöglicht es, die Verfügbarkeit der Leitung und ihren ordnungsgemässen Betrieb zu gewährleisten, beeinträchtigt jedoch in keiner Weise die Tragsicherheit der Anlage oder die Sicherheit von Personen.

In der vorliegenden Studie werden drei Windvariablen analysiert:

- Die Amplitude, d. h. die maximale Windgeschwindigkeit (Durchschnitt über 10 Minuten)
- Die Häufigkeit
- Die Richtung

Diese drei Variablen ermöglichen eine Bewertung des Risikos und der Anfälligkeit bzw. Empfindlichkeit der Stromleitung gegenüber Überprüfungen im Grenzzustand des Betriebs unter Windlast.

4 Winddatenerfassung und -verarbeitung

BYES hat sich mit MétéoSuisse in Verbindung gesetzt, um Informationen über die Windrichtung und -Geschwindigkeit in der Nähe der Leitung zu erhalten. Sechs Stationen in der Nähe der Leitung wurden identifiziert.

- Buchs/Aarau
- Cham
- Lägern
- Mosen
- Uetliberg
- Würenlingen

Die Wahl dieser sechs Stationen wurde getroffen, um die Leitung zu umrahmen und ein gutes Bild der verschiedenen Winde zu erhalten, die unter anderem von den Hügelländern (Lägern, Uetliberg) kommen und deren Auswirkungen auf das Schweizer Mittelland (Buchs/Aarau, Cham, Mosen, Würenlingen), der Region, in der die Leitung verläuft, zu sehen.

Für die sechs Wetterstationen wurden folgende Daten analysiert:

- Tagesdaten + Windrose
 - Windgeschwindigkeit; Durchschnitt über 10 Minuten
 - Windböe (Integration 1 s); Maximalwert über 10 Minuten
 - Windrichtung; Durchschnitt über 10 Minuten [°]

Die Geschwindigkeiten werden in einer Höhe von 10 m über dem Boden gemessen, mit Ausnahme der Stationen Würenlingen und Uetliberg (in 70 m bzw. 162 m über dem Boden).

Der Messzeitraum ist bei allen sechs Wetterstationen nicht identisch und hängt von deren Inbetriebnahme ab. In der Schweiz haben sich in den letzten Jahren zwei Stürme ereignet: 1999 (Lothar) und 2018 (Burglind/Eleanor). Die Aufzeichnungsperioden dieser Stationen erlauben es, nur das zweite grosse Ereignis zwischen diesen beiden mit Sicherheit zu beurteilen, da 1999 nicht alle Stationen in Betrieb waren (nur fünf von sechs). Die ebenfalls aussergewöhnlichen Ereignisse von 2023 werden auch im für die Studie verwendeten Zeitrahmen erfasst (Daten ab Inbetriebnahme der Stationen bis 30. September 2023).

Darüber hinaus ermöglicht die CENELEC-Norm die Extrapolation der Windgeschwindigkeit auf eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren in Abhängigkeit von der verfügbaren Messperiode. Diese Extrapolation wird in der vorliegenden Studie verwendet und ist in §7 beschrieben.

In dieser Abbildung 1 wird der Leitungsverlauf sowie die Lage der Stationen von MétéoSuisse um die Leitung dargestellt.

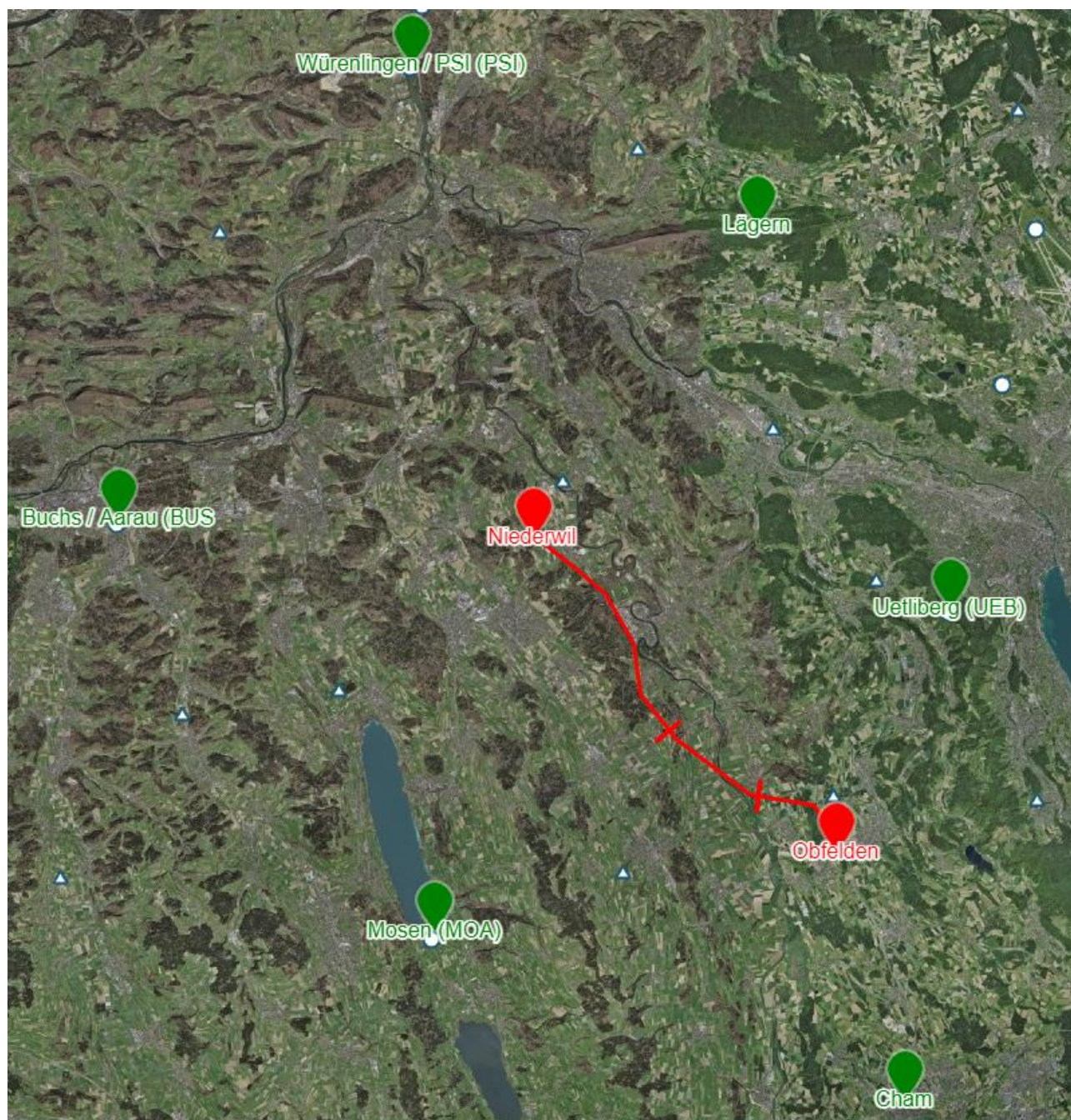


Abbildung 1. Aktueller Verlauf der Leitung Niederwil-Obfelden und in der Studie berücksichtigte Wetterstationen.

Anmerkung:

In der Schweiz kann der Wert der Luftdichte je nach Höhe variieren, in der Studie wird der Wert $\rho_{\text{air}} = 1.165 \text{ kg/m}^3$ berücksichtigt, was einer Höhe von 650 m entspricht. Zur Berechnung dieses Wertes wurde die Website [Wind-energie-Daten der Schweiz \(wind-data.ch\)](http://wind-energie-daten.der.schweiz.ch) verwendet. Für die Luftdichte wird in EN 1991-1-4 ein konservativer Wert angegeben: $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Dieser Wert wird von Swissgrid gewählt.

Gemäss der Beschreibung der Geländearten der CENELEC EN 50342-1:2012 haben wir geschätzt, dass die Position der Leitung einer Geländekategorie II entspricht, die zum Geländefaktor führt:

- $k_r = 0,189$ und $z_0 = 0,05 \rightarrow$ Geländekategorie II über den gesamten analysierten Leitungsverlauf

Die Geländekategorie II entspricht einem Gebiet mit niedriger Vegetation wie Gras und einzelnen Hindernissen (Bäume, Gebäude), die mindestens das 20-Fache ihrer Höhe voneinander entfernt sind.

4.1 Station Buchs/Aarau

4.1.1 Winddatenanalyse

Die jährlichen Maximaldaten der Station Buchs/Aarau seit 1999 sind im Anhang 1 enthalten.

Tabelle 1 enthält eine Übersicht der Extremdaten und des Jahres des Auftretens:

Max. jährliche Windböen (Integration 1 Sek.)	104,0 km/h (522 Pa) im Jahr 2018
Jahresdurchschnitt der Windböen (Integration 1 Sek.)	81,8 km/h
Maximale Durchschnittsgeschwindigkeit über 10 Minuten in 10 m Höhe	47,20 km/h im Jahr 2018

Tabelle 1. Jährliche Extremwerte der Station Buchs/Aarau: Windböen und Integration über 10 Min.

4.1.2 Hauptrichtung des Windes

Anhand der Daten zu den Windrosen lässt sich erkennen, dass die vorherrschende Windrichtung einer Achse von 225°-45° entspricht.

Die unten dargestellte Windrose entspricht **dem durchschnittlichen stündlichen Wind (über 1 Stunde)** der Station, entsprechend den verschiedenen Windrichtungen.

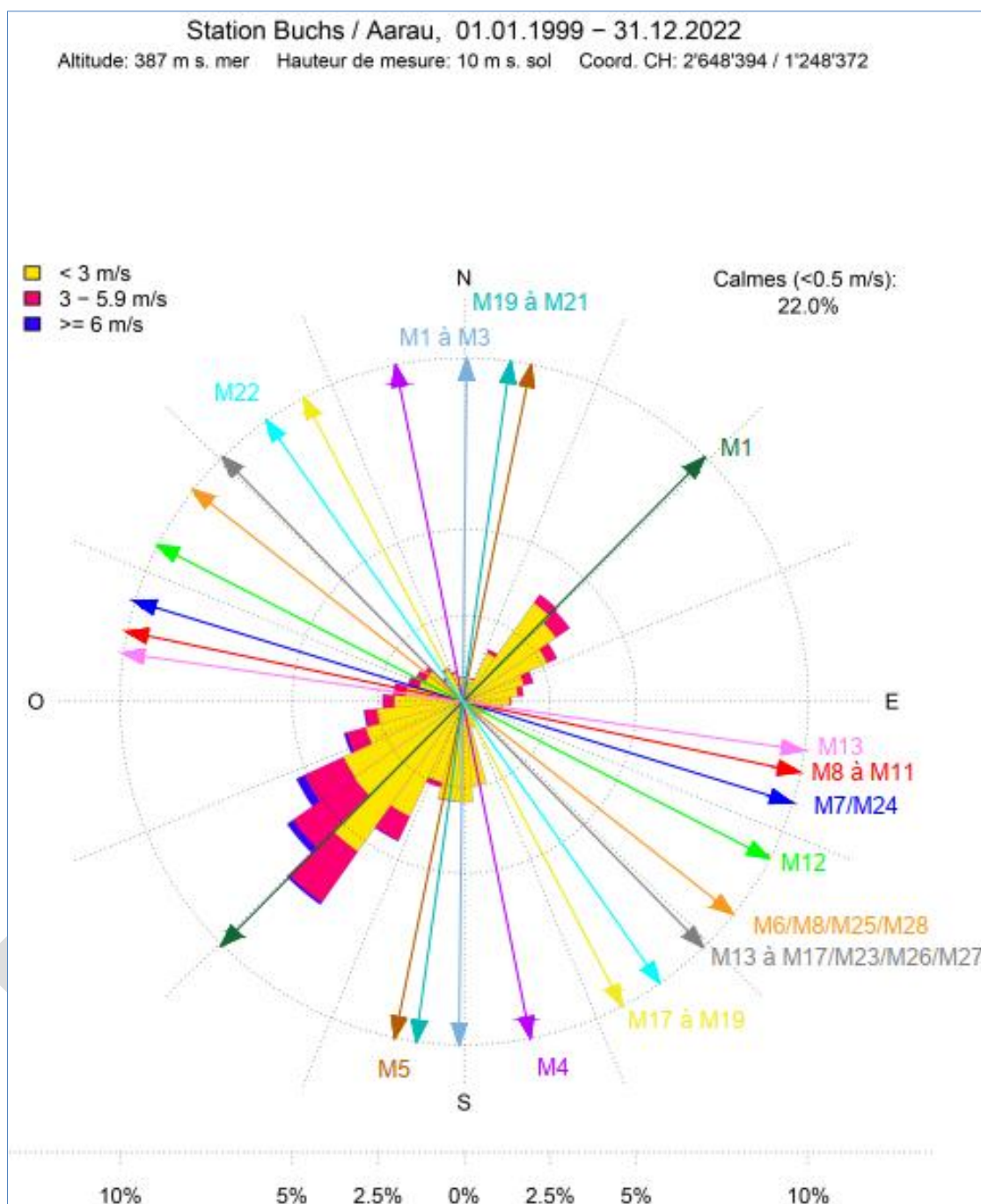


Abbildung 2. Windrose Station Buchs/Aarau.

4.2 Station Cham

4.2.1 Winddatenanalyse

Die jährlichen Maximaldaten der Station Cham seit 1999 sind im Anhang 2 enthalten.

Tabelle 2 enthält eine Übersicht der Extremdaten und des Jahres des Auftretens:

Max. jährliche Windböen (Integration 1 Sek.)	141,5 km/h (966 Pa) im Jahr 1999
Jahresdurchschnitt der Windböen (Integration 1 Sek.)	95,58 km/h
Maximale Durchschnittsgeschwindigkeit über 10 Minuten in 10 m Höhe	87,5 km/h im Jahr 1999

Tabelle 2. Jährliche Extremwerte der Station Cham: Windböen und Integration über 10 Min.

4.2.2 Hauptrichtung des Windes

Die unten dargestellte Windrose ermöglicht es, die vorherrschende Windrichtung zu identifizieren, die einer Achse von **306°-126°** entspricht.

Die Windrose wird auf der Grundlage **des stündlichen Durchschnitts (über 1 Stunde)** der Station gemäss den verschiedenen Windrichtungen ermittelt.

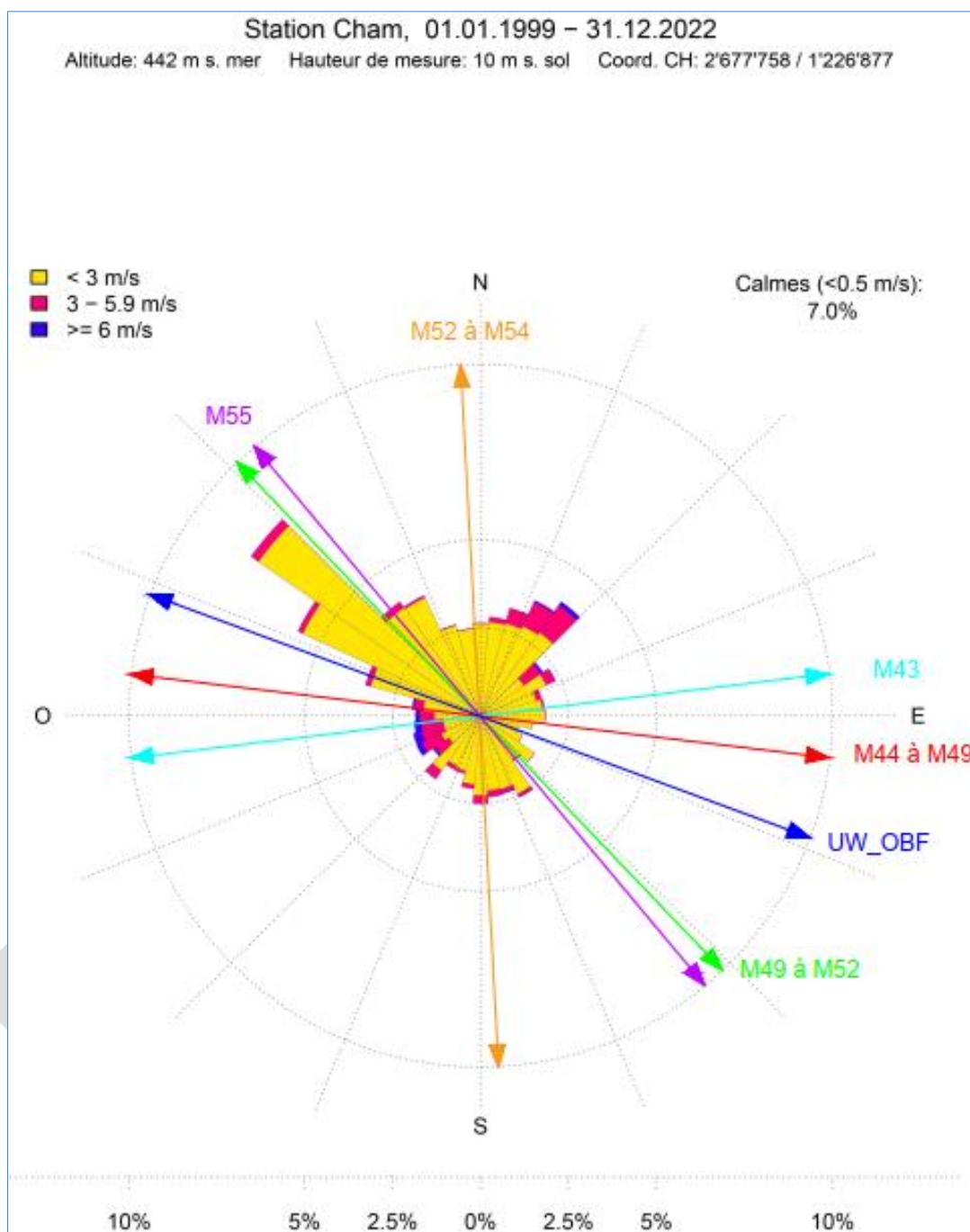


Abbildung 3. Windrose Station Cham.

4.3 Station Mosen

4.3.1 Winddatenanalyse

Die jährlichen Maximaldaten der Station Mosen seit 1999 sind im Anhang 3 enthalten.

Tabelle 3 enthält eine Zusammenfassung der Daten:

Max. jährliche Windböen (Integration 1 Sek.)	110,5 km/h (589 Pa) im Jahr 2009
Jahresdurchschnitt der Windböen (Integration 1 Sek.)	89,73 km/h
Maximale Durchschnittsgeschwindigkeit über 10 Minuten in 10 m Höhe	51,1 km/h im Jahr 2002, 2008

Tabelle 3. Jährliche Extremwerte der Station Mosen: Windböen und Integration über 10 Min.

4.3.2 Hauptrichtung des Windes

Anhand der unten dargestellten Windrosen kann die vorherrschende Windrichtung identifiziert werden, die einer Achse von **335°-155°** entspricht.

Die Windrose in Abbildung 4 wird auf der Grundlage des **stündlichen Durchschnitts (über 1 Stunde)** der Station gemäss den verschiedenen Windrichtungen vom 01.01.1999 bis zum 31.12.2022 ermittelt.

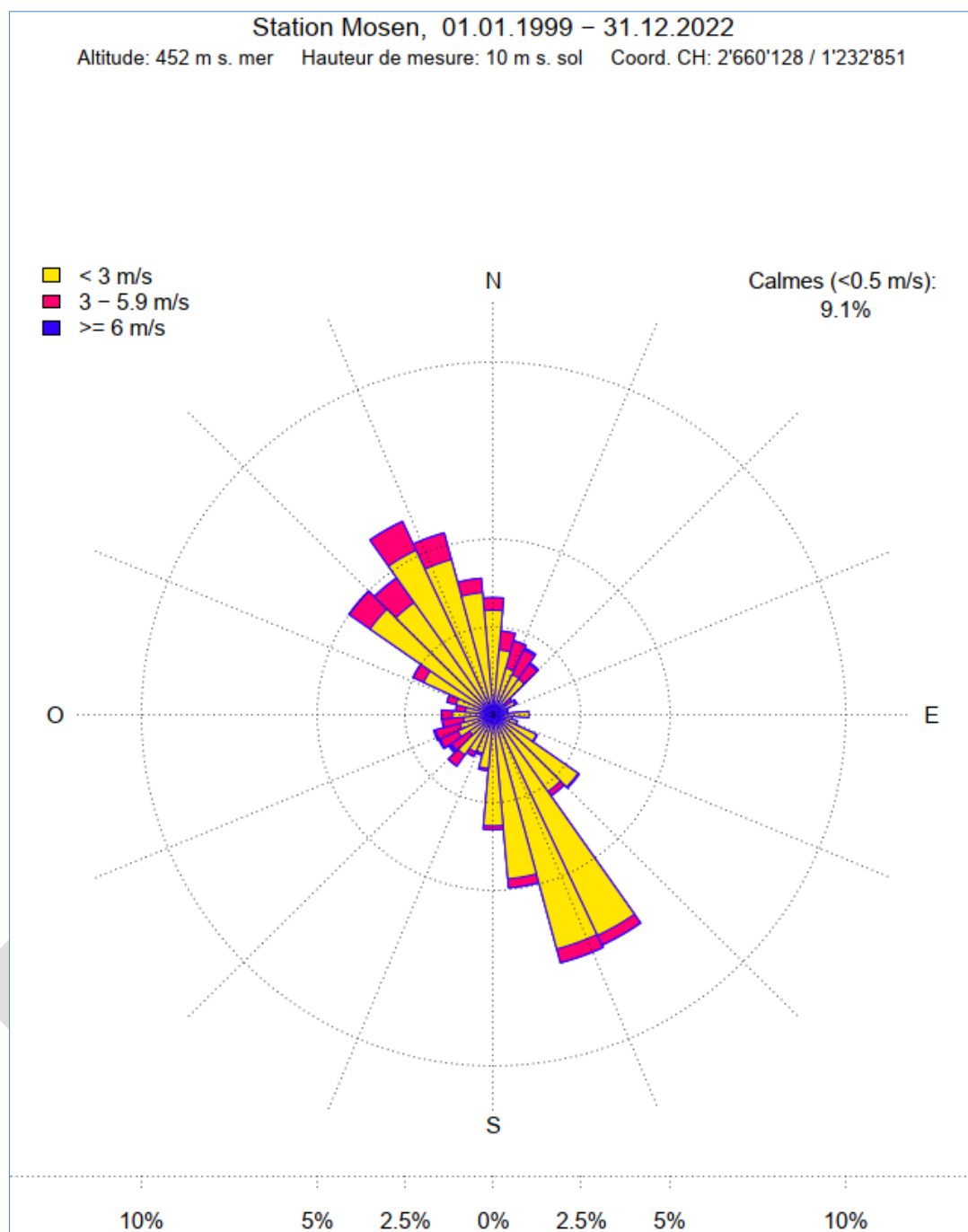


Abbildung 4. Windrose Station Mosen.

Die Ausrichtungen der verschiedenen Spannweiten werden auf der Windrose nicht dargestellt, da diese Station bei der Analyse nach der CENELEC-Norm nicht berücksichtigt wird (siehe §6).

4.4 Station Lägern

4.4.1 Winddatenanalyse

Die jährlichen Maximaldaten der Station Lägern seit 1999 sind im Anhang 4 enthalten.

Tabelle 4 enthält eine Zusammenfassung der Daten:

Max. jährliche Windböen (Integration 1 Sek.)	165,2 km/h (1316 Pa) im Jahr 1999
Jahresdurchschnitt der Windböen (Integration 1 Sek.)	125,77 km/h (762 Pa)
Maximale Durchschnittsgeschwindigkeit über 10 Minuten in 10 m Höhe	72,7 km/h im Jahr 1999

Tabelle 4. Jährliche Extremwerte der Station Lägern: Windböen und Integration über 10 Min.

4.4.2 Hauptrichtung des Windes

Die unten dargestellte Windrose ermöglicht es, die vorherrschende Windrichtung zu bestimmen, die einer Achse von **210°-30°** entspricht.

Die Windrose in Abbildung 5 wird auf der Grundlage des **stündlichen Durchschnitts (über 1 Stunde)** der Station gemäss den verschiedenen Windrichtungen vom 01.01.1999 bis zum 31.12.2022 ermittelt.

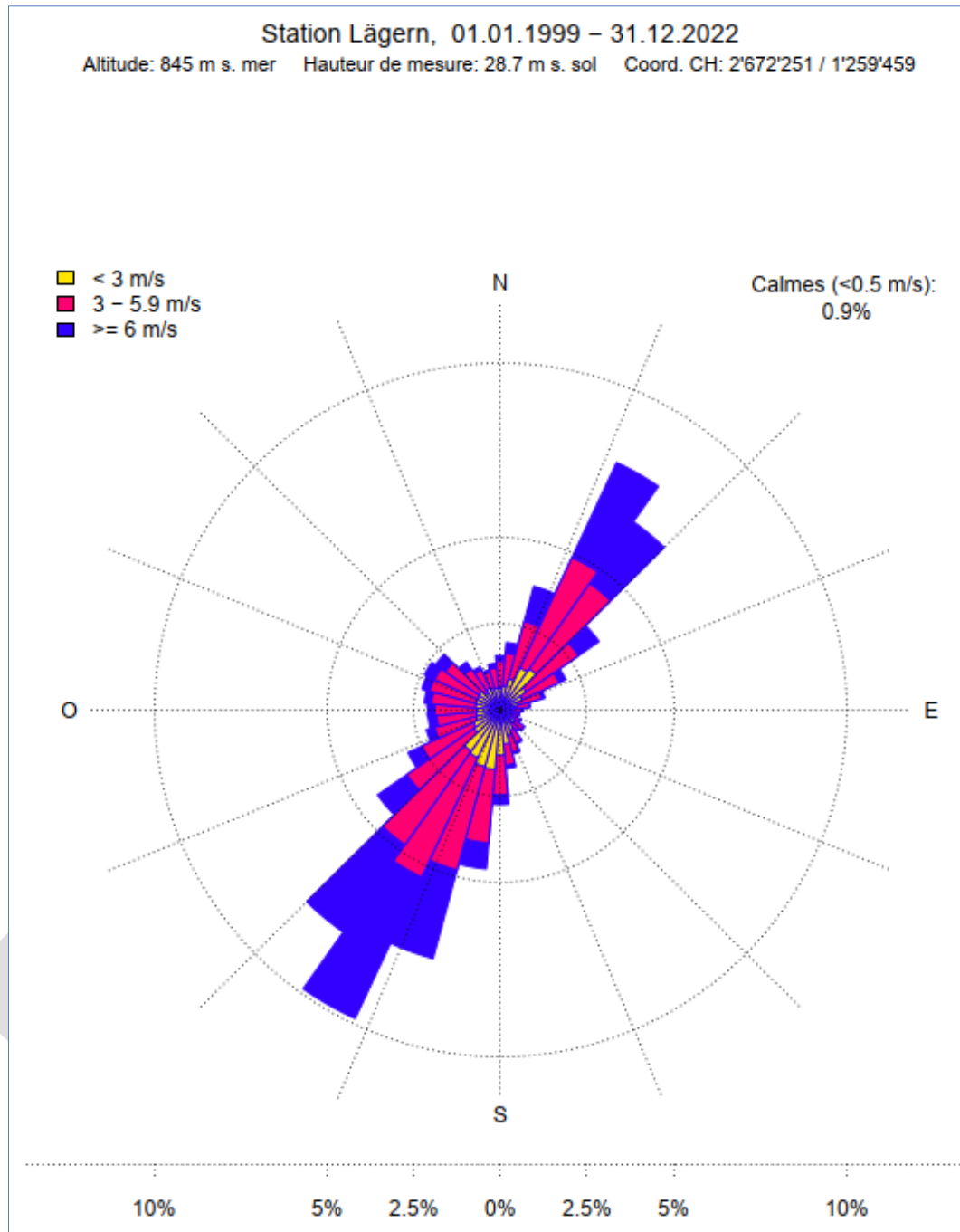


Abbildung 5. Windrose Station Lägern.

Die Ausrichtungen der verschiedenen Spannweiten werden auf der Windrose nicht dargestellt, da diese Station bei der Analyse nach der CENELEC-Norm nicht berücksichtigt wird (siehe §6).

4.5 Station Uetliberg

4.5.1 Winddatenanalyse

Die jährlichen Maximaldaten der Station Uetliberg seit 1999 sind in Anhang 5 enthalten.

Tabelle 4 enthält eine Zusammenfassung der Daten:

Max. jährliche Windböen (Integration 1 Sek.)	158,8 km/h (1216 Pa) im Jahr 2020
Jahresdurchschnitt der Windböen (Integration 1 Sek.)	Nicht zuverlässig
Maximale Durchschnittsgeschwindigkeit über 10 Minuten in 10 m Höhe	114,8 km/h im Jahr 2018, Konvertierung: 64,0 km/h

Tabelle 5. Jährliche Extremwerte der Station Uetliberg: Windböen und Integration über 10 Min.

Da die Messungen in 162 m Höhe durchgeführt werden, ist es notwendig, diese Werte so umzuwandeln, dass sie mit denen anderer Stationen vergleichbar sind. Es ist notwendig, die in 70 m Höhe erhobenen Daten umzuwandeln und die Messung auf 10 m Höhe zu übertragen.

Nach mehreren Recherchen wurde beschlossen, das logarithmische Gesetz zu verwenden, das direkt aus den Navier-Stokes-Gleichungen abgeleitet wird.

$$U_z/U_{zr} = \ln(z/z_0) / \ln(z_r/z_0)$$

In dieser Formel bedeuten:

U_z = Geschwindigkeit in 10 m Bodenhöhe

U_{zr} = Geschwindigkeit in 70 m Bodenhöhe

z = 10 m

z_r = 162 m

z_0 = 0,3 m = Rauheitslänge an der Messstation

Diese Formel ergibt einen Koeffizienten $U_z/U_{zr} = 0,56$.

Die obigen Formeln wurden aus dieser Quelle bezogen:

<https://www.energyhunters.it/misurare-il-vento-le-variazioni-del-vento-con-laltezza-dal-suolo/>

4.5.2 Hauptrichtung des Windes

Die unten dargestellte Windrose ermöglicht es, die vorherrschende Windrichtung zu identifizieren, die einer Achse von **237°-57°** entspricht.

Die Windrose in Abbildung 6 wird basierend auf **der Messungen 10 Minuten** der Station in den verschiedenen Windrichtungen von 2005 bis 2023 erstellt.

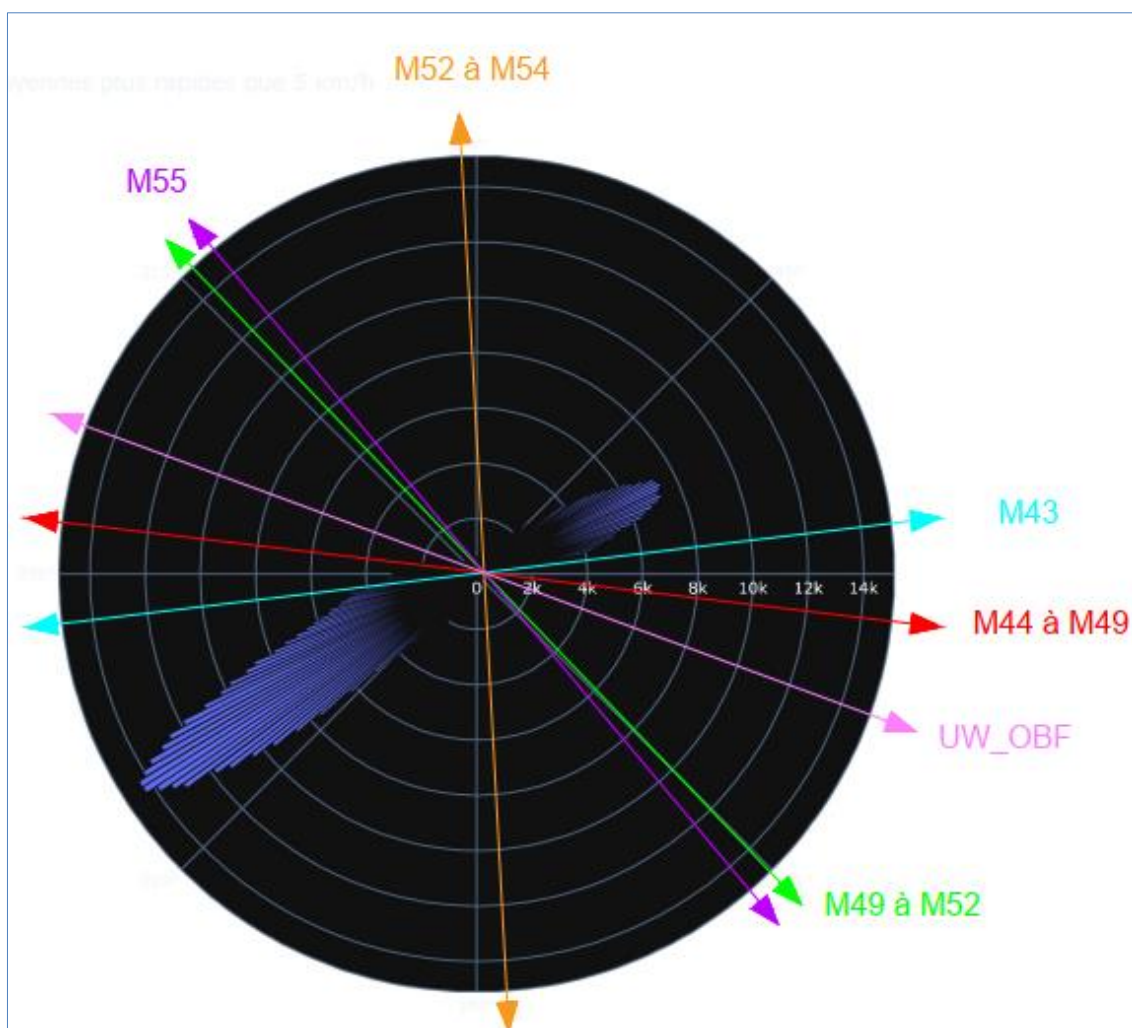


Abbildung 6. Windrose Uetliberg.

4.6 Station Würenlingen

4.6.1 Winddatenanalyse

Die jährlichen Maximaldaten der Station Würenlingen seit 2005 sind in Anhang 6 enthalten.

Tabelle 6 enthält eine Zusammenfassung der Daten:

Max. jährliche Windböen (Integration 1 Sek.)	124,08 km/h (742 Pa) im Jahr 2019
Jahresdurchschnitt der Windböen (Integration 1 Sek.)	105 km/h
Maximale Durchschnittsgeschwindigkeit über 10 Minuten in 10 m Höhe	72,2 km/h Konvertierung: $72,2 \cdot 0,64 = 46,4$ km/h

Tabelle 6. Jährliche Extremwerte der Station Würenlingen: Windböen und Integration über 10 Min.

Da die Messungen in 70 m Höhe durchgeführt werden, ist es notwendig, diese Werte so umzurechnen, dass sie mit denen anderer Stationen vergleichbar sind. Es ist notwendig, die in 70 m Höhe erhobenen Daten umzurechnen und die Messung auf 10 m Höhe zu übertragen.

Nach mehreren Recherchen wurde beschlossen, das logarithmische Gesetz zu verwenden, das direkt aus den Navier-Stokes-Gleichungen abgeleitet wird.

$$U_z/U_{zr} = \ln(z/z_0) / \ln(z_r/z_0)$$

In dieser Formel bedeuten:

U_z = Geschwindigkeit in 10 m Bodenhöhe

U_{zr} = Geschwindigkeit in 70 m Bodenhöhe

z = 10 m

z_r = 70 m

z_0 = 0,3 m = Rauheitslänge für diese geografische Zone

Diese Formel ergibt einen Koeffizienten $U_z/U_{zr} = 0,64$.

4.6.2 Hauptrichtung des Windes

Die unten dargestellte Windrose ermöglicht es, die vorherrschende Windrichtung zu identifizieren, die einer Achse von **194°-14°** entspricht.

Die Windrose in Abbildung 7 wird auf der Grundlage **der Aufzeichnungen der Messungen 10 Minuten** der Station in den verschiedenen Windrichtungen von 2005 bis 2023 erstellt.

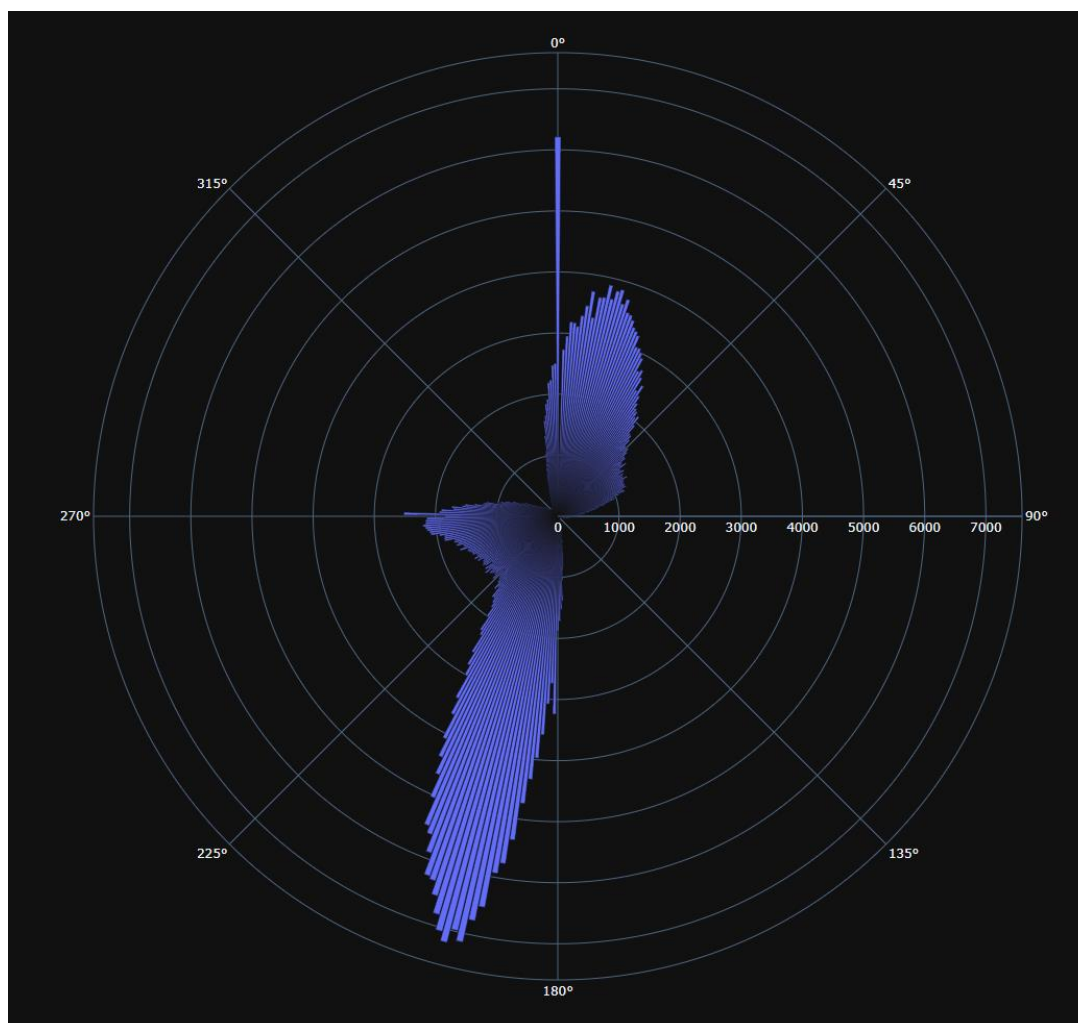


Abbildung 7. Windrose Station Würenlingen.

Die Ausrichtungen der verschiedenen Spannweiten werden in der Windrose nicht dargestellt, da diese Station bei der Analyse nach der CENELEC-Norm nicht berücksichtigt wird (siehe §6).

5 Leitungsverordnung LeV 734.31

Der Winddruck, der senkrecht zur Leitung angelegt werden muss, um die Auslenkungen zu überprüfen, beträgt laut LeV 1994 650 Pa für Masten mit einer Höhe bis 80 m.

Gemäss Artikel 2 vom Anhang 15 können die Belastungen für die Bemessung der Tragwerke gemäss Diagramm 3 reduziert werden, wenn die Längen der äquivalenten Spannweiten 225 m überschreiten.

Auf der Leitung beträgt die durchschnittliche Spannweite 323 m. Daher können wir von einem durchschnittlichen Reduktionsfaktor von 0,86 ausgehen.

Somit wäre der zu berücksichtigende Winddruck **559 Pa**.

6 CENELEC-Norm

In diesem Kapitel wird versucht, den Winddruck, der auf die Seile angewendet wird, gemäss den Empfehlungen der CENELEC-Norm 50341-1 zu bestimmen, um ihn mit dem von der LeV 1994 auf die runden Körper von 650 Pa anzuwendenden Druck zu vergleichen.

Für die Analyse nach CENELEC-Norm wurden drei Stationen ausgewählt:

- Buchs/Aarau: für den Leitungsabschnitt zwischen der UW Niederwil und dem Mast 28
- Cham: für den Leitungsabschnitt zwischen dem Mast 44 und der UW Obfelden
- Uetliberg: für den Leitungsabschnitt zwischen dem Mast 44 und der UW Obfelden (zusätzliche Analyse)

Die anderen drei Windmessstationen (Lägern, Würenlingen und Mosen) wurden aus folgenden Gründen nicht für die Berechnungen nach CENELEC-Norm herangezogen: niedriger Winddruck, Leitungsabstand und unterschiedliche Geländebeschaffenheit.

Der resultierende höhere Druckwert zwischen den Stationen Cham und Uetliberg wird beibehalten.

Gemäss §4.3 der CENELEC-Norm wird die Referenzgeschwindigkeit V_r angegeben, die einer Durchschnittsgeschwindigkeit entspricht.

Gemäss den Daten von MétéoSuisse und der zuvor durchgeführten Analyse wird Folgendes berücksichtigt:

- eine Geschwindigkeit V_r von 13,11 m/s (Station Buchs/Aarau)
- eine Geschwindigkeit V_r von 24,16 m/s (Station Cham)
- eine Geschwindigkeit V_r von 17,77 m/s (Station Uetliberg)

Genau genommen, handelt es sich bei den nachstehenden Werten um die über den gesamten Messzeitraum von 24 Jahren gemessenen, maximalen Windgeschwindigkeiten.

Gemäss der Beschreibung der Geländearten der CENELEC EN 50341-1:2012 haben wir geschätzt, dass die Position der Leitung einer Geländekategorie II entspricht, die zum Geländefaktor führt:

- $z_0 = 0,05$ und $k_r = 0,189$

Die Berechnungen nach der CENELEC-Norm ermöglichen die Bestimmung der Absolutwerte der auf die Leiter aufzubringenden Winddrücke:

- **Station Buchs/Aarau: 317 Pa**
- **Station Cham: 1076 Pa**
- **Station Uetliberg: 582 Pa**

Details zu den Berechnungen finden Sie im Anhang 8.

Ansichts des Beobachtungszeitraums von 24 Jahren wurde in der Berechnung die Umrechnung über einen Zeitraum von 50 Jahren gemäss Anhang B.2 der CENELEC-Norm EN 50341-1:2012 vorgenommen.

Die Ausrichtungsindizes in Anlage 7 definieren den Einfluss des Windes auf alle Abspannstrecke. Dieser Index ermöglicht es, die Kantone zu identifizieren, in denen die Auslenkung der Leiter am stärksten vom Wind beeinflusst wird, und Gegenmassnahmen nur an diesen Stellen und nicht auf der ganzen Leitung zu ergreifen.

Die senkrecht anzuwendenden Druckwerte entsprechen den mit den Ausrichtungsindizes multiplizierten Absolutwerten.

7 Risikobeurteilung

In den vorangegangenen Absätzen haben wir anhand einer Analyse der Winddaten von MétéoSuisse die Möglichkeit untersucht, den durch die Leitungsverordnung vorgeschriebenen Winddruck für die Berechnung der Kettenauslenkungen anzupassen.

Die elektrischen inneren Abstände müssen zwischen dem Träger und den unter Spannung stehenden Teilen (Leiter, Ende von Isolierketten oder des Isolatorschirms, das sich am nächsten an den Trägern befindet, Gegengewichte usw.) überprüft werden. Diese Überprüfungen werden an allen Masten der Leitung, Tensoren und Trägern durchgeführt.

Bei Hängeketten wird die Einhaltung der elektrischen Abstände durch einen Vergleich zwischen den zulässigen Auslenkungswinkeln und den durch das Gleichgewicht des Leiters verursachten Auslenkungswinkeln sichergestellt.

Bei Abspannketten sind die elektrischen Abstände zwischen den spannungsführenden Teilen des Kettenendes (oder des letzten Schirms des Isolators) und der Erde sowie zwischen der Schlaufe und der Erde zu überprüfen, d.h. nur die Auslenkung der Schlaufen ist dem Wind ausgesetzt. d. h. nur die dem Wind ausgesetzten Schlaufen werden ausgelenkt.

Um eine Ausnahmeregelung festlegen zu können, wünscht das ESTI, dass eine Risikoanalyse unter Berücksichtigung aussergewöhnlicher klimatischer Ereignisse durchgeführt wird.

7.1 Gefährdungs- und Schadensanalyse

Jedes gefährliche Phänomen kann zu einem Ereignis führen, das einen Schaden verursachen kann. In der folgenden Tabelle identifizieren wir die gefährlichen Phänomene und die damit verbundenen Ereignisse.

Gefährliche Phänomene	Gefährliche Ereignisse	Schäden
Übermässiger Winddruck (Ausbruch eines aussergewöhnlichen Sturms) Hoher Winddruck, der lange genug ausgeübt wird	Auslenkung der Kette oder der Schlaufe über den zulässigen Winkel hinaus, um den Kurzschlussabstand einzuhalten	Durchschlag, Lichtbogen, Kurzschlussstrom Leitungsstrang beschädigt Elektroschock Menschen - Tiere

Tabelle 7 Gefährliche Phänomene im Zusammenhang mit der Annäherung der unter Spannung stehenden Teile an geerdete Elemente

7.2 Risikoeinschätzung, Wahrscheinlichkeit und Schweregrad

Das Risiko ist der quantitative Wert eines gefährlichen Phänomens. Dieser Wert setzt sich aus dem Schweregrad des Schadens und der Wahrscheinlichkeit, dass dieser Schaden eintritt, zusammen.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens wird bestimmt durch:

- die Häufigkeit und Dauer der Exposition gegenüber dem gefährlichen Phänomen
- die Eintrittswahrscheinlichkeit des gefährlichen Ereignisses
- die Möglichkeit, den Schaden durch technische Lösungen zu vermeiden oder zu begrenzen

7.2.1 Schätzung des Schweregrads des Schadens

Wir beschliessen, den Schweregrad des Schadens in drei Kategorien zu unterteilen.

Kategorie	Umfang des Schadens	Definition der Folgen
1	Sehr schwer	Gefährdung der Nachbarschaft
2	Mittel	Abschaltung der Leitung, aber unwirksame automatische Wiedereinschaltungen (schwerer Fehler)
3	Gering	Ausserbetriebnahme der Leitung und Betrieb der automatischen Wiedereinschaltungen (keine neuen Unterbrechungen – geringfügige Schäden)

Tabelle 8 Schweregrade

Ein zu geringer Abstand zwischen Mast und Kette kann dazu führen, dass bei übermässiger Auslenkung der Kette (oder der Schlaufe) ein Durchschlag auftritt.

Die Leitungen sind mit automatischen Wiedereinschaltvorrichtungen (an den UW) ausgestattet. Wenn ein Fehler auftritt, geht die Leitung in den Sicherheitsmodus über. Normalerweise gibt es zwei automatische Wiedereinschaltungen, eine schnelle (nach einigen Zehntelsekunden) und eine langsame (nach einigen Sekunden).

Wenn der Defekt fortbesteht (z. B. abgestürzter Mast), ist ein menschliches Eingreifen erforderlich, um den Defekt zu identifizieren und eine Lösung zu finden. In diesem Fall wird die Leitung je nach Ursache und Schaden für eine unterschiedliche Dauer ausser Betrieb genommen. In diesem Fall wird der Strom oft über andere Leitungen (Netzdichte und n-1 Sicherheit) transportiert.

Leitende Teile, die normalerweise nicht unter Spannung stehen, sind geerdet, um die Gefahr für Personen durch Berührungs- und Schrittspannungen sowie die Gefahr für Objekte durch Erdschluss- oder Kurzschlussströme zu verringern. Um die Gefahr für Personen und Einrichtungen zu begrenzen, werden alle Masten geerdet. Die Erdung stellt sicher, dass die Berührungs- und Schrittspannungen im Einflussbereich des Mastes gemäss den Sicherheitsvorschriften und -Regeln eingehalten werden. Diese Erdungen werden anschliessend gemessen, überprüft (gemäss Swissgrid-Standard "SG_BL_ZE_UZ00.0002") und bei Bedarf korrigiert, um den geltenden Vorschriften zu entsprechen.

Das Durchschlagen des Lichtbogens auf die Struktur hat keinen Einfluss auf die mechanische Festigkeit und Stabilität des Mastes. Die Leiter und Isolatorketten können beschädigt werden, ohne ihre mechanische Festigkeit zu gefährden.

Deshalb wird der Schweregrad des Schadens als **gering** eingeschätzt.

7.2.2 Schätzung der Schadenswahrscheinlichkeit

Folgende Wahrscheinlichkeitskategorien werden definiert:

Kategorie	Wahrscheinlichkeitsskala	Vorkommen
A	Häufig	< einmal pro Jahr
B	Gelegentlich	< einmal in 10 Jahren > einmal pro Jahr
C	Sehr unwahrscheinlich	> einmal in 10 Jahren < einmal in 100 Jahren

Tabelle 9 Kategorie der Vorkommnisse.

Die Windgeschwindigkeit, die für die Berechnung des Winddrucks gemäss CENELEC-Norm verwendet wurde, deckt alle 10-Minuten-Aufzeichnungen der letzten 24 Jahre ab (auf 50 Jahre hochgerechnet).
Die Referenzwindgeschwindigkeit entspricht der maximalen Durchschnittsgeschwindigkeit, gemessen in 10 m Höhe über dem Boden über 10 Minuten auf allen verfügbaren Daten der Wetterstation.

Ein Durchschlag Ketten – Mast kann potenziell stattfinden:

- Bei Windböen, die grösser als $V_{b,0}$ sind und lange genug wirken: < 2 % der Winde über einen Zeitraum von 50 Jahren
- Bei Stürmen (Wiederkehrzeit 50 bis 100 Jahre) – in solchen Situationen ist ein Schwingen der Ketten ein geringes Problem

Die Schadenswahrscheinlichkeit wird als **sehr unwahrscheinlich** eingeschätzt.

Hierbei wird berücksichtigt, dass aufgrund der globalen Erwärmung immer häufiger starke Böen zu erwarten sind.

7.3 Risikobewertung

Zur **Risikobewertung** kann die folgende Matrix verwendet werden:

Wahrscheinlichkeit	A			
	B			
	C	X		
		3	2	1
Umfang des Schadens				

Tabelle 10: Risikobewertungsmatrix

Bereich: akzeptables Risiko, die menschliche Sicherheit ist gewährleistet, das Material ist nicht oder nur geringfügig beschädigt und muss langfristig repariert werden

Bereich: mittleres Risiko, die menschliche Sicherheit ist gewährleistet, das Material ist beschädigt und muss mittelfristig repariert werden

Bereich: hohes Risiko, die menschliche Sicherheit ist nicht mehr gewährleistet, das Material ist stark beschädigt und muss sehr kurzfristig repariert werden

Ein Durchschlag durch übermässiges Auslenkung einer Kette oder einer Schlaufe stellt ein geringes Risiko dar. Dies liegt daran, dass Personen und Material nicht gefährdet werden und Lösungen zur Behebung des Problems, wenn es fortbesteht, einfach zu implementieren sind.

7.4 Massnahmen zur Risikominderung

Wie wir untersucht haben, ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Durchschlages Mast – Ketten ein gelegentliches Ereignis. Die Folgen eines solchen Ereignisses sind eher gering.

Sollte sich das Ereignis auf einem Mast wiederholen (besondere Windzone, ungleiche Gewichtsverteilung usw.), ist es wichtig zu beachten, dass man den Abstand zum Tragwerk erhöhen oder die Auslenkungen begrenzen kann, indem man nacheinander oder durch Kombination die folgenden Bestimmungen umsetzt:

Aufhängungsarten	Mögliche Lösungen
Hängeketten	- Verwendung einer V-Kette - Verschiebung der Aufhängung, wenn diese Möglichkeit am Mast oder an dem Trägers vorgesehen ist und im Falle eines kleinen Winkels - Einbau oder Erhöhung von Gegengewichten
Abspannketten	- Versetzte Aufhängung - Verlängerungsstück zwischen dem Tragwerk und der Kette - Einbau einer Hilfskette (auch Retentionskette genannt), um die Schlaufe von der Tragwerk oder des Trägers zu entfernen oder Gegengewichte an der Schlaufe anzubringen

Tabelle 11: Lösung zur Verringerung oder Beseitigung des potenziellen Fehlers

Durch den Einsatz dieser Vorrichtungen (je nach Fall anzupassen) wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Schadens weiter verringert. Diese Massnahmen haben keinen Einfluss auf den Schweregrad des Unfalls, können aber die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls erheblich verringern.

8 Zusammenfassung

Im Auftrag der Swissgrid AG wurde auf der Leitung 380/220 kV Niederwil-Obfelden eine Windanalyse (Geschwindigkeit, Häufigkeit und Richtung auf Basis von Messungen) durchgeführt. Die Winddrücke wurden nach den folgenden zwei Quellen definiert:

Stromleitungsverordnung (OLEI)

Der Winddruck, der senkrecht zur Leitung angewendet wird, um die Schwingungen unter Berücksichtigung des Reduktionsfaktors zu überprüfen, beträgt 559 Pa.

CENELEC-Norm

Anhand meteorologischer Daten konnten realistischere Winddruckwerte ermittelt werden. Die statistische Untersuchung ergibt eine Übereinstimmung, die für mehr Sicherheit im Leitungsbetrieb und die erwartete Zuverlässigkeit sorgt.

- **Station Buchs/Aarau: 317 Pa**
- **Station Cham: 1076 Pa**

Diese Werte, die aus den Messdaten an den Stationen der MétéoSuisse berechnet werden, berücksichtigen nicht die Linienführung. Die Werte, die die Linienführungen berücksichtigen, sind Anhang 7 zu entnehmen.

Es sei daran erinnert, dass die Lasten nicht direkt miteinander verglichen werden können, da die Normen Teilfaktoren mit Winddrücken in Verbindung bringen, die auch unterschiedlich sein können und auch mit der Beurteilung des Risikos, der Zuverlässigkeit der Anlage, des Ansatzes der Norm (probabilistisch, semi-probabilistisch und deterministisch) und des Berechnungsmodells verbunden sind.

9 Schlussfolgerungen

Die CENELEC-Norm wurde speziell für die Dimensionierung von Hochspannungsleitungen entwickelt. Diese Norm basiert auf Referenzgeschwindigkeiten, die nach meteorologischen Daten, in unserem Fall von MétéoSuisse, ermittelt werden. Die Wahl der Referenzgeschwindigkeit ist angesichts der Bedeutung der Infrastruktur von Swissgrid auf eine sehr hohe Zuverlässigkeit ausgerichtet. Wir wählten eine Referenzgeschwindigkeit (je nach Intensität und Hauptwindrichtung an der Messstation), die höchste aller Stationen unter Berücksichtigung des Ausrichtungsindex darstellt. Höchste Durchschnittsgeschwindigkeit über 10 min an der Station Buchs/Aarau und Cham gemäss CENELEC-Verfahren.

Die Wahl dieser beiden Stationen für die Berechnungen nach der CENELEC-Norm ist auf die geografische Beschaffenheit der Region und die Windrichtung zurückzuführen.

Ein zusätzliches Kriterium ist der „Ausrichtungsindex“. In der Tat ist die Betrachtung des in §6 berechneten senkrechten Drucks zu konservativ, während die tatsächliche Richtung oft eine schwächere Wirkung des effektiven Winddrucks verursacht.

Die Berechnung der Kettenauslenkungen ohne Berücksichtigung der Leitungsausrichtung könnte zu einem übermässigen Einsatz von Gegengewichten oder Hilfskette führen. Die CENELEC-Norm ermöglicht es, sich auf diesen Ausrichtungsindex zu beziehen, um den Winddruck zu verringern, wenn die Ausrichtung des Mastes günstig ist.

In Anbetracht der erhaltenen Ergebnisse wird für die Windanalyse und vorbehaltlich der Zustimmung von Swissgrid der zur Leitungsachse senkrechte Winddruck in Übereinstimmung mit den in Anhang 7 (Tabelle 19, 4. Spalte) berechneten Werten vorgeschlagen.

Da der berechnete Druck auf einigen Abschnitten höher ist als der von der LeV 1994 angegebene Wert, wird in Absprache mit Swissgrid vorgeschlagen, den von der LeV 1994 vorgeschriebenen Druckwert auf diese Bereiche anzuwenden (559 Pa = Wert bei 10 °C nach LeV 1994 mit dem Reduktionsfaktor 0,86).

Durch die Analyse der gemessenen Windgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet wird eine Referenzgeschwindigkeit ermittelt und der Druck mit der Leitungsführung gemäss Anhang 7 angewendet. Für den Leitungsabschnitt zwischen der UW Obfelden und UBW S wird der höhere Wert beider Analysen zugrunde gelegt.

Die empfohlenen Winddruckwerte (senkrecht zur Leitung anzuwenden) sind wie folgt :

- **Niederwil – UBW N : 315 Pa**
- **UBW S – Obfelden : 560 Pa**

Der für den Abschnitt zwischen UBW S und Obfelden berechnete Winddruck senkrecht zur Linie beträgt 835 Pa. Dieser Wert ist höher als der von der LeV 1994 vorgeschriebene Wert von 559 Pa (Reduktionsfaktor 0,86 bei einer mittleren Spannweite von 300m). Es wird empfohlen, den Wert 560Pa senkrecht zur Linie zwischen UBW S und Obfelden anzuwenden.

Abschnitte/ Masten	Druck senk- recht zur Lei- tung (Pa)	Harmonisierter Staudruck (Pa)
Niederwil - Mast 1	240	315
Mast 1 - Mast 3	240	315
Mast 3 - Mast 4	264	315
Mast 4 - Mast 5	240	315
Mast 5 - Mast 6	315	315
Mast 6 - Mast 7	280	315
Mast 7 - Mast 8	315	315
Mast 8 - Mast 11	265	315
Mast 11 - Mast 12	302	315
Mast 12 - Mast 13	254	315
Mast 13 - Mast 17	317	315
Mast 17 - Mast 19	303	315
Mast 19 - Mast 21	240	315
Mast 21 - Mast 22	312	315
Mast 22 - Mast 23	317	315
Mast 23 - Mast 24	279	315
Mast 24 - Mast 25	316	315
Mast 25 - Mast 26	317	315
Mast 26 - Mast 27	317	315
Mast 27 - Mast 28	316	315
Mast 28 - UBW_N	272	315
UBW_S - Mast 43	559	560
Mast 43 - Mast 49	524	560
Mast 49 - Mast 52	559	560
Mast 52 - Mast 54	559	560
Mast 54 - Mast 55	559	560
Mast 55 - UW_OBF	292	560

Tabelle 12. Vorgeschlagener Winddruck.

10 Anhänge

Hinweis: Zuvor basierten die Windstudien auf den Windgeschwindigkeiten, die auch von MétéoSuisse gemessen werden. Darüber hinaus wurde die Referenzgeschwindigkeit gewählt, um 98% der Messwerte abzudecken. Zum Vergleich und da die Analyse bereits durchgeführt wurde, sind die Geschwindigkeiten der Windböen in den Anlagen dargestellt.

Anhang 1: Station Buchs/Aarau – Tagesdaten seit 1999

Jahr	Max. Geschwindigkeit der Windböe über 1 s (km/h)	Durchschnittliche max. Geschwindigkeit 10 Min. (km/h)
1999	91,1	k. A.
2000	64,8	k. A.
2001	83,5	k. A.
2002	90	k. A.
2003	88,2	k. A.
2004	90	k. A.
2005	72,4	25,9
2006	63	31,7
2007	78,8	34,9
2008	74,2	34,9
2009	94	36,7
2010	76,7	31,3
2011	78,1	37,4
2012	81,4	38,5
2013	64,8	31,3
2014	83,5	38,9
2015	87,5	44,3
2016	74,9	33,5
2017	82,1	34,6
2018	104	47,2
2019	76,3	41,8
2020	100,1	42,8
2021	69,5	34,2
2022	85,7	37,1
2023	90,4	38,5

Tabelle 13. Maximale Geschwindigkeiten pro Jahr (Integration bei 1 Sek. und 10 Min.).
Station MétéoSuisse in Buchs/Aarau.

Anhang 2: Station Cham – Tagesdaten seit 1999

Jahr	Max. Geschwindigkeit der Windböe über 1 s (km/h)	Durchschnittliche max. Geschwindigkeit 10 Min. (km/h)
1999	141,5	87,5
2000	84,6	39,2
2001	87,1	48,2
2002	86,8	47,5
2003	128,9	59,8
2004	86,4	52,2
2005	76,7	41,8
2006	83,5	47,9
2007	85	49
2008	94	50,8
2009	114,1	54,7
2010	95,8	53,6
2011	100,8	54,7
2012	91,8	49
2013	79,6	47,2
2014	91,1	51,8
2015	91,8	51,5
2016	88,9	51,8
2017	99,7	48,2
2018	111,6	65,5
2019	81	46,8
2020	105,1	58,3
2021	88,9	48,6
2022	85,3	45,7
2023	109,4	56,2

Tabelle 14. Maximale Geschwindigkeiten pro Jahr (Integration bei 1 Sek. und 10 Min.).
Station MétéoSuisse in Cham.

Anhang 3: Station Mosen – Tagesdaten seit 1999

Jahr	Max. Geschwindigkeit der Windböe über 1 s (km/h)	Durchschnittliche max. Geschwindigkeit 10 Min. (km/h)
1999	95,4	45,4
2000	82,8	35,3
2001	78,5	45,7
2002	100,1	51,1
2003	91,1	45,4
2004	85,3	41,4
2005	94	49
2006	81	45
2007	104,8	43,2
2008	96,5	51,1
2009	110,5	47,9
2010	94	49
2011	82,8	44,6
2012	88,9	46,4
2013	77	37,4
2014	87,1	40,3
2015	102,2	43,9
2016	73,4	34,6
2017	87,5	39,6
2018	102,2	44,3
2019	88,9	37,1
2020	99,4	40,7
2021	85,3	42,5
2022	76,7	47,9
2023	77,8	35,3

Tabelle 15. Maximale Geschwindigkeiten pro Jahr (Integration bei 1 Sek. und 10 Min.). Partnerstation von MétéoSuisse in Mosen.

Anhang 4: Station Lägern – Tagesdaten seit 1999

Jahr	Max. Geschwindigkeit der Windböe über 1 s (km/h)	Durchschnittliche max. Geschwindigkeit 10 Min. (km/h)
1999	165,2	72,7
2000	117	58
2001	129,6	61,6
2002	125,6	66,2
2003	359,6	56,9
2004	124,2	60,8
2005	113	58,7
2006	135,4	61,9
2007	127,1	65,2
2008	132,8	62,3
2009	128,2	57,6
2010	103,4	59,1
2011	117	63,9
2012	103,4	58,1
2013	105,6	51,5
2014	106,8	52,1
2015	108,4	57
2016	112,4	55,4
2017	113,4	62,3
2018	105,1	58,3
2019	103	55,4
2020	112,7	60,1
2021	94,7	53,6
2022	110,2	58,3
2023	90,4	51,8

Tabelle 16. Maximale Geschwindigkeiten pro Jahr (Integration bei 1 Sek. und 10 Min.). Partnerstation von MétéoSuisse in Lägern.

Anhang 5: Station Uetliberg – Tagesdaten seit 1999

Jahr	Max. Geschwindigkeit der Windböe über 1 s (km/h)	Durchschnittliche max. Geschwindigkeit 10 Min. (km/h)
1999	k. A.	k. A.
2000	k. A.	k. A.
2001	k. A.	k. A.
2002	k. A.	k. A.
2003	k. A.	k. A.
2004	k. A.	k. A.
2005	117,4	87,1
2006	136,1	102,6
2007	147,6	106,2
2008	156,6	106,2
2009	158,4	114,1
2010	125,3	94
2011	150,8	105,1
2012	140	101,9
2013	117	89,6
2014	124,6	97,6
2015	138,2	100,1
2016	132,5	94
2017	133,2	109,1
2018	154,1	114,8
2019	132,8	91,8
2020	158,8	110,5
2021	134,3	100,8
2022	140,4	101,2
2023	143,6	110,2

Tabelle 17. Maximale Geschwindigkeiten pro Jahr (Integration bei 1 Sek. und 10 Min.). Partnerstation von MétéoSuisse in Uetliberg.

Anhang 6: Station Würenlingen – Tagesdaten seit 2005

Jahr	Max. Geschwindigkeit der Windböe über 1 s (km/h)	Durchschnittliche max. Geschwindigkeit 10 Min. (km/h)
2005	79,636	46,3
2006	92,6	53,708
2007	k. A.	k. A.
2008	k. A.	k. A.
2009	k. A.	k. A.
2010	k. A.	k. A.
2011	109,268	57,412
2012	98,156	68,524
2013	98,156	57,412
2014	94,452	51,856
2015	101,86	64,82
2016	109,268	50,004
2017	120,38	66,672
2018	116,676	59,264
2019	124,084	57,412
2020	124,084	72,228
2021	94,452	59,264
2022	100,1	59
2023	113	60,5

Tabelle 18. Maximale Geschwindigkeiten pro Jahr (Integration bei 1 Sek. und 10 Min.). Partnerstation von MétéoSuisse in Würenlingen.

Anhang 7: Ausrichtungsindex der Leitung

Für die Berechnung der Ausrichtungsindizes der Leitung wurde die Hauptwindrichtung von 225° gewählt, die der Station Buchs/Aarau für den Abschnitt zwischen der UW Niederwil und dem Mast 28 entspricht. Für den Leitungsabschnitt zwischen Mast 44 und der UW Obfelden wird die Station Cham berücksichtigt (Hauptrichtung 306°).

Der gewählte Referenzdruck beträgt 317 Pa für Buchs/Aarau und 751 Pa für Cham.

Abschnitte/ Masten	Ausrichtung Mast zur vorherrschenden Windrichtung (Grad)	Windstärke (Pa) Maximalwert für Referenzstation	Berechnung: Pa x sin Winkel	Ausrichtungsindex
Niederwil - Mast 1	199,6	317	2	0,01
Mast 1 - Mast 3	150,7	317	222	0,70
Mast 3 - Mast 4	137,4	317	264	0,83
Mast 4 - Mast 5	162,7	317	175	0,55
Mast 5 - Mast 6	107,6	317	315	0,99
Mast 6 - Mast 7	131,0	317	280	0,88
Mast 7 - Mast 8	108,0	317	315	0,99
Mast 8 - Mast 11	136,9	317	265	0,84
Mast 11 - Mast 12	119,9	317	302	0,95
Mast 12 - Mast 13	141,0	317	254	0,80
Mast 13 - Mast 17	99,4	317	317	1,00
Mast 17 - Mast 19	80,7	317	303	0,95
Mast 19 - Mast 21	41,2	317	191	0,60
Mast 21 - Mast 22	88,8	317	312	0,98
Mast 22 - Mast 23	100,1	317	317	1,00
Mast 23 - Mast 24	131,3	317	279	0,88
Mast 24 - Mast 25	104,8	317	316	1,00
Mast 25 - Mast 26	97,0	317	317	1,00
Mast 26 - Mast 27	102,7	317	317	1,00
Mast 27 - Mast 28	104,8	317	316	1,00
Mast 28 - UBW_N	134,5	317	272	0,86
UBW_S - Mast 43	152,4	1076	732	0,68
Mast 43 - Mast 49	167,6	1076	524	0,49
Mast 49 - Mast 52	188,5	1076	193	0,18
Mast 52 - Mast 54	143,4	1076	835	0,78
Mast 54 - Mast 55	184,3	1076	263	0,24
Mast 55 - UW_OBF	182,5	1076	292	0,27

Tabelle 19. Ausrichtungsindex und äquivalente Windgeschwindigkeit (Analyse Stationen Buchs/Aarau und Cham).

Für eine bessere Zuverlässigkeit der Ergebnisse wurde die Analyse zwischen UW_OBF und UBW_S auch mit der Station Uetliberg durchgeführt. Hier sind die Ergebnisse.

Abschnitte/ Masten	Ausrichtung Mast zur vor- herrschenden Windrichtung (Grad)	Windstärke (Pa) Maximalwert für Re- ferenzstation	Berechnung: Pa x sin Winkel	Ausrich- tungsindex
UBW_S - Mast 43	171	582	256	0,44
Mast 43 - Mast 49	155,8	582	372	0,64
Mast 49 - Mast 52	111,9	582	572	0,98
Mast 52 - Mast 54	66,8	582	505	0,87
Mast 54 - Mast 55	107,6	582	578	0,99
Mast 55 - UW_OBF	140,9	582	256	0,80

Tabelle 20. Ausrichtungsindex und äquivalente Windgeschwindigkeit (Analyse Station Uetliberg).

Anhang 8: Einzelheiten der Berechnungen der CENELEC-Norm

Annahmen für Berechnungen, Referenzen in EN50341-1 {2012}

- $z_0 = 0,05$ und $k_r = 0,189$ → Gelände der Kategorie 2 über den gesamten analysierten Leitungsverlauf
- $h = 50$ m. Referenzhöhe (h) der zu untersuchenden Leitungskomponente. Diese Annahme ist konservativ
- $\rho_{\text{air}} = 1,25 \text{ kg/m}^3$
- Mittlere Reichweite = 300 m, Vereinfachung bei Berechnungen
- $c_{\text{dir}} = 1$: Windrichtungskoeffizient. Der Wind gilt als senkrecht zur Leitung
- $c_0 = 1$, Faktor der Geländestruktur
- $G_c = 0,71$, Strukturkoeffizient für Leiter oder Spannweitenfaktor, in einer Höhe von 50 m; gemäss §4.4.1.2 Tabelle 4.4.c
- $C_x = 1$, Widerstandskoeffizient (oder Kraftkoeffizient) abhängig von der Form des zu untersuchenden Leitungsbauteils
- C_t (24 Jahre) = 1,10 für die Stationen Buchs/Aarau, Cham und Uetliberg gemäss Anlage B.2

Auswahl der Referenzstationen für die Berechnungen

- Buchs/Aarau: für den Leitungsabschnitt zwischen der UW Niederwil und dem Mast 28
- Cham: für den Leitungsabschnitt zwischen dem Mast 44 und der UW Obfelden
- Uetliberg: für den Leitungsabschnitt zwischen dem Mast 44 und der UW Obfelden (zusätzliche Analyse)

Berechnungen

$V_{b,0}$ ist nach §4.3.1 der CENELEC-Norm ein Kennwert mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,02, was einer durchschnittlichen Wiederkehrperiode von 50 Jahren entspricht. Mit Zustimmung von Swissgrid wurde beschlossen, diese Geschwindigkeit während der gesamten möglichen Aufzeichnungsdauer als die an der Messstation aufgezeichnete Höchstgeschwindigkeit bei 10 Minuten zu wählen. Diese Wahl ist eine konservative Wahl.

Mit den Daten der beiden Wetterstationen wurden die folgenden Höchstgeschwindigkeiten bei 10 min, $V_{\text{max},10\text{min}}$ gewählt:

- Buchs/Aarau: **47,2** km/h (oder 13,1 m/s)
- Cham: **87,0** km/h (oder 24,16 m/s)
- Uetliberg: **64,0** km/h (oder 17,78 m/s)

$V_{b,0} = V_r$ = Referenzgeschwindigkeit über die Wiederkehrperiode von 50 Jahren wird durch die Beziehung bestimmt:

$$V_{b,0} = V_{\text{max},10\text{min}} \cdot C_t$$

Also:

- Buchs/Aarau: $V_{b,0} = 14,42 \text{ m/s}$
- Cham: $V_{b,0} = 26,58 \text{ m/s}$
- Uetliberg: $V_{b,0} = 19,56 \text{ m/s}$

D. h. $V_h(h)$ ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit auf der Befestigungshöhe der Leiter. „Wenn es keine Anforderungen in den NNA gibt, ist eine Höhe von 60 m in der Regel akzeptabel“ (§4.3.1). In der vorliegenden Studie beträgt die durchschnittliche Höhe über dem Boden der Leitung 50 m. $V_h(h)$ wird durch die Beziehung §4.3.2 definiert:

$$V_h(h) = V_{b,0} \cdot C_{dir} \cdot C_o \cdot k_r \cdot \ln(h / z_0)$$

Wir ermitteln also $V_h(h) = V_{b,0} \cdot k_r \cdot \ln(h / z_0)$:

- Buchs/Aarau: $V_h(h) = 18,83 \text{ m/s}$
- Cham: $V_h(h) = 34,71 \text{ m/s}$
- Uetliberg: $V_h(h) = 25,53 \text{ m/s}$

Daraus lässt sich der dynamische Druck nach Beziehung ableiten:

$$q_h = \frac{1}{2} \rho_{air} V_h^2$$

D. h.:

- Buchs/Aarau: $q_h(h) = 222 \text{ Pa}$
- Cham: $q_h(h) = 752 \text{ Pa}$
- Uetliberg: $q_h(h) = 407 \text{ Pa}$

Die Turbulenzintensität wird durch folgendes Gesetz, §4.3.4, definiert:

$$I_v(h) = 1 / [c_0 \ln(h / z_0)]$$

Also:

- Buchs/Aarau: $I_v(h) = 0,145$
- Cham: $I_v(h) = 0,145$
- Uetliberg: $I_v(h) = 0,145$

Der dynamische Druck des Böenwindes, $q_p(h)$, auf der Referenzhöhe über dem Boden h , der die Turbulenzintensität $I_v(h)$ berücksichtigt, wird gemäss folgender Gleichung ermittelt:

$$q_p(h) = [1 + 7 I_v(h)] q_h(h)$$

Also:

- Buchs/Aarau: $q_p(h) = 446 \text{ Pa}$
- Cham: $q_p(h) = 1516 \text{ Pa}$
- Uetliberg: $q_p(h) = 820 \text{ Pa}$

Anschliessend wird der Winddruck, der von einem horizontal wehenden Wind in der Referenzhöhe über dem Boden h senkrecht zu einer Leitungsteil ausgeübt wird, in §4.3.5 angegeben:

$$Q_{wx} = q_p(h) G_x C_x A_x$$

Wobei:

G_x ist der Strukturkoeffizient für die zu untersuchende Leitungsstrukturkomponente

A_x ist die Fläche der Leitungskomponente, die auf eine Ebene senkrecht zur Windrichtung projiziert wird

Man erhält einen senkrechten Druck auf einen Leiter (Pa) 50 m über dem Boden:

- Buchs/Aarau: $Q_{k1}/A_{ref} = q_p(h) \cdot G_c \cdot C_c \cdot G_q = 442 \cdot 0,71 \cdot 1 \cdot 1 = \mathbf{317 \text{ Pa}}$
- Cham: $Q_{k1}/A_{ref} = q_p(h) \cdot G_c \cdot C_c \cdot G_q = 442 \cdot 0,71 \cdot 1 \cdot 1 = \mathbf{1076 \text{ Pa}}$
- Uetliberg: $Q_{k1}/A_{ref} = q_p(h) \cdot G_c \cdot C_c \cdot G_q = 442 \cdot 0,71 \cdot 1 \cdot 1 = \mathbf{582 \text{ Pa}}$

ENERVAL