Windpark Weißenborn-Lichtenberg GmbH,
Am Steinberg 7, 09603 Großschirma

Landratsamt Mittelsachsen
Referat Immissionsschutz
z.Hd. Fr. Mandy Uhlmann
Leipziger Straße 4
09599 Freiberg

Geschäftsführer
Jan Greschner
Ulf Oesterlin
Telefon: *+49 (0) 37328 / 898-0*
Telefax: *+49 (0) 37328 / 898-299*
E-Mail: *j.greschner@eab-newenergy.eu*
Ulf.oesterlin@pacifico-energy.com
Internet: *www.eab-newenergy.eu*
www.pacifico-energy.com
Datum: *26.03.2025*

Aktzenzeichen: ***1.23.5-106.11-0153-2024/56707***

Nachreichung zur Stellungnahme des Referats Immissionsschutz (Email von Fr. Mandy Uhlmann vom 06.12.2024) zur Thematik Eiswurf/Eisabfall

Sehr geehrte Frau Uhlmann,

in Ihrer Email vom 06.12.2024 teilten Sie uns mit, dass der LK Mittelsachsen bzw. das SG Immissionsschutz zum eingereichten BImSchG-Antrag der Windpark Weißenborn-Lichtenberg GmbH hinreichende und aussagefähige Unterlagen zur Thematik Eiswurf/Eisabfall nachfordert.

Hierfür wurde am 10.12.2024 ein dafür geeigneter Gutachter für Eiswurf/Eisabfall mit der notwendigen Begutachtung beauftragt wurden.

Das Gutachten liegt nunmehr vor und wird hiermit nachgereicht.

Die Nachforderung ist somit erfüllt. Wir bitten Sie um kurze Bestätigung der Vollständigkeit in diesem Sachgebiet.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen jederzeit gern zur Verfügung und bedanken uns bereits vorab für den weiteren gemeinsamen Austausch.

Mit freundlichsten Grüßen aus Großschirma,

Dipl.-Ing. Stefan Rüdiger

Projektleitung

Gutachten zum Eiswurf und Eisfall an Windenergieanlagen

im Windpark Weißenborn-Lichtenberg

Deutschland

Bericht-Nr.: I17-EW-2025-019

I17-Wind GmbH & Co. KG --- Robert-Koch-Straße 29 --- 25813 Husum

Gutachten zum Eiswurf und Eisfall an Windenergieanlagen

im Windpark Weißenborn-Lichtenberg

Bericht-Nr.:	I17-EW-2025-019
Auftraggeber:	Windpark Weißenborn-Lichtenberg GmbH Am Steinberg 7 D- 09603 Großschirma
Auftragnehmer:	I17-Wind GmbH & Co. KG Robert-Koch-Straße 29 D-25813 Husum Tel.: 04841 – 87596 – 0 E-Mail: mail@i17-wind.de Internet: www.i17-wind.de
Datum:	26. Februar 2025

Haftungsausschluss und Urheberrecht

Das vorliegende Gutachten wurde unabhängig, unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen nach derzeitigem Stand der Technik erstellt. Für vom Auftraggeber und vom Anlagenhersteller bereitgestellte Daten, die nicht von der I17-Wind GmbH & Co. KG erhoben oder ermittelt wurden, kann keine Gewähr für deren Korrektheit übernommen werden. Diese werden als richtig vorausgesetzt.

Urheber des vorliegenden Gutachtens zum Eiswurf und Eisfall an Windenergieanlagen (WEA) ist die I17-Wind GmbH & Co. KG. Der Auftraggeber erhält nach § 31 Urheberrechtsgesetz das einfache Nutzungsrecht, welches nur durch Zustimmung des Urhebers übertragen werden kann. Eine Bereitstellung zum uneingeschränkten Download in elektronischen Medien ist ohne gesonderte Zustimmung des Urhebers nicht gestattet.

Anmerkung zu Anlagenparametern der WEA

Die zitierten Dokumente entsprechen dem aktuellen Stand zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung. Eine Änderung der angenommenen Werte ist den Anlagenherstellern vorbehalten. Modellbedingt kann keine Gewährleistung auf nachträglich geänderte Ergebnisse hinsichtlich der untersuchten WEA bzw. Schutzobjekte gegeben werden. Bei einer Änderung der Anlagenparameter gegenüber dem Stand zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung verliert das vorliegende Gutachten seine Gültigkeit.

Revisionsnummer	Datum	Änderung	Verfasser
0	26.02.2025	Erste Ausgabe	Schwartau

Verfasser:

M. Sc. Tristan Schwartau

Husum, 26.02.2025

Geprüft:

B. Sc. Lukas Drescher, Sachverständiger

Husum, 28.02.2025

Freigegeben:

M. Sc. Tristan Schwartau

Husum, 28.02.2025

Dieses Dokument wurde digital signiert und die Integrität des Dokuments wurde überprüft. Das zugehörige Zertifikat kann von der I17-Wind GmbH & Co. KG auf Anfrage gerne zur Verfügung gestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Vorbemerkung 7
1.1 Allgemeines 7
1.2 Geführte Nachweise 7
2 Aufgabenstellung und Standort 8
2.1 Windparklayout 8
2.2 Zu Grunde gelegte Windverhältnisse 11
3 Standortanalyse 12
3.1 Vereisungspotenzial 12
3.2 Eiswurf und Eisfall 13
3.3 Eiserkennungssysteme 13
3.4 Berechnung der Flugbahnen 14
3.4.1 Simulation der Flugbahnen 14
3.4.2 Randbedingungen 15
3.5 Ermittlung der zu untersuchenden Gefährdungszonen 16
4 Gültigkeit der Ergebnisse 19
5 Einordnung der Schutzobjekte 20
5.1 Expositionszeiten 20
5.2 Wirkungsbereich der einfallenden Eisstücke 22
6 Risikobewertungskriterien 23
6.1 MEM-Prinzip 23
6.2 Festlegen der Grenzwerte für das Individualrisiko 23
6.3 Festlegen der Grenzwerte für das Kollektivrisiko 24
6.4 ALARP-Prinzip 24
6.5 Zusammenfassung der Grenzwerte für die Risikoanalyse 25
6.6 Risikomindernde Maßnahmen 25
7 Darstellung der Ergebnisse 27
7.1 Kumulierung von Risiken 27
7.2 Trefferhäufigkeiten und relevante WEA zur Risikobewertung 28
7.3 Ergebnisse Risikobewertung 30
7.4 Risiken für angrenzende Wälder 31
8 Zusammenfassung 32
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis 33
Literaturverzeichnis 34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration (Übersicht); Kartenmaterial: [3.1, 3.2]..... 10
Abbildung 3.1 :Zu untersuchende Gefährdungszonen [3.1, 3.3]..... 17
Abbildung 6.1: Übersicht der definierten Risikoakzeptanzbereiche nach dem ALARP-Prinzip [12]..... 24
Abbildung 7.1: Berechnete Trefferhäufigkeiten der WEA W1 – W9 [3.1, 3.3] 28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration [20.1]..... 9
Tabelle 2.2: Windverhältnisse am Standort WV 1/1 [20.2]..... 11
Tabelle 3.1: Zugrunde gelegte Vereisungstage am Standort 12
Tabelle 3.2: Anzahl der betrachteten Eisstücke am Standort pro Jahr 13
Tabelle 3.3: Zu untersuchende Schutzobjekte..... 18
Tabelle 5.1: Nutzungskategorien von Wegen 20
Tabelle 5.2: Nutzungshäufigkeiten der Schutzobjekte 21
Tabelle 6.1: Risikogrenzwerte in Anlehnung an das ALARP-Prinzip..... 25
Tabelle 6.2: Maßnahmen zu Risikominderung 25
Tabelle 6.3: Weiterführende Maßnahmen zur Risikoreduzierung 26
Tabelle 7.1: Relevante WEA an den Schutzobjekten 29
Tabelle 7.2: Darstellung der Ergebnisse für die Schutzobjekte 30
Tabelle 7.3: Ergebnisse maximale Flugweite..... 30
Tabelle 8.1: Zusammenfassung der Ergebnisse..... 32

1 Vorbemerkung

1.1 Allgemeines

Vereisung von Rotorblättern ist ein für die Planung und den Betrieb von Windenergieanlagen zu berücksichtigender Aspekt. Im vorliegenden Gutachten werden die Risiken des sich lösenden Eisansatzes an den untersuchten WEA in Bezug auf die Gefährdung von Personen in deren Umgebung evaluiert. Da es in ganz Deutschland zu winterlichen Witterungsverhältnissen kommen kann, ist eine Bewertung des Gefährdungspotenzials durch neu geplante WEA sinnvoll [14].

Verkehrsteilnehmer können durch herabfallende oder von der WEA weggeschleuderte Eisstücke gefährdet werden. Daher ist es notwendig, Verkehrswege und Räume, in denen sich Personen potenziell aufhalten können, auf das Gefährdungspotenzial durch Eiswurf oder Eisfall zu untersuchen. Aufgrund von Unsicherheiten bei der Beschreibung von Wetterbedingungen wird jedes Wetterereignis, das eine Vereisung der Rotorblätter zulässt, als Vereisungsereignis betrachtet.

Im Rahmen der IEA Wind TCP Task 19 [1] wurden international anwendbare Empfehlungen für die Berechnung und Risikobewertung von Eiswurf und Eisfall von WEA erarbeitet. In dem vorliegenden Gutachten wurden diese Empfehlungen für die Berechnungen und anschließende Risikobewertung zu Grunde gelegt. Da die Empfehlungen in [1] einen allgemeinen Charakter haben, wird sich vorbehalten, im Rahmen der Gutachtenerstellung von diesen Empfehlungen abzuweichen, sofern es die Standortbedingungen erlauben bzw. erfordern. Zu diesem Vorgehen wird in [1] angeregt, um regionale Besonderheiten berücksichtigen zu können. Sofern von dem in [1] dargestellten Vorgehen abgewichen wird, wird diese Abweichung im Folgenden begründet.

In den Empfehlungen der IEA Wind TCP Task 19 [1] sowie in der Muster-Liste der technischen Baubestimmungen [14] wird ein notwendiger Mindestabstand definiert, welcher 1.5 × (RD + NH) zu Gebäuden und Verkehrswegen zu betragen hat, um einen sicheren Betrieb der WEA zu gewährleisten. Bei einer Unterschreitung dieses Abstands ist ein Gutachten eines Sachverständigen erforderlich, um die Risiken bezüglich Eiswurf bzw. Eisfall von WEA zu bewerten [14].

1.2 Geführte Nachweise

Gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) § 5 Abs. 1 Nr. 1 & 2 sind „genehmigungsbedürftige Anlagen […] so zu errichten und zu betreiben, dass [..] ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt“ gewährleistet ist. Das bedeutet, dass „schädliche Umwelteinwirkungen, sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft“ vermieden werden müssen. Es müssen, falls erforderlich, auch Vorsorgemaßnahmen getroffen werden, um solche Umwelteinwirkungen und Gefahren zu verhindern.

Somit ist es unerlässlich, im Rahmen des Genehmigungsprozesses für den geplanten Betrieb einer WEA einen Nachweis über das Gefährdungspotenzial hinsichtlich Eiswurf und Eisfall zu erbringen. Falls erforderlich, müssen Vorsorgemaßnahmen getroffen werden, um die Gefährdung von Personen, die sich im Umfeld der WEA aufhalten können, zu minimieren.

2 Aufgabenstellung und Standort

Die I17-Wind GmbH & Co. KG wurde damit beauftragt, ein Gutachten zum Eiswurf und Eisfall von WEA unter Berücksichtigung der in Tabelle 2.1 aufgeführten und in Abbildung 2.1 dargestellten WEA zu erstellen. Der Auftraggeber plant die Errichtung von acht WEA des Typs Nordex N163/6.X auf 164.0 m Nabenhöhe am Standort Weißenborn-Lichtenberg in Sachsen.

Untersucht wird das durch den Betrieb der WEA W1 – W8 entstehende Risiko auf die umliegenden Verkehrs-, Wald- und Feldwege sowie Flächen, auf denen sich potenziell Personen aufhalten oder am Straßenverkehr teilnehmen können. Sofern Schutzobjekte, welche im Rahmen der Risikobewertung untersucht werden, durch weitere neu geplante oder Bestands-WEA einem Risiko ausgesetzt sind, werden diese WEA in der Risikobewertung berücksichtigt.

Im vorliegenden Gutachten werden zusätzlich die Risiken, welche durch die WEA W9 an den zu untersuchenden Schutzobjekten verursacht wird, berücksichtigt.

Wenn über den Betriebsmodus keine Informationen in den Eingangsdaten vorliegen, wird stets der Betriebsmodus für die Berechnungen herangezogen, der die konservativsten Ergebnisse liefert, was dem offenen, nicht leistungsreduzierten Betriebsmodus entspricht.

Im vorliegenden Gutachten beziehen sich alle WEA-Bezeichnungen auf die interne, laufende W-Nummer.

2.1 Windparklayout

In der folgenden Tabelle 2.1 wird die vom Kunden in [20.1] übermittelte, zu untersuchende Windparkkonfiguration dargestellt.

Tabelle 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration [20.1]

Interne W-Nr.	Bezeichnung Auftraggeber	Neu / Bestand	UTM ETRS89 Zone 33		Hersteller	WEA Typ	*NH* [m]	*D* [m]	Betriebsmodus	*FEH* [m]	P_N [kW]
			X [m]	*Y* [m]							
W1	WEA 1	Neu	383724	5633575	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Trudelbetrieb	0.0	7000
W2	WEA 2	Neu	384098	5633779	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Trudelbetrieb	0.0	7000
W3	WEA 3	Neu	384627	5634005	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Trudelbetrieb	0.0	7000
W4	WEA 4	Neu	384406	5634780	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Trudelbetrieb	0.0	7000
W5	WEA 5	Neu	384749	5634585	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Trudelbetrieb	0.0	7000
W6	WEA 6	Neu	385465	5634816	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Trudelbetrieb	0.0	7000
W7	WEA 7	Neu	385631	5635217	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Trudelbetrieb	0.0	7000
W8	WEA 8	Neu	385854	5634696	Nordex	N163/6.X	164.0	163.0	Trudelbetrieb	0.0	7000
W9	BWEA 3	Bestand	385084	5634866	GE	GE-1.5s	64.7	70.5	Standard [TSR]	0.0	1500
W10	BWEA 4	Bestand	385069	5634241	Enercon	E-82 / 2.000 kW	98.3	82.0	Trudelbetrieb	0.0	2000
W11	BWEA 5	Bestand	385301	5634381	Enercon	E-82 / 2.000 kW	98.3	82.0	Trudelbetrieb	0.0	2000

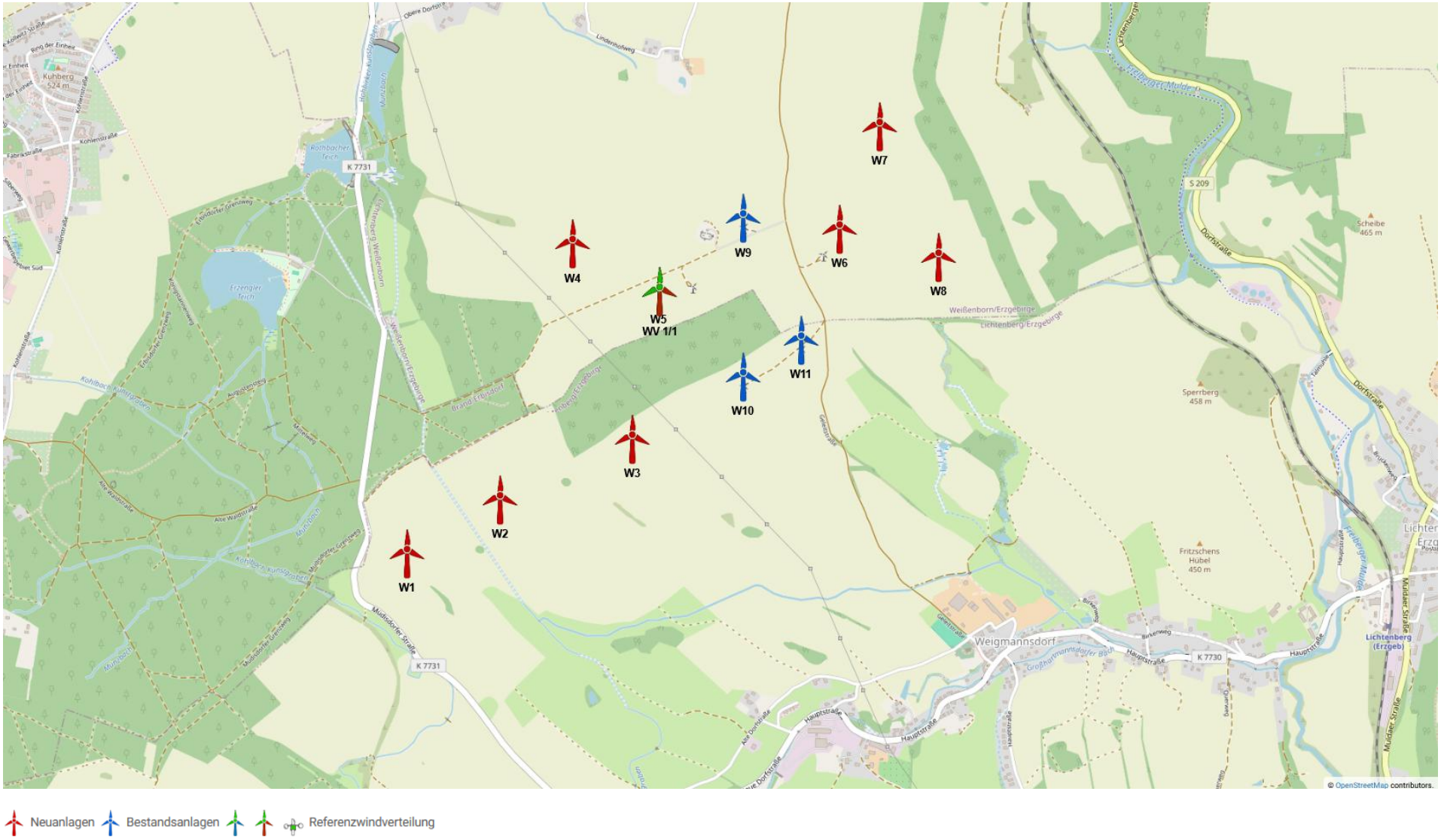

Abbildung 2.1: Zu untersuchende Windparkkonfiguration (Übersicht); Kartenmaterial: [3.1, 3.2]

2.2 Zu Grunde gelegte Windverhältnisse

Es wurden ganzjährige, auf Vereisungsereignisse gefilterte standortbezogene Windverhältnisse, unterteilt in 12 Sektoren, zu Grunde gelegt [20.2]. Diese werden als richtig und für den Standort repräsentativ vorausgesetzt.

Um die Windverhältnisse auf Nabenhöhe am jeweiligen Anlagenstandort zu ermitteln, werden die Daten der Windverhältnisse [20.2] auf die notwendigen Höhen umgerechnet, sofern diese nicht bereits auf Nabenhöhe vorliegen. Die Umrechnung erfolgt auf Basis eines logarithmischen Windprofils und des am Standort der Windverteilung ermittelten Höhenexponenten α. Bei der vertikalen Umrechnung wird der Formparameter k als invariant mit der Höhe angenommen und lediglich der Skalenparameter A umgerechnet. Eine horizontale Umrechnung vom Standort der Winddaten zu den jeweiligen WEA-Standorten erfolgt nicht. Liegen in [20.2] mehrere Windverteilungen vor, werden diese den jeweiligen WEA zugeordnet. Tabelle 2.2 führt die in [20.2] übermittelten Windbedingungen am Standort auf.

Die Windverteilung bildet die Basis für die Simulation der Flugbahnen eines Eisstücks. Entsprechend der Verteilung der sektoriellen Häufigkeit p sowie den sektoriellen Weibullparametern A und k werden zufallsbasiert eine Windrichtung und eine Windgeschwindigkeit ermittelt, welche für ein spezifisches Wurfereignis zu Grunde gelegt werden.

Tabelle 2.2: Windverhältnisse am Standort WV 1/1 [20.2]

UTM ETRS89 Zone 33			***A*** **[m/s]**	***k*** **[-]**	***p*** **[%]**
X [m]	**Y [m]**	**h_{WV} [m]**			
384749	**5634585**	**164.0**			
Sektor | Windrichtung [°]					
N | 0			5.68	2.49	5.21
NNO | 30			5.41	2.60	5.73
ONO | 60			5.85	2.71	6.97
O | 90			6.49	2.41	5.29
OSO | 120			5.49	1.99	3.95
SSO | 150			9.61	2.47	7.27
S | 180			9.14	2.24	5.92
SSW | 210			7.90	2.01	3.75
WSW | 240			10.60	2.70	11.66
W | 270			10.97	3.01	21.48
WNW | 300			8.87	2.48	15.61
NNW | 330			6.63	2.27	7.16

3 Standortanalyse

3.1 Vereisungspotenzial

Die Vereisung von Windenergieanlagen hängt von vielen Faktoren ab. Neben Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur spielen auch Betriebskennwerte der WEA und topografische Eigenschaften des Standorts eine entscheidende Rolle, um die Vereisungsbedingungen zu beschreiben. Diese Vielzahl von Einflussfaktoren macht es nur bedingt möglich, das Vereisungspotenzial allein auf Basis meteorologischer Größen zu bestimmen.

Vereisung kann verschiedene Erscheinungstypen an WEA verursachen [5]:

- **Raureif:** Dabei setzen sich unterkühlte Wassertropfen der Umgebungsfeuchtigkeit auf den Bauteilen der WEA ab und gefrieren direkt. Dieser Prozess kann weichen Raureif mit einer Dichte von $200\ \frac{kg}{m^3} - 600\ \frac{kg}{m^3}$ bei kleinen Tropfen und harten Raureif mit einer Dichte von $600\ \frac{kg}{m^3} - \ 900\ \frac{kg}{m^3}$ bei großen Tropfen erzeugen.
- **Klareis:** Hierbei bildet sich zunächst ein Wasserfilm aus dem abgesetzten Wasser aus Wolken und Nebel auf den Bauteilen der WEA, der eine Temperatur nahe *0°C* hat. Anschließend gefriert der Wasserfilm auf der Oberfläche, was zu Eis mit einer Dichte von etwa $900\ \frac{kg}{m^3}$ führt.
- **Nassschnee:** Dabei trifft teilweise geschmolzener Schnee auf die Oberfläche der WEA und bildet eine Schicht, die anschließend gefriert. Nassschnee hat eine Dichte von $300\ \frac{kg}{m^3} - \ 600\ \frac{kg}{m^3}$.
- **Eisregen:** Hierbei entsteht durch das Gemisch aus gefrorenem Eis und Regentropfen eine Klareisschicht auf der Oberfläche der WEA.

Untersuchungen, welche die großflächigen Vereisungsbedingungen auf Basis gemessener Wetterdaten in Deutschland analysieren, zeigen, dass die Kombination verschiedener Vereisungsereignisse (gefrierender Regen, nasser Schnee, In-Wolken-Vereisung) valide Daten liefern kann, wenn sie durch die Interpolation von Wetterdaten räumlich aufgelöst werden [4]. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt eine großflächige Vereisungskarte für Deutschland [15] bereit, die gemittelte Vereisungsdaten mit einer Auflösung von $1\ km\ \times\ 1\ km$ über einen Zeitraum von 30 Jahren umfasst. Des Weiteren werden in [4] Vergleichsuntersuchungen hinsichtlich der Vereisungsbedingungen in Deutschland an 74 (67 nach Bereinigung) Wetterstationen durchgeführt. Hierfür werden Wetterereignisse mit gefrierendem Regen, Nassschneeereignissen und Eisbildung in Wolken untersucht. Diese Untersuchungen zeigen, dass für Standorte, die weder als hochgelegen-exponiert noch als geschützt anzusehen sind, die Anzahl der Vereisungsereignisse gut durch eine Exponentialfunktion abgebildet werden kann. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung werden die WEA-Standorte hinsichtlich dieses Kriteriums überprüft. Sofern die Topografie des Standortes keine Hinweise auf eine hochgelegen-exponierte oder geschützte Lage zeigt, wird die in [4] dargestellte Exponentialfunktion für die Bestimmung der Vereisungstage zu Grunde gelegt. Andernfalls wird die Anzahl der Vereisungstage am Standort anhand der großflächigen Vereisungskarte für Deutschland [15] ermittelt. In Tabelle 3.1 sind die für den Standort angesetzten Vereisungstage dargestellt.

Tabelle 3.1: Zugrunde gelegte Vereisungstage am Standort

Standort	Vereisungstage
Weißenborn-Lichtenberg	17.6

Nachdem die Anzahl der anzunehmenden Vereisungsereignisse pro Jahr ermittelt wurde, kann die Anzahl der betrachteten Eisobjekte pro Vereisungsereignis berechnet werden. Am Alpine Test Site

Gütsch wurden Eiswurfereignisse beobachtet und dokumentiert [5, 6]. Im Rahmen der Untersuchung wurde über einen Zeitraum von mehreren Jahren bei einer Enercon E-44 Eisstücke, welche von der WEA geworfen wurden oder gefallen sind, dokumentiert.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus [5, 6] im Rahmen einer Ähnlichkeits-Vergleichsrechnung auf die Geometrie der geplanten WEA umgerechnet – basierend auf dem Quadrat des Rotordurchmessers. Aufgrund der in [5] diskutierten Unsicherheit hinsichtlich der dokumentierten Eisstücke wird von einer Dunkelziffer von 100 % ausgegangen. Die hier dargestellten Ergebnisse sind folglich als konservativ anzusehen. Die in [5, 6] untersuchte WEA hat einen Rotordurchmesser von 44 m, womit sich ein Quadrat des Rotordurchmessers von 1936 m² ergibt. Dieses wird mit dem Quadrat des Rotordurchmessers der am Standort geplanten WEA ins Verhältnis gesetzt. Mit diesem Verhältnis wird die Anzahl der anzusetzenden Eisstücke vom dem Standort Gütsch auf den hier untersuchten Standort skaliert.

Tabelle 3.2: Anzahl der betrachteten Eisstücke am Standort pro Jahr

Geplanter WEA-Typ	*D [m]*	*D² [m²]*	Eisobjekte/Jahr
N163/6.X	163.0	26569	3012

3.2 Eiswurf und Eisfall

Eisfragmente, die aus beträchtlicher Höhe und mit erheblicher Geschwindigkeit herabfallen, stellen eine Gefahr für Verkehrsteilnehmer im betroffenen Umkreis dar. Für Personen, die sich im Freien aufhalten, stellen die Eisfragmente eine direkte Gefahr dar, da sie durch diese verletzt werden können. Bei einem Kopftreffer durch ein Eisfragment kann konservativ von einer tödlichen Verletzung ausgegangen werden. Auch für Personen, die sich in einem Fahrzeug innerhalb der Gefahrenzone befinden, besteht die Gefahr, dass durch einen Einschlag Schäden am Fahrzeug entstehen, die zu einem Unfall führen können. Ein maßgebender Faktor für die Berechnung von Eiswurf sind die Betriebsparameter der zu betrachtenden WEA. Dabei sollte zunächst zwischen Eiswurf und Eisfall unterschieden werden. Bei Eiswurf werden die spezifischen Betriebsmodi zur Berechnung der Flugweiten herangezogen, um die durch die Rotation der Rotorblätter entstehenden Kräfte zu berücksichtigen. Somit werden die Abwurfbedingungen für das jeweilige Eisstück über die Parameter des Betriebsmodus und die zugrunde gelegte Windverteilung definiert. Bei der Betrachtung von Eisfall hingegen sind die Drehzahlen deutlich geringer, da sich die betrachtete WEA im Trudelbetrieb befindet. Weitere auf das Eisstück wirkende Kräfte (z.B. Wind) bleiben davon unberührt.

3.3 Eiserkennungssysteme

Ein Eiserkennungssystem sorgt dafür, dass bei detektiertem Eisansatz die betreffende WEA in den Trudelbetrieb versetzt wird. Somit folgt die WEA nicht mehr der Kennlinie für den Normalbetrieb, sondern der Kennlinie für den Trudelbetrieb. Ein Normalbetrieb unter Vereisungsbedingungen wird somit ausgeschlossen und in den vorgenommenen Berechnungen nicht berücksichtigt. Die Windnachführung bleibt jedoch unberührt von dem Wechsel in den Trudelbetrieb.

Als risikominimierende Maßnahme besteht die Möglichkeit, die Nachführung nach Erkennen eines Eisansatzes abzuschalten und die betreffende WEA nach Eiserkennung in einem definierten Azimut-Winkel zu halten.

In dem hier vorliegenden Gutachten wird keine Bewertung des Eiserkennungssystems vorgenommen. Es wird davon ausgegangen, dass ein funktionsfähiges Eiserkennungssystem installiert ist. Somit werden die Betriebsparameter des Trudelbetriebs angesetzt [19].

3.4 Berechnung der Flugbahnen

3.4.1 Simulation der Flugbahnen

Für die Berechnung der Flugbahn eines Eisfragments werden die in [1] beschriebenen Erkenntnisse zur Beschreibung der Flugbahnen von Eisblöcken einer WEA verwendet. Mit diesem Modell kann unter Berücksichtigung der meteorologischen Bedingungen am Standort sowie der spezifischen Charakteristika der WEA die Bahnkurve eines Eisblocks bestimmt werden [16].

Die folgenden Parameter werden bei der Beschreibung der Bahnkurve berücksichtigt:

- m : *Masse des Eisstücks [kg]*
- x_0, y_0, z_0 : *Startposition des Eisstücks [m]*
- V_x, V_y, V_z : *partielle Startgeschwindigkeiten des Eisstücks* $\left[\frac{m}{s}\right]$
- ρ : *Luftdichte am Standort* $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- C_D : *Strömungswiderstandskoeffizient des Eisstücks* [-]
- A : *Referenzfläche des Eisstücks [m²]*
- $V(z)$: *höhenabhängige Windgeschwindigkeit* $\left[\frac{m}{s}\right]$ *(wird während der Wurfbewegung auf die jeweilige Höhe des Eisstücks umgerechnet)*
- NH : *Nabenhöhe [m]*
- D : *Rotordurchmesser [m]*

Das folgende Gleichungssystem beschreibt die resultierenden Kräfte während der Flugphase eines Eisblocks [16]. Zusammen mit den Initialbedingungen für das Eisstück (x_0, y_0, z_0 und V_x, V_y, V_z), kann die Flugbahn eines Eisstücks mithilfe dieser Gleichungen beschrieben werden. Zusätzlich findet in dem Modell ein digitales Geländemodell Anwendung. Die STRM-Daten (Shuttle Radar Topography Mission) sind mit einer Auflösung von einer Winkelsekunde (ca. *30 m × 30 m*) hinterlegt. Sofern die Topografie am Standort es erfordert, wird während der Integration der Flugbahn die Flughöhe laufend mit den Höhendaten abgeglichen, um den Schnittpunkt mit der Geländeoberfläche zu ermitteln. Um den Verlauf des Geländeprofils zwischen den Rasterpunkten zu berücksichtigen, wird die Flugweite entsprechend der Differenz zwischen den beiden Geländehöhen, in denen die Geländehöhe erstmals erreicht wird, interpoliert.

$$m\,\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{1}{2}\rho C_D A\left(\frac{\partial x}{\partial t} - V\right)|U|$$

$$m\,\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{1}{2}\rho C_D A\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)|U|$$

$$m\,\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -mg\ -\frac{1}{2}\rho C_D A\left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)|U|$$

$$|U| = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial x}{\partial t} - V\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)^2\right]}$$

Das oben abgebildete Gleichungssystem liefert jeweils die Flugbahn eines Eiswurfereignisses. Damit eine Aussage über die Risiken bezüglich Eiswurf bzw. Eisfall durch die geplante WEA getroffen werden kann, muss die Berechnungsmethode mit einer statistischen Methode gekoppelt werden. Im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation werden für jede berechnete Flugbahn die Eingangsparameter zufällig anhand probabilistischer Werteverteilungen ermittelt. Die Häufigkeitsverteilung der Zufallsparameter

entspricht den standortspezifischen Gegebenheiten oder wird aus standortübergreifenden Untersuchungen abgeleitet.

3.4.2 Randbedingungen

Für die Berechnung der Flugbahnen werden die folgenden Annahmen getroffen. Diese basieren auf der verfügbaren Datengrundlage oder wurden stets konservativ gewählt:

- Die Berechnungen werden auf Basis einer ganzjährigen Windstatistik durchgeführt, die eine Sektorbreite von 30° aufweist. Die Häufigkeit der Windrichtungen innerhalb eines Sektors wird als gleichverteilt angenommen.
- Die Luftdichte für den WEA-Standort wird repräsentativ für Vereisungsbedingungen auf 1.3 $\frac{kg}{m^3}$ angenommen und als höheninvariant angesehen.
- Die Massenverteilung der Eisstücke entlang des Rotorradius wird nach einer Eismassenverteilung gemäß IEC 61400-1 [7] angenähert.
- Die Vereisungstage gemäß DWD [15] basieren auf Wetterereignissen der vergangenen 40 Jahre und werden als repräsentativ für die Betriebslebensdauer angenommen.
- Im Rahmen der Simulation werden alle relevanten Variablen auf Basis von Häufigkeitsverteilungen erzeugt. Interne Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Stichprobe von 100.000 zufällig generierten Einzelereignissen repräsentativ für die Untersuchung ist. Das bedeutet, dass die im Zusammenhang mit einer Zufalls-Simulation resultierenden Schwankungen der Ergebnisse aufgrund der großen Stichprobe als vernachlässigbar anzusehen sind.
- Es liegen nur wenige empirische Studien über die Anzahl der Eiswurfereignisse pro Vereisungstag vor. Das Ansetzen der Untersuchungsergebnisse gemäß [5] mit einem Unsicherheitszuschlag von 100 % wird jedoch als konservativ bewertet.

3.5 Ermittlung der zu untersuchenden Gefährdungszonen

Als potenzielle Gefährdungszone wird der Bereich innerhalb eines Abstands der 1.5-fachen Summe aus Nabenhöhe und Rotordurchmesser angesehen [1]. In der folgenden Abbildung 3.1 wird dieser Bereich im Umkreis der zu untersuchenden WEA dargestellt.

Durch die Gefährdungszone verlaufen Straßen und Wege, die von Personen genutzt werden. Falls es bei einem Weg mehrere Möglichkeiten gibt, diesen zu befahren oder zu laufen, wird stets der kritische Pfad (mit dem höheren Risiko) gewählt. Daher sind Routen, die ggf. nicht in die Risikobewertung mit einbezogen werden, durch die betrachteten Routen konservativ abgedeckt. Verkehrswege, bei welchen durch Ihre Streckenführung zu erkennen ist, dass eine Nutzung durch Passanten nicht zu erwarten ist, da diese lediglich z.B. als Zuwegung eines Feldes dienen, werden nicht als Schutzobjekt betrachtet. Andernfalls würde das berechnete Risiko stark überbewertet werden. Für sich zufällig auf diesen Wegen aufhaltende Personen ergibt sich demnach kein signifikantes Risiko.

Die Zugangswege zu den WEA, die an den Anlagen enden und nicht Teil eines ausgedehnten Wegenetzes sind, werden nicht als prioritäre Schutzobjekte angesehen, da sie primär für den Zugang von qualifiziertem Fachpersonal zu den WEA vorgesehen sind. Es ist jedoch empfohlen, angemessene Warnhinweise an diesen Zugangswegen für die Öffentlichkeit anzubringen.

Flächen, die keine Straßen oder Wege sind, für die ein Betreten durch Personen aber erwartbar ist und die eine Anbindung an das Verkehrswegenetz aufweisen, werden im Regelfall als Aufenthaltsflächen berücksichtigt. Dazu zählen beispielsweise Parkplätze, Spielplätze und Gärten. Überdachte Flächen werden nicht als relevante Aufenthaltsfläche angesehen, da der Aufenthalt dort vor Eiswurf bzw. Eisfall schützt.

Für das Schutzobjekt Waldwegenetz wurden konservativ abdeckend alle Wege zusammen als ein Schutzobjekt betrachtet. Die Ergebnisse decken somit auch die Nutzung einzelner Abschnitte des Schutzobjekts ab.

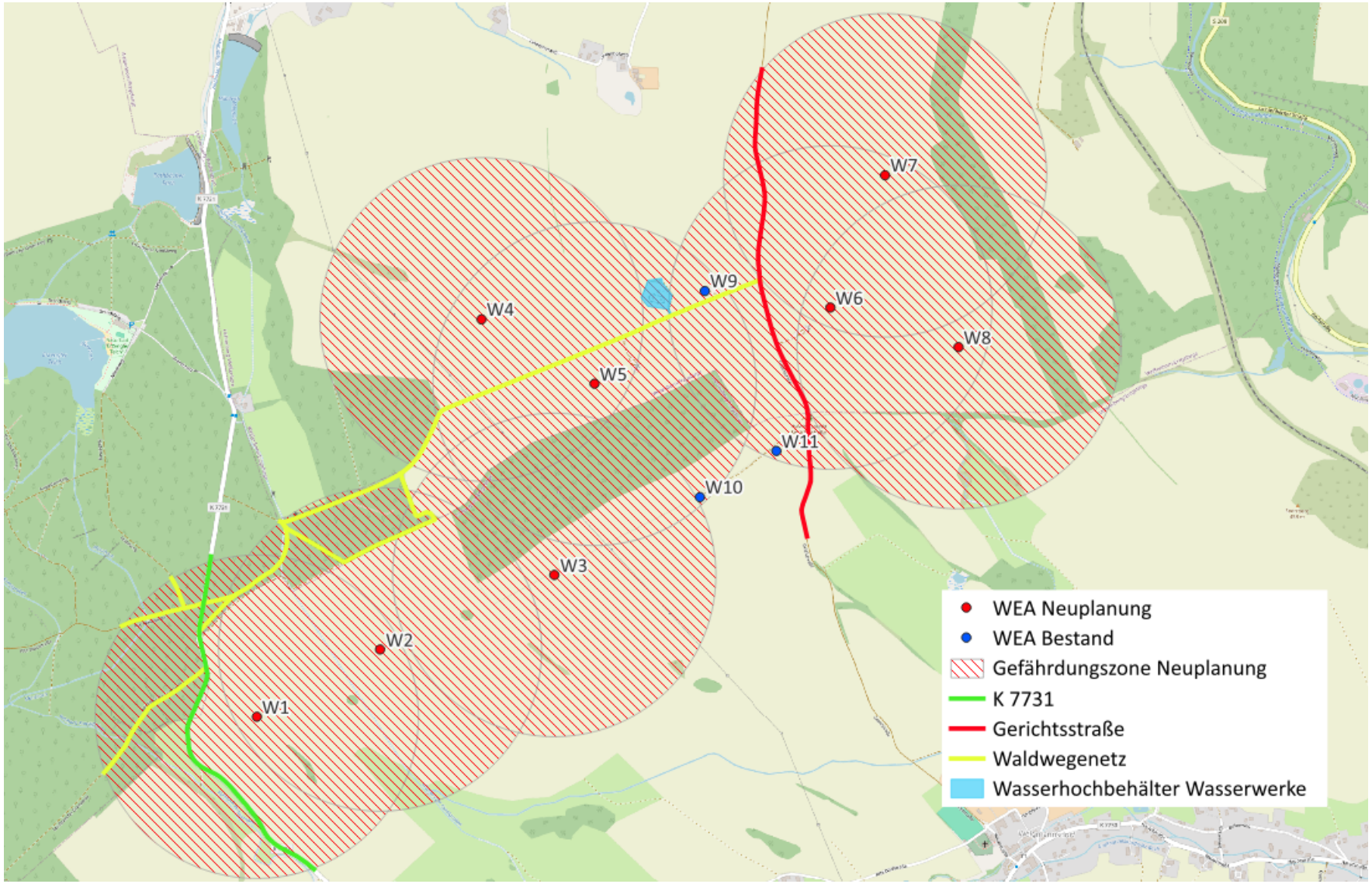

Abbildung 3.1 :Zu untersuchende Gefährdungszonen [3.1, 3.3]

In den in Abbildung 3.1 dargestellten Gefährdungszonen befinden sich die in der Tabelle 3.3 aufgelisteten Schutzobjekte.

Um das Risiko für Personen, die sich innerhalb dieser Gefährdungszonen auf einem der Schutzobjekte aufhalten, zu bewerten, werden, sofern relevant, auch weitere, nicht in diesem Gutachten zu bewertende WEA in die Risikobewertung mit einbezogen. Zuwegungen und Arbeitsflächen der WEA werden nicht in der Risikobetrachtung berücksichtigt. Personen, die sich auf dieser Fläche aufhalten, stehen in direktem Bezug zu den WEA und sind sich somit über die Risiken im Zusammenhang mit Eiswurf bzw. Eisfall bewusst, wodurch die Risikoakzeptanz steigt. Daher sind sie nicht als kritische Personen in der Risikobetrachtung zu berücksichtigen.

Tabelle 3.3: Zu untersuchende Schutzobjekte

Schutzobjekt	Für die Risikobewertung berücksichtigte WEA
K 7731	W1
Gerichtsstraße	W6, W7, W8
Waldwegenetz	W1, W2, W3, W4, W5, W6, W9
Wasserhochbehälter Wasserwerke	W4, W5, W6

4 Gültigkeit der Ergebnisse

Die in diesem Gutachten dargestellten Ergebnisse sind von verschiedenen Eingangsgrößen abhängig, wie dem WEA-Standort, dem WEA-Typ, der Nabenhöhe, dem Betriebsmodus und der Windverteilung. Wenn sich einzelne oder mehrere dieser Eingangsdaten ändern, kann die Gültigkeit der Simulationsergebnisse nicht mehr gewährleistet werden. Wenn sich die Datengrundlage der zu bewertenden Objekte ändert, ist ebenso eine erneute Bewertung der Gesamtsituation erforderlich. Sollten sich Daten hinsichtlich der Aufenthaltshäufigkeit und -dauer von Personen im Umfeld der WEA ändern, ist ebenfalls eine Neubewertung erforderlich.

Für die Eingangsgrößen, die für die Simulationen der Flugbahnen relevant sind, kann keine pauschale Aussage über die Konservativität getroffen werden [1]. Bei Änderung der Eingangsparameter (Koordinaten, Nabenhöhe, Rotordurchmesser, Betriebsmodus) ist somit zwingend eine Neubewertung erforderlich.

Es ist darauf hinzuweisen, dass jeder Versuch, Naturphänomene zu beschreiben, mit Unsicherheiten behaftet ist. Die durch die Modellierung bedingten Vereinfachungen ermöglichen lediglich einen einzelnen Wert für das Risiko zu ermitteln. Dieser einzelne Wert stellt häufig nicht das exakte Risiko an jedem Punkt dar, sondern ist ein über eine Fläche approximierter Wert. Weiterhin gibt es bei der Berechnung der Risiken Faktoren, welche zu den Unsicherheiten des Gesamtmodells beitragen [1]. Hierzu zählen die Faktoren:

- Windverteilung
- Masse und Form der Eisstücke
- Anzahl der Fragmente
- Relevanter Einwirkungsbereich
- Expositionszeiträume der betrachteten Personen
- Risikoakzeptanzkriterien
- Wirksamkeit empfohlener Maßnahmen

Die in dieser Analyse gewählten Annahmen sind stets mit dem nötigen Konservatismus gewählt, insbesondere wenn Unsicherheiten in der Datengrundlage zu erwarten sind. Dadurch wird die Gültigkeit der Ergebnisse hinsichtlich der getroffenen Annahmen weiterhin gewährleistet.

5 Einordnung der Schutzobjekte

5.1 Expositionszeiten

Damit die Risikobewertung weitestgehend einheitlich durchgeführt werden und dabei trotzdem die vor Ort vorherrschenden Gegebenheiten realistisch abgebildet werden können, werden die Wege in Nutzungskategorien hinsichtlich ihrer Nutzungshäufigkeit unterteilt. Die folgenden, in Tabelle 5.1 dargestellten Nutzungskategorien wurden in Anlehnung an [1] definiert:

Tabelle 5.1: Nutzungskategorien von Wegen

Nutzungskategorie	Beschreibung
Regelmäßige Nutzung	Aufgrund der Beschaffenheit des Weges, seiner Zugänglichkeit sowie seiner Nähe zu Ortschaften ist davon auszugehen, dass dieser Weg regelmäßig, nahezu täglich, von Spaziergängern oder Joggern frequentiert wird. Dabei genügt es, wenn bereits ein einzelner Spaziergänger oder Jogger diesen Weg regelmäßig nutzt.
Häufige Nutzung	Bei Wegen dieser Art sind nicht alle Merkmale der Kategorie „Regelmäße Nutzung“ zutreffend. Beispielsweise kann eine größere Entfernung zu Ortschaften sowie eine eingeschränkte Zugänglichkeit dazu führen, dass davon ausgegangen werden kann, dass der Weg zwar nicht täglich, aber dennoch häufig von Spaziergängern oder Joggern genutzt wird.
Gelegentliche Nutzung	In diese Kategorie fallen Wege, die zwar klar als solche erkennbar sind, jedoch eindeutig nicht als Hauptwege gelten. Ihre Ausbaustufe und Erreichbarkeit deuten auf eine nur gelegentliche Nutzung hin.
Seltene Nutzung	In diese Kategorie fallen Wege, die noch als solche erkennbar sind, deren Zustand und Erreichbarkeit jedoch auf eine seltene Nutzung hinweisen.
Normalerweise nicht genutzter Weg	Wege, die aus der Vogelperspektive kaum noch sichtbar sind, eindeutig nur als Zufahrtswege für die Forst- oder Landwirtschaft dienen oder sehr weit von der nächsten Wohnbebauung entfernt liegen, werden als in der Regel unbenutzt angesehen. Die Exposition wird in diesem Fall anhand einer Person bewertet, die sich zufällig an diesem Ort aufhält.

Die Witterungsbedingungen haben insbesondere bei Wegen und Flächen, deren Nutzung der Naherholung oder Freizeitgestaltung dient, einen Einfluss auf die Nutzungshäufigkeiten. Bei der Bestimmung der Nutzungskategorie eines Schutzobjekts wird somit die bei Eisansatz erwartbare Nutzungshäufigkeit herangezogen.

Für Autofahrer wird das kollektive Risiko berücksichtigt, wenn von einer durchschnittlichen Verkehrsdichte von mehr als 100 Fahrzeugen pro Tag ausgegangen wird. Dies wird grundsätzlich für alle Straßen angenommen. Das individuelle Risiko eines einzelnen Fahrers bei einer einfachen Fahrt wird ermittelt und anschließend mit der Anzahl der Fahrzeuge multipliziert, um das kollektive Risiko zu bestimmen. Sofern Daten zu der Nutzungshäufigkeit vorliegen, wird auf diese zurückgegriffen. Falls keine Daten vorliegen, erfolgt eine konservative Schätzung der Verkehrsdichte. Für die Risikobewertung werden die folgenden in der Tabelle 5.2 zusammengefassten Nutzungshäufigkeiten zu Grunde gelegt.

Tabelle 5.2: Nutzungshäufigkeiten der Schutzobjekte

Schutzobjekt	Nutzungshäufigkeit
K 7731	1000 Fz. / Tag
Gerichtsstraße	Gelegentliche Nutzung
Waldwegenetz	Gelegentliche Nutzung
Wasserhochbehälter Wasserwerke	Gelegentlicher Aufenthalt

5.2 Wirkungsbereich der einfallenden Eisstücke

Zur Ermittlung der Auftreffwahrscheinlichkeit müssen die Querschnittsfläche des Eisstücks und die relevante Trefferfläche herangezogen werden. Für die Querschnittsfläche der Eisstücke werden gemäß [1] die Eisstücke als Punktmasse angenommen. Für die relevante Trefferzone werden in der Risikoanalyse die folgenden Werte angesetzt [1]:

- **Fußgänger:**
  - **Kopftreffer:** Relevante Aufprallfläche 0.04 m² mit einer konservativ angenommenen tödlichen Trefferfolge.
  - **Rumpftreffer:** Relevante Aufprallfläche 0.18 m² mit konservativ angenommenen schweren Verletzungen als Trefferfolge.
- **Fahrzeuge:**
  - **Windschutzscheibe:** Als relevanter Bereich für eine Unfallfolge wird hier die Windschutzscheibe mit einer Fläche von 2.00 m² betrachtet.

Die Konservativität der getroffenen Annahmen wird hier maßgeblich mit der Verteilung der Massen der Eisstücke begründet. Eisstücke mit einem Gewicht von weniger als 100 g haben eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, durch einen Aufprall tödliche Folgen hervorzurufen, machen aber etwa 25 % aller als relevant betrachteten Eisstücke aus [1].

Da Personen in einem Fahrzeug vor direkten Treffern von Eisstücken geschützt sind, kann eine direkte tödliche Folge durch einen Treffer mit einem Eisstück ausgeschlossen werden, jedoch wird hier das Risiko für einen schweren Unfall der Ursache eines Treffers durch ein Eisstück mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % betrachtet [1, 17]. Das bedeutet, dass aus zehn Treffern mit einem Eisstück ein Fahrfehler, welcher zu einem schweren Unfall führt, resultiert.

6 Risikobewertungskriterien

In diesem Gutachten werden Treffer mit potenziell tödlichem Ausgang betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass ein ungeschützter Kopftreffer mit einem Eisstück tödliche Folgen hat. Diese Annahme ist konservativ, da Eisstücke mit einer Masse von weniger als 100 g wahrscheinlich keine tödlichen Verletzungen bei einer getroffenen Person verursachen würden [1]. Für eine Person, die sich in einem Fahrzeug befindet, sind direkte physische Schäden durch das Eisstück ausgeschlossen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass durch einen Aufprall auf der Windschutzscheibe, bedingt durch die Ablenkung oder den Schrecken des Fahrers, das Unfallrisiko steigt. In dieser Analyse wird in Anlehnung an [1] davon ausgegangen, dass einer von zehn Treffern auf die Windschutzscheibe zu einem Unfall führt. Da keine belastbaren Daten über die Häufigkeit tödlicher Unfälle nach ähnlich gelagerten Ereignissen vorliegen, wird konservativ davon ausgegangen, dass ein solcher Unfall tödlich endet.

6.1 MEM-Prinzip

Als Bewertungsgrundlage für ein akzeptables Risiko, das ein technisches System für Personen hat, wird das Prinzip der Minimalen Endogenen Sterblichkeit (MEM-Prinzip) [8] herangezogen. Dieses Prinzip zielt darauf ab, dass das Risiko eines technischen Systems für Personen auf ein Minimum reduziert wird, sodass es im Einklang mit den menschlichen Überlebensbedürfnissen steht. Es berücksichtigt dabei nicht nur die direkten Risiken, die von der Maschine ausgehen, sondern auch die allgemeine Sterblichkeitsrate und die Wahrscheinlichkeit, dass ein Mensch in einem bestimmten Zeitraum durch andere Ursachen umkommt.

Generell kann jede Maschine einen Gefährdungsbereich haben, in dem für eine Person eine Gefährdung ausgeht [9]. Dieser Gefährdungsbereich wird oft durch die potenziellen Auswirkungen der Maschine definiert, wie zum Beispiel herabfallende Objekte oder gefährliche Emissionen. Um das Risiko angemessen bewerten zu können, muss dieses jedoch in Relation zur allgemeinen Sterblichkeit gesetzt werden. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit des Risikos über verschiedene Kontexte hinweg und erleichtert die Festlegung von Grenzwerten für akzeptable Risikoniveaus.

In den folgenden Abschnitten werden die in diesem Gutachten zugrunde gelegten Grenzwerte für das individuelle Risiko und das kollektive Risiko dargelegt. Diese Grenzwerte wurden unter Berücksichtigung des MEM-Prinzips sowie relevanter Forschungsergebnisse und Normen festgelegt. Dabei wurden verschiedene Szenarien und Einflussfaktoren berücksichtigt, um sicherzustellen, dass das Risiko für Personen in der Umgebung der geplanten WEA angemessen bewertet wird.

6.2 Festlegen der Grenzwerte für das Individualrisiko

Einen Wert für ein akzeptables individuelles Risiko zu finden, hängt von mehreren Faktoren ab. Beispielsweise ist die Risikoakzeptanz bei einem genauen Verständnis des Risikos höher gegenüber einem unbekannten Risiko. Ebenso ist die Risikoakzeptanz im beruflichen Kontext höher, da Arbeitende für das Risiko eine entsprechende Kompensation (Entlohnung) erhalten, über das Gefahrenpotential informiert sind sowie Schutzausrüstung tragen. Die in diesem Gutachten betrachtete kritische Person steht jedoch weder in einem beruflichen Kontext zu den geplanten WEA, noch wird diese Person Kenntnisse über die durch Eiswurf oder Eisfall von WEA ausgehenden Risiken haben. Aus diesem Grund wird für eine unbeteiligte Person der Grenzwert für das individuelle Risiko festgesetzt. Ein auf internationaler Ebene etablierter Wert für das Risikomanagement hinsichtlich des individuellen Risikos liegt bei 1×10^{-5} Todesfälle pro Jahr [10.1]. Auf Basis dieses Grenzwertes wird im folgenden Verlauf der Risikoanalyse das individuelle Risiko für die kritische Person bewertet.

6.3 Festlegen der Grenzwerte für das Kollektivrisiko

Bei der Wahl eines Kollektivrisikogrenzwerts geht es um eine Beurteilung der Gefährdung des Straßenverkehrs, die durch die geplante WEA auf die Verkehrsteilnehmer wirkt. Es wird davon ausgegangen, dass das Risiko eines schweren Unfalls – im Zusammenhang mit dem Betrieb einer WEA – durch Eiswurf oder Eisfall nicht signifikant erhöht werden darf. Als signifikant wird in diesem Zusammenhang eine Steigerung des Gefährdungspotenzials um 10 % angesehen [8].

Zur Ermittlung des Risikos, das für eine Person im Straßenverkehr anzunehmen ist, wurden aktuelle Verkehrsstatistiken des Statistischen Bundesamts (Destatis) [11] ausgewertet. Auf Basis der etwa 2.3 Millionen polizeilich erfassten Unfälle aus dem Jahr 2021 wurden in der Gesamtstatistik 395 Unfälle mit Personenschäden pro 1000 *km* Straßenlänge (außerorts ohne Autobahnen) und 1244 Unfälle mit Personenschäden pro 1000 *km* Straßenlänge (auf Autobahnen) dokumentiert. Gemeinsam mit den Unfallzahlen für diese Bereiche mit getöteten bzw. schwer verletzten Personen ergibt sich ein Risiko unter Berücksichtigung von Unsicherheitsfaktoren bei der Herleitung für den Straßenverkehr von $10^{-2}\ \frac{Schwere\ Unfälle}{km*Jahr}$. Als schwere Unfälle sind hier Unfälle mit Todesfolge und schweren Verletzungen zu verstehen. Unter Berücksichtigung des an das MEM-Kriterium [8] angelehnten, nicht signifikanten Anstiegs des Risikos für den Straßenverkehr ergibt sich ein Kollektiv-Risikogrenzwert von $10^{-3}\ \frac{Schwere\ Unfälle}{km*Jahr}$.

6.4 ALARP-Prinzip

Mit den in den Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3 festgelegten Grenzwerten für das Individualrisiko bzw. Kollektivrisiko lassen sich unter Bezugnahme des ALARP-Prinzips (As Low As Reasonably Practicable) [12, 18] weitere Risikogrenzwerte bestimmen. In der folgenden Abbildung 6.1 werden Risikoakzeptanzbereiche in Anlehnung an das ALARP-Prinzip [12, 18] definiert.

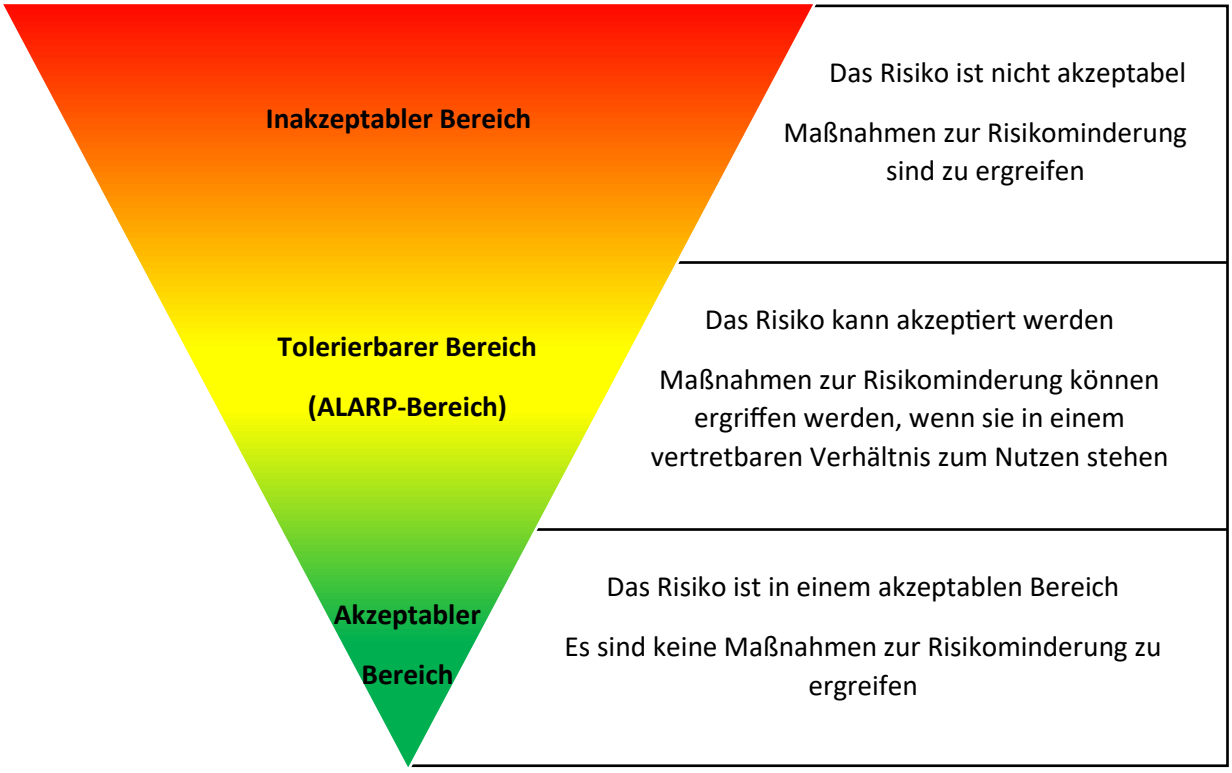

Abbildung 6.1: Übersicht der definierten Risikoakzeptanzbereiche nach dem ALARP-Prinzip [12]

6.5 Zusammenfassung der Grenzwerte für die Risikoanalyse

Weiterhin wird das ALARP-Prinzip genutzt, um zusätzliche Grenzwerte für die Risikoanalyse von Eiswurf oder Eisfall von WEA zu definieren. Die jeweilige obere Grenze des tolerierbaren Risikos wird als die in den Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3 festgelegten Grenzwerte für das Individualrisiko bzw. Kollektivrisiko festgelegt. Somit gilt für das Individualrisiko $1 \times 10^{-5}\ \frac{Todesfälle}{Jahr}$ als obere Grenze zwischen dem ALARP-Bereich und einem inakzeptablen Risiko. Für das Kollektivrisiko gilt ein Risiko von $1 \times 10^{-3}\ \frac{Schwere\ Unfälle}{km*Jahr}$ als obere Grenze zwischen dem ALARP-Bereich und einem inakzeptablen Risiko.

Ausgehend von dem durch das MEM-Kriterium hergeleiteten Grenzwert sind Risiken bis zu zwei Größenordnungen unter dem Grenzwert als akzeptabel anzusehen. In der folgenden Tabelle 6.1 sind die für die Untersuchung zu Grunde gelegten Grenzwerte für Individual- und Kollektivrisiko dargestellt:

Tabelle 6.1: Risikogrenzwerte in Anlehnung an das ALARP-Prinzip

Grenzwerte individuelles Risiko	Grenzwerte kollektives Risiko	Risikobewertung
$> 10^{-5}$	$> 10^{-3}$	**inakzeptabler Bereich**: Das Risiko liegt in einem inakzeptablen Bereich, Maßnahmen zur Risikominimierung sind zwingend einzuhalten.
$10^{-6} - 10^{-5}$	$10^{-4} - 10^{-3}$	**(oberer) tolerierbarer Bereich:** Das Risiko liegt im oberen ALARP-Bereich. Maßnahmen zur Risikominimierung werden dringend empfohlen.
$10^{-7} - 10^{-6}$	$10^{-5} - 10^{-4}$	**(unterer) tolerierbarer Bereich:** Das Risiko liegt im unteren ALARP-Bereich. Maßnahmen zur Risikominimierung sind hinsichtlich ihres Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu prüfen.
$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-5}$	**akzeptabler Bereich:** Das Risiko liegt in einem signifikanten, aber unbedenklichen Bereich. Es besteht kein Handlungsbedarf hinsichtlich risikomindernder Maßnahmen.
$< 10^{-9}$	$< 10^{-7}$	**nicht signifikanter Bereich:** Das Risiko kann als vernachlässigbar angesehen werden.

6.6 Risikomindernde Maßnahmen

Die zur Verfügung stehenden Maßnahmen reichen von einfachen Warnsystemen mittels aufzustellender Warnschilder, die vor den Gefahren durch Eiswurf oder Eisfall von den WEA warnen, bis hin zur Sperrung von Straßen. Während die Sperrung von Straßen in den für Eisfall relevanten Perioden als unverhältnismäßige Maßnahme erscheint, ist genau jene Maßnahme besonders in Gebirgsregionen ein übliches Mittel zur Risikominimierung vor z.B. Lawinen. In der folgenden Tabelle 6.2 sind die potenziellen Maßnahmen zur Risikominimierung gemäß [1] aufgeführt.

Tabelle 6.2: Maßnahmen zu Risikominderung

Sicherheitsmaßnahme	Risikominderungsfaktor	Geeignet für
Warnzeichen für Eiswurf	$1 - 10$	Nebenstraßen und Wege
Warnleuchte in Verbindung mit einem Eiserkennungssystem in Kombination mit Warnzeichen für Eiswurf oder Eisfall	$10 - 100$	Nebenstraßen und Wege
Umleitung der Streckenführung unter Aufsicht von Sicherheitspersonal	$10 - 100$	Nebenstraßen und Wege
Straßensperrung mit Barriere und Beschilderung	$10 - 100$	Häufig genutzte Straßen und Kletterpfade oder Wanderwege

Sofern die Sperrung von Straßen, Wegen oder Flächen nicht möglich ist oder keine ausreichenden Effekte auf das bestehende Risiko haben, sind weitere Maßnahmen in Betracht zu ziehen, die eine

Neuberechnung der von den WEA ausgehenden Risiken erfordern. In der folgenden Tabelle 6.3 sind potenzielle Maßnahmen zur Risikominimierung gemäß [1] aufgeführt.

Tabelle 6.3: Weiterführende Maßnahmen zur Risikoreduzierung

Maßnahme	Bemerkung
Fixierung des Azimutwinkels der WEA	Durch die Fixierung des Azimutwinkels können Ausrichtungen der WEA, welche ein hohes Risiko hervorrufen, ausgeschlossen werden.
Verringerung des Rotordurchmessers	ggf. können die Risiken an Straßen oder Wegen, welche einem hohen Risiko ausgesetzt sind, verringert werden; Neuberechnungen sind erforderlich
Verlegung der WEA	ggf. können die Risiken an Straßen oder Wegen, welche einem hohen Risiko ausgesetzt sind, verringert werden; Neuberechnungen sind erforderlich
Verlegung von Straßen oder Wegen	Straßen oder Wege, welche einem hohen Risiko ausgesetzt sind, können verlegt werden; Neuberechnungen sind i.d.R. erforderlich
Verlegung von Straßen oder Wegen während Perioden mit einer hohen Risikoerwartung	Straßen oder Wege, welche einem hohen Risiko ausgesetzt sind, können während Vereisungsperioden verlegt werden; Neuberechnungen sind i.d.R. erforderlich
Nutzung von Eiserkennungssystemen	Durch die Nutzung von Eiserkennungssystemen kann Eiswurf ausgeschlossen werden und hingegen ausschließlich Eisfall betrachtet werden.
Aufklärung von Anwohnern	Unabhängig vom kalkulierten Risiko sollte diese Maßnahme ergriffen werden, um die Bewohner zu informieren

7 Darstellung der Ergebnisse

7.1 Kumulierung von Risiken

Für eine adäquate Risikobewertung müssen alle Risiken für das Schutzobjekt betrachtet werden, sofern die jeweiligen Risiken als relevant einzustufen sind. Wenn mehrere Risikoquellen auf das Schutzobjekt einwirken, wird das kumulierte Risiko für das Schutzobjekt betrachtet. Grundsätzlich werden alle WEA für das kumulierte Risiko in Erwägung gezogen, deren Risikoeinwirkungszonen sich überschneiden [13].

Wenn bei der Risikobewertung der zu untersuchenden WEA ein vernachlässigbares Risikoniveau an dem zu prüfenden Schutzobjekt festgestellt wird, kann für dieses Schutzobjekt die Berücksichtigung weiterer WEA entfallen. Der Risiko-Einfluss befindet sich in einer Größenordnung, die auch bei einem erheblichen, durch die weiteren WEA verursachten Risikoniveau als vernachlässigbar gilt. Eine kumulierte Risikobetrachtung ist in diesem Fall obsolet. Der Vergleich mit den Risikogrenzwerten nach Tabelle 6.1 erfolgt sowohl für das individuelle als auch das kollektive Risiko anhand des Einzelrisikos am Schutzobjekt, ausgehend von der zu untersuchenden WEA.

Ist das von der zu untersuchenden WEA ausgehende Risiko als relevant einzustufen, ist ein wesentlicher Einfluss auf die Bewertung eines kumulierten Risikos am Schutzobjekt nicht auszuschließen. WEA, für die ebenfalls Treffer auf dem Schutzobjekt zu verzeichnen sind, werden in diesem Fall in die Risikobewertung einbezogen und das Risikoniveau als Kumulierung der Einzelrisiken ermittelt. Der Vergleich mit den Risikogrenzwerten nach Tabelle 6.1 erfolgt sowohl für das individuelle als auch das kollektive Risiko anhand des kumulierten Risikowerts.

Für WEA, welche ein Risiko auf eine Straße des überregionalen Verkehrs ausüben (z.B Bundesautobahnen oder Bundesstraßen), bedarf es keiner Kumulierung der Einzelrisiken, da einerseits mit einem auf die gefahrene Strecke bezogenen Risikogrenzwert verglichen wird und andererseits der regionale Charakter eines Windparks, wie er bei Gemeindesstraßen oder anderen regionalen Wegen vorherrscht, nicht gegeben ist.

7.2 Trefferhäufigkeiten und relevante WEA zur Risikobewertung

In der folgenden Abbildung 7.1 sind die Treffer aus der Simulation sowie die für diese WEA zu untersuchenden, in Tabelle 5.2 aufgelisteten Schutzobjekte dargestellt. Die Trefferwahrscheinlichkeit im Umkreis der WEA wird entsprechend der in der Abbildung dargestellten farbigen Skala abgebildet.

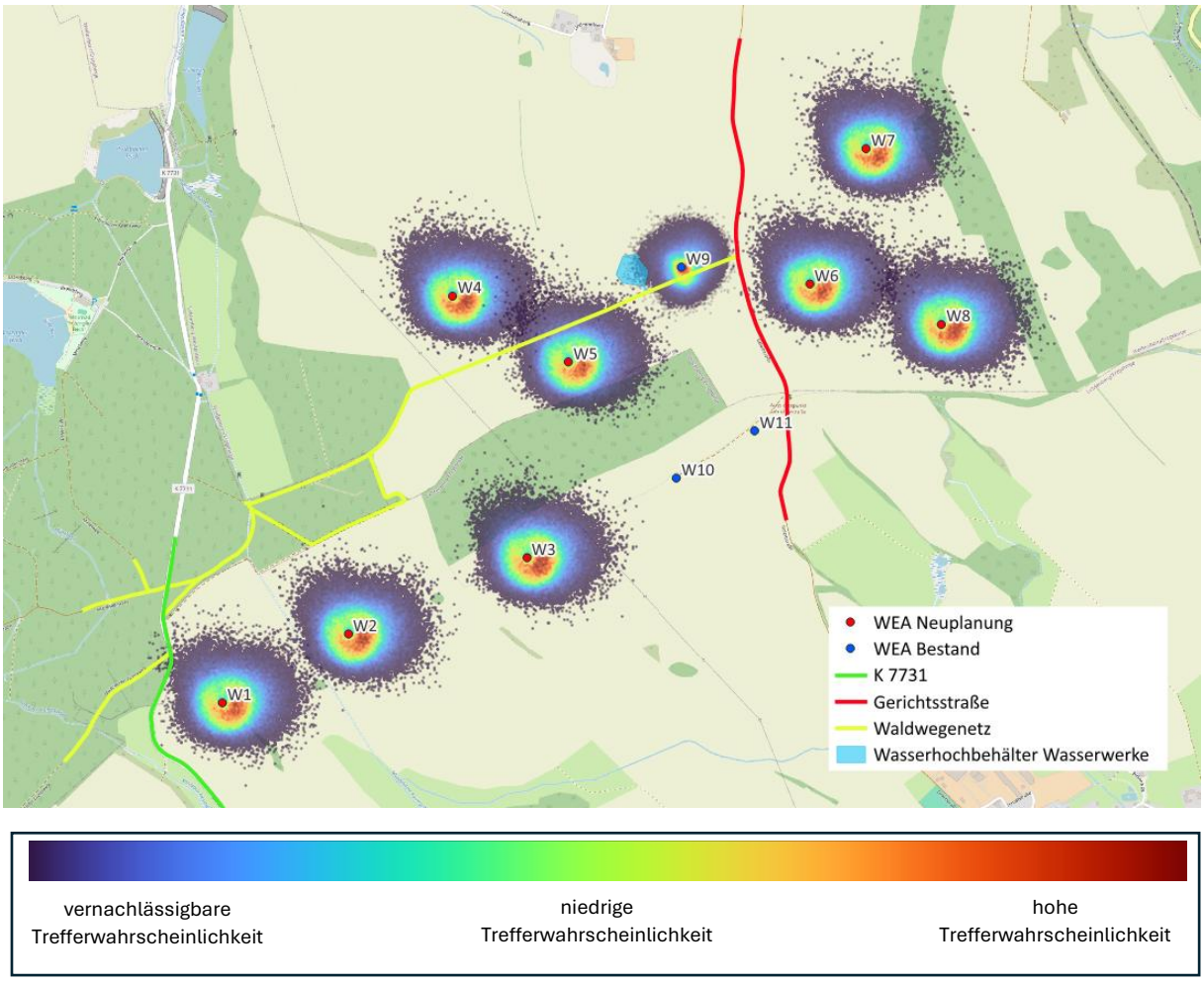

Abbildung 7.1: Berechnete Trefferhäufigkeiten der WEA W1 – W9 [3.1, 3.3]

Die Tabelle 7.1 fasst die Trefferhäufigkeiten aus Abbildung 7.1 in Form der resultierenden Einzelrisiken zusammen. Dargestellt werden alle identifizierten Schutzobjekte und die jeweils zu untersuchenden WEA. Die Zuordnung zu individuellem oder kollektivem Personenrisiko erfolgt anhand der in Abschnitt 5.1 ermittelten Nutzungsfrequenzen der Schutzobjekte.

Tabelle 7.1: Relevante WEA an den Schutzobjekten

Schutzobjekt	Für Risikobewertung relevante WEA	Individuelles Personenrisiko	Kollektives Personenrisiko
K 7731	W1	-	2.07×10^{-8}
Gerichtsstraße	W6	8.28×10^{-11}	-
	W7	keine Treffer	-
	W8	keine Treffer	-
Waldwegenetz	W1	1.40×10^{-10}	-
	W2	keine Treffer	-
	W3	keine Treffer	-
	W4	2.80×10^{-11}	-
	W5	1.22×10^{-7}	-
	W6	keine Treffer	-
	W9	3.76×10^{-7}	-
Wasserhochbehälter Wasserwerke	W4	keine Treffer	-
	W5	keine Treffer	-
	W6	keine Treffer	-

Das Schutzobjekt K 7731 liegt zwar innerhalb der Gefährdungszone, gemäß Simulation werden jedoch keine oder wenige Treffer durch die zu untersuchende WEA W1 verzeichnet, sodass das resultierende Risiko durch diese WEA als nicht signifikant eingestuft werden kann. Daher werden gemäß Abschnitt 7.1 die Treffer durch die zu untersuchende WEA W1 als nicht relevant bewertet.

Das Schutzobjekt Gerichtsstraße liegt zwar innerhalb der Gefährdungszone, gemäß Simulation werden jedoch keine oder wenige Treffer durch die zu untersuchenden WEA W6 – W8 verzeichnet, sodass das resultierende Risiko durch diese WEA als nicht signifikant eingestuft werden kann. Daher werden gemäß Abschnitt 7.1 die Treffer durch die zu untersuchenden WEA W6 – W8 als nicht relevant bewertet.

Das Schutzobjekt Waldwegenetz liegt zwar innerhalb der Gefährdungszone, gemäß Simulation werden jedoch keine oder wenige Treffer durch die zu untersuchenden WEA W1 – W4 und W6 verzeichnet, sodass das resultierende Risiko durch diese WEA als nicht signifikant eingestuft werden kann. Daher werden gemäß Abschnitt 7.1 die Treffer durch die zu untersuchende WEA W1 – W4 und W6 als nicht relevant bewertet.

Das Schutzobjekt Wasserhochbehälter Wasserwerke liegt zwar innerhalb der Gefährdungszone, gemäß Simulation werden jedoch keine oder wenige Treffer durch die zu untersuchenden WEA W4 – W6 verzeichnet, sodass das resultierende Risiko durch diese WEA als nicht signifikant eingestuft werden kann. Daher werden gemäß Abschnitt 7.1 die Treffer durch die zu untersuchenden WEA W4 – W6 als nicht relevant bewertet.

7.3 Ergebnisse Risikobewertung

Für die ermittelten Schutzobjekte wurden die Risiken durch Eiswurf bzw. Eisfall für sich im Gefahrenbereich aufhaltende Personen ermittelt. Für Schutzobjekte mit einer angenommenen Frequentierung von unter 100 Personen/Tag wird das individuelle Risko als Bewertungsgrundlage herangezogen, bei einer Frequentierung von mehr als 100 Personen/Tag ist das kollektive Risiko als Bewertung herangezogen worden. Sofern von den zu bewertenden WEA ein signifikantes Risiko ausgeht, wird in der folgenden Tabelle 7.2 das individuelle oder das kollektive Risiko aller zu bewertenden sowie zusätzlich betrachteten WEA ausgewiesen. Sollte von einer zu untersuchenden WEA kein signifikantes Risiko für ein Schutzobjekt ausgehen, wird das durch weitere WEA an diesem Schutzobjekt verursachte Risiko keiner Bewertung unterzogen, und deren Einfluss als nicht relevant angesehen.

Die hier dargestellten Ergebnisse bewerten das Risiko hinsichtlich Eisfall, da vorausgesetzt wird, dass an den zu bewertenden WEA W1 – W8 ein funktionsfähiges Eiserkennungssystem verbaut wird.

Tabelle 7.2: Darstellung der Ergebnisse für die Schutzobjekte

Schutzobjekt	Relevante WEA	Individuelles Personenrisiko	Kollektives Personenrisiko	Risikobewertung	Empfohlene risikomindernde Maßnahme
K 7731	-	-	$< 10^{-7}$	nicht signifikantes Risiko	-
Gerichtsstraße	-	$< 10^{-9}$	-	nicht signifikantes Risiko	-
Waldwegenetz	W5, W9	4.97×10^{-7}	-	tolerierbares Risiko	-
Wasser-hochbehälter Wasserwerke	-	$< 10^{-9}$	-	nicht signifikantes Risiko	-

Die folgende Tabelle 7.3 weist die Ergebnisse zur maximalen Flugweite der Eisstücke, ausgehend von den zu bewertenden WEA, die sich aus den Simulationen ergeben, aus. Diese Ergebnisse sind rein informativ und fließen nicht in die Risikobewertung ein.

Tabelle 7.3: Ergebnisse maximale Flugweite

WEA	Maximale Flugweite eines Eisstücks [m]
W1	371
W2	386
W3	360
W4	356
W5	358
W6	370
W7	362
W8	351

7.4 Risiken für angrenzende Wälder

Innerhalb der Gefährdungszonen der geplanten WEA befinden sich Wälder und Haine, die, wie aus Abbildung 7.1 hervorgeht, potenziell von Eisstücken getroffen werden können. Zur Abschätzung der resultierenden Schäden an Stämmen und Ästen der Gehölze spielen sowohl die Eigenschaften der Gehölze selbst als auch die Charakteristika der zu betrachtenden Eisfragmente eine Rolle.

Als Maß für die Robustheit von Baumrinde und Ästen gegenüber einer von außen einwirkenden Energie kann die Bruchzähigkeit herangezogen werden. Diese gibt an, wieviel Energie pro Flächeneinheit notwendig ist, um einen Riss in der Rinde bzw. einen Bruch des Astgewebes herbeizuführen. Der Wert der Bruchzähigkeit (und anderer Parameter zur Bestimmung der Rindenrobustheit) hängt vor allem von der Baumspezies und dem Alter eines Baums ab [21].

Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, können die Eisstücke, die an den Rotorblättern der WEA entstehen, sich bei verschiedenen Witterungsverhältnissen bilden und somit unterschiedliche Strukturen annehmen. Je nach Vereisungstyp (Raureif, Klareis, Nassschnee) sind die sich lösenden Eisfragmente mehr oder weniger stabil. Größere Fragmente zerbrechen bereits in der Luft, sodass der Großteil dieser weniger als 200 g wiegt. Weite Würfe werden vorrangig von kleinen, kompakten Eisstücken erreicht, die weniger als 50 Gramm schwer sind [22]. Aufgrund der Vielfältigkeit der Eisstücke sowie der Rahmenbedingungen, die für Eisfall bzw. Eiswurf zu berücksichtigen sind, variiert die resultierende Energie bei Einschlag der Eisfragmente.

Für die Eisstücke, die in den Waldabschnitten in der Nähe der geplanten WEA landen, ergibt sich aus der Simulation eine Energiespanne von 1 – 16 $\frac{kJ}{m^2}$, wobei über 90 % weniger als 6 $\frac{kJ}{m^2}$ aufbringen. Zur Bestimmung potenzieller Schäden an den Gehölzen ist davon auszugehen, dass nicht die gesamte Energie der Eisstücke auf die Baumoberfläche einwirkt, sondern je nach Beschaffenheit der Fragmente und Größe der Baumoberfläche nur ein kleiner Teil davon.

Neben dem möglichen Schadensausmaß ist die erwartete Schadensfrequenz einzubeziehen. Die simulierten Trefferverteilungen haben für die zu untersuchenden WEA eine relativ geringe Überschneidung mit den angrenzenden Waldflächen; der höchste Wert liegt hier bei etwa 2%, was bedeutet, dass von 50 Eisstücken im Schnitt eins auf einer Waldfläche landet. Daraus ergibt sich auf Basis der Simulationsergebnisse ein Erwartungswert von ca. 60 Eisstücken pro WEA und Jahr (vgl. Tabelle 3.2), die auf die Waldflächen treffen. Von diesen wird wiederum nur ein Bruchteil auf Baumstämme oder Äste treffen.

Im Ergebnis lässt sich in Bezug auf die Risiken für die angrenzenden Wälder schlussfolgern, dass aufgrund der potenziellen Energie der Eisstücke oberflächliche Beschädigungen an Gehölzen nicht auszuschließen sind. Die Anzahl der Fragmente, von denen dieses Potenzial ausgeht, fällt allerdings sehr gering aus. Daher kann das Risiko durch Eiswurf bzw. Eisfall ebenfalls als sehr gering angesehen werden.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen der Risikoanalyse hinsichtlich Eiswurf bzw. Eisfall für den untersuchten Windpark wurde die vom Kunden übermittelte Windparkkonfiguration hinsichtlich des Risikos durch Eiswurf bzw. Eisfall überprüft. Informationen zu den aufgeführten Schutzobjekten sind in Abschnitt 3.5 zu finden.

Für die in die Berechnungen einbezogenen WEA W1 – W8 wurde zugrunde gelegt, dass die WEA mit einem funktionsfähigen Eisabschaltungssystem betrieben werden. Daher wird Eiswurf für diese WEA ausgeschlossen und eine Risikobewertung hinsichtlich Eisfall durchgeführt.

Für die zu untersuchenden WEA wurden die folgenden zu berücksichtigenden Schutzobjekte ermittelt:

- für die Schutzobjekte K 7731, Gerichtsstraße und Wasserhochbehälter Wasserwerke wurde kein Treffer durch Eiswurf bzw. Eisfall oder ein nicht signifikantes Risiko, ausgehend von der WEA W1 – W8, simuliert,
- das Schutzobjekt Waldwegenetz wurde hinsichtlich des ausgehenden Risikos durch die WEA W5 und W9 bewertet, die WEA W1 – W4 und W6 wurden als nicht relevant für die Risikobewertung eingestuft.

Für die Schutzobjekte K 7731, Gerichtsstraße und Wasserhochbehälter Wasserwerke besteht kein signifikantes Risiko durch die betrachteten WEA.

Für das Schutzobjekt Waldwegenetz wurde ein tolerierbares Risiko berechnet. Risikomindernde Maßnahmen werden nicht empfohlen.

Tabelle 8.1: Zusammenfassung der Ergebnisse

Schutzobjekt	Ist die Risikobewertung bezüglich Eiswurf bzw. Eisfall positiv ausgefallen?	Empfohlene risikomindernde Maßnahmen
K 7731	Ja	-
Gerichtsstraße	Ja	-
Waldwegenetz	Ja	-
Wasserhochbehälter Wasserwerke	Ja	-

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
BImSchG	Bundes-Immissionsschutz-Gesetz
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem von 1989
Fz.	Fahrzeuge
MEM	Minimale endogene Mortalität
UTM	Universal Transverse Mercator Projection
WEA	Windenergieanlage
WGS84	World Geodetic System (letzte Revision in 2004)
WV	Windverteilung
GK	Gauß-Krüger

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Skalenparameter der Weibullverteilung	[m/s]
C_D	Strömungswiderstandskoeffizient des Eisstücks	[-]
D	Rotordurchmesser	[m]
h_{WV}	Höhe der Windbedingungen / Windverteilung über Grund	[m]
FEH	Fundamenterhöhung	[m]
k	Formparameter der Weibullverteilung	[-]
NH	Nabenhöhe	[m]
M	Masse des Eisstücks	[kg]
p	Sektorielle Häufigkeit	[%]
P_N	Nennleistung	[kW]
v_{hub}	Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe	[m/s]
$V(z)$	Windgeschwindigkeit auf Höhe des Eisstücks	[m/s]
X	Rechtswert des kartesischen Koordinatensystems	[m]
Y	Hochwert des kartesischen Koordinatensystems	[m]
x_0	Startposition des Eisstücks in x-Richtung des Wurfkoordinatensystems	[m]
y_0	Startposition des Eisstücks in y-Richtung des Wurfkoordinatensystems	[m]
z_0	Startposition des Eisstücks in z-Richtung des Wurfkoordinatensystems	[m]
V_x	Startgeschwindigkeit des Eisstücks in x-Richtung des Wurfkoordinatensystems	[m/s]
V_y	Startgeschwindigkeit des Eisstücks in y-Richtung des Wurfkoordinatensystems	[m/s]
V_z	Startgeschwindigkeit des Eisstücks in z-Richtung des Wurfkoordinatensystems	[m/s]
α	Höhenexponent	[-]
ρ	Luftdichte	[kg/m³]

Literaturverzeichnis

[1] *IEA Wind TCP, Task 19 Wind Energy in Cold Climates; Technical Report International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments; April 2022;*

[2] *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG);*

[3.1] *OpenStreetMap und Mitwirkende; SRTM | Kartendarstellung: OpenTopoMap (CC-BY-SA); Siehe auch: https://creativecommons.org;*

[3.2] *Microsoft Corporation; © 2019 Digital Globe © CNES (2019) Distribution Airbus DS; Siehe auch: https://www.microsoft.com/en-us/maps/product;*

[3.3] *OpenStreetMap, © OpenStreetMap, www.openstreetmap.org/copyright*

[4] *Wichura; (2013);The Spatial Distrubution of Icing in Germany Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurement of Icing; IWAIS;*

[5] *Cattin; ALPINE TEST SITE GUETSCH HANDBUCH UND FACHTAGUNG Schlussbericht; 31.12.2008;*

[6] *Cattin, René et. al. (2008). TWO YEARS OF MONITORING OF A WIND TURBINE UNDER ICING CONDITIONS;*

[7] *International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61400-1. Wind Energy Generation Systems - Part 1: Design requirements.; 2018;*

[8] *DIN EN 50126 - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit (RAMS), März 2000;*

[9] *ISO 12100:2010 Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung März 2011;*

[10.1] *Ostermann et. al (2004); BETRACHTUNGEN ZUR RISIKOANALYSE IM EISENBAHNBAU; Institutsheft 32, S. 19 – 23;*

[11] *Statistisches Bundesamt (Destatis); Verkehr Verkehrsunfälle Fachserie 8 Reihe 7; 07.07.2022;*

[12] *Kalberlah, F., Bloser, M., & Wachholz, C. (2005). Toleranz- und Akzeptanzschwelle für Gesundheitsrisiken am Arbeitsplatz, BAuA Forschung Projekt F 2010. Dortmund/Berlin/Dresden: Federal Institue for Occupational Safety and Health.*

[13] *Bundesanstalt für Straßenwesen. (2017). Fahrleistungserhebung 2014 - Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrstechnik Heft V 291.Bergisch Gladbach.*

[14] *Amtliche Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen 2023/1 (MVV TB 2023/1) mit Druckfehlerberichtigung vom 10. Mai 2023; Ausgabe 2; 17. April 2023;*

[15] *Deutscher Wetterdienst (DWD); Open Data Server des DWD (https://opendata.dwd.de); Index of /climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/ice_days/; Datei: grids_germany _multi_annual_ice_days_1991-2020_17.asc; Letzter Zugriff: 23.04.2024;*

[16] *Biswas, S.; Taylor, P. and Salmon; J. (2012), A model of ice throw trajectories from wind turbines. Wind Energ., 15: 889-901.;*

[17] *Herry, M. et.al. (2011); Verkehr in Zahlen. Wien: Bundesministerium für Verkehr; Innovation und Technologie;*

[18] *Kalberlah et al. (2005); Toleranz- und Akzeptanzschwelle für Gesundheitsrisiken am Arbeitsplatz; Forschung Projekt F 2010;*

[19] *Nordex SE; Maximale Rotordrehzahl im langsamen Trudelbetrieb nach „Eisalarm“; 09.05.2023;*

[20.1] *eab-New Energy GmbH; E-Mail mit dem Betreff: "Gutachten zum Eiswurf und Eisfall im Windenergieprojekt Weißenborn-Lichtenberg" vom 06.12.2024;*

[20.2] *anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH; Standortgenaue Berechnung des langjährigen mittleren Windpotenzials am Standort Weißenborn-Lichtenberg – Werte für Temperaturkriterium 1.0 °C; 2025-02-17-134405-419077; 17.04.2025;*

[21] *Niklas, K.J., (1999); The Mechanical Role of the Bark; American Journal of Botany 86(4): 465–469;*

[22] *Cattin, R. et al. (2007); Wind Turbine Ice Throw Studies in the Swiss Alps; European Wind Energy Conference Milan. Vol. 1. 2007;*