

Bericht

2025PAV00880

Risikobewertung Eisfall

Standort: ***Olsberg Bruchhausen***, Nordrhein-Westfalen,
Deutschland

Kunde:

Eurowind Energy GmbH
Unterm Bornrain 2
35091 Cölbe/Marburg

Husum, 27/05/2025

Version	Datum	Veränderung	Kommentar
0	27/05/2025	-	Erstausgabe

Haftungsausschluss

Die vorliegenden Berechnungsergebnisse in diesem Bericht wurden von der PAVANA GmbH gemäß dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Für die physikalische Einhaltung der abgeschätzten Ergebnisse werden seitens der PAVANA GmbH keine Garantien übernommen. Eine auszugsweise Vervielfältigung dieses Berichtes ist nur mit schriftlicher Zustimmung der PAVANA GmbH erlaubt.

Version of report template: ICE-DE-1.0

Bericht-Nr.: 2025PAV00880

Datum des Auftrags: 27/03/2025

Kunde: Eurowind Energy GmbH
Unterm Bornrain 2
35091 Cölbe/Marburg

Kontakt: Christopher Koch

Auftragnehmer: PAVANA GmbH
Haus der Zukunftsenergien
Otto-Hahn-Straße 12 – 16
D – 25813 Husum

Aufgabe: **Risikobewertung Eisfall für zwei Windenergieanlagen des Typs Vestas V162-6.2 MW und für eine Windenergieanlage des Typs Vestas V150-6.0 auf einer Nabenhöhe von 169 m**

Verfasser:

Lea Kastner
Junior Wind & Site

Prüfer:

Kevin Gutbrod
Expert Wind & Site

Freigabe:

Dipl.-Ing. Lars Levermann
Head of Pavana GmbH

Husum, 27/05/2025

Inhaltsverzeichnis

1	VORWORT	5
2	AUFGABENSTELLUNG	5
3	STANDORTSPEZIFISCHE EINGANGSDATEN	6
3.1	Kenndaten der geplanten WEA	6
3.2	Prüfung gemäß der Technischen Baubestimmungen des DIBt	7
3.3	Eiserkennung und automatischer Restart nach Eisablagerungen	8
3.4	Vereisungsbedingungen am Standort	8
3.5	Vereisungseigenschaften der WEA	9
3.6	Eismasse und Anzahl der Eisstücke pro Vereisungstag	10
3.7	Windgeschwindigkeit und Windrichtung	11
4	ERMITTLUNG DER MAXIMALEN FALLWEITE IM TRUDELBETRIEB	12
5	IDENTIFIKATION DER GEFÄHRDUNGSBEREICHE	14
5.1	Beschreibung der Gefährdungsbereiche	14
5.2	Simulation Trefferhäufigkeit (Monte-Carlo)	15
6	RISIKOANALYSE	17
6.1	Bewertungskriterien	17
6.2	Grenzwerte	18
6.3	Standortspezifischer Grenzwert für das Kollektivrisiko	18
6.4	Individualrisiko	19
6.5	Kollektivrisiko	19
6.6	Summierung von Risiken	19
6.7	Berechnungsergebnisse	20
6.8	Risikominderungsmaßnahmen	21
6.9	Unsicherheiten der Eingangsdaten und des Berechnungsmodells	21
7	ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN	22
8	LITERATURVERZEICHNIS	23

1 Vorwort

Die vorliegende Risikobewertung zum Eisfall für den Standort *Olsberg Bruchhausen* wurde von der PAVANA GmbH gemäß dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen erstellt.

Für die physikalische Einhaltung der prognostizierten Ergebnisse der Risikobewertung Eisfall werden seitens der PAVANA GmbH keine Garantien übernommen. Sie basieren auf den internationalen Empfehlungen zum Eisfall und Eiswurf der IEA [1] sowie den von der PAVANA GmbH und dem Hersteller der Windenergieanlagen (im folgenden WEA genannt) gestellten Anlagendaten.

2 Aufgabenstellung

Die Eurowind Energy GmbH plant am Standort *Olsberg Bruchhausen* (Nordrhein-Westfalen) westlich der Ortschaft *Willingen* und östlich der Ortschaft *Wiemeringhausen* die Errichtung von drei Windenergieanlagen des Herstellers Vestas. Bei den geplanten WEA handelt es sich um zwei WEA des Typs Vestas V162-6.2 MW mit einer Nabenhöhe (NH) von 169 m und einer Nennleistung im Leistungsbetrieb von 6,2 MW und einer WEA des Typs Vestas V150-6.0 MW mit einer Nabenhöhe von 169 m und einer Nennleistung im Leistungsbetrieb von 6,0 MW.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens soll nachgewiesen werden, dass die öffentliche Sicherheit durch diese Planung nicht beeinträchtigt wird [2]. Eine Beeinträchtigung der Sicherheit durch Vereisung der Rotorblätter von Windenergieanlagen kann sowohl durch Eisfall als auch durch Eisabwurf vorliegen.

Eiswurf: Eisstücke, die sich während des Betriebes einer Windenergieanlage ablösen, können erhebliche Fallweiten erreichen. Die Fallweite wird im Wesentlichen durch die Drehzahl der Windenergieanlage beeinflusst.

Eisfall: Eisstücke, die sich von einer stehenden bzw. im Trudelbetrieb befindlichen Windenergieanlage ablösen, erreichen deutlich geringere Fallweiten. Die Fallweite wird im Wesentlichen durch die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit beeinflusst.

Da die geplanten WEA mit einem System zur Eiserkennung ausgestattet sind und die WEA bei Vereisungsbedingungen in den Trudelbetrieb versetzt werden, entfällt eine Betrachtung von Beeinträchtigungen durch Eiswurf. Im Weiteren werden die möglichen Beeinträchtigungen durch Eisfall betrachtet.

Zunächst wird eine Prüfung gem. der Technischen Baubestimmungen des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) [3] durchgeführt, um festzustellen, ob eine standortspezifische Beurteilung erforderlich ist. Für die standortspezifische Beurteilung wird unter Berücksichtigung der meteorologischen Standortdaten (Eistage, Windrichtungen und -geschwindigkeiten am Standort) eine Abschätzung der potenziellen Eisfallereignisse (Eismasse, Eisstücke) als Grundlage der Berechnungen vorgenommen.

Die Berechnung der maximalen Fallweite bestimmt den Gefährdungsradius, in dem die Bereiche identifiziert werden, in denen eine Personengefährdung durch Eisabfall möglich ist (Verkehrs- und Wirtschaftswege, Industriegelände etc.). Für die Gefährdungsbereiche wird in Verbindung durch den jeweiligen Aufenthaltshäufigkeiten eine Simulation der Trefferhäufigkeiten durchgeführt und im Rahmen einer Risikoanalyse sowohl das Individualrisiko als auch das Kollektivrisiko bestimmt. Die Ergebnisse werden anschließend mit Risikoakzeptanzkriterien verglichen. In Abhängigkeit von den Ergebnissen werden ggf. Risikominderungsmaßnahmen empfohlen. Grundlage der Berechnungen basieren auf den aktuellen internationalen Empfehlungen von Eiswurf und Eisfall von WEA [1].

3 Standortsspezifische Eingangsdaten

3.1 Kenndaten der geplanten WEA

Die Kenndaten der geplanten Windenergieanlagen am Standort *Olsberg Bruchhausen* sind der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Kenndaten der geplanten WEA (UTM ETRS89 Z32)¹

Bez. / Nr.	X [m]	Y [m]	Z [m]	Hersteller	WEA-Typ	Nennleistung [kW]	RD (Rotor-durchmesser) [m]	NH (Nabenhöhe) [m]	1,5 x (NH + RD) [m]
WEA 01	466.971	5.683.471	558,2	Vestas	V162-6.2	6.200	162,0	169	497
WEA 02	467.539	5.683.538	564,5	Vestas	V150-6.0	6.000	150,0	169	479
WEA 03	466.845	5.682.454	636,6	Vestas	V162-6.2	6.200	162,0	169	497

Abbildung 1 stellt den Standort und die neu geplanten Windenergieanlagen dar.

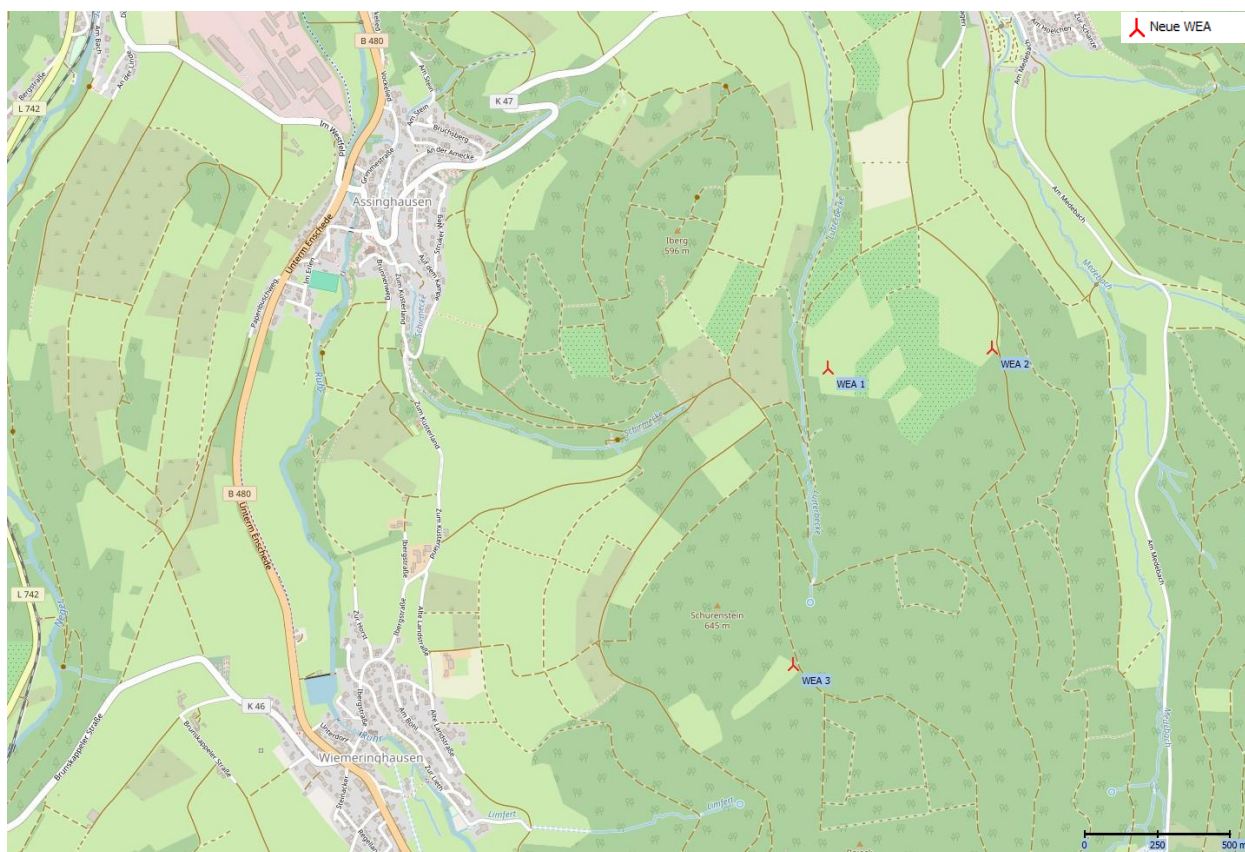


Abbildung 1: WEA-Standorte am Standort Olsberg Bruchhausen (© OpenStreetMap, EMD International A/S)

¹ Die Koordinaten werden vom Kunden bereitgestellt.

3.2 Prüfung gemäß der Technischen Baubestimmungen des DIBt

In der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen des DIBt [3] wird folgender Abstand zur Orientierung festgelegt:

„Abstände zu Verkehrswegen und Gebäuden sind unbeschadet der Anforderungen aus anderen Rechtsbereichen wegen der Gefahr des Eisabwurfs (Windenergieanlage in Betrieb) und des Eisfalls (Windenergieanlage im Stillstand) einzuhalten, soweit eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit nicht auszuschließen ist. Abstände, gemessen von der Turmachse, größer als $1,5 \times$ (Rotordurchmesser plus Nabhöhe) gelten im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen als ausreichend. In anderen Fällen ist die Stellungnahme eines Sachverständigen erforderlich [3].“

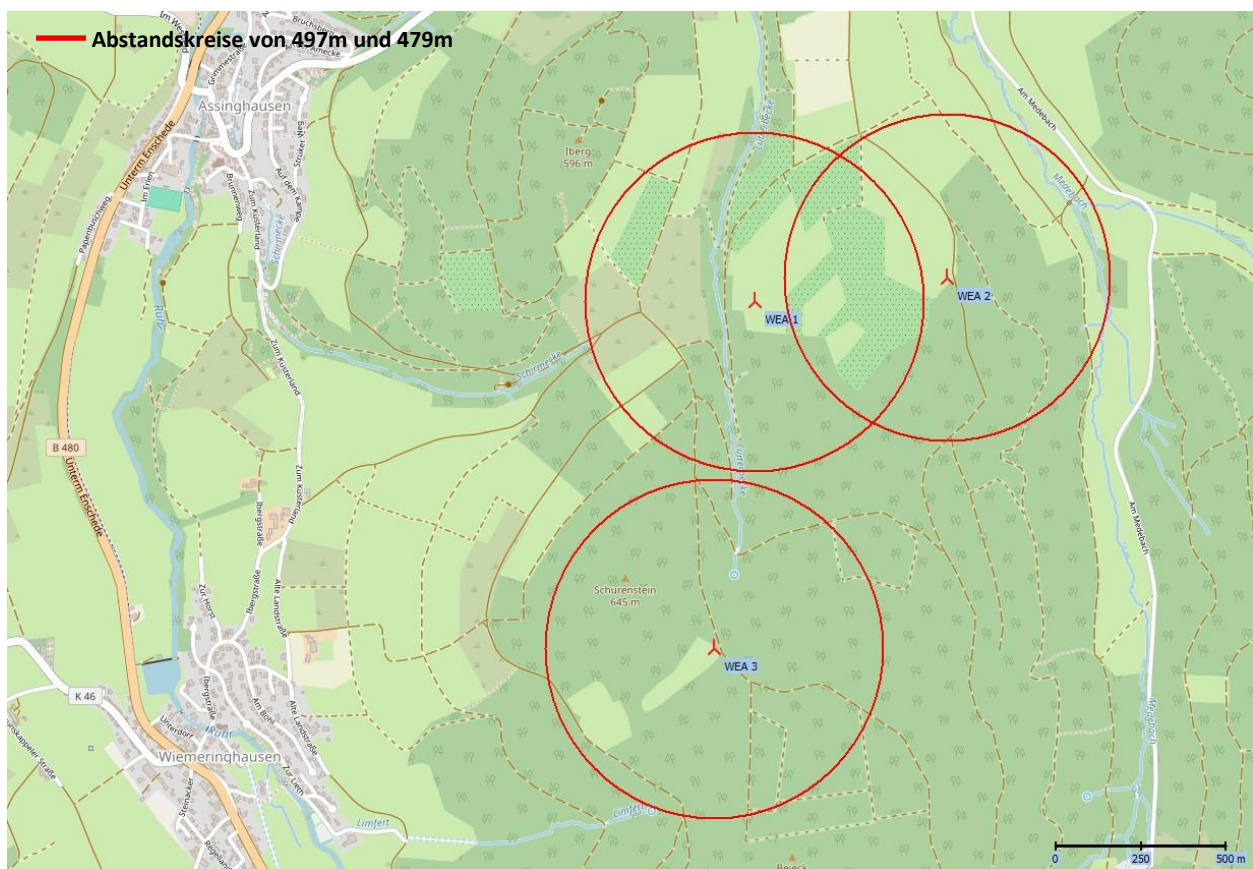


Abbildung 2: Übersichtskarte mit der geplanten WEA und Abstand gemäß der Technischen Baubestimmungen des DIBt

Innerhalb des definierten Abstandes von 497 m und 479 m (siehe Tabelle 1) befinden sich Verkehrswege, so dass eine standortspezifische Beurteilung erforderlich ist.

3.3 Eiserkennung und automatischer Restart nach Eisablagerungen

Detaillierte Informationen über das Eiserkennungssystem der geplanten WEA wurden den Herstellerunterlagen entnommen. Die geplanten Windenergieanlagen werden mit einem Eiserkennungssystem (Vestas Eiserkennung VID) ausgestattet. Über einen Sensor in jedem Rotorblatt werden die Schwingungsfrequenzen dauerhaft überwacht. Bei Eisansatz ändern sich die Schwingungsfrequenzen und der Anlagenbetrieb wird bei einem definierten Schwellenwert sowie einer Temperatur unter 5°C unterbrochen. Sobald kein Eisansatz mehr erkannt wird, wird der Betrieb der Anlage wieder aufgenommen.

Das Eiserkennungssystem ist gem. TC-DNV GL-SE-0439-04314-2 mit Datum vom 20.10.2022 zertifiziert. Im Rahmen der Zertifizierung wird bestätigt, dass das Eiserkennungssystem sowie die Integration der Eiserkennung in die WEA-Steuerung dem Stand der Technik entspricht und dass der Eisansatz zuverlässig erkannt und die WEA sicher abgeschaltet wird. Eiserkennungssysteme sind zur Minderung von Eiswurf vorgesehen, jedoch nicht zur Minderung von Eisfall.

Der automatische Restart von Windenergieanlagen nach Eisablagerung per Remote ermöglicht eine schnelle Wiederinbetriebnahme ohne Vor-Ort-Einsatz. Nach einer Abschaltung aufgrund von Vereisung überwacht das SCADA-System kontinuierlich relevante Parameter wie Blatttemperatur, Vibrationen und Windgeschwindigkeit. Sind die Bedingungen unkritisch – etwa Temperaturen über 0 °C und keine Anzeichen von Eis oder Unwucht – wird der Wiederanlauf automatisiert eingeleitet. Dies reduziert Stillstandszeiten, erhöht den Energieertrag und verbessert die Betriebssicherheit im Winterbetrieb. Voraussetzung sind eine zuverlässige Eiserkennung, stabile Kommunikationsverbindungen und die Einhaltung sicherheitsrelevanter Vorgaben.

3.4 Vereisungsbedingungen am Standort

Die Vereisung der Rotorblätter einer Windenergieanlage wird durch verschiedene Faktoren bestimmt:

- Topographie des Standortes (z.B. Gebirge, Nähe von großen Wasser- oder Feuchtflächen)
- Meteorologische Verhältnisse (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit)
- Eigenschaften der Bauteile (Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit, Form)

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat in einer Studie systematisch Vereisungshäufigkeiten für Deutschland untersucht [4]. Dabei wurden synoptische Vereisungsmessungen von ca. 70 DWD-Stationen von Niederschlag (freezing rain und wet snow) und In-Cloud-Icing (rime, fog) in Beziehung zu der Stationshöhe gestellt. Es zeigte sich eine klare Korrelation zwischen Vereisungshäufigkeit und Stationshöhe. Dieses Resultat wurde zur Erstellung einer Vereisungskarte genutzt.

Auf Basis der Studie des DWD [4] wurde die Anzahl der Vereisungstage für den Standort *Olsberg Bruchhausen* bestimmt. Die in Abbildung 3 dargestellte Karte zeigt die Häufigkeit von Vereisungsbedingungen (kumuliert aus in-cloud Icing, gefrierendem Regen und nassem Schnee). Die Häufigkeit wurde umgerechnet in Vereisungstage pro Jahr, im Sinne von 24 Stunden Vereisung pro Tag. Für den Standort *Olsberg Bruchhausen* zeigt die Karte eine Vereisungshäufigkeit von 4-5 %. Entsprechend werden als konservativer Ansatz ca. 19 Vereisungstage pro Jahr ermittelt.

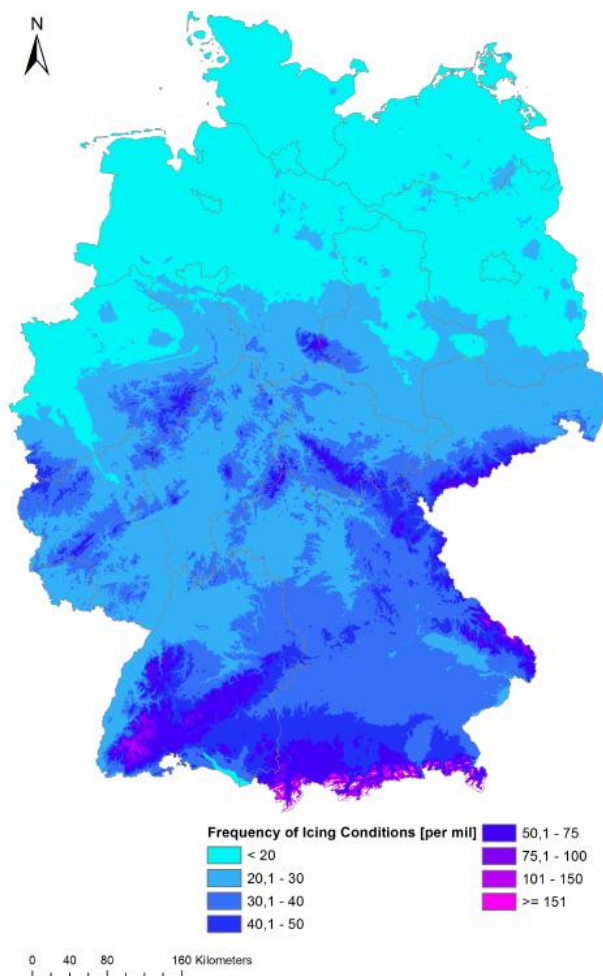


Abbildung 3: Die Vereisungskarte für Deutschland [4] zeigt die Häufigkeit von Vereisungsbedingungen (kumuliert aus in-cloud Icing, gefrierendem Regen und nassem Schnee)

3.5 Vereisungseigenschaften der WEA

Die entstehende Eismasse am Rotorblatt wird im Wesentlichen vom Rotorblattdesign und den Betriebsparametern des installierten Eiserkennungssystems beeinflusst. Die Rotorblattgeometrie wird in der Berechnung der Eismasse berücksichtigt.

Für die geplanten WEA ist ein zertifiziertes Standardeiserkennungssystem vorgesehen. Die sich daraus ergebenden Parameter für den Zustand nach Abschaltung (z.B. Drehzahl im Trudelbetrieb) gehen in die Fallweitenberechnung ein.

3.6 Eismasse und Anzahl der Eisstücke pro Vereisungstag

Für die Bestimmung der Anzahl der ablösenden Eisstücke pro Vereisungsereignis wird die Eismasse entsprechend der Massenverteilung an der Vorderkante entsprechend IEC 61400-1 Ed.4 [5] berechnet.

$$M(r) = 0,125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} Ch_{85\%} \cdot r$$

mit:

$M(r)$: Massenverteilung an der Vorderkante des Rotorblattes [kg/m]
 r : Radialer Abstand zur Rotorachse [m]
 $Ch_{85\%}$: Profillänge bei 85 % des Rotorradius [m]

Die Profillänge $Ch_{85\%}$ des Rotorblattes wird aus den Daten der Windpro-WTG-Datenbank $Ch_{90\%}$ abgeschätzt. Es werden vereinfachende Annahmen hinsichtlich der Länge der sich ablösende Eisstücke gemacht und nur Eisstücke mit einem bestimmten Mindestgewicht berücksichtigt.

Es wird angenommen, dass die Rotorblätter einmal pro Vereisungstag komplett vereisen und nachfolgend das Eis wieder verlieren. Da die o.g. Formel für Lastberechnungen entwickelt wurde, wurden die auf diese Weise ermittelten Stückzahlen, so wie in [1] empfohlen, mit gemessenen Eisfalldaten skaliert. Als gemessene Eisfalldaten wurden die Daten von WEA des Typs Enercon E-82 mit 78 m Nabenhöhe [1] verwendet. Als konservativer Ansatz wurde der Trudelbetrieb mit Rotorblattheizung angenommen (Spalte b in Tabelle 2). Dafür wurde der zeitliche Anteil der instrumentellen Vereisung in Vereisungstage umgerechnet und so die Anzahl der Eisstücke pro Tag abgeschätzt und mit den berechneten Werten für den WEA-Typ E-82 verglichen.

Tabelle 2 zeigt die Vereisungsklassen der International Energy Agency (IEA) und die gemessene Anzahl der Eisstücke an den Enercon E-82. Zu beachten ist, dass sich die Anzahl der Eisstücke auf die Maße der Rotorblätter der Enercon E-82 bezieht.

Tabelle 2: IEA-Vereisungsklassen aus [1] inklusive der jährlichen Anzahl der Eisstücke pro Jahr basierend auf Messungen an Enercon E-82-WEA

IEA Icing Class	Instrumental Icing [%]	Anzahl der Eisstücke pro WEA pro Jahr [-]			
		Trudelbetrieb ohne Rotorblattheizung (a)	Trudelbetrieb mit Rotorblattheizung (de-icing) (b)	Im Betrieb ohne Rotorblattheizung (c)	Im Betrieb mit Rotorblattheizung (anti-icing) (d)
5	<20	>3.200	>8.800	>9.600	>8.000
4	10-30	1.600	4.400	4.800	4.000
3	6-15	800	2.200	2.400	2.000
2	1-9	400	1.100	1.200	1.000
1	0-1,5	80	220	240	200

Daraus ergibt sich für den Standort *Olsberg Bruchhausen* für den WEA-Typ Vestas V162-6.2 eine Anzahl der ablösenden Eisstücke von 204 pro Vereisungstag. Für ca. 19 Vereisungstage pro Jahr ergeben sich 3.876 Eisstücke pro Jahr und WEA. Für den WEA-Typ Vestas V150-6.0 eine Anzahl der ablösenden Eisstücke von 174 pro Vereisungstag. Für ca. 19 Vereisungstage pro Jahr ergeben sich 3.306 Eisstücke pro Jahr und WEA.

Tabelle 3: Vereisungstage und Eisstücke pro Jahr am Standort Olsberg Bruchhausen

Vereisungstage pro Jahr	Eisstücke pro WEA pro Jahr, Vestas V162-6.2	Eisstücke pro WEA pro Jahr, Vestas V150-6.0
19	3.876	3.306

3.7 Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Die Weibullverteilung, die der Berechnung zu Grunde liegt, wurde vom Kunden übermittelt und ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Weibull-Parameter am Standort Olsberg Bruchhausen auf 169 m ü. Gr.

Sektor	A-Parameter [m/s]	k-Parameter [-]	Häufigkeit [%]	v_m [m/s]
Mittelwert	7,8	1,97	-	6,9
N	4,4	1,99	4,3	3,9
NNO	4,3	2,05	4,0	3,8
ONO	4,9	2,28	4,8	4,4
O	6,0	2,27	5,0	5,4
OSO	6,9	2,17	5,3	6,1
SSO	7,7	2,13	6,0	6,8
S	8,4	2,40	7,9	7,5
SSW	9,8	2,52	13,7	8,7
WSW	10,3	2,61	21,5	9,1
W	7,9	2,26	13,4	7,0
WNW	6,1	2,14	8,5	5,4
NNW	5,0	1,99	5,6	4,4

Der Höhenexponent, der dieser Berechnung zu Grunde liegt, wurde vom Kunden übermittelt und beträgt 0,278.

4 Ermittlung der maximalen Fallweite im Trudelbetrieb

Um die Größe der Gefährdungsbereiche zu bestimmen, wird die maximale Fallweite am Standort ermittelt. Dazu wird eine Simulation der Flugbahn der Eisstücke bei der für den Standort maximal prognostizierten Windgeschwindigkeit für den Trudelbetrieb durchgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass der Rotor optimal zum Wind ausgerichtet ist, d.h. orthogonal zur Windrichtung steht. Die Flugbahn wird von der Ablösung des Eisstücks vom Rotorblatt bis zur Berührung der Bodenoberfläche berechnet. Dazu wird die Anfangsposition auf dem Rotorblatt und die Anfangsgeschwindigkeit des Eisstücks für eine optimale Flugbahn definiert. Da sich die Windgeschwindigkeit auf der Flugbahn mit sinkender Höhe aufgrund der Geländerauigkeit ändert, wird die Veränderung der Windgeschwindigkeit über den Verlauf der Flugbahn in der Berechnung berücksichtigt.

Für alle Berechnungen werden die Flugbahnen für auf 1 kg normierte Eisstücke betrachtet, deren mittlere Flächen zwischen 0,015 m² und 0,035 m² beträgt und deren Strömungswiderstände zwischen 1,15 und 1,31 liegen.

Folgende Annahmen wurden der Berechnung zugrunde gelegt:

- Die WEA befindet sich im Trudelbetrieb (max. Drehzahl = 2,0 U/min).
- Als WEA-Höhe wird im flachen Gelände die Entfernung vom Turmfuß bis zur Nabe angenommen, bei komplexem Gelände wird als maximale WEA-Höhe die Höhendifferenz zwischen dem tiefsten Punkt des Geländes und der WEA-Nabe angenommen. So ergibt sich für WEA 1 eine Höhendifferenz von 169 m, für WEA 2 eine Höhendifferenz von 253 m und für WEA 3 eine Höhendifferenz von 185 m.
- Die Eigenschaften der normierten Eisstücke
- Die Position des Eisstücks (Rotorblattspitze, um die maximale Fallweite zu erreichen)
- Die Position des Rotorblatts für den optimalen Abwurfwinkel
- Die Windgeschwindigkeit [$v = 23,7$ m/s] (99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung auf Nabenhöhe)
- Erdbeschleunigung [$g = 9,81$ m/s²]
- Luftdichte [$\rho = 1,3$ kg/m³] (aufgerundet bei 0°C Lufttemperatur)

Die Windrichtung wird nicht berücksichtigt, da hier nur die maximalen Fallweiten berechnet werden.

Unter den genannten Bedingungen ergibt sich für den WEA-Typ Vestas V162-6.2 bzw. V150-6.0 mit einer Nabenhöhe von 169 m am Standort *Olsberg Bruchhausen* für eine maximale Windgeschwindigkeit von 23,7 m/s eine maximale Fallweite von 417 m (99,9 %-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung auf Nabenhöhe).

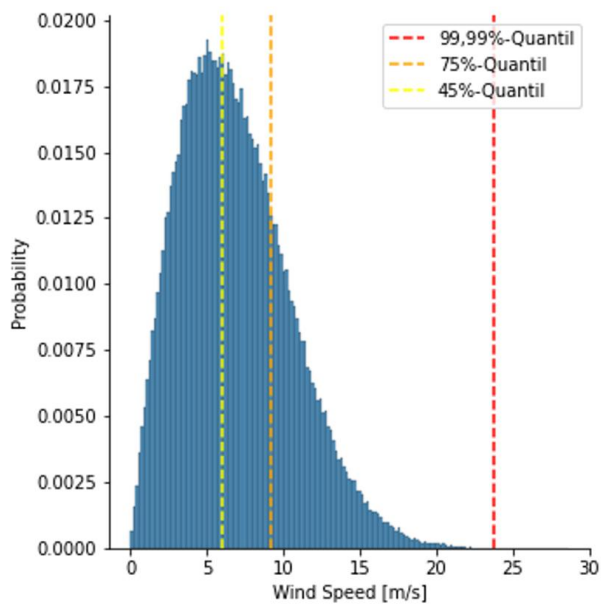


Abbildung 4: Weibullverteilung der Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe

Tabelle 5: Maximale Fallweiten der Weibullverteilung

		99,9%-Quantil	75-% Quantil	45% Quantil
Windgeschwindigkeit	[m/s]	23,7	9,2	6,0
Windstärke	[bft]	9	5	4
Maximale Fallweite	[m]	417	161	108

5 Identifikation der Gefährdungsbereiche

5.1 Beschreibung der Gefährdungsbereiche

Innerhalb der in Kapitel 4 berechneten maximalen Fallweiten sind die in Abbildung 5 dargestellten Gefährdungsbereiche zu betrachten.

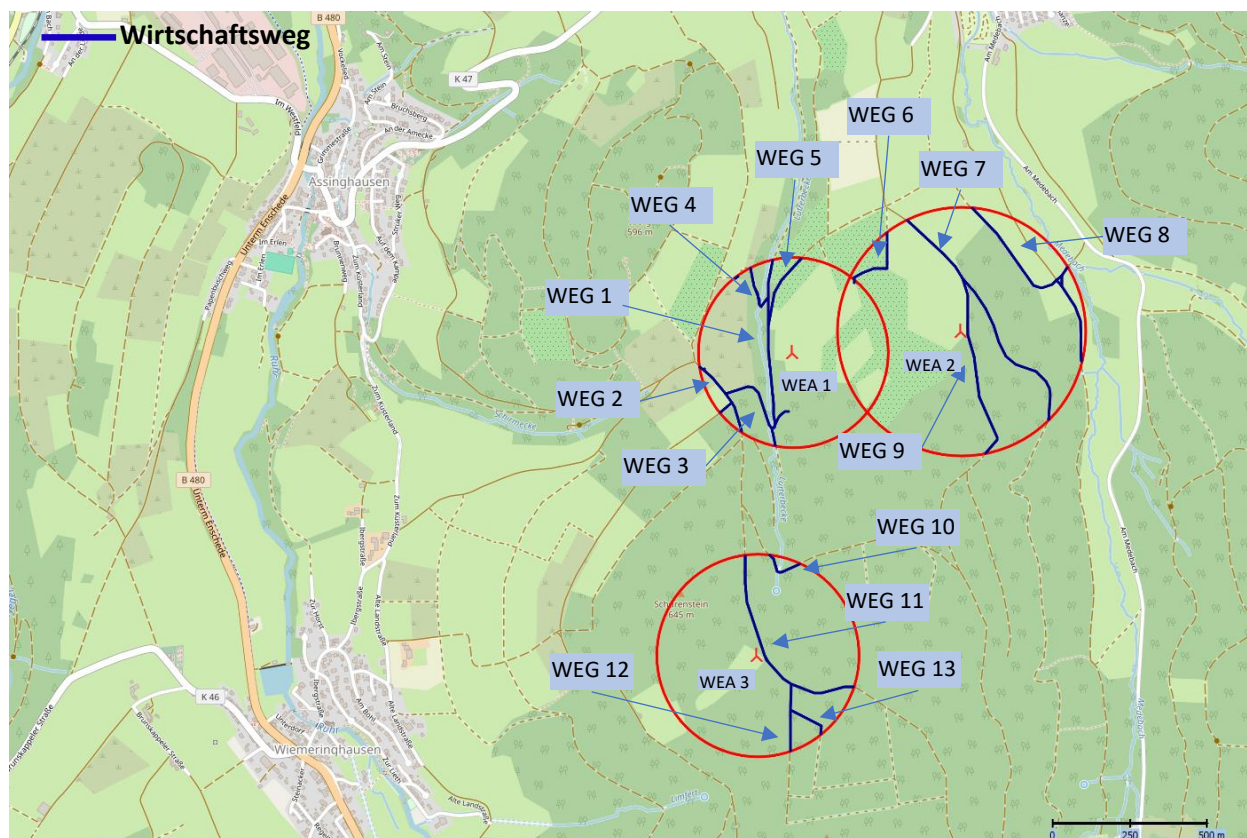


Abbildung 5: Darstellung der maximalen Fallweite und der Gefährdungsbereiche

Es wurden 13 Wirtschaftswege als Gefährdungsbereiche identifiziert. Bei der Standortbesichtigung am 06.05.2025 wurde die Beschaffenheit der Wege in Augenschein genommen und dokumentiert.

Tabelle 6: Beschreibung der Gefährdungsbereiche

Bez.	Kategorie	Beschreibung
1-13	Wirtschaftsweg	Teilweise unbefestigt, teilweise nur für landwirtschaftliche Fahrzeuge

5.2 Simulation Trefferhäufigkeit (Monte-Carlo)

Die Berechnung der Trefferhäufigkeit pro Quadratmeter erfolgt über das in Kapitel 4 beschriebene Flugbahnmodell gekoppelt mit einem statistischen Modell. Unter Variation (Monte-Carlo Simulation) verschiedener relevanter Parameter (Position und Typ des normierten Eisstücks, der Stellung des Rotorblattes, Windrichtung und Windgeschwindigkeit) werden pro Windenergieanlage 200.000 verschiedene Flugbahnen und Trefferpunkte generiert.

Für die Monte-Carlo Simulation werden die folgende Eingabedaten verwendet:

- Als WEA-Höhe wird im flachen Gelände die Entfernung vom Turmfuß bis zur WEA-Nabe angenommen.
- Im komplexen Gelände wird als maximale WEA-Höhe die Höhendifferenz zwischen dem tiefsten Punkt des Geländes und der WEA-Nabe angenommen.
- Die Eigenschaften der unter Kapitel 4 beschriebenen normierten Eisstücke
- Eine Eisbildung am Ende des Rotorblattes ist häufiger zu beobachten als am Ansatz des Rotorblattes [6]. Die Anzahl der Eisstücke steigt mit zunehmender Entfernung vom Rotoransatz zur Rotorblattspitze linear an.
- Die Position des Rotorblatts wird im Intervall $[0^\circ, 360^\circ]$ gleichverteilt berücksichtigt.
- Erdbeschleunigung $[g = 9,81 \text{ m/s}^2]$.
- Luftdichte $[p = 1,3 \text{ kg/m}^3]$ (aufgerundet bei 0°C Lufttemperatur).

Die folgende Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der Simulation der Trefferhäufigkeiten:

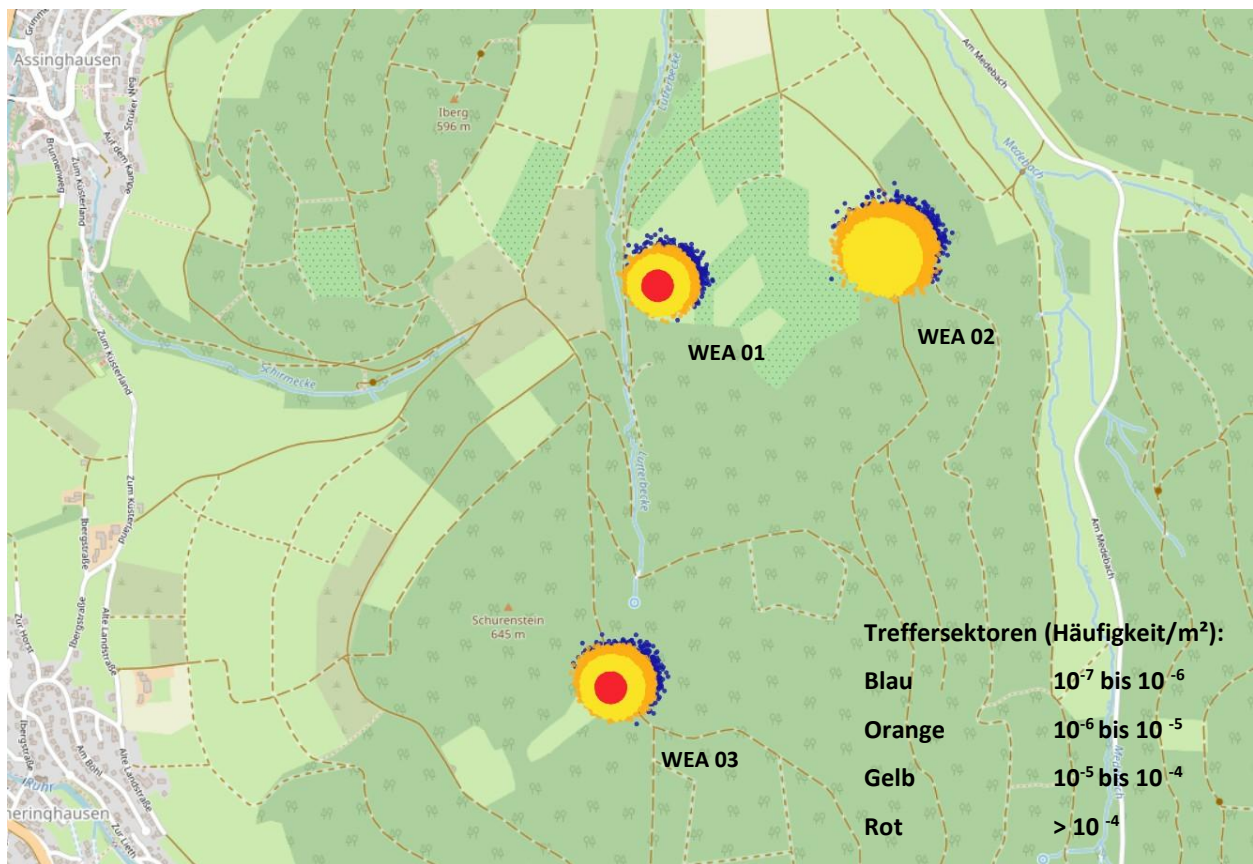


Abbildung 6: Treffersektoren gem. Monte-Carlo-Simulation für Eisfall im Trudelbetrieb

Das Ergebnis der Monte-Carlo Simulation zeigt keine Überschneidungen von relevanten Treffersektoren ($> 10^{-7}$) der betrachteten WEA untereinander.

6 Risikoanalyse

6.1 Bewertungskriterien

Um ein Risiko zu beschreiben, wird einerseits die Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts (Häufigkeit) abgeschätzt und andererseits werden die Auswirkungen des Ereignisses (Schadenshöhe) bemessen. Das ermittelte Risiko wird nachfolgend mit Akzeptanzkategorien verglichen, um es dann bewerten zu können. In der Bewertung kann eine größere Häufigkeit mit einer Verminderung der Schadenshöhe ausgeglichen werden und umgekehrt. Für den Eisfall wird für die Schadenshöhe immer von einem schweren Personenschaden bzw. Todesfall für jeden Treffer ausgegangen, um eine konservative Beurteilung vorzunehmen.

DIN EN ISO 12100:2011-03
EN ISO 12100:2010 (D)

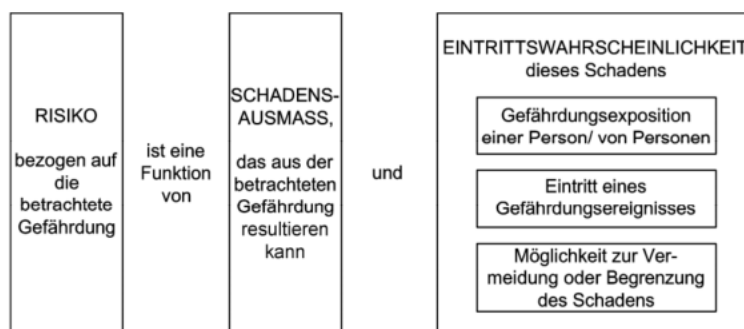


Abbildung 7: Risikoelemente nach DIN EN ISO 12100 [7]

Als ein Grenzwert für die Risikobewertung technischer Systeme wird die minimale endogene Mortalität (MEM) angenommen. Sie bezeichnet das endogene Sterberisiko (durch Krankheit oder angeborene Missbildung). Das endogene Sterberisiko ist für einen Europäer zwischen 5 und 15 Jahren am geringsten und beträgt 0,0002 Todesfälle pro Person und Jahr. Das Risiko durch ein technisches System zu Tode zu kommen, soll dieses Sterberisiko nicht signifikant erhöhen [8]. Da auf jeden Menschen mehrere technische Systeme gleichzeitig einwirken, soll der Grenzwert für neue Technologien deshalb auf 1/20 MEM begrenzt werden. **Als Schwellenwert für das individuelle Risiko wird also 0,00001 Todesfall pro Person und pro Jahr ($1 \cdot 10^{-5}$) gefordert.** Alle höheren Risiken durch technische Systeme sind als inakzeptabel zu bewerten.

Im Risikomanagement findet darüber hinaus eine weitere Risikobewertung Anwendung, das sogenannte ALARP-Prinzip (as low as reasonably practicable) [8]. Zwischen der Bewertung „inakzeptables Risiko“ und „allgemein akzeptables Risiko“ befindet sich ein Bereich des „tolerierbaren Risikos“ (ALARP-Bereich), der Risikominderungsmaßnahmen in unterschiedlich hohem Ausmaß erfordert [8].

6.2 Grenzwerte

In Anlehnung an das ALARP-Prinzip [8] werden nach [1] folgende Grenzwerte für das Individualrisiko und das Kollektivrisiko vorgeschlagen:

Tabelle 7: Grenzwerte für das Individualrisiko und Kollektivrisiko

Individual-Risiko	Kollektiv-Risiko	Bewertung
$> 10^{-5}$	$> 10^{-3}$	Das Risiko ist unakzeptabel hoch, es müssen Risikominderungsmaßnahmen durchgeführt werden
10^{-6} bis 10^{-5}	10^{-4} bis 10^{-3}	Das Risiko ist noch akzeptabel, aber im oberen ALARP Bereich, es sollten Risikominderungsmaßnahmen eingeleitet werden
10^{-7} bis 10^{-6}	10^{-5} bis 10^{-4}	Das Risiko ist akzeptabel und im unteren ALARP Bereich, Risikominderungsmaßnahmen sind in Abhängigkeit von Kosten-Nutzen-Aspekten in Erwägung zu ziehen

Die Grenzwerte für das Individualrisiko orientieren sich an den Vorgaben für technische Systeme. Für das Kollektiv-Risiko sind die vorgeschlagenen Werte auf Grundlage repräsentativer Studien und Statistiken standortspezifisch zu überprüfen und ggf. anzupassen.

6.3 Standortspezifischer Grenzwert für das Kollektivrisiko

Das Bundesamt für Statistik dokumentiert das Straßenunfallgeschehen in Deutschland. Es liegen die Statistiken einschließlich 2021 schon vor. Die Unfallzahlen für 2020 und 2021 werden aber als nicht repräsentativ betrachtet, da die Fahrleistung in diesen Jahren aufgrund der Pandemie geringer war. Es wird deshalb auf die Zahlen von 2019 zurückgegriffen [9]. Es ergibt sich aus der Statistik für 2019 ein Wert von $\approx 0,1$ (10^{-1}) Schwerverletzten oder Getöteten außerorts ohne Autobahn pro km bzw. 0,0001 (10^{-4}) Schwerverletzten oder Getöteten außerorts ohne Autobahn pro m. **Zur Vermeidung einer signifikanten Erhöhung des Risikos wird als oberer Grenzwert für das Kollektivrisiko 0,00001 ($1 \cdot 10^{-5}$) Schwerverletzter oder Getöteter pro m und Jahr herangezogen.**

Für den Standort *Olsberg Bruchhausen* ergeben sich danach folgende Grenzwerte:

Tabelle 8: Grenzwerte für das Individualrisiko und Kollektivrisiko am Standort Olsberg Bruchhausen

Individual-Risiko	Kollektiv-Risiko standortspezifisch pro m und Jahr	Bewertung
$> 10^{-5}$	$> 10^{-5}$	Das Risiko ist unakzeptabel hoch, es müssen Risikominderungsmaßnahmen durchgeführt werden
10^{-6} bis 10^{-5}	10^{-6} bis 10^{-5}	Das Risiko ist noch akzeptabel, aber im oberen ALARP Bereich, es sollten Risikominderungsmaßnahmen eingeleitet werden
$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	Das Risiko ist akzeptabel und im unteren ALARP Bereich, Risikominderungsmaßnahmen sind in Abhängigkeit von Kosten-Nutzen-Aspekten in Erwägung zu ziehen

6.4 Individualrisiko

Während die Häufigkeit eines Eisfallereignisses mittels Simulation der Treffer abgeschätzt wird, wird die Schadenshöhe konservativ immer als Todesfall, bzw. schwerer Personenschaden angenommen. Betrachtet werden einerseits Personen, die sich auf Straßen oder Wegen fortbewegen und andererseits Fahrzeuge, die auf Straßen oder Schienen fahren. Für Personen wird konservativ eine Trefferfläche von $0,18 \text{ m}^2$ und für Fahrzeuge eine Trefferfläche von 2 m^2 (Windschutzscheibe) angenommen [1].

Innerhalb des Gefährdungsbereichs identifizierte Wege oder Straßen sind nach Nutzungshäufigkeit zu kategorisieren und die Bewegungsgeschwindigkeit der Personen und Fahrzeuge entsprechend der Gegebenheiten vor Ort abzuschätzen.

Für das Individualrisiko werden Wirtschafts-, Wald und Wanderwege, Fahrradwege und Straßen (ausgenommen Bundesstraßen und Autobahnen) sowohl für Fußgänger als auch für Fahrzeuge beurteilt. Das Individualrisiko kann für Bundesstraßen und Autobahnen vernachlässigt werden. Für die Nutzungshäufigkeit wird konservativ für die Person ein Hin- und Rückweg an jedem Vereisungstag im Gefährdungsbereich angenommen.

6.5 Kollektivrisiko

Um das Kollektivrisiko abzuschätzen, werden Fahrzeuge auf Kreis-, Landes- und Bundesstraßen sowie Autobahnen berücksichtigt. Weiterhin kommen auch Industriegebiete oder Parkplätze in Betracht. Für wenig frequentierte Wege wie z.B. Wirtschaftswege ist das Kollektivrisiko zu vernachlässigen. Das Kollektivrisiko beinhaltet die Gesamtzahl der geschädigten Personen. Das Verkehrsaufkommen ist nach Möglichkeit auf Grundlage von Verkehrszählungen zu bemessen oder näherungsweise abzuschätzen. Für Fahrzeuge wird von 1,5 Personen im Fahrzeug ausgegangen. Dies entspricht dem mittlerem PKW-Besetzungsgrad von 1,5 Personen in Deutschland [10].

6.6 Summierung von Risiken

Jedes Individuum ist immer mehreren Risiken gleichzeitig ausgesetzt. Das können Risiken aus verschiedenen Quellen sein oder auch verschiedene Risiken, die gleichzeitig von einer Quelle ausgehen. Diesem Umstand wird in der Risikobewertung durch die niedrigen Grenzwerte begegnet.

In der Risikobewertung zum Eisfall werden Risiken durch andere technische Risikoquellen nicht hinzugerechnet. Kommt es jedoch durch mehrere Windenergieanlagen zu einer Überschneidung der Gefährdungsbereiche, summiert sich das Risiko Eisfall in diesem Bereich und muss entsprechend in der Berechnung berücksichtigt werden. Dabei ist es unerheblich, ob es sich dabei um bereits bestehende oder in der Planung befindliche Windenergieanlagen handelt. Risiken, die unterhalb der Relevanzgrenze von 10^{-7} liegen, können hinsichtlich der Summierung von Risiken vernachlässigt werden [1].

6.7 Berechnungsergebnisse

Für die im Gefährdungsbereich liegenden Wege wird die Aufenthaltsdauer anhand folgender Geschwindigkeiten berechnet.

Tabelle 9: Geschwindigkeiten für die Wegekategorien

Wegekategorie	Mittlere Geschwindigkeit	
	KFZ [km/h]	Fußgänger [km/h]
Wald- und Wirtschaftswege	20	3

Aufgrund der geringen Frequentierung wird auf eine Betrachtung des Kollektiv-Risikos verzichtet.

Auf Grundlage, der in Kapitel 5.2 ermittelten Trefferhäufigkeiten und auf Basis der zugrunde gelegten Aufenthaltsdauer, wurden die Risiken für die ermittelten Gefährdungsbereiche berechnet. Nachfolgend werden in Tabelle 10 die Risiken für die einzelnen WEA angegeben:

Tabelle 10: Berechnungsergebnisse

Wegekategorie		WEA1		WEA2		WEA 3	
		Individual- risiko [Treffer/Jahr]	Kollektiv- risiko [Treffer/Jahr und Meter]	Individual- risiko [Treffer/Jahr]	Kollektiv- risiko [Treffer/Jahr und Meter]	Individual- risiko [Treffer/Jahr]	Kollektiv- risiko [Treffer/Jahr und Meter]
Wald- und Wirtschaftswege	KFZ	$2,7 \cdot 10^{-6}$ (0,0000027)	-	-	-	--	-
	Fußgänger	$1,6 \cdot 10^{-6}$ (0,0000016)	-	-	-	-	-
Wald- und Wirtschaftswege	KFZ	-	-	$6,5 \cdot 10^{-5}$ (0,000065)	-	-	-
	Fußgänger	-	-	$3,9 \cdot 10^{-5}$ (0,000027)	-	-	-
Wald- und Wirtschaftswege	KFZ	-	-	$5,7 \cdot 10^{-5}$ (0,000057)	-	-	-
	Fußgänger	-	-	$3,4 \cdot 10^{-5}$ (0,000034)	-	-	-
Wald- und Wirtschaftswege	KFZ	-	-	-	-	$4,4 \cdot 10^{-4}$ (0,00044)	-
	Fußgänger	-	-	-	-	$2,6 \cdot 10^{-4}$ (0,00026)	-

6.8 Risikominderungsmaßnahmen

Für Ergebnisse der Risikoabschätzung, die oberhalb des allgemeinen Lebensrisikos liegen, sind Risikominderungsmaßnahmen in unterschiedlich hohem Ausmaß zu veranlassen. Die Minderungsmaßnahmen sind standortspezifisch und auf Grundlage der vorgenommenen Risikoanalyse auszuwählen.

Sollte die Risikoanalyse ein unakzeptabel hohes Risiko ausweisen, kommt neben einer Standortänderung der geplanten WEA auch eine Umplanung auf einen anderen hinsichtlich des Eisfallrisikos günstigeren Anlagentyps in Frage. Als weitere Maßnahme kommt eine Verhinderung der Rotorüberstreichung des gefährdeten Weges sein (Parallelstellung der Rotorkreisebene zum Verkehrsweg) oder eine sichere Fixierung des Rotors in Azimutstellung bei Eisfallbedingungen (Verhinderung des Trudelbetriebs) in Betracht. Eine Neubewertung des Eisfallrisikos ist zum Nachweis vorzulegen.

Bei einer Risikobewertung innerhalb des ALARP-Bereiches kommen Warnhinweise in Form von Beschilderung oder Warnbeleuchtung in Betracht, ggf. auch die Sperrung von Wegen oder Straßen.

6.9 Unsicherheiten der Eingangsdaten und des Berechnungsmodells

Die vorliegende Risikobewertung ist eine Abschätzung, die mit größter Sorgfalt auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes, der verfügbaren Daten und der Fragestellung angemessenen Modellen angefertigt wurde. Die Ergebnisse unterliegen jedoch Unsicherheiten, da z.B. eine Reihe Faktoren meteorologischen Ursprungs berücksichtigt werden, die auf Mittelwerten beruhen. Die Modellrechnungen basieren auf möglichst realistischen Annahmen zu den physikalischen Eigenschaften der Eisstücke, der Windrichtungen und -geschwindigkeiten und stellen eine repräsentative Verteilung der Trefferhäufigkeiten dar, können den Einzelfall jedoch nicht sicher abbilden. Die Form und Anzahl der Eisstücke, die Größe der Auftrefffläche und die Aufenthaltsdauern in den Gefährdungsbereichen wurden konservativ abgeschätzt und die Annahme, dass jeder Treffer einen Todesfall, bzw. einen schweren Personenschaden verursacht, ist ebenfalls als worst-case Annahme zu bewerten. Die Ergebnisse sind als näherungsweise Darstellung des Risikos zu verstehen und können nur der Orientierung dienen.

7 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Eurowind Energy GmbH plant am Standort *Olsberg Bruchhausen* (Nordrhein-Westfalen) östlich der Ortschaft *Willingen* und westlich der Ortschaft *Wiemeringhausen* die Errichtung von drei Windenergieanlagen des Herstellers Vestas. Bei den geplanten WEA handelt es sich um den Typ Vestas V162-6.2 MW mit einer Nabenhöhe von 169 m und einer Nennleistung im Leistungsbetrieb von 6,2 MW und den Typ Vestas V150-6.0 MW mit einer Nabenhöhe von 169 m und einer Nennleistung im Leistungsbetrieb von 6,0 MW. Innerhalb des nach der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen des DIBt [3] definierten Abstandes um die geplanten Windenergieanlagen wurden Verkehrswege identifiziert, so dass es erforderlich ist, eine standortspezifische Risikobewertung vorzunehmen. Die Risikobewertung wurde nach den International Recommendations for Ice Fall und Ice Throw Risk Assessments der IEA [1] durchgeführt.

Die geplanten Windenergieanlagen werden mit einem zertifizierten Eiserkennungssystem (Vestas Eiserkennung VID) ausgestattet. Über einen Sensor in jedem Rotorblatt werden die Schwingungsfrequenzen dauerhaft überwacht. Bei Eisansatz ändern sich die Schwingungsfrequenzen und der Anlagenbetrieb wird bei einem definierten Schwellenwert sowie einer Temperatur unter 5°C unterbrochen. Sobald kein Eisansatz mehr erkannt wird, wird der Betrieb der Anlage wieder aufgenommen.

Die Simulation der Trefferhäufigkeiten ergab keine Überschneidungen der relevanten Treffersektoren (Trefferhäufigkeit/m² <10⁻⁷) der WEA untereinander.

Die relevanten Treffersektoren der WEA 1 überschneiden einen Wirtschaftsweg. Das Risiko für landwirtschaftliche Fahrzeuge und Fußgänger liegt im mittleren ALARP Bereich. Als Risikominderungsmaßnahme sollte eine Warnbeschilderung auf dem betreffenden Streckenabschnitt als ausreichend betrachtet werden, da der Weg insbesondere im Winter außerhalb der Wirtschaftsperiode nur selten genutzt wird.

Die relevanten Treffersektoren der WEA 2 überschneiden zwei Wirtschaftswege. Das Risiko für landwirtschaftliche Fahrzeuge und Fußgänger liegt im hohen ALARP Bereich. Als Risikominderungsmaßnahme sollte eine Warnbeschilderung auf dem betreffenden Streckenabschnitt als ausreichend betrachtet werden, da der Weg insbesondere im Winter außerhalb der Wirtschaftsperiode nur selten genutzt wird.

Die relevanten Treffersektoren der WEA 3 überschneiden einen Wirtschaftsweg. Das Risiko für landwirtschaftliche Fahrzeuge und Fußgänger liegt im hohen ALARP Bereich. Als Risikominderungsmaßnahme sollte eine Warnbeschilderung auf dem betreffenden Streckenabschnitt als ausreichend betrachtet werden, da der Weg insbesondere im Winter außerhalb der Wirtschaftsperiode nur selten genutzt wird.

8 Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency (IEA), "IEA Wind TCP Task 19 Technical Report: International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments," Apr. 2022.
- [2] "Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge," Deutschland, zul. geänd. Jul. 2023.
- [3] Deutsches Institut für Bautechnik, "DIBt - Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)," Ausgabe Jan. 2023.
- [4] B. Wichura, "The Spatial Distribution of Icing in Germany Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurements of Icing," 15th Workshop on Atmospheric Icing of Structures, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, 2013.
- [5] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61400-1: Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements," Edition 4.0, 2019.
- [6] B. Tammelin *et al.*, "Wind energy production in cold climate (WECO)," DTU Library, 2000.
- [7] Deutsches Institut für Normung e. V., "DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen- Allgemeine Gestaltungsleitsätze-Risikobeurteilung und Risikominderung," Mar. 2011.
- [8] European Committee for Electrotechnical Standardization, "CENELEC EN 50126-2: Railway Applications- The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 2: Systems Approach to Safety," Brussels, Oct. 2017.
- [9] bast-Bundesanstalt für Straßenwesen, "Bundesweite Verkehrsdaten 2019: Verkehrstechnik Heft V365,"
- [10] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, "Tabellarische Grundausswertung Deutschland: Mobilität in Deutschland," Bonn, Dec. 2018.