



Gutachten zu Risiken durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen am Standort Grambow-Dümmer

Referenz-Nummer:

F2E-2019-WND-121, Rev. 0 - gekürzte Fassung

Auftraggeber:

SAB Projektentwicklung GmbH & Co. KG
Berliner Platz 1, 25524 Itzehoe

Die Ausarbeitung des Gutachtens erfolgte durch:

Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG
Borsteler Chaussee 178, 22453 Hamburg, www.f2e.de

Verfasser:

Dipl.-Met. Nicole Stoffels, Sachverständige, Hamburg, 26.08.2019

Geprüft:

Dr.-Ing. Thomas Hahm, Sachverständiger, Hamburg, 26.08.2019

Urheber- und Nutzungsrecht:

Urheber des Gutachtens ist die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG. Der Auftraggeber erwirbt ein einfaches Nutzungsrecht entsprechend dem Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (UrhG). Das Nutzungsrecht kann nur mit Zustimmung des Urhebers übertragen werden. Veröffentlichung und Bereitstellung zum uneingeschränkten Download in elektronischen Medien sind verboten. Eine Einsichtnahme der gekürzten Fassung des Gutachtens gemäß UVPG §23 (2) über die zentralen Internetportale von Bund und Ländern gemäß UVPG §20 Absatz (1) wird gestattet.



Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung.....	3
2 Grundlagen.....	4
2.1 Vereisung.....	4
2.2 Regelungen in den Normen zum Eiswurf- / Eisfallrisiko.....	5
2.3 Eintrittshäufigkeiten Bauteilversagen.....	7
2.4 Berechnung der Flugbahnen von Eisstücken.....	8
2.5 Vereisungshäufigkeiten.....	8
2.6 Berechnung der Flugbahn von Blattbruchstücken.....	10
2.7 Berechnung der Auftreffhäufigkeit nach Turmversagen.....	12
2.8 Grenzwerte und Risikobewertung.....	12
2.8.1 Grenzwerte individuelles Risiko.....	12
2.8.2 Grenzwerte kollektives Risiko.....	14
2.8.3 Risikobewertung.....	15
2.8.4 Addition von Risiken.....	18
3 Eingangsdaten.....	20
3.1 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte.....	20
3.2 Winddaten am Standort.....	24
3.3 Aufenthaltshäufigkeiten.....	24
3.4 Standortspezifische Grenzwerte für das kollektive Risiko.....	24
3.5 Eiserkennung.....	25
3.5.1 Eiserkennungssystem.....	25
3.5.2 Zustand nach Abschaltung.....	25
3.5.3 Azimut-Position bei Stillstand.....	25
4 Durchgeführte Untersuchungen.....	26
4.1 Standortbesichtigung.....	26
4.2 Vereisungshäufigkeit am Standort.....	27
4.3 Anzahl sich lösender Eisstücke.....	27
4.4 Betrachtung der Einzelrisiken.....	27
4.4.1 Eiswurf.....	28
4.4.2 Eisfall.....	28
4.4.3 Bauteilversagen.....	28
4.4.4 Ermittlung der Gefährdungsbereiche.....	28
4.5 Bewertung des Gesamtrisikos.....	28
5 Weitere Maßnahmen.....	29
5.1 Eisfall.....	29
6 Zusammenfassung.....	30
7 Formelzeichen und Abkürzungen.....	31



8 Literaturangaben.....	31
Anhang A: Detaillierte Berechnungsergebnisse Bauteilversagen.....	33
A.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten von Blattbruchstücken.....	33
A.2 Turmversagen.....	34
A.3 Verlust der Gondel bzw. des Rotors.....	34
A.4 Schadenshäufigkeiten.....	34
Anhang B: Detaillierte Berechnungsergebnisse Eisfall.....	36
B.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten.....	36
B.2 Schadenshäufigkeiten.....	37

1 Aufgabenstellung

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG ist beauftragt worden, die vorliegende Windparkkonfiguration hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf und Eisfall ausgehend von sich in Betrieb befindlichen bzw. stillstehenden (trudelnden) Windenergieanlagen (WEA) zu betrachten. Weiterhin wird eine Gefährdung durch Rotorblattbruch, Turmversagen und Verlust der Gondel bzw. des Rotors an den WEA betrachtet.

Die Bewertung erfolgt auf Basis des Gesamtrisikos durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen.



3 Eingangsdaten

3.1 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte

Am Standort Grambow-Dümmer (Mecklenburg-Vorpommern) plant der Auftraggeber die Errichtung von acht Windenergieanlagen (WEA 1 - 8).

Die vom Auftraggeber übermittelten Daten zur Windparkkonfiguration sind in Tabelle 3.1.2 bzw. Abbildung 3.1.2 dargestellt.

In der Umgebung befindet sich die Kreisstraße K28, welche im Rahmen dieser Untersuchung als Schutzobjekt definiert wurde (siehe Abbildung 3.1.1).

Die WEA 8 liegt in unmittelbarer Nähe zu dem Schutzobjekt und wird im Folgenden hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen betrachtet.

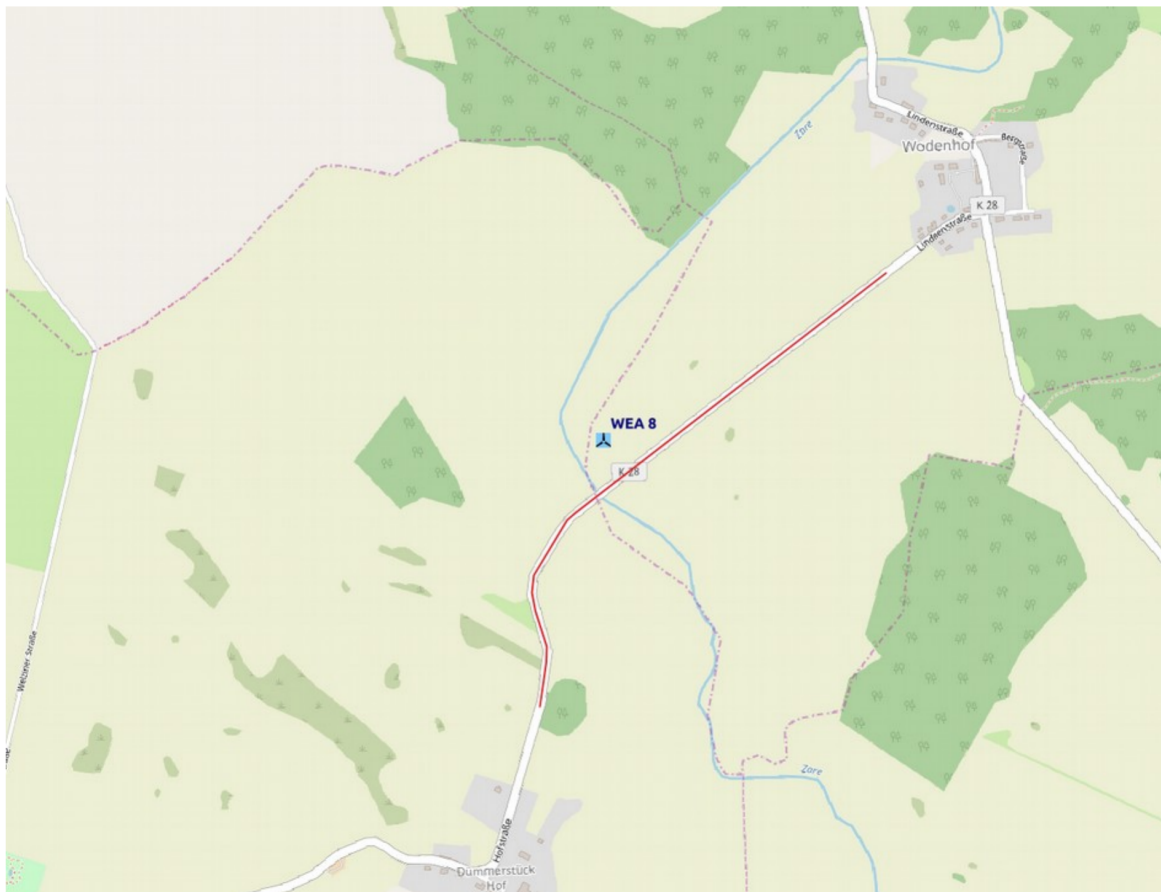


Abbildung 3.1.1: Betrachtetes Schutzobjekt (K28: rot) in der Umgebung der WEA 8 am Standort Grambow-Dümmer (Karte /1.4/).



Folgende Abstände wurden für die betreffende WEA ermittelt:

Tabelle 3.1.1: Abstände zu den Schutzobjekten.

	Lfd.Nr. WEA	Bezeichnung	Schutzobjekt	Abstand [m]
	8	WEA 8	K28	~110

Aus dem Vergleich mit den Wurfweiten entsprechend Tabelle 2.3.1 ergibt sich für die zu betrachtenden WEA:

- Eine Gefährdung durch Verlust der Gondel bzw. des Rotors ist nicht zu unterstellen.
- Eine Gefährdung durch ein Versagen des Turmes ist für die WEA 8 zu unterstellen.
- Eine Gefährdung durch Abwurf eines ganzen Rotorblattes ist für die WEA 8 zu unterstellen. Da die Wurfweiten für Blattbruchstücke jedoch deutlich größer sein können, ist auch eine Gefährdung durch Blattbruch für die betrachtete WEA 8 zu unterstellen.

Tabelle 3.1.2: Windparkkonfiguration

	Lfd.Nr. WEA	Bezeichnung	Koordinaten (UTM ETRS89 Zone 33)		Hersteller	WEA-Typ	P _N [MW]	RD [m]	NH [m]
			East	North					
	1	WEA 1	251095	5946795	Vestas	V162	5.6	162.0	166.0*
	2	WEA 2	250732	5946638	Vestas	V162	5.6	162.0	166.0*
	3	WEA 3	250234	5945824	Vestas	V162	5.6	162.0	166.0*
	4	WEA 4	250135	5945489	Vestas	V162	5.6	162.0	166.0*
	5	WEA 5	250105	5945140	Vestas	V162	5.6	162.0	166.0*
	6	WEA 6	250627	5945872	Vestas	V162	5.6	162.0	166.0*
	7	WEA 7	250748	5945566	Vestas	V162	5.6	162.0	166.0*
	8	WEA 8	250967	5945181	Vestas	V162	5.6	162.0	166.0*

*: Zuzüglich zur angegebenen Nabenhöhe weist die WEA eine Fundamenterhöhung von 3m auf.

Alle Benennungen von WEA im Dokument beziehen sich auf die Nomenklatur von Spalte 2 (Lfd. Nr.) in Tabelle 3.1.2.

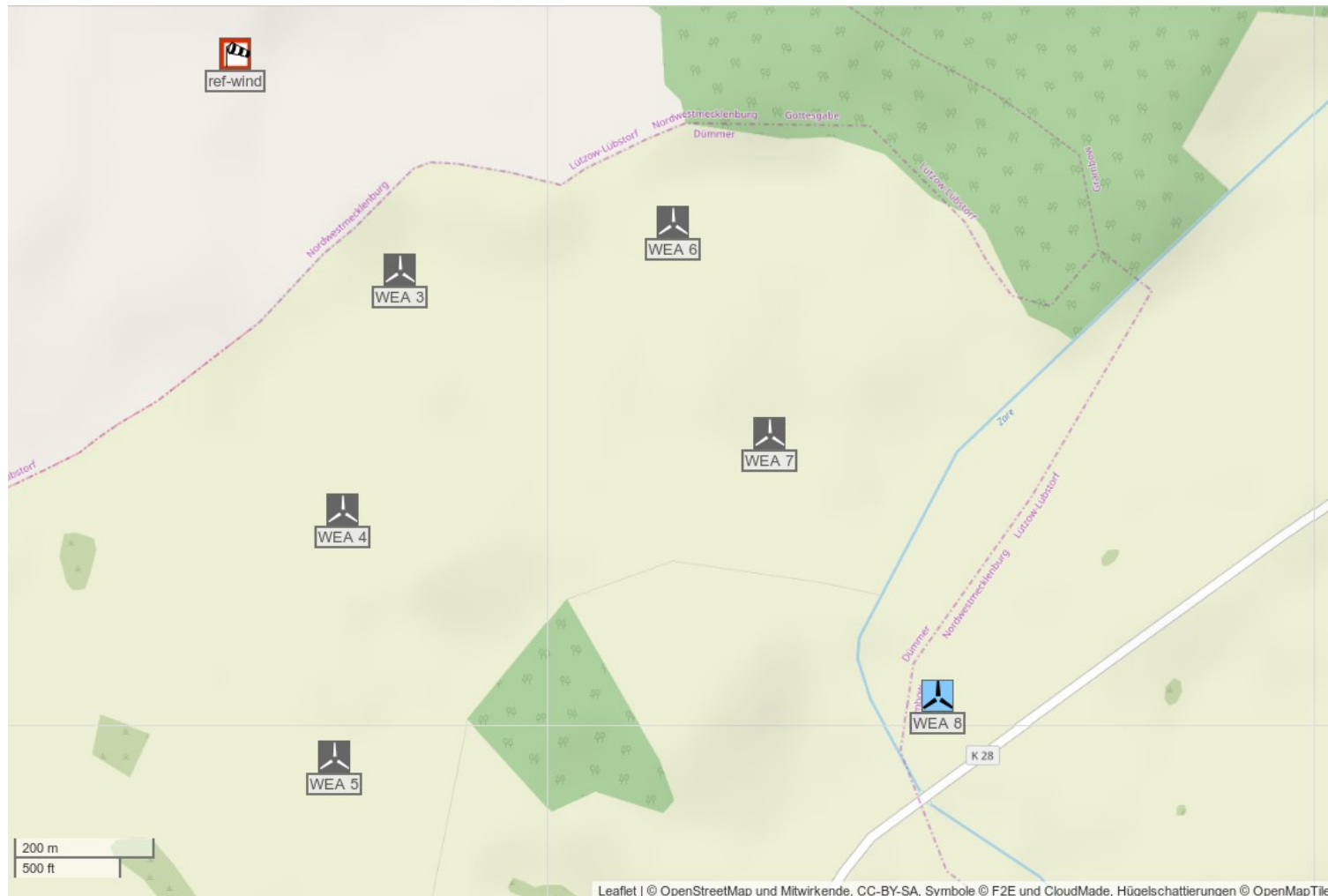


Abbildung 3.1.2:
Lage des Standortes,
Karte /1.4/.

-  zu betrachtende WEA
-  zu berücksichtigende WEA
-  weitere WEA
-  Referenzpunkt der Winddaten



3.2 Winddaten am Standort

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und Windgeschwindigkeiten am Standort wurden /3.1/ entnommen und sind in Tabelle 3.2.1 dargestellt.

Die vorliegenden Daten werden als richtig und repräsentativ für die freie Anströmung am Standort Grambow-Dümmer vorausgesetzt.

Eine Filterung entsprechend den Empfehlungen aus /2.1/ für Perioden, bei denen Eiswurf oder Eisfall potentiell auftreten kann, konnte auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Daten nicht durchgeführt werden.

Tabelle 3.2.1: Winddaten am Standort (f: Häufigkeit der Windrichtung; A und k: Skalen- und Formparameter der Weibull-Verteilung).

Ref.-Pkt.		N	NNO	ONO	O	OSO	SSO	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW	Ges.
Wind 1	A	5.9	6.3	7.8	9.3	9.2	9.3	8.9	9.1	9.5	9.0	8.3	7.2	8.8
	k	1.89	2.46	2.51	2.98	2.97	2.85	2.43	2.88	4.03	3.01	3.07	2.10	2.81
	f	0.029	0.039	0.070	0.096	0.061	0.059	0.073	0.094	0.183	0.141	0.106	0.049	1.000
Bezugswerte														
Koordinaten des Referenzpunktes (UTM ETRS89 Zone 32)								East			North			
Wind 1 (WEA 8 zugeordnet)								646970			5941798			
Höhe über Grund h								169m						

Die Parameter der Weibull-Verteilung werden genutzt, um die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen auf die jeweiligen Windgeschwindigkeiten umzurechnen.

3.3 Aufenthaltshäufigkeiten

Nach /3.2/ wurde auf der K28 zwischen der L042 und Wodenhof eine Verkehrsbelastung von 353 Kfz pro Tag ermittelt. Im Folgenden wird von einem Verkehrsaufkommen von 400 Kfz pro Tag auf der K28 ausgegangen.

Auf Grund von Straßenbeschaffenheit und -verlauf wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeug-Geschwindigkeit bei 80 Kilometern pro Stunde liegt.

3.4 Standortspezifische Grenzwerte für das kollektive Risiko

Für Kreisstraßen und sonstige Straßen, für die das kollektive Risiko maßgeblich ist, gilt der pauschale Grenzwert für das kollektive Personenrisiko von $1.0 \cdot 10^{-3}$ (siehe Kapitel 2.8.2).



3.5 Eiserkennung

3.5.1 Eiserkennungssystem

Die WEA 8 ist mit der Eiserkennung Vestas Ice Detection™ System (VID) ausgestattet /3.3/. Dieses System ist baugleich zur Eiserkennung BLADEcontrol Ice Detector (BID) der Firma Weidmüller. Dabei werden zwei bestimmte Eigenfrequenzen an den Blättern gemessen. Wird eine Änderung der Frequenzen festgestellt, lässt dies auf Eisansatz schließen und die Anlage schaltet ab. Dieses System erkennt Eis auch im Trudelbetrieb, so dass die Anlage nach dem Abtauen selbstständig wieder in Betrieb genommen wird, soweit dies behördlich erlaubt ist.

Das verwendete System zur Eiserkennung ist entsprechend der Richtlinie des Germanischen Lloyd für die Zertifizierung von Systemen zur Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen /2.5/ typgeprüft /3.4/.

3.5.2 Zustand nach Abschaltung

Nach einer Abschaltung durch das Eiserkennungssystem geht die WEA in einen definierten Zustand. Angaben zu Trudeldrehzahlen, Blattstellung und Windnachführung der WEA wurden gemäß /3.5/ umgesetzt.

3.5.3 Azimut-Position bei Stillstand

Die WEA 8 kann nach einer Abschaltung durch die Eiserkennung in eine fixe Azimut-Position gefahren werden. Damit kann die Trefferhäufigkeit von Eisstücken auf die Schutzobjekte verringert werden, indem im Falle eines Verkehrsweges z.B. der Rotor parallel zum Fahrbahnrand ausgerichtet wird. Die Azimut-Position wird dabei definiert über den Azimutwinkel zwischen geografisch Nord und der Achsenrichtung der WEA.

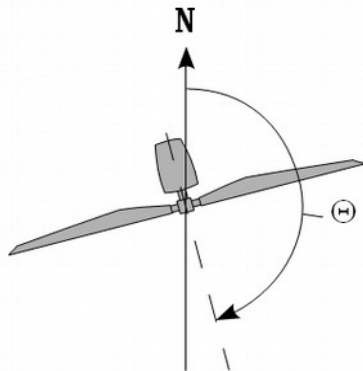


Abbildung 3.5.3.1: Definition des Azimutwinkels Θ .

In den in den Anhang B dargestellten Ergebnissen wurden keine festen Azimut-Positionen nach Eisabschaltung berücksichtigt.

4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Standortbesichtigung

Eine Standortbesichtigung ist im Rahmen der Bewertung des Risikos durch Eiswurf, Eisfall und Bauteilversagen nicht durch ein Regelwerk vorgeschrieben oder geregelt. Eine Standortbesichtigung empfiehlt sich, wenn die Situation vor Ort nicht ausreichend bekannt ist.

Im Rahmen der Standortbesichtigung werden die potentiellen Schutzobjekte vor Ort dokumentiert und besichtigt. Es werden Informationen zur Beschaffenheit der Schutzobjekte, wie z.B. Straßenbelag, Geschwindigkeitsbeschränkungen und Fahrverboten bei Verkehrswegen aufgenommen.

Die Standortbesichtigung dient nicht zur Bestimmung der Aufenthaltshäufigkeit von Personen in oder auf Schutzobjekten, der Bestimmung der Frequentierung von Verkehrswegen, der Bestimmung der Klimatologie des Standortes oder der Verifizierung der Windparkkonfiguration.

Die Schutzobjekte vor Ort wurden vom Auftraggeber festgelegt (siehe Kapitel 3.1). Aufgrund der vorhandenen Datenlage zu den Schutzobjekten wurde auf eine Standortbesichtigung verzichtet.



4.2 Vereisungshäufigkeit am Standort

Entsprechend Kapitel 2.5 ergibt sich am Standort Grambow-Dümmer eine Vereisungshäufigkeit von 1.8% entsprechend 6.7 Vereisungstagen pro Jahr.

4.3 Anzahl sich lösender Eisstücke

Die Anzahl der insgesamt am Standort zu unterstellenden Eisstücke ergibt sich aus der Anzahl der Eisstücke pro Vereisungsereignis und der Anzahl der Vereisungstage.

Für die WEA ist konservativ davon auszugehen, dass es an allen Vereisungstagen zu einer vollständigen Vereisung der WEA kommt.

In Übereinstimmung mit /2.1/ kann die insgesamt zu berücksichtigende Eismasse abhängig von der Blattgeometrie anhand des Vereisungslastfalles der internationalen Richtlinie für WEA /2.4/ definiert werden. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Masse der Eisstücke lässt sich daraus eine Anzahl Eisstücke pro Vereisung ableiten. Die Anzahl ist dabei unabhängig davon, ob ein Risiko durch Eisfall oder Eiswurf betrachtet wird, und ergibt im vorliegenden Fall 195.4 Eisstücke pro Vereisung. Damit ergeben sich bei 6.7 Vereisungsfällen insgesamt 1309 Eisstücke pro Jahr.

4.4 Betrachtung der Einzelrisiken

Aus der in Kapitel 4.3 ermittelten Gesamtanzahl von Eisstücken, der Windgeschwindigkeitsverteilung gemäß Tabelle 3.2.1, der Geometrie und Betriebsweise der WEA sowie der Topografie am Standort, ergeben sich in der Umgebung einer WEA für jeden Punkt unterschiedliche Trefferhäufigkeiten von Eisstücken. Hinzu kommen die Trefferhäufigkeiten durch Bauteilversagen. Auf Basis dieser Trefferhäufigkeiten ist die spezifische Gefährdung von Personen abhängig von der Wegstrecke, den die Personen bzw. die mit Personen besetzten Fahrzeuge in der Umgebung der WEA nehmen, der Geschwindigkeit, mit der sie sich fortbewegen sowie der Häufigkeit, mit der ein bestimmter Weg genommen wird. Verkehrswege und andere Freiflächen bzw. Gebäude, die keinen Schutz gegen Eisstücke bieten, unterscheiden sich beim Risiko durch Eiswurf oder Eisfall nur dahingehend, dass die Wegstrecke bei Verkehrswegen deutlich vorgegeben ist, während sie bei Freiflächen typischerweise durch eine allgemeine Aufenthaltshäufigkeit ersetzt wird.

Eine spezifische Gefährdung lässt sich daher nicht in Form einer Gefährdungskarte in der Umgebung einer WEA darstellen, da für jeden Punkt in der Umgebung einer WEA theoretisch unendlich viele Szenarien denkbar sind. Die Gefährdung ist daher stets in Bezug zu einem Schutzobjekt unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen zu ermitteln.



4.4.1 Eiswurf

Aufgrund der vorhandenen zertifizierten Systeme zur Eiserkennung kann der Betrieb bei potentiell gefährlichem Eisansatz ausgeschlossen werden. Damit ergibt sich keine Gefährdung durch Eiswurf von den betrachteten WEA.

4.4.2 Eisfall

Entsprechend Kapitel 2.2 besteht auch bei vorhandener funktionssicherer Eiserkennung stets ein Risiko durch Eisfall in der Umgebung einer WEA. Dieses Risiko ist daher standortspezifisch zu bewerten.

Details zu den Berechnungen sind im Anhang B dargestellt.

4.4.3 Bauteilversagen

Ein Risiko durch Bauteilversagen ist stets entsprechend der in Kapitel 2.3 aufgeführten Eintrittshäufigkeiten zu unterstellen.

Details zu den Berechnungen sind im Anhang A dargestellt.

4.4.4 Ermittlung der Gefährdungsbereiche

Aus den Berechnungen ergeben sich folgende WEA, die zum Risiko im Gefährdungsbereich der zu betrachtenden WEA beitragen:

Tabelle 4.4.4.1: Für das Gesamtrisiko der zu betrachtenden WEA zu berücksichtigende WEA am Standort Grambow-Dümmer.

Zu betrachtende WEA	Beiträge benachbarter WEA	
	Eiswurf/Eisfall	Bauteilversagen
WEA 8	---	---

4.5 Bewertung des Gesamtrisikos

Mit den Detailergebnissen für Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen ergeben sich am Standort Grambow-Dümmer folgende Gesamtrisiken:



Tabelle 4.5.1: Kollektive und individuelle Risiken für Personenschäden am Standort Grambow-Dümmer.

Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
WEA 8	Kreisstraße K28	$3.74 \cdot 10^{-4}$ (einmal in 2600 Jahren)	$1.25 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 801 000 Jahren)

Wie in Kapitel 2.8 dargestellt, erfolgt die Bewertung des individuellen und kollektiven Risikos durch eine Einteilung in vier Bereiche von inakzeptabel bis uneingeschränkt akzeptabel. Damit ergeben sich bezogen auf die betrachteten WEA folgende Ergebnisse für das Gesamtrisiko. Es ist in Tabelle 4.5.2 jeweils nur das in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen zu betrachtende Risiko dargestellt (siehe Kapitel 2.8).

Tabelle 4.5.2: Gefährdung durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen am Standort Grambow-Dümmer.

Gesamtbewertung der einzelnen WEA			
Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
WEA 8	Kreisstraße K28	akzeptabel - Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen	---

5 Weitere Maßnahmen

5.1 Eisfall

Da die für die WEA 8 ermittelten Risiken bezüglich der Kreisstraße K28 im oberen ALARP-Bereich liegen, sind weitere Maßnahmen in Betracht zu ziehen, um das Risiko noch weiter zu senken.

Da die WEA bereits mit einer zertifizierten Eiserkennung ausgerüstet ist, verbleibt als weitere mögliche Maßnahme im vorliegenden Fall eine Ausrichtung der Azimut-Position des Rotors der WEA nach Abschaltung durch die Eiserkennung (siehe Kapitel 2.8).

Für die WEA 8 empfehlen wir nach Abschaltung auf Grund von Eisansatz den Rotor der WEA so auszurichten, dass möglichst wenige Eisstücke die Kreisstraße K28 treffen und entsprechend den Vorgaben des Herstellers die Azimutposition des Rotors bis zur maximal möglichen Windgeschwindigkeit beizubehalten. Die erforder-



derlichen Werte sind in Tabelle 5.1.1 dargestellt (zur Definition des Azimutwinkels siehe Abbildung 3.5.3.1).

Tabelle 5.1.1: Empfohlene Azimut-Positionen nach Abschaltung auf Grund von Eisansatz für den Rotor der WEA.

	Azimutwinkel bei Stillstand [°]
WEA 8	142

6 Zusammenfassung

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG ist beauftragt worden, die vorliegende Windparkkonfiguration hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf und Eisfall sowie durch Bauteilversagen ausgehend von den stillstehenden (trudelnden) bzw. in Betrieb befindlichen WEA zu betrachten und zu bewerten.

Als Schutzobjekt wurde die Kreisstraße K28 in der Nachbarschaft der WEA definiert.

Eine mögliche Ursache für ein Umstürzen der WEA, einen Absturz des Rotors, einen Absturz der Gondel oder den Verlust des ganzen bzw. Teilen eines Rotorblattes ist ein Brand der WEA. Das durch einen Brand hierdurch verursachte Risiko ist daher in der Risikobetrachtung für das Bauteilversagen enthalten und mit abgedeckt.

Die abschließende Bewertung des Gesamtrisikos ist in Tabelle 6.1 für alle zu betrachtenden WEA bezüglich der relevanten Schutzobjekte dargestellt. Zu berücksichtigende benachbarte WEA (siehe Kapitel 4.4.4) sind in der Bewertung enthalten. Schutzobjekte, die von der jeweiligen WEA nicht getroffen werden, sind in Tabelle 6.1 nicht aufgeführt.

Maßnahmen, die in den Berechnungen berücksichtigt wurden und entsprechend für die getroffene Aussage unabdingbar sind, werden in der Spalte „Maßnahmen - erforderlich“ aufgeführt.

Maßnahmen, die umgesetzt werden sollten, weil das Risiko im oberen ALARP-Bereich (siehe Kapitel 2.8) liegt, werden in der Spalte „Maßnahmen - empfohlen“ aufgeführt.

Tabelle 6.1: Bewertung des Gesamtrisikos.

Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Risiko- bewertung	Maßnahmen	
			erforderlich	empfohlen
WEA 8	Kreisstraße K28	akzeptabel	---	Kapitel 5



7 Formelzeichen und Abkürzungen

WEA	Windenergieanlage	
RD	Rotordurchmesser	
NH	Nabenhöhe	
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989	
UTM	Universale Transversale Mercator Projektion	
WGS84	World Geodetic System 1984	
ü. NN	über Normalnull	
MEM	Minimale endogen Sterblichkeit	
Kfz	Kraftfahrzeug	
A	Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung	[m/s]
k	Formparameter der Weibullverteilung	[-]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]
h	Höhe	[m]
Θ	Azimutwinkel	[°]

8 Literaturangaben

Allgemein

- /1.1/ Bengt Tammelin et. al.; Wind Energy Production in Cold climates; Meteorological publications No.41, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, February 2000.
- /1.2/ International Energy Agency (IEA), IEA Wind Task 19, State-of-the-Art of Wind Energy in Cold Climates, Edition October 2012.
- /1.3/ Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Verkehrstechnik Heft V 291, Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko; Bergisch Gladbach, August 2017.
- /1.4/ OpenStreetMap und Mitwirkende; siehe Internet: <http://www.openstreetmap.org>, <http://opendatacommons.org>, <http://creativecommons.org>.
- /1.5/ Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2006, Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- /1.6/ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Mobilität in Deutschland 2008; Ergebnisbericht, Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends; Bonn und Berlin, Februar 2010.
- /1.7/ Schneider J., Schlatter H. P.; Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure; 1. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart, 1994.
- /1.8/ Wichura, B., 2013. The Spatial Distribution of Icing in Germany Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurements of Icing, Proceedings of the 15th Interna-



- tional Workshop On Atmospheric Icing Of Structures (IWAIS 2013). Compusult Ltd., St. John's, Newfoundland and Labrador, September 8-11, 2013, pp. 303-309.
- /1.9/ HSE, Health and safety Executive. (n.d.); Risk analyses or 'predictive' aspects of comah safety reports guidance for explosives sites - The COMAH Safety Report Process for Predictive Assessment of Explosives Sites, downloaded 2014-08-21; Retrieved from <http://www.hse.gov.uk/comah/>
- /1.10/ Bredesen, R. E.; Kjeller Vindteknikk AS; Icethrow from wind turbines - Assessment and risk management; IEA Wind Task 19, Präsentation bei der Winterwind International Wind Energy Conference, Åre 2017.
- /1.11/ C. J. Faasen, P. A. L. Franck, A. M. H. W. Taris; Handboek Risicozonering Windturbines, Eindversie, 3e geactualiseerde versie mei 2013, en Herziene versie 3.1 september 2014; Nederland.
- /1.12/ T. Hahm, J. Kröning; Rotorblattversagen – Gefährdungsanalyse für die Umgebung von Windenergieanlagen; 6. Deutsche Windenergie-Konferenz DEWEK 2002.
- /1.13/ J. Kesenheimer; Grundlagenforschung zur Restnutzungsdauer von Windenergieanlagen; Technische Universität Hamburg-Harburg, April 2003.

Normen

- /2.1/ International Energy Agency (IEA), IEA Wind TCP Task 19; International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments; October 2018.
- /2.2/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen - Fassung Juni 2015 bzw. Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen, Ausgabe 2017/1.
- /2.3/ DIN EN 50126; Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS); Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000.
- /2.4/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1 Ed. 4, Wind turbines - Part 1: Design requirements; 88/521/CD Committee Draft, 22. Oktober 2015.
- /2.5/ Germanischer Lloyd; GL Rules and Guidelines - IV Industrial Services - Part 4; Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, Edition 2013.

Projektspezifisch

- /3.1/ UL International GmbH; Windpotenzialabschätzung, Grambow; Ref. Nr.: UL-GER-WP18-12609111-01; 30.11.2018; Oldenburg, Deutschland.
- /3.2/ Kreisverwaltung Ludwigslust-Parchim, Fachdienst Straßen- und Tiefbau; Verkehrsbelastung auf der K28, telefonisch mitgeteilt durch Hr. Zimek am 21.08.2019.
- /3.3/ Vestas Wind Systems A/S; Allgemeine Spezifikation Vestas Eiserkennung (VID) - V105/V112/ V117/V126/V136-3.45/3.6MW 50/60Hz V117/V136/V150 - 4.0/4.2MW 50/60Hz V150/V162 - 5.6MW 50/60Hz; Dokumentennr. : 0051-2750 V07; 17. Januar 2019.
- /3.4/ DNV GL Renewables Certification; Type Certificate Ice Detection System BLADEcontrol Ice Detector (BID); Certificate No. TC-DNVGL-SE-04314-0; Hamburg, 2018-10-18.
- /3.5/ Vestas Central Europe; Angaben zum Trudelbetrieb nach Abschaltung wegen Eisansatz; per E-Mail am 13.12.2017, 15.10.2018 und 19.11.2018.



Anhang A: Detaillierte Berechnungsergebnisse Bauteilversagen

A.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten von Blattbruchstücken

Tabelle A.1.1 listet die maximal erreichte Flugweite der Bruchstücke bezogen auf den Fußpunkt der WEA auf.

Tabelle A.1.1: Maximale Flugweite der betrachteten Blattbruchstücke am Standort Grambow-Dümmer.

Lfd. Nr. WEA	Maximale Flugweite [m]
8	380.4

In der Abbildung A.1.1 sind die daraus für die Umgebung der WEA 8 resultierenden Auftreffhäufigkeiten pro Rasterfläche (25m²) und Jahr dargestellt. Erkennbar sind die größeren Auftreffhäufigkeiten quer zur Hauptwindrichtung.

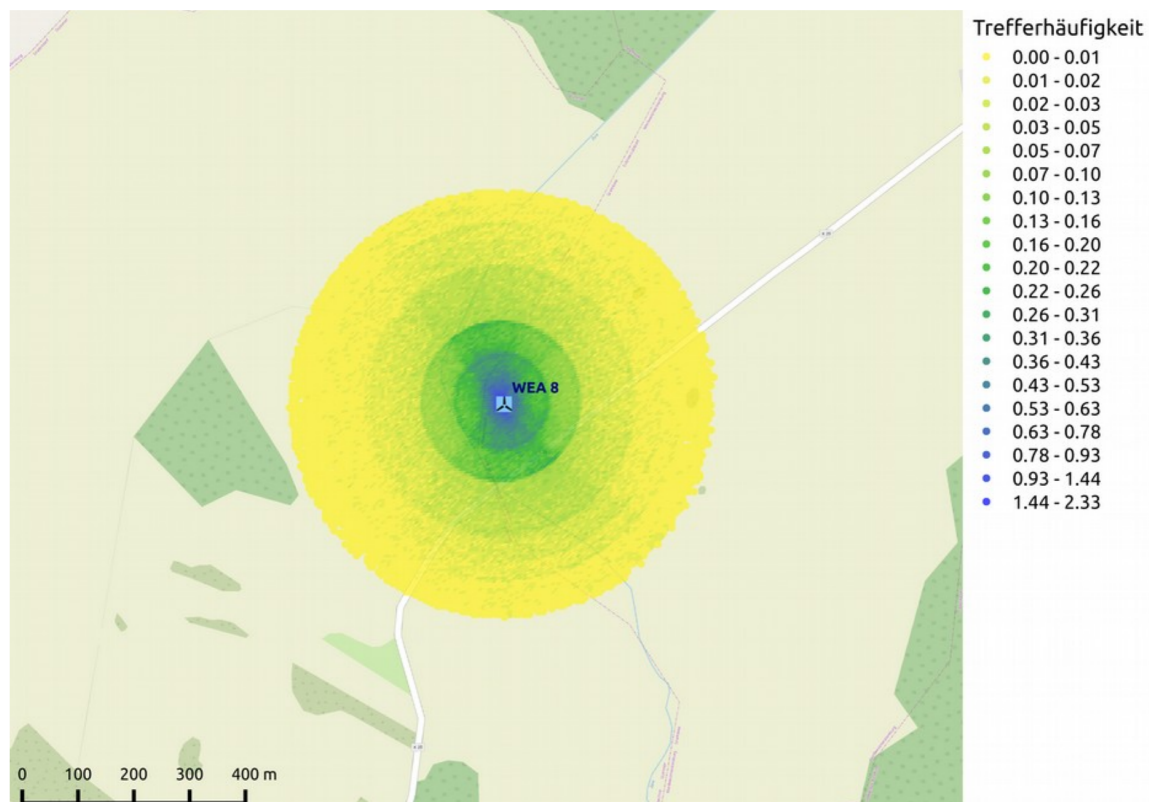


Abbildung A.1.1: Trefferhäufigkeiten von Blattbruchstücken pro Rasterfläche (25m²) in einer Millionen Jahren in der Umgebung der WEA 8 vom Typ Vestas V162 5.6MW, NH 166m zzgl. 3m Fundamenterhöhung am Standort Grambow-Dümmer (Karte /1.4/).



A.2 Turmversagen

Der Abstand zu dem Schutzobjekt liegt für die WEA 8 unterhalb des in Tabelle 2.3.1 genannten maximalen Einflussbereiches für den Fall Turmversagen. Eine Gefährdung des Schutzobjektes infolge Turmversagen ist daher für diese WEA zu unterstellen.

A.3 Verlust der Gondel bzw. des Rotors

Der Abstand des Schutzobjektes liegt oberhalb des in Tabelle 2.3.1 genannten maximalen Einflussbereiches für einen Verlust der Gondel bzw. des Rotors. Eine Gefährdung des Schutzobjektes durch einen Verlust der Gondel bzw. des Rotors wird daher ausgeschlossen.

A.4 Schadenshäufigkeiten

Aus den ermittelten Flugbahnen ergeben sich für die Gefährdungsbereiche der zu betrachtenden WEA gemäß Kapitel 4.4.4 die in Tabelle A.4.1 aufgeführten Auftreffhäufigkeiten für Blattbruchstücke und die in Tabelle A.4.2 aufgeführten Auftreffhäufigkeiten infolge Turmversagens.

Tabelle A.4.1: Auftreffhäufigkeiten von Blattbruchstücken für die Gefährdungsbereiche am Standort Grambow-Dümmer.

Lfd.Nr. WEA	Schutzobjekt	Beiträge WEA	Auftreffhäufigkeit eines Blattbruchstückes pro Jahr
WEA 8	Kreisstraße K28	8	$7.97 \cdot 10^{-6}$

Tabelle A.4.2: Auftreffhäufigkeiten infolge Turmversagen für die Gefährdungsbereiche am Standort Grambow-Dümmer.

Lfd.Nr. WEA	Schutzobjekt	Beiträge WEA	Auftreffhäufigkeit infolge Turmversagens pro Jahr
WEA 8	Kreisstraße K28	8	$2.52 \cdot 10^{-5}$

Für die Bewertung von Personenschäden wird davon ausgegangen, dass jedes Kfz im Mittel mit 1.5 Personen besetzt ist. Dies entspricht der durchschnittlichen Besetzungszahl von Pkw in Deutschland /1.6/. Eine infolge eines Treffers durch Eis resultierende Verkettung von Unfällen wurde nicht betrachtet.

Mit den genannten Ausführungen ergeben sich die in Tabelle A.4.3 aufgelisteten Unfallhäufigkeiten bzw. Risiken.



Das in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen zu betrachtende Risiko ist in Tabelle A.4.3 jeweils fett gedruckt.

Relevante Überschreitungen der Risikogrenzwerte gemäß Tabelle 2.8.3.1 bzw. Werte im ALARP-Bereich, die eventuell weitere Maßnahmen erfordern, treten in Tabelle A.4.3 nicht auf.

Tabelle A.4.3: Kollektive und individuelle Risiken für Personenschäden am Standort Grambow-Dümmer durch Blattbruch und Turmversagen.

WEA	Schutzobjekt	Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
WEA 8	Kreisstraße K28	$2.21 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 451 000 Jahren)	$7.38 \cdot 10^{-9}$ (einmal in 135 Mio. Jahren)



Anhang B: Detaillierte Berechnungsergebnisse Eisfall

B.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten

Tabelle B.1.1 listet die maximal erreichte Flugweite der Bruchstücke bezogen auf den Fußpunkt der WEA auf. Die maximale Flugweite bezieht sich auf ein 99.95% Quantil. Einzelne Eisstücke erreichen größere Flugweite, sind aber für die Risikobewertung nicht relevant und werden auch nicht bei den Trefferhäufigkeiten berücksichtigt.

Tabelle B.1.1: Maximale Flugweite der betrachteten Eisstücke am Standort Grambow-Dümmer.

WEA	Maximale Flugweite [m]	Maximale Flugweite / (Nabenhöhe + Rotordurchmesser)
WEA 8	274.1	0.828

Die Flugweiten erreichen einen Maximalwert vom 0.828fachen aus Nabenhöhe plus Rotordurchmesser der WEA. Sie liegen damit unter dem in /1.1/ bei pauschaler Betrachtung geforderten konservativen Abstand vom 1.5fachen aus Nabenhöhe plus Rotordurchmesser der WEA.

In der Abbildung B.1.1 sind die für die Umgebung der WEA resultierenden Treffer pro 16 Quadratmeter und Jahr dargestellt.

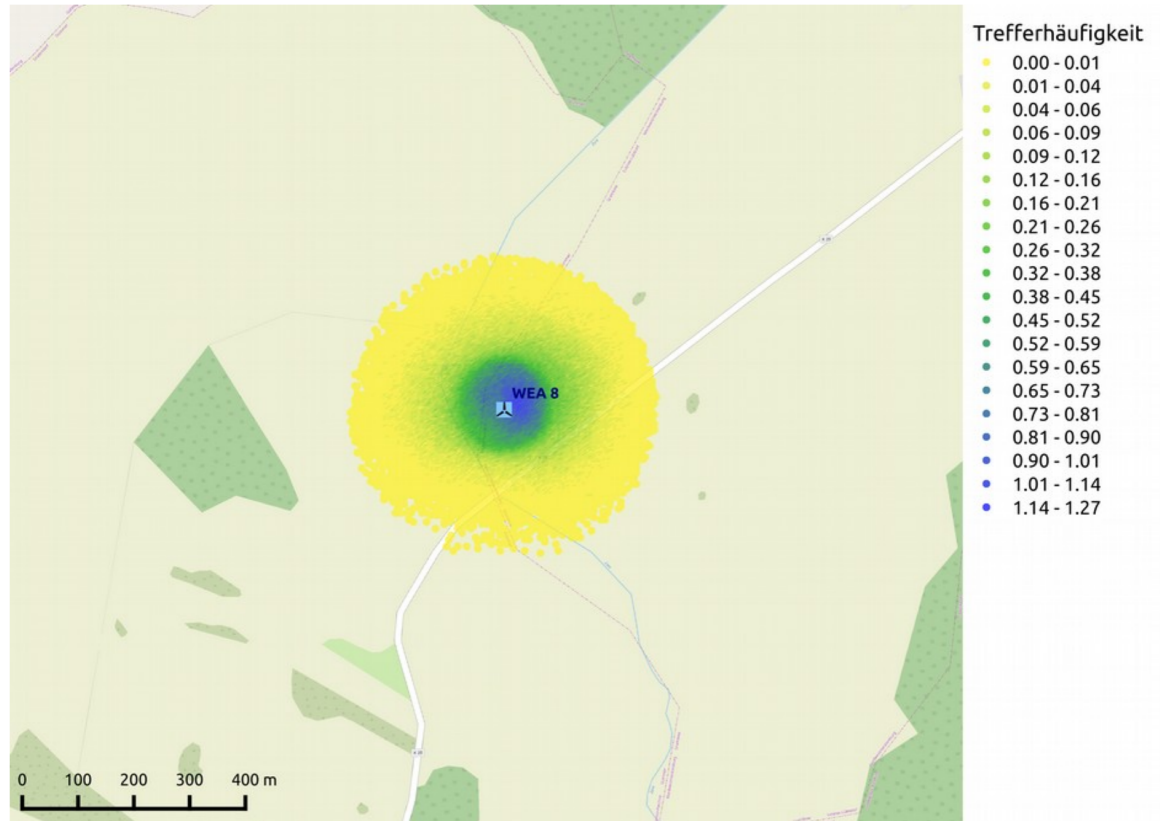


Abbildung B.1.1: Trefferhäufigkeiten von Eisstücken pro Rasterfläche (16m²) und Jahr in der Umgebung der WEA 8 am Standort Grambow-Dümmer (Karte /1.4/).

B.2 Schadenshäufigkeiten

Aus den ermittelten Flugbahnen ergeben sich für die Gefährdungsbereiche der zu betrachtenden WEA gemäß Kapitel 4.4.4 die in Tabelle B.2.1 aufgeführten Randbedingungen.

Tabelle B.2.1: Randbedingungen für die Bewertung von Sach- bzw. Personenschäden am Standort Grambow-Dümmer.

WEA	Schutzobjekt	Beiträge WEA	Anzahl Treffer pro Jahr
WEA 8	Kreisstraße K28	8	5.7

Für die Bewertung von Personenschäden wird davon ausgegangen, dass jedes Kfz im Mittel mit 1.5 Personen besetzt ist. Dies entspricht der durchschnittlichen Besetzungszahl von Pkw in Deutschland /1.6/. Eine infolge eines Treffers durch Eis



resultierende Verkettung von Unfällen wurde nicht betrachtet.

Mit den genannten Ausführungen ergeben sich die in Tabelle B.2.2 aufgelisteten Unfallhäufigkeiten bzw. Risiken.

Das in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen zu betrachtende Risiko ist in Tabelle B.2.2 jeweils fett gedruckt.

Relevante Überschreitungen der Risikogrenzwerte gemäß Tabelle 2.8.3.1 bzw. Werte im ALARP-Bereich, die eventuell weitere Maßnahmen erfordern, sind in Tabelle B.2.2 jeweils kursiv gedruckt.

Tabelle B.2.2: Kollektive und individuelle Risiken für Personenschäden am Standort Grambow-Dümmer.

WEA	Schutzobjekt	Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
WEA 8	Kreisstraße K28	$3.72 \cdot 10^{-4}$ <i>(einmal in 2600 Jahren)</i>	$1.24 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 806 000 Jahren)