



Gutachten zu Risiken durch Eiswurf und Eisfall am Standort Bornhausen

Referenz-Nummer: F2E-2017-WND-109
Revision 0 - gekürzte Fassung

Auftraggeber:

wpd onshore GmbH & Co. KG
Franz-Lenz-Straße 4
49084 Osnabrück

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, 16.01.2018

Geprüft:

Dipl.-Ing. (FH) Silva Mäusling, Sachverständige, Hamburg, 16.01.2018

Für weitere Auskünfte:

Tel.: 040 53303680-0 Fax: 040 5330368-79
Nicole Stoffels: stoffels@f2e.de oder Silva Mäusling: maeusling@f2e.de



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.....	2
2 Grundlagen.....	3
2.1 Vereisung.....	3
2.2 Regelungen in den Normen.....	4
2.3 Grenzwerte.....	6
2.4 Berechnung der Flugbahnen von Eisstücken.....	8
3 Randbedingungen.....	10
3.1 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte.....	10
3.2 Winddaten am Standort.....	13
3.3 Aufenthaltshäufigkeiten.....	14
4 Durchgeführte Untersuchungen.....	14
4.1 Vereisungshäufigkeiten.....	14
4.2 Anzahl sich lösender Eisstücke.....	16
4.3 Eiswurf.....	16
4.4 Eisfall.....	17
5 Zusammenfassung.....	19
5.1 Eiswurf.....	19
5.2 Eisfall.....	19
6 Formelzeichen und Abkürzungen.....	20
7 Literaturangaben.....	20
Anhang A: Detaillierte Berechnungsergebnisse Eisfall.....	22
A.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten.....	22
A.2 Schadenshäufigkeiten.....	24

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 und zu bewerten.



2 Grundlagen

2.1 Vereisung

Abhängig von den Vereisungsbedingungen kann es auf dem Rotorblatt einer WEA zu starken Vereisungen kommen, in deren Folge eine Gefahr durch sich lösende bis zu mehreren Kilogramm schwere Eisstücke besteht.

Während des Betriebes der WEA erfahren diese Eisstücke einen deutlichen Anfangsimpuls durch das schnell rotierende Blatt. In diesem Fall wird daher von Eiswurf gesprochen. Während des Stillstandes der WEA trudelt diese mit deutlich niedrigeren Drehzahlen. In diesem Fall wird daher von Eisfall gesprochen. In beiden Fällen (Eiswurf und Eisfall) wirken auf die abgelösten Eisstücke durch den Wind weitere Kräfte. Bei Sturm und auch entlang eines abfallenden Geländes können so nennenswerte Flugweiten erreicht werden.

Vereisung tritt ein, wenn entweder unterkühlte Wassertropfen auf das Rotorblatt aufschlagen oder die Oberflächentemperatur des Rotorblattes unterhalb des Reifpunktes liegt und Wasserdampf auf der Oberfläche in Form von Reif sublimiert.

Im Temperaturbereich von ca. 0° bis -10°C bildet sich aus den Wassertropfen beim Auftreffen auf das Rotorblatt Eis. Bis etwa -4°C kommt es dabei aufgrund der verzögerten Eisbildung zu großflächiger Klareisbildung. Bei niedrigeren Temperaturen dominiert hingegen die Raueisbildung, mit geringer Haftoberfläche und einem milchigeren und rauherem Erscheinungsbild.

Unterhalb von -10°C können sich größere Ablagerungen von Raureif an den Profilkanten bilden. Der sich bei noch kälteren Temperaturen bildende Reif bildet typischerweise keine größeren Ablagerungen und spielt hinsichtlich einer Gefährdung durch Eisfall oder Eiswurf keine Rolle.

Grundsätzlich sollten bei der Gefährdung durch Eisfall bzw. Eiswurf daher zwischen großflächigen Eisplatten, die sich über einen großen Bereich der Profiltiefe ausbilden können, und schlankeren Eisstücken, die von der Profilkante abbrechen, unterschieden werden. Hinweise zu Form und Masse von Eisstücken finden sich z.B. in /1/.

Aufgrund der extrem hohen Variabilität der Vereisungstage von Jahr zu Jahr werden langjährige Messungen benötigt, die möglichst auf einen klimatologischen Zeitraum, also 30 Jahre, zu beziehen sind. Derart langjährige Messungen oder Beobachtungen liegen in Deutschland z.B. in Bodennähe für die Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes DWD vor. Messungen in Bodennähe unterliegen jedoch starken mikroskaligen Einflüssen, so dass sie bezüglich einer Vereisung schon wenige



hundert Meter entfernt nicht mehr aussagekräftig sein können, wenn sich dort z.B. aufgrund einer lokalen Senke kalte Luft sammelt. Diese mikroskaligen Effekte, die auf Nabenhöhe der Windenergieanlagen typischerweise keine Rolle mehr spielen, zu identifizieren und entsprechend zu korrigieren ist so gut wie nicht möglich. Hinzu kommt, dass die Daten der Klimastationen oft über mehr als 10km und auf andere Höhen über Meeressniveau übertragen werden müssen, so dass die Unsicherheiten in der Vorhersage der Vereisungstage nach dieser Methode insgesamt sehr groß sind.

Eine weitere mögliche Quelle stellen großflächige Vereisungskarten dar, wie sie z.B. in /1/ und /2/ dargestellt sind. Diese Karten liefern jedoch nur Hinweise und Tendenzen. In /2/ wird darauf hingewiesen, dass im Gegensatz zu den in den großflächigen Karten dargestellten Werten, die tatsächlichen Werte schon auf kurzen Distanzen stark schwanken können und die lokale Geländetopografie berücksichtigt werden sollte. Die daraus entstehenden Unterschiede in der Einschätzung der Vereisungstage können extrem groß sein, so dass diese Karten selbst zur Plausibilisierung lokaler Vereisungsdaten nur sehr bedingt geeignet sind.

Für Deutschland liegt mittlerweile eine hochaufgelöste Vereisungskarte des DWD vor, die die lokale Topografie berücksichtigt /10/. Sie stellt vor dem Hintergrund der dargestellten Zusammenhänge die zurzeit beste Datengrundlage zur Ermittlung der Vereisungstage für Standorte in Deutschland dar.

2.2 Regelungen in den Normen

In /1/ findet sich für Regionen mit einer hohen Vereisungshäufigkeit die Empfehlung, einen Mindestabstand von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ zu gefährdeten Bereichen einzuhalten oder die Windenergieanlage bei Vereisungsbedingungen abzuschalten.

Der vorgeschlagene Mindestabstand von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ fand in Deutschland Eingang in die Muster-Liste der technischen Baubestimmungen /3/. Dort heißt es in Anlage 2.7/12, Absatz 2 zur Richtlinie „Windenergieanlagen; Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“:

„Abstände zu Verkehrswegen und Gebäuden sind unbeschadet der Anforderungen aus anderen Rechtsbereichen wegen der Gefahr des Eisabwurfs einzuhalten, soweit eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit nicht auszuschließen ist. Abstände größer als $1,5 \cdot (\text{Rotordurchmesser plus Nabenhöhe})$ gelten im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen als ausreichend. In anderen Fällen ist die Stellungnahme eines Sachverständigen erforderlich.“

Soweit dieser Mindestabstand nicht eingehalten wird bzw. der Standort der Wind-



energieanlage in einer besonders eisgefährdeten Region liegt und der Mindestabstand daher keine Anwendung finden kann, ist also das Risiko durch Eiswurf standortspezifisch zu bewerten.

Weiterhin führt die Muster-Liste /3/ in Absatz 3.3 der Anlage 2.7/12 aus, dass die gutachterliche Stellungnahme eines Sachverständigen zur Funktionssicherheit von Einrichtungen vorzulegen ist, durch die der Betrieb der Windenergieanlage bei Eisansatz sicher ausgeschlossen werden kann oder durch die ein Eisansatz verhindert werden kann. Dies hat immer dann zu erfolgen, wenn erforderliche Abstände wegen der Gefahr des Eisabwurfes nicht eingehalten werden.

Die gutachterliche Stellungnahme zur Funktionssicherheit von Einrichtungen zur Eiserkennung ist im Gegensatz zur gutachterlichen Stellungnahme bei Unterschreitung des in der Muster-Liste genannten Mindestabstandes von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ kein standortspezifischer Nachweis, sondern ein entweder vom Hersteller des Eiserkennungssystems bzw. für die Implementierung in eine spezifische Windenergieanlage vom Hersteller der Windenergieanlage einmalig für den jeweiligen Typ in Auftrag gegebenes Gutachten. Diese Systeme schließen damit den Betrieb bei potentiell gefährlichem Eisansatz aus, können aber nicht grundsätzlich Eisansatz verhindern. Das für eine Verhinderung des Eisansatzes in /3/ genannte Beispiel einer Rotorblattheizung ist an dieser Stelle typischerweise nicht als Sicherheitssystem konzipiert. Der Betrieb einer Rotorblattheizung wird daher durch einzelne Hersteller für Standorte, in deren Umgebung eventuell durch Eiswurf eine erhebliche Gefährdung besteht, sogar ausgeschlossen.

Damit ergibt sich die Situation, dass auch bei einem vorhandenen System zur Eiserkennung mit Eisfall (Eiswurf von der stillstehenden Windenergieanlage) zu rechnen ist und damit auch in diesen Fällen bei Unterschreitung des Mindestabstandes von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ eine standortspezifische Bewertung des Risikos erfolgen sollte.

Der in der Abbildung 2.2.1 dargestellte Entscheidungsbaum für die Bewertung des Risikos durch Eiswurf und Eisfall fasst dies noch einmal zusammen.

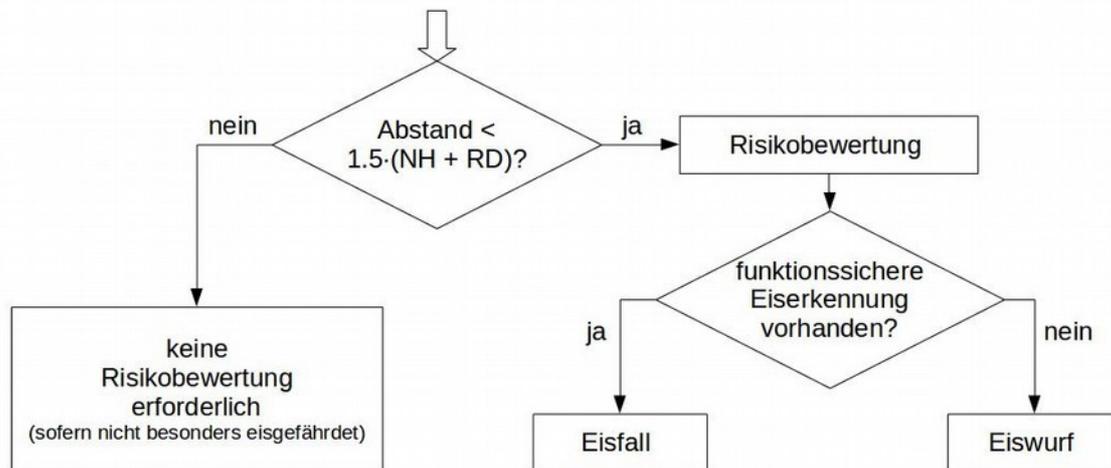


Abbildung 2.2.1: Entscheidungsbaum für die Bewertung des Risikos durch Eiswurf und Eisfall.

2.3 Grenzwerte

Für Personenschäden findet sich in der Literatur das Konzept der minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) /4/. Die endogene Sterblichkeit erfasst das Sterberisiko durch technologische Faktoren bei Sport, Heimwerkertätigkeiten, durch Arbeitsmaschinen oder den Verkehr. Krankheiten oder angeborene Missbildungen werden nicht betrachtet.

Die minimale endogene Sterblichkeit in entwickelten Ländern findet sich in der Gruppe der fünf bis 15jährigen. Sie liegt bei $2 \cdot 10^{-4}$ Todesfällen pro Person und Jahr. Eine neue Technologie sollte diese endogene Sterblichkeit nicht nennenswert erhöhen. Es wird daher gefordert, dass die einer neuen Technologie verbundene Sterblichkeit nicht mehr als $1 \cdot 10^{-5}$ Todesfälle pro Person und Jahr betragen darf.

An anderer Stelle wird das gesellschaftlich akzeptierte Todesfallrisiko abhängig vom Grad der Freiwilligkeit und möglichen Einflussnahme auf die Handlung dargestellt /8/. Die Akzeptanz sinkt, wenn zum einen die Möglichkeit sich durch adäquates Handeln zu schützen gegen Null geht und zum anderen sich die Person nicht freiwillig der Gefährdung aussetzt. Der unter diesen Randbedingungen definierte Grenzwert liegt bei $1 \cdot 10^{-5}$ Todesfällen pro Person und Jahr und entspricht damit dem definierten MEM-Kriterium.

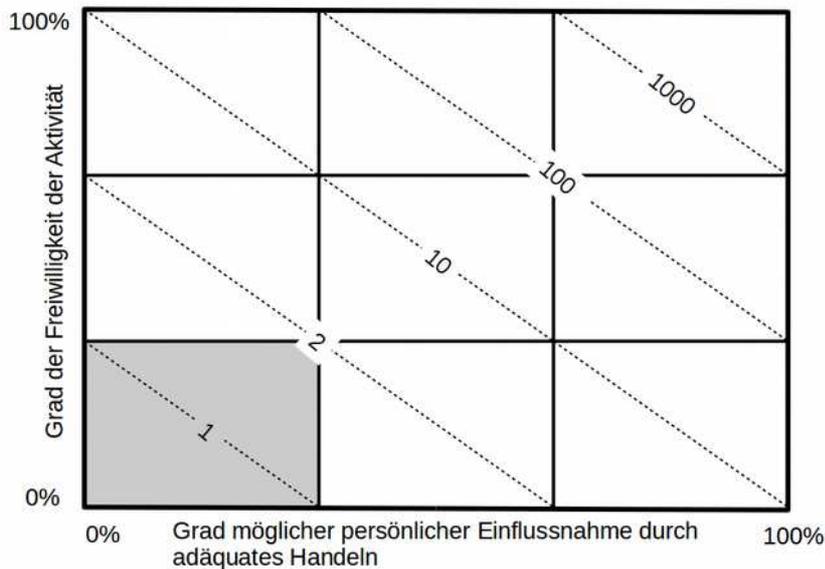


Abbildung 2.3.1: Akzeptiertes Todesfallrisiko pro 100 000 Personen /8/. Grau hinterlegter Bereich entspricht dem MEM-Kriterium /4/.

Betrachtet man das Risiko in der Nähe einer WEA durch Eisfall oder Eiswurf tödlich zu verunglücken, begibt man sich in der Regel weder freiwillig in diese Lage noch hat man durch persönliche Einflussnahme eine Möglichkeit das Risiko nennenswert zu minimieren. Der Ansatz des MEM-Kriteriums ist daher an dieser Stelle gerechtfertigt und sinnvoll.

Damit liegt eine Gefährdung durch Eiswurf oder Eisfall nur vor, wenn der so definierte Grenzwert überschritten wird.

Um hier eine konservative Vorgehensweise zu gewährleisten, werden folgende Annahmen getroffen:

- Ein Eisstück, das eine ungeschützte Person außerhalb eines Fahrzeuges oder Gebäudes trifft, führt immer zu einer schweren Verletzung oder zum Tode.
- Ein Eisstück, das im Gefahrenbremsbereich eines Fahrzeuges oder direkt auf ein Fahrzeug auftrifft, führt stets zu einem Unfall. Die durchschnittliche Anzahl von Personen in einem Kraftfahrzeug ist statistisch erfasst /7/ ebenso wie die Häufigkeit schwerer und tödlicher Verletzungen in Folge eines Unfalls im Straßenverkehr /9/, so dass sich hieraus eine Anzahl betroffener Personen ableiten lässt.

Es ist offensichtlich, dass mit dem Ausschluss leichter Verletzungen, der fehlenden Unterscheidung zwischen schweren und tödlichen Verletzungen sowie der weitreichenden Annahmen für das generelle Eintreten eines Unfalls hier ein sehr konserva-



tiver Ansatz gewählt wird. Eine weitere Differenzierung gestaltet sich an dieser Stelle jedoch sehr schwierig und lässt sich auch statistisch zurzeit nicht ausreichend absichern.

Bei der Bewertung von Schutzobjekten, bei denen sich eine größere Anzahl von Personen in der Nähe der WEA aufhält, wie es typischerweise bei Verkehrswegen der Fall ist, muss das daraus resultierende Kollektivrisiko bewertet werden. Entsprechende Grenzwerte für das Kollektivrisiko sind jedoch schwer zu definieren. Für frequentierte Verkehrswege kann man davon ausgehen, dass der Grenzwert für das Kollektivrisiko etwa zwei Größenordnungen günstiger ausfällt als das MEM-Kriterium. Bei schwach frequentierten Verkehrswegen, wie land- und forstwirtschaftlichen Wegen, kann das Kriterium für das Kollektivrisiko als identisch mit dem MEM-Kriterium angesetzt werden.

Im Folgenden wird abdeckend in allen Fällen als Grenzwert das MEM-Kriterium zugrunde gelegt.

Damit kann bei einem Vergleich mit dem MEM-Kriterium in der Umgebung von frequentierten Verkehrswegen jede WEA für sich und unabhängig von einer Vorbelastung bewertet werden.

In der Nähe von schwach frequentierten Verkehrswegen, wie land- und forstwirtschaftlichen Wegen, sind entsprechende kumulierte Risiken zu betrachten, wenn mehrere WEA zur Gefährdung beitragen. Praktisch liegt man in der Regel aber bei schwach frequentierten Verkehrswegen soweit unterhalb des MEM-Kriteriums, dass diese Effekte vernachlässigbar sind und nicht explizit betrachtet werden müssen. Sollte dies im Einzelfall dennoch erforderlich sein, wird dies in den detaillierten Berechnungsergebnissen dargestellt und berücksichtigt.

Umgekehrt wird bei der Bewertung mehrerer Schutzobjekte im Einflussbereich einer WEA eine Summe nur über die Schutzobjekte gebildet, für die das Kriterium für das Kollektivrisiko als identisch mit dem MEM-Kriterium angesetzt werden muss. Ansonsten werden die einzelnen Schutzobjekte im Einflussbereich einer WEA getrennt bewertet.

Da Sachschäden hier in ihrer Schwere gegenüber Personenschäden vernachlässigbar sind, erübrigt sich in der Regel eine gesonderte Bewertung von Sachschäden.

2.4 Berechnung der Flugbahnen von Eisstücken

Für die Berechnung der Flugbahnen der Eisstücke wird basierend auf den Luftwiderstandsbeiwerten, der Geometrie und der Masse der Eisstücke die Lage des Eisstückes während der gesamten Bewegung erfasst und verfolgt, so dass sich im Vergleich zu



einer rein ballistischen Flugbahn ein realistischeres Bild der Flugweiten ergibt und auch solche Flugbahnen erfasst werden, bei denen im Einzelfall aufgrund von Auftriebskräften am Eisstück sehr hohe Flugweiten erreicht werden.

In der Summe wurden ca. eine Million Flugbahnen ausgewertet.

Folgende Randbedingungen werden bei der Berechnung zugrunde gelegt:

- definierte Größe und Masse der Standard-Eisstücke:
 - ca. 500*60*30mm, 0.63kg
 - ca. 500*1150*10mm, 4.1kg
- Standortspezifische Windgeschwindigkeitsverteilung sowie zusätzliche Sturmereignisse, die dadurch konservativ in ihrer Häufigkeit überbewertet werden.
- Windrichtung in 1°-Schritten gewichtet mit der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen.
- Rotorblattstellung zum Zeitpunkt des Eiswurf bzw. Eisfalls: gleichverteilt in 5°-Schritten.
- Abwurfpunkte gleichmäßig verteilt über das Rotorblatt. Verlustfreie Ablösung der Eisstücke.
- Drehzahl der WEA: Normalbetrieb für Eiswurf und Trudelbetrieb für Eisfall gemäß /20/.
- Geländehöhe: es wurden Geländehöhen aus /6/ berücksichtigt.

Eine eventuell vorhandene Schutzwirkung durch Bewuchs oder Gebäude wird vernachlässigt.



3 Randbedingungen

3.1 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte

Am Standort Bornhausen (Niedersachsen) plant der Auftraggeber die Errichtung von sechs Windenergieanlagen (WEA 1 - 6).

Die vom Auftraggeber übermittelten Daten zur Windparkkonfiguration sind in Tabelle 3.1.1 bzw. Abbildung 3.1.2 dargestellt.

In der Umgebung befinden sich die Bundesautobahn A7 und die Bundesstraße B243, welche im Rahmen dieser Untersuchung als Schutzobjekte definiert wurden (siehe Abbildung 3.1.1).

Die WEA 1 - 6 liegen in unmittelbarer Nähe zu den Schutzobjekten und werden im Folgenden hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf und Eisfall betrachtet.



Abbildung 3.1.1: Betrachtete Schutzobjekte (A7: rot, B243: blau) in der Umgebung der WEA 1 - 6 am Standort Bornhausen (Satellitenbild /13/).



	Lfd.Nr. WEA	Bezeichnung	Koordinaten (UTM ETRS89 Zone 32)		Hersteller	WEA-Typ	P _N [MW]	RD [m]	NH [m]
			East	North					
	1	WEA_01	578251	5751501	Vestas	V150	4.2	150.0	145.0
	2	WEA_02	578651	5751253	Vestas	V150	4.2	150.0	166.0
	3	WEA_03	579101	5751094	Vestas	V150	4.2	150.0	166.0
	4	WEA_04	578225	5750896	Vestas	V150	4.2	150.0	145.0
	5	WEA_05	578571	5750352	Vestas	V150	4.2	150.0	166.0
	6	WEA_06	578772	5750804	Vestas	V150	4.2	150.0	166.0

Tabelle 3.1.1: Windparkkonfiguration

Alle Benennungen von WEA im Dokument beziehen sich auf die Nomenklatur von Spalte 2 (Lfd. Nr.) in Tabelle 3.1.1.

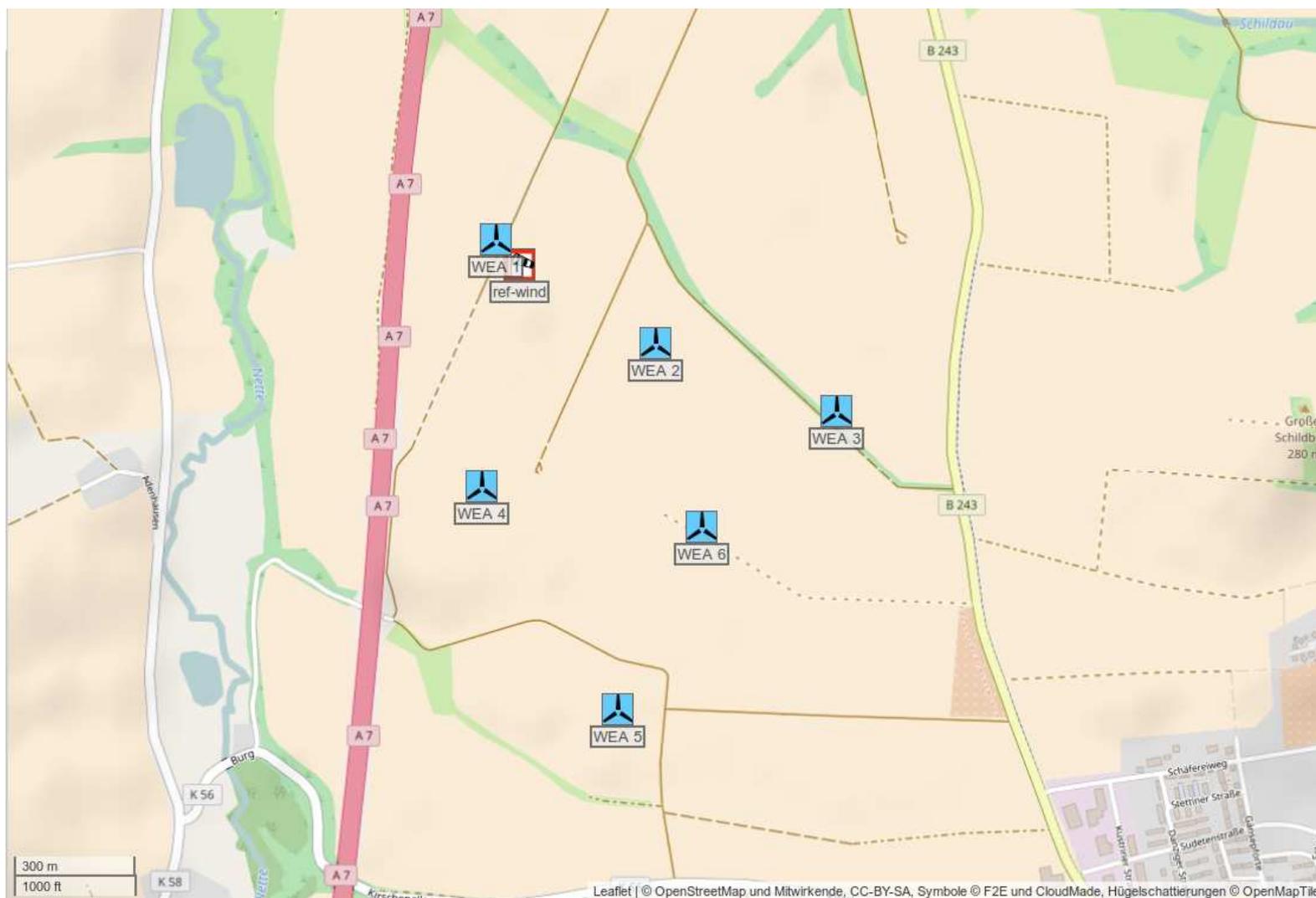


Abbildung 3.1.2:
Lage des Standortes,
Karte 15/.

-  betrachtete WEA
-  weitere WEA
-  Referenzpunkt der
Winddaten



3.2 Winddaten am Standort

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und Windgeschwindigkeiten am Standort wurden /12/ entnommen und sind in Tabelle 3.2.1 dargestellt.

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

Richtungssektoren	Relative Häufigkeit (100%=1)	Weibullverteilung	
		A	k
N	0.042	4.56	2.139
NNO	0.047	5.10	2.205
ONO	0.062	6.27	2.646
O	0.050	6.28	2.490
OSO	0.037	5.18	1.627
SSO	0.095	7.77	2.162
S	0.200	8.75	2.920
SSW	0.144	7.99	2.854
WSW	0.108	7.46	2.717
W	0.101	7.04	2.561
WNW	0.065	5.98	2.432
NNW	0.050	4.93	2.338
gesamt	1.001	7.14	2.307
Bezugswerte			
Koordinate des Referenzpunktes (UTM WGS84 Zone 32)		East	North
		578310	5751441
Höhe über Grund h		166m	

Tabelle 3.2.1: Winddaten am Standort.

Die Parameter der Weibull-Verteilung werden genutzt, um die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen auf die jeweiligen Windgeschwindigkeiten umzurechnen. Die Weibull-Parameter werden dabei auf die jeweilige Nabenhöhe der WEA umgerechnet.



3.3 Aufenthaltshäufigkeiten

Nach /14/ wurde am Zählpunkt auf der A7 zwischen den Anschlussstellen Seesen/Harz und Rhüden/Harz eine Verkehrsbelastung von 56100 Kfz pro Tag ermittelt. Auf der B243 zwischen Seesen und Bornhausen existiert kein Zählpunkt. Es gibt jedoch einen Zählpunkt im weiteren Verlauf zwischen Bornhausen und Rhüden, der ersatzweise zugrunde gelegt wird. Danach ergibt sich eine Verkehrsbelastung von 5300 Kfz pro Tag für die B243.

4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Vereisungshäufigkeiten

Datengrundlage für die Bewertung der Vereisungshäufigkeit bildet die Vereisungskarte des Deutschen Wetterdienstes /10/. Für die Bestimmung der Häufigkeit atmosphärischer Vereisung wurden hierzu in /10/ verschiedene Wetter-Meldungen ausgewertet:

- Allgemeine Wetterereignisse:
 - leichter, mäßiger oder starker gefrierender Regen,
 - leichter, mäßiger oder starker gefrierender Sprühregen,
 - leichter, mäßiger oder starker Schneeregen,
 - Eiskörner (gefrorene Regentropfen),
 - Nebel mit Reifansatz
- Wetterereignisse bei Temperaturen $\leq 0^\circ$ Celsius:
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Sprühregen,
 - leichter, mäßiger oder starker Sprühregen mit Regen,
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Regen,
 - Nebel oder Nebel mit Reifansatz
- Wetterereignisse bei Temperaturen $> 0^\circ$ Celsius:
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Schneefall,
 - leichter, mäßiger oder starker Schneeregen- oder Schneeschauer,
- Wetterereignisse der letzten Stunde aber nicht zur Beobachtungszeit:
 - Schneefall,
 - Schneeregen oder Eiskörner,



- gefrierender Regen,
- Schneeschauer bei Temperaturen $> 0^{\circ}$ Celsius,
- Nebel bei Temperaturen $\leq 0^{\circ}$ Celsius

Damit werden eine Vielzahl von Ereignissen erfasst, die nicht in allen Fällen zu einer signifikanten Vereisung bzw. in einigen Fällen zu keiner Vereisung der WEA führen. Gleichzeitig beziehen sich die Meldungen auf Beobachterhöhe und nicht auf die Nabenhöhe der WEA. Es wurden daher Vergleiche mit verschiedenen Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt. Hierzu wurden langjährige (30 Jahre) Messreihen zum Tagesmittel der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur ausgewertet, um die Vereisungshäufigkeit auf Nabenhöhe zu bestimmen. Der Vergleich zeigt, dass die in /10/ auf Beobachterhöhe ermittelten Vereisungshäufigkeiten konservativere Ergebnisse liefern. Eine Umrechnung auf Nabenhöhe der WEA ist daher unter Berücksichtigung der in /10/ betrachteten Ereignisse nicht erforderlich.

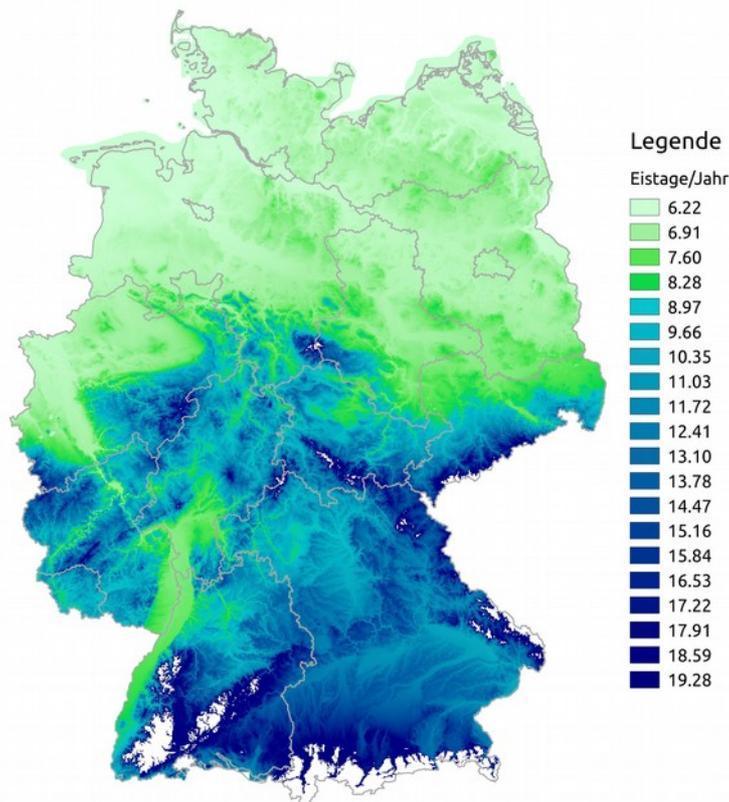


Abbildung 4.1.1: Eistage pro Jahr gemäß den Ergebnissen aus /10/ für Höhen bis 700m üNN.

Gemäß /10/ sind für Standorte in großen Höhen besondere Betrachtungen erforderlich, wenn diese besonders exponiert oder besonders geschützt liegen. Entsprechende



Orte wurden in /10/ daher gefiltert. Die niedrigste betroffene Höhe liegt bei ca. 700m üNN, so dass das hier verwendete Verfahren im Folgenden für Orte bis zu einer Höhe von 700m üNN ohne Korrekturen angewendet wird. In diesem Höhenbereich weist die in /10/ verwendete exponentielle Regression eine gute Annäherung an die Daten auf und wird daher hier verwendet. Abbildung 4.1.1 zeigt die hierauf beruhende Vereisungskarte für Deutschland.

Damit ergibt sich am Standort Bornhausen eine Vereisungshäufigkeit von 2.2% entsprechend 8.2 Vereisungstagen pro Jahr.

4.2 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.

Im aktuellen Entwurf der internationalen Richtlinie für WEA /11/ wird für den Vereisungslastfall die insgesamt zu berücksichtigende Eismasse abhängig von der Blattgeometrie definiert. 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 167.5 Eisstücke pro Vereisung. Damit ergeben sich bei 8.2 Vereisungsfällen insgesamt 1374 Eisstücke pro Jahr.

4.3 Eiswurf

Die WEA 1 - 6 werden mit einem der folgenden beschriebenen Eiserkennungssysteme ausgestattet:

Das Eiserkennungssystem Vestas Ice Detection™ System (VID) /15/ 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 System zur Eiserkennung ist entsprechend der Richtlinie des Germanischen Lloyd für die Zertifizierung von Systemen zur Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen /16/ typgeprüft /17/.



Alternativ können die WEA 1 - 6 mit dem Eiserkennungssystem Labkotec der Firma Labkotec Oy ausgestattet werden. Dabei wird Eisansatz aufgrund der Veränderung des Ultraschallsignals des auf der Gondel montierten Sensors detektiert /18/.

Die Bewertung der Funktionssicherheit dieser Systeme ist nicht Bestandteil des Gutachtens. In /18, 19/ wurde jedoch die Funktionalität und grundsätzliche Eignung geprüft. Danach ist Labkotec als Eiserkennungssystem für Windenergieanlagen allgemein geeignet. Labkotec ist in der Lage Vereisung innerhalb von Wolken, sowie Vereisung auf Grund von gefrierendem Regen zu detektieren.

Die Aussagen in /19/ beziehen sich dabei auf die Standard-Einstellungen für den "ice alarm level". Dieser Einstellwert liegt gemäß /19/ bei 50 auf einer Skala von 0 bis 100, wobei höhere Werte eine höhere Sensitivität und damit ein schnelleres Ansprechen des Alarms bedeuten. Für geringere Einstellwerte als 50 für den "ice alarm level" werden in /19/ keine Aussagen getroffen.

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 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.

Aus der in Kapitel 4.2 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. 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 an dieser Stelle nur dahingehend, dass die Wegstrecke bei Verkehrswegen deutlich vorgegeben ist, während sie bei Freiflächen typischerweise durch eine allgemeine Aufenthaltshäufigkeit ersetzt wird.

Aus den Erläuterungen wird klar, dass sich eine Gefährdung nicht in Form einer Gefährdungskarte in der Umgebung einer WEA darstellen lässt, 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.

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt liegt dann eine Gefährdung durch Eisfall vor, wenn der dort definierte Grenzwert überschritten wird. Damit ergeben sich bezogen auf die betrachteten WEA folgende Ergebnisse für das Szenario Eisfall.

Gesamtbewertung der einzelnen WEA		
Lfd. Nr. WEA	Bezeichnung	Gefährdung durch Eisfall
1	WEA_01	nicht vorhanden
2	WEA_02	nicht vorhanden
3	WEA_03	nicht vorhanden
4	WEA_04	nicht vorhanden
5	WEA_05	nicht vorhanden
6	WEA_06	nicht vorhanden

Tabelle 4.4.1: Gefährdung durch Eisfall am Standort Bornhausen.

Details der zugrunde liegenden Berechnungen sind im Anhang A dargestellt.



5 Zusammenfassung

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

Als Schutzobjekte wurden die Bundesautobahn A7 und die Bundesstraße B243 in der Nachbarschaft der WEA definiert.

5.1 Eiswurf

Abschließend kann festgestellt werden, dass aufgrund der vorhandenen Systeme zur Eiserkennung eine Gefährdung durch Eiswurf von den betrachteten WEA ausgeschlossen werden kann.

5.2 Eisfall

Abschließend kann festgestellt werden, dass sich aus der Gesamtbewertung der jeweiligen betrachteten WEA 1 - 6 bezüglich der Schutzobjekte keine Gefährdung durch Eisfall ergibt.



6 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]

7 Literaturangaben

- /1/ Bengt Tammelin et. al.; Wind Energy Production in Cold climates; Meteorological publications No.41, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, February 2000.
- /2/ International Energy Agency (IEA), IEA Wind Task 19, State-of-the-Art of Wind Energy in Cold Climates, Edition October 2012.
- /3/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen - Fassung Juni 2015.
- /4/ DIN EN 50126; Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS); Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000.
- /5/ OpenStreetMap und Mitwirkende; siehe Internet: <http://www.openstreetmap.org>, <http://opendatacommons.org>, <http://creativecommons.org>.
- /6/ Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2006, Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- /7/ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Mobilität in Deutschland 2008; Ergebnisbericht, Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends; Bonn und Berlin, Februar 2010.
- /8/ Schneider J., Schlatter H. P.; Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure; 1. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart, 1994.
- /9/ Statistisches Bundesamt; Verkehr – Verkehrsunfälle - 2012, Fachserie 8 Reihe 7; Wiesbaden, 2013.



- /10/ 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 International Workshop On Atmospheric Icing Of Structures (IWAIS 2013). Compusult Ltd., St. John's, Newfoundland and Labrador, September 8-11, 2013, pp. 303-309.
- /11/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1 Ed. 4, Wind turbines - Part 1: Design requirements; 88/521/CD Committee Draft, 22. Oktober 2015.
- /12/ wpd AG; WindPRO Ergebnisausdruck, PARK - Analyse der Windverhältnisse, Projekt: Bornhausen2; 18.12.2018; Bremen, Deutschland.
- /13/ © 2017 Google Inc.; © 2009 GeoBasis DE/BKG.
- /14/ Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr; Verkehrsmengenkarte Niedersachsen 2015; 2017; Hannover, Deutschland.
- /15/ Vestas Wind Systems A/S; Allgemeine Beschreibung Eissturz- und Eisabwurfisiko - sowie Risikominderung - V105/V112/V117/V126/V136/V150; Dokumentennr. : 0068-3752 V00; 21.06.2017.
- /16/ Germanischer Lloyd; GL Rules and Guidelines - IV Industrial Services - Part 4; Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, Edition 2013.
- /17/ DNV GL Renewables Certification; Type Certificate BLADEcontrol Ice Detector (BID); Certificate No. TC-GL-IV-4-02381-0; Hamburg, 2016-12-09.
- /18/ Labkotec Oy; LID-3300IP Eis-Detektor, Eis-Detektor für Windturbinen und Wetterstationen, Montage und Betriebsanleitung; 24.2.2012; Pirkkala, Finnland.
- /19/ VTT Technical Research Centre of Finland; Pre-certification of Labcotec LID 3300IP ice detector for wind energy applications; Report identification code: VTT-CR-04740-11; 22.06.2011; Espoo, Finland.
- /20/ Vestas Central Europe; Angaben zum Trudelbetrieb nach Abschaltung wegen Eisansatz; per E-Mail am 13.12.2017.



Anhang A: Detaillierte Berechnungsergebnisse Eisfall

A.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten

Tabelle A.1.1 listet die maximal erreichte Flugweite der Bruchstücke bezogen auf den Fußpunkt der WEA auf. Die Häufigkeitsverteilung der Flugweiten ist für die WEA in den Abbildungen A.1.1 und A.1.2 aufgetragen.

WEA	Maximale Flugweite [m]	Maximale Flugweite / (Nabenhöhe + Rotordurchmesser)
WEA 1	263.6	0.894
WEA 2	294.0	0.930
WEA 3	292.6	0.926
WEA 4	260.9	0.884
WEA 5	295.3	0.934
WEA 6	291.3	0.922

Tabelle A.1.1: Maximale Flugweite der betrachteten Eisstücke am Standort Bornhausen.

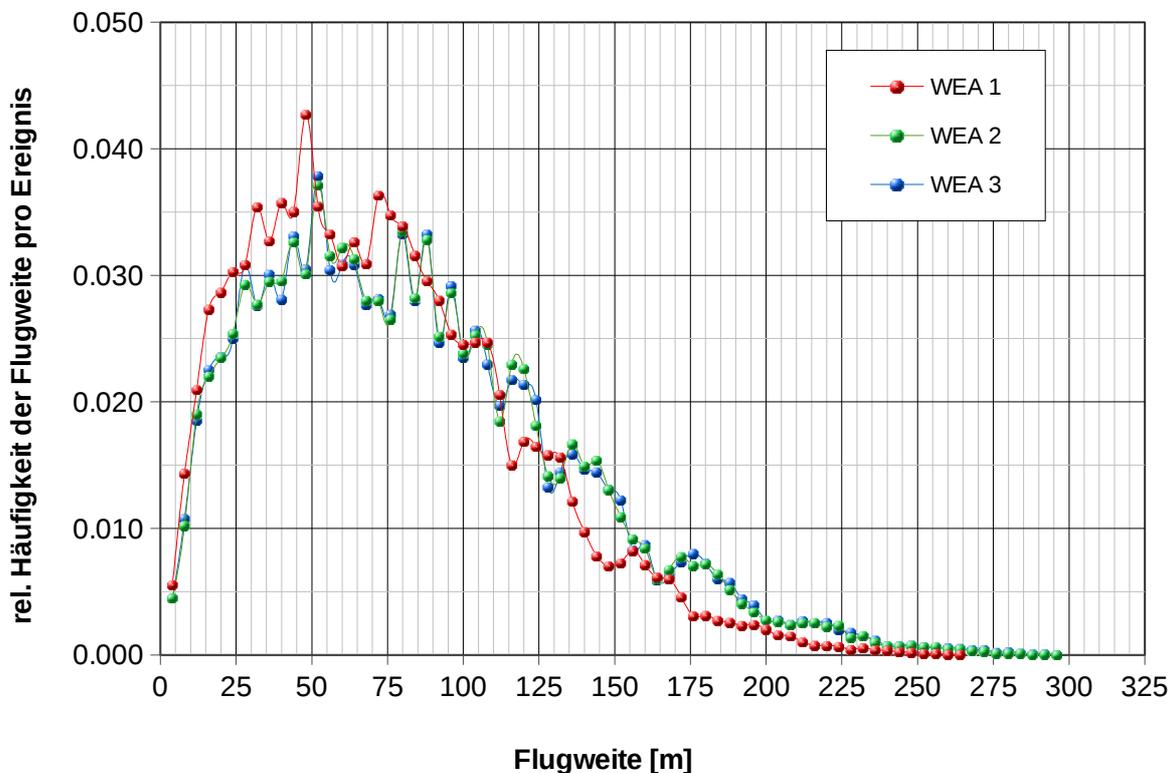


Abbildung A.1.1: Häufigkeitsverteilung der Flugweiten von Eisstücken für die betrachteten WEA 1 - 3.

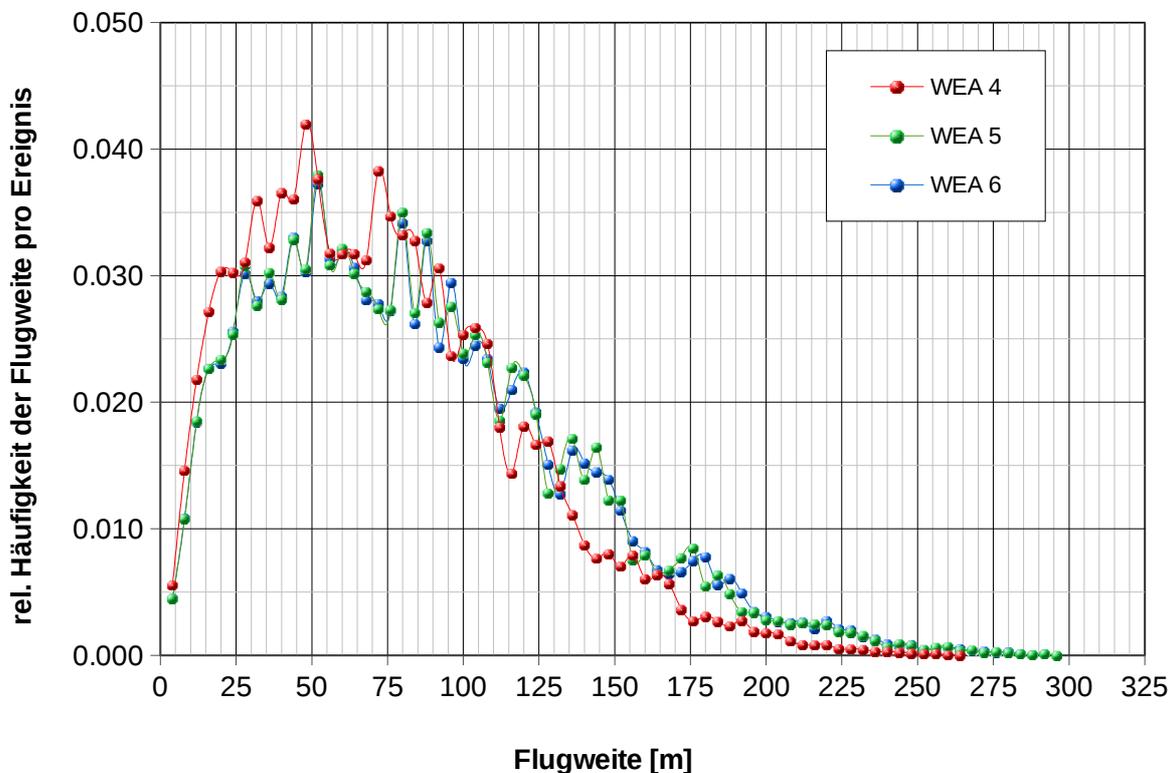


Abbildung A.1.2: Häufigkeitsverteilung der Flugweiten von Eisstücken für die betrachteten WEA 4 - 6.

Die Flugweiten erreichen einen Maximalwert vom 0.934fachen aus Nabenhöhe plus Rotordurchmesser der WEA. Sie liegen damit unter dem in /1/ bei pauschaler Betrachtung geforderten konservativen Abstand vom 1.5fachen aus Nabenhöhe plus Rotordurchmesser der WEA.

In der Abbildung A.1.3 sind die für die Umgebung der WEA resultierenden Treffer pro 16 Quadratmeter und Jahr dargestellt.

Zur Auswertung wurden georeferenzierte Satellitenbilder aus Google Earth verwendet /13/. Auf Grund der Unsicherheit bei der Georeferenzierung wurde ein zusätzlicher räumlicher Toleranzbereich von 2m für die Schutzobjekte berücksichtigt.



Abbildung A.1.3: Trefferhäufigkeiten von Eisstücken pro Rasterfläche (16m²) und Jahr in der Umgebung der WEA 1 - 6 am Standort Bornhausen (Satellitenbild /13/).

A.2 Schadenshäufigkeiten

Aus den ermittelten Flugbahnen ergeben sich für die Schutzobjekte im Bereich der WEA die in Tabelle A.2.1 aufgeführten Randbedingungen.



WEA	Schutzobjekt	Durch Eisfall gefährdete Fläche [m ²]	Anzahl Treffer pro Jahr
WEA 1	A7	~5775	0.03
	B243	0	0
WEA 2	A7	0	0
	B243	0	0
WEA 3	A7	0	0
	B243	0	0
WEA 4	A7	~6300	0.03
	B243	0	0
WEA 5	A7	0	0
	B243	0	0
WEA 6	A7	0	0
	B243	0	0

Tabelle A.2.1: Randbedingungen für die Bewertung von Sach- bzw. Personenschäden am Standort Bornhausen.

Die Bundesstraße B243 wird nicht von Eisstücken getroffen.

Für die wirksame Trefferfläche eines Kfz wird angenommen, dass sie sich proportional zum Anhalteweg des Fahrzeugs verhält. Dies berücksichtigt, dass auch das Auftreffen im Nahbereich des Kfz eine Fehlreaktion beim Fahrer auslösen kann, in dessen Folge es zu einem Unfall kommt. Dabei steigt das Risiko überproportional mit der Fahrgeschwindigkeit. Für die Bewertung von Personenschäden wird weiterhin davon ausgegangen, dass jedes Kfz im Mittel mit 1.5 Personen besetzt ist. Dies entspricht der durchschnittlichen Besetzungszahl von Pkw in Deutschland /7/. Eine infolge eines Treffers durch Eis resultierende Verkettung von Unfällen wurde nicht betrachtet.

Legt man die Verkehrsunfälle mit Personenschaden zugrunde, liegt die Wahrscheinlichkeit bei einem Unfall auf einer Autobahn tödlich zu verunglücken bei 0.022, die Wahrscheinlichkeit tödlich zu verunglücken oder schwer verletzt zu werden liegt bei 0.32 /9/. Dementsprechend wird im folgenden davon ausgegangen, dass 32% der durch Eiswurf und Eisfall verursachten Verkehrsunfälle tödlich sind oder zu schweren Verletzungen führen. Dabei gilt eine Person als schwerverletzt, wenn sie mindestens 24 Stunden stationär in einer Klinik behandelt wurde.

Mit den genannten Ausführungen ergeben sich die in Tabelle A.2.2 aufgelisteten



Unfallhäufigkeiten bzw. Risiken.

Überschreitungen des MEM-Kriteriums sind in Tabelle A.2.2 jeweils fett gedruckt. Die zugrunde gelegten Parameter sind noch einmal in Tabelle A.2.3 aufgeführt.

WEA	Schutzobjekt	Sachschäden pro Jahr	Personenschäden pro Jahr
WEA 1	A 7	3.48*10 ⁻⁷ (einmal in 2.8 Mio. Jahren)	1.67*10 ⁻⁷ (einmal in 5.9 Mio. Jahren)
WEA 4	A 7	2.75*10 ⁻⁷ (einmal in 3.6 Mio. Jahren)	1.32*10 ⁻⁷ (einmal in 7.5 Mio. Jahren)

Tabelle A.2.2: Risiko für Sach- bzw. Personenschäden am Standort Bornhausen.

Einflussparameter	Wert
Vereisungshäufigkeit pro Jahr	0.022 (2.2%)
Vereisungshäufigkeit der WEA bei Vereisungsbedingungen	1 (100%)
Eisstücke pro Vereisungsereignis	167.5
Vereisungsereignisse pro Jahr (vollständige und dickschichtige Vereisung)	8.2
Gesamtanzahl Eisstücke pro Jahr	1374
Für die Statistik berücksichtigte Anzahl an Eisstück-Flugbahnen	~ 1 000 000
Verkehrsaufkommen auf der Bundesautobahn A7 Kfz/Tag	56100
Verkehrsaufkommen auf der Bundesstraße B243 Kfz/Tag	5300
Anzahl Personen pro Kfz	1.5
Wahrscheinlichkeit bei einem Verkehrsunfall mit Personenschaden auf einer Autobahn tödlich zu verunglücken oder schwer verletzt zu werden	0.32

Tabelle A.2.3: Auflistung der verwendeten Einflussparameter.