



Industrie Service

**Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.**

Unabhängige Analyse von Eisfall mit Risikoanalyse

OHE (SCHLESWIG-HOLSTEIN)

Bericht Nr.: MS-1903-016-SH-ICE-RA-de

Revision 05

Datum: 29.08.2022

Bericht verfasst von:

(Teilbereich Eisfallanalyse)

Dipl.-Met. Katja Hofer

(Abteilung Wind Service Center)

Das Dokument besteht aus
45 Seiten.
Seite 1 von 45

Dipl.-Geogr. Florian Weber

(Gruppenleiter - Abteilung Wind Service Center)

Die auszugsweise Wiedergabe des
Dokumentes und die Verwendung
zu Werbezwecken bedürfen der
schriftlichen Genehmigung der
TÜV SÜD Industrie Service GmbH.

Bericht verfasst von:

(Teilbereich Risikobewertung)

Dipl.-Phys. Thorsten Weidl

(Abteilung Systemtechnik und Risikomanagement)

Die Prüfergebnisse beziehen sich
ausschließlich auf die
untersuchten Prüfgegenstände.

Dr. Ing. Ulrich Jenssen

(Abteilung Systemtechnik und Risikomanagement)



Industrie Service

Auftraggeber

Nord-Ostsee Windkraft Ohe GmbH & Co. KG
 Uhlenhorst 1
 D-24790 Schülldorf

Angaben zum Angebot

Angebots-Nr.	Datum	Dienstleistung
AN-WG-2203-151-SH, REV.1	28.03.2022	Analyse von Eisfall mit Risikoanalyse

Berechnete Konfigurationen

Lfd. Nr.	Konfig.-Nr.	Anzahl WEA	WEA-Typ	Leistung	Durchmesser	Nabenhöhe
01	IV	4	Vestas V150	6.0 MW	150 m	125 m

Ausgehändigte Berichte und Änderungen

Revision Nr.	Datum	Titel des Berichtes und Kurzbeschreibung der Änderung
00	16.04.2019	- Analyse von Eisfall mit Risikobewertung - Erstbericht
01	11.07.2019	- Analyse von Eisfall mit Risikobewertung - Vollständiger Endbericht; redaktionelle Anpassungen und Änderung der Zuwegung
02	03.03.2020	- Analyse von Eisfall mit Risikobewertung - Vollständiger Endbericht; Änderung WEA-Typ (WKA1), Koordinaten (WKA1 und WKA5) und Zuwegung
03	16.06.2021	- Analyse von Eisfall mit Risikoanalyse - Vollständiger Endbericht; Änderung Koordinaten (WKA1, WKA2) und Zuwegung, Wegfall WKA5
04	23.06.2021	- Analyse von Eisfall mit Risikoanalyse - Vollständiger Endbericht; Anpassung der Maßnahmenempfehlung für die Kranstellflächen und Zuwegungen
05	29.08.2022	- Analyse von Eisfall mit Risikoanalyse - Vollständiger Endbericht; Änderung WEA-Typ, Koordinaten und Zuwegung

Hinweise

- Punkt anstatt Komma als Dezimaltrennzeichen
- Hochstrich als Zifferngruppierung
- Es existieren keine wirtschaftlichen oder weiterführenden geschäftlichen Verflechtungen mit dem Auftraggeber
- Notwendigkeit der Untersuchung ergibt sich auf Grund eines Untersuchungsobjekts innerhalb des durch die Richtlinie für Windenergieanlagen [1] definierten Radius von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe)

Inhalt

0	Zusammenfassung der Ergebnisse	5
1	Eingangsdaten für die Berechnungen	6
1.1	Karteninformationen	6
1.2	Windparkkoordinaten und anlagenspezifische Informationen	6
1.3	Technische Eingangsdaten zum Verhalten bei Eisansatzerkennung	6
1.4	Meteorologische Eingangsdaten	7
1.4.1	Windstatistik für die Eisfallberechnungen	7
1.4.2	Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage	8
1.5	Untersuchungsobjekte am Standort	8
1.6	Graphische Darstellung	10
2	Ermittlung des von den Anlagen ausgehenden Gesamtrisikos	12
2.1	Tabellarische Übersicht der Risikoermittlung am untersuchten Standort	12
2.2	Maßnahmenempfehlung	13
2.3	Räumliche Verteilung des Risikos am untersuchten Standort	14
2.3.1	WKA1	14
2.3.2	WKA2	15
2.3.3	WKA3	16
2.3.4	WKA4	17
2.4	Risiko für Kranstellflächen und Zuwegung	18
3	Hinweise zur Erstellung der Analyse	19
4	Literaturverzeichnis	20
5	Anhang	23
5.1	Eiswurf und Eisfall bei Windenergieanlagen	23
5.2	Theoretische Berechnungsgrundlagen von Eiswurf bzw. Eisfall	25
5.3	Annahmen für die Eisfallberechnungen	26
5.4	Einfluss einer Blattheizung	27
5.5	Eismassen und Eistypen	27
5.6	Risiko und Risikoakzeptanzkriterien	29
5.6.1	Der Risikobegriff	29
5.6.1.1	Risikobewertung	29
5.6.1.2	Risikodarstellung - Risikomatrix	30
5.6.2	Risikoakzeptanzkriterien	32
5.6.2.1	Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM)	32
5.6.2.2	Das ALARP-Prinzip	33
5.6.2.3	Kollektives Risiko	34
5.6.2.4	Im Rahmen der Untersuchung verwendete Akzeptanzkriterien	35



5.6.2.5 Vergleichsrisiken	36
5.7 Für die Risikoanalyse verwendete Methodik	37
5.7.1 Schadensausmaß	37
5.7.1.1 Die Probit-Funktion	37
5.7.1.2 Ermittlung von Sachschäden	38
5.7.1.3 Ermittlung der Eisansatztage	39
5.7.1.4 Betrachtete Expositionsszenarien	39
5.7.1.5 Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit H_T , P_T	41
5.7.1.6 Ermittlung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit P_A	42
5.7.1.7 Berücksichtigung eines Reduktionsfaktors	42
5.7.1.8 Ermittlung der Gefährdungswahrscheinlichkeit	42
5.7.2 Ermittlung des Risikos	43
5.7.3 Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen	43
5.8 Abkürzungsverzeichnis	45

0 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wird eine unabhängige Analyse für den Standort Ohe durchgeführt. Dabei wird der mögliche Eisfall am Standort durch die untersuchten, vereisungsbedingt abgeschalteten und im Trudelbetrieb befindlichen Anlagen, welche vom Auftraggeber vorgegeben sind, berechnet.

Die gemäß der Richtlinie für Windenergieanlagen – Technische Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage 1.2.8/6 [1] geforderten Unterlagen zur Funktionssicherheit des Eiserkennungssystems liegen für den geplanten WEA-Typ vor (siehe hierzu Abschnitt 1.3).

Entsprechend der Technischen Baubestimmungen, Ziffer 2 der Anlage 1.2.8/6 [1] sind Verkehrswege und Gebäude in einem Radius von $1.5 \times$ (Rotordurchmesser + Nabenhöhe) um die untersuchten Anlagen im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung der öffentlichen Sicherheit durch Eiswurf zu betrachten. Nähere Angaben zu deren Lage sowie den jeweiligen Entfernungen zu den geplanten Anlagen sind im Abschnitt 1.5 zu finden.

Hinsichtlich der Risikobewertung der ermittelten Eisfallbereiche ist zusammenfassend festzuhalten, dass eine Kombination aus Hinweisschildern und Warnschildern empfohlen wird. Dies gewährleistet eine sichere Benutzung der untersuchten Objekte im Bereich der Windenergieanlagen.

Es wird empfohlen:

- auf allen Wegen, auf denen der Windpark zu Fuß, mit dem Fahrrad oder einem sonstigen Fahrzeug erreicht werden kann, allgemeine Hinweisschilder anzubringen, die vor möglichem Eisfall warnen und dazu aufrufen, bei winterlichen Bedingungen auf den Wegen zu bleiben.
- an dem in Ost-West Richtung verlaufenden Wirtschaftsweg C1.4, beidseitig der WKA4 Warnschilder aufzustellen, die vor Eisfall bei winterlichen Wetterbedingungen warnen. Diese Schilder sollen verhindern, dass sich Personen länger als unbedingt notwendig im Gefahrenbereich aufhalten.
- die Kranstellflächen sowie deren Zuwegungen entsprechend der Vorgaben aus Kapitel 2.4 abzusichern.

Für die Bahntrasse im Süd-Westen der WKA2 und der WKA3 besteht kein signifikantes Risiko, der in Tabelle 7 genannte Wert ist vernachlässigbar und muss nicht weiter beachtet werden.

1 Eingangsdaten für die Berechnungen

1.1 Karteninformationen

Das topographische Modell sowie das Höhenlinienmodell wird auf Basis des vorhandenen Materials [17][18] angefertigt.

1.2 Windparkkoordinaten und anlagenspezifische Informationen

Die Standortkoordinaten für den Windpark werden vom Auftraggeber vorgegeben [6]. Die Angabe der Fußpunkthöhen entstammt aus der Interpolation des Höhenmodells und kann damit von feldvermessenen Werten abweichen. Die Fußpunkthöhen unterliegen damit der Schwankung des eingegangenen Höhenmodells.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Koordinaten der betrachteten WEA sowie die anlagenspezifischen Informationen zum betrachteten WEA-Typ dargestellt.

Windparkkoordinaten - betrachteter Standort								
Windpark Ohe	Anlagentyp	Nabenhöhe	Durchmesser	1.5 x (NH+D)	Leistung	Koordinatensystem		Höhe ü. NN (ca.)
						UTM Zone 32, ETRS89		Fußpunkt
	[-]	[m]	[m]	[m]	[MW]	O	N	[m]
WKA 01	Vestas V150-6.0MW	125	150	412.5	6.0	549224	6014140	10
WKA 02	Vestas V150-6.0MW	125	150	412.5	6.0	549453	6013763	10
WKA 03	Vestas V150-6.0MW	125	150	412.5	6.0	549882	6013471	10
WKA 04	Vestas V150-6.0MW	125	150	412.5	6.0	549827	6013916	10

Tabelle 1: Koordinaten und technische Daten der betrachteten WEA am Standort (Konfiguration IV).

1.3 Technische Eingangsdaten zum Verhalten bei Eisansatzerkennung

Durch den Auftraggeber wird eine Anlagenkonfiguration zur Berechnung am Standort vorgegeben [6][22][23][25]. Die jeweiligen Eingangswerte für den betrachteten Anlagentyp werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Technische Daten								
Konfiguration	Anlagentyp	Blattheizung	Gondelarretierung		Maximale Drehzahl im Trudelbetrieb	Maximale Drehzahl im Betrieb	Anforderungen gemäß [1]	
			berücksichtigt	Richtung			Eiserkennungssystem	Integration in WEA-Technik
[-]	[-]	[-]	[-]	[°]	[U/min]	[U/min]	[-]	[-]
IV	Vestas V150	nein	nein	---	[0.12;3.1]	[4.82;10.12]	erfüllt	erfüllt

Tabelle 2: Zusammenfassung der technischen Daten der betrachteten WEA.

Wie aus der Tabelle hervorgeht, erfüllt das geplante Eiserkennungssystem für Konfiguration IV die Anforderungen an [1] sowie auch die Integration des Eiserkennungssystems auf Basis der zur Verfügung gestellten Dokumente [22][23] die Anforderungen gemäß [1] erfüllen. Eine feste Gondelpositionierung wird nicht berechnet.

Wie im Gutachten zur Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems BLADEcontrol [23] beschrieben, ist der Eisdetektor in der Lage Vereisung an den Rotorblättern und auch die Eisfreiheit der Rotorblätter im Stillstand der Anlage zu messen. Entsprechend [22] fährt die Steuerung der Vestas WEA diese erst wieder in den Produktionsmodus, wenn Eisfreiheit vorliegt und der BID (BLADEcontrol Ice Detector) verwertbare Messdaten liefert. Ist letzteres nicht der Fall oder liegt ein Ausfall des BID vor, kann die WEA nicht in den Produktionsmodus überführt werden, auch wenn ein eisfreier Zustand vorliegen sollte.

Vom Anlagenhersteller liegt ein Dokument [25] mit den Angaben der Drehzahlkennlinie im Trudelbetrieb, sowie den für die Analyse im Störbetrieb benötigten Normalbetrieb vor.

1.4 Meteorologische Eingangsdaten

1.4.1 Windstatistik für die Eisfallberechnungen

Für die Berechnungen wird die auf Basis des Berichts [7] für den Standort und für die hier betrachtete Nabenhöhe generierte Windstatistik und der Exponent der Windscherung (α) herangezogen.

Aufgrund der räumlichen Nähe der geplanten Anlagen im Windpark sind hinsichtlich der für die Beurteilung des Eisfalls einfließenden Windverhältnisse die minimalen Unterschiede zwischen den einzelnen Windstatistiken an den geplanten WEA-Standorten nicht relevant.

Die nachfolgende Tabelle stellt eine Zusammenfassung dieser Eingangsdaten dar.

Windstatistik (UTM ETRS89 X: 549197; Y: 6014438; 116.5m NH)			
Sektorielle Windstatistik in Nabenhöhe			
Sektor	Häufigkeiten	A-Parameter	k-Parameter
[°]	[%]	[m/s]	[-]
345 - 015	3.1	6.0	2.40
015 - 045	3.8	5.9	2.22
045 - 075	7.5	7.0	2.21
075 - 105	9.1	8.0	2.65
105 - 135	6.9	7.4	2.97
135 - 165	6.3	7.6	2.57
165 - 195	10.2	8.3	2.74
195 - 225	13.4	8.8	2.87
225 - 255	13.3	9.2	2.37
255 - 285	12.7	8.3	2.19
285 - 315	9.9	7.5	2.10
315 - 345	4.0	5.0	1.74

Windprofil	
Exponent der Windscherung	0.34

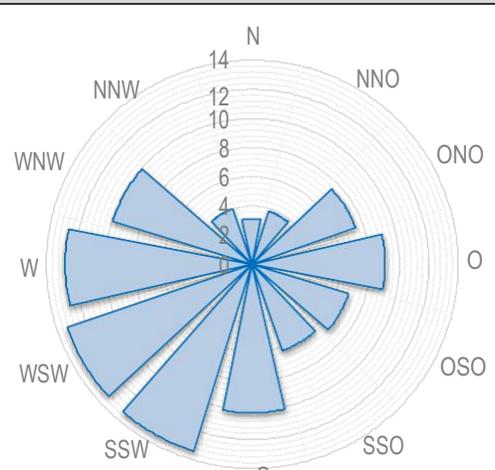
Windrose


Tabelle 3: Zusammenfassung der wichtigsten Parameter der ausgewählten Windstatistik.

Die höchsten Windgeschwindigkeiten (> 25 m/s) treten in den Sektoren WSW und W auf.

1.4.2 Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage

In Anlehnung an [35] werden als Eingangsdaten für die Risikobewertung die Anzahl der Tage pro Jahr mit Eisfallpotenzial standortspezifisch abgeschätzt.

Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage	
Standort	Anzahl an Vereisungstagen
Ohe	8

Tabelle 4: Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage auf Basis von [35].

Die in obiger Tabelle angegebene Anzahl an Vereisungstagen ist stark abhängig von der Lage und der Höhe über NN. Genauere Angaben zur Herleitung sind in Abschnitt 5.7.1.3 zu finden.

1.5 Untersuchungsobjekte am Standort

Für die Bezeichnung der Untersuchungsobjekte wird folgende Nomenklatur verwendet: XY.Z. Dabei bezeichnet X einen bestimmten Objekttyp (z.B. Schiene, Landesstraße, Zuwegung). Gibt es mehrere Untersuchungsobjekte eines Typs, werden diese mit Y nummeriert. Z gibt den Bezug zur nächstgelegenen WEA an (siehe Tabelle 5).

Einheitliche Nomenklatur der Untersuchungsobjekte			
Form:		XYZ	
Legende:			
X	Objekttyp	A	Schienenstrecke
		B	Landesstraße
		C	Gemeindeweg
		W	Kranstellfläche / Zuwegung
Y	Nummerierung der jeweiligen Objekttypen	1, 2, ...	
Z	Nummerierung der WEA	1, 2, ...	

Tabelle 5: Nomenklatur der Untersuchungsobjekte.

Entsprechend der Technischen Baubestimmungen, Ziffer 2 der Anlage 1.2.8/6 [1] werden mögliche Untersuchungsobjekte in einem Radius von $1.5 \times$ (Rotordurchmesser + Nabenhöhe) um die untersuchten Anlagen ermittelt. Diese werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Hierbei werden die minimalen Abstände zu der jeweils nächstgelegenen WEA angegeben, wobei der Abstand auf 5 m gerundet wird. Desweiteren soll hierbei beachtet werden, dass die Genauigkeit dieser Angabe auf die Genauigkeit der Kartengrundlage [17], zurückzuführen ist. Weiterhin werden in der folgenden Tabelle die relevanten Expositionsszenarien (Wegkategorien) gemäß Abschnitt 5.7.1.3 mit aufgeführt



Untersuchungsobjekte

Bezeichnung	Objekt	Minimaler Abstand zur jeweiligen WEA	Expositionszenario (Wegekategorie)
A	Schienenstrecke 1040 / 1022	290 m (WKA3)	56 Züge / d
B1.2	Landesstrasse 255	180 m (WKA2)	1277 Fzg. / d
B1.3	Landesstrasse 255	140 m (WKA3)	1277 Fzg. / d
C1.2	gemeindlicher Verbindungsweg, Wirtschaftsweg	95 m (WKA2)	regelmäßig
C1.4	gemeindlicher Verbindungsweg, Wirtschaftsweg	35 m (WKA4)	regelmäßig
W1.1	Kranstellfläche WKA1	10 m (WKA1)	siehe Kapitel 2.4
W2.1	Zuwegung WKA1	25 m (WKA1)	siehe Kapitel 2.4
W3.2	Kranstellfläche WKA2	10 m (WKA2)	siehe Kapitel 2.4
W4.2	Zuwegung WKA2, WKA3	30 m (WKA2)	siehe Kapitel 2.4
W5.3	Kranstellfläche WKA3	10 m (WKA3)	siehe Kapitel 2.4
W6.3	Zuwegung WKA2, WKA3	30 m (WKA3)	siehe Kapitel 2.4
W7.4	Kranstellfläche WKA4	10 m (WKA4)	siehe Kapitel 2.4
W8.4	Zuwegung WKA4	30 m (WKA4)	siehe Kapitel 2.4

Tabelle 6: Objekte in der Umgebung der betrachteten Anlagenstandorte.

1.6 Graphische Darstellung

Die nachfolgende Abbildung stellt einen Überblick der lokalen Situation dar. Es sind die betrachteten WEA und die Untersuchungsobjekte auf einer topographischen Karte abgebildet.

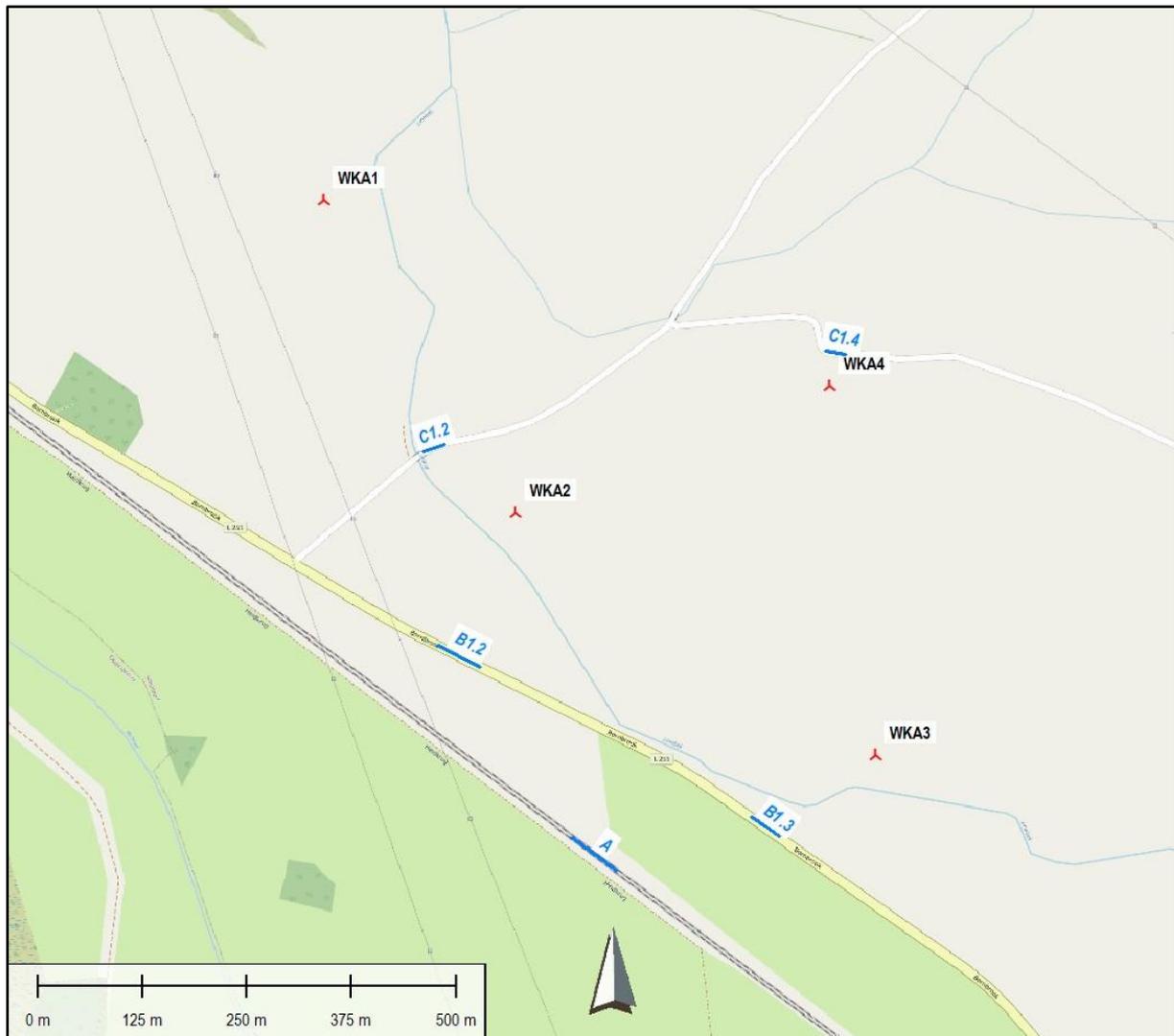


Abbildung 1: Kartographische Darstellung mit OSM-Daten [20] mit den untersuchten Objekten am Standort (blaue Signatur) ohne Kranstellflächen und Zuwegung, sowie Standorte der betrachteten WEA (▲).

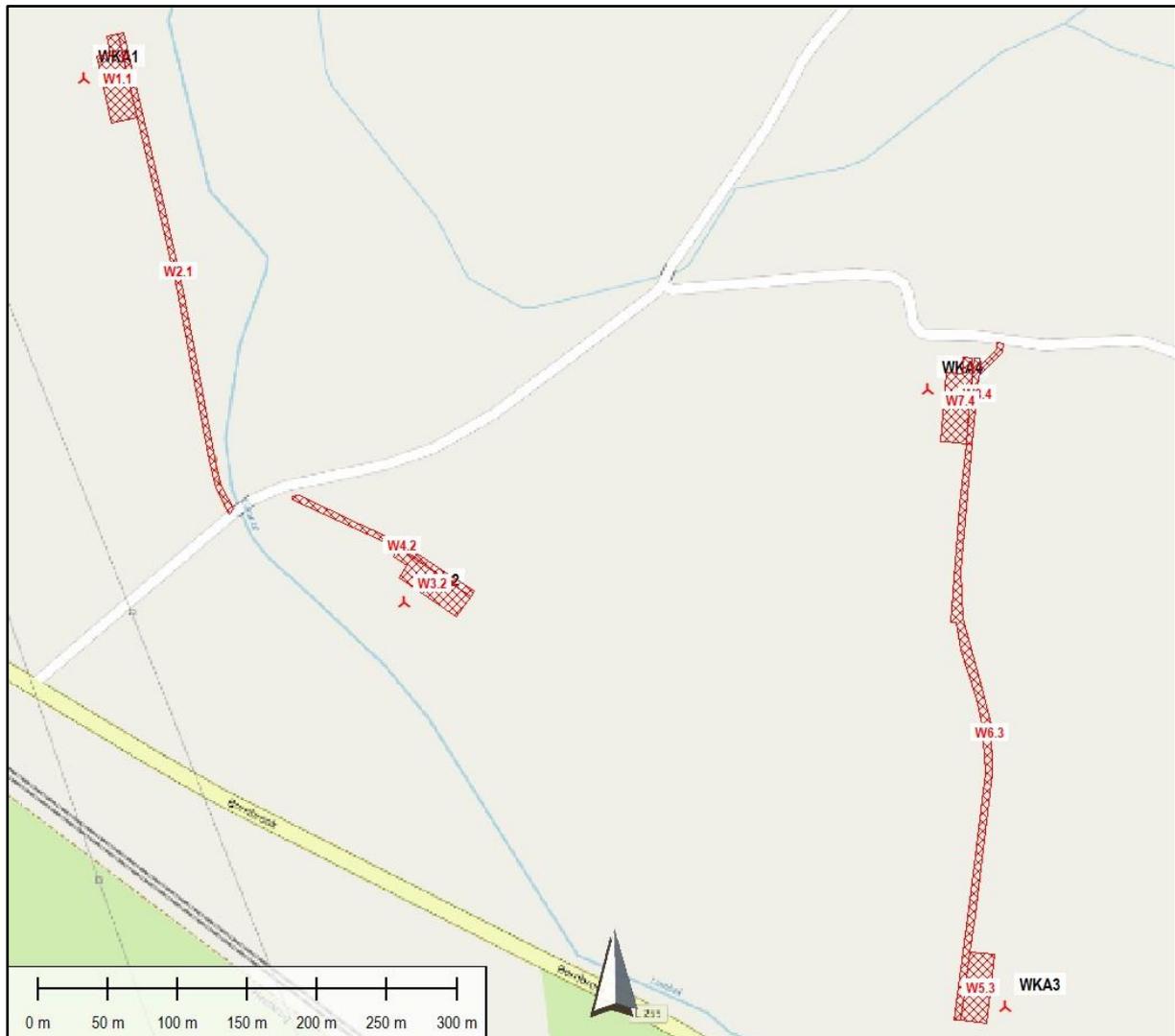


Abbildung 2: Kartographische Darstellung mit OSM-Daten [20] mit der Zuwegung sowie den Kranstellflächen (rot schraffiert) und den Standorten der betrachteten WEA (人).



2 Ermittlung des von den Anlagen ausgehenden Gesamtrisikos

In den folgenden Kapiteln werden die Risiken für alle Objekte aus Tabelle 6 ermittelt, dargestellt und ggf. Maßnahmen empfohlen. Bei Objekten die hier nicht betrachtet werden, obwohl sie in einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) liegen, ist es offensichtlich, dass das Risiko vernachlässigbar ist, da keine Treffer bzw. nur Einzeltreffer ermittelt werden.

2.1 Tabellarische Übersicht der Risikoermittlung am untersuchten Standort

Objekt	Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen	Empfohlene Maßnahmen	Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen
A	< 5.34E-10 (vernachlässigbar)	---	vernachlässigbar
B1.2	4.23E-09 (vernachlässigbar)	---	vernachlässigbar
B1.3	1.59E-06 (akzeptabel)	---	akzeptabel
C1.2	3.38E-09 (vernachlässigbar)	---	vernachlässigbar
C1.4	1.25E-07 (tolerabel)	Warnschilder, die vor Eisfall bei winterlichen Wetterbedingungen warnen	akzeptabel
W1.1	Die Kranstellflächen und die Zuwegungen zu den Kranstellflächen und den Aufstellorten werden allgemeingültig in Kapitel 2.4 behandelt.		
W2.1			
W3.2			
W4.2			
W5.3			
W6.3			
W7.4			
W8.4			

Tabelle 7: Übersicht der Risikoanalyse für alle Untersuchungsobjekte



2.2 Maßnahmenempfehlung

In Tabelle 7 sind die Risiken für alle wesentlichen Untersuchungsobjekte dargestellt, Kranstellflächen und Zuwegungen werden in Kapitel 2.4 behandelt.

Das Risiko ist für die Schienenstrecke 1040 / 1022, die Landesstraße 255 sowie den nach Nord-Osten verlaufenden Wirtschaftsweg C1.2 aufgrund des ausreichend großen Abstands zuden jeweiligen WKA'n akzeptabel (B1.3) bzw. vernachlässigbar (A, B1.2 & C1.2), sodass hier keine zusätzlichen risikoreduzierenden Maßnahmen notwendig sind. Allgemeine Hinweisschilder, die dazu aufrufen, bei winterlichen Bedingungen auf den Wegen zu bleiben, sind obligatorisch.

An dem in Ost-West Richtung verlaufenden Wirtschaftsweg C1.4 wird empfohlen, beidseitig der WKA 4 im Abstand von ca 100 m Warnschilder aufzustellen, die vor Eisfall bei winterlichen Wetterbedingungen warnen. Diese Schilder sollen verhindern, dass sich Personen länger als unbedingt notwendig im Gefahrenbereich aufhalten.

2.3 Räumliche Verteilung des Risikos am untersuchten Standort

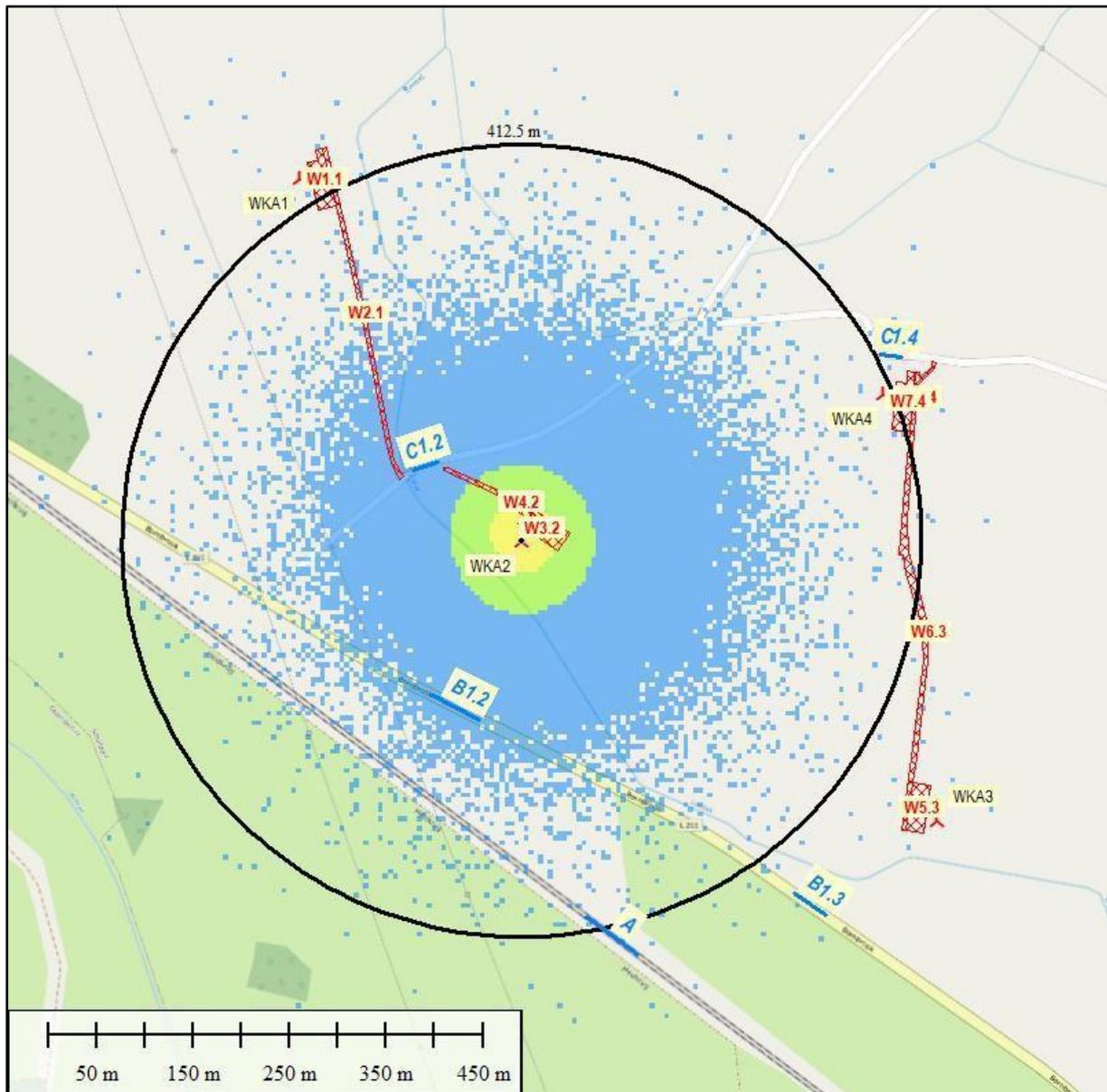
In diesem Abschnitt werden die Verteilungen des Risikos, die Lage der Untersuchungsobjekte sowie ein Umkreis von 412.5 m um die WKA, der einem Abstand von $1.5 \times$ (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [1] entspricht, dargestellt. Das Risiko wird für Objekte, die in diesem Umkreis liegen, beurteilt. Dabei wird jeweils die maßgebliche Exposition verwendet (s. Tabelle 6). Wege mit kleinerer Exposition weisen ein entsprechend geringeres Risiko auf.

2.3.1 WKA1

Bei der WKA1 werden lediglich Kranstellflächen und Zuwegungen betrachtet, die nicht zum allgemeinen Wegesystem gehören. Diese werden in Kapitel 2.4 betrachtet.

2.3.2 WKA2

Folgende Abbildung 3 zeigt, dass insbesondere für die Bahnlinie nur noch vereinzelt Treffer durch Eisstücke simuliert wurden. Das Risiko dafür ist in jedem Fall vernachlässigbar und muss nicht weiter betrachtet werden. Auch für den Weg C1.2 ist das Risiko vernachlässigbar.

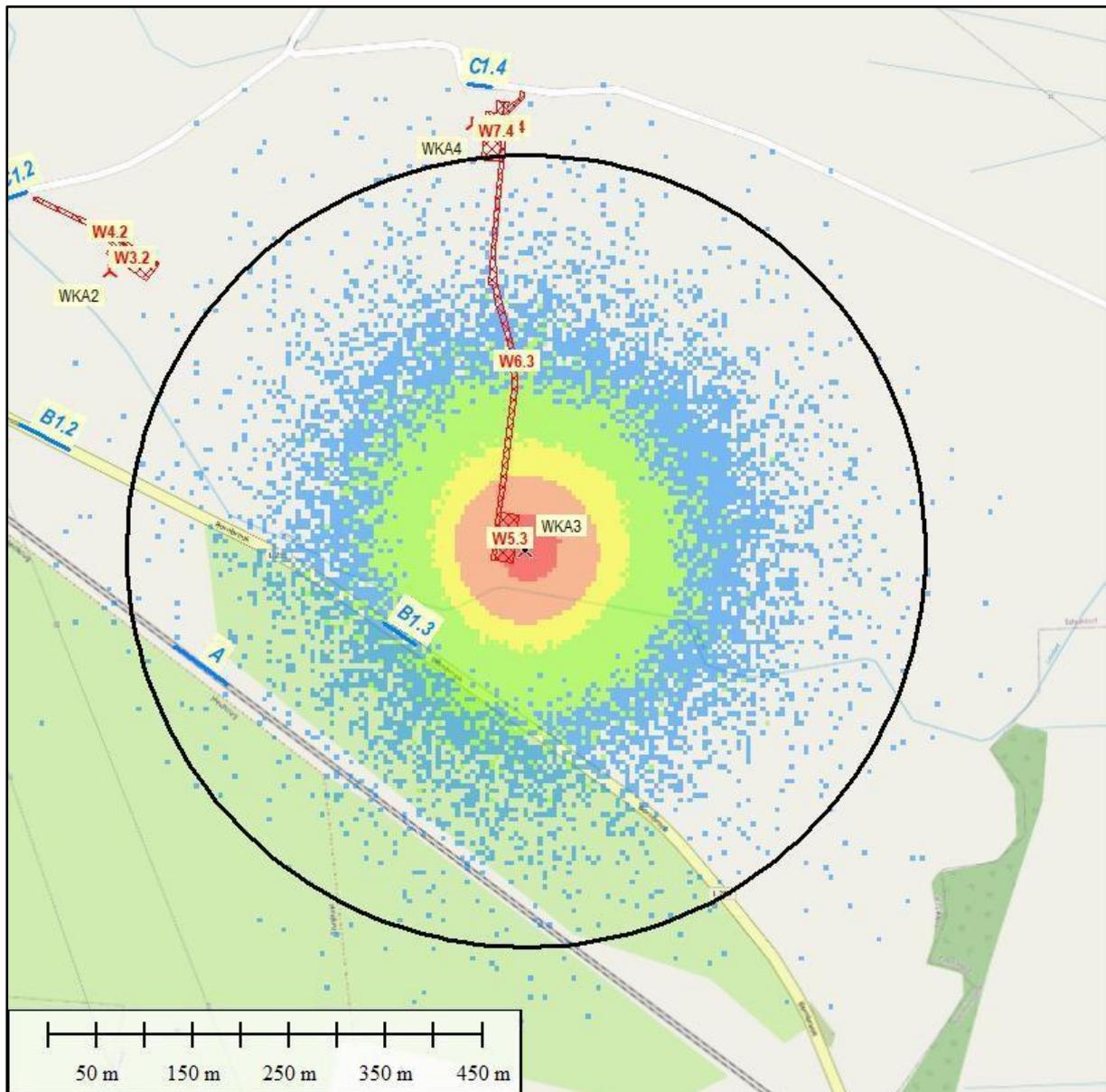


Legende der Risikokategorien			
	kein Treffer		hohes Risiko
	vernachlässigbares Risiko		sehr hohes, unakzeptables Risiko
	akzeptables Risiko		
	tolerables Risiko		

Abbildung 3: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WKA2 inklusive des Umkreises von 412,5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das Risiko für Fußgänger auf regelmäßig benutzten Wegen.

2.3.3 WKA3

Folgende Abbildung 4 zeigt, dass für die Bahnlinie nur noch vereinzelt Treffer durch Eisstücke simuliert wurden. Das Risiko dafür ist in jedem Fall vernachlässigbar und muss nicht weiter betrachtet werden. Für die Landesstraße 255 ist das kollektive Risiko für alle Autofahrer akzeptabel, sodass auch hier keine Maßnahmen erforderlich sind. Das individuelle Risiko für einen einzelnen Fahrer kann vernachlässigt werden.

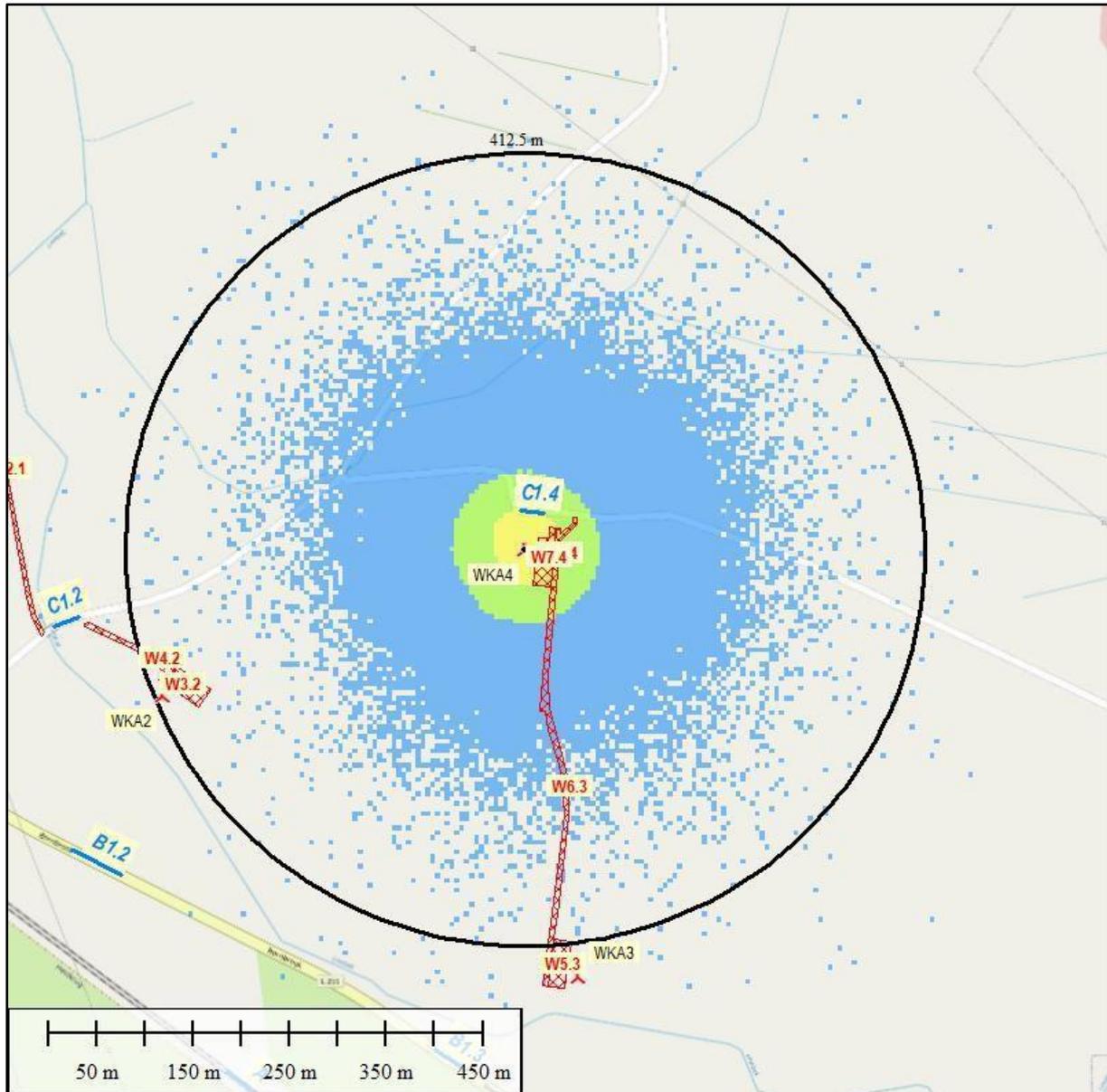


Legende der Risikokategorien			
	kein Treffer		hohes Risiko
	vernachlässigbares Risiko		sehr hohes, unakzeptables Risiko
	akzeptables Risiko		
	tolerables Risiko		

Abbildung 4: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WKA3 inklusive des Umkreises von 412.5 m um die WKA herum und des Risikoprofils für das kollektive Risiko auf der Landesstraße 255.

2.3.4 WKA4

Folgende Abbildung 5 zeigt, dass für den Weg C1.4 das Risiko vernachlässigbar ist.



Legende der Risikokategorien			
	kein Treffer		hohes Risiko
	vernachlässigbares Risiko		sehr hohes, unakzeptables Risiko
	akzeptables Risiko		
	tolerables Risiko		

Abbildung 5: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WKA4 inklusive des Umkreises von 412.5 m um die WKA herum und des Risikoprofils für das Risiko für Fußgänger auf regelmäßig benutzten Wegen.



2.4 Risiko für Kranstellflächen und Zuwegung

Bei den Zuwegungen, Kranstellflächen und den Aufstellungsorten der betrachteten WKA muss davon ausgegangen werden, dass sie von Passanten bewusst benutzt werden, um in die Nähe der WKA zu gelangen. Hinsichtlich der Zuwegungen bzw. Stichwege, Kranstellflächen und Aufstellungsorte der WKA wird ein gewollter einmaliger kurzzeitiger Aufenthalt einer Person im Gefahrenbereich unterstellt. Dieses Risiko muss generell durch geeignete Maßnahmen beherrscht werden. Bei Eisfallbedingungen besteht in diesem Fall bereits bei einmaligem Vorkommen ein hohes Risiko. Bei Eisfallbedingungen besteht in diesem Fall bereits bei einmaligem Vorkommen ein hohes Risiko. Daher wird empfohlen, die Kranstellflächen mittels einer der folgenden Punkte abzusichern:

- Kranstellflächen einzäunen
- Aufstellung eines Schildes mit einer an das Eiserkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bzw. Aufenthalt abrät
- Zugang zu den Kranstellflächen durch Weidetore an den Zuwegungen (Abzweigung vom öffentlichen Wegenetz) verhindern und die Absperrung im Winter mit Hinweisen auf die Gefahr durch Eisfall untermauern.

3 Hinweise zur Erstellung der Analyse

- Bezugnehmend auf die Dokumente, die über die Eignung des Eisansatzerkennungssystems zur zuverlässigen Abschaltung der Anlage bei Vereisung vorliegen (siehe Abschnitt 1.3), werden die Berechnungen bei einer im Trudelbetrieb befindlichen Anlage durchgeführt.
- Die Zuverlässigkeit des Eisansatzerkennungssystems ist von zentraler Bedeutung für die Risikobewertung, da die Rotordrehzahl eine entscheidende Rolle für die simulierten Fallweiten spielt. Für die funktionale Sicherheit dieses Systems werden die Vorgaben der IEC 61508-1 [37] angenommen.
- Als Eingangsparameter für die Umdrehungszahl im Trudelbetrieb wird die vom Anlagenhersteller mitgeteilte Umdrehungszahl verwendet [25].
- Die Unsicherheitsbetrachtung des Prüfberichts [7] weist eine kombinierte Unsicherheit von 10.3% hinsichtlich der meteorologischen Eingangsdaten und der Windfeldmodellierung am Standort aus.
- Für die Berechnungen wird eine ganzjährige Windstatistik verwendet, d.h. es werden die über das ganze Jahr verteilten Windereignisse in eine mittlere Windstatistik zusammengefasst. Die Betrachtung der jahreszeitlich abhängigen bzw. bei Eisfallbedingungen tatsächlich vorherrschenden Windverhältnisse ist basierend auf der verfügbaren Datengrundlage nicht möglich.
- Die Ergebnisse der Simulationen zeigen eine statistische Verteilung der Fallweiten von insgesamt 10 Millionen herunterfallenden Eisstücken. Eine Aussage über die Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit von auftretendem Eisfall am Standort wird nicht getroffen.
- Die Topographie des Standorts wird in der Eisfallsimulation in Form eines dreidimensionalen Geländemodells berücksichtigt. Eine evtl. Bewaldung wird bei der Berechnung der Fallweiten nicht berücksichtigt.

Haftungsausschluss

Der vorliegende Bericht wurde nach bestem Wissen und Gewissen und nach allgemeinen Regeln der Technik angefertigt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass das durch den Auftraggeber bzw. Dritte zur Verfügung gestellte Material (Schriften, Aufzeichnungen, Daten, Diagramme, etc.) von der TÜV Süd IS nicht auf Richtigkeit geprüft werden konnte, daher hierfür keine Fehlerfreiheit garantiert und keine Haftung übernommen werden kann.

Die ermittelten Ergebnisse sind nur im Kontext mit dem gesamten Bericht und unter besonderer Berücksichtigung der Hinweise und ermittelten Unsicherheiten zu den Ergebnissen zu verstehen.

Es soll zudem darauf hingewiesen werden, dass alle prognostizierte Werte im Bereich der Windenergienutzung sehr hohen Unsicherheiten unterliegen, da modellarische Berechnungen und entsprechende Parametrisierungen unter Umständen erhebliche Abweichungen zu realen Werten oder weiteren Modellergebnissen aufzeigen können.

Des Weiteren kann nicht gewährleistet werden, dass die anlagenspezifischen Angaben und Daten des Herstellers (z.B. Leistungskennlinie, Schallpegel, Standsicherheitswerte, Schubbeiwerte) eingehalten werden. Hierzu sollte ein geeigneter und wirksamer Garantievertrag abgeschlossen werden.

Zukünftige Änderungen (z.B. Umgebungsbedingungen, Anlagenparametrisierung, Klimatologische Bedingungen), können sich auf das Ergebnis auswirken und konnten u.U. nicht berücksichtigt werden.

Jährliche Schwankungen des Klimas können von den vorliegenden langjährigen ermittelten Prognosewerten erheblich bis sehr stark abweichen und sollten berücksichtigt werden.

Der vorliegende Bericht entspricht dem Charakter einer Prognose mit den zusätzlichen im Kontext stehenden Angaben zu den Unsicherheiten.

Für eine auszugsweise Vervielfältigung wird keine Haftung oder Gewähr für die Prognosewerte übernommen.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Schleswig-Holstein Ministerium für Inneres, ländliche Räume, Integration und Gleichstellung, Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen für das Land Schleswig-Holstein (VV TB SH), Anlage 1.2.8/6 zur "Richtlinie für Windenergieanlagen", April 2021
- [2] IEC 60050-415: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch, Berlin (D), 1999
- [3] IEC 61400-1: Wind Turbines – Part 1: Design Requirements, International Electrotechnical Commission, Geneva (CH), Aug. 2005
- [4] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Angebot AN-WG-2203-151-SH, REV.1, Regensburg, 28.03.2022
- [5] Nord-Ostsee Windkraft Ohe GmbH & Co. KG, Beauftragung Angebot AN-WG-2203-151-SH, REV.1 für WP Ohe, Schülldorf, 24.06.2022
- [6] Planungsbüro Petrick GmbH & Co. KG, Koordinaten der geplanten WEA, Anhang: 220624_WP-Ohe_V150-UePla5-A3.pdf, Email, 24.06.2022
- [7] Anemos Jacob, 04_Ohe_Rev.0.0_12.01.2016_aj.pdf, Gutachterliche Stellungnahme über die langjährigen mittleren Windverhältnisse und die zu erwartenden mittleren Energieerträge von Windkarftanlagen an einem Standort bei Ohe (Windpark Ohe), Revision 0.0 vom 12.01.2016
- [8] C. Morgan and E. Bossanyi, Wind turbine icing and public safety - a quantifiable risk?, Proceedings of Boreas III conference, Sariselka, Finland 1996
- [9] E. Bossanyi and C. Morgan, Wind turbine icing – its implications for public safety, Proceedings of European Union Wind Energy Conference 1996
- [10] C. Morgan, E. Bossanyi and H Seifert, Assessment of safety risks arising from wind turbine icing, Proceedings of EWEC '97 conference, Dublin 1997
- [11] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Richtlinie für Windenergieanlagen, Berlin (D), 2004
- [12] OVG-Rheinland-Pfalz, Urteil 1 A 11330/07.OVG vom 29.10.2008
- [13] René Cattin, Alpine Test Site Guetsch – Handbuch und Fachtagung (Schlussbericht), Bern, 31.12.2008
- [14] S. Biswas, P. Taylor and J. Salmon, A model of ice throw trajectories from wind turbines, Research Article – Wind Energy 2012; 15:889-901, 2011
- [15] Excel-Programm Flugbahn 1P0 zur numerischen Berechnung der Flugbahn von Körpern aus ihrer Anfangsbewegung unter Berücksichtigung der Schwerkraft und des Luftwiderstands – Arbeitsbericht, TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Dr. Christoph Reichel, 2007
- [16] Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage
- [17] Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein, TOP25 1:25'000 Schleswig Holstein, Version 3.0, 2009
- [18] Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein, Digitales Geländemodell DGM25, 2009
- [19] Geoportal Schleswig-Holstein, <https://danord.gdi-sh.de/viewer/resources/apps/Anonym/index.html?lang=de>, Stand 02.04.2019
- [20] OSM Daten, <http://ows.mundialis.de/services/service>, Stand 02.04.2019
- [21] Nord-Ostsee Windkraft Ohe GmbH & Co. KG, Hr. Rumpel, Daten und Dokumente zum Windpark Ohe, E-Mail vom 07.03.2019

Bereitgestellte Daten im Download Datenpaket:

- 190201_NOW_WP-Ohe_Informationen-STGN-Eisabwurf.pdf
 - 190201_WP-Ohe_VG-067+68_Eisabwurf-UeKa_A3-10.pdf
 - 190301_WP-Ohe_5-WKA.dwg
 - 01_Projektbeschreibung_.pdf
 - 02_Standorte-der-WKA_und_Koordinatentransformation.pdf
 - 03-a_0051-2750.V06-Allgemeine-Spezifikation-Vestas-Eiserkennung-(VID)-(0051-2750).pdf
 - 03-b_VID_Weidmuler_Certificate_DNVGL-SE-0439-04314-0-Weidmüller_BLADEcontrol-Ice-Detector_Certification_(3).pdf
 - 03-c_GL-75172-Gutachten-Integration-des-BLADEcontrol-Ice-Detector-BID-in-die-Steuerung-von-Vestas-Windenergieanlagen-(0047-7240).pdf
 - 03-d_0061-9745_V00.pdf
 - 04_Ohe_Rev.0.0_12.01.2016_aj.pdf
 - 05_Verkehrsaufkommen-L255+Bahn.pdf
 - 181206_Messdaten-Bokelholmer-Chaussee_Hoehe-Bahnhofsstraße.pdf
 - 190228_NOWO-TUEV-SUED_Auftrag-Eisabwurfgutachten_AN-WG-1902-037-SH_7.150€_.pdf
 - 190301_WP-Ohe_UeKa-Foto_5-WKA_A3-10.pdf
 - 190301_WP-Ohe_UeKa-Untersuchungsobjekte_5-WKA_A3-7.5.pdf
 - Vestas_Bestaetigung-Trudelbetrieb_V126HTq_V136-4.2MW.pdf
 - Fotodokumentation am Standort mit 20 Bildern
- [22] DNV-GL, Integration des BLADEcontrol Ice Detector BID in die Steuerung von Vestas Windenergieanlagen, Report 75172, Rev.6, 18.10.2021
- [23] DNV-GL, Typenzertifikat Eis-Erkennungssystem BLADEcontrol Ice Detector (BID), TC-DNVGL-SE-0439-04314-1, gültig bis 19.10.2022, 20.10.2020
- [24] Planungsbüro Petrick GmbH & Co. KG, Zuwegung der geplanten WEA, Anhang: 220706_WP-Ohe-4WEA_25832.dwg, Email, 07.07.2022
- [25] Planungsbüro Petrick GmbH & Co. KG, Umdrehungszahl der geplanten WEA, Anhang: 0098-0883_V00 - V150-6.0 MW RPM Curves.pdf, Email, 07.07.2022
- [26] Internetportal des Bureau of Transportation Statistics (BTS), <http://www.bts.gov/btsprod/nts/>
- [27] DIN EN 50126 - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit (RAMS), März 2000
- [28] Health and Safety Executive (HSE), *ALARP-Prinzip* <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarplance.htm>
- [29] Health and Safety Executive (HSE), *The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations*, 1992 (Revised Edition), London: HMSO
- [30] „*Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung*“, Bericht der Störfallkommission beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, SFK-GS-41, 21.04.2004
- [31] Methods for determining the Potential Damage, CPR16E, CIP-data of royal library
- [32] Floyd D. J., Ball P. J., *Societal Risks*, Hongkong, 1993
- [33] *Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung*, Proske, Dresden, 2004
- [34] *Risk Acceptance Criteria*, Hoffmann A., Klein G., Weidl T., TÜV SÜD Industrie Service GmbH, 12th International Probabilistic Workshop, Weimar 2014



Industrie Service

- [35] The Spatial Distribution of Icing in Germany. Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurements of Icing, Bodo Wichura, Deutscher Wetterdienst, September 2013
- [36] IEA Wind TCP Task 19: International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments, 2018
- [37] IEC 61508-1: Functional Safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements, 2010

5 Anhang

5.1 Eiswurf und Eisfall bei Windenergieanlagen

Das Thema Eiswurf / Eisfall bei WEA wurde detailliert im WECO-Projekt der EU untersucht (Wind Energy Production in Cold Climate). Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf den daraus gewonnenen Erkenntnissen [13].

Eiswurf bzw. Eisfall tritt bei Windenergieanlagen in erster Linie in Abhängigkeit von der umgebenden Temperatur sowie der umgebenden Luftfeuchtigkeit auf. Man unterscheidet zwischen den zwei Begrifflichkeiten Eiswurf und Eisfall. Bei Eiswurf wird die Wurfweite einer sich in Betrieb befindlichen rotierenden Anlage untersucht, bei Eisfall die Fallweite einer stillstehenden WEA. Im Rahmen dieses Berichtes wird auch bei einer sich im Trudelbetrieb befindlichen WEA der Begriff Eisfall verwendet.

In Summe existieren fünf bekannte Möglichkeiten zur Erkennung von Eisansatz an einer Windkraftanlage:

- Eisdetektoren auf der Gondeloberseite: Speziell angebrachte Sensoren beobachten die Umgebungsbedingungen und schalten die Anlage bei Eisansatz ab. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass die meteorologischen Bedingungen auf der Gondel von denjenigen Bedingungen abweichen können, denen das Rotorblatt während der vollständigen Umdrehung ausgesetzt ist (z.B. durch tiefhängende Wolkenschichten).
- Leistungskurvenverfahren: Hierbei wird die Leistungskurve der Anlage detailliert verfolgt und mit der zu erwartenden Kennlinie bei entsprechenden Umgebungsbedingungen verglichen. Abweichungen sind auf Änderungen der aerodynamischen Eigenschaften durch Eisansatz an den Rotorblättern zurückzuführen und die Anlage wird abgeschaltet. Hierbei sollte berücksichtigt werden, dass im Idealfall zumindest ein verwendetes Gondelanemometer beheizt wird, um nicht ebenfalls durch Vereisungsbedingungen ausgelöste unzuverlässige Werte aufzuzeichnen.
- Vibrationsüberwachung: In Verbindung mit den notwendigen Umgebungsbedingungen kann eine auftretende Unwucht an der Rotornabe ebenfalls das Erkennen von wachsender Eisbildung an den Rotorblättern signalisieren.
- Eigenschwingungsanalyse: Bei Vereisung ändern sich die Eigenfrequenzen der Rotorblätter aufgrund der Massenzunahme. Dieses Prinzip wird zur Erkennung von Eisansatz verwendet. Ein Vorteil dieses Systems ist, dass die Massenzunahme und dadurch die Änderung der Eigenschwingung auch bei Stillstand der Anlagen erkannt werden. Zudem kann die Eisfreiheit der Anlage nach dem gleichen Prinzip zeitnah festgestellt werden.
- Verwendung zweier Anemometer: Bei dieser Art der Eisbeobachtung werden auf der Gondeloberseite zwei Referenzanemometer installiert. Davon ist je eines beheizt bzw. unbeheizt. Bei einem Einfrieren des unbeheizten Anemometers wird davon ausgegangen, dass Vereisungsbedingungen vorliegen und die Anlage wird abgestellt. Es ist jedoch ebenfalls zu beachten, dass die meteorologischen Bedingungen auf der Gondeloberseite und in den durch die Rotorblätter durchstreiften Höhen voneinander abweichen können.

Als ein erstes Indiz für Vereisungsbedingungen am Standort kann auftretende Vereisung von Leiterseilen bei Hochspannungsleitungen oder Eisbruch in Wäldern angesehen werden.

Generell kann gesagt werden, dass sich erst ein nennenswerter Eisansatz in der Größenordnung von etwa 40% der Profiltiefe bilden muss, ehe sich einzelne Eisstücke vom Rotor lösen und durch die hohe Blattspitzengeschwindigkeit einer sich in Betrieb befindlichen Anlage weggeschleudert werden. Die Überwachung der Leistungskurve registriert einen Einbruch der

erzeugten Energie jedoch bereits bei ca. 3% Eisansatz am Rotorblatt, da dadurch die Aerodynamik stark gestört wird.

Die notwendigen Funktionen der Fernüberwachung und das Eingreifen in die Anlagensteuerung sind mittlerweile Stand der Technik und können als zuverlässig eingestuft werden. Eine Kombination der oben genannten Punkte unterstützt die Sicherheit der Anlagenabschaltung, so dass Eiswurf einer im Betrieb befindlichen Anlage mit hoher Sicherheit verhindert werden kann.

Gemäß der Richtlinie für Windenergieanlagen – Technischen Baubestimmungen [1] wird der Nachweis, dass der Eiswurf von einer sich im Betrieb befindlichen Anlage sicher ausgeschlossen werden kann, in Form einer gutachterlichen Stellungnahme eines unabhängigen Sachverständigen zur Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems gefordert.

Bezugnehmend auf die zur Verfügung gestellten Dokumente wird in den Berechnungen angenommen, dass die Betriebsführung der Anlage den Vereisungsfall zuverlässig erkennt und diese in der Folge sicher abgestellt wird bzw. in den Trudelbetrieb übergeht.

Es sollte im Vorhinein der Verwirklichung eines Windparks ein Prozedere entwickelt werden, wie eine WEA nach einer Vereisungssituation wieder in Betrieb genommen wird, da Eisfall bei einer geparkten WEA am häufigsten vorkommt (hier gibt es bei einsetzendem Tauwetter abfallende Eisstücke, die in Lee-Richtung abfallen). Eine stillstehende WEA ist dabei prinzipiell mit jedem anderen hohen Gebäude (Türme, Hochspannungsmasten, etc.) zu vergleichen. Bei diesen anderen Gebäudetypen ist aufgrund der Situierung innerhalb einer Stadt ebenso mit einer prinzipiellen Gefährdung von Passanten durch Eisfall zu rechnen. Aufgrund der Planungssituation von WEA in deutlicher Entfernung zu Siedlungsgebieten, jedoch aufgrund der Zuwegung in der Nähe von ausgebauten Straßen, ist eine mögliche Gefährdung öffentlicher Straßen und Feldwege gegeben. Zusätzlich ist zu beachten, dass vereisungsbedingt abgestellte Anlagen oftmals nicht still stehen, sondern sich im Trudelbetrieb befinden. Hierbei erhalten die Eisstücke durch die langsame, aber vorhandene Bewegung der Rotorblätter eine Anfangsgeschwindigkeit, die abhängig von der jeweiligen Umdrehungszahl zu höheren Fallweiten führen als bei einer stillstehenden WEA.

Bei einer WEA kommt es je nach Rotorstellung zu unterschiedlichen Fallweiten. Die hierfür notwendigen Eingangsdaten (Größe und Masse des Eisstücks, aerodynamische Eigenschaften, etc.) für die Berechnungen werden aus vorhandenen Forschungsergebnissen und Richtlinien [7][9][10][16][36] abgeschätzt.

Die Eisstücke lösen sich von den Rotorblättern ab und werden aufgrund der Rotation des Rotors (Trudeln bzw. Betrieb) mit einer gewissen Anfangsgeschwindigkeit und -richtung abgeworfen. Danach sind zwei Effekte relevant. Zum einen die Bewegung beim Start des Eisstücks und zum anderen die Verfrachtung durch die umgebenden Windbedingungen.

Die Fallweiten schwerer Klareisstücke sind daher überwiegend durch die Anfangsgeschwindigkeit beim Ablösen bestimmt. Bei leichteren Raueisstücken kommt der Einfluss der Verfrachtung durch den Wind hinzu, sodass diese Eisstücke überwiegend von der WEA aus in Mitwindrichtung zu finden sind. Ebenso verhält es sich mit der Umgebungsgeschwindigkeit. Bei geringeren Windgeschwindigkeiten überwiegt der Einfluss der Startbewegung und bei höheren Windgeschwindigkeiten die Verfrachtung mit dem Wind. Die Kombination aller dieser Faktoren spiegelt sich in der statistischen Verteilung wieder.

5.2 Theoretische Berechnungsgrundlagen von Eiswurf bzw. Eisfall

In einer Untersuchung im Rahmen des WECO-Projektes im Schweizer Hochgebirge [13] wurden wichtige Erkenntnisse im Umgang von WEA mit Vereisung gesammelt. So wurden Vereisungszeiten vornehmlich nachts festgestellt. Dabei konnte hinsichtlich der Abschaltung der WEA eine sehr gute Trefferquote erzielt werden, so dass ein möglichst gefahrloser Betrieb von Anlagen möglich ist. Das an der beobachteten Anlage für Eiserkennung angewandte Leistungskurvenverfahren zeigte gute Ergebnisse. Während an dem eingesetzten Sonic Anemometer Vereisung erst nach derjenigen der Flügel einsetzte, zeigte die Leistungskennlinie bereits ab Beginn des Vereisungsprozesses eine Abweichung von der erwarteten Kennlinie.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Eiswurfmodell entwickelt, welches basierend auf den meteorologischen Bedingungen am Standort sowie der Charakteristik der Windenergieanlage die Bahnkurve eines Eisstücks bis zum Aufprall auf der Erde berechnet [14]. Mit Hilfe einer standortspezifischen Windstatistik kann somit die Eiswurf- bzw. Eisfalltrefferhäufigkeit um die Anlage unter Berücksichtigung der Windverhältnisse bestimmt werden.

Bei der Berechnung von Eiswurf bzw. Eisfall durch WEA sollten die folgenden Eingangsparameter berücksichtigt werden:

- Rotordurchmesser D und Nabenhöhe NH in m
- Windgeschwindigkeit $U(z)$ in m/s als Funktion der Höhe z
- Größe der Eisstücke (Stirnfläche A_{Eis} in m^2)
- Dichte der Eisstücke ρ_{Eis} in kg/m^3 und Masse m in kg
- Widerstandsbeiwert der Eisstücke C_D
- Startposition des herabfallenden Eisstücks auf dem Rotorblatt, beschrieben durch die radiale Position auf dem Rotorblatt (r in m), den Winkel der Rotorstellung in Bezug auf die Horizontale (θ in rad) sowie den Azimutwinkel der Rotorfläche (φ in rad)
- Windprofil am Standort der WEA zur Bestimmung der Anfangswindgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Rotorposition
- Dichte der Luft ρ in kg/m^3 .

Mit diesen Eingangsdaten können für die Berechnung des Eiswurfes bzw. Eisfalls die folgenden Bewegungsgleichungen aufgestellt werden, wobei die Position des Eisstücks durch die Koordinaten x , y und z beschrieben wird:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{2} \rho C_D A_{Eis} (v - U(\varphi)) \frac{x}{r}$$

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{2} \rho C_D A_{Eis} v \frac{y}{r}$$

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{1}{2} \rho C_D A_{Eis} v \frac{z}{r}$$

mit: $v = \sqrt{(v - U(\varphi))^2 + v^2 + v^2}$ (relative Windgeschwindigkeit)¹

Es wird davon ausgegangen, dass ein Eisstück zum Zeitpunkt des Lösens vom Rotorblatt eine Anfangsgeschwindigkeit als Vektor besitzt, welche auf der Umdrehungsgeschwindigkeit und

¹ Überpunkt stellt die Ableitung nach der Zeit dar ($\frac{d}{dt}$)

der Lage des Rotors basiert. Im Flug unterliegt es der Erdanziehung, dem Luftwiderstand, welcher das Teilchen abbremst, sowie der Kraft des Windes, welche es aus seiner Bahn ablenkt.

5.3 Annahmen für die Eisfallberechnungen

Für die im Rahmen der vorliegenden Analyse durchgeführten Berechnungen werden folgende Annahmen getroffen, sofern durch vorhandene meteorologische Daten keine Verbesserung der Eingabeparameter erfolgen kann:

- Die Eisfall- bzw. Eiswurfberechnungen werden mit einer ganzjährigen Windstatistik durchgeführt. D.h. es werden die über das ganze Jahr verteilten Windereignisse in eine mittlere Windstatistik zusammengefasst. Dabei wird die Windstatistik als Weibullverteilung modelliert. Die Betrachtung der jahreszeitlich abhängigen bzw. bei Eisfallbedingungen tatsächlich vorherrschenden Windverhältnisse ist gemäß Task 19 [36] nicht relevant.
- Die Zuverlässigkeit des Eisansatzerkennungssystems ist von zentraler Bedeutung für die Risikobewertung, da die Rotordrehzahl eine entscheidende Rolle für die simulierten Fallweiten spielt. Für die funktionale Sicherheit dieses Systems werden die Vorgaben der IEC 61508-1 [37] angenommen.
- Die Simulation des Eisfalls erfolgt bei einer Anlage im Trudelbetrieb. Als Eingangsparmeter für die Umdrehungszahl im Trudelbetrieb wird die vom Anlagenhersteller mitgeteilte windgeschwindigkeitsabhängige Trudeldrehzahlkennlinie bzw. die maximale Umdrehungszahl verwendet. Sofern vom Hersteller des geplanten Anlagentyps mitgeteilt wird, dass bei einer vereisungsbedingt abgeschalteten Anlage von keinem Trudelbetrieb auszugehen ist und das zur Verfügung stehende Eiserkennungssystem nur bei Betrieb der Anlage funktioniert, wird im Rahmen des vorliegenden Berichtes eine worst-case-Analyse durchgeführt. In dieser Analyse wird die Situation beim Wiederanfahren der Anlage mit einer vom Anlagenhersteller mitgeteilten maximalen Umdrehungszahl einer startenden Anlage simuliert. Diese erhöhte Umdrehungszahl stellt somit ein worst-case-Szenario dar, wobei sich bei Wiederanfahren der Anlagen eventuell nicht abgetaute Eisstücke vom Rotorblatt lösen.
- Treffer von Eisstücken, die auf Grund einer zu geringen kinetischen Energie gemäß der Probit-Funktion (s. Abschnitt 5.7.1.1) zu keiner Verletzung führen, werden nicht dargestellt.
- Gondelarretierung: Bei den Windenergieanlagen wird die Gondelarretierung berücksichtigt, sofern dies mitgeteilt wird. Ohne Arretierung sind die Gondeln frei drehbar, sodass sich die Rotorebene immer senkrecht zur aktuellen Windrichtung befindet. Dadurch können die simulierten Eisstücke in alle Richtungen abgeworfen werden. Für den Fall, dass bei der Windenergieanlage die Gondel arretiert wird, befindet sich die Rotorebene in einem festen Winkel. Dadurch werden die simulierten Eisstücke in einem Winkel von 90° zur festgelegten Richtung bevorzugt abgeworfen.
- In einer Simulation werden die Startposition des Eisstücks auf dem Rotorblatt (Blattwurzel bis Blattspitze) sowie die Rotorstellung zufällig gewählt. Es werden mehrere Millionen Berechnungen durchgeführt, um aus den ermittelten Auftreffhäufigkeiten am Boden statistische Aussagen abzuleiten und sowohl die Windrichtungs- als auch die Windgeschwindigkeitsverteilung zu berücksichtigen.



- Die in der entsprechenden Starthöhe des Eisstücks herrschende Windgeschwindigkeit wird aus dem für den Standort bestimmten Windprofil (vertikale Windgeschwindigkeitsverteilung) abgeschätzt: $U(z) = U_N \left(\frac{z}{z_N} \right)^\alpha$.
- Die Geometrie der abfallenden Eisstücke wird nicht gesondert berücksichtigt. Stattdessen wird die mittlere Stirnfläche A_{Eis} berechnet (s. Abschnitt 5.5).
- Die Topographie des Standorts wird in der Simulation in Form eines dreidimensionalen Geländemodells berücksichtigt. Eine eventuelle Bewaldung wird bei der Berechnung der Fallweiten nicht berücksichtigt.

5.4 Einfluss einer Blattheizung

Falls die Windenergieanlagen im Windpark mit einer Blattheizung ausgerüstet sind, kann bei Eisansatzbedingungen der Betriebsmodus schneller wieder aufgenommen werden. Im Falle von Eisansatz wird der Rotor in den Trudelbetrieb versetzt und gleichzeitig die Blattheizung für N_B Stunden eingeschaltet. Nach dieser Zeit der Enteisung geht die Anlage wieder in den Betriebsmodus über. Ohne eine solche Blattheizung würde der Trudelbetrieb aufrecht erhalten werden bis die Umgebungstemperatur auf über $+2^\circ\text{C}$ steigt.

Aus diesem Grund verhindert die Blattheizung nicht, dass Eisansatz stattfindet, sondern verkürzt lediglich die potentielle Dauer von Eisfall. Unter der konservativen Annahme, dass im schlimmsten Fall zwei Enteisungszyklen notwendig sind, kann an Vereisungstagen (s. Abschnitt 1.4.2) von $2 \cdot N_B$ Stunden ausgegangen werden in denen Eisfall stattfinden kann. Das Risiko wird daher auf $2 \cdot N_B / 24 \cdot 100$ % reduziert.

Die zuverlässige Funktion des Eisansatzerkennungssystems und der Blattheizung ist daher von zentraler Bedeutung für die Risikobewertung bzgl. Eisfall. Ist die funktionale Sicherheit des Systems nicht nachgewiesen, wird gemäß [37] eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10% angenommen. Somit berechnet sich das Gesamtrisiko als die Summe aus 0.1 mal dem Risiko ohne Blattheizung und 0.9 mal dem reduzierten Risiko aufgrund der Blattheizung.

$$Ri_{\text{Eisfall}} = 0.1 \cdot Ri_{\text{Eisfall ohne Blattheizung}} + 0.9 \cdot Ri_{\text{Eisfall mit Blattheizung}}$$

5.5 Eismassen und Eistypen

Die Simulation beinhaltet zwei unterschiedliche Arten von Eis: Raureis und Klareis mit den jeweiligen Dichten von $\rho_{R\text{eis}} = 600 \text{ kg/m}^3$, bzw. $\rho_{K\text{eis}} = 900 \text{ kg/m}^3$. Im Folgenden wird auf der Basis von Informationen aus [13] daher davon ausgegangen, dass die Massen Lognormalverteilungen folgen, die ihr Maximum bei 60 g bzw. 360 g haben und deren 99%-Perzentil bei 1.5 kg bzw. 4.5 kg liegt. Desweiteren wird eine A/m Verteilung auf der Basis von [36] angenommen.

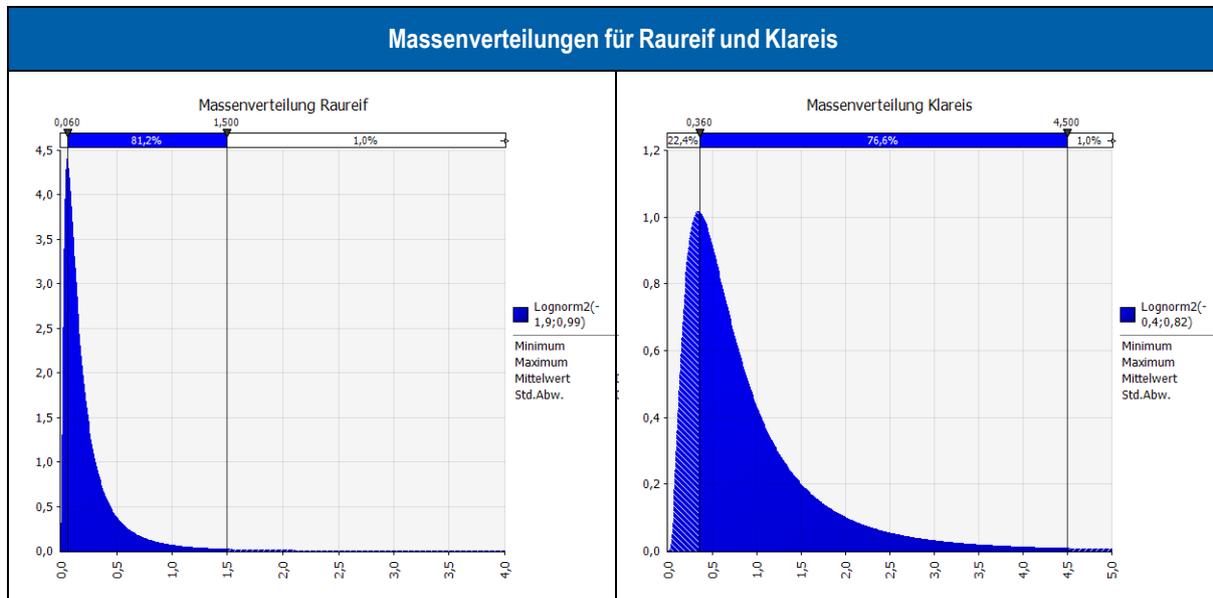


Abbildung 6: Angenommene Massenverteilung für Raureif (links) bzw. Klareis (rechts).

Die Kurven in Abbildung 6 ergeben sich mit diesen Annahmen für die Perzentile bzw. Maxima aus folgender Formel für die Wahrscheinlichkeitsdichte der Lognormalverteilung für die Masse

des Eisprojektils:

$$f(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot m} \cdot e^{-\frac{(\ln m - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

mit

$\mu = -1,99$ und $\sigma = 0,99$ für Raureif

$\mu = -0,4$ und $\sigma = 0,82$ für Klareis

Die Entscheidung, ob ein Eisstück aus Raureif oder Klareis besteht, wird zufällig getroffen und zu einer gemeinsamen Massenverteilung kombiniert. D.h. im Mittel sind 50% der Teile Raureif und 50% der Teile Klareis. Die Geometrie der abfallenden Eisstücke wird nicht gesondert berücksichtigt. In [36] ist eine Verteilung für das Verhältnis der mittleren Stirnfläche und der Masse des Eisstücks (A_{Eis}/m) gegeben. Aus dieser Verteilung wird für jedes Eisstück ein Wert ermittelt und zusammen mit der unabhängig davon simulierten Masse die mittlere Stirnfläche A_{Eis} berechnet.

Diese Herangehensweise erlaubt jede mögliche Kombination von mittlerer Oberfläche und Masse. Damit werden auf der einen Seite kleine kompakte Eisstücke berücksichtigt, die bei einem Kopftreffer tödliche Verletzungen verursachen können, jedoch geringere Fallweiten aufweisen, da der Einfluss des Windes aufgrund des höheren Gewichts kleiner ausfällt. Auf der anderen Seite können auch leichte bzw. im Verhältnis zur Masse große plattenartige Stücke auftreten, die tendenziell ein geringeres Schadensausmaß aufweisen, jedoch aufgrund ihres geringeren Gewichtes weiter vom Wind verfrachtet werden. Damit wird die Berechnung auf keine bestimmte Form festgelegt.

Noch kleinere und leichtere Eisstücke als die im Rahmen dieser Analyse untersuchten Eisstücke können noch größere Fallweiten erreichen, sind jedoch in der Risikobewertung zu vernachlässigen, da aufgrund ihres geringen Gewichtes unwesentliche Beschädigungen bzw. Gefährdungen zu erwarten sind.

5.6 Risiko und Risikoakzeptanzkriterien

5.6.1 Der Risikobegriff

Risikoanalysen stellen ein geeignetes Instrumentarium dar, um die vorhandene Unsicherheit qualitativ oder quantitativ zu beschreiben und Entscheidungsvarianten eine kalkulierte Wirkung zuzurechnen. Hierfür wird in der Technik die bekannte „Formel“

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittshäufigkeit} * \text{Ausmaß der Auswirkungen eines Ereignisses}$$

herangezogen. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass bei geringerem Schadensausmaß üblicherweise eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit akzeptiert wird. Steigt das Schadensausmaß an, muss die Häufigkeit des Ereignisses sinken, um in den akzeptablen Bereich zu gelangen. Hohe Schäden, die dazu noch häufig auftreten, sind hingegen nicht annehmbar. Intuitiv ist klar, dass zwischen den akzeptablen und den unakzeptablen Risiken ein Übergangsbereich liegt, in dem ggf. Verbesserungen möglich oder sinnvoll sind.

Die Begriffe in der obigen Formel sind wie folgt zu verstehen:

Die *Eintrittshäufigkeit* bezeichnet die Anzahl der Ereignisse innerhalb eines Zeitraums. Sie ist eine statistische Größe, d.h. sie spiegelt die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses in einem bestimmten Zeitraum wider. Das *Ausmaß der Auswirkungen* eines Ereignisses kann entsprechend des Verwendungszweckes einer Risikoanalyse unterschiedlich definiert werden. Sicherheitsorientierte Betrachtungen in der Technik bestimmen in erster Linie Ereignisse mit der möglichen Folge von Schäden für Leib und Leben. Umwelt- und/oder Sachschäden werden üblicherweise in Geldeinheiten ausgedrückt („monetarisiert“).

5.6.1.1 Risikobewertung

Ergebnis einer Risikoanalyse ist zunächst eine Aussage über das absolute Risiko. Um aber risikobasiert Entscheidungen vorbereiten zu können, muss dieser Risikowert durch Vergleich mit „üblicherweise akzeptierten“ Risiken eingeordnet und bewertet werden. Diese Aufgabe ist offensichtlich schwierig und mit Unwägbarkeiten behaftet, da der Übergangsbereich zwischen akzeptablem und inakzeptablem Bereich nicht eindeutig fixiert ist.

Beispiel:

Das Bewegen eines Fahrzeugs stellt eine (erlaubte) Gefährdung dar. Bei Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzungen wird grundsätzlich unterstellt, dass die Schadenshäufigkeit und Schadensauswirkung allgemein akzeptiert werden können. Eine explizite Quantifizierung dieses „Grenzrisikos“ existiert im deutschen Recht nicht.

Generell können dabei zwei Kriterien betrachtet werden (siehe Abbildung 7):

1. Übersteigt das Schadensausmaß eine bestimmte Grenze, muss immer Abhilfe geschaffen werden. Ein derartiges Ereignis liegt unabhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit stets im nicht akzeptablen Abschnitt der Graphik.
2. Ebenso verhält es sich mit Ereignissen, die zu häufig eintreten. Auch hier gibt es eine Grenze, ab der unabhängig vom Schadensausmaß der nicht akzeptable Bereich beginnt, da allein schon aus betrieblichen Gründen das Risiko zu hoch wird.

Zur Bestimmung der Lage der in Abbildung 7 dargestellten Akzeptanzgrenzen gibt es mehrere international übliche Vorgehensweisen, die letztendlich alle vergleichbare Ergebnisse bzw. Akzeptanzwerte liefern.

Bei einer Technologie, die mit sehr großen Ängsten behaftet ist, kann der Übergangsbereich sehr ausgedehnt sein. Ein weiterer Aspekt bei der Beurteilung eines Risikos ist der Grad der

Freiwilligkeit der Risikoexposition, da freiwillig eingegangene Risiken (z. B. Sport) eher akzeptiert werden als unfreiwillig eingegangene Risiken, wie sie etwa mit der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel, von Gebäuden oder der Erzeugung bestimmter Leistungen verbunden sind.

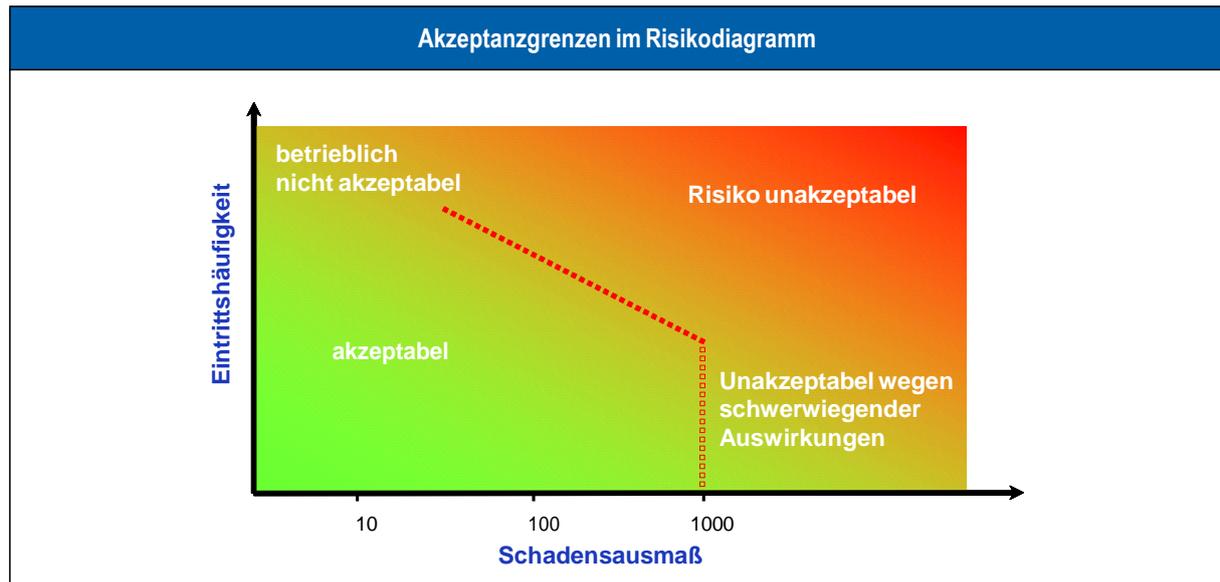


Abbildung 7: Akzeptanzgrenzen im Risikodiagramm.

Dies macht bereits deutlich, dass neben der „absoluten Risikobewertung“ einer Anlage auch die relative Risikobetrachtung von Bedeutung ist, d.h. die vergleichende Risikobetrachtung mit üblicherweise akzeptierten Risiken der Gesellschaft.

5.6.1.2 Risikodarstellung - Risikomatrix

Die Darstellung mittels eines Risikodiagramms ist nützlich, wenn Wahrscheinlichkeiten und Konsequenzen in präzisen Zahlen und eindeutigen Dimensionen angegeben oder berechnet werden können. In der Tat werden Risikoanalysen mit einer Vielfalt von quantitativen und qualitativen Methoden durchgeführt.

Sogenannte semi-quantitative Methoden haben den Vorteil, dass mit ihnen Ereignisdaten ebenso wie Expertenwissen berücksichtigt werden können. Sie erlauben es daher, subjektive Einschätzungen und objektive Erfahrungen miteinander zu verbinden. Dadurch ist es nicht mehr möglich, einzelne „Punkte“ im Risikodiagramm aufzuzeigen. Vielmehr sind nur noch Abschätzungen etwa der Größenordnung nach möglich.

Das Risikodiagramm wird damit zu einer Risiko-Matrix, wie sie die Abbildung 8 exemplarisch zeigt. Anstelle kontinuierlich verteilter Größen verwendet die Risiko-Matrix diskrete Kategorien für die Eintrittshäufigkeit (z. B. „1“ bis „5“) und das Ausmaß (z. B. „A“ bis „E“).

Diese Parameter werden qualitativ oder halbquantitativ geschätzt und umschrieben. So kann die „5“ etwa „beinahe sicher“ bedeuten, „1“ hingegen „extrem unwahrscheinlich“. Entsprechend steht z.B. „E“ für „katastrophale“, „A“ für „vernachlässigbare Ereignisse“. Der logarithmischen Auftragung der Achsenwerte im Risikodiagramm entsprechend unterscheiden sich die benachbarten Kategorien dabei je um eine Größenordnung.

Der **Bereich I** (grüner Bereich) ist die Region akzeptabler Risiken (s. o. Risikobewertung). Befindet sich ein System in diesem Sektor, sind weitere risikoreduzierende Maßnahmen aus sicherheitstechnischer Sicht nicht notwendig. Im **Bereich II** (gelber und oranger Übergangsbereich) sind Verbesserungsmaßnahmen sinnvoll, im **Bereich III** (rot) sind sie unumgänglich.

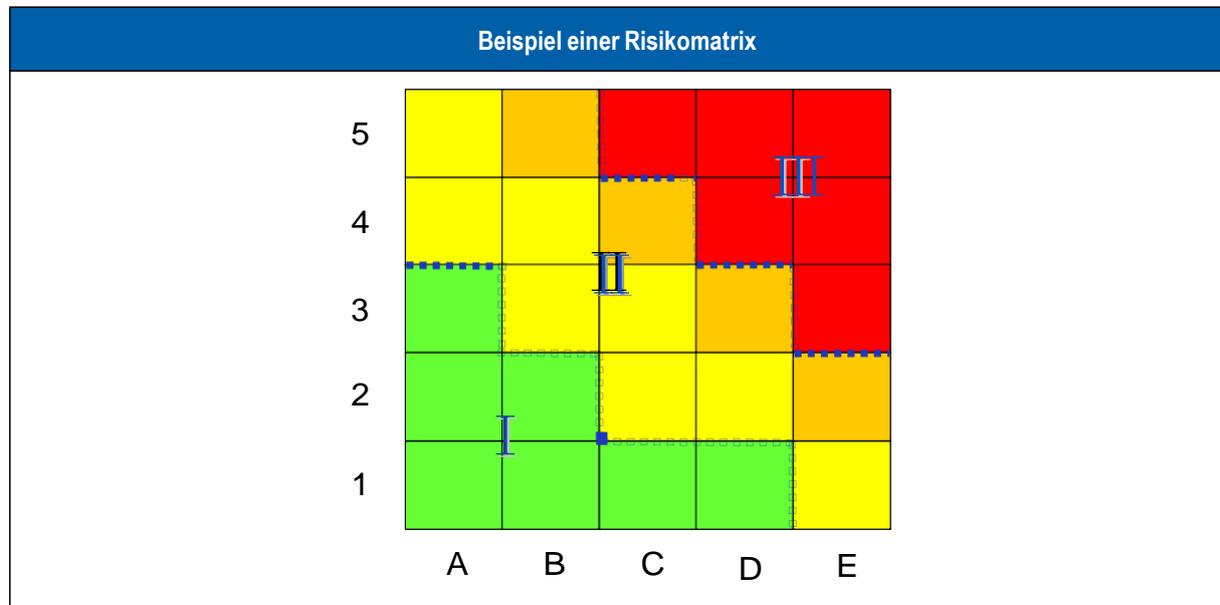


Abbildung 8: Beispiel einer Risikomatrix.

Da die Skalierungen und Festlegungen vor der Bewertung einzelner Ereignisse und Maßnahmen erfolgen, wird eine objektive und ergebnisoffene Bewertung einerseits erleichtert, andererseits bleibt aber auch jede einzelne getroffene Bewertung sehr transparent. Erläuterungen zu den einzelnen Farbkodierungen sind in Tabelle 8 zu finden.

Wo die Grenzwerte für die einzelnen Bereiche des Risikos liegen, wird im folgenden Kapitel ausgehend von international üblichen Vorgehensweisen hergeleitet. Dabei wird der Übergangsbereich (gelber und oranger Bereich) zwischen akzeptablen und unakzeptablen Risiken zur besseren Abstufung risikoreduzierender Maßnahmen nochmals unterteilt.

5.6.2 Risikoakzeptanzkriterien

Zur Bestimmung des akzeptablen Risikos gibt es mehrere international übliche Vorgehensweisen, die letztendlich alle vergleichbare Ergebnisse liefern. Zunächst muss geklärt werden, welches Risiko als Vergleichsrisiko herangezogen wird. Grundsätzlich gibt es zwei Arten ein Risiko zu ermitteln. Je nachdem welches Ziel mit der Analyse verfolgt wird, wird entweder das *kollektive Risiko* oder das *individuelle Risiko* ermittelt.

Das kollektive Risiko ist das Gesamtrisiko für die Summe aller betroffenen Personen im betrachteten Szenario. Das Risiko für einen Einzelnen ist dabei jedoch unbekannt.

Das individuelle Risiko ist das Risiko, dem eine einzelne Person ausgesetzt ist. Durch diese Reduktion auf eine vergleichbare Basis kann dieses Risiko mit anderen technischen Bereichen verglichen werden.

5.6.2.1 Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM)

Die Frage, welches individuelle Risiko als akzeptabel gilt, hängt von mehreren Faktoren ab. Zunächst einmal muss geklärt werden, welche Risiken auf eine Person einwirken. Dazu wird in [27] das Prinzip der minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) eingeführt. Bei diesem Prinzip wird davon ausgegangen, dass der Tod sich aus vielen verschiedenen Ursachen ergibt. Eine dieser Ursachengruppe wird „Technologische Tatsachen“ genannt, z. B.

- Unterhaltung und Sport (Surfen, Extremsport usw.);
- Heimwerker-Aktivitäten (Rasenmähen usw.);
- Arbeitsmaschinen;
- Verkehr.

Diese Gruppe hat einen bestimmten Prozentsatz von Toten pro Jahr zur Folge, der je nach Alter der betrachteten Bevölkerungsgruppe unterschiedlich ist. Das entsprechende Risiko wird als „Endogene Sterblichkeit R“ bezeichnet. In wirtschaftlich gut entwickelten Ländern ist R für die Gruppe der 5- bis 15-jährigen am niedrigsten. Die unterste Stufe der endogenen Sterblichkeit, bekannt als „Minimale endogene Sterblichkeit“ und mit „R_m“ bezeichnet, wurde bestimmt als

$$R_m = 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Todesfälle}}{\text{Jahr}}$$

Daraus wird folgende Regel gebildet:

„Gefahren, die auf eine neue Industrieanlage zurückzuführen sind, dürfen *keine nennenswerte* Erhöhung der Zahl R_m verursachen.“

Damit werden mit dem MEM-Prinzip folgende Grenzwerte festgelegt:

- R₁ ≤ 10⁻⁵ Todesfälle/Person x Jahr
- R₂ ≤ 10⁻⁴ Schwerverletzte/Person x Jahr
- R₃ ≤ 10⁻³ Leichtverletzte/Person x Jahr



Die hiermit festgelegten Grenzwerte können als absolute Obergrenze betrachtet werden. Risiken, die darüber liegen, sind für Privatpersonen absolut unakzeptabel². Ein weiterer Aspekt, der sich aus diesen Grenzwerten ergibt ist folgende empfohlene Umrechnungsvorschrift:

$$1 \text{ Toter} = 10 \text{ Schwerverletzte} = 100 \text{ Leichtverletzte}$$

5.6.2.2 Das ALARP-Prinzip

Eine etwas andere Herangehensweise mit anderen Grenzwerten wird von der britischen HSE empfohlen [28][29]. Hier werden verschiedene Grenzwerte für verschiedene Bevölkerungsgruppen ermittelt. So gelten z. B. für Arbeiter Grenzwerte von 10^{-3} Todesfällen pro Jahr.

Insgesamt sieht die britische HSE bei einem jährlichen individuellen Todesfallrisiko von 1:1.000.000 (10^{-6}) die Schwelle erreicht, bei der zusätzliche Kosten zur Risikovorsorge nicht mehr im Verhältnis zum Sicherheitszugewinn stehen. Mit anderen Worten: Ausprägungen des individuellen Risikos, die kleiner als dieser Wert sind, gelten grundsätzlich als akzeptabel – es besteht kein Handlungsbedarf für weitere risikoreduzierende Maßnahmen.

Die zwischen diesen Schwellen befindliche Zone wird als ALARP-Zone angesehen, bei der fallbezogen und unter Berücksichtigung einer Kosten-Nutzenabwägung ein vertretbares Risiko von der Aufsichtsbehörde festgelegt wird. Die nachfolgende Abbildung 9 zeigt das ALARP-Prinzip im Überblick.

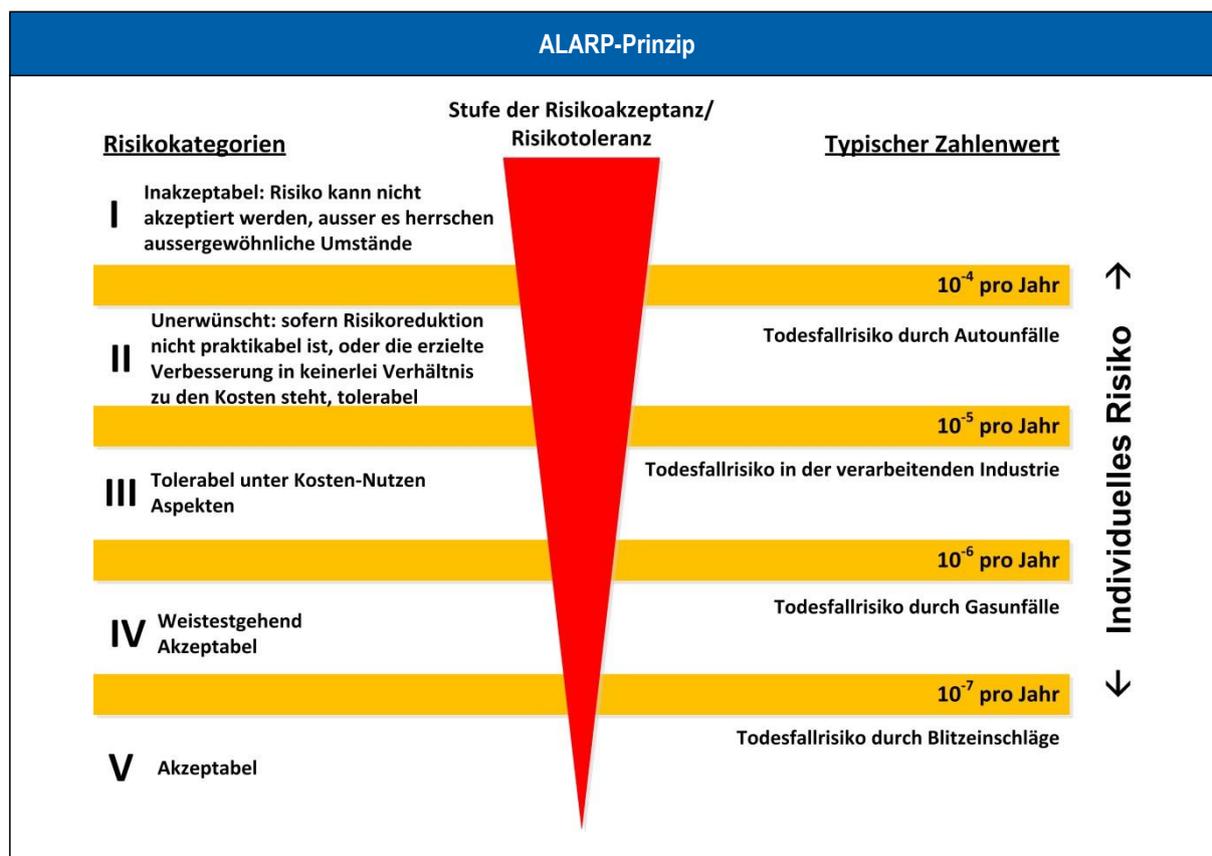


Abbildung 9: ALARP-Prinzip

² Für beruflich exponierte Personen wird im Allgemeinen ein um einen Faktor 10 höheres Risiko als Akzeptanzgrenze definiert.

Das ALARP Prinzip wird im Allgemeinen für die Darstellung der einzelnen Kategorien aus Abbildung 8 verwendet, so spricht man bei dem gelb gekennzeichneten Bereich auch vom „unteren ALARP Bereich“ und beim orange gekennzeichneten Bereich vom „oberen ALARP Bereich“.

5.6.2.3 Kollektives Risiko

Alle o.g. Werte gelten für das individuelle Risiko. Wird stattdessen das kollektive Risiko betrachtet, gibt es weniger gesicherte Quellen, welches Referenzrisiko zur Bewertung herangezogen wird.

Die in folgender Abbildung 10 dargestellte Vorgehensweise aus [32] fasst die Erkenntnisse anschaulich zusammen. Je höher die Anzahl der Personenschäden (x-Achse) ist, umso unwahrscheinlicher muss ein Ereignis sein. Im Fall von Windenergieanlagen ist das Schadensausmaß N mit 1 anzusetzen. Der kollektive Ansatz wird durch die Anzahl der gefährdeten Personen in die Betrachtung mit einbezogen.

Nach dieser Darstellung ist die untere Akzeptanzgrenze mit 10^{-5} Todesfällen pro Jahr und die obere Akzeptanzgrenze mit 10^{-3} Todesfällen pro Jahr definiert. Dies liegt einen Faktor 100 über den üblichen Akzeptanzgrenzen für das individuelle Risiko.

D. h. wenn auf einer vorbeiführenden Straße die Verkehrsdichte mit 100 Bewegungen pro Tag angenommen wird, so ist das kollektive Risiko um einen Faktor 100 größer als das individuelle Risiko.

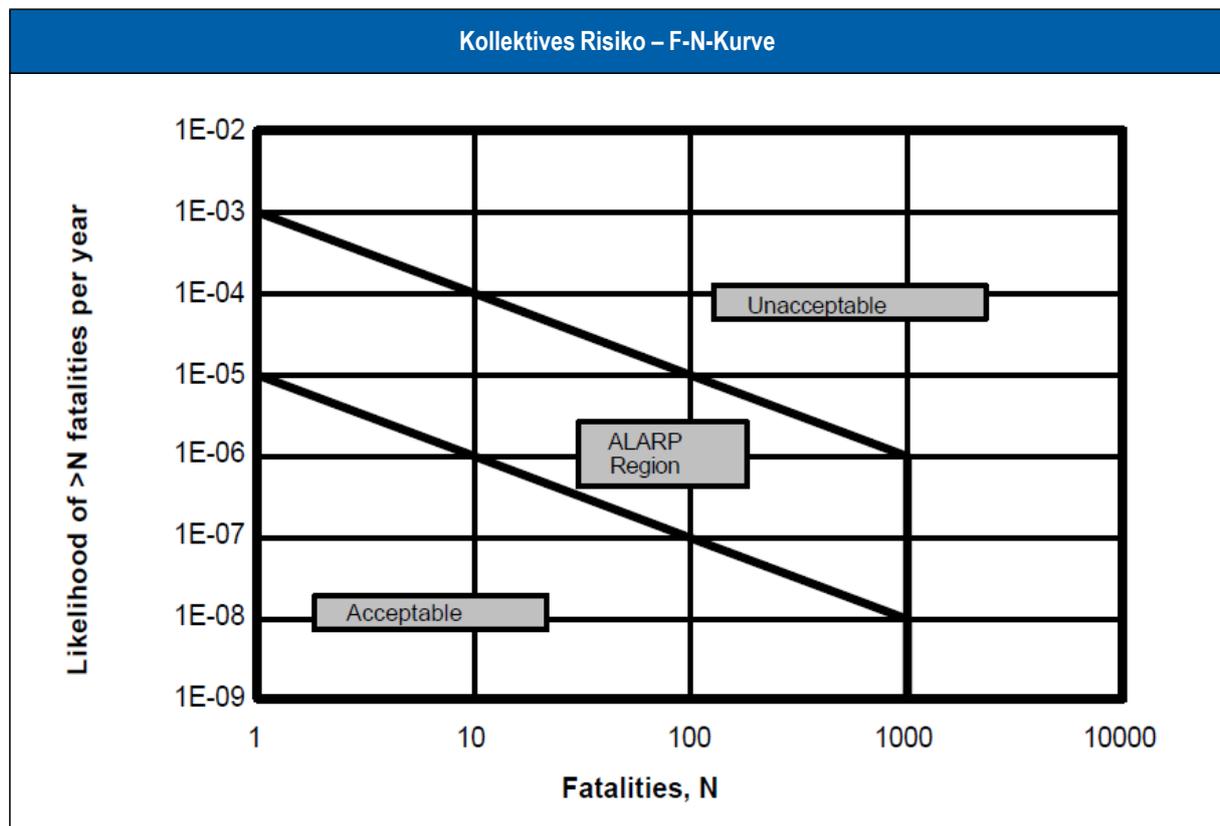


Abbildung 10: Kollektives Risiko – F-N-Kurve.

Die Risikobewertung ist jedoch identisch. Ist die Verkehrsdichte kleiner als 100 Bewegungen pro Tag, überwiegt das individuelle Risiko, ansonsten ist das kollektive Risiko zu betrachten.

5.6.2.4 Im Rahmen der Untersuchung verwendete Akzeptanzkriterien

Aus dem ALARP-Prinzip lässt sich ein Akzeptanzbereich von 10^{-4} – 10^{-6} Todesfällen pro Person und Jahr im Bereich der Arbeitssicherheit ableiten, für unbeteiligte Dritte (Spaziergänger oder Autofahrer) wird im Allgemeinen ein strengerer Akzeptanzbereich von 10^{-5} – 10^{-7} Todesfällen pro Person und Jahr angesetzt. Als Grenzen für das kollektive Risiko, z. B. bei stark befahrenen Straßen, wird nach Kapitel 5.6.2.3 ein Akzeptanzbereich von 10^{-3} – 10^{-5} Todesfällen pro Person und Jahr angesetzt. Dieser Bereich definiert für gewöhnlich das, was durch den aktuell verfügbaren Stand der Technik erwartet werden kann und ist somit auch generell für die vorliegende Risikobetrachtung zu verwenden.

Es ist üblich verschiedene Kategorien, in denen das Risiko liegen kann, zu definieren. Dabei werden den Kategorien entsprechend der Einschätzung des Risikos verschiedene Farbkodierungen zugeordnet, in Anlehnung an die Farben des in Abbildung 7 dargestellten Risikodiagramms. In Tabelle 8 sind die in der vorliegenden Risikobetrachtung verwendeten Risikokategorien für Spaziergänger und Autofahrer dargestellt.

Risikokategorien	
Risikowert (1/a) und Farbkodierung	Risikobewertung
Kleiner als 10^{-08} (individuell) Kleiner als 10^{-07} (beruflich) Kleiner als 10^{-06} (kollektiv)	Das Risiko ist vernachlässigbar . Es liegt weit unterhalb aller anderen aus dem Alltag bekannten Risiken.
Zwischen 10^{-08} und 10^{-07} (individuell) Zwischen 10^{-07} und 10^{-06} (beruflich) Zwischen 10^{-06} und 10^{-05} (kollektiv)	Das Risiko liegt im akzeptablen Bereich, es besteht aus risikoorientierter Sicht kein Handlungsbedarf.
Zwischen 10^{-07} und 10^{-06} (individuell) Zwischen 10^{-06} und 10^{-05} (beruflich) Zwischen 10^{-05} und 10^{-04} (kollektiv)	Das Risiko ist tolerierbar und liegt im unteren ALARP-Bereich. Sofern weitergehende Maßnahmen zur Risikoreduzierung bekannt sind, können diese unter Kosten-Nutzen-Aspekten geprüft werden. Eine Empfehlung, solche Maßnahmen umzusetzen wird jedoch nicht ausgesprochen.
Zwischen 10^{-06} und 10^{-05} (individuell) Zwischen 10^{-05} und 10^{-04} (beruflich) Zwischen 10^{-04} und 10^{-03} (kollektiv)	Das Risiko ist hoch und liegt im oberen ALARP-Bereich. Die Umsetzung von bekannten risikoreduzierenden Maßnahmen wird dringend empfohlen bzw. es wird empfohlen, nach weitergehenden risikoreduzierenden Maßnahmen auch über den Stand der Technik hinaus zu suchen.
Größer 10^{-05} (individuell) Größer 10^{-04} (beruflich) Größer 10^{-03} (kollektiv)	Das Risiko ist unakzeptabel hoch . Maßnahmen zur Risikoreduktion müssen umgehend eingeleitet werden.

Tabelle 8: In der Analyse verwendete Risikokategorien inklusive der Farbcodierung [34].

Grundsätzlich kann für die Risikoanalyse folgende Faustregel getroffen werden: Bei Fuß- und Feldwegen kann von einer sehr geringen Verkehrsdichte ausgegangen werden (Ausnahme:



Sehenswürdigkeiten bzw. Ausflugsziele in der Nähe). Hier wird in der Regel das individuelle Risiko als abdeckend betrachtet.

Für jegliche Straße, an der Kfz-Verkehr herrscht, muss von einer Verkehrsdichte größer als 100 Bewegungen pro Tag ausgegangen werden. Hier wird das kollektive Risiko als Vergleichsmaßstab herangezogen.

5.6.2.5 Vergleichsrisiken

Um die später ermittelten Risiken korrekt einordnen zu können, ist es hilfreich diese an bekannten Vergleichsrisiken zu spiegeln. Nachfolgende Tabelle 9 gibt die Größenordnung verschiedener Vergleichsrisiken wieder [33][34].

	Ursache / Tätigkeit	Todesfallrisiko / Jahr
Berufsrisiken	Arbeiter auf Baustellen	1.0E-04
	Arbeiter in der Metallherstellung	5.5E-05
	Elektroingenieur	8.0E-06
verschiedene Verkehrsrisiken	Eisenbahn	4.4E-06 ... 1.5E-05
	PKW-Fahrer	2.0E-04 ... 2.2E-04
	Flugzeug (Passagiere)	0.67E-04 ... 1.2E-04
Freizeitaktivitäten	Bergsteigen	1.0E-03 ... 2.7E-03
	Fallschirmspringen (USA)	2.0E-03
	Urlaub (UK 1990)	1.0E-04
Alltagsrisiken	Hausarbeit	1.0E-04
	Gebäudebrand	8.0E-06
	Blitzschlag (UK, USA)	1.0E-07 ... 5.0E-07

Tabelle 9: Vergleichsrisiken.

Aufbauend auf Tabelle 9 und weitergehenden Analysen wird in [34] für die Arbeitssicherheit ein maximales Berufsrisiko von ca. 10^{-4} Todesfällen pro Person und Jahr abgeleitet (Anmerkung: besonders risikoexponierte Tätigkeitsfelder wurden in Tabelle 9 nicht berücksichtigt). Für unbeteiligte Dritte wird im Allgemeinen eine um eine Zehnerpotenz niedrigere Akzeptanzgrenze angesetzt, was der oberen Grenze des in Kapitel 5.6.2.4 definierten Bereichs entspricht.

5.7 Für die Risikoanalyse verwendete Methodik

5.7.1 Schadensausmaß

Nach der in Abschnitt 5.6 gegebenen Definition wird das Risiko aus den Parametern Eintrittshäufigkeit und Schadensausmaß eines Ereignisses bestimmt. Dies unterscheidet Risikoanalysen von Gefährdungsanalysen, bei denen die Eintrittshäufigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Zur Bestimmung des Schadensausmaßes gibt es verschiedene Möglichkeiten, häufig wird lediglich abgeschätzt, ob eine leichte Verletzung, eine schwere Verletzung oder ein Todesfall zu erwarten ist.

5.7.1.1 Die Probit-Funktion

Um das Schadensausmaß realitätsnäher zu bestimmen, kann mit der in [31] beschriebenen Methodik der Probit-Funktion die Mortalitätsrate (die Wahrscheinlichkeit bei einem Treffer am Kopf durch ein Projektil ums Leben zu kommen) ermittelt werden.

Die Probit-Funktion ist hier definiert durch

$$P_{\text{D}} = -17.56 + 5.3 \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{E_{\text{D}}}{2} \right) \right)$$

und somit ausschließlich von der kinetischen Energie des Projektils abhängig. Diese Funktion wird verwendet, um die Todesfallwahrscheinlichkeit zu ermitteln, wenn eine Person von einem Objekt mit einer Masse m bei einer Geschwindigkeit v am Kopf getroffen wird. Gültig ist diese Funktion für Massen zwischen 0.1 und 4.5 kg. Die Mortalität in Abhängigkeit vom Wert der Probit-Funktion lässt sich aus der von [31] entnommenen Tabelle 10 ableiten:

Todesfallwahrscheinlichkeit vs. Probit-Funktion										
%	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.90	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
-	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Tabelle 10: Zusammenhang zwischen Todesfallwahrscheinlichkeit und Wert der Probit-Funktion.

Folgende Beispiele erläutern, wie Tabelle 10 zu lesen ist:

- Beträgt der Wert der Probit-Funktion 2.67 (Zeile 2, Spalte 3), so ist die Todesfallwahrscheinlichkeit mit 1% anzusetzen.



- Beträgt der Wert der Probit-Funktion 5.36 (Zeile 8, Spalte 6), so ist die Todesfallwahrscheinlichkeit mit 64% anzusetzen.

Aus [16] kann für Objekte verschiedener Massen und Formen die Auftreffgeschwindigkeit $v(m)$ in Abhängigkeit von der Masse des Projektils und unter Berücksichtigung des Luftwiderstandbeiwertes für die betrachteten Höhen ermittelt werden.

Die cw-Werte wurden anhand [16] (Seite B60) abgeschätzt. Demnach kann für Eisplatten ein cw-Wert von ca. 1 herangezogen werden.

5.7.1.2 Ermittlung von Sachschäden

Von Windenergieanlagen herabfallende Eisstücke können neben Personen- auch Sachschäden verursachen. Sollten im Rahmen dieser Analyse Sachschäden untersucht werden, wird zur Ermittlung des Schadensausmaßes nicht die kinetische Energie (s. Personenschäden), sondern der Impuls der aufschlagenden Eisstücke herangezogen. Überschreitet der Impuls einen definierten Grenzwert, so kann von einem Sachschaden ausgegangen werden. Dieser Grenzwert ist meist in entsprechenden technischen Regelwerken (z.B. DIN) festgelegt.

5.7.1.3 Ermittlung der Eisansatztage

Nach [35] ist die Anzahl der Eisansatztage in Deutschland (und damit näherungsweise für Mitteleuropa) sowohl von der absoluten Höhe über NN als auch von der geografischen Lage (Alpennähe und nicht-Alpennähe) abhängig. Auf der Basis der [35] zugrundeliegend Rohdaten, die vom DWD übermittelt wurden, können so zwei Formeln für die anzusetzenden Eisansatztage ermittelt werden:

1. Vereisungstage in Alpennähe

$$N = 33.337 \cdot \ln(x) - 210.32$$

2. Vereisungstage außerhalb der Alpen

$$N = 6.0707 \cdot x^{0.0017x}$$

Mit

N = Anzahl der Vereisungstage

x = Höhe über NN zuzüglich Nabenhöhe

5.7.1.4 Betrachtete Expositionsszenarien

Um die Risikobetrachtung weitestgehend zu standardisieren und vergleichbar zu machen, aber auch um ein realistisches und nicht zu konservatives Ergebnis zu erhalten, wurden die Wege in verschiedene Nutzungskategorien eingeteilt, aus denen sich dann Expositionsszenarien ergeben. Es werden folgende Unterscheidungen gemacht:

Fußgänger

Kategorie	Bedeutung
Regelmäßig benutzter Weg	Es muss auf Grund der Ausbaustufe des Weges, seiner Erreichbarkeit und seiner Lage zu Ortschaften davon ausgegangen werden, dass dieser Weg regelmäßig, d. h. beinahe täglich von Spaziergängern oder Joggern genutzt wird. Dabei ist es ausreichend, wenn ein einziger Spaziergänger oder Jogger diesen Weg regelmäßig nutzt.
Häufig benutzter Weg	Für Wege dieser Art treffen nicht alle der o. g. Merkmale zu. So führen z. B. eine größere Entfernung zu Ortschaften und ein schlechter Zugang dazu, dass davon ausgegangen wird, dass dieser Weg nicht an allen Tagen aber doch häufig von Spaziergängern bzw. Joggern benutzt wird.
Gelegentlich benutzter Weg	In diese Kategorie fallen Wege, die noch eindeutig als solche, jedoch eindeutig nicht als Hauptwege erkennbar sind, und deren Ausbaustufe und Erreichbarkeit auf eine gelegentliche Benutzung schließen lassen.
Selten benutzter Weg	In diese Kategorie fallen Wege, die noch als solche erkennbar sind, und deren Zustand und Erreichbarkeit auf eine seltene Benutzung schließen lassen.
Normalerweise nicht benutzter Weg	Wege, die aus der Vogelperspektive kaum noch zu erkennen sind, die eindeutig lediglich als Zufahrtswege für die Forst- bzw. Landwirtschaft erkennbar sind oder die sehr weit von der nächsten Wohnbebauung entfernt sind, werden als normalerweise nicht benutzt betrachtet. Die Exposition ermittelt sich aus einer Person, die sich zufällig an diesem Ort aufhält.

Tabelle 11: Kategorien der betrachteten Wege.



Industrie Service

Autofahrer

Entsprechend den Angaben zur Risikoakzeptanz aus Kapitel 5.6.2.4 muss für Autofahrer das kollektive Risiko betrachtet werden, sofern von einer Verkehrsdichte von mehr als 100 Fzg. / Tag ausgegangen wird. Dies wird grundsätzlich für alle Straßen angenommen. Für Autofahrer wird das ermittelte individuelle Risiko eines Fahrers bei einfacher Fahrt ermittelt und mit der Anzahl der Fahrzeuge multipliziert.

Andere Personengruppen

Im Rahmen dieser Analyse werden beispielsweise Fahrradfahrer oder Langlaufskifahrer der Gruppe der Fußgänger zugeordnet. Dieser Absatz ist als konservativ zu bewerten. Als Grund hierfür ist insbesondere die geringeren Expositionszeit durch die vergleichsweise höhere Bewegungsgeschwindigkeit anzuführen.

Auch beruflich exponierte Personen, wie z.B. Forstarbeiter, Jäger oder Landwirte sind in dieser Analyse mit abgedeckt, da für diese weniger strenge Risikoakzeptanzgrenzen gelten (siehe Kapitel 5.6.2.4). Außerdem sind diese Personengruppen beim Befahren der Wege durch die Fahrzeugstrukturen geschützt und haben beim Durchqueren eines Gefährdungsbereiches eine geringere Expositionszeit im Vergleich zu den Fußgängern.

Zuwegungen und Stichwege und Kranstellflächen

Hinsichtlich Zuwegungen bzw. Stichwegen und Kranstellflächen an den Aufstellungsorten der WEA wird ein gewollter Aufenthalt eines Fußgängers im Gefahrenbereich unterstellt. Es wird ein 5-minütiger Aufenthalt in der unmittelbaren Nähe der WEA angenommen, woraus sich ein hohes Risiko ergibt. Dieses hohe Risiko muss generell durch geeignete Maßnahmen beherrscht werden, es wird empfohlen Kranstellflächen zu umzäunen oder als gleichwertige Alternative ein Schild mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bei Eisfallbedingungen dringent abrät, aufzustellen.

5.7.1.5 Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit H_T , P_T

Auf Basis der übergebenen Rohdaten aus den Eisfallsimulationen wurde ein quadratisches Raster in 5 m Schritten erstellt und die relative Trefferhäufigkeit von Eisstücken unabhängig von Masse oder Eistyp innerhalb dieser Teilfläche ermittelt. Die Trefferhäufigkeit ist jedoch von der Anzahl der simulierten Eisstücke abhängig und spiegelt nicht die tatsächlich zu erwartende Anzahl an Eisstücken wider.

In einer Untersuchung im Rahmen des WECO-Projektes (Wind Energy Production in Cold Climate) wurde der Eisfall einer WEA auf der Gütsch im Schweizer Hochgebirge beobachtet. Hierbei wurden die von der Anlage abgefallenen bzw. abgeworfenen Eisstücke protokolliert [13].

In dem Untersuchungszeitraum von ca. 3 Jahren wurden etwa 200 Eisstücke identifiziert [13]. Da jedoch davon ausgegangen wird, dass nicht alle von der Versuchsanlage herabgefallenen Eisstücke tatsächlich gefunden wurden, z. B. weil sie in der Luft oder beim Aufprall zerbrochen sind, wird davon ausgegangen, dass ca. 200 Eisfälle pro Jahr vorgekommen sind. Für die vorliegende Analyse wird diese Anzahl noch quadratisch mit dem Rotorradius in Verhältnis gesetzt.

Werden die übermittelten relativen Eisfallhäufigkeiten auf diese Zahl normiert, so kann damit die absolute Trefferhäufigkeit H_T in ein 5x5m großes Rechteck pro Jahr ermittelt werden. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fahrzeug bzw. ein Fußgänger getroffen wird, hängt von der relevanten Querschnittsfläche ab. Dafür werden folgende Werte angesetzt:

Autofahrer

Relevante Trefferfläche: 2 m² (als relevant wird hier die Windschutzscheibe angenommen, damit ergibt sich eine Trefferwahrscheinlichkeit P_T von 0.08).

Fußgänger

Relevante Trefferfläche: 0.04 m² (als relevant wird hier ein Treffer am Kopf angenommen, damit ergibt sich eine Trefferwahrscheinlichkeit P_T von 0.0016).

5.7.1.6 Ermittlung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit P_A

Unter der Expositionsdauer wird die Zeit verstanden, in der eine Person der Gefahr ausgesetzt ist. Diese wird im Folgenden für die einzelnen 5x5m-Teilflächen ermittelt.

Als Parameter muss der Aufenthalt im Gefährdungsbereich bestimmt werden. Dies ist die Zeit, die eine Person benötigt, um den durch Eisfall gefährdeten Bereich zu durchqueren. Dafür werden für die einzelnen 5x5m-Teilflächen folgende Zeiten angesetzt:

- 0.3 s (bei einer angenommenen Geschwindigkeit von 60 km/h für Autofahrer)
- 3.6 s (bei einer angenommenen Geschwindigkeit vom 5 km/h für Fußgänger)

In Anlehnung an [35] kann die Anzahl der Tage pro Jahr mit Eisfallpotenzial abgeschätzt werden, unter der worst-case-Annahme, dass ein Vereisungstag einem Eisfalltag gleichzusetzen ist. In Abschnitt 1.4.2 ist eine standortspezifische Abschätzung von Vereisungstagen angegeben, die der Risikobewertung dieser vorliegenden Analyse zu Grunde liegt. Unter der Voraussetzung, dass sowohl Autofahrer als auch Fußgänger dieser Gefährdung zweimal pro Tag ausgesetzt sind, ergeben sich folgende Expositionzeiten:

- 0.6 s/d und Teilfläche für Autofahrer, bzw.
- 7.2 s/d und Teilfläche für Fußgänger.

Zusammen mit den jährlichen³ Eisansatztagen (s. Abschnitt 1.4.2) berechnet sich die Aufenthaltswahrscheinlichkeit folgendermaßen:

$$P_A = \frac{0.6 \cdot N_{\text{Eisfalltag}} \cdot a}{15768000} \quad \text{für Autofahrer bzw.}$$

$$P_A = \frac{7.2 \cdot N_{\text{Eisfalltag}} \cdot a}{15768000} \quad \text{für Fußgänger}$$

in den einzelnen Teilflächen.

5.7.1.7 Berücksichtigung eines Reduktionsfaktors

Grundsätzlich gilt das nach Kapitel 5.7.1 ermittelte Schadensausmaß für Personen, die am Kopf getroffen werden. Dies ist nicht ohne Weiteres auf eine durch ein Fahrzeug geschützte Person übertragbar. Dennoch kann dieser Wert für Autofahrer zunächst übernommen werden.

In der Regel sollte die Karosserie sowie die Windschutzscheibe Eisstücke, die einen Spaziergänger töten würden, ohne größeren Schaden überstehen. Ähnliches erlebt man tagtäglich im Winter auf den Autobahnen, wenn sich Eisplatten z. B. von den Dächern von LKWs lösen und auf der Windschutzscheibe zerbersten. Somit ist von einer direkten tödlichen Auswirkung des Eisfalls nicht auszugehen.

Ein durchschnittlicher Autofahrer kann mit diesen Bedingungen umgehen und wird keinen Schaden davontragen. Dennoch wird davon ausgegangen, dass in 10% (Korrekturfaktor $K=0.1$) aller Fälle eine Reaktion des Autofahrers erfolgt, die zu einem mit Kapitel 5.7.1 vergleichbarem Schadensausmaß führt.

5.7.1.8 Ermittlung der Gefährdungswahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person (ein Fahrzeug) von einem Eisstück getroffen wird und daraus eine Verletzung resultiert, kann somit zu

³ Es wird nur das Winterhalbjahr in Betracht gezogen.

$$P = H_T \cdot P_T \cdot K(\text{Autofahrer}) \text{ bzw.}$$

$P = H_T \cdot P_T \cdot K(\text{Fußgänger})$
ermittelt werden.

5.7.2 Ermittlung des Risikos

Für jedes einzelne Eisstück in einem $5 \times 5 \text{ m}^2$ großem Quadranten wird das Risiko durch eine Multiplikation von Schadensausmaß C und Gefährdungswahrscheinlichkeit P berechnet.

$$R_{\text{Eisstück } i} = C_{\text{Eisstück } i} \cdot P_{\text{Eisstück } i}$$

Wobei die Wahrscheinlichkeit P_i für jedes Eisstück in einem Quadranten identisch ist. Somit ergibt sich für das Risiko in einem Quadranten in dem N Eisstücke gelandet sind

$$R_Q = P_i \cdot \sum_{i=1}^N C_{\text{Eisstück } i}$$

Für das Gesamtrisiko, wenn insgesamt M Quadranten betroffen sind, gilt

$$R_{\text{gesamt}} = \sum_{k=1}^M P_{ik} \cdot \sum_{i=1}^N C_{\text{Eisstück } ik}$$

5.7.3 Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen

Die Risikoreduktion durch geeignete Maßnahmen ist für Straßen/Wege erforderlich, die ein hohes / unakzeptabel hohes Risiko gemäß Kapitel 2 aufweisen.

Um die Risiken durch Eisfall zu reduzieren bieten sich zwei prinzipielle Möglichkeiten an. Zum einen kann der Abstand der Straße/des Weges zur Windenergieanlage vergrößert werden, so dass die Trefferwahrscheinlichkeit mit einem Eisstück auf das erforderliche Maß verringert wird. Zum anderen kann die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Fahrzeuges auf der Straße / eines Fußgängers auf dem Weg reduziert werden.

In folgender Tabelle werden beispielhaft mögliche Sicherheitsmaßnahmen dargestellt und deren risikoreduzierendes Potential bewertet.



Kategorie	Sicherheitsmaßnahme	Wirksamkeit
Aufenthaltswahrscheinlichkeit reduzieren	Warnschilder über Eisfallbedingungen	Obligatorisch / geringer Effekt, maximal eine Größenordnung
	Regelmäßige (mindestens jährlich) Informationsveranstaltungen/ Flugblätter/ Durchsagen im Radio etc.	Reduktion des Risikos um maximal eine Größenordnung (z. B. vom hohen Risiko zum tolerablen Risiko)
	Sperrung der Straße/des Weges in Wintermonaten/zu Zeiten mit Eisfallbedingungen mittels Schranken/Warnlichtanlage mit dem Eiserkennungssystem gekoppelt	Reduktion des Risikos um zwei Größenordnungen (z. B. vom hohen Risiko zum akzeptablen Risiko)
Abstand vergrößern	Verlegung der Straße/des Weges	Abhängig vom gewählten neuen Abstand; prinzipiell ist eine Reduktion des Risikos bis in den vernachlässigbaren Bereich möglich
	Spezielle Wegführung in den Wintermonaten	
	Verlegung der WEA	

Tabelle 12: Wirksamkeit bestimmter Sicherheitsmaßnahmen.



5.8 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
A	[m/s]	Skalenparameter der Weibullverteilung
A _{Eis}	[m ²]	Stirnfläche Eis
ALARP	[-]	As low as reasonably practicable
α	[-]	Exponent des Windprofils
B	[m]	Breite
C	[-]	Schadensausmaß
C _D	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
D	[m]	Rotordurchmesser
E _{kin}	[kg m ² /s ²]	Kinetische Energie
f	[-]	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	Höhe
H _T	[-]	Trefferhäufigkeit
HW	[-]	Hochwert
IEC	[-]	International Electrical Commission
k	[-]	Formparameter der Weibullverteilung
K	[-]	Korrekturfaktor
L	[m]	Länge
m	[kg]	Masse des Eisstücks
MEM, R _m	[1/a]	Minimale Endogene Sterblichkeit
μ		Mittelwert
N	[-]	Nord, nördlich
n	[-]	Anzahl Eisansatztage
NH	[m]	Nabenhöhe
NN	[-]	Normal Null
O	[-]	Ost, östlich
P	[-]	Wahrscheinlichkeit (engl. probability)
Pr	[kg m ² /s ²]	Probit-Funktion
R		Risiko
RW	[-]	Rechtswert
ρ	[kg/m ³]	Luftdichte
ρ _{Eis}	[kg/m ³]	Dichte Eis
S	[-]	Süd, südlich
σ		Standardabweichung
U ₀	[m/s]	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
v	[m/s]	Geschwindigkeit des Eisstücks
W	[-]	West, westlich
WEA, WKA	[-]	Windenergieanlage
W _{rel}	[m/s]	Relative Windgeschwindigkeit
x	[m]	Position (x,y,z)