Industrie Service

Mehr Sicherheit.
Mehr Wert.

Unabhängige Analyse

für den Standort

PFULLENDORF-DENKINGEN (BADEN-WÜRTTEMBERG)

Bericht Nr.: MS-1804-030-BW-ICE-RA-de

Revision 0

Datum: 03.07.2018

Unabhängige Analyse von Eisfall mit Risikobewertung

Datum: 09.08.2018
Revision: 1

Unsere Zeichen:
IS-ESW-RGB/KM/WEI

Das Dokument besteht aus 55 Seiten.
Seite 1 von 55

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

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfgegenstände.

Sitz: München
Amtsgericht München HRB 96 869
USt-IdNr. DE129484218
Informationen gemäß § 2 Abs. 1 DL-InfoV unter www.tuev-sued.de/impressum

Aufsichtsrat:
Reiner Block (Vors.)
Geschäftsführer:
Ferdinand Neuwieser (Sprecher),
Christian Bauerschmidt, Thomas Kainz

Telefon: +49 941 460212-0
Telefax: +49 941 460212-29
www.tuev-sued.de/is

TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Wind Cert Services
Ludwig-Eckert-Str. 8
93049 Regensburg
Deutschland

Auftraggeber:	**ABO Wind AG** Unter den Eichen 7 D-65195 Wiesbaden
Auftragnehmer:	**TÜV SÜD Industrie Service GmbH** **Abteilung Wind Cert Services** Ludwig-Eckert-Str. 8 D-93049 Regensburg
Angebot Nr.:	**AN-WG-1804-093-BW**
Berichtart:	**Unabhängige Analyse von Eisfall**
Standortbezeichnung:	**Pfullendorf-Denkingen**
Land:	**Baden-Württemberg, Deutschland**
Bericht Nr.:	**MS-1804-030-BW-ICE-RA-de**
Revision:	**0**
Ausstellungsdatum:	**09.08.2018**
Status:	**Endbericht**
Vertraulichkeitsstufe:	☐ **A** ☐ **B** ☒ **C**

Bericht verfasst von: **(Teilbereich Eisfallanalyse)**	i. A. **Dipl.-Met. Michaela Stark** **(Abteilung Wind Cert Services)**
Bericht geprüft von: **(Teilbereich Eisfallanalyse)**	**Dipl.-Geogr. Jürgen Hahn** **(Abteilung Wind Cert Services)**
Bericht verfasst von: **(Teilbereich Risikobewertung)**	**Dipl.-Phys. Thorsten Weidl** **(Abteilung Risikomanagement und Technische DueDiligence)**
Bericht geprüft von: **(Teilbereich Risikobewertung)**	**Dipl.-Ing. André Hoffmann** **(Abteilung Risikomanagement und Technische Due Diligence)**

Haftungsausschluss

Der vorliegende Bericht wurde sorgfältig und fachgerecht nach bestem Wissen und Gewissen und nach allgemeinen Regeln der Technik angefertigt. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass das durch den Auftraggeber bzw. Dritte zur Verfügung gestellte Material (Daten, Schriften, Aufzeichnungen, Diagramme, etc.) zur Erstellung der Dienstleistung nicht vollständig auf Richtigkeit geprüft werden kann. Es kann daher keine Fehlerfreiheit der dargestellten Ergebnisse übernommen werden. Eine Garantie und eine damit verbundene Haftung kann nicht übernommen werden. Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse sind nur im Kontext mit der gesamten Analyse und unter besonderer Berücksichtigung der Hinweise und der berechneten Unsicherheiten zu den Ergebnissen zu verstehen.

Ausgehändigte Berichte

Revision	Datum	Titel des Berichts
ICE-RA-0	03.07.2018	Unabhängige Analyse von Eisfall mit Risikobewertung

Änderungsrevision

Revision	Datum	Zusammenfassung der Änderungen
ICE-RA-0	03.07.2018	Vollständiger Endbericht
ICE-RA-1	09.08.2018	Redaktionelle Änderungen

Definition der Vertraulichkeitsstufe

Im nachfolgenden wird die Klassifikation der jeweiligen Vertraulichkeitsstufe beschrieben. Die Definition der jeweiligen Vertraulichkeitsstufe soll dem Auftraggeber die Möglichkeit liefern, das Projekt und die auszustellende Dienstleistung gegenüber dem Zugriff Dritter zu schützen. Hierzu werden 3 Stufen (Klassifikationen) unterschieden, die im Feld Definition näher beschrieben sind. Die Vertraulichkeitsstufe wird bei der Beauftragung der Dienstleistung vorab durch den Auftraggeber festgelegt. Änderungen der Klassifikationen bedürfen der Schriftform seitens des Auftraggebers.

Stufe	Klassifikation	Definition
A	Streng vertraulich	Nur die als Empfänger namentlich unter Angabe der Firmenanschrift genannten Personen erhalten Informationen zu diesem Projekt.
B	Vertraulichkeits-vereinbarung	Nur die als Auftraggeber genannte Firma und deren Beschäftigten erhalten Informationen zu diesem Projekt.
C	Geheim	Die vom Auftraggeber genannten Firmen dürfen Informationen zu diesem Projekt erhalten.

Inhalt

0 Einleitung ... 6
1 Zusammenfassung der Ergebnisse ... 7
2 Eingangsdaten für die Berechnungen ... 10
2.1 Tabellarische und graphische Darstellung der Windparkkoordinaten ... 10
2.2 Anlagenspezifische Eingangsdaten ... 11
2.3 Meteorologische Eingangsdaten ... 11
2.3.1 Standortspezifische Windmessdaten ... 11
2.3.2 Generierte Windstatistik für die Eisfallberechnungen ... 11
2.3.3 Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage ... 13
2.4 Untersuchungsobjekte am Standort ... 13
3 Darstellung der Berechnungsergebnisse für Eisfall bei Trudelbetrieb ... 17
4 Ermittlung des von den Anlagen ausgehenden Gesamtrisikos ... 19
4.1 Risiko für WEA01 ... 20
4.2 Risiko für WEA02 ... 23
4.3 Risiko für WEA03 ... 26
4.4 Risiko für WEA04 ... 28
5 Hinweise zur Erstellung der Analyse ... 30
6 Literaturverzeichnis ... 31
7 Anhang ... 33
7.1 Eiswurf und Eisfall bei Windenergieanlagen ... 33
7.2 Theoretische Berechnungsgrundlagen von Eiswurf bzw. Eisfall ... 35
7.3 Annahmen für die Eisfallberechnungen ... 36
7.4 Berechnete Eisfallszenarien ... 36
7.5 Risiko und Risikoakzeptanzkriterien ... 38
7.5.1 Der Risikobegriff ... 38
7.5.1.1 Risikobewertung ... 38
7.5.1.2 Risikodarstellung - Risikomatrix ... 39
7.5.2 Risikoakzeptanzkriterien ... 41
7.5.2.1 Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) ... 41
7.5.2.2 Das ALARP-Prinzip ... 42
7.5.2.3 Kollektives Risiko ... 43
7.5.2.4 Im Rahmen der Untersuchung verwendete Akzeptanzkriterien ... 44
7.5.2.5 Vergleichsrisiken ... 46
7.6 Für die Risikoanalyse verwendete Methodik ... 47
7.6.1 Schadensausmaß ... 47
7.6.1.1 Die Probit-Funktion ... 47
7.6.1.2 Massenverteilung der Eisstücke ... 48

7.6.1.3 Ermittlung des mittleren Schadensausmaßes 49
7.6.2 Eintrittshäufigkeit 50
7.6.2.1 Betrachtete Expositionsszenarien 51
7.6.2.2 Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit H_T, P_T 52
7.6.2.3 Ermittlung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit P_A 53
7.6.2.4 Berücksichtigung eines Reduktionsfaktors 53
7.6.2.5 Ermittlung der Gefährdungswahrscheinlichkeit 53
7.6.3 Ermittlung des Risikos für die einzelnen Szenarien und Gesamtrisiko 54
7.6.4 Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen 54
7.7 Abkürzungsverzeichnis 55

0 Einleitung

Dieser hier vorliegende Bericht beruht auf dem Angebot mit der Nr. AN-WG-1804-093-BW vom 17.04.2018 [3]. Der Auftraggeber hat dieses am 24.04.2018 schriftlich beauftragt und an den Auftragnehmer zugestellt [4].

Der geplante Windpark trägt den Projektnamen Pfullendorf-Denkingen. Vom Auftraggeber wurde eine Parkkonfiguration mit den jeweiligen Koordinaten der geplanten Windenergieanlagen (WEA) vorgegeben [5].

Für die Ermittlung der Eisfallweiten bei Trudelbetrieb wurden die folgenden Anlagendaten verwendet.

- Parkkonfiguration I: 4 x General Electric GE 158-5.3 mit 5.3 MW Leistung, 161 m Nabenhöhe und 158 m Rotordurchmesser

Innerhalb dieser Analyse wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Prüfung der gemäß der Richtlinie für Windenergieanlagen – Liste der technischen Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage 2.7/12 [17] geforderten Unterlagen zur Funktionssicherheit des Eiserkennungssystems für den geplanten Anlagentyp auf Vollständigkeit auf Basis der vom Anlagenhersteller zur Verfügung gestellten Dokumente.
- Unsicherheitsbetrachtung auf Basis der meteorologischen Eingangsdaten für die Windstatistik.
- Berechnung der zu erwartenden Eisfallweiten von den geplanten Anlagen unter Berücksichtigung der maximalen Umdrehungszahl beim Trudelbetrieb der Anlage (Leerlauf) sowie der Windverhältnisse am Standort.
- Bewertung der in der Umgebung der geplanten Anlagenstandorte verlaufenden Straßen und Wege hinsichtlich ihrer Lage im ermittelten Gefährdungsbereich.
- Risikobewertung des Eisfalls für die im Einwirkbereich der geplanten Anlagenstandorte befindlichen Wege und Straßen.

Dieser hier vorliegende Bericht wurde von TÜV SÜD IS erstellt, um mögliche Eisfallgefährdungen und das Risiko für Menschen durch abfallende Eisstücke durch den geplanten Windpark zu ermitteln.

Diese Betrachtung ist notwendig, weil sich ein Wegesystem innerhalb des durch die Richtlinie für Windenergieanlagen [17] definierten Radius von *1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe)* um die geplanten Windenergieanlagen befindet.

Zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer existieren keine weiteren geschäftlichen Verbindungen zu diesem hier durchgeführten Projekt.

In diesem hier vorliegenden Bericht werden als Dezimaltrennzeichen Punkte verwendet. Zudem wird ein Hochstrich als Zifferngruppierung eingeführt, der die Tausender-Gruppierung anzeigt.

1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurde eine unabhängige Analyse für den Standort Pfullendorf-Denkingen durchgeführt. Dabei wurde der mögliche Eisfall am Standort durch die geplanten, vereisungsbedingt abgeschalteten und im Trudelbetrieb befindlichen Anlagen berechnet.

Vom Auftraggeber wurde eine Parkkonfiguration bestehend aus vier Anlagen des Typs General Electric GE 158-5.3 mit einer Nennleistung von 5.3 MW, einer Nabenhöhe von 161 m und einem Rotordurchmesser von 158 m mitgeteilt [5]. Die Anlagen sollen mit dem Eiserkennungssystem BLADEcontrol Ice Detector BID der Firma Weidmüller Monitoring Systems GmbH ausgestattet werden.

Die gemäß der Richtlinie für Windenergieanlagen – Liste der technischen Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage 2.7/12 [17] geforderten Unterlagen zur Funktionssicherheit des Eiserkennungssystems liegen für den geplanten WEA-Typ vor (siehe hierzu Abschnitt 2.2). Demnach kann der Eiswurf durch eine sich in Betrieb befindliche Anlage ausgeschlossen werden.

Entsprechend der Liste der technischen Baubestimmungen, Ziffer 2 der Anlage 2.7/12 [17] sind Verkehrswege und Gebäude in einem Radius von 478.5 m um die geplanten WEA im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung der öffentlichen Sicherheit durch Eiswabwurf zu betrachten.

Die geplanten Anlagenstandorte sind von einem Wald- und Forstwegsystem umgeben. Außerdem verläuft die Landesstraße L201 nordöstlich von den geplanten Anlagen. Nähere Angaben zu deren Lage sowie den jeweiligen Entfernungen zu den geplanten Anlagen sind im Abschnitt 2.4 zu finden.

Für die Berechnungen wurden die im Rahmen eines Windgutachtens [6] für den Standort Pfullendorf-Denkingen ermittelten Windfeldparameter verwendet. Die Daten dieser langzeiteingeordneten Windstatistik basieren auf einer am geplanten Standort durchgeführten Windmessung [6].

Die der Windstatistik zugrunde liegenden meteorologischen Eingangsdaten stammen vom geplanten Standort, jedoch sind die Aufbereitungsprozesse und der Langzeitbezug der Windmessdaten sowie die Übertragung dieser auf die aktuell geplanten WEA-Standorte trotz der Standortnähe mit Unsicherheiten behaftet.

Daher wurde der windrichtungsabhängige Skalierungsparameter der Weibull-Funktion der vorliegenden Windstatistik mit einem Unsicherheitszuschlag versehen, dem die Unsicherheitsbetrachtung des Windgutachtens [6] hinsichtlich der meteorologischen Eingangsdaten sowie der Windfeldmodellierung zugrunde liegt. Dabei wurde die Verteilung der Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Sektoren erhöht. Damit sind die ermittelten Eisfallweiten mit einer Unsicherheitsbetrachtung versehen und sind als eher konservativ anzusehen. Weitere Informationen zur verwendeten Windstatistik sind in Abschnitt 2.3.2 zu finden.

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Berechnungen geht hervor, dass bei der Simulation des leichteren Eisstücks aus Raureif (Szenario A) die größten Fallweiten zustande gekommen sind. Die Verteilung der Trefferhäufigkeiten spiegelt in allen Szenarien die in die Berechnung eingeflossene Windrichtungsverteilung sowie die durch die entsprechende Ausrichtung der Anlage erfolgte, zur jeweiligen Windrichtung rechtwinklige Abwurfrichtung von der trudelnden Anlage wieder.

Um eine sichere Benutzung des Wegesystems im Bereich der Windenergieanlagen zu gewährleisten, wurden in Kapitel 4 für einzelne WEA Maßnahmen ermittelt. Im Folgenden werden die Maßnahmenvorschläge derart zusammengefasst, dass nicht mehr die einzelne WEA, sondern der Windpark als Ganzes abgesichert ist, der Vorschlag ist in Abbildung 1 grafisch dargestellt.

Es wird empfohlen folgende Wege für Fußgänger und Radfahrer bei Eisfallbedingungen zu sperren oder als gleichwertige alternative Hinweisschilder mit an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchten aufzustellen:

- der Weg *B* an der Kreuzung zum Weg *C* (Verkehrsführung nach Süden über den Weg *C*);
- der Weg B an der Kreuzung zum Weg *Y* (Verkehrsführung nach Norden über den Weg *Y*);

Darüber hinaus sollten an folgenden Wegkreuzungen eindeutige Warn- bzw. Verbotsschilder angebracht werden, die mit einem eindeutigen Warnhinweis versehen sind.

- der Weg *H* an der Kreuzung zum Weg *C* (Verkehrsführung nach Norden und Süden über den Weg *C*);
- der Weg *O* an der Kreuzung zu den Wegen *C* und *P* (Verkehrsführung nach Norden über den Weg *C* und nach Süden über den Weg *P*);

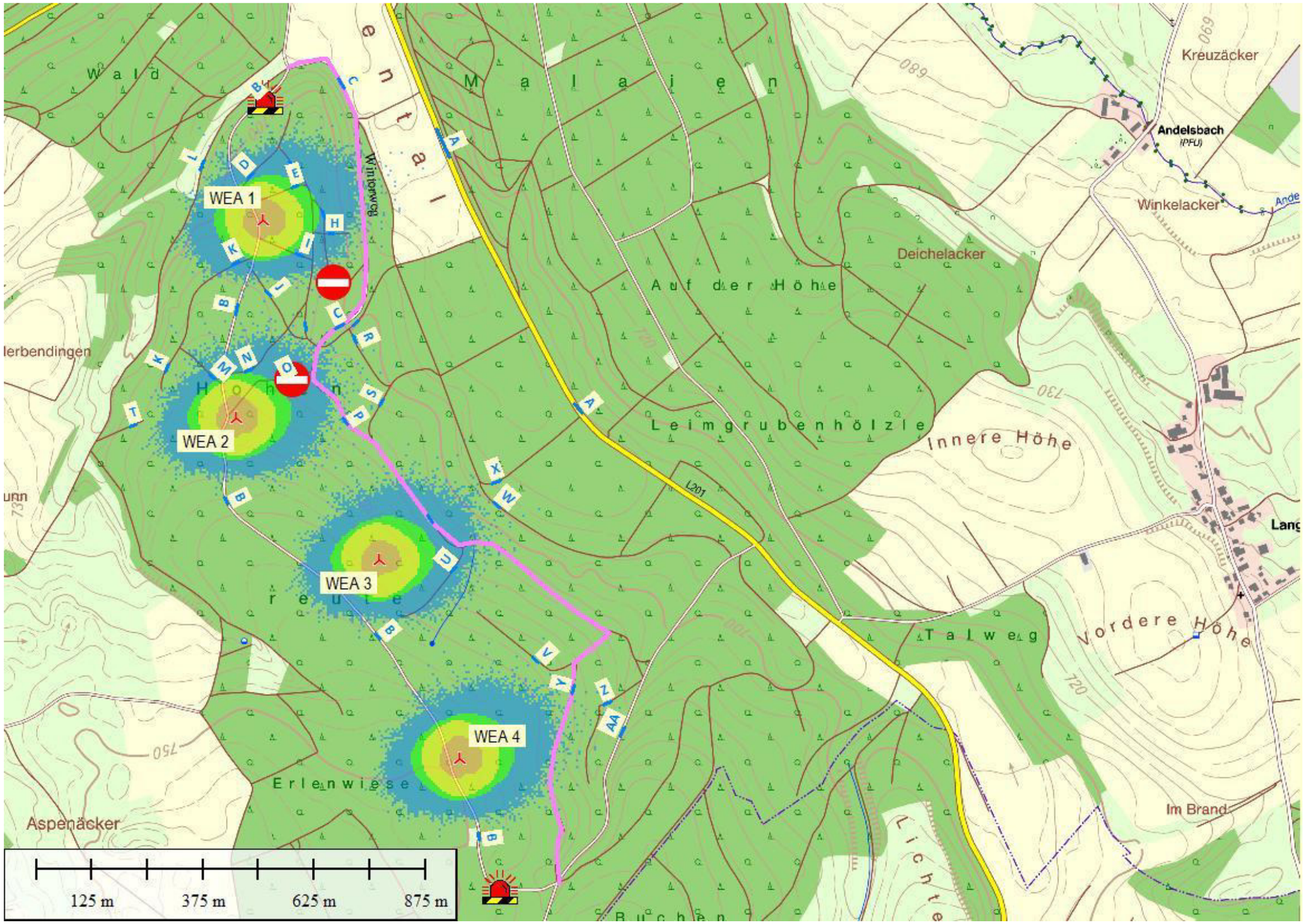
Darüber hinaus wird empfohlen, dafür zu sorgen, dass Fußgänger und Radfahrer sich bei Eisfallbedingungen auf sicheren Wegen (Winterweg) bewegen.

In folgender Abbildung 1 ist ein Vorschlag zur Anordnung von Wegsperrungen und Schildern sowie ein sicherer Weg für Fußgänger und Radfahrer (rosa Wegführung) dargestellt.

Für Autofahrer sind keine weiteren Maßnahmen notwendig.

Sollten im Rahmen der Errichtung der WEA zusätzliche Stichwege und/oder Kranstellflächen errichtet werden, wird empfohlen, diese bei Eisfallbedingungen grundsätzlich zu sperren.

Industrie Service



	Der Weg ist bei Eisfallbedingungen zu sperren. Dies sollte durch • Aufstellen eines Schildes mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bei Eisfallbedingungen wegen Lebensgefahr dringend abrät (Alternativ: Absperrung des Weges zu Zeiten mit Eisfallpotential mittels Schranke) realisiert werden. Zusätzlich sollte ein eindeutiges Warnschild angebracht werden, das davor warnt • sich bei winterlichen Bedingungen unnötig lange in der Nähe der Windenergieanlagen aufzuhalten **und darauf hinweisen** • auf den ausgeschilderten Wegen zu bleiben. Dies sollte durch ein Schild "Wald- und Forstarbeiter frei" ergänzt werden.
	An den Zuwegungen zum Windpark, die nicht explizit gesperrt werden, aber auf Wege mit einem hohen oder unakzeptabel hohen Risiko führen, sollte eine an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelte Warnleuchte/Lichtzeichen angebracht werden. Zusätzlich sollte ein eindeutiges Warnschild angebracht werden, das davor warnt • sich bei winterlichen Bedingungen unnötig lange in der Nähe der Windenergieanlagen aufzuhalten **und darauf hinweisen** auf den ausgeschilderten Wegen zu bleiben. Dies sollte durch ein Schild "Wald- und Forstarbeiter frei"[1] ergänzt werden.
Durchgang verboten	Zusätzlich zu den o. g. Wegsperrungen sollten an den Wegkreuzungen, die direkt zu den Windenergieanlagen führen, eindeutige Verbotsschilder angebracht werden. Diese sollten mit einem eindeutigen Warnhinweis versehen werden, dass bei Eisfallbedingungen Lebensgefahr durch Eisfall vorherrscht. Diese Schilder dienen der korrekten Wegführung im Winter. Darüber hinaus wird empfohlen, im Winter einen sicheren „Winterweg" auszuweisen.
	Empfohlene Wegführung im Winter. Auf den markierten Wegen ist das Risiko in jedem Fall vernachlässigbar.

Abbildung 1: Vorschlag zur Umsetzung der Maßnahmen. Topographische Karte [19] mit den Standorten der geplanten WEA (⅄) im Windpark Pfullendorf-Denkingen inklusive der Risikoeinschätzung gemäß Kapitel 4.

[1] Es wird davon ausgegangen, dass Wald- und Forstarbeiter aufgrund ihrer Tätigkeit persönliche Schutzausrüstung tragen bzw. durch ein Fahrzeug entsprechend geschützt sind.

2 Eingangsdaten für die Berechnungen

2.1 Tabellarische und graphische Darstellung der Windparkkoordinaten

Die Standortkoordinaten und die Fußpunkthöhen für den Windpark Pfullendorf-Denkingen wurden vom Auftraggeber mitgeteilt [5] und werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Windparkkoordinaten

Windpark Pfullendorf-Denkingen	Koordinatensystem				Höhe ü.NN ca.
	Gauß-Krüger, DHDN, Zone 3		UTM, WGS84, Zone 32		Fußpunkt
	RW	HW	Ost	Nord	[m]
WEA 1	3'522'714	5'304'381	522'629	5'302'700	712
WEA 2	3'522'652	5'303'936	522'567	5'302'255	727
WEA 3	3'522'975	5'303'615	522'890	5'301'934	739
WEA 4	3'523'155	5'303'168	523'070	5'301'487	750

Tabelle 1: Koordinaten der geplanten Anlagen im Windpark Pfullendorf-Denkingen (Konfiguration I).

In der nachfolgenden Abbildung werden die geplanten Anlagenstandorte graphisch dargestellt.

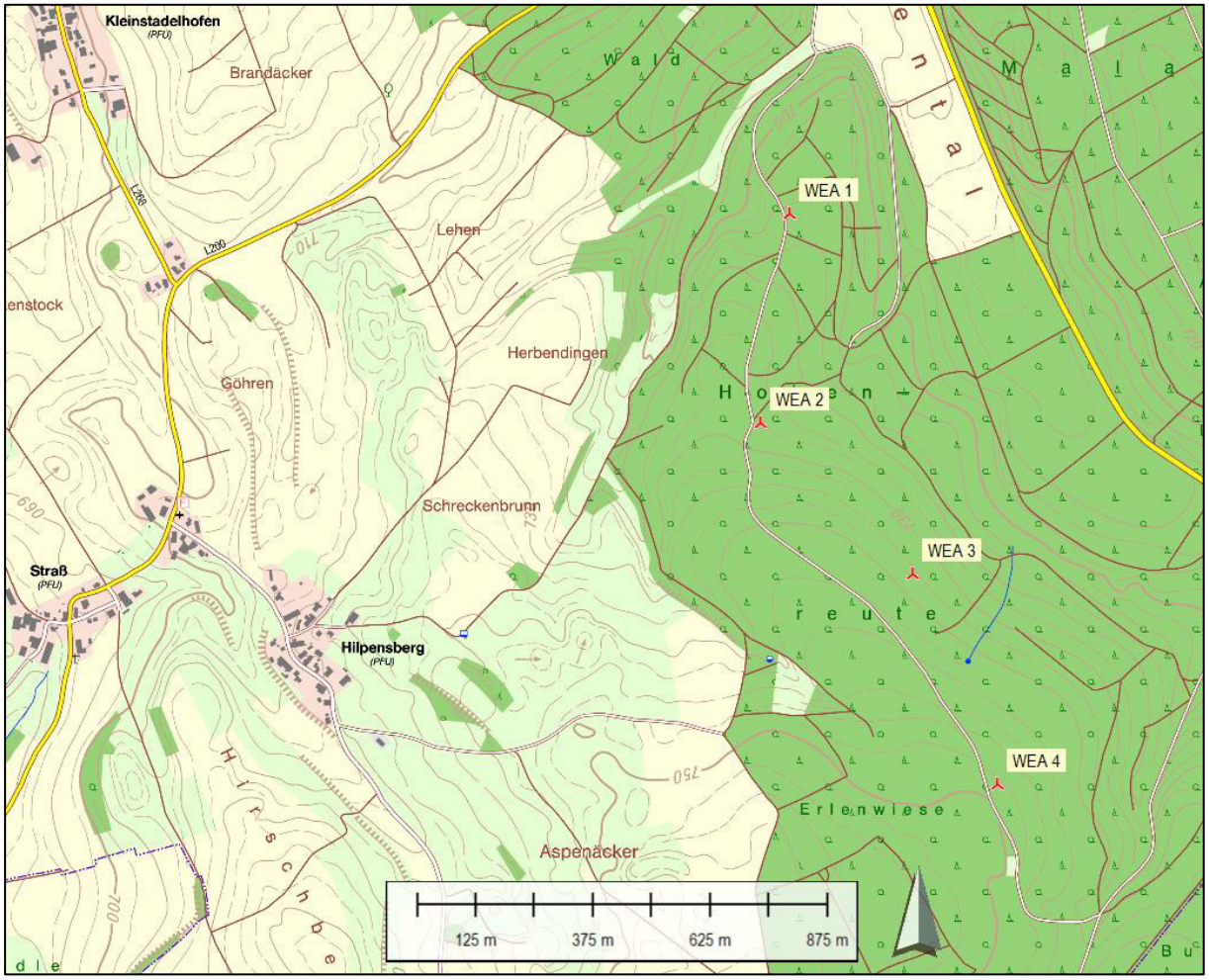


Abbildung 2: Topographische Karte [19] mit den Standorten geplanten WEA (⅄) im Windpark Pfullendorf-Denkingen.

2.2 Anlagenspezifische Eingangsdaten

Durch den Auftraggeber wurde eine Anlagenkonfiguration zur Berechnung vorgegeben [5].

Die jeweiligen Eingangswerte für den geplanten Anlagentyp werden in der nachfolgenden Tabelle kurz zusammengefasst.

Technische Daten						
Hersteller / Typ	Leistung	Nabenhöhe	Rotor-durchmesser	Maximale Umdrehungs-zahl im Trudelbetrieb	Anforderungen gemäß Anlage 2.7/12 zur Richtlinie für Windenergieanlagen	
					Eiserkennungs-sytem	Integration in WEA-Technik
[-]	[MW]	[m]	[m]	[U/min]	[-]	[-]
General Electric GE158-5.3	5.3	161	158	1	erfüllt	erfüllt

Tabelle 2: Zusammenfassung der technischen Daten der geplanten WEA.

Wie aus der Tabelle hervorgeht, erfüllt das geplante Eiserkennungssystem für die betrachtete Konfiguration die Anfordungen von [17] sowie auch die Integration des Eiserkennungssystems auf Basis der zur Verfügung gestellten Dokumente [20][21] die Anforderungen von [17] erfüllt.

Wie im Gutachten zur Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems BLADEcontrol [20] beschrieben, ist der Eisdetektor in der Lage Vereisung an den Rotorblättern und auch die Eisfreiheit der Rotorblätter im Stillstand der Anlage zu messen. Nach Bewertung der Einbindung der Signale des Eiserkennungssystems in die Anlagensteuerung in [21] ist ein automatisches Anfahren der Anlage nach Meldung der Eisfreiheit als sicher zu bewerten.

Die Dokumente, auf deren Basis die Bewertung zur Eiserkennung beruht, werden im Anhang dieses Berichts angefügt.

2.3 Meteorologische Eingangsdaten

2.3.1 Standortspezifische Windmessdaten

Nach Angaben des Auftraggebers wurde am Standort Pfullendorf-Denkingen eine Windmessung über einen Zeitraum von vier Jahren mit einem 120 m hohen Messmasten durchgeführt. Diese Messdaten wurden im Rahmen eines Windgutachtens [6] zur Erzeugung einer Windstatistik verwendet.

2.3.2 Generierte Windstatistik für die Eisfallberechnungen

Für die Berechnungen wurde die auf Basis des Windgutachtens [6] für den Standort und für die hier betrachtete Nabenhöhe von 161 m generierte Windstatistik herangezogen. Die zur Verfügung stehende Windstatistik [6] erscheint plausibel.

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. Für die hier durchgeführten Berechnungen wurde die auf Basis des Windgutachtens [6] für einen Referenzpunkt im Windpark erzeugte Windstatistik verwendet. Diese kann für die restlichen Anlagen im Windpark als repräsentativ eingestuft werden.

Der Exponent der Windscherung wurde aus dem im Windgutachten betrachteten Windprofil über der Rotorfläche mit 0.25 ermittelt [6].

Die nachfolgende Tabelle zeigt die sektoriellen Häufigkeiten sowie A- und k-Parameter der Weibullverteilung der ausgewählten Windstatistik.

Ergebnisse der Windgeschwindigkeitsstatistik			
Sektor	**Häufigkeiten**	**A-Parameter**	**k-Parameter**
[°]	**[%]**	**[m/s]**	**[-]**
345 - 015	2.9	5.3	2.17
015 - 045	5.2	6.1	2.11
045 - 075	15.9	7.6	2.39
075 - 105	8.4	6.0	2.04
105 - 135	3.3	4.8	1.84
135 - 165	2.7	4.1	1.38
165 - 195	4.9	4.6	1.50
195 - 225	13.5	7.3	1.94
225 - 255	29.2	8.4	2.10
255 - 285	8.0	6.5	1.76
285 - 315	3.6	5.9	1.76
315 - 345	2.3	4.7	1.86
Summe/Mittelwert	100	7.0	1.87

Tabelle 3: Zusammenfassung der wichtigsten Parameter der ausgewählten Windstatistik (ohne Unsicherheitszuschlag) [6] für die geplante Nabenhöhe von 161 m.

Die Bestimmung des Windfeldes aus den gemessenen Daten für einen Langzeitraum, die Extrapolation auf die geplante Nabenhöhe sowie die Modellierung an den einzelnen geplanten WEA-Standorten ist trotz der standortspezifischen Windmessung mit Unsicherheiten verbunden.

Daher wurde die Windstatistik mit einem Unsicherheitszuschlag versehen, dem die Unsicherheitsbetrachtung des Windgutachtens [6] hinsichtlich der meteorologischen Eingangsdaten mit einer Unsicherheit von 7.2% bzw. der Windfeldmodellierung am Standort mit einer Unsicherheit von 3.6% zugrunde liegt. Dies ergibt eine kombinierte Unsicherheit von 8.0%. Hierbei wurden die sektoriellen windrichtungsabhängigen Skalierungsparameter der Weibull-Funktion entsprechend einer 25-prozentigen Überschreitungswahrscheinlichkeit erhöht, sodass die Verteilung der Windgeschwindigkeiten als eher konservativ betrachtet werden kann.

Die Windrichtungsverteilung sowie die Weibull-Verteilung der in den Berechnungen verwendeten Windstatistik sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Windrose und Weibullverteilung inkl. Unsicherheitsbetrachtung

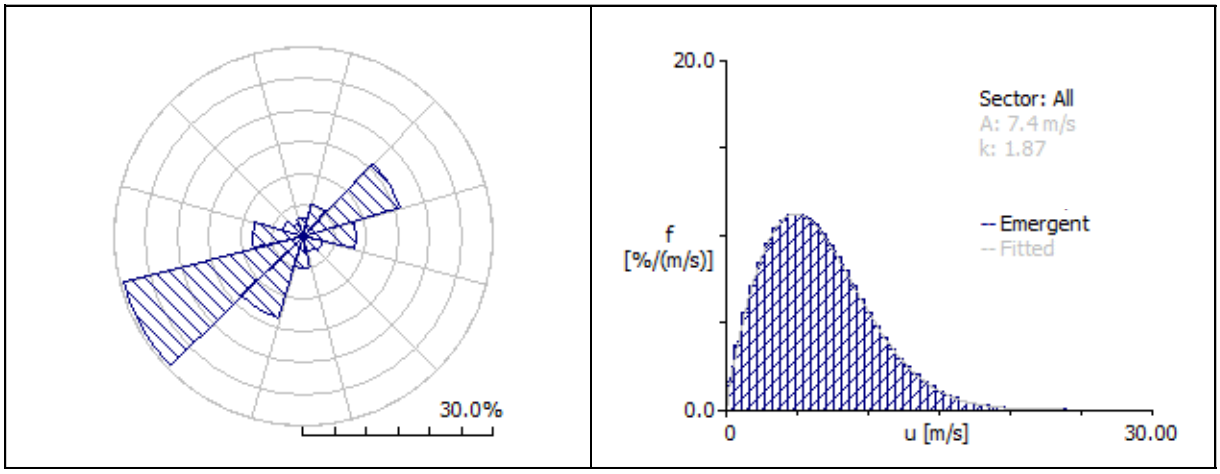


Abbildung 3: **Ganzjährige Windrose und Histogramm der verwendeten Windstatistik für den Standort Pfullendorf-Denkingen.**

2.3.3 Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage

In Anlehnung an [37] werden als Eingangsdaten für die Risikobewertung die Anzahl der Tage pro Jahr mit Eisfallpotenzial standortspezifisch abgeschätzt.

Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage

Standort	Anzahl an Vereisungstagen
Pfullendorf-Denkingen	28

Tabelle 4: **Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage auf Basis von [37].**

Die in obiger Tabelle angegebene Abschätzung wirkt sich maßgeblich auf die Expositionszeiten aus (vgl. Abschnitt 7.6.2).

2.4 Untersuchungsobjekte am Standort

Die geplanten Anlagenstandorte sind von einem Forst- und Waldwegesystem umgeben, wobei die Abstände der Anlagen zu diesen Forst- und Waldwegen (Wege B bis AA) zwischen ca. 10 m und 315 m betragen. Zur Bewertung der Beschaffenheit und des damit verbundenen Nutzungsprofils wurden seitens des Auftraggebers Fotos zum Fortswirtschaftsweg B übermittelt [24].

Außerdem verläuft die Landesstraße L201 (Straße A) nordöstlich von den geplanten Anlagen mit einem Mindestabstand von ca. 440 m zur WEA 1. Zur Bewertung der Frequentierung der Straße wurden seitens des Auftraggebers Verkehrszahlen der Straßenverkehrszentrale Baden-Württemberg für die L201 zur Verfügung gestellt [23].

Die oben beschriebenen Objekte in der Umgebung der geplanten Anlagenstandorte werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Hierbei werden die minimalen Abstände zu der jeweils nächstgelegenen geplanten WEA angegeben, wobei der Abstand auf 5 m gerundet wird. Desweiteren soll hierbei beachtet werden, dass die Genauigkeit dieser Angaben auf die Genauigkeit der Kartengrundlage [19] zurückzuführen ist. Weiterhin werden in der folgenden Tabelle die relevanten Expositionsszenarien (Wegkategorien) gemäß Abschnitt 7.6.2.1 mit aufgeführt.

In den Abbildungen 4 und 5 sind die aufgeführten Untersuchungsobjekte mit den Bezeichnungen A bis AA eingetragen.

Untersuchungsobjekte

Bezeichnung	Objekt	Minimaler Abstand zur jeweiligen WEA	Expositionszenario (Wegekategorie)
A	Landesstraße L201	440 m (WEA 1)	5700 Fzg. / Tag
B	befestigter Forstwirtschaftsweg	10 m (WEA 1) 15 m (WEA 2) 110 m (WEA 3) 20 m (WEA 4)	häufig
C	befestigter Forstwirtschaftsweg	220 m (WEA 1) 250 m (WEA 2)	häufig
D	Waldweg	85 m (WEA 1)	normalerweise nicht
E	Waldweg	40 m (WEA 1)	normalerweise nicht
F	Waldweg	105 m (WEA 1) 235 m (WEA 2)	selten
G	Waldweg	120 m (WEA 1)	selten
H	Waldweg	115 m (WEA 1)	normalerweise nicht
I	Waldweg	40 m (WEA 1)	normalerweise nicht
J	Waldweg	115 m (WEA 1) 225 m (WEA 2)	normalerweise nicht
K	Waldweg	90 m (WEA 1) 180 m (WEA 2)	normalerweise nicht
L	Waldweg	160 m (WEA 1)	gelegentlich
M	Waldweg	80 m (WEA 2)	normalerweise nicht
N	Waldweg	100 m (WEA 2)	selten
O	Waldweg	15 m (WEA 2)	selten
P	Waldweg	185 m (WEA 2) 145 m (WEA 3)	gelegentlich
Q	Waldweg	250 m (WEA 2)	normalerweise nicht
R	Waldweg	315 m (WEA 2)	normalerweise nicht
S	Waldweg	300 m (WEA 2)	gelegentlich
T	Waldweg	210 m (WEA 2)	normalerweise nicht
U	Waldweg	140 m (WEA 3)	normalerweise nicht
V	Waldweg	250 m (WEA 3) 280 m (WEA 4)	selten
W	Waldweg	280 m (WEA 3)	gelegentlich

Bezeichnung	Objekt	Minimaler Abstand zur jeweiligen WEA	Expositionszenario (Wegekategorie)
X	Waldweg	290 m (WEA 3)	selten
Y	Waldweg	205 m (WEA 4)	gelegentlich
Z	Waldweg	285 m (WEA 4)	normalerweise nicht
AA	befestigter Forstwirtschaftsweg	325 m (WEA 4)	häufig

Tabelle 5: Objekte in der Umgebung der geplanten Anlagenstandorte.

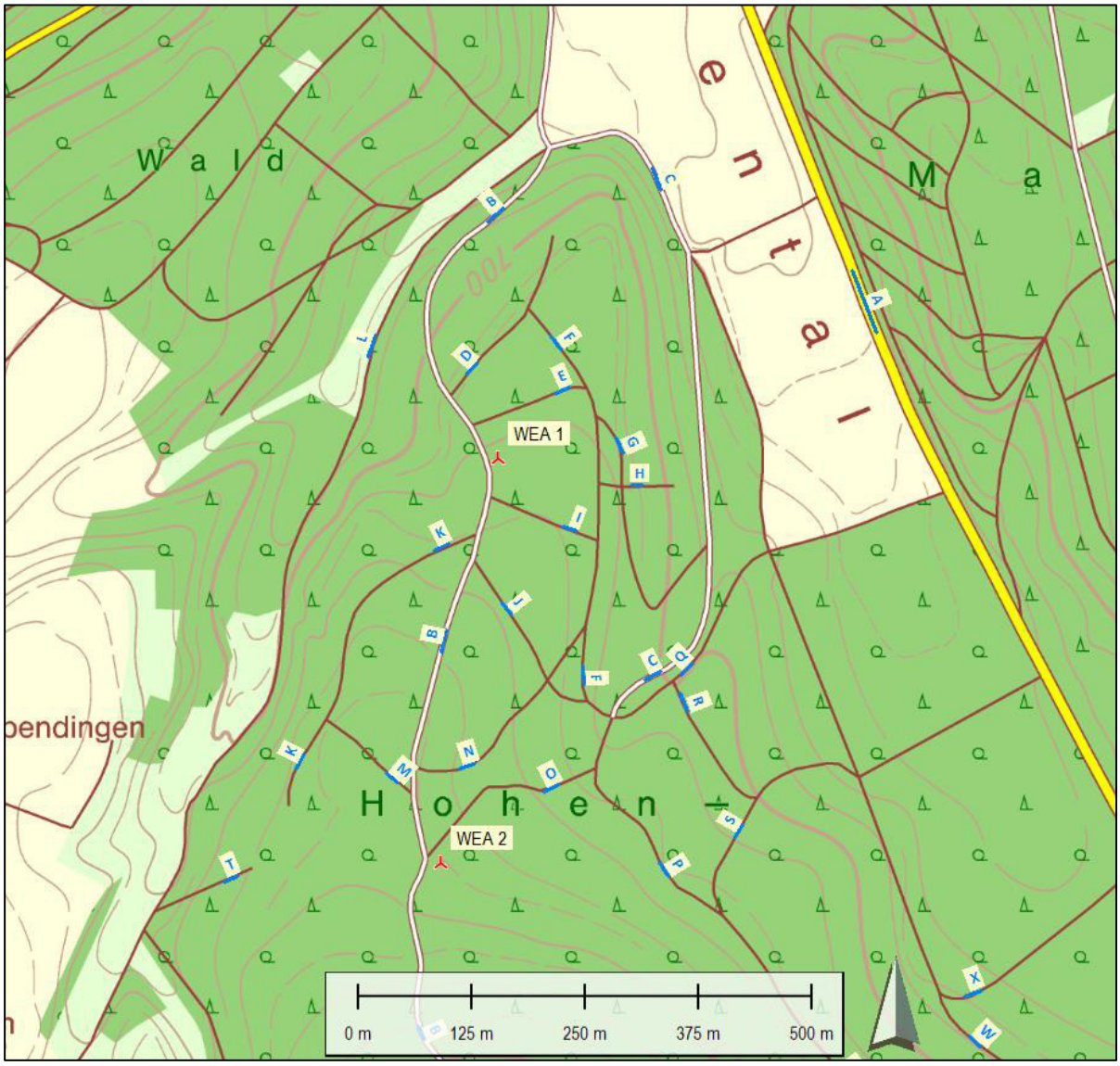


Abbildung 4: Topographische Karte [19] mit den untersuchten Objekten an den geplanten Standorten WEA 1 und WEA 2 des Windparks Pfullendorf-Denkingen (mit den Buchstaben A bis T gekennzeichnet) sowie Standorte der geplanten WEA ( ).

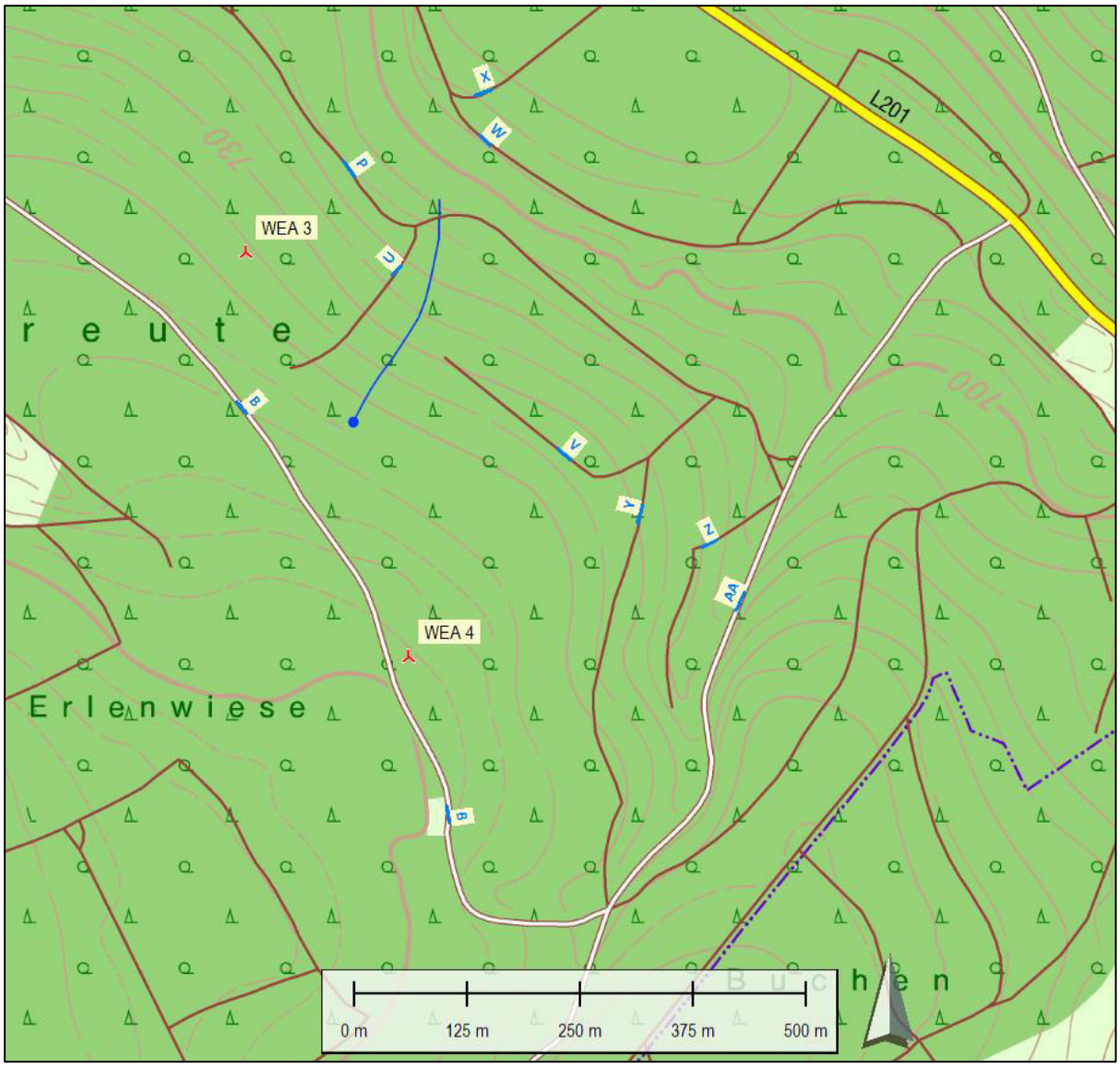


Abbildung 5: **Topographische Karte [19] mit den untersuchten Objekten an den geplanten Standorten WEA 3 und WEA 4 des Windparks Pfullendorf-Denkingen (mit den Buchstaben B bis AA gekennzeichnet) sowie Standorte der geplanten WEA (⅄).**

3 Darstellung der Berechnungsergebnisse für Eisfall bei Trudelbetrieb

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der Berechnungen für die vier untersuchten Szenarien A bis D dargestellt.

Die Abbildungen zeigen die simulierten Trefferhäufigkeiten in den einzelnen Quadranten von 5x5 m² Fläche. Die Farbcodierung stellt die Summe der in den Quadranten gezählten Treffer durch ein herabfallendes Eisstück dar. Als Obergrenze der Farbskala in der Darstellung wurden 10‘000 Treffer pro Quadrantfläche festgelegt. Somit wurden alle Quadranten, die 10‘000 bzw. mehr Treffer aufweisen, im gleichen Farbton dargestellt. In den Abbildungen wurden Abstandskreise in je 79 m (Rotorradius), 100 m sowie 200 m Abstand eingefügt.

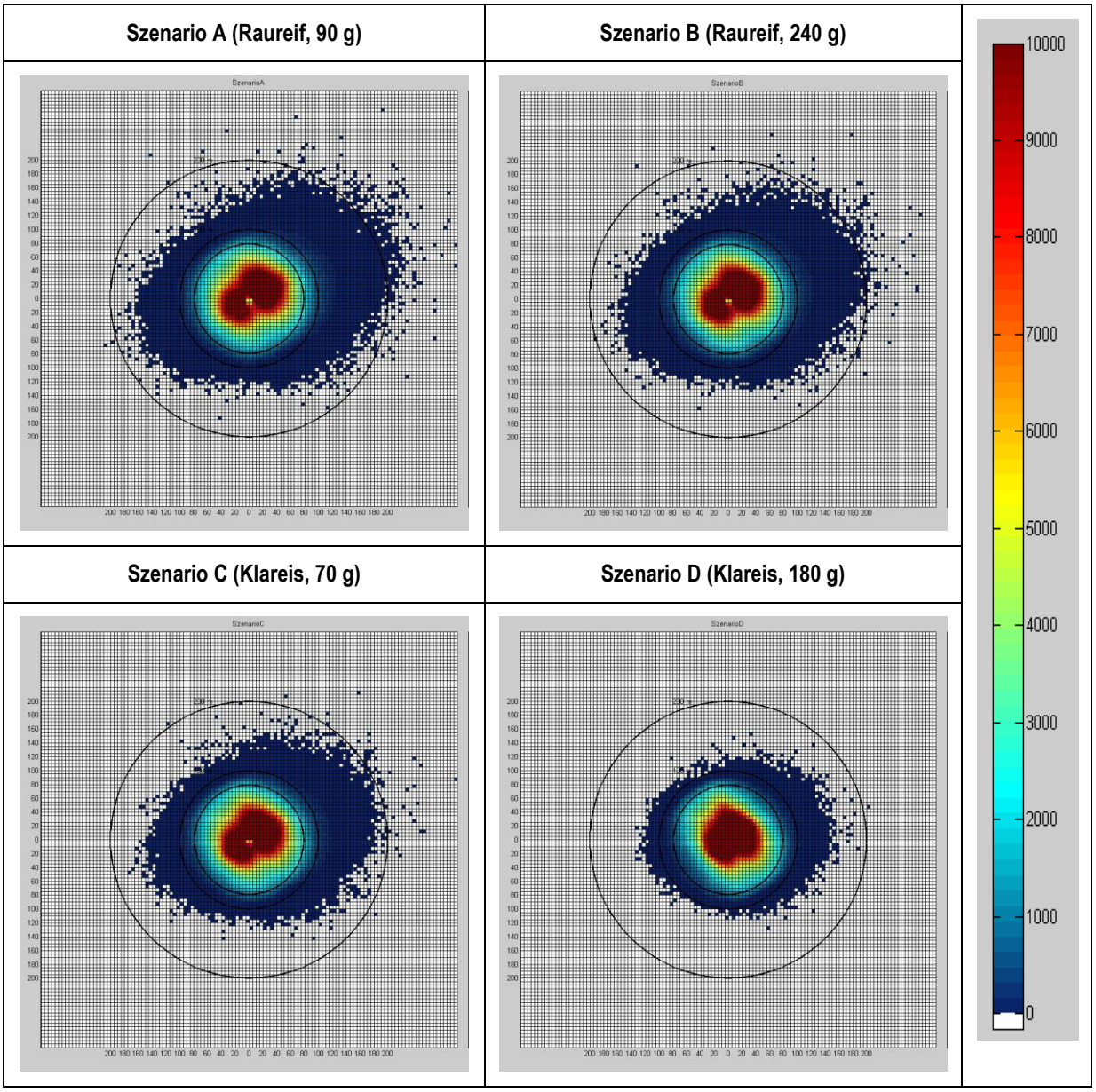


Abbildung 6: **Grafische Darstellung der simulierten Fallweiten für die untersuchten Szenarien. Die Ergebnisse sind für alle vier geplanten Anlagenstandorte im Windpark Pfullendorf-Denkingen gültig. Die Farbskala zeigt die Anzahl der Treffer pro Quadrantfläche. Hilfsweise sind in den Abbildungen Abstandskreise für den Rotorradius sowie für die Entfernung von 100 m und 200 m vom Anlagenmittelpunkt eingetragen.**

Wie aus den vorangegangenen Abbildungen ersichtlich ist, wurden die größten Fallweiten in jedem Szenario nordost- bzw. ostseitig der Anlage berechnet. Dies kommt zum einen durch die vorwiegend westsüdwestliche Hauptwindrichtung zustande, wobei die Eisstücke vom Wind in Mitwindrichtung transportiert werden. Die größten Fallweiten wurden durch die vorkommenden stärksten Windgeschwindigkeiten verursacht, wobei den größten Anteil an hohen Windgeschwindigkeiten die Sektoren WSW und SSW aufweisen.

Zum anderen spielt auch die Ausrichtung der Anlage im rechten Winkel zur jeweiligen Windrichtung eine wichtige Rolle. Da die westsüdwestlichen Sektoren die größten Häufigkeiten aufzeigen, kommen die entsprechenden Ausrichtungen der Anlage ebenfalls am häufigsten vor. Somit würde diese rechtwinklige Richtungskomponente, die das Eisstück beim Lösen vom Rotorblatt erhält, in einer etwa Nordwest-Südost-Ausrichtung der mit hohen Trefferhäufigkeiten simulierten Bereiche (in den Abbildungen in Gelb bis Rot dargestellt) erwartet werden. In diesen Bereichen sind die Fallweiten bei eher geringeren Windgeschwindigkeiten simuliert worden, wobei der Effekt der Anfangsgeschwindigkeit durch die trudelnde Anlage den Einfluss des Windes und dessen Ablenkung überwiegen kann.

Dieses Muster ist jedoch nur im Szenario D **mit dem Eisstück aus Klareis der Masse von 180 g zu beobachten. In den Szenarien A bis C konnte dies weniger ausgeprägt beobachtet werden, da aufgrund der Kombination aus Masse und Stirnfläche des Eisstücks die Verfrachtung durch den Wind überwiegt.**

Die größten Fallweiten wurden in dem betrachteten Szenario A berechnet. Hierbei sind einzelne Treffer bis zu 375 m von der Anlage simuliert worden, wobei die ermittelten Treffer ab einer Entfernung von ca. 215 m nur sehr geringe Trefferhäufigkeiten (unter 0.0001% pro untersuchte Zelle) aufweisen.

Generell stellen in den Abbildungen die dunkelblau gefärbten Zellen Bereiche mit geringen Trefferhäufigkeiten dar, in denen das Gefährdungspotenzial als eher gering abgeschätzt werden kann.

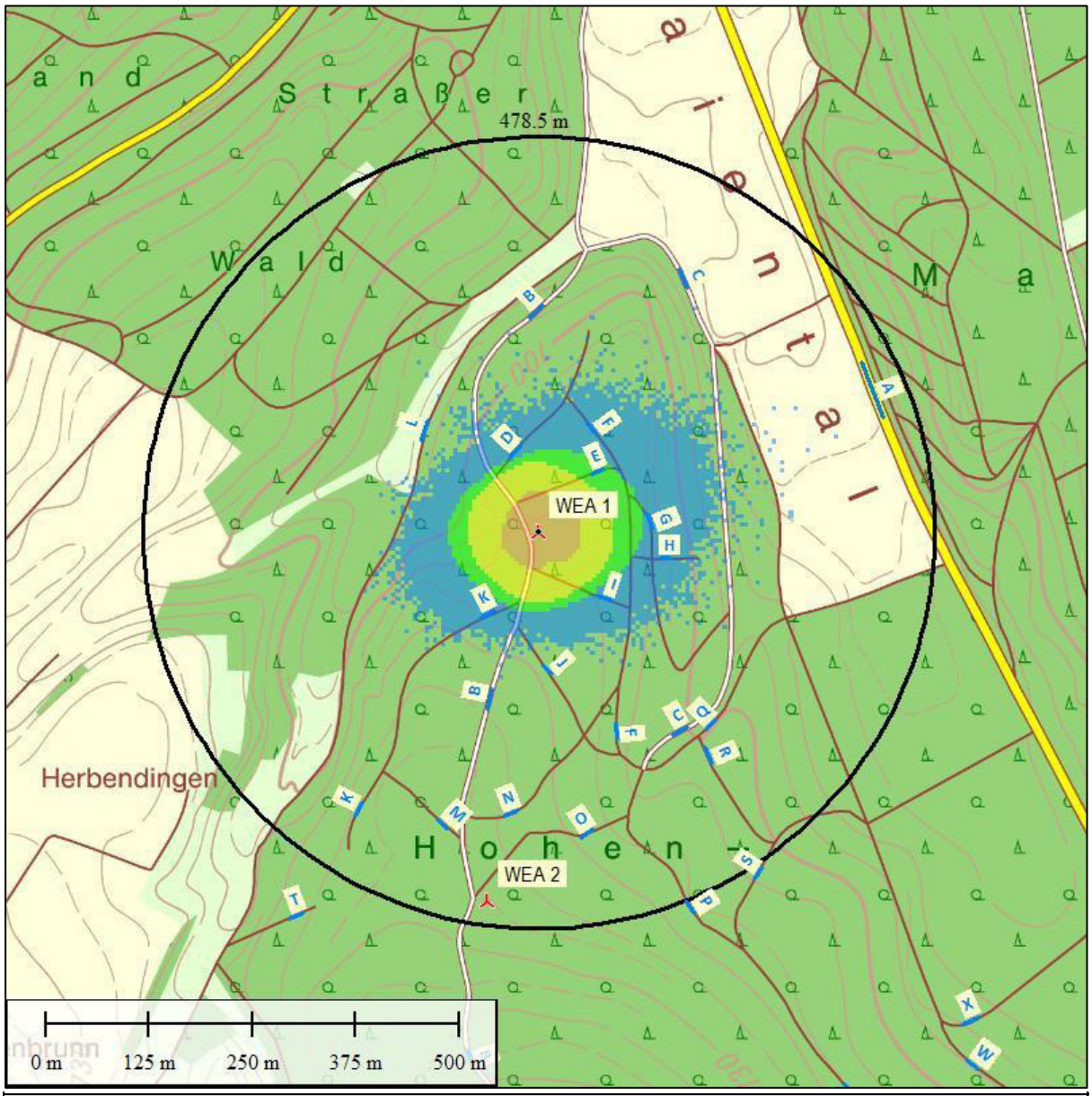
4 Ermittlung des von den Anlagen ausgehenden Gesamtrisikos

In den folgenden Kapiteln 4.1 bis 4.4 werden die Risiken für alle Objekte aus Tabelle 5 ermittelt, dargestellt und ggf. Maßnahmen empfohlen.

Bei Objekten, die hier nicht betrachtet werden, obwohl sie innerhalb eines Abstands von 478.5 m (1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe)) [17] liegen, ist es offensichtlich, dass das Risiko vernachlässigbar ist, da keine Treffer bzw. nur Einzeltreffer ermittelt wurden.

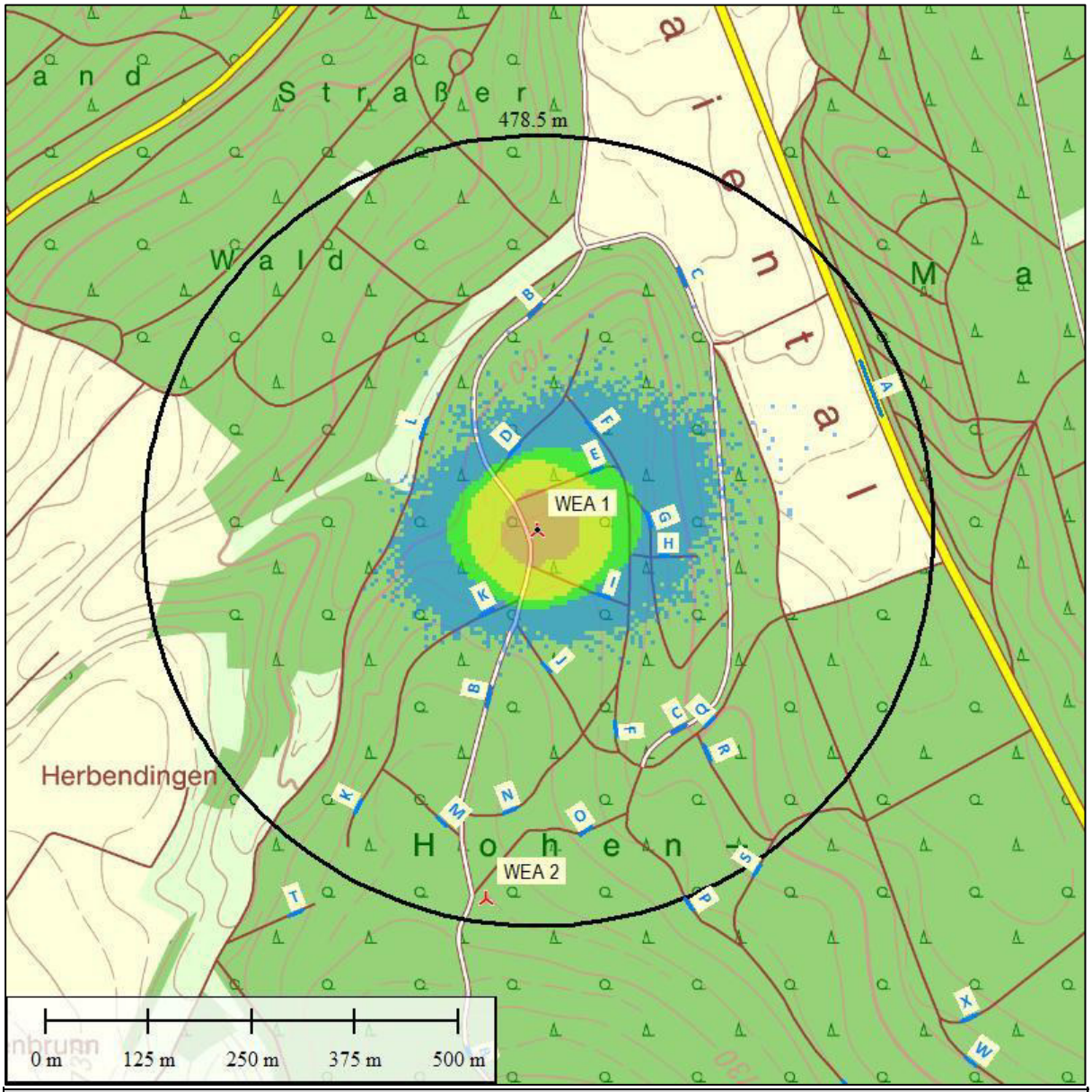
4.1 Risiko für WEA 1

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA 1 dargestellt sowie ein Umkreis von 478.5 m um diese WEA, der einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [17] entspricht. Eine Risikobeurteilung für die in diesem Umkreis liegenden Wege und Flächen ist notwendig. Außerdem wird dargestellt, ob für einen Quadranten überhaupt ein Treffer mit einem Eisstück simuliert wurde und wie groß das sich ergebende Risiko im Falle von Treffern mit Eisstücken gemäß der beschriebenen Methodik in Kapitel 7.6 ist.



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

Abbildung 7: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA 1 inklusive des Umkreises von 478.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf häufig benutzten Wegen (Wege *B* und *C*).



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

Abbildung 8: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA 1 inklusive des Umkreises von 478.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das kollektive Risiko für Autofahrer an der Landesstraße L 201.

In der folgenden Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA 1 zusammengefasst.

Risikobewertung der WEA 1			
Objekt	**Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen**	**Empfohlene Maßnahmen**	**Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen**
A	1.24E-08 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
B	3.64E-06 (hoch)	Mittels Wegsperrungen und Warnschildern sollen Fussgänger bei Eisfallbedingungen auf dem Wegesystem derart geleitet werden, dass sie nicht auf dem Weg B an der WEA 1 vorbeikommen. Dies kann durch einen der folgenden Punkte realisiert werden: • Absperrung des Weges B mittels Schranke zu Zeiten mit Eisfallpotential • Aufstellen einer Beschilderung mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das vom Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät	akzeptabel
C	3.10E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
D	3.83E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
E	6.11E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
F	5.87E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
G	2.17E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
H	9.60E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
I	5.11E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
J	2.31E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
K	1.36E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
L	6.95E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

Tabelle 6: Risiken ausgehend von der WEA 1.

Für den Weg *B* liegt das Risiko im hohen Bereich. Eine Benutzung des Weges durch Fußgänger bei Eisfallbedingungen sollte vermieden werden. Durch intelligente Wegführung im Winter, insbesondere aber durch Wegsperrungen an den richtigen Stellen, kann das Risiko jedoch in den akzeptablen Bereich reduziert werden.

Die Wegsperrung kann mit einer Schranke erfolgen oder aber als ***gleichwertige Alternative*** mittels einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät (idealerweise ist diese direkt am obligatorischen Warnschild angebracht).

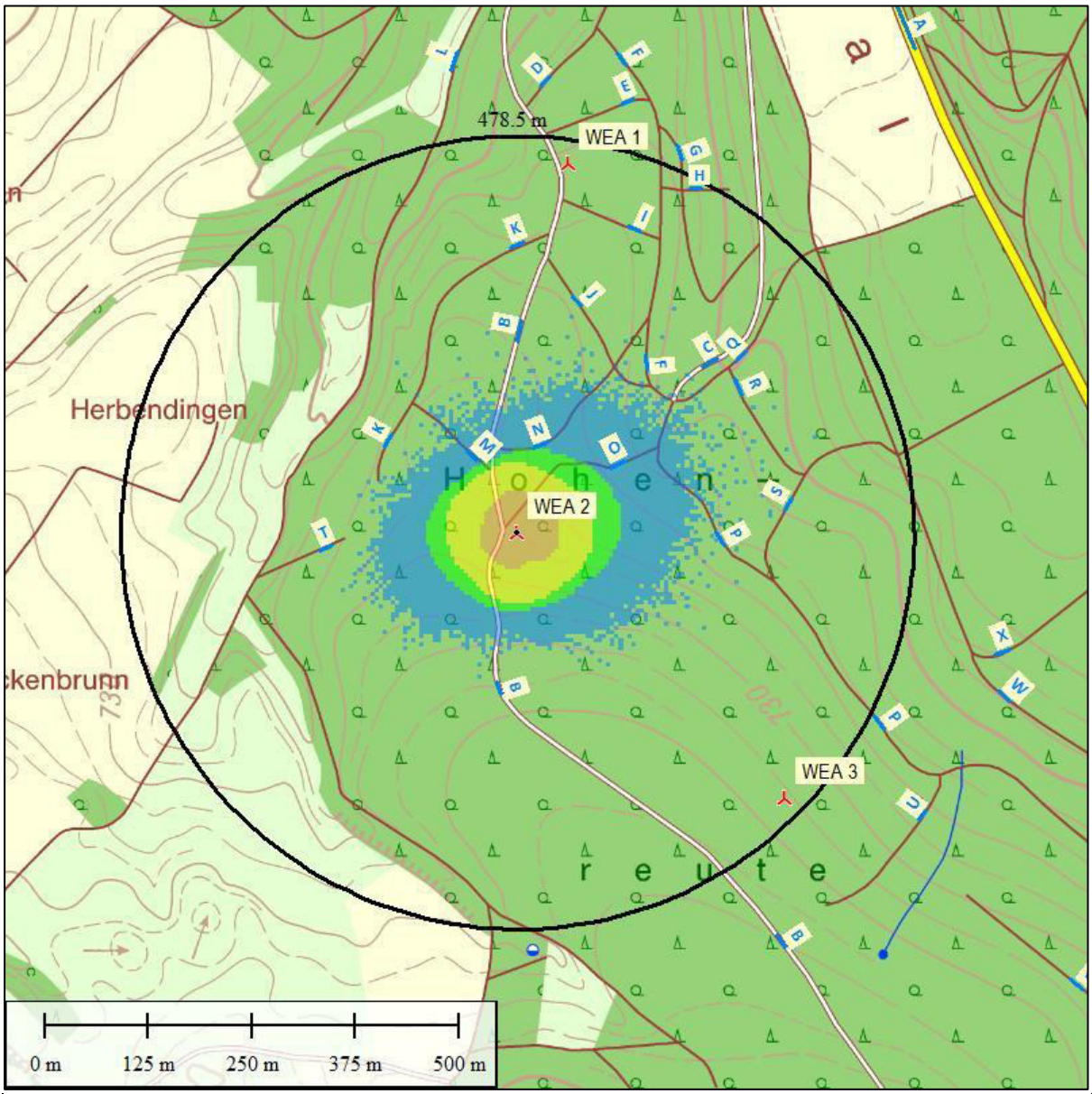
Für Autofahrer, die durch die Karosserie geschützt sind, liegt das Risiko im akzeptablen Bereich, hier sind keine besonderen Maßnahmen nötig.

Für alle anderen Wege sowie für die Landesstraße L201 liegen die Risiken im akzeptablen bzw. im vernachlässigbaren Bereich, besondere Maßnahmen sind hier nicht notwendig.

In Kapitel 1, Abbildung 1 ist ein Vorschlag zu einer ganzheitlichen Umsetzung der Maßnahmen gegeben.

4.2 Risiko für WEA 2

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA 2 dargestellt sowie ein Umkreis von 478.5 m um diese WEA, der einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [17] entspricht. Eine Risikobeurteilung für die in diesem Umkreis liegenden Wege und Flächen ist notwendig. Außerdem wird dargestellt, ob für einen Quadranten überhaupt ein Treffer mit einem Eisstück simuliert wurde und wie groß das sich ergebende Risiko im Falle von Treffern mit Eisstücken gemäß der beschriebenen Methodik in Kapitel 7.6 ist.



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

Abbildung 9: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA 2 inklusive des Umkreises von 478.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf häufig benutzten Wegen (Wege *B* und *C*).

In der folgenden Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA 2 zusammengefasst.

Risikobewertung der WEA 2			
Objekt	**Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen**	**Empfohlene Maßnahmen**	**Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen**
B	3.59E-06 (hoch)	Mittels Wegsperrungen und Warnschildern sollen Fussgänger bei Eisfallbedingungen auf dem Wegesystem derart geleitet werden, dass sie nicht auf dem Weg B an der WEA 2 vorbeikommen. Dies kann durch einen der folgenden Punkte realisiert werden: • Absperrung des Weges B mittels Schranke zu Zeiten mit Eisfallpotential • Aufstellen einer Beschilderung mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das vom Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät	akzeptabel
C	2.11E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
D	3.83E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
F	3.47E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
J	1.28E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
K	1.98E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
M	1.04E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
N	1.64E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
O	4.10E-07 (tolerabel)	Aufstellen eines Schildes, das ausdrücklich davor warnt, den Weg O bei Eisfallbedingungen zu benutzen. Dieses Schild soll insbesondere dazu dienen, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen nicht beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.	akzeptabel
P	1.04E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
Q	2.21E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
R	2.21E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
S	6.99E-14 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
T	6.98E-14 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

Tabelle 7: Risiken ausgehend von der WEA 2.

Für den Weg *B* liegt das Risiko im hohen Bereich. Eine Benutzung des Weges durch Fußgänger bei Eisfallbedingungen sollte vermieden werden. Durch intelligente Wegführung im Winter, insbesondere aber durch Wegsperrungen an den richtigen Stellen, kann das Risiko jedoch in den akzeptablen Bereich reduziert werden.

Die Wegsperrung kann mit einer Schranke erfolgen oder aber als ***gleichwertige Alternative*** mittels einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät (idealerweise ist diese direkt am obligatorischen Warnschild angebracht).

Für Autofahrer, die durch die Karosserie geschützt sind, liegt das Risiko im akzeptablen Bereich, hier sind keine besonderen Maßnahmen nötig.

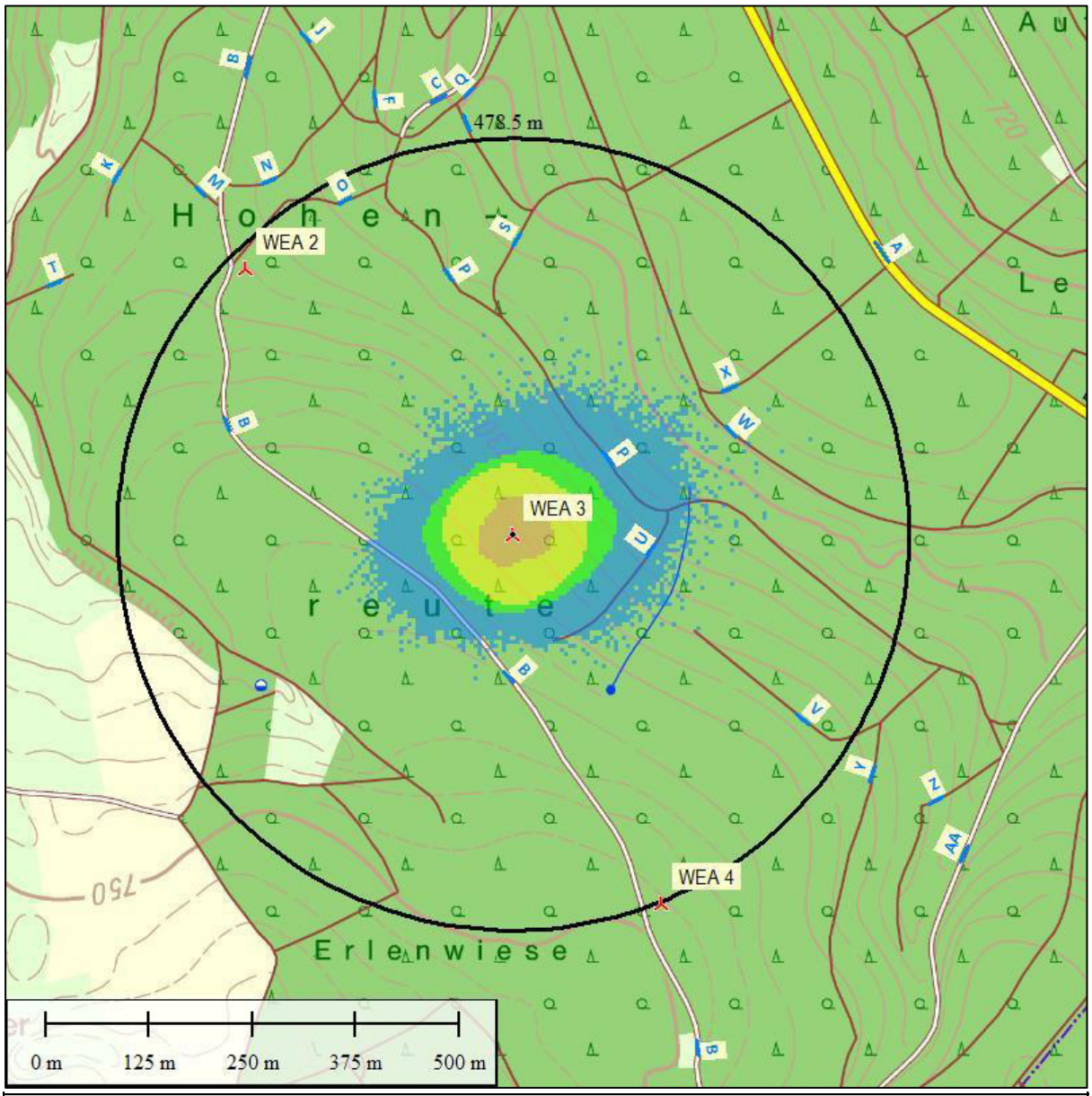
Für den Weg O liegt das Risiko im tolerablen Bereich. Durch ein eindeutiges Warnschild sollte auf die Gefahren durch Eisfall hingewiesen werden, ggf. unterstützt mit der Angabe einer Alternativroute. Dadurch soll vermieden werden, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.

Für alle anderen Wege liegen die Risiken im akzeptablen bzw. im vernachlässigbaren Bereich, besondere Maßnahmen sind hier nicht notwendig.

In Kapitel 1, Abbildung 1 ist ein Vorschlag zu einer ganzheitlichen Umsetzung der Maßnahmen gegeben.

4.3 Risiko für WEA 3

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA 3 dargestellt sowie ein Umkreis von 478.5 m um diese WEA, der einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [17] entspricht. Eine Risikobeurteilung für die in diesem Umkreis liegenden Wege und Flächen ist notwendig. Außerdem wird dargestellt, ob für einen Quadranten überhaupt ein Treffer mit einem Eisstück simuliert wurde und wie groß das sich ergebende Risiko im Falle von Treffern mit Eisstücken gemäß der beschriebenen Methodik in Kapitel 7.6 ist.



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

Abbildung 10: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA 3 inklusive des Umkreises von 478.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf häufig benutzten Wegen (Weg *B*).

In der folgenden Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA 3 zusammengefasst.

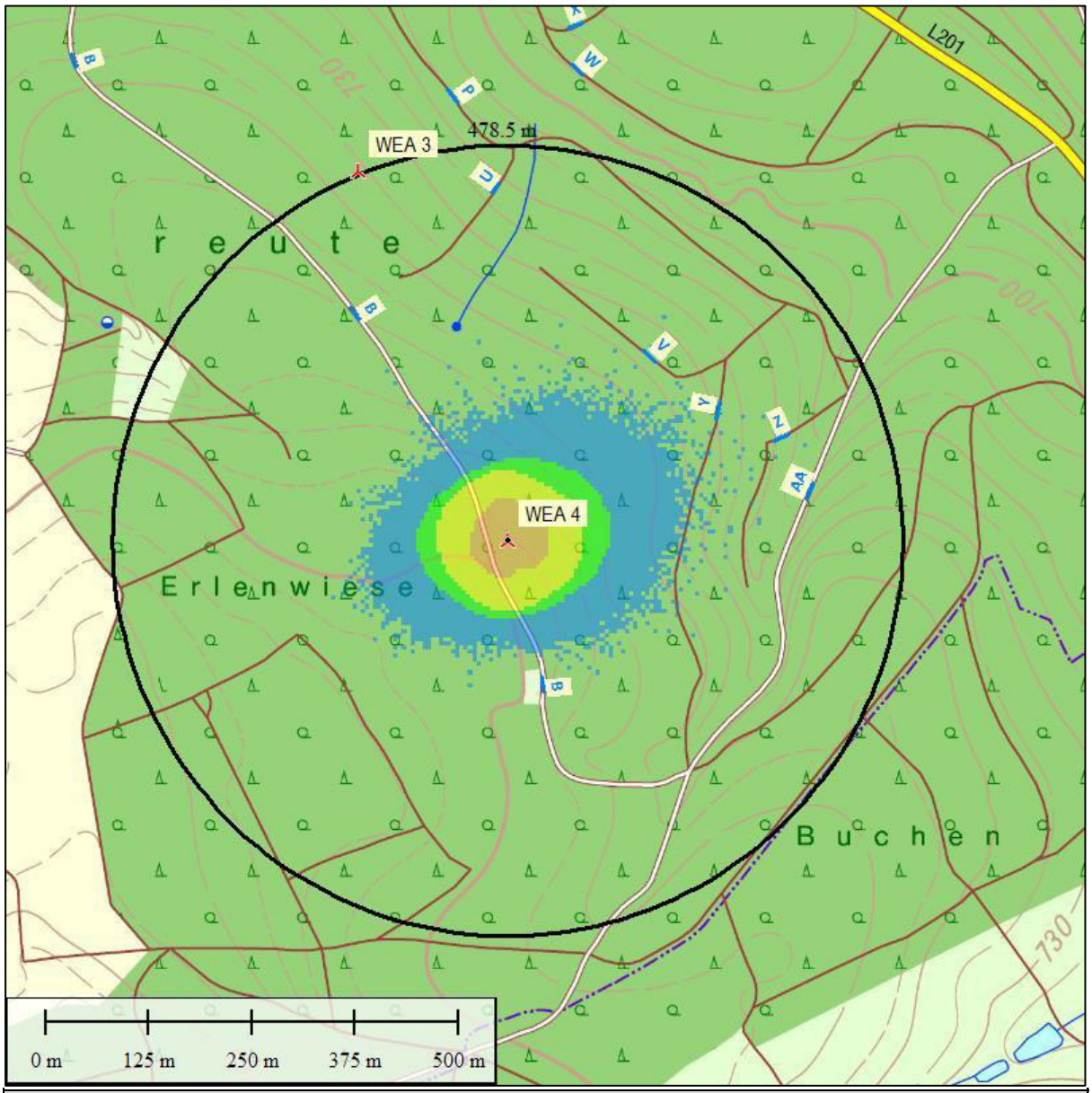
Risikobewertung der WEA 3			
Objekt	**Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen**	**Empfohlene Maßnahmen**	**Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen**
B	6.29E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
P	1.17E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
U	8.41E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
V	8.92E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
W	3.95E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
X	3.13E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

Tabelle 8: Risiken ausgehend von der WEA 3.

Die Risiken liegen für alle betrachteten Wege im vernachlässigbaren Bereich, besondere Maßnahmen sind hier nicht notwendig.

4.4 Risiko für WEA 4

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA 4 dargestellt sowie ein Umkreis von 478.5 m um diese WEA, der einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [17] entspricht. Eine Risikobeurteilung für die in diesem Umkreis liegenden Wege und Flächen ist notwendig. Außerdem wird dargestellt, ob für einen Quadranten überhaupt ein Treffer mit einem Eisstück simuliert wurde und wie groß das sich ergebende Risiko im Falle von Treffern mit Eisstücken gemäß der beschriebenen Methodik in Kapitel 7.6 ist.



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

Abbildung 11: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA 4 inklusive des Umkreises von 478.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf häufig benutzten Wegen (*B* und *AA*).

In der folgenden Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA 4 zusammengefasst.

Risikobewertung der WEA 4			
Objekt	**Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen**	**Empfohlene Maßnahmen**	**Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen**
B	3.33E-06 (hoch)	Mittels Wegsperrungen und Warnschildern sollen Fussgänger bei Eisfallbedingungen auf dem Wegesystem derart geleitet werden, dass sie nicht auf dem Weg B an der WEA 4 vorbeikommen. Dies kann durch einen der folgenden Punkte realisiert werden: • Absperrung des Weges B mittels Schranke zu Zeiten mit Eisfallpotential • Aufstellen einer Beschilderung mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das vom Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät	akzeptabel
V	2.21E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
Y	2.66E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
Z	1.40E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AA	2.21E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

Tabelle 9: Risiken ausgehend von der WEA04.

Für den Weg *B* liegt das Risiko im hohen Bereich. Eine Benutzung des Weges durch Fußgänger bei Eisfallbedingungen sollte vermieden werden. Durch intelligente Wegführung im Winter, insbesondere aber durch Wegsperrungen an den richtigen Stellen, kann das Risiko jedoch in den akzeptablen Bereich reduziert werden.

Die Wegsperrung kann mit einer Schranke erfolgen oder aber als ***gleichwertige Alternative*** mittels einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät (idealerweise ist diese direkt am obligatorischen Warnschild angebracht).

Für Autofahrer, die durch die Karosserie geschützt sind, liegt das Risiko im akzeptablen Bereich, hier sind keine besonderen Maßnahmen nötig.

Für alle anderen Wege liegen die Risiken im vernachlässigbaren Bereich, besondere Maßnahmen sind hier nicht notwendig.

In Kapitel 1, Abbildung 1 ist ein Vorschlag zu einer ganzheitlichen Umsetzung der Maßnahmen gegeben.

5 Hinweise zur Erstellung der Analyse

- Bezugnehmend auf die Dokumente, die über die Eignung des Eiserkennungssystems zur zuverlässigen Abschaltung der Anlage bei Vereisung vorliegen (siehe Abschnitt 2.2), wurden die Berechnungen bei einer im Trudelbetrieb befindlichen Anlage durchgeführt. Unter der Annahme eines funktionierenden Eiserkennungssystems ist eine Berechnung von Wurfweiten während des laufenden Betriebs aus gutachterlicher Sicht nicht notwendig.
- Als Eingangsparameter für die Umdrehungszahl im Trudelbetrieb wurde die vom Anlagenhersteller mitgeteilte maximale Umdrehungszahl von 1 U/min verwendet [22].
- Für die Berechnungen wurde 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 demnach eine statistische Verteilung der Fallweiten von insgesamt 5 Millionen herunterfallenden Eisstücken pro Szenario. Eine Aussage über die Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit von auftretendem Eisfall am Standort wird nicht getroffen.
- An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die orographischen Bedingungen am Standort sowie die Situierung der geplanten Anlagen im Wald in den durchgeführten Simulationen nicht berücksichtigt wurden. Die Berechnung der Fallweiten erfolgt unter Annahme einer ebenen, unbewaldeten Fläche.
- Es ist zu beachten, dass sich der geplante Standort in einem geschlossenen Waldgebiet befindet, wobei Bäume in einigen Fällen eine abschirmende Wirkung für die naheliegenden Wege gegen abfallende Eisstücke haben können. Da jedoch nicht davon auszugehen ist, dass jedes Eisstück durch die Kollision mit einem Baum abgefangen wird und die Verteilung der Bäume sowie deren eventuell abschirmende Wirkung modellarisch nicht berücksichtigt werden kann, sind die Berechnungsergebnisse ebenfalls als leicht konservativ anzusehen.

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 der gesamten Analyse und unter besonderer Berücksichtigung der Hinweise zu den Ergebnissen zu verstehen. Daher wird bei einer auszugsweisen Vervielfältigung wird keine Haftung oder Gewähr für die Ergebnisse übernommen.

6 Literaturverzeichnis

[1] IEC 60050-415: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch, Berlin (D), 1999

[2] IEC 61400-1: Wind Turbines – Part 1: Design Requirements, International Electrotechnical Commission, Geneva (CH), Aug. 2005

[3] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Angebot AN-WG-1804-093-BW, Regensburg, 17.04.2018

[4] Elmar Holz, ABO Wind AG, Beauftragung Eisfallanalyse für WP Pfullendorf-Denkingen, Wiesbaden, 24.04.2018

[5] Elmar Holz, ABO Wind AG, Koordinaten und Fußpunkthöhen des Windparks Pfullendorf-Denkingen, E-Mails vom 09.05.2018 und 24.05.2018

[6] Elmar Holz, ABO Wind AG, Informationen zur Windtstatistik für den Standort Pfullendorf-Denkingen, Auszug aus dem Bericht 088WG418/01 vom 27.04.2018 der Firma WINDconsult GmbH, E-Mails vom 24.05.2018 und 29.05.2018

[7] C. Morgan and E. Bossanyi, Wind turbine icing and public safety - a quantifiable risk?, Proceedings of Boreas III conference, Sariselka, Finland 1996

[8] E. Bossanyi and C. Morgan, Wind turbine icing – its implications for public safety, Proceedings of European Union Wind Energy Conference 1996

[9] C. Morgan, E. Bossanyi and H Seifert, Assessment of safety risks arising from wind turbine icing, Proceedings of EWEC ‘97 conference, Dublin 1997

[10] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Richtlinie für Windenergieanlagen, Berlin (D), 2004

[11] OVG-Rheinland-Pfalz, Urteil 1 A 11330/07.OVG vom 29.10.2008

[12] René Cattin, Alpine Test Site Guetsch – Handbuch und Fachtagung (Schlussbericht), Bern, 31.12.2008

[13] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Windenergienutzung – Technik, Planung und Genehmigung, Stuttgart, 4. Auflage, August 2003

[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] Richtlinie für Windenergieanlagen; Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, DIBT, 2004

[16] 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

[17] Anlage 2.7/12 der Liste der als Technische Baubestimmungen zur Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft im Einvernehmen mit dem Ministrium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, 06.06.2012

[18] Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage

[19] Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, TOP10 Ortsplan 1:10‘000 Baden-Württemberg, Version 1, 2008

[20] Elmar Holz, ABO Wind AG, Informationen zum Eiserkennungssystem – Gutachten zur Funktionsfähigkeit des BLADEcontrol Ice Detectors BID (Bericht Nr. 75138, Rev.4 vom 08.02.2017 der Firma DNV GL), E-Mail vom 09.05.2018

[21] Stefan Schuck, ABO Wind AG, Informationen zum Eiserkennungssystem – Gutachten zur Einbindung eines Eiserkennungssystems in GE Windenergieanlagen (Bericht Nr. 11 327 215 D Rev.3 vom 05.06.2018 der Firma TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG), E-Mail vom 07.06.2018

[22] Elmar Holz, ABO Wind AG, Maximale Trudeldrehzahl für den Standort Pfullendorf-Denkingen, E-Mail vom 09.05.2018

[23] Elmar Holz, ABO Wind AG, Informationen zu den Verkehrszahlen der L201, E-Mail vom 09.05.2018

[24] Elmar Holz, ABO Wind AG, Informationen zum Forstwirtschaftsweg B, E-Mail vom 09.05.201

[25] Internetportal des Bureau of Transportation Statistics (BTS), http://www.bts.gov/btsprod/nts/

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

[27] Health and Safety Executive (HSE)*, ALARP-Prinzip* http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpglance.htm

[28] Health and Safety Executive (HSE), The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations, 1992 (Revised Edition), London: HMSO

[29] *„Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung“,* Bericht der Störfallkommission beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, SFK-GS-41, 21.04.2004

[30] *Das Windenergiepotenzial Vorarlbergs – Endbericht*, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 11/2003

[31] Methods for determining the Potential Damage, CPR16E, CIP-data of royal library

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

[33] 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

[34] Floyd D. J., Ball P. J., Societal Risks, Hongkong 1993

[35] Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung, Proske, Dresden, 2004

[36] Risk Acceptance Criteria, Hoffmann A., Klein G., Weidl T., TÜV SÜD Industrie Service GmbH, 12th International Probabilistic Workshop, Weimar 2014

[37] 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

[38] Typenzertifikat zum Eiserkennungssystem BLADEcontrol der Firma Weidmüller Monitoring Systems GmbH, Cert. No.: TC-GL-IV-4-02381-0 vom 09.12.2016, heruntergeladen von Website des Herstellers: http://www.weidmueller.de/bausteine.net/f/10275/GL-Zertifikat-Eisdetektor(EN).pdf?fd=2

7 Anhang

7.1 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 [12].

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 bzw. 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 sechs bekannte Möglichkeiten zur Erkennung von Eisansatz an einer Windkraftanlage:

- Eisdetektoren auf der Gondeloberseite: Speziell angebrachte Sensoren beobachten die Umgebungsbedingungen an der Gondel. Registriert der Sensor die einprogrammierten, für Vereisungsbedingungen charakteristischen Parameter, führt dies zur Abschaltung der Anlage.
- 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.
- Leistungskurvenverfahren: Hierbei wird die vorgegebene Leistungskurve in der Anlagensteuerung detailliert verfolgt. Die Änderung der aerodynamischen Eigenschaften durch Eisansatz an den Rotorblättern ist mit einer Abweichung der Leistungskennlinie von der zu erwartenden Kennlinie bei entsprechenden Umgebungsbedingungen verbunden und führt zur Abschaltung der Anlage. 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 in Verbindung mit den notwendigen Umgebungsbedingungen zur Erkennung von Eisansatz verwendet.
- Impedanzmessung: Bei Vereisung ändert sich die Leitfähigkeit auf den Rotorblättern. Eis und die dazugehörige Schichtdicke kann damit durch Messung der Impedanz auf der Oberfläche erkannt werden.

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 – Liste der technischen Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage 2.7/12 [17] wird jedoch 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.

Die entsprechenden Dokumente wurden vom Anlagenhersteller zur Verfügung gestellt [20][21], somit liegt dieser Nachweis für den hier geplanten Anlagentyp vor. Weitere Angaben hierzu werden in Abschnitt 2.2 dargestellt.

Bezugnehmend auf die genannten Dokumente wird in den nachfolgenden 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][8][9][10] abgeschätzt. Bei stillstehenden bzw. trudelnden WEA ist vor allem der Lee-Bereich des Rotors von Eisfall betroffen, somit stellen die Verteilung der Windgeschwindigkeit und der -richtung wichtige Eingangsdaten für die Berechnungen dar.

7.2 Theoretische Berechnungsgrundlagen von Eiswurf bzw. Eisfall

In einer Untersuchung im Rahmen des WECO-Projektes im Schweizer Hochgebirge [12] 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 einsetze, 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 H in m
- Windgeschwindigkeit U in Nabenhöhe in m/s
- Größe und Form von Eisstücken (Stirnfläche A in m²)
- Dichte der Eisstücke ρ_{Eis} in kg/m³ 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 Azimuthwinkel der Rotorfläche (φ in rad)
- Windprofil am Standort der WEA zur Bestimmung der Anfangswindgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Rotorposition (Die abnehmende Windgeschwindigkeit mit sich reduzierendem Abstand zum Erdboden wird nicht berücksichtigt und führt zu konservativen Flugweiten)
- Dichte der Luft ρ in kg/m³.

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:

$$M\ddot{x} = -\frac{1}{2}\,\rho\, C_D\, A\,(\dot{x} - U)\, W \qquad [7.1]$$

$$M\ddot{y} = -\frac{1}{2}\,\rho\, C_D\, A\,\dot{y}\, W \qquad [7.2]$$

$$M\ddot{z} = -Mg - \frac{1}{2}\rho\, C_D\, A\,\dot{z}\, W \qquad [7.3]$$

mit: $W = \sqrt{(\dot{x} - U)^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ (relative Windgeschwindigkeit)

Die Simulationen beinhalten dabei verschiedene Szenarien mit Eisstücken unterschiedlicher Masse und Eisdichte. Es wird davon ausgegangen, dass ein Eisstück zum Zeitpunkt des Lösens vom Rotorblatt eine Anfangsgeschwindigkeit als Vektor besitzt, welche auf der Umdrehungsgeschwindigkeit und 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.

7.3 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. Die Betrachtung der jahreszeitlich abhängigen bzw. bei Eisfallbedingungen tatsächlich vorherrschenden Windverhältnisse ist basierend auf der verfügbaren Datengrundlage nicht möglich.
- Die Ergebnisse der Simulationen zeigen demnach eine statistische Verteilung der Fallweiten von herunterfallenden Eisstücken, eine Aussage über die Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit von auftretendem Eisfall wird nicht getroffen.
- Die Funktionsfähigkeit der Abschalt- und Sicherheitsmechanismen der WEA sind gewährleistet, die Betriebsführung der Anlage erkennt den Vereisungsfall zuverlässig und die Abschaltung der Anlage bei Eisansatz erfolgt durch die Maßnahmen zur Eiserkennung wirkungsvoll, d.h. es tritt kein Eiswurf bei laufendem Betrieb auf.
- Da in der gültigen Norm [2] Vereisung als extremes externes Ereignis definiert ist, ist gemäß den darin festgehaltenen Vorschriften davon auszugehen, dass keine Fehler im Kontrollsystem auftreten.
- Die Simulation des Eisfalls erfolgt bei einer Anlage im Trudelbetrieb. Als Eingangsparameter für die Umdrehungszahl im Trudelbetrieb wurde die vom Anlagenhersteller mitgeteilte maximale Umdrehungszahl von 1 U/min verwendet [22].
- In einer Simulation werden die Position des Eisstücks auf dem Rotorblatt (Blattwurzel bis Blattspitze) sowie die Rotorstellung zufällig gewählt. Die in der entsprechenden Höhe herrschende Windgeschwindigkeit wird aus dem für den Standort bestimmten Windprofil ermittelt. Um aus den ermittelten Auftreffhäufigkeiten am Boden statistische Aussagen abzuleiten und sowohl die Windrichtungs- als auch die Windgeschwindigkeitsverteilung zu berücksichtigen, werden für jedes Eisstückszenario mehrere Millionen Simulationen durchgeführt.
- Die abfallenden Eisstücke werden als quaderförmig angenommen.
- Die Eisstücke rotieren auf ihrem Weg vom Rotorblatt zum Erdboden hin, damit jede Seite abwechslungsweise vom Wind erfasst und auch vom Luftwiderstand abgebremst wird.
- Die Topographie sowie der den Standort umgebende Wald werden in den Simulationen nicht berücksichtigt. Die Simulationen werden auf einer horizontalen, unbewaldeten Fläche durchgeführt.

7.4 Berechnete Eisfallszenarien

Die Simulationen wurden für insgesamt vier Szenarien mit Eisstücken unterschiedlicher Größe und Dichte durchgeführt:

A) Eisstück aus Raureif mit 90 g (Eisdichte: 600 kg/m³; Maße: 12 cm x 2.5 cm x 5 cm)

B) Eisstück aus Raureif mit 240 g (Eisdichte: 600 kg/m³; Maße: 20 cm x 4 cm x 5 cm)

C) Eisstück aus Klareis mit 70 g (Eisdichte: 900 kg/m³; Maße: 8.5 cm x 2.4 cm x 3.8 cm)

D) Eisstück aus Klareis mit 180 g (Eisdichte: 900 kg/m³; Maße: 10 cm x 4 cm x 5 cm)

Diese Eisstücke wurden anhand einer für Risikoabschätzungen zugrunde liegenden Mortalitätskurve für Raureif bzw. Klareis definiert. Dabei stellen die Szenarien A bzw. C die Eisstückmassen dar, die bei einem Kopftreffer bereits leichte Verletzungen verursachen können. Die in den Szenarien B und D definierten Eisstücke können dagegen zu durchaus tödlichen Verletzungen führen.

Die Abmessungen der Eisstücke wurden aus der jeweiligen Masse und Dichte sowie anhand von Abschätzungen gemäß der Entstehungsmechanismen sowie der zu erwartenden Form abgeschätzt.

Die Wahl dieser Eisstücke stellt eine konservative Herangehensweise dar, da leichte Eisstücke aufgrund ihres geringeren Gewichtes weiter vom Wind verfrachtet werden können. Dabei entstehen größere Fallweiten als bei größeren und schwereren Eisstücken, die vom Wind weniger abgelenkt werden können. Zudem wurden in den Szenarien B und D die Eismassen ausgewählt, die bei einem Kopftreffer bereits tödliche Verletzungen verursachen können. Der Untersuchung von schwereren Eisstücken, die aufgrund ihres Gewichtes geringere Fallweiten, jedoch dasselbe Gefährdungspotential aufweisen, ist damit genüge getan.

Kleinere und leichtere Eisstücke als die im Rahmen dieser Analyse untersuchten Eisstücke können größere Fallweiten erreichen, jedoch sind aufgrund ihres geringen Gewichtes unwesentliche Beschädigungen bzw. Gefährdungen zu erwarten. Mit den in den Szenarien A und C untersuchten Eisstücken aus Raureif bzw. Klareis wurde zudem eine Untergrenze für Eismassen definiert, ab der leichte Verletzungen verursacht werden können.

Für jedes der vier Szenarien werden mehrere Millionen Simulationen durchgeführt, wobei die Startposition des Eisstücks auf dem Rotorblatt sowie die Ausrichtung des Rotorblattes zufällig generiert werden. Die jeweiligen zum Zeitpunkt des Herabfallens des Eisstücks vorherrschenden Windverhältnisse werden ebenfalls anhand der eingegebenen Windstatistik sowie des Windprofils zufällig erzeugt. Dabei fließt die mit einem Unsicherheitszuschlag versehene Windstatistik entsprechend der sektoriellen Häufigkeitsverteilung ein.

Es werden Windgeschwindigkeiten bis 30 m/s betrachtet. Es fließen zwar keine höheren Windgeschwindigkeiten in die Berechnungen ein, jedoch führen folgende Annahmen zu einer konservativen Betrachtungsweise. So führt die Annahme des mittleren Windprofils über die Rotorfläche bei hohen Windgeschwindigkeiten [2] zu einer Überschätzung der Windgeschwindigkeit in Höhen über der Nabenhöhe. Desweiteren wird in den Berechnungen vernachlässigt, dass die Windgeschwindigkeit während des Falls des Eisstücks zum Boden hin gemäß dem Windprofil abnimmt. Somit erfährt das Eisstück stets die gleiche, in Höhe der Rotorfläche aus dem Windprofil ermittelte Windgeschwindigkeit, was in den unteren Höhen eine künstliche Erhöhung der Fallweiten zur Folge hat. Entsprechend ist das Verfahren als konservativ zu bewerten. Eine deutliche Überbewertung der Flugweiten wird mit der Windgeschwindigkeitsbegrenzung vermieden, ohne den Unsicherheitszuschlag abzuändern.

7.5 Risiko und Risikoakzeptanzkriterien

7.5.1 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“

Risiko = Eintrittshäufigkeit * 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 wieder. 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“).

7.5.1.1 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 12):

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 12 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.

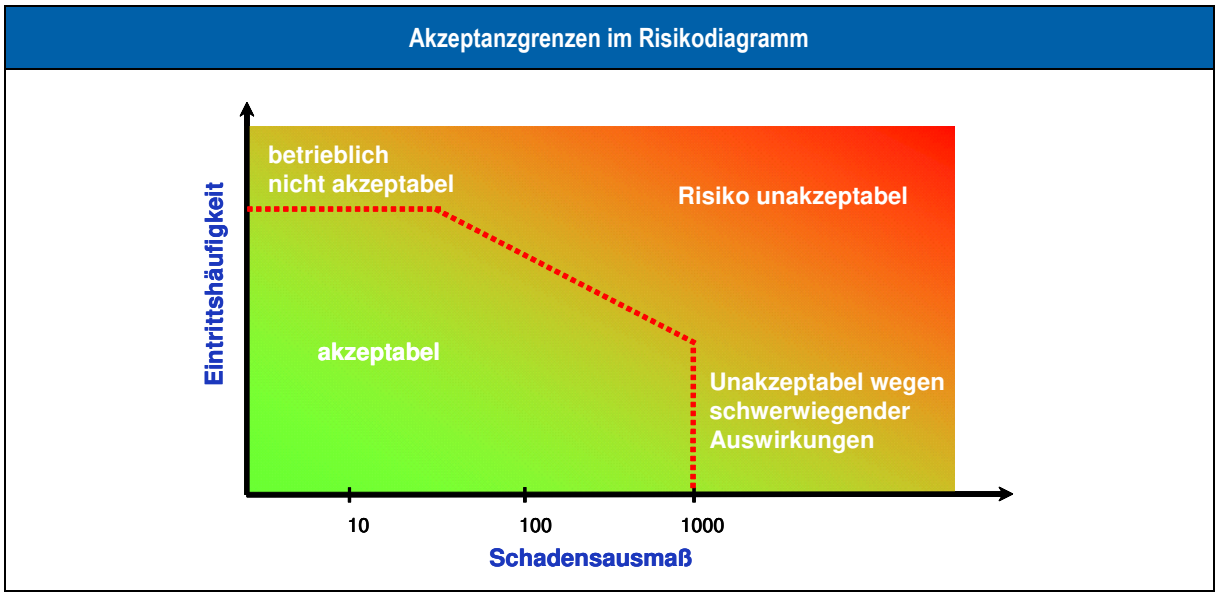


Abbildung 12: Akzeptanzgrenzen im Risikodiagramm.

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.

7.5.1.2 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 13 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.

Beispiel einer Risikomatrix

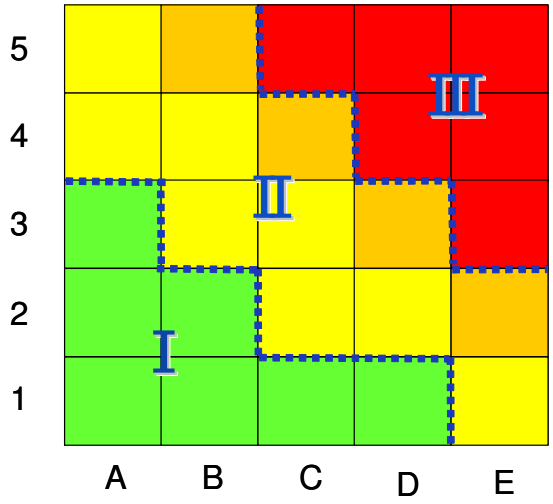


Abbildung 13: Beispiel einer Risikomatrix.

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 10 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.

7.5.2 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.

7.5.2.1 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 [26] 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 „Rm“ bezeichnet, wurde bestimmt als

$$Rm = 2 \cdot 10^{-4} \frac{Todesfälle}{Jahr} .$$

Daraus wird folgende Regel gebildet:

„Gefahren, die auf eine neue Industrieanlage zurückzuführen sind, dürfen *keine nennenswerte* Erhöhung der Zahl Rm 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 unakzeptabel[2]. Ein weiterer Aspekt, der sich aus diesen Grenzwerten ergibt ist folgende empfohlene Umrechnungsvorschrift:

1 Toter = 10 Schwerverletzte = 100 Leichtverletzte

7.5.2.2 Das ALARP-Prinzip

Eine etwas andere Herangehensweise mit anderen Grenzwerten wird von der britischen HSE empfohlen [27][28]. 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 14 zeigt das ALARP-Prinzip im Überblick.

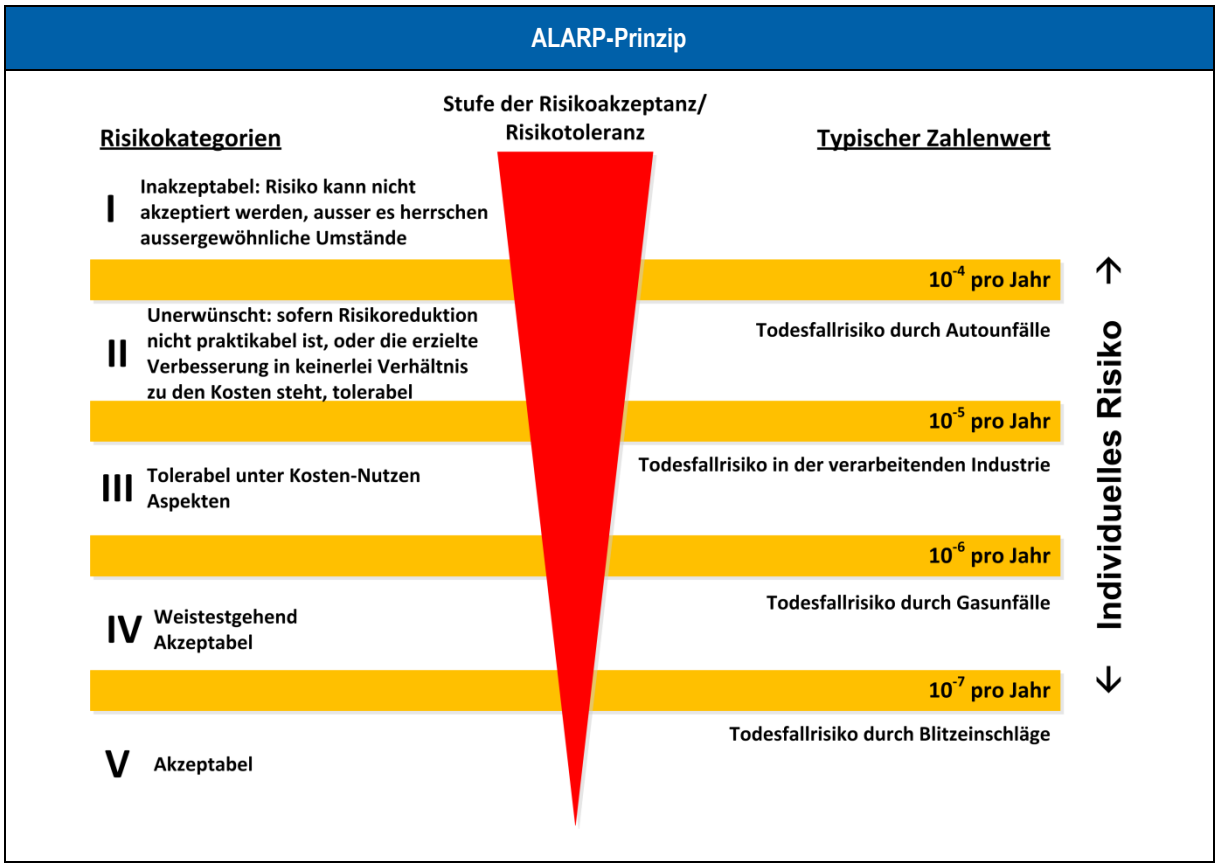


Abbildung 14: ALARP-Prinzip

---

[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 13 verwendet, so spricht man bei dem gelb gekennzeichneten Bereich auch vom „unteren ALARP Bereich“ und beim orange gekennzeichneten Bereich vom „oberen ALARP Bereich“.

7.5.2.3 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 15 dargestellte Vorgehensweise aus [34] 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.

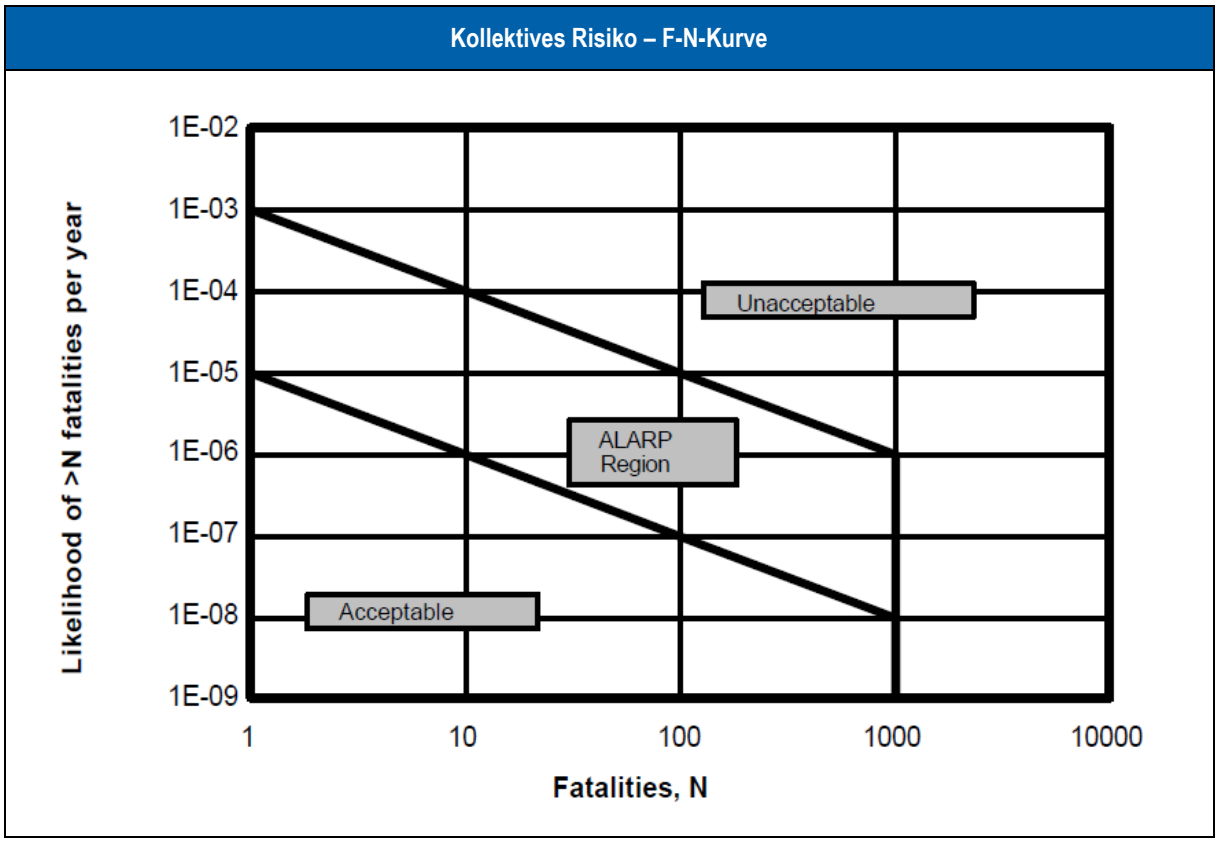


Abbildung 15: Kollektives Risiko – F-N-Kurve.

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.

7.5.2.4 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 7.5.2.3 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 12 dargestellten Risikodiagramms. In Tabelle 10 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 10: In der Analyse verwendete Risikokategorien inklusive der Farbcodierung [36].

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.

7.5.2.5 Vergleichsrisiken

Um die später ermittelten Risiken korrekt einordnen zu können, ist es hilfreich diese an bekannten Vergleichsrisiken zu spiegeln. Nachfolgende Tabelle 11 gibt die Größenordnung verschiedener Vergleichsrisiken wieder [35][36].

	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 11: Vergleichsrisiken.

Aufbauend auf Tabelle 11 und weitergehenden Analysen wird in [36] für die Arbeitssicherheit ein maximales Berufsrisiko von ca. 10^{-4} Todesfällen pro Person und Jahr abgeleitet (Anmerkung: besonders risikoexponierte Tätigkeitsfelder wurden in Tabelle 11 nicht berücksichtigt). Für unbeteiligte Dritte wird im Allgemeinen eine um eine Zehnerpotenz niedrigere Akzeptanzgrenze angesetzt, was der oberen Grenze des in Kapitel 7.5.2.4 definierten Bereichs entspricht.

7.6 Für die Risikoanalyse verwendete Methodik

7.6.1 Schadensausmaß

Nach der in Abschnitt 7.5 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.

7.6.1.1 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

$$\Pr = -17.56 + 5.3 \cdot \ln S$$

$$mit \qquad [7.4]$$

$$S = \frac{1}{2} m v^2$$

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[3]. Die Mortalität in Abhängigkeit vom Wert der Probit-Funktion lässt sich aus der von [31] entnommenen Tabelle 12 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**	**0.30**	**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 12: Zusammenhang zwischen Todesfallwahrscheinlichkeit und Wert der Probit-Funktion.

[3] Streng genommen ist sie für die angenommenen Massen zwischen 70 g und 90 g (Szenarien C bzw. A) nicht mehr gültig, sie kann aber auch hier näherungsweise verwendet werden.

Folgende Beispiele erläutern, wie Tabelle 12 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 [18] 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 betrachtete Nabenhöhe von 160 m ermittelt werden.

Die cw-Werte wurden anhand [18] (Seite B60) abgeschätzt. Demnach kann für Eisplatten ein cw-Wert von ca. 1 herangezogen werden.

Es ergeben sich unter Berücksichtigung der verschiedenen Dichten von Raureif (600 kg/m³) und Klareis (900 kg/m³) Auftreffgeschwindigkeiten von

- 30 m/s (Raureif) bzw.
- 35 m/s (Klareis).

7.6.1.2 Massenverteilung der Eisstücke

In der vorliegenden Risikobetrachtung werden, abgeleitet aus den Untersuchungen [12], 60 g bzw. 360 g als die am häufigsten vorkommende Masse angenommen, sowie 1.5 kg bzw. 4.5 kg als seltene Ereignisse betrachtet. Im Folgenden wird 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.

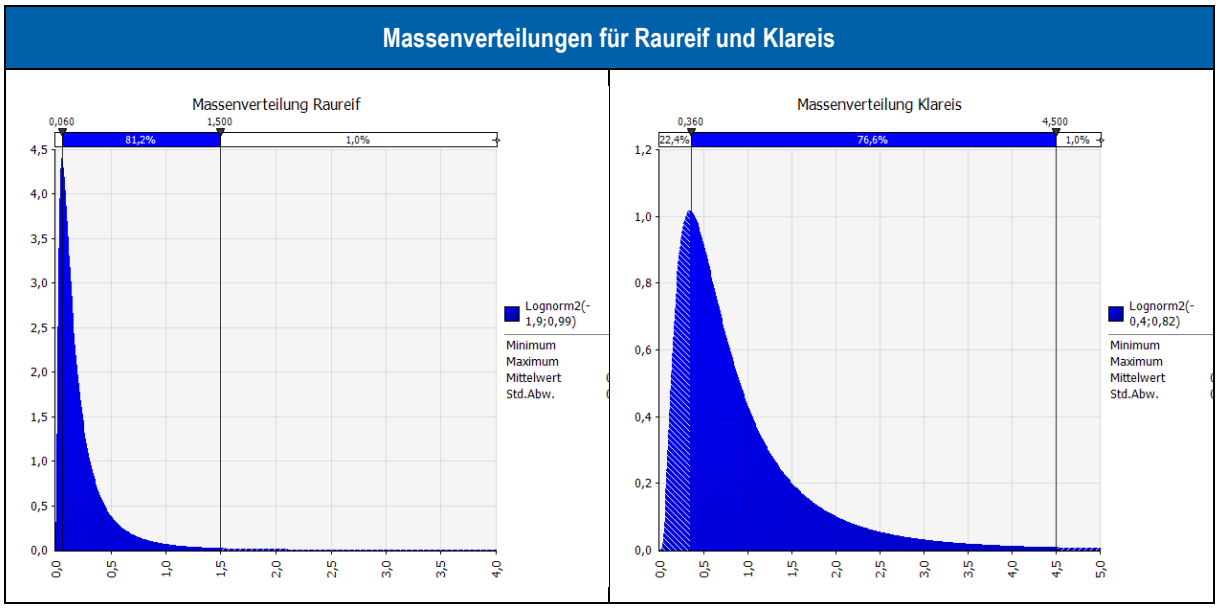


Abbildung 16: Angenommene Massenverteilung für Raureif (links) bzw. Klareis (rechts).

Die Kurven in Abbildung 16 ergeben sich mit diesen Annahmen für die Perzentile bzw. Maxima aus folgender Formel für die Wahrscheinlichkeitsdichte der Lognormalverteilung:

$$f(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot m} \cdot e^{-\left(\frac{(\ln m - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \qquad [7.5]$$

mit

m: *Masse des Eisprojektils*

σ: *0.99*

μ: *-1.9*

für Raureif bzw.

σ: *0.82*

μ: *-0.4*

für Klareis.

7.6.1.3 Ermittlung des mittleren Schadensausmaßes

Aus der Masse *m* und der Geschwindigkeit *v(m)* kann der Wert der Probit-Funktion *Pr(m)* bestimmt werden. Das Schadensausmaß *C(m)* kann anschließend aus Tabelle 12 ermittelt werden. In Abbildung 17 ist zu sehen, dass der Bereich, in dem das Schadensausmaß variiert, relativ schmal ist. So gibt es für Eisplatten aus Raureif bei einem angenommenen cw-Wert von 1 unterhalb einer Masse von 90 g keinen relevanten Schaden, oberhalb einer Masse von 240 g muss das Schadensausmaß mit 1 angesetzt werden (Todesfall durch Treffer).

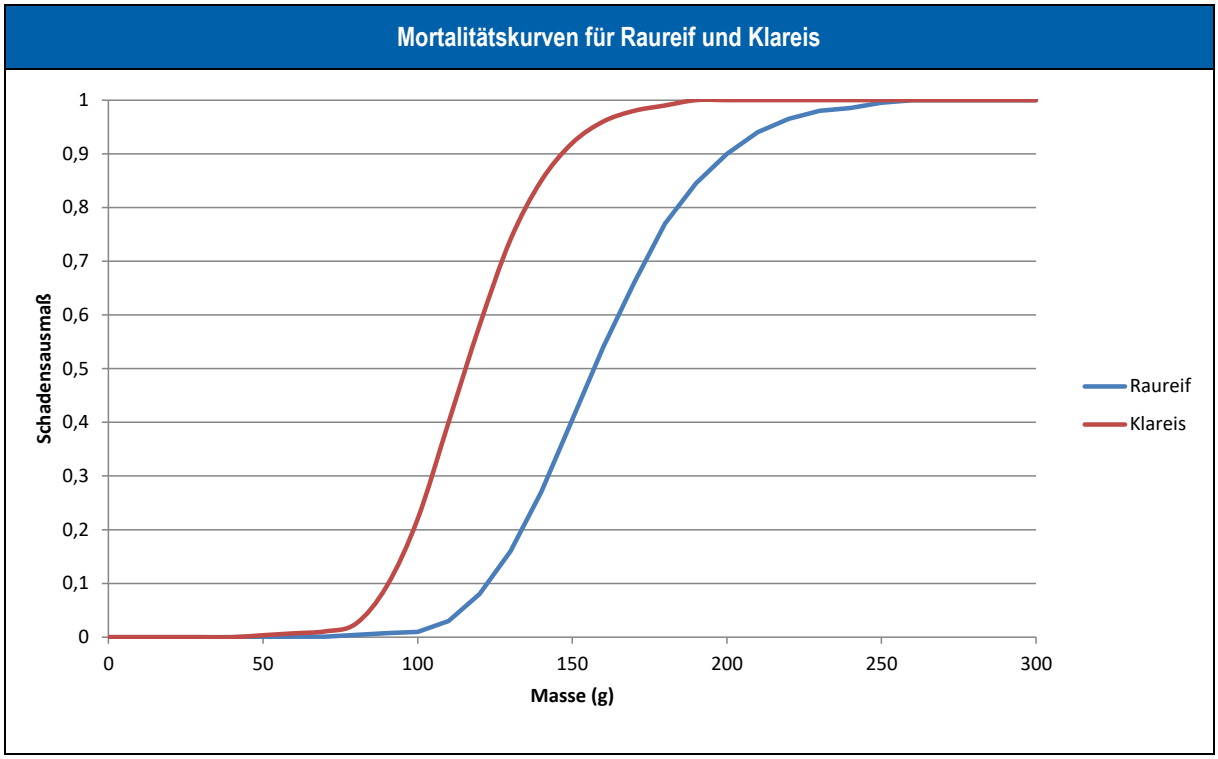


Abbildung 17: Mortalität bei Projektilen aus Raureif bzw. Klareis in Abhängigkeit von der Masse für eine Nabenhöhe von 161 m und einem cw-Wert von 1.

Um für die Berechnung ein mittleres Schadensausmaß C zu ermitteln, muss dieses noch mit der Wahrscheinlichkeit multipliziert werden, mit der diese Masse auftritt und über alle Massen aufsummiert werden:

$$C = \int_0^\infty C(m) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot m} \cdot e^{-\left(\frac{(\ln m - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)} dm. \qquad [7.6]$$

Das Schadensausmaß wurde für die in Tabelle 12 dargestellten Fälle ermittelt und wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Nabenhöhe	Eistyp	Schadensausmaß C
161 m	Raureif	0.48
161 m	Klareis	0.98

Tabelle 13: Mittleres Schadensausmaß für eine Nabenhöhe von 161 m und einen cw-Wert von 1.

Der Unterschied im Schadensausmaß für Raureif und Klareis ist durch die unterschiedlichen Massenverteilungen (siehe hierzu auch Abbildung 16Abbildung 1) bedingt.

7.6.2 Eintrittshäufigkeit

Zur Ermittlung der Eintrittshäufigkeit wurden in Rahmen des Teilbereichs Eisfallanalyse an den geplanten Anlagenstandorten relative Häufigkeiten ermittelt, mit denen ein Eisstück in der näheren Umgebung der sich im Stillstand bzw. Trudelbetrieb befindlichen WEA auftrifft. Hierbei wurden folgende Eisstücke betrachtet:

- Szenario A: Eisstück aus Raureif mit 90 g Gewicht
- Szenario B: Eisstück aus Raureif mit 240 g Gewicht
- Szenario C: Eisstück aus Klareis mit 70 g Gewicht
- Szenario D: Eisstück aus Klareis mit 180 g Gewicht

Für die durchgeführten Risikoanalysen wurden grundsätzlich alle Massen aus Kapitel 7.6.1.2 berücksichtigt. Die in den Eisfallsimulationen betrachteten Eisstücke repräsentieren dabei die Massen, bei denen von möglichen leichten Verletzungen (leichtere Eisstücke der Szenarien A und C) bzw. von tödlichen Verletzungen (schwerere Eisstücke der Szenarien B und D) ausgegangen werden muss.

Auf Basis der übergebenen Rohdaten aus den Eisfallsimulationen wurde ein quadratisches Raster in 5 m Schritten erstellt, mit dessen Hilfe die Trefferhäufigkeit auf Fahrzeuge bzw. Fußgänger, die sich auf den vorbeiführenden Straßen und Wege befinden, ermittelt werden kann.

7.6.2.1 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 14: Kategorien der betrachteten Wege.

Autofahrer

Entsprechend den Angaben zur Risikoakzeptanz aus Kapitel 7.5.2.4 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 7.5.2.4). 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.

7.6.2.2 Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit H_T, P_T

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 [12].

In dem Untersuchungszeitraum von ca. 3 Jahren wurden etwa 200 Eisstücke identifiziert [12]. 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 5x5m² 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).

7.6.2.3 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 5x5m²-Quadranten ermittelt.

Als Paramater 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 5x5m²-Quadranten 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 [37] 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 2.3.3 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 Expositionszeiten:

- 12 s/a und Quadrant für Autofahrer, bzw.
- 144 s/a und Quadrant für Fußgänger.

Damit gilt eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit von

$P_A = 3.80 \cdot 10^{-07}$ für Autofahrer bzw.

$P_A = 4.57 \cdot 10^{-06}$ für Fußgänger

in den einzelnen Quadranten.

7.6.2.4 Berücksichtigung eines Reduktionsfaktors

Grundsätzlich gilt das nach Kapitel 7.6.1 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 7.6.1 vergleichbarem Schadensausmaß führt.

7.6.2.5 Ermittlung der Gefährdungswahrscheinlichkeit

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

$$P = H_T \cdot P_T \cdot P_A \cdot K \quad \text{(Autofahrer) bzw.} \qquad [7.6]$$

$$P = H_T \cdot P_T \cdot P_A \quad \text{(Fußgänger)} \qquad [7.7]$$

ermittelt werden.

7.6.3 Ermittlung des Risikos für die einzelnen Szenarien und Gesamtrisiko

Für die einzelnen betrachteten Szenarien wird das Risiko durch eine Multiplikation von Schadensausmaß *C* und Gefährdungswahrscheinlichkeit *P* berechnet.

$$R_{Szenario\ i} = C_{Szenario\ i} \cdot P_{Szenario\ i} \qquad [7.8]$$

Unter der Annahme, dass jedes Szenario etwa gleich wahrscheinlich ist, kann das Gesamtrisiko zu

$$R = 0.25 \cdot \sum_{i=1}^{4} C_{Szenario\ i} \cdot P_{Szenario\ i} \qquad [7.9]$$

ermittelt werden.

7.6.4 Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen

Die Risikoreduktion durch geeignete Maßnahmen ist für Straßen/Wege erforderlich, die ein hohes / unakzeptabel hohes Risiko gemäß Tabelle 10 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 15: Wirksamkeit bestimmter Sicherheitsmaßnahmen.

7.7 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen		
Abkürzung	**Einheit**	**Bedeutung**
A	[m/s]	Skalenparameter der Weibullverteilung
c_p	[-]	Leistungsbeiwert
c_t	[-]	Schubbeiwert
D	[m]	Rotordurchmesser
E	[MWh]	Energieertrag, Jahresenergieertrag
E_f	[kWh/m^2/a]	Energiefluss, Mittlere Energiedichte
frei	[-]	freie Anströmungsbedingungen
h_i	[%]	Häufigkeit im Intervall i
h_{Park}	[%]	Wirkungsgrad, Parkwirkungsgrad
HW	[-]	Hochwert
I	[-]	Turbulenz, Turbulenzintensität
IEC	[-]	International Electrical Commission
k	[-]	Formparameter der Weibullverteilung
LK	[-]	Leistungskennlinie
Mode	[-]	Modus, Einstellung
N	[-]	Nord, nördlich
NH	[m]	Nabenhöhe
NN	[-]	Normal Null
O	[-]	Ost, östlich
P	[kW]	Leistung
P_f	[W/m^2]	Mittlere Leistungsdichte, Leistungsfluss
ρ	[kg/m³]	Luftdichte
RIX	[%]	ruggedness index
RW	[-]	Rechtswert
S	[-]	Süd, südlich
Sek, sec	[deg]	Windrichtungssektor
SN	[-]	Seriennummer
U	[-]	Unsicherheit
v	[m/s]	Windgeschwindigkeit
W	[-]	West, westlich
wake	[-]	Nachlaufströmung
WEA, WKA	[-]	Windenergieanlage
x	[-]	Entfernung
z	[m]	Höhe ü. Grund
z_0	[m]	Rauigkeitslänge

GE Renewable Energy

-Original-

Technische Dokumentation Windenergieanlagen Alle Anlagentypen

Eisdetektion

imagination at work

© 2017 General Electric Company. All rights reserved.

Alle technischen Daten unterliegen der möglichen Änderung durch fortschreitende technische Entwicklung!

Die Angaben im Dokument beziehen sich ausschließlich auf Windenergieanlagen die in Deutschland installiert werden, gleichwohl können sie auch für Anlagen außerhalb Deutschlands zutreffend sein.

Klassifizierung: öffentliches Dokument

Urheber- und Verwertungsrechte

Alle Unterlagen sind im Sinne des Urheberrechtgesetzes geschützt. Zuwiderhandlungen sind strafbar und verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte zur Ausübung von gewerblichen Schutzrechten behalten wir uns vor.

© 2017 General Electric Company. Alle Rechte vorbehalten.

GE und sind Warenzeichen und Dienstleistungsmarken der General Electric Company.

Andere, in diesem Dokument genannte Unternehmens- oder Produktnamen sind ggf. Warenzeichen bzw. eingetragene Warenzeichen ihrer jeweiligen Unternehmen.

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeines 5
1.1 GE IceCONTROL 5
1.2 BLADEcontrol® System 6
1.3 Labkotec „LID-3300IP“ 6

Die auf dieser Seite in Textform wiedergegebenen sowie in Zeichnungen, Modellen, Tabellen etc. verkörperten Informationen bleiben ausschließliches Eigentum der General Electric Company und/oder deren verbundene Unternehmen. Sie werden nur zu dem vereinbarten Zweck anvertraut und dürfen zu keinem anderen Zweck verwendet werden. Kopien oder sonstige Vervielfältigungen dürfen nur zu dem vereinbarten Zweck angefertigt werden. Ausgedruckte und/oder elektronisch verbreitete Dokumente unterliegen nicht der Änderungskontrolle
© 2017 General Electric Company und/oder deren verbundene Unternehmen. Alle Rechte vorbehalten.

1 Allgemeines

GE bietet unterschiedliche Möglichkeiten, um Eisansatz an den Rotorblättern zu erkennen und die Anlage im Betrieb einzuschränken oder ggf. abzuschalten. Es wird bei der Auswertung zwischen der anlageneigenen Sensorik (1.) und externen Sensoren (2. & 3.) unterschieden.

1. GE IceCONTROL
2. Rotorblattsensorik BLADEcontrol® (Weidmüller)
3. Eisansatzsensor „LID-3300IP“ (Labkotec)

GE Wind Energy behält sich vor, ähnliche Sensoren anderer Hersteller zu liefern, die den gleichen Funktionsumfang bieten. Für Anlagen in Mittelgebirgslagen an Standorten im Bundesland Rheinland Pfalz wird ein Gutachten zur Eiserkennung gefordert. Für das System zu 2. liegt das Gutachten vor, es ist gegliedert in zwei Bestandteile, die beide diesem Dokument beigefügt sind.

Wird Eisansatz erkannt, führt die Anlagensteuerung abhängig von der festgelegten Programmierung folgende Aktionen durch:

I. Eiswarnung, keine Änderung der Betriebsweise, Info über Fernüberwachung an Anlagenhersteller und/oder Betreiber,
II. Reduzierung der Rotordrehzahl mit dem Ziel, die Reichweite des Eisabwurfes zu reduzieren,
III. Eisalarm, Abschaltung der Anlage,
IV. Weiterbetrieb der Anlage in einem Betriebsmodus, der es ermöglicht, einen erhöhten Energieertrag (im Vergleich zu I.) zu erreichen, nur wenn kein Eiswurfrisiko an dem betreffenden Standort gegeben ist.

Die detektierten Zustände werden im GE SCADA gespeichert, es werden folgenden Zustände unterschieden:

1. Eisansatz/kein Eisansatz
2. System o.k./System Fehler
3. Kommunikation zwischen BLADEcontrol® und Anlagensteuerung o.k./Kommunikationsfehler (nur im Fall von BLADEcontrol®).

1.1 GE IceCONTROL

Beim Leistungskurvenverfahren und der Schwingungsüberwachung werden Signale der Anlage ausgewertet, um Rotorblattvereisung zu erkennen. Diese Überwachung ist in der Lage sowohl symmetrischen und unsymmetrischen Eisansatz an den Rotorblättern zu detektieren. Werden bestimmte Parameterkombinationen festgestellt, wird ein Eisalarm ausgelöst. Für den Start der Anlage bedarf es einer visuellen Kontrolle der Rotorblätter. Der Start kann über die Fernüberwachung ausgeführt werden, wenn die Rückmeldung der Vor-Ort-Kontrolle vorliegt.

Bei der Überwachung des „Tip Speed Ratio“ („TSR“, deutsch auch „Schnelllaufzahl“ genannt) wird unter anderem die Rotordrehzahl überwacht. Abweichungen der im Betrieb gemessenen Werte von in der Anlagensteuerung hinterlegten Sollkurven sind ein Hinweis auf veränderte aerodynamische Verhältnisse und

Die auf dieser Seite in Textform wiedergegebenen sowie in Zeichnungen, Modellen, Tabellen etc. verkörperten Informationen bleiben ausschließliches Eigentum der General Electric Company und/oder deren verbundene Unternehmen. Sie werden nur zu dem vereinbarten Zweck anvertraut und dürfen zu keinem anderen Zweck verwendet werden. Kopien oder sonstige Vervielfältigungen dürfen nur zu dem vereinbarten Zweck angefertigt werden. Ausgedruckte und/oder elektronisch verbreitete Dokumente unterliegen nicht der Änderungskontrolle
© 2017 General Electric Company und/oder deren verbundene Unternehmen. Alle Rechte vorbehalten.

führen wiederum in Verbindung mit einer niedrigen Außentemperatur zu einer entsprechenden Meldung an die Anlagensteuerung.

GE IceCONTROL arbeitet im Windgeschwindigkeitsbereich von etwa 5 m/s bis zum Erreichen der Nennwindgeschwindigkeit. Außerhalb dieses Windgeschwindigkeitsbereichs kann die Anlagensteuerung so eingestellt werden, dass die Anlage im Fall geringer Umgebungstemperaturen entweder im Normalbetrieb bleibt oder abgeschaltet wird. Der Auftraggeber muss seine Auswahl dem Auftragnehmer mitteilen.

1.2 BLADEcontrol® System

Das BLADEcontrol® System von Weidmüller ist ein Messsystem, das kontinuierlich die Eigenfrequenz der Rotorblätter überwacht und diese mit historischen Werten vergleicht. Im Falle von Eisansatz vergrößert sich die Masse der Rotorblätter und die Eigenfrequenzen verschieben sich zu kleineren Werten. Für die Messung ist in jedem der 3 Rotorblätter ein unabhängig arbeitender Sensor installiert. Sobald Eisansatz erkannt wird und bestimmte Auslöseschwellen überschritten werden, sendet BLADEcontrol® entsprechende Warn- oder Alarmmeldungen an die Anlagensteuerung. Diese sorgt dann abhängig von der Programmierung für die Reaktionen I – IV. Das System kann bei Anlagenstillstand sowie im Betrieb der WEA Eisansatz messen. Eine automatische Wiederinbetriebnahme der Anlage ist möglich, wenn sich der Status des Sensors von „Eisansatz“ auf „kein Eisansatz“ ändert. Das BLADEcontrol® System wird nur zur Erkennung von Eisansatz eingesetzt.

1.3 Labkotec „LID-3300IP“

Dieser Eissensor wird auf dem Maschinenhaus der Anlage installiert. Der Sensor hat eine Größe von etwa 10 x 35 cm und kann z. B. in der Nähe der Sensoren zur Messung der Windgeschwindigkeit installiert werden. Der Sensor nutzt einen Draht, der einem Ultraschallsignal ausgesetzt wird. Veränderungen im Ultraschallsignal werden genutzt, um Eisansatz zu detektieren. Die Auslöseschwelle, bei der Eisansatze zum Auslösen des Eisalarms an die Anlagensteuerung führen soll, ist einstellbar. Für den Neustart der Anlage bedarf es einer visuellen Kontrolle der Rotorblätter und Freigabe der Wiederinbetriebnahme.

Die auf dieser Seite in Textform wiedergegebenen sowie in Zeichnungen, Modellen, Tabellen etc. verkörperten Informationen bleiben ausschließliches Eigentum der General Electric Company und/oder deren verbundene Unternehmen. Sie werden nur zu dem vereinbarten Zweck anvertraut und dürfen zu keinem anderen Zweck verwendet werden. Kopien oder sonstige Vervielfältigungen dürfen nur zu dem vereinbarten Zweck angefertigt werden. Ausgedruckte und/oder elektronisch verbreitete Dokumente unterliegen nicht der Änderungskontrolle
© 2017 General Electric Company und/oder deren verbundene Unternehmen. Alle Rechte vorbehalten.

Gutachten

Ice Detection System

BLADEcontrol Ice Detector BID

Report Nr.: 75138, Rev. 4 **Datum: 08.02.2017**

DNV GL - Energy
Renewables Certification

Hersteller	Weidmüller Monitoring Systems GmbH Else-Sander-Str. 8 01099 Dresden Germany
GL Renewables Auftragsnr.	4800/14/462712/256
Sachverständiger	Dr. Karl Steingröver
Revision 4	Änderung Hersteller
Adresse	DNV GL - Energy Renewables Certification Brooktorkai 18 20457 Hamburg Germany

1 MITGELTENDE DOKUMENTATION

1.1 Type Certificate “BLADEcontrol Ice Detector BID”, TC-GL-IV-4-02381-0, ausgestellt am 09.12.2016

1.2 Certification Report for the Ice Detection System “BLADEcontrol Ice Detector BID”, CR-CMS-GL-IV-4-02381-0, ausgestellt am 09.12.2016

2 PRÜFKRITERIUM / STAND DER TECHNIK

Im Bereich von Windenergieanlagen (WEA) existiert nur eine Richtlinie, in der der Stand der Technik zur Eiserkennung auf Rotorblättern dargestellt ist:

Germanischer Lloyd: GL Rules and Guidelines – IV Industrial Services – Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, Edition 2013

Auf Basis dieser Richtlinie kann die Fähigkeit von Condition Monitoring Systemen hinsichtlich Detektierung von relevanten Zustandsänderungen, die Abweichungen vom normalen Betriebsverhalten darstellen, beurteilt werden. Das Eiserkennungssystem „BLADEcontrol Ice Detector BID“ gehört zur Kategorie der Condition Monitoring Systeme für Rotorblätter; Eisansatz stellt eine Abweichung vom normalen Betriebsverhalten dar. Der Personenschutz ist hierbei der Hauptaspekt zur Beurteilung. Diese Richtlinie ist somit das maßgebliche Prüfkriterium für dieses Gutachten. Sie enthält aktuell allerdings noch keine Grenzwerte für Eisdicken, die als unkritisch angesehen werden können.

Die Form im Betrieb abgeworfener Eisstücke sowie deren Abmessungen hängt von vielen Faktoren ab. Diese sind z.B. Abwurfgeschwindigkeit, Windwiderstand, mögliche Flugbahn und Windgeschwindigkeit. Der aktuelle Wissensstand ist, dass Eisstücke umso eher durch den Einfluss des Windes im Flug vor dem Auftreffen auf dem Boden aufgrund ihrer größeren relativen Oberfläche in unkritische kleinere Stücke und damit unkritische impulsgebende Massen zerbrechen, je dünner sie sind und je niedriger die Dichte der Eisanhaftung ist. Als konservativer Wert wird hier eine Eisdicke von 1,5 cm bis max. 2 cm angesehen, unterhalb dessen keine Gefahr für die Umgebung angesehen wird.

3 SACHVERSTÄNDIGER

Dieses Gutachten wurde durch den Sachverständigen Dr. Karl Steingröver, Senior Principal Engineer bei DNV GL – Energy, Renewables Certification erstellt.

4 SYSTEMBESCHREIBUNG

Bei dem Eiserkennungssystem (BID) handelt es sich um ein in sich geschlossenes System, welches sowohl beim WEA-Hersteller als auch nachträglich in einer WEA aufgebaut werden kann. Das Messverfahren ermittelt die aktuelle Vereisungssituation direkt an den Rotorblättern. Der BID besteht im Wesentlichen aus Sensoren, die in die Rotorblätter appliziert werden, sowie einer Auswerteeinheit, die in einem Gehäuse in der Gondel der WEA an geeigneter Stelle angebracht wird. Die in den Rotorblättern installierten Beschleunigungssensoren nehmen dabei die Eigenschwingungen des elastischen Rotorblattes auf. Von der Auswerteeinheit wird aus den Schwingungssignalen ein Frequenzspektrum gebildet, aus dem Rotorblatttyp-spezifische Schwingungsmodi gezielt analysiert werden. Bei Eisansatz auf dem Rotorblatt verlangsamt das Eis die Eigenschwingung des Rotorblattes, was sich in einen messbaren Frequenzabfall zeigt. Diese relative Frequenzänderung ist dabei umgekehrt proportional zur relativen Masseänderung. Nach erfolgreicher Installation und Inbetriebnahme liefert der BID elektrische Signale, welche den Zustand der Rotorblätter mit „Eisfrei“ oder „Eisansatz“ charakterisieren. Die Bestimmung der Empfindlichkeit des Systems ist in 5 beschrieben. Das Signal „Eisansatz“ wird gegeben, wenn die Frequenzabweichung ein eingestelltes Maß überschreitet. Dieses eingestellte Maß ist dabei so festgelegt, dass eine Gefährdung der Umgebung durch Eisabwurf im laufenden Betrieb sowie im Leerlauf nicht erfolgt. Eine Herleitung dieses Maßes ist in 6 dargestellt. Der BID gibt zudem ein Signal aus, dass seine Funktionsfähigkeit anzeigt („watch dog“) sowie ein Signal, ob eine Eisauswertung beim aktuellen Anlagenzustand ein verwertbares Ergebnis liefert. Diese Signale können vom WEA-Betriebssystem oder vom SCADA-System der WEA zum Ein- und Ausschalten der WEA verwendet werden. Da WEA-Betriebs- und SCADA-Systeme Hersteller-spezifisch sind, ist das Ein- und Ausschalten der WEA jedoch nicht Gegenstand dieses Gutachtens. Dieses muss für jede Anlagensteuerung in einem separaten Gutachten beurteilt werden. In den separaten Gutachten wird dargelegt, wie die WEA auf die unterschiedlichen Signalkombinationen des BID reagiert, um eine Gefährdung für die Umgebung durch Eisabwurf auszuschließen.

5 PRÜFUNG

Der BID inklusive der Sensoren und Software sowie der Betriebsmethode wurden im Rahmen der in 1 angeführten Zertifizierung des Eiserkennungssystems im Hinblick auf zuverlässige Eiserkennung und sicheren Betrieb auf Basis der in 2 angegebenen Richtlinie geprüft. Dabei wurden die Anforderungen der DIN EN ISO 13849-1 erfüllt. Die Eiserkennung wurde erfolgreich in einem beim Hersteller in Dresden durchgeführten Systemtest am 18.03.2008 nachgewiesen. Hier wurde gezeigt, dass eine Zusatzmasse, welche 0,1 % der Rotorblattmasse entsprach, eine Frequenzabweichung in vierfacher Höhe der Messauflösung erzeugt. Für eine sichere Detektion ist eine Abweichung in Höhe der zweifachen Messauflösung ausreichend, der BID erreicht somit eine Empfindlichkeit von 0,5 ‰ der Rotorblattmasse. Bei Eisansatz vereist zumindest ein 10 cm breiter Bereich an der Vorderkante des Blattes welcher sich über mindestens der äußeren Hälfte der Blattlänge erstreckt. Für ein 55 Meter langes Rotorblatt ergibt

sich somit ein vereister Bereich von 2,75 m2. Ein derartiges Rotorblatt hat eine Masse von 12 Tonnen. Die Empfindlichkeit des BID beträgt somit für dieses Rotorblatt 6 kg. Bei einer gegebenen Dichte für Eis von 910 kg/m³ ergibt sich so für dieses Beispiel eine detektierbare Eisdicke von 2,4 Millimetern. Der BID ist somit zur Eiserkennung entsprechend dem Stand der Technik hinreichend sensibel.

Die Installation des BID auf einer WEA wurde in Bremerhaven am 14.11.2008 gemäß der in 2 angegebenen Richtlinie geprüft. Der Einbau des BID in die WEA beeinflusst nicht das Systemverhalten der WEA. Die unabhängige Funktion des Betriebssystems der WEA sowie des BID wurde dabei durch einen Systemtest geprüft. Der BID entspricht somit den Anforderungen der in 2 angegebenen Richtlinie, was durch das in 1.1 angeführte Zertifikat bescheinigt wurde. Der Einbau des BID in eine WEA beeinflusst in keiner Weise das Typenzertifikat der jeweiligen WEA.

6 WEA-BEZOGENE EINSTELLUNGEN

Aufgrund unterschiedlicher Rotorblattmassen und Rotorblattabmessungen wird der BID bei Inbetriebnahme WEA-Typ spezifisch eingestellt. Dies betrifft einerseits die Festlegung der auszuwertenden Schwingungsmodi (Frequenzpeaks) und andererseits die Festlegung der zulässigen Frequenzabweichung, ab der ein Signal für Eisansatz ausgegeben wird. Diese Einstellungen und Justierungen werden in dem jeweiligen Installationsprotokoll vermerkt.

7 STANDORTBEZOGENE / ORTSSPEZIFISCHE EINSTELLUNGEN UND ABNAHMEN

WEA-Typ spezifische Einstellungen und Justierungen des BID (siehe 6) werden im Rahmen der Installation getätigt. Die in 1.2 sowie in 5 beschriebene Prüfung der Installation des BID auf einer WEA hat gezeigt, dass keine standortbezogenen Abnahmen notwendig und nach der Installation keine ortspezifischen Einstellungen und Justierungen durchzuführen sind. Aufgrund der in 4 beschriebenen „watch dog“-Funktion (Funktionsanzeige) sind keinerlei wiederkehrende Prüfungen oder Nachjustierungen zu einem späteren Zeitpunkt erforderlich.

Generell ist es möglich, die Abschaltgrenzen, die auf die in 2 erläuterten unkritischen Eisdicken abgestimmt sind, zu ändern. Diese Änderungen können aber weder vom WEA-Betreiber noch vom WEA-Hersteller vorgenommen werden, sondern aus Gründen der Betriebssicherheit ausschließlich vom Hersteller des BID. Dabei kann ein Wunsch nach Veränderung hin zu früheren Signalisierungen, d.h. bereits bei geringerem Eisansatz, vom Betreiber formlos dem Hersteller des Eiserkennungssystems mitgeteilt werden, der dann entsprechende Anpassungen vornimmt. Eine Veränderung hin zu späteren Abschaltungen wird nur umgesetzt, wenn die Unbedenklichkeit der Maßnahme nachgewiesen und behördlicherseits akzeptiert ist. Dies ist dem Hersteller des BID entsprechend zu belegen.

8 ABSCHALTEN / ANFAHREN DER WEA BEI EISANSATZ

Bei Erkennen von Eisansatz bei laufender WEA stellt das BID elektrische Signale zur Verfügung, mit deren Hilfe die WEA vom Betriebssystem abgeschaltet werden kann. Nach Stillsetzung der Anlage ist das Eiserkennungssystem in der Lage, auch im Stillstand zu messen. Der aktuelle Eisstatus wird der Anlage somit auch vor einem beabsichtigten Wiederanlauf mitgeteilt. Die Ausführung der Abschaltung der WEA bei Eisansatz bzw. das Anfahren der WEA bei Eisfreiheit unter Berücksichtigung der Signalisierung des Eiserkennungssystems ist nicht Gegenstand dieses Gutachtens. Dieses muss für jede Anlagensteuerung in einem separaten Gutachten beurteilt werden.

9 ZUSAMMENFASSUNG

Die Prüfung des BID hat ergeben, dass der BID die Gefahr von Eisabwurf im laufenden Betrieb als „sonstige Gefahr“ im Sinne des § 5 BImSchG durch Detektion der durch Eisansatz auf den Rotorblättern entstehenden Zusatzmasse aufgrund von Messungen der Blatt-Eigenfrequenzen mit einer Empfindlichkeit erkennt, die das mindestens notwendige Maß deutlich überschreitet. Das System entspricht damit dem Stand der Technik. Der BID ist auch unter konservativen Annahmen als zur Gefahrenabwehr geeignet einzustufen. Der Hersteller der WEA hat durch ein entsprechendes Gutachten die zweckmäßige und sicherheitstechnisch vollständige Einbindung der Signalisierung des BID in die Anlagensteuerung, entweder direkt oder über eine Einbindung in das SCADA, zu belegen, damit diese Aussage für den mit dem BID ausgestatteten WEA-Typ Gültigkeit hat. Dieses Gutachten behält seine Gültigkeit, so lange ein gültiges Typenzertifikat für den BID vorliegt.

Stgr

DNV GL - Energy
Renewables Certification

Dr. Karl Steingröver
Expert in Charge

DNV·GL

TYPE CERTIFICATE

Certificate No.:	Issued:	Valid until:
TC-GL-IV-4-02381-0	2016-12-09	2018-12-08

Issued for:

Ice Detection System BLADEcontrol Ice Detector (BID)

Issued to:

Weidmüller Monitoring Systems GmbH

Else-Sander-Str. 8
01099 Dresden
Germany

According to:

GL–IV–4:2013 – Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines

Based on the documents:

CR-CMS-GL-IV-4-02381-0	Certification Report Ice Detection System BLADEcontrol Ice Detector, dated 2016-12-09

Changes of the system design, the production or the manufacturer's quality system are to be approved by DNV GL.

Hamburg, 2016-12-09

For DNV GL Renewables Certification

Christer Eriksson
Service Line Leader Type Certification

DAkkS
Deutsche Akkreditierungsstelle
D-ZE-11053-01-00

By DAkkS according DIN EN IEC/ISO 17065 accredited Certification Body for products. The accreditation is valid for the fields of certification listed in the certificate.

Hamburg, 2016-12-09

For DNV GL Renewables Certification

i.A.

Robert Kasch
Senior Project manager

TYPE CERTIFICATE – ANNEX 1

General

System name	BLADEcontrol

Hardware

Name	ECU V5.1, HMU V2.7
Number of analogue channels (vibration)	4
Number of digital channels	-
Blade sensor type	BCA403b / BCA423
Hub sensor type	BCA401b

Software

Name	cmrbl
Version	2.4.sqllite

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG

Gutachten zur Einbindung eines Eiserkennungssystems in GE Windenergieanlagen

TÜV NORD Bericht Nr.: 8111 327 215 D Rev.3

Gegenstand der Prüfung: BLADEControl Eiserkennungssystem der Firma Weidmüller an GE Windenergieanlagen

Dieser Bericht umfasst 17 Seiten.

Rev.	Datum	Änderungen
0	05.11.2014	Erste Fassung
1	02.02.2015	Satzlöschung in Kap. 1.2
2	17.12.2015	Änderung der Bezeichnung von GE 1.x und GE 2.x Windenergieanlagen in GE 1.x und GE 2.x (alte Bezeichnung) und GE 1-2 MW Plattform und 3 MW Plattform (neue Bezeichnung) Windenergieanlagen
3	05.06.2018	Einbindung der GE 5 MW Plattform, Änderung von Bosch Rexroth auf Weidmüller, Revision von Unterlagen

Inhalt

1 Einleitung 3
1.1 Ausgangssituation 3
1.2 Aufgabenstellung 4
1.3 Windenergieanlagen 5
1.4 Eiserkennungssystem BLADEcontrol 5
2 Sicherheitstechnik der GE Windenergieanlagen 8
2.1 Betriebsführungs- und Sicherheitssystem 8
2.2 Einbindung des Eiserkennungssystems in die GE-Anlagensteuerung 8
2.3 Einbauverfahren und Inbetriebnahme 12
2.4 Parametrierung 12
2.5 Wiederkehrende Prüfungen 13
2.6 Vermeidung des Anfahrens bei Vereisung 14
3 Bewertung 15
4 Dokumente und Literaturverzeichnis 16
4.1 Bewertete Dokumente 16
4.2 Literatur & Quellen 17

Abbildungen

Abbildung 1: Systemarchitektur von BLADEcontrol 6
Abbildung 2: Kommunikation ECU und Betriebsführung 9
Abbildung 3: Logik Eiserkennung im BFS 11
Abbildung 4: Freigabelogik nach Abschaltung durch Eisansatz 14

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Rotorblätter von Windenergieanlagen (WEA), die in Regionen mit Temperaturen unter 3°C aufgestellt werden, können bei ungünstigen Bedingungen Eis ansammeln. Aus der dann entstehenden Eisschicht können sich beispielsweise durch Abtauen oder Blattverformung Eisbrocken ablösen, die im Betrieb der Anlage vom Rotorblatt abgeworfen werden und zu Personen- oder Sachschäden im Wurfbereich der Anlage führen können. Ab einer bestimmten Masse der abgeworfenen Brocken besteht damit eine potentielle Gefahr. Beobachtungen zeigen abgeworfene Brocken mit einer Masse von mehreren kg, jedoch sind dem TÜV NORD bisher keine Personenschäden bekannt geworden.

An den WEA installierte Eiserkennungssysteme dienen dem Zweck, dass die Anlage bei erkannter Vereisung der Rotorblätter abgeschaltet wird und somit keine Gefahr durch Eisabwurf mehr besteht. Das Eis wird dann von den Blättern der stehenden / trudelnden WEA abfallen, bevor die WEA wieder manuell oder automatisch in Betrieb genommen wird. Eisabfall von abgeschalteten WEA ist nicht vermeidbar und vergleichbar mit Eisabfall von Strommasten oder Brücken.

Eiserkennungssysteme verfügen generell über einen Sensor und eine Auswerteeinheit. Das Sensorsignal wird durch vereiste Rotorblätter beeinflusst und kann beispielsweise die Leistung der Anlage oder die Blattbeschleunigung sein. Die Auswerteeinheit übernimmt die Aufgabe, aus dem Sensorsignal einen Indikator für Vereisung zu generieren. Üblicherweise gibt es einen Schwellwert, bei dessen Überschreitung das Eiserkennungssystem ein Abschalten der Anlage initiiert. Oft ist dieser Schwellwert spezifisch für jeden Anlagentyp oder gar jede Anlage einzustellen.

Die Bewertung von Eiserkennungssystemen erfolgte bisher in Gutachterlichen Stellungnahmen über Plausibilitätsprüfungen. Es wurde Stellung bezogen zum physikalischen Prinzip der Erkennung bzw. zu der Frage, ob die durch den Eisansatz hervorgerufene Veränderung der Anlageneigenschaften zu einer detektierbaren Veränderung des Sensorsignals führt. Außerdem wurde Stellung bezogen zu auftretenden Lücken der Messung im Betriebsbereich der Anlage. Die Bewertung beschränkte sich jedoch auf eine rein qualitative Bewertung bzw. Plausibilitätsprüfung.

Gerade vor dem Hintergrund, dass ein Eiserkennungssystem immer im Zusammenhang mit der Anlage und der vorliegenden Vereisung zu bewerten ist, wurden seitens der Genehmigungsbehörden die Anforderungen an die Bewertung von Eiserkennungssystemen in den letzten Monaten erhöht. Es ist durch genauere, teilweise quantitative Untersuchungen zu indizieren, dass das Eiserkennungssystem

- die kritische Eismasse zuverlässig detektiert,

- hinsichtlich der Schwellwerte und Parameter korrekt auf die Anlage eingestellt ist und

- sicherheitstechnisch zuverlässig funktioniert.

Die Bewertung soll in Bezug auf das sichere Abschalten der WEA bei kritischem Eisansatz an den Rotorblättern erfolgen. Anhaltspunkte zur Bewertung liefern die von der Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord herausgegebenen Papiere „Anforderungsprofil für ein Gutachten gemäß Merkblatt Sicherheitsnachweise hinsichtlich Eisabwurf – Rheinland-Pfalz" – Arbeitsentwurf 09.08.2013 sowie „Sicherheitsnachweise hinsichtlich Eisabwurf" – Arbeitsentwurf Stand 09.08.2013.

Auf Wunsch des Auftraggebers erfolgt eine Trennung der Aufgabenstellungen. Die Aspekte der zuverlässigen Detektion der kritischen Eismasse sollen in einem separaten Gutachten für das verwendete Eiserkennungssystem vom Typ „BLADEcontrol" bewertet werden. Im vorliegenden Gutachten sollen ausschließlich die weiteren sicherheitstechnischen Fragestellungen in Bezug auf die Einbindung des Systems in GE 1.x und GE 2.x (alte Bezeichnung) und GE 1-2 MW Plattform und 3 MW Plattform (neue Bezeichnung) sowie der 5 MW Plattform WEA bewertet werden.

1.2 Aufgabenstellung

Es sollen die folgenden sicherheitstechnischen Kriterien für die GE 1-2 MW Plattform, 3 MW Plattform und 5 MW Plattform WEA bewertet werden:

1. Die logische Einbindung des Systems in die Betriebsführung der WEA
2. Das praktische Einbauverfahren
3. Die Möglichkeiten der Parametrierung
4. Inbetriebnahme und wiederkehrende Prüfungen
5. Die Vermeidung des (wieder-) Anfahrens bei Vereisung

Die Bewertung bezieht sich ausschließlich auf *Eisabwurf*. Eine Bewertung bezüglich Eisabfall erfolgt hier nicht, denn Eisabfall von einer stehenden / trudelnden Anlage kann nicht verhindert werden.

Zur Zuverlässigkeit der Detektion einer kritischen Eismasse durch das System BLADEcontrol bzw. zur Sensibilität der Eiserkennung werden im Rahmen dieses Gutachtens keine Aussagen gemacht.

Die Bewertung erfolgt in Bezug auf das sichere Abschalten der WEA bei anstehendem Signal „Eis-Alarm".

1.3 Windenergieanlagen

Die hier dargestellten grundsätzlichen Verfahren zur Einbindung des Eiserkennungssystems in GE WEA sind unabhängig vom WEA Typ. Sie können sowohl für alle GE 1.x als auch für alle GE 2.x Varianten (alte Bezeichnung) bzw. für alle Varianten der GE 1-2 MW Plattform als auch alle Varianten der 3 MW Plattform (neue Bezeichnung) und 5 MW Plattform angewandt werden. Eine ausführliche Aufzählung aller gültigen Anlagentypen findet sich in Dokument /6/. Die unterschiedlichen Eigenschaften von verschiedenen Rotorblättern sind jedoch vorab im Rahmen der Kalibrierung des Eiserkennungssystems zu berücksichtigen. Diese Aspekte werden im Rahmen des vorliegenden Gutachtens nicht bewertet.

1.4 Eiserkennungssystem BLADEcontrol

Folgende Systemkomponenten des Eiserkennungssystems BLADEcontrol werden auf der WEA installiert:

- Zweidimensional messende Beschleunigungssensoren in jedem einzelnen Rotorblatt
- Ein zusätzlicher Beschleunigungssensor in der Nabe zur Messung von Anlagenschwingungen in Nick-Richtung
- Messerfassungseinheit in der Nabe, Hub Measurement Unit (HMU)
- Messdatenauswertungs- und Kommunikationseinheit (ECU)
- Datenkommunikationsverbindung von der WEA zum Monitoring Center, idR. über das Internet

Ergänzend kommen weitere Komponenten für die Spannungsversorgung und Datenübertragung hinzu.

Die art- und ortstypischen Details der Installation der Komponenten sind in Installationsanweisungen festgelegt, welche für die einzelnen WEA-Typen bestehen. Diese Anweisungen wurden in Abstimmung mit den jeweiligen Herstellern der Anlagen erstellt (s. Kap. 2.2).

Die Systemarchitektur von BLADEcontrol ist in Abbildung 1 dargestellt.

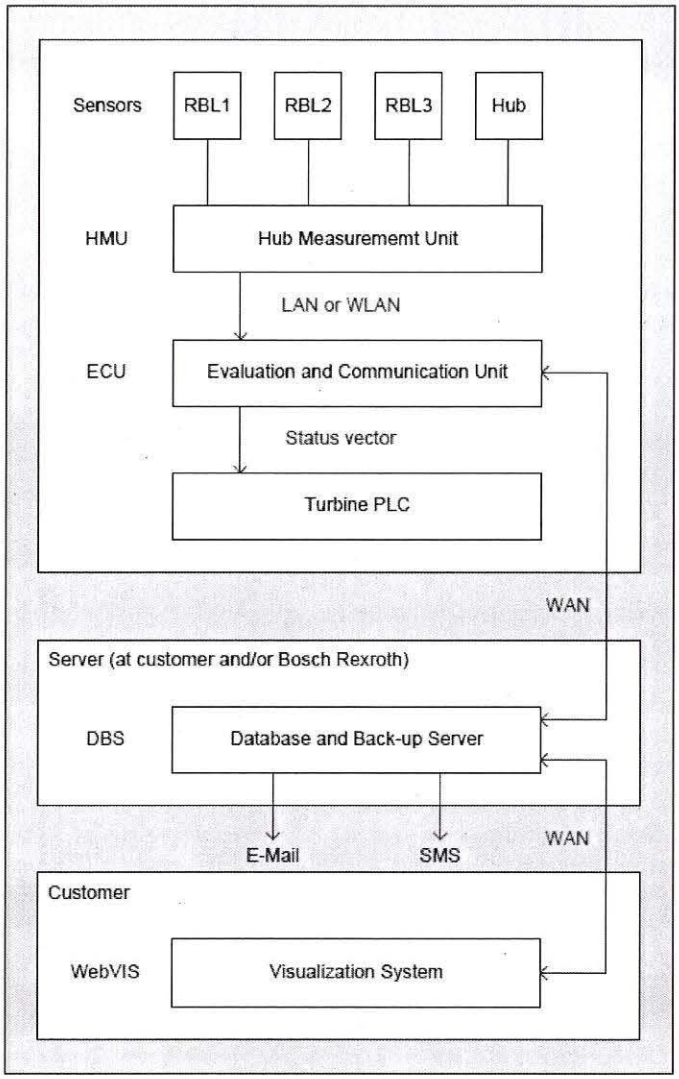


Abbildung 1: Systemarchitektur von BLADEcontrol

Die einzelnen Systemgruppen werden in /1/ wie folgt beschrieben.

Sensoren

Die Schwingungen der einzelnen Rotorblätter sowie die Nickschwingungen der WEA insgesamt werden über Beschleunigungssensoren aufgenommen. Neben den Beschleunigungssensoren verfügt jedes Messmodul über einen Temperatursensor, der die jeweilige Rotorblatttemperatur erfasst.

Die signaltechnische Anbindung der Sensoren an die HMU in der Nabe erfolgt zur Unterdrückung elektromagnetischer Einflüsse über je ein geschirmtes Signalkabel.

Hub Measurement Unit (HMU)

In der HMU werden die Sensorsignale in der Nabe erfasst, kalibriert und gefiltert. Anschließend werden die so aufbereiteten Signale als kontinuierlicher Datenstrom über WLAN an die ECU weiter geleitet.

Evaluation and Communication Unit (ECU)

In der ECU werden die durch die HMU bereitgestellten Messdaten in Spektren umgewandelt und mit definierten Algorithmen analysiert. Die Messdaten wie auch die Spektren werden auf der ECU für eine definierte Zeit gespeichert. Die ECU baut selbsttätig eine Kommunikation zum Datenbankserver (DBS) im Monitoring Center auf und sendet dabei periodisch eine definierte Auswahl an Daten an den DBS.

Einen weiteren Kommunikationspfad unterhält die ECU mit der Anlagensteuerung (s. Kap. 2.2). Von dort bekommt sie zeitaktuelle Daten zum aktuellen Betriebspunkt der Anlage (z.B. Leistung, Pitchwinkel, Windgeschwindigkeit), welche für eine Ermittlung der momentanen Blattlast notwendig sind. Zurück an die Steuerung sendet die ECU einen Statusvektor, der neben Informationen zur momentanen eigenen Betriebsfähigkeit auch Warn- und Alarmrückmeldungen an die Anlagensteuerung enthält.

Das System startet bei Anschalten an die Spannungsversorgung bzw. bei Wiederherstellung der Versorgung nach einem Ausfall automatisch. Dabei bleiben alle relevanten Informationen im remanenten Speicher erhalten.

2 Sicherheitstechnik der GE Windenergieanlagen

2.1 Betriebsführungs- und Sicherheitssystem

Das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem GE 1-2 MW Plattform und 3 MW Plattform wurde vom Verfasser im Rahmen der Anlagenzertifizierung auf Übereinstimmung mit den Anforderungen der IEC 61400-1 ed.3 von 2005 geprüft. Die 5 MW Plattform befindet sich derzeit in der Prüfung. Die relevanten Prüfunterlagen wurden bereits begutachtet. Mit Vorliegen der Gutachterlichen Stellungnahme 8115542742-2 D zur Typenprüfung der Anlage erledigt sich dieser Vorbehalt. Die Anforderungen an das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem werden erfüllt. Als übergeordnete Anforderung wird in der Richtlinie für sicherheitsrelevante Funktionen eine Einzelfehlersicherheit gefordert. D.h., ein beliebiger Fehler darf nicht zum Versagen der Sicherheitsfunktion führen. Dieser Maßstab ist auch in Bezug auf die sichere Abschaltung der WEA bei kritischem Eisansatz anzusetzen. Im Folgenden wird dieses jedoch erst ab Signalausgang des Eiserkennungssystems, also nicht für das eigentliche Eiserkennungssystem, sondern für die Weiterverarbeitung des Signals im WEA-Betriebsführungssystem bewertet.

2.2 Einbindung des Eiserkennungssystems in die GE-Anlagensteuerung

Die vom Eiserkennungssystem generierten Signale werden in das Betriebsführungssytem der WEA eingelesen. Der Statusvektor von der ECU fasst die aktuellen Analyseergebnisse und den Zustand von BLADEcontrol in binärer Form (0/1) zusammen und wird über eine Schnittstelle als Antwort auf Anfrage dem Betriebsführungssystem mitgeteilt. Die Alarmierung erfolgt somit in jedem Fall direkt und nicht, wie ebenfalls möglich, nur indirekt über Email / SMS an Personen.

In der Anlagensteuerung werden die in Abbildung 2 dargestellten Analyseergebnisse von der ECU im Sekundentakt abgefragt und in Form von Bits zur Verfügung gestellt. Es werden die in Bezug auf die Eiserkennung wesentlichen Bits abgefragt.
Folgende externe Größen müssen dem Messsystem zur Verfügung stehen:

- grundsätzlich erforderlich:
  - (a) die aktuell erzeugte Leistung der WEA
  - (b) der Pitch-Winkel
- optional:
  - (c) die Windstärke,
  - (d) der Betriebsstatus der WEA (z.B. bei Wartungsarbeiten),
  - (e) die Außentemperatur,
  - (f) der Azimutwinkel der WEA

Die optionalen Werte, die von der GE WEA Steuerung an die ECU übergeben werden, verbessern die Funktionsweise dahingehend, dass Tests auf Plausibilität möglich sind. Insbesondere die Einbeziehung des Betriebsstatus der WEA verhindert Fehlalarme z.B. bei Maschinenstopp oder „Notaus".

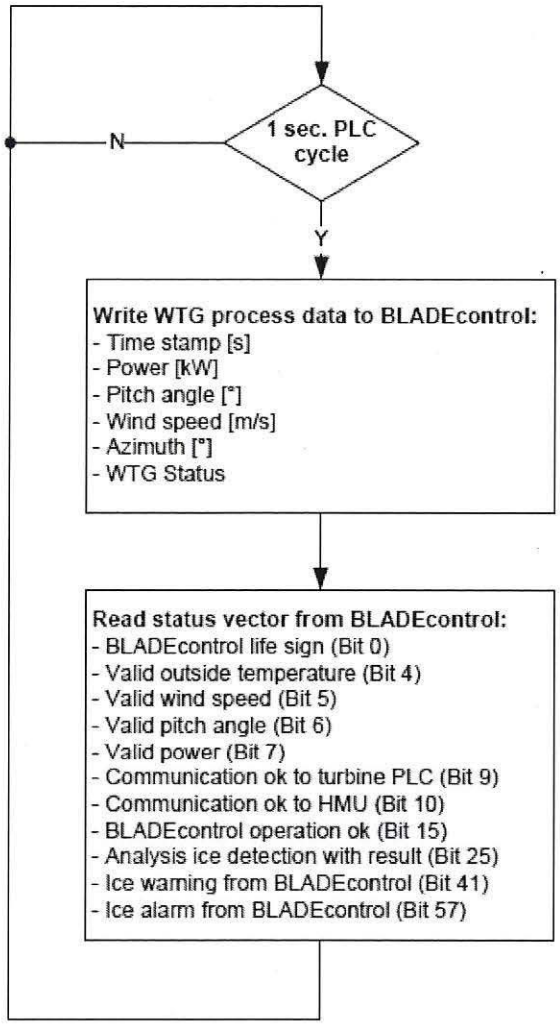


Abbildung 2: Kommunikation ECU und Betriebsführung

Die Funktion des Eiserkennungssystems, d.h. die Betriebs- und Kommunikationsfähigkeit, wird vom System selbst ständig überwacht. Sofern diese nicht bestätigt werden kann, wird über die Status Meldung SM489 („BLADEcontrol icing analysis missing") ein Betrieb der WEA verhindert. Die WEA verbleibt dann abgeschaltet im Trudelbetrieb bzw. wird mit dem für derartige Fehler bei GE WEA üblichen Bremsprogramm 2 (kontrollierter WEA-Stop) abgeschaltet.

Status Messages				
No	Description	Reset-Type	Braking Procedure	Priority
489	BLADEcontrol icing analysis missing	A	2	Information
490	BLADEcontrol ice detection warning	L/R	0	Warning
491	BLADEcontrol ice detection alarm	L/(A)	2	Information
492	BLADEcontrol communciation warning	L/R/A	0	Warning
493	BLADEcontrol communciation alarm	L/R/A	2	Fault

Tabelle 2.1 Status Messages

In Bezug auf die Meldung der Vereisung und die Kommunikationsbereitschaft gibt es drei Zustände:

1. Kein Alarm
2. Voralarm / Warnung (Warnschwelle überschritten)
3. Alarm (Alarmschwelle überschritten).

Eine Abschaltung der WEA mit Bremsprogramm 2 erfolgt erst bei anstehendem Signal „ice detection alarm“ oder „communication alarm“. Bei den jeweiligen Warnungen erfolgt hingegen keine Abschaltung, die WEA verbleibt mit einer entsprechenden Statusmeldung im Betrieb bzw. in Bereitschaft.

Die Stufe „communication warning“ bzw. Statusmeldung SM492 ist ausschließlich bei Außentemperaturen oberhalb der parametrierbaren Eiserkennungstemperatur (P48.18) möglich, sobald die Temperatur darunter sinkt, wird aus der Warnung automatisch ein Alarm.

In Abbildung 3 ist die Logik des Betriebsführungssystems in Bezug auf die Abschaltung bei Eiserkennung dargestellt.

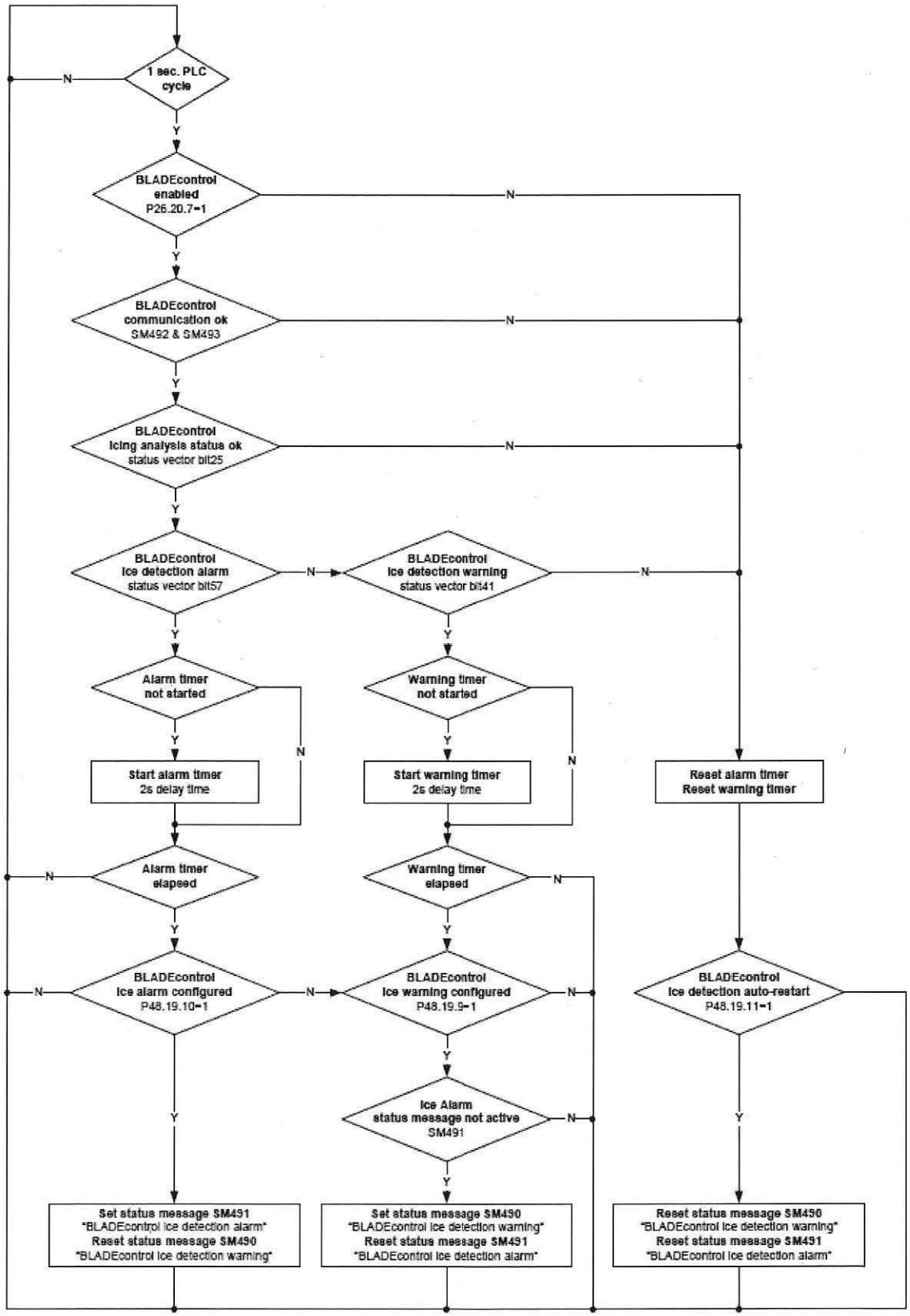


Abbildung 3: Logik Eiserkennung im BFS

Die Funktion der Anlagensteuerung selbst wird wiederum vom unabhängigen Sicherheitssystem der WEA überwacht („Watchdog"). Bei einem Ausfall des Betriebsführungssystems schaltet das hierarchisch übergeordnete Sicherheitssystem die WEA sicher ab.

2.3 Einbauverfahren und Inbetriebnahme

Die Montage von BLADEcontrol erfolgt entweder durch den Hersteller der Windenergieanlage, einen autorisierten Fachbetrieb oder durch die Weidmüller Monitoring Systems GmbH. Der finale Einbau des BLADEcontrol Eiserkennungssystems erfolgt vor Ort an der vollständig errichteten WEA. Zum Teil erfolgt eine Montage bspw. der Sensoren in den Blättern schon vorab, um den Aufwand vor Ort zu reduzieren. Das Einbauverfahren ist für alle Komponenten des Systems detailliert in der generischen Installationsanleitung /7/ beschrieben. Die Randbedingungen und Montagevoraussetzungen sind definiert.

Nach Installation und Anschluss aller Komponenten erfolgt im Rahmen der Inbetriebnahme des Systems eine systematische Funktionsprüfung /7/. Die ordnungsgemäße Funktion des Gesamtsystems wird mit Hilfe eines Testprogramms auf einem Laptop geprüft und dokumentiert. Die Signalerfassung und Weiterverarbeitung im BLADEcontrol System wird durch Anregung der Sensoren mit einem Hammer geprüft.

Dieses Testverfahren prüft nur die Funktion des Eiserkennungssystems und nicht die ordnungsgemäße Reaktion der WEA. Im Rahmen der Inbetriebnahme der WEA wird daher zusätzlich die Anbindung und Reaktion des Betriebsführungssystems geprüft. Die Funktionalität der Meldekette wird durch einen erfolgreich durchgeführten Abschalttest und ein entsprechendes Inbetriebnahmeprotokoll nachgewiesen /9/.

2.4 Parametrierung

BLADEcontrol bietet hinsichtlich der Alarmierung die Möglichkeit voreingestellte Grenzwerte auf die einzelnen WEA anzupassen. Die Parameter können nur von authentifiziertem und dafür autorisiertem Personal verändert werden. Dazu muss sich der Mitarbeiter auf dem Datenbackupserver mit seinem Login anmelden. Sämtliche Anpassungen werden hinsichtlich Login, Datum und Uhrzeit und Veränderung geloggt. Die veränderten Parameter werden daraufhin auf die ECU übertragen.

Für die folgenden von GE vorgesehenen Kombinationsmöglichkeiten sind die Parameter wie folgt einzustellen /8/:

1. Kombination
    a. BLADEcontrol aktiv
    b. Eisalarm mit Abschaltung der Turbine (SM491)
    c. BLADEcontrol Kommunikationsfehler führt zur Abschaltung der Turbine (SM493)
    d. Kein automatischer Wiederanlauf

Parameter			
No.	**Description**	**Unit**	**Value**
26.20 Bit 7	Enable BLADEcontrol	-	**1**
26.20 Bit 8	Turbine shutdown due to BLADEcontrol communication alarm	-	**1**
48.19 Bit 10	BLADEcontrol CBM system ice detection alarm	-	**1**
48.19 Bit 11	BLADEcontrol CBM system ice detection auto-restart	-	**0**

Tabelle 2.2 Parametereinstellungen 1

2. Kombination
    a. BLADEcontrol aktiv
    b. Eisalarm mit Abschaltung der Turbine (SM491)
    c. BLADEcontrol Kommunikationsfehler führt zur Abschaltung der Turbine (SM493)
    d. Automatischer Wiederanlauf

Parameter			
No	**Description**	**Unit**	**Value**
26.20 Bit 7	Enable BLADEcontrol	-	**1**
26.20 Bit 8	Turbine shutdown due to BLADEcontrol communication alarm	-	**1**
48.19 Bit 10	BLADEcontrol CBM system ice detection alarm	-	**1**
48.19 Bit 11	BLADEcontrol CBM system ice detection auto-restart	-	**1**

Tabelle 2.3 Parametereinstellungen 2

Der Parameter 48.18 bestimmt die max. Temperatur für die Eiserkennungsfunktion. Dieser Wert ist nach /6/ auf 3°C einzustellen. Sofern erforderlich, lässt sich dieser Wert auch auf bspw. 5°C einstellen. Oberhalb dieser Temperatur erfolgt keine Abschaltung bei anstehendem Signal „Eisalarm“, da von einer Fehldetektion ausgegangen wird.

2.5 Wiederkehrende Prüfungen

Das Eiserkennungssystem BLADEcontrol ist aufgrund seiner Systemgestaltung sowie der Eigendiagnosefunktionen wartungsfrei. Störungen des Systems werden mittels seiner Eigendiagnosefunktionen der WEA-Steuerung über die jeweilige Schnittstelle und dem Monitoring-Center über die jeweilige Datenanbindung automatisch angezeigt. Aus

dem Monitoring Center heraus kann über die bestehende Datenanbindung eine detaillierte Fehlereingrenzung und Maßnahmenableitung erfolgen.

2.6 Vermeidung des Anfahrens bei Vereisung

Das Wiederanfahren der WEA nach Abschaltung aufgrund von Vereisung darf nur unter der Voraussetzung der Eisfreiheit geschehen. Grundsätzlich sind hierzu je nach Parametrierung (vgl. Kap. 2.4) zwei verschiedene Verfahren möglich:

1. Local Reset; Wiederanfahren nur nach Freigabe durch eine autorisierte Person vor Ort
2. Auto Reset / restart; das automatische Wiederanfahren der WEA erfolgt bei Signal „Eisfrei"

Ein Wiederanfahren nach einem Remote Reset über das Netzwerk ist dagegen nicht möglich, s. Abbildung 4.

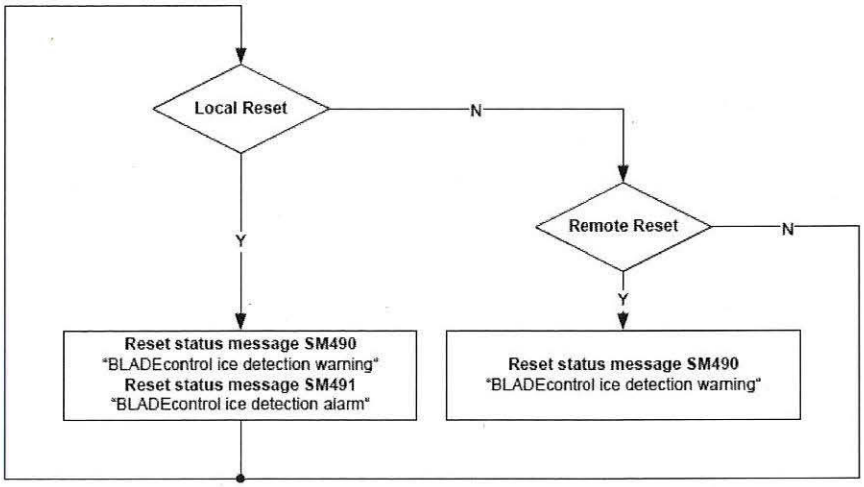


Abbildung 4: Freigabelogik nach Abschaltung durch Eisansatz

Die manuelle Freigabe nach Sichtprüfung auf Eisfreiheit durch eine geschulte und autorisierte Person vor Ort ist übliche Praxis und als ausreichend sicher zu bewerten.

Unter der Voraussetzung, dass das BLADEcontrol Eiserkennungssystem kritischen Eisansatz zuverlässig erkennt, ist ein automatisches Wiederanfahren als sicher zu bewerten. Die Zuverlässigkeit des Eiserkennungssystems ist nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

3 Bewertung

Bei anstehendem Signal „Eisalarm" wird die WEA automatisch vom Betriebsführungssystem abgeschaltet. Das Eiserkennungssystem BLADEcontrol ist für die untersuchten GE WEA kompatibel mit dem Konzept des Betriebsführungs- und Sicherheitssystems und die Einbindung in das Betriebsführungssystem erfolgt unter Berücksichtigung der definierten erforderlichen Schnittstellen.

Das Eiserkennungssystem erfüllt das für diese Systeme maßgebliche Einzelfehler-kriterium insofern, als dass bei einer Störung oder nicht bestätigter Bereitschaft des Eiserkennungssystems die WEA unterhalb von 3°C (parametrierbar) automatisch abgeschaltet wird. Die Frage der zuverlässigen Erkennung von kritischem Eisansatz am Rotorblatt wurde an dieser Stelle nicht bewertet.

Die Parametrierung der Anlage erfolgt im Rahmen der geregelten Inbetriebnahme und darf nur von autorisierten und dafür ausgebildeten Mitarbeitern vorgenommen werden.

Als Teil der Inbetriebnahme des Eiserkennungssystems in GE WEA werden die Signale des BLADEcontrol Systems (wie BLADEcontrol Ready, Eis-Voralarm, Eis-Alarm) im BLADEcontrol System simuliert und die Reaktion der WEA geprüft.

Das vorgesehene Verfahren des Wiederanfahrens nach Vereisung durch Sichtprüfung vor Ort wird als ausreichend sicher bewertet. Unter der Voraussetzung, dass das BLADEcontrol Eiserkennungssystem kritischen Eisansatz zuverlässig erkennt, ist ein automatisches Wiederanfahren ebenfalls als sicher zu bewerten.

Erstellt	Freigabe
Dipl.-Ing. L. Klüppel	Dipl.-Ing. O. Raupach

4 Dokumente und Literaturverzeichnis

4.1 Bewertete Dokumente

/1/ Weidmüller Monitoring Systems GmbH
BLADEcontrol Rotorblatt Condition Monitoring System
Dokumentation zur Zertifizierung, Teil 1: Systembeschreibung, Rev. 6

/2/ Weidmüller Monitoring Systems GmbH
BLADEcontrol Rotorblatt Condition Monitoring System
Dokumentation zur Zertifizierung
Teil 2: Funktionsbeschreibung zur Zustandsüberwachung, Rev. 4,

/3/ Weidmüller Monitoring Systems GmbH
BLADEcontrol Rotorblattüberwachung für Windenergieanlagen
Betriebsanleitung, WTD-21751-001_Betriebsanleitung_N_DE_161111

/4/ BLADEcontrol Eisdetektor
Dokumentation zur Zertifizierung des Systems BLADEcontrol durch den Germanischen Lloyd, TD-21690-011_N_DE_121114, Rev. 3

/5/ Weidmüller Monitoring Systems GmbH
Inbetriebnahme BLADEcontrol
WAA-21750-003, 2016-11-25

/6/ GE Energy
Ice Detection Features; Control Logic
Ice Detection Control Logic, Rev03, Date: 2018-05-30

/7/ Rexroth Bosch Group
BLADEcontrol, Installation and Commissioning,
generic version, V1.1_2014-07-09

/8/ GE Power & Water
Email von Christoph Schulten an Oliver Raupach, 2014-10-24

/9/ GE Power & Water
Email von Martin Essing an Oliver Raupach, 2014-10-24

4.2 Literatur & Quellen

/10/ DIN 1055-5. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten. Juli 2005.

/11/ DIBt. Muster – Liste der Technischen Baubestimmungen. Berlin. Fassung September 2013.

/12/ VTT Technical Research Centre of Finland. State-of-the-art of wind energy in cold climates. VTT WORKING PAPERS 152. ISBN 978-951-38-7493-3. 2010.

/13/ COST-727. Atmospheric Icing on Structures. Measurements and data collection on icing: State of the Art Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp. Zürich. 2006.

/14/ DIN 1055-5. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten. Juli 2005.

/15/ Seifert, H. Technische Ausrüstung von Windenergieanlagen an extremen Standorten. Wilhelmshaven. 2002.

/16/ Seifert, H., Richert, F. A recipe to estimate aerodynamics and loads on iced rotor blades, Boreas IV. Hetta, Finland, 1998.

/17/ Seifert, H. Technical requirements for rotor blades operating in cold climates Boreas VI. Pyhä, Finland, 2003.

/18/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.

/19/ DIBt. Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Berlin. Fassung Oktober 2012.

/20/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Hamburg. Ausgabe 2010.