



Industrie Service

**Mehr Sicherheit.  
Mehr Wert.**

# Unabhängige Analyse

für den Standort

## LANGENBRANDER HÖHE (BADEN-WÜRTTEMBERG)

**Bericht Nr.: MS-1403-048-BW-ICE-RA-de**

**Revision 01**

**Datum: 11.07.2018**

## Unabhängige Analyse von Eisfall mit Risikobewertung

Datum: 11.07.2018  
Revision: 01

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

Das Dokument besteht aus  
63 Seiten.  
Seite 1 von 63

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.



**Auftraggeber:**

**BayWa r.e. Wind GmbH**

Arabellastraße 4

D-81925 München

**Auftragnehmer:**

**TÜV SÜD Industrie Service GmbH**

**Abteilung Wind Cert Services**

Ludwig-Eckert-Str. 8

D-93049 Regensburg

**Angebot Nr.:**

**AN-WG-1804-084-BW**

**Berichtart:**

**Unabhängige Analyse von Eisfall**

**Standortbezeichnung:**

**Langenbrander Höhe**

**Land:**

**Baden-Württemberg, Deutschland**

**Bericht Nr.:**

**MS-1403-048-BW-ICE-RA-de**

**Revision:**

**01**

**Ausstellungsdatum:**

**11.07.2018**

**Status:**

**Endbericht**

**Vertraulichkeitsstufe:**

A  B  C

**Bericht verfasst von:**

**(Teilbereich Eisfallanalyse)**



---

**Dipl.-Geogr. Martin Unger**  
**(Abteilung Wind Cert Services)**

**Bericht geprüft von:**

**(Teilbereich Eisfallanalyse)**



**i.V.**

---

**Dipl.-Met. Michaela Stark**  
**(Abteilung Wind Cert Services)**

**Bericht verfasst von:**

**(Teilbereich Risikobewertung)**



---

**Dipl.-Phys. Thorsten Weidl**  
**(Abteilung Risikomanagement und  
Technische Due Diligence)**

**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
o. Nr.	04.04.2017	Unterlagenanforderung (Eisfall- und Risikoanalyse)
ICE-0	25.07.2017	Unabhängige Analyse von Eisfall
ICE-0	25.07.2017	Unabhängige Risikoanalyse zum Eisfall
ICE-RA-1	11.07.2018	Unabhängige Analyse von Eisfall mit Risikobewertung

## Änderungsrevision

Revision	Datum	Zusammenfassung der Änderungen
ICE-0	25.07.2017	Vollständiger Endbericht
RA-0	25.07.2017	Vollständiger Endbericht
ICE-RA-1	11.07.2018	Vollständiger Endbericht; Änderung der geplanten Anlagenkonfiguration sowie Änderung der meteorologischen Eingangsdaten

## 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	Vertraulichkeitsvereinbarung	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

<b>0</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Eingangsdaten für die Berechnungen.....</b>	<b>10</b>
2.1	Tabellarische und graphische Darstellung der Windparkkoordinaten .....	10
2.2	Anlagenspezifische Eingangsdaten .....	11
2.3	Meteorologische Eingangsdaten .....	12
2.3.1	Standortspezifische Windmessdaten .....	12
2.3.2	Generierte Windstatistik für die Eisfallberechnungen .....	12
2.3.3	Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage .....	13
2.4	Untersuchungsobjekte am Standort .....	14
<b>3</b>	<b>Darstellung der Berechnungsergebnisse für Eisfall bei Trudelbetrieb.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Ermittlung des von den Anlagen ausgehenden Gesamtrisikos .....</b>	<b>21</b>
4.1	Risiko für WEA01 .....	22
4.2	Risiko für WEA02.....	25
4.3	Risiko für WEA03.....	28
4.4	Risiko für WEA04.....	31
4.5	Risiko für WEA05.....	34
4.6	Risiko für Kranstellflächen und Zuwegung .....	36
<b>5</b>	<b>Hinweise zur Erstellung der Analyse.....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>41</b>
7.1	Eiswurf und Eisfall bei Windenergieanlagen .....	41
7.2	Theoretische Berechnungsgrundlagen von Eiswurf bzw. Eisfall.....	43
7.3	Annahmen für die Eisfallberechnungen .....	44
7.4	Berechnete Eisfallszenarien.....	44
7.5	Risiko und Risikoakzeptanzkriterien.....	46
7.5.1	Der Risikobegriff .....	46
7.5.1.1	Risikobewertung .....	46
7.5.1.2	Risikodarstellung - Risikomatrix .....	47
7.5.2	Risikoakzeptanzkriterien .....	49
7.5.2.1	Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) .....	49
7.5.2.2	Das ALARP-Prinzip.....	50
7.5.2.3	Kollektives Risiko .....	51
7.5.2.4	Im Rahmen der Untersuchung verwendete Akzeptanzkriterien .....	52
7.5.2.5	Vergleichsrisiken.....	54
7.6	Für die Risikoanalyse verwendete Methodik .....	55
7.6.1	Schadensausmaß.....	55

7.6.1.1 Die Probit-Funktion .....	55
7.6.1.2 Massenverteilung der Eisstücke.....	56
7.6.1.3 Ermittlung des mittleren Schadensausmaßes .....	57
7.6.2 Eintrittshäufigkeit.....	58
7.6.2.1 Betrachtete Expositionsszenarien .....	59
7.6.2.2 Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit $H_T$ , $P_T$ .....	60
7.6.2.3 Ermittlung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit $P_A$ .....	61
7.6.2.4 Berücksichtigung eines Reduktionsfaktors .....	61
7.6.2.5 Ermittlung der Gefährdungswahrscheinlichkeit.....	61
7.6.3 Ermittlung des Risikos für die einzelnen Szenarien und Gesamtrisiko .....	62
7.6.4 Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen.....	62
7.7 Abkürzungsverzeichnis .....	63

## 0 Einleitung

Dieser hier vorliegende Bericht beruht auf dem Angebot mit der Nr. AN-WG-1804-084-BW vom 16.04.2018 [3] sowie dem Nachtragsangebot mit der Nr. AN-WG-1807-154-BW vom 03.07.2018 [4]. Der Auftraggeber hat diese am 17.05.2018 bzw. 03.07.2018 beauftragt [5][6].

Der geplante Windpark trägt den Projektnamen Langenbrander Höhe. Die grobe Lokalisierung kann durch die Ortschaften Langenbrand und Höfen an der Enz, beide im Landkreis Calw, sowie Waldrennach im Landkreis Enzkreis in Baden-Württemberg erfolgen.

Vom Auftraggeber wurde eine Parkkonfiguration mit den jeweiligen Koordinaten der geplanten Windenergieanlagen (WEA) vorgegeben [7][25].

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

- Parkkonfiguration IV: 5 x Nordex N149 mit 4.5 MW Leistung, 164 m Nabenhöhe und einem Rotordurchmesser von 149 m.

Im Rahmen dieser Analyse wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Prüfung der gemäß der Richtlinie für Windenergieanlagen – Verwaltungsvorschrift über Technische Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage A1.2.8/6 [20] 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 sowie der Windverhältnisse am Standort.
- Bewertung der in der Umgebung der geplanten Anlagenstandorte verlaufenden Straßen und Wege bzw. weiterer Untersuchungsobjekte hinsichtlich ihrer Lage im ermittelten Gefährdungsbereich.
- Risikobewertung des Eisfalls für die im Einwirkungsbereich der geplanten Anlagenstandorte befindlichen Wege und Straßen sowie weiteren Untersuchungsobjekten.

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 [20] definierten Radius von  $1.5 \times$  (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 Langenbrander Höhe 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 5 Anlagen des Typs Nordex N149 mit einer Nennleistung von 4.5 MW, einer Nabenhöhe von 164 m und einem Rotordurchmesser von 149 m mitgeteilt [7][25]. Als Eiserkennungssystem an den geplanten Anlagen ist das IDD Blade-Eiserkennungssystem der Firma Wölfel vorgesehen.

Die gemäß der Richtlinie für Windenergieanlagen – Verwaltungsvorschrift über Technische Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage A1.2.8/6 [20] geforderten Unterlagen zur Funktionsicherheit 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 Verwaltungsvorschrift über Technische Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage A1.2.8/6 [20] sind Verkehrswege und Gebäude in einem Radius von 469.5 m um die geplanten Anlagen im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung der öffentlichen Sicherheit durch Eiswabwurf zu betrachten.

Die geplanten Anlagenstandorte sind von einem Forstwegsystem umgeben. Außerdem die geplanten Zuwegungen und Kranstellflächen sowie die in der nahen Umgebung der WEA vorzufindenden Nutzungswege des Schwarzwaldvereins betrachtet. Desweiteren wurden zwei Jagdkanzeln in die Untersuchung mit einbezogen. Nähere Angaben zu deren Lage sowie den jeweiligen Entfernungen zu den geplanten Anlagen sind im Abschnitt 2.4 zu finden.

Im Westen des geplanten Standorts verläuft von Nord nach Süd die Bundesstraße B294 sowie im Osten, ebenfalls von Nord nach Süd verlaufend, die Kreisstraße K4378. Im Norden ist die Kreisstraße 4581 zu verorten und im Süden die Landstraße L343. Die geringste Entfernung von den geplanten Anlagen zu diesen Straßen beträgt etwa 790 m. Auf Grund der großen Entfernungen befinden sich diese Straßen außerhalb des Eisfallbereichs. Das Gefährdungspotential durch Eisfall von der geplanten WEA01, WEA02, WEA 03, WEA04 und WEA05 am Standort Langenbrander Höhe kann für diese Straßen demnach als vernachlässigbar eingestuft werden und daher wurden diese nicht explizit als Untersuchungsobjekte betrachtet.

Für die Berechnungen wurden im Rahmen des Windgutachtens [8] für den Standort Langenbrander Höhe ermittelten Windfeldparameter verwendet. Die Daten dieser langzeiteingeordneten Windstatistik basieren auf der am geplanten Standort durchgeführten Windmessung [8].

Die der Windstatistik zugrundeliegenden meteorologischen Eingangsdaten stammen vom geplanten Standort, jedoch sind die Aufbereitungsprozesse, 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, der anhand der Windprognose [9] für die veränderten, aktuell verwendeten meteorologischen Eingangsparameter abgeschätzt wurde. Dabei wurde die Verteilung der Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Sektoren erhöht. Damit sind die ermittelten Eisfallweiten mit einer Unsicherheitsbetrachtung versehen und sind als 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, sollten folgende Maßnahmen umgesetzt werden.

Es wird empfohlen folgende Wege zu sperren oder als gleichwertige Alternative Hinweisschildern mit an das Eiserkennungssystem gekoppelten Warnleuchten aufzustellen:

- der Weg *B* an der Kreuzung zum Weg *F* (Verkehrsführung nach Norden über den Weg *F*);
- der Weg *N* an der Kreuzung zum Weg *I* (Verkehrsführung nach Osten oder Westen über den Weg *I*). Der Weg *N* beinhaltet zwar kein nennenswertes Risiko, dient aber als Zuwegung für die Wege *B* und *P*;
- der Weg *P* an der Wegekreuzung im Norden (Verkehrsführung über den kreuzenden Weg nach Osten oder Westen);
- der Weg *B* an der Kreuzung zum Weg *AG* (Verkehrsführung über den Weg *AG*).

Zusätzlich wird empfohlen an relevanten Zugängen zum Windpark Hinweisschilder mit an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchten zu platzieren, sodass Personen beim Betreten des Windparks ausreichend vor den Gefährdungen gewarnt werden.

Darüber hinaus sind alle Zuwegungen zu den Anlagen, die nicht zum ursprünglichen Wegesystem gehören, abzusichern (siehe auch Kapitel 4.6).

Sollten die Maßnahmen wie oben beschrieben umgesetzt sein und ein sicherer Winterweg ausgeschildert sein, kann auf spezielle Maßnahmen bei den Kranstellflächen (siehe Kapitel 4.6) verzichtet werden.

In folgender Abbildung 1 ist ein Vorschlag zur Anordnung von Wegsperrungen und Schildern dargestellt. An weiteren Wegen werden anforderungsgerecht Warnschilder empfohlen, die dazu dienen, die Personenströme auf den ausgeschilderten Wegen zu halten. Wie die endgültige Ausprägung und Positionierung der Warnhinweise umgesetzt sein muss, hängt stark von den tatsächlichen örtlichen Begebenheiten ab.

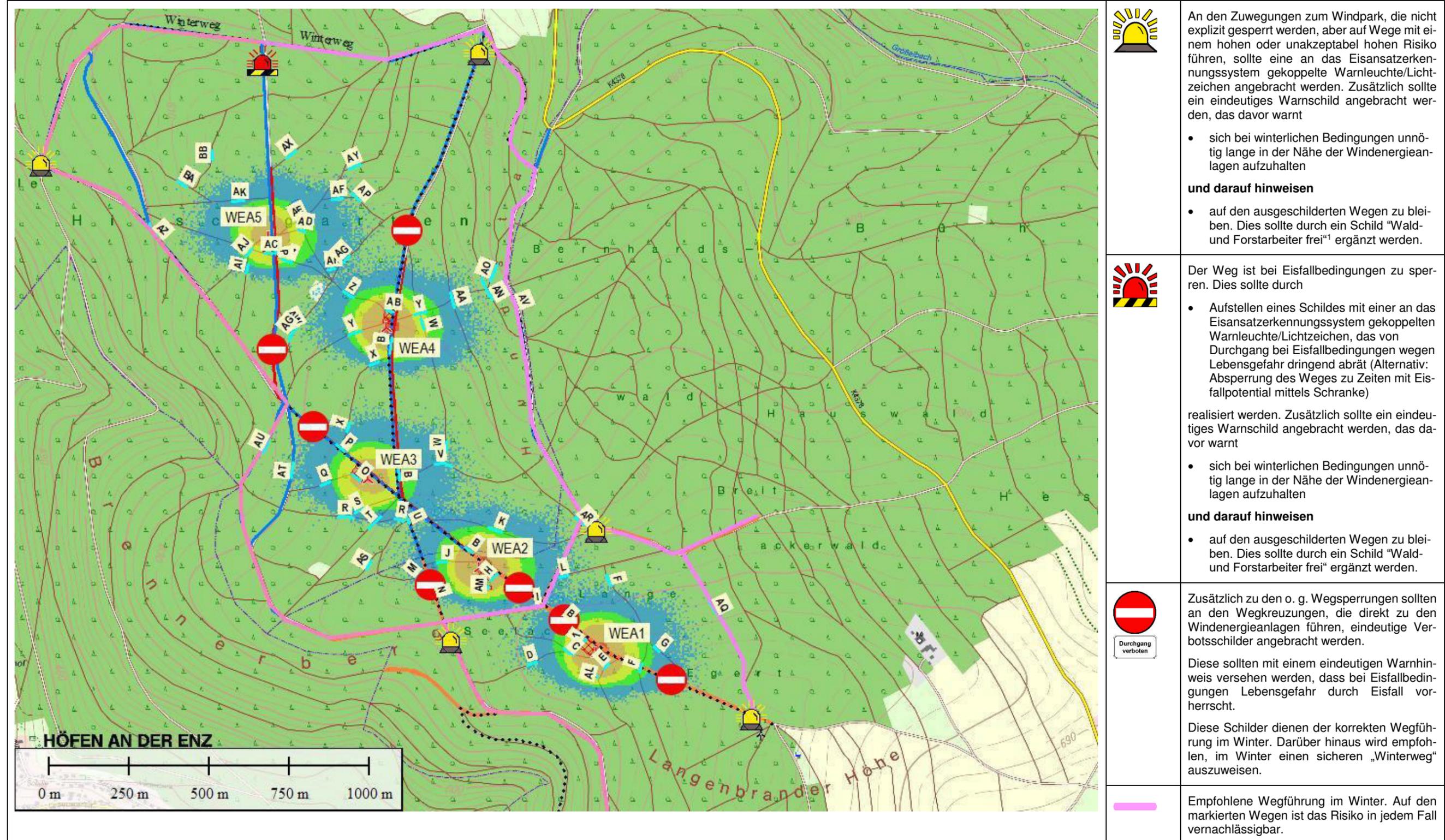


Abbildung 1: Vorschlag zur Umsetzung der Maßnahmen. Topographische Karte [23] mit den Standorten der geplanten WEA (↗) im Windpark Langenbrander Höhe inklusive der Risikoeinschätzung gemäß Kapitel 4.

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

## 2 Eingangswdaten für die Berechnungen

### 2.1 Tabellarische und graphische Darstellung der Windparkkoordinaten

Die Standortkoordinaten für den Windpark Langenbrander Höhe wurden vom Auftraggeber mitgeteilt [7] und werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Windparkkoordinaten					
Windpark Langenbrander Höhe	Koordinatensystem				Höhe ü.NN ca.
	Gauß-Krüger, DHDN, Zone 3		Geographisch, WGS84		Fußpunkt
	RW	HW	Ost	Nord	[m]
WEA 01	3'471'465	5'407'839	08°36'41"	48°48'30"	711
WEA 02	3'471'100	5'408'106	08°36'23"	48°48'39"	691
WEA 03	3'470'751	5'408'381	08°36'06"	48°48'48"	672
WEA 04	3'470'811	5'408'853	08°36'09"	48°49'03"	650
WEA 05	3'470'441	5'409'138	08°35'51"	48°49'12"	626

Tabelle 1: Koordinaten der geplanten Anlagen im Windpark Langenbrander Höhe (Konfiguration IV).

In der nachfolgenden Abbildung werden die geplanten Anlagenstandorte im Windpark Langenbrander Höhe graphisch dargestellt.

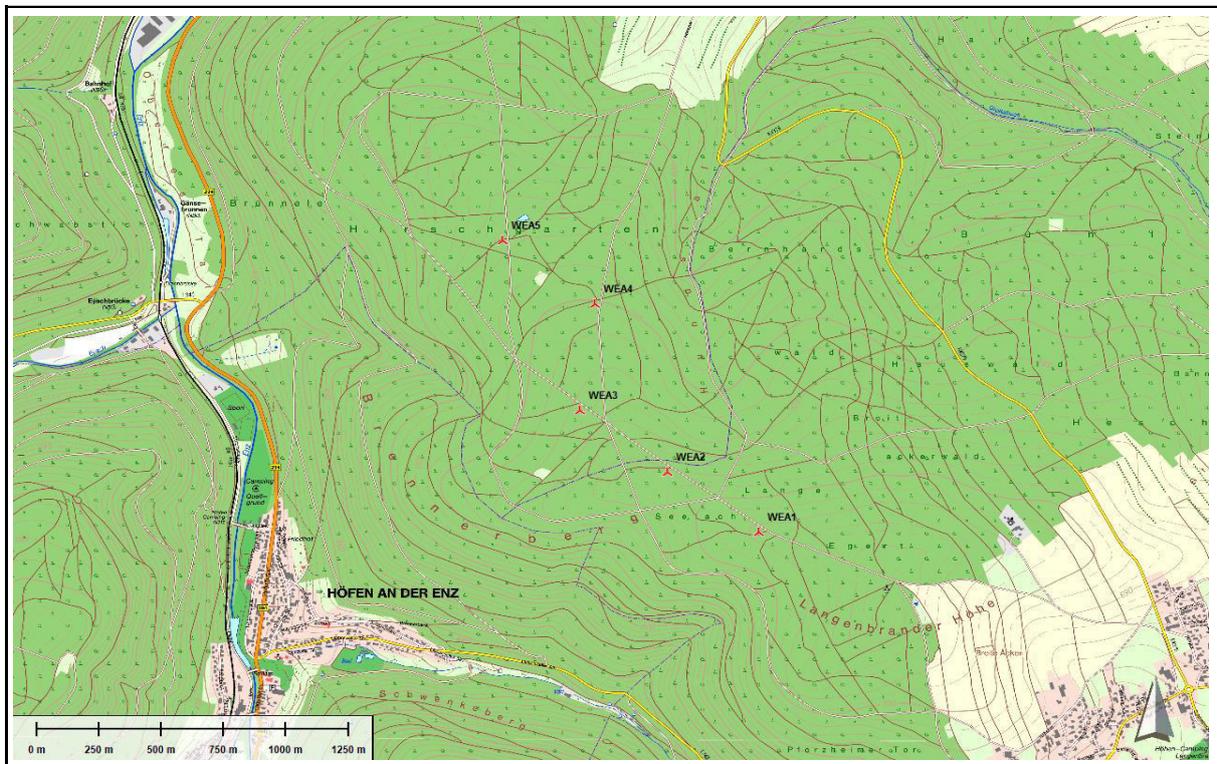


Abbildung 2: Topographische Karte [23] mit den Standorten geplanten WEA (📍) im Windpark Langenbrander Höhe.

## 2.2 Anlagenspezifische Eingangsdaten

Durch den Auftraggeber wurde eine Anlagenkonfiguration zur Berechnung am Standort Langenbrander Höhe vorgegeben [7][25].

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

Technische Daten							
Konfiguration	Hersteller / Typ	Leistung	Nabenhöhe	Rotordurchm.	Maximale Umdrehungszahl im Trudelbetrieb	Anforderungen gemäß Anlage 2.7/12 zur Richtlinie für Windenergieanlagen	
						Eiserkennungssystem	Integration in WEA-Technik
[-]	[-]	[MW]	[m]	[m]	[U/min]	[-]	[-]
IV	Nordex N 149	4.5 MW im Tagbetrieb	164	149	1.8	erfüllt	erfüllt

**Tabelle 2: Zusammenfassung der technischen Daten der geplanten WEA.**

Wie aus der Tabelle hervorgeht, erfüllt das an den geplanten WEA vorgesehene Eiserkennungssystem IDD BladeControl der Firma Wölfel die Anforderungen an die Verwaltungsvorschrift über technische Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage A1.2.8/6 [20]. Die 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.

Auch die Integration des Eiserkennungssystems erfüllt auf Basis der zur Verfügung gestellten Dokumente [26][27][27][29] die Anforderungen an die Verwaltungsvorschrift über technische Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage A1.2.8/6 [20].

Im Gutachten zur Bewertung der Funktionalität eines Eiserkennungssystems zur Verhinderung von Eisabwurf an NORDEX Windenergieanlagen (Bericht-Nr.: 8111 327 215 Rev.2, Abschnitt 5.5 vom 15.06.2017) [27] werden drei unterschiedliche Verfahren zum Wiederauffahren der Anlage nach einer Abschaltung aufgrund von Vereisung beschrieben: AutoStart, FernReset und VorortReset. Alle drei Arten des Wiederauffahrens werden in [27] als ausreichend sicher bewertet. Genauere Angaben sind dem obig genannten Dokument zu entnehmen.

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

Am Standort Langenbrander Höhe wurde eine Windmessung mittels eines LIDAR-Geräts durchgeführt.

Diese Messdaten, die für den Zeitraum vom 18.10.2016 bis 26.10.2017 vorlagen, wurden im Rahmen des durch die TÜV SÜD IS erstellten Windgutachtens [8] zur Erzeugung einer Windstatistik verwendet. Diese wird als repräsentativ angenommen.

### 2.3.2 Generierte Windstatistik für die Eisfallberechnungen

Für die Berechnungen wurde die auf Basis des Berechnungsmodells des Windgutachtens [8] für den Standort und für die hier betrachtete Nabenhöhe von 164 m generierte Windstatistik herangezogen. Diese erscheint für die Berechnungen 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 für die als Referenzpunkt gewählte WEA 01 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 0.30 ermittelt [8].

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	4.4	4.5	2.06
015 - 045	3.7	4.4	2.18
045 - 075	3.9	5.5	1.74
075 - 105	5.6	7.8	1.93
105 - 135	5.8	8.5	2.14
135 - 165	7.4	7.3	2.42
165 - 195	6.8	8.4	2.46
195 - 225	8.5	7.7	2.15
225 - 255	22.1	9.2	2.19
255 - 285	19.9	8.9	1.97
285 - 315	7.3	5.5	1.78
315 - 345	4.7	4.6	1.93
Summe/Mittelwert	100	7.74	1.92

**Tabelle 3:** Zusammenfassung der wichtigsten ermittelten Parameter der ausgewählten Windstatistik (ohne Unsicherheitszuschlag) für die geplante Nabenhöhe von 164 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 einer standortspezifischen Windmessung mit Unsicherheiten verbunden.

Daher wurde die Windstatistik mit einem Unsicherheitszuschlag versehen, der anhand der Windprognose [9] für die aktuell verwendeten meteorologischen Eingangsparameter abgeschätzt wurde. Aus der Unsicherheit der meteorologischen Eingangsdaten von 5.9% und der Unsicherheit der Windfeldmodellierung von 9.0% ergibt sich eine kombinierte Unsicherheit von 10.8%.

Es 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.

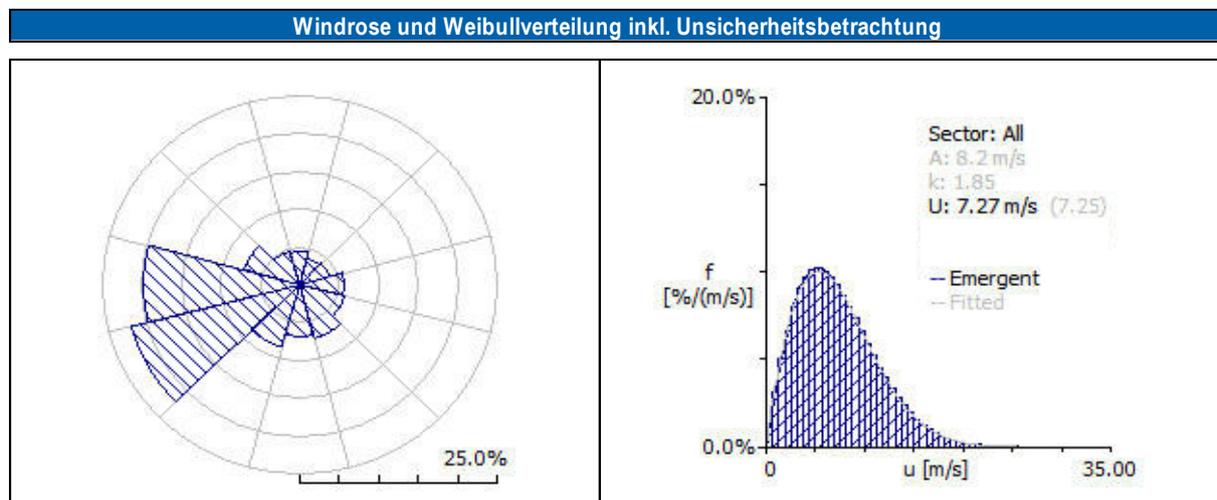


Abbildung 3: Ganzjährige Windrose und Histogramm der verwendeten Windstatistik für den Langenbrander Höhe.

### 2.3.3 Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage

In Anlehnung an [49] werden als Eingangsdaten für die Risikobewertung die Anzahl der Tage pro Jahr mit Eisfallpotenzial standortspezifisch abgeschätzt.

Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage	
Standort	Anzahl an Vereisungstagen
Langenbrander Höhe	25

Tabelle 4: Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage auf Basis von [49].

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 C-G, I-N, Q-AA, AD-AK und AN-BB) zwischen < 10 m und 395 m betragen.

Außerdem wurde die geplante Zuwegung zu den Anlagen sowie die Kranstellflächen durch den Auftraggeber mitgeteilt [34]. Die minimalen Abstände zu den Zuwegungen (B und P) betragen zwischen 10 m und 90 m. Für die nachfolgenden Bewertungen werden diese als befestigt betrachtet. Dies gilt auch für die Kranstellfläche (A, H, O, AB und AC). Die Kranstellflächen befinden sich naturgemäß sehr nahe der geplanten Anlagen, ihr Abstand wird daher mit 10 m angegeben.

Zudem wurden seitens des Auftraggebers auch Nutzungswege des Schwarzwaldvereins (Wege B, I, N, P, U, AV und AZ), die sich in der Umgebung des geplanten Windparks befinden, mitgeteilt [35] und in nachfolgender Bewertung berücksichtigt.

Desweiteren wurde durch den Auftraggeber mitgeteilt, dass sich südöstlich der geplanten Anlagen WEA01 und WEA02 Wildwiesen mit Kanzeln befinden, die im Winter zur Jagd genutzt werden. Entsprechend wurden die Jagdkanzeln als Untersuchungsobjekte AL und AM mit aufgenommen. Neben diesen beiden Jagdkanzeln wurde noch eine Schutzhütte durch den Auftraggeber mitgeteilt, die sich in der Nähe der WEA04 befindet. Da nach Auskunft des Auftraggebers diese im Rahmen der Errichtung der Windkraftanlagen rückgebaut wird, wird diese nicht als Untersuchungsgebiet mit aufgenommen [36].

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 Angabe auf die Genauigkeit der Kartengrundlage [23][24][34][35][36] zurückzuführen ist. Weiterhin werden in der folgenden Tabelle die relevanten Expositionsszenarien (Wegkategorien) gemäß Abschnitt 7.6.2.1 mit aufgeführt

In Abbildung 4 sind die Untersuchungsobjekte mit den Bezeichnungen A bis BB eingetragen.

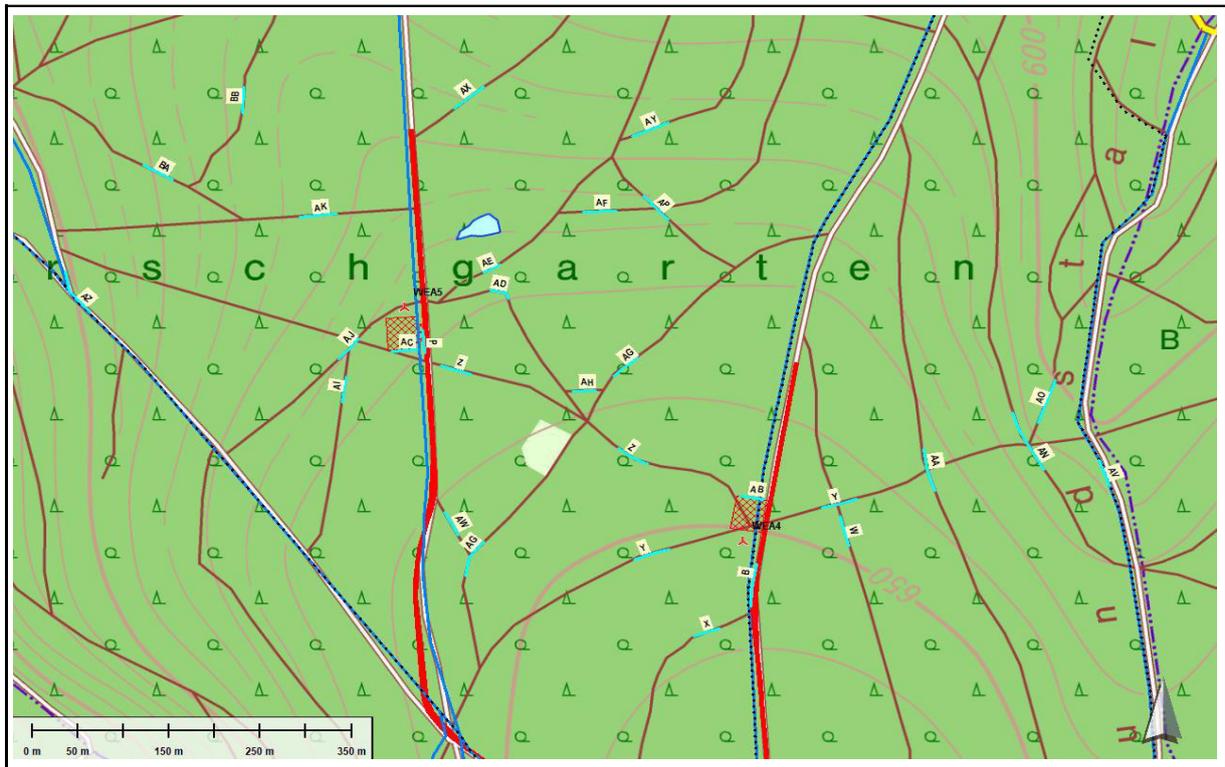
### Untersuchungsobjekte

Bezeichnung	Objekt	Minimaler Abstand zur jeweiligen WEA	Expositionsszenario (Wegekategorie)
A	Kranstellfläche	10 m (WEA01)	Siehe Kapitel 4.6
B	Zuwegung teils deckungsgleich mit Forstweg Calw (südlich) teils deckungsgleich mit Forstweg Enzkreis (nördlich) teils deckungsgleich mit Weg des Schwarzwaldvereins	20 m (WEA01) 20 m (WEA02) 90 m (WEA03) 10 m (WEA04)	regelmäßig
C	Waldweg	10 m (WEA01) 160 m (WEA02)	selten
D	Waldweg	90 m (WEA01)	selten
E	Waldweg	45 m (WEA01)	gelegentlich
F	Waldweg	140 m (WEA01) 390 m (WEA02)	häufig
G	Waldweg	160 m (WEA01)	normalerweise nicht
H	Kranstellfläche	10 m (WEA02)	Siehe Kapitel 4.6
I	Forstweg Calw teils deckungsgleich mit Weg des Schwarzwaldvereins	220 m (WEA01) 150 m (WEA02)	häufig
J	Waldweg	10 m (WEA02)	normalerweise nicht
K	Waldweg	125 m (WEA02) 230 m (WEA03)	normalerweise nicht
L	Waldweg	250 m (WEA01) 245 m (WEA02)	normalerweise nicht
M	Waldweg	170 m (WEA02)	gelegentlich
N	Forstweg Calw teils deckungsgleich mit Weg des Schwarzwaldvereins	155 m (WEA02)	regelmäßig
O	Kranstellfläche	10 m (WEA03)	Siehe Kapitel 4.6
P	Zuwegung teils deckungsgleich mit Forstweg Enzkreis (nördlich) teils deckungsgleich mit Weg des Schwarzwaldvereins	15 m (WEA03) 20 m (WEA05)	häufig
Q	Waldweg	30 m (WEA03)	gelegentlich
R	Waldweg	265 m (WEA02) 125 m (WEA03)	normalerweise nicht
S	Waldweg	80 m (WEA03)	normalerweise nicht
T	Waldweg	110 m (WEA03)	normalerweise nicht
U	Forstweg Enzkreis (nördlich) teils deckungsgleich mit Weg des Schwarzwaldvereins	180 m (WEA02) 120 m (WEA03)	regelmäßig
V	Waldweg	105 m (WEA03)	normalerweise nicht
W	Waldweg	245 m (WEA03) 110 m (WEA04)	normalerweise nicht
X	Waldweg	125 m (WEA03) 85 m (WEA04)	normalerweise nicht
Y	Waldweg	10 m (WEA04)	selten
Z	Waldweg	15 m (WEA04) 55 m (WEA05)	selten

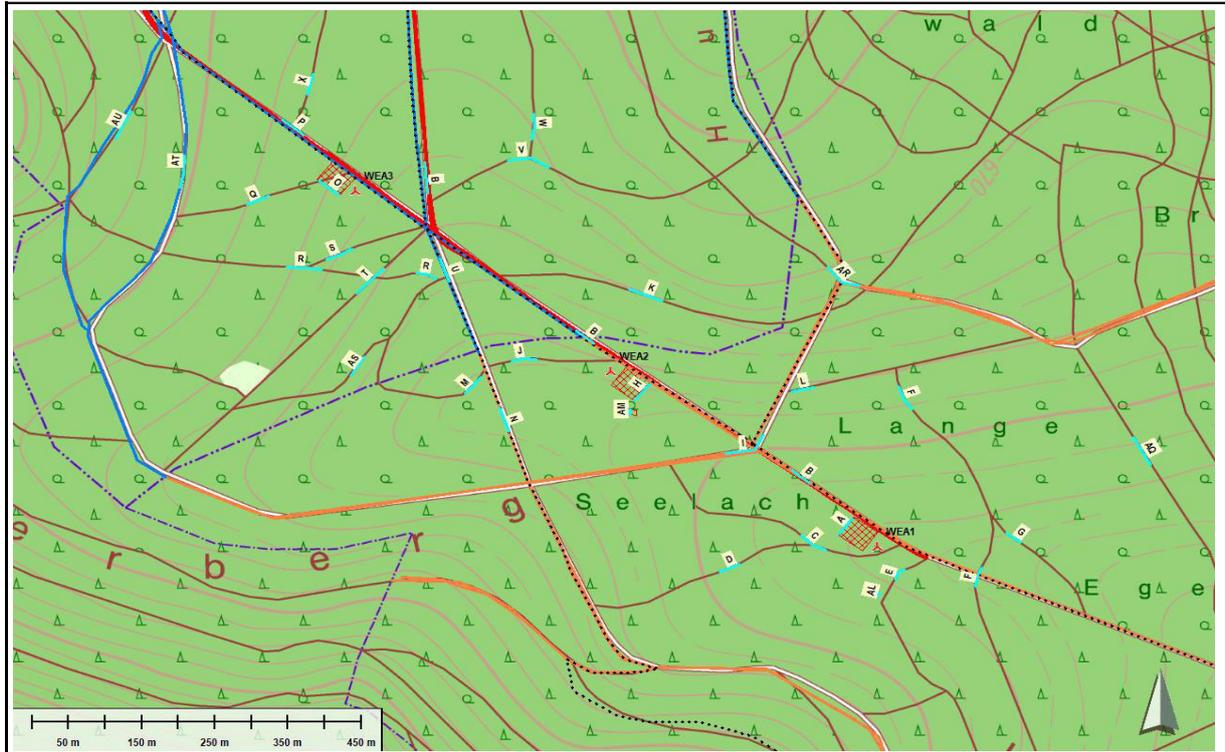
**Tabelle 5: Objekte in der Umgebung der geplanten Anlagenstandorte – Teil 1.**

Bezeichnung	Objekt	Minimaler Abstand zur jeweiligen WEA	Expositionsszenario (Wegekatgorie)
AA	Waldweg	220 m (WEA04)	selten
AB	Kranstellfläche	10 m (WEA04)	Siehe Kapitel 4.6
AC	Kranstellfläche	10 m (WEA05)	Siehe Kapitel 4.6
AD	Waldweg	225 m (WEA04) 35 m (WEA05)	normalerweise nicht
AE	Waldweg	35 m (WEA05)	normalerweise nicht
AF	Waldweg	200 m (WEA05)	selten
AG	Waldweg	220 m (WEA04) 240 m (WEA05)	normalerweise nicht
AH	Waldweg	235 m (WEA04) 200 m (WEA05)	normalerweise nicht
AI	Waldweg	80 m (WEA05)	normalerweise nicht
AJ	Waldweg	< 10 m (WEA05)	normalerweise nicht
AK	Waldweg	115 m (WEA05)	normalerweise nicht
AL	Jagdkanzle	70 m (WEA01)	2h / Woche
AM	Jagdkanzle	65 m (WEA02)	2h / Woche
AN	Waldweg	330 m (WEA04)	selten
AO	Waldweg	330 m (WEA04)	normalerweise nicht
AP	Waldweg	280 m (WEA05)	normalerweise nicht
AQ	Waldweg	390 m (WEA01)	häufig
AR	Waldweg teils deckungsgleich mit Forstweg Calw	305 m (WEA02)	häufig
AS	Waldweg	305 m (WEA02)	normalerweise nicht
AT	Forstweg Enzkreis	230 m (WEA03)	gelegentlich
AU	Forstweg Enzkreis	325 m (WEA03)	gelegentlich
AV	Forstweg Enzkreis teils deckungsgleich mit Weg des Schwarzwaldvereins	395 m (WEA04)	häufig
AW	Waldweg	295 m (WEA04)	normalerweise nicht
AX	Waldweg	205 m (WEA05)	normalerweise nicht
AY	Waldweg	310 m (WEA05)	normalerweise nicht
AZ	Forstweg Enzkreis teils deckungsgleich mit Weg des Schwarzwaldvereins	270 m (WEA05)	häufig
BA	Waldweg	205 m (WEA05)	selten
BB	Waldweg	265 m (WEA05)	selten

**Tabelle 6: Objekte in der Umgebung der geplanten Anlagenstandorte – Teil 2.**



**Abbildung 4:** Topographische Karte [23] mit den untersuchten Objekten am geplanten Standort Langenbrander Höhe (mit den Buchstaben A bis BB gekennzeichnet) sowie Standorte der geplanten WEA (  ). Die Zuwegung ist rot eingefärbt sowie die Kranstellflächen rot schraffiert sind. Forstwege Calw sind in orange, Forstwege Enzkreis in blau, Nutzungswege des Schwarzwaldvereins in schwarzer, gestrichelter Linienführung dargestellt. Die Umgriffe der Jagdkanzeln sind in roter Farbe horizontal gestreift – nördlicher Teil.

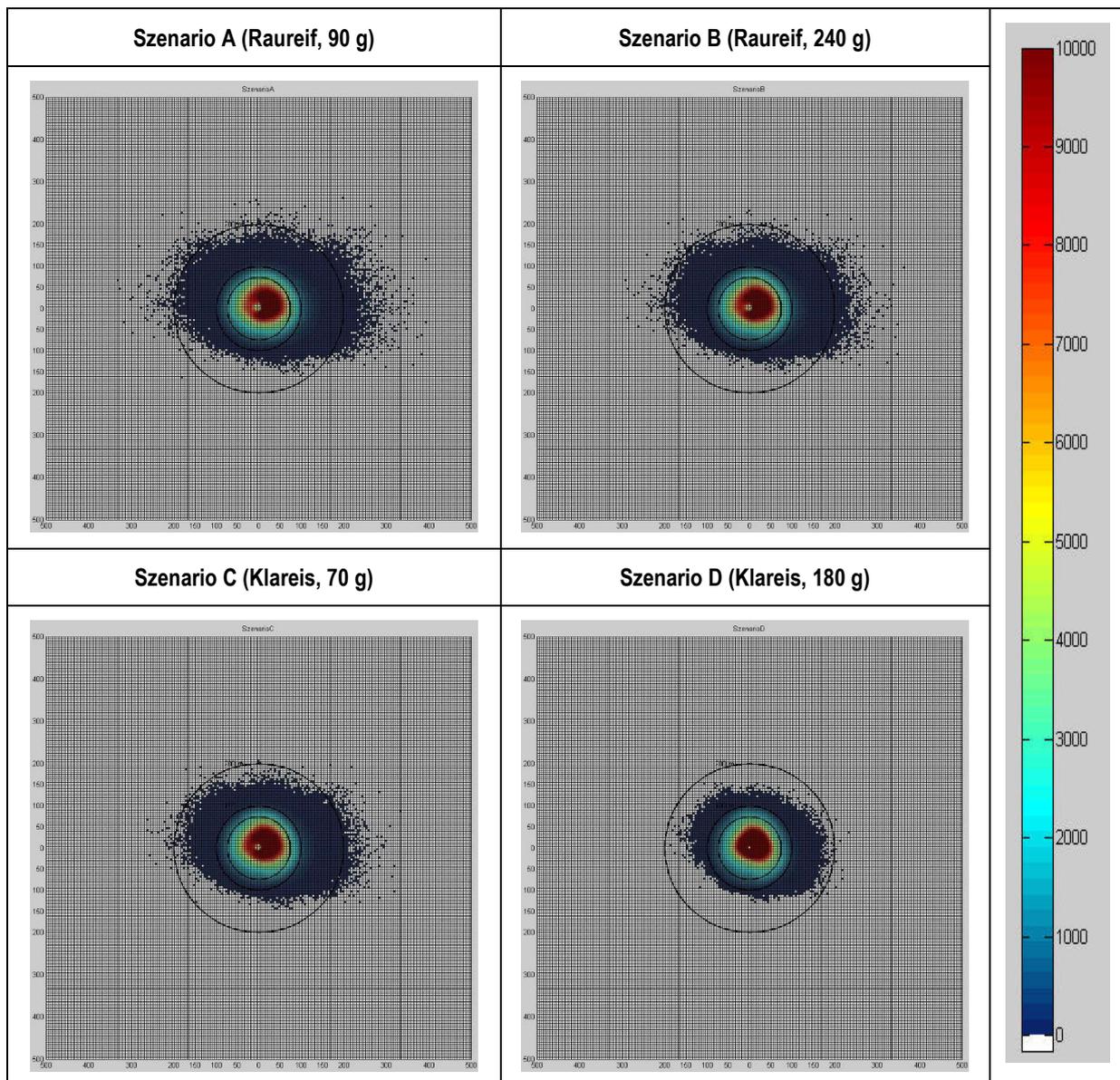


**Abbildung 5:** Topographische Karte [23] mit den untersuchten Objekten am geplanten Standort Langenbrander Höhe (mit den Buchstaben A bis BB gekennzeichnet) sowie Standorte der geplanten WEA (  ). Die Zuwegung ist rot eingefärbt sowie die Kranstellflächen rot schraffiert sind. Forstwege Calw sind in orange, Forstwege Enzkreis in blau, Nutzungswege des Schwarzwaldvereins in schwarzer, gestrichelter Linienführung dargestellt. Die Umgriffe der Jagdkanzeln sind in roter Farbe horizontal gestreift – südlicher Teil.

### 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 m<sup>2</sup> 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 74.5 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 fünf geplanten Anlagenstandorte im Windpark Langenbrander Höhe 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 ostnordost- bzw. ostseitig der Anlage berechnet. Dies kommt zum einen durch die vorwiegend westsüdwest- bzw. westliche 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 W sowie auch O und OSO aufweisen.

Zum anderen spielt auch die Ausrichtung der Anlage im rechten Winkel zur jeweiligen Windrichtung eine wichtige Rolle. Da der westsüdwestliche und westliche Sektor 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 Nordnordwest-Südsüdost-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 gut 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 den betrachteten Szenarien A und B berechnet. Hierbei sind einzelne Treffer bis zu 405 m von der Anlage simuliert worden, wobei die ermittelten Treffer ab einer Entfernung von ca. 245 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 4.6 werden die Risiken für alle Objekte aus Tabelle 5 und Tabelle 6 ermittelt, dargestellt und ggf. Maßnahmen empfohlen. Objekte, die hier nicht betrachtet werden, obwohl sie in einem Abstand von  $1.5 \times$  (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) [20] liegen, wurden entweder nicht zur Begutachtung beauftragt, oder es ist offensichtlich, dass das Risiko vernachlässigbar ist, da keine Treffer bzw. nur Einzeltreffer ermittelt wurden.

### 4.1 Risiko für WEA01

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA01 dargestellt sowie ein Umkreis von 469.5 m um diese WEA, der einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [20] 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.

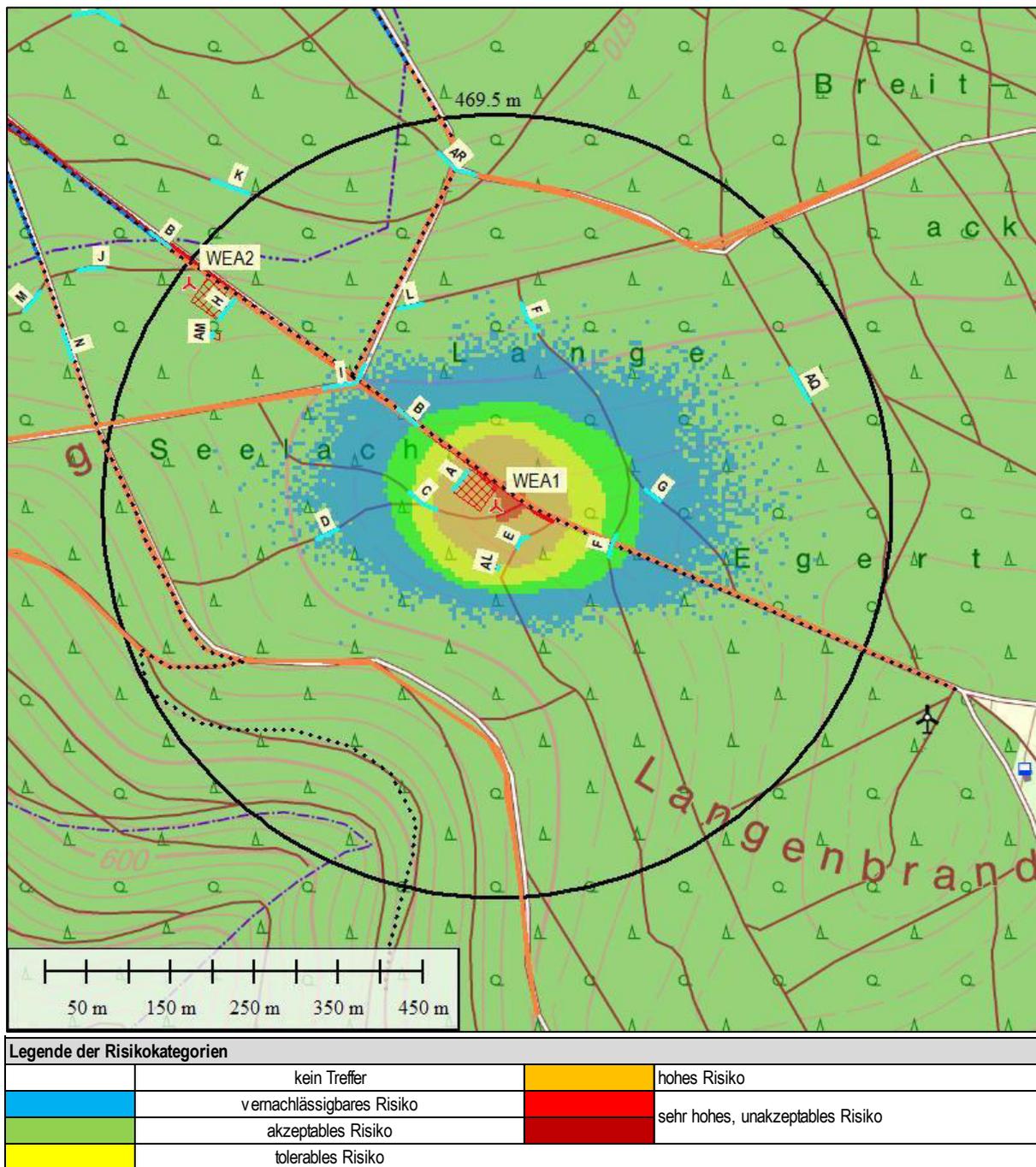


Abbildung 7: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA01 inklusive des Umkreises von 469.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf regelmäßig benutzten Wegen (Weg B).

In der folgenden Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA01 zusammengefasst.

Risikobewertung der WEA01			
Objekt	Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen	Empfohlene Maßnahmen	Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen
A	Siehe Kapitel 4.6		---
B	1.07E-05 (unakzeptabel)	Mittels Wegsperrungen und Warnschildern sollten Fußgänger bei Eisfallbedingungen auf dem Wegesystem derart geleitet werden, dass sie nicht auf dem Weg an der WEA vorbeikommen. Dies kann durch einen der folgenden Punkte realisiert werden:  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Absperrung des Weges mittels Schranke zu Zeiten mit Eisfallpotential</li> <li>• Aufstellen einer Beschilderung mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das vom Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät</li> </ul>	tolerabel
C	2.96E-07 (tolerabel)	Aufstellen eines Schildes, das ausdrücklich davor warnt, den Weg bei Eisfallbedingungen zu benutzen. Dieses Schild soll insbesondere dazu dienen, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen nicht beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.	akzeptabel
D	9.25E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
E	4.46E-07 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
F	1.76E-08 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
G	2.07E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
I	4.72E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
L	5.55E-14 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AL	2.65E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
Weg zu AL	3.48E-07 (tolerabel)	Aufstellen eines Schildes, das ausdrücklich davor warnt, den Weg bei Eisfallbedingungen zu benutzen. Dieses Schild soll insbesondere dazu dienen, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen nicht beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.	akzeptabel
AQ	3.50E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

**Tabelle 7: Risiken ausgehend von der WEA01.**

Für den Weg *B*, der direkt an der WEA vorbeiführt, liegt das Risiko im unakzeptablen Bereich. Eine Benutzung des Weges bei Eisfallbedingungen muss unter allen Umständen vermieden werden. Durch intelligente Wegführung im Winter, insbesondere aber durch Wegsperrungen an den richtigen Stellen, kann das Risiko jedoch in den tolerablen 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 den Weg *C* sowie einer Zuwegung zur Jagdkanzel *AL* wurde ein tolerables Risiko ermittelt. Dieses Risiko kann dadurch weiter reduziert werden, dass am Eingang zum Windpark, idealerweise dort, wo die o. g. Wegsperrungen vorgenommen werden sollten, Warnhinweise angebracht werden. Diese sollten davor warnen, sich bei winterlichen Bedingungen unnötig lange in der Nähe der Windenergieanlagen aufzuhalten und darauf hinweisen, auf den ausgeschilderten Wegen zu bleiben.

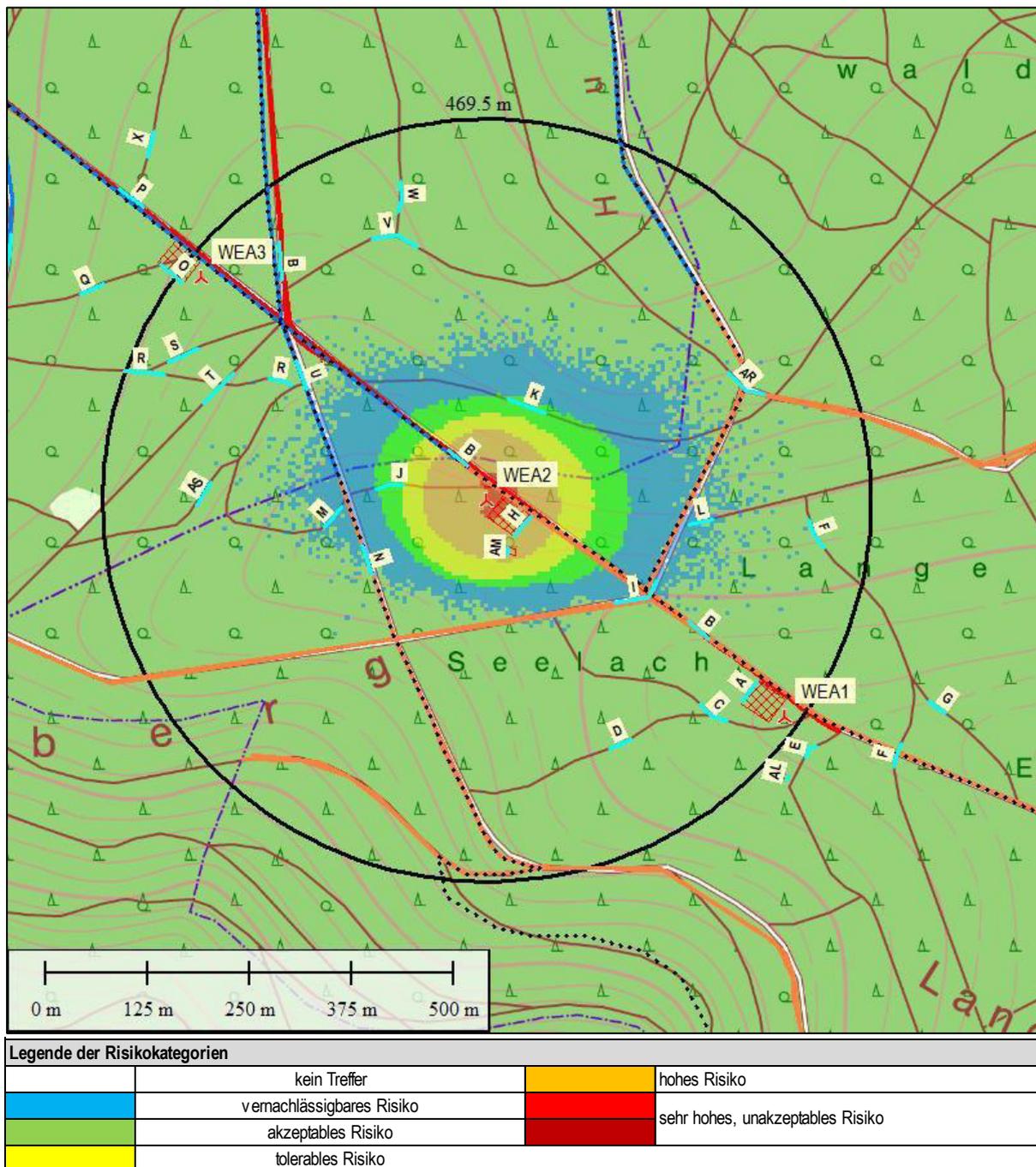
Für die Jagdkanzel *AL* wurde – unter der Voraussetzung, dass sie überdacht ist – ein akzeptables Risiko ermittelt, besondere Maßnahmen sind hier nicht notwendig.

Für alle anderen Wege liegt das Risiko im akzeptablen oder vernachlässigbaren Bereich, Maßnahmen zur Risikoreduzierung sind hier nicht notwendig.

Die Risikobeurteilung für die Kranstellfläche *A* erfolgt gesondert im nachfolgenden Kapitel 4.6. Eine Empfehlung zur Maßnahmenumsetzung ist bereits in Abschnitt 1 erfolgt.

## 4.2 Risiko für WEA02

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA02 dargestellt sowie ein Umkreis von 469.5 m um diese WEA, der einem Abstand von  $1.5 \times$  (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [20] 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.



**Abbildung 8:** Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA02 inklusive des Umkreises von 469.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf regelmäßig benutzten Wegen (Weg B).

In der folgenden Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA02 zusammengefasst.

Risikobewertung der WEA02			
Objekt	Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen	Empfohlene Maßnahmen	Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen
B	1.07E-05 (unakzeptabel)	Mittels Wegsperrungen und Warnschildern sollten Fußgänger bei Eisfallbedingungen auf dem Wegesystem derart geleitet werden, dass sie nicht auf dem Weg an der WEA vorbeikommen. Dies kann durch einen der folgenden Punkte realisiert werden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Absperrung des Weges mittels Schranke zu Zeiten mit Eisfallpotential</li> <li>• Aufstellen einer Beschilderung mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das vom Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät</li> </ul>	tolerabel
C	1.75E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
F	3.50E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
H	Siehe Kapitel 4.6		---
I	4.22E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
J	9.89E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
K	1.64E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
L	4.91E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
M	1.52E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
N	3.25E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
R	1.57E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
U	8.45E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AM	3.34E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
Weg zu AM	4.40E-07 (tolerabel)	Aufstellen eines Schildes, das ausdrücklich davor warnt, den Weg bei Eisfallbedingungen zu benutzen. Dieses Schild soll insbesondere dazu dienen, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen nicht beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.	akzeptabel
AR	1.24E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AS	3.91E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

**Tabelle 8: Risiken ausgehend von der WEA02.**

Für den Weg *B*, der direkt an der WEA vorbeiführt, liegt das Risiko im unakzeptablen Bereich. Eine Benutzung des Weges bei Eisfallbedingungen muss unter allen Umständen vermieden werden. Durch intelligente Wegführung im Winter, insbesondere aber durch Wegsperrungen an den richtigen Stellen, kann das Risiko jedoch in den tolerablen 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 die Zuwegung zur Jagdkanzel *AM* wurde ein tolerables Risiko ermittelt. Dieses Risiko kann dadurch weiter reduziert werden, dass am Eingang zum Windpark, idealerweise dort, wo die o. g. Wegsperrungen vorgenommen werden sollten, Warnhinweise angebracht werden. Diese

sollten davor warnen, sich bei winterlichen Bedingungen unnötig lange in der Nähe der Windenergieanlagen aufzuhalten und darauf hinweisen, auf den ausgeschilderten Wegen zu bleiben.

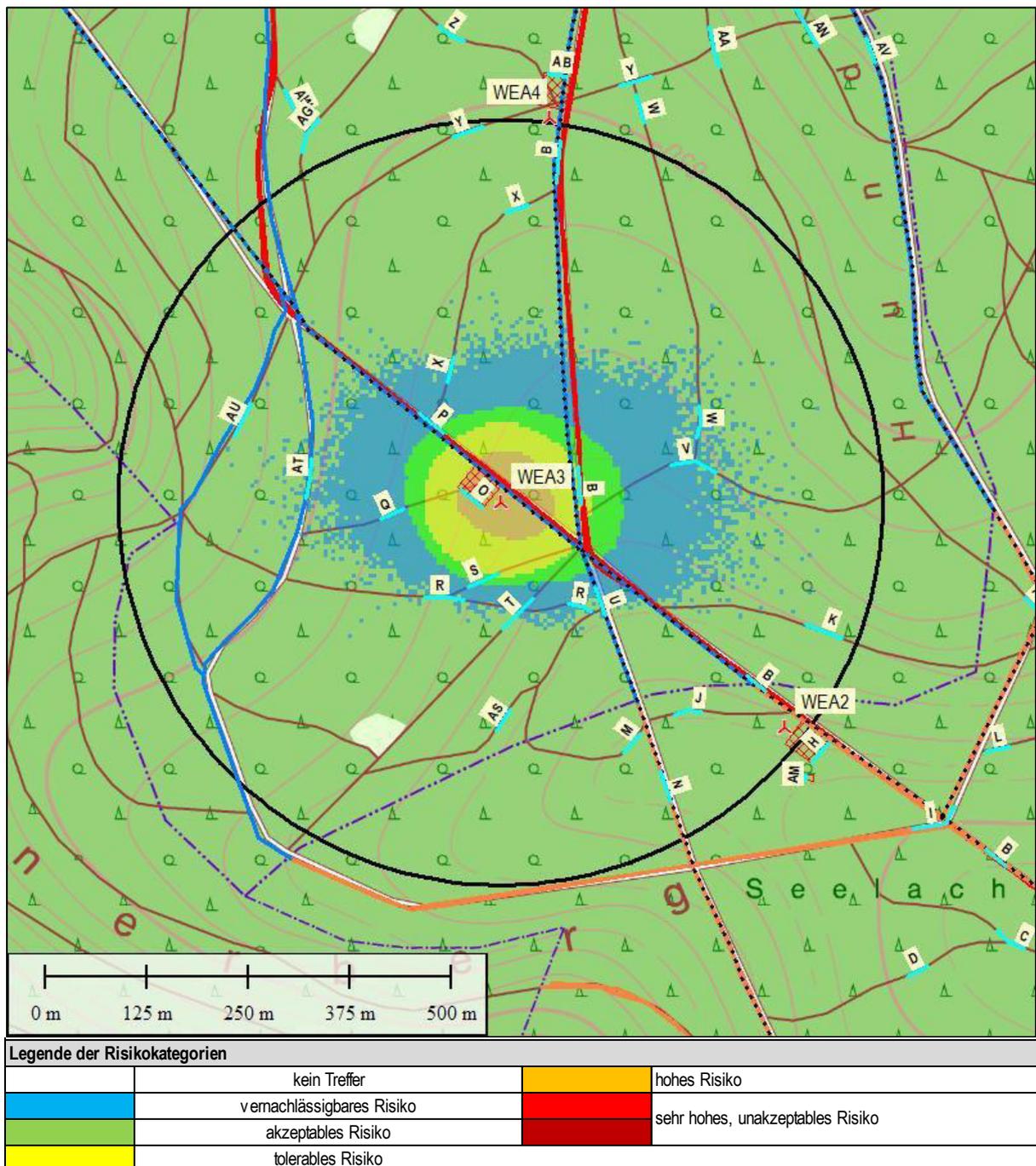
Für die Jagdkanzel *AM* wurde – unter der Voraussetzung, dass sie überdacht ist – ein akzeptables Risiko ermittelt, besondere Maßnahmen sind hier nicht notwendig.

Für alle anderen Wege liegt das Risiko im akzeptablen oder vernachlässigbaren Bereich, Maßnahmen zur Risikoreduzierung sind hier nicht notwendig.

Die Risikobeurteilung für die Kranstellfläche *H* erfolgt gesondert im nachfolgenden Kapitel 4.6. Eine Empfehlung zur Maßnahmenumsetzung ist bereits in Abschnitt 1 erfolgt.

### 4.3 Risiko für WEA03

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA03 dargestellt sowie ein Umkreis von 469.5 m um diese WEA, der einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [20] 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.



**Abbildung 9:** Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA03 inklusive des Umkreises von 469.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf häufig benutzten Wegen (Weg P).

In der folgenden Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA03 zusammengefasst.

Risikobewertung der WEA03			
Objekt	Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen	Empfohlene Maßnahmen	Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen
B	7.44E-07 (tolerabel)	Aufstellen eines Schildes, das ausdrücklich davor warnt, den Weg bei Eisfallbedingungen zu benutzen. Dieses Schild soll insbesondere dazu dienen, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen nicht beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.	akzeptabel
K	5.08E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
O	Siehe Kapitel 4.6		---
P	3.38E-06 (hoch)	Mittels Wegsperrungen und Warnschildern sollten Fußgänger bei Eisfallbedingungen auf dem Wegesystem derart geleitet werden, dass sie nicht auf dem Weg an der WEA vorbeikommen. Dies kann durch einen der folgenden Punkte realisiert werden:  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Absperrung des Weges mittels Schranke zu Zeiten mit Eisfallpotential</li> <li>• Aufstellen einer Beschilderung mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das vom Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät</li> </ul>	akzeptabel
Q	4.87E-07 (tolerabel)	Aufstellen eines Schildes, das ausdrücklich davor warnt, den Weg bei Eisfallbedingungen zu benutzen. Dieses Schild soll insbesondere dazu dienen, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen nicht beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.	akzeptabel
R	7.49E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
S	6.19E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
T	1.56E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
U	7.88E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
V	3.30E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
W	4.91E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
X	1.64E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AT	8.48E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AU	2.22E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

**Tabelle 9: Risiken ausgehend von der WEA03.**

Für den Weg *P*, der direkt an der WEA vorbeiführt liegt das Risiko im hohen Bereich. Eine Benutzung des Weges bei Eisfallbedingungen muss unter allen Umständen 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 die Wege *B* und *Q* wurde ein tolerables Risiko ermittelt. Dieses Risiko kann dadurch weiter reduziert werden, dass am Eingang zum Windpark, idealerweise dort, wo die o. g. Wegsperrungen vorgenommen werden sollten, Warnhinweise angebracht werden. Diese sollten davor

warnen, sich bei winterlichen Bedingungen unnötig lange in der Nähe der Windenergieanlagen aufzuhalten und darauf hinweisen, auf den ausgeschilderten Wegen zu bleiben.

Für alle anderen Wege liegt das Risiko im vernachlässigbaren Bereich, Maßnahmen zur Risikoreduzierung sind hier nicht notwendig.

Die Risikobeurteilung für die Kranstellfläche *O* erfolgt gesondert im nachfolgenden Kapitel 4.6. Eine Empfehlung zur Maßnahmenumsetzung ist bereits in Abschnitt 1 erfolgt.

#### 4.4 Risiko für WEA04

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA04 dargestellt sowie ein Umkreis von 469.5 m um diese WEA, der einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [20] 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.

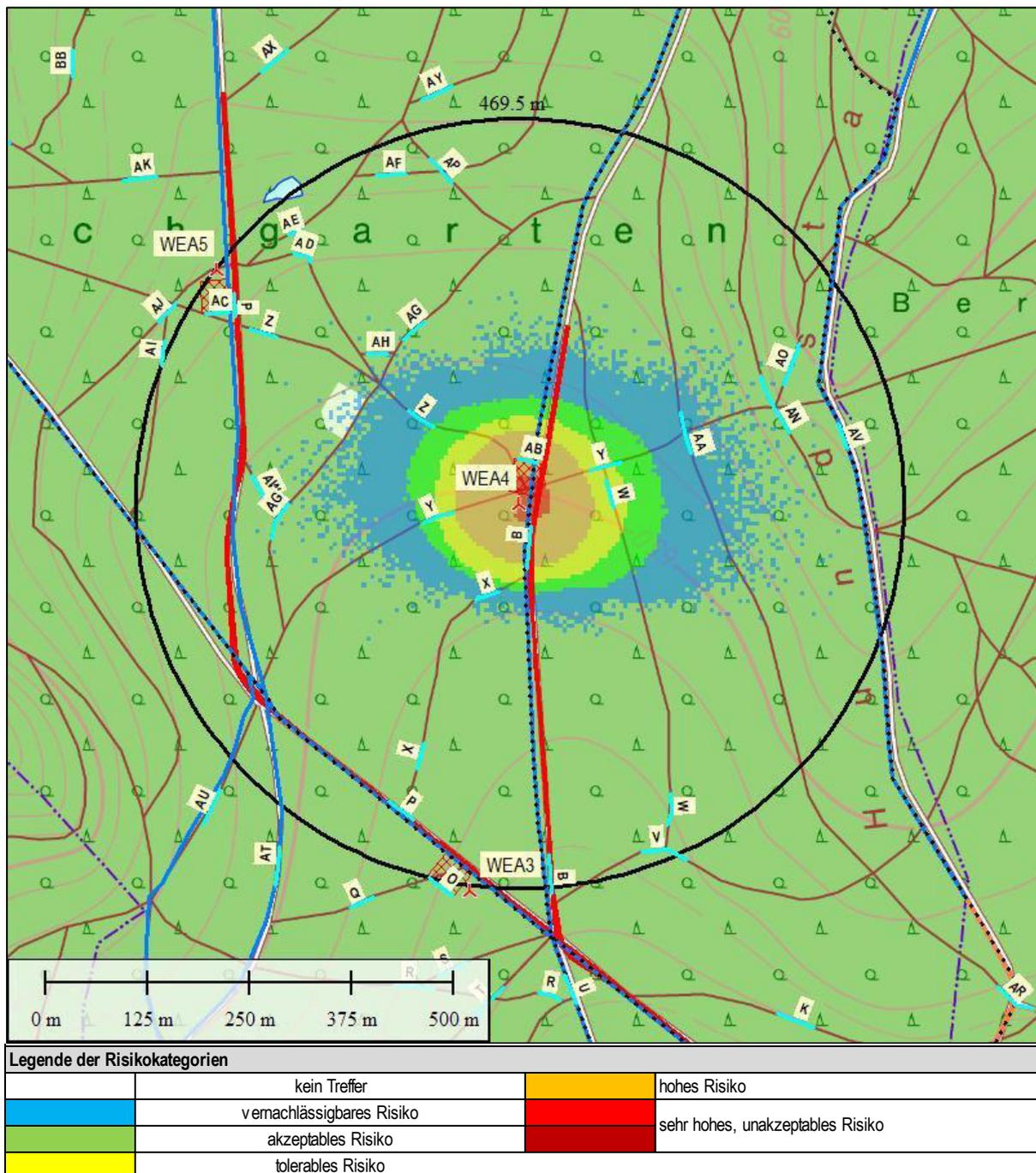


Abbildung 10: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA04 inklusive des Umkreises von 469.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf regelmäßig benutzten Wegen (Weg B).

In der folgenden Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA04 zusammengefasst.

Risikobewertung der WEA04			
Objekt	Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen	Empfohlene Maßnahmen	Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen
B	1.02E-05 (unakzeptabel)	Mittels Wegsperrungen und Warnschildern sollten Fußgänger bei Eisfallbedingungen auf dem Wegesystem derart geleitet werden, dass sie nicht auf dem Weg an der WEA vorbeikommen. Dies kann durch einen der folgenden Punkte realisiert werden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Absperrung des Weges mittels Schranke zu Zeiten mit Eisfallpotential</li> <li>• Aufstellen einer Beschilderung mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das vom Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät</li> </ul>	tolerabel
W	2.54E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
X	4.07E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
Y	3.13E-07 (tolerabel))	Aufstellen eines Schildes, das ausdrücklich davor warnt, den Weg bei Eisfallbedingungen zu benutzen. Dieses Schild soll insbesondere dazu dienen, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen nicht beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.	akzeptabel
Z	3.08E-07 (tolerabel)	Aufstellen eines Schildes, das ausdrücklich davor warnt, den Weg bei Eisfallbedingungen zu benutzen. Dieses Schild soll insbesondere dazu dienen, dass sich Personen bei Eisfallbedingungen nicht beliebig lange im Gefahrenbereich aufhalten.	akzeptabel
AA	4.01E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AB	Siehe Kapitel 4.6		---
AD	8.63E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AG	1.13E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AH	7.91E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AN	8.84E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AO	2.80E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AV	5.55E-14 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AW	5.55E-14 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

**Tabelle 10: Risiken ausgehend von der WEA04.**

Für den Weg B, der direkt an der WEA vorbeiführt liegt das Risiko im unakzeptablen Bereich. Eine Benutzung des Weges bei Eisfallbedingungen muss unter allen Umständen vermieden werden. Durch intelligente Wegführung im Winter, insbesondere aber durch Wegsperrungen an den richtigen Stellen, kann das Risiko jedoch in den tolerablen 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 die Wege Y und Z wurde ein tolerables Risiko ermittelt. Dieses Risiko kann dadurch weiter reduziert werden, dass am Eingang zum Windpark, idealerweise dort, wo die o. g. Wegsperrungen vorgenommen werden sollten, Warnhinweise angebracht werden. Diese sollten davor

warnen, sich bei winterlichen Bedingungen unnötig lange in der Nähe der Windenergieanlagen aufzuhalten und darauf hinweisen, auf den ausgeschilderten Wegen zu bleiben.

Die Risikobeurteilung für die Kranstellfläche *AB* erfolgt gesondert im nachfolgenden Kapitel 4.6.

Für alle anderen Wege liegt das Risiko im vernachlässigbaren Bereich, Maßnahmen zur Risikoreduzierung sind hier nicht notwendig.

Eine Empfehlung zur Maßnahmenumsetzung ist bereits in Abschnitt 1 erfolgt.

#### 4.5 Risiko für WEA05

Aus der folgenden Abbildung ist die Lage der Wege in Relation zur WEA05 dargestellt sowie ein Umkreis von 469.5 m um diese WEA, der einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [20] 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.

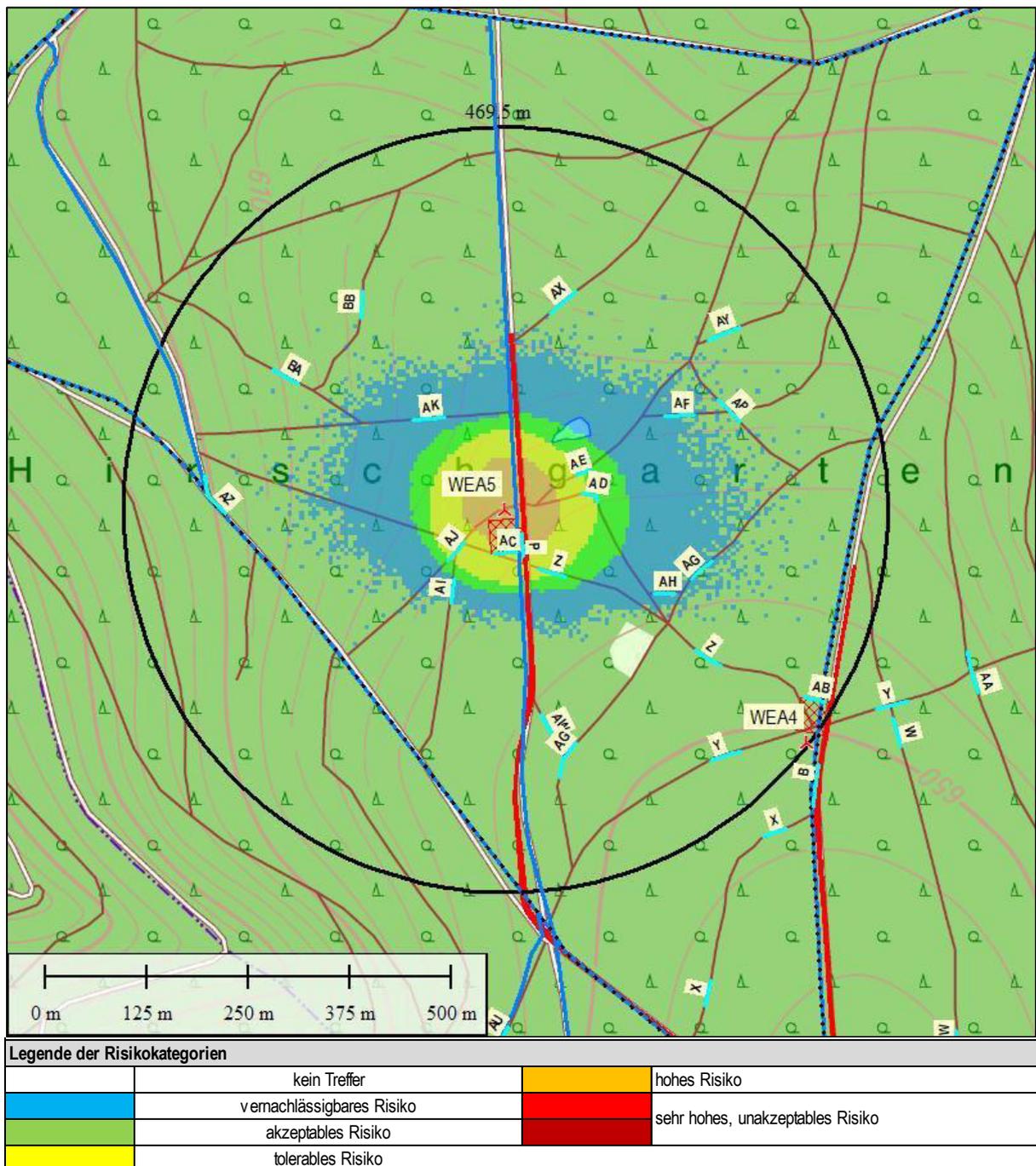


Abbildung 11: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA05 inklusive des Umkreises von 469.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf häufig benutzten Wegen (Weg P).

In der folgenden Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die WEA05 zusammengefasst.

Risikobewertung der WEA05			
Objekt	Risiko (1/a) ohne weitere Maßnahmen	Empfohlene Maßnahmen	Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen
P	3.18E-06 (hoch)	Mittels Wegsperrungen und Warnschildern sollten Fußgänger bei Eisfallbedingungen auf dem Wegesystem derart geleitet werden, dass sie nicht auf dem Weg an der WEA vorbeikommen. Dies kann durch einen der folgenden Punkte realisiert werden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Absperrung des Weges mittels Schranke zu Zeiten mit Eisfallpotential</li> <li>• Aufstellen einer Beschilderung mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das vom Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät</li> </ul>	akzeptabel
Z	6.58E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
AC	Siehe Kapitel 4.6		---
AD	7.36E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
AE	7.36E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
AF	4.03E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AG	1.58E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AH	9.72E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AI	6.05E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AJ	9.69E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
AK	3.80E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AP	1.56E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AX	6.12E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AY	5.55E-14 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
AZ	1.75E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
BA	6.96E-12 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
BB	4.96E-13 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

**Tabelle 11: Risiken ausgehend von der WEA05.**

Für den Weg *P*, der direkt an der WEA vorbeiführt liegt das Risiko im hohen Bereich. Eine Benutzung des Weges bei Eisfallbedingungen muss unter allen Umständen vermieden werden. Durch intelligente Wegführung im Winter, insbesondere aber durch Wegsperrungen an den richtigen Stellen, kann das Risiko jedoch in den tolerablen 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).

Die Risikobeurteilung für die Kranstellfläche *AC* erfolgt gesondert im nachfolgenden Kapitel 4.6.

Für alle anderen Wege liegt das Risiko im akzeptablen oder vernachlässigbaren Bereich, Maßnahmen zur Risikoreduzierung sind hier nicht notwendig.

Eine Empfehlung zur Maßnahmenumsetzung ist bereits in Abschnitt 1 erfolgt.

#### **4.6 Risiko für Kranstellflächen und Zuwegung**

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

Als **gleichwertige Alternative** zur Umzäunung kann auch ein Schild mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bzw. Aufenthalt bei Eisfallbedingungen dringend abrät, aufgestellt werden.

Hierdurch lässt sich das Risiko in den akzeptablen Bereich reduzieren.

## 5 Hinweise zur Erstellung der Analyse

- Bezugnehmend auf die Dokumente, die über die Eignung des Eiserkennungssystems zur zuverlässigen Abschaltung der Anlage bei Vereisung vorlagen (siehe Abschnitt 2.2), wurden die Berechnungen bei einer im Trudelbetrieb befindlichen Anlage durchgeführt. Eine Berechnung von Wurfweiten während des laufenden Betriebs fand nicht statt.
- Als Eingangsparameter für die Umdrehungszahl im Trudelbetrieb wurde die vom Anlagenhersteller mitgeteilte maximale Umdrehungszahl von 1.8 U/min verwendet [30].
- Für den Standort Langenbrander Höhe stand eine Windstatistik für einen repräsentativen Standort (Referenzpunkt WEA01) zur Verfügung, der standortspezifische Windmessdaten zugrunde liegen. Die ermittelte Windstatistik für die betrachtete Nabenhöhe von 164 m, basiert auf dem Windgutachten der TÜV SÜD Industrie Service GmbH [8].
- 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.
- In Bereichen mit steil abfallendem Gelände können Eisstücke durch Verlassen der Projektion der Treffer auf eine Ebene in der Realität leicht größere Fallweiten erreichen. Jedoch ist in den Berechnungsergebnissen eine Unsicherheitsbetrachtung implementiert, wodurch bereits vergrößerte Fallweiten und damit konservativere Ergebnisse berechnet wurden.
- Es ist ebenfalls 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 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-1804-084-BW, Regensburg, 16.04.2018
- [4] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Nachtragsangebot AN-WG-1807-154-BW, Regensburg, 03.07.2018
- [5] BayWa r.e. Wind GmbH, Herr Jakob Graf, Beauftragung Eisfallanalyse für WP Langenbrander Höhe, München, 17.05.2018
- [6] BayWa r.e. Wind GmbH, Herr Jakob Graf, Beauftragung des Nachtragsangebots Eisfallanalyse für WP Langenbrander Höhe, München, 03.07.2018
- [7] BayWa r.e. Wind GmbH, Herr Jakob Graf, Koordinaten des Windparks Langenbrander Höhe, E-Mail vom 19.06.2018
- [8] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Unabhängiges Windgutachten für den Standort Langenbrander Höhe, MS-1403-048-BW-WG-de, Rev.2 vom 11.12.2017
- [9] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Unabhängige Windprognose für den Standort Langenbrander Höhe, MS-1403-048-BW-WG-de, Rev.0 vom 10.07.2017
- [10] C. Morgan and E. Bossanyi, Wind turbine icing and public safety - a quantifiable risk?, Proceedings of Boreas III conference, Sariselka, Finland 1996
- [11] E. Bossanyi and C. Morgan, Wind turbine icing – its implications for public safety, Proceedings of European Union Wind Energy Conference 1996
- [12] C. Morgan, E. Bossanyi and H Seifert, Assessment of safety risks arising from wind turbine icing, Proceedings of EWEC '97 conference, Dublin 1997
- [13] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Richtlinie für Windenergieanlagen, Berlin (D), 2004
- [14] OVG-Rheinland-Pfalz, Urteil 1 A 11330/07.OVG vom 29.10.2008
- [15] René Cattin, Alpine Test Site Guetsch – Handbuch und Fachtagung (Schlussbericht), Bern, 31.12.2008
- [16] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Windenergienutzung – Technik, Planung und Genehmigung, Stuttgart, 4. Auflage, August 2003
- [17] 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
- [18] Richtlinie für Windenergieanlagen; Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, DIBT, 2004
- [19] 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
- [20] Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums und des Wirtschaftsministeriums über Technische Baubestimmungen (Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – VwV TB) vom 20. Dezember 2017 – Az: 45-2601.1/51 (UM) und Az: 5-2601.3 (WM)
- [21] Windenergieerlass Baden-Württemberg, Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, des Ministeriums für Ländlichen Raum

und Verbraucherschutz, des Ministeriums für Verkehr und Infrastruktur und des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft, Az.: 63-4583/404, 09.09.2012

- [22] Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage
- [23] Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, TOP10 Ortsplan 1:10'000 Baden-Württemberg, Version 1, 2008
- [24] Geoportal Baden Württemberg, Orthophoto nahe der geplanten WEA01 und WEA 02 bzgl. Jagdkanzeln, <http://www.geoportal-bw.de/geoportal/opencms/de/geoviewer.html>, Stand: 04.07.2017
- [25] BayWa r.e. Wind GmbH, Herr Jakob Graf, Informationen zum WEA-Typ für WP Langenbrander Höhe, E-Mail vom 07.06.2018
- [26] Nordex Energx GmbH, Roland Buschhaus, Informationen zum Eiserkennungssystem, E-Mail vom 19.06.2018, Anlage: K0801\_055240\_DE\_R01\_Rotorblatt\_Eisdetektion\_160428.pdf
- [27] Nordex Energx GmbH, Roland Buschhaus, Informationen zum Eiserkennungssystem, E-Mail vom 19.06.2018, Anlage: 2017-06-15 G 8111327215 Rev. 2 Zur Bewertung der Funktionalität eine Ei...pdf
- [28] Nordex Energx GmbH, Roland Buschhaus, Informationen zum Eiserkennungssystem, E-Mail vom 19.06.2018, Anlage: Übertragbarkeit IDD N117&N131 auf DELTA4000.pdf
- [29] Wölfel Engineering GmbH + Co. KG, Informationen zum Eiserkennungssystem – Zertifikat SHM.Blade/IDD.Blade, online verfügbar unter: <https://www.woelfel.de/fileadmin/unternehmen/zertifikate/SHM-IDD-Blade-certificate.pdf>; Stand: 20.06.2018
- [30] Nordex Energx GmbH, Roland Buschhaus, Informationen zum Trudelbetrieb, E-Mail vom 20.06.2018
- [31] BayWa r.e. Wind GmbH, Stefan Ziegler, Information zum Untersuchungsobjekt bzgl. WP Langenbrander Höhe, E-Mail vom 11.05.2017
- [32] BayWa r.e. Wind GmbH, Jakob Graf, Information zum Untersuchungsobjekt Jagdkanzel und Schutzhütte bzgl. WP Langenbrander Höhe, E-Mail vom 04.07.2017
- [33] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Martin Unger, Rückmeldung zu Information zum Untersuchungsobjekt bzgl. WP Langenbrander Höhe, E-Mail vom 11.05.2017 und 30.05.2017
- [34] BayWa r.e. Wind GmbH, Jakob Graf, Update-Information zum Untersuchungsobjekt Zuwegung und Kranstellflächen bzgl. WP Langenbrander Höhe, E-Mail vom 27.06.2018
- [35] BayWa r.e. Wind GmbH, Stefan Ziegler, Information zum Untersuchungsobjekt bzgl. WP Langenbrander Höhe, E-Mail vom 11.05.2017
- [36] BayWa r.e. Wind GmbH, Jakob Graf, Information zum Untersuchungsobjekt Jagdkanzel und Schutzhütte bzgl. WP Langenbrander Höhe, E-Mail vom 04.07.2017
- [37] Internetportal des Bureau of Transportation Statistics (BTS), <http://www.bts.gov/btsprod/nts/>
- [38] DIN EN 50126 - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit (RAMS), März 2000
- [39] Health and Safety Executive (HSE), *ALARP-Prinzip* <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarplance.htm>
- [40] Health and Safety Executive (HSE), *The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations*, 1992 (Revised Edition), London: HMSO

- [41] „*Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung*“, Bericht der Störfallkommission beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, SFK-GS-41, 21.04.2004
- [42] *Das Windenergiepotenzial Vorarlbergs – Endbericht*, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien 11/2003
- [43] Methods for determining the Potential Damage, CPR16E, CIP-data of royal library
- [44] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)
- [45] 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
- [46] Floyd D. J., Ball P. J., *Societal Risks*, Hongkong 1993
- [47] *Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung*, Proske, Dresden, 2004
- [48] *Risk Acceptance Criteria*, Hoffmann A., Klein G., Weidl T., TÜV SÜD Industrie Service GmbH, 12th International Probabilistic Workshop, Weimar 2014
- [49] *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

## 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 [15].

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 – Verwaltungsvorschrift über Technische Baubestimmungen, Ziffer 3.2 der Anlage A1.2.8/6 [20] 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 [26][27][28][29], 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 stillstehen, 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 [10][11][12][13] 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 [15] wurden wichtige Erkenntnisse im Umgang von WEA mit Vereisung gesammelt. So wurden Vereisungszeiten vornehmlich nachts festgestellt. Dabei konnte hinsichtlich der Abschaltung der WEA eine sehr gute Trefferquote erzielt werden, so dass ein möglichst gefahrloser Betrieb von Anlagen möglich ist. Das an der beobachteten Anlage für Eiserkennung angewandte Leistungskurvenverfahren zeigte gute Ergebnisse. Während an dem eingesetzten Sonic Anemometer Vereisung erst nach derjenigen der Flügel einsetzte, zeigte die Leistungskennlinie bereits ab Beginn des Vereisungsprozesses eine Abweichung von der erwarteten Kennlinie.

Auf Basis **dieser Erkenntnisse wurde ein Eiswurfmodell entwickelt**, welches basierend auf den meteorologischen Bedingungen am Standort sowie der Charakteristik der Windenergieanlage die Bahnkurve eines Eisstücks bis zum Aufprall auf der Erde berechnet [17]. 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  $m^2$ )
- Dichte der Eisstücke  $\rho_{\text{Eis}}$  in  $kg/m^3$  und Masse  $M$  in kg
- Widerstandsbeiwert der Eisstücke  $C_D$
- Startposition des herabfallenden Eisstücks auf dem Rotorblatt, beschrieben durch die radiale Position auf dem Rotorblatt ( $r$  in m), den Winkel der Rotorstellung in Bezug auf die Horizontale ( $\theta$  in rad) sowie den Azimuthwinkel der Rotorfläche ( $\varphi$  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  $\rho$  in  $kg/m^3$ .

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

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

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

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

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 1.8 U/min verwendet [30].
- 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/m<sup>3</sup>; Maße: 12 cm x 2.5 cm x 5 cm)
- B) Eisstück aus Raureif mit 240 g (Eisdichte: 600 kg/m<sup>3</sup>; Maße: 20 cm x 4 cm x 5 cm)
- C) Eisstück aus Klareis mit 70 g (Eisdichte: 900 kg/m<sup>3</sup>; Maße: 8.5 cm x 2.4 cm x 3.8 cm)
- D) Eisstück aus Klareis mit 180 g (Eisdichte: 900 kg/m<sup>3</sup>; Maße: 10 cm x 4 cm x 5 cm)

Diese Eisstücke wurden anhand einer für Risikoabschätzungen zugrundeliegenden 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 den 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“

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

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

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

Die *Eintrittshäufigkeit* bezeichnet die Anzahl der Ereignisse innerhalb eines Zeitraums. Sie ist eine statistische Größe, d. h. sie spiegelt die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses in einem bestimmten Zeitraum 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.

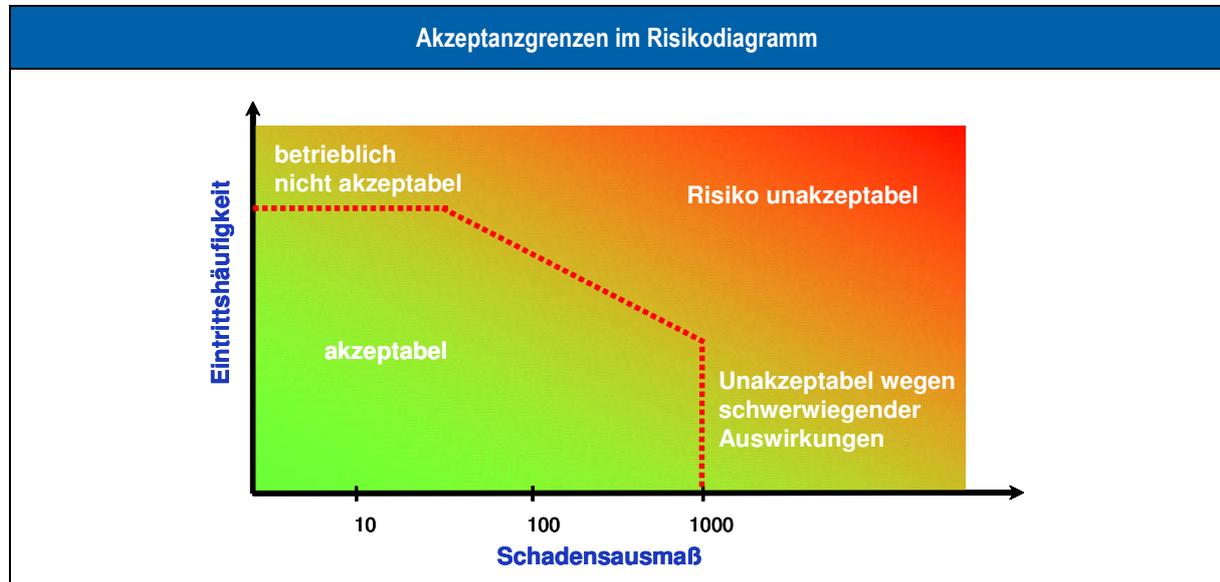
Generell können dabei zwei Kriterien betrachtet werden (siehe Abbildung 12):

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

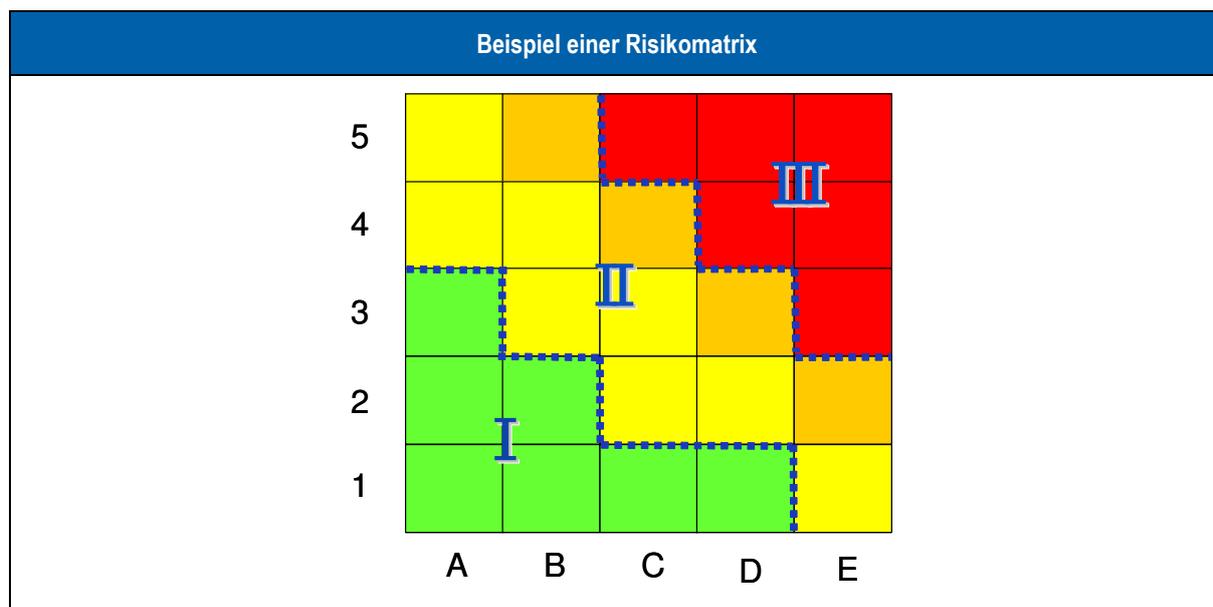
Die Darstellung mittels eines Risikodiagramms ist nützlich, wenn Wahrscheinlichkeiten und Konsequenzen in präzisen Zahlen und eindeutigen Dimensionen angegeben oder berechnet werden können. In der Tat werden Risikoanalysen mit einer Vielfalt von quantitativen und qualitativen Methoden durchgeführt.

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.



**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 12 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 [38] 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 Ursachengruppen wird „Technologische Tatsachen“ genannt, z. B.

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

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

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

Daraus wird folgende Regel gebildet:

„Gefahren, die auf eine neue Industrieanlage zurückzuführen sind, dürfen *keine nennenswerte* Erhöhung der Zahl R<sub>m</sub> verursachen.“

Damit werden mit dem MEM-Prinzip folgende Grenzwerte festgelegt:

- R<sub>1</sub> ≤ 10<sup>-5</sup> Todesfälle/Person x Jahr
- R<sub>2</sub> ≤ 10<sup>-4</sup> Schwerverletzte/Person x Jahr
- R<sub>3</sub> ≤ 10<sup>-3</sup> Leichtverletzte/Person x Jahr

Die hiermit festgelegten Grenzwerte können als absolute Obergrenze betrachtet werden. Risiken, die darüber liegen, sind für Privatpersonen absolut unakzeptabel<sup>2</sup>. Ein weiterer Aspekt, der sich aus diesen Grenzwerten ergibt ist folgende empfohlene Umrechnungsvorschrift:

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

### 7.5.2.2 Das ALARP-Prinzip

Eine etwas andere Herangehensweise mit anderen Grenzwerten wird von der britischen HSE empfohlen [39][40]. 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 Risikoversorge 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.

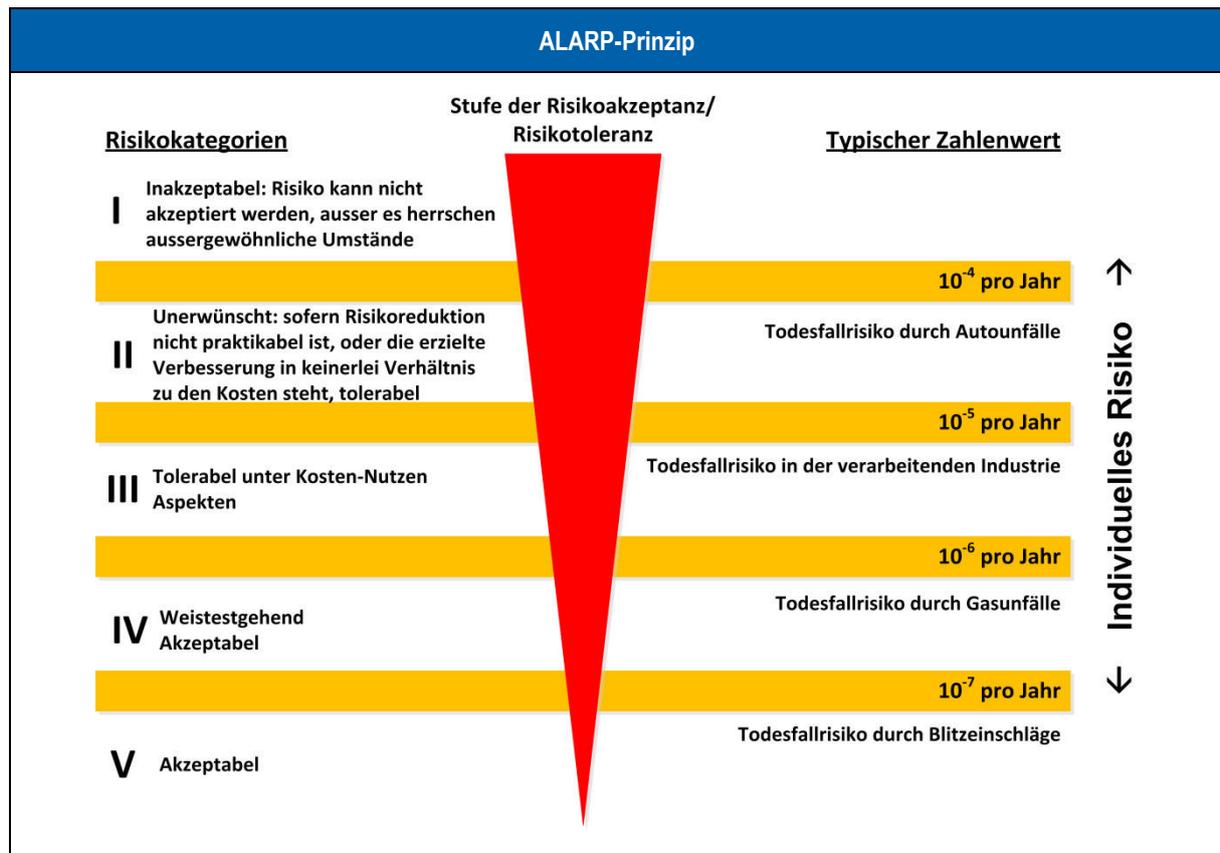


Abbildung 14: ALARP-Prinzip

<sup>2</sup> 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 [46] 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.

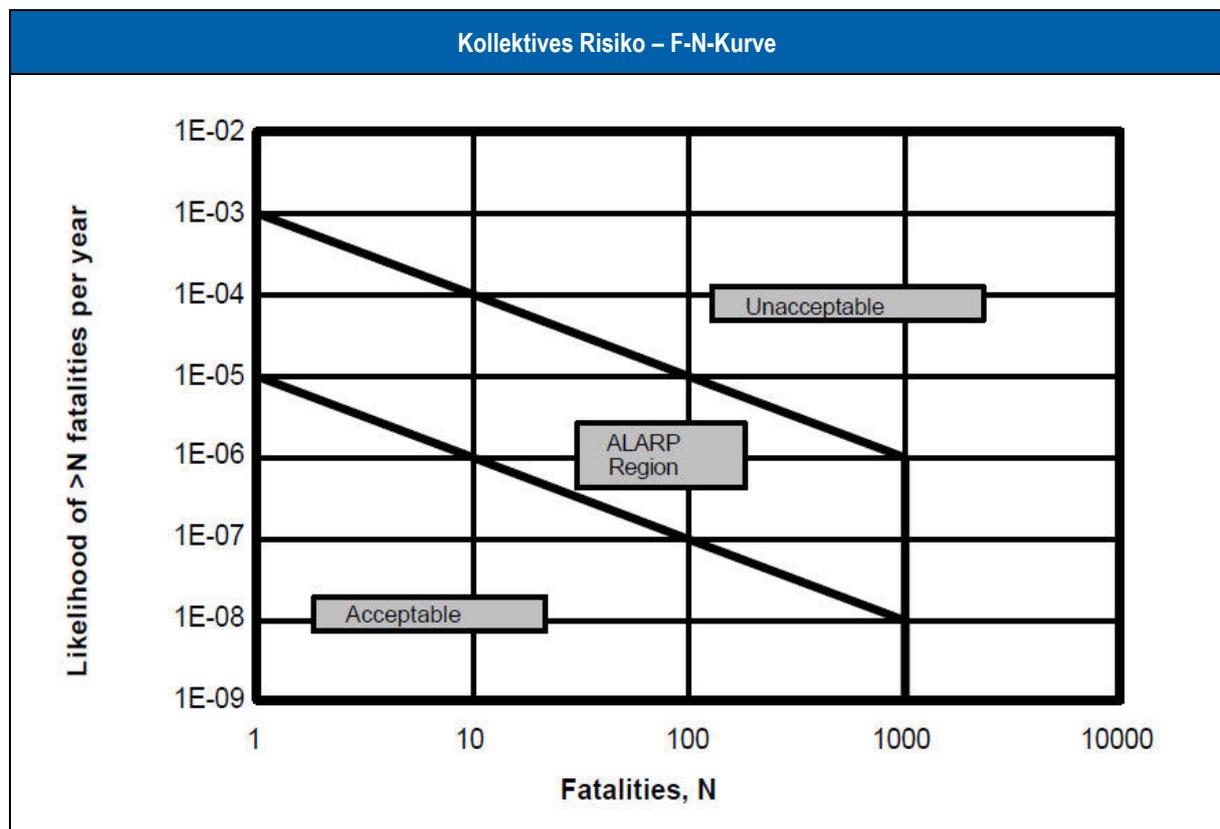


Abbildung 15: Kollektives Risiko – F-N-Kurve.

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 12 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 <b>vernachlässigbar</b> . 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 <b>akzeptablen</b> 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 <b>tolerierbar</b> 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 <b>hoch</b> 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 <b>unakzeptabel hoch</b> . Maßnahmen zur Risikoreduktion müssen umgehend eingeleitet werden.

Tabelle 12: In der Analyse verwendete Risikokategorien inklusive der Farbkodierung [48].

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 13 gibt die Größenordnung verschiedener Vergleichsrisiken wieder [47][48].

	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 13: Vergleichsrisiken.**

Aufbauend auf Tabelle 13 und weitergehenden Analysen wird in [48] für die Arbeitssicherheit ein maximales Berufsrisiko von ca.  $10^{-4}$  Todesfällen pro Person und Jahr abgeleitet (Anmerkung: besonders risikoexponierte Tätigkeitsfelder wurden in Tabelle 13 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 [43] 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

$$S = \frac{1}{2} mv^2$$

[7.4]

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<sup>3</sup>. Die Mortalität in Abhängigkeit vom Wert der Probit-Funktion lässt sich aus der von [43] entnommenen Tabelle 14 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 14: Zusammenhang zwischen Todesfallwahrscheinlichkeit und Wert der Probit-Funktion.

<sup>3</sup> 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 14 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 [22] 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 ( $600 \text{ kg/m}^3$ ) und Klareis ( $900 \text{ kg/m}^3$ ) 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 [15], 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.

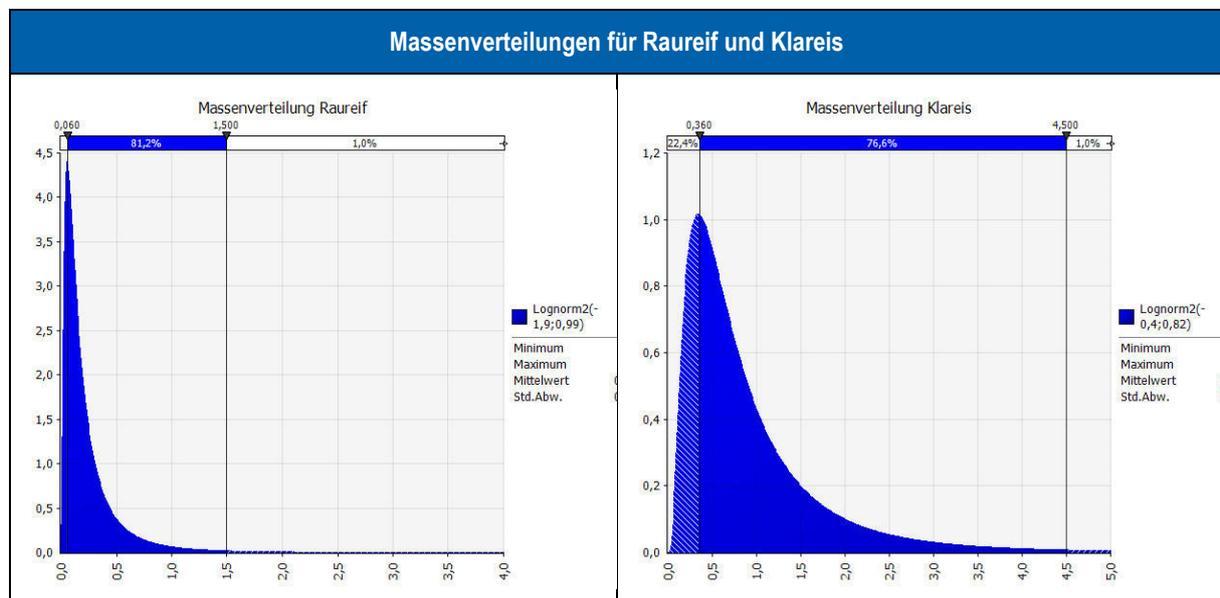


Abbildung 16: Angenommene Massenverteilung für Raureif (links) bzw. Klareis (rechts).

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

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

mit

$m$ : Masse des Eisprojektils

$\sigma$ : 0.99

$\mu$ : -1.9

für Raureif bzw.

$\sigma$ : 0.82

$\mu$ : -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 14 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  $c_w$ -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).

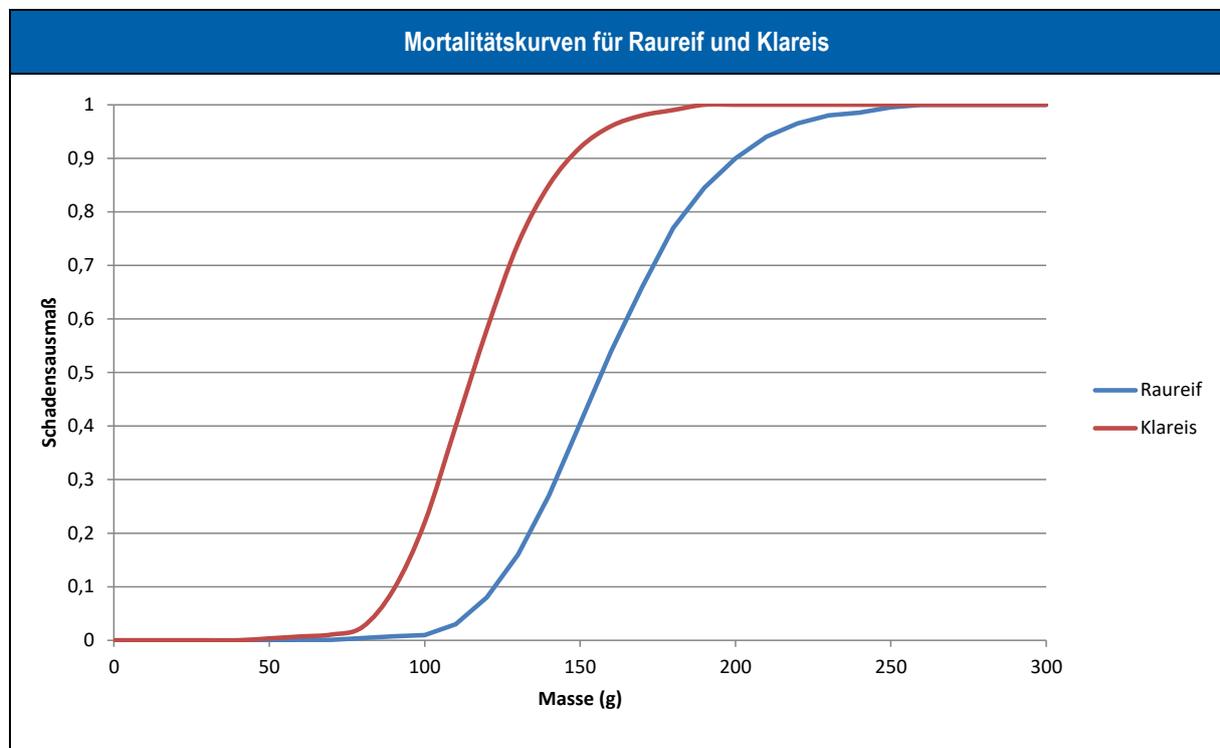


Abbildung 17: Mortalität bei Projektilen aus Raureif bzw. Klareis in Abhängigkeit von der Masse für eine Nabenhöhe von 164 m und einem  $c_w$ -Wert von 1.

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:

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

Das Schadensausmaß wurde für die in Tabelle 14 dargestellten Fälle ermittelt und wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

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

**Tabelle 15: Mittleres Schadensausmaß für eine Nabenhöhe von 164 m und einen cw-Wert von 1.**

Der Unterschied im Schadensausmaß für Raureif und Klareis ist durch die unterschiedlichen Massenverteilungen (siehe hierzu auch Abbildung 16) 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 auftritt. 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 vorbeifahrenden 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
<b>Regelmäßig benutzter Weg</b>	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.
<b>Häufig benutzter Weg</b>	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.
<b>Gelegentlich benutzter Weg</b>	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.
<b>Selten benutzter Weg</b>	In diese Kategorie fallen Wege, die noch als solche erkennbar sind, und deren Zustand und Erreichbarkeit auf eine seltene Benutzung schließen lassen.
<b>Normalerweise nicht benutzter Weg</b>	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 16: 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 geringere 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 dringend 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 [15].

In dem Untersuchungszeitraum von ca. 3 Jahren wurden etwa 200 Eisstücke identifiziert [15]. 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  $5 \times 5 \text{ m}^2$  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:  $2 \text{ m}^2$  (als relevant wird hier die Windschutzscheibe angenommen, damit ergibt sich eine Trefferwahrscheinlichkeit  $P_T$  von 0.08).

#### Fußgänger

Relevante Trefferfläche:  $0.04 \text{ m}^2$  (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  $5 \times 5 \text{m}^2$ -Quadranten ermittelt.

Als Parameter muss der Aufenthalt im Gefährdungsbereich bestimmt werden. Dies ist die Zeit, die eine Person benötigt, um den durch Eisfall gefährdeten Bereich zu durchqueren. Dafür werden für die einzelnen  $5 \times 5 \text{m}^2$ -Quadranten folgende Zeiten angesetzt:

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

In Anlehnung an [49] 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 Expositionzeiten:

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

Damit gilt eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit von

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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 12 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 17: 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 <sup>2</sup> /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 <sup>2</sup> ]	Mittlere Leistungsdichte, Leistungsfluss
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	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

Vertriebsdokument

# **Option Rotorblatt-Eisdetektion in Nordex- Windenergieanlagen**

**Gültig für Nordex K08-Anlagen  
Generation gamma und delta**

K0801\_055240\_DE

Revision 01 / 26.04.2016

- Originalvertriebsdokument -

Dokument wird elektronisch verteilt.

Original mit Unterschriften bei Nordex Energy GmbH, Engineering.

## **Technische Änderungen**

Dieses Dokument wurde mit größter Sorgfalt und unter Berücksichtigung der aktuell gültigen Normen angefertigt.

Trotzdem können durch stetige Weiterentwicklungen Abbildungen, Funktionsschritte und technische Daten geringfügig abweichen.

## **Copyright**

Copyright 2016 by Nordex Energy GmbH.

Dieses Dokument, einschließlich seiner Darstellung und seines Inhalts ist geistiges Eigentum der Nordex Energy GmbH.

Jegliche Weitergabe, Vervielfältigung oder Übersetzung dieses Dokuments oder Teilen davon in gedruckter, handschriftlicher oder elektronischer Form ohne ausdrückliche Zustimmung durch die Nordex Energy GmbH sind ausdrücklich untersagt.

Alle Rechte vorbehalten.

## **Kontakt**

Bei Fragen zu dieser Dokumentation wenden Sie sich bitte an:

Nordex Energy GmbH

Langenhorner Chaussee 600

22419 Hamburg

Germany

<http://www.nordex-online.com>

[info@nordex-online.com](mailto:info@nordex-online.com)

# 1. Einführung

Zur Erfüllung behördlicher Auflagen kann ein Eisdetektionssystem für Nordex-Windenergieanlagen (WEA) der Typen gamma und delta eingesetzt werden. Dieses erkennt auch im Stillstand der WEA, ob Eisansatz auf dem Rotorblatt vorhanden ist oder nicht. So erfolgt eine Alarmmeldung und Abschaltung der WEA nur, solange sich tatsächlich gefährliches Eis auf den Rotorblättern befindet.

## 2. Systembeschreibung

### 2.1 Funktionsprinzip

Das Rotorblatt-Eiserkennungssystem ist ein System zur Erfassung und Analyse von Meßdaten, mit denen Eisansatz an den Rotorblättern der WEA erkannt werden kann. Die Funktionsweise beruht auf der Messung von Beschleunigung und Temperatur im Innern aller Rotorblätter einer WEA. Grundsätzlich erkennt das Eisdetektionssystem Massenveränderungen am Rotorblatt durch Eis, weil dadurch die Eigenfrequenz der Rotorblätter verändert wird.

### 2.2 Systemübersicht

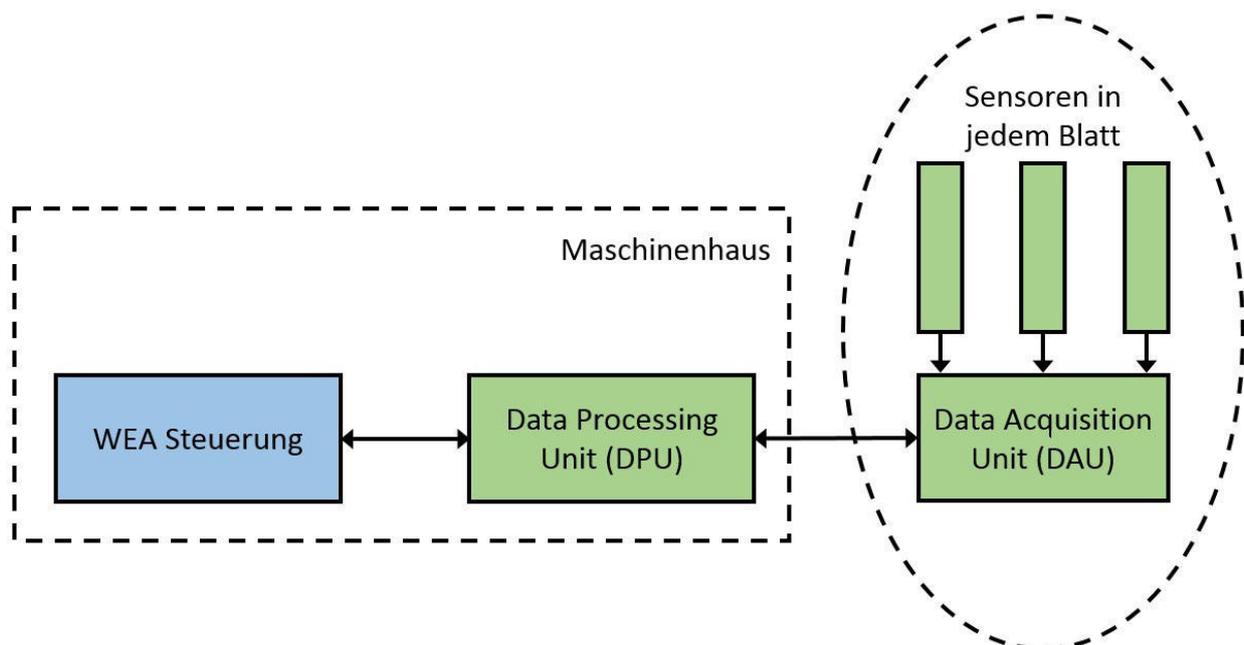


Abb. 1 Schematische Darstellung des in der Nordex-WEA integrierten Rotorblatt-Eisdetektionssystems

## 2.3 Funktionen

### Eiserkennung

- fortlaufende Bestimmung des Vereisungszustandes der Rotorblätter bei mindestens 2,5 m/s Windgeschwindigkeit
  - im Teillastbetrieb oder
  - im Nennlastbetrieb oder
  - im Trudelbetrieb oder
  - bei WEA-Stillstand (ohne aktive Bremse oder Rotor-Lock)
- Eisansatz-Alarm beim Überschreiten des Alarmschwellenwertes und automatisches Abschalten der WEA
- Rücksetzen des Eisansatzalarms zum automatischen Wiedereinschalten der WEA, wenn kein gefährlicher Eisansatz mehr vorhanden ist oder alternativ manuelle Rücksetzung vor Ort oder im Fernzugriff parametrierbar

### Systemfunktionen

- permanente Überwachung der Systemfunktionen und -komponenten
- Systemmeldungen, die einen sicheren Zustand der WEA gewährleisten
- unter bestimmten Umgebungsbedingungen kann das Anlaufen bzw. der Betrieb der Anlage um einige Minuten verzögert/unterbrochen werden

## 3. Liefer- und Leistungsumfang

Die folgenden Bauteile und Leistungen sind in der Option Rotorblatt-Eisdetektion enthalten:

- Sensoren für drei Rotorblätter
- eine Datenerfassungseinheit (Data Acquisition Unit - DAU)
- eine Datenverarbeitungseinheit (Data Processing Unit - DPU)
- Installation und Inbetriebnahme des Systems

## 4. Technische Daten des Gesamtsystems

Gesamtsystem	
Stromversorgung	100 ...240 V AC/ 45 ... 65 Hz, 24 V DC
Leistungsaufnahme	ca. 150 W

<b>Gesamtsystem</b>	
Betriebstemperaturbereich Normal Climate Version (NCV)	-20 °C bis +50 °C
Betriebstemperaturbereich Cold Climate Version (CCV)	-40 °C bis +50 °C
Blitz- und Überspannungsschutz	nach IEC 61400-24
EMV Störfestigkeit	entsprechend IEC 61000-6-2
EMV Störaussendung	entsprechend IEC 61000-6-2

## 5. Zertifikate und Konformität

CE-Konformität	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2006/95/EG Niederspannungsrichtlinie</li> <li>- 2004/108/EG EMV-Richtlinie</li> <li>- 1999/5/EG Richtlinie für Funkanlagen und Telekommunikationsendeeinrichtungen</li> <li>- DIN EN 61439-1,-2 Niederspannungsschaltgeräte-Kombinationen</li> </ul>
Hersteller Produkt-Zertifizierung	System "IDD.Blade" entspricht der GL-Richtlinie "Guideline for Condition Monitoring Systems of Wind Turbines" Edition 2013 vom Germanischen Lloyd
Gutachten TÜV NORD	"Zur Bewertung der Funktionalität eines Eiserkennungssystems zur Verhinderung von Eisabwurf an Nordex Windenergieanlagen"

Nordex Energy GmbH  
Langenhorner Chaussee 600  
22419 Hamburg  
Germany  
<http://www.nordex-online.com>  
[info@nordex-online.com](mailto:info@nordex-online.com)

## Gutachten

### Zur Bewertung der Funktionalität eines Eiserkennungssystems zur Verhinderung von Eisabwurf an NORDEX Windenergieanlagen

<b>TÜV NORD Bericht Nr.:</b>	8111 327 215 Rev.2
<b>Gegenstand der Prüfung:</b>	Untersuchung der Funktionalität und Zuverlässigkeit des in NORDEX Windenergieanlagen installierten Eiserkennungssystems IDD.Blade der Firma Wölfel
<b>Anlagenhersteller:</b>	NORDEX Energy GmbH Langenhorner Chaussee 600 22419 Hamburg Germany

Dieser Prüfbericht umfasst 49 Seiten.

Rev.	Datum	Änderungen
0	13.10.2014	Erste Fassung
1	11.05.2016	Ergänzung N131/3300 PH134 und PH164 und N90/2500 R70opt.
2	15.06.2017	Redaktionelle Änderung zum Trudelbetrieb, Ergänzung der N117 3600

## Inhalt

1	Einleitung .....	5
1.1	Ausgangssituation.....	5
1.2	Gegenstand der Untersuchungen .....	6
1.3	Untersuchtes Eiserkennungssystem IDD.Blade.....	7
2	Beschreibung der Bewertungskette .....	10
2.1	Bewertungsmaßstäbe .....	10
2.2	Grenzen der Bewertung .....	10
2.3	Beschreibung der Vorgehensweise .....	10
3	Ermittlung der kritischen Eisdicke .....	12
3.1	Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf .....	12
3.2	Ermittlung eines kritischen Eisobjektes .....	16
3.3	Ermittlung einer kritischen Zeit zur Bildung eines kritischen Eisobjektes .....	20
4	Test der Eiserkennung auf Basis von numerischen Simulationen .....	21
4.1	Testbeschreibung .....	21
4.2	Beschreibung der modellierten Windenergieanlagen.....	22
4.2.1	N100/2500 gamma .....	22
4.2.2	N117/3000 delta .....	23
4.3	Modellaufbau .....	24
4.4	Referenzierung der Anlagenmodelle.....	25
4.5	Modellierung der Anlagenvereisung.....	26
4.6	Simulation der Testszenarien.....	27
4.7	Auswertung der Testszenarien .....	27
4.8	Bewertung der Testergebnisse .....	31
4.9	Übertragbarkeit der Testumgebung auf die Realität .....	32
4.10	Übertragbarkeit der Testergebnisse der repräsentativ gewählten Windenergieanlagen auf die weiteren Windenergieanlagen.....	34
5	Sicherheitstechnik.....	36
5.1	Qualitative Bewertung.....	36
5.2	Einbindung in das Nordex Betriebsführungssystem.....	37
5.3	Einbauverfahren und Parametrierung .....	39

5.4	Inbetriebnahme und Wiederkehrende Prüfungen .....	41
5.5	Vermeidung des Anfahrens bei Vereisung .....	42
6	Anforderungen .....	44
7	Zusammenfassung und Ergebnis der Bewertung .....	45
8	Dokumente und Literaturverzeichnis.....	47
8.1	Bewertete Dokumente.....	47
8.2	Dazugehörige Dokumente .....	47
8.3	Literatur & Quellen .....	48

## Tabellen

Tabelle 1.1	NORDEX Windenergieanlagen, an denen das IDD.Blade Eiserkennungssystem zum Einsatz kommen soll.....	6
Tabelle 3.1:	Gewähltes Eisobjekt.....	16
Tabelle 3.2:	Untersuchungsergebnisse unter den gegebenen Randbedingungen (Würfel). 18	18
Tabelle 3.3:	Untersuchungsergebnisse Variation der generierten Eisobjekte, Auswahlkriterium kinetische Energie größer 40J. ....	18
Tabelle 3.4:	Untersuchungsergebnisse Variation der generierten Eisobjekte, Auswahlkriterium kinetische Energie größer 40J und Windgeschwindigkeit kleiner gleich 20m/s. 19	19
Tabelle 3.5:	Detektionszeiten bis zum Aufwachsen einer kritischen Eisdicke.....	20
Tabelle 4.1:	Technisch Hauptdaten der untersuchten WEA NORDEX N100/2500 .....	22
Tabelle 4.2:	Technisch Hauptdaten der untersuchten WEA NORDEX N117/3000 .....	23
Tabelle 4.3	Festlegung von Randbedingungen für die numerischen Simulationen.....	25
<b>Tabelle 5.1:</b>	Parameter der Eiserkennung .....	40

## Abbildungen

Abbildung 1:	Abwurfwinkel Eisobjekt Würfel.....	15
Abbildung 2:	Flugbahn unter den gegebenen Randbedingungen – Eisobjekt Würfel (N117/3000 delta, 91,0m Nabenhöhe).....	17

Abbildung 3: Ergebnisse der Auswertung der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000 .....	29
Abbildung 4: Auswertung des Testblocks 02 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000 .....	30
Abbildung 5: Auswertung des Testblocks 04 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000 .....	30
Abbildung 6: Auswertung des Testblocks 05 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000 .....	30
Abbildung 7: Einbindung des Eisdetektionssystems in NORDEX WEA .....	38
Abbildung 8: Schema zur Position des SNS im Rotorblatt .....	39

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Die Rotorblätter von Windenergieanlagen, 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 zu beachtende Gefahr. Beobachtungen zeigen abgeworfene Brocken mit einer Masse von mehreren kg, jedoch sind dem TÜV NORD bisher keine Personenschäden bekannt geworden.

An den Anlagen installierte Eiserkennungssysteme dienen dem Zweck, dass die Anlage bei erkannter Vereisung der Rotorblätter abgeschaltet wird und somit keine Gefahr von Eisabwurf mehr besteht. Das Eis wird dann von den Blättern der stehenden / trudelnden Anlage abfallen, bevor die Anlage wieder in den Betrieb genommen wird.

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. Üblicher Weise 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

- dem „Stand der Technik“ entspricht,
- hinsichtlich der Schwellwerte und Parameter korrekt auf die Anlage eingestellt ist und
- sicherheitstechnisch zuverlässig funktioniert.

Eine Aussage zum Stand der Technik erfolgt über die Untersuchung, ob das Eiserkennungssystem in der Lage ist, eine vorher definierte, kritische Eisdicke zu detektieren und ob das System hinsichtlich der Hardware die notwendigen Voraussetzungen hinsichtlich Zuverlässigkeit erfüllt.

In diesem Sinne ist das vorliegende Gutachten aufgebaut.

## 1.2 Gegenstand der Untersuchungen

Die folgende Begutachtung befasst sich mit der Bewertung der Funktionsweise und der Eignung des IDD.BLADE Eiserkennungssystems der Firma Wölfel bezüglich der zuverlässigen Eiserkennung bei Einsatz auf den folgenden Windenergieanlagen:

**Tabelle 1.1 NORDEX Windenergieanlagen, an denen das IDD.Blade Eiserkennungssystem zum Einsatz kommen soll**

Anlagentyp	Rotorblatt	Rotor-durchmesser [m]	Nabenhöhe [m]	Ein-schalt-windgeschwindigkeit [m/s]	Abschalt-windgeschwindigkeit [m/s]	Nenn-drehzahl [1/min]
N90/2500 gamma	NR45, LM43.8P	90	65, 70, 80	3	25	16,3
N100/2500 gamma	NR50 -1, LM 48.8P	100	75, 80, 100	3	25	14,98
N117/2400 gamma	NR 58.5 -1	117	91, 120, 141	3	20	11,8
N100/ 3300 delta	NR 50 -2	100	75, 85, 100	3	25	14,3
N117/3000 delta	NR 58.5 -2	117	91, 120, 141	3	25	12,6
N131/3000 delta	NR 65.5	131	99, 114, 134, 144	2,5	20	10,27
N131/3300 delta	NR 65.5	131	134, 164	3	20	10,9
N117/3600 delta	NR 58.5 -2	117	91, 106, 120, 141	3	25	14,36

Bei den Windenergieanlagen handelt es sich jeweils um Anlagen mit aktiver Windrichtungsnachführung und einem luvseitig angeordneten Dreiblattrotor. Die Leistungsbe-

grenzung erfolgt durch Blattwinkelverstellung aller drei Rotorblätter. Die Anlagen werden auf verschiedenen Türmen mit variierender Nabenhöhe verbaut, wie Tabelle 1.1 zu entnehmen ist. Im Rahmen der vorliegenden Begutachtung wurden drei der in Tabelle 1.1 verzeichneten Anlagenkonfigurationen als repräsentativ ausgewählt und die Funktionsfähigkeit des IDD.Blade Eiserkennungssystem auf Basis der ausgewählten Anlagen genauer betrachtet. Die Kriterien zur repräsentativen Auswahl können den folgenden Kapiteln 3 und 4 entnommen werden. In Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 sind die ausgewählten Anlagen mit ihren wichtigsten technischen Hauptdaten beschrieben.

### 1.3 Untersuchtes Eiserkennungssystem IDD.Blade

Das Eiserkennungssystem IDD.Blade der Firma Wölfel ist ein System zur Erfassung und Analyse von Messdaten, mit dem Eisansatz an Rotorblättern von WEA erkannt werden kann. Grundsätzlich detektiert IDD.Blade durch Vereisung verursachte Zustandsveränderungen, die das strukturdynamische Verhalten eines Rotorblattes über ein spezifisches Mindestmaß hinaus beeinflussen. Es beruht auf dem physikalischen Grundprinzip, dass messbare, bauteilcharakteristische Kennwerte wie die Eigenfrequenz eines Rotorblatts von einer Änderung der Bauteilsteifigkeit oder der Bauteilmasse, beispielsweise durch Eisansatz, beeinflusst werden.

Dieser Zusammenhang wird exemplarisch aus dem vereinfachten Modell eines sog. Einmassenschwingers ersichtlich, dessen Eigenfrequenz proportional zur Wurzel des Verhältnisses der Steifigkeit zur Masse ist:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}}$$

mit:  $f_0$  = Eigenfrequenz  
 $c$  = Steifigkeit  
 $m$  = Masse

Um die Veränderungen der bauteilcharakteristischen Kennwerte zu detektieren, werden beim Eiserkennungssystem IDD.Blade Beschleunigungen direkt in den Rotorblättern einer WEA erfasst und ausgewertet. Die Messung erfolgt mit sogenannten *Structural Noise Sensoren* (SNS), welche in der Regel im Bereich von 18 m Rotorradius in den Rotorblättern installiert werden und neben den Beschleunigungen auch die aktuelle Bauteiltemperatur zur Verfügung stellen. Da die charakteristischen Frequenzen eines Rotorblatts neben der Bauteilmasse und Temperatur (temperaturabhängige Materialversteifung) ebenfalls von weiteren Einflussgrößen wie beispielsweise der Rotordrehzahl (Fliehkraftversteifung) und dem aktuellen Blattpitchwinkel abhängig sind, ist für die weitere Auswertung ein Abgleich mit den aktuellen Betriebsbedingungen der WEA notwendig. Hierzu werden die folgen Umwelt- und Betriebsdaten, welche auch zur Klassifizierung der Messdaten verwendet werden, von der WEA-Steuerung über eine sogenannte EOC Schnittstelle (*Environmental and Operational Conditions*) an das IDD.Blade Eiserkennungssystem übergeben:

- Windgeschwindigkeit Anemometer (Auflösung 1 Hz)
- Elektrische Wirkleistung (Auflösung 1 Hz)

- Generator- oder Rotordrehzahl (Auflösung 1 Hz)
- Pitch-Winkel (Auflösung 1 Hz)

Weitere Informationen können optional berücksichtigt werden, z.B.:

- Azimutwinkel,
- Lufttemperatur und -druck,
- Anlageninformationen (Servicezustände etc.)
- etc.

Da die Datenauswertung zu großen Teilen auf einem statistischen Verfahren beruht, das auf einem ausreichenden Datenpool aufbaut, erfolgt die Datenerfassung und Auswertung kontinuierlich. Die Messdatenanalyse, welche sowohl im Produktionsbetrieb als auch im Trudelzustand der WEA eingesetzt wird, verwendet zur Eiserkennung im Wesentlichen Systemidentifikationsverfahren im Zeitbereich an, insbesondere Verfahren der Operational Modal Analysis (OMA). Grundsätzlich detektieren die Systeme globale, strukturdynamische Veränderungen in Bezug auf zuvor referenzierten, eisfreien Zustände.

Um den Bezug zu den eisfreien Zuständen herstellen zu können, ist nach Inbetriebnahme zunächst eine Lernphase zum Referenzieren der individuellen Blatteigenschaften notwendig, um eine ausreichend hohe Sensitivität der Detektion zu gewährleisten. Dies ist unter anderem erforderlich, um fertigungsbedingte Streuungen der Rotorblattmassen und Rotorblattsteifigkeiten von der weiteren Beurteilung auszuschließen. Während dieser Lernphase, die vollautomatisch und ohne Eingriffe von außen durch das System selbstständig durchgeführt wird, erfolgt ein Vergleich von aktuellen Blattzuständen mit fest hinterlegten Referenzgrößen, die im Rahmen von Prototypentests bestimmt wurden. Da die strukturdynamischen Rotorblatteigenschaften, wie bereits erwähnt, zusätzlich von der Betriebsweise (z.B. Drehzahl) und den Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur) abhängig sind, sind diese Parameter ebenfalls zu berücksichtigen und deren Einfluss ist vom Eiserkennungssystem zu kompensieren.

Nach erfolgreicher Referenzierung des Eiserkennungssystems werden im laufenden Betrieb als Ergebnis der Zustandsüberwachung Zustandsindikatoren bereitgestellt, anhand derer eine Beurteilung über den aktuellen Vereisungszustand der Rotorblätter vorgenommen werden kann. Diese Zustandsindikatoren werden prinzipiell auf Basis der kontinuierlich erfassten Messdaten fortlaufend bestimmt. Da eine Klassifikation nach Betriebs- und Umweltbedingungen vorgenommen werden muss und die Sensordaten einer statistischen Auswertung zugeführt werden, ergeben sich die aktualisierten Zustandsinformationen jedoch rhythmisch. Dieser Rhythmus ist vom Rotorblatttyp, vom Anlagentyp, von den aktuell herrschenden Betriebs- und Umweltbedingungen sowie weiteren Einflussgrößen abhängig, bewegt sich jedoch in der Regel zwischen ca. 5 und 60 Minuten. Referenz- sowie eisfreie Zustände werden dabei mit Indikatoren im Toleranzbereich von Null abgebildet. Im Falle von Vereisungen weichen die Indikatoren – proportional zur Stärke der Veränderungen – von Null ab.

Durch die Vorgabe von zwei Schwellwerten ist es möglich, automatische Warn- und Alarmmeldungen (Ampelfunktion grün, gelb, rot) zu generieren. Die Bestimmung der Schwellwerte selbst erfolgt mit statistischen Methoden im Rahmen eines Prototypentests sowie ggf. mit weiteren numerischen Untersuchungen im Rahmen der rotorblatt- und anlagenspezifischen Anpassung (Referenzierungsphase) und kann bei Bedarf kunden- bzw. standortspezifisch angepasst werden.

Auf Basis des ampelbasierten Alarmkonzeptes ist eine aktive Beeinflussung der WEA-Steuerung möglich. Im Falle von Vereisungen kann die WEA automatisch gestoppt bzw. nach Abtauen wieder gestartet werden.

Es gibt Betriebszustände, bei denen die Bereitstellung von Zustandsindikatoren nicht möglich ist. Dies ist der Fall bei

- Windgeschwindigkeiten  $< 2$  bis  $3$  m/s
- Drehzahl- und Pitchwinkelveränderungen außerhalb des normalen Betriebsbereichs (Starten und Stoppen der WEA)
- Ggf. einzelne Betriebsdrehzahlen, bei denen eine Auswertung nicht möglich ist (anlagenspezifisch)

In diesen Fällen wird vom IDD.Blade Eiserkennungssystem eine entsprechende Meldung ausgegeben, sodass die sicherheitstechnische Steuerung der WEA darauf reagieren und die Anlage ggf. nach verstreichen einer kritischen Zeit abschalten kann um den Abwurf von unerkanntem Eisansatz zu verhindern.

## 2 Beschreibung der Bewertungskette

### 2.1 Bewertungsmaßstäbe

Die Bewertung erfolgt in Bezug auf das sichere Abschalten der WEA bei kritischem Eisansatz an den Rotorblättern. Weil es keine Richtlinie gibt, nach der Eiserkennungssysteme zu bewerten sind, ist die Form dieser Bewertung ein Gutachten, in dem die einzelnen Schritte der Bewertung beschrieben werden. 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“.

### 2.2 Grenzen der Bewertung

Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich auf die Funktionalität der Systeme bezüglich Verhinderung von *Eisabwurf*. Eine Untersuchung bezüglich Eisabfall wird hier nicht behandelt, denn Eisabfall von einer stehenden/trudelnden Anlage kann nicht verhindert werden. Die Gefahr bezüglich Eisabfall sollte immer standortspezifisch in Abhängigkeit gefährdeter Objekte im für Eisabfall kritischen Radius um die Anlage bewertet werden.

### 2.3 Beschreibung der Vorgehensweise

Die Bewertung der Eiserkennungssysteme hat zum Ziel, quantitative Aussagen zur Detektionsfähigkeit der Systeme zur Eiserkennung zu treffen und damit in Hinblick auf die Windenergieanlage (WEA) Aussagen zu treffen, ob und unter welchen Bedingungen eine Detektion einer kritischen Vereisung der Rotorblätter im Betrieb der WEA funktioniert. Aufgrund der Komplexität des vorliegenden Eiserkennungssystems in der Erfassung, Verarbeitung und Auswertung der relevanten Zustandsdaten wurde mit dem Systemhersteller Wölfel ein auf numerischen Anlagensimulationen basierender Systemtest im Rahmen eines „Black-Box“ Verfahrens abgestimmt. Hierzu werden von unabhängiger gutachterlicher Seite die von dem Eiserkennungssystem verwendeten Eingangsgrößen simuliert und anonymisiert an den Systemhersteller (Wölfel) übermittelt. Dieser wertet die übermittelten Daten aus und meldet die vom System ermittelten Ausgangsgrößen zurück an den Gutachter. Die Auswertung der Rückmeldungen auf Basis der auf gutachterlicher Seite bekannten Rahmenbedingungen der Eingangsgrößen ermöglicht sodann eine Bewertung der Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Eiserkennung bezogen auf die vorliegenden, simulierten Eisdicken und die Schwellwerte des Systems. Weiterhin werden qualitative Aussagen zur Einbindung der Systeme in die Steuerung der WEA getroffen, um die sichere Abschaltung der WEA bei Eiserkennung und das Wiederanfahren nach Vereisung zu bewerten.

Das Vorgehen zur Bewertung unterteilt sich in die folgenden Schritte:

### **1. Bestimmung einer kritischen Eisdicke**

(s. Kap.3) Die Bestimmung der kritischen Eisdicke erfolgt für ausgewählte Anlagen des NORDEX Produktspektrums (Tabelle 1.1), um repräsentative Eisdicken festzulegen, die für die abzudeckenden Anlagen als kritisch einzustufen sind. Diese Eisdicken werden bei der Bewertung des Eisdetektionsalgorithmus einbezogen.

### **2. Test der Erkennung der kritischen Eisdicken auf Grundlage von numerischen Simulationen**

(s. Kap.4) Dieser Abschnitt befasst sich mit der Erzeugung von Testdaten auf Basis von numerischen Simulationen zum Systemtest im „Black-Box“ Verfahren, sowie mit der Beschreibung des Testablaufs und der Auswertung der Testergebnisse. Darauf basierend werden Aussagen darüber getroffen, ob der Algorithmus funktionsfähig ist und ob die im System eingestellten Schwellwerte und Parameter des Algorithmus zur Erkennung der zuvor ermittelten kritischen Eisdicke in der kritischen Zeit auf der entsprechenden Windenergieanlage führen. Anschließend werden der Einfluss gegebenenfalls bestehender Abweichungen der verwendeten Testumgebung gegenüber der Realität und die Übertragbarkeit der Testergebnisse auf alle abzudeckenden Windenergieanlagen betrachtet und eingeschätzt.

### **3. Bewertung der Einbindung des Eiserkennungssystems in das Sicherheitssystem der Anlage**

(s. Kap.5) In diesem Abschnitt wird das Eiserkennungssystem hinsichtlich sicherheitstechnischer Kriterien geprüft und bewertet. Dazu zählt die Einbindung ins Sicherheitssystem, regelmäßige wiederkehrende Prüfungen, die Parametrisierung des Systems sowie das sichere Wiederanfahren der WEA nach Eiserkennung.

### 3 Ermittlung der kritischen Eisdicke

Gegenstand der Untersuchung ist die Bewertung, inwieweit das zu betrachtende Eiserkennungssystem geeignet ist, Eisabwurf im Betrieb der Anlage durch frühzeitiges Abschalten der Anlage zu verhindern, bevor sich eine kritische Eisdicke am Blatt akkumuliert hat. Es ist somit erforderlich in einem ersten Schritt eine kritische Eisdicke festzulegen. Dies erfolgt in einzelnen Arbeitsschritten:

- Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf.
- Ermittlung eines kritischen Eisobjektes. Ein kritisches Eisobjekt ist definiert als ein Eisobjekt, welches aufgrund seiner Aufprallenergie eine Gefahr für eine ungeschützte Person am Boden darstellt. Dem kritischen Eisobjekt werden eine kritische Eismasse und eine kritische Eisdicke zugeordnet.
- Ermittlung einer kritischen Zeit, bis zu der mit der Akkumulation der kritischen Eisdicke zu rechnen ist.

#### 3.1 Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf

Verwendetes Rechenmodell:

Die Flugbahn von Eisobjekten lässt sich durch Überlagerung zweier Kräfte modellieren, der Schwerkraft und dem Winddruck. Die Erfahrung zeigt, dass die herabfallenden Eisobjekte eine sehr unregelmäßige Form besitzen und deshalb praktisch wenig Auftrieb erfahren, so dass in vertikaler Richtung im Wesentlichen die Schwerkraft und der Luftwiderstand wirken. Der Winddruck wirkt horizontal in x-Richtung (Achsenkonvention nach der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /19/). Zur Modellierung des Winddrucks werden jedem Eisobjekt ein konstanter Widerstandsbeiwert  $C_w$  /33/ und eine konstante Projektionsfläche  $A$  zugeordnet.

Der zeitabhängige Verlauf des Eisabwurfs lässt sich mit einem dreidimensionalen Modell beschreiben (in Anlehnung an /16/):

$$\ddot{x} = -\frac{\rho \cdot A \cdot C_w}{2 \cdot m} \cdot (\dot{x} - v) \cdot \sqrt{\dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (\dot{x} - v)^2}, \quad (1)$$

$$\ddot{y} = -\frac{\rho \cdot A \cdot C_w}{2 \cdot m} \cdot \dot{y} \cdot \sqrt{\dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (\dot{x} - v)^2} \quad \text{und} \quad (2)$$

$$\ddot{z} = -g - \frac{\rho \cdot A \cdot C_w}{2 \cdot m} \cdot \dot{z} \cdot \sqrt{\dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (\dot{x} - v)^2} \quad (3)$$

mit

$x$  = horizontale Koordinate (senkrecht zur y-z-Ebene) [m]

$y$  = horizontale Koordinate [m],

$z$  = vertikale Koordinate (y-z-Ebene entspricht der Rotationsebene) [m],

$v$  = Windgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s],

$g$  = Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ],

$\rho$  = Luftdichte [ $kg/m^3$ ],

$A$  = Projektionsfläche des Eisobjekts [ $m^2$ ],

$C_w$  = Luftwiderstandsbeiwert des Eisobjekts und

$m$  = Masse des Eisobjekts [kg].

#### Anlagenbezogene Randbedingungen:

WEA-Typ:

Aus dem Anlagenportfolio Tabelle 1.1 wurden drei WEA-Typen ausgewählt, die als repräsentativ für die Produktpalette herangezogen werden können. Es wurde jeweils die kleinste Nabenhöhe ausgewählt, da diese auf Basis von Untersuchungen für die Ermittlung der kritischen Eisdicke des Eisabwurfs konservativ ist.

- N100/2500 gamma mit 75,0 m Nabenhöhe, 100,0 m Rotordurchmesser
- N117/3000 delta mit 91,0 m Nabenhöhe, 117,0 m Rotordurchmesser
- N131/3000 delta mit 99,0 m Nabenhöhe, 131,0 m Rotordurchmesser

Drehzahl bei Eisabwurf:

Für die Drehzahl wird jeweils die Nenndrehzahl der jeweiligen WEA berücksichtigt, siehe Tabelle 1.1.

- N100/2500 gamma, Rotordrehzahl 14,98 rpm
- N117/3000 delta, Rotordrehzahl 12,6 rpm
- N131/3000, Rotordrehzahl 10,27 rpm

### Physikalische Randbedingungen:

**Luftdichte:** Die Luftdichte wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /19/ zu  $1,225\text{kg/m}^3$  festgelegt.

Die gewählte Luftdichte ist für den betrachteten Eisabwurf als konservativ zu betrachten, da sie gegenüber der bei Eisansatzbedingungen zu erwartenden Luftdichte von ca.  $1,27\text{kg/m}^3$  (siehe Untersuchungen /18/) zu einer höheren Aufprallgeschwindigkeit führt.

**Windgeschwindigkeit:** Zur Festlegung der Windgeschwindigkeit wird in einem ersten Schritt die jeweilige anlagenbezogene Abschaltwindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe zugrunde gelegt, siehe Tabelle 1.1.

**Abschaltwindgeschwindigkeit:**

- 25m/s N100/2500 gamma
- 25m/s N117/3000 delta
- 20m/s N131/3000 delta

**Höhenabhängigkeit:** Die Windgeschwindigkeit wird als Funktion der Höhe modelliert, hierzu wird das exponentielle Windprofil verwendet. Der Höhenexponent  $\alpha$  wird gemäß der IEC 61400-1 ed. 3 /14/ zu 0,2 festgelegt.

**Erdbeschleunigung:** Die Erdbeschleunigung wird zu  $9,81\text{m/s}^2$  festgelegt.

Die kritische Eisdicke wurde in zwei getrennten Schritten mit unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt. In einem ersten Schritt wurde für die Ermittlung der kritischen Eisdicke ein Würfel untersucht (kompaktes Eisobjekt). Die hierfür gewählten Randbedingungen sind im Folgenden dargestellt („Schritt eins“). Im zweiten Schritt wurde unter anderem die Anzahl und die Objektgeometrie der zugrundegelegten Eisobjekte variiert.

### Randbedingungen zum Eisabwurf („Schritt eins“, Würfel):

**Gewicht und Geometrie der Eisobjekte:** In Feldstudien /17/ hat sich gezeigt, dass das Gewicht der Eisobjekte für die Fallweite von geringer Relevanz ist. Die Flugeigenschaften werden im Wesentlichen von der Geometrie und dem  $c_w$ -Wert beeinflusst. Die Gewichte der Eisobjekte normieren wir unter Zugrundelegung der Kenntnisse aus /17/ (geringe Relevanz, siehe vorherigen Absatz) auf 1,0 kg (zur normierten Ermittlung der Flugbahn). Die Normierung ist nach eigenen Untersuchungen bzgl. der Ermittlung der Eisdicke (Eisabwurf) über die Aufprallenergie konservativ.

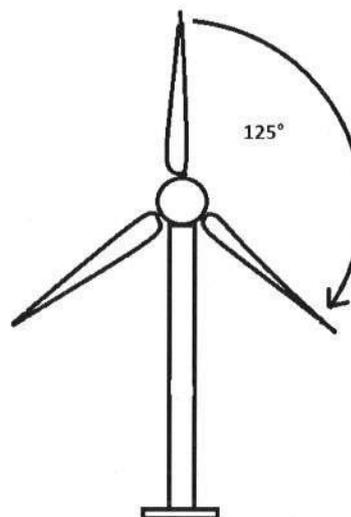
Auf Basis eigener Untersuchungen (siehe z.B. /29/, /30/) wird als zu betrachtendes Eisobjekt im ersten Schritt ein Würfel angesetzt (siehe Tabelle 3.1). Der Würfel ist gegenüber länglichen Eisobjekten hinsichtlich der Aufprallgeschwindigkeit und der resultierenden Aufprallenergie als konservativ zu betrachten.

Lageparameter des Eisobjekts:

Die maximale Umfangsgeschwindigkeit ist an der Rotorblattspitze gegeben. Im Rahmen der Modellierung wird angesetzt, dass sich das Eisobjekt zum Zeitpunkt des Abwurfs an der Rotorblattspitze befindet und somit die größtmögliche Startenergie besitzt.

Lageparameter des Rotorblattes (Abwurfwinkel):

Die Aufprallgeschwindigkeit des Eisobjekts ist auf Basis eigener Untersuchungen im Wesentlichen von der Lage des Eisobjekts zum Zeitpunkt des Abwurfs (gegeben durch die Lage des Rotorblattes in der Rotorebene und der Lage des Eisobjekts auf dem Rotorblatt) und von der Höhe der WEA abhängig (die Aufprallgeschwindigkeit reduziert sich mit zunehmender Höhe – Einfluss des Luftwiderstandes). Unter den genannten Aspekten wird der Abwurfwinkel auf  $125^\circ$  (ca. 4Uhr) festgesetzt (ausgehend von der 0:00Uhr Position im Uhrzeigersinn).



**Abbildung 1:** Abwurfwinkel Eisobjekt Würfel.

Masse [kg]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Form	mittlere Fläche [m <sup>2</sup> ]	mittlerer C <sub>w</sub> -Wert [-]
1,0	700	Würfel	0,013	1,11

**Tabelle 3.1:** Gewähltes Eisobjekt.

#### Randbedingungen zur Schadensbewertung:

Dichte des Eises: Die Dichte des Eises wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /19/ zu 700kg/m<sup>3</sup> festgelegt.

Kritische Aufprallenergie: Für die Ermittlung der kritischen Eisdicke wird die kritische Aufprallenergie (kinetische Energie) gemäß /31/ auf 40J festgelegt. Die kritische Aufprallenergie (kinetische Energie) berechnet sich zu

$$E_{kin} = 1/2 \cdot m \cdot v^2 .$$

mit

E<sub>kin</sub>: kinetische Energie [J],  
m: Masse des Eisobjekts [kg] und  
v: Aufprallgeschwindigkeit [m/s].

Die Masse wird hierbei vereinfacht punktförmig angenommen (konservative Vereinfachung).

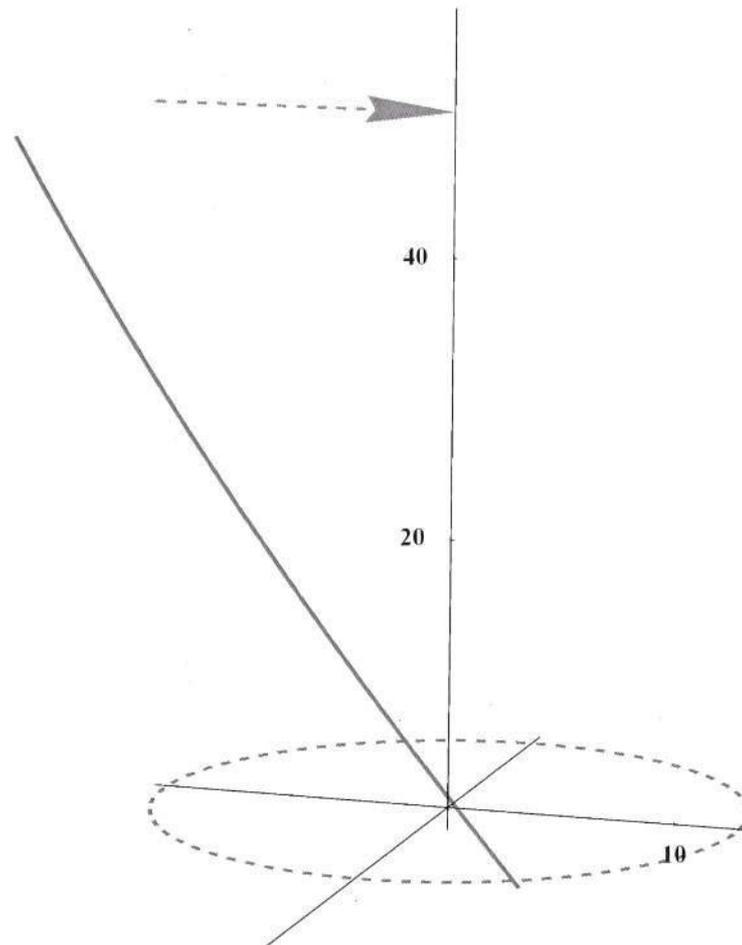
## 3.2 Ermittlung eines kritischen Eisobjektes

Ein kritisches Eisobjekt ist definiert als ein Eisobjekt, welches aufgrund seiner Aufprallenergie eine Gefahr für eine ungeschützte Person am Boden darstellt. Dem kritischen Eisobjekt werden eine kritische Eismasse und eine kritische Eisdicke zugeordnet. Zur Ermittlung sind die folgenden Arbeitsschritte erforderlich:

- Ermittlung der Aufprallgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der festgelegten Randbedingungen.
- Ermittlung der kritischen Eismasse unter Berücksichtigung der ermittelten Aufprallgeschwindigkeit und der festgelegten kritischen Aufprallenergie.
- Ermittlung der kritischen Eisdicke für einen Würfel (gewählte Geometrie des Eisobjekts) unter Berücksichtigung der festgelegten Eisdichte und der ermittelten kritischen Eismasse.

In Abbildung 2 ist die Flugbahn eines Eisobjekts unter Berücksichtigung der festgelegten Randbedingungen dargestellt. Die Randbedingungen (siehe Kapitel 3.1) wurden so

gewählt, dass eine maximale Aufprallgeschwindigkeit vorliegt (Geometrie Würfel, Abwurfwinkel, geringer Abstand Abwurfpunkt Boden).



**Abbildung 2:** Flugbahn unter den gegebenen Randbedingungen – Eisobjekt Würfel (N117/3000 delta, 91,0m Nabenhöhe)

Aufgrund der gewählten Randbedingungen ist die erzielte Wurfweite minimal – im Sinne einer „Worst Case“ Betrachtung sind die Aufprallgeschwindigkeit und die resultierende Aufprallenergie für die Ermittlung der kritischen Eisdicken entscheidend. Auf Basis der ermittelten Aufprallgeschwindigkeiten wurden für die untersuchten WEA-Typen die kritischen Eismassen unter Berücksichtigung der festgelegten kritischen Aufprallenergie von 40J und die daraus resultierenden kritischen Eisdicken ermittelt (siehe Tabelle 3.2).

	N100/2500 gamma	N117/3000 delta	N131/3000 delta
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	10,6	12,6	15,9
Kritische Eismasse [g]	27,7	32,1	38,2
Kritische Eisdicke [cm]	3,4	3,6	3,8

**Tabelle 3.2:** Untersuchungsergebnisse unter den gegebenen Randbedingungen (Würfel).

Vergleicht man den Würfel („Schritt eins“) mit beobachteten Eisobjekten aus der Praxis (TÜV NORD Erfahrungen aus den wiederkehrenden Prüfungen und Literaturquellen /17/, /20/, /21/) sowie Modellrechnungen (Turbice /20/, /24/, /25/, /26/), so ist festzustellen, dass der Würfel als gewähltes Eisobjekt nicht die Bandbreite der möglichen abgeworfenen Eisobjekte abdeckt. Aus diesem Grund wurden in einem zweiten Schritt etwa 144 verschiedene Eisobjekte mit ihren objektspezifischen Massen generiert (Randbedingungen der Eisobjekte: Breite; Höhe; Länge: 10cm; 0,3cm bis 5cm; 5cm bis 20cm; Dichte 700kg/m<sup>3</sup> /19/) und die Aufprallenergie unter Variation der Abwurfbedingungen ermittelt. Die folgenden Randbedingungen wurden für die Parameterstudie („Schritt zwei“) der generierten Eisobjekte gegenüber dem ersten Schritt (Würfel) variiert:

- Die Windgeschwindigkeit wurde von 15m/s bis zur Abschaltwindgeschwindigkeit (siehe Kapitel 3.1) der jeweiligen WEA kontinuierlich mit einer Schrittweite von 1m/s variiert. Für die Ermittlung der kritischen Eisdicke hat sich gezeigt, dass der obere Windgeschwindigkeitsbereich maßgeblich ist.
- Die Lage des Rotorblattes in der Rotorebene (Abwurfwinkel) wurde in 10° Schritten von 0° bis 360° variiert.

Für jedes abgeworfene Eisobjekt wurden die Aufprallgeschwindigkeit sowie die zugehörige Aufprallenergie ermittelt und mit der zugrunde gelegten kritischen Aufprallenergie von 40J verglichen (siehe Kapitel 3.1). In der Tabelle 3.3 sind die daraus resultierenden minimalen Eisdicken für die Untersuchten WEA-Typen angegeben.

	N100/2500 gamma	N117/3000 delta	N131/3000 delta
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	22,1	21,5	20,4
Masse [kg]	0,168	0,182	0,210
Dicke [cm]	1,2	1,3	1,5
Windgeschwindigkeit [m/s]	25	25	20

**Tabelle 3.3:** Untersuchungsergebnisse Variation der generierten Eisobjekte, Auswahlkriterium kinetische Energie größer 40J.

Die Ergebnisse in Tabelle 3.3 zeigen, dass die ermittelte kritische Eisdicke mit einer hohen Windgeschwindigkeit (Abschaltwindgeschwindigkeit 25m/s) einhergeht. Gemäß deutschem Wetterdienst (DWD) /32/ entspricht eine Windgeschwindigkeit von 25m/s einem „schwerem Sturm“, bei dem mit brechenden Bäumen und größeren Schäden an Häusern zurechnen ist. Die Ergebnisse aus /18/ und weiteren internen Studien zeigen, dass an den überwiegenden Standorten in Deutschland bei Eisansatz überwiegend mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten, bezogen auf die Ganzjahreswindstatistik, zu rechnen ist. Auf dieser Basis wurde für die Auswahl des kritischen Eisobjektes die Windgeschwindigkeit auf kleiner gleich 20m/s begrenzt. Gemäß DWD /32/ ist bei einer Windgeschwindigkeit von 20m/s („Sturm“) immer noch mit brechenden Ästen von Bäumen (vergleichbar mit der Gefährdung durch herabfallende Eisobjekte) und einem beschwerlichem Gehen zurechnen. Daraus ergeben sich die in Tabelle 3.4 dargestellten kritischen Eisdicken.

	N100/2500 gamma	N117/3000 delta	N131/3000 delta
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	20,3	20,2	20,4
Masse [kg]	0,196	0,196	0,210
Dicke [cm]	1,4	1,4	1,5
Windgeschwindigkeit [m/s]	20	20	20

**Tabelle 3.4:** Untersuchungsergebnisse Variation der generierten Eisobjekte, Auswahlkriterium kinetische Energie größer 40J und Windgeschwindigkeit kleiner gleich 20m/s.

Die Ergebnisse aus Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 zeigen, dass mit zunehmender Anlagengröße die kritische Eisdicke zunimmt. Dies ist unter anderem durch den längeren Flugweg und die größere Flugzeit der abgeworfenen Eisobjekte begründet. Die hohe Anfangsgeschwindigkeit, die durch die Blattspitzengeschwindigkeit auf das abgeworfene Eisobjekt wirkt, wird über den Flugweg durch den Luftwiderstand zunehmend abgebremst. Daraus folgt, dass mit zunehmendem Flugweg (größere Anlage) die Aufprallgeschwindigkeit sinkt und damit die kritische Masse sowie die kritische Eisdicke steigen.

Abschließend werden die kritischen Eisdicken, unter Berücksichtigung einer niedrigeren Windgeschwindigkeit bei Eisansatz /18/, zu den in Tabelle 3.4 aufgeführten Dicken festgelegt. Die dünnste ermittelte kritische Eisdicke stellt sich somit bei der N100/2500 gamma (Nabenhöhe 75,0) zu 1,4 cm ein.

### 3.3 Ermittlung einer kritischen Zeit zur Bildung eines kritischen Eisobjektes

In der Vergangenheit gab es zum Eiswachstum verschiedene Studien auf Basis der Simulationsprogramme TURBICE /20/, /24/, /25/, /26/ (WEA – Vereisung von Rotorblättern) und LEWICE /24/ (Luftfahrt – Vereisung von Tragflächen) sowie auf Basis experimenteller Windkanalversuche /20/, /24/, /27/.

Die Studien zeigen übereinstimmend die folgenden Ergebnisse:

- Die Eiswachstumsrate von Raureif (Dicke Eis pro Zeiteinheit [mm/min]) nimmt mit zunehmender Größe der WEA (450kW bis 2MW) ab (0,75 mm/min bis 0,45 mm/min) /25/, /26/. Zusätzlich zu den Versuchsergebnissen /25/ wurde dieses Phänomen zunächst in einem Windpark beobachtet und daraufhin näher untersucht /25/.
- Raureif wächst insgesamt dicker auf als Klareis /24/, /27/ besitzt aber eine geringere Dichte /28/ (Raureif: 600 bis 900 kg/m<sup>3</sup>, Klareis 900 kg/m<sup>3</sup>).
- Die Eiswachstumsrate liegt in einem Bereich von 0,45 mm/min /25/ bis 3 mm/min /24/.

Zusammenfassend wird die Eiswachstumsrate zu 1 mm/min festgelegt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Eiswachstumsrate mit zunehmender Größe der WEA abnimmt /25/, /26/ - gemäß der Erkenntnisse aus /25/ eher unterhalb von 1 mm/min liegt. Die festgelegte Eiswachstumsrate gilt in Anlehnung an /27/ (Studie DTU Wind Energy 2013) für Klareis, Raureif bzw. einer Vereisungsmischung /27/.

Auf Basis der ermittelten kritischen Eisdicken (siehe Tabelle 3.4) ergibt sich die kritische Zeit, bis zu der mit der Akkumulation der kritischen Eisdicke zu rechnen ist, ca. zu den in Tabelle 3.5 aufgeführten Werten. Innerhalb dieser Zeit sollte das Eiserkennungssystem den Eisansatz erkannt und die WEA abgeschaltet haben, um den Eisabwurf eines kritischen Eisobjektes zu verhindern.

	N100/2500 gamma	N117/3000 delta	N131/3000 delta
Detektionszeit [min]	14	14	15

**Tabelle 3.5:** Detektionszeiten bis zum Aufwachsen einer kritischen Eisdicke.

## 4 Test der Eiserkennung auf Basis von numerischen Simulationen

### 4.1 Testbeschreibung

Die grundsätzliche, anlagenunabhängige Eignung der vom IDD.Blade System verwendeten Sensorik und Auswerteeinheiten sowie die allgemeine Funktionsfähigkeit des Systemaufbaus bezüglich der zuverlässigen Detektion von globalen, strukturdynamischen Zustandsveränderungen wurde bereits im Rahmen einer früheren Begutachtung durch die Zertifizierungsstelle des Germanischen Lloyd entsprechend der Richtlinie /11/, unter anderem auf Basis eines experimentellen Nachweises im Rotorblatttestprüfstand , /12/, geprüft und bestätigt, siehe /3/. Darüber hinausgehend soll in der hier vorliegenden Begutachtung durch genauere, quantitative Untersuchungen überprüft werden, ob das Eiserkennungssystem hinsichtlich der Schwellwerte und Parameter korrekt auf die Anlagen eingestellt ist und die im vorherigen Kapitel ermittelten kritischen Eisdicken innerhalb der ermittelten kritischen Detektionszeiten zuverlässig erkennen und melden kann.

Aufgrund der Komplexität des vorliegenden Eiserkennungssystems in der Erfassung, Verarbeitung und Auswertung der relevanten Zustandsdaten wurde mit dem Systemhersteller Wölfel ein auf numerischen Anlagensimulationen basierender Systemtest im Rahmen eines „Black-Box“ Verfahrens abgestimmt. Hierzu werden von unabhängiger gutachterlicher Seite die von dem Eiserkennungssystem verwendeten Eingangsgrößen simuliert und anonymisiert an den Systemhersteller übermittelt. Dieser wertete die übermittelten Daten mit dem IDD.Blade Eiserkennungssystem aus und meldete die vom System ermittelten Ausgangsgrößen zurück an den Gutachter. Die Auswertung der Rückmeldungen auf Basis der auf gutachterlicher Seite bekannten simulierten Umgebungsbedingungen und Eisdicken der Eingangsgrößen ermöglichte sodann eine Bewertung der Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Eiserkennung bezogen auf die vorliegenden Schwellwerte des Systems.

Die numerischen Simulationen wurden auf Basis von Mehrkörpersimulationsmodellen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden aus den in Tabelle 1.1 genannten Windenergieanlagen die folgenden zwei Anlagen repräsentativ ausgewählt (siehe auch Kapitel 4.10), modelliert und näher untersucht:

- N100/2500 gamma, Rotorblatt NR50
- N117/3000 delta, Rotorblatt NR58.5 -2

Bei den Windenergieanlagen handelt es sich um Anlagen mit aktiver Windrichtungsnachführung und einem luvseitig angeordneten Dreiblatt-Rotor. Die Leistungsbegrenzung erfolgt durch die Blattwinkelverstellung aller drei Rotorblätter. Die Anlagen werden auf verschiedenen Türmen mit variierender Nabenhöhe verbaut, wie Tabelle 1.1 zu entnehmen ist.

Im Folgenden werden die ausgewählten Anlagen mit ihren wichtigsten technischen Hauptdaten beschrieben.

## 4.2 Beschreibung der modellierten Windenergieanlagen

### 4.2.1 N100/2500 gamma

**Tabelle 4.1:** Technisch Hauptdaten der untersuchten WEA NORDEX N100/2500

Elektrische Nennleistung	2500 kW
Nabenhöhe	75 – 100 m
Rotordurchmesser	100 m
Rotornennendrehzahl	14,98 U/min
Rotordrehzahl im Produktionsbetrieb	9,8 – 16,9 U/min
Getriebeübersetzung	77,44
Netzfrequenz	50 Hz
Rotorüberhang (vor Turmachse)	3,98 m
Rotorachsneigung	5°
Rotor-Konuswinkel	3,5° upwind
Einschaltwindgeschwindigkeit (10 Minuten Mittelwert)	3 m/s
Nennwindgeschwindigkeit	12 m/s
Abschaltwindgeschwindigkeit (10 Minuten Mittelwert)	25 m/s
Rotorblatt	NR50
Rotorblattmasse	10700 kg
Pitch-Verstellbereich	-5° bis 90°
Max. Pitchgeschwindigkeit	±8 °/s
Auslegungslebensdauer	20 Jahre

#### 4.2.2 N117/3000 delta

**Tabelle 4.2:** Technisch Hauptdaten der untersuchten WEA NORDEX N117/3000

Elektrische Nennleistung	3000 kW
Nabenhöhe	91 – 141 m
Rotordurchmesser	117 m
Rotornennendrehzahl	12,6 U/min
Rotordrehzahl im Produktionsbetrieb	8,1 – 14,1 U/min
Getriebeübersetzung	92,29
Netzfrequenz	50 Hz
Rotorüberhang (vor Turmachse)	3,915 m
Rotorachsneigung	5°
Rotor-Konuswinkel	3,5° upwind
Einschaltwindgeschwindigkeit (10 Minuten Mittelwert)	3 m/s
Nennwindgeschwindigkeit	12 m/s
Abschaltwindgeschwindigkeit (10 Minuten Mittelwert)	25 m/s
Rotorblatt	NR58.5 -2
Rotorblattmasse	10551 kg
Pitch-Verstellbereich	-5° bis 90°
Max. Pitchgeschwindigkeit	±10 °/s
Auslegungslbensdauer	20 Jahre

### 4.3 Modellaufbau

Zur Begutachtung der Funktion des IDD.Blade Eiserkennungssystems wurde jeweils ein dreidimensionales dynamisches Simulationsmodell für die in Kapitel 4.2 beschriebenen Anlagen unter Berücksichtigung der Anlagendynamik und der Aeroelastizität aufgestellt. Für die numerischen Simulationen wurde das speziell für die Berechnung von Windenergieanlagen entwickelte und auf dem Mehrkörpersimulationsansatz basierende Programm DNV-GL Bladed in der Version 4.5 verwendet. Das Berechnungsmodell berücksichtigt alle für das Schwingungsverhalten der WEA wesentlichen Massen, Dämpfungen und Steifigkeiten, die Blattwinkel- und Umrichterregelung sowie alle lastrelevanten Eigenschaften des Betriebsführungs- und Sicherheitssystems. Die Aerodynamik der Rotorblätter basiert auf der Blattelementtheorie und berücksichtigt die Blatt- und Turmdeformationsgeschwindigkeit, den Stall-Effekt sowie den Turmvorstau. Eine aerodynamische Asymmetrie der Blätter durch Blattwinkelfehler ( $\pm 0.3^\circ$ ) und eine Massenexzentrizität des Rotors von 145 kg wirkend im Blattschwerpunkt wurden in dem Berechnungsmodell als strukturelle Unwucht für alle Berechnungen berücksichtigt. Die Lastberechnungen wurden unter Berücksichtigung einer elastischen Einspannung des Turmfußes durchgeführt.

Als Ergebnis der numerischen Simulationen können die vom IDD.Blade verwendeten Eingangsgrößen der Anlagenbetriebsführung, bestehend aus

- Windgeschwindigkeit
- Leistung
- Rotordrehzahl
- Pitchwinkel der drei Rotorblätter

im Zeitbereich bereitgestellt werden.

Aus simulationstechnischen Gründen ist eine Ausgabe der benötigten Blattbeschleunigungen an den Positionen der vom Eiserkennungssystem verwendeten Sensoren nicht direkt möglich. Stattdessen wurde mit Wölfel die Übermittlung der Blattverschiebungen an den entsprechenden Positionen über der Zeit vereinbart, welche im Rahmen der Auswertung in einem vorgeschalteten Prozess zunächst manuell durch ein Finite-Differenzen-Verfahren 2. Ordnung zu den benötigten Beschleunigungen abgeleitet wurden.

Durch die in diesem Absatz beschriebene Modellierung ist es möglich den Test des Eiserkennungssystems, anders als bei experimentellen Tests in Rotorblattprüfständen, unter Einbeziehung der Gesamtanlagendynamik und realistischer externer Bedingungen durchzuführen. Hierbei werden das Eiserkennungssystem beeinflussende Faktoren und Effekte wie die Versteifung der Rotorblätter durch den Fliehkrafteffekt, oder die blattwinkelabhängige Kopplung der Blatteigen- und Triebstrangfrequenz direkt berücksichtigt und einbezogen.

#### 4.4 Referenzierung der Anlagenmodelle

Wie in Kapitel 1.3 beschrieben, muss das IDD:Blade Eiserkennungssystem an neuen Windenergieanlagen zunächst durch eine Lernphase im unvereisten Zustand referenziert werden. Im Rahmen dieser Referenzierung werden die zur Detektion geeigneten Eigenfrequenzen der einzelnen Rotorblätter und deren Beeinflussung durch den Betriebszustand der Windenergieanlage sowohl im Produktions- als auch im Trudelbetrieb festgestellt.

Zu diesem Zweck wurden für beide im vorherigen Kapitel ausgewählten repräsentativen Anlagen (N100/2500 gamma und N117/300 delta) zunächst eine zur Referenzierung ausreichende Anzahl von Anlagensimulationen im unvereisten Zustand ausgeführt und an Wölfel übermittelt. Im Folgenden werden die Randbedingungen zu diesen Simulationen dargelegt.

**Tabelle 4.3 Festlegung von Randbedingungen für die numerischen Simulationen**

Luftdichte:	Die Luftdichte wurde gemäß der Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /19/ zu $1,225\text{kg/m}^3$ festgelegt.
Turbulentes Windmodell:	Die zur Anlagensimulation verwendeten turbulenten Windfelder, welche eine dreidimensionale, zeitlich und räumlich variierende Windgeschwindigkeit repräsentieren, wurden mittels des in der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 /14/ aufgeführten Kaimal Turbulenzmodell erstellt. Die windgeschwindigkeitsabhängige Turbulenzintensität der Windfelder wurde entsprechend der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 /14/ auf die Turbulenzkategorie C festgelegt, was einem Erwartungswert der Turbulenzintensität von 0,12 bei 15m/s Windgeschwindigkeit entspricht.
Windgeschwindigkeiten:	Im Rahmen der Simulationen wurden Windfelder mit einer zeitlichen Ausdehnung von 600 Sekunden (entspricht 10 Minuten) verwendet. Die mittleren Windgeschwindigkeiten von Einschalt- bis Ausschaltwindgeschwindigkeit (jeweils 3 bis 25m/s) wurden mit einer Auflösung von 1m/s in einzelnen Windfeldern umgesetzt. Für jede der daraus resultierenden 23 Windgeschwindigkeiten wurden sechs Windfelder mit unterschiedlichen Turbulenzseeds erstellt und verwendet.
Höhenabhängigkeit:	Die Windgeschwindigkeit wurde als Funktion der Höhe modelliert, hierzu wird das exponentielle Windprofil verwendet. Der Höhenexponent $\alpha$ wurde gemäß der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 /14/ zu 0,2 festgelegt.

Im Rahmen der Referenzierungsphase wurden Wöfel pro Windenergieanlage jeweils 138 Zeitreihen a 600 Sekunden Länge (10 Minuten) im Trudelbetrieb und 138 Zeitreihen im Produktionsbetrieb übermittelt.

Es wurde sich auf Simulationen unter normalen, fehlerfreien Produktions- bzw Trudelbedingungen der Windenergieanlagen entsprechend der Auslegungslastfallgruppen DLC1.1 und DLC6.4 der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 /14/ beschränkt. Extreme atmosphärische Bedingungen wie starke Windgeschwindigkeitsänderungen in Form von deterministischen Böen oder starke Windrichtungsänderungen sowie Fehlerzustände der Anlage wie das Erreichen der Überdrehzahl oder starke Gierfehler als auch Fehler des Übertragungsnetzes sind in der Regel von kurzer und somit zur Eiserkennung irrelevanter Dauer und führen in der Regel ohnehin zu einem Abschalten der Anlage.

#### 4.5 Modellierung der Anlagenvereisung

Nach erfolgter Einstellung des IDD.Blade Eiserkennungssystems auf die numerischen Anlagenmodelle im Rahmen der Referenzierung wurden die Modelleigenschaften abgeändert um den Vereisungszustand der Anlagen in den folgenden Simulationen abzubilden. Da das IDD.Blade Eiserkennungssystem, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, Eisansatz am Rotorblatt indirekt durch eine Massenzunahme des Rotorblatts und die dadurch bedingte Veränderung der Bauteileigenfrequenz detektiert, wurde eine Manipulation der Rotorblattmasse durch Zusatzpunktmassen im numerischen Simulationsmodell vorgenommen. Die Stärke der Vereisung als auch die Eisverteilung über dem Rotorblatt kann unter Anwendung dieser Methode anhand der Variation von Position und Größe der einzelnen Zusatzmassen eingestellt werden.

Die kritischen Eisdicken für den jeweiligen Windenergieanlagentyp wurden in Kapitel 3 ermittelt. Bei der Modellierung der Eisdicken wurde sich maßgeblich auf die ermittelten kritischen Eisdicken beschränkt. Da das Eiserkennungssystem eine stärkere Vereisung als die ermittelte kritische Eisdicke aufgrund des hinterlegten physikalischen Grundprinzips besser und einfacher detektieren kann als die kritische Vereisung, ist dieser Ansatz als konservativ anzusehen. Eine Umrechnung der ermittelten kritischen Eisdicken auf entsprechende Punktmassen erfolgte unter Einbeziehung der in Kapitel 3 festgelegten Rahmenbedingungen. Es wurde bei der Modellierung die Annahme zugrunde gelegt, dass der Eisansatz bis zum Erreichen der kritischen Eisdicke lediglich im Bereich der Profilverderkannte ansetzt, womit auch die Positionen der Zusatzmassen entsprechend an der Profilverderkannte festgelegt wurden. Für die spannweiteige Verteilung des Eises über der Rotorblattlänge wurden drei unterschiedliche Ansatzformen ausgewählt:

1. Die Eisdicke steigt linear von null Millimetern am Rotormittelpunkt bis zur kritischen Dicke am halben Rotorradius an und verläuft von dort aus bis zur Rotorblattspitze konstant, entsprechend der DIBt Richtlinie 2012 /15/
2. Die Eisdicke steigt linear von null Millimetern am Rotormittelpunkt bis zur kritischen dicke an der Rotorblattspitze an, entsprechend /34/
3. Die Eisdicke verläuft mit konstanter, kritischer Dicke von der Rotorblattspitze ausgehend über ein Drittel der Blattlänge. Diese partielle Eisverteilung soll das

sogenannte „in-cloud icing“ repräsentieren, bei dem lediglich der äußere Teil des Rotorblattes, beispielsweise aufgrund des Durchlaufens tiefhängender Wolken und Nebelschichten, von den Vereisungsbedingungen betroffen ist.

Zusätzlich wurde bei der Modellierung der Vereisungsszenarien zwischen Vereisung aller drei Rotorblätter zur gleichen Zeit und nur einzeln vereisten Rotorblättern des Rotors variiert.

#### **4.6 Simulation der Testszzenarien**

Die Simulation der Testszzenarien fand unter den in Kapitel 4.4 beschriebenen Randbedingungen statt. Die Luftdichte wurde dabei z.T. zwischen den im Kapitel 4.4 angegebenen  $1,225\text{kg/m}^3$ , was einer Umgebungstemperatur von  $15^\circ\text{C}$  bei Standardbedingungen auf Meereshöhe entspricht, und  $1,3163\text{ kg/m}^3$ , was einer Umgebungstemperatur von  $-5^\circ\text{C}$  bei Standardbedingungen auf Meereshöhe entspricht, variiert.

Zur Simulation der Testszzenarien wurden neue Windfelder unter den in Kapitel 4.4 beschriebenen Randbedingungen im gesamten Betriebsbereich der Windenergieanlagen, von Einschalt- bis Ausschaltgeschwindigkeit erstellt. Somit entsprechen die Windbedingungen der Testszzenarien bezüglich der charakteristischen Werte wie mittlere Windgeschwindigkeit und Turbulenzintensität zwar den Windbedingungen der Referenzierungsphase, unterscheiden sich jedoch im zeitlichen Verlauf, welches als eine wichtige Voraussetzung für eine realitätsnahe Testumgebung angesehen wird.

Zum Test der Eiserkennungsfunktionalität wurden insgesamt 384 Zeitreihen mit jew. 600 Sekunden Länge (10 Minuten) sowohl im Produktions- als auch im Trudelbetrieb der Anlagen erstellt. Jeweils 6 Zeitreihen (entspricht 60 Minuten Testzeit) unter verschiedenen Windbedingungen, jedoch gleichen Vereisungsbedingungen, wurden dabei zu einem sogenannten Testblock zusammengestellt und anonymisiert an Wölfel übermittelt. Zur Abdeckung der Prüfung auf Zuverlässigkeit und Plausibilität waren in den an Wölfel übermittelten Daten auch Testblöcke enthalten, in denen gegenüber der kritischen Eisdicke deutlich abgeschwächte oder z.T. gar keine Vereisung der Anlagen vorlag. Die Testblöcke decken somit eine repräsentative Auswahl an individuellen Kombinationen der Wind-, Vereisungs- und Betriebsbedingungen der begutachteten Anlagen ab, welche vom Systemanbieter Wölfel mit dem IDD.Blade Eiserkennungssystem ausgewertet wurden.

#### **4.7 Auswertung der Testszzenarien**

Die Übermittlung der Simulationsdaten an Wölfel erfolgte testblockweise als anonymisierte ASCII Dateien, in denen lediglich die in Kapitel 4.3 beschriebenen Betriebsbedingungen und Blattverschiebungen über der Zeit enthalten waren. Anonymisiert bedeutet in diesem Zusammenhang, dass zwar der Anlagentyp bekannt ist, jedoch keinerlei Information zum Vereisungszustand der Blätter. Somit wurde sichergestellt, dass für Wölfel kein direkter Rückschluss von den Testdaten auf die Vereisungszustände der Wind-

energieanlagen möglich war und sich zudem keine Verzerrung des Testergebnisses aufgrund von Informationen einstellen konnte, welche dem Eiserkennungssystem im Feldbetrieb nicht vorliegen. Wölfel hat im Zuge der Auswertung schriftlich bestätigt, dass die Auswertung der Testdaten ausschließlich auf Basis der im IDD.Blade umgesetzten Methodik und Auswertelgorithmen stattgefunden hat und keine relevanten Modifikationen an dem System im Vergleich zum realen Feldbetrieb vorgenommen wurden /35/. Lediglich die in Kapitel 4.3 beschriebene manuelle Ableitung der übermittelten Blattverschiebungen zu Blattbeschleunigungen wurde der Auswertung als manueller Prozess vorgeschaltet.

Um die IDD.Blade Eiserkennungsfunktionen im Originalzustand nutzen zu können wurden die übermittelten Testblockdaten dem Eiserkennungssystem in einminütigen Teilabschnitten zugeführt, wobei immer fünf Einminutenabschnitte einen Zustandsindikator repräsentieren. Da IDD.Blade einen Vereisungszustand anhand der Überschreitung eines Schwellwertes durch den Zustandsindikator detektiert, konnte die zur Detektion eines Vereisungszustandes benötigte Zeit somit im Rahmen von fünf Minuten (kleinste Zeiteinheit zur Ermittlung eines Vereisungsindikators) bis 60 Minuten (maximal in einem Testblock zur Verfügung gestellte Messdaten) liegen. Im Zuge der Testdatenauswertung wurde von Wölfel -neben der Meldung von ggf. in einem Testblock vorliegender kritischer Vereisung -ebenfalls die zur Detektion benötigte Zeit pro Testblock zurück übermittelt.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine im Zuge der Begutachtung des IDD.Blade Eiserkennungssystems von Wölfel zurück übermittelte Auswertung der Testdatenblöcke einer Testschleife an der N117/3000 Windenergieanlage. Die Festlegung der Schwellwerte der Zustandsindikatorabweichung wurde auf Basis der in Kapitel 4.4 beschriebenen Simulationsdaten als anlagenspezifischer Systemparameter festgelegt und liegt bei -0,35% für eine Eiswarnung und -0,6% für einen Eisalarm. Diese Schwellwerte wurden von Wölfel in den weiteren Tests ebenfalls für die N100/2500 Windenergieanlage festgelegt und angewendet. Die Beurteilung, ob eine Warnung bzw. ein Alarm gemeldet wird, basiert auf dem zusammengefassten Zustandsindikator aller drei Blätter, welcher sich als Minimum der pro Blatt ermittelten Zustandsindikatorabweichungen ermittelt. Die aufgeführten Zustandsindikatoren der einzelnen Blätter entsprechen dem Mittelwert der Abweichung eines gesamten Testblocks (60 Minuten) gegenüber dem referenzierten Anlagenzustand.

Test Nr.	Beurteilung	Eisindikatoren [%]				Zeit bis	
		Blatt1	Blatt2	Blatt3	min(B1,B2,B3)	Warnung	Alarm
01	Alarm	-2,23	-2,24	-2,28	-2,28	x	5 Min.
02	Alarm	-1,45	-1,46	-1,44	-1,46	x	5 Min.
04	Alarm	-0,72	-0,66	-0,89	-0,89	5 Min.	10 Min.
05	Alarm	-0,51	-0,52	-0,62	-0,62	5 Min.	20 Min.
07	Normal	-0,12	-0,13	-0,31	-0,31		
08	Normal	-0,09	-0,02	-0,05	-0,09		
11	Normal	-0,07	-0,26	-0,23	-0,26		
12	Alarm	-1,36	-1,47	-1,33	-1,47	x	5 Min.
13	Normal	-0,06	-0,29	-0,08	-0,29		
14	Alarm	-0,64	-0,77	-0,69	-0,77	5 Min.	10 Min.
15	Alarm	-1,03	-1,07	-1,26	-1,26	x	5 Min.
18	Normal	-0,21	-0,08	-0,03	-0,21		
19	Alarm	-1,14	-1,09	-1,02	-1,14	x	5 Min.
21	Normal	-0,06	-0,16	-0,16	-0,16		
22	Alarm	-1,48	-1,49	-1,67	-1,67	x	5 Min.
24	Alarm	-1,10	-1,08	-1,18	-1,18	x	5 Min.

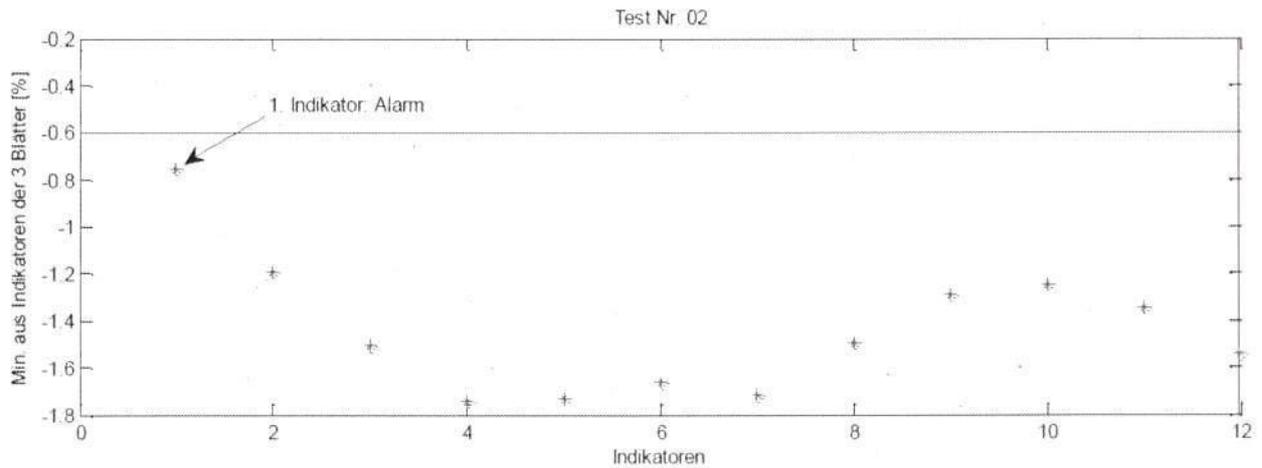
**Abbildung 3:** Ergebnisse der Auswertung der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000

Die zur Detektion benötigte Zeit pro Testblock entspricht der Zeit, nach der ein entsprechender Schwellwert zum ersten Mal überschritten wurde. Dabei wurde jeweils von einem aus der Anlagenreferenzierung bekannten, eisfreien Zustand ausgegangen, an den sich der jeweilige Testdatensatz anschließt.

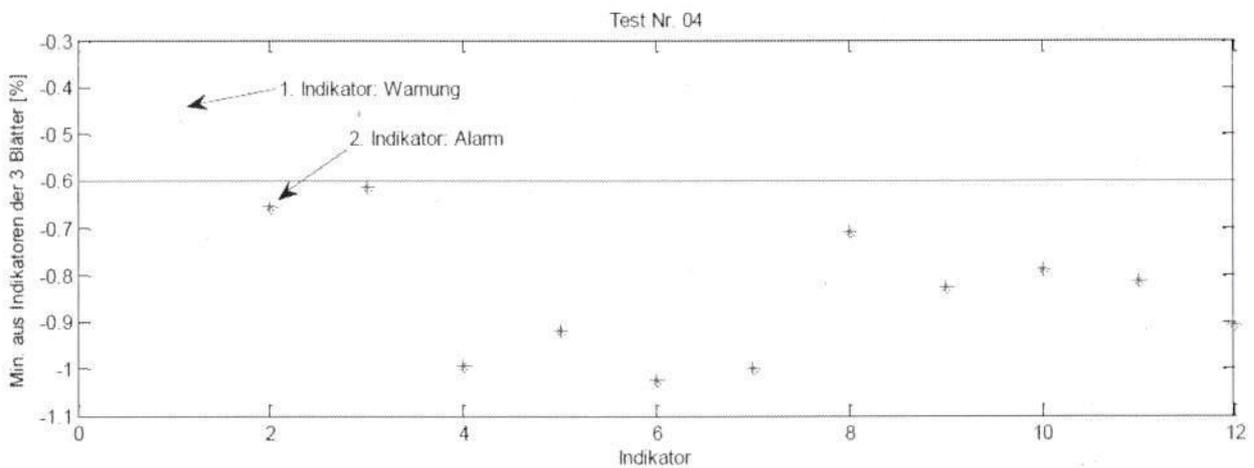
Abbildung 4 bis Abbildung 6 zeigen exemplarisch die zeitlichen Verläufe der Zustandsindikatoren aus den Testblöcken Nr. 02, 04 und 05 der ersten Testschleife zur Eiserkennung der N117/300 Windenergieanlage.

Ein Indikator ergibt sich aus der Berechnung von 5 jeweils 60 Sekunden langen Zeitreihen (12 Indikatoren je Stunde). Die Identifikationszeiten bis zur ersten Warnung bzw. Alarmierung sind in den beiden letzten Spalten der Abbildung 3 aufgeführt. Ein x bei der Warnung bedeutet dabei, dass das Eiserkennungssystem bereits mit der Auswertung des ersten Zustandsindikators eine Überschreitung des Alarmschwellwerts festgestellt hat, sodass nach 5 Minuten Detektionszeit sofort ein Alarm ausgelöst wird.

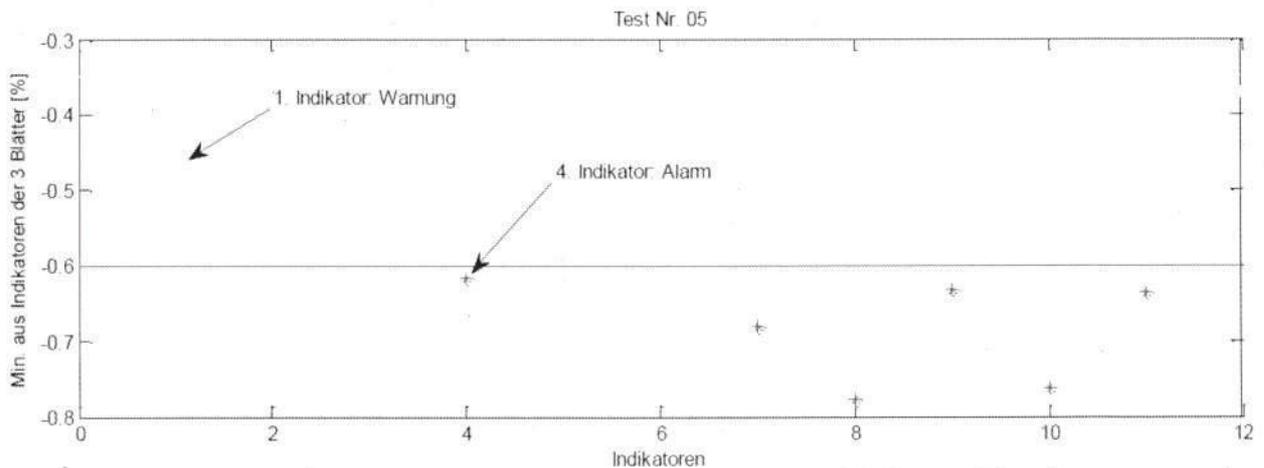
Anhand der Rückmeldungen pro Testblock kann eine Bewertung der Funktion und der Eignung des IDD.BLADE Eiserkennungssystems auf Basis der in Kapitel 3.2 ermittelten Eisdicken und der in Kapitel 3.3 ermittelten Detektionszeiten bezüglich der zuverlässigen Eiserkennung bei Einsatz auf den betrachteten Windenergieanlagen vorgenommen werden.



**Abbildung 4:** Auswertung des Testblocks 02 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000



**Abbildung 5:** Auswertung des Testblocks 04 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000



**Abbildung 6:** Auswertung des Testblocks 05 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000

## 4.8 Bewertung der Testergebnisse

Im Rahmen der in Kapitel 4 beschriebenen Testprozedur wurde das IDD.Blade Eiserkennungssystem anhand von numerischen Simulationsmodellen, welche auf den zwei repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen N100/2500 gamma und N117/3000 delta basieren, referenziert. Anschließend wurden verschiedene, maßgeblich auf den in Kapitel 3.2 ermittelten kritischen Eisdicken basierende Vereisungsszenarien mittels Massenmanipulationen der Anlagenmodelle simuliert und vom IDD.Blade Eiserkennungssystem ausgewertet. Im Zuge der Begutachtung des IDD.Blade Eiserkennungssystems wurden auf diese Weise 60 Testblöcke, welche Testszenarien als repräsentative Kombinationen von Wind-, Vereisungs- und Betriebsbedingungen der betrachteten Windenergieanlagen darstellen, abgeprüft.

Die Auswertung der Testblöcke, unter denen auch eine repräsentative Anzahl von unvereisten Testblöcken vorhanden war, ergab, dass das IDD.Blade Eiserkennungssystem mit sehr guter Zuverlässigkeit alle Testblöcke, welche mit den in Kapitel 3.2 ermittelten kritischen Eisdicken versehen waren, detektiert hat. Dabei wurde bei keinem der Testblöcke mit unvereistem Anlagenzustand ein Fehlalarm und lediglich bei einem Testblock, entspricht ca. 5% aller unvereisten Testfälle, eine Fehlwarnung ausgegeben, womit zusätzlich eine hohe Anlagenverfügbarkeit bei eisfreiem Zustand indiziert wurde. Die Auswertung der Testblöcke mit schwächerer Vereisung als der jew. ermittelten kritischen Eisdicke zeigte, dass z.T. auch deutlich geringere Eisdicken, als die kritische Eisdicke gut detektiert werden können.

Im Rahmen der Begutachtung wurde innerhalb von höchstens 15 Minuten eine Eiswarnung bei 100% und ein Eisalarm bei 71% aller Testblöcke mit kritischer Vereisung gemeldet. Bei den übrigen 21% der Testblöcke mit kritischer Vereisung wurde der Eisalarm nach höchstens 20 Minuten gemeldet. Eine detaillierte Betrachtung der zeitlichen Verläufe der Einzelindikatoren der oben genannten 21% der Testfälle auf Basis von Grafiken entsprechend den in Abbildung 4 bis Abbildung 6 dargestellten Beispielen hat darüber hinaus ergeben, dass sich zumeist schon nach 15 Minuten ein dem Alarmschwellwert sehr nahe liegender Zustandsindikator eingestellt hat.

Auf Grundlage der oben beschriebenen Auswertung liegt ein starker Indikator dafür vor, dass das IDD.Blade Eiserkennungssystem ohne Einschränkungen in der Lage ist, die in Kapitel 3.2 festgelegten kritischen Eisdicken in der im Kapitel 3.3 festgelegten kritischen Zeiten zuverlässig und reproduzierbar in der in Kapitel 4 beschriebenen Testumgebung an den repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen zu detektieren. Es wird zudem davon ausgegangen, dass bei fortschreitender Entwicklung der Genauigkeit der Datenerfassung und Auswertung des Eiserkennungssystems und ggf. weiterer Anpassung der Schwellwerte zukünftig auch deutlich geringere Eisdicken als die in dieser Begutachtung ermittelten kritischen Eisdicken bei gleichzeitig hoher Anlagenverfügbarkeit in unvereistem Zustand zuverlässig detektiert werden können. Zusätzlich gilt bei weiterer Entwicklung des Auswertalgorithmus und einer ggf. gleichzeitigen Verringerung der minimalen Ausgabzeit der aktualisierten Zustandsindikatoren eine weitere Reduzierung der oben genannten Überschreitungen der Eisalarmmeldezeiten in 21% der kritischen Testfälle als sehr wahrscheinlich. Aufgrund der guten Übereinstimmung der in Kapitel 3.3 ermittelten kritischen Detektionszeiten mit den im Rahmen der Begutachtung

festgestellten Detektionszeiten für Eiswarnung bei einer gleichzeitig geringen Fehlwarnungsquote von ca. 5% wird davon ausgegangen, dass die Zuverlässigkeit der Eisdetektion bezüglich der kritischen Detektionszeit schon heute durch Abschaltung der Anlagen bei Eiswarnung erhöht werden kann.

#### 4.9 Übertragbarkeit der Testumgebung auf die Realität

Eine modellgestützte Testprozedur ist immer mit einer gewissen Abweichung gegenüber der Realität verbunden, wie sie annähernd bei einem Langzeitfeldtest bei ausreichend häufiger, repräsentativer, natürlicher Vereisung und wechselnden natürlichen Umgebungsbedingungen aufgenommen werden könnte. Da sich solche Feldtests in der Regel als nicht praktikabel darstellen, müssen gewisse Annahmen und Modelle, sowohl in realisierbaren Feldtests, mit beispielsweise künstlicher Eismodellierung, als auch in numerischen Simulationsumgebungen zugrunde gelegt werden.

Die in dieser Begutachtung zur Simulation der Windenergieanlagen verwendete Software gilt als Stand der Technik für die aus der Zertifizierung von Windenergieanlagen nach den Richtlinien /11/, /14/ und /15/ geforderten Lastrechnungen. Hierbei zeigt sich regelmäßig im Rahmen von Prototypenvermessungen und Modellvalidierungen die gute Übereinstimmung der Simulationssoftware zu den realen Bedingungen. Für die in dieser Begutachtung herangezogene Windenergieanlage N100/2500 gamma liegt ebenfalls eine gültige Prototypenvermessung vor, anhand derer eine Validierung des numerischen Simulationsmodells stattfinden konnte /36/.

Die in Kapitel 4.3 beschriebene numerische Testumgebung ermöglicht es, den Test des Eiserkennungssystems durch die dazugehörige Modellierung, anders als bei experimentellen Tests in Rotorblattprüfständen, unter Einbeziehung der Gesamtanlagendynamik und realistischer externer Bedingungen und mit einer hohen Modellierungsfreiheit von Vereisungsszenarien durchzuführen. Hierbei werden das Eiserkennungssystem beeinflussende Faktoren und Effekte wie die Versteifung der Rotorblätter durch den Fliehkrafteffekt, oder die blattwinkelabhängige Kopplung der Blatteigen- und Triebstrangfrequenz direkt berücksichtigt und einbezogen.

Die oben genannten Gesichtspunkte begründen die Annahme, dass die hier gewählte numerische Testumgebung grundsätzlich für die Begutachtung des IDD.Blade Eiserkennungssystems geeignet ist.

Im Folgenden sollen die das Eiserkennungssystem beeinflussenden Abweichungen der Testumgebung gegenüber der Realität betrachtet werden.

##### Bauteilsteifigkeitsbeeinflussende Effekte:

Der Elastizitätsmodul, welcher eine wichtige Materialkenngröße für die Steifigkeit eines Bauteils darstellt, wurde in dieser Begutachtung als konstant vorausgesetzt. Eine Vergrößerung des Elastizitätsmoduls würde zu einer höheren Bauteileigenfrequenz führen und umgekehrt. Aus diesem Grund sind aus sicherheitstechnischer Betrachtung im Zuge der zuverlässigen Eiserkennung elastizitätsmodulvergrößernde Effekte als kritisch

einzuschätzen, da diese dem Effekt der Eigenfrequenzabnahme durch Eismassenzunahme entgegenlaufen.

Der Effekt der temperaturabhängigen Materialversteifung ist beispielsweise durch brüchig werdende Kunststoffe bei sehr niedrigen Temperaturen bzw. weich werdenden Kunststoffen bei sehr hohen Temperaturen bekannt. Von diesem Effekt sind auch Rotorblätter von Windenergieanlagen in gewissem Maße betroffen, was zu höheren Eigenfrequenzen bei niedrigen Temperaturen aufgrund der Materialversteifung führt. Im Zuge der vorliegenden Begutachtung wurde der Temperatureffekt anhand verschiedener, von Wölfel eingereichter Messdaten zur Veränderung der Rotorblattfrequenz über der Temperatur, sowohl aus Testprüfständen als auch aus Feldmessungen bewertet. Es wurde plausibel dargelegt, dass die im Eiserkennungsalgorithmus hinterlegte Methode geeignet ist, den Temperatureinfluss zu kompensieren.

Eine weitere mögliche Beeinflussung des Elastizitätsmoduls durch Belastungen und Verformungen des Rotorblattes im Betrieb wird, wenn überhaupt, sowohl während der Anlagenreferenzierung als auch im Eiserkennungsbetrieb auftreten, und somit ist diese Beeinflussung durch die Anlagenreferenzierung abgedeckt.

Eine zeitabhängige Veränderung des Elastizitätsmoduls kann beispielsweise durch betriebsbedingte Materialdegradation aufgrund kleiner Strukturschäden als auch altersbedingter Materialversprödung aufgrund von Umwelteinflüssen verursacht werden. Diese gegenläufigen Effekte, deren Einfluss als gering eingeschätzt wird, werden sich der Erfahrung nach jedoch zu einer Eigenfrequenzverringerung aufsummieren, womit keine Verschlechterung der Eisdetektionsfunktion zu erwarten ist.

#### Veränderung der Anlagenaerodynamik aufgrund von Eisansatz:

Bei Eisansatz wird sich in der Regel auch ein gravierender Einfluss der Vereisung der Rotorblätter auf die aerodynamischen Eigenschaften der Windenergieanlage bemerkbar machen. Dieser Effekt, welcher unter anderem zu einer Verschiebung des Zusammenhangs zwischen gemessener Windgeschwindigkeit und produzierter Leistung an der Windenergieanlage führt, wurde bei dieser Begutachtung nicht modelliert. Die beiden Größen Windgeschwindigkeit und Leistung gehen zwar als Eingangsgrößen in das IDD.Blade Eiserkennungssystem ein, werden dort jedoch individuell weiterverarbeitet und nicht in Beziehung zueinander gesetzt, sodass von der Modellierung der eisbedingten Anlagenaerodynamik abgesehen wurde.

#### Angenommene Eisanwuchsgeometrien:

Durch die in Kapitel 4.5 beschriebenen Kombinationen von möglichen Vereisungsszenarien wird von einer guten Abdeckung der in der Realität auftretenden Anlagenvereisung ausgegangen. Dennoch kann ein Restrisiko, welches von einer deutlich davon abweichenden und somit nicht von der angewendeten Kombination abgedeckten Anlagenvereisung ausgeht, nicht vollständig ausgeschlossen werden.

#### Kontinuierlich anwachsende Eisdicke:

Die zu Testzwecken modellierten Vereisungsszenarien wachsen im Gegensatz zur Realität nicht langsam, von null Millimeter beginnend, auf eine kritische Eisdicke an, son-

dern sind in den entsprechend simulierten Testdaten direkt vorhanden. Bei der Auswertung der Testdaten wurde, wie in Kapitel 4.7 beschrieben, jeweils von einem aus der Anlagenreferenzierung bekannten eisfreien Zustand ausgegangen, an den sich der jeweilige Testdatensatz anschließt. Dieser Umstand dürfte zu einer gegenüber der Realität leicht verfälschten Detektionszeit führen, dessen Einfluss auf das Testergebnis jedoch als gering eingeschätzt wird.

#### **4.10 Übertragbarkeit der Testergebnisse der repräsentativ gewählten Windenergieanlagen auf die weiteren Windenergieanlagen**

Im Rahmen der vorliegenden Begutachtung wurden die folgenden zwei der in Tabelle 1.1 verzeichneten abzudeckenden Anlagenkonfigurationen repräsentativ ausgewählt:

- N100/2500 gamma, Rotorblatt NR50
- N117/3000 delta, Rotorblatt NR58.5 -2

Anhand dieser ausgewählten Anlagen wurden die Eignung und die Funktionsfähigkeit des IDD.Blade Eiserkennungssystems bezüglich der eingestellten Schwellwerte und der zuverlässigen Eiserkennung getestet.

Alle in Tabelle 1.1 aufgeführten Windenergieanlagen basieren auf einem vergleichbaren Anlagenkonzept mit aktiver Windrichtungsnachführung, einem luvseitig angeordneten Dreiblatt-Rotor, aktiver Leistungsbegrenzung durch Blattwinkelverstellung aller drei Rotorblätter und Leistungsübertragung durch einen Triebstrang mit Getriebe.

Im Zuge der Ermittlung der in Kapitel 3.2 festgelegten kritischen Eisdicken in der im Kapitel 3.3 festgelegten kritischen Detektionszeiten wurden sehr vergleichbare und teilweise übereinstimmende kritische Werte für die verschiedenen in Tabelle 1.1 aufgeführten Windenergieanlagen festgestellt.

Die für das Eiserkennungssystem grundlegenden physikalischen Größen sind, entsprechend der Beschreibung in Kapitel 1.3, die Rotorblattsteifigkeit und die Rotorblattmasse, aus der sich die Eigenfrequenzen ableiten. Die zur Begutachtung repräsentativ ausgewählten Anlagenkonfigurationen N100/2500 gamma mit dem NR50 Rotorblatt und N117/3000 delta mit dem NR58.5 -2 Rotorblatt setzen zwei sehr unterschiedliche Rotorblatttypen ein, was deutlich wird, wenn man die geometrische Ausdehnung auf die zugehörige Rotorblattmasse bezieht. Das NR58.5 -2 Rotorblatt ist mit 10551 Kg Rotorblattmasse (siehe Tabelle 4.2) bei ca. 57,3 Metern Rotorblattlänge etwa 150 Kg leichter, als das etwa 48.7 Meter lange Rotorblatt NR50 mit seinen 10700 Kg Rotorblattmasse (siehe Tabelle 4.1). Aufgrund dieser gravierenden Unterschiede im Blattaufbau kann davon ausgegangen werden, dass durch die Begutachtung dieser beiden Anlagenkonfigurationen die in Tabelle 1.1 aufgeführten Bandbreite an Anlagenkonfigurationen abgedeckt wird.

Aufgrund der oben genannten Beziehungen der repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen zu den restlichen in Tabelle 1.1 verzeichneten Anlagen werden die während der Begutachtung gewonnenen Erkenntnisse, welche zur Bewertung des IDD.Blade Eiserkennungssystems herangezogen werden, als gleichermaßen gültig für alle in Tabelle 1.1 verzeichneten Windenergieanlagenkonfigurationen angesehen.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse auch auf Nabenhöhen oberhalb der in Tabelle 1.1 genannten kleinsten Nabenhöhe für den jeweiligen Anlagentyp übertragbar sind (s. 3.2)

## 5 Sicherheitstechnik

### 5.1 Qualitative Bewertung

Für das von NORDEX verwendete IDD.Blade System liegt eine Produktzertifizierung nach *GL Rules and Guidelines -IV Part 4, Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, Ed. 2013 vor 13/*. Das System wurde darin im Hinblick auf die Eignung für den Einsatz als Condition Monitoring System in WEA bewertet. Im Einzelnen wurden das System-Design, ein Prototypen-Test sowie das Qualitätssystem des Herstellers Wölfel bewertet. Es wurden keine Abweichungen zu den Anforderungen der zugrunde gelegten Richtlinie festgestellt. Allerdings beinhaltet die zugrundegelegte Richtlinie /11/ nicht die spezifischen Belange von Eiserkennungssystemen.

Um die Frage nach der zuverlässigen Abschaltung der WEA nach Erkennung von Eisansatz ganzheitlich zu beurteilen, sind weitere Prüfungen erforderlich. Es wird daher im Folgenden

- die technische Einbindung des IDD.Blade Systems in das Betriebsführungssystem der Nordex-WEA in Bezug auf die sichere Abschaltung bei Eiserkennung,
- die praktische Installation und Parametrierung,
- die Testmöglichkeiten bei Inbetriebnahme bzw. wiederkehrenden Prüfungen, sowie
- die technischen und organisatorischen Sicherheitsmaßnahmen zur Vermeidung des (wieder-) Anfahrens bei Vereisung

untersucht und bewertet.

Weiterhin muss beachtet werden dass es Betriebszustände gibt, bei denen die Eiserkennung nicht möglich ist. Dies ist der Fall bei

- Windgeschwindigkeiten  $< 2-3$  m/s, da die Anregungsenergie der Rotorblätter nicht erreicht wird, dies ist erst bei Windgeschwindigkeiten  $> 2-3$  m/s der Fall.
- Drehzahl- und Pitchwinkelveränderungen außerhalb des normalen Betriebsbereiches (z. B. während des Start- oder Stoppvorganges der WEA);
- Arbeiten an der WEA (insbesondere bei aktiver Triebstrangbremse und / oder eingelegtem Rotor-Lock);
- ggf. begrenzten Betriebsdrehzahlbereichen, bei denen die Rotorblattschwingungen von Schwingungen der gesamten WEA überlagert werden, so dass eine Auswertung nicht möglich ist. Abhängig vom WEA-Typ und dessen individuellem dynamischen Verhalten können diese unterschiedlich liegen.

Kann dadurch kein aktueller Indikator gebildet werden, so wird ein Systemfehler an die Betriebsführung (NC2 Control) ausgegeben, was je nach Parametereinstellung nach einer einstellbaren Verzögerung ebenfalls zu einem WEA-Stopp führt /2/. Der dafür vorgesehene Zeitraum liegt, in Anlehnung an die kritische Detektionszeit (siehe Kap. 3.3), bei 15 Minuten.

## 5.2 Einbindung in das Nordex Betriebsführungssystem

Das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem der Nordex K08 gamma und delta Plattformen wurde im Rahmen der Anlagen-Zertifizierungen nach IEC 61400-1 Ed. 3 vom TÜV NORD geprüft. Das Betriebsführungssystem umfasst die Sensoren, die Softwarelogik und die Aktoren, bspw. Pitchmotoren. Es wurde hinsichtlich seiner Fähigkeit geprüft, die WEA im normalen Betriebsbereich zu steuern, zu regeln und zu überwachen. Sofern sicherheitsrelevante Grenzwerte überschritten werden oder das Betriebsführungssystem ausfällt oder der Not-Halt betätigt wird, wird das unabhängige und übergeordnete Sicherheitssystem aktiviert und die WEA automatisch abgeschaltet.

In Bezug auf das Sicherheitskonzept besteht in der IEC 61400-1 Richtlinie die grundsätzliche Anforderung der Einzelfehlersicherheit, d.h. ein beliebiger Einzelfehler einer Komponente darf nicht zum Versagen der Sicherheitsfunktion führen. Für das hier zu bewertende optionale IDD.Blade System wird analog dazu derselbe Bewertungsmaßstab zugrunde gelegt.

In Abbildung 7 ist die Einbindung des IDD.Blade Systems in die Nordex WEA dargestellt. Es wird je Rotorblatt ein Sensor installiert. Die Signale der Sensoren werden per Kabel in die Rotornabe und dort von der *Data Acquisition Unit* (DAU) via Ethernet zur *Data Processing Unit* (DPU) in das Maschinenhaus übertragen. In der DPU findet die Analyse der Schwingungsmessdaten der Rotorblätter in Verbindung mit den Betriebs- und Umgebungsdaten, die von der NC2 Control bereitgestellt werden, statt. Aus den Analyseergebnissen wird beim Überschreiten zweier unterschiedlicher Schwellen eine Eis-Warnung oder ein Eis-Alarm gebildet. Diese werden zusammen mit Systemstatusmeldungen an die NC2 Control übergeben. In der DPU steht ein Web-Server zur Konfiguration und Systemdiagnose zur Verfügung /2/.

Die Sensorsignale werden ständig auf Plausibilität überprüft, so dass fehlerhafte Messwerte nicht in die Analyse eingehen. Bei Ausfall einzelner Messkanäle oder eines gesamten Sensors kann bei der Eiserkennung jedoch von den zwei Rotorblättern mit den verbleibenden Sensoren auf das dritte geschlossen werden, so dass die Funktion des Systems weiter besteht. Im Fehlerfall erfolgt eine Fehlermeldung, so dass eine Diagnose und Reparatur eingeleitet werden kann.

Die DAU und die DPU verfügen über Selbstüberwachungsfunktionen. Der aktuelle Systemzustand wird fortlaufend protokolliert. Sie sind selbststartfähig, so dass sie z. B. auch nach einem Stromausfall automatisch neu starten. Außerdem meldet das System permanent aktiv seinen Status an die WEA-Steuerung, die so einen Ausfall sofort erkennt /2/. Im Fehlerfall erfolgt eine Fehlermeldung, so dass eine Diagnose und Reparatur eingeleitet werden kann.

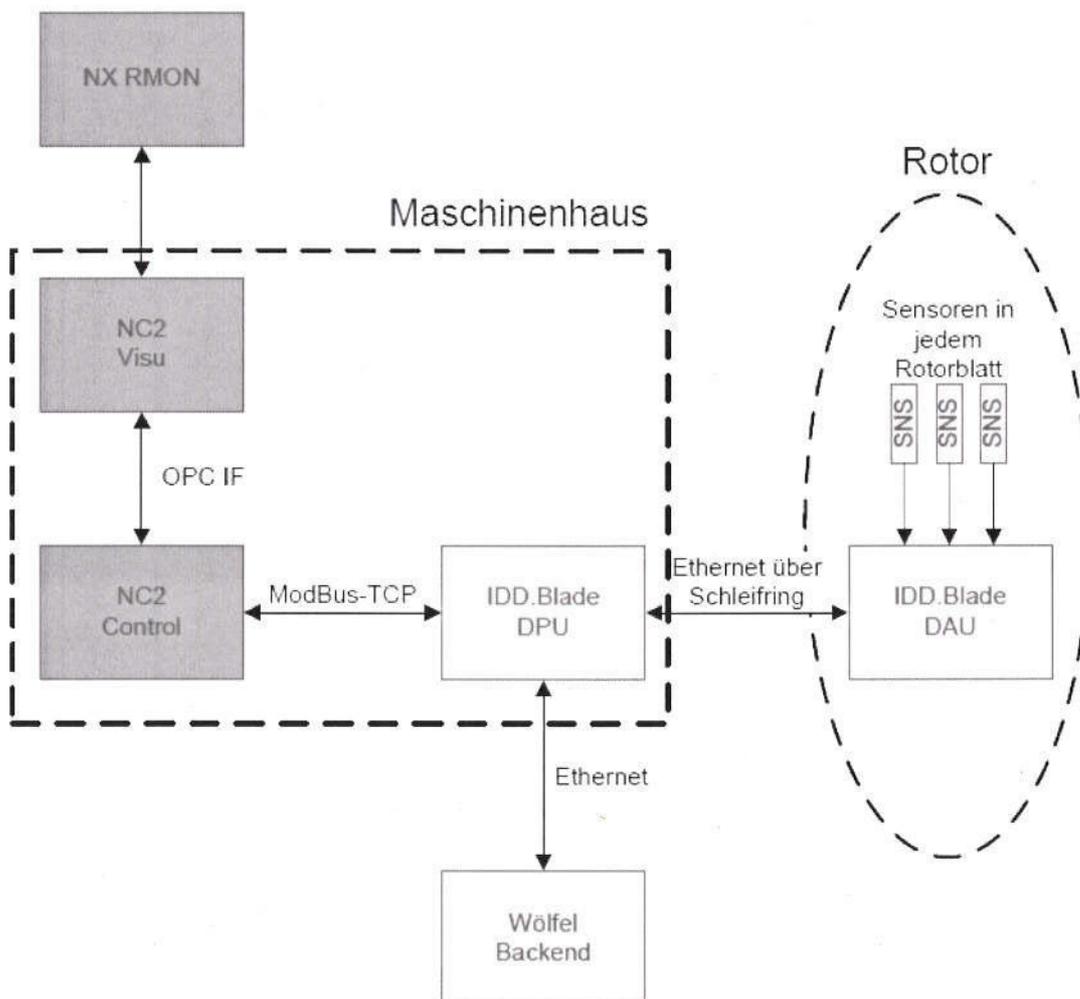
Die Übergabe von Betriebs- und Umgebungsdaten (EOC) erfolgt über eine bereitgestellte Modbus-TCP-Schnittstelle (ab NC2 Rev. 22). Über dieselbe Modbus-TCP-Schnittstelle werden u. a. folgende Warnungen und Alarmmeldungen des IDD.Blade an die WEA NC2 Control übergeben:

- System Fehler (kein Eisindikator verfügbar)

- Eisansatz Warnung
- Eisansatz Alarm

Bei Eisansatz Alarm und bei einem Systemfehler unterhalb der in Parameter P47.16 festgelegten Außentemperatur erfolgt eine Abbremsung mit dem Bremsprogramm BP1 („Sanftbremsung“).

Damit die Signale in der Betriebsführung richtig verarbeitet werden, müssen die dazugehörigen Parameter eingestellt sein (s. hierzu Kap. 5.3).

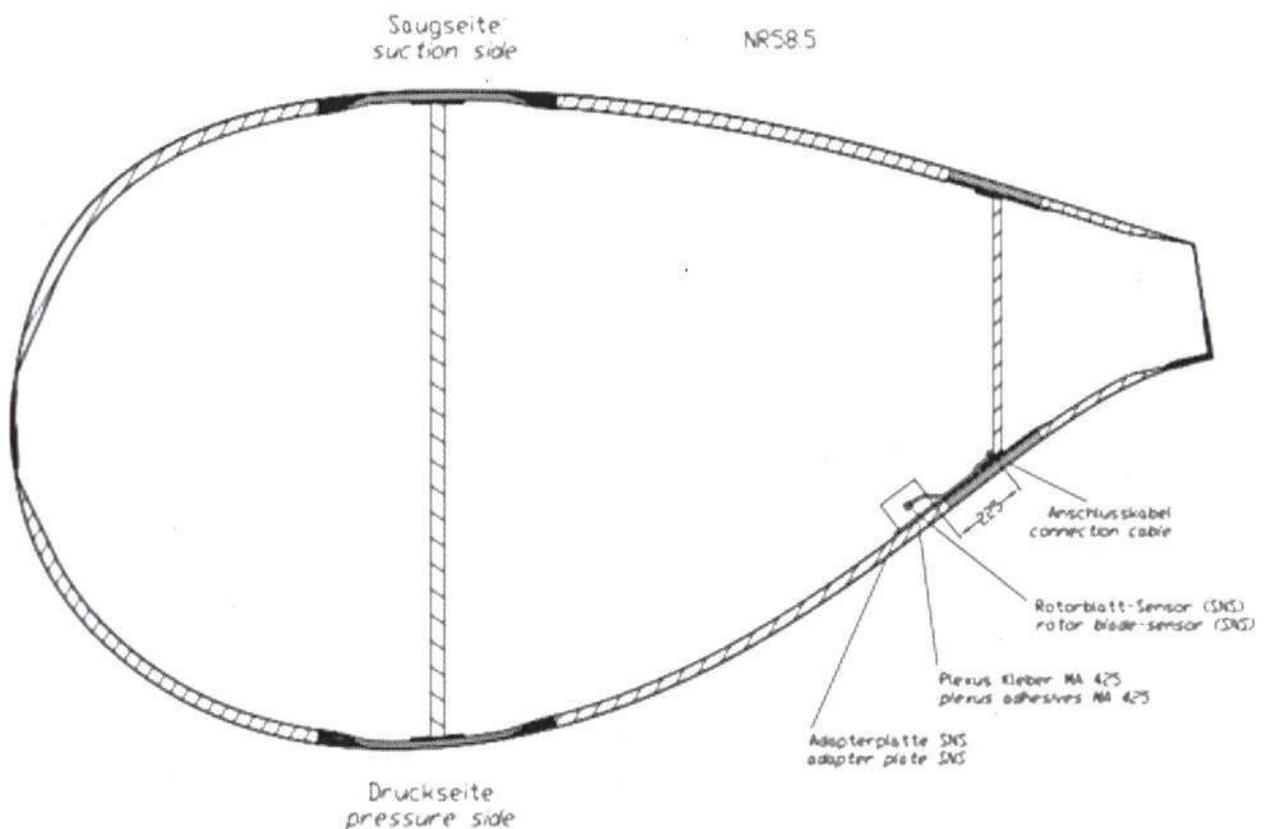


**Abbildung 7:** Einbindung des Eisdetektionssystems in NORDEX WEA

### 5.3 Einbauverfahren und Parametrierung

Für das Verfahren müssen die sogenannten Structural Noise Sensoren (SNS) in den Rotorblättern installiert werden. Sie Sensoren sind bei etwa 1/3 der Länge des jeweiligen Rotorblattes montiert. Dies entspricht bei den betrachteten WEA der Typen N100 und N117 ca. 18m vom Nabenmittelpunkt ausgehend.

Die Sensoren werden auf einer Montageplatte befestigt, die mit geeignetem Klebstoff von innen zwischen dem Hauptsteg und dem Fahnensteg auf der Rotorblatthülle angebracht sind (siehe Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Schema zur Position des SNS im Rotorblatt

Die Sensorkabel werden in einem Leerrohr von den Sensoren zur Blattwurzel verlegt und durch die Bodenplatte geführt. Die Connection Box ist auf der Außenseite der Bodenplatte neben der Wartungsöffnung angeklebt. Dort werden die Sensorkabel eingeführt und angeschlossen.

Die Montage der SNS und der Connection Box erfolgt zweckmäßig während der Rotorblattfertigung im Werk, alternativ bei Produktnachrüstungen direkt auf der WEA.

Die Montage erfolgt gemäß der Montage- und Wartungsanleitung /4/. Im Anschluss an die Montage werden von den verantwortlichen Mitarbeitern die Montageprotokolle /5/, /6/ und /7/ ausgefüllt und unterzeichnet.

Die Sensoren und Kabel sind anhand von Blitzschutzzonen so angeordnet, dass sie keine Auswirkungen auf das vorhandene Blitzschutzsystem haben. Aufgrund ihrer Positionen kann ein direkter Blitzeinschlag in das IDD.Blade ausgeschlossen werden. Die Systemkomponenten sind mit Überspannungsschutzmodulen ausgerüstet. Eine strukturelle Gefährdung der Rotorblätter oder WEA insgesamt durch Einwirkung auf Komponenten des IDD.Blade durch einen Blitzschlag in benachbarte Bauteile der WEA wird nicht angenommen.

Die Masse der im Rotorblatt eingebauten Komponenten ist mit je SNS von ca. 1,5 kg im Vergleich zur Gesamtmasse des Rotorblattes sowie deren Fertigungsstreuung vernachlässigbar klein. Sie haben somit keinen Einfluss auf die mechanischen Lasten der WEA.

Die folgenden Parameter sind im Rahmen des Eiserkennungssystems einstellbar:

**Tabelle 5.1:** Parameter der Eiserkennung

Parameter	Beschreibung	Einheit	Default	Min	Max
P35.18	Modb Kommunikation	-	0	0	1
P03.18	CMS ICE Version	-	00000	00000	11111
	0000x => Eis Alarm/Warnung => 0 = deaktiviert / 1 = aktiviert 000x0 => Eis Alarm => 0 = ohne BP / 1 = mit BP 00x00 => Eis Alarm => 0 = ohne AutoReset / 1 = mit AutoReset 0x000 => Eis Alarm => 0 = ohne FernReset / 1 = mit FernReset x0000 => Eis Alarm => 0 = ohne VorortReset / 1 = mit VorortReset				
P03.19	CMS Intervallzeit	S	900	0	86400
P34.15	CMS Timeout	S	5	0	600
P47.16	Met Eisalarm Freig. Außentemp.	°C	5	-50	50

Der Parameter P35.18 aktiviert den Signalaustausch via Modbus, somit muss dieser Parameter bei allen Anlagen mit Eiserkennungssystem aktiviert werden. P03.18 ist der definierende Parameter des Eiserkennungssystems und besteht aus fünf einstellbaren Positionen. Die letzte bzw. fünfte Position schaltet die Eiserkennung aktiv bzw. deaktiviert sie. Diese Position sollte bei allen Anlagen mit Eiserkennung aktiviert sein. Die vierte Position bestimmt, ob bei Eisalarm eine Bremsung erfolgt. Diese Option sollte bei allen WEA, die ein Eiserkennungssystem benötigen, aktiviert werden.

Die vorderen drei Positionen bestimmen wie die Anlage nach einem Eisalarm wieder in Betrieb genommen werden darf.

Wie in 5.1 beschrieben gibt es Betriebszustände, in denen der Vereisungszustand nicht erfasst werden kann. P03.19 legt fest, nach welchem Zeitraum in einem solchen Zustand ein Fehler gemeldet und die Anlage gestoppt wird. Nach dem Stopp kann im Trudelbetrieb, bei ausreichend hoher Windgeschwindigkeit, der Vereisungszustand festgestellt werden. In Absprache mit dem TÜV NORD wird dieser Parameter von NORDEX auf den Defaultwert von 900 Sekunden gesetzt, in Anlehnung an die kritische Vereisungszeit.

Das Eiserkennungssystem prüft sich regelmäßig selbst auf Fehler. Anhand des Parameters P34.15 kann die Häufigkeit, mit der dies geschieht, eingestellt werden. P47.16 definiert die Außentemperatur, ab der ein Eisalarm möglich ist. Bei Temperaturen oberhalb der Parametereinstellung wird eine Veränderung in der Blattfrequenz nicht als Eisansatz erkannt und somit kein Alarm ausgegeben. Somit kann das Herabsetzen der im Parameter festgelegten Temperatur dazu führen, dass der Vereisungszustand nicht mehr erkannt wird.

Sämtliche Parameter dürfen nur von Personen mit den entsprechenden Zugangsrechten parametrisiert werden. Dabei sind die Standortbedingungen und Behördenauflagen zu beachten. Die benötigten Zugangsrechte werden erst nach einer entsprechenden Schulung durch Nordex erteilt.

## 5.4 Inbetriebnahme und Wiederkehrende Prüfungen

Im Zuge der Inbetriebnahme wird das Eiserkennungssystem an die Windenergieanlage angepasst. Die Inbetriebnahme des Systems erfolgt gemäß der Inbetriebnahmeanleitung /8/, in der die erforderlichen Arbeitsschritte und Berechtigungen definiert sind. Im Anschluss der Inbetriebnahme wird ein Inbetriebnahmeprotokoll /9/ erstellt und unterschrieben.

Die Wartung wird gemäß der Montage- und Wartungsanleitung /4/ und den darin definierten Intervallen durchgeführt. Demnach werden folgende Wartungsarbeiten jährlich durchgeführt:

- Prüfung Funktionsfähigkeit und gegebenenfalls Austausch Überspannungsschutz in der DAU und DPU
- Prüfung der Haltbarkeit der Klebeverbindungen

Nach Abschluss der Wartungsarbeiten wird ein Funktionstest und gegebenenfalls eine Fehlersuche und Störungsbeseitigung durchgeführt. Mögliche Fehler, die während des Betriebs von IDD.Blade auftreten, sind in der Bedienungsanleitung näher beschrieben. Die durchgeführten Wartungsarbeiten sind im Wartungsprotokoll /10/ zu notieren. Das Protokoll ist im Anschluss von den verantwortlichen Mitarbeitern zu unterzeichnen.

Die Messdaten der drei Sensoren werden permanent untereinander abgeglichen und auf Plausibilität überprüft. Zur korrekten Funktion des Eiserkennungssystems werden lediglich zwei Sensoren benötigt, somit führt der Ausfall eines Sensors nicht zum Systemausfall. Im Fehlerfall erfolgt eine Fehlermeldung, so dass eine Diagnose und Reparatur eingeleitet werden kann. DAU und DPU melden fortlaufend ihre Aktivität an die

WEA-Steuerung, so dass ein Ausfall sofort erkannt wird. Die Funktion von DAU und DPU können auch über den Webserver auf ihre Konfiguration und Funktion getestet werden.

## 5.5 Vermeidung des Anfahrens bei Vereisung

Das Wiederanfahren der WEA nach Abschaltung aufgrund von Vereisung darf nur unter der Voraussetzung der Eisfreiheit geschehen. Von NORDEX sind hierzu drei verschiedene Verfahren vorgesehen:

- AutoReset; das automatische Wiederanfahren der Anlage nach Änderung Erkennung der Eisfreiheit aller drei Blätter im Trudelbetrieb.
- FernReset; durch eine autorisierte Person über das Netzwerk
- VorortReset; durch eine autorisierte Person vor Ort

Beim AutoReset obliegt es dem Eiserkennungssystem, Eisfreiheit zu erkennen und die WEA zum Start freizugeben. Wie in Kapitel 4.7 beschrieben wird bereits im Trudelbetrieb der Anlage, bei Windgeschwindigkeiten über 2-3 m/s, eine Vereisung vom Eiserkennungssystem sicher und innerhalb ausreichend kurzer Zeit erkannt (für die kritische Eisdicke stets kleiner der kritischen Detektionszeit siehe Kap. 3.3).

Im vollständigen Stillstand oder bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s kann vom Eiserkennungssystem kein Eis erkannt werden. Dieser Zustand wird vom System erkannt und gemeldet. Um den Start einer vereisten WEA nach vollständigem Stillstand zu verhindern, bleibt die WEA so lange im Trudelbetrieb, bis das System einen eisfreien Zustand erkannt und die Anlage freigegeben hat.

Im Trudelbetrieb bei Windgeschwindigkeiten  $< 3$  m/s ist aufgrund der sehr geringen Rotationsenergie keine Gefährdung durch Eiswurf gegeben und bei Windgeschwindigkeiten  $\geq 3$  m/s (Startgeschwindigkeit) greift das Eiserkennungssystem zuverlässig ein und verhindert das Anfahren der WEA und somit eine Gefährdung durch Eiswurf.

Beim FernReset werden die vom Eiserkennungssystem ermittelten und per Netzwerk übertragenen Vereisungsdaten von qualifizierten Personen bewertet und anhand derer über ein Wiederanfahren der Anlage entschieden.

Im Hinblick auf die indizierte Zuverlässigkeit des Eiserkennungssystems ist das AutoReset Verfahren gegenüber dem FernReset und dem VorortReset vorzuziehen, da eine mögliche Fehlinterpretation der Verhältnisse durch Personen als Fehlerquelle ausgeschlossen wird.

FernReset und AutoReset sind standardmäßig ausgeschaltet und dürfen nur von einer Person mit den entsprechenden Zugangsrechten parametrisiert werden und nur dann, wenn eine entsprechende Vereinbarung mit dem Betreiber besteht. Dabei sind die Standortbedingungen und Behördenauflagen zu beachten. Die benötigten Zugangsrechte werden erst nach einer entsprechenden Schulung durch Nordex erteilt.

Zusammenfassend können alle drei Arten des Wiederanfahrens als hinreichend sicher bewertet werden.

## 6 Anforderungen

Aus der Bewertung sich ergebende Forderungen, unter denen das Gutachten gültig ist

1. Die vorliegende Begutachtung baut auf dem GL Zertifikat /3/ auf und setzt dessen Gültigkeit voraus. Die Anmerkungen und Bedingungen gelten, sofern zutreffend, auch für dieses Gutachten.
2. Dieses Gutachten gilt für die geprüfte Version des IDD.Blade. Wenn grundlegende Systemänderungen vorgenommen werden, ist das Fortbestehen der Gültigkeit des Gutachtens vom TÜV NORD oder einer vergleichbaren Sachverständigenstelle zu überprüfen.
3. Eine nachträgliche Beeinflussung des Eiserkennungssystems durch die in Kapitel 1.3 beschriebene kundenspezifische Einstellung der Schwellwerte darf lediglich hin zur sensibleren Eisdetektion gegenüber den im Test dieser Begutachtung angewendeten Maßstäben erfolgen.
4. Dieses Gutachten gilt abdeckend für die in Tabelle 1.1 aufgeführten Anlagen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse auch auf Nabenhöhen oberhalb der in Tabelle 1.1 genannten kleinsten Nabenhöhe für den jeweiligen Anlagentyp übertragbar sind. Wenn darüberhinausgehend weitere Anlagenkonfigurationen aufgenommen werden sollen muss eine Überprüfung auf Abdeckung der neuen Anlagenkonfigurationen von dem vorliegenden Gutachten vom TÜV NORD oder einer vergleichbaren Sachverständigenstelle vorgenommen werden.
5. Es muss sichergestellt werden, dass das Eiserkennungssystem ausreichend gut referenziert ist, bevor die Anlage unter 3°C Außentemperatur betrieben werden darf.
6. Inbetriebnahme und Wartung sind gemäß den Anleitungen auszuführen und zu protokollieren.
7. Die Positionen vier und fünf des Parameters P03.18 müssen auf 1 gesetzt werden.
8. Der Parameter P47.16 darf nicht unter 3°C eingestellt werden.
9. Der Parameter P03.19 darf nicht über 900 Sekunden eingestellt werden.

## 7 Zusammenfassung und Ergebnis der Bewertung

Im Rahmen einer Parameterstudie wurden kritische Eisdicken und dazu gehörige kritische Detektionszeiten für ausgewählte, repräsentative Anlagen der in Tabelle 1.1 aufgeführten Anlagen ermittelt.

Die grundsätzliche, anlagenunabhängige Eignung der vom IDD.Blade System verwendeten Sensorik und Auswerteeinheiten sowie die allgemeine Funktionsfähigkeit des Systemaufbaus bezüglich der zuverlässigen Detektion von globalen, strukturdynamischen Zustandsveränderungen wurde bereits im Rahmen einer früheren Begutachtung durch die Zertifizierungsstelle des Germanischen Lloyd entsprechend der Richtlinie /11/, unter anderem auf Basis eines experimentellen Nachweises im Rotorblatttestprüfstand /12/, geprüft und bestätigt, siehe /3/. Darüber hinausgehend wurde in der hier vorliegenden Begutachtung durch genauere, quantitative Untersuchungen überprüft, ob das Eiserkennungssystem hinsichtlich der Schwellwerte und Parameter korrekt auf die Anlagen eingestellt ist und die ermittelten kritischen Eisdicken innerhalb der ermittelten kritischen Detektionszeiten zuverlässig erkennen und melden kann.

Im Rahmen der in Kapitel 4 beschriebenen Testprozedur wurde das IDD.Blade Eiserkennungssystem anhand von numerischen Simulationsmodellen, welche auf den zwei repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen N100/2500 gamma und N117/3000 delta basieren, referenziert. Anschließend wurden verschiedene, maßgeblich auf den in Kapitel 3.2 ermittelten kritischen Eisdicken basierende Vereisungsszenarien mittels Massenmanipulation der Anlagenmodelle simuliert und vom IDD.Blade Eiserkennungssystem ausgewertet. Im Zuge der Begutachtung des IDD.Blade Eiserkennungssystems wurden auf diese Weise 60 Testblöcke abgeprüft, welche Testszenarien als repräsentative Kombinationen von Wind-, Vereisungs- und Betriebsbedingungen der betrachteten Windenergieanlagen darstellen.

Auf Grundlage dieser Auswertungen wurde stark indiziert, dass das IDD.Blade Eiserkennungssystem ohne Einschränkungen in der Lage ist, die in Kapitel 3.2 festgelegten kritischen Eisdicken in der im Kapitel 3.3 festgelegten kritischen Zeiten zuverlässig und reproduzierbar in der in Kapitel 4 beschriebenen Testumgebung an den repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen zu detektieren. Es wird zudem davon ausgegangen, dass bei fortschreitender Entwicklung der Genauigkeit der Datenerfassung und Auswertung des Eiserkennungssystems und ggf. weiterer Anpassung der Schwellwerte zukünftig auch deutlich geringere Eisdicken als die in dieser Begutachtung ermittelten kritischen Eisdicken bei gleichzeitig hoher Anlagenverfügbarkeit in unvereistem Zustand zuverlässig detektiert werden können. Aufgrund der in Kapitel 4.8 dargelegten Verhältnisse wird in der Verwendung der Eiswarnung als Abschaltkriterium der Windenergieanlagen das Potential gesehen, die Zuverlässigkeit der Eisdetektion bezüglich der kritischen Detektionszeit weiter zu erhöhen.

Das Eiserkennungssystem ist für die untersuchten Anlagen kompatibel mit den vorhandenen NORDEX Betriebsführungs- und Sicherheitssystemen und erfüllt das für diese Systeme maßgebliche Einzelfehlerkriterium. Die Parametrisierung der Anlage erfolgt im Rahmen der geregelten Inbetriebnahme und darf nur von autorisierten und dafür ausgebildeten Mitarbeitern vorgenommen werden.

Die möglichen Verfahren zur Vermeidung des Wiederauffahrens nach Vereisung werden als ausreichend sicher bewertet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die in Tabelle 1.1 aufgeführten NORDEX Windenergieanlagen in Verbindung mit dem Eiserkennungssystem IDD.Blade der Firma Wölfel hinsichtlich der Eiserkennung dem Stand der Technik entsprechen und alle Ergebnisse dafür sprechen, dass unter den genannten Bedingungen eine Eisdicke erkannt wird, die geringer ist als die individuelle kritische Eisdicke.

Erstellt

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "L. Klüppel".

Dipl.-Ing. L. Klüppel

Geprüft

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "O. Raupach".

Dipl.-Ing. O. Raupach

An der Erstellung beteiligte Sachverständige

Dipl.-Ing. M. Bülk

B.Sc. F. Lautenschlager

## 8 Dokumente und Literaturverzeichnis

### 8.1 Bewertete Dokumente

- /1/ NORDEX Energy GmbH  
Technische Beschreibung Systembeschreibung Rotorblatt Eisdetektionssystem  
Dok. Nr.: K0803\_054354\_DE, Rev. 01, Datum: 25.08.2014
- /2/ NORDEX Energy GmbH  
Technische Beschreibung Integration Rotorblatt Condition Monitoring System  
Dok. Nr.: K0803\_052496\_DE, Rev. 00, Datum: 15.08.2013

### 8.2 Dazugehörige Dokumente

- /3/ GL Germanischer Lloyd  
Type Certificate Ice Detection System IDD.Blade  
Cert. Nr.: TC-GL-015A-2013, Datum 26.11.2013
- /4/ Wölfel  
Montage- und Wartungsanleitung SHM.Blade  
Dok. Name: SHMB\_01\_Anleitung\_MontageWartung\_Rev02,  
Datum: 12.07.2013
- /5/ Wölfel  
Montageprotokoll DPU SHM.Blade  
Dok. Name: SHMB\_01\_Protokoll\_Montage\_DPU\_Rev01, Datum: 02.09.2013
- /6/ Wölfel  
Montageprotokoll DAU SHM.Blade  
Dok. Name: SHMB\_01\_Protokoll\_Montage\_DAU\_Rev01, Datum: 02.09.2013
- /7/ Wölfel  
Montageprotokoll SNS SHM.Blade  
Dok. Name: SHMB\_01\_Protokoll\_Montage\_SNS\_Rev01, Datum: 02.09.2013
- /8/ Wölfel  
Inbetriebnahmeanleitung SHM.Blade  
Dok. Name: SHMB\_01\_Anleitung\_Inbetriebnahme\_Rev01, Datum: 12.09.2013
- /9/ Wölfel  
Inbetriebnahmeprotokoll SHM.Blade  
Dok. Name: SHMB\_01\_Protokoll\_Inbetriebnahme\_Rev01, Datum: 03.09.2013
- /10/ Wölfel  
Wartungsprotokoll SHM.Blade  
Dok. Name: SHMB\_01\_Protokoll\_Wartung\_Rev01, Datum: 02.09.2013

### 8.3 Literatur & Quellen

- /11/ GL Rules and Guidelines – IV Industrial Services – Part 4 – Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, Edition 2013
- /12/ Wölfel, Testprotokoll Experimenteller Nachweis zur Erkennung von Massenveränderungen, Dok.-Name: shmb-01-expnach-protokoll-rev01, 21.10.2013 Rev. 03
- /13/ Nordex SE. Schreiben, Einsatz des Eiserkennungssystem IDD Blade der Firma Wölfel auf Nordex Windturbinen der Klasse K08 Gamma und Delta. Hamburg. 14.07.2014.
- /14/ IEC 61400-1. Wind turbines – Part 1: Design requirements. Third Edition. 2005.
- /15/ Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt: Richtlinie für Windkraftanlagen, Auswirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, Fassung Oktober 2012
- /16/ Morgan, C. et al. Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk? Wind Energy Production in Cold Climates. Bristol. 1996.
- /17/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.
- /18/ Lautenschlager, F. Studie zum Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ereignis Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik. 2012.
- /19/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Ausgabe 2010.
- /20/ Seifert, H. Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen. St. Pölten. 1999.
- /21/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.
- /22/ Seifert, H. Technische Ausrüstung von Windenergieanlagen an extremen Standorten. St. Poelten. 2002.
- /23/ Seifert, H. Technical requirements for rotor blades operating in cold climate. Wilhelmshaven. 2003
- /24/ Makkonen, L. et. al. Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines. Wind Engineering Volume 25, No. 1. 2001.
- /25/ Wallenius, T. et. al. The relationship between chord length and rime icing on wind turbines. Winterwind. 2008.

- /26/ Lehtomäki, V. et. al. IcedBlades - Modelling of ice accretion on rotor blades in a coupled wind turbine tool. Winterwind. 2012.
- /27/ Hudecz, A. et. al. Experimental investigation of ice accretion on wind turbine blades. Winterwind. 2013.
- /28/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.
- /29/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.
- /30/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.
- /31/ Green Book. Methods for the determination of possible damage – first edition. Voorburg 1989.
- /32/ Deutscher Wetterdienst. Online Wetterlexikon, Stand: September 2014. Offenbach. 2014.
- /33/ Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen (Hrsg.): DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Auflage. Springer, Berlin/Heidelberg 2011
- /34/ Henry Seifert: Rotorblätter, eiskalt erwischt – Glacial Period for Rotor Blades, DEWI Magazin Nr. 8, Februar 1996
- /35/ Wölfel, Aktennotiz / Memorandum: IDD.Blade®: Nachweis der Funktionalität zur Eiserkennung anhand von numerisch simulierten Zeitverläufen durch den TÜV NORD; Ergebnisse für N117-3000; TEST01 vom 15.09.2014
- /36/ TÜV NORD, Type Test Conformity Statement, Registration-No. 44 220 10990180-T-IEC, Rev 1

Nordex Energy GmbH • Langenhorner Chaussee 600 • 22419 Hamburg

Ansprechpartner/in	Tel.	email	Datum
Alexander Jorewitz	040/30030-2191	ajorewitz@nordex-online.com	31. August 2017

### **Übertragbarkeit Eiserkennungssystem IDD Blade N117 und N131 auf DELTA4000 (N149)**

Bezüglich der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit des IDD Blade Systems zur Eiserkennung, sowie dessen Einbindung in die Anlagensteuerung für den Typ N117 und N131 gemäß TÜV Nord Bericht 8111 327 215 Rev.2 vom 15.06.2017

bestätigen wir Ihnen gerne, dass

- das durch Nordex verbaute IDD Blade-Eiserkennungssystem bei N117 und N131 (Plattform K08 Gamma und Delta) funktional identisch ist zu der Anlagengeneration DELTA4000,
- die Einbindung in die Anlagensteuerung identisch ausgeführt wird,
- die Funktionsbeschreibung zur N117 und N131 somit auch für die DELTA4000 gelten und
- das daher die Ergebnisse der Tests und Nachweise wie diese für die N117 und N131 erbracht wurden somit auch auf die DELTA4000 übertragbar sind.

Sollten Sie weitere Fragen haben stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

**Nordex Energy GmbH**

  
i.V. Günther Steininger  
Head of Repowering & Projects

  
i.A. Alexander Jorewitz  
Sales Engineer Nord

Nordex Energy GmbH  
Centraallee 263a  
46047 Oberhausen  
Deutschland

Tel: +49-208-8241-0  
Fax: +49-208-8241-105

info@nordex-online.com  
www.nordex-online.com

Sitz der Gesellschaft: Hamburg  
Amtsgericht Hamburg, HRB 117218  
Zweigniederlassung: Rostock

UST-ID: DE159112930

Geschäftsführung:  
Bernard Schäferbarthold  
Lars Bondo Krogsgaard

UniCredit Bank AG  
BLZ 200 300 00  
SWIFT: HYVE DE MM 300  
Konto 313 346  
DE91 2003 0000 0000 3133 46

# TYPE CERTIFICATE

Certificate No.:  
TC-DNVGL-SE-0439-03577-0

Issued:  
2018-01-27

Valid until:  
2020-01-26

Issued for:

## Ice Detection System IDD.Blade

Specified in Annex 1

Issued to:

## Wölfel Wind Systems GmbH

Max-Planck-Str. 15  
97204 Höchberg, Germany

According to:

## DNVGL-SE-0439:2016-06 Certification of condition monitoring

Based on the documents:

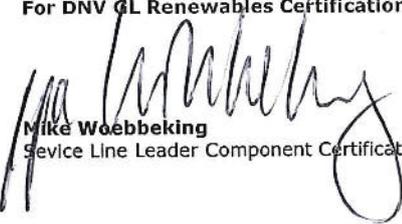
CR-DNVGL-SE-0439-03577-0

Certification Report Ice Detection System IDD.Blade,  
dated 2018-01-27

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

Hamburg, 2018-01-27

For DNV GL Renewables Certification

  
**Mike Woebbeking**  
Service Line Leader Component Certification



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, 2018-01-27

For DNV GL Renewables Certification

  
**Robert Kasch**  
Senior Project Manager

