

**Gutachtliche Stellungnahme zur
Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall,
Rotorblattbruch und Turmversagen am
Windenergieanlagen-Standort Elbe-Haverlah**

Erstellt im Auftrag für

Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG
Cremlingen

Revision 0

Hamburg, 04.03.2020

Revision	Datum	Änderung
0	04.03.2020	Erste Ausgabe

Gegenstand: Risikobeurteilung am Windenergieanlagen-Standort
Elbe-Haverlah

Referenz-Nr.: 2019-WND-RB-172-R0

Auftraggeber: Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG
Feldbergstraße 6a
38162 Cremlingen

Anlagenhersteller: Vestas Wind Systems A/S
Hedeager 42
8200 Aarhus N, Dänemark

WEA-Typ:	P_{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]
Vestas V162	5,6	162,0	166,0

Vom Auftraggeber eingereichte Unterlagen:

- WEA-Spezifikationen: Nennleistung, Drehzahlbereich, Rotordurchmesser und Nabenhöhe /1/.
- Lageplan mit Darstellung der WEA und der Schutzobjekte /2/.
- Weibull-Parameter A und k sowie die Windrichtungsverteilung auf Nabenhöhe /3/.
- Angaben und Nachweise zu dem Eiserkennungssystem der WEA /4/.
- Beschreibung der Schutzobjekte und des Standorts sowie Angaben zu den Nutzungshäufigkeiten am Standort /5/, /6/.

Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:

Verfasser	B.Sc. F. Lautenschlager Sachverständiger	Hamburg, 04.03.2020
Geprüft durch	Dipl.-Ing. O. Raupach Sachverständiger	Hamburg, 04.03.2020

Für weitere Auskünfte:

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
B.Sc. F. Lautenschlager
Große Bahnstraße 31
22525 Hamburg

Tel.: +49 40 8557 1482
Fax: +49 40 8557 2552
E-Mail: flautenschlager@tuev-nord.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	5
1 Aufgabenstellung	6
2 Angaben zum Windenergieanlagenstandort	8
3 Bewertungsmaßstab	8
3.1 Individualrisiko.....	9
3.2 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	10
3.3 Bahnverkehr.....	11
4 Risikoanalyse.....	13
4.1 Eisabwurf und Eisabfall.....	13
4.1.1 Vereisungspotential.....	14
4.1.2 Automatische Eisabschaltung (Eisabwurf).....	15
4.1.3 Randbedingungen für die Untersuchung des Eisabfalls	16
4.1.4 Gefährdungsradius.....	17
4.2 Detailanalyse Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bahntrasse und der Kreisstraße K47.....	19
4.2.1 Randbedingungen für die Untersuchung des Eisabfalls	19
4.2.2 Trefferhäufigkeiten	20
4.3 Rotorblattbruch.....	22
4.3.1 Generische Ereignishäufigkeiten.....	22
4.3.2 Randbedingungen.....	22
4.3.3 Trefferhäufigkeiten	23
4.3.4 Individualrisiko Straßenverkehr	25
4.3.5 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	26
4.3.6 Gefährdung des Bahnverkehrs.....	27
4.4 Turmversagen.....	29
4.4.1 Generische Ereignishäufigkeiten.....	31
4.4.2 Gefährdung des Bahnverkehrs.....	31
5 Modell- und Datenunsicherheiten	34
6 Zusammenfassung und Risikobewertung	35

7	Rechtsbelehrung	40
8	Formelzeichen und Abkürzungen	41
9	Literatur- und Quellenangaben.....	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lageplan /2/.....	8
Abbildung 2:	Risikoaversion auf Basis des MEM-Prinzips /35/.....	12
Abbildung 3:	Fallweiten bei 20,5m/s Windgeschwindigkeit.....	18
Abbildung 4:	Gefährdungsradius – rot gestrichelt ($v = 20,5\text{m/s}$).....	19
Abbildung 5:	Auftreffpunkte bei Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.....	20
Abbildung 6:	Trefferhäufigkeiten [$1/\text{m}^2$] pro Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.....	21
Abbildung 7:	Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt... 23	
Abbildung 8:	Trefferhäufigkeiten [$1/\text{m}^2$] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.....	24
Abbildung 9:	Gefährdungsradien (rot gestrichelt) bei Turmversagen: innen – Gondel, außen – Gesamthöhe.....	30
Abbildung 10:	Gefährdungsbereiche (rot) bei Turmversagen (schwarzer Balken).....	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung.....	15
Tabelle 2:	Idealisierte Eisobjekte.....	17
Tabelle 3:	Ermittelte maximale Fallweiten.....	17
Tabelle 4:	Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Eisabfall), *alles außerhalb der Zone 4.....	21
Tabelle 5:	Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Rotorblattbruch). *alles außerhalb der Zone 4.....	24
Tabelle 6:	Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Rotorblattbruch.....	25
Tabelle 7:	Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Rotorblattbruch.....	26
Tabelle 8:	Trefferhäufigkeiten Bahnverkehr pro Jahr (Sachschäden), bei Rotorblattbruch.....	29
Tabelle 9:	Individualrisiko Bahnverkehr, bei Rotorblattbruch.....	29
Tabelle 10:	Trefferhäufigkeiten Bahnverkehr pro Jahr (Sachschäden) bei Turmversagen.....	34
Tabelle 11:	Individualrisiko Bahnverkehr, bei Turmversagen.....	34
Tabelle 12:	Trefferhäufigkeiten Bahnverkehr pro Jahr (Sachschäden), bei Rotorblattbruch.....	36
Tabelle 13:	Individualrisiko Bahnverkehr, bei Rotorblattbruch.....	36

1 Aufgabenstellung

Am Standort Elbe-Haverlah in Niedersachsen plant der Auftraggeber, die Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG, die Errichtung von sechs Windenergieanlagen (WEA) des Typs Vestas V162 mit 166,0m Nabhöhe (NH) und 162,0m Rotordurchmesser (D). In der Nähe der geplanten WEA verlaufen eine Bahnstrecke und die Kreisstraße K47.

Gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /27/ §5 Abs. 1 Nr. 1 sind genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass zur Gewährleistung eines hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können. Eisobjekte sowie Trümmerteile (Rotorblattbruch und Turmversagen) sind im Sinne des BImSchG als „sonstige Gefahr“ zu betrachten (siehe auch /28/), der Einfluss auf das Schutzniveau der Umwelt ist für den jeweiligen Standort zu bewerten (standortbezogene Risikobeurteilung).

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ist nachzuweisen, dass die öffentliche Sicherheit nicht durch die geplanten WEA beeinträchtigt wird. In der durch das Bundesland Niedersachsen eingeführten Liste der Technischen Baubestimmungen /25/, werden aufgrund einer Gefahr durch Eisabwurf Mindestabstände definiert. Nach /25/ gelten Abstände größer als $1,5 \times (D + NH)$ im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen gemäß DIN 1055-5 /23/ als ausreichend. Soweit diese Abstände nicht eingehalten werden, ist eine gutachtliche Stellungnahme eines Sachverständigen erforderlich.

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG (TÜV NORD) ist von der Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG mit Schreiben vom 31.07.2019 mit der Erstellung einer Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen beauftragt worden. Die folgende Vorgehensweise ist Gegenstand der Beauftragung:

Erstellung einer gutachtlichen Stellungnahme zur möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K47 und der nahegelegenen Bahntrasse durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen der geplanten WEA. Die Stellungnahme beinhaltet die folgenden Arbeitsschritte:

1. Darstellung des geplanten Projekts mit Angaben zu den Eigenschaften der geplanten WEA und dem Standort.
2. Ermittlung und Darstellung von Kenngrößen zur Risikobewertung.
3. Qualitative Prüfung des Konzepts der Eiserkennung der WEA des Typs Vestas V162.
4. Ermittlung und Darstellung der möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K47 und der Bahntrasse durch herabfallende Eisobjekte, Rotorblattbruch und Turmversagen von WEA des Typs Vestas V162 am Windenergieanlagen-Standort Elbe-Haverlah.

5. Risikobewertung zur Einordnung der Ergebnisse.

Eine weitere Analyse des möglichen Schadensverlaufs durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen (z.B. Gebäudeschäden, Fahrzeugschäden, Ausbreitungsrechnungen für Gefahrstoffe, Schadensbeurteilung, Untersuchung weiterer Schutzobjekte) erfolgt nicht im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme. Die Risikobeurteilung erfolgt auf Grundlage der eingereichten Unterlagen. Es wurde ausschließlich die Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K47 und der Bahntrasse durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen durch die neugeplanten WEA beurteilt, mögliche weitere Schutzobjekte in der Umgebung der geplanten WEA sowie die Beurteilung weiterer Gefährdungen sind nicht Bestandteil der vorliegenden gutachtlichen Stellungnahme. Für die WEA-Spezifikation der geplanten WEA wurden die benannten Spezifikationen berücksichtigt (siehe Seite 2).

Die in dieser Stellungnahme verwendeten Randbedingungen und Rechnungen zum Eisabwurf und Eisabfall basieren auf den aktuellen internationalen Empfehlungen für Risikobeurteilungen von Eisabwurf und Eisabfall von WEA /47/.

2 Angaben zum Windenergieanlagenstandort

Die jeweilige Lage der geplanten WEA des Typs Vestas V162 ist dem Lageplan in Abbildung 1 zu entnehmen.

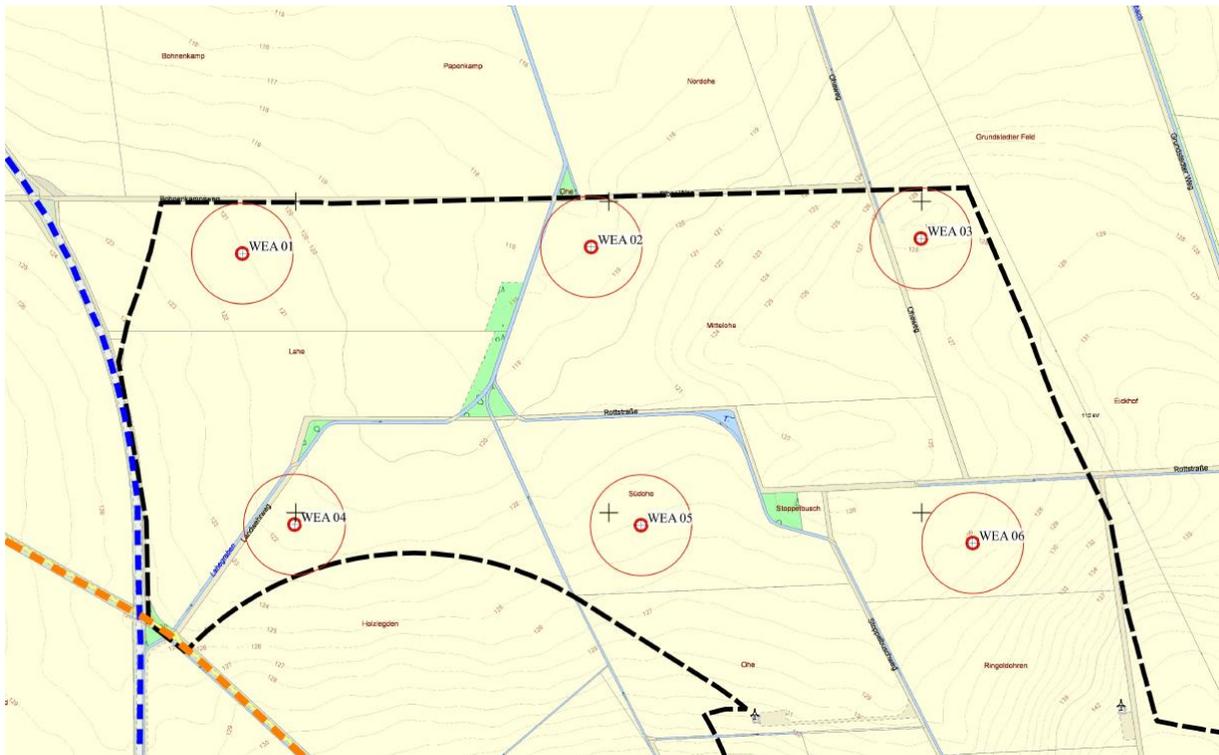


Abbildung 1: Lageplan /2/.

Das umliegende Gelände der geplanten WEA am Standort Elbe-Haverlah ist durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt. In der Nähe der geplanten WEA verlaufen eine Bahnstrecke (siehe Abbildung 1, blau gestrichelte Linie) sowie die Kreisstraße K47 (siehe Abbildung 1, orange gestrichelte Linie). Der kürzeste Abstand der WEA 04 (WEA-Mittelpunkt) zur Bahntrasse beträgt ca. 245m und der kürzeste Abstand der WEA 04 (WEA-Mittelpunkt) zur Kreisstraße K47 beträgt ca. 251m.

Die Angaben zum Standort wurden dem Lageplan /2/ und der Standortbeschreibung /5/ entnommen.

3 Bewertungsmaßstab

Da es in Deutschland kein einheitliches Risikoakzeptanzkriterium gibt, werden für die vorliegende Fragestellung verschiedene Quellen zur Ermittlung eines Risikogrenzwertes herangezogen:

- Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) /35/.

- Statistiken der Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE) /36/.
- Statistiken der Verkehrsunfälle des Statistischen Bundesamtes /37/.
- Risk Criteria in EU /39/.
- Deutsche Störfall-Kommission - Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung /40/.
- Auswertung des VdTÜV /41/.
- Internationale Empfehlung zur Risikobeurteilung Eisabwurf und Eisabfall /47/.

Zeigt es sich, dass sich das Risiko zu verunfallen, infolge der betrachteten Gefährdung durch die WEA signifikant erhöht, so sind entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Als signifikant ist hierbei eine Risikoerhöhung größer als 10% zu betrachten (in Anlehnung an das Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) /35/).

Im Rahmen der Beurteilung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmern im öffentlichen Straßenverkehr werden die Gefährdung der einzelnen Verkehrsteilnehmer und die Gefährdung des Straßenverkehrs der betroffenen Verkehrsabschnitte berücksichtigt. Für die Bewertung einzelner Verkehrsteilnehmer werden im Folgenden Bewertungsmaßstäbe für das Individualrisiko herangezogen (siehe Kapitel 3.1). Zur Beurteilung der Gesamtsituation ist neben der Bewertung des Individualrisikos auch die Betrachtung der Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) nötig. Diese wird auf Basis der Verkehrsdichte am Standort und den aktuellen Verkehrsunfallzahlen /37/ beurteilt (siehe Kapitel 3.2).

Für die Beurteilung der Gefährdung des Bahnverkehrs ist das Individualrisiko eines Zugreisenden relevant. Dieses wird auf Basis der Fahrgastzahlen am Standort beurteilt (siehe Kapitel 3.3).

3.1 Individualrisiko

MEM-Prinzip

Das Prinzip der MEM /35/ beschreibt die gegebene Sterberate pro Person und Jahr unter Berücksichtigung verschiedener Ursachen aus den Bereichen Freizeit, Arbeit und Verkehr. In wirtschaftlich gut entwickelten Ländern liegt die minimale endogene Sterblichkeit in der Gruppe der 5- bis 15-jährigen /35/. Die in /35/ getätigten Angaben decken sich mit aktuellen Erhebungen des GBE /36/. Auf Basis des MEM-Prinzips lässt sich der Risikogrenzwert für das Individualrisiko zu $1,0E-05$ pro Person und Jahr ableiten.

Freizeitunfälle

Auf Basis der Unfallstatistiken der GBE /36/ und der Bedingung, dass das vorherrschende Risiko nicht signifikant steigen darf (max. 10%), lässt sich der folgende Risikogrenzwert ableiten:

- Risiko eines tödlichen Freizeitunfalls: $6,0E-06$ je Person und Jahr.

VdTÜV

Vom VdTÜV wurden in einer Auswertung /41/ die folgenden Risikogrenzwerte angegeben:

- Niederlande: $1,0E-05/a$ für bestehende Anlagen, $1,0E-06/a$ für geplante Anlagen.
- Deutschland, Empfehlung des VdTÜV: Solange keine offiziellen Werte für Deutschland festgelegt werden, schlagen die Verfasser vor, für das Individualrisiko den Wert für Neuanlagen in den Niederlanden mit $1,0E-06/a$ zu verwenden.

Werden die aufgeführten Quellen zur Ermittlung eines Risikoakzeptanzkriteriums verglichen, so zeigt sich, dass die Risikoakzeptanzkriterien in guter Übereinstimmung zu einander in einem Bereich von $1,0E-06$ bis $1,0E-05$ liegen. Zusammenfassend lässt sich für das Individualrisiko (lebensbedrohlicher Unfall/Jahr) folgendes feststellen:

- Der untere Grenzwert des Individualrisikos liegt in einer Größenordnung von $1,0E-06$ pro Person und Jahr.
- Der obere Grenzwert des Individualrisikos liegt in einer Größenordnung von $1,0E-05$ pro Person und Jahr.

Ein ermitteltes Individualrisiko unterhalb von $1,0E-06$ ist als unkritisch zu bewerten. Liegt das ermittelte Individualrisiko in einem Bereich zwischen $1,0E-06$ und $1,0E-05$ ist das Risiko tolerabel. Es sind aber in Anlehnung an das ALARP-Prinzip (As Low As Reasonably Practicable) /39/ Maßnahmen zur Risikominderung zu prüfen und ggf. umzusetzen. Ein Individualrisiko oberhalb von $1,0E-05$ wird als unakzeptabel eingestuft. Hier sind weiterführende Maßnahmen zur Risikominderung zwingend erforderlich.

3.2 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko)

Für die Beurteilung der Gefährdung des Straßenverkehrs durch die geplanten WEA wird das allgemein vorliegende Risiko im Straßenverkehr betrachtet. Diesbezüglich ist in Anlehnung an die Straßenverkehrsordnung (StVO) der Bundesrepublik Deutschland die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten /38/ und darf durch den Zubau einer WEA nicht gefährdet werden. Für die Bewertung der Gefährdung des Straßenverkehrs werden die aktuellen Statistiken der Verkehrsunfälle des Statistischen Bundesamtes herangezogen /37/. Zeigt es sich, dass sich das Unfallrisiko des zu beurteilenden Straßenabschnittes signifikant erhöht, so sind entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Als signifikant ist hierbei eine Risikoerhöhung größer als 10% zu betrachten (in Anlehnung an das Prinzip der MEM, beschrieben in /35/). In Anlehnung an die Vorgaben der StVO /38/ werden für die Beurteilung der Gefährdung des Straßenverkehrs nicht nur die möglichen Unfälle mit tödlichem Ausgang betrachtet, sondern alle Unfälle mit einer schweren Unfallfolge herangezogen und bewertet.

Die Daten des Statistischen Bundesamtes zu den Verkehrsunfällen sind für unterschiedliche Situationen aufbereitet /37/. Im Jahr 2018 gab es je 1.000km Straßenlänge

- innerorts 4.217,
- außerorts ohne Autobahnen 451 und
- auf Autobahnen 1.579

Unfälle mit Personenschaden.

Zusätzlich sind in /37/ die gesamte Anzahl der Unfälle mit Personenschäden, die Anzahl der Personenschäden, die Anzahl der getöteten, schwer- und leichtverletzten Verkehrsteilnehmer angegeben. Hieraus lässt sich für die jeweilige Verkehrssituation die Gefährdung im Straßenverkehr ableiten. Auf Basis der aktuellen Unfallstatistik aus dem Jahr 2017 ergibt sich die Unfallhäufigkeit von schweren Verkehrsunfällen mit Personenschaden außerorts (ohne Autobahn) zu $1,0E-01$ pro km und Jahr. Dies entspricht einem schweren Verkehrsunfall mit tödlichem Ausgang bzw. schwerverletzten Personen alle 10 Jahre pro Kilometer.

Unter Berücksichtigung, dass das vorherrschende Risiko nicht signifikant steigen darf (max. 10%), ergibt sich daraus die obere Grenze des zu berücksichtigenden Risikogrenzwertbereichs für die Gefährdung des Straßenverkehrs außerorts (ohne Autobahn) zu $1,0E-02$ schwere Verkehrsunfälle mit Personenschaden je Kilometer und Jahr bzw. zu $1,0E-05$ pro Meter und Jahr.

In Anlehnung an das ALARP-Prinzip /39/ leitet sich daraus der folgende Risikogrenzwertbereich für die Beurteilung der Gefährdung des Straßenverkehrs außerorts (ohne Autobahn) ab:

- Untere Grenze: Der untere Grenzwert der Gefährdung des Straßenverkehrs liegt in einer Größenordnung von $1,0E-06$ pro Meter und Jahr.
- Obere Grenze: Der obere Grenzwert der Gefährdung des Straßenverkehrs liegt in einer Größenordnung von $1,0E-05$ pro Meter und Jahr.

Bezogen auf die am Standort Elbe-Haverlah zu betrachtenden Straßenabschnitte bedeutet dies, dass eine ermittelte Unfallhäufigkeit unterhalb von $1,0E-06$ pro Meter und Jahr als unkritisch zu bewerten ist. Liegt die ermittelte Unfallhäufigkeit in einem Bereich zwischen $1,0E-06$ pro Meter und Jahr und $1,0E-05$ pro Meter und Jahr ist das Risiko tolerabel. Es sind aber in Anlehnung an das ALARP-Prinzip /39/ Maßnahmen zur Risikominderung zu prüfen und ggf. umzusetzen. Eine Unfallhäufigkeit oberhalb von $1,0E-05$ pro Meter und Jahr wird als unakzeptabel eingestuft. Hier sind weiterführende Maßnahmen zur Risikominderung zwingend erforderlich.

3.3 Bahnverkehr

Für den Bahnverkehr zeigt sich, dass bei einem kritischen Ereignis im Bahnverkehr nicht nur Einzelpersonen gefährdet sind, sondern mit einer Vielzahl von toten oder schwerverletzten Personen gerechnet werden muss. Die Anzahl der Personen, welche bei einem Bahnunfall tödlich verunglücken hängt vom Unfallhergang und der Besetzung des Zuges ab. Je nach Besetzung des Zuges muss mit unterschiedlich vielen Toten gerechnet werden. Für die Bestimmung der möglichen Mortalitätsrate wurden

die schweren Zugunglücke der letzten Jahre verglichen und konservativ das Zugunglück von Eschede aus dem Jahre 1998 zugrunde gelegt. Der damals verunglückte ICE war mit 287 Personen belegt und bei dem Unglück starben 101 Menschen, woraus sich konservativ eine Mortalitätsrate für den Zugverkehr von 35% ergibt, welche für ein mögliches Zugunglück berücksichtigt wird. Diese Annahme ist insofern konservativ, als das Eschede das bislang schwerste Zugunglück in der Vergangenheit in Deutschland darstellt und im Folgenden für die Ermittlung der möglichen getöteten Personen bei einem Zugunglück berücksichtigt wird.

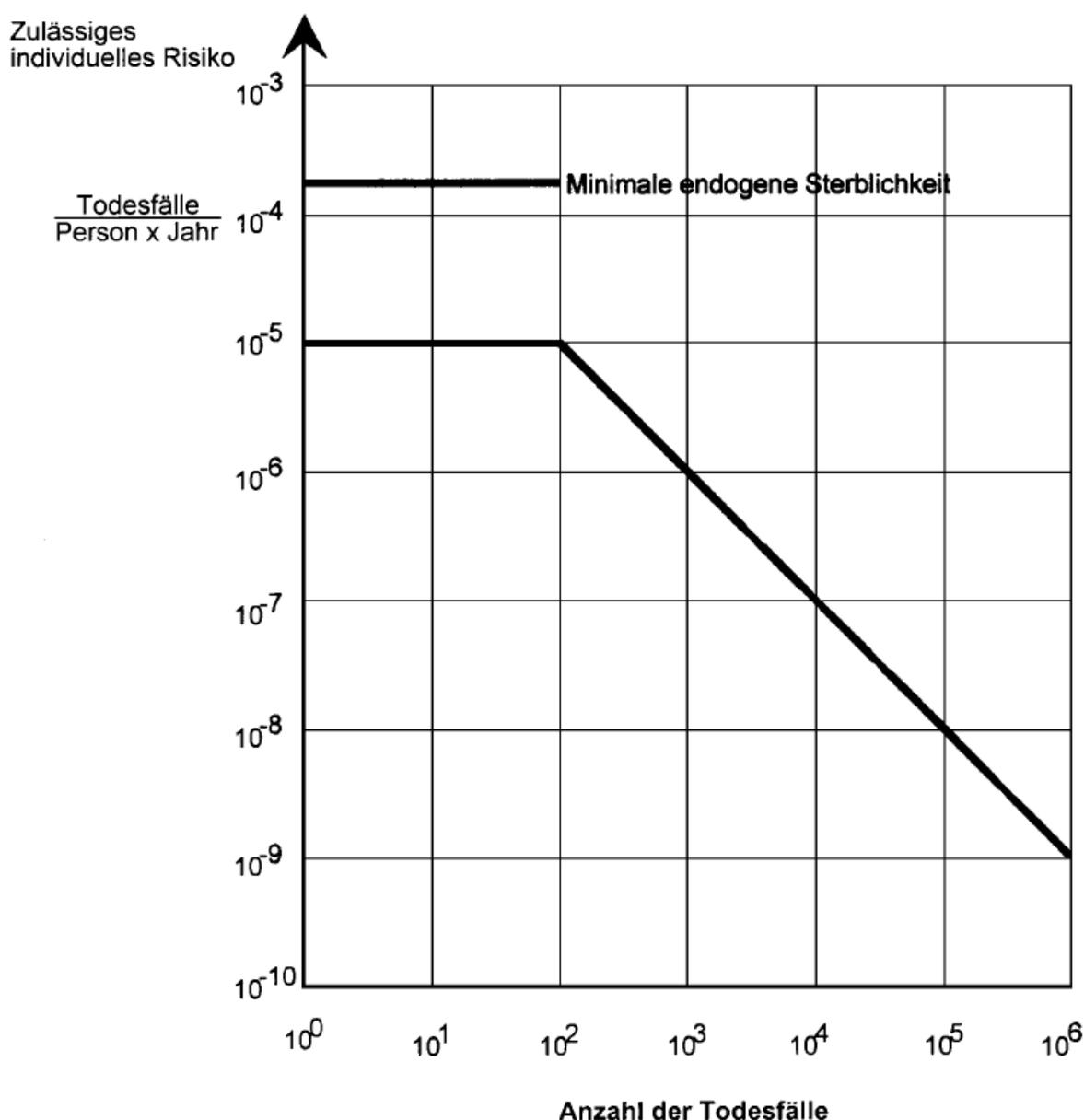


Abbildung 2: Risikoaversion auf Basis des MEM-Prinzips /35/.

Die Abbildung 2 zeigt, dass in der DIN EN 50126 /35/ eingeführte MEM Prinzip und die Risikoaversion für Ereignisse, bei denen mit mehr als 100 Tote gerechnet werden muss. Für die Ermittlung des Risikogrenzwertes für den Bahnverkehr am Standort Elbe-Haverlah muss die mögliche Anzahl an Todesfällen je Ereignis ermittelt werden. Hierfür wird die Anzahl an durchschnittlich beförderten Personen herangezogen und mit der ermittelten Mortalitätsrate kombiniert. Für die durchschnittliche Anzahl an Fahrgästen wird gemäß /6/ ein Wert von 58 Personen pro Fahrt angenommen. Kombiniert mit der konservativ ermittelten Mortalitätsrate ergeben sich daraus ca. 20 Todesfälle je Ereignis. Daraus folgt der für den Standort Elbe-Haverlah heranzuziehende Risikogrenzwert für den Bahnverkehr zu $1,0E-05$ Ereignisse pro Jahr.

In Anlehnung an das ALARP-Prinzip /39/ leitet sich daraus der folgende Risikogrenzwertbereich für die Beurteilung der Gefährdung des Bahnverkehrs am Standort Elbe-Haverlah ab:

- Der obere Grenzwert der Gefährdung des Bahnverkehrs (Individualrisiko) am Standort Elbe-Haverlah liegt in einer Größenordnung von $1,0E-05$ pro Person und Jahr.
- Der untere Grenzwert der Gefährdung des Bahnverkehrs (Individualrisiko) am Standort Elbe-Haverlah liegt in einer Größenordnung von $1,0E-06$ pro Person und Jahr.

Bezogen auf die am Standort Elbe-Haverlah zu betrachtende Bahnstrecke bedeutet dies, dass ein ermitteltes Individualrisiko unterhalb von $1,0E-06$ als unkritisch bzw. vernachlässigbar zu bewerten ist. Liegt das ermittelte Individualrisiko in einem Bereich zwischen $1,0E-06$ und $1,0E-05$ ist das Risiko akzeptabel. Es sind aber in Anlehnung an das ALARP-Prinzip /39/ Maßnahmen zur Risikominderung zu prüfen. Eine Unfallhäufigkeit oberhalb von $1,0E-05$ wird als unakzeptabel eingestuft. Hier sind weiterführende Maßnahmen zur Risikominderung zwingend erforderlich.

4 Risikoanalyse

4.1 Eisabwurf und Eisabfall

Eisstücke oder Eiszapfen, die aus großer Höhe und mit entsprechend hoher Geschwindigkeit herabgeschleudert werden oder herunterfallen, können für Verkehrsteilnehmer im Trefferbereich eine ernste Gefahr darstellen. Durch Eisbildung an Gebäuden sind in Gebieten mit starker Eisbildung bereits Personen durch herabfallende Eisstücke zu Schaden gekommen.

Geschlossene Fahrzeuge bieten Schutz, könnten aber beschädigt werden. Bei Fahrzeugen in Bewegung könnten im Falle eines Treffers reflexartige Reaktionen des Fahrers zu Unfällen führen. Demgegenüber stellen herabfallende Eisplatten von LKW mit Planenaufbau für Verkehrsteilnehmer eine nicht zu vernachlässigende Gefahr dar. Unfälle durch herabfallende Eisplatten von LKW mit Personen- und Sachschäden werden

im Winter regelmäßig gemeldet. Das Schadenspotential durch Eisabwurf oder Eisabfall von WEA ist vergleichbar mit dem von Eisplatten, welche sich von LKW mit Planenaufbau lösen können.

Grundlegend muss bei der Bewertung von vereisten WEA zwischen den Gefährdungen durch Eisabwurf und Eisabfall unterschieden werden. Der Eisabwurf ist das Abwerfen eines Eisobjektes während des Betriebes der WEA, das Eisobjekt wird durch die drehende Rotorbewegung beschleunigt. Der Eisabfall ist das Abfallen eines Eisobjektes bei abgeschalteter WEA (Trudelbetrieb), hierbei wird das Eisobjekt im Fallen durch den Wind abgetrieben. Zur Ermittlung des möglichen Gefährdungsbereichs durch Eisabwurf bzw. Eisabfall von Rotorblättern einer WEA ist zunächst zu prüfen, ob die WEA über eine automatische Abschaltung bei Eisansatz verfügt. Bei WEA ohne eine wirksame Eisabschaltung kommt es infolge der Drehung des Rotors zum Wegschleudern des Eises (Eisabwurf), wodurch erheblich größere Wurfweiten erzielt werden.

Für die standortbezogene Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf und Eisabfall wird im Rahmen der Risikoanalyse das Eiserkennungssystem zur Verhinderung des Eisabwurfs dargestellt. Darauffolgend wird die Gefährdung durch Eisabfall ermittelt. Die Ergebnisse werden in der Risikobewertung (siehe Kapitel 6) unter Berücksichtigung der tatsächlichen Standortumgebung beurteilt.

4.1.1 Vereisungspotential

Die Vereisung durch Eisregen oder Raueis hängt von den meteorologischen Verhältnissen wie Lufttemperatur, relative und absolute Luftfeuchte sowie der Windgeschwindigkeit ab. Diese Parameter werden z. B. durch die Topografie des zu beurteilenden Standortes beeinflusst. Wesentlich sind außerdem die Eigenschaften der Bauteile wie Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit und Form. Allgemein gültige Angaben über das Auftreten von Vereisung können deshalb nicht gemacht werden. Vereisung bildet sich jedoch bevorzugt im Gebirge, im Bereich feuchter Aufwinde oder in der Nähe großer Gewässer, auch in Küstennähe und an Flussläufen /20/, /21/, /22/.

Aufgrund des Tragflächenprinzips von WEA-Rotorblättern sinkt der Luftdruck infolge der Beschleunigung der Luft an der Hinterseite der Rotorblätter (Bernoulli-Effekt). Durch den plötzlichen Druckabfall kommt es zu einer Verringerung der Lufttemperatur. Dieser Effekt kann die Vereisung der Rotorblätter bei bestimmten Wetterlagen verstärken. Während Eisablagerungen bei entsprechender Schichtstärke zu einer Gefährdung führen können, stellen Reif- und Schneeablagerungen für die Umgebung keine Gefahr dar. Eisabfall von Rotorblättern tritt nach jeder Vereisungswetterlage mit einsetzendem Tauwetter auf. Abgeschaltete WEA unterscheiden sich dann nicht wesentlich von anderen hohen Objekten wie z.B. Brücken oder Strommasten.

Für den Standort Elbe-Haverlah ist gemäß den Eiskarten Europas /11/ und den Vereisungstagen des DWD /14/, /15/ im Mittel mit ca. 18 möglichen Vereisungstagen pro Jahr zu rechnen. Dieser Wert deckt sich mit internen Untersuchungen von TÜV NORD

zur Vereisungshäufigkeit /12/, /13/, welche auf Basis von Wetterstationen und Wetterbeobachtungen für ganz Deutschland durchgeführt wurden.

Zusätzlich zur jährlichen Vereisungsperiode (Anzahl der Vereisungsereignisse) ist die Anzahl der Eisabfallereignisse je Vereisung abzuschätzen. Im Rahmen des Schweizer Forschungsprojekts „Alpine Test Site Gütisch“ /17/, /18/, /19/ wurden unter anderem beobachtete abgefallene bzw. abgeworfene Eisobjekte einer WEA mit einem Rotordurchmesser von 44,0m statistisch erfasst. So wurden in vier Jahren mind. 250 Eisobjekte beobachtet /19/. Unter Berücksichtigung der in /18/ ausgewiesenen Häufigkeit der Vereisung für den Standort Gütisch mit 10 bis 30 Tagen pro Jahr, lässt sich somit die Anzahl von Eisfragmenten pro Vereisung zu

$$\frac{250 \text{ Eisobjekte}}{4 \text{ Jahre} \cdot 10 \text{ Vereisungen / Jahr}} \approx 7 \text{ Eisobjekte / Vereisung}$$

abschätzen. Da davon auszugehen ist, dass ein erheblicher Anteil der Eisobjekte nicht erfasst wurde, setzt TÜV NORD für die Anzahl der Eisabwurf- bzw. Eisabfallereignisse, unter Berücksichtigung einer geschätzten Dunkelziffer von 100%, einen Wert von 14 Eisobjekten/Vereisung an.

Da die Studie „Alpine Test Site Gütisch“ für eine WEA mit einem Rotordurchmesser von 44,0m durchgeführt wurde, sind die Beobachtungen auf andere WEA zu übertragen. Eine sinnvolle Basis ist die gebildete Eismenge, welche proportional zu D^2 ist. In Tabelle 1 sind die prognostizierten abgeworfenen Eisobjekte pro Vereisung aufgeführt.

WEA-Typ	D [m]	D^2 [m ²]	Verhältnis	Eisobjekte/Vereisung
ENERCON E-40	44,0	1.936	1,0	ca. 14
Vestas V162	162,0	26.244	13,6	ca. 191

Tabelle 1: Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung.

4.1.2 Automatische Eisabschaltung (Eisabwurf)

Zur Ermittlung des möglichen Gefährdungsbereichs durch Eisabwurf bzw. Eisabfall von Rotorblättern der WEA ist zunächst zu prüfen, ob die geplanten WEA über eine automatische Abschaltung bei Eisansatz verfügen. Bei WEA, die über eine wirksame Eisabschaltung verfügen, sind lediglich der Eisabfall von den abgeschalteten WEA und die seitliche Ablenkung durch den Wind zu berücksichtigen.

Für die Eiserkennung ist das Eiserkennungssystem BLADEcontrol der Firma Weidmüller Monitoring Systems GmbH geplant /4/. Die Erkennung des Eisansatzes beruht bei BLADEcontrol auf einer Überwachung der Eigenfrequenzen der Rotorblätter. Die Masse der Blätter nimmt bei Eisansatz zu und bewirkt eine Frequenzverschiebung, welche Eisansatz signalisiert /7/. Gemäß /7/ überschreitet die Empfindlichkeit das notwendige Maß, sodass eine Gefährdung der Umgebung durch Eisabwurf im laufenden

Betrieb nicht erkennbar ist. Ein Eisansatz wird erkannt, bevor dieser eine kritische Masse erreicht /7/.

Dadurch, dass BLADEcontrol auch bei Stillstand der WEA das Eis direkt an den Rotorblättern detektiert, kann die WEA bei Eisansatz nicht nur automatisch abgeschaltet werden, es wird auch die Eisfreiheit der Rotorblätter zeitnah gemessen /7/, /8/. Die WEA kann dann automatisch wieder zugeschaltet werden /8/.

Das System wurde nach GL IV-4 „Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines“ zertifiziert /9/. Mit /7/ wurde für die Eiserkennung mittels BLADEcontrol bestätigt, dass das System dem Stand der Technik entspricht und zur Erkennung von Eisansatz geeignet ist. Mit /8/ wurde die Integration der Eiserkennung mittels BLADEcontrol in die Steuerung von Vestas WEA in Hinblick auf eine zuverlässige Eiserkennung geprüft. Die Prüfung hat ergeben, dass die WEA bei Eisansatz sicher abgeschaltet werden und die Integration der Eiserkennung in die WEA-Steuerung dem Stand der Technik entspricht /8/. Gemäß /8/ werden die behördlichen Anforderungen für eine sichere Abschaltung bei Gefahr von Eisabwurf im laufenden Betrieb als „sonstige Gefahr“ im Sinne des § 5 BImSchG erfüllt. Das vorgesehene System ist gemäß /7/, /8/ auch unter konservativen Annahmen zur Gefahrenabwehr bzgl. Eisabwurf geeignet.

4.1.3 Randbedingungen für die Untersuchung des Eisabfalls

Für die Berechnungen der Fallweiten werden die folgenden Rahmenbedingungen angenommen:

- WEA: Die WEA ist abgeschaltet (Trudelbetrieb). In Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird die entsprechende Drehzahl im Trudelbetrieb ermittelt (Drehzahlbereich Trudeln 0 - 2,0 U/min) und als Anfangsgeschwindigkeit des Eisobjekts berücksichtigt.
- Lageparameter des Rotorblattes: Das Rotorblatt steht senkrecht über dem Turm, sodass die Blattspitze ihre maximale Höhe erreicht.
- Lageparameter des Eisobjekts: Das Eisobjekt befindet sich an der Rotorblattspitze.
- Eisobjekt: Idealisierte Eisobjekte mit unterschiedlicher Form und Größe.
- Windrichtung: Der Wind kommt aus beliebiger Richtung und weht in horizontaler Richtung und orthogonal zur Rotorebene. Eine entsprechende Stellung der WEA ist durch die automatische Windnachführung gegeben.
- Windgeschwindigkeit: Für die Windgeschwindigkeit wird das 99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung auf Nabenhöhe ermittelt. Diese Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe ist hinreichend konservativ gewählt, da sie zu 99,9% nicht überschritten wird und zudem für den gesamten Fallweg angesetzt wird.
- Physikalische Parameter: Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, Luftdichte $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ (konservativ aufgerundet bei 0°C Lufttemperatur).

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und die Weibullverteilung wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt /3/. Die Daten werden als repräsentativ und richtig für den Standort vorausgesetzt und wurden nicht durch TÜV NORD geprüft.

Über die anzusetzende Form und Größe der Eisobjekte gibt es nur wenig belastbare Angaben. Die zur Verfügung stehenden Angaben deuten darauf hin, dass die Mehrzahl der Eisobjekte relativ klein ist (bis ca. 2kg) und die Eisobjekte selten ein Gewicht von mehreren Kilogramm aufweisen /10/, /11/, /17/. Zudem hat sich in Feldstudien /17/ 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 (Strömungswiderstandskoeffizient) beeinflusst.

Um den Einfluss von unterschiedlichen Eisobjekten zu berücksichtigen, werden für die Berechnungen idealisierte Eisobjekte mit unterschiedlicher Form und Größe angesetzt. Die Gewichte der Eisobjekte werden unter Berücksichtigung der Kenntnisse aus /17/ auf 1,0kg normiert. Die Eigenschaften der zugrunde gelegten Eisobjekte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Nr.	Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Form	mittlere Fläche [m ²]	mittlerer c_w -Wert [-]
1	1,0	700	Würfel	0,013	1,11
2	1,0	700	Quader	0,015	1,14
3	1,0	700	Quader	0,019	1,17
4	1,0	700	Platte	0,026	1,23
5	1,0	700	Platte	0,035	1,31

Tabelle 2: Idealisierte Eisobjekte.

4.1.4 Gefährdungsradius

Für die geplanten WEA mit einer Gesamthöhe von ca. 247m über Grund wurde mit einer Windgeschwindigkeit von 23,3m/s (99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung /3/) auf Basis der in Tabelle 2 angegebenen Eisobjekte die maximalen Fallweiten ermittelt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3 und die entsprechenden Fallkurven in Abbildung 3 dargestellt.

v [m/s]	1 Würfel [m]	2 Quader [m]	3 Quader [m]	4 Platte [m]	5 Platte [m]
20,5	138,4	156,3	180,6	225,6	272,9

Tabelle 3: Ermittelte maximale Fallweiten.

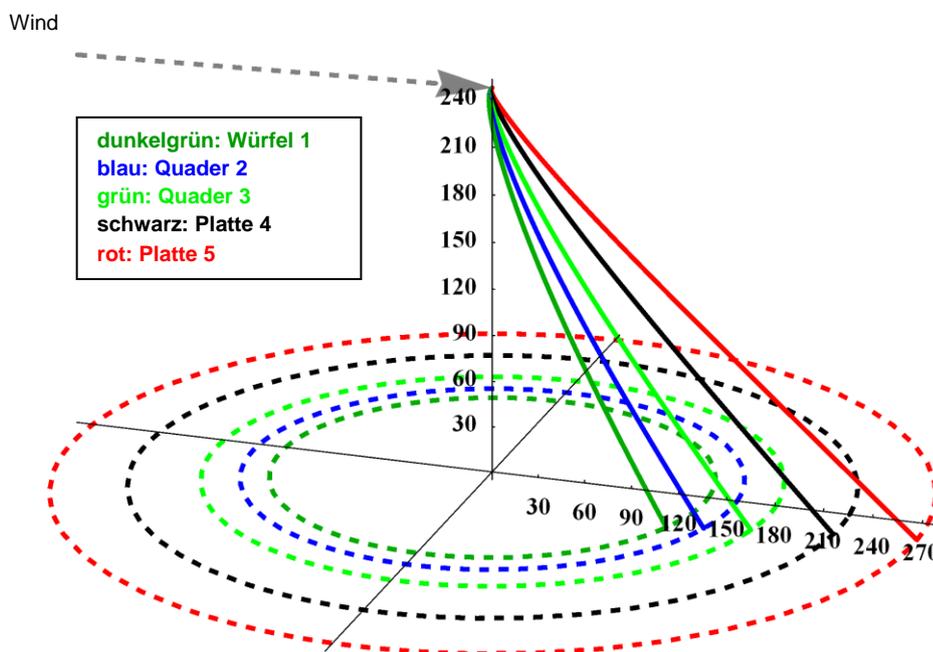


Abbildung 3: Fallweiten bei 20,5m/s Windgeschwindigkeit.

Die ermittelte maximale Fallweite ist der Spalte 7 der Tabelle 3 (Eisobjekt Nr. 5) zu entnehmen. Diese maximale Fallweite ist in der nachfolgenden Abbildung 4 als Gefährdungsradius (rot gestrichelt) um die geplanten WEA dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Abschnitte der Bahntrasse sowie der Kreisstraße K47 durch die Gefährdungsradien der geplanten WEA überdeckt werden. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass Teile der Gefährdungsradien Abschnitte der Wirtschaftswege überdecken. Für die Untersuchung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bahntrasse und der Kreisstraße K47 durch Eisabfall wird im Folgenden eine Detailanalyse und die Simulation des Eisabfalls durchgeführt (siehe Kapitel 4.2). Für die hauptsächlich landwirtschaftlich genutzten Wirtschaftswege /5/, für die im Winter außerhalb der Bewirtschaftungsperiode von einer unregelmäßig Nutzung ausgegangen werden kann, wird die Nutzungshäufigkeit sowie die mögliche Gefährdung durch Eisabfall innerhalb des ermittelten Gefährdungsradius qualitativ berücksichtigt (siehe Kapitel 6).

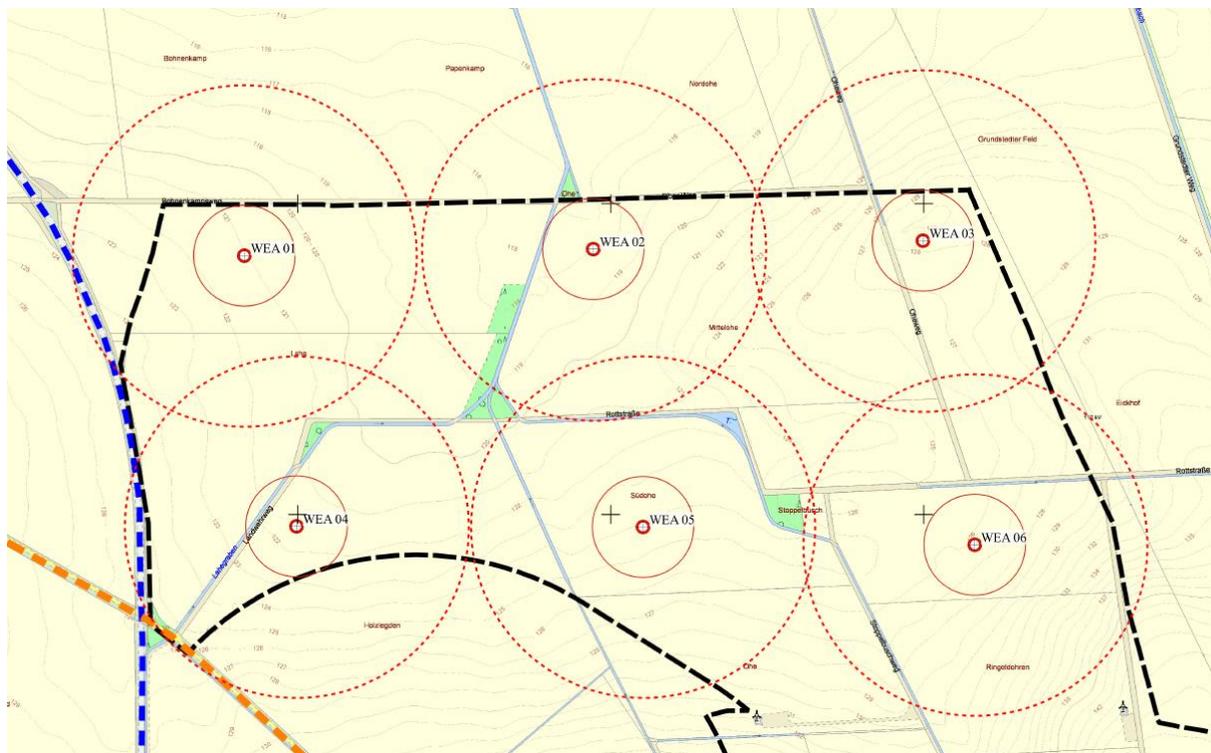


Abbildung 4: Gefährdungsradius – rot gestrichelt ($v = 20,5\text{m/s}$).

4.2 Detailanalyse Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bahntrasse und der Kreisstraße K47

4.2.1 Randbedingungen für die Untersuchung des Eisabfalls

Die Berechnungen der Flugbahnen von Eisobjekten erfolgen ausschließlich für abgeschaltete WEA (Trudelbetrieb). Die Berechnung der flächenbezogenen Trefferhäufigkeit erfolgt unter Variation (Monte-Carlo-Simulation) verschiedener Parameter /42/, /43/: Position und Größe des Eisobjekts, Stellung des Rotorblatts, Windrichtung, Windgeschwindigkeit etc. Im Rahmen der Simulation werden pro WEA etwa 100.000 verschiedene Flugbahnen und Trefferpunkte generiert.

Für die Simulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- WEA-Typ: Vestas V162 mit 166,0m NH und 162,0m D.
- Drehzahl bei Eisabfall: entspricht dem Trudelbetrieb. In Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird die entsprechende Drehzahl bestimmt (Drehzahlbereich Trudeln 0 – 2,0 U/min) und bei der Ermittlung der Anfangsgeschwindigkeit des Eisobjekts berücksichtigt.
- Für die Verteilung der Windrichtung wurden die meteorologischen Daten des Standortes /3/ verwendet.
- Für die Verteilung der Windgeschwindigkeit wurden die meteorologischen Daten des Standortes /3/ verwendet (Weibull-Parameter A und k).

- Physikalische Parameter: Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, Luftdichte $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ (konservativ aufgerundet bei 0°C Lufttemperatur).
- Eisobjekt: Idealisierte Eisobjekte mit unterschiedlicher Form und Größe gemäß Kapitel 4.1.3.
- Lageparameter des Eisobjekts:
Diskrete Verteilungsfunktion, welche auf Basis von Erfahrungswerten zur Eisbildung auf dem Rotorblatt bestimmt wird. Gemäß /16/ ist eine Eisbildung am Ende des Rotorblattes ca. dreimal häufiger zu beobachten als am Ansatz des Rotorblattes.
- Lageparameter der Rotorblätter:
Der Rotor kann sich im abgeschalteten Modus frei bewegen (Trudeln orthogonal zur Windrichtung möglich). Die Position des Rotorblattes ist in der Rotationsebene zum Zeitpunkt des Eisabfalls im Intervall $(0^\circ, 360^\circ)$ gleichverteilt.

4.2.2 Trefferhäufigkeiten

Für die Häufigkeit von Eisabfall-Ereignissen wird gemäß Kapitel 4.1.1 ein Wert von 3.438 Eisabfall-Ereignissen pro WEA und Jahr angesetzt (18 Vereisungstage pro Jahr mit je 191 Eisabfall-Ereignissen). In Abbildung 5 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Eisabfall-Ereignissen der jeweiligen WEA dargestellt.

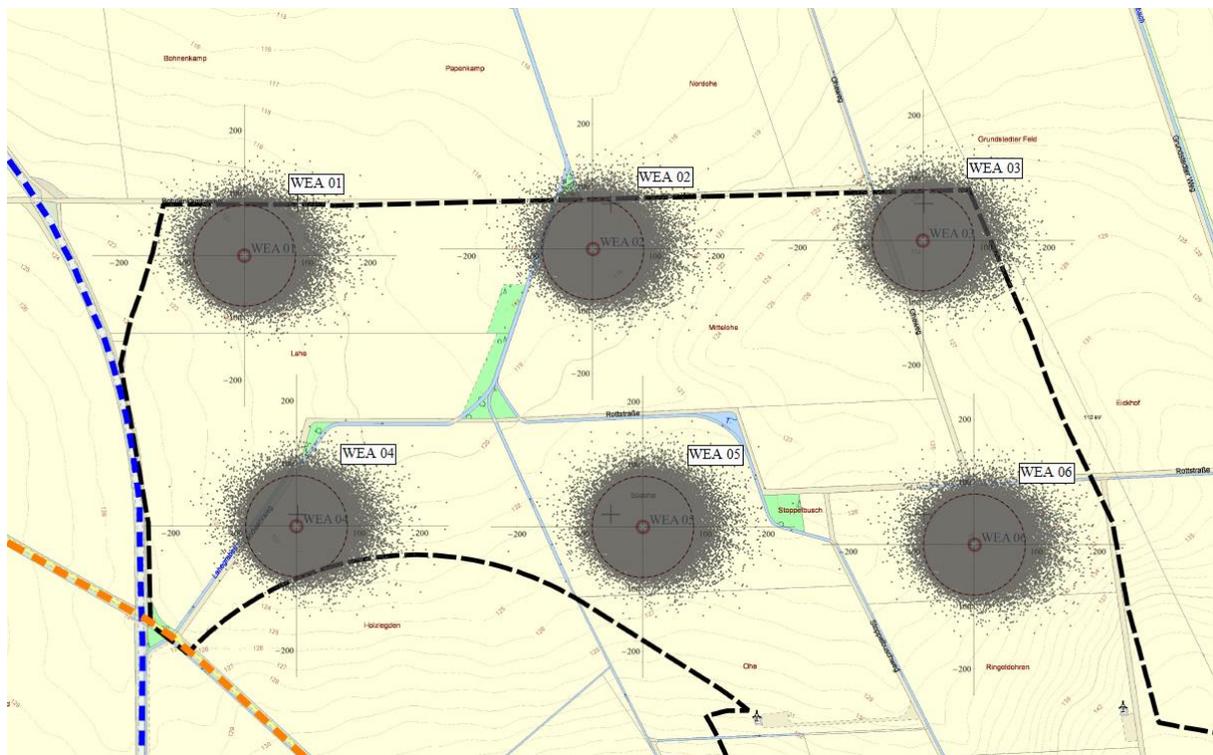


Abbildung 5: Auftreffpunkte bei Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 6 sind die Größenordnungen der Trefferhäufigkeiten pro Quadratmeter und Eisabfall-Ereignis in der Umgebung der WEA durch farblich abgestufte Gefährdungsbereiche dargestellt (Wahrscheinlichkeitszonen). Die Bedeutung der farblich abgestuften Gefährdungsbereiche sowie der möglichen Treffer durch Eisabfall pro Jahr und Quadratmeter sind in der Tabelle 4 beschrieben.

Zone	Farbe	Trefferhäufigkeiten [1/m ²]	Trefferhäufigkeiten pro Jahr [1/(a m ²)]
1	Rot	größer 1,0E-04	größer 3,4E-01
2	Orange	1,0E-05 bis 1,0E-04	3,4E-02 bis 3,4E-01
3	Gelb	1,0E-06 bis 1,0E-05	3,4E-03 bis 3,4E-02
4	Farblos	1,0E-07 bis 1,0E-06	3,4E-04 bis 3,4E-03
5*	Farblos	kleiner 1,0E-07	kleiner 3,4E-04

Tabelle 4: Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Eisabfall),
 *alles außerhalb der Zone 4.

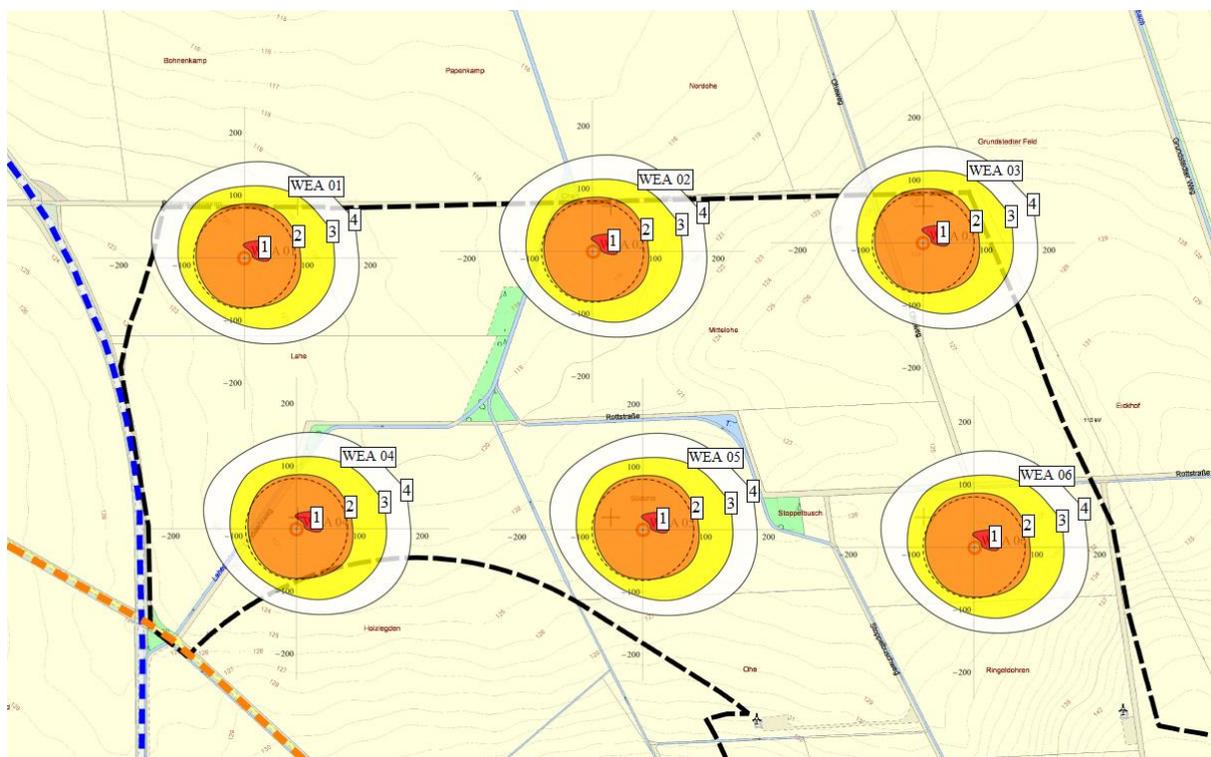


Abbildung 6: Trefferhäufigkeiten [1/m²] pro Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die Ergebnisse der standortbezogenen Simulation des Eisabfalls in Abbildung 6 zeigen, dass die ermittelten Gefährdungsbereiche durch Eisabfall der WEA keine Ab-

schnitte der Bahntrasse oder der Kreisstraße K47 überdecken. Eine direkte Gefährdung durch Eisabfall von den WEA für den Bahnverkehr oder Verkehrsteilnehmer auf der Kreisstraße K47 ist somit nicht zu unterstellen.

4.3 Rotorblattbruch

Unter Rotorblattbruch wird der Bruch des gesamten Rotorblattes ab Nabe oder Bruch an beliebiger Stelle zwischen Rotorblattnabe und Rotorblattspitze mit Ausnahme von Kleinteilen verstanden. Die Flugbahn eines Blattbruchstückes wird durch das Zusammenspiel der angreifenden Kräfte charakterisiert. Dies sind die Schwerkraft und die aus der Luftumströmung resultierenden Druckkräfte.

Trümmerobjekte durch Rotorblattbruch, die aus großer Höhe und mit entsprechend hoher Geschwindigkeit abgeworfen werden, stellen für Verkehrsteilnehmer im Trefferbereich eine Gefahr dar.

4.3.1 Generische Ereignishäufigkeiten

Es sind bereits mehrere Ereignisse bekannt, bei denen an WEA ein Rotorblattbruch beobachtet wurde. TÜV NORD geht nach Auswertung der verfügbaren Ereignis-Datenbanken /29/, /30/, /31/ und unter Berücksichtigung einer geschätzten Anzahl von nicht bekannten Ereignissen in gleicher Größenordnung von einer Schadenshäufigkeit von $1,0E-03$ pro WEA und Jahr aus. Diese Schadenshäufigkeit ergibt sich aus einer Auswertung der bekannten Schadensereignisse in Deutschland (1997 bis Ende 2017 /29/, Daten der Betreiber-Datenbasis (BDB) /30/) und einer Auswertung von Senter-Novem (Handboek Risicozonering Windturbines, Niederlande 2005 /31/). Die Schadensereignisse werden auf die Betriebsdauer und die Anzahl an WEA bezogen, um die Eintrittswahrscheinlichkeit pro Jahr und WEA zu ermitteln. Die Angaben über die Anzahl der in Deutschland errichteten WEA können der Statistik des DEWI /32/ entnommen werden.

4.3.2 Randbedingungen

Die Berechnungen der Flugbahnen von Rotorblattbruchstücken erfolgen unter Variation der verschiedenen Parameter wie Bruchlage, Abwurfwinkel, Windrichtung und Windstärke /43/. Es werden somit etwa 100.000 verschiedene Flugbahnen pro WEA simuliert.

Für die Simulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- WEA-Typ: Vestas V162 mit 166,0m NH und 162,0m D.
- Drehzahl bei Rotorblattbruch: $12,6 \text{ U/min} \cdot 120\% = 15,12 \text{ U/min}$ (Überdrehzahl).
- Für die Verteilung der Windrichtung wurden die meteorologischen Daten des Standortes /3/ verwendet.

- Für die Verteilung der Windgeschwindigkeit wurden die meteorologischen Daten des Standortes /3/ verwendet (Weibull-Parameter A und k).
- Der Rotorblattbruch wird vorausgesetzt. Es wird angenommen, dass dieser für Windgeschwindigkeiten in einem Bereich [15m/s bis 30m/s] erfolgt. Diese Annahme ist aufgrund der Ausdehnung des Trefferbereiches für Windgeschwindigkeiten kleiner 15m/s als abdeckend zu betrachten.
- Es wurden diskrete Bruchpositionen angesetzt (alle 2 Meter), diese werden als gleichverteilt angenommen.
- Der Bruch wird als glatter Schnitt modelliert, der Bruch verbraucht keine Energie.
- Trümmerbrüche, die ein Feld von kleineren Trümmerteilen erzeugen, werden nicht betrachtet.
- Die Abwurfposition (in Rotorblattebene) ist gleichverteilt.

4.3.3 Trefferhäufigkeiten

In Abbildung 7 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Rotorblattbruch-Ereignissen pro WEA dargestellt.

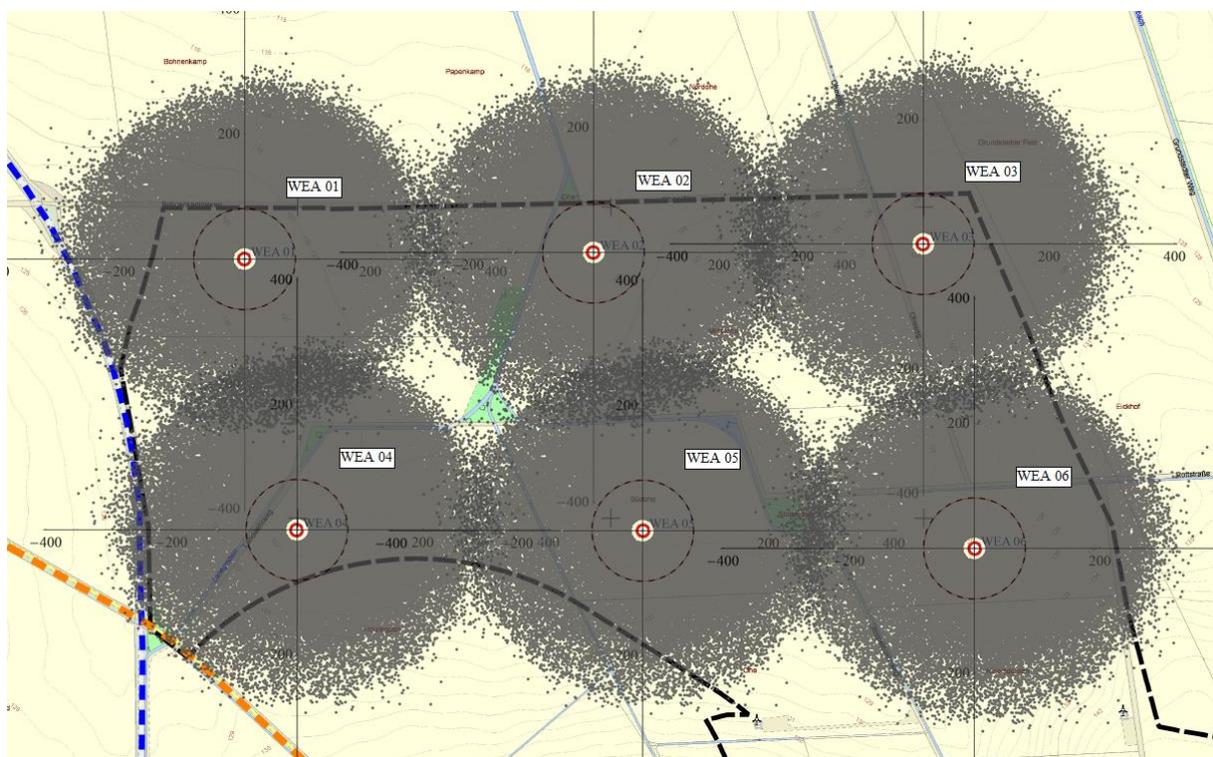


Abbildung 7: Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 8 sind die Größenordnungen der Trefferhäufigkeiten pro m² und Rotorblattbruch-Ereignis in der Umgebung der WEA durch farblich abgestufte Gefährdungs-

bereiche dargestellt (Wahrscheinlichkeitszonen). Die Bedeutung der farblich abgestuften Gefährdungsbereiche sowie der möglichen Treffer durch Rotorblattbruch pro Jahr und m² sind in der Tabelle 5 beschrieben.

Zone	Farbe	Trefferhäufigkeiten [1/m ²]	Trefferhäufigkeiten [1/(a m ²)]
1	Rot	größer 1,0E-05	größer 1,0E-08
2	Orange	1,0E-06 bis 1,0E-05	1,0E-09 bis 1,0E-08
3	Gelb	1,0E-07 bis 1,0E-06	1,0E-10 bis 1,0E-09
4	Farblos	1,0E-08 bis 1,0E-07	1,0E-11 bis 1,0E-10
5*	Farblos	kleiner 1,0E-08	kleiner 1,0E-11

Tabelle 5: Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Rotorblattbruch). *alles außerhalb der Zone 4.

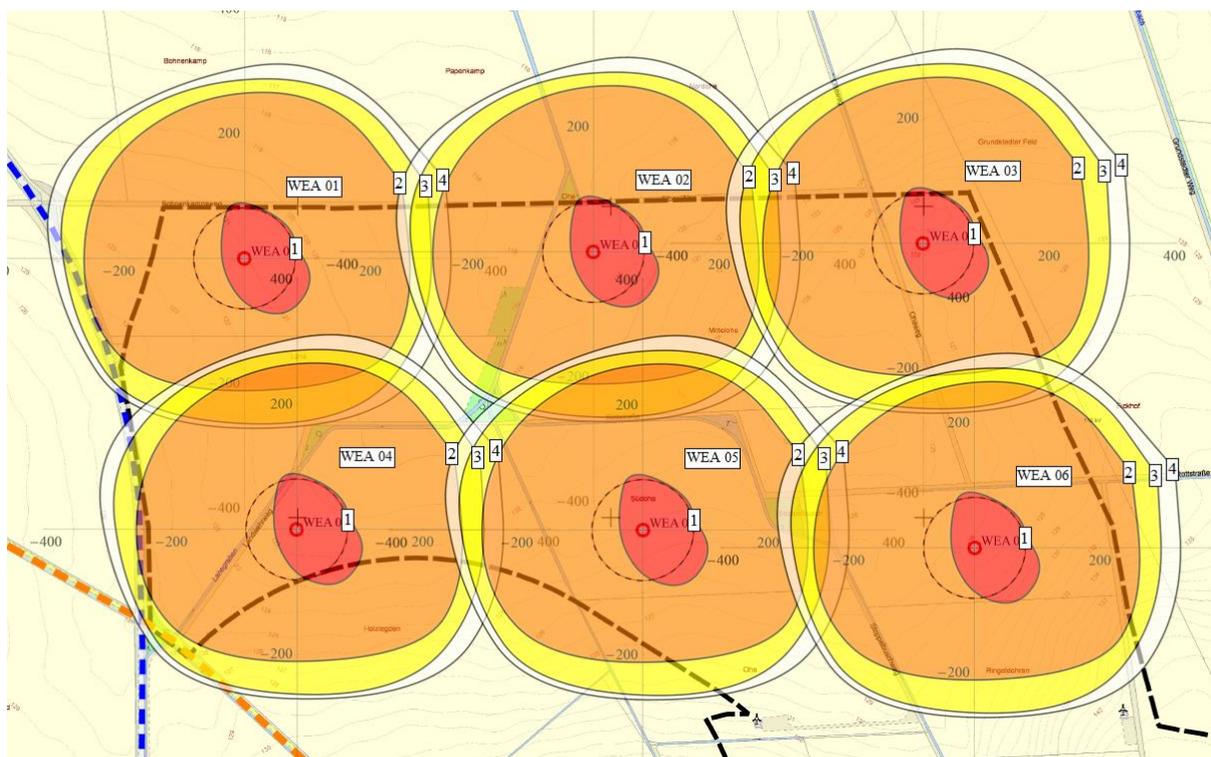


Abbildung 8: Trefferhäufigkeiten [1/m²] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die Ergebnisse der standortbezogenen Simulation des Rotorblattbruchs in Abbildung 8 zeigen, dass Abschnitte der Bahntrasse sowie der Kreisstraße K47 teilweise durch die ermittelten Gefährdungsbereiche der WEA 01 bzw. WEA 04 überdeckt werden (siehe weitere Risikoanalyse Kapitel 4.3.4, 4.3.5 und 4.3.6).

4.3.4 Individualrisiko Straßenverkehr

Auf Basis der in Abbildung 8 dargestellten Trefferhäufigkeiten wird das Risiko, im Straßenverkehr aufgrund Rotorblattbruchs zu verunfallen, für die Kreisstraße K47 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Kreisstraße K47 konservativ eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt. Diese Annahme ist insofern konservativ, als dass die Expositionsdauer im Gefährdungsbereich erhöht wird.

Ein Rotorblattbruch ist dann als personengefährdend einzustufen, wenn Zeit und Ort des Treffers des Bruchobjektes mit der Zeit und dem Ort des zu betrachtenden Fahrzeugs übereinstimmen. Es ergibt sich der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{RJ} \cdot h_{TRj} \cdot A_T \cdot P_{RA} \cdot P_{Aj} \cdot k_T,$$

$$H_T = \sum_j H_{Tj} \text{ mit}$$

- H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr (Ergebnis der Simulation).
- H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.
- h_{RJ} : Häufigkeit Rotorblattbruch pro WEA und Jahr, $h_{RJ} = 1,0E-03/a$ (Kapitel 4.3.1).
- h_{TRj} : Häufigkeit der Treffer pro m² im Bereich j pro Rotorblattbruch (Ergebnis der Simulation).
- A_T : Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs (2m²).
- P_{RA} : Wahrscheinlichkeit, an einem Rotorblattbruch-Ereignis anwesend zu sein, $P_{RA} = (225 \times 2)/365$ (Annahme: Berufspendler). Nutzung an 225 Tagen im Jahr pro Person, z.B. Berufspendler, welcher an 225 Tagen pro Jahr die Straße zweimal pro Tag passiert (Hin- und Rückweg).
- P_{Aj} : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Bereich j eintritt (Geschwindigkeit des Fahrzeugs $v_F / 4$, Länge des Straßenabschnitts l_j aus Abbildung 8)
 $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.
- k_T : Korrekturfaktor, der berücksichtigt, dass ein Bruchobjekt einen, im Vergleich zu seiner Trefferfläche, größeren Schaden verursacht.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergibt sich die in Tabelle 6 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko).

WEA	Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
04	Kreisstraße K47	2,4E-12

Tabelle 6: Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Rotorblattbruch.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von 2,4E-12 Treffer/a im Mittel ca. alle 4,2E+11 Jahre ein lebensbedrohlicher Treffer durch Rotorblattbruch. Eine

Aussage, zu welchem Zeitpunkt sich ein Treffer ereignet, lässt sich hieraus nicht ableiten.

4.3.5 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko)

Für die Ermittlung der Gefährdung des Straßenverkehrs durch Rotorblattbruch wird, aufbauend auf den Randbedingungen für die Ermittlung des Individualrisikos (siehe Kapitel 4.3.4), zusätzlich die Verkehrsdichte auf der Kreisstraße K47 berücksichtigt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Kreisstraße K47 konservativ eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt.

Es ergibt sich der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{RJ} \cdot h_{TRj} \cdot h_{aVT} \cdot A_T \cdot P_{Aj} \cdot k_T,$$

$$H_T = \sum_j H_{Tj} \text{ mit}$$

- H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr (Ergebnis der Simulation).
- H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.
- h_{RJ} : Häufigkeit Rotorblattbruch pro WEA und Jahr, $h_{RJ} = 1,0E-03/a$ (Kapitel 4.3.1).
- h_{TRj} : Häufigkeit der Treffer pro m^2 im Bereich j pro Rotorblattbruch (Ergebnis der Simulation).
- h_{aVT} : Verkehrsdichte: Für die Verkehrsdichte auf der Kreisstraße K47 am Standort Elbe-Haverlah wird gemäß /5/ ein Wert von 197 Fahrzeugen pro Tag angesetzt.
- A_T : Zu berücksichtigende Trefferfläche [m^2]: Fahrzeug: 10,0 m^2 .
- P_{Aj} : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Bereich j eintritt (Geschwindigkeit der Fahrzeuge v_F , Länge des Straßenabschnitts l_j aus Abbildung 8).
- k_T : Korrekturfaktor, der berücksichtigt, dass ein Bruchobjekt einen, im Vergleich zur Trefferfläche, größeren Schaden verursacht.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergibt sich die in Tabelle 7 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Gefährdung des Straßenverkehrs).

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
04	Kreisstraße K47	1,2E-12

Tabelle 7: Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Rotorblattbruch.

Beispielhaft dargestellt erfolgt bei einer Gefährdung von $1,2E-12$ Treffer/(m*a) im Mittel ca. alle $8,3E+12$ Jahre pro Meter Streckenabschnitt ein schwerer Unfall durch Rotorblattbruch. Eine Aussage, zu welchem Zeitpunkt sich ein Treffer ereignet, lässt sich hieraus nicht ableiten.

4.3.6 Gefährdung des Bahnverkehrs

Für die Ermittlung der Gefährdung des Bahnverkehrs durch Rotorblattbruch ist zu beachten, dass der Bahnverkehr zum einen von direkten Treffern sowie von größeren Trümmerteilen auf den Bahngleisen gefährdet werden kann. Ein Rotorblatt kann bezüglich des Gefährdungspotenzials prinzipiell mit einem Baum, welcher auf den Schienen liegt, verglichen werden. Ein herannahender Zug kann aufgrund der niedrigen Höhe darauf auffahren und entgleisen. Der Bremsweg eines Zuges beträgt nach auslösen der Bremsung geschwindigkeitsabhängig mehrere hundert Meter. Aus den genannten Gründen kann ein Unfall infolge eines im Gleisbett liegenden Trümmerteils nicht ausgeschlossen werden und muss im Rahmen der Risikobeurteilung betrachtet werden.

Gemäß der Einschätzung von Experten der TÜV NORD Bahntechnik kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass ein Treffer der Bahnstrecke automatisch erkannt wird und der Zugverkehr stoppt. Ein Treffer der Bahnstrecke könnte die Oberleitung beschädigen, je nach Lage der Einspeisepunkte kann dies zu einer Unterbrechung der Stromversorgung für einen herannahenden Zug führen.

Aufgrund der nicht in jedem Fall gewährleisteten Warnung bzw. eines sichergestellten frühzeitigen Stopps des Zuges bei einem Trümmerteil im Gleisbett oder der Beschädigung der Oberleitung werden im folgenden zwei Grenzszenarien für die Gefährdung durch Rotorblattbruch betrachtet. Erstens der Worst-Case-Fall, dass jeder mögliche Treffer der Bahntrasse einen Unfall zur Folge hat und zweitens, dass nur die direkten Treffer eines fahrenden Zuges zu einem Unfall führen. Daraus ergeben sich für die Gefährdung des Bahnverkehrs die Eintrittshäufigkeiten eines möglichen Sachschadens. Für die Ermittlung des Individualrisikos wird zusätzlich zu den ermittelten Trefferhäufigkeiten die im Kapitel 3.3 hergeleitete Mortalitätsrate berücksichtigt.

Für das erste Szenario (Worst-Case-Fall) ergibt sich für die Trefferhäufigkeit der geplanten Bahntrasse der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{RJ} \cdot h_{TRj},$$

$$H_T = \sum_j H_{Tj} \text{ mit}$$

H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr
(Ergebnis der Simulation).

H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.

- h_{RJ} : Häufigkeit Rotorblattbruch pro WEA und Jahr, $h_{RJ} = 1,0E-03/a$ (Kapitel 4.3.1).
 h_{TRj} : Trefferhäufigkeit der Bahnstrecke: Diese ergibt sich aus den ermittelten Treffern der Bahnstrecke geteilt durch die Anzahl der Simulationsläufe. Zusätzlich wurde die Trefferwahrscheinlichkeit der einzelnen Treffer geometrisch auf Basis des Abstandes zur Bahnstrecke ermittelt.

Für das zweite Szenario ergibt sich für die Trefferhäufigkeit des Bahnverkehrs der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{RJ} \cdot h_{TRj} \cdot h_{aVT} \cdot P_{RA} \cdot P_{Aj},$$

$$H_T = \sum_j H_{Tj} \text{ mit}$$

- H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr (Ergebnis der Simulation).
 H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.
 h_{RJ} : Häufigkeit Rotorblattbruch pro WEA und Jahr, $h_{RJ} = 1,0E-03/a$ (Kapitel 4.3.1).
 h_{TRj} : Trefferhäufigkeit der Bahnstrecke: Diese ergibt sich aus den ermittelten Treffern der Bahnstrecke geteilt durch die Anzahl der Simulationsläufe. Zusätzlich wurde die Trefferwahrscheinlichkeit der einzelnen Treffer geometrisch auf Basis des Abstandes zur Bahnstrecke ermittelt.
 h_{aVT} : Verkehrsdichte (Bahnverkehr): Für die Verkehrsdichte werden gemäß /6/ 38 Züge pro Tag angesetzt.
 P_{RA} : Wahrscheinlichkeit, an einem Rotorblattbruch-Ereignis anwesend zu sein.
 P_{Aj} : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während des Aufenthalts eines Zuges im gefährdeten Bereich eintritt (Mittlere Geschwindigkeit des Zugverkehrs v_F /6/, Länge des gefährdeten Streckenabschnittes l_j aus Abbildung 8), $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergeben sich die in Tabelle 8 aufgeführten Trefferhäufigkeiten pro Jahr. Für die Ermittlung der Individualrisiken wird die im Kapitel 3.3 hergeleitete mögliche Schadensfolge für Personenschäden angesetzt. Es ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Individualrisiken pro Person und Jahr.

WEA	Szenario	Trefferhäufigkeit [Treffer/a]
01	Worst Case	4,2E-06
04	Worst Case	6,6E-06
Summe	Worst Case	1,1E-05
01	Direkter Zugtreffer	3,5E-08
04	Direkter Zugtreffer	6,0E-08
Summe	Direkter Zugtreffer	9,5E-08

Tabelle 8: Trefferhäufigkeiten Bahnverkehr pro Jahr (Sachschäden), bei Rotorblattbruch.

WEA	Szenario	Individualrisiko [Treffer/(Person*a)]
01	Worst Case	1,5E-06
04	Worst Case	2,3E-06
Summe	Worst Case	3,8E-06
01	Direkter Zugtreffer	1,2E-08
04	Direkter Zugtreffer	2,1E-08
Summe	Direkter Zugtreffer	3,3E-08

Tabelle 9: Individualrisiko Bahnverkehr, bei Rotorblattbruch.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von 3,8E-06 Treffer/(Person*a) im Mittel ca. alle 263.158 Jahre ein lebensbedrohlicher Treffer durch Rotorblattbruch. Eine Aussage, zu welchem Zeitpunkt sich ein Treffer ereignet, lässt sich hieraus nicht ableiten.

4.4 Turmversagen

Der Gefährdungsbereich bei Turm- oder Fundamentversagen ergibt sich in Abhängigkeit von der Bruchstelle. Bei einem Bruch direkt über dem Fundament oder bei Fundamentversagen ergibt sich der Gefährdungsbereich annähernd aus der Gesamthöhe der WEA. Eine Streuung von Trümmerteilen über diesen Gefährdungsradius hinaus wird für dieses Schadensereignis nicht angenommen.

Trümmerobjekte durch Turmversagen (inkl. Fundamentversagen, Gondelabsturz), die aus großer Höhe herabstürzen, stellen für Verkehrsteilnehmer im Trefferbereich eine ernste Gefahr dar. Ein Turmversagen kann z. B. bei Versagen des Bremssystems /33/ oder bei extrem hohen Windgeschwindigkeiten /34/ aufgrund der dann vorliegenden Kräfte auftreten.

In Abbildung 9 sind die maximalen Gefährdungsradien bei Turmversagen (innen – Gondel, außen – Gesamthöhe) zu erkennen. Hieraus ist zu erkennen, dass die Bahntrasse durch ein mögliches Turmversagen der WEA 04 betroffen ist. Es zeigt sich, dass bei einem möglichen Turmversagen durch die WEA 04 der Turm inkl. Gondel nicht auf die Bahntrasse fallen könnte, die Bahntrasse ist hierbei nur durch einen möglichen Treffer der äußeren Rotorblätter betroffen. Die Kreisstraße K47 ist durch ein mögliches Turmversagen nicht betroffen.

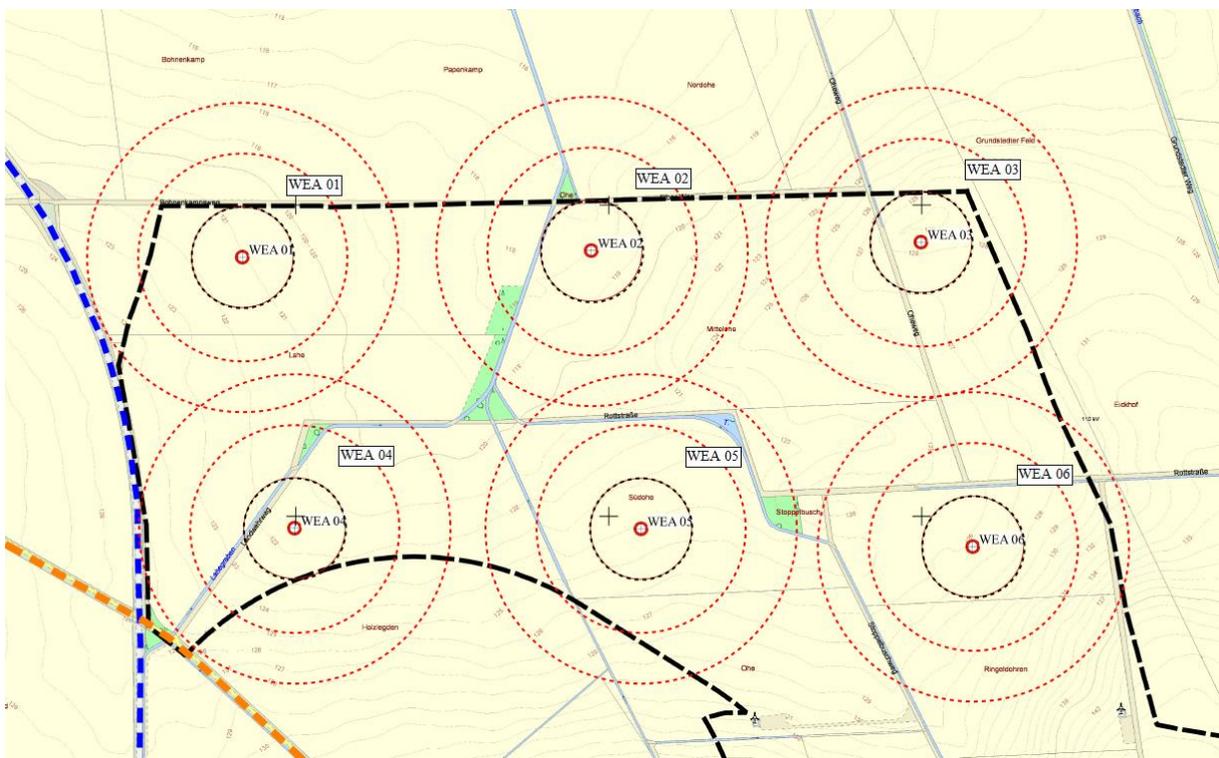


Abbildung 9: Gefährdungsradien (rot gestrichelt) bei Turmversagen: innen – Gondel, außen – Gesamthöhe.

4.4.1 Generische Ereignishäufigkeiten

Es sind bereits mehrere Ereignisse bekannt, bei denen WEA aufgrund eines Turm- oder Fundamentversagens vollständig oder teilweise umgestürzt sind. Darüber hinaus sind Schadensereignisse bekannt, bei denen die Gondel einschließlich Rotor vom Turm gebrochen ist. TÜV NORD geht nach Auswertung der verfügbaren Ereignis-Datenbanken /29/, /31/ und unter Berücksichtigung einer geschätzten Anzahl von nicht bekannten Ereignissen in gleicher Größenordnung von einer Schadenshäufigkeit von $1,0E-04$ pro WEA und Jahr aus. Diese Schadenshäufigkeit ergibt sich aus einer Auswertung der TÜV NORD bekannten Schadensereignisse in Deutschland (1997 bis Ende 2017 /29/) und einer Auswertung von SenterNovem (Handboek Risicozonering Windturbines, Niederlande 2005 /31/). Die Schadensereignisse werden auf die Betriebsdauer und die Anzahl an WEA bezogen, um die Eintrittswahrscheinlichkeit pro Jahr und WEA zu ermitteln. Die Angaben über die Anzahl der in Deutschland errichteten WEA können z.B. der Statistik des DEWI /32/ entnommen werden.

4.4.2 Gefährdung des Bahnverkehrs

Ein Schadensereignis mit direkter Personen- bzw. Verkehrsgefährdung tritt für den Fall ein, dass schwere Teile der WEA auf exponierte Bereiche stürzen (Bahntrasse). Der Gefährdungsbereich ergibt sich in Abhängigkeit von der Bruchstelle. Bei einem Bruch direkt über dem Fundament ergibt sich der maximale Gefährdungsbereich aus der Gesamthöhe der WEA. Für die Ermittlung der möglichen Gefährdung durch Turmversagen wird berücksichtigt, dass der Turm in jegliche Richtung fallen und in unterschiedlicher Höhe brechen kann. Die Fallrichtung sowie die Bruchhöhe wird gleichverteilt angesetzt. Beispielhaft für den Gefährdungsbereich ist der mögliche Trefferbereich durch Turmversagen in der Abbildung 10 dargestellt.

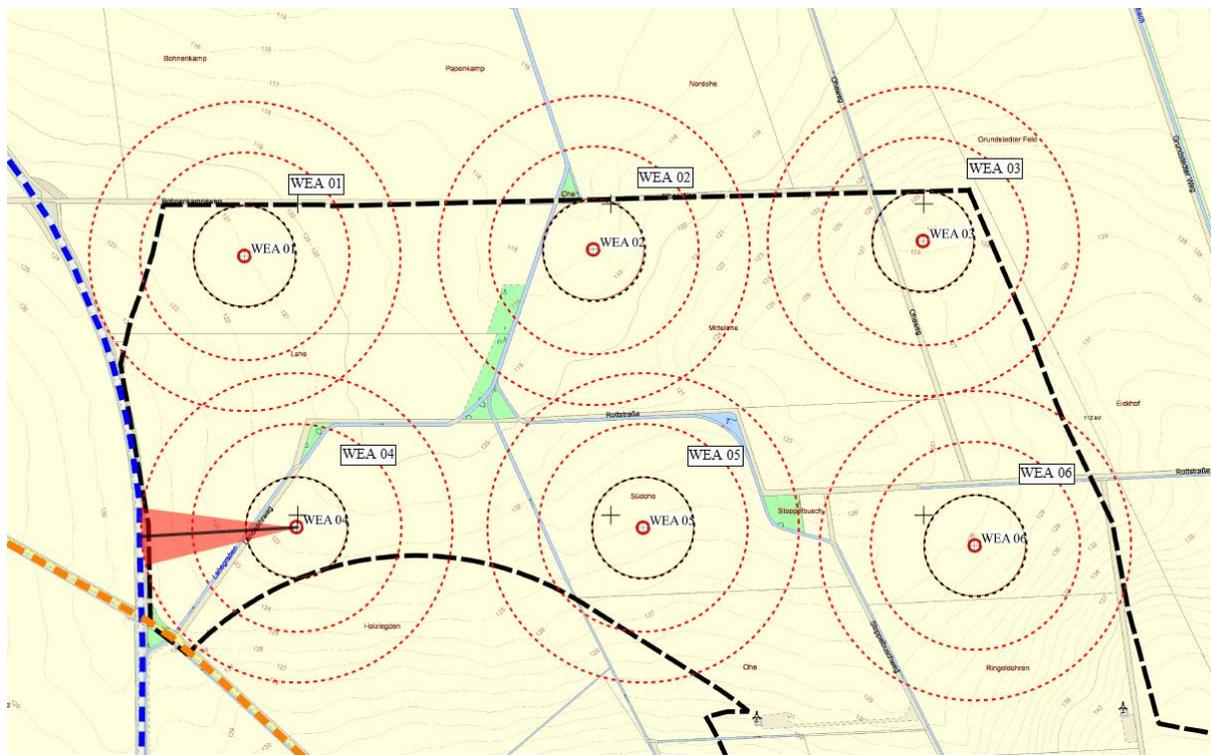


Abbildung 10: Gefährdungsbereiche (rot) bei Turmversagen (schwarzer Balken).

Auf Basis der in Abbildung 10 dargestellten Gefährdungsbereiche wird das Risiko für den Zugverkehr durch Turmversagen der untersuchten WEA 04 ermittelt.

Ein Turmversagen ist dann als gefährdend einzustufen, wenn der Turm in Richtung der Bahnstrecke fällt und wenn der Bruch in Abhängigkeit der Fallrichtung in einer Höhe erfolgt, sodass Teile der WEA (Turm, Gondel oder Rotorblatt) die Strecke treffen (Trefferwahrscheinlichkeit (PTR)). Diese ergibt sich aus der geometrischen Beziehung des gefährdeten Trefferbereichs zum gesamten möglichen Trefferbereich (Winkelbeziehung). Für die Ermittlung der Gefährdung des Bahnverkehrs durch Turmversagen ist zu beachten, dass der Bahnverkehr zum einen von direkten Treffern sowie von größeren Trümmerteilen auf den Bahngleisen gefährdet werden kann. Ein Trümmerteil kann bezüglich des Gefährdungspotenzials prinzipiell mit einem Baum, welcher auf den Schienen liegt, verglichen werden. Ein herannahender Zug kann aufgrund der niedrigen Höhe darauf auffahren und entgleisen. Der Bremsweg eines Zuges beträgt nach auslösen der Bremsung geschwindigkeitsabhängig mehrere hundert Meter. Aus den genannten Gründen kann ein Unfall infolge eines im Gleisbett liegenden Trümmerteils nicht ausgeschlossen werden und muss im Rahmen der Risikobeurteilung betrachtet werden.

Aufgrund der nicht in jedem Fall gewährleisteten Warnung bzw. eines sichergestellten frühzeitigen Stopps des Zuges bei einem Trümmerteil im Gleisbett oder der Beschädigung der Oberleitung, werden analog zum Rotorblattbruch im folgenden zwei Grenzszenarien für die Gefährdung durch Turmversagen betrachtet. Erstens der Worst-

Case-Fall, dass jeder mögliche Treffer der Bahntrasse einen Unfall zur Folge hat und zweitens, dass nur die direkten Treffer eines fahrenden Zugs zu einem Unfall führen. Daraus ergeben sich für die Gefährdung des Bahnverkehrs die Eintrittshäufigkeiten eines möglichen Sachschadens. Für die Ermittlung des Individualrisikos wird zusätzlich zu den ermittelten Trefferhäufigkeiten die im Kapitel 3.3 hergeleitete Mortalitätsrate berücksichtigt.

Für das erste Szenario (Worst-Case-Fall) ergibt sich für die Trefferhäufigkeit der geplanten Bahntrasse der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{RJ} \cdot h_{TRj},$$

$$H_T = \sum_j H_{Tj} \text{ mit}$$

H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr
(Ergebnis der Simulation).

H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.

h_{RJ} : Häufigkeit Turmversagen pro WEA und Jahr, $h_{RJ} = 1,0E-04/a$
(Kapitel 4.3.1).

h_{TRj} : Trefferhäufigkeit der Bahnstrecke: Diese ergibt sich aus den ermittelten Treffern der Bahnstrecke geteilt durch die Anzahl der Simulationsläufe. Zusätzlich wurde die Trefferwahrscheinlichkeit der einzelnen Treffer geometrisch auf Basis des Abstandes zur Bahnstrecke ermittelt.

Für das zweite Szenario ergibt sich für die Trefferhäufigkeit des Bahnverkehrs der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{RJ} \cdot h_{TRj} \cdot h_{aVT} \cdot P_{RA} \cdot P_{Aj},$$

$$H_T = \sum_j H_{Tj} \text{ mit}$$

H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr
(Ergebnis der Simulation).

H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.

h_{RJ} : Häufigkeit Turmversagen pro WEA und Jahr, $h_{RJ} = 1,0E-04/a$
(Kapitel 4.3.1).

h_{TRj} : Trefferhäufigkeit der Bahnstrecke: Diese ergibt sich aus den ermittelten Treffern der Bahnstrecke geteilt durch die Anzahl der Simulationsläufe. Zusätzlich wurde die Trefferwahrscheinlichkeit der einzelnen Treffer geometrisch auf Basis des Abstandes zur Bahnstrecke ermittelt.

h_{aVT} : Verkehrsdichte (Bahnverkehr): Für die Verkehrsdichte werden gemäß /6/ 38 Züge pro Tag angesetzt.

P_{RA} : Wahrscheinlichkeit, an einem Turmversagen-Ereignis anwesend zu sein.

P_{Aj} : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während des Aufenthalts eines Zuges im gefährdeten Bereich eintritt (Mittlere Geschwindigkeit des Zugverkehrs v_F /6/, Länge des gefährdeten Streckenabschnittes l_j aus Abbildung 10), $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergeben sich die in Tabelle 10 aufgeführte Trefferhäufigkeiten pro Jahr. Für die Ermittlung der Individualrisiken wird die im Kapitel 3.3 hergeleitete mögliche Schadensfolge für Personenschäden angesetzt. Es ergeben sich die in Tabelle 11 dargestellten Individualrisiken pro Person und Jahr.

WEA	Szenario	Trefferhäufigkeit [Treffer/a]
04	Worst Case	9,0E-12
04	Direkter Zugtreffer	2,7E-14

Tabelle 10: Trefferhäufigkeiten Bahnverkehr pro Jahr (Sachschäden) bei Turmversagen.

WEA	Szenario	Individualrisiko [Treffer/(Person*a)]
04	Worst Case	3,2E-12
04	Direkter Zugtreffer	9,4E-15

Tabelle 11: Individualrisiko Bahnverkehr, bei Turmversagen.

Beispielhaft erfolgt bei einem Individualrisiko von 3,2E-12 Treffer/(Person*a) im Mittel alle 3,1E+12 Jahre ein lebensbedrohlicher Treffer durch Turmversagen. Eine Aussage, zu welchem Zeitpunkt sich ein Treffer ereignet, lässt sich hieraus nicht ableiten.

5 Modell- und Datenunsicherheiten

Um den Aufwand der Analyse zu begrenzen, wurden vereinfachte Annahmen und Randbedingungen getroffen. Sämtliche Vereinfachungen sind dabei stets konservativ gewählt worden.

Generell können Modellrechnungen die Realität nur annähernd erfassen und sind daher nur als Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung zu verwenden. Die ermittelten Ergebnisse gelten nur unter den genannten Randbedingungen. Es ist davon auszugehen, dass eine Abgrenzung der Gefährdungsbereiche im Ereignisfall in der Realität nicht so scharf ist, wie in den Ergebnissen dargestellt. Insofern sind die dargestellten Ergebnisse als ungefähre Darstellung zu verstehen und dienen der Orientierung.

6 Zusammenfassung und Risikobewertung

Am Standort Elbe-Haverlah in Niedersachsen plant der Auftraggeber, die Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG, die Errichtung von sechs WEA des Typs Vestas V162 mit 166,0m NH und 162,0m D. In der Nähe der geplanten WEA verlaufen eine Bahnstrecke und die Kreisstraße K47.

Im Rahmen der gutachtlichen Stellungnahme galt es zu prüfen und zu bewerten, ob eine besondere Gefährdung von Verkehrsteilnehmern der Bahnstrecke oder der Kreisstraße K47 durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch oder Turmversagen vorliegt.

Zusammenfassend wurden die folgenden Ergebnisse und daraus resultierenden Empfehlungen ermittelt:

Auf Basis der TÜV NORD zur Verfügung gestellten Unterlagen zur Eiserkennung und zur Verhinderung von Eisabwurf (Kapitel 4.1.2) von drehenden Rotoren kommt TÜV NORD zu dem Ergebnis, dass das Ereignis Eisabwurf für die hier betrachteten WEA nicht anzunehmen ist. Mit der Prüfung in /7/ und /8/ wurde für die Wirksamkeit des geplanten Eiserkennungssystems der aktuelle Stand der Technik bestätigt. Hierbei ist zu beachten, dass die Eiserkennung wie in /7/ und /8/ in den geplanten WEA-Typ Vestas V162 integriert wird. Dies sollte im Rahmen der Genehmigung und der Inbetriebnahme der geplanten WEA geprüft und Nachweis hierzu erbracht werden.

Auf Basis der ermittelten Gefährdung durch Eisabfall ist zu erkennen, dass die landwirtschaftlichen Wirtschaftswege in der näheren Umgebung der geplanten WEA durch Eisabfall betroffen sind. Eine direkte Gefährdung des Bahnverkehrs und von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K47 durch Eisabfall ist nicht zu unterstellen.

Für die landwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen und Wirtschaftswege ist eine Gefährdung durch Eisabfall nicht anzunehmen, da die Wintermonate außerhalb der üblichen Wirtschaftsperiode liegen und im Winter mit weniger landwirtschaftlichem Verkehr zu rechnen ist. Sollten dennoch Arbeiten außerhalb der üblichen Wirtschaftsperiode im Winter durchgeführt werden, so werden diese normalerweise in überdachten Maschinen ausgeführt, welche einen Schutz gegen möglichen Eisabfall bieten. Die Fahrer landwirtschaftlicher Maschinen sind in ihrem Führerhaus gegen mögliche herabfallende Eisobjekte geschützt. Sie haben über sich ein festes Dach und vor sich eine senkrechte Scheibe. Ein von oben herabstürzendes Eisobjekt könnte demnach auf das Dach fallen. TÜV NORD sind bisher keine Berichte bekannt, wonach ein herabfallendes Eisobjekt ein festes Fahrzeugdach durchschlagen hat.

Auf Basis der ermittelten Gefährdung durch Rotorblattbruch und Turmversagen zeigt sich, dass die Kreisstraße K47 durch Rotorblattbruch betroffen ist und dass die Bahntrasse und die landwirtschaftlichen Wirtschaftswege in der näheren Umgebung der geplanten WEA durch Rotorblattbruch und Turmversagen betroffen sind.

Für die landwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen und Wirtschaftswege (inkl. Zufahrten der geplanten WEA) ist eine Gefährdung durch Rotorblattbruch und Turmversagen nicht anzunehmen, da die flächenbezogene Nutzungshäufigkeit durch Personen als gering anzusehen ist.

Für die Bewertung der Gefährdung im Straßenverkehr ist zum einen das Risiko von Einzelpersonen (Individualrisiko) und zum anderen das Gruppenrisiko (Kollektivrisiko) zu betrachten. Durch den Vergleich der ermittelten Ergebnisse für die Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K47 durch Rotorblattbruch mit den in Kapitel 3 hergeleiteten Risikogrenzwerten zeigt sich, dass:

- das ermittelte Individualrisiko unterhalb des hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs (siehe Kapitel 3.1) liegt.
- das ermittelte Kollektivrisiko unterhalb des hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs (siehe Kapitel 3.2) liegt.

Wie in den Kapiteln 4.3.6 und 4.4.2 dargestellt ist der genaue Schadensverlauf infolge eines Rotorblattbruchs oder Turmversagens für den Bahnverkehr nicht vorherzusagen. Daher wurden für die Bewertung der Personengefährdung zwei Grenzszenarien untersucht. Erstens der Worst Case (Szenario 1), dass jeder mögliche Treffer der Bahntrasse einen Zugunfall zur Folge hat und zweitens, dass nur die direkten Treffer eines fahrenden Zugs zu einem Unfall mit Personenschaden führen (Szenario 2). Hierbei wurden die angesetzten Randbedingungen konservativ gewählt, sodass davon ausgegangen werden kann, dass das tatsächliche Risiko zwischen oder unterhalb der beiden definierten Grenzszenarien liegt. Das Gesamtrisiko für die Bahntrasse ergibt sich durch Addieren der Risiken durch Rotorblattbruch und Turmversagen der jeweils betroffenen WEA. Daraus ergeben sich für die Bahntrasse die in Tabelle 12 dargestellten Trefferhäufigkeiten pro Jahr sowie die in Tabelle 13 dargestellten Individualrisiken.

Szenario	Trefferhäufigkeit [Treffer/a]	Treffer im Mittel [a]
1 (Worst Case)	1,1E-05	ca. alle 36.000
2 (direkter Zugtreffer)	9,5E-08	ca. alle 1.490.000

Tabelle 12: Trefferhäufigkeiten Bahnverkehr pro Jahr (Sachschäden), bei Rotorblattbruch.

Szenario	Individualrisiko [Treffer/(Person*a)]	Treffer im Mittel [a]
1 (Worst Case)	3,8E-06	ca. alle 100.000
2 (direkter Zugtreffer)	3,3E-08	ca. alle 4.170.000

Tabelle 13: Individualrisiko Bahnverkehr, bei Rotorblattbruch.

Der Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Szenarien für die mögliche Personen-gefährdung (Individualrisiko) mit dem in Kapitel 3.3 hergeleiteten Risikogrenzwertbereich für das Individualrisiko zeigt, dass das untersuchte Szenario 1 innerhalb des hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs liegt, sowie, dass das Szenario 2 unterhalb des Risikogrenzwertbereichs liegt. Für die weitere Bewertung der Gefährdung des Bahnverkehrs ist der Vergleich bzw. die Einordnung der beiden untersuchten Szenarien entscheidend. Für das Szenario 2 werden alle direkten möglichen Zugtreffer als ein Schadensereignis mit schwerem Personenschaden (Individualrisiko) gewertet und als untere Grenze des Risikos für den Bahnverkehr herangezogen. Für die obere Grenze wird das Szenario 1 berücksichtigt bei welchem jeder mögliche Treffer der Bahntrasse als ein Schadensereignis mit schwerem Personenschaden (Individualrisiko) berücksichtigt wird. Diese Annahme ist als sehr konservativ einzuschätzen, weil in der Realität nicht jeder Treffer der Bahntrasse zu einem Schadensereignis mit Personenschaden führen wird:

- Ein Trümmerteil auf der Bahntrasse kann durch den Zugführer rechtzeitig gesichtet werden, sodass der Zug mit einer Notbremsung vor einem Zusammenstoß zum Halten kommt.
- Der Zusammenstoß eines Zuges mit einem Trümmerteil auf der Bahntrasse wird nicht in jedem Fall zu einem Entgleisen des Zuges und einem Schadensereignis mit Personenschaden führen.

Unter Berücksichtigung der oben genannten konservativen Annahmen für das Szenario 1 kann für die Bewertung des Bahnverkehrs durch einen möglichen Rotorblattbruch oder Turmversagen festgestellt werden, dass das tatsächliche Risiko deutlich unterhalb des ermittelten Wertes liegt. Die genaue Reduktion kann im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme nicht direkt quantifiziert werden und wird qualitativ berücksichtigt. Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Situationen wird als Mittel der beiden untersuchten Szenarien ein Individualrisiko von $3,5E-07$ Treffern pro Person und Jahr angenommen. Das Risiko des Bahnverkehrs durch Rotorblattbruch und Turmversagen liegt somit unterhalb des ermittelten Risikogrenzwertbereichs.

Weitere risikoreduzierende Maßnahmen

Unter Berücksichtigung des Eiserkennungssystems (siehe Kapitel 4.1.2) sowie der Ergebnisse aus Kapitel 3.3 empfiehlt TÜV NORD die folgenden üblichen Maßnahmen zur weiteren Minderung des Restrisikos:

- Die Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems der WEA sollte im Rahmen der Inbetriebnahme /26/, /24/ durch eine befähigte Person geprüft und dokumentiert werden. Betriebsbegleitend ist die Funktionalität des Eiserkennungssystems im Rahmen der vorgesehenen Prüfungen des Sicherheitssystems und der sicherheitstechnisch relevanten Komponenten der WEA /26/, /24/ durch eine befähigte Person aufzuzeigen. Für die Inbetriebnahme des Eiserkennungssystems sollte die Anlernphase des Eiserkennungssystems berücksichtigt werden. Ist die Anlernphase nicht vor den winterlichen Vereisungsereignissen abgeschlossen, so sind geeignete Maßnahmen zur Vermeidung eines Eisabwurfs vorzusehen.

- Durch Hinweisschilder (mind. im Abstand der 1,1-fachen Gesamthöhe der WEA) ist an den Zufahrtswegen der WEA und den umliegenden Wirtschaftswe-
gen auf die Gefährdung durch Eisabfall aufmerksam zu machen. Die Schilder
sind so aufzustellen, dass sie von möglichen Benutzern der Wirtschaftswege
frühzeitig erkannt werden. Hierbei können die Schilder durch ein eindeutiges
Piktogramm ergänzt werden, welches auf die Gefährdung durch Eisabfall hin-
weist.

Unter Berücksichtigung der Tatsache,

- dass die Risikobeurteilung konservativ durchgeführt wurde,
- dass in der Realität nicht jeder Treffer zu einem lebensbedrohlichen Unfall füh-
ren wird (dies betrifft die Geschwindigkeit und das Gewicht der Eisobjekte, die
Trefferfläche sowie die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs zum Zeitpunkt des
Treffers des Eisobjekts),
- dass in der Realität nicht jedes große Trümmerteil auf der Bahntrasse zu einem
entgleisen des Zuges führt und
- dass darauf Aufbauend nicht jede Zugentgleisung oder jeder direkte Treffer der
Bahn einen schlimmen Unfall vergleichbar mit Eschede zur Folge haben wird.
- dass sich die abgeschalteten, vereisten WEA prinzipiell nicht von anderen Bau-
werken mit Eisansatz unterscheiden,
- dass die öffentlich zugänglichen Wege (Wirtschaftswege) in unmittelbarer Nähe
der WEA gemäß /5/ hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt werden und im
Winter, außerhalb der Wirtschaftsperiode, von einer eher geringen Frequentie-
rung ausgegangen werden kann,
- dass davon auszugehen ist, dass der landwirtschaftliche Verkehr überwiegend
mit geschützten Maschinen oder Fahrzeugen erfolgt (landwirtschaftlicher Ver-
kehr ist im Winter außerhalb der Wirtschaftsperiode als eher gering anzusehen),
- dass Warnhinweise zur Warnung vor akuter Eisabfallgefahr an allen möglichen
Zugängen zum Windpark aufgestellt werden sollen und hierüber die Möglichkeit
zur Gefahrenvermeidung gegeben ist,

ist das nach Umsetzung obiger Maßnahmen zur Eiserkennung bzw. Abschaltung bei
Eisansatz und Risikominderung verbleibende Restrisiko für die Bahntrasse und die
Kreisstraße K47 als akzeptabel zu betrachten.

Unter Berücksichtigung

- der mit der Liste der Technischen Baubestimmungen des Bundeslandes Nie-
dersachsen /25/ eingeführten technischen Regeln Anlage A 1.2.8/6: „Gefahr
des Eisabwurfs bei Unterschreitung eines Abstands von $1,5 \times (\text{Rotordurchmes-
ser} + \text{Nabenhöhe})$ “ sowie in Anlehnung an
- das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /27/ §5 Abs. 1 Nr. 1: „Vermei-
dung sonstiger Gefahren“

ist eine signifikante Gefährdung des Bahnverkehrs oder von Verkehrsteilnehmern auf
der Kreisstraße K47 durch die Errichtung der geplanten WEA am Standort Elbe-

Haverlah durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen nach Umsetzung der genannten Maßnahmen zur Risikominderung nicht anzunehmen.

Generelle Maßnahmen zur Reduzierung des Restrisikos durch Rotorblattbruch und Turmversagen

Aufgrund der möglichen Schadensschwere durch Rotorblattbruch und Turmversagen empfiehlt TÜV NORD auf die folgenden im Betrieb üblichen Maßnahmen zum Umgang mit dem verbleibenden Restrisiko besonders zu achten:

- Regelmäßige Wiederkehrende Prüfung (WKP) des Sicherheitssystems und des Bremssystems gemäß /26/, /24/ sowie den Grundsätzen des Bundesverband Windenergie (BWE) /45/, /46/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /44/.
- Regelmäßige WKP der Rotorblätter und der Standsicherheit des Turms (mind. Sichtprüfung) gemäß /26/, /24/ sowie den Grundsätzen des BWE /45/, /46/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /44/. Im Rahmen der Prüfung der Standsicherheit sind unter anderem der Übergang zwischen Fundament und Turmfuß, das Fundament auf Setzung und die Vorspannkräfte der Schraubverbindung zwischen dem Fundament und dem unteren Turmsegment zu prüfen. Zusätzlich sollten die vorgegebenen Austauschzyklen sicherheitsrelevanter Komponenten beachtet werden. Hierbei sind unter anderem die vorgegebenen Gewährleistungen z.B. der Schraubgarnituren zu beachten.
- Prüfung von organisatorischen Maßnahmen, wie ein detaillierter Alarmplan, der im Falle eines drohenden oder eingetretenen Rotorblattschadens bzw. Turmversagens die Abschaltung der WEA sowie eine Benachrichtigung der Alarmierungsstellen und weitere Schadensbegrenzung regelt.

7 Rechtsbelehrung

Die vorliegende gutachtliche Stellungnahme ist nur in ihrer Gesamtheit gültig. Die darin getroffenen Aussagen beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden übermittelten Dokumente.

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG leistet keine Gewähr für die Erfüllung von Vorhersagen. Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit der vom Auftraggeber übermittelten Informationen und Angaben und für durch unrichtige Angaben bedingte falsche Aussagen.

Die von TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG erbrachten Leistungen (z.B. Gutachten-, Prüf- und Beratungsleistungen) dürfen nur im Rahmen des vertraglich vereinbarten Zwecks verwendet werden. Vorbehaltlich abweichender Vereinbarungen im Einzelfall, räumt TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG dem Auftraggeber an seinen urheberrechtsfähigen Leistungen jeweils ein einfaches, nicht übertragbares sowie zeitlich und räumlich auf den Vertragszweck beschränktes Nutzungsrecht ein. Weitere Rechte werden ausdrücklich nicht eingeräumt, insbesondere ist der Auftraggeber nicht berechtigt, die Leistungen des Auftragnehmers zu bearbeiten, zu verändern oder nur auszugsweise zu nutzen.

Eine Veröffentlichung der Leistungen über den Rahmen des vertraglich vereinbarten Zwecks hinaus, auch auszugsweise, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung von TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Eine Bezugnahme auf TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG ist nur bei Verwendung der Leistung in Gänze und unverändert zulässig.

Bei einem Verstoß gegen die vorstehenden Bedingungen ist TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG jederzeit berechtigt, dem Auftraggeber die weitere Nutzung der Leistungen zu untersagen.

8 Formelzeichen und Abkürzungen

A	Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung	[m/s]
a	Jahr	[a]
ALARP	As Low As Reasonably Practicable	
BDB	Betreiber-Datenbasis	
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	
BWE	Bundesverband Windenergie	
D	Rotordurchmesser	[m]
h	Stunde	[h]
k	Formparameter der Weibull-Verteilung	[-]
LKW	Lastkraftwagen	
MEM	Minimale endogene Sterblichkeit	
min	Minute	[min]
NH	Nabenhöhe	[m]
P_{Nenn}	Nennleistung	[MW]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]
WEA	Windenergieanlage(n)	
WKP	Wiederkehrende Prüfung	

9 Literatur- und Quellenangaben

- /1/ Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG. Angaben zu den WEA-Spezifikationen. Übermittelt durch Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 16.07.2019.
- /2/ Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG. Lageplan: WP Elbe-Haverlah, Stand: 16.07.19. Übermittelt durch Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 16.07.2019.
- /3/ Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG. Angaben zu den meteorologischen Daten: PARK - Analyse der Windverhältnisse, Stand: 22.07.19. Übermittelt durch Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 14.08.2019.
- /4/ Vestas Central Europe A/S. Allgemeine Spezifikation Vestas Eiserkennung (VID) V105/V112/V117/V126/V136-3.45/3.6 MW 50/60 Hz V117/V136/V150 – 4.0/4.2MW 50/60 Hz, V150/V162 – 5.6MW 50/60Hz, Dokumentennr.: 0051-2750 V07. Stand 17 Januar 2019. Übermittelt durch Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 14.08.2019
- /5/ Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG. Beschreibung der Schutzobjekte und Angaben zu den Nutzungshäufigkeiten. Übermittelt durch Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG mit E-Mails vom 16.07.2019, 14.08.2019 und 28.08.2019.
- /6/ Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG. Informationen zur Bahntrasse (Zugdaten, Streckenfrequentierung, Personenzahl). Übermittelt durch Ebert Erneuerbare Energien Projekt GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 28.08.2019.
- /7/ DNV GL – Energy Renewables Certification Gutachten Ice Detection System, BLADEcontrol Ice Detector BID, Report-Nr.: 75138, Rev. 6, Stand 15.11.2018.
- /8/ DNV GL – Energy Renewables Certification Gutachten Ice Detection System – Integration des BLADEcontrol Ice Detector BID in die Steuerung von Vestas Windenergieanlagen, Report Nr.: 75172, Rev. 3 Stand: 19.03.2018.
- /9/ DNV-GL – Renewables Certification. Typenzertifikat: Eisdetektorsystem BLADEcontrol Ice Detector (BID). TC-DNVGL-SE-0439-04314-0, Hamburg. 2018.
- /10/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.
- /11/ Tammelin, B. et al. Wind Energy in Cold Climate, Final Report WECO (JOR3-CT95-0014), ISBN 951-679-518-6. Finnish Meteorological Institute. Helsinki, Finland. 2000.
- /12/ Lautenschlager, F. Studie zum Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ereignis Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik. Hamburg 2012.

- /13/ Storck, F. Influence of wind conditions under icing conditions on the result of a risk assessment. Winterwind international wind energy conference. Piteå 2015.
- /14/ Deutscher Wetterdienst. Freie Klimadaten, Eistage Deutschland 1981-2010 (Rasterdaten). www.dwd.de, Juni 2017.
- /15/ Wichura, B. (DWD). The Spatial Distribution of Icing in Germany Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurements of Icings, IWAIS 2013.
- /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/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.
- /19/ Cattin, R. et al. Four years of monitoring a wind turbine under icing conditions, IWAIS 2009, 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Bern. 2009.
- /20/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1; Wind turbines - Part 1: Design requirements; Third Edition; August 2005 + Amendment 1: Oktober 2010.
- /21/ VTT Technical Research Centre of Finland. State-of-the-art of wind energy in cold climates. VTT WORKING PAPERS 152. ISBN 978-951-38-7493-3. 2010.
- /22/ COST-727. Atmospheric Icing on Structures. Measurements and data collection on icing: State of the Art Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp. Zürich. 2006.
- /23/ DIN 1055-5. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten. Berlin. Juli 2005.
- /24/ DIBt. Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Berlin. Fassung Oktober 2012.
- /25/ Niedersächsisches Ministerium für Soziales, Gesundheit und Gleichstellung. Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (VV TB) – Fassung Januar 2019.
- /26/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Hamburg. Ausgabe 2010.
- /27/ BImSchG 2017. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Deutschland. Fassung vom 29.05.2017.
- /28/ Jarass, H. D. 2012. Bundes-Immissionsschutzgesetz: BImSchG, Kommentarunter Berücksichtigung der Bundes-Immissionsschutzverordnungen, der TA Luft sowie der TA Lärm. Verlag C.H. Beck, München, 2012.

- /29/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG. Statistische Auswertung von Pressemeldungen über Havarien von Windenergieanlagen im Zeitraum 1997 bis 2016 (Internetrecherche). Hamburg. 2017.
- /30/ Keiler, J. Betreiber-Datenbasis (BDB). Daten der Jahrgänge 2000 bis 2011. Rade. 2011.
- /31/ Rademakers, L. et al. Handboek Risicozonering Windturbines. Versie 2, jan2005. SenterNovem, Nederland. 2005.
- /32/ DEWI, Deutsches Windenergie-Institut, DEWI GmbH. www.dewi.de. 2013.
- /33/ osthessen-news.de. Versagte das Bremssystem? Ursachenforschung nach Windrad-Crash. Kirtorf. Meldung vom 20.06.2011.
- /34/ rundschau-online.de. Windrad stürzt auf Acker. Meldung vom 16.12.2013.
- /35/ DIN EN 50126. Bahnanwendungen. Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS). März 2000.
- /36/ GBE. Heft 52 – Sterblichkeit, Todesursachen und regionale Unterschiede. Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE). 2013.
- /37/ D STATIS. Verkehr, Verkehrsunfälle, Zeitreihen. Statistisches Bundesamt. 2019.
- /38/ Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). <http://www.gesetze-im-internet.de>. Gelesen am 10.12.2018. Stand 2017.
- /39/ Trbojevic V.M. 2005. Risk Criteria in EU. ESREL'05, Poland, 27.-30. Juni 2005.
- /40/ Störfall-Kommission. 2004. Bericht, Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung. SFK-GS-41.
- /41/ Hauptmanns, U. & Marx, M. Kriterien für die Beurteilung von Gefährdungen durch technische Anlagen. Verlag VdTÜV - Band 18. Berlin. November 2010.
- /42/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.
- /43/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.
- /44/ Bundesverband WindEnergie e.V. Anforderungen an den Sachverständigen für Windenergieanlagen. Berlin. 21.09.2007.
- /45/ Bundesverband WindEnergie e.V. Grundsätze für die Wiederkehrende Prüfung von Windenergieanlagen. Berlin 2012.
- /46/ Bundesverband WindEnergie e.V. Grundsätze für die die Prüfung zur zustandsorientierten Instandhaltung von Windenergieanlagen. Osnabrück. 21.09.2007.
- /47/ IEA Wind TCP Task 19. International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments. Revision 0, Oktober 2018.