

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

Erstellt im Auftrag für

WKN GmbH

Husum

Revision 0

Hamburg, 07.05.2019

Revision	Datum	Änderung
0	07.05.2019	Erste Ausgabe

Gegenstand: Risikobeurteilung am Windenergieanlagen-Standort
Parum-Dümmer

Referenz-Nr.: 2019-WND-RB-063-R0

Auftraggeber: WKN GmbH
Otto-Hahn-Straße 12 - 16
25813 Husum

Anlagenhersteller: GE Wind Energy GmbH
Holsterfeld 16
48499 Salzbergen

WEA-Typ:	P_{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]
GE 5.5-158	5,5	158,0	161,0

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 Windverteilung 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 /6/.

Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:

Verfasser	B.Sc. F. Lautenschlager Sachverständiger	Hamburg, 07.05.2019
Geprüft durch	Dr. M. Polster Sachverständige	Hamburg, 07.05.2019

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

1	Aufgabenstellung	6
2	Angaben zum Windenergieanlagenstandort	8
3	Bewertungsmaßstab	9
3.1	<i>Individualrisiko</i>	9
3.2	<i>Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko)</i>	10
4	Risikoanalyse	11
4.1	<i>Eisabwurf und Eisabfall</i>	11
4.1.1	Vereisungspotential.....	12
4.1.2	Automatische Eisabschaltung	13
4.1.3	Randbedingungen.....	15
4.1.4	Gefährdungsradius.....	16
4.2	<i>Detailanalyse Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K26</i>	18
4.2.1	Randbedingungen.....	18
4.2.2	Trefferhäufigkeiten	19
4.2.3	Individualrisiko.....	21
4.2.4	Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	22
4.3	<i>Rotorblattbruch</i>	23
4.3.1	Generische Ereignishäufigkeiten.....	23
4.3.2	Randbedingungen.....	23
4.3.3	Trefferhäufigkeiten	24
4.3.4	Individualrisiko.....	26
4.3.5	Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	27
4.4	<i>Turmversagen</i>	28
4.4.1	Generische Ereignishäufigkeiten.....	30
4.4.2	Individualrisiko.....	30
4.4.3	Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	32
5	Modell- und Datenunsicherheiten	33
6	Zusammenfassung und Risikobewertung	34
7	Rechtsbelehrung	38
8	Formelzeichen und Abkürzungen	39

9 Literatur- und Quellenangaben.....40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan /2/.....	8
Abbildung 2: Fallweiten bei 21,5m/s Windgeschwindigkeit.....	17
Abbildung 3: Gefährdungsradius – rot gestrichelt ($v = 21,5\text{m/s}$).....	18
Abbildung 4: Auftreffpunkte bei Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.....	19
Abbildung 5: Trefferhäufigkeiten [$1/\text{m}^2$] pro Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.....	20
Abbildung 6: Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt...	24
Abbildung 7: Trefferhäufigkeiten [$1/\text{m}^2$] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.....	25
Abbildung 8: Gefährdungsradien (rot gestrichelt) bei Turmversagen: innen – Gondel, außen – Gesamthöhe.....	29
Abbildung 9: Gefährdungsbereiche (rot) bei Turmversagen (schwarzer Balken).....	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung.....	13
Tabelle 2: Idealierte Eisobjekte.....	16
Tabelle 3: Ermittelten maximale Fallweiten.....	16
Tabelle 4: Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Eisabfall), *alles außerhalb der Zone 4.....	20
Tabelle 5: Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko bei Eisabfall.....	21
Tabelle 6: Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Eisabfall.....	22
Tabelle 7: Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Rotorblattbruch). *alles außerhalb der Zone 4.....	25
Tabelle 8: Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Rotorblattbruch.....	27
Tabelle 9: Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Rotorblattbruch.....	28
Tabelle 10: Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Turmversagen.....	32
Tabelle 11: Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Turmversagen.....	33
Tabelle 12: Gesamtgefährdung Individualrisiko durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen.....	35
Tabelle 13: Gesamtgefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen.....	35

1 Aufgabenstellung

Am Standort Parum-Dümmer in Mecklenburg-Vorpommern plant der Auftraggeber, die WKN GmbH, die Errichtung von vier Windenergieanlagen (WEA) des Typs GE 5.5-158 mit 161,0m Nabhöhe (NH) und 158,0m Rotordurchmesser (D). In der Nähe der geplanten WEA befindet sich die Kreisstraße K26.

Gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /26/ §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, Turmversagen) sind im Sinne des BImSchG als „sonstige Gefahr“ zu betrachten (siehe auch /27/), 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 Mecklenburg-Vorpommern 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 /22/ 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 WKN GmbH mit Schreiben vom 19.03.2019 mit der Erstellung einer Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen beauftragt worden. Die folgende Vorgehensweise ist Gegenstand der Beauftragung:

Erstellung der gutachtlichen Stellungnahme zur Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen am Windenergieanlagen-Standort Parum-Dümmer (vier WEA):

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 GE 5.5-158.
4. Ermittlung und Darstellung der möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K26 und den umliegenden Wirtschaftswege durch herabfallende Eisobjekte, Rotorblattbruch und Turmversagen von WEA des Typs GE 5.5-158 am Windenergieanlagen-Standort

5. Risikobewertung zur Einordnung der Ergebnisse (Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K26 sowie den umliegenden Wirtschaftswegen).

Eine weitere Analyse des möglichen Schadensverlaufs durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen (z.B. Gebäudeschäden, Fahrzeugschäden, Ausbreitungsrechnungen für Gefahrstoffe) erfolgt nicht im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme. Die Risikobeurteilung erfolgt auf Grundlage der eingereichten Unterlagen. Es wurde ausschließlich die Gefährdung für Verkehrsteilnehmer auf der Kreisstraße K26 und den angrenzenden land- und forstwirtschaftliche genutzten Wirtschaftswegen durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen durch die neu geplanten 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 übermittelten Spezifikationen /1/ berücksichtigt (siehe Seite 2).

2 Angaben zum Windenergieanlagenstandort

Die Lage der geplanten WEA des Typs GE 5.5-158 ist dem Lageplan in Abbildung 1 zu entnehmen.

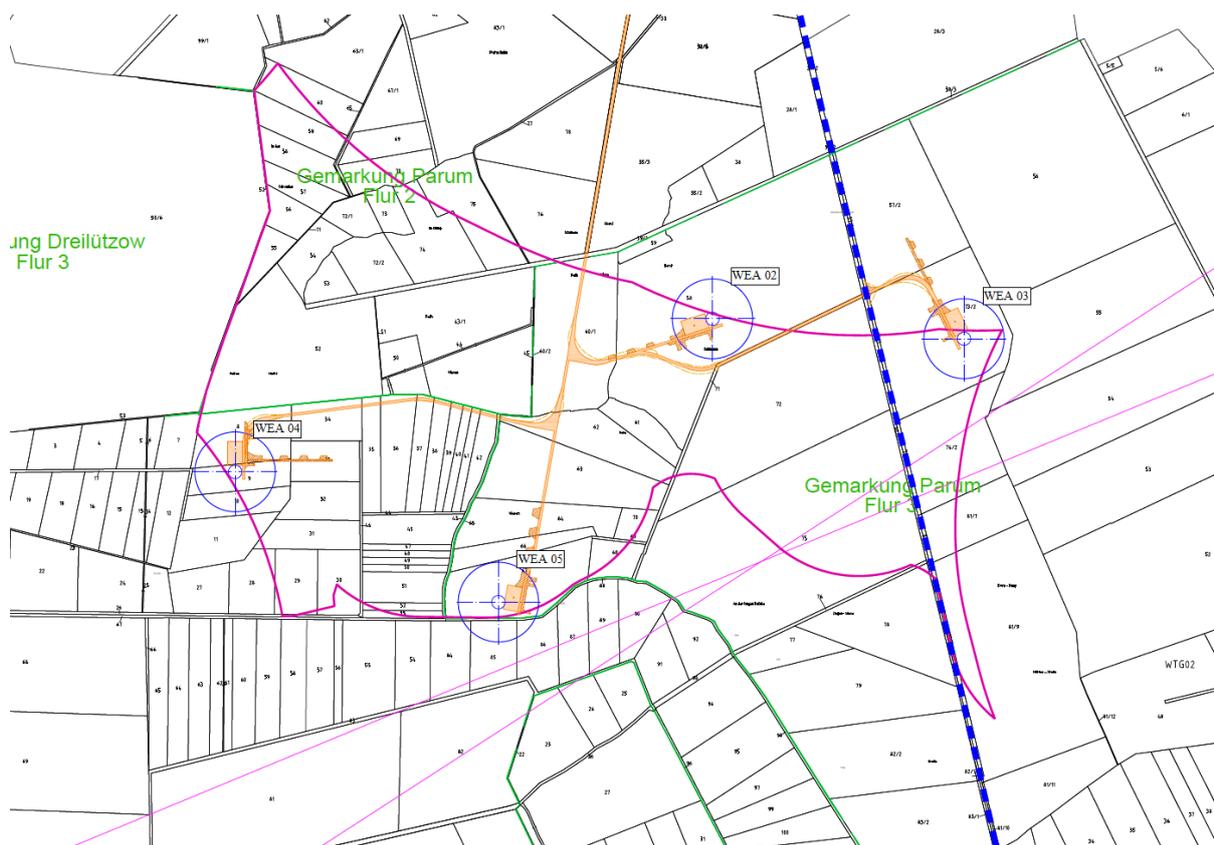


Abbildung 1: Lageplan /2/.

Das umliegende Gelände der geplanten WEA am Standort Parum-Dümmer ist durch land- und forstwirtschaftliche Nutzung geprägt. In der Nähe der geplanten WEA 02 und WEA 03 verläuft die Kreisstraße K26 (siehe Abbildung 1, blau gestrichelte Linie). Der kürzeste Abstand der WEA 03 zur Kreisstraße K26 beträgt ca. 163m. Zusätzlich verlaufen im geplanten Windpark einige hauptsächlich land- und forstwirtschaftlich genutzte Wirtschaftswege, welche zusätzlich als Zufahrten zu den WEA genutzt werden /6/.

Die Angaben zum Standort wurden dem Lageplan /2/ und der Standortbeschreibung /6/ 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) /34/.
- Statistiken der Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE) /35/.
- Statistiken der Verkehrsunfälle des Statistischen Bundesamtes /36/.
- Risk Criteria in EU /38/.
- DIN EN 1990 „Grundlagen der Tragwerksplanung“ /23/.
- Auswertung des VdTÜV /40/.

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) /34/).

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 /36/ beurteilt (siehe Kapitel 3.2).

3.1 Individualrisiko

MEM-Prinzip

Das Prinzip der MEM /34/ beschreibt die gegebene Sterberate pro Person und Jahr unter Berücksichtigung verschiedener Ursachen aus den Bereichen Freizeit, Arbeit und Verkehr. In wirtschaftlich gut entwickelten Ländern ist die endogene Sterblichkeit für die Gruppe der 5- bis 15-jährigen am niedrigsten /34/. Die in /34/ getätigten Angaben decken sich mit aktuellen Erhebungen des GBE /35/. 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 /35/ 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 /40/ 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) /38/ 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 /37/ 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 /36/. 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 /34/). In Anlehnung an die Vorgaben der StVO /37/ 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 /36/. Im Jahr 2017 gab es je 1.000km Straßenlänge

- innerorts 4.126,
- außerorts ohne Autobahnen 445 und
- auf Autobahnen 1.610

Unfälle mit Personenschaden.

Zusätzlich sind in /36/ 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 /38/ 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 Parum-Dümmer 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 /38/ 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.

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 Personen

oder 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 /19/, /20/, /21/.

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 Parum-Dümmer ist gemäß den Eiskarten Europas /12/ und den Vereisungstagen des DWD /13/, /14/ im Mittel mit ca. 11 möglichen Vereisungstagen pro Jahr zu rechnen.

Zusätzlich zur jährlichen Vereisungsperiode (Anzahl der Vereisungsereignisse) ist die Anzahl der Eisabfallereignisse je Vereisung abzuschätzen. Im Rahmen des Schweizer Forschungsprojekts „Alpine Test Site Gütsch“ /16/, /17/, /18/ 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 /18/. Unter Berücksichtigung der in /17/ ausgewiesenen Häufigkeit der Vereisung für den Standort Gütsch 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, setzen wir 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 Gütsch“ 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]	D2 [m2]	Verhältnis	Eisobjekte/Vereisung
ENERCON E-40	44,0	1.936	1,0	ca. 14
GE 5.5-158	158,0	24.964	12,9	181

Tabelle 1: Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung.

4.1.2 Automatische Eisabschaltung

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.

Das geplante Sicherheitskonzept zur Behandlung von Eisabwurf von WEA des Typs GE 5.5-158 /7/ beinhaltet die folgenden Maßnahmen zur Eiserkennung:

- Standardmaßnahmen der WEA: Leistungskurvenverfahren, Schwingungsüberwachung und Überwachung der Schnelllaufzahl
- Zusätzlicher Eissensor: BLADEcontrol der Firma Weidmüller Monitoring Systems GmbH

Zur Eiserkennung kommen standardmäßig ein Leistungs- und Schwingungsüberwachungssystem sowie die Überwachung der Schnelllaufzahl zum Einsatz /7/. Zum einen erfolgt über das Betriebsführungssystem eine Auswertung der Messwerte im Produktionsbetrieb, d.h. es erfolgt ein Abgleich der tatsächlichen Leistung mit der zu erwartenden theoretischen Leistung. Zum anderen werden die durch Unwuchten entstehenden Schwingungen überwacht. Stimmen die Leistungskennwerte nicht mit den Erwartungswerten überein oder wird eine unzulässige Unwucht gemessen, schaltet die WEA automatisch ab. Bei der Überwachung der Schnelllaufzahl wird permanent die Drehzahl der WEA überwacht und mit der in der WEA-Steuerung hinterlegten Sollkurve verglichen. Weichen diese Werte bei Temperaturen im Bereich des Gefrierpunktes zu sehr voneinander ab, so wird auf einen möglichen Eisansatz geschlossen und die WEA gestoppt /7/.

Zusätzlich ist für die Eiserkennung das Eiserkennungssystem BLADEcontrol der Firma Weidmüller Monitoring Systems GmbH geplant /4/, /5/. 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 /8/. Gemäß /8/ 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 /8/.

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 /8/, /5/. Die WEA kann dann automatisch wieder zugeschaltet werden /4/.

Das System wurde nach GL IV-4 „Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines“ zertifiziert /9/. Mit /8/ wurde für die Eiserkennung mittels BLADEcontrol bestätigt, dass das System dem Stand der Technik entspricht und zur Erkennung von Eisansatz geeignet ist. Mit /5/ wurde durch den TÜV NORD die Integration der Signale von BLADEcontrol in die Steuerung der WEA geprüft. Die Prüfung hat ergeben, dass die WEA bei anstehendem Signal „Eisansatz“ sicher abgeschaltet werden. Weiterhin wird die Bereitschaft des Systems überwacht und die WEA wird im Falle eines Ausfalls des Systems bei niedrigen Temperaturen ebenfalls automatisch abgeschaltet. Das Wiederanfahren nach Vereisung wird nach vorheriger

Sichtprüfung sowie unter der Voraussetzung, dass das BLADEcontrol Eiserkennungssystem kritischen Eisansatz zuverlässig erkennt, als ausreichend sicher bewertet /5/. Mit /8/ wurde die Zuverlässigkeit des Eiserkennungssystems bestätigt, somit ist gemäß /5/ das automatische Wiederanfahren ebenfalls als sicher zu bewerten. 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 /8/ auch unter konservativen Annahmen zur Gefahrenabwehr bzgl. Eisabwurf geeignet.

4.1.3 Randbedingungen

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 - 1,8 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 /11/, /12/, /16/. Zudem hat sich in Feldstudien /16/ 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 /16/ 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 cW-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. 240m über Grund wurde mit einer Windgeschwindigkeit von 21,5m/s (maximales 99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung /3/) auf Basis der in Tabelle 2 angegebenen Eisobjekte die maximale Fallweite ermittelt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3 und die entsprechenden Fallkurven in Abbildung 2 dargestellt.

v [m/s]	1 Würfel [m]	2 Quader [m]	3 Quader [m]	4 Platte [m]	5 Platte [m]
21,5	138,3	157,1	182,4	228,8	277,2

Tabelle 3: Ermittelten maximale Fallweiten.

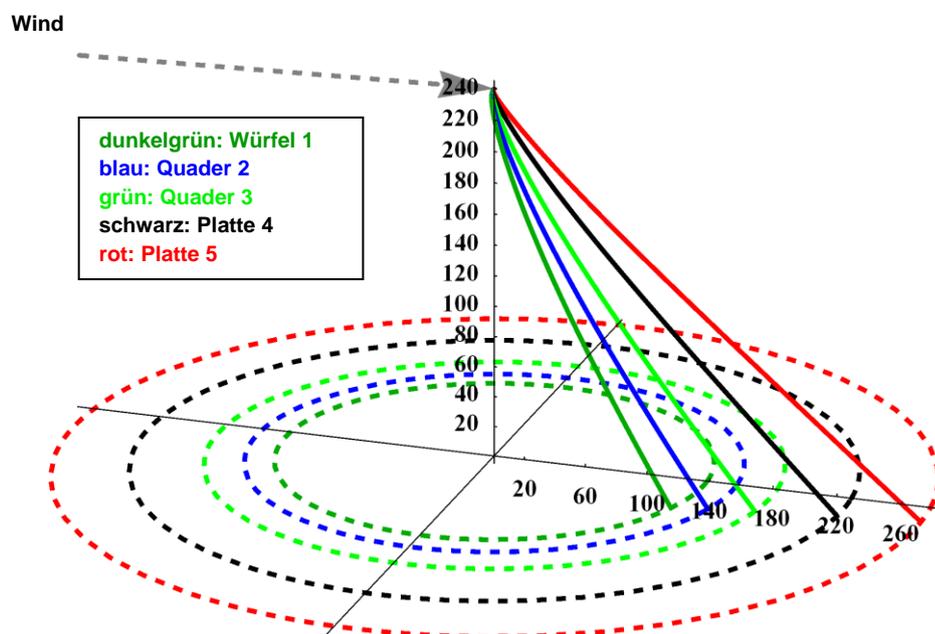


Abbildung 2: Fallweiten bei 21,5m/s Windgeschwindigkeit.

Die ermittelte maximale Fallweite ist der Spalte 6 der Tabelle 3 (Eisobjekt Nr. 5) zu entnehmen. Diese maximale Fallweite ist in der nachfolgenden Abbildung 3 als Gefährdungsradius (rot gestrichelt) um die geplanten WEA dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Abschnitte der Kreisstraße K26 durch den Gefährdungsradius der geplanten WEA 03 überdeckt werden. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass Teile der Wirtschaftswege durch die Gefährdungsradien der geplanten WEA überdeckt werden.

Für die Untersuchung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K26 durch Eisabfall wird im Folgenden eine Detailanalyse und die Simulation des Eisabfalls für die geplanten WEA durchgeführt (siehe Kapitel 4.2). Für die hauptsächlich land- und forstwirtschaftlich genutzten Wirtschaftswege /6/, 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).

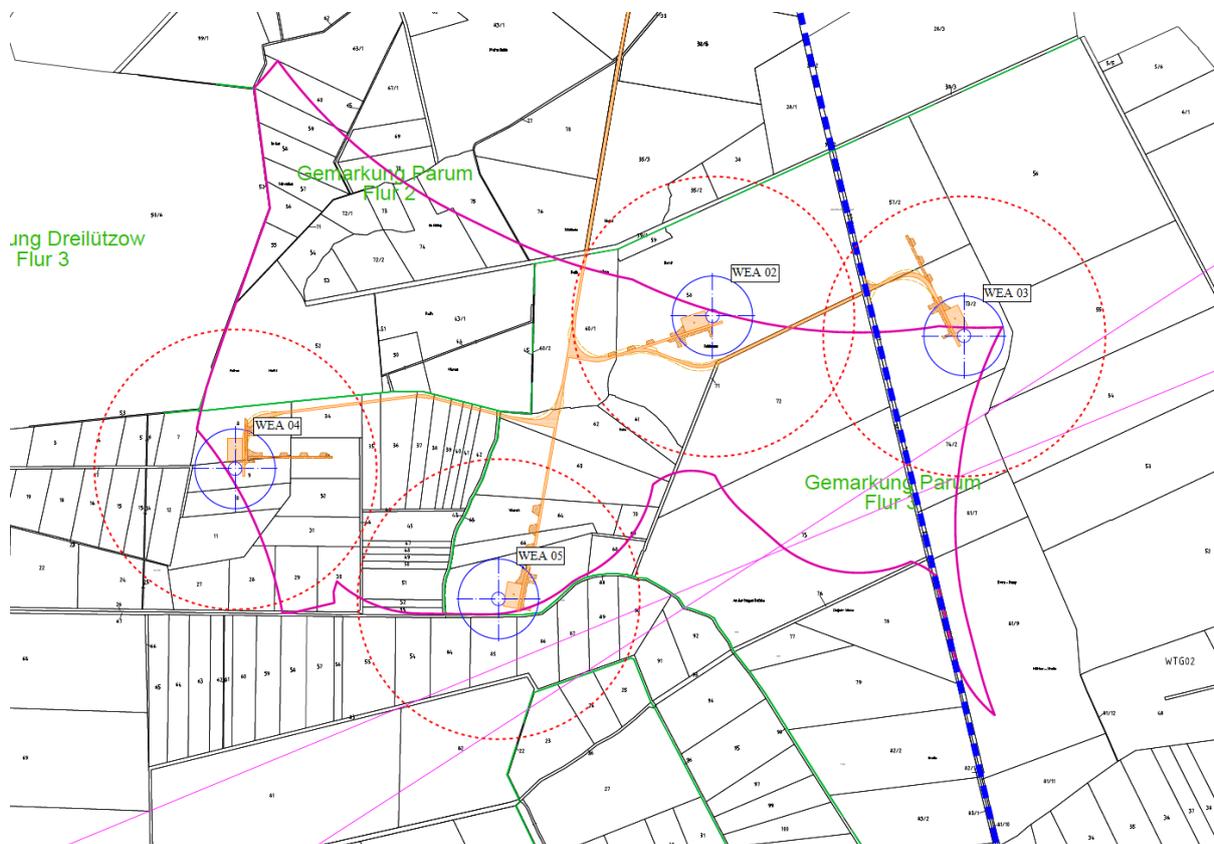


Abbildung 3: Gefährdungsradius – rot gestrichelt ($v = 21,5\text{m/s}$).

4.2 Detailanalyse Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K26

4.2.1 Randbedingungen

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 /41/, /42/: 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: GE 5.5-158 mit 161,0m NH und 158,0m D.
- Drehzahl bei Eisabfall: entspricht dem Trudelbetrieb. In Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird die entsprechende Drehzahl bestimmt (Drehzahlbereich Trudeln 0 - 1,8 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 /15/ 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 Rotationssebene 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 1.991 Eisabfall-Ereignissen pro WEA und Jahr angesetzt (11 Vereisungstage pro Jahr mit je 181 Eisabfall-Ereignissen). In Abbildung 4 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Eisabfall-Ereignissen der jeweiligen WEA dargestellt.



Abbildung 4: Auftreffpunkte bei Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 5 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 2,0E-01
2	Orange	1,0E-05 bis 1,0E-04	2,0E-02 bis 2,0E-01
3	Gelb	1,0E-06 bis 1,0E-05	2,0E-03 bis 2,0E-02
4	Farblos	1,0E-07 bis 1,0E-06	2,0E-04 bis 2,0E-03
5*	Farblos	kleiner 1,0E-07	kleiner 2,0E-04

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

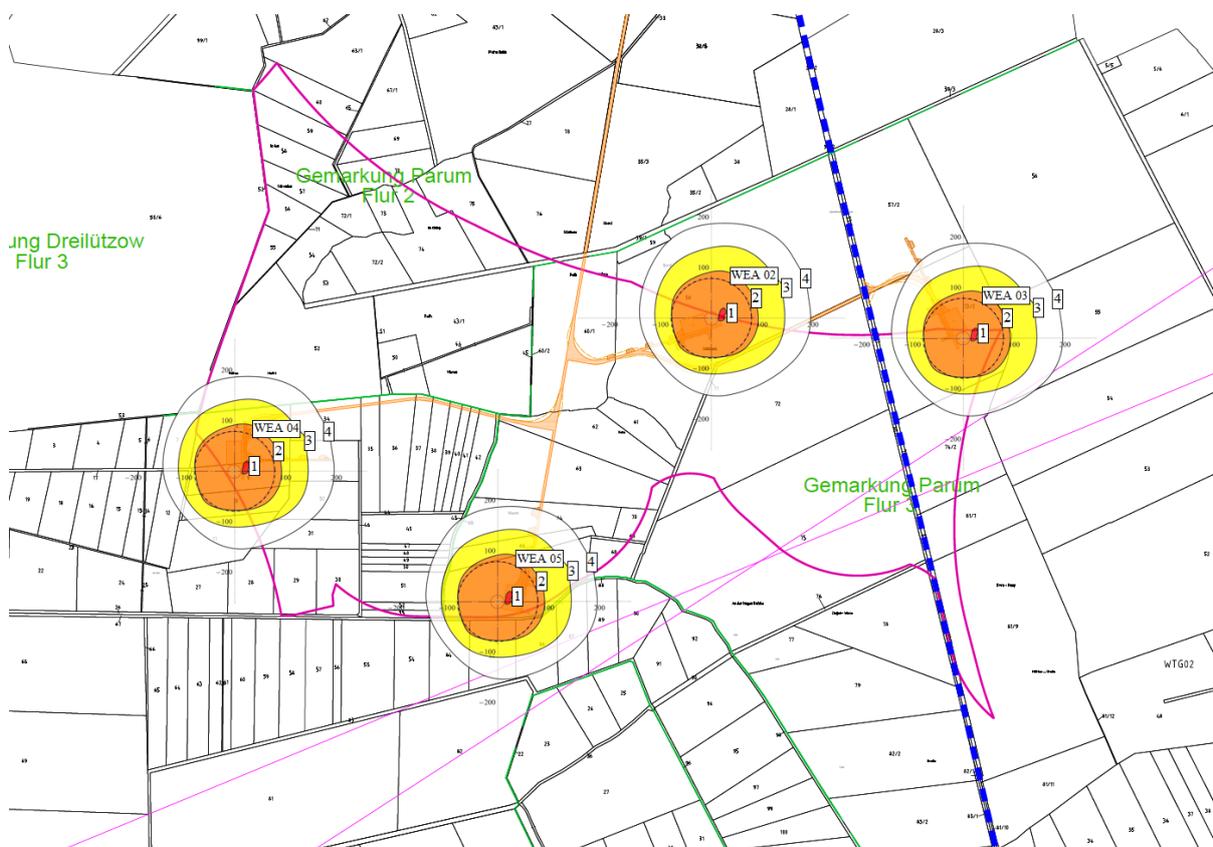


Abbildung 5: Trefferhäufigkeiten [1/m²] pro Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

4.2.3 Individualrisiko

Auf Basis der in Abbildung 5 dargestellten Trefferhäufigkeiten wird das Risiko, im Straßenverkehr aufgrund Eisabfalls zu verunfallen, für die Kreisstraße K26 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Kreisstraße K26 konservativ eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt. Diese Annahme ist insofern konservativ, als dass die Expositionsdauer im Gefährdungsbereich erhöht wird.

Ein Eisabfall ist dann als gefährlich einzustufen, wenn Zeit und Ort des Treffers des Eisobjektes mit der Zeit und dem Ort des zu betrachtenden Fahrzeugs übereinstimmen.

Es ergibt sich der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{Vj} \cdot h_{EV} \cdot h_{TEj} \cdot A_T \cdot P_{VA} \cdot P_{Aj},$$

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

- H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr (Ergebnis der Simulation).
- H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.
- h_{Vj} : Häufigkeit der Vereisung pro Jahr (Kapitel 4.1.1).
- h_{EV} : Häufigkeit Eisabfall pro Vereisung (Kapitel 4.1.1).
- h_{TEj} : Häufigkeit der Treffer pro m² im Bereich j pro Eisabfall (Ergebnis der Simulation).
- A_T : Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs (für einen lebensbedrohlichen Fahrzeugtreffer wird als Trefferfläche die Fläche der Windschutzscheibe mit 2m² angesetzt).
- P_{VA} : Wahrscheinlichkeit, an einem Vereisungstag anwesend zu sein, $P_{VA} = (225 \times 2)/365$ (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 Verkehrsteilnehmers v_F , Länge des Straßenabschnitts l_j aus Abbildung 5), $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergibt sich die in Tabelle 5 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko). Für die Risikobewertung wird konservativ angenommen, dass ein Treffer der Windschutzscheibe unabhängig von der Eisobjektgröße einen schweren oder tödlichen Unfall zur Folge hat.

WEA	Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
03	Kreisstraße K26	2,8E-08

Tabelle 5: Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko bei Eisabfall.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von $2,8E-08$ Treffer/a im Mittel ca. alle $3,6E+07$ Jahre ein lebensbedrohlicher Treffer durch Eisabfall. Eine Aussage, zu welchem Zeitpunkt sich ein Treffer ereignet, lässt sich hieraus nicht ableiten.

4.2.4 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko)

Für die Ermittlung der Gefährdung des Straßenverkehrs wird, aufbauend auf die Randbedingungen für die Ermittlung des Individualrisikos (siehe Kapitel 4.2.3), zusätzlich die Verkehrsdichte auf der Kreisstraße K26 berücksichtigt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Kreisstraße K26 konservativ eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt.

Daraus ergibt sich der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{Vj} \cdot h_{EV} \cdot h_{TEj} \cdot h_{aVT} \cdot A_T \cdot P_{Aj},$$

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

- H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr (Ergebnis der Simulation).
- H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.
- h_{Vj} : Häufigkeit der Vereisung pro Jahr (Kapitel 4.1.1).
- h_{EV} : Häufigkeit Eisabfall pro Vereisung (Kapitel 4.1.1).
- h_{TEj} : Häufigkeit der Treffer pro m^2 im Bereich j pro Eisabfall (Ergebnis der Simulation).
- h_{aVT} : Verkehrsdichte: Für die Verkehrsdichte auf der Kreisstraße K26 werden auf Basis der Angaben aus /6/ ca. 250 Fahrzeuge pro Tag angesetzt.
- A_T : Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs (für einen lebensbedrohlichen Fahrzeugtreffer wird als Trefferfläche die Fläche der Windschutzscheibe mit $2m^2$ angesetzt).
- P_{Aj} : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Bereich j eintritt (Geschwindigkeit des Verkehrsteilnehmers v_F , Länge des Straßenabschnitts l_j aus Abbildung 5), $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergibt sich für die Gefährdung des Straßenverkehrs auf der Kreisstraße K26 die in Tabelle 6 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter. Für die Bewertung (siehe Kapitel 6) wird konservativ angenommen, dass ein Treffer der Windschutzscheibe unabhängig von der Eisobjektgröße einen schweren oder tödlichen Unfall zur Folge hat.

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
03	Kreisstraße K26	4,1E-08

Tabelle 6: Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Eisabfall.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von $4,1E-08$ Treffer/(m*a) im Mittel ca. alle $2,4E+07$ Jahre pro Meter Streckenabschnitt ein schwerer Unfall durch Eisabfall. Eine Aussage, zu welchem Zeitpunkt sich ein Treffer ereignet, lässt sich hieraus nicht ableiten.

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 /28/, /29/, /30/ 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 /28/, Daten der Betreiber-Datenbasis (BDB) /29/) und einer Auswertung von Senter-Novem (Handboek Risicozonering Windturbines, Niederlande 2005 /30/). 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 /31/ entnommen werden.

4.3.2 Randbedingungen

Die Berechnungen der Flugbahnen von Rotorblattbruchstücken erfolgen unter Variation der verschiedenen Parameter wie Bruchlage, Abwurfwinkel, Windrichtung und Windstärke /42/. Es werden somit etwa 100.000 verschiedene Flugbahnen pro WEA simuliert.

Für die Simulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- WEA-Typ: GE 5.5-158 mit 161,0m NH und 158,0m D.
- Drehzahl bei Rotorblattbruch: $9,7 \text{ U/min} \cdot 120\% = 11,64 \text{ U/min}$ (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 6 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Rotorblattbruch-Ereignissen pro WEA dargestellt.

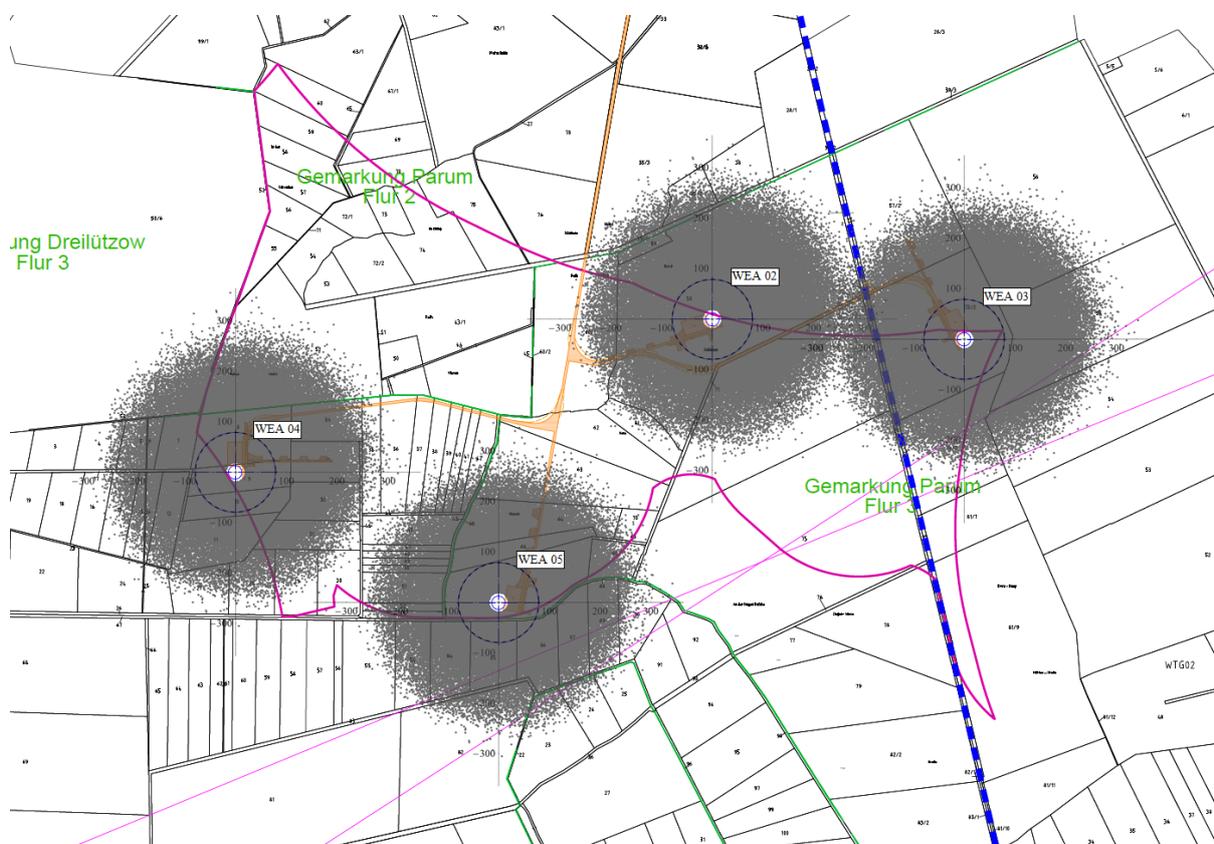


Abbildung 6: Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 7 sind die Größenordnungen der Trefferhäufigkeiten pro m² und Rotorblattbruch-Ereignis in der Umgebung der WEA durch farblich abgestufte Gefährdungsbereiche dargestellt (Wahrscheinlichkeitszonen). Die Bedeutung der farblich abgestuften Gefährdungsbereiche sowie der möglichen Treffer durch Rotorblattbruch pro Jahr und m² sind in der Tabelle 7 beschrieben.

Zone	Farbe	Trefferhäufigkeiten [1/m ²]	Trefferhäufigkeiten pro Jahr [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 7: Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Rotorblattbruch). *alles außerhalb der Zone 4.



Abbildung 7: Trefferhäufigkeiten [1/m²] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die Ergebnisse der standortbezogenen Simulation des Rotorblattbruchs in Abbildung 7 zeigen, dass Abschnitte der Kreisstraße K26 durch Breiche der ermittelten

Gefährdungsbereiche der WEA 02 und WEA 03 übedeckt werden (siehe weitere Risikoanalyse Kapitel 4.3.4 und 4.3.5).

4.3.4 Individualrisiko

Auf Basis der in Abbildung 7 dargestellten Trefferhäufigkeiten wird das Risiko, im Straßenverkehr aufgrund Rotorblattbruchs zu verunfallen, für die Kreisstraße K26 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Kreisstraße K26 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 [m²]: Fahrzeug: 10,0m².
- 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 7),
 $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.
- k_T : Korrekturfaktor, der berücksichtigt, dass ein Bruchobjekt einen, im Vergleich zu seiner Trefferfläche, größeren Schaden verursacht.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergeben sich die in Tabelle 8 aufgeführten Trefferhäufigkeiten pro Jahr (Individualrisiko).

WEA	Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
02	Kreisstraße K26	1,2E-13
03		4,4E-11
Gesamt		4,4E-11

Tabelle 8: Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Rotorblattbruch.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von 4,4E-11 Treffer/a im Mittel ca. alle 2,3E+10 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 K26 berücksichtigt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Kreisstraße K26 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 m² im Bereich j pro Rotorblattbruch (Ergebnis der Simulation).

h_{aVT} : Verkehrsdichte: Für die Verkehrsdichte auf der Kreisstraße K26 werden auf Basis der Angaben aus /6/ ca. 250 Fahrzeuge pro Tag angesetzt.

A_T : Zu berücksichtigende Trefferfläche [m²]: Fahrzeug: 10,0m².

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 7).

k_T : Korrekturfaktor, der berücksichtigt, dass ein Bruchobjekt einen, im Vergleich zur Trefferfläche, größeren Schaden verursacht.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergeben sich die in Tabelle 9 aufgeführten Trefferhäufigkeiten pro Jahr (Gefährdung des Straßenverkehrs).

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
02	Kreisstraße K26	1,2E-13
03		1,7E-11
Gesamt		1,7E-11

Tabelle 9: Trefferhäufigkeiten pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Rotorblattbruch.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von 1,7E-11 Treffer/(m*a) im Mittel ca. alle 5,9E+10 Jahre pro Meter Streckenabschnitt ein schwerer Unfall 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 /32/ oder bei extrem hohen Windgeschwindigkeiten /33/ aufgrund der dann vorliegenden Kräfte auftreten.

In Abbildung 8 sind die maximalen Gefährdungsradien bei Turmversagen (innen – Gondel, außen – Gesamthöhe) zu erkennen. Hieraus ist zu erkennen, dass die Kreisstraße K26 durch ein mögliches Turmversagen der WEA 03 betroffen ist (siehe weitere Risikobeurteilung Kapitel 4.4.2 und 4.4.3).

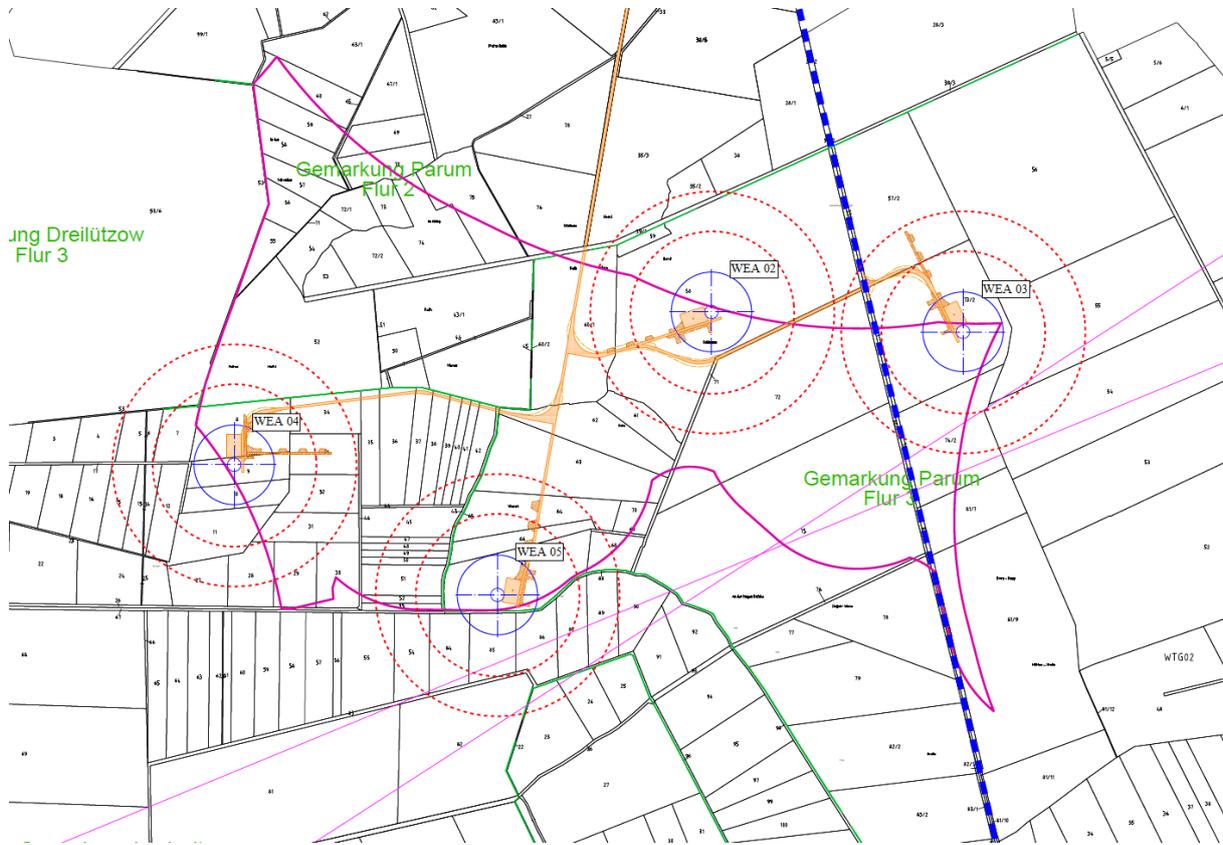


Abbildung 8: Gefährdungsradien (rot gestrichelt) bei Turmversagen: innen – Gondel, außen – Gesamthöhe.

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 /28/, /30/ 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 bekannten Schadensereignisse in Deutschland (1997 bis Ende 2017 /28/) und einer Auswertung von SenterNovem (Handboek Risicozonering Windturbines, Niederlande 2005 /30/). 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 /31/ entnommen werden.

4.4.2 Individualrisiko

Ein Schadensereignis mit direkter Personen- bzw. Verkehrsgefährdung tritt für den Fall ein, dass schwere Teile der WEA auf Bereiche der Kreisstraße K26 stürzen. 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 für die Kreisstraße K26 in der Abbildung 9 dargestellt.

Auf Basis der in Abbildung 9 dargestellten Gefährdungsbereiche wird das Risiko, im Straßenverkehr aufgrund Turmversagens zu verunfallen, für die Kreisstraße K26 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Kreisstraße K26 konservativ eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt. Diese Annahme ist insofern konservativ, als dass die Expositionsdauer im Gefährdungsbereich erhöht wird.

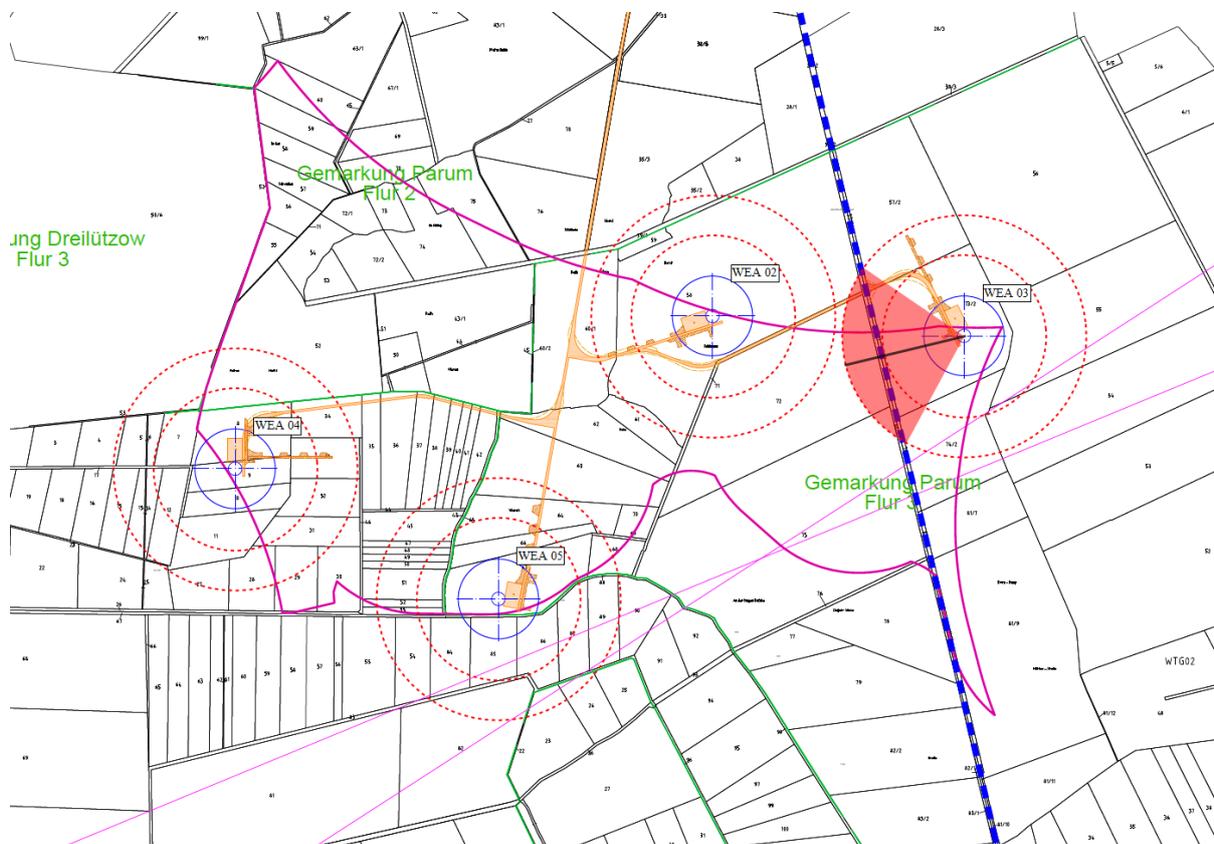


Abbildung 9: Gefährdungsbereiche (rot) bei Turmversagen (schwarzer Balken).

Ein Turmversagen 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:

$$H_{Tj} = h_{Tj} \cdot P_{TA} \cdot P_{Sj} \cdot P_{Asj} \cdot P_{Atj} \cdot k_T,$$

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

H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr.

H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.

h_{Tj} : Häufigkeit Turmversagen pro WEA und Jahr, $h_{Tj} = 1,0E-04/a$ (Kapitel 4.4.1).

P_{TA} : 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_{Sj} : Wahrscheinlichkeit, dass der Turm das Schutzobjekt trifft / in Richtung Schutzobjekt fällt, (siehe Abbildung 9).

- P_{Asj} : Wahrscheinlichkeit, sich im getroffenen Bereich j aufzuhalten (Verhältnis der Turmfläche zum Gefährdungsbereich gemäß Abbildung 9).
- P_{Atj} : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Bereich j eintritt (Geschwindigkeit des Fahrzeugs v_F /4/, Länge des Straßenabschnitts l_j aus Abbildung 9),
 $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.
- k_T : Korrekturfaktor, der berücksichtigt, dass ein Bruchobjekt im Vergleich zu seiner Trefferfläche einen größeren Schaden verursacht.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergeben sich die in Tabelle 10 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko).

WEA	Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
03	Kreisstraße K26	4,2E-10

Tabelle 10: Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Turmversagen.

Beispielhaft erfolgt bei einem Individualrisiko von 4,2E-10 Treffer/a im Mittel alle 2,4E+09 Jahre ein lebensbedrohlicher Treffer durch Turmversagen. Eine Aussage, zu welchem Zeitpunkt sich ein Treffer ereignet, lässt sich hieraus nicht ableiten.

4.4.3 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko)

Für die Ermittlung der Gefährdung des Straßenverkehrs durch Turmversagen wird, aufbauend auf den Randbedingungen für die Ermittlung des Individualrisikos (siehe Kapitel 4.4.2), zusätzlich die Verkehrsdichte auf der Kreisstraße K26 berücksichtigt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Kreisstraße K26 konservativ eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt.

Es ergibt sich der folgende mathematische Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{Tj} \cdot h_{aVT} \cdot P_{Sj} \cdot P_{Asj} \cdot P_{Atj},$$

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

H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr.

H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.

h_{Tj} : Häufigkeit Turmversagen pro WEA und Jahr, $h_{Tj} = 1,0E-04/a$ (Kapitel 4.4.1).

h_{aVT} : Verkehrsdichte: Für die Verkehrsdichte auf der Kreisstraße K26 werden auf Basis der Angaben aus /6/ ca. 250 Fahrzeuge pro Tag angesetzt.

P_{Sj} : Wahrscheinlichkeit, dass der Turm das Schutzobjekt trifft / in Richtung Schutzobjekt fällt (siehe Abbildung 9). Hierbei wird auch berücksichtigt, dass der Turm in beliebiger Höhe gleichverteilt brechen kann.

- P_{Asj} : Wahrscheinlichkeit, sich im betroffenen Straßenbereich j aufzuhalten (örtlicher Aufenthalt) Verhältnis von Schutzobjekt (Fahrzeug) zu Gefährdungslänge – Fahrzeug inkl. Sicherheitszuschlag für die Ausdehnung des Turms.
- P_{Atj} : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines ungeschützten Aufenthalts (Aufenthaltszeit pro Ereignistag) im Freien im Bereich j eintritt (Geschwindigkeit des Fahrzeugs v_F , Länge des Straßenabschnitts l_j aus Abbildung 9, $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$).

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergeben sich die in Tabelle 11 aufgeführten Trefferhäufigkeiten pro Jahr (Gefährdung des Straßenverkehrs).

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
03	Kreisstraße K26	2,4E-10

Tabelle 11: Trefferhäufigkeit pro Jahr pro Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Turmversagen.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von 2,4E-10 Treffer/(m*a) im Mittel alle 4,2E+09 Jahre pro Meter Streckenabschnitt ein schwerer Unfall 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 Parum-Dümmer in Mecklenburg-Vorpommern plant der Auftraggeber, die WKN GmbH, die Errichtung von vier WEA des Typs GE 5.5-158 mit 161,0m NH und 158,0m D. In der Nähe der geplanten WEA befindet sich die Kreisstraße K26.

Im Rahmen der gutachtlichen Stellungnahme galt es zu prüfen und zu bewerten, ob eine besondere Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K26 sowie den Verkehrswegen im Umkreis der geplanten WEA durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch oder Turmversagen vorliegt.

Zusammenfassend wurden die folgenden Ergebnisse und daraus resultierenden Empfehlungen ermittelt:

Auf Basis der uns 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 /5/ und /8/ wurde für die Wirksamkeit des geplanten Eiserkennungssystems der aktuelle Stand der Technik bestätigt.

Auf Basis der ermittelten Gefährdung ist zu erkennen, dass die Kreisstraße K26, die Wirtschaftswege und die landwirtschaftlichen Flächen in der näheren Umgebung der geplanten WEA durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen betroffen sein können.

Für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen und Wirtschaftswege, ist eine Gefährdung durch Eisabfall nicht zu unterstellen, da die Wintermonate außerhalb der üblichen landwirtschaftlichen Wirtschaftsperiode liegen und im Winter mit geringem land- und forstwirtschaftlichem Verkehr zu rechnen ist. Sollten hier forstwirtschaftliche Arbeiten im Winter durchgeführt werden, so werden diese normalerweise in einem zeitlich sehr begrenzten Rahmen durchgeführt. Bei Forstarbeiten im Freien wird üblicherweise ein Helm getragen bzw. kommen bei größeren Durchforstungsmaßnahmen überdachte Maschinen zum Einsatz. Diese bieten einen Schutz gegen möglichen Eisabfall. Sollten landwirtschaftliche Arbeiten außerhalb der üblichen Wirtschaftsperiode im Winter durchgeführt werden, so werden diese normalerweise ebenfalls in überdachten Maschinen ausgeführt. Die Fahrer land- und forstwirtschaftlicher 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. Eine Gefährdung durch Rotorblattbruch und Turmversagen ist für die landwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen (inkl. Zufahrten der geplanten WEA) nicht anzunehmen, da die flächenbezogene Nutzungshäufigkeit als gering anzusehen ist.

Für die Bewertung der Gefährdung im Straßenverkehr sind zum einen das Risiko von Einzelpersonen (Individualrisiko) sowie das Gruppenrisiko (Gefährdung des Straßenverkehrs) zu betrachten. Für die untersuchten Straßenabschnitte wurden die Gefährdungen für Verkehrsteilnehmer durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen bestimmt (siehe Kapitel 4). Es ergeben sich die in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgeführten Gesamtgefährdungen für Verkehrsteilnehmer auf der betroffenen Kreisstraße K26.

WEA	Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
02	Kreisstraße K26	1,2E-13
03		2,8E-08
Gesamt		2,8E-08

Tabelle 12: Gesamtgefährdung Individualrisiko durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen.

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
02	Kreisstraße K26	1,2E-13
03		4,1E-08
Gesamt		4,1E-08

Tabelle 13: Gesamtgefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen.

Durch den Vergleich der ermittelten Ergebnisse für die Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K26 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.

Unter Berücksichtigung des Eiserkennungssystems (siehe Kapitel 4.1.2) sowie der Ergebnisse aus Kapitel 4 empfehlen wir die folgenden üblichen Maßnahmen zur weiteren Minderung des Restrisikos:

- Die Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems der WEA sollte im Rahmen der Inbetriebnahme /25/, /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 /25/, /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 1,2-fachen Gesamthöhe der WEA) ist an den Zufahrtswegen der WEA und den umliegenden Wirtschaftswegen 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 hinweist.

Unter Berücksichtigung der Tatsache,

- dass die Risikobeurteilung konservativ durchgeführt wurde,
- dass in der Realität nicht jeder Treffer zu einem lebensbedrohlichen Unfall führen wird (dies betrifft die Geschwindigkeit und das Gewicht der Eisobjekte, die Trefferfläche sowie die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs zum Zeitpunkt des Treffers des Eisobjekts),
- dass sich die abgeschalteten, vereisten WEA prinzipiell nicht von anderen Bauwerken mit Eisansatz unterscheiden,
- dass die öffentlich zugänglichen Wege (Wirtschaftswegen) in unmittelbarer Nähe der WEA gemäß /6/ hauptsächlich land- und forstwirtschaftlich genutzt werden und im Winter, außerhalb der Wirtschaftsperiode, von einer eher geringen Frequentierung ausgegangen werden kann,
- dass gemäß /6/ im Winter eine sehr geringe Nutzungshäufigkeit der Wirtschaftswegen durch Spaziergänger und Fahrradfahrer (Freizeitnutzung) angenommen werden kann und diese als untergeordnet bewertet werden kann,
- dass davon auszugehen ist, dass der land- und forstwirtschaftliche Verkehr überwiegend mit geschützten Maschinen erfolgt (landwirtschaftlicher Verkehr 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 durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen für Verkehrsteilnehmer auf der Kreisstraße K26 und den umliegenden Wirtschaftswegen als akzeptabel zu betrachten.

Unter Berücksichtigung

- der mit der Liste der Technischen Baubestimmungen des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern /25/ eingeführten technischen Regeln Anlage 2.7/12: „Gefahr des Eisabwurfs bei Unterschreitung eines Abstands von $1,5 \times (\text{Rotor-durchmesser} + \text{Nabenhöhe})$ “

sowie in Anlehnung an

- das Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) /26/ §5 Abs. 1 Nr. 1: „Vermeidung sonstiger Gefahren“

ist eine konkrete Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Kreisstraße K26 und den umliegenden Wirtschaftswegen durch die Errichtung der geplanten WEA am Standort Parum-Dümmer durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen nach Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen zur Risikominderung nicht anzunehmen.

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 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	
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/ WKN GmbH. Angaben zu den WEA-Spezifikationen. Übermittelt durch WKN GmbH mit E-Mail vom 21.03.2019.
- /2/ WKN GmbH. Lageplan: Windpark Parum-Dümmer, Stand: 01.03.19. Übermittelt durch WKN GmbH mit E-Mail vom 21.03.2019.
- /3/ WKN GmbH. Angaben zu den meteorologischen Daten. Übermittelt durch WKN GmbH mit E-Mails vom 05.04.2019 und 08.04.2019.
- /4/ Weidmüller Monitoring Systems GmbH. Angaben zum Eiserkennungssystem: Technische Information Eisdetektion an Rotorblättern mit BLADEcontrol®. Übermittelt durch WKN GmbH mit E-Mail vom 21.03.2019.
- /5/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Gutachten zur Einbindung eines Eiserkennungssystems in GE Windenergieanlagen, Rev. 3, Stand 05.06.2018. Übermittelt durch WKN GmbH mit E-Mail vom 21.03.2019.
- /6/ WKN GmbH. Beschreibung der Schutzobjekte und Angaben zu den Nutzungshäufigkeiten. Übermittelt durch WKN GmbH mit E-Mails vom 26.03.2019 und 01.04.2019.
- /7/ GE Renewable Energy. Technische Dokumentation Windenergieanlagen Alle Anlagentypen, Eisdetektion. Stand 2017.
- /8/ DNV GL – Energy Renewables Certification Gutachten Ice Detection System, BLADEcontrol Ice Detector BID, Report-Nr.: 75138, Rev. 6, Stand 15.11.2018.
- /9/ DNV-GL – Renewables Certification. Typenzertifikat: Eisdetektorsystem BLADEcontrol Ice Detector (BID). TC-DNVGL-SE-0439-04314-0, Hamburg. 2018.
- /10/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Gutachten zur Einbindung eines Eiserkennungssystems in GE Windenergieanlage, Bericht Nr.: 8111327215 Rev.3. 05.06.2018.
- /11/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.
- /12/ 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.
- /13/ Deutscher Wetterdienst. Freie Klimadaten, Eistage Deutschland 1981-2010 (Rasterdaten). www.dwd.de, Juni 2017.
- /14/ 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.
- /15/ Morgan, C. et al. Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk? Wind Energy Production in Cold Climates. Bristol. 1996.

- /16/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.
- /17/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.
- /18/ 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.
- /19/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1; Wind turbines - Part 1: Design requirements; Third Edition; August 2005 + Amendment 1: Oktober 2010.
- /20/ 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.
- /21/ COST-727. Atmospheric Icing on Structures. Measurements and data collection on icing: State of the Art Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp. Zürich. 2006.
- /22/ DIN 1055-5. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten. Berlin. Juli 2005.
- /23/ DIN EN 1990. Grundlagen der Tragwerksplanung. Dezember 2010.
- /24/ DIBt. Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Berlin. Fassung Oktober 2012.
- /25/ Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern. Liste der Technischen Baubestimmungen. Fassung September 2015.
- /26/ BImSchG 2017. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Deutschland. Fassung vom 29.05.2017.
- /27/ 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.
- /28/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG. Statistische Auswertung von Pressemeldungen über Havarien von Windenergieanlagen im Zeitraum 1997 bis 2016 (Internetrecherche). Hamburg. 2017.
- /29/ Keiler, J. Betreiber-Datenbasis (BDB). Daten der Jahrgänge 2000 bis 2011. Rade. 2011.
- /30/ Rademakers, L. et al. Handboek Risicozonering Windturbines. Versie 2, jan2005. SenterNovem, Nederland. 2005.
- /31/ DEWI, Deutsches Windenergie-Institut, DEWI GmbH. www.dewi.de. 2013.
- /32/ osthessen-news.de. Versagte das Bremssystem? Ursachenforschung nach Windrad-Crash. Kirtorf. Meldung vom 20.06.2011.
- /33/ rundschau-online.de. Windrad stürzt auf Acker. Meldung vom 16.12.2013.

- /34/ DIN EN 50126. Bahnanwendungen. Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS). März 2000.
- /35/ GBE. Heft 52 – Sterblichkeit, Todesursachen und regionale Unterschiede. Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE). 2013.
- /36/ D STATIS. Verkehr, Verkehrsunfälle, Zeitreihen. Statistisches Bundesamt. 2018.
- /37/ Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). <http://www.gesetze-im-internet.de>. Gelesen am 10.12.2018. Stand 2017.
- /38/ Trbojevic V.M. 2005. Risk Criteria in EU. ESREL'05, Poland, 27.-30. Juni 2005.
- /39/ Störfall-Kommission. 2004. Bericht, Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung. SFK-GS-41.
- /40/ Hauptmanns, U. & Marx, M. Kriterien für die Beurteilung von Gefährdungen durch technische Anlagen. Verlag VdTÜV - Band 18. Berlin. November 2010.
- /41/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.
- /42/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.