

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

Erstellt im Auftrag für

Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG  
Rees

Revision 3

Hamburg, 24.03.2021

<b>Revision</b>	<b>Datum</b>	<b>Änderung</b>
0	09.03.2016	Erste Ausgabe
1	05.09.2018	Änderung des Windparklayouts, des WEA-Typs und der Nabenhöhe sowie die Beurteilung für Rotorblattbruch und Turmversagen
2	09.09.2019	Änderung des Rotordurchmessers und der Nabenhöhe
3	24.03.2021	Änderung der Leistung und Berücksichtigung eines zusätzlichen Eiserkennungssystems

**Gegenstand:** Risikobeurteilung am Windenergieanlagen-Standort  
Wiesemscheid

**Referenz-Nr.:** 2021-WND-RB-105-R3

**Auftraggeber:** Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG  
Wertherbrucherstraße 13  
46459 Rees

**Anlagenhersteller:** ENERCON GmbH  
Dreekamp 5  
26605 Aurich

<b>WEA-Typ:</b>	<b>P<sub>Nenn</sub> [MW]</b>	<b>D [m]</b>	<b>NH [m]</b>
ENERCON E-138 EP3 E2	4,2	138,3	160,00
ENERCON E-138 EP3 E2	4,2	138,3	130,07

**Vom Auftraggeber eingereichte Unterlagen:**

- WEA-Spezifikationen: Nennleistung, Drehzahlbereich, Rotordurchmesser und Nabenhöhe /1/.
- Lageplan mit Darstellung der WEA und der Schutzobjekte /2/, /3/.
- Angabe einer möglichen Überhöhung der WEA gegenüber den Schutzobjekten /2/.
- Weibull-Parameter A und k sowie die Windverteilung auf Nabenhöhe /4/.
- Angaben und Nachweise zu dem Eiserkennungssystem der WEA /5/, /6/.
- Beschreibung der Schutzobjekte und des Standorts sowie Angaben zu den Nutzungshäufigkeiten am Standort /7/, /8/.

**Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:**

Verfasser	M.Sc. N. Cromm Sachverständiger	Hamburg, 24.03.2021
Geprüft durch	Dipl.-Ing. O. Raupach Sachverständiger	Hamburg, 24.03.2021

**Für weitere Auskünfte:**

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG  
M.Sc. N. Cromm  
Große Bahnstraße 31  
22525 Hamburg

Tel.: +49 40 8557 1754

Fax: +49 40 8557 2552

E-Mail: [ncromm@tuev-nord.de](mailto:ncromm@tuev-nord.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Aufgabenstellung .....</b>	<b>6</b>
<b>2 Angaben zum Windenergieanlagenstandort .....</b>	<b>8</b>
<b>3 Bewertungsmaßstab .....</b>	<b>9</b>
3.1 Individualrisiko.....	9
3.2 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	10
<b>4 Risikoanalyse.....</b>	<b>12</b>
4.1 Eisabwurf und Eisabfall.....	12
4.1.1 Vereisungspotential.....	12
4.1.2 Automatische Eisabschaltung .....	14
4.1.3 Randbedingungen.....	15
4.1.4 Gefährdungsradius.....	17
4.2 Detailanalyse Gefährdung der Bundesstraße B258 durch Eisabfall.....	19
4.2.1 Randbedingungen.....	19
4.2.2 Trefferhäufigkeiten .....	20
4.2.3 Individualrisiko.....	23
4.2.4 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	24
4.3 Rotorblattbruch.....	25
4.3.1 Generische Ereignishäufigkeiten.....	25
4.3.2 Randbedingungen.....	25
4.3.3 Trefferhäufigkeiten .....	26
4.3.4 Individualrisiko.....	29
4.3.5 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	30
4.4 Turmversagen.....	31
4.4.1 Generische Ereignishäufigkeiten.....	32
4.4.2 Individualrisiko.....	33
4.4.3 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	36
<b>5 Modell- und Datenunsicherheiten .....</b>	<b>37</b>
<b>6 Zusammenfassung und Risikobewertung .....</b>	<b>37</b>
<b>7 Rechtsbelehrung .....</b>	<b>41</b>

<b>8</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>42</b>
<b>9</b>	<b>Literatur- und Quellenangaben.....</b>	<b>43</b>

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lageplan /2/.....	8
Abbildung 2:	Fallweiten bei 19,1m/s Windgeschwindigkeit für die WEA 02 und WEA 03. ....	17
Abbildung 3:	Gefährdungsradius – rot gestrichelt ( $v = 21,9\text{m/s}$ ). ....	19
Abbildung 4:	Auftreffpunkte bei Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt. ....	21
Abbildung 5:	Trefferhäufigkeiten [ $1/\text{m}^2$ ] pro Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt. ....	22
Abbildung 6:	Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt... 27	
Abbildung 7:	Trefferhäufigkeiten [ $1/\text{m}^2$ ] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt. ....	28
Abbildung 8:	Gefährdungsradien (rot gestrichelt) bei Turmversagen: innen – Gondel, außen – Gesamthöhe. ....	32
Abbildung 9:	Gefährdungsfläche (hellrot) bei Turmversagen (schwarzer Balken).....	34

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung. ....	14
Tabelle 2:	Idealisierte Eisobjekte.....	16
Tabelle 3:	Ermittelte Fallweiten. ....	17
Tabelle 4:	Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Eisabfall), *alles außerhalb der Zone 4.....	22
Tabelle 5:	Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko bei Eisabfall.....	24
Tabelle 6:	Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Eisabfall. ....	25
Tabelle 7:	Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Rotorblattbruch). *alles außerhalb der Zone 4. ....	28
Tabelle 8:	Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Rotorblattbruch. ....	30
Tabelle 9:	Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Rotorblattbruch. ....	31
Tabelle 10:	Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Turmversagen. ....	35
Tabelle 11:	Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Turmversagen. ....	36

## 1 Aufgabenstellung

Am Standort Wiesemscheid plant der Auftraggeber, die Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG, die Errichtung einer Windenergieanlage (WEA) des Typs ENERCON E-138 EP3 E2 mit 160,00 m Nabhöhe (NH) und 138,25 m Rotordurchmesser (D) (WEA 01) und zwei WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 E2 mit 130,07 m NH und 138,25 m D (WEA 02 und WEA 03). In der Nähe der geplanten WEA verlaufen die Bundesstraße B257 und die Bundesstraße B258. Darüber hinaus befinden sich in näherer Umgebung der geplanten WEA einige Forst- und Wirtschaftswege /7/.

Gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /31/ §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 /33/), 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 Rheinland-Pfalz eingeführten Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen /31/, werden aufgrund einer Gefahr durch Eisabfall und Eisabwurf Mindestabstände definiert. Nach /31/ gelten Abstände größer als  $1,5 \times (D + NH)$  im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen gemäß DIN 1055-5 /28/ 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 Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit Schreiben vom 22.12.2015 mit der Erstellung einer Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall beauftragt worden. Mit der nun vorliegenden Revision 3 wurden die Änderung der Leistung sowie der Einbau eines zusätzlichen externen Eiserkennungssystems berücksichtigt. Die folgende Vorgehensweise ist Gegenstand der Beauftragung:

Erstellung einer gutachtlichen Stellungnahme zur möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der nahegelegenen Bundesstraße B258 und der Bundesstraße B257 durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen der geplanten WEA. Die Stellungnahme beinhaltet die folgenden Arbeitsschritte:

1. Untersuchungen zur Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall am Windenergieanlagen-Standort Wiesemscheid (drei WEA)
2. Untersuchungen zur Risikobeurteilung Rotorblattbruch am Windenergieanlagen-Standort Wiesemscheid (drei WEA)

### 3. Untersuchungen zur Risikobeurteilung Turmversagen am Windenergieanlagen-Standort Wiesemscheid (drei WEA)

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 (mögliche Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der nahegelegenen Bundesstraße B257 und der Bundesstraße B258) erfolgt auf Grundlage der eingereichten Unterlagen. Es wurde ausschließlich die Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B258 und der Bundesstraße B257 durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen von den geplanten WEA beurteilt, mögliche weitere Schutzobjekte in der Umgebung der WEA sowie die Beurteilung weiterer Gefährdungen sind nicht Bestandteil der vorliegenden gutachtlichen Stellungnahme. Für die WEA-Spezifikationen der geplanten WEA wurden die benannten Spezifikationen berücksichtigt (siehe Seite 2).

## 2 Angaben zum Windenergieanlagenstandort

Die jeweilige Lage der geplanten WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 E2 ist dem Lageplan in Abbildung 1 zu entnehmen.

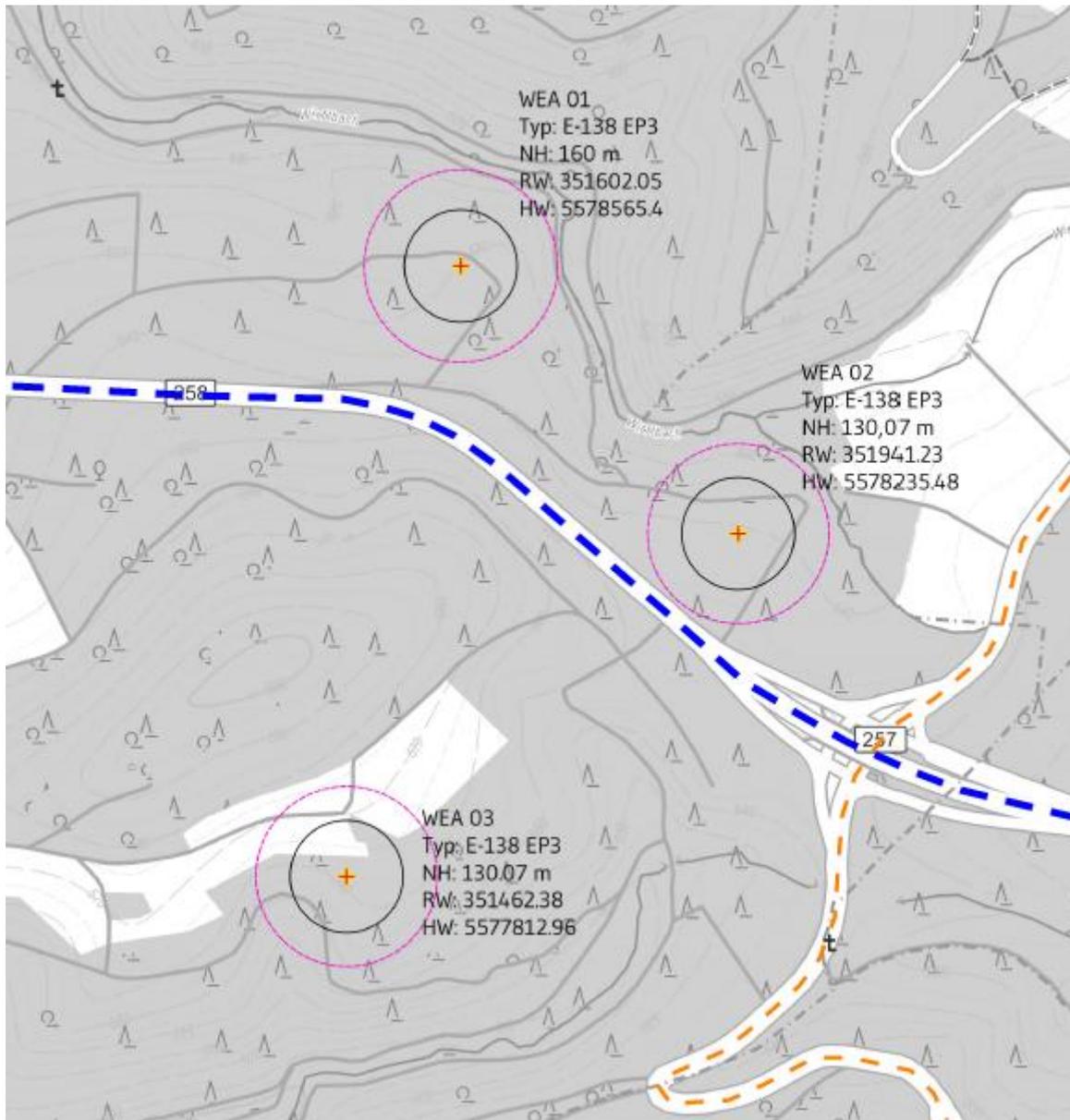


Abbildung 1: Lageplan /2/.

Die Angaben zum Standort wurden dem Lageplan /2/ und der Übersichtskarte /3/ entnommen.

Der geplante WEA-Standort liegt zwischen den Ortschaften Wiesemscheid und Nürburg. Das umliegende Gelände am Standort Wiesemscheid ist überwiegend bewaldet.

In der Nähe der geplanten WEA kreuzen sich die Bundesstraße B258 (blau gestrichelte Linie) und die Bundesstraße B257 (orange gestrichelte Linie). Darüber hinaus befinden sich einige Forst- und Wirtschaftswege in der Nähe der geplanten WEA /7/. Der minimale Abstand der WEA 02 zur Bundesstraße B258 beträgt ca. 116 m /2/.

### 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) /40/.
- Statistiken der Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE) /41/.
- Statistiken der Verkehrsunfälle des Statistischen Bundesamtes /42/.
- Risk Criteria in EU /43/.
- Deutsche Störfall-Kommission - Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung /44/.
- Auswertung des VdTÜV /45/.

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) /40/).

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 /42/ beurteilt (siehe Kapitel 3.2).

#### 3.1 Individualrisiko

##### MEM-Prinzip

Das Prinzip der MEM /40/ 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 /40/. Die in /40/ getätigten Angaben decken sich mit aktuellen Erhebungen des GBE /41/. 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 /41/ 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 /45/ 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) /43/ 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 /46/ 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 /42/. 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 /40/). In Anlehnung an die Vorgaben der StVO /46/ 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 /42/. Im Jahr 2017 gab es je 1.000 km Straßenlänge

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

Unfälle mit Personenschaden.

Zusätzlich sind in /42/ 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 etwa 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 /43/ 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 Wiesemscheid 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 /43/ 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 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 LKWs 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 ferner die Eigenschaften der Bauteile wie Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit und Form. Allgemeingültige 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 /25/, /26/, /27/.

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 Wiesemscheid ist gemäß den Eiskarten Europas /17/, /18/ und den Vereisungstagen des DWD /20/ im Mittel mit ca. 34 möglichen Vereisungstagen pro Jahr zu rechnen. Dieser Wert deckt sich mit internen Untersuchungen des TÜV NORD zur Vereisungshäufigkeit /19/, 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 Gütsch“ /22/, /23/, /24/ 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 /24/. Unter Berücksichtigung der in /23/ 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 44,0 m 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 <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	Verhältnis	Eisobjekte / Vereisung
ENERCON E-40	44,0	1.936	1,0	ca. 14
ENERCON E-138 EP3 E2	138,25	19.110	9,9	ca. 139

**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 stehenden WEA und die seitliche Ablenkung durch den Wind zu berücksichtigen. Bei WEA ohne eine wirksame Eisabschaltung kommt es infolge der Rotation des Rotors zum Wegschleudern des Eises (Eisabwurf), wodurch erheblich größere Wurfweiten erzielt werden.

Die Erkennung des Eisansatzes beruht beim ENERCON-Leistungskurvenverfahren im Wesentlichen auf einer Überwachung der Leistungs- und Blattwinkelkennlinien. Bei Eisansatz kommt es im Leistungsbetrieb durch eine Verschlechterung der Aerodynamik der Rotorblätter zu Abweichungen bestimmter Anlagenparameter (z. B. Rotordrehzahl, Pitchwinkel, el. Leistung) von den wetterabhängigen Erwartungswerten. Das Messprinzip des Leistungskurvenverfahrens basiert auf der Änderung der aerodynamischen Eigenschaften der Blattprofile durch Eisansatz, welcher sowohl die Oberflächenrauigkeit als auch die Geometrie des Blattes so verändert, dass es zu einem signifikanten Verlust an aerodynamischer Leistungsfähigkeit kommt. Diese Aussage wird gestützt durch Veröffentlichungen /51/, in welchen ein hoher Verlust an Auftrieb bereits bei leichter Vereisung messtechnisch gezeigt wird. Die daraus resultierende Leistungsabweichung zu den wetterabhängigen Erwartungswerten wird durch die Steuerung erkannt und die WEA automatisch abgeschaltet /9/, /11/.

Die Wiederinbetriebnahme der WEA nach Abschaltung durch Vereisung erfolgt ausschließlich manuell vor Ort /5/, /6/. Ein manueller Neustart der WEA erfolgt erst, wenn ein Eisansatz durch Sichtkontrolle ausgeschlossen werden kann /5/, /6/.

Bzgl. des oben aufgeführten Leistungskurvenverfahrens ist anzumerken, dass dieses die WEA nicht präventiv abschalten kann, sondern erst nachdem die WEA im Betrieb leicht vereist ist. Bei Windgeschwindigkeiten unterhalb von 3m/s ist die sichere Eiserkennung ausschließlich nach dem Leistungskurvenverfahren nach derzeitigem Kenntnisstand nicht mit Sicherheit gegeben /9/, /11/. Der Zustand der WEA bei Windgeschwindigkeiten unterhalb von 3m/s ist mit dem Stillstand zu vergleichen.

Für den Fall, dass eine WEA längere Zeit stillsteht (z.B. aufgrund längerer Schwachwindperioden oder eines Defekts) und sich während dieser Zeit die Wetterbedingungen ändern, kann es zu unerkannten Vereisungen an der WEA kommen. Nach einem Fehler ist gemäß den Untersuchungen aus /11/ ein Anfahren der WEA nur bei gemittelten Windgeschwindigkeiten unterhalb von 5,0m/s erlaubt. Gemäß /11/ stellt dieser

Startbetrieb gegenüber dem Eisabfall im Stillstand der WEA keine unzulässige zusätzliche Gefährdung dar.

Die prinzipielle Wirksamkeit des Systems wurde durch TÜV NORD mit /11/ bestätigt und entspricht dem Stand der Technik, die vorliegenden Betriebserfahrungen zum ENERCON-Leistungskurvenverfahren bestätigen dessen Wirksamkeit/10/.

Zusätzlich ist für die Eiserkennung das Eiserkennungssystem der Firma eologix geplant /5/, /12/. Die Erkennung des Eisansatzes basiert bei diesem System auf der Messung der Permeabilität der Sensoroberfläche, wodurch die Eisdicke ermittelt werden kann /12/, /13/. Auf jedes Rotorblatt werden mehrere Sensoren geklebt, die einmal pro Minute Daten an eine Basisstation senden, welche die Daten auswertet. Sobald einer oder mehrere Sensoren einen kritischen Eisansatz melden, wird die WEA automatisch abgeschaltet, wobei die Abschaltung bei einer geringeren Eisdicke erfolgt, wenn mehrere Sensoren eine Vereisung melden /12/.

Die Eiserkennung ist auch bei Stillstand der WEA möglich. Wenn das System Eisansatz an den Rotorblättern erkannt hat und die WEA daraufhin abgeschaltet wurde, kann die Anlage automatisch neugestartet werden, sobald das System den eisfreien Zustand an der WEA meldet /12/, /13/. Ein vorzeitiger manueller Neustart der WEA erfolgt erst, wenn ein Eisansatz durch Sichtkontrolle ausgeschlossen werden kann /12/. Bei gleichzeitiger Nutzung des ENERCON-Kennlinienverfahrens und des eologix Eiserkennungssystems erfolgt ein automatischer Neustart nur, wenn keines der beiden Systeme einen kritischen Eisansatz meldet /12/.

Das System wurde nach GL IV-1:2010 „Guidelines for the Certification of Wind Turbines“ zertifiziert /14/. Mit /15/ wurde für die Eiserkennung mittels eologix bestätigt, dass das System dem Stand der Technik entspricht und zur Erkennung von Eisansatz geeignet ist. Mit /13/ wurde die Integration der Eiserkennung mittels eologix in die Steuerung von ENERCON WEA 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 /13/. Gemäß /15/ 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 /15/ 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 – 2,5 U/min /11/) 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  $\rho = 1,300 \text{ kg/m}^3$  (konservativ aufgerundet bei  $0^\circ\text{C}$  Lufttemperatur).

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und die Weibullverteilung wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und gelten als vorläufig /4/. Die Daten werden als repräsentativ und richtig für den Standort vorausgesetzt und wurden nicht durch TÜV NORD geprüft. Wenn die vorläufigen Winddaten aktualisiert wurden, sollten die Ergebnisse der Risikobeurteilung mit den endgültigen Winddaten des Standortes neu geprüft werden.

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. 2 kg) und die Eisobjekte selten ein Gewicht von mehreren Kilogramm aufweisen /16/, /17/, /22/. Zudem hat sich in Feldstudien /22/ 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 /22/ auf 1,0 kg normiert. Die Eigenschaften der zugrunde gelegten Eisobjekte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Nr.	Masse [kg]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Form	mittlere Fläche [m <sup>2</sup> ]	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

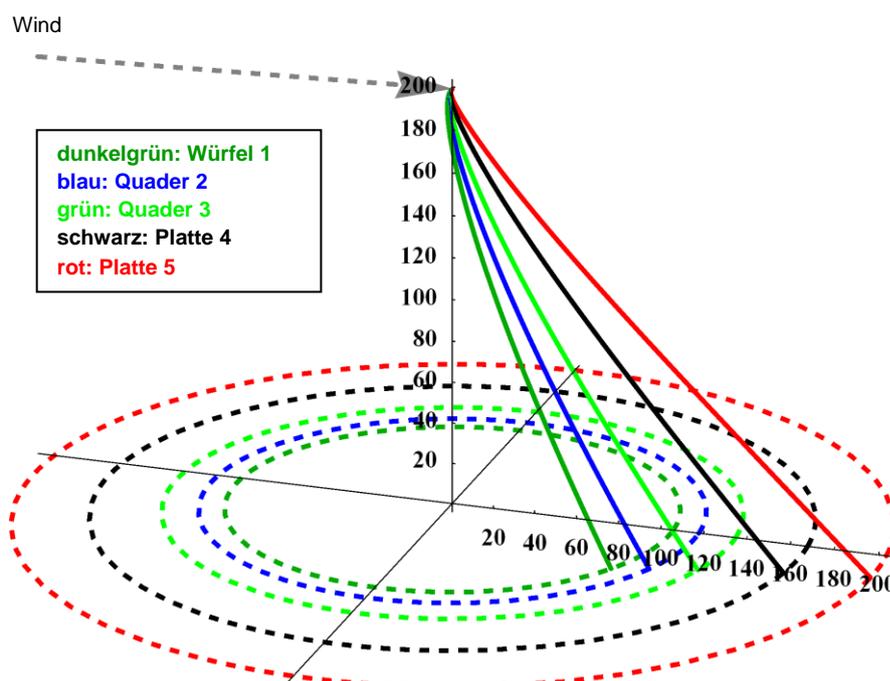
**Tabelle 2:** Idealisierte Eisobjekte.

#### 4.1.4 Gefährdungsradius

Für die geplante WEA mit einer Gesamthöhe von 229,12 m (WEA 01) über Grund wurde mit einer Windgeschwindigkeit von 21,9 m/s (99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung /4/) auf Basis der in Tabelle 2 angegebenen Eisobjekte die maximale Fallweite ermittelt. Für die geplanten WEA mit einer Gesamthöhe von 199,15 m über Grund (WEA 02 und WEA 03) wurde die maximale Fallweite mit einem 99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung von 19,1 m/s ermittelt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3 und die entsprechenden Fallkurven beispielhaft für die WEA 02 und WEA 03 in Abbildung 2 dargestellt.

WEA	v [m/s]	1 Würfel [m]	2 Quader [m]	3 Quader [m]	4 Platte [m]	5 Platte [m]
01	21,9	141,0	158,1	181,7	225,8	272,6
02, 03	19,1	105,6	117,5	134,6	167,6	203,2

**Tabelle 3:** Ermittelte Fallweiten.



**Abbildung 2:** Fallweiten bei 19,1 m/s Windgeschwindigkeit für die WEA 02 und WEA 03.

Die ermittelten maximalen Fallweiten sind der Spalte 7 der Tabelle 3 (Eisobjekt Nr. 5) zu entnehmen. Diese maximalen Fallweiten sind in der nachfolgenden Abbildung 3 als Gefährdungsradien (rot gestrichelt Radius) um die geplanten WEA dargestellt. Die Abbildung 3 zeigt,

- dass Teile der Bundesstraße B258 (blau gestrichelte Linie) von den Gefährdungsradien der geplanten WEA 01 und WEA 02 überdeckt werden (siehe hierzu Detailanalyse Kapitel 4.2).
- dass keine Teile der Bundesstraße B258 (blau gestrichelt Linie) durch die Gefährdungsradien der geplanten WEA 03 überdeckt werden.
- dass keine Teile der Bundesstraße B257 (orange gestrichelt Linie) durch die Gefährdungsradien der geplanten WEA überdeckt werden.
- dass Teile der nahegelegenen Forst- und Wirtschaftswege durch die Gefährdungsradien der geplanten WEA überdeckt werden.

Für die Gefährdung der Bundesstraße B258 wird in Kapitel 4.2 eine Detailanalyse der möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmern durchgeführt. Für die Forst- und Wirtschaftswege wird die Nutzungshäufigkeit sowie die mögliche Gefährdung durch Eisabfall innerhalb der ermittelten Gefährdungsradien qualitativ berücksichtigt (siehe Kapitel 6). Für die Nutzung der Forst- und Wirtschaftswege wird auf Basis der eingereichten Angaben zu den Schutzobjekten davon ausgegangen, dass diese im Winter durch evtl. Wanderer oder Spaziergänger wenig frequentiert sind, da die Wege überwiegend forstwirtschaftlich genutzt werden /6/.

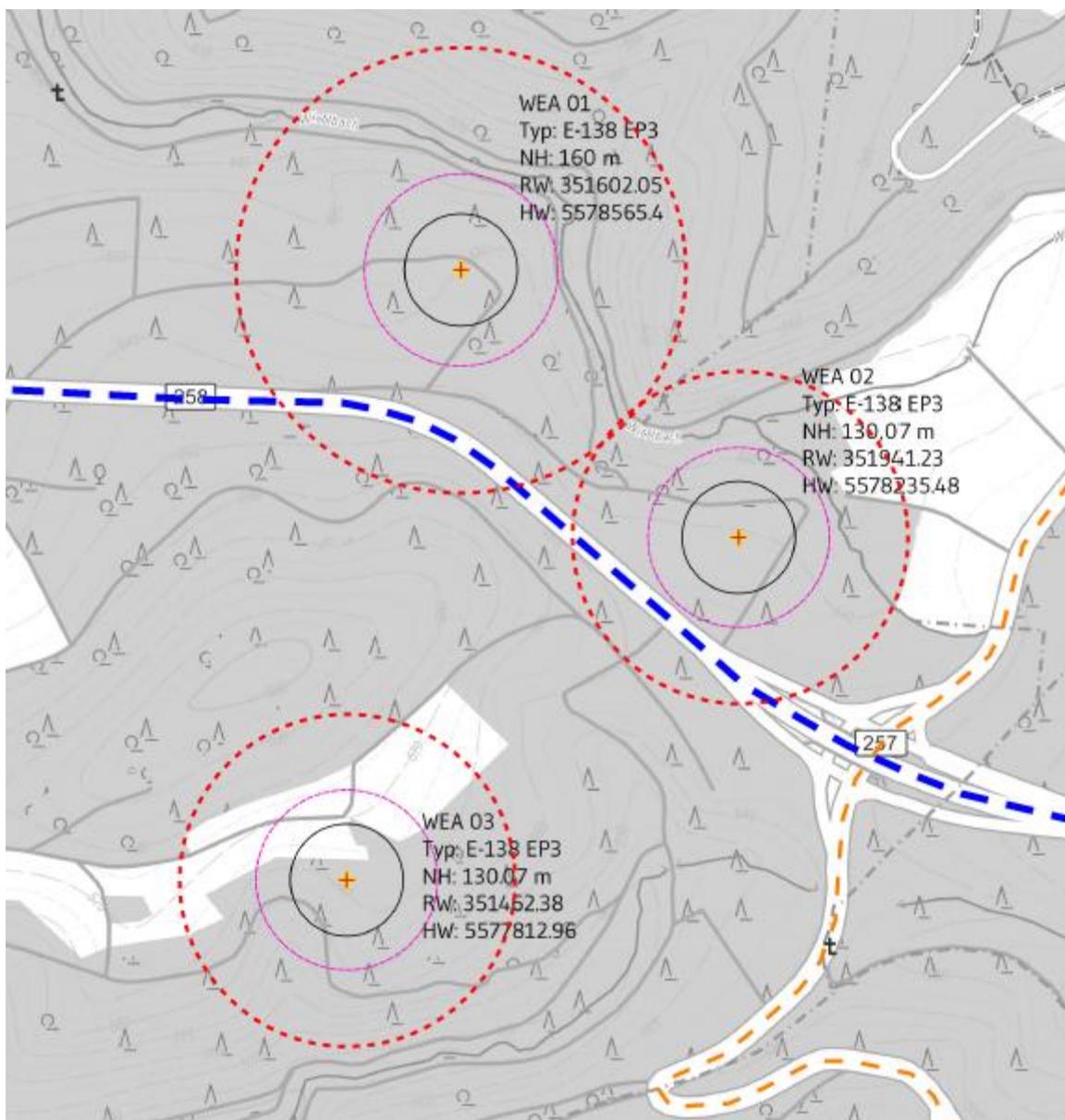


Abbildung 3: Gefährdungsradius – rot gestrichelt.

## 4.2 Detailanalyse Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B258 durch Eisabfall

### 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 /47/, /48/: 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.

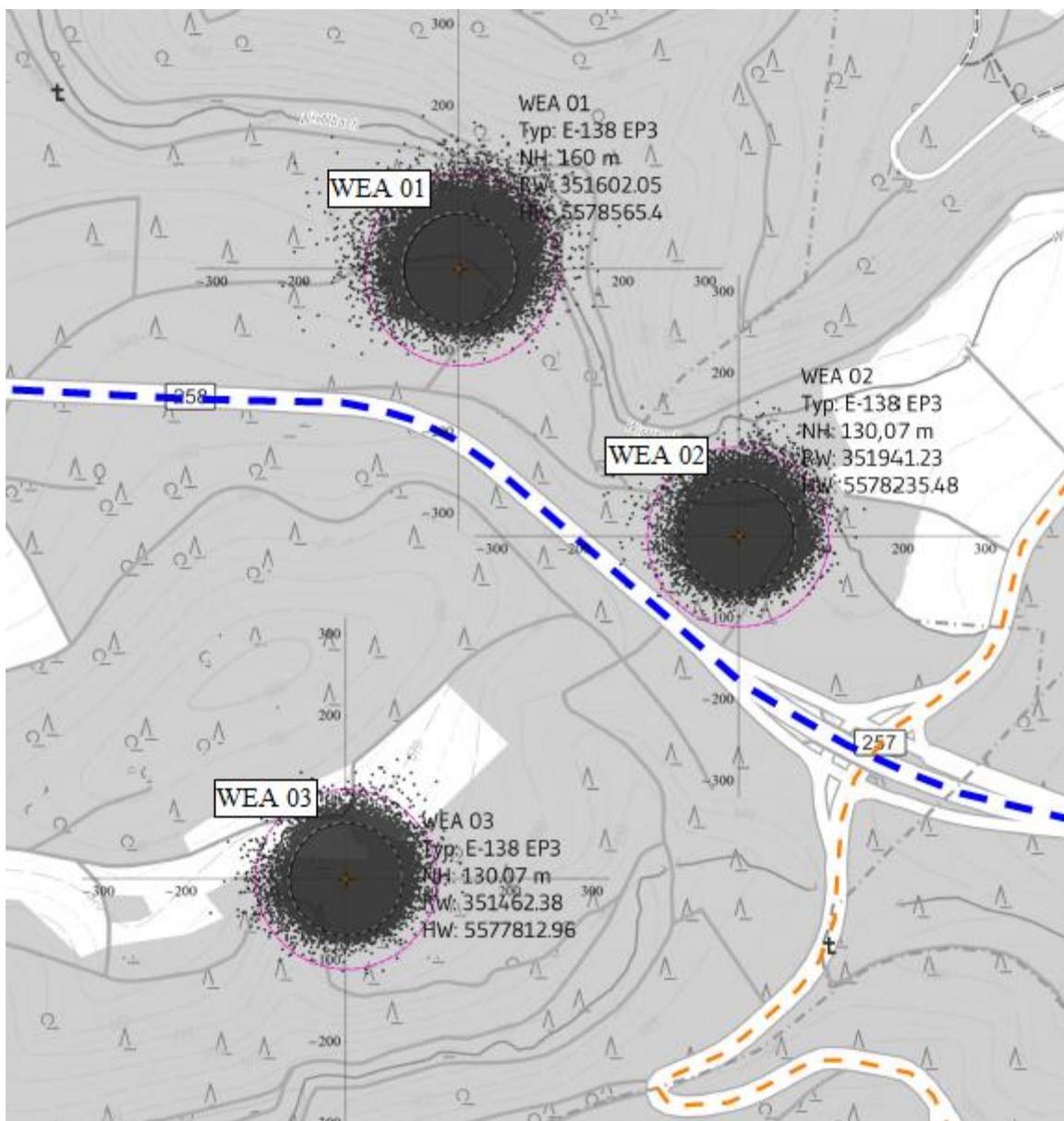
Für die Simulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- WEA-Typ: ENERCON E-138 EP3 E2 mit 160,00 m NH und 138,3 m D (WEA 01) und ENERCON E-138 EP3 E2 mit 130,07 m NH und 138,3 m D (WEA 02 und WEA 03).
- Drehzahl bei Eisabfall: entspricht dem Trudelnbetrieb. In Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird die entsprechende Drehzahl bestimmt (Drehzahlbereich Trudeln 0 – 2,5 U/min /11/) und bei der Ermittlung der Anfangsgeschwindigkeit des Eisobjekts berücksichtigt.
- Für die Verteilung der Windrichtung wurden die meteorologischen Daten des Standortes /4/ verwendet.
- Für die Verteilung der Windgeschwindigkeit wurden die meteorologischen Daten des Standortes /4/ verwendet (Weibull-Parameter A und k).
- Physikalische Parameter: Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , Luftdichte  $\rho = 1,300 \text{ kg/m}^3$  (konservativ aufgerundet bei  $0^\circ\text{C}$  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 /21/ 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  $(0, 2\pi)$  gleichverteilt.
- Für die Simulation des Eisabfalls wurde auf Basis des eingereichten Kartenmaterials /2/ und dem digitalen Geländemodell des Standortes die jeweilige Topographie der WEA-Standorte sowie der Bundesstraße B258 berücksichtigt.

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und die Weibullverteilung wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und gelten als vorläufig /4/. Die Daten werden als repräsentativ und richtig für den Standort vorausgesetzt und wurden nicht durch TÜV NORD geprüft. Wenn die vorläufigen Winddaten aktualisiert wurden, sollten die Ergebnisse der Risikobeurteilung mit den endgültigen Winddaten des Standortes neu geprüft werden.

#### 4.2.2 Trefferhäufigkeiten

Für die Häufigkeit von Eisabfall-Ereignissen wird gemäß Kapitel 4.1.1 ein Wert von 4.726 Eisabfall-Ereignissen pro WEA und Jahr angesetzt (34 Vereisungstage pro Jahr mit je 139 Eisabfall-Ereignissen). In Abbildung 4 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Eisabfall-Ereignissen der jeweiligen WEA dargestellt.

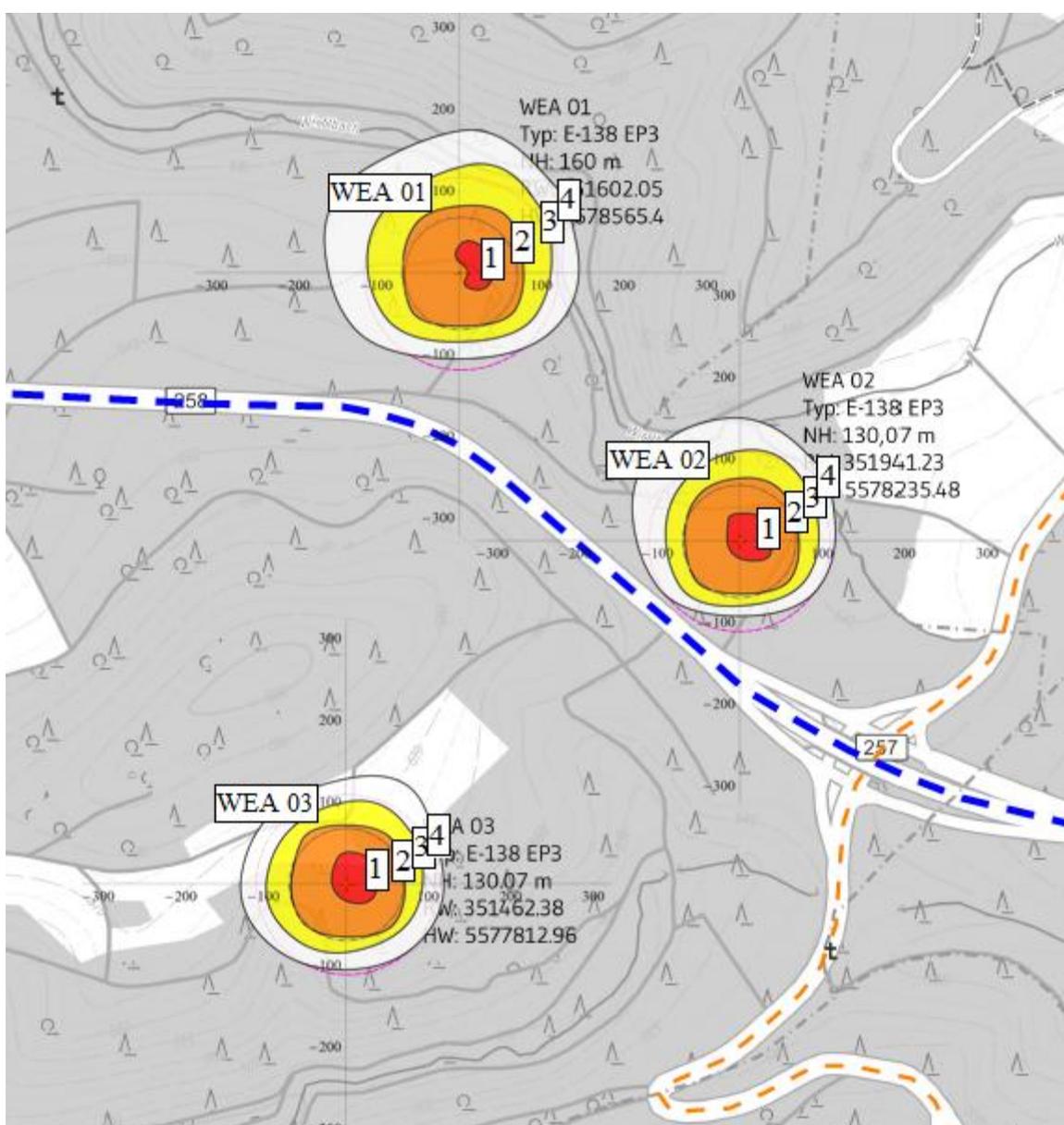


**Abbildung 4:** Auftreffpunkte bei Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 5 sind die Größenordnungen der Trefferhäufigkeiten pro m<sup>2</sup> und Eisabfall-Ereignis in der Umgebung der WEA durch farblich abgestufte Gefährdungsflächen dargestellt (Wahrscheinlichkeitszonen). Die Bedeutung der farblich abgestuften Gefährdungsflächen sowie der möglichen Treffer durch Eisabfall pro Jahr sind in der Tabelle 4 beschrieben.

Zone	Farbe	Trefferhäufigkeiten [1/m <sup>2</sup> ]	Trefferhäufigkeiten [1/(a m <sup>2</sup> )]
1	Rot	größer 1,0E-04	größer 4,7E-01
2	Orange	1,0E-05 bis 1,0E-04	4,7E-02 bis 4,7E-01
3	Gelb	1,0E-06 bis 1,0E-05	4,7E-03 bis 4,7E-02
4	Farblos	1,0E-07 bis 1,0E-06	4,7E-04 bis 4,7E-03
5*	Farblos	kleiner 1,0E-07	kleiner 4,7E-04

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



**Abbildung 5:** Trefferhäufigkeiten [1/m<sup>2</sup>] pro Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die Ergebnisse der standortbezogenen Simulation des Eisabfalls in Abbildung 5 zeigen, dass die Bundesstraße B258 knapp außerhalb des durch Eisabfall direkt gefährdeten Bereichs liegt. Die ermittelten Gefährdungsbereiche der WEA 01 bis WEA 03 überdecken die Bundesstraße B258 nicht. Abbildung 4 zeigt jedoch, dass bei der Simulation des Eisabfalls für die geplante WEA 02 (100.000 Eisobjekte) wenige Eisobjekte die Straße erreichen. Für die Bundesstraße B258 wird im Folgenden das Individualrisiko und die Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) betrachtet.

### 4.2.3 Individualrisiko

Auf Basis der in Abbildung 5 dargestellten Trefferhäufigkeiten wird das Risiko, im Straßenverkehr aufgrund Eisabfalls zu verunfallen, für die Bundesstraße B258 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Bundesstraße B258 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 der zu betrachtenden Person 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 m<sup>2</sup> im Bereich j pro Eisabfall (Ergebnis der Simulation).

$A_T$ : Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs (für einen lebensbedrohlichen Fahrzeugtreffer wird konservativ als Trefferfläche die Fläche der Windschutzscheibe mit 2 m<sup>2</sup> angesetzt). Diese Annahme ist für die Ermittlung des Individualrisikos insofern konservativ, als dass davon ausgegangen werden kann, dass nicht jeder Treffer der Windschutzscheibe diese durchschlägt bzw. einen lebensbedrohlichen Unfall zur Folge hat.

$P_{VA}$ : 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 ungeschützten Aufenthalts im Bereich j eintritt (Geschwindigkeit des Verkehrsteilnehmers  $v_F$ , Länge des Straßenabschnitts  $l_j$  aus Abbildung 3),  $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$ .

- Geschwindigkeit PKW 50 km/h

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]
02	Bundesstraße B258	7,8E-08

**Tabelle 5:** Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko bei Eisabfall.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von 7,8E-08 Treffer/a im Mittel ca. alle 12 Mio. 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 Bundesstraße B258 berücksichtigt.

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<sup>2</sup> im Bereich j pro Eisabfall (Ergebnis der Simulation).
- $h_{aVT}$ : Verkehrsdichte: Für die Verkehrsdichte auf der Bundesstraße B258 werden auf Basis der Angaben aus /8/ ca. 4.500 Fahrzeugen pro Tag angesetzt.
- $A_T$ : Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs (für einen bedrohlichen Fahrzeugtreffer wird als Trefferfläche die Fläche der Windschutzscheibe mit 2 m<sup>2</sup> angesetzt).
- $P_{Aj}$ : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines ungeschützten Aufenthalts im Bereich j eintritt (Geschwindigkeit der Fahrzeuge  $v_F$ , Länge des Straßenabschnitts  $l_j$  aus Abbildung 3).

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergibt sich die in Tabelle 6 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter Streckenabschnitt. 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	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(a*m)]
02	Bundesstraße B258	1,8E-06

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

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von 1,8E-06 Treffer/(m\*a) im Mittel ca. alle 564.600 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 /34/, /35/, /36/ 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 TÜV NORD bekannten Schadensereignisse in Deutschland (1997 bis Ende 2017 /34/, Daten der Betreiber-Datenbasis (BDB) /35/) und einer Auswertung von SenterNovem (Handboek Risicozonering Windturbines, Niederlande 2005 /36/). 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 /37/ entnommen werden.

#### 4.3.2 Randbedingungen

Die Berechnungen der Flugbahnen von Rotorblattbruchstücken erfolgen unter Variation der verschiedenen Parameter wie Bruchlage, Abwurfwinkel, Windrichtung und

Windstärke /48/. Es werden somit etwa 100.000 verschiedene Flugbahnen pro WEA simuliert.

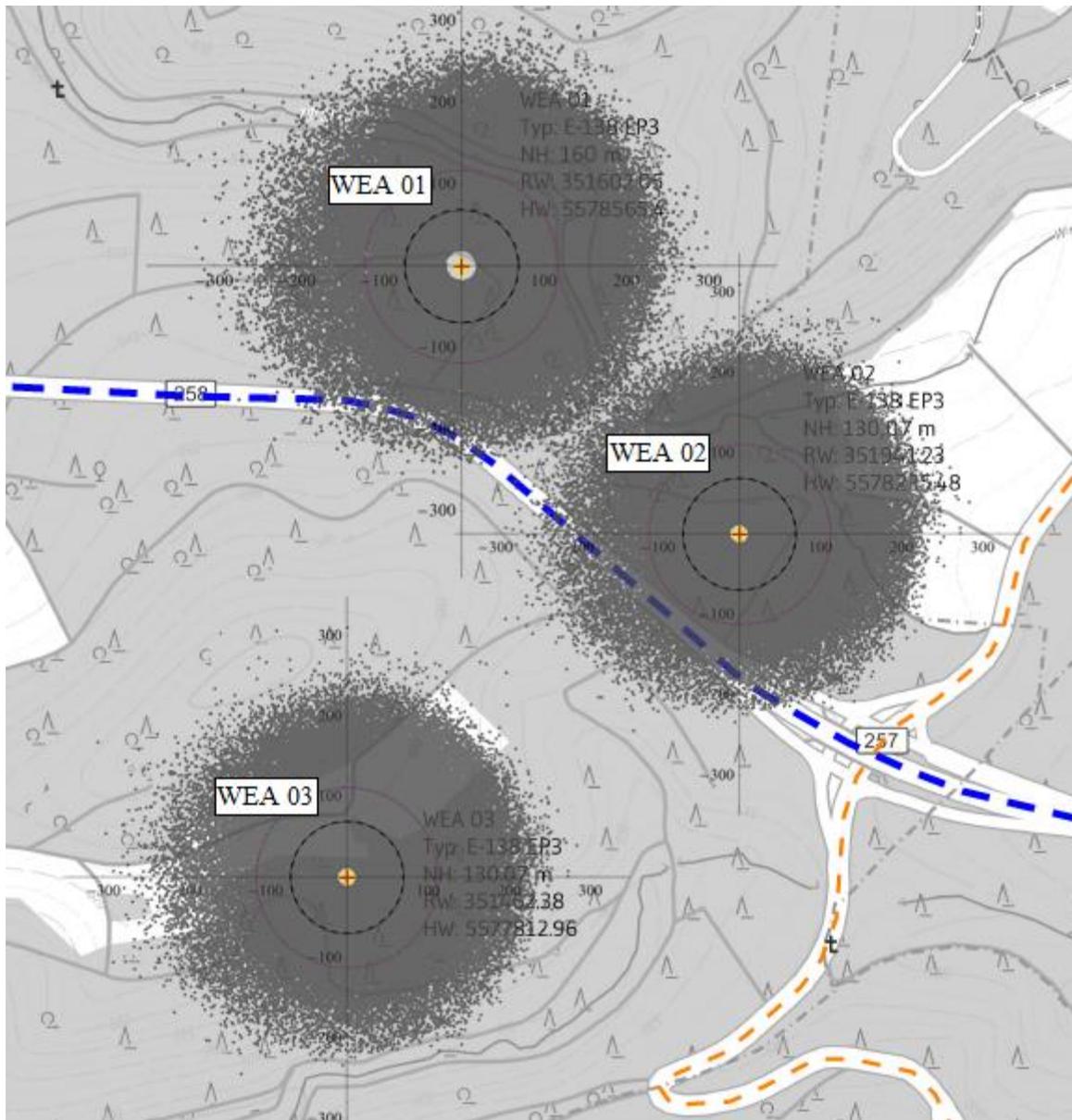
Für die Simulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- WEA-Typ: ENERCON E-138 EP3 E2 mit 160,00 m NH und 138,3 m D (WEA 01) und ENERCON E-138 EP3 E2 mit 130,07 m NH und 138,3 m D (WEA 02 und WEA 03).
- Drehzahl bei Rotorblattbruch:  $10,5 \text{ U/min} \cdot 120\% = 12,6 \text{ U/min}$ .
- Für die Verteilung der Windrichtung wurden die meteorologischen Daten des Standortes /4/ verwendet.
- Für die Verteilung der Windgeschwindigkeit wurden die meteorologischen Daten des Standortes /4/ verwendet (Weibull-Parameter A und k).
- Der Rotorblattbruch wird vorausgesetzt. Es wird angenommen, dass dieser für Windgeschwindigkeiten in einem Bereich [15 m/s bis 30 m/s] erfolgt. Diese Annahme ist aufgrund der Ausdehnung des Trefferbereiches für Windgeschwindigkeiten kleiner 15 m/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.
- Für die Simulation des Rotorblattbruchs wurde auf Basis des eingereichten Kartenmaterials /2/ und der topographischen Karte die Topographie des Geländes berücksichtigt.

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und die Weibullverteilung wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und gelten als vorläufig /4/. Die Daten werden als repräsentativ und richtig für den Standort vorausgesetzt und wurden nicht durch TÜV NORD geprüft. Wenn die vorläufigen Winddaten aktualisiert wurden, sollten die Ergebnisse der Risikobeurteilung mit den endgültigen Winddaten des Standortes neu geprüft werden.

#### 4.3.3 Trefferhäufigkeiten

In Abbildung 6 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Rotorblattbruch-Ereignissen je WEA dargestellt.

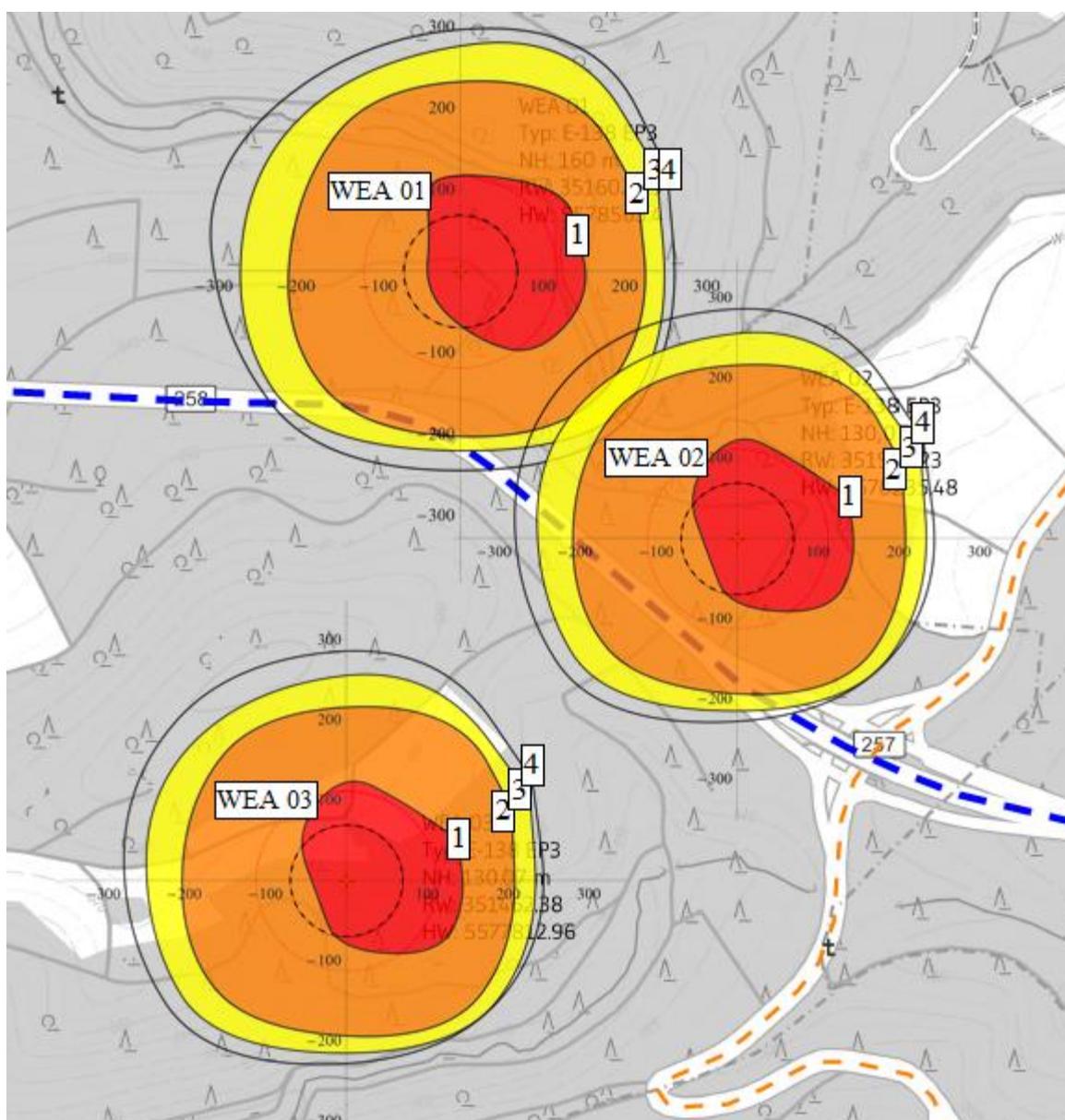


**Abbildung 6:** Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 6 sind die Größenordnungen der Trefferhäufigkeiten pro m<sup>2</sup> und Rotorblattbruch-Ereignis in der Umgebung der WEA durch farblich abgestufte Gefährdungsflächen dargestellt (Wahrscheinlichkeitszonen). Die Bedeutung der farblich abgestuften Gefährdungsflächen sowie der möglichen Treffer durch Rotorblattbruch pro Jahr und m<sup>2</sup> sind in der Tabelle 7 beschrieben.

Zone	Farbe	Trefferhäufigkeiten [1/m <sup>2</sup> ]	Trefferhäufigkeiten [1/(a m <sup>2</sup> )]
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/m<sup>2</sup>] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die Ergebnisse der standortbezogenen Simulation des Rotorblattbruchs in Abbildung 7 zeigen, dass die Bundesstraße B257 knapp außerhalb des durch Rotorblattbruch direkt gefährdeten Bereichs liegt. Die ermittelten Gefährdungsbereiche der WEA 01 und WEA 02 überdecken jedoch Teile der Bundesstraße B258. Für die Bundesstraße B258 wird im Folgenden das Individualrisiko und die Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) betrachtet.

#### 4.3.4 Individualrisiko

Auf Basis der in Abbildung 7 dargestellten Trefferhäufigkeiten wird das Risiko, im Straßenverkehr aufgrund Rotorblattbruchs zu verunfallen, für die Bundesstraße B258 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Bundesstraße B258 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 m<sup>2</sup> im Bereich j pro Rotorblattbruch (Ergebnis der Simulation).

$A_T$ : Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs (10 m<sup>2</sup>).

$P_{RA}$ : 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  $v_F/5$ , 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	Treffer eines Fahrzeugs [Treffer/a]
01	Bundesstraße B258	2,5E-11
02	Bundesstraße B258	5,1E-11
Gesamt	Bundesstraße B258	7,6E-11

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

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von 7,6E-11 Treffer/a im Mittel ca. alle 1,3E+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 Bundesstraße B258 berücksichtigt.

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<sup>2</sup> im Bereich j pro Rotorblattbruch (Ergebnis der Simulation).

$h_{aVT}$ : Verkehrsdichte: Für die Verkehrsdichte auf der Bundesstraße B258 werden auf Basis der Angaben aus /8/ ca. 4.500 Fahrzeugen pro Tag angesetzt.

$A_T$ : Zu berücksichtigende Trefferfläche [m<sup>2</sup>]: Fahrzeug: 10 m<sup>2</sup>.

$P_{Aj}$ : Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines ungeschützten 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 und Meter (Gefährdung des Straßenverkehrs).

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(a*m)]
01	Bundesstraße B258	2,8E-10
02	Bundesstraße B258	3,6E-10
Gesamt	Bundesstraße B258	6,4E-10

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

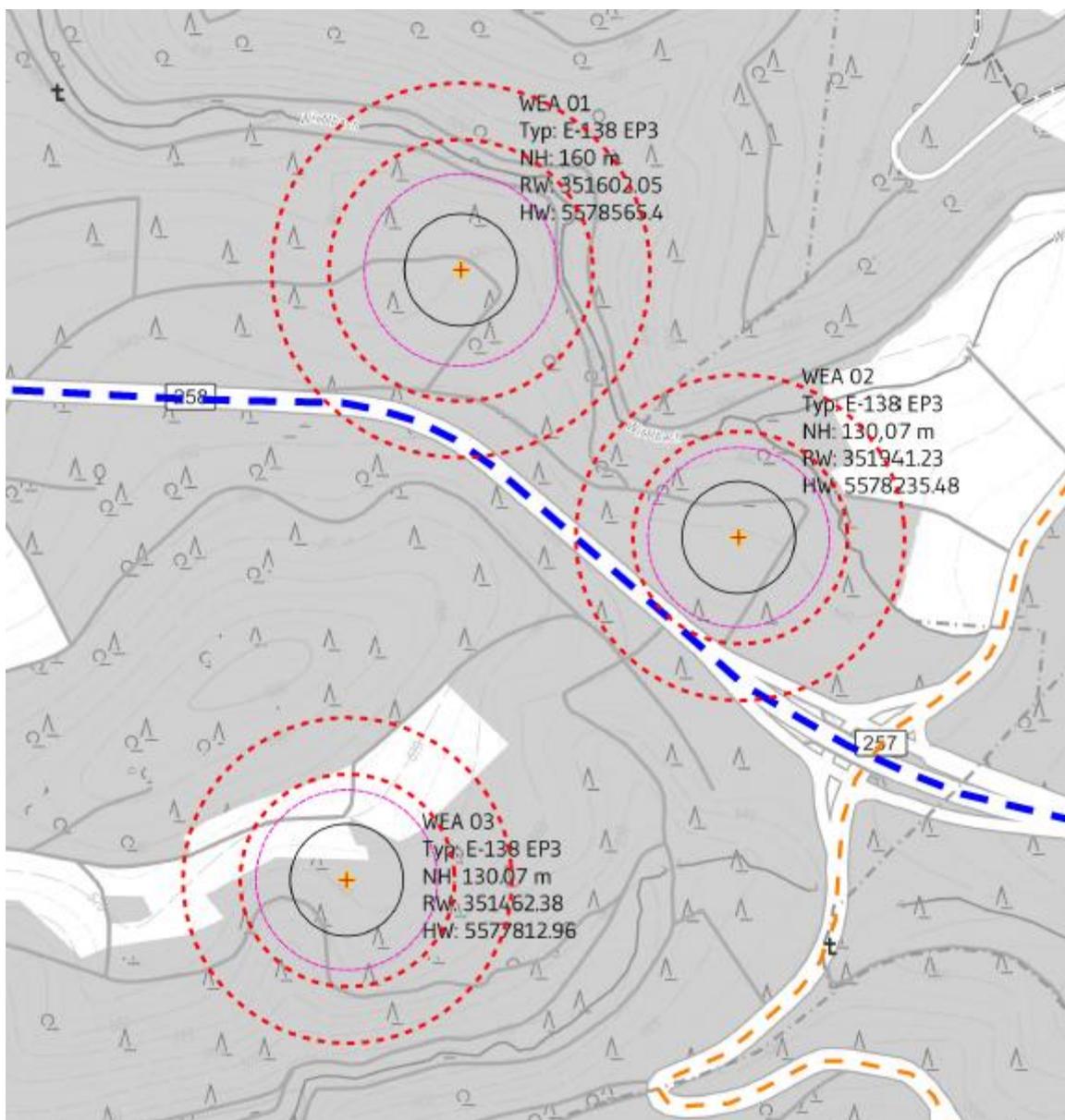
Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von  $6,4E-10$  Treffer/(m\*a) im Mittel ca. alle  $6,3E+09$  Jahre pro Meter Streckenabschnitt ein schwerer Unfall durch Rotorblattbruch. Eine Aussage, zu welchem Zeitpunkt sich ein Treffer ereignet, lässt sich hieraus nicht 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 /38/ oder bei extrem hohen Windgeschwindigkeiten /39/ 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 Bundesstraße B257 nicht durch ein mögliches Turmversagen der geplanten WEA betroffen ist. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Bundesstraße B258 durch ein mögliches Turmversagen der WEA 01 und der WEA 02 betroffen ist. Es zeigt sich, dass bei einem möglichen Turmversagen durch die WEA 01 der Turm inkl. Gondel nicht auf die Bundesstraße B258 fallen könnte, die Straße ist hierbei nur durch einen möglichen Treffer der Rotorblätter gefährdet. Ein Turmversagen der WEA 03 hat unter Berücksichtigung der Entfernung keine Gefährdung der Bundesstraße B258 zur Folge.



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

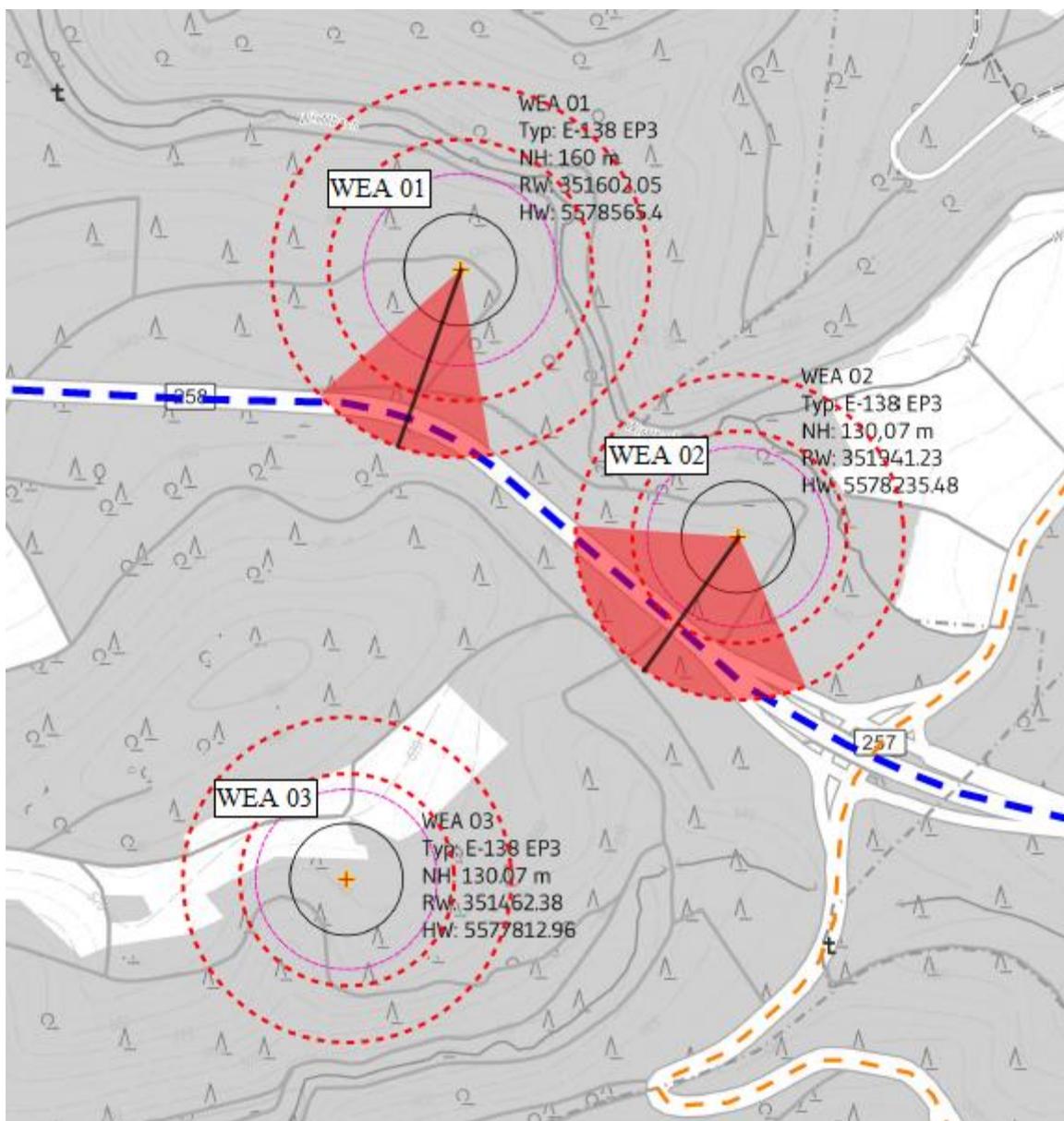
#### 4.4.1 Generische Ereignishäufigkeiten

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 /34/, /36/ 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 /34/) und einer Auswertung von SenterNovem (Handboek Risicozonering Windturbines, Niederlande 2005 /36/). 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 /37/ entnommen werden.

#### **4.4.2 Individualrisiko**

Ein Schadensereignis mit direkter Personen- bzw. Verkehrsgefährdung tritt für den Fall ein, dass schwere Teile der WEA auf exponierte Bereiche der Bundesstraße B258 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 Trefbereich durch Turmversagen für die Bundesstraße B258 in der Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9:** Gefährdungsfläche (hellrot) bei Turmversagen (schwarzer Balken).

Auf Basis der in Abbildung 9 dargestellten Gefährdungsflächen wird das Risiko, im Straßenverkehr aufgrund Turmversagens zu verunfallen, für die Bundesstraße B258 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Bundesstraße B258 konservativ eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt. Diese Annahme ist insofern konservativ, als dass die Expositionsdauer im Gefährdungsbereich erhöht wird.

Ein Turmversagen ist dann als personengefährdend einzustufen, wenn Zeit und Ort des Treffers des Turmobjektes mit der Zeit und dem Ort der zu betrachtenden Person 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, bei einem Turmversagen anwesend zu sein,  $P_{TA} = (225 \times 2)/365$  (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 beispielhaft Abbildung 8). 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 8,  $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$ ).
- $k_T$ : 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 aufgeführten Trefferhäufigkeiten pro Jahr (Individualrisiko).

WEA	Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
01	Bundesstraße B258	1,4E-10
02	Bundesstraße B258	6,2E-10
Gesamt	Bundesstraße B258	7,6E-10

**Tabelle 10:** Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Turmversagen.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von 7,6E-10 Treffer/a im Mittel alle 1,3E+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 Bundesstraße B258 berücksichtigt.

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 Bundesstraße B258 werden auf Basis der Angaben aus /8/ ca. 4.500 Fahrzeugen pro Tag angesetzt.

$P_{Sj}$ : Wahrscheinlichkeit, dass der Turm das Schutzobjekt trifft / in Richtung Schutzobjekt fällt (siehe Abbildung 8). 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 8,  $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$ ).

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

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
01	Bundesstraße B258	2,4E-09
02	Bundesstraße B258	6,6E-09
Gesamt	Bundesstraße B258	9,0E-09

**Tabelle 11:** Trefferhäufigkeiten pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Turmversagen.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von 9,0E-09 Treffer/(m\*a) im Mittel alle 1,1E+08 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.

Die Ergebnisse dieser Risikobeurteilung gelten nur unter Annahme der Richtigkeit der eingereichten Winddaten /4/ (siehe Kapitel 4.2.1).

## 6 Zusammenfassung und Risikobewertung

Am Standort Wiesemscheid plant der Auftraggeber, die Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG, die Errichtung einer WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 mit 160,0 m NH und 138,25 m D (WEA 01) und zwei WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 E2 mit 130,07 m NH und 138,25 m D (WEA 02 und WEA 03). In der Nähe der geplanten WEA verlaufen die Bundesstraße B257 und die Bundesstraße B258. Darüber hinaus befinden sich in näherer Umgebung der geplanten WEA einige Forst- und Wirtschaftswege /7/.

Im Rahmen der gutachtlichen Stellungnahme galt es zu prüfen und zu bewerten, ob eine besondere Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B257 und der Bundesstraße B258 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 den Prüfungen in /11/, /13/ und /15/ wurden für die geplanten Eiserkennungssysteme der aktuelle Stand der Technik bestätigt. Durch den Betrieb

zweier unabhängiger Eiserkennungssysteme erhöht sich die Sicherheit weiter, da eine Verhinderung von Eisabwurf auch bei Ausfall eines Systems sichergestellt ist.

Auf Basis der ermittelten Gefährdung durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen ist zu erkennen, dass Teile der landwirtschaftlich genutzten Wirtschaftswege in der näheren Umgebung der geplanten WEA sowie Teile der Bundesstraße B258 betroffen sind. Die Bundesstraße B257 ist nicht von den Gefährdungsradien überdeckt. Eine unzulässige Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B257 durch Eisabfall, Rotorblattbruch oder Turmversagen der geplanten WEA ist somit nicht zu unterstellen.

Für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Forst- und Wirtschaftswege ist eine Gefährdung durch Eisabfall nicht zu unterstellen, da die Wintermonate außerhalb der üblichen Wirtschaftsperiode liegen und im Winter mit weniger land- und forstwirtschaftlichem 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 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 das Metaldach eines Fahrzeuges durchschlagen hat.

Für die Bewertung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmern im öffentlichen Straßenverkehr auf der Bundesstraße B258 werden die Gefährdung einzelner Verkehrsteilnehmer (Individualrisiko, siehe Kapitel 4.2.3) und die Gefährdung des Straßenverkehrs der betroffenen Verkehrsabschnitte (siehe Kapitel 4.2.4) durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen ermittelt. Die Ergebnisse aus Kapitel 4 zeigen, dass die Bundesstraße B258 durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen der WEA 01 und WEA 02 betroffen sein kann. Die ermittelten Gefährdungen werden mit den in Kapitel 3 hergeleiteten Risikogrenzwerten verglichen. Zusammenfassend wurden die folgenden Ergebnisse und daraus resultierenden Empfehlungen ermittelt:

- das ermittelte Individualrisiko für Verkehrsteilnehmer durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen der WEA 01 und WEA 02 liegt unterhalb des hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs (siehe Kapitel 3.1).
- die ermittelte Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) durch Eisabfall der WEA 01 liegt unterhalb Risikogrenzwertbereichs (ALARP-Bereich, siehe Kapitel 3.2).
- die ermittelte Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) durch Eisabfall der WEA 02 liegt knapp innerhalb des hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs (ALARP-Bereich, siehe Kapitel 3.2). Hier sind in Anlehnung an das ALARP-Prinzip /43/ Maßnahmen zur Risikominderung zu prüfen und ggf. umzusetzen.

- die ermittelte Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) durch Rotorblattbruch und Turmversagen der WEA 01 und WEA 02 liegt knapp innerhalb des hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs (ALARP-Bereich, siehe Kapitel 3.2).

### **Risikoreduzierende Maßnahmen**

Unter Berücksichtigung der Eiserkennungssysteme (siehe Kapitel 4.1.2) sowie der Ergebnisse aus Kapitel 4 empfiehlt TÜV NORD die folgenden Maßnahmen zur weiteren Minderung des Restrisikos im Sinne des ALARP-Prinzips:

- Die Funktionsfähigkeit der Eiserkennungssysteme der WEA sollte im Rahmen der Inbetriebnahme /29/, /30/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /49/ geprüft werden. Betriebsbegleitend ist die Funktionalität der Eiserkennungssysteme im Rahmen der vorgesehenen Prüfungen des Sicherheitssystems und der sicherheitstechnisch relevanten Komponenten der WEA /29/, /30/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /49/ aufzuzeigen. Für die Inbetriebnahme der Eiserkennungssysteme sollte die Anlernphase der Eiserkennungssysteme 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 Forst- und Wirtschaftswegen auf die Gefährdung durch Eisabfall aufmerksam zu machen. Die Schilder sind so aufzustellen, dass sie von möglichen Benutzern der Wege frühzeitig erkannt werden. Hierbei können die Schilder durch ein eindeutiges Piktogramm ergänzt werden, welches auf die Gefährdung durch Eisabfall hinweist.
- Parkposition der WEA bei erkanntem Eisansatz: Wurde durch das Eiserkennungssystem Eisansatz an den geplanten WEA erkannt, sollte der Rotor der geplanten WEA in eine Parkposition parallel zur Bundesstraße B258 gefahren und dort fixiert werden. Hierbei sollte der Rotor in eine Position gefahren werden mit welcher der größtmögliche Abstand zur Straße sichergestellt ist.
- Die Mitarbeiter der betroffenen Forstbetriebe sollten im Rahmen der Sicherheitsunterweisung nach §12 Arbeitsschutzgesetz /49/ über die Gefährdungen durch Eisabfall unterrichtet werden. Zur Unterweisung gehören auch die vorgesehenen Warnhinweise, welche eine Eisabfallgefahr anzeigen. Durch den Betreiber der geplanten WEA sind die hierfür benötigten Unterlagen für die betroffenen Forstbetriebe zur Verfügung zu stellen.

Unter Berücksichtigung der Tatsache,

- dass die Risikobeurteilung konservativ durchgeführt wurde,
- dass im Winter in den Wäldern am Standort grundsätzlich mit einem Risiko durch Eisabfall und brechenden Bäumen zu rechnen ist,
- 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 WEA nach erkanntem Eisansatz erst dann manuell vor Ort neugestartet werden kann, wenn ein Eisansatz durch Sichtprüfung ausgeschlossen wurde,
- dass über die Bäume am Standort ein natürlicher Schutz gegenüber herabfallenden Eisobjekten von einer vereisten WEA besteht (Abschattung),
- dass die öffentlich zugänglichen Wege (Forst- und Wirtschaftswege) in unmittelbarer Nähe der WEA gemäß /7/ hauptsächlich land- und forstwirtschaftlich genutzt werden (untergeordnete Freizeitnutzung) und im Winter, außerhalb der Wirtschaftsperiode, von einer eher geringen Frequentierung ausgegangen werden kann,
- dass davon auszugehen ist, dass der land- und forstwirtschaftliche Verkehr überwiegend mit geschützten Maschinen erfolgt,
- 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 die Bundesstraße B257 als akzeptabel sowie für die Bundesstraße B258 als tolerabel zu betrachten.

Unter Berücksichtigung

- der mit der Verwaltungsvorschrift Technischen Baubestimmungen des Bundeslandes Rheinland-Pfalz /31/ eingeführten technischen Regeln Anlage 2.7/12: „Gefahr des Eisabfalls und Eisabwurfs bei Unterschreitung eines Abstands von  $1,5 \times (\text{Rotordurchmesser} + \text{Nabenhöhe})$ “

sowie in Anlehnung an

- das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /31/ §5 Abs. 1 Nr. 1: „Vermeidung sonstiger Gefahren“

ist eine konkrete Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B257 oder der Bundesstraße B258 durch die Errichtung der geplanten WEA 01 bis WEA 03 am Standort Wiesemscheid durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen nach Umsetzung der genannten 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]
ALARP	As Low As Reasonable Practicable	
a	Jahr	[a]
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	
D	Rotordurchmesser	[m]
GBE	Statistiken der Gesundheitsberichterstattung des Bundes	
h	Stunde	[h]
k	Formparameter der Weibull-Verteilung	[-]
Kfz	Kraftfahrzeug	
LKW	Lastkraftwagen	
MEM	Minimalen endogenen Sterblichkeit	
min	Minute	[min]
NH	Nabenhöhe	[m]
$P_{\text{Nenn}}$	Nennleistung	[MW]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]
WEA	Windenergieanlage(n)	

## 9 Literatur- und Quellenangaben

- /1/ Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG. Angaben zu den WEA-Spezifikationen. Übermittelt durch Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 15.02.2021.
- /2/ Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG. Lageplan und Angaben zur Überhöhung: Windpark Wiesemscheid, Stand: 26.08.2019. Übermittelt durch Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 26.08.2019.
- /3/ Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG. Übersichtsplan: Windpark Wiesemscheid Übersichtsplan, Stand: 26.08.19. Übermittelt durch Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 26.08.2019.
- /4/ Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG. Angaben zu den meteorologischen Daten: Vorläufige Winddaten. Übermittelt durch Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 04.07.2018 und E-Mail vom 10.07.2018.
- /5/ Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG. Angaben zum Eiserkennungssystem. Übermittelt durch Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit E-Mails vom 26.08.2019 und vom 15.02.2021.
- /6/ Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG. Manuelles Starten von ENERCON Windenergieanlagen nach Stopp durch Eisansatz durch die technische Betriebsführung, Stand: August 2018. Übermittelt durch Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 10.09.2018.
- /7/ Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG. Beschreibung der Schutzobjekte. Übermittelt durch Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 12.01.2016 und Email vom 22.02.2016.
- /8/ Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG. Angaben zur Verkehrsdichte Übermittelt durch Windpark Wiesemscheid GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 12.01.2016 und mit E-Mail vom 15.06.2018.
- /9/ ENERCON GmbH. Technische Beschreibung ENERCON Windenergieanlagen Eisansatzerkennung, D0154407-6, Stand 23.02.2018.
- /10/ Cattin, R. Zuverlässigkeit der ENERCON Eiserkennung. Schreiben an ENERCON vom 22.03.2012. Genossenschaft METEOTEST. 2012.
- /11/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Gutachten zur Bewertung der Funktionalität von Eiserkennungssystemen zur Verhinderung von Eisabwurf an ENERCON Windenergieanlagen: Eisansatzerkennung nach dem ENERCON Kennlinienverfahren, Bericht Nr.: 8111881239 Rev.6. vom 04.06.2020.
- /12/ ENERCON GmbH. Technische Beschreibung eologix-Eisansatzerkennung, D0676290-1a. Stand: 17.01.2020.
- /13/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Gutachten Eisansatzerkennung an Rotorblättern von ENERCON Windenergieanlagen durch das ENERCON-

- Kennlinienverfahren und externe Eissensoren. Bericht Nr.: 8111 7247 373  
Rev.0 vom 17.06.2020.
- /14/ DNV GL - Energy Renewables Certification. Komponentenzertifikat Eiserkennungssystem (BasisstationBET214t, Sensor CET214t). CCA-DNVGL-SE-0441-00526, September 2020.
  - /15/ DNV GL - Energy Renewables Certification. Gutachten eologix Eiserkennungssystem BET214t/CET214t, Bericht-Nr: P-GL-IV-49365-1. Stand: 25.07.2018.
  - /16/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.
  - /17/ 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.
  - /18/ Rosten, G. et al. State-of-the-Art of Wind Energy in Cold Climates. IEA Wind Task 19. Edition October 2012.
  - /19/ Storck, F. Influence of wind conditions under icing conditions on the result of a risk assessment. Winterwind international wind energy conference. Piteå 2015.
  - /20/ Deutscher Wetterdienst. Freie Klimadaten, Eistage Deutschland 1981-2010 (Rasterdaten). www.dwd.de, Juni 2017.
  - /21/ Morgan, C. et al. Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk? Wind Energy Production in Cold Climates. Bristol. 1996.
  - /22/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.
  - /23/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.
  - /24/ 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.
  - /25/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1; Wind turbines - Part 1: Design requirements; Third Edition; August 2005 + Amendment 1: Oktober 2010.
  - /26/ 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.
  - /27/ COST-727. Atmospheric Icing on Structures. Measurements and data collection on icing: State of the Art Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp. Zürich. 2006.
  - /28/ DIN 1055-5. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten. Berlin. Juli 2005.
  - /29/ DIBt. Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Berlin. Fassung Oktober 2012.

- /30/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Hamburg. Ausgabe 2010.
- /31/ Ministerium der Finanzen, Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (VV-TB). Fassung November 2019.
- /32/ BImSchG 2017. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Deutschland. Fassung vom 29.05.2017.
- /33/ 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.
- /34/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG. Statistische Auswertung von Pressemeldungen über Havarien von Windenergieanlagen im Zeitraum 1997 bis 2016 (Internetrecherche). Hamburg. 2017.
- /35/ Keiler, J. Betreiber-Datenbasis (BDB). Daten der Jahrgänge 2000 bis 2011. Rade. 2011.
- /36/ Rademakers, L. et al. Handboek Risicozonering Windturbines. Versie 2, jan2005. SenterNovem, Nederland. 2005.
- /37/ DEWI, Deutsches Windenergie-Institut, DEWI GmbH. [www.dewi.de](http://www.dewi.de). 2013.
- /38/ [osthessen-news.de](http://osthessen-news.de). Versagte das Bremssystem? Ursachenforschung nach Windrad-Crash. Kirtorf. Meldung vom 20.06.2011.
- /39/ [rundschau-online.de](http://rundschau-online.de). Windrad stürzt auf Acker. Meldung vom 16.12.2013.
- /40/ DIN EN 50126. Bahnanwendungen. Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS). März 2000.
- /41/ GBE. Heft 52 – Sterblichkeit, Todesursachen und regionale Unterschiede. Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE). 2013.
- /42/ D STATIS. Verkehr, Verkehrsunfälle, Zeitreihen. Statistisches Bundesamt. 2018.
- /43/ Trbojevic V.M. 2005. Risk Criteria in EU. ESREL'05, Poland, 27.-30. Juni 2005.
- /44/ Störfall-Kommission. 2004. Bericht, Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung. SFK-GS-41.
- /45/ Hauptmanns, U. & Marx, M. Kriterien für die Beurteilung von Gefährdungen durch technische Anlagen. Verlag VdTÜV - Band 18. Berlin. November 2010.
- /46/ Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). <http://www.gesetze-im-internet.de>. Gelesen am 10.12.2018. Stand 2017.
- /47/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.

- /48/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.
- /49/ Bundesverband WindEnergie e.V. Anforderungen an den Sachverständigen für Windenergieanlagen. Berlin. 21.09.2007.
- /50/ Arbeitsschutzgesetz. <http://www.gesetze-im-internet.de>. Gelesen am 04.03.2016. Stand 2009.
- /51/ NASA: Ice Accretions and Icing Effects for Modern Airfoils, April 2000.