TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Energie- und Systemtechnik

Gutachtliche Stellungnahme zur Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall und Rotorblattbruch am Windenergieanlagen-Standort Oberperl

Erstellt im Auftrag für

Windpark Oberperl GmbH & Co. KG
Bremen

Revision 0 Hamburg, 03.03.2020

Revision	Datum	Änderung
0	03.03.2020	Erste Ausgabe

Gegenstand:	Risikobeurteilung am Windenergieanlagen-Standort Oberperl
Referenz-Nr.:	2019-WND-RB-280-R0
Auftraggeber:	Windpark Oberperl GmbH & Co. KG Stephanietorsbollwerk 3 28217 Bremen
Anlagenhersteller:	Vestas Wind Systems A/S Hedeager 42 8200 Aarhus N, Dänemark

WEA-Typ:	**P_{Nenn} [MW]**	**D [m]**	**NH [m]**
Vestas V150	5,6	150,0	166,0

Vom Auftraggeber eingereichte Unterlagen:

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

Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:

Verfasser	B.Sc. F. Lautenschlager Sachverständiger	Hamburg, 03.03.2020
Geprüft durch	Dr. M. Polster Sachverständige	Hamburg, 03.03.2020

Für weitere Auskünfte:

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

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

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung 6

2 Angaben zum Windenergieanlagen-Standort 8

3 Bewertungsmaßstab 9

3.1 Individualrisiko 9

3.2 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) 10

4 Risikoanalyse 12

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 16

4.2 Detailanalyse Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Autobahn A8 18

4.2.1 Randbedingungen 18

4.2.2 Trefferhäufigkeiten 18

4.2.3 Individualrisiko 21

4.2.4 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) 22

4.3 Rotorblattbruch 23

4.3.1 Generische Ereignishäufigkeiten 23

4.3.2 Randbedingungen 24

4.3.3 Trefferhäufigkeiten 25

4.3.4 Individualrisiko 27

4.3.5 Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) 28

5 Modell- und Datenunsicherheiten 29

6 Zusammenfassung und Risikobewertung 29

7 Rechtsbelehrung 33

8 Formelzeichen und Abkürzungen 34

9 Literatur- und Quellenangaben 35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan /2/. ... 8
Abbildung 2: Fallweiten bei 20,0m/s Windgeschwindigkeit. ... 16
Abbildung 3: Gefährdungsradius – rot gestrichelt (v = 20,0m/s). ... 17
Abbildung 4: Auftreffpunkte bei Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt. ... 19
Abbildung 5: Trefferhäufigkeiten [1/m²] pro Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt. ... 20
Abbildung 6: Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt... 25
Abbildung 7: Trefferhäufigkeiten [1/m²] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt. ... 26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung. ... 14
Tabelle 2: Idealisierte Eisobjekte. ... 16
Tabelle 3: Ermittelte maximale Fallweiten. ... 16
Tabelle 4: Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Eisabfall), *alles außerhalb der Zone 4. ... 20
Tabelle 5: Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko bei Eisabfall. ... 22
Tabelle 6: Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Eisabfall. ... 23
Tabelle 7: Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Rotorblattbruch).*alles außerhalb der Zone 4. ... 26
Tabelle 8: Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr bei Rotorblattbruch. ... 28
Tabelle 9: Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Rotorblattbruch. ... 29
Tabelle 10: Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr insgesamt. ... 30
Tabelle 11: Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs insgesamt. ... 30

1 Aufgabenstellung

Am Standort Oberperl im Saarland plant der Auftraggeber, die Windpark Oberperl GmbH & Co. KG, die Errichtung von drei Windenergieanlagen (WEA) des Typs Vestas V150 mit 166,0m Nabenhöhe (NH) und 150,0m Rotordurchmesser (D). Die Risikobeurteilung wird für die WEA 1 durchgeführt. In der Nähe der geplanten WEA 1 verläuft die Autobahn A8.

Gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /24/ §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) sind im Sinne des BImSchG als „sonstige Gefahr“ zu betrachten (siehe auch /25/), 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 geplante WEA beeinträchtigt wird. In der durch das Bundesland Saarland eingeführten Liste der Technischen Baubestimmungen /22/ werden aufgrund einer Gefahr durch Eisabwurf Mindestabstände definiert. Nach /22/ gelten Abstände größer als 1,5 x (D + NH) im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen gemäß DIN 1055-5 /20/ 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 Oberperl GmbH & Co. KG mit Schreiben vom 19.11.2019 mit der Erstellung einer Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall und Rotorblattbruch beauftragt worden. Die folgende Vorgehensweise ist Gegenstand der Beauftragung:

Erstellung einer gutachtlichen Stellungnahme zur möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Autobahn A8 durch Eisabwurf/Eisabfall und Rotorblattbruch der geplanten WEA. Die Stellungnahme beinhaltet die folgenden Arbeitsschritte:

1. Darstellung des geplanten Projekts mit Angaben zu den Eigenschaften der betrachteten WEA und dem Standort.
2. Ermittlung und Darstellung von Kenngrößen zur Risikobewertung.
3. Qualitative Prüfung des Konzepts der Eiserkennung der WEA des Typs Vestas V150.
4. Ermittlung und Darstellung der möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Autobahn A8 durch herabfallende Eisobjekte und Rotorblattbruch von der betrachteten WEA des Typs Vestas V150 am WEA-Standort Oberperl.
5. Risikobewertung zur Einordnung der Ergebnisse.

Eine weitere Analyse des möglichen Schadensverlaufs durch Eisabwurf/Eisabfall und Rotorblattbruch (z.B. Gebäudeschäden, Fahrzeugschäden, Ausbreitungsrechnungen für Gefahrstoffe, Schadensbeurteilung, Untersuchung weiterer Schutzobjekte) erfolgt nicht im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme. Die Risikobeurteilung erfolgt auf Grundlage der eingereichten Unterlagen. Es wurde ausschließlich die Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Autobahn A8 durch Eisabwurf/Eisabfall und Rotorblattbruch durch die neugeplante WEA 1 beurteilt, mögliche weitere Schutzobjekte in der Umgebung der betrachteten WEA sowie die Beurteilung weiterer Gefährdungen sind nicht Bestandteil der vorliegenden gutachtlichen Stellungnahme. Für die WEA-Spezifikationen wurden die benannten Spezifikationen berücksichtigt (siehe Seite 2).

Die in dieser Stellungnahme verwendeten Randbedingungen und Rechnungen zum Eisabwurf und Eisabfall basieren auf den aktuellen internationalen Empfehlungen für Risikobeurteilungen von Eisabwurf und Eisabfall von WEA /42/.

2 Angaben zum Windenergieanlagen-Standort

Die Lage der geplanten WEA 1 des Typs Vestas V150 ist dem Lageplan in Abbildung 1 zu entnehmen.

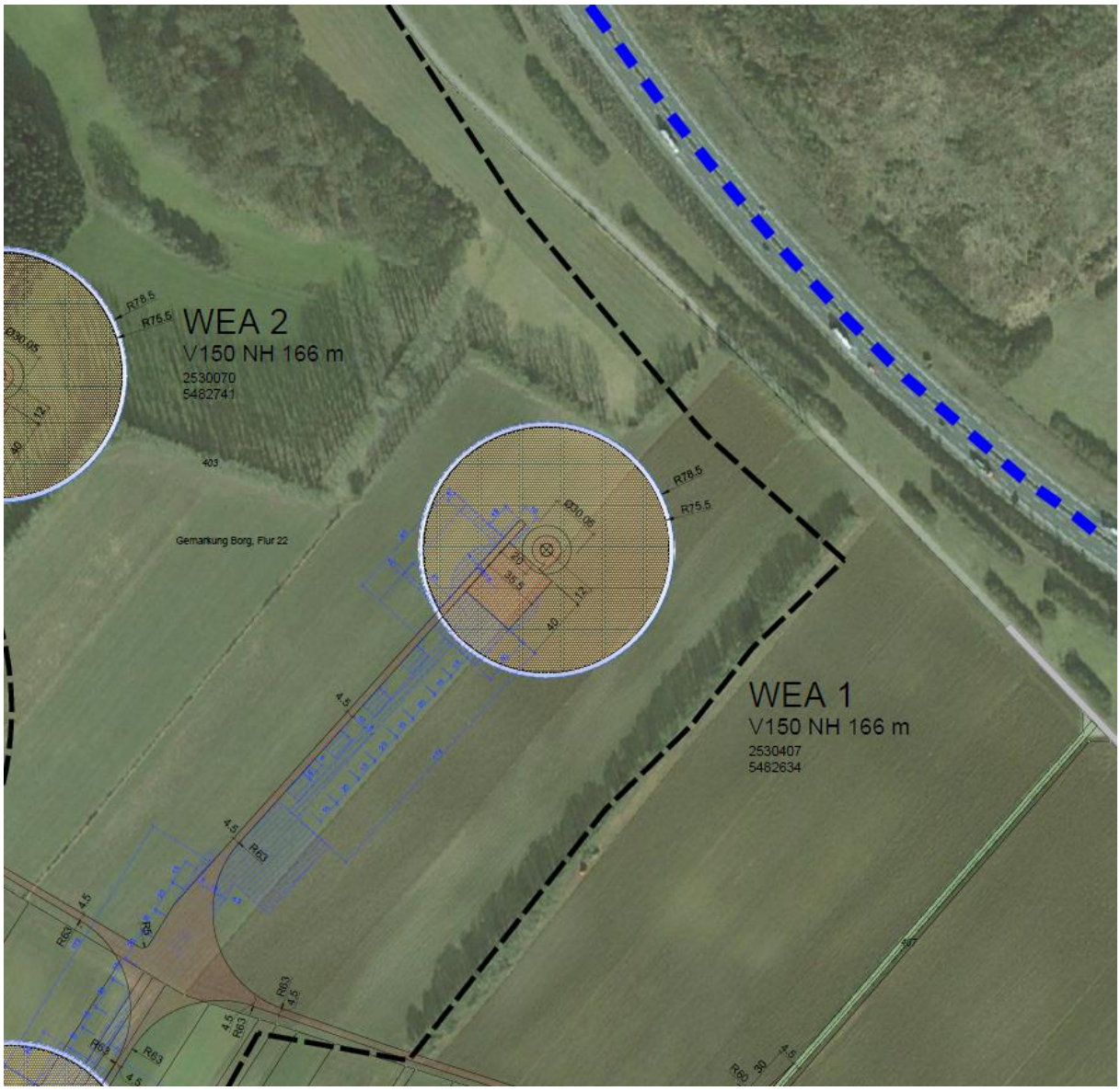

Abbildung 1: Lageplan /2/.

Das umliegende Gelände der geplanten WEA am Standort Oberperl ist durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt. In der Nähe der geplanten WEA 1 befindet sich die Autobahn A8 (siehe Abbildung 1, blau gestrichelte Linie). Der kürzeste Abstand der WEA 1 (WEA-Mittelpunkt) zur Autobahn A8 beträgt ca. 217m.

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

3 Bewertungsmaßstab

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

- Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) /30/.
- Statistiken der Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE) /31/.
- Statistiken der Verkehrsunfälle des Statistischen Bundesamtes /32/.
- Risk Criteria in EU /34/.
- Deutsche Störfall-Kommission - Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung /35/.
- Auswertung des VdTÜV /36/.
- Internationale Empfehlung zur Risikobeurteilung Eisabwurf und Eisabfall /42/.

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) /30/).

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 /32/ beurteilt (siehe Kapitel 3.2).

3.1 *Individualrisiko*

<u>MEM-Prinzip</u>

Das Prinzip der MEM /30/ beschreibt die gegebene Sterberate pro Person und Jahr unter Berücksichtigung verschiedener Ursachen aus den Bereichen Freizeit, Arbeit und Verkehr. In wirtschaftlich gut entwickelten Ländern liegt die minimale endogene Sterblichkeit in der Gruppe der 5- bis 15-jährigen /30/. Die in /30/ getätigten Angaben decken sich mit aktuellen Erhebungen des GBE /31/. 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 /31/ 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 /36/ 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 zueinander 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) /34/ 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 geplante 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 /33/ 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 /32/. 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 /30/). In Anlehnung an die Vorgaben der StVO /33/ 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 /32/. 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 /32/ die gesamte Anzahl der Unfälle mit Personenschaden, 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 Personenschadenauf Autobahnen zu 3,7E-01 pro km und Jahr. Dies entspricht etwa einem schweren Verkehrsunfall mit tödlichem Ausgang bzw. schwerverletzten Personen alle 3 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 auf Autobahnen zu 3,7E-02 schwere Verkehrsunfälle mit Personenschaden je Kilometer und Jahr bzw. zu 3,7E-05 pro Meter und Jahr.

In Anlehnung an das ALARP-Prinzip /34/ leitet sich daraus der folgende Risikogrenzwertbereich für die Beurteilung der Gefährdung des Straßenverkehrs auf Autobahnen ab:

- Untere Grenze: Der untere Grenzwert der Gefährdung des Straßenverkehrs liegt in einer Größenordnung von 3,7E-06 pro Meter und Jahr.
- Obere Grenze: Der obere Grenzwert der Gefährdung des Straßenverkehrs liegt in einer Größenordnung von 3,7E-05 pro Meter und Jahr.

Bezogen auf die am Standort Oberperl zu betrachtenden Straßenabschnitte bedeutet dies, dass eine ermittelte Unfallhäufigkeit unterhalb von 3,7E-06 pro Meter und Jahr als unkritisch zu bewerten ist. Liegt die ermittelte Unfallhäufigkeit in einem Bereich zwischen 3,7E-06 pro Meter und Jahr und 3,7E-05 pro Meter und Jahr ist das Risiko tolerabel. Es sind aber in Anlehnung an das ALARP-Prinzip /34/ Maßnahmen zur Risikominderung zu prüfen und ggf. umzusetzen. Eine Unfallhäufigkeit oberhalb von 3,7E-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 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 /17/, /18/, /19/.

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 Oberperl ist gemäß den Eiskarten Europas /10/ und den Vereisungstagen des DWD /11/, /12/ im Mittel mit ca. 13 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“ /14/, /15/, /16/ 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 /16/. Unter Berücksichtigung der in /15/ 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

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

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

Da die Studie „Alpine Test Site 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]	D^2 [m^2]	Verhältnis	Eisobjekte/ Vereisung
ENERCON E-40	44,0	1.936	1,0	ca. 14
Vestas V150	150,0	22.500	11,6	ca. 163

Tabelle 1: Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung.

4.1.2 Automatische Eisabschaltung (Eisabwurf)

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

Für die Eiserkennung ist das Eiserkennungssystem BLADEcontrol der Firma Weidmüller Monitoring Systems GmbH geplant, was dem BLADEcontrol System von Vestas entspricht /4/. Die Erkennung des Eisansatzes beruht bei BLADEcontrol auf einer Überwachung der Eigenfrequenzen der Rotorblätter. Die Masse der Blätter nimmt bei Eisansatz zu und bewirkt eine Frequenzverschiebung, welche Eisansatz signalisiert /6/. Gemäß /6/ 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 /6/.

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 /6/, /7/. Die WEA kann dann automatisch wieder zugeschaltet werden /7/.

Das System wurde nach GL IV-4 „Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines“ zertifiziert /8/. Mit /6/ wurde für die Eiserkennung mittels BLADEcontrol bestätigt, dass das System dem Stand der Technik entspricht und zur Erkennung von Eisansatz geeignet ist. Mit /7/ wurde die Integration der Eiserkennung mittels BLADEcontrol in die Steuerung von Vestas WEA in Hinblick auf eine zuverlässige Eiserkennung geprüft. Die Prüfung hat ergeben, dass die WEA bei Eisansatz sicher abgeschaltet werden und die Integration der Eiserkennung in die WEA-Steuerung dem Stand der Technik entspricht /7/. Gemäß /7/ 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 /6/, /7/ auch unter konservativen Annahmen zur Gefahrenabwehr bzgl. Eisabwurf geeignet.

4.1.3 Randbedingungen für die Untersuchung des Eisabfalls

Für die Berechnungen der Fallweiten werden die folgenden Rahmenbedingungen angenommen:

- WEA-Typ: Vestas V150 mit 166,0m NH und 150,0m D.
- WEA: Die WEA ist abgeschaltet (Trudelbetrieb). In Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird die entsprechende Drehzahl im Trudelbetrieb ermittelt (Drehzahlbereich Trudeln 0 – 2,0 U/min) und als Anfangsgeschwindigkeit des Eisobjekts berücksichtigt.
- Lageparameter des Rotorblattes: Das Rotorblatt steht senkrecht über dem Turm, sodass die Blattspitze ihre maximale Höhe erreicht.
- Lageparameter des Eisobjekts: Das Eisobjekt befindet sich an der Rotorblattspitze.
- Eisobjekt: Idealisierte Eisobjekte mit unterschiedlicher Form und Größe.
- Windrichtung: Der Wind kommt aus beliebiger Richtung und weht in horizontaler Richtung und orthogonal zur Rotorebene. Eine entsprechende Stellung der WEA ist durch die automatische Windnachführung gegeben.
- Windgeschwindigkeit: Für die Windgeschwindigkeit wird das 99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung auf Nabenhöhe ermittelt. Diese Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe ist hinreichend konservativ gewählt, da sie zu 99,9% nicht überschritten wird und zudem für den gesamten Fallweg angesetzt wird.
- Physikalische Parameter: Erdbeschleunigung $g = 9{,}81\ m/s^2$, Luftdichte $\rho = 1{,}3\ kg/m^3$ (konservativ aufgerundet bei 0°C Lufttemperatur).
- Für die betrachtete WEA wurde auf Basis des eingereichten Kartenmaterials /2/ eine maximale Überhöhung von etwa 5m gegenüber der Autobahn A8 ermittelt und konservativ für die gesamte betroffene Strecke zugrunde gelegt.

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 /9/, /10/, /14/. Zudem hat sich in Feldstudien /14/ 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 /14/ auf 1,0kg normiert. Die Eigenschaften der zugrunde gelegten Eisobjekte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Nr.	Masse [kg]	Dichte [kg/m³]	Form	mittlere Fläche [m²]	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 ca. 241m über Grund wurde mit einer Windgeschwindigkeit von 20,0m/s (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.

WEA	v [m/s]	1 Würfel [m]	2 Quader [m]	3 Quader [m]	4 Platte [m]	5 Platte [m]
1	20,0	131,8	149,6	173,5	217,5	263,7

Tabelle 3: Ermittelte maximale Fallweiten.

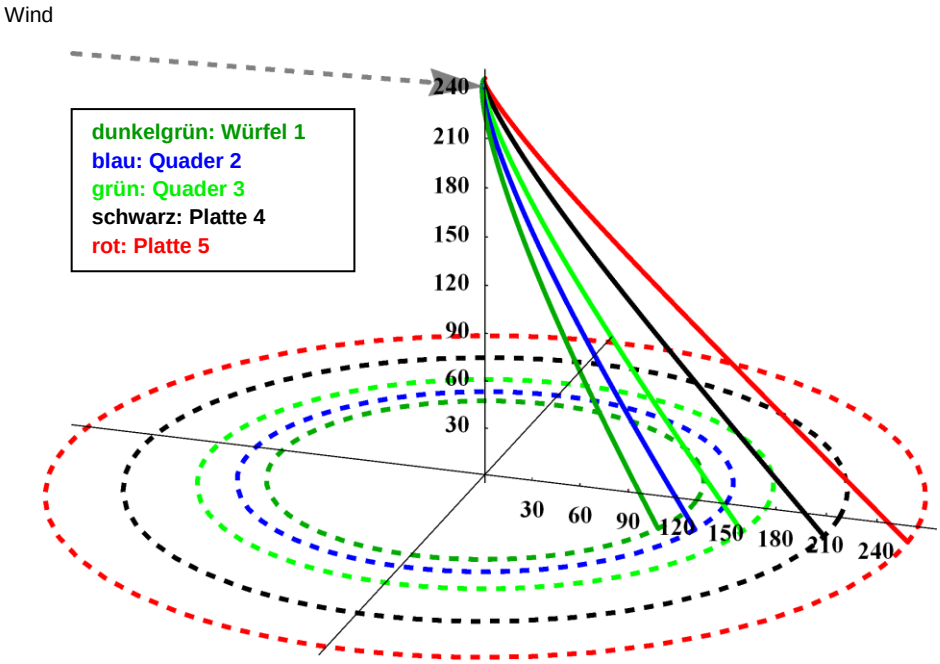

Abbildung 2: Fallweiten bei 20,0m/s Windgeschwindigkeit.

Die ermittelte maximale Fallweite ist der Spalte 7 der Tabelle 3 (Eisobjekt Nr. 5) zu entnehmen. Diese maximale Fallweite ist in der nachfolgenden Abbildung 3 als Gefährdungsradius (rot gestrichelt) um die betrachtete WEA dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Teile des Gefährdungsradius Abschnitte der Autobahn A8 überdecken. Des Weiteren überdecken Teile des Gefährdungsradius Abschnitte der Wirtschaftswege. Für die Untersuchung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Autobahn A8 durch Eisabfall wird im Folgenden eine Detailanalyse und die Simulation des Eisabfalls für die WEA 1 durchgeführt (siehe Kapitel 4.2). Für die hauptsächlich landwirtschaftlich genutzten Wirtschaftswege /5/, für die im Winter außerhalb der Bewirtschaftungsperiode von einer unregelmäßigen Nutzung ausgegangen werden kann, wird die Nutzungshäufigkeit sowie die mögliche Gefährdung durch Eisabfall innerhalb des ermittelten Gefährdungsradius qualitativ berücksichtigt (siehe Kapitel 6).

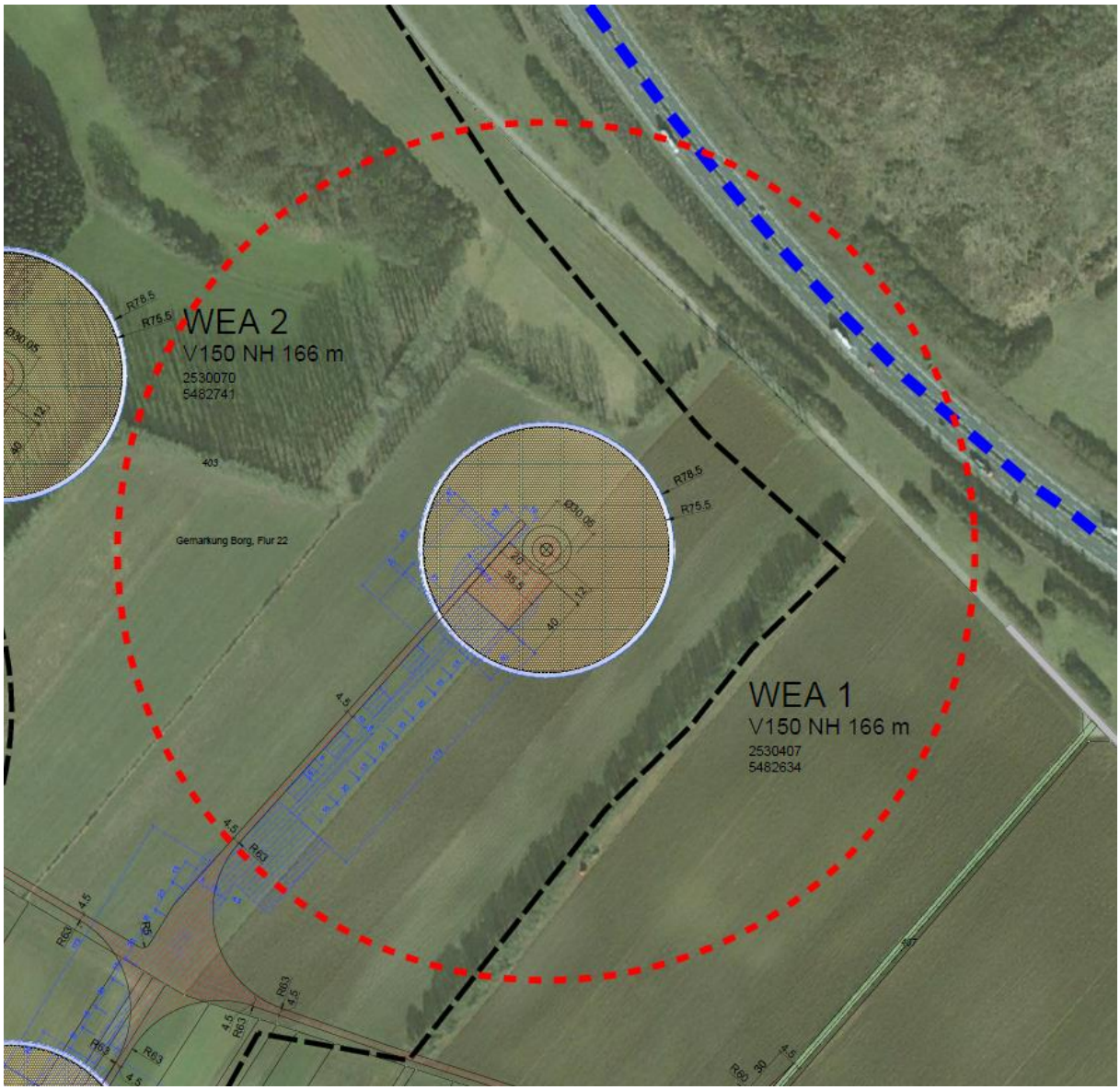

Abbildung 3: Gefährdungsradius – rot gestrichelt (v = 20,0m/s).

4.2 *Detailanalyse Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Autobahn A8*

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 /37/, /38/: Position und Größe des Eisobjekts, Stellung des Rotorblattes, Windrichtung, Windgeschwindigkeit etc. Im Rahmen der Simulation werden etwa 100.000 verschiedene Flugbahnen und Trefferpunkte generiert.

Für die Simulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- WEA-Typ: Vestas V150 mit 166,0m NH und 150,0m D.
- Drehzahl bei Eisabfall: entspricht dem Trudelbetrieb. In Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird die entsprechende Drehzahl bestimmt (Drehzahlbereich Trudeln 0 – 2,0 U/min) und bei der Ermittlung der Anfangsgeschwindigkeit des Eisobjekts berücksichtigt.
- Für die Verteilung der Windrichtung wurden die meteorologischen Daten des Standortes /3/ verwendet.
- Für die Verteilung der Windgeschwindigkeit wurden die meteorologischen Daten des Standortes /3/ verwendet (Weibull-Parameter A und k).
- Physikalische Parameter: Erdbeschleunigung $g = 9{,}81\ m/s^2$, Luftdichte $\rho = 1{,}3\ kg/m^3$ (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 /13/ ist eine Eisbildung am Ende des Rotorblattes ca. dreimal häufiger zu beobachten als am Ansatz des Rotorblattes.
- Lageparameter der Rotorblätter:
  Der Rotor kann sich im abgeschalteten Modus frei bewegen (Trudeln orthogonal zur Windrichtung möglich). Die Position des Rotorblattes ist in der Rotationsebene zum Zeitpunkt des Eisabfalls im Intervall (0°, 360°) gleichverteilt.
- Für die betrachtete WEA wurde auf Basis des eingereichten Kartenmaterials /2/ eine maximale Überhöhung von etwa 5m gegenüber der Autobahn A8 ermittelt und konservativ für die gesamte betroffene Strecke zugrunde gelegt.

4.2.2 Trefferhäufigkeiten

Für die Häufigkeit von Eisabfall-Ereignissen wird gemäß Kapitel 4.1.1 ein Wert von 2.119 Eisabfall-Ereignissen pro WEA und Jahr angesetzt (13 Vereisungstage pro Jahr mit je 163 Eisabfall-Ereignissen). In Abbildung 4 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Eisabfall-Ereignissen dargestellt.

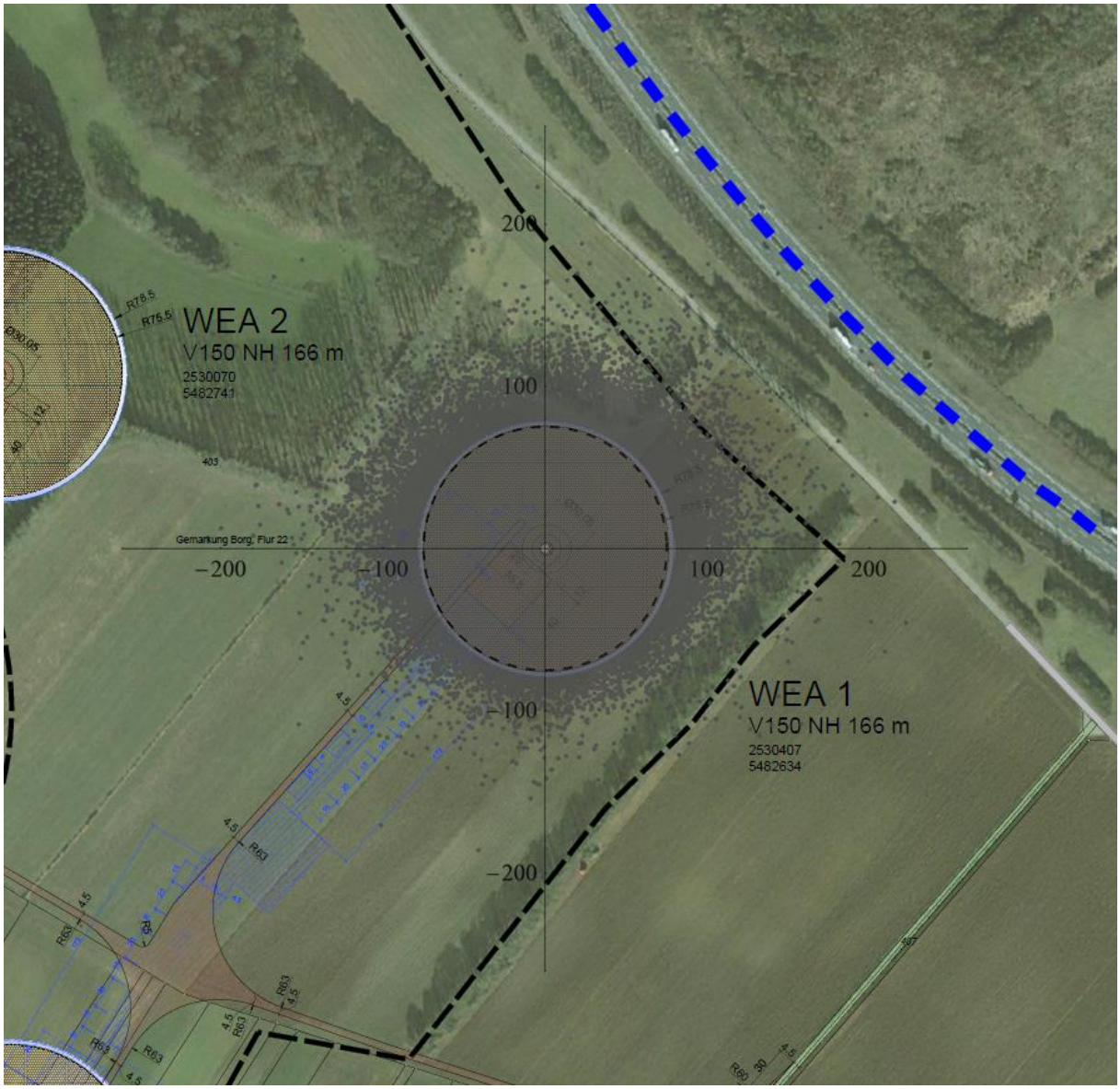

Abbildung 4: Auftreffpunkte bei Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 5 sind die Größenordnungen der Trefferhäufigkeiten pro Quadratmeter und Eisabfall-Ereignis in der Umgebung der WEA 1 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/m²]	Trefferhäufigkeiten pro Jahr [1/(a m²)]
1	Rot	größer 1,0E-04	größer 2,1E-01
2	Orange	1,0E-05 bis 1,0E-04	2,1E-02 bis 2,1E-01
3	Gelb	1,0E-06 bis 1,0E-05	2,1E-03 bis 2,1E-02
4	Farblos	1,0E-07 bis 1,0E-06	2,1E-04 bis 2,1E-03
5*	Farblos	kleiner 1,0E-07	kleiner 2,1E-04

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

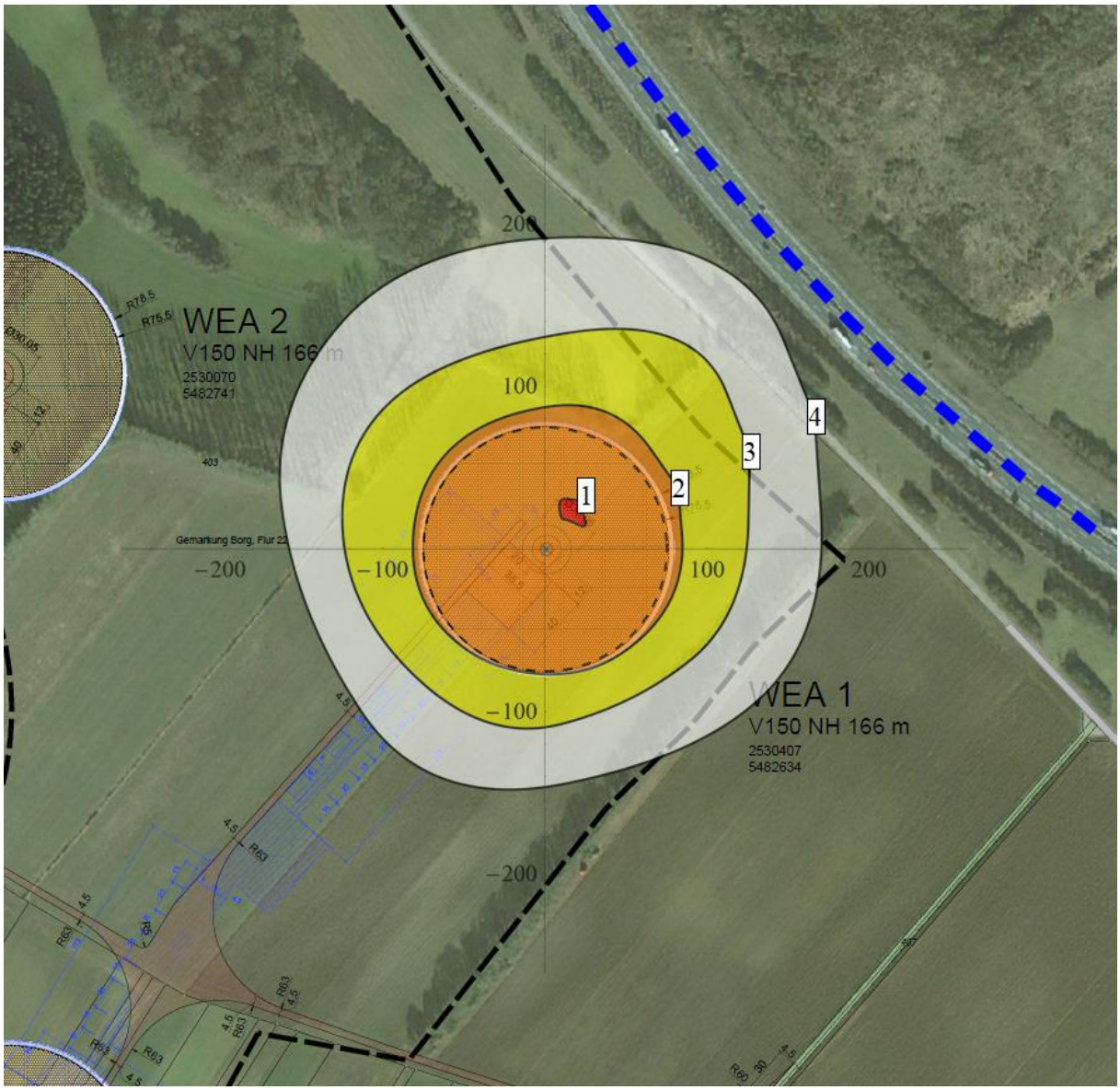

Abbildung 5: Trefferhäufigkeiten [1/m²] pro Eisabfall. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die standortbezogene Simulation des Eisabfalls (Detailanalyse der Trefferbereiche) von der geplanten WEA (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5) zeigt, dass die Autobahn A8 außerhalb des ermittelten vierten Gefährdungsbereichs liegt und nicht von den Trefferflächen der WEA überdeckt wird. Mit zunehmendem Abstand nimmt die Trefferhäufigkeit immer weiter ab. Aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens auf der Autobahn A8 und der vereinzelten Treffer (siehe Abbildung 4) wird das Risiko für Verkehrsteilnehmer auf der Autobahn A8 ermittelt (siehe weitere Risikoanalyse Kapitel 4.2.3 und Kapitel 4.2.4).

4.2.3 Individualrisiko

Auf Basis der in Abbildung 5 dargestellten Trefferhäufigkeiten wird das Risiko, im Straßenverkehr aufgrund Eisabfalls zu verunfallen, für die Autobahn A8 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Autobahn A8 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 m^2 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 2m² 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 x 2)/365. 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), $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.

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]
1	Autobahn A8	3,7E-09

Tabelle 5: Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko bei Eisabfall.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von 3,7E-09 Treffer/a im Mittel ca. alle 2,7E+08 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 den Randbedingungen für die Ermittlung des Individualrisikos (siehe Kapitel 4.2.3), zusätzlich die Verkehrsdichte auf der Autobahn A8 berücksichtigt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Autobahn A8 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 Autobahn A8 werden auf Basis der Angaben aus /5/ ca. 20.000 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 ungeschützten Aufenthalts im Bereich j eintritt (Geschwindigkeit der Fahrzeuge v_F, Länge des Straßenabschnitts l_j aus Abbildung 5).

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergibt sich für die Gefährdung des Straßenverkehrs auf der Autobahn A8 die in Tabelle 6 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter Streckenabschnitt. 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)]
1	Autobahn A8	6,9E-07

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

Beispielhaft erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von 6,9E-07 Treffer/(m*a) im Mittel ca. alle 1,5E+06 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 /26/, /27/, /28/ 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 /26/, Daten der Betreiber-Datenbasis (BDB) /27/) und einer Auswertung von SenterNovem (Handboek Risicozonering Windturbines, Niederlande 2005 /28/). 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 /29/ entnommen werden.

4.3.2 Randbedingungen

Die Berechnungen der Flugbahnen von Rotorblattbruchstücken erfolgen unter Variation der verschiedenen Parameter wie Bruchlage, Abwurfwinkel, Windrichtung und Windstärke /38/. Es werden somit etwa 100.000 verschiedene Flugbahnen simuliert.

Für die Simulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- WEA-Typ: Vestas V150 mit 166,0m NH und 150,0m D.
- Drehzahl bei Rotorblattbruch: 12,6 U/min•120% = 15,12 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 dargestellt.

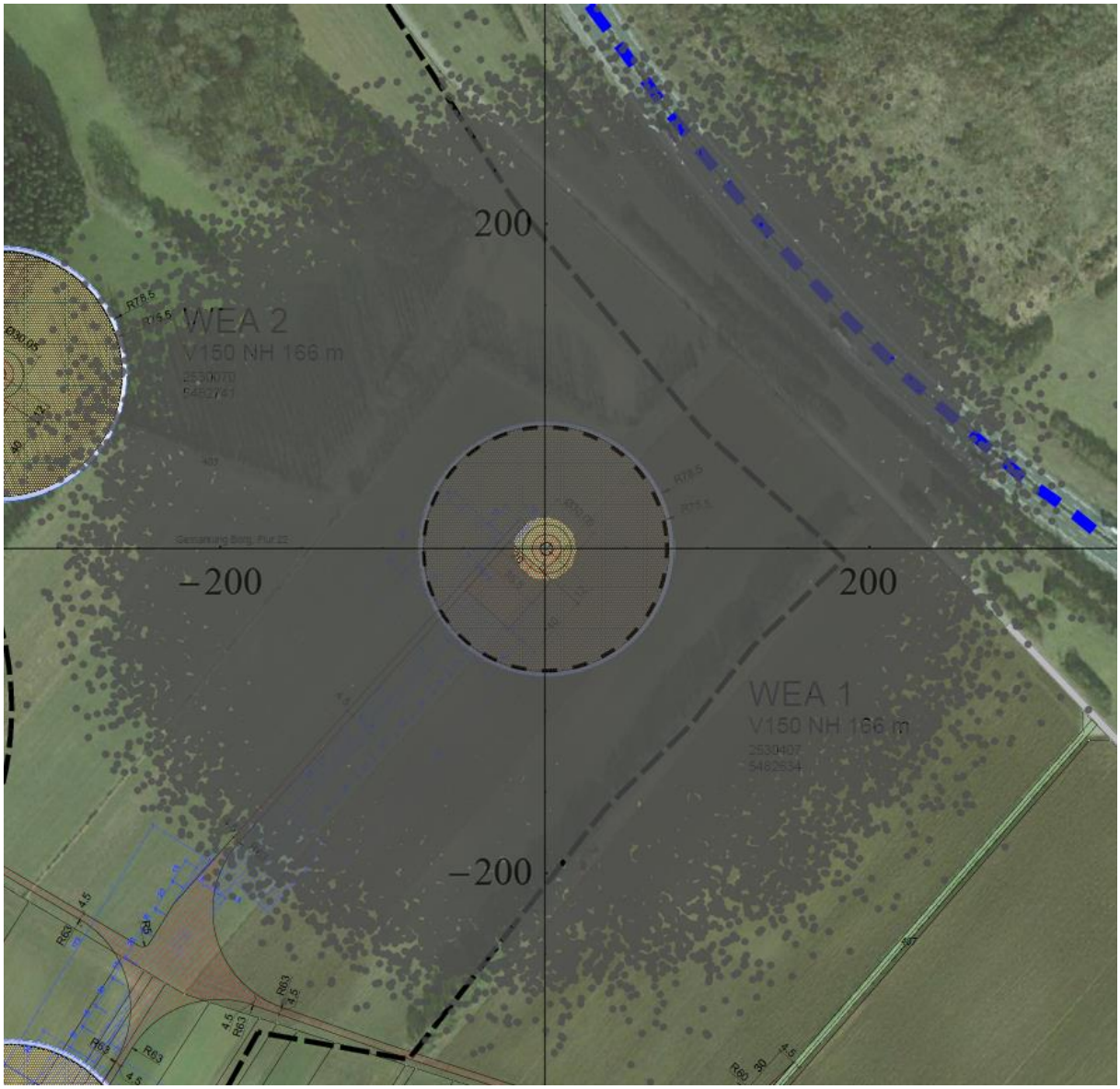

Abbildung 6: Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 7 sind die Größenordnungen der Trefferhäufigkeiten pro m² und Rotorblattbruch-Ereignis in der Umgebung der WEA 1 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/m²]	Trefferhäufigkeiten [1/(a m²)]
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.

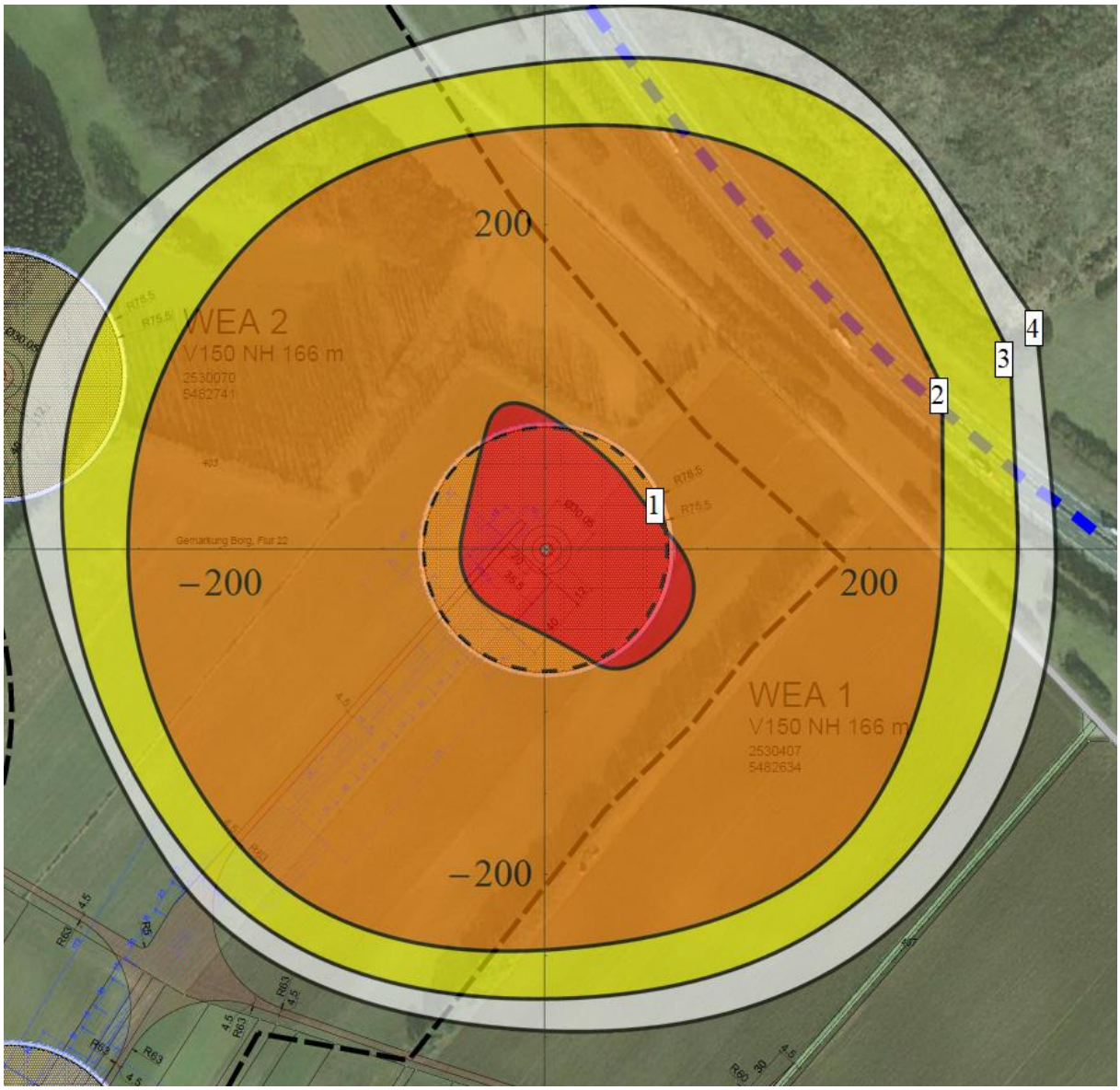

Abbildung 7: Trefferhäufigkeiten [1/m²] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die Ergebnisse der standortbezogenen Simulation des Rotorblattbruchs in Abbildung 7 zeigen, dass Abschnitte der Autobahn A8 durch die ermittelten Gefährdungsbereiche der WEA 1 überdeckt 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 Autobahn A8 ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Autobahn A8 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^2 im Bereich j pro Rotorblattbruch (Ergebnis der Simulation).

A_T: Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs ($10m^2$).

P_{RA}: Wahrscheinlichkeit, an einem Rotorblattbruch-Ereignis anwesend zu sein, P_{RA} = (225 x 2)/365. 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 ergibt sich die in Tabelle 8 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko).

WEA	Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
1	Autobahn A8	3,1E-11

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

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von 3,1E-11 Treffer/a im Mittel ca. alle 3,2E+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 Autobahn A8 berücksichtigt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf der Autobahn A8 konservativ eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt.

Es ergibt sich der folgende mathematische Zusammenhang:

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

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

H_{Tj}: Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr (Ergebnis der Simulation).
H_T: Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.
h_{RJ}: Häufigkeit Rotorblattbruch pro WEA und Jahr, h_{RJ} = 1,0E-03/a (Kapitel 4.3.1).
h_{TRj}: Häufigkeit der Treffer pro m^2 im Bereich j pro Rotorblattbruch (Ergebnis der Simulation).
h_{aVT}: Verkehrsdichte: Für die Verkehrsdichte auf der Autobahn A8 werden auf Basis der Angaben aus /5/ ca. 20.000 Fahrzeuge pro Tag angesetzt.
A_T: Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs ($10m^2$).
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 ergibt sich die in Tabelle 9 aufgeführte Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter (Gefährdung des Straßenverkehrs).

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
1	Autobahn A8	1,1E-09

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

Beispielhaft erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von 1,1E-09 Treffer/(m*a) im Mittel ca. alle 9,0E-8 Jahre pro Meter Streckenabschnitt ein schwerer Unfall durch Rotorblattbruch. 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 Oberperl im Saarland plant der Auftraggeber, die Windpark Oberperl GmbH & Co. KG, die Errichtung von drei WEA des Typs Vestas V150 mit 166,0m NH und 150,0m D. Die Risikobeurteilung wird für die WEA 1 durchgeführt. In der Nähe der geplanten WEA 1 verläuft die Autobahn A8.

Im Rahmen der gutachtlichen Stellungnahme galt es zu prüfen und zu bewerten, ob eine besondere Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Autobahn A8 durch Eisabwurf/Eisabfall oder Rotorblattbruch 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 betrachtete WEA nicht anzunehmen ist. Mit der Prüfung in /6/ und /7/ wurde für die Wirksamkeit des

geplanten Eiserkennungssystems der aktuelle Stand der Technik bestätigt. Hierbei ist zu beachten, dass die Eiserkennung wie in /6/ und /7/ in den geplanten WEA-Typ Vestas V150, integriert wird. Dies soll im Rahmen der Genehmigung und der Inbetriebnahme der geplanten WEA geprüft und Nachweis hierzu erbracht werden.

Auf Basis der ermittelten Gefährdung durch Eisabfall und Rotorblattbruch ist zu erkennen, dass die landwirtschaftlichen Wirtschaftswege in der näheren Umgebung der geplanten WEA 1 sowie Teile der Autobahn A8 durch Eisabfall und Rotorblattbruch betroffen sind.

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

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

Für die Bewertung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmern ist zum einen das Risiko von Einzelpersonen (Individualrisiko) und zum anderen das Gruppenrisiko (Gefährdung des Straßenverkehrs) zu betrachten. Die Gesamtgefährdungen durch Eisabfall und Rotorblattbruch für Verkehrsteilnehmer auf der Autobahn A8 sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführt.

WEA	Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
1	Autobahn A8	3,7E-09

Tabelle 10: Trefferhäufigkeit pro Jahr, Individualrisiko Straßenverkehr insgesamt.

WEA	Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
1	Autobahn A8	6,9E-07

Tabelle 11: Trefferhäufigkeit pro Jahr und Meter, Gefährdung des Straßenverkehrs insgesamt.

Der Vergleich der ermittelten Risiken mit den in Kapitel 3 hergeleiteten Risikogrenzwerten zeigt, dass sowohl das Individualrisiko als auch die Gefährdung des Straßenverkehrs unterhalb der hergeleiteten Risikogrenzwerte liegen.

Weitere risikoreduzierende Maßnahmen

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

- Die Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems der WEA sollte im Rahmen der Inbetriebnahme /23/, /21/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /39/ geprüft und dokumentiert werden. Betriebsbegleitend ist die Funktionalität des Eiserkennungssystems im Rahmen der vorgesehenen Prüfungen des Sicherheitssystems und der sicherheitstechnisch relevanten Komponenten der WEA /23/, /21/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /39/ aufzuzeigen. Für die Inbetriebnahme des Eiserkennungssystems sollte die Anlernphase des Eiserkennungssystems berücksichtigt werden. Ist die Anlernphase nicht vor den winterlichen Vereisungsereignissen abgeschlossen, so sind geeignete Maßnahmen zur Vermeidung eines Eisabwurfs vorzusehen.
- Durch Hinweisschilder (mind. im Abstand der 1,1-fachen Gesamthöhe der WEA) ist an den Zufahrtswegen der WEA und den umliegenden 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 abgeschaltete, vereiste WEA prinzipiell nicht von anderen Bauwerken mit Eisansatz unterscheidet,
- dass die öffentlich zugänglichen Wege (Wirtschaftswege) in unmittelbarer Nähe der WEA gemäß /5/ hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt werden (untergeordnete Freizeitnutzung) und im Winter, außerhalb der Wirtschaftsperiode, von einer eher geringen Frequentierung ausgegangen werden kann,
- dass davon auszugehen ist, dass der landwirtschaftliche Verkehr überwiegend mit geschützten Maschinen oder Fahrzeugen 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 für Verkehrsteilnehmer auf der Autobahn A8 als akzeptabel zu betrachten

Unter Berücksichtigung

- der mit der Liste der Technischen Baubestimmungen des Bundeslandes Saarland /22/ eingeführten technischen Regeln Anlage 2.7/12: „Gefahr des Eisabwurfs bei Unterschreitung eines Abstands von 1,5 x (Rotordurchmesser + Nabenhöhe)“

sowie in Anlehnung an

- das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /24/ §5 Abs. 1 Nr. 1: „Vermeidung sonstiger Gefahren“

ist eine konkrete Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Autobahn A8 durch die Errichtung der geplanten WEA 1 am Standort Oberperl durch Eisabwurf/Eisabfall und Rotorblattbruch 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 leistet keine Gewähr für die Erfüllung von Vorhersagen. Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit der vom Auftraggeber übermittelten Informationen und Angaben und für durch unrichtige Angaben bedingte falsche Aussagen.

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

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

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

8 Formelzeichen und Abkürzungen

A	Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung	[m/s]
a	Jahr	[a]
ALARP	As Low As Reasonably Practicable	
BDB	Betreiber-Datenbasis	
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	
BWE	Bundesverband Windenergie e.V.	
CMS	Condition Monitoring System	
D	Rotordurchmesser	[m]
GBE	Statistiken der Gesundheitsberichterstattung des Bundes	
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/ Windpark Oberperl GmbH & Co. KG. Angaben zu den WEA-Spezifikationen. Übermittelt durch Windpark Oberperl GmbH & Co. KG mit E-Mails vom 12.11.2019 und vom 02.12.2019.

/2/ Windpark Oberperl GmbH & Co. KG. Lageplan: Windpark Oberperl, Stand: 13.12.19. Übermittelt durch Windpark Oberperl GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 19.12.2019.

/3/ Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH. PARK – Analyse der Windverhältnisse, Stand: 17.07.2018. Übermittelt durch Windpark Oberperl GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 05.12.2019.

/4/ Windpark Oberperl GmbH & Co. KG. Angaben zum Eiserkennungssystem. Übermittelt durch Windpark Oberperl GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 12.11.2019.

/5/ Windpark Oberperl GmbH & Co. KG. Beschreibung der Schutzobjekte und Angaben zu den Nutzungshäufigkeiten. Übermittelt durch Windpark Oberperl GmbH & Co. KG mit E-Mails vom 02.12.2019 und vom 17.12.2019.

/6/ DNV GL – Energy Renewables Certification Gutachten Ice Detection System, BLADEcontrol Ice Detector BID, Report-Nr.: 75138, Rev. 6, Stand 15.11.2018.

/7/ DNV GL – Energy Renewables Certification Gutachten Ice Detection System – Integration des BLADEcontrol Ice Detector BID in die Steuerung von Vestas Windenergieanlagen, Report Nr.: 75172, Rev. 5 Stand: 07.01.2019.

/8/ DNV-GL – Renewables Certification. Typenzertifikat: Eisdetektorsystem BLADEcontrol Ice Detector (BID). TC-DNVGL-SE-0439-04314-0, Hamburg. 2018.

/9/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.

/10/ 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.

/11/ Deutscher Wetterdienst. Freie Klimadaten, Eistage Deutschland 1981-2010 (Rasterdaten). www.dwd.de, Juni 2017.

/12/ 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.

/13/ Morgan, C. et al. Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk? Wind Energy Production in Cold Climates. Bristol. 1996.

/14/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.

/15/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.

/16/ 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.

/17/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1; Wind turbines - Part 1: Design requirements; Third Edition; August 2005 + Amendment 1: Oktober 2010.

/18/ 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.

/19/ COST-727. Atmospheric Icing on Structures. Measurements and data collection on icing: State of the Art Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp. Zürich. 2006.

/20/ DIN 1055-5. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten. Berlin. Juli 2005.

/21/ DIBt. Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Berlin. Fassung Oktober 2012.

/22/ Ministerium für Inneres und Sport Saarland. Muster – Liste der Technischen Baubestimmungen. Fassung Juli 2015.

/23/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Hamburg. Ausgabe 2010.

/24/ BImSchG 2017. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Deutschland. Fassung vom 29.05.2017.

/25/ Jarass, H. D. 2012. Bundes-Immissionsschutzgesetz: BImSchG, Kommentar- unter Berücksichtigung der Bundes-Immissionsschutzverordnungen, der TA Luft sowie der TA Lärm. Verlag C.H. Beck, München, 2012.

/26/ TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG. Statistische Auswertung von Pressemeldungen über Havarien von Windenergieanlagen im Zeitraum 1997 bis 2016 (Internetrecherche). Hamburg. 2017.

/27/ Keiler, J. Betreiber-Datenbasis (BDB). Daten der Jahrgänge 2000 bis 2011. Rade. 2011.

/28/ Rademakers, L. et al. Handboek Risicozonering Windturbines. Versie 2, jan2005. SenterNovem, Nederland. 2005.

/29/ DEWI, Deutsches Windenergie-Institut, DEWI GmbH. www.dewi.de. 2013.

/30/ DIN EN 50126. Bahnanwendungen. Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS). März 2000.

/31/ GBE. Heft 52 – Sterblichkeit, Todesursachen und regionale Unterschiede. Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE). 2013.

/32/ D STATIS. Verkehr, Verkehrsunfälle, Zeitreihen. Statistisches Bundesamt. 2018.

/33/ Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). http://www.gesetze-im-internet.de. Gelesen am 10.12.2018. Stand 2017.

/34/ Trbojevic V.M. 2005. Risk Criteria in EU. ESREL'05, Poland, 27.-30. Juni 2005.

/35/ Störfall-Kommission. 2004. Bericht, Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung. SFK-GS-41.

/36/ Hauptmanns, U. & Marx, M. Kriterien für die Beurteilung von Gefährdungen durch technische Anlagen. Verlag VdTÜV - Band 18. Berlin. November 2010.

/37/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.

/38/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.

/39/ Bundesverband WindEnergie e.V. Anforderungen an den Sachverständigen für Windenergieanlagen. Berlin. 21.09.2007.

/40/ Bundesverband WindEnergie e.V. Grundsätze für die Wiederkehrende Prüfung von Windenergieanlagen. Berlin 2012.

/41/ Bundesverband WindEnergie e.V. Grundsätze für die die Prüfung zur zustandsorientierten Instandhaltung von Windenergieanlagen. Osnabrück. 21.09.2007.

/42/ IEA Wind TCP Task 19. International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments. Revision 0, Oktober 2018.