

Gutachtliche Stellungnahme zur Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall am Wind- energieanlagen-Standort Nachtsheim-Luxem

Erstellt im Auftrag für

Windpark Luxem GmbH & Co. KG
Rees

Revision 3

Hamburg, 28.01.2019

Revision	Datum	Änderung
0	04.06.2015	Erste Ausgabe
1	28.06.2016	Anpassung und Neubewertung des Windparklayouts
2	20.12.2017	Anpassung und Neubewertung des Windparklayouts
3	28.01.2019	Anpassung und Neubewertung des Windparklayouts

Gegenstand: Risikobeurteilung am Windenergieanlagen-Standort
Nachtsheim-Luxem

Referenz-Nr.: 2018-WND-RB-273-R3

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

Anlagenhersteller: ENERCON GmbH
Dreekamp 5
26605 Aurich

WEA-Typ:	P_{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]
ENERCON E-138 EP3	3,5	138,6	130,03
ENERCON E-138 EP3	3,5	138,6	160,00

Vom Auftraggeber eingereichte Unterlagen:

- WEA-Spezifikationen: Nennleistung, Drehzahlbereich, Rotordurchmesser und Nabenhöhe /1/.
- Lageplan mit Darstellung der WEA und der Schutzobjekte /2/, /3/.
- Weibull-Parameter A und k sowie die Windverteilung auf Nabenhöhe /4/.
- Beschreibung der Schutzobjekte und des Standorts sowie Angaben zu den Nutzungshäufigkeiten am Standort /5/, /11/.
- Angaben und Nachweise zu dem Eiserkennungssystem der WEA /6/, /7/.

Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:

Verfasser	 M.Sc. F. Storck Sachverständiger	Hamburg, 28.01.2019
Geprüft durch	 Dipl.-Ing. O. Raupach Sachverständiger	Hamburg, 28.01.2019

Für weitere Auskünfte:

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
M.Sc. F. Storck
Große Bahnstraße 31
22525 Hamburg

Tel.: +49 40 8557 2025
Fax: +49 40 8557 2552
E-Mail: fstorck@tuev-nord.de

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	6
2	Angaben zu den Windenergieanlagen und der Standortumgebung	7
3	Bewertungsmaßstab	10
3.1	<i>Individualrisiko</i>	10
3.2	<i>Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko)</i>	11
4	Risikoanalyse	13
4.1	<i>Eisabwurf und Eisabfall</i>	13
4.1.1	Vereisungspotential.....	13
4.1.2	Automatische Eisabschaltung	15
4.1.3	Randbedingungen.....	16
4.1.4	Gefährdungsradius.....	17
4.2	<i>Detailanalyse Gefährdung der Bundesstraße B410 und der Kreisstraße K9</i>	20
4.2.1	Randbedingungen.....	20
4.2.2	Trefferhäufigkeiten	21
4.2.3	Individualrisiko.....	25
4.2.4	Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko).....	27
5	Modell- und Datenunsicherheiten	28
6	Zusammenfassung und Risikobewertung	28
7	Rechtsbelehrung	32
8	Formelzeichen und Abkürzungen	33
9	Literatur- und Quellenangaben	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lageplan WEA LU 1 bis LU 3 und WEA NH 1 und NH 2 /2/.....	8
Abbildung 2:	Lageplan WEA NH 3, NH 4 und LU 4 /2/.....	9
Abbildung 3:	Fallweiten bei 19,8m/s Windgeschwindigkeit (160,0m NH).....	18
Abbildung 4:	Gefährdungsradien WEA LU 1 bis LU 3 und WEA NH 1 und NH 2 – rot gestrichelt.....	19
Abbildung 5:	Gefährdungsradien WEA NH 3, NH 4, LU 4 – rot gestrichelt.....	20
Abbildung 6:	Auftreffpunkte bei Eisabfall der WEA LU 1 bis LU 3 und WEA NH 1 und NH 2. Rotorblatradius schwarz gestrichelt.....	22
Abbildung 7:	Auftreffpunkte bei Eisabfall der WEA NH 3, NH 4 und LU 4. Rotorblatradius schwarz gestrichelt.....	23
Abbildung 8:	Trefferhäufigkeiten [1/m ²] pro Eisabfall WEA LU 1 bis LU 3 und WEA NH 1 und NH 2. Rotorblatradius schwarz gestrichelt.....	24
Abbildung 9:	Trefferhäufigkeiten [1/m ²] pro Eisabfall der WEA NH 3, NH 4 und LU 4. Rotorblatradius schwarz gestrichelt.....	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung.....	14
Tabelle 2:	Idealisierte Eisobjekte.....	17
Tabelle 3:	Ermittelte Fallweiten.....	17
Tabelle 4:	Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Eisabfall), *alles außerhalb der Zone 4.....	23
Tabelle 5:	Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko bei Eisabfall.....	26
Tabelle 6:	Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Gefährdung des Straßenverkehrs bei Eisabfall.....	28

1 Aufgabenstellung

Am Standort Nachtsheim-Luxem plant der Auftraggeber die Windpark Luxem GmbH & Co. KG die Errichtung von sechs WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 mit 160,0m Nabhöhe (NH) und 138,6m Rotordurchmesser (D) sowie zwei WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 mit 130,03m NH und 138,6m D. In der Nähe der geplanten WEA befinden sich die Bundesstraße B410 und die Kreisstraße K9. Darüber hinaus verlaufen in unmittelbarer Umgebung zu den geplanten WEA einige Wirtschaftswege.

Gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /30/ §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 sind im Sinne des BImSchG als „sonstige Gefahr“ zu betrachten (siehe auch /31/), 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 Liste der Technischen Baubestimmungen /28/, werden aufgrund einer Gefahr durch Eisabwurf Mindestabstände definiert. Nach /28/ gelten Abstände größer als $1,5 \times (D + NH)$ im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen gemäß DIN 1055-5 /26/ als ausreichend. Soweit diese Abstände nicht eingehalten werden, ist eine gutachtliche Stellungnahme eines Sachverständigen erforderlich.

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG (ehemals TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, TÜV NORD) ist von der Windpark Luxem GmbH & Co. KG mit Schreiben vom 23.01.2015 mit der Erstellung einer Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall, beauftragt worden (Referenz-Nr.: 2015-WND-RB-033-R0). Mit der nun vorliegenden Revision 3 wurde die Änderung des Windparklayouts (WEA-Standorte bzw. geänderte Koordinaten), des WEA-Typs und der Nabhöhe aktualisiert und im Rahmen der Risikobeurteilung berücksichtigt. Die folgende Vorgehensweise ist Gegenstand der Beauftragung:

Erstellung einer Revision der gutachtlichen Stellungnahme zur möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B410 und der Kreisstraße K9 durch Eisabwurf/Eisabfall der acht geplanten WEA des Typs ENERCON E-138 EP3. Die Stellungnahme beinhaltet die folgenden Arbeitsschritte:

1. Ermittlung der Eingangsdaten zur Risikoanalyse (Standortbedingungen und WEA-Spezifikationen).
2. Ermittlung der möglichen Gefährdung durch herabfallende Eisobjekte von WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 am Windenergieanlagen-Standort Nachtsheim-Luxem.

Die Berechnungen erfolgen ausschließlich für abgeschaltete WEA. Es erfolgen Berechnungen des Gefährdungsbereichs durch herabfallende Eisobjekte sowie Berechnungen flächenbezogener Trefferhäufigkeiten. Die standortspezifische Berechnung der Trefferhäufigkeit von herabfallenden Eisobjekten erfolgt unter Variation (Monte-Carlo-Simulation) verschiedener Parameter: Position und Größe des Eisobjekts, Stellung des Rotorblatts, Windrichtung, Windgeschwindigkeit etc. Im Rahmen der Simulation werden etwa 100.000 verschiedene Flugbahnen und Trefferpunkte generiert. Die Ergebnisse werden numerisch und grafisch dargestellt. Den Berechnungen liegen die Anlagenparameter der geplanten WEA (Nabenhöhe und Rotorradius) sowie die standortspezifischen Windverhältnisse zugrunde. Die Eintrittshäufigkeit für herabfallende Eisobjekte wird aus generischen Daten abgeleitet.

3. Die Risikobewertung (Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B410 und der Kreisstraße K9) erfolgt auf Basis der Ergebnisse der Arbeitsschritte 1 und 2 sowie auf Basis standortspezifischer Angaben. In Abhängigkeit der Ergebnisse der Risikobewertung werden Maßnahmen zur notwendigen Risikominderung genannt.
4. Die gutachtliche Stellungnahme wird für die geplanten acht WEA am Standort Nachtsheim-Luxem angepasst.

Eine weitere Analyse des möglichen Schadensverlaufs durch Eisabwurf/Eisabfall (z. B. Gebäudeschäden, Fahrzeugschäden, Ausbreitungsrechnungen für Gefahrstoffe) erfolgt nicht im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme. Die Risikobeurteilung erfolgt ausschließlich auf Grundlage der eingereichten Unterlagen. Es wurde ausschließlich die Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B410 und der Kreisstraße K9 durch Eisabwurf/Eisabfall durch die neugeplanten WEA beurteilt, mögliche weitere Schutzobjekte in der Umgebung der geplanten WEA sowie die Beurteilung weiterer Gefährdungen sind nicht Bestandteil der vorliegenden gutachtlichen Stellungnahme.

2 Angaben zu den Windenergieanlagen und der Standortumgebung

Die jeweilige Lage der geplanten WEA LU 1 bis LU 3 sowie der WEA NH 1 und NH 2 des Typs ENERCON E-138 EP3 ist dem Lageplan in Abbildung 1 zu entnehmen, die jeweilige Lage der geplanten WEA NH 3 und NH 4 sowie der WEA LU 4 des Typs ENERCON E-138 EP3 ist dem Lageplan in Abbildung 2 zu entnehmen.



Abbildung 1: Lageplan WEA LU 1 bis LU 3 und WEA NH 1 und NH 2 /2/.

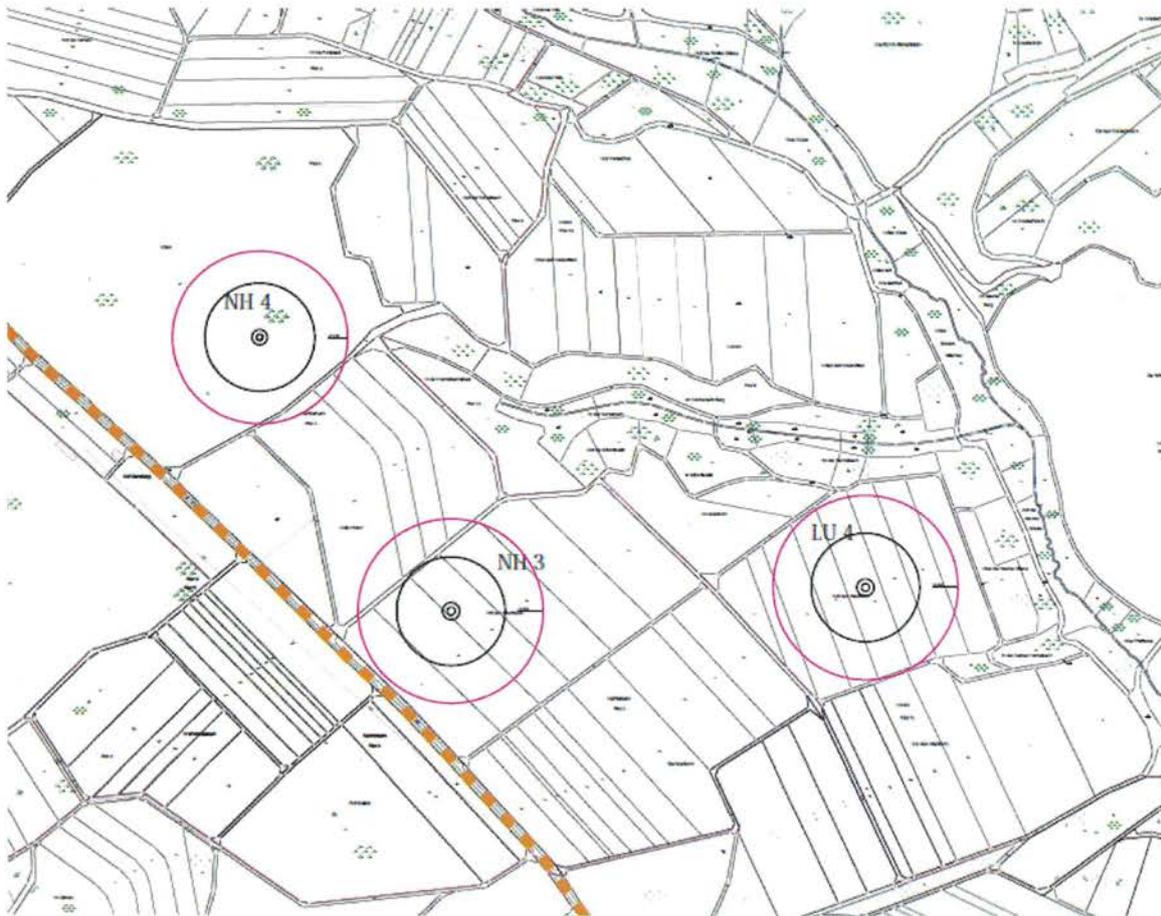


Abbildung 2: Lageplan WEA NH 3, NH 4 und LU 4 /2/.

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

Der geplante Standort befindet sich östlich der Ortschaft Nachtsheim und westlich der Ortschaft Luxem in Rheinland-Pfalz. Das umliegende Gelände der geplanten WEA am Standort Nachtsheim-Luxem ist durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt und teilweise bewaldet. In Nähe der geplanten WEA befinden sich die Bundesstraße B410 (Abbildung 1, blau gestrichelt) und die Kreisstraße K9 (Abbildung 2, orange gestrichelt). Darüber hinaus verlaufen in unmittelbarer Umgebung zu den geplanten WEA einige Wirtschaftswege, welche hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt werden /5/. Der minimale Abstand der WEA NH 1 zur Bundesstraße B410 beträgt ca. 118m, der minimale Abstand der WEA NH 3 zur Kreisstraße K9 beträgt ca. 127m /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) /32/.
- Statistiken der Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE) /33/.
- Statistiken der Verkehrsunfälle des Statistischen Bundesamtes /34/.
- Risk Criteria in EU /36/.
- Deutsche Störfall-Kommission - Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung /37/.
- Auswertung des VdTÜV /38/.

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) /32/).

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 /34/ beurteilt (siehe Kapitel 3.2).

3.1 Individualrisiko

MEM-Prinzip

Das Prinzip der MEM /32/ 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 /32/. Die in /32/ getätigten Angaben decken sich mit aktuellen Erhebungen des GBE /33/. 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 /33/ 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 /38/ 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 Reasonable Practicable) /36/ 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 /35/ 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 /34/. 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 /32/). In Anlehnung an die Vorgaben der StVO /35/ 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 /34/. 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 /34/ die gesamte Anzahl der Unfälle mit Personenschäden, die Anzahl der Personenschäden, die Anzahl der getöteten, schwer- und leichtverletzten Verkehrsteilnehmer angegeben. Hieraus lässt sich für die jeweilige Verkehrssituation die Gefährdung im Straßenverkehr ableiten. Auf Basis der aktuellen Unfallstatistik aus dem Jahr 2017 ergibt sich die Unfallhäufigkeit von schweren Verkehrsunfällen mit Personenschaden außerorts (ohne Autobahn) zu $1,0E-01$ pro km und Jahr. Dies entspricht einem schweren Verkehrsunfall mit tödlichem Ausgang bzw. schwerverletzten Personen alle 10 Jahre.

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 sowie zu $1,0E-05$ pro Meter und Jahr.

In Anlehnung an das ALARP-Prinzip /36/ 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 Nachtsheim-Luxem 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 /36/ Maßnahmen zur Risikominderung zu prüfen und ggf. umzusetzen. Eine Unfallhäufigkeit oberhalb von $1,0E-05$ pro Meter und Jahr wird als unakzeptabel eingestuft. Hier sind weiterführende Maßnahmen zur Risikominderung zwingend erforderlich.

4 Risikoanalyse

4.1 Eisabwurf und Eisabfall

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

Geschlossene Fahrzeuge bieten Schutz, könnten aber beschädigt werden. Bei Fahrzeugen in Bewegung könnten im Fall 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 (siehe Kapitel 0) das Eiserkennungssystem zur Verhinderung des Eisabwurfs dargestellt. Darauf folgend 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 /23/, /24/, /25/.

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 Nachtsheim-Luxem ist gemäß den Eiskarten Europas /14/, /15/ und den Vereisungstagen des DWD /18/ im Mittel mit ca. 35 möglichen Vereisungstagen pro Jahr zu rechnen. Dieser Wert deckt sich mit internen Untersuchungen des TÜV NORD zur Vereisungshäufigkeit /16/, /17/, 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“ /20/, /21/, /22/ 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 /22/. Unter Berücksichtigung der in /21/ ausgewiesenen Häufigkeit der Vereisung für den Standort Gütsch mit 10 bis 30 Tagen pro Jahr, lässt sich somit die Anzahl von Eisfragmenten pro Vereisung zu

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

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

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

WEA-Typ	D [m]	D ² [m ²]	Verhältnis	Eisobjekte/Vereisung
ENERCON E-40	44,0	1.936	1	ca. 14
ENERCON E-138 EP3	138,6	19.210	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 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.

Die Erkennung des Eisansatzes beruht beim ENERCON-Leistungskurvenverfahren 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, elektrische 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 /10/, in welcher ein hoher Verlust an Auftrieb bereits bei leichter Vereisung messtechnisch gezeigt wird. Die daraus resultierende Änderung des Betriebskennfelds (Zusammenhang von Wind, Drehzahl, Leistung und Blattwinkel) und Leistungsabweichung zu den wetterabhängigen Erwartungswerten der Wind-Leistungs- und Wind-Blattwinkelkennlinie wird durch die Steuerung erkannt. Die WEA wird bei Außenlufttemperaturen von 2°C oder niedriger mit der Statusmeldung „Eisansatz“ automatisch abgeschaltet /7/, /6/.

Die Wiederinbetriebnahme der WEA nach Abschaltung durch Vereisung erfolgt jeweils erst nach einer temperaturabhängigen Wartezeit nach Ende der Vereisungsbedingungen /7/, /6/.

Zusätzlich wird der technische Betriebsführer der betroffenen WEA über die automatische Abschaltung der Anlage informiert (z.B. per SMS) /8/. Aus Sicherheitsgründen ist es dem Betriebsführer nicht möglich, die WEA bei der Fehlermeldung „Eisansatz“ per Fernsteuerung wieder zu starten, stattdessen muss die Fehlermeldung manuell vor Ort in der WEA zurückgesetzt werden. Ein manueller Neustart der WEA erfolgt erst, wenn ein Eisansatz durch Sichtkontrolle ausgeschlossen werden kann und sich keine Personen oder Gegenstände in der Nähe der WEA befinden. /7/, /8/.

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 Erkennung ausschließlich nach dem Leistungskurvenverfahren nach derzeitigem Kenntnisstand nicht mit Sicherheit gegeben /7/, /6/. 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 /6/ ein Anfahren der WEA nur bei gemittelten Windgeschwindigkeiten unterhalb von 5,0m/s erlaubt. Gemäß /6/ stellt dieser Startbetrieb gegenüber dem Eisabfall im Stillstand der WEA keine unzulässige zusätzliche Gefährdung dar.

Die prinzipielle Wirksamkeit des Systems wurde durch den TÜV NORD mit /6/ bestätigt. Das System entspricht dem Stand der Technik, die vorliegenden Betriebserfahrungen zum ENERCON-Leistungskurvenverfahren bestätigen dessen Wirksamkeit /9/.

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

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und die Weibullverteilung wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt /4/. 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 sind (bis ca. 2kg) und die Eisobjekte selten ein Gewicht von mehreren Kilogramm aufweisen /7/, /14/, /20/. Zudem hat sich in Feldstudien /20/ 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, setzen wir für die Berechnungen idealisierte Eisobjekte mit unterschiedlicher Form und Größe an. Die Gewichte der Eisobjekte haben wir unter Berücksichtigung der Kenntnisse aus /20/ auf 1,0kg normiert. Die Eigenschaften der zugrunde gelegten Eisobjekte sind in Tabelle 2 dargestellt.

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

Tabelle 2: Idealisierte Eisobjekte.

4.1.4 Gefährdungsradius

Für die geplanten WEA mit einer Gesamthöhe von 199,32m über Grund (WEA NH 1, NH 2) wurde mit einer Windgeschwindigkeit von 19,0m/s (99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung /4/) auf Basis der in Tabelle 2 angegebenen Eisobjekte die maximalen Fallweiten ermittelt. Für die geplanten WEA mit einer Gesamthöhe von 229,30m über Grund (LU 1 - LU 4, NH 3, NH 4) wurde mit einer Windgeschwindigkeit von 19,8m/s auf Basis der in Tabelle 2 angegebenen Eisobjekte die maximalen Fallweiten ermittelt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3 und die entsprechenden Fallkurven beispielhaft für die WEA NH 3 in Abbildung 3 dargestellt.

WEA	NH [m]	v [m/s]	1 Würfel [m]	2 Quader [m]	3 Quader [m]	4 Brett [m]	5 Brett [m]
NH 1, NH 2	130,03	19,0	105,1	117,0	133,9	166,8	202,2
LU 1 - LU 4, NH 3, NH 4	160,00	19,8	125,4	140,6	161,8	201,6	243,9

Tabelle 3: Ermittelte Fallweiten.

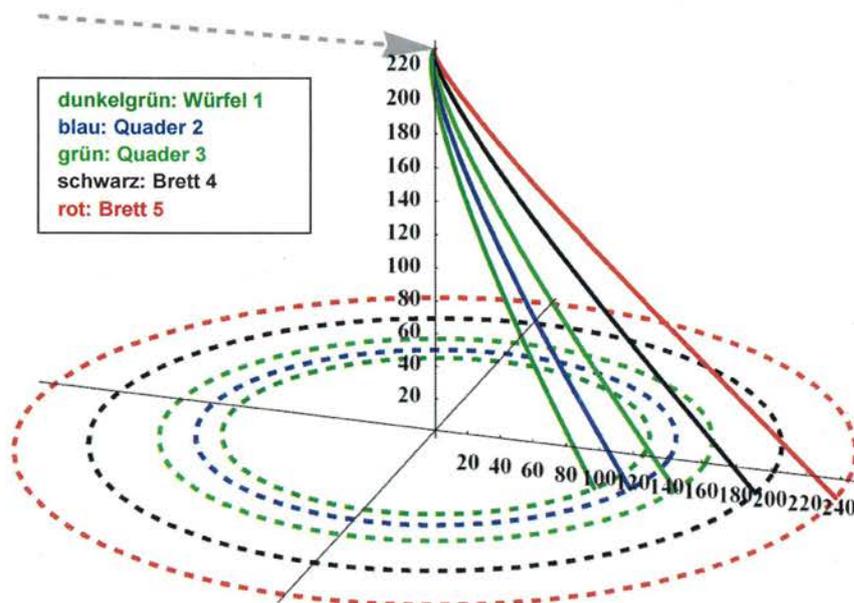


Abbildung 3: Fallweiten bei 19,8m/s Windgeschwindigkeit (160,0m NH).

Die ermittelten maximalen Fallweiten sind der Spalte 8 der Tabelle 3 (Eisobjekt Nr. 5) zu entnehmen. Diese maximalen Fallweiten sind in den nachfolgenden Abbildung 4 und Abbildung 5 als Gefährdungsradien (rot gestrichelt) um die geplanten WEA dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Abschnitte der Bundesstraße B410 und der Kreisstraße K9 sowie Teile der umliegenden Wirtschaftswege durch die Gefährdungsradien der geplanten WEA überdeckt werden. Für die Untersuchung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmern auf der Bundesstraße B410 und auf der Kreisstraße K9 durch Eisabfall wird im Folgenden eine Detailanalyse und die Simulation des Eisabfalls durchgeführt. Für die hauptsächlich land- und forstwirtschaftlich genutzten Wirtschaftswege /5/, für die im Winter außerhalb der Bewirtschaftungsperiode von einer unregelmäßig Nutzung ausgegangen werden kann, wird die Nutzungshäufigkeit sowie die mögliche Gefährdung durch Eisabfall innerhalb des ermittelten Gefährdungsradius qualitativ berücksichtigt (siehe Kapitel 6).

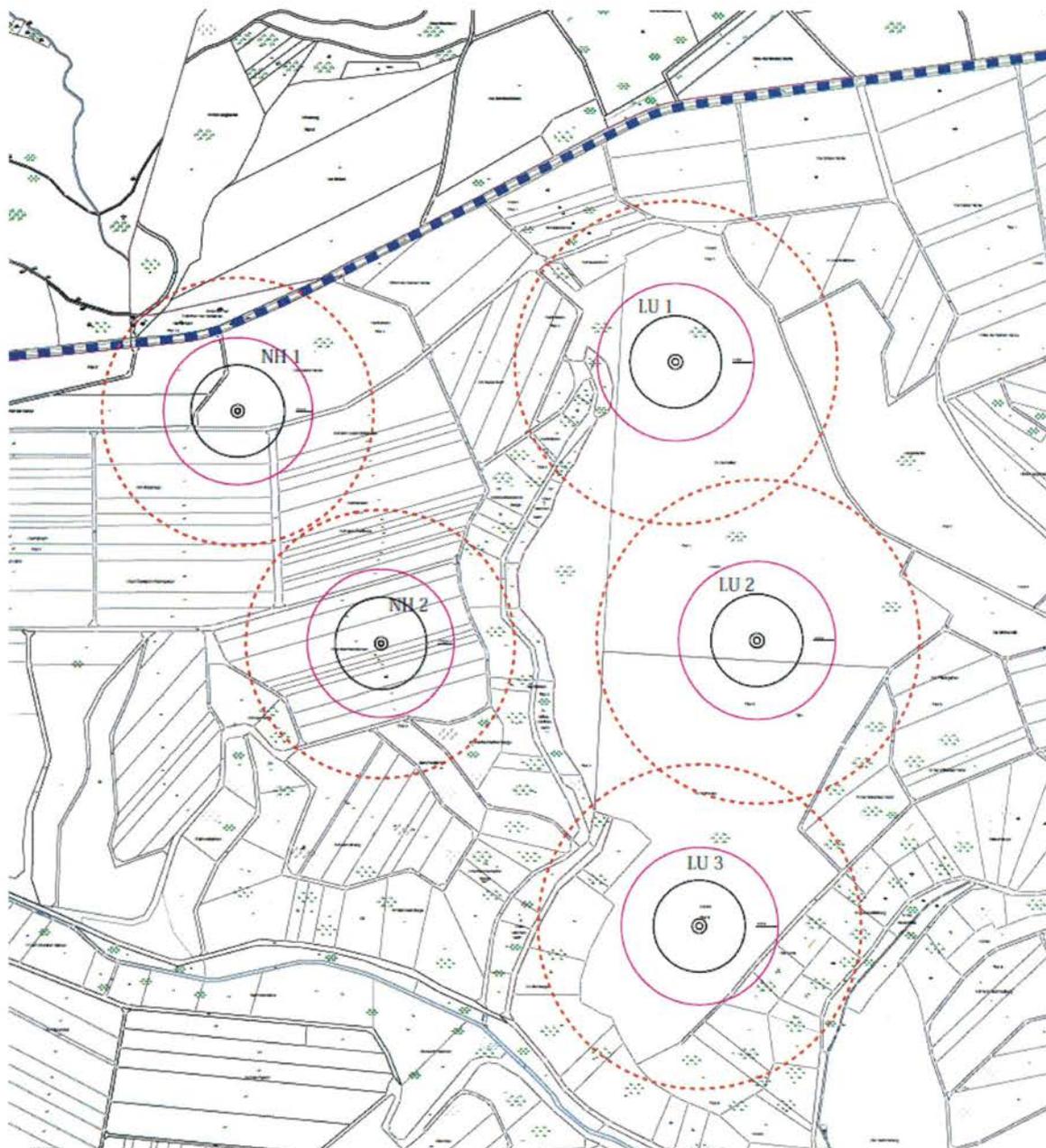


Abbildung 4: Gefährdungsradien WEA LU 1 bis LU 3 und WEA NH 1 und NH 2 – rot gestrichelt.

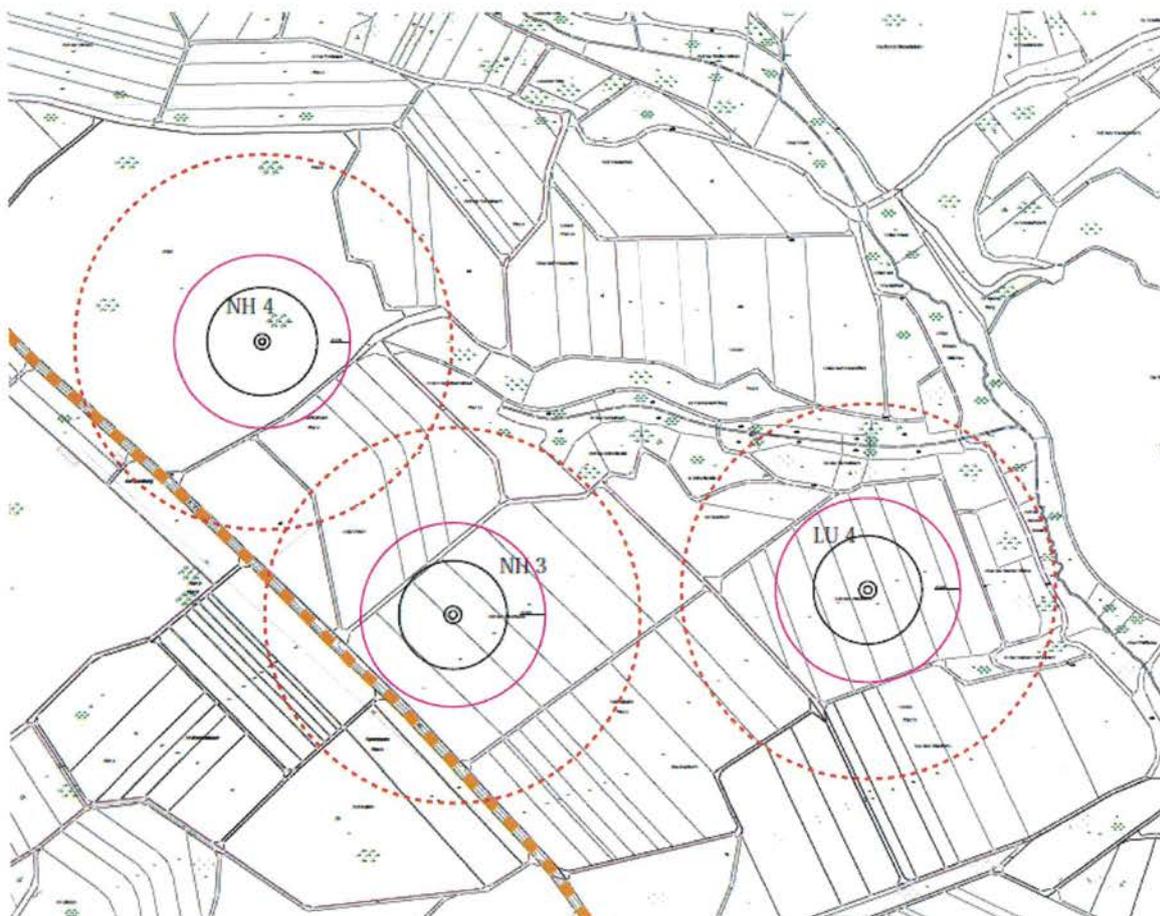


Abbildung 5: Gefährdungsradien WEA NH 3, NH 4, LU 4 – rot gestrichelt.

4.2 Detailanalyse Gefährdung der Bundesstraße B410 und der Kreisstraße K9

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 /39/, /40/: Position und Größe des Eisobjekts, Stellung des Rotorblatts, 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: ENERCON E-138 EP3 mit 160,0m NH und 138,6m D und ENERCON E-138 EP3 mit 130,03m NH und 138,6m D.
- Drehzahl bei Eisabfall: entspricht dem Trudelbetrieb. In Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird die entsprechende Drehzahl bestimmt (Drehzahlbereich

Trudeln 0 – 2,5 U/min) 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 $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ (konservativ aufgerundet bei 0°C Lufttemperatur).
- Eisobjekt: Ideализierte 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 /19/ 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.

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und die Weibullverteilung wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt /4/. Diese werden als repräsentativ und richtig für den Standort vorausgesetzt und wurden nicht durch TÜV NORD geprüft.

4.2.2 Trefferhäufigkeiten

Für die Häufigkeit von Eisabfall-Ereignissen wird gemäß Kapitel 4.1.1 ein Wert von 4.865 Eisabfall-Ereignissen pro WEA und Jahr angesetzt (35 Vereisungstage pro Jahr mit je 139 Eisabfall-Ereignissen). In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Eisabfall-Ereignissen der jeweiligen WEA dargestellt.

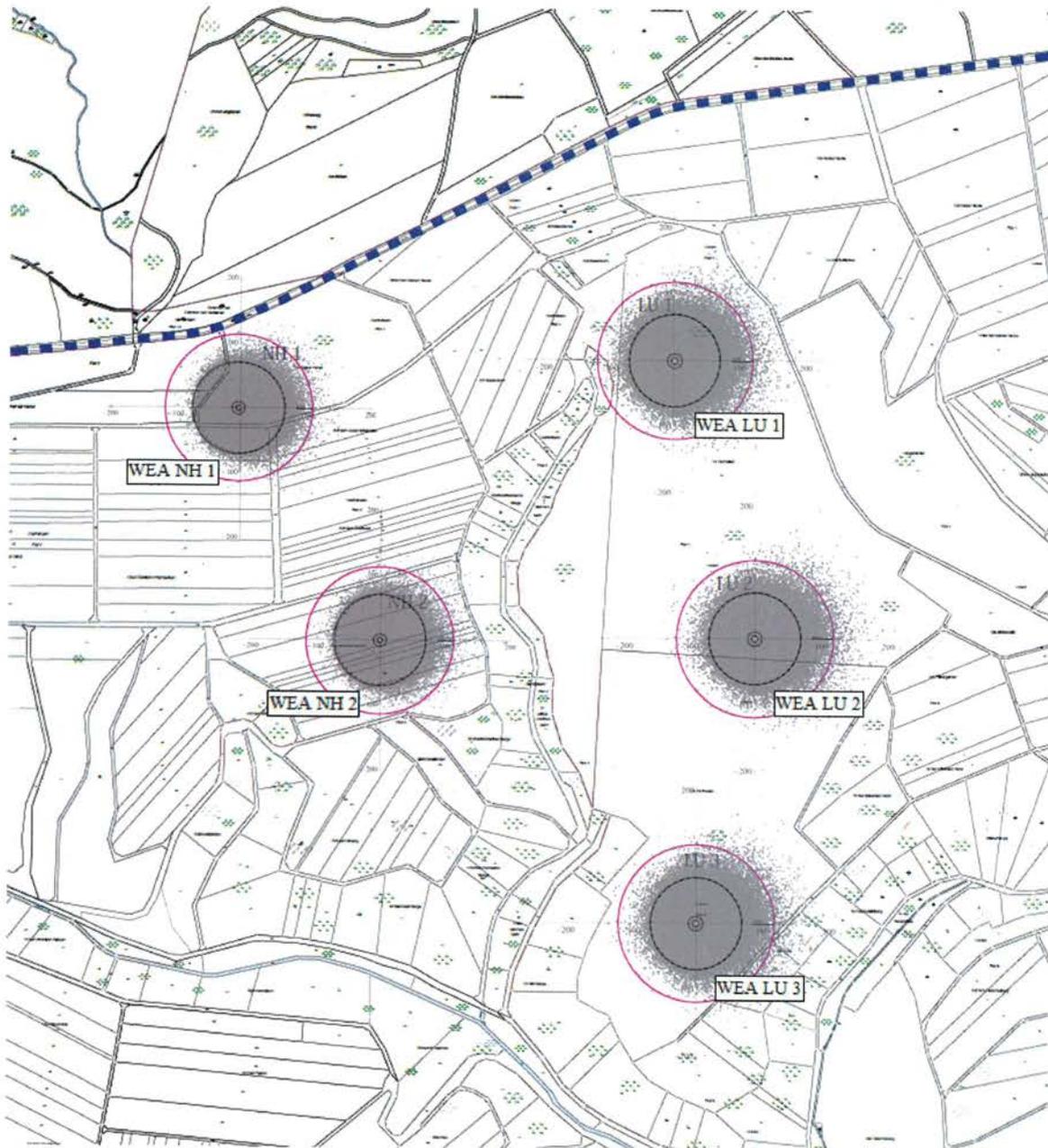


Abbildung 6: Auftreffpunkte bei Eisabfall der WEA LU 1 bis LU 3 und WEA NH 1 und NH 2. Rotorblatt-radius schwarz gestrichelt.



Abbildung 7: Auftreffpunkte bei Eisabfall der WEA NH 3, NH 4 und LU 4. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Größenordnungen der Trefferhäufigkeiten pro m^2 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 [$1/m^2$]	Trefferhäufigkeiten [$1/(a \cdot m^2)$]
1	Rot	größer $1,0E-04$	größer $4,9E-01$
2	Orange	$1,0E-05$ bis $1,0E-04$	$4,9E-02$ bis $4,9E-01$
3	Gelb	$1,0E-06$ bis $1,0E-05$	$4,9E-03$ bis $4,9E-02$
4	Farblos	$1,0E-07$ bis $1,0E-06$	$4,9E-04$ bis $4,9E-03$
5*	Farblos	kleiner $1,0E-07$	kleiner $4,9E-04$

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

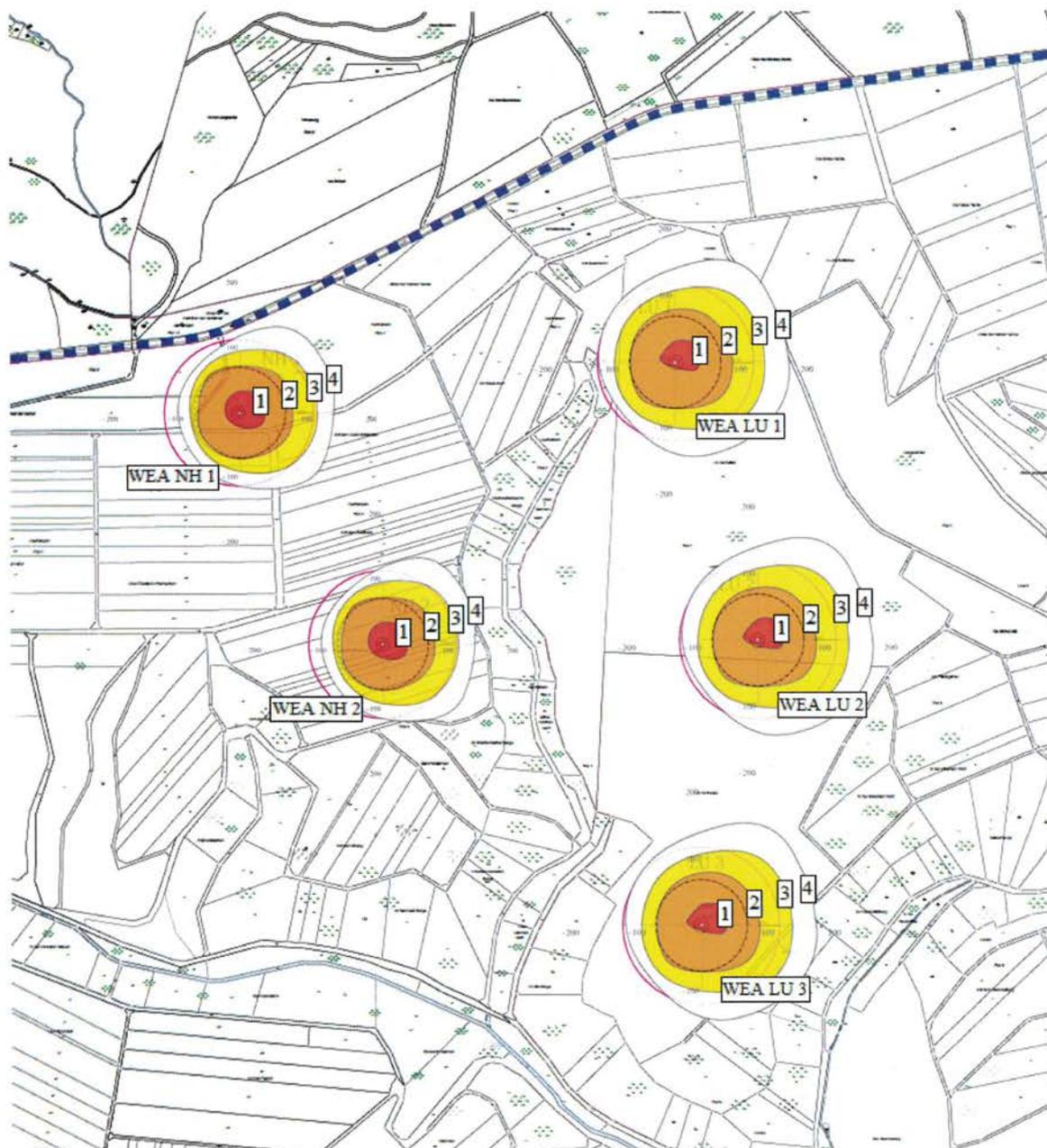


Abbildung 8: Trefferhäufigkeiten [1/m²] pro Eisabfall WEA LU 1 bis LU 3 und WEA NH 1 und NH 2. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

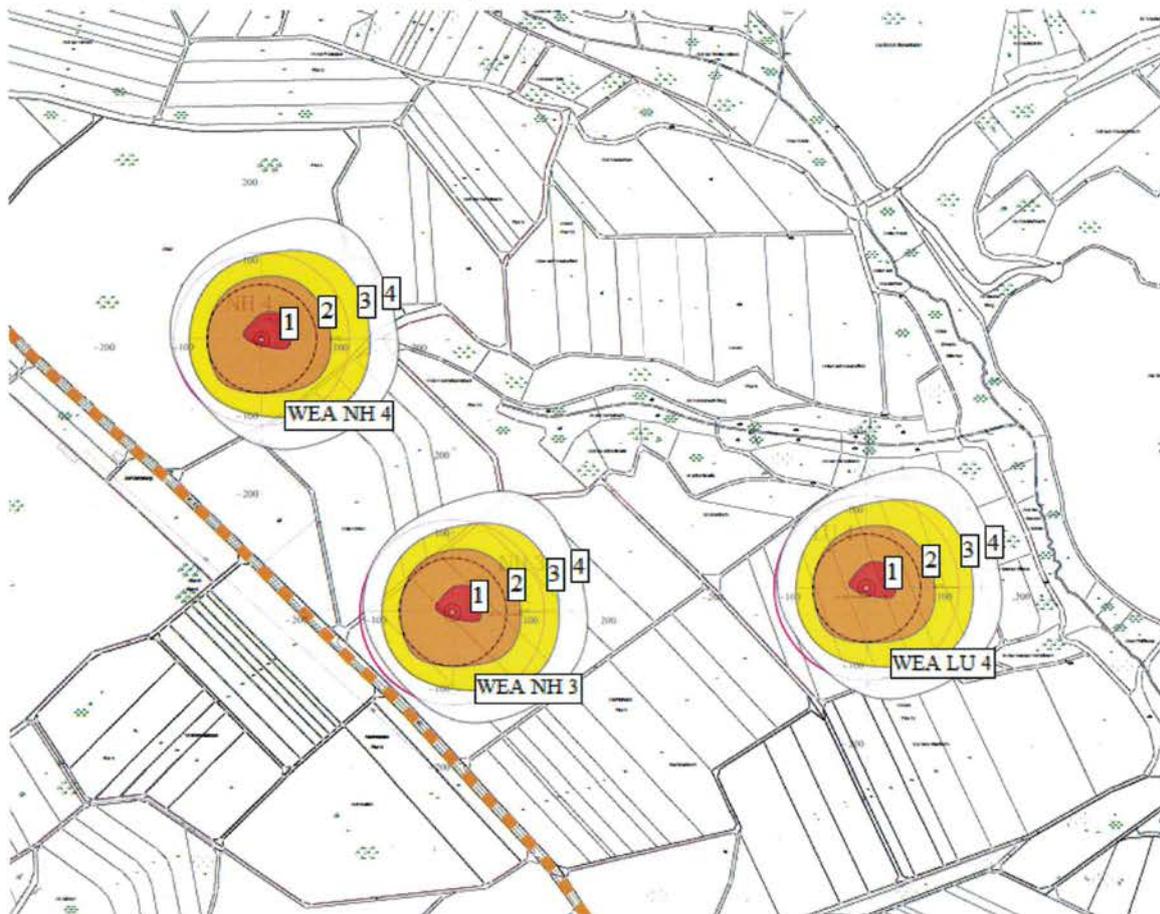


Abbildung 9: Trefferhäufigkeiten [1/m²] pro Eisabfall der WEA NH 3, NH 4 und LU 4. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die standortbezogene Simulation des Eisabfalls (Detailanalyse der Trefferbereiche) von den geplanten WEA (siehe Abbildung 6 bis Abbildung 9) zeigt, dass die Bundesstraße B410 knapp außerhalb des vierten Gefährdungsbereichs der WEA NH 1 liegt. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Kreisstraße K9 knapp außerhalb des durch Eisabfall der WEA NH 3 gefährdeten Bereichs und somit ebenfalls knapp außerhalb des vierten Gefährdungsbereichs liegt. Für die Feldwege, für die im Winter von einer untergeordneten Nutzung ausgegangen werden kann /5/, wird die Nutzungshäufigkeit sowie die mögliche Gefährdung durch Eisabfall innerhalb des ermittelten Gefährdungsradius qualitativ berücksichtigt (siehe Kapitel 6).

4.2.3 Individualrisiko

Auf Basis der in Kapitel 4.2.2 dargestellten Trefferhäufigkeiten wird das Risiko im Straßenverkehr aufgrund Eisabfalls zu verunfallen für die Bundesstraße B410 (Abbildung 8, blau gestrichelte Linie) sowie für die Kreisstraße K9 (Abbildung 9, orange gestrichelte Linie) ermittelt. Für die Durchschnittsgeschwindigkeit wird auf den Straßen konservativ

eine Geschwindigkeit von 50 km/h angesetzt. Diese Annahme ist insofern konservativ, als dass die Expositionsdauer im Gefährdungsbereich erhöht wird.

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

Es ergibt sich der folgende mathematische Zusammenhang:

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

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

- H_{Tj} : Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr (Ergebnis der Simulation).
- H_T : Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr.
- h_{Vj} : Häufigkeit der Vereisung pro Jahr (Kapitel 4.1.1).
- h_{EV} : Häufigkeit Eisabfall pro Vereisung (Kapitel 4.1.1).
- h_{TEj} : Häufigkeit der Treffer pro m² im Bereich j pro Eisabfall (Ergebnis der Simulation).
- A_T : Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs (für einen lebensbedrohlichen Fahrzeugtreffer wird 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, $P_{VA} = (225 \times 2)/365$ (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, Länge des Straßenabschnitts l_j aus Abbildung 9), $P_{Aj} = (l_j/v_F)/24h$.

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergeben sich die in Tabelle 5 aufgeführten Trefferhäufigkeiten 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.

Bereich	Individualrisiko [Treffer/a]
Bundesstraße B410	8,1E-08 Treffer/a
Kreisstraße K9	9,1E-08 Treffer/a

Tabelle 5: Trefferhäufigkeiten pro Jahr, Individualrisiko bei Eisabfall.

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einem Individualrisiko von $9,1E-08$ Treffer/a im Mittel ca. alle 10.989.011 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 B410 sowie der Kreisstraße K9 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^2 im Bereich j pro Eisabfall (Ergebnis der Simulation).
- h_{aVT} : Verkehrsdichte: Für die Verkehrsdichte auf der Bundesstraße B410 werden auf Basis der Angaben aus /11/ ca. 1.951 Fahrzeugen pro Tag angesetzt. Für die Verkehrsdichte auf der Kreisstraße K9 werden auf Basis der Angaben aus /12/ ca. 517 Fahrzeugen pro Tag angesetzt.
- A_T : Zu berücksichtigende Trefferfläche des Fahrzeugs (für einen bedrohlichen 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 9).

Mit dem oben beschriebenen Zusammenhang ergeben sich für die Gefährdung des Straßenverkehrs auf der Bundesstraße B410 sowie der Kreisstraße K9 die in Tabelle 6 aufgeführten Trefferhäufigkeiten pro Jahr. 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.

Bereich	Gefährdung des Straßenverkehrs [Treffer/(m*a)]
Bundesstraße B410	7,9E-07
Kreisstraße K9	2,1E-07

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

Beispielhaft dargestellt, erfolgt bei einer Gefährdung des Straßenverkehrs von 7,9E-07 Treffer/(m*a) im Mittel ca. 1.265.047 Jahre pro Meter Streckenabschnitt ein schwerer Unfall durch Eisabfall. 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 Nachtsheim-Luxem plant der Auftraggeber die Windpark Luxem GmbH & Co. KG die Errichtung von sechs WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 mit 160,0m NH und 138,6m D und zwei WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 mit 130,03m NH und 138,6m D. In der Nähe der geplanten WEA befinden sich die Bundesstraße B410 und die Kreisstraße K9. Darüber hinaus verlaufen in unmittelbarer Umgebung zu den geplanten WEA einige Wirtschaftswege.

Im Rahmen der gutachtlichen Stellungnahme galt es zu prüfen und zu bewerten, ob eine besondere Gefährdung eines Verkehrsteilnehmers im Umkreis der geplanten WEA durch Eisabwurf/Eisabfall vorliegt.

Zusammenfassend wurden die folgenden Ergebnisse und daraus resultierenden Empfehlungen ermittelt:

Auf Basis der uns zur Verfügung gestellten Unterlagen zur Eiserkennung und zur Verhinderung von Eisabwurf (Kapitel 4.1.2) von drehenden Rotorblättern kommt TÜV NORD zu dem Ergebnis, dass das Ereignis Eisabwurf für die hier betrachtete WEA nicht anzunehmen ist. Das vorgesehene System zur Eiserkennung wurde durch TÜV

NORD geprüft /6/. Mit der Prüfung durch TÜV NORD wurde für die Wirksamkeit des Eiserkennungssystems und der aktuelle Stand der Technik des Systems bestätigt /6/.

Für die geplanten WEA des Typs ENERCON E-138 EP3 wurde auf Basis der 99,9%-Quantile der Windgeschwindigkeit mit den in Tabelle 2 angegebenen Eisobjekten die maximalen Fallweiten (Gefährdungsradien) bestimmt. Es ist zu erkennen, dass Teile der land- wirtschaftlichen Flächen und der umliegenden Wirtschaftswege durch die Gefährdungsbereiche der geplanten WEA (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5, rot gestrichelter Radius) überdeckt werden. Darüber hinaus zeigen die Abbildung 4 und Abbildung 5, dass Teile der Bundesstraße B410 und Teile der Kreisstraße K9 von den Gefährdungsradien der WEA überdeckt werden (siehe hierzu Detailanalyse Kapitel 4.2).

Für die Bewertung der Gefährdung im Straßenverkehr sind zum einen das Risiko von Einzelpersonen (Individualrisiko) sowie das Kollektivrisiko (Gefährdung des Straßenverkehrs) zu betrachten. Die Ergebnisse der Detailanalyse in Kapitel 4.2 für den Eisabfall von den geplanten WEA zeigen, dass die Kreisstraße K9 und die Bundesstraße B410 außerhalb des durch Eisabfall direkt gefährdeten Bereichs liegt und nicht von den Trefferflächen der geplanten WEA überdeckt werden.

Für die untersuchten Straßenabschnitte wurden die Gefährdungen für Verkehrsteilnehmer bestimmt (siehe Kapitel 4.2.3 und Kapitel 4.2.4). Anhand der Ergebnisse in Kapitel 4.2 und des in Kapitel 3 hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs kommt der TÜV NORD für die Bewertung einer Gefährdung eines Verkehrsteilnehmers auf der Bundesstraße B410 und der Kreisstraße K9 durch Eisabfall der geplanten WEA zu den folgenden Ergebnissen:

- Das berechnete Individualrisiko für Verkehrsteilnehmer auf der Bundesstraße B410 liegt mit $8,1E-08$ Treffer/a (siehe Kapitel 4.2.3) unterhalb des in Kapitel 3 hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs.
- Die berechnete Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) auf der Bundesstraße B410 liegt mit $7,9E-07$ Treffer/a (siehe Kapitel 4.2.4) unterhalb des ALARP-Bereichs.
- Das berechnete Individualrisiko für Verkehrsteilnehmer auf der Kreisstraße K9 liegt mit $9,1E-08$ Treffer/a (siehe Kapitel 4.2.3) unterhalb des in Kapitel 3 hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs.
- Die berechnete Gefährdung des Straßenverkehrs (Kollektivrisiko) auf der Kreisstraße K9 liegt mit $2,1E-07$ Treffer/a (siehe Kapitel 4.2.4) des in Kapitel 3 hergeleiteten Risikogrenzwertbereichs.

Für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen und Wirtschaftswege, ist eine Gefährdung durch Eisabfall nicht zu unterstellen, da die Wintermonate außerhalb der üblichen landwirtschaftlichen Wirtschaftsperiode liegen und im Winter mit geringem land- und forstwirtschaftlichem Verkehr zu rechnen ist. Sollten hier forstwirtschaftliche Arbeiten im Winter durchgeführt werden, so werden diese normalerweise in einem zeitlich sehr begrenzten Rahmen durchgeführt. Bei Forstarbeiten

im Freien wird üblicherweise ein Helm getragen bzw. kommen bei größeren Durchforstungsmaßnahmen überdachte Maschinen zum Einsatz. Diese bieten einen Schutz gegen möglichen Eisabfall. Sollten landwirtschaftliche Arbeiten außerhalb der üblichen Wirtschaftsperiode im Winter durchgeführt werden, so werden diese normalerweise ebenfalls in überdachten Maschinen ausgeführt. Die Fahrer land- und forstwirtschaftlicher Maschinen sind in ihrem Führerhaus gegen mögliche herabfallende Eisobjekte geschützt. Sie haben über sich ein festes Dach und vor sich eine senkrechte Scheibe. Ein von oben herabstürzendes Eisobjekt könnte demnach auf das Dach fallen. Dem TÜV NORD sind bisher keine Berichte bekannt, wonach ein herabfallendes Eisobjekt das Metaldach eines Fahrzeuges durchschlagen hat.

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

- Die Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems der WEA sollte im Rahmen der Inbetriebnahme /29/, /27/ durch eine befähigte Person geprüft und dokumentiert werden. Betriebsbegleitend ist die Funktionalität des Eiserkennungssystems im Rahmen der vorgesehenen Prüfungen des Sicherheitssystems und der sicherheitstechnisch relevanten Komponenten der WEA /29/, /27/ durch eine befähigte Person aufzuzeigen.
- 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 Wirtschaftswegen frühzeitig erkannt werden. Hierbei können die Schilder durch ein eindeutiges Piktogramm ergänzt werden, welches auf die Gefährdung durch Eisabfall hinweist.
- Die Mitarbeiter der betroffenen Forstbetriebe sollten im Rahmen der Sicherheitsunterweisung nach §12 Arbeitsschutzgesetz /41/ 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 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 Fahrzeuges zum Zeitpunkt des Treffers des Eisobjekts sowie den durch die Bäume der umliegenden Bewaldung bestehenden natürlichen Schutz (Abschattung)),
- dass sich die abgeschalteten, vereisten WEA prinzipiell nicht von anderen Bauwerken mit Eisansatz unterscheiden,

- dass die öffentlich zugänglichen Wege (Wirtschaftswege) in unmittelbarer Nähe der WEA gemäß /5/ hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt werden und im Winter, außerhalb der Wirtschaftsperiode, von einer eher geringen Frequentierung ausgegangen werden kann,
- dass davon auszugehen ist, dass der land- und forstwirtschaftliche Verkehr überwiegend mit geschützten Maschinen erfolgt (landwirtschaftlicher Verkehr ist im Winter außerhalb der Wirtschaftsperiode als eher gering anzusehen),
- dass im Winter in den Wäldern am Standort grundsätzlich mit einem Risiko durch Eisabfall und brechenden Bäumen zu rechnen ist,
- 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 Bundesstraße B410 sowie die Kreisstraße K9 als unkritisch zu betrachten.

Unter Berücksichtigung

- der mit der Liste der Technischen Baubestimmungen des Bundeslandes Rheinland-Pfalz /28/ eingeführten technischen Regeln Anlage 2.7/12: „Gefahr des Eisabwurfs bei Unterschreitung eines Abstands von $1,5 \times$ (Rotordurchmesser + Nabenhöhe)“ sowie in Anlehnung an
- das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /30/ §5 Abs. 1 Nr. 1: „Vermeidung sonstiger Gefahren“

ist eine konkrete Gefährdung der Bundesstraße B410 sowie der Kreisstraße K9 durch die Errichtung der geplanten WEA (WEA LU 1 bis LU 4 sowie WEA NH 1 bis NH 4) am Standort Nachtsheim-Luxem durch Eisabwurf/Eisabfall 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 urheberrechtlich-fähigen 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 Reasonable Practicable	
BDB	Betreiber-Datenbasis	
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_{Nenn}	Nennleistung	[MW]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]
WEA	Windenergieanlage(n)	

9 Literatur- und Quellenangaben

- /1/ DunoAir Windpark Planung GmbH. Angaben zu den WEA-Spezifikationen: Projekt Windpark Nachtsheim-Luxem, Neue WEA – 8x ENERCON E138 EP3 Stand: 30.11.2018. Übermittelt durch DunoAir Windpark Planung GmbH mit E-Mail vom 07.12.2018.
- /2/ DunoAir Windpark Planung GmbH. Lageplan: NHL_181128_PLANUNG-A3hoch, Stand 30.11.2018. Übermittelt durch DunoAir Windpark Planung GmbH mit E-Mail vom 30.11.2018.
- /3/ DunoAir Windpark Planung GmbH. Übersichtskarte: Planzeichnung M3.6 A0 hoch TK, Stand 02.10.2017. Übermittelt durch Windpark Luxem GmbH & Co. KG mit E-Mail vom 02.10.2017.
- /4/ Dunoair Windpark Planung GmbH. Angaben zu den meteorologischen Daten: Analyse der Windverhältnisse, Stand: 02.07.2014. Übermittelt durch Dunoair Windpark Planung GmbH mit E-Mail vom 27.04.2015.
- /5/ Dunoair Windpark Planung GmbH. Angaben zu dem Schutzobjekt. Übermittelt durch Dunoair Windpark Planung GmbH mit E-Mail vom 27.04.2015.
- /6/ 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.5. vom 19.09.2018.
- /7/ ENERCON GmbH. Technische Beschreibung ENERCON Windenergieanlagen Eisansatzerkennung, D0154407-6, Stand 23.02.2018. Übermittelt durch DunoAir Windpark Planung GmbH mit E-Mail vom 07.12.2018.
- /8/ Dunoair Windpark Planung GmbH. Manuelles Starten von ENERCON Windenergieanlagen nach Stopp durch Eisansatz durch die technische Betriebsführung, Stand: August 2018. Übermittelt durch Dunoair Windpark Planung GmbH mit E-Mail vom 31.01.2019.
- /9/ Cattin, R. Zuverlässigkeit der ENERCON Eiserkennung. Schreiben an ENERCON vom 22.03.2012. Genossenschaft METEOTEST. 2012.
- /10/ NASA: Ice Accretions and Icing Effects for Modern Airfoils, April 2000.
- /11/ Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz. Verkehrsstärkenkarte Bundesfern- und Landesstraßen, Straßenverkehrszählung 2015.
- /12/ Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz. Verkehrsstärkenkarte Kreisstraßen, Straßenverkehrszählung 2015.
- /13/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.
- /14/ 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.

- /15/ Rosten, G. et al. State-of-the-Art of Wind Energy in Cold Climates. IEA Wind Task 19. Edition October 2012.
- /16/ Lautenschlager, F. Studie zum Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ereignis Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik. Hamburg 2012.
- /17/ Storck, F. Influence of wind conditions under icing conditions on the result of a risk assessment. Winterwind international wind energy conference. Piteå 2015.
- /18/ Deutscher Wetterdienst. Freie Klimadaten, Eistage Deutschland 1981-2010 (Rasterdaten). www.dwd.de Februar 2014.
- /19/ Morgan, C. et al. Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk? Wind Energy Production in Cold Climates. Bristol. 1996.
- /20/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.
- /21/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.
- /22/ 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.
- /23/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1; Wind turbines - Part 1: Design requirements; Third Edition; August 2005 + Amendment 1: Oktober 2010.
- /24/ 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.
- /25/ COST-727. Atmospheric Icing on Structures. Measurements and data collection on icing: State of the Art Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp. Zürich. 2006.
- /26/ DIN 1055-5. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten. Berlin. Juli 2005.
- /27/ DIBt. Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Berlin. Fassung Oktober 2012.
- /28/ Ministerium der Finanzen, Liste der Technischen Baubestimmung. Fassung September 2014.
- /29/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Hamburg. Ausgabe 2010.
- /30/ BImSchG 2017. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Deutschland. Fassung vom 29.05.2017.
- /31/ 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.

- /32/ DIN EN 50126. Bahnanwendungen. Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS). März 2000.
- /33/ GBE. Heft 52 – Sterblichkeit, Todesursachen und regionale Unterschiede. Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE). 2013.
- /34/ D STATIS. Verkehr, Verkehrsunfälle, Fachserie 8 – Reihe 7. Statistisches Bundesamt. 2015.
- /35/ Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). <http://www.gesetze-im-internet.de>. Gelesen am 10.12.2018. Stand 2017.
- /36/ Trbojevic V.M. 2005. Risk Criteria in EU. ESREL'05, Poland, 27.-30. Juni 2005.
- /37/ Störfall-Kommission. 2004. Bericht, Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung. SFK-GS-41.
- /38/ Hauptmanns, U. & Marx, M. Kriterien für die Beurteilung von Gefährdungen durch technische Anlagen. Verlag VdTÜV - Band 18. Berlin. November 2010.
- /39/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.
- /40/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.
- /41/ Arbeitsschutzgesetz. <http://www.gesetze-im-internet.de>. Gelesen am 04.03.2016. Stand 2009.