

Gutachtliche Stellungnahme zur Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen am Windenergieanlagen-Standort Bernstorff- Questin

Erstellt im Auftrag für

WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH
Rostock OT Seebad Warnemünde

Revision 0

Hamburg, 12.12.2022

Revision	Datum	Änderung
0	12.12.2022	Erste Ausgabe

Gegenstand: Gutachtliche Stellungnahme zur Risikobeurteilung
Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen
am Windenergieanlagen-Standort Bernstorf-Questin

Referenz-Nr.: 2022-WND-RB-318-R0

Auftraggeberin: WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH
Am Strom 1-4
18119 Rostock OT Seebad Warnemünde

Anlagenherstellerin: Nordex SE
Langenhorner Chaussee 600
22419 Hamburg

WEA-Typ:	P_{Nenn} [MW]	D [m]	NH [m]
Nordex N149/5.X	5,7	149,1	164,0

Eingereichte Unterlagen:

- WEA-Spezifikationen: Nennleistung, Drehzahlbereich, Rotordurchmesser und Nabenhöhe /1/.
- Lageplan mit Darstellung der WEA und der Schutzobjekte /2/.
- Beschreibung der Schutzobjekte und des WEA-Standorts /3/.

Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:

Verfasser	B.Sc. F. Lautenschlager Sachverständiger	Hamburg, 12.12.2022
Geprüft durch	Dr. R. Fischer Sachverständiger	Hamburg, 12.12.2022

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	Risikoanalyse	9
3.1	<i>Eisabwurf und Eisabfall</i>	9
3.1.1	Vereisungspotential.....	9
3.1.2	Automatische Eisabschaltung (Eisabwurf).....	11
3.1.3	Randbedingungen für die Untersuchung des Eisabfalls	12
3.1.4	Gefährdungsradius.....	13
3.2	<i>Rotorblattbruch</i>	15
3.2.1	Generische Ereignishäufigkeiten.....	16
3.2.2	Randbedingungen für die Untersuchungen des Rotorblattbruchs.....	16
3.2.3	Trefferhäufigkeiten	16
3.3	<i>Turmversagen</i>	19
3.3.1	Generische Ereignishäufigkeiten.....	19
3.3.2	Gefährdungsbereiche.....	19
4	Modell- und Datenunsicherheiten	20
5	Zusammenfassung und Risikobewertung	21
6	Rechtsbelehrung	25
7	Formelzeichen und Abkürzungen	26
8	Literatur- und Quellenangaben	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan /2/.....	8
Abbildung 2: Fallweiten bei 21,3 m/s Windgeschwindigkeit.....	14
Abbildung 3: Gefährdungsradius – rot gestrichelt ($v = 21,3$ m/s).....	15
Abbildung 4: Auftreffpunkte bei Rotorblattbruch. Rotorblatradius schwarz gestrichelt...	17
Abbildung 5: Trefferhäufigkeiten [$1/m^2$] bei Rotorblattbruch. Rotorblatradius schwarz gestrichelt.....	18
Abbildung 6: Gefährdungsradien (rot gestrichelt): innen – Gondel, außen – Gesamthöhe.....	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung.....	11
Tabelle 2: Idealisierte Eisobjekte.....	13
Tabelle 3: Ermittelte maximale Fallweiten.....	13
Tabelle 4: Wahrscheinlichkeitszonen und mittlere Trefferhäufigkeiten (Rotorblattbruch). *alles außerhalb der Zone 4.....	18

1 Aufgabenstellung

Am Standort Bernstorf-Questin in Mecklenburg-Vorpommern plant die WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH die Errichtung von einer Windenergieanlage (WEA) des Typs Nordex N149/5.X mit 164,0 m Nabenhöhe (NH) und 149,1 m Rotordurchmesser (D). In der Nähe der geplanten WEA 06 verläuft die Autobahn A20.

Gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /25/ §5 Abs. 1 Nr. 1 sind genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass zur Gewährleistung eines hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können. Eisobjekte sowie Trümmerteile (Rotorblattbruch und Turmversagen) sind im Sinne des BImSchG als „sonstige Gefahr“ zu betrachten (siehe auch /26/), 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 Mecklenburg-Vorpommern eingeführten Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen /24/ werden aufgrund einer Gefahr durch Eisabfall und Eisabwurf Mindestabstände definiert. Nach /24/ gelten Abstände größer als $1,5 \times (D + NH)$ im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen als ausreichend. Soweit diese Abstände nicht eingehalten werden, ist eine gutachtliche Stellungnahme einer Sachverständigen oder eines Sachverständigen erforderlich.

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG (TÜV NORD) ist von der WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH mit Schreiben vom 12.09.2022 mit der Erstellung einer Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen beauftragt worden. Die folgende Vorgehensweise ist Gegenstand der Beauftragung:

Erstellung der gutachtlichen Stellungnahme zur Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen am Windenergieanlagen-Standort Bernstorf-Questin (WEA 06):

1. Darstellung des geplanten Projekts mit Angaben zu den Eigenschaften der geplanten WEA und dem Standort.
2. Ermittlung und Darstellung von Kenngrößen zur Risikobewertung.
3. Qualitative Prüfung des Konzepts der Eiserkennung der WEA des Typs Nordex N149/5.X.
4. Ermittlung und Darstellung der möglichen Gefährdung von Verkehrsteilnehmer:innen auf der Autobahn A20 sowie den umliegenden Wirtschaftswegen durch herabfallende Eisobjekte, Rotorblattbruch und Turmversagen von der

WEA des Typs Nordex N149/5.X am Windenergieanlagen-Standort Bernstorf-Questin.

5. Risikobewertung auf Basis der Arbeitsschritte 1 bis 4 zur Einordnung der Ergebnisse (Gefährdung von Verkehrsteilnehmer:innen auf der Autobahn A20 sowie den umliegenden Wirtschaftswegen).

Eine weitere Analyse des möglichen Schadensverlaufs durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen (z.B. Gebäudeschäden, Fahrzeugschäden, Ausbreitungsrechnungen für Gefahrstoffe, Schadensbeurteilung) erfolgt nicht im Rahmen dieser gutachtlichen Stellungnahme. Die Risikobeurteilung erfolgt auf Grundlage der eingereichten Unterlagen. Es wird ausschließlich die Gefährdung der Verkehrsteilnehmer:innen auf der Autobahn A20 durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen durch die neu geplante WEA beurteilt. Zusätzlich wird die landwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen und Wirtschaftswege berücksichtigt. Mögliche weitere Schutzobjekte in der Umgebung der geplanten WEA sowie die Beurteilung weiterer Gefährdungen sind nicht Bestandteil der vorliegenden gutachtlichen Stellungnahme. Für die WEA-Spezifikationen der geplanten WEA wurden die benannten Spezifikationen berücksichtigt (siehe Seite 2).

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 /36/.

2 Angaben zum Windenergieanlagen-Standort

Die Lage der geplanten WEA des Typs Nordex N149/5.X ist dem Lageplan in Abbildung 1 zu entnehmen.



Abbildung 1: Lageplan /2/.

Das umliegende Gelände der geplanten WEA am Standort Bernstorf-Questin ist durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt. In der Nähe der geplanten WEA verläuft die Autobahn A20 (siehe Abbildung 1, orange gestrichelte Linie). Der kürzeste Abstand der geplanten WEA 06 (WEA-Mittelpunkt) zur Autobahn A20 beträgt ca. 373 m /2/.

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

3 Risikoanalyse

3.1 Eisabwurf und Eisabfall

Eisstücke oder Eiszapfen, die aus großer Höhe und mit entsprechend hoher Geschwindigkeit herabgeschleudert werden oder herunterfallen, können für Verkehrsteilnehmer:innen 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 der Fahrerin oder des Fahrers zu Unfällen führen. So stellen beispielsweise herabfallende Eisplatten von LKW mit Planenaufbau für Verkehrsteilnehmer:innen 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 5) unter Berücksichtigung der tatsächlichen Standortumgebung beurteilt.

3.1.1 Vereisungspotential

Die Vereisung durch Eisregen oder Raueis hängt von den meteorologischen Verhältnissen wie Lufttemperatur, relative und absolute Luftfeuchte sowie der Windgeschwindigkeit ab. Diese Parameter werden z. B. durch die Topografie des zu beurteilenden Standortes beeinflusst. Wesentlich sind außerdem die Eigenschaften der Bauteile wie Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit und Form. Allgemein gültige Angaben über das Auftreten von Vereisung können deshalb nicht gemacht werden. Vereisung bildet sich

jedoch bevorzugt im Gebirge, im Bereich feuchter Aufwinde oder in der Nähe großer Gewässer, auch in Küstennähe und an Flussläufen /20/, /21/, /22/.

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

Für den Standort Bernstorf-Questin ist gemäß den Eiskarten Europas /13/ und den Angaben zu den jährlichen Vereisungstagen des DWD /15/, /16/ sowie der Auswertung des Wlce Atlas für Deutschland durch das VTT Technical Research Centre /14/ im Mittel mit ca. zehn 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“ /17/, /18/, /19/ wurden unter anderem beobachtete abgefallene bzw. abgeworfene Eisobjekte einer WEA mit einem Rotordurchmesser von 44,0 m statistisch erfasst. So wurden in vier Jahren mind. 250 Eisobjekte beobachtet /19/. Unter Berücksichtigung der in /18/ 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, setzt TÜV NORD für die Anzahl der Eisabwurf- bzw. Eisabfallereignisse, unter Berücksichtigung einer geschätzten Dunkelziffer von 100%, einen Wert von 14 Eisobjekten pro Vereisung an.

Da die Studie „Alpine Test Site Gütsch“ für eine WEA mit einem Rotordurchmesser von 44,0 m durchgeführt wurde, sind die Beobachtungen auf andere WEA zu übertragen. In Tabelle 1 sind die prognostizierten abgeworfenen Eisobjekte pro Vereisung aufgeführt.

WEA-Typ	D [m]	D ² [m ²]	Verhältnis	Eisobjekte/ Vereisung
ENERCON E-40/6.44	44,0	1.936	1,0	ca. 14
Nordex N149/5.X	149,1	22.231	11,5	ca. 161

Tabelle 1: Prognostizierte, abgeworfene Eisobjekte/Vereisung.

3.1.2 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. Sofern erforderliche Abstände zu den relevanten Schutzobjekten in Bezug auf eine mögliche Gefahr durch Eisabwurf nicht eingehalten werden (siehe Kapitel 1), ist die Funktionssicherheit der Eiserkennung mit einer gutachterlichen Stellungnahme einer oder eines Sachverständigen nachzuweisen /24/.

Für die Eiserkennung wird das von Nordex verwendete Eiserkennungssystem IDD.Blade der Firma Wölfel in die geplanten WEA eingebaut /5/, /6/. Die Erkennung des Eisansatzes beruht auf der Messung von Beschleunigungen und Temperatur direkt an den Rotorblättern. In jedem Rotorblatt misst ein Beschleunigungssensor die Eigenschwingungen des elastischen Rotorblattes, eine zentrale Einheit wertet die Daten der einzelnen Sensoren aus. Weichen die Messdaten von den ermittelten Referenzdaten (ermittelt über Lernphase am Standort) ab, so wird dies als Eisansatz interpretiert und die WEA daraufhin abgeschaltet /10/.

Die Eiserkennung ist auch bei einer abgeschalteten WEA (Trudelbetrieb) möglich. Hierbei ist zu beachten, dass die WEA zur Eiserkennung trudelt und mindestens eine Windgeschwindigkeit von ca. 3 m/s herrschen muss. Steht die WEA mit Eisansatz komplett still, so wird die WEA anschließend erst in einen Trudelbetrieb gefahren, bis das System den eisfreien Zustand erkannt hat und die Anlage zum automatischen Neustart freigibt /10/.

Das System wurde nach DNVGL-SE-0439 „Zertifizierung der Zustandsüberwachung“ zertifiziert /7/. Mit /8/ wurde für die Eiserkennung mittels IDD.Blade bestätigt, dass das System dem Stand der Technik entspricht und zur Erkennung von Eisansatz geeignet ist. Gemäß /8/ werden die behördlichen Anforderungen für eine sichere Abschaltung bei Gefahr von Eisabwurf im laufenden Betrieb als „sonstige Gefahr“ im Sinne des § 5 BImSchG erfüllt. Das vorgesehene System ist gemäß /8/ auch unter konservativen Annahmen zur Gefahrenabwehr bzgl. Eisabwurf geeignet. Die Einbindung des Systems in Nordex WEA wurde von TÜV NORD geprüft /10/. Im Rahmen dieser Prüfung wurden die Sensibilität, die Parametrierung und die Integration in die WEA-Steuerung bewertet. Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die Funktion des Eiserkennungssystems IDD.Blade und die Integration in die WEA-Steuerung dem Stand der

Technik entsprechen und auch ein automatisches Wiederauffahren nach Vereisung als sicher zu bewerten ist /8/, /10/.

Ein Wegschleudern des Eises von rotierenden Rotorblättern (Eisabwurf) ist aufgrund der geplanten Systeme zur Eiserkennung für den Standort Bernstorf-Questin nicht anzunehmen. Im Folgenden wird die darüber hinaus bestehende Gefährdung durch Eisabfall betrachtet.

3.1.3 Randbedingungen für die Untersuchung des Eisabfalls

Für die Berechnungen der maximalen Fallweiten werden die folgenden Rahmenbedingungen angenommen:

- WEA-Typ: Nordex N149/5.X mit 164,0 m NH und 149,1 m D.
- Drehzahl bei Eisabfall: Die WEA ist abgeschaltet (Trudelbetrieb). In Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird die entsprechende Drehzahl im Trudelbetrieb ermittelt (Drehzahlbereich Trudeln 0 – 3,0 U/min /11/) und als Anfangsgeschwindigkeit des Eisobjekts berücksichtigt.
- Lageparameter des Rotorblattes: Das Rotorblatt steht senkrecht über dem Turm, sodass die Blattspitze ihre maximale Höhe erreicht.
- Lageparameter des Eisobjekts: Das Eisobjekt befindet sich an der Rotorblattspitze.
- Eisobjekt: Idealisierte Eisobjekte mit unterschiedlicher Form und Größe.
- Windrichtung: Der Wind kommt aus beliebiger Richtung und weht in horizontaler Richtung 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).

Über die anzusetzende Form und Größe der Eisobjekte gibt es nur wenige belastbare Angaben. Die zur Verfügung stehenden Angaben deuten darauf hin, dass die Mehrzahl der Eisobjekte relativ klein ist (bis ca. 2,0 kg) und die Eisobjekte selten ein Gewicht von mehreren Kilogramm aufweisen /12/, /13/, /17/. Zudem hat sich in Feldstudien /17/ gezeigt, dass das Gewicht der Eisobjekte für die Fallweite von geringer Relevanz ist. Die Flugeigenschaften werden im Wesentlichen von der Geometrie und dem c_w -Wert (Strömungswiderstandskoeffizient) beeinflusst.

Um den Einfluss von unterschiedlichen Eisobjekten zu berücksichtigen, werden für die Berechnungen idealisierte Eisobjekte mit unterschiedlicher Form und Größe angesetzt. Die Gewichte der Eisobjekte werden unter Berücksichtigung der Kenntnisse

aus /17/ auf 1,0 kg normiert. Die Eigenschaften der zugrunde gelegten Eisobjekte sind in Tabelle 2 dargestellt.

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

Tabelle 2: Idealisierte Eisobjekte.

3.1.4 Gefährdungsradius

Für die geplante WEA mit einer Gesamthöhe von ca. 238,5 m über Grund wurde mit einer Windgeschwindigkeit von 21,3 m/s (99,9%-Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung /4/) auf Basis der in Tabelle 2 angegebenen Eisobjekte die maximale Fallweite ermittelt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3 und die entsprechenden Fallkurven in Abbildung 2 dargestellt.

v [m/s]	1 Würfel [m]	2 Quader [m]	3 Quader [m]	4 Platte [m]	5 Platte [m]
21,3	151,3	166,9	189,0	231,8	278,0

Tabelle 3: Ermittelte maximale Fallweiten.

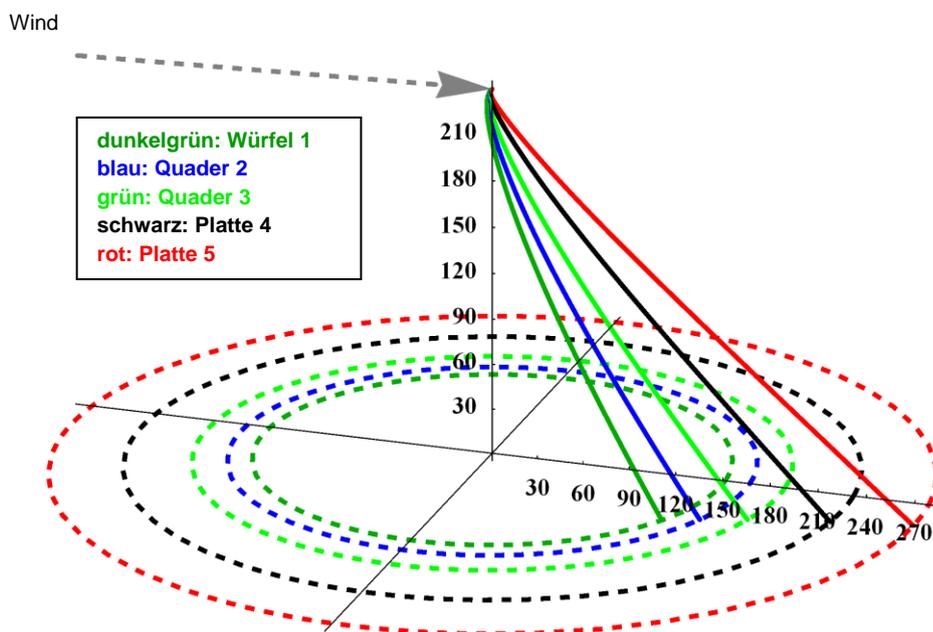


Abbildung 2: Fallweiten bei 21,3 m/s Windgeschwindigkeit.

Die ermittelte maximale Fallweite ist der Spalte 6 der Tabelle 3 (Eisobjekt Nr. 5) zu entnehmen. Diese maximale Fallweite ist in der nachfolgenden Abbildung 3 als Gefährdungsradius (rot gestrichelt) um die geplante WEA dargestellt. Es ist zu erkennen, dass keine Abschnitte der Autobahn A20 durch den Gefährdungsradius der geplanten WEA überdeckt werden. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass Teile des Gefährdungsradius Abschnitte der Wirtschaftswege überdecken. Für die hauptsächlich landwirtschaftlich genutzten Wirtschaftswege (untergeordnete Freizeitnutzung) /3/, 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 5).

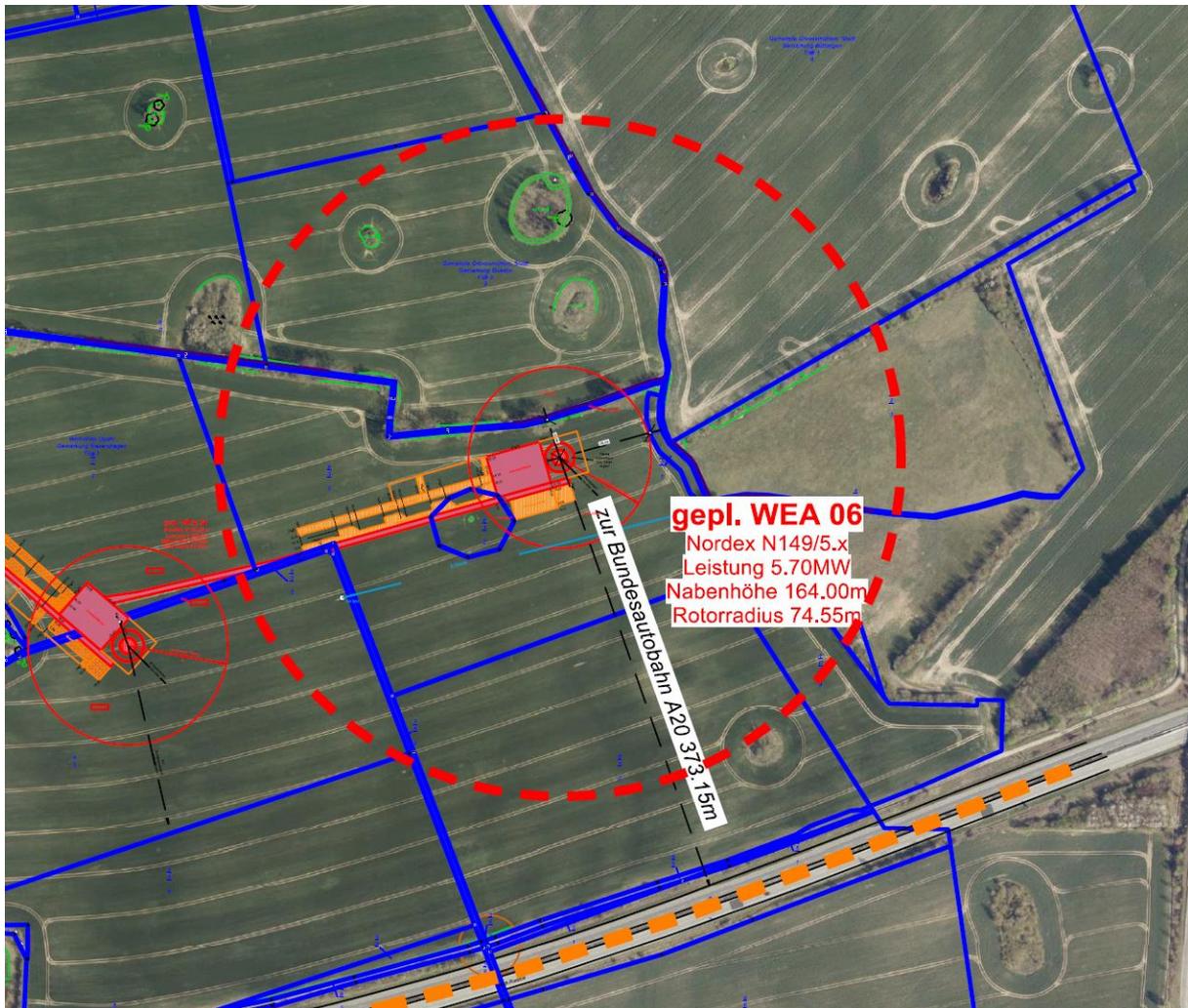


Abbildung 3: Gefährdungsradius – rot gestrichelt ($v = 21,3 \text{ m/s}$).

3.2 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:innen im Trefferbereich eine Gefahr dar.

3.2.1 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 /27/, /28/ von einer Schadenshäufigkeit von $5,0E-04$ pro WEA und Jahr aus. Diese Schadenshäufigkeit ergibt sich aus einer Auswertung der TÜV NORD bekannten Schadensereignisse in Deutschland /27/ unter Berücksichtigung einer geschätzten Anzahl von nicht bekannten Ereignissen in gleicher Größenordnung sowie einer Auswertung von SenterNovem (Handboek Risicozonering Windturbines /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 aus /29/ entnommen werden.

3.2.2 Randbedingungen für die Untersuchungen des Rotorblattbruchs

Die Berechnungen der Flugbahnen von Rotorblattbruchstücken erfolgen unter Variation der verschiedenen Parameter wie Bruchlage, Abwurfwinkel, Windrichtung und Windstärke /32/. Es werden somit 100.000 verschiedene Flugbahnen simuliert.

Für die Simulationen werden folgende Annahmen getroffen:

- WEA-Typ: Nordex N149/5.X mit 164,0 m NH und 149,1 m D.
- Drehzahl bei Rotorblattbruch: $12,2 \text{ U/min} \cdot 120\% = 14,64 \text{ U/min}$ (Überdrehzahl).
- Für die Verteilung der Windrichtung wurden die meteorologischen Daten des Standortes /4/ verwendet.
- Für die Verteilung der Windgeschwindigkeit wurden die meteorologischen Daten des Standortes /4/ verwendet (Weibull-Parameter A und k).
- Der Rotorblattbruch wird vorausgesetzt. Es wird angenommen, dass dieser für Windgeschwindigkeiten in einem Bereich [15 m/s bis 30 m/s] erfolgt. Diese Annahme ist aufgrund der Ausdehnung des Trefferbereiches für Windgeschwindigkeiten kleiner 15 m/s als abdeckend zu betrachten.
- Es wurden diskrete Bruchpositionen angesetzt (alle 2 Meter), diese werden als gleichverteilt angenommen.
- Der Bruch wird als glatter Schnitt modelliert, der Bruch verbraucht keine Energie.
- Trümmerbrüche, die ein Feld von kleineren Trümmerteilen erzeugen, werden nicht betrachtet.
- Die Abwurfposition (in Rotorblattebene) ist gleichverteilt.

3.2.3 Trefferhäufigkeiten

In Abbildung 4 sind die Auftreffpunkte von 100.000 verschiedenen Rotorblattbruch-Ereignissen pro WEA dargestellt.

Zone	Farbe	Trefferhäufigkeiten [1/m ²]	Trefferhäufigkeiten [1/(a m ²)]
1	Rot	größer 1,0E-05	größer 5,0E-09
2	Orange	1,0E-06 bis 1,0E-05	5,0E-10 bis 5,0E-09
3	Gelb	1,0E-07 bis 1,0E-06	5,0E-11 bis 5,0E-10
4	Farblos	1,0E-08 bis 1,0E-07	5,0E-12 bis 5,0E-11
5*	Farblos	kleiner 1,0E-08	kleiner 5,0E-12

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

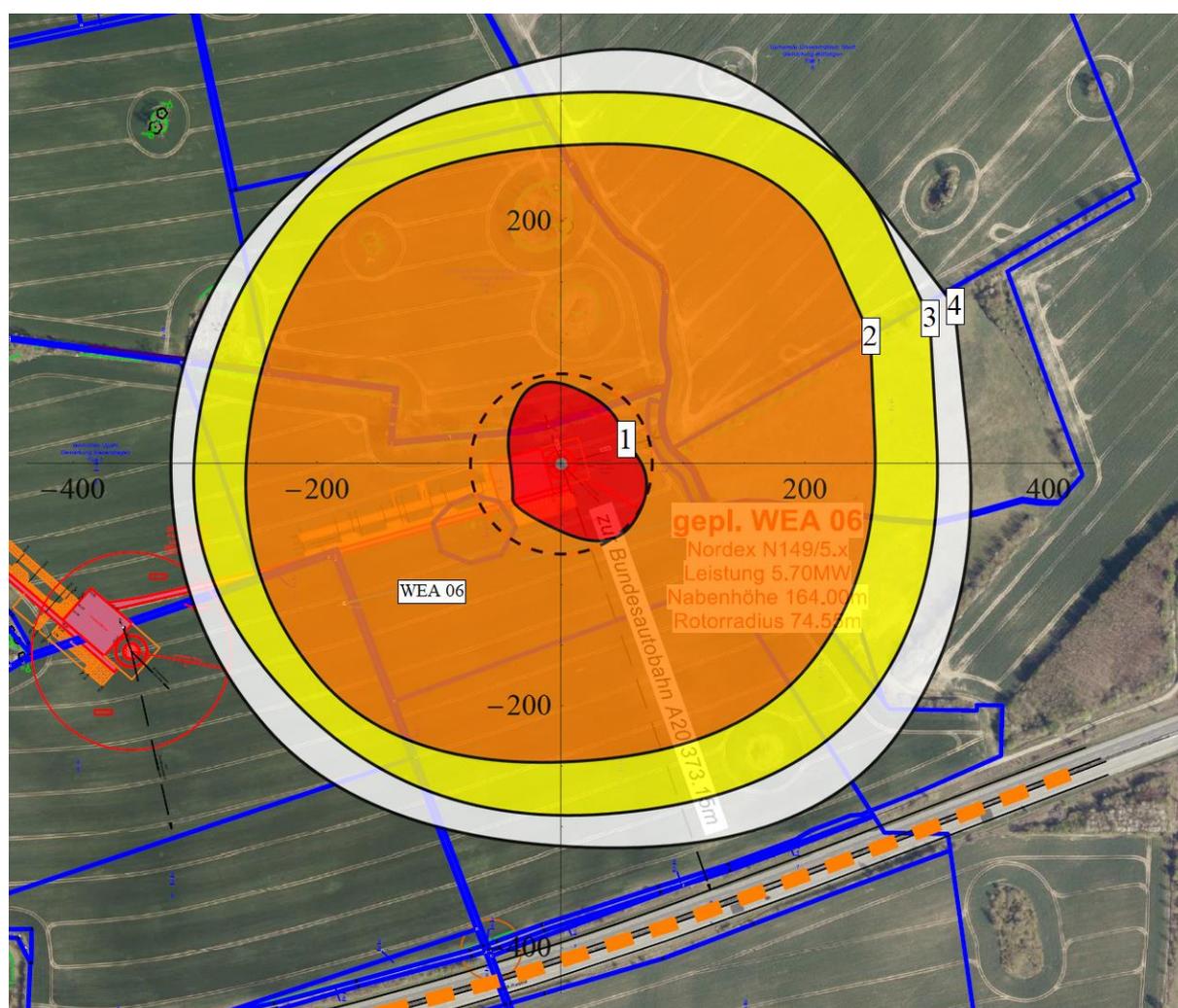


Abbildung 5: Trefferhäufigkeiten [1/m²] bei Rotorblattbruch. Rotorblattradius schwarz gestrichelt.

Die Ergebnisse der standortbezogenen Simulation des Rotorblattbruchs in Abbildung 5 zeigen, dass die Autobahn A20 außerhalb der durch Rotorblattbruch direkt gefährdeten Bereiche liegt. Die ermittelten Gefährdungsbereiche der WEA 06 überdecken die Autobahn A20 nicht. Eine direkte Gefährdung durch Rotorblattbruch von der

WEA 06 für Verkehrsteilnehmer:innen auf der Autobahn A20 ist somit nicht zu unterstellen.

3.3 Turmversagen

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

Trümmerobjekte durch Turmversagen (inkl. Fundamentversagen, Gondelabsturz), die aus großer Höhe herabstürzen, stellen für Verkehrsteilnehmer:innen im Trefferbereich eine ernste Gefahr dar. Ein Turmversagen kann z. B. bei Versagen des Bremssystems /30/ oder Materialermüdung /31/ auftreten.

3.3.1 Generische Ereignishäufigkeiten

Es sind bereits mehrere Ereignisse bekannt, bei denen WEA aufgrund eines Turm- oder Fundamentversagens vollständig oder teilweise umgestürzt sind. Darüber hinaus sind Schadensereignisse bekannt, bei denen die Gondel einschließlich Rotor vom Turm gebrochen ist. TÜV NORD geht nach Auswertung der verfügbaren Ereignis-Datenbanken /27/, /28/ von einer Schadenshäufigkeit von $5,0E-05$ pro WEA und Jahr aus. Diese Schadenshäufigkeit ergibt sich aus einer Auswertung der TÜV NORD bekannten Schadensereignisse in Deutschland /27/ und einer Auswertung von SenterNovem (Handboek Risicozonering Windturbines /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 aus /29/ entnommen werden.

3.3.2 Gefährdungsbereiche

In Abbildung 6 sind die maximalen Gefährdungsradien bei Turmversagen (innen – Gondel, außen – Gesamthöhe) dargestellt. Es zeigt sich, dass bei einem möglichen Turmversagen durch die WEA 06 der Turm inkl. Gondel und Rotorblätter nicht auf die Autobahn A20 fallen könnte. Ein Turmversagen der geplanten WEA 06 hat unter Berücksichtigung der vorgenannten Bedingungen keine Gefährdung für Verkehrsteilnehmer:innen auf der Autobahn A20 zur Folge.

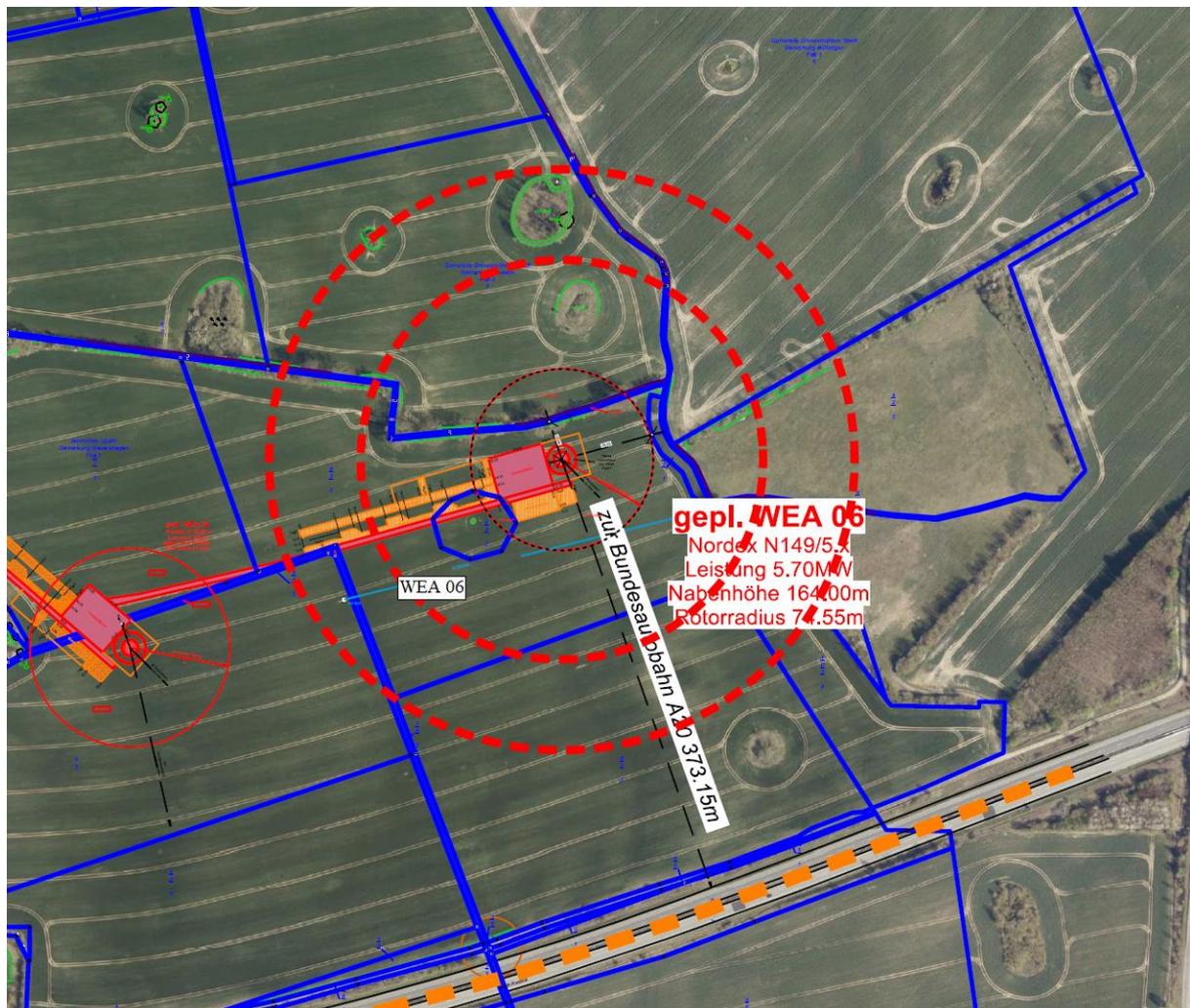


Abbildung 6: Gefährdungsradien (rot gestrichelt): innen – Gondel, außen – Gesamthöhe.

4 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.

5 Zusammenfassung und Risikobewertung

Am Standort Bernstorf-Questin in Mecklenburg-Vorpommern plant die WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH die Errichtung von einer WEA des Typs Nordex N149/5.X mit 164,0 m NH und 149,1 m D. In der Nähe der geplanten WEA 06 verläuft die Autobahn A20.

Im Rahmen der gutachtlichen Stellungnahme galt es zu prüfen und zu bewerten, ob eine besondere Gefährdung von Verkehrsteilnehmer:innen auf der Autobahn A20 durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch oder Turmversagen von der geplanten WEA 06 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 3.1.2) von drehenden Rotoren kommt TÜV NORD zu dem Ergebnis, dass das Ereignis Eisabwurf für die hier betrachtete WEA nicht anzunehmen ist. Mit /8/ und /10/ wurde bestätigt, dass die Wirksamkeit des geplanten Eiserkennungssystems und die Einbindung in den geplanten WEA-Typ Nordex N149/5.X dem aktuellen Stand der Technik entsprechen und zur Verhinderung von Eisabwurf geeignet sind.

Auf Basis der ermittelten Gefährdung durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen (siehe Kapitel 3) ist zu erkennen, dass keine Teile der Autobahn A20 betroffen sind. Eine direkte Gefährdung von Verkehrsteilnehmer:innen auf der Autobahn A20 durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen ist auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 3 nicht anzunehmen. Des Weiteren sind, die landwirtschaftlich genutzten Wirtschaftswege in der näheren Umgebung der geplanten WEA durch Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen betroffen.

Für die landwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen und Wirtschaftswege ist eine Gefährdung durch Eisabfall nicht anzunehmen, da die Wintermonate außerhalb der üblichen Wirtschaftsperiode liegen und im Winter mit weniger landwirtschaftlichem Verkehr zu rechnen ist. Sollten dennoch Arbeiten außerhalb der üblichen Wirtschaftsperiode im Winter durchgeführt werden, so werden diese normalerweise in überdachten Maschinen ausgeführt, welche einen Schutz gegen möglichen Eisabfall bieten. Die Fahrer:innen 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 das Metaldach eines Fahrzeuges durchschlagen hätte.

Für die landwirtschaftliche Nutzung der umliegenden Flächen und Wirtschaftswege (inkl. Zufahrten der geplanten WEA) ist eine Gefährdung durch Rotorblattbruch und

Turmversagen nicht anzunehmen, da die flächenbezogene Nutzungshäufigkeit durch Personen als gering anzusehen ist.

Weitere risikoreduzierende Maßnahmen

Unter Berücksichtigung des Eiserkennungssystems (siehe Kapitel 3.1.2) sowie der Ergebnisse aus Kapitel 3 empfiehlt TÜV NORD die folgenden üblichen Maßnahmen zur weiteren Minderung des Restrisikos:

- Die Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems der WEA sollte im Rahmen der Inbetriebnahme /23/, /24/ durch eine:n unabhängige:n Sachverständige:n /33/ 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/, /24/ durch eine:n unabhängige:n Sachverständige:n /33/ regelmäßig aufzuzeigen. Für die Inbetriebnahme des Eiserkennungssystems sollte die Anlernphase berücksichtigt werden. Ist die Anlernphase nicht vor den winterlichen Vereisungsereignissen abgeschlossen, so sind geeignete Maßnahmen zur Vermeidung eines Eisabwurfs vorzusehen.
- Durch Hinweisschilder (mind. im Abstand der 1,2-fachen Gesamthöhe der WEA) ist an den Zufahrtswegen der WEA und den umliegenden Wirtschaftswegen auf die Gefährdung durch Eisabfall aufmerksam zu machen. Die Schilder sind so aufzustellen, dass sie von möglichen Benutzer:innen 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 /3/ 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:innen auf der Autobahn A20 sowie den umliegenden Wirtschaftswegen als akzeptabel zu betrachten.

Unter Berücksichtigung

- der mit der Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern /24/ eingeführten technischen Regeln Anlage A 1.2.8/6: „Gefahr des Eisabfalls und Eisabwurfs bei Unterschreitung eines Abstands von $1,5 \times (\text{Rotordurchmesser} + \text{Nabenhöhe})$ “

sowie in Anlehnung an

- das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) /25/ §5 Abs. 1 Nr. 1: „Vermeidung sonstiger Gefahren“

ist eine konkrete Gefährdung von Verkehrsteilnehmer:innen auf der Autobahn A20 durch Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen der geplanten WEA 06 am Standort Bernstorf-Questin nach Umsetzung der genannten Maßnahmen zur Risikominderung nicht anzunehmen.

Generelle Maßnahmen zur Reduzierung des Restrisikos durch Rotorblattbruch und Turmversagen

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

- Grundsätzlich empfiehlt TÜV NORD vor Montage der Rotorblätter eine Prüfung, Schadstellenbewertung und -dokumentation durch einen unabhängigen Sachverständigen /33/ an den Rotorblättern vorzunehmen. Die Rotorblätter sollten zudem zum Abschluss der Inbetriebnahme /23/, /24/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /33/ geprüft werden.
- Regelmäßige Wiederkehrende Prüfung (WKP) des Sicherheitssystems und des Bremssystems gemäß /23/, /24/ sowie den Grundsätzen des Bundesverband Windenergie (BWE) /34/, /35/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /33/.
- Regelmäßige WKP der Rotorblätter und der Standsicherheit des Turms (mind. Sichtprüfung) gemäß /23/, /24/ sowie den Grundsätzen des BWE /34/, /35/ durch einen unabhängigen Sachverständigen /33/. Im Rahmen der Prüfung der Standsicherheit sind unter anderem der Übergang zwischen Fundament und Turmfuß, das Fundament auf Setzung und die Vorspannkräfte der Schraubverbindung zwischen dem Fundament und dem unteren Turmsegment zu prüfen.
- Organisatorische Maßnahmen, wie ein detaillierter Alarmplan, der im Falle eines drohenden oder eingetretenen Rotorblattschadens bzw. Turmversagens die Abschaltung der WEA sowie eine Benachrichtigung der Alarmierungsstellen und weitere Schadensbegrenzung regelt.

6 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 eingereichten Unterlagen und Angaben und für durch unrichtige Angaben bedingte falsche Aussagen oder abgeleitete Empfehlungen.

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 der WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH 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 die WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH 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, der WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH die weitere Nutzung der Leistungen zu untersagen.

7 Formelzeichen und Abkürzungen

A	Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung	[m/s]
a	Jahr	[a]
BDB	Betreiber-Datenbasis	
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	
BWE	Bundesverband Windenergie e.V.	
D	Rotordurchmesser	[m]
h	Stunde	[h]
k	Formparameter der Weibull-Verteilung	[-]
LKW	Lastkraftwagen	
min	Minute	[min]
NH	Nabenhöhe	[m]
P_{Nenn}	Nennleistung	[MW]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]
VTT	VTT Technical Research Centre of Finland	
WEA	Windenergieanlage(n)	
WKP	Wiederkehrende Prüfung	

8 Literatur- und Quellenangaben

- /1/ WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH. Angaben zu den WEA-Spezifikationen. Übermittelt durch WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH mit E-Mail vom 22.07.2022.
- /2/ WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH. Lageplan und Angaben zur Rotorüberstrichenen Fläche: Windpark Bernstorf/Questen Übersichtskarte und Lageplan zum Bauantrag, Stand: 19.10.2022 und 20.05.2022. Übermittelt durch WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH mit E-Mail vom 19.10.2022.
- /3/ WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH. Beschreibung der Schutzobjekte und Angaben zu den Nutzungshäufigkeiten. Übermittelt durch WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH mit E-Mails vom 18.10.2022 und 19.10.2022.
- /4/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Angaben zu den meteorologischen Daten: Gutachtliche Stellungnahme zur Risikobeurteilung Eisabwurf/Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen am Windenergieanlagen-Standort Bernstorf/Questin III, Referenz: 2021-WND-RB-239a-R1, Stand: 02.09.2021. Übermittelt durch WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH am 18.10.2022.
- /5/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Angaben zum Eiserkennungssystem: Intern. Übermittelt durch WIND-projekt Ingenieur- und Projektentwicklungsgesellschaft mbH mit E-Mail vom 18.10.2022.
- /6/ Wölfel Wind Systems GmbH. Produktspezifikation IDD.Blade. Höchberg, 2020.
- /7/ DNV Renewables Certification. Service Specification DNVGL-SE-0439:2016-06: Certification of condition monitoring. Juni 2021.
- /8/ DNV Renewables Certification. Gutachten Ice Detection System, IDD.Blade, Report-Nr.: 75148, Rev. 0, Stand 21.10.2019.
- /9/ Nordex Energy GmbH. Allgemeine Dokumentation Eiserkennung an Nordex-Windenergieanlagen. Dokumenten-Nr.: E0003946627 Rev.3 vom 01.04.2021.
- /10/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Gutachten zur Bewertung der Funktionalität eines Eiserkennungssystems zur Verhinderung von Eisabwurf an Nordex Windenergieanlagen, Bericht: 8111327215, Rev. 5, Stand 23.09.2020.
- /11/ Nordex Energy GmbH & Co. KG. Maximale Rotordrehzahl im langsamen Trudeln nach „Eisalarm“. Stand 18.11.2020.
- /12/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.
- /13/ 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.
- /14/ VTT Technical Research Centre of Finland. Icing map of Germany, 2020.

- /15/ Deutscher Wetterdienst. Freie Klimadaten, Eistage Deutschland 1981-2010 (Rasterdaten). www.dwd.de, Juni 2017.
- /16/ 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.
- /17/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.
- /18/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.
- /19/ Cattin, R. et al. Four years of monitoring a wind turbine under icing conditions, IWAIS 2009, 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Bern. 2009.
- /20/ Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE); DIN EN IEC 61400-1 (VDE 0127-1):2019; Windenergieanlagen – Teil 1 Auslegungsanforderungen (IEC 6140-1:2019). Dezember 2019.
- /21/ VTT Technical Research Centre of Finland. State-of-the-art of wind energy in cold climates. VTT WORKING PAPERS 152. ISBN 978-951-38-7493-3. 2010.
- /22/ COST-727. Atmospheric Icing on Structures. Measurements and data collection on icing: State of the Art Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp. Zürich. 2006.
- /23/ DIBt. Richtlinie für Windenergieanlagen – Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Berlin. Stand Oktober 2012 – Korrigierte Fassung März 2015.
- /24/ Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Mecklenburg-Vorpommern. Verwaltungsvorschrift Technischen Baubestimmungen M-V (VV TB M-V). Fassung Januar 2021.
- /25/ BImSchG 2020. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Deutschland. Fassung vom 03.12.2020.
- /26/ 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.
- /27/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Statistische Auswertung von Pressemeldungen über Havarien von Windenergieanlagen im Zeitraum 2010 bis 2021 (Internetrecherche). Hamburg. 2022.
- /28/ Rijksdienst voor Ondernemend Nederland: Handboek Risicozonering Windturbines, Versie 3, Nederland. 2014.
- /29/ Deutsche WindGuard GmbH. Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland - Halbjahr 2022.
- /30/ Schaumburger Wochenblatt. „Burglind“ reißt Windkraftanlage zu Boden. Meldung vom 06.01.2018.

- /31/ LR-online.de. War es eine Windhose? Gutachter skeptisch. Meldung vom 14.12.2014.
- /32/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.
- /33/ Bundesverband WindEnergie e.V. Anforderungen an den Sachverständigen für Windenergieanlagen. Berlin. 21.09.2007.
- /34/ Bundesverband WindEnergie e.V. Grundsätze für die Wiederkehrende Prüfung von Windenergieanlagen. Berlin 2012.
- /35/ Bundesverband WindEnergie e.V. Grundsätze für die die Prüfung zur zustandsorientierten Instandhaltung von Windenergieanlagen. Osnabrück. 21.09.2007.
- /36/ IEA Wind TCP Task 19. International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments. Revision 1, April 2022.