

Gutachtliche Stellungnahme

Einfluss einer Rotorblattheizung auf die Gefährdung durch Eisobjekte von ENERCON Windenergieanlagen

TÜV NORD Bericht-Nr.: 8119303413 Rev. 0

Gegenstand der Prüfung: Einfluss der Rotorblattheizung auf die Gefährdung durch Eisabwurf von Windenergieanlagen

Erstellt für: ENERCON GmbH
Dreekamp 5
26605 Aurich

Dieser Bericht umfasst 10 Seiten.

Rev.	Datum	Änderungen
0	22.03.2022	Erste Fassung

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	ENERCON Messkampagne	3
2.1	Methodischen Vorgehensweise.....	3
2.2	Ergebnisse der Messkampagne	3
3	Gefährdungsradius.....	4
3.1.1	Randbedingungen für die Ermittlung der maximalen Eisabwurfweiten	5
3.1.2	Ergebnisse	5
4	Datenunsicherheiten	8
5	Zusammenfassende Bewertung des Einflusses der RBH auf die Sicherheit ..	8
6	Dokumente	10

1 Einleitung

ENERCON hat in den Wintern 2012-2013, 2013-2014 und 2014-2015 eine umfangreiche Datenerfassungskampagne von Eisstücken um vier Windenergieanlagen (WEA) des Typs ENERCON E-82 mit 78,0 m Nabenhöhe (NH) und 82,0 m Rotordurchmesser (D) im Windpark Kryštofovy Hamry in der Tschechischen Republik durchgeführt. Im Bericht /1/ sind Informationen über den Standort, die Erfassungskampagne, die Daten und ihre Unsicherheit sowie die Ergebnisse der Datenanalyse zusammengefasst. Von den vier WEA wurden drei in verschiedenen Betriebsweisen mit einer Rotorblattheizung (RBH) betrieben und eine WEA als Vergleich ohne RBH.

Mit der vorliegenden gutachtlichen Stellungnahme werden die Ergebnisse der Studie im Hinblick auf die Sicherheit des Betriebs einer RBH bewertet. Im Einzelnen wird der Einfluss der RBH auf die Kriterien Eismasse, Eisdichte bzw. Eisart und Gefährdungsradius bewertet. Für den Gefährdungsradius werden zusätzlich zur ENERCON-Studie /1/ eigene Berechnungen zur maximalen Wurfweite durchgeführt.

2 ENERCON Messkampagne

2.1 Methodischen Vorgehensweise

Die Messungen wurden vor Ort von Ingenieurstudenten der Technischen Universität Bergakademie Freiberg durchgeführt. Die Datenerfassungskampagne wurde in Zusammenarbeit mit Meteotest durchgeführt. Meteotest überwachte die Vereisung an den Standorten mit Kameras. Wenn Vereisung beobachtet wurde, setzte sich Meteotest mit den Studenten in Verbindung, die nach dem Ereignis vor Ort die Eisstücke am Boden lokalisiert und vermessen bzw. kategorisiert haben. Eine Unterscheidung zwischen Eisabwurf von WEA in Betrieb und Eisabfall von stillstehenden / trudelnden WEA ist aufgrund der Zeitdifferenz zwischen Ereignis und vor Ort Vermessung nicht möglich gewesen.

Die Angaben zu Randbedingungen, Qualitätssicherung, Unsicherheiten und Datenqualität sind in Bericht /1/ nachvollziehbar und plausibel dargestellt.

2.2 Ergebnisse der Messkampagne

Nach Auswertung der Daten können folgende Aussagen zum Einfluss der RBH auf die Vereisung der WEA gemacht werden.

Keine der hier untersuchten Betriebsweisen der RBH kann Eisabwurf vermeiden.

Eine WEA, die während Vereisungsereignissen stillsteht oder trudelt, hat den geringsten Eiswurf-Gefährdungsbereich.

WEA mit aktivierter RBH und Betrieb während Vereisungsereignissen führen zu einem größeren Eiswafradius und einem geringeren durchschnittlichen Eisstückgewicht.

Reif-Eis ist die vorherrschende Art von Eisstücken, die von WEA mit aktivierter RBH erzeugt werden.

Ein Vergleich zwischen einer WEA mit RBH nur im Stillstand / Trudelbetrieb und automatischem Wiederanlauf und einer WEA mit RBH im Betrieb zeigt keine wesentliche Verringerung des Eisabwurf-Gefährdungsbereichs.

Die Verdoppelung der Heizleistung hat nicht zu einer Verringerung des Eiswurf-Gefährdungsbereichs geführt.

Eine nicht beheizte WEA wies im Allgemeinen weniger und dafür größere / schwerere Eisstücke auf als eine beheizte WEA. Klar-Eis war bei den großen Stücken die vorherrschende Eis-Art. Bei den kleineren Eisstücken, die am weitesten entfernt landeten, war Reif-Eis die vorherrschende Eis-Art. Insgesamt wurde festgestellt, dass die Eisstücke von beheizten WEA im Durchschnitt ein um ca. 50 % geringeres Gewicht aufwiesen als die von unbeheizten WEA.

Bei der unbeheizten WEA betrug die maximale gemessene Eiswurfweite 140 m, während sie bei den beheizten WEA 170 m betrug (Faktor 1,2). Diese maximal gemessene Eiswurfweite (Reif-Eis, 50g) war deutlich kleiner als der nach der üblichen Sicherheitsabstandsmethode ermittelte Wert von 240 m, der auf der Nabenhöhe und dem Rotordurchmesser basiert. Für die Bewertung des Gefährdungsradius werden daher im Folgenden eigene Berechnungen durchgeführt.

3 Gefährdungsradius

Auf Basis der Ergebnisse der Messkampagne kann nicht festgestellt werden, dass der Betrieb einer RBH die Gefährdung durch Eisabwurf oder Eisabfall grundsätzlich reduziert. Daher sind auch beim Betrieb einer RBH Sicherheitsabstände aufgrund der Gefahr durch Eisabwurf und Eisabfall einzuhalten. In der Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (VVTB) /2/ wird ein Mindestabstand von $1,5 \times (D + NH)$ in nicht besonders eisgefährdeten Regionen gemäß DIN EN 1991-1-3 /3/ als ausreichend bewertet. Dieser allgemein auch als Seifert-Formel bekannte Abstand wurde 2000 als grober Richtwert für den Abstand eingeführt, in dem mit einer Gefahr durch Eisabwurf zu rechnen ist /4/. Moderne WEA sind deutlich größer als zu der Zeit, in der die Seifert-Formel aufgestellt wurde und werden mit deutlich geringeren Drehzahlen betrieben. Um zu überprüfen, ob die Seifert-Formel (VVTB) den Gefährdungsbereich durch Eisabwurf von modernen WEA realistisch darstellt oder zu konservativ ist, wurde für die in Tabelle 1 aufgeführten WEA-Typen aus der ENERCON-Produktpalette für unterschiedliche Nabenhöhen der Eisabwurf simuliert.

WEA-Typ	Rotordurchmesser [m]	Nabenhöhen [m]	Nenn Drehzahl [U/min]
E-53	52,9	60,0 / 73,0	28,3
E-82	82,0	78,0 / 85,0 / 98,0 / 108,0 / 138,0	16,9
E-115 EP3 E3	115,7	92,0 / 122,0 / 135,0 / 149,0	12,9
E-138 EP3 E2	138,25	111,0 / 131,0 / 160,0	10,8

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten WEA-Typen.

3.1.1 Randbedingungen für die Ermittlung der maximalen Eisabwurfweiten

Für die Simulation des Eisabwurfs werden die folgenden konservativen Rahmenbedingungen angenommen, um eine maximale Eisabwurfweite zu erzielen:

- Lageparameter des Rotorblattes: Die Stellung des Rotorblattes wird zur Ermittlung der maximalen Eisabwurfweite in der Rotationsebene der Rotorblätter schrittweise variiert.
- Lageparameter des Eisobjekts: Das Eisobjekt befindet sich an der Rotorblattspitze.
- Eisobjekt: Idealisierte Eisobjekte mit unterschiedlicher Form und entsprechend unterschiedlichen c_w -Werten (Strömungswiderstandskoeffizient).
- Windgeschwindigkeit: Es wurde eine konstante Windgeschwindigkeit von 20,0 m/s für den gesamten Flug angesetzt. Gemäß Deutschem Wetterdienst (DWD) /5/ ist bei einer solchen Windgeschwindigkeit mit brechenden Ästen von Bäumen (vergleichbar mit der Gefährdung durch herabfallende Eisobjekte) und einem beschwerlichen Gehen im Freien zu rechnen. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse aus /6/, dass an den überwiegenden Standorten in Deutschland bei Eisansatz mit niedrigeren Windgeschwindigkeit, bezogen auf die Ganzjahreswindstatistik, zu rechnen ist.
- Physikalische Parameter: Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, Luftdichte $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ (konservativ aufgerundet bei 0°C Lufttemperatur).

3.1.2 Ergebnisse

Die simulierten und die mit der Seifert-Formel (VVTB) berechneten maximalen Eisabwurfweiten für die verschiedenen WEA sind in der Tabelle 2 dargestellt.

WEA-Typ	Nabenhöhe [m]	Eisabwurfweite aus der Simulation [m]	Eisabwurfweite aus der Seifert-Formel [m]
E-53	60,0	170,7	169,35
	73,0	184,9	188,85
E-82	78,0	192,2	240,0
	85,0	199,8	250,5
	98,0	214,0	270,0
	108,0	225,0	285,0
	138,0	257,8	330,0
E-115 EP3 E3	92,0	221,2	311,55
	122,0	254,1	356,55
	135,0	268,3	376,05
	149,0	283,7	397,05
E-138 EP3 E2	111,0	249,7	373,875
	131,0	271,6	403,875
	160,0	303,5	447,375

Tabelle 2: Vergleich der simulierten Eisabwurfweiten mit den Eisabwurfweiten aus der Seifert-Formel (VVTB).

Der Vergleich der simulierten Eisabwurfweite für die E-82 mit 78,0 m Nabenhöhe von 192,0 m mit der im Rahmen der Messkampagne höchsten gemessenen Wurfweite von 170,0 m deuten darauf hin, dass die gewählten Randbedingungen der Simulation hinreichend konservativ sind.

Die Ergebnisse der E-53 zeigen bei beiden betrachteten Nabenhöhen eine gute Übereinstimmung der simulierten Eisabwurfweite mit der Seifert-Formel (VVTB), während die Abweichung zur Seifert-Formel (VVTB) mit steigender WEA-Größe und abnehmender Nenndrehzahl immer mehr zunimmt. Dies ist auch in Abbildung 1 zu erkennen, in der das Verhältnis der simulierten Wurfweite zur mit der Seifert-Formel (VVTB) ermittelten Wurfweite gegen die Nenndrehzahl aufgetragen ist. Es ist deutlich ein linearer Trend zu erkennen, wonach die Seifert-Formel (VVTB) mit sinkender Rotordrehzahl (und entsprechend mit zunehmender WEA-Größe) immer konservativer wird. Zusätzlich ist in Abbildung 2 die maximale Eisabwurfweite relativ zu $(NH+D)$ gegen den Rotordurchmesser aufgetragen. Hier ist ebenfalls zu erkennen, dass die Seifert-Formel von $1,5 \cdot (NH+D)$, welche als rote Linie eingezeichnet ist, mit zunehmendem Rotordurchmesser immer konservativer ist, wobei der Trend im Vergleich zur Rotordrehzahl nicht linear ist.

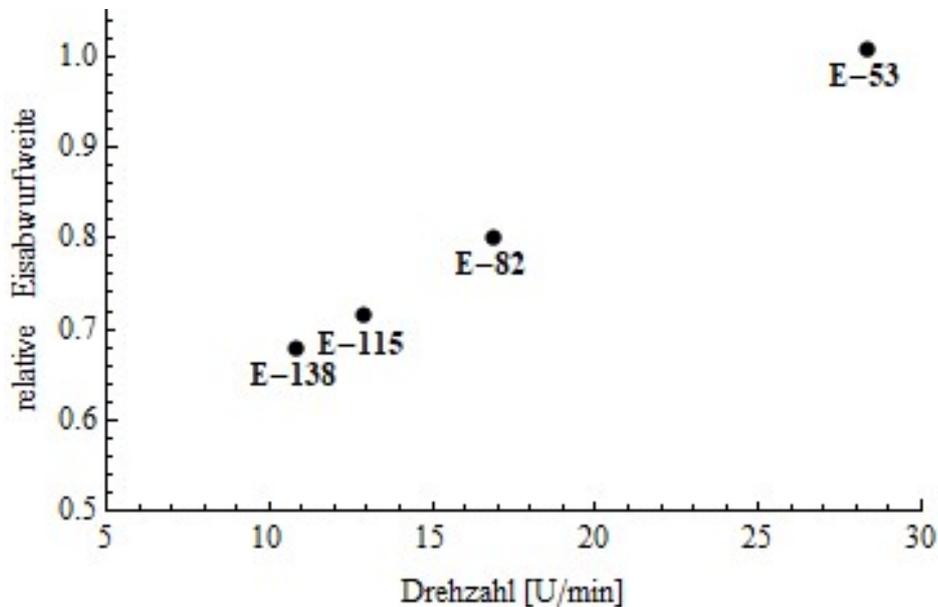


Abbildung 1: maximale Eisabwurfweiten relativ zur Seifert-Formel (VVTB).

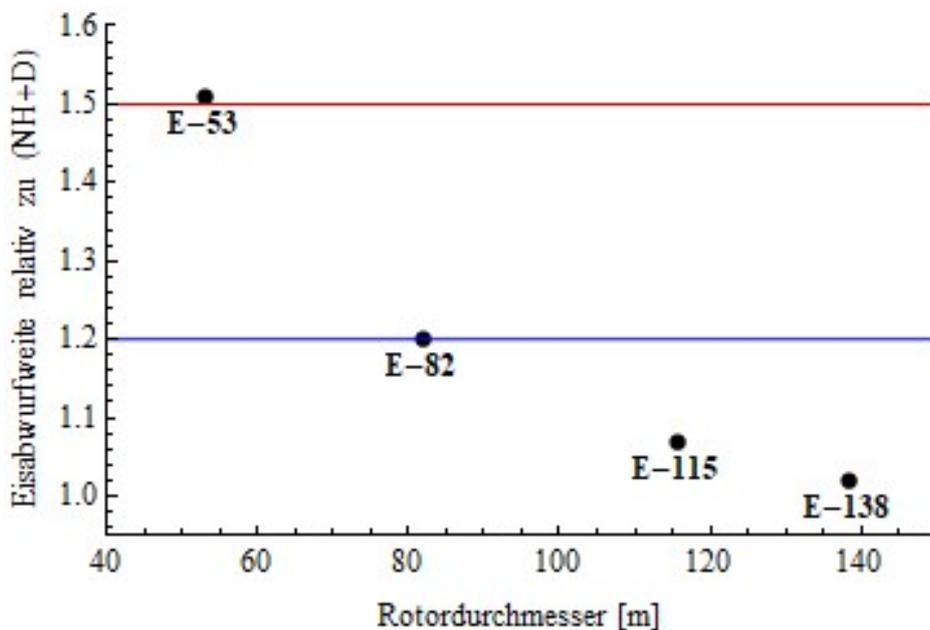


Abbildung 2: maximale Eisabwurfweiten relativ zu (NH+D).

Aus dem Vergleich der Simulationsergebnisse des Eisabwurfs mit den jeweiligen Ergebnissen der Seifert-Formel (VVTB) lässt sich schließen, dass die Seifert-Formel (VVTB) für ältere WEA eine gute Näherung ist, für moderne WEA jedoch als sehr konservativ angesehen werden kann. Stattdessen könnte auf Basis der vorliegenden Ergebnisse ein Mindestabstand von $1,2 \cdot (D + NH)$ als ausreichend zum Schutz vor Eisabwurf betrachtet werden. Dieser Abstand ist in Abbildung 2 als blaue Linie eingezeichnet und deckt die

ENERCON E-82 und alle größeren untersuchten WEA-Typen mit geringerer Nenndrehzahl ab. Sobald sich innerhalb dieses Gefährdungsbereichs Verkehrswege oder Gebäude befinden, sollte eine standortbezogene Risikobeurteilung zum Eisabwurf/Eisabfall durchgeführt werden.

4 Datenunsicherheiten

Es besteht bei den in /1/ erfassten Daten eine erhebliche Unsicherheit. Aufgrund der Vielzahl an Messungen innerhalb eines kurzen Zeitraums (jeweils 1 Tag) sind vereinfachte Annäherungen erforderlich gewesen. Ein großer Teil der Schätzungen beruht auf Beurteilungen und Annahmen. Darüber hinaus ist ein hohes Maß an Unsicherheit auf die schwierigen Umweltbedingungen zurückzuführen.

Die Parameter, die mit der Unsicherheit zusammenhängen, wurden erst in der letzten Phase des Erhebungsprozesses aufgenommen. Aus diesem Grund sind nur begrenzte Informationen über die Messunsicherheit verfügbar.

Die Datenunsicherheiten der Ergebnisse sind in /1/ nachvollziehbar und plausibel quantifiziert worden.

Die ermittelten Ergebnisse der Modellrechnungen in Kapitel 3 gelten nur unter den genannten Randbedingungen. Sämtliche Randbedingungen und 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.

5 Zusammenfassende Bewertung des Einflusses der RBH auf die Sicherheit

Die Beobachtungen in /1/ zeigen, dass es bei einer WEA mit RBH weiterhin zu Eisabwurf kommen kann. Die RBH hat jedoch Einfluss auf die Eis-Art und die Größe der Eisstücke. Bei WEA mit RBH ist die durchschnittliche Masse der Eisstücke geringer, wohingegen die Gesamtmenge an Eisansatz bzw. Eisabwurf gestiegen ist.

Es ist zu erwarten, dass die Gefahr einer schweren Verletzung von Personen, die sich während Vereisungsperioden in der Nähe der WEA aufhalten und getroffen werden, bei verringertem Eisstückgewicht bzw. einer geringeren Dichte des Eisstücks im Vergleich zu Klar-Eis sinkt. Das Trefferrisiko im Gefahrenbereich steigt jedoch mit der Anzahl der abgeworfenen Eisstücke.

Eine Änderung des Gefährdungsbereichs (Eisabwurf) durch Einsatz einer RBH lässt sich aus den Beobachtungen in /1/ nicht ableiten.

Allerdings ist festzustellen, dass der verbreitete Ansatz der Bestimmung des Gefährdungsbereichs über die Seifert-Formel (VVTB, /3/) für die ENERCON E-82 und alle größeren untersuchten WEA-Typen sehr konservativ ist. Die Beobachtungen in /1/ wurden durch Simulationen für verschiedene WEA-Typen gestützt.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse ist für die hier betrachteten WEA mit oder ohne RBH ein Mindestabstand von $1,2 \cdot (D + NH)$ als ausreichend zum Schutz vor Eisabwurf zu bewerten. Dieser Abstand deckt die ENERCON E-82 und alle größeren untersuchten WEA-Typen mit geringerer Nenndrehzahl ab.

Erstellt

Geprüft

Dipl.-Ing. O. Raupach

B.Sc. F. Lautenschlager

Sachverständiger

Sachverständiger

An der Erstellung beteiligt
M.Sc. N. Cromm
Sachverständiger

6 Dokumente

- /1/ ENERCON GmbH, Ice piece data analysis, Results from the 3-year icing measurement campaign conducted at WF Kryštofovy Hamry (Czech Republic)
Report No.: D02472905/3 (D02472905-en-IcePieceDataAnalysis.docx)
Date: 2021-12-06
- /2/ DIBt. Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen. Ausgabe 2020/1.
- /3/ DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schnee. Berlin. April 2019.
- /4/ Bengt Tammelin, Massimo Cavaliere, Hannele Holtinnen, Colin Morgan, Henry Seifert, Kristiina Säntti. Wind Energy in Cold Climate, Final Report WECO (JOR3-CT95-0014), ISBN 951-679-518-6, Finnish Meteorologica Institute, Helsinki, Finland, Februar 2000.
- /5/ Deutscher Wetterdienst. Online Wetter- und Klimalexikon, Stand: Februar 2022.
- /6/ Frederik Lautenschlager. Studie zum Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ereignis Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik. 2012.