

Risikoanalyse für einen Windpark bei Willerswalde (Mecklenburg-Vorpommern)

Berichtsnummer: WE201907-1

Seiten: 29

Auftragnehmer:

Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dieter Frey
Bürgermeister Kröger Straße 17
D - 21244 Buchholz - Sprötze

Auftraggeber:

EEN GmbH

Herrenhufenstraße 1
D-17489 Greifswald

INHALT

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | ZUSAMMENFASSUNG | 3 |
| 2. | EINLEITUNG | 4 |
| 3. | STANDORTBESCHREIBUNG | 5 |
| 3.1 | LAGE | 5 |
| 4. | RISIKOBEWERTUNG | 6 |
| 4.1 | INDIVIDUELLES RISIKO | 6 |
| 4.2 | KOLLEKTIVES RISIKO (GEFÄHRDUNG DES STRAßENVERKEHRS) | 7 |
| 5. | RISIKOANALYSE | 8 |
| 5.1 | EISWURF UND EISFALL | 8 |
| 5.1.1 | BESTIMMUNG DER EISABWURFWEITEN | 8 |
| 5.1.2 | MINIMIERUNG DES EISWURFRISIKOS | 12 |
| 5.1.3 | MAßNAHMEN ZUM SCHUTZ VOR EISWURF IM BETRIEB | 13 |
| 5.1.3.1 | ERKENNUNG VON EISANSATZ | 13 |
| 5.1.3.2 | MAßNAHMEN ZUM SCHUTZ VOR EISWURF BEI WIEDERANLAUF | 13 |
| 5.2 | BAUTEILVERSAGEN | 13 |
| 5.2.1 | ROTORBLATT | 13 |
| 5.2.2 | TURM | 14 |
| 5.2.3 | MAßNAHMEN ZUR MINIMIERUNG DES SCHADENSRIKOS | 14 |
| 5.3 | BRANDGEFÄHRDUNG | 14 |
| 5.3.1 | MAßNAHMEN ZUR MINIMIERUNG DES BRANDRIKOS | 15 |
| 6. | RISIKOANALYSE UND BEWERTUNG | 16 |
| 6.1 | EISWURF UND EISFALL | 16 |
| 6.1.1 | VEREISUNGSPOTENTIAL | 16 |
| 6.1.2 | GEFÄHRDUNGSRADIUS | 17 |
| 6.1.3 | INDIVIDUALRISIKO | 17 |
| 6.1.3 | KOLLEKTIVRISIKO | 18 |
| 6.2 | RISIKO DURCH BAUTEILVERSAGEN TURM / ROTORBLATT | 19 |
| 6.2.1 | INDIVIDUALRISIKO | 19 |
| 6.2.2 | KOLLEKTIVRISIKO | 20 |
| 6.3 | RISIKO DURCH BRAND | 21 |
| 6.3.1 | INDIVIDUALRISIKO | 22 |
| 6.3.2 | KOLLEKTIVRISIKO | 23 |
| 7. | MODELL- UND DATENUNSIKERHEITEN | 23 |
| 8. | BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN | 25 |
| 9 | VERWENDETE ABKÜRZUNGEN | 26 |
| 10 | ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 27 |
| 11 | TABELLENVERZEICHNIS | 28 |
| | LITERATURVERZEICHNIS | 29 |

1. Zusammenfassung

Im geplanten Windpark Willerswalde wird der erforderliche Mindestabstand zu öffentlichen Verkehrsflächen bzgl. Eisabwurf, sowie Blatt- und Turmversagen und Brandgefährdung (1,5 x Nabenhöhe) bei den vier geplanten Windenergieanlagen (WEA) unterschritten.

Die Risikoabschätzung ergab, dass die Risiken im tolerablen Bereich liegen, es sind jedoch risikomindernde Maßnahmen vorzusehen. Durch folgende Maßnahmen kann das Gefährdungsrisiko deutlich minimiert werden (siehe Kap.8):

Eiswurf und Eisfall:

1. Installation eines Systems zur automatischen Erkennung von Eisansatz an den Rotorblättern und Abschaltung der WEA nach Vorgabe des Anlagenherstellers (siehe Kap.8), sowie Verhinderung des selbsttätigen Wiederanlaufs;
2. Erweiterte Eisansatzerkennung auch im Stillstand der Anlage durch Einbau eines zusätzlichen Eiserkennungssystems (Labkotec), Weiterleitung von Eisansatzerkennung an die technische Betriebsführung, bzw. den Betreiber;
3. Vor dem Wiederanlaufen der Anlage Überwachung der Eisfreiheit der Rotorblätter vor Ort durch den Betreiber oder einen qualifizierten Dritten.

Hierzu werden im Folgenden Berechnungen zur Eisabfallwahrscheinlichkeit bei stehendem Rotor im Umkreis der WEA beschrieben und die gefährdeten Bereiche in Kartenform dargestellt.

Bauteilversagen Rotorblatt / Turm

Durch geeignete Schwingungsüberwachung im Turm und in den Rotorblättern können Schäden frühzeitig erkannt werden und die Anlage kann gestoppt werden. Die Funktionsfähigkeit der Messeinrichtungen muss durch regelmäßige Überprüfung (2x jährlich) durch qualifiziertes Fachpersonal sichergestellt werden.

Brand


Eine regelmäßige Prüfung der Sicherheitseinrichtungen zum Brandschutz und eine Prüfung des Blitzschutzkonzepts (2x jährlich) durch qualifiziertes Fachpersonal ist erforderlich (siehe Kap. 8).

Der Bericht wurde sorgfältig und unparteiisch nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Die Ergebnisse sind von dritter Seite unbeeinflusst zustande gekommen.

Von dem Bericht liegt eine Kopie im Ing.-Büro Frey, welche im Streitfall alleinig gültig ist.

Schadensersatzansprüche sind ausgeschlossen. Auszugsweise Veröffentlichungen aus diesem Bericht sind erlaubt, wenn die Seiten vollständig kopiert werden. Der Bericht ist vorzugsweise vollständig weiterzugeben.

Buchholz, den 8.7.2019



(Dr. Jost Constantin)

2. Einleitung

Die EEN GmbH plant südlich von Stralsund nahe der Ortschaft Willerswalde (Landkreis Rügen-Vorpommern, Mecklenburg-Vorpommern) die Errichtung eines Windparks, bestehend aus vier Anlagen des Typs eno energy eno 126 mit 137 m Nabenhöhe und 126 m Rotordurchmesser. Bei den Anlagen wird der erforderliche Mindestabstand (1,5 mal Nabenhöhe) zur nahe gelegenen Bundesstraße B96 unterschritten.

Nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) 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.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ist nachzuweisen, dass die öffentliche Sicherheit durch die geplanten Anlagen nicht beeinträchtigt wird. Nach den Vorgaben der Genehmigungsbehörde gelten Abstände größer als 1,5 x Nabenhöhe zu öffentlichen Verkehrswegen als ausreichend. Sofern diese Abstände nicht eingehalten werden, ist eine gutachterliche Stellungnahme erforderlich, um eine Abweichung zu begründen und die Funktionssicherheit von zusätzlichen Einrichtungen (z.B. Rotorblattheizung, automatische Abschaltung bei Eisansatz, Monitoringsysteme zur Schwingungsüberwachung, optimiertes Brandschutzkonzept) zu gewährleisten.

Bei einer Nabenhöhe der Neuanlagen (Typ eno 126) von 137 m und einem Rotordurchmesser von 126 m sind daher auftretende Abstände unter $1,5 \times 137 \text{ m} = 206 \text{ m}$ zu Verkehrswegen gesondert zu überprüfen. Betroffen sind die geplanten WEA 1-4 im Abstand von unter 200 m zur Bundesstraße B96 nördlich von Wüst Eldena.

Dazu werden die vorgesehenen technischen Maßnahmen zur Vermeidung von Eisabwurf und Eisabfall rings um die neue WEA beschrieben und bewertet. Ergänzend wird eine Berechnung der Eisabfallwahrscheinlichkeit im Umkreis der WEA erstellt.

Die Risiken von Bauteilversagen des Turms und der Rotorblätter, sowie das Brandrisiko werden anhand der vorliegenden technischen Anlagenbeschreibung und der Schadensstatistik bestehender WEA aus den letzten Jahren beurteilt. Es werden Empfehlungen für die Risikominimierung beschrieben.

3. Standortbeschreibung

3.1 Lage

Der geplante Windpark aus vier Anlagen vom Typ eno 126 mit 137 m Nabenhöhe und 126 m Rotordurchmesser liegt südlich der Hansestadt Stralsund in Vorpommern östlich der Ortschaft Willerswalde (Gemeinde Süderholz, Landkreis Vorpommern-Rügen) auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Weitere Orte in der näheren Umgebung sind Wüst Eldena im Süden und Bremerhagen im Norden. Die Stadt Stralsund ist ca. 20 km entfernt (im Norden).

Die Standortumgebung ist gekennzeichnet durch großflächige, landwirtschaftliche Nutzflächen. Die Wege und Straßen, sowie die Ortsrandbereiche sind verbreitet von Büschen und Bäumen gesäumt. Unmittelbar im Osten des Windparks und im Südwesten liegen größere geschlossene Waldgebiete, weitere lockere Baumbestände finden sich rings um die Ortschaften.

Alle vier geplanten Anlagen liegen dicht an der Bundesstraße B96. Das Gelände ist im nahen und weiten Umfeld eben mit typischen Höhen zwischen 5 und 20 m NN.



Abbildung 1: oben: Luftbild und Detailkarte des Windparks Willerswalde mit Neuplanung (rot). Die B96 (gelb) verläuft in Nord-Süd Richtung in unmittelbarer Nähe des Windparks. Unten links: Ansicht von WEA 2 nach Süden- Unten rechts: Ansicht von WEA 3 nach Norden. Fotos vom Mai 2019.

4. Risikobewertung

Für die vorliegende Fragestellung werden verschiedene Quellen zur Ermittlung eines Risikogrenzwertes herangezogen, da es deutschlandweit kein einheitliches Risikoakzeptanzkriterium gibt:

- Prinzip der minimalen endogenen Mortalität (MEM, [1])
- Statistiken der Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE, [13])
- Statistiken der Verkehrsunfälle des Statistischen Bundesamtes [8]
- Risk Criteria in EU [14]
- Deutsche Störfall Kommission-Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung [15]
- Kriterien für die Beurteilung von Gefährdungen durch technische Anlagen VdTÜV [16]

Erhöht sich das Risiko, infolge der betrachteten Gefährdung durch die WEA signifikant, so sind entsprechende Maßnahmen abzuleiten. In Anlehnung an das MEM Prinzip [1] wird eine Risikoerhöhung um mehr als 10% als signifikant erachtet.

Im Rahmen der Beurteilung der Gefährdung von Verkehrsteilnehmern im öffentlichen Straßenverkehr werden die Gefährdung der einzelnen Verkehrsteilnehmer und die des Straßenverkehrs in den betroffenen Verkehrsabschnitten berücksichtigt. Für die Bewertung einzelner Verkehrsteilnehmer werden Bewertungsmaßstäbe für das Individualrisiko herangezogen (Kap. 4.1). Zur Beurteilung der Gesamtsituation ist zusätzlich auch die Betrachtung der Gefährdung des Straßenverkehrs nötig. Diese wird mit Hilfe von Daten zur Verkehrsdichte am Standort [10] und den aktuellen Verkehrsunfallzahlen [8, 9] bewertet

4.1 Individuelles Risiko

MEM Prinzip

Das Prinzip der MEM [1] beschreibt das akzeptierte (unvermeidliche) Risiko, durch eine betreffende Technologie zu Tode zu kommen.

Sie wird in der CENELEC-Norm EN 50126 beschrieben und konkretisiert als **0,0002 Todesfälle pro Person und Jahr** (in wirtschaftlich gut entwickelten Ländern). Da jeder Mensch „vielen“ (normiert: 20) technischen Systemen gleichzeitig ausgesetzt ist, wird pro System ein Schwellwert von $1/20 \text{ MEM} = 0,00001$ Tote/Jahr festgesetzt.

Dieser Wert darf von geplanten Neuerungen nicht überschritten werden. Im Gegenteil müssen neue Technologien in aller Regel sicherer sein als alte, da der technische Fortschritt das ermöglicht (ALARP-Prinzip, von englisch *as low as reasonably practicable* [7]).

GBE Statistik

Nach den Unfallstatistiken der GBE [13] und mit der Annahme eines Anstiegs des Risikos um maximal 10% (noch nicht signifikant), erhält man:

- Risiko eines tödlichen Freizeitunfalls $6,0 \cdot 10^{-6}$ (0,000006) je Person und Jahr.

VdTÜV

In [16] wird empfohlen, für Deutschland den in den Niederlanden geltenden Risikogrenzwert von $1,0 \cdot 10^{-6}$ für Neuanlagen zu übernehmen, solange in Deutschland keine rechtlich verbindliche Regelung vorliegt.

Ein Vergleich der drei Ansätze zeigt, dass die Risikoakzeptanzkriterien in einem Bereich von $1,0 \cdot 10^{-6}$ pro Person und Jahr (unterer Grenzwert des Individualrisikos) bis $1,0 \cdot 10^{-5}$ pro Person und Jahr (oberer Grenzwert des Individualrisikos) liegen.

Ein Individualrisiko unterhalb von $1,0 \cdot 10^{-6}$ ist als akzeptabel oder unkritisch zu bewerten. Im Bereich zwischen $1,0 \cdot 10^{-6}$ und $1,0 \cdot 10^{-5}$ ist das Risiko tolerabel. Nach dem ALARP Prinzip [9] sind in diesem Fall jedoch Maßnahmen zur Risikominderung erforderlich, bzw. zu prüfen. Ein Individualrisiko oberhalb von $1,0 \cdot 10^{-5}$ gilt als unakzeptabel. In diesem Fall müssen weiterführende Maßnahmen zur Risikominderung durchgeführt werden.

4.2 Kollektives Risiko (Gefährdung des Straßenverkehrs)

Zur Beurteilung der Gefährdung des Straßenverkehrs durch die WEA wird das allgemein vorliegende Unfallrisiko im Straßenverkehr betrachtet. Dazu werden die aktuellen Statistiken von Verkehrsunfällen herangezogen (Statistisches Bundesamt [8,9]). Bei einer signifikanten Risikoerhöhung (größer 10% in Anlehnung an das MEM Prinzip [1]) sind entsprechende Maßnahmen zur Minderung vorzusehen.

Nach [8, 9] gab es in 2016 je 1.000 km Straßenlänge 347 Unfälle (außerorts, ohne Autobahnen) mit Personenschaden.

Das entspricht einer Unfallhäufigkeit von $3,5 \cdot 10^{-1}$ (0,35) pro Kilometer und Jahr außerorts (ohne Autobahn), bzw. einem Unfall mit Personenschaden alle 2,9 Jahre (außerorts ohne Autobahn).

Die signifikante Risikoschwelle (10%) liegt dann bei $3,5 \cdot 10^{-2}$ je km und Jahr. Berücksichtigt man die betroffene Straßenlänge der B96 (1,6 km im Gefährdungsbereich der vier geplanten WEA, oder 0,4 km Gefährdungsbereich je WEA) erhält man in Anlehnung an das ALARP Prinzip [7] folgende Risikogrenzwerte:

- Obere Grenze: $1,4 \cdot 10^{-2}$ je WEA und Jahr. Das entspricht einem Unfall mit tödlichem oder schwerverletztem Personenschaden alle 71 Jahre;
- Untere Grenze: $1,4 \cdot 10^{-3}$ je WEA und Jahr. Das entspricht einem Unfall mit tödlichem oder schwerverletztem Personenschaden alle 714 Jahre.

Bezogen auf die Bundesstraße B96 bei Willerswalde ist daher eine Unfallhäufigkeit kleiner als $1,4 \cdot 10^{-3}$ je WEA als unkritisch zu bewerten. Ein Unfallrisiko zwischen $1,4 \cdot 10^{-2}$ und $1,4 \cdot 10^{-3}$ ist tolerabel, Maßnahmen zur Risikominderung sind jedoch zu prüfen. Bei einem Unfallrisiko größer als $1,4 \cdot 10^{-2}$ je WEA sind weiterführende Maßnahmen zur Risikominderung zwingend erforderlich.

5. Risikoanalyse

5.1 Eiswurf und Eisfall

Die Begriffe Eiswurf und Eisfall werden meist in Zusammenhang mit Windenergieanlagen verwendet und bezeichnen das Abfallen (bei stehender Anlage), bzw. Abwerfen (Abwurf) von Eis von den Rotorblättern. Die Gefahr von herabfallenden Eisstücken bei entsprechender Witterung geht jedoch grundsätzlich von allen hohen Gebäuden und Bauwerken aus.

Bei bestimmten Wetterlagen (insbesondere bei Nebel oder Regen und Temperaturen um den Gefrierpunkt oder darunter) können sich auf den Rotorblättern von Windenergieanlagen Eisschichten bilden, die sich bei Tauwetter oder bei Erreichen einer bestimmten Eisdicke ablösen.

Je nach Betriebszustand der Anlage lassen sich drei Fälle unterscheiden:

1. Die Anlage ist während der Eisbildung in Betrieb, durch die Rotordrehung und die Biegung der Rotorblätter werden Eisstücke in Drehrichtung des Rotors abgeworfen. Dieser Betriebszustand kann durch ein automatisches System zur Erkennung von Eisansatz ausgeschlossen werden.
2. Im Stillstand – insbesondere bei einsetzendem Tauwetter – kann das angesetzte Eis abfallen und durch den vorherrschenden Wind zusätzlich entgegen der Windrichtung verdriftet werden.
3. Beim Wiederanlauf der Anlage nach Stillstand und nicht vollständig abgetauten Rotorblättern werden Eisstücke in Drehrichtung des Rotors abgeworfen.

Rechnerisch sind je nach Windgeschwindigkeit Wurfweiten von mehreren hundert Metern möglich. In der Realität tritt kritischer Eiswurf selten bei hohen Windgeschwindigkeiten auf. Eiswetterlagen sind meist schwachwindig, schon Eisansatz in Millimeterstärke reduziert Auftrieb und Drehzahl des Rotors und das Eis wird in kleinen Stücken bereits durch die auf sie wirkende Zentripetalkraft abgeworfen. Je nach Eisform wirkt der Luftwiderstand begrenzend auf die Wurfweite. Parameter für die Wurfweite sind Drehzahl, Anlagenhöhe, Rotordurchmesser, ablenkende Windgeschwindigkeit quer zur Wurfrichtung und Eisform (Luftwiderstand).

Es wird daher empfohlen, einen Abstand von $1,5 \cdot x$ (Nabenhöhe+Durchmesser) zu den nächsten gefährdeten Objekten einzuhalten [5]. Ist dies nicht möglich, sollte die Anlage in Zeiten möglicher Vereisung automatisch abgeschaltet bleiben, es sei denn, der Wind kommt aus Richtungen, die eine Gefährdung dieser Objekte durch Eisabwurf ausschließen oder eine Vereisung wird durch aktive Beheizung der Blätter verhindert.

Durch eine Gondelverstellung kann das Risiko des Eisfalls im Stillstand auf eine gefährdete Fläche unter einem Abstand von $1,5 \cdot x$ (Nabenhöhe + Rotordurchmesser) zudem minimiert werden.

5.1.1 Bestimmung der Eisabwurfweiten

Die Gefährdung durch Eisabwurf im laufenden Betrieb der WEA wird durch das eingesetzte Eiserkennungssystem weitgehend ausgeschlossen. Die WEA wird bei Eisansatzerkennung automatisch gestoppt. Im Stillstand, bzw. im Trudelbetrieb abfallendes Eis – insbesondere während des Abtauens - kann je nach Windrichtung und Windgeschwindigkeit, sowie Größe und Form der Eisstücke verdriftet werden und damit auch außerhalb der Rotorkreisfläche zum Boden gelangen.

In einer umfangreichen internationalen Studie zum Eisansatz an WEA (*Wind Energy in Cold Climate, WECCO Projekt, [4]*) wurde ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Verdriftung entwickelt und mit beobachteten Abwurfweiten verifiziert (*H. Seifert 2007; [5]*).

Neben der Windgeschwindigkeit hängt die Verdriftungsweite danach wesentlich von Luftwiderstandsbeiwert c_w des Eises ab. Längliche Eisstücke (typische Längen bis 2 m und Querschnitt 8 cm mal 13,5 cm, die häufig beim Abtauen vereister Rotorblätter auftreten, werden danach bei gleicher Windgeschwindigkeit aufgrund ihres gegenüber kompakten (runden) Eiskörpern höheren c_w Werts deutlich weiter von der WEA verdriftet (nach [5]).

Für die Bestimmung der Auftreffwahrscheinlichkeit im Umfeld der WEA wird daher im Folgenden von großen, länglichen Eisstücken ausgegangen.

Die maximalen Abwurfweiten werden dabei nach folgender Gleichung bestimmt (vgl. in [5]):

$$d_{max} = (v + vr) * \left(\frac{D}{2} + H\right) / 15$$

mit

d_{max} : maximale Abwurfweite durch Verdriftung bei stillstehender WEA;

v : Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe;

vr : Geschwindigkeit des Rotorblatts im Trudelbetrieb

D : Rotordurchmesser

H : Nabenhöhe

Die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe der WEA für verschiedene Windrichtungen und die Verteilung der Häufigkeit der Windrichtungen in einem durchschnittlichen Jahr werden mit Hilfe von benachbarten Wetterstationsdaten (Deutscher Wetterdienst) ermittelt.

Für die Wintermonate mit potenzieller Vereisung (November bis März) wird folgende Verteilung angenommen:

Tabelle 1: Verwendete Windstatistiken im Windpark Willerswalde (Monate November bis März, langjährige Mittelwerte).

| Richtungssektor | Windgeschwindigkeit in 137 m Höhe über Grund (Mittel) | Windrichtung Häufigkeit |
|---|---|----------------------------|
| | m/s | Prozent |
| 0 (Nord) | 6,42 | 2,9 |
| 1 | 5,62 | 3,4 |
| 2 | 6,54 | 7,7 |
| 3 (Ost) | 5,75 | 8,0 |
| 4 | 5,70 | 6,3 |
| 5 | 6,15 | 8,0 |
| 6 (Süd) | 6,40 | 9,1 |
| 7 | 7,01 | 11,4 |
| 8 | 8,34 | 17,2 |
| 9 (West) | 8,14 | 13,8 |
| 10 | 7,29 | 7,9 |
| 11 | 7,63 | 4,4 |
| Mittel windrichtungsgewichtet | 7,04 | |

Aus den Daten und mit Hilfe der o.g. Gleichung kann die Auftreffwahrscheinlichkeit von Eisstücken im Umkreis der WEA berechnet werden. Die auf der nächsten Seite dargestellte Karte stellt die Auftreffwahrscheinlichkeit für abfallendes Eis in Prozent je Quadratmeter Grundfläche dar.

Wie erwartet, nimmt die Wahrscheinlichkeit rasch mit dem Abstand zum Anlagenmittelpunkt ab. Innerhalb der vom Rotorkreis überstrichenen Fläche (Abstand < 63 m vom WEA Mittelpunkt) sind ca. 60% des abfallendes Eises zu erwarten.

Die größten Abfallweiten sind in nordöstlicher und östlicher Richtung zu erwarten, da die höchsten Windgeschwindigkeiten im langjährigen Mittel bei Südwest bis Westwind auftreten und diese Windrichtungen am häufigsten auftreten (vgl. Tabelle 1).

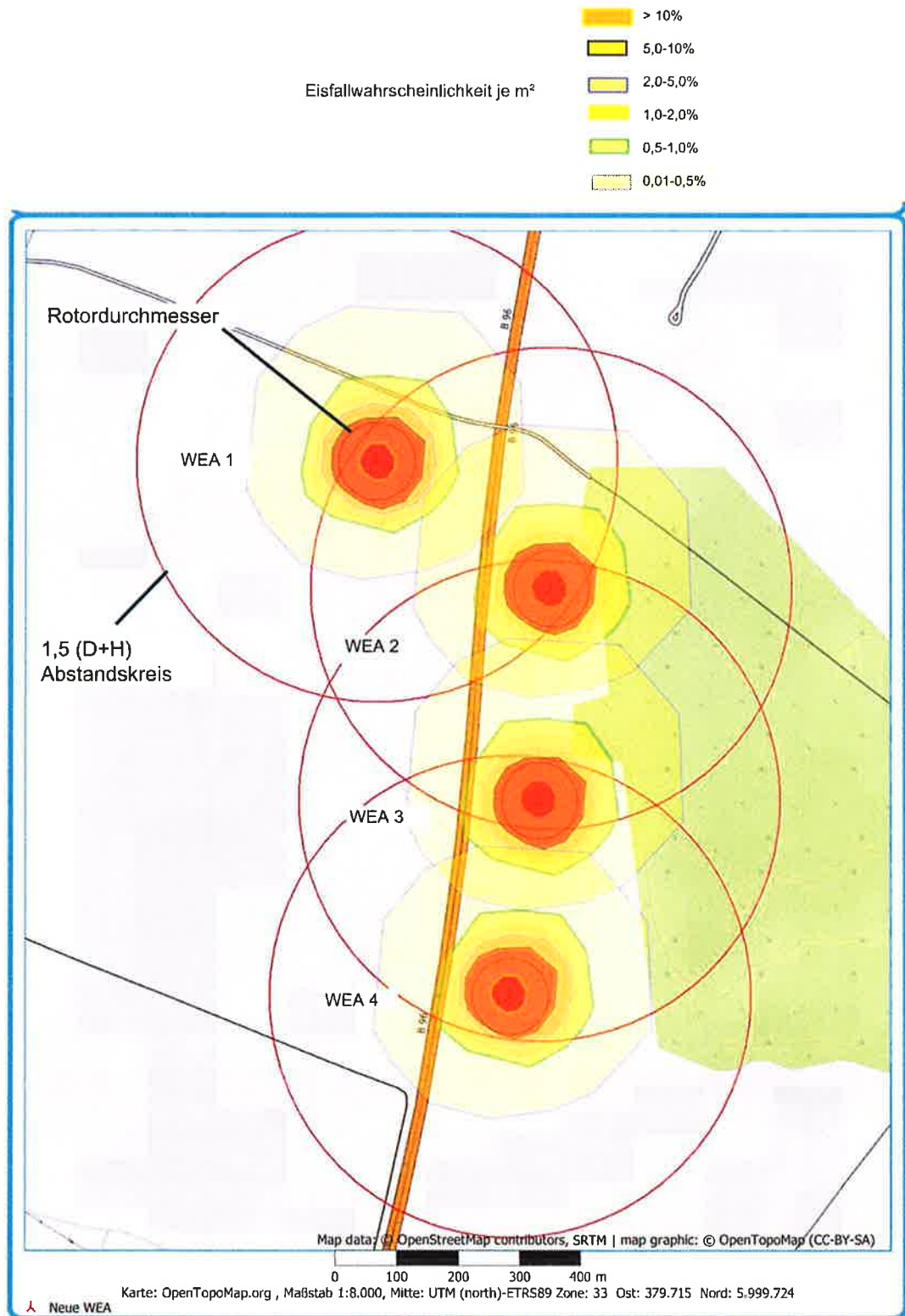
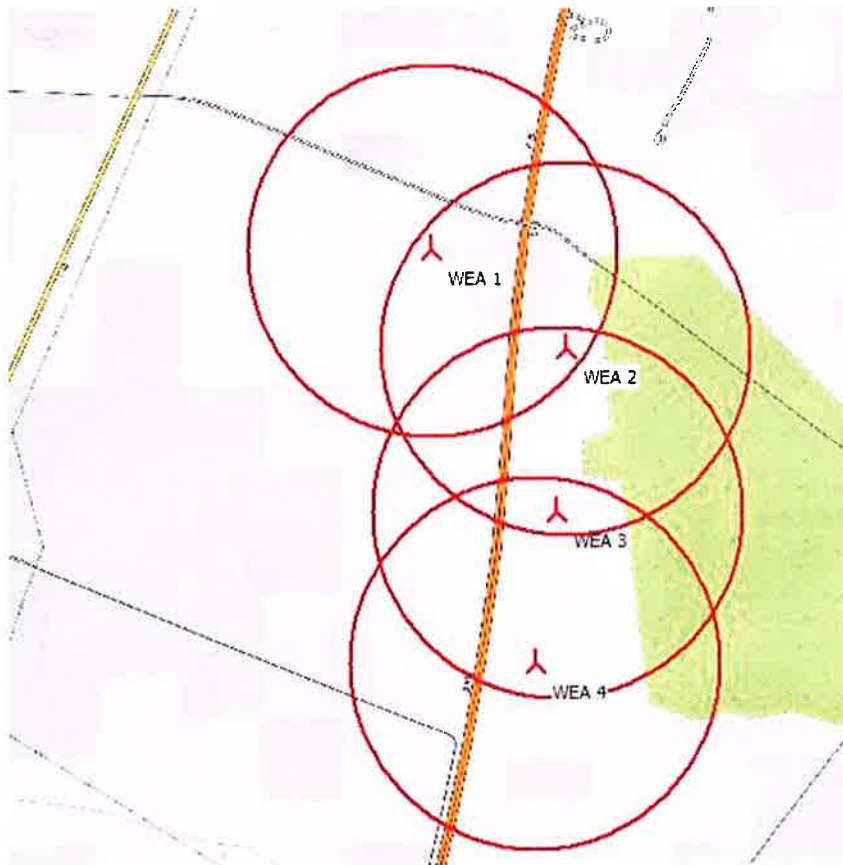


Abbildung 2: Karte der Eisfallwahrscheinlichkeiten der WEA 1 bis 4. Der große rote Kreis ist der Gefährdungsbereich (Radius 395m), der kleine orange Kreis der Rotorkreis (Durchmesser 126m).

5.1.2 Minimierung des Eiswurfrisikos

Die Karte zeigt die geplanten WEA und die Abstandskreise (Radius 395 m) um die nahe der Straße gelegenen Standorte, innerhalb derer eine erhöhte Gefährdung vorliegt. Die Länge des betroffenen Straßenbereichs beträgt insgesamt 1.600 m (zur Berechnung siehe Kap. 6.1.2):



Copyright: open street map contributors

Abbildung.3: Gefährdungsradien (Berechnung s. Kap. 6.1.2) rings um die WEA in Straßennähe.

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten WEA und des gefährdeten Straßenbereichs.

| Ifd. Nr | Bezeichnung | Typ | Nabenhöhe (m) | Rotordurchmesser (m) | UTM ETRS89 | |
|-------------------------|------------------------------------|---------|------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------|
| | | | | | Ost | Nord |
| Neue WEA | | | | | | |
| 1 | WEA01 | eno 126 | 137,0 | 126,0 | 33.379.575 | 6.000.165 |
| 2 | WEA02 | eno 126 | 137,0 | 126,0 | 33.379.855 | 5.999.949 |
| 3 | WEA03 | eno 126 | 137,0 | 126,0 | 33.379.827 | 5.999.602 |
| 4 | WEA04 | eno 126 | 137,0 | 126,0 | 33.379.771 | 5.999.283 |
| Betroffene Verkehrswege | | | | | | |
| | Bezeichnung | | WEA im Abstand < 395 m | | Lage | |
| E1 | Bundesstraße B96, bei Willerswalde | | Nr. 1-4 | | 104-112 m westlich der WEA 1-3 | |

5.1.3 Maßnahmen zum Schutz vor Eiswurf im Betrieb

5.1.3.1 Erkennung von Eisansatz

Die WEA ist vom Hersteller mit einem System zur automatischen Erkennung von Eisansatz an den Blättern ausgestattet. Das System wird im Anhang ausführlich beschrieben [2].

Ein Eisansatz wird dabei durch zwei unabhängige Systeme erkannt:

1. Detektion von Unwucht und Vibrationen in den Rotorblättern und der Gesamtanlage durch anwachsendes Eis;
2. Feststellung von nicht plausiblen Werten der gemessenen Windgeschwindigkeit und Anlagenleistung, z.B. zu geringe Leistung trotz ausreichend Wind (durch Veränderung der Aerodynamik am Rotorblatt durch Eis). Dazu wird die aktuell gültige Leistungskennlinie der WEA mit den aktuell gemessenen Werten verglichen;
3. (optional): Einbau eines Sensors zur Bestimmung der Eisbildungsrisikos. Der Sensor misst die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung. Werden bestimmte Grenzwerte überschritten, die vom Deutschen Wetterdienst festgelegt werden, wird die WEA durch den Betriebsführungsrechner gestoppt.

Durch die drei voneinander unabhängigen Erkennungssysteme ist eine sichere Detektion von Eisansatz möglich.

Ein Neustart der Anlage darf nur vor Ort durch eingewiesenes Personal erfolgen (kein automatischer Wiederanlauf).

5.1.3.2 Maßnahmen zum Schutz vor Eiswurf bei Wiederanlauf

Vor einem Wiederanlauf der Anlage muss die Eisfreiheit der Rotorblätter durch Sichtkontrolle vor Ort überprüft werden. Der Wiederanlauf muss manuell vor Ort erfolgen. Beim Anlaufvorgang kann bei Auftreten von Eisabwurf durch das Personal vor Ort ein sofortiger Stopp erfolgen.

5.2 Bauteilversagen

Bei einem Bauteilversagen, insbesondere des Turms oder eines Rotorblatts kann durch abfallende Anlagenteile eine Gefährdung nahegelegener Verkehrswege, hier der Bundesstraße B96 ausgelöst werden. Möglich ist auch ein Absturz der kompletten Gondel bei Versagen der Gondelbefestigung am Turm.

5.2.1 Rotorblatt

Rotorblätter können durch Brand (siehe Kap. 5.3) Materialermüdung, Überlastung infolge von Überdrehzahl oder Blattschwingungen oder ein Versagen des Blattlagers / Blattflansches abfallen.

Teile der Rotorblätter werden dabei ähnlich wie Eisstücke verdriftet. Die Analyse von Schadensbilder bei in der Vergangenheit aufgetretenen Blattschäden zeigt, dass bei Blatterstö-

rung infolge von Überdrehzahl (der meist bei hohen Windgeschwindigkeiten auftritt) Trümmerteile mehrere Hundertmeter um die Anlage verteilt sein können.

5.2.2 Turm

Ein Turmversagen kann durch Materialermüdung, Überlastung infolge von Überdrehzahl des Rotors oder mangelnde Standsicherheit des Fundaments ausgelöst werden. Aufgrund der kompakten Massen (keine Verdriftung) ist der Gefährdungsbereich kleiner als bei Blattabfall. Ein Gefährdungsradius von $1,5 \times (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotorradius}) - 300 \text{ m}$ für die eno126 mit 137m Nabenhöhe - kann bei einem Turmversagen daher als ausreichend betrachtet werden. Gleiches gilt bei einem Abfall der kompletten Gondel.

5.2.3 Maßnahmen zur Minimierung des Schadensrisikos

Blatt- und Turmschäden können durch geeignete Schwingungsmessverfahren im Vorfeld eines Bauteilversagens erkannt werden. Entsprechende Messgeräte sind im Turm und im Antriebsstrang der eno126 eingebaut. Bei Überschreitung kritischer Grenzwerte sollte die WEA automatisch gestoppt werden. Vor einem Wiederanlauf ist die Ursache der Grenzwertüberschreitung durch qualifiziertes Fachpersonal zu ermitteln.

Die Funktionstüchtigkeit des Sensorsystems sollte regelmäßig (mindestens 2x pro Jahr) im Rahmen der Anlagenwartung geprüft werden.

5.3 Brandgefährdung

Ein Brand in der Gondel einer WEA oder ein Blitzeinschlag mit Brandfolge kann zum Abfall der Rotorblätter oder Teilen davon führen. Insbesondere bei dichtem Abstand zu öffentlichen Verkehrsflächen sind daher verstärkte Maßnahmen zum Brandschutz notwendig.

Brände können insbesondere in der Gondel, im Turm sowie in der Umspannstation der Windenergieanlagen entstehen. Zu den typischen Ursachen der Brandentstehung an WEA zählen Blitzschlag, Fehler in elektrischen Einrichtungen (z.B. leistungselektronische Bauteile, Steuerungselektronik), Funkenflug durch Überlastung mechanischer Bremsen sowie feuergefährliche Arbeiten im Rahmen von Wartungs- und Reparaturarbeiten. Zu den brennbaren Komponenten einer WEA zählen insbesondere Elektrokabel, Getriebe-, Transformator- und Hydrauliköle sowie weitere brennbare Materialien wie das Maschinenhaus selbst oder die i.d.R. aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) gefertigten Rotorblätter. Entstehungsbrände können sich daher auf das Maschinenhaus sowie auf die Rotorblätter ausbreiten und zu einem Totalschaden führen.

Grundsätzlich müssen WEA so beschaffen sein, dass der Entstehung eines Brandes der Anlage und der Brandweiterleitung auf die Umgebung vorgebeugt wird. Hierbei geht es zunächst um konstruktionsbedingte Vorkehrungen, z.B. Verwendung nichtbrennbarer Materialien, um Brände innerhalb einer Anlage erst gar nicht entstehen zu lassen. Als weitere brandschutztechnische Maßnahmen zur Vermeidung der Brandentstehung an WEA werden standardmäßig Blitzschutzanlagen eingesetzt, um Überspannungen durch Blitzeinschläge zu vermeiden. Daneben dienen Systeme zur Brandfrüherkennung, z.B. Brandmelder, sowie aktive Löschsysteme dazu, die Brandentstehung zu registrieren und eine Brandausbreitung möglichst frühzeitig zu verhindern. Moderne WEA verfügen über unterschiedliche Sensoren, um beispielsweise die Betriebstemperaturen einzelner Komponenten (Maschine, Schaltschränke etc.) messtechnisch zu überwachen. Die Brandfrüherkennung sowie die automatisierte Wei-

terleitung an die Fernüberwachungszentrale sind von großer Bedeutung, da sich im regulären Betrieb keine Personen auf der Anlage aufhalten. Daneben sind Brandschutzvorschriften obligatorisch, die vor allem bei Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten von Bedeutung sind, z.B. das Vorhalten von Handfeuerlöschern, Rauchverbote, etc.

5.3.1 Maßnahmen zur Minimierung des Brandrisikos

Das Brandschutzkonzept der eno126 [11] sieht folgende Überwachungseinrichtungen vor:

Im Maschinenhaus ist ein Temperatursensor installiert, der die Innentemperatur des Maschinenhauses misst. Bei Überschreitung bestimmter Grenzwerte wird automatisch eine Meldung an die Fernüberwachung gesendet und die WEA wird automatisch angehalten. Ebenso werden die Temperaturen der verschiedenen Lager (Rotor, Getriebe, Generator), sowie von Getriebeöl und Generatorwicklung überwacht.

Bei Überschreiten von Grenzwerten folgt eine Abschaltung mindestens der betroffenen Systeme. Schutzeinrichtungen gegen die Folgen von Kurzschlüssen und Überstrom sowie Motorschutzschalter mindern die Gefahr von Entstehungsbränden weiter. Die Fernüberwachung wird automatisch über den Ausfall einzelner Komponenten oder das Abschalten der WEA informiert.

Zur Minimierung des Brandrisikos durch Blitzeinschlag ist eine regelmäßige Prüfung des Blitzschutzkonzepts der eno 126 [12] notwendig

6. Risikoanalyse und Bewertung

6.1 Eiswurf und Eisfall

Abfallende Eisstücke aus großer Höhe und mit entsprechend hoher Geschwindigkeit können für Verkehrsteilnehmer im Trefferbereich eine ernste Gefahr darstellen. Geschlossene Fahrzeuge bieten Schutz, durch reflexartige Reaktionen des Fahres können jedoch Unfälle ausgelöst werden.

Die häufig beobachteten Schäden durch von LKW abfallenden Eisplatten belegen den hohen Gefährdungsgrad für Personen- und Sachschäden.

Die betrachteten WEA sind mit einem System zur automatischen Abschaltung bei Eisansatz von drehenden Rotorblättern ausgestattet. Das System ist bei mehreren Anlagenherstellern im Einsatz und hat sich hier in den vergangenen Jahren bewährt.

Im Folgenden wird daher nur die Gefährdung bei Eisfall von stehenden Rotorblättern betrachtet.

6.1.1 Vereisungspotential

Die Vereisung durch Eisregen oder Raueis ist abhängig von den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, Feuchte und Windgeschwindigkeit, die durch das Standortklima und die jeweiligen Witterungsverhältnisse vorgegeben sind. Ferner beeinflussen Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit und Form der Rotorblätter den Vereisungsgrad.

Allgemeingültige Aussagen über das Auftreten von Vereisung können daher nicht gemacht werden. Bevorzugt tritt sie im Gebirge, in Küstennähe, in der Nähe großer Binnengewässer und an Flussläufen auf.

Aufgrund des Druckabfalls an der Hinterseite der Rotorblätter sinkt dort die Lufttemperatur und Vereisung kann bereits bei Außentemperaturen unter ca. 2°C auftreten. Eisabfall von Rotorblättern kann nach jeder Vereisungswetterlage mit anschließendem Tauwetter auftreten. Die abgeschalteten WEA unterscheiden sich dabei nicht wesentlich von anderen hohen Objekten wie z.B. Brücken oder Strommasten.

Für den Standort Willerswalde ist gemäß den Statistiken des Deutschen Wetterdienstes für das 125 km entfernte Schwerin mit 25 Vereisungstagen (Frosttage mit hoher Luftfeuchtigkeit) im Jahr zu rechnen). Für den Eisfall entscheidend sind die Vereisungsereignisse, die in der Regel aus mehreren zusammenhängenden Vereisungstagen bestehen. Erst am Ende einer Vereisungsperiode (bei Tauwetter) tritt Eisfall auf. Die 25 Vereisungstage in Schwerin lassen sich in sieben durchgehende Vereisungsereignisse aufteilen.

Da die Wintertemperaturen der letzten Jahre angestiegen sind und aufgrund des Klimawandels weiter ansteigen, ist zukünftig mit einer geringeren Zahl von Vereisungstagen zu rechnen.

Zusätzlich zu den Vereisungsereignissen muss die Anzahl der möglichen Eisfallereignisse je Vereisung bekannt sein. Hierzu werden Daten einer Fallstudie eines Schweizer Forschungsprojekts (Alpine Test Site Gütsch) verwendet [17]. Dabei wurden die abgefallenen und abgeworfenen Eisobjekte bei einer WEA mit 44 m Rotordurchmesser (Enercon E-40 6.44) statistisch über einen Zeitraum von vier Jahren erfasst. Insgesamt wurden 250 Eisobjekte bei einer Vereisungshäufigkeit von 10-30 Tagen pro Jahr erfasst.

Damit lässt sich die Anzahl von Eisobjekten pro Vereisung abschätzen zu:

250 / 4 Jahre / 10 Vereisungen pro Jahr oder 6-7 Eisobjekte pro Vereisung.

Nimmt man an, dass ein Teil der Eisobjekte (ca. 1/3) nicht gefunden wurde, lässt sich konservativ ein Wert von 10 Eisobjekten je Vereisung annehmen.

Zur Übertragung der Ergebnisse der Feldstudie auf andere Typen von WEA muss der unterschiedliche Rotordurchmesser berücksichtigt werden. Die gebildete Eismenge ist proportional zur Rotorfläche und damit zum Quadrat des Rotordurchmessers.

Das Verhältnis der Rotorflächen eno 126 zu Enercon E-40 6.44 beträgt 8,2. D.h. für die eno126 ist mit $8,2 \times 10 = 82$ Eisobjekten je Vereisung zu rechnen.

Auf das Jahr umgerechnet erhält man damit $82 \text{ Eisobjekte} \times 7 \text{ Vereisungsereignisse} = 574$ Eisabfall Ereignisse pro WEA und Jahr.

6.1.2 Gefährdungsradius

Die maximale Fallweite von Eisstücken bestimmt den Gefährdungsradius rings um die Windenergieanlage. Bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s (das 99,9% Quantil der Häufigkeitsverteilung in Nabenhöhe 137 m) beträgt die Fallweite 395 m (für flache, flächige Eisobjekte mit maximalen Fallweiten).

Innerhalb dieses Abstands rings um die WEA 1-4 verläuft die B96 (vgl. Abb.2).

6.1.3 Individualrisiko

Auf Basis der in Abbildung 1 (Gefährdungsflächen bei Eisabfall der WEA 1-4) dargestellten Trefferhäufigkeiten kann das Risiko eines Unfalls auf der B96 ermittelt werden. Dabei wird konservativ eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h angenommen (was die Aufenthaltsdauer im Gefährdungsbereich gegenüber einer höheren Windgeschwindigkeit deutlich erhöht).

Trifft der Eisabfall zeitlich und örtlich mit dem zu betrachtenden Fahrzeug überein, besteht eine Gefährdung des Verkehrs:

Es gilt folgender Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{vj} * h_{Ev} * h_{Tej} * A_T * P_{VA} * P_{Aj}$$

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

Mit

H_{Tj} Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr;

H_T Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr;

h_{vj} Häufigkeit der Vereisung pro Jahr (7 Vereisungsereignisse);

h_{Ev} Häufigkeit Eisabfall pro Vereisung (82 für den Anlagentyp eno126);

h_{Tej} Häufigkeit der Treffer pro m² im Bereich j pro Eisabfall;

A_T Trefferfläche des Fahrzeugs: Fläche der Windschutzscheibe ca. 2 m² (konservative Annahme, da nicht jeder Treffer die Windschutzscheibe durchschlägt und einen lebensbedrohlichen Unfall zur Folge hat).

P_{VA} Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit an einem Vereisungstag. Beispiel Berufspendler, der die Straße an 225 pro Jahr zweimal am Tag passiert (Hin- und Rückweg).

$$P_{VA} = (225 * 2) / 365$$

P_{Aj} Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Gefährdungsbereich j eintritt: $P_{Aj} = \left(\frac{l_j}{v_f}\right) / 24$; l_j : Länge des Gefährdungsbereichs (400 m je WEA),

$$v_f = 60 \text{ km/h}$$

Damit erhält man die in der folgenden Tabelle dargestellte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko). Dabei wird konservativ angenommen, dass jeder Treffer der Windschutzscheibe einen Unfall mit Personenschaden zur Folge hat.

Tabelle 3: Individualrisiko pro Jahr bei Eisabfall

| Verkehrsweg | WEA | Treffer eines Fahrzeugs bei 60 km/h |
|------------------|-------|-------------------------------------|
| B96 Willerswalde | WEA 1 | $1,73 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 2 | $4,59 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 3 | $4,59 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 4 | $4,59 \cdot 10^{-7}$ |
| | Summe | $1,38 \cdot 10^{-6}$ |

Das Risiko ist bei WEA 1 aufgrund des größeren Abstands zur B96 geringer. Ein Individualrisiko von $1,38 \cdot 10^{-6}$ (Summe aller 4 WEA) bedeutet im Mittel alle 726.000 Jahre einen lebensbedrohlichen Treffer durch Eisabfall. Eine Angabe des Zeitpunkts, zu dem sich der Treffer ereignet, ist nicht ableitbar.

6.1.3 Kollektivrisiko

Das Kollektivrisiko berechnet sich nach den Randbedingungen für das Individualrisiko und nach der ermittelten Verkehrsdichte auf der B96 [10]. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{vj} * h_{Ev} * h_{Tej} * A_T * h_{avT} * P_{Aj}$$

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

Mit

H_{Tj} Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr;

H_T Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr;

h_{vj} Häufigkeit der Vereisung pro Jahr;

h_{Ev} Häufigkeit Eisabfall pro Vereisung

h_{Tej} Häufigkeit der Treffer pro m² im Bereich j pro Eisabfall;

A_T Trefferfläche des Fahrzeugs: Fläche der Windschutzscheibe ca. 2 m² (konservative Annahme, da nicht jeder Treffer die Windschutzscheibe durchschlägt und einen lebensbedrohlichen Unfall zur Folge hat).

h_{avT} Verkehrsdichte: 10.733 Fahrzeuge pro Tag (nach [10]).

P_{Aj} Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Gefährdungsbereich j eintritt: $P_{Aj} = \left(\frac{l_j}{v_f}\right) / 24$; l_j : Länge des Gefährdungsbereichs (400 m je WEA), $v_f = 60 \text{ km/h}$

Damit erhält man die in der folgenden Tabelle dargestellte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Kollektivrisiko). Dabei wird konservativ angenommen, dass jeder Treffer der Windschutzscheibe einen Unfall mit Personenschaden zur Folge hat.

Tabelle 4: Kollektivrisiko pro Jahr bei Eisabfall

| Verkehrsweg | WEA | Treffer eines Fahrzeugs (Gefährdung des Straßenverkehrs) |
|-------------------------------------|-------|---|
| B96 Friedrichsruhe- Willerswalde | WEA 1 | $1,51 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 2 | $4,00 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 3 | $4,00 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 4 | $4,00 \cdot 10^{-3}$ |
| | Summe | $1,35 \cdot 10^{-2}$ |

Das Risiko ist bei WEA 1 aufgrund des größeren Abstands zur B96 geringer. Das ermittelte Kollektivrisiko von $1,35 \cdot 10^{-2}$ (für alle 4 WEA) bedeutet, dass sich im Mittel alle 74 Jahre ein schwerer Unfall durch Eisabfall ereignet. Eine Aussage zum Zeitpunkt lässt sich daraus nicht ableiten.

6.2 Risiko durch Bauteilversagen Turm / Rotorblatt

Eine offizielle Statistik zum Bauteilversagen mit nachfolgendem Totalschaden (abgelöstes Rotorblatt, gekippte WEA) gibt es nicht.

In [18] und [19] sind schwere Unfälle an WEA, wie oben beschrieben, aus den letzten Jahren dokumentiert:

2008: 2 Ereignisse (abgerissenes Rotorblatt)

2009: 1 Ereignis (abgerissenes Rotorblatt)

2010: -

2011: 1 Ereignis (Gondel abgestürzt)

2012: 2 Ereignisse

2013: 5 Ereignisse

2014: 1 Ereignis

2015: 4 Ereignisse

2016: 7 Ereignisse

2017: 7 Ereignisse

2018: 12 Ereignisse

2019: 8 Ereignisse (bis Mai)

Bezieht man die Unfälle auf die Gesamtzahl der installierten WEA in dem jeweiligen Jahr, erhält man ein Unfallrisiko durch Bauteilversagen von maximal $4,11 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr (für 2018 mit 29.213 installierten Anlagen). Dieser Wert wird im Folgenden verwendet.

6.2.1 Individualrisiko

Wie beim Eisfallrisiko wird konservativ eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h angenommen (was die Aufenthaltsdauer im Gefährdungsbereich gegenüber einer höheren Windgeschwindigkeit deutlich erhöht).

Trifft das Bauteilversagen zeitlich und örtlich mit dem zu betrachtenden Fahrzeug überein, besteht eine Gefährdung des Verkehrs:

Es gilt folgender Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{vj} * h_{Ev} * h_{Tej} * A_T * P_{VA} * P_{Aj}$$

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

Mit

- H_{Tj} Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr;
- H_T Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr;
- h_{Ev} Anzahl Bauteile pro Bauteilversagen (100 als konservative Schätzung);
- h_{vj} Häufigkeit Bauteilversagen pro Jahr ($4,11 \cdot 10^{-4}$);
- h_{Tej} Häufigkeit der Treffer pro m^2 Straße im Bereich j pro Bauteilversagen;
- A_T Trefferfläche des Fahrzeugs: Gesamtfläche ca. 10 m^2 .
- P_{VA} Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit; Beispiel Berufspendler, der die Straße an 225 pro Jahr zweimal am Tag passiert (Hin- und Rückweg). $P_{VA} = (225 \cdot 2)/365$
- P_{Aj} Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Gefährdungsbe-
reich j eintritt: $P_{Aj} = \left(\frac{l_j}{v_f}\right) / 24$; l_j : Länge des Gefährdungsbereichs (400 m je WEA),
 $v_f = 60 \text{ km/h}$

Damit erhält man die in der folgenden Tabelle dargestellte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko). Dabei wird konservativ angenommen, dass jeder Treffer des Kraftfahrzeugs einen Unfall mit Personenschaden zur Folge hat.

Tabelle 5: Individualrisiko pro Jahr bei Bauteilversagen

| Verkehrsweg | WEA | Treffer eines Fahrzeugs bei 60 km/h |
|---------------------------------|-------|-------------------------------------|
| B96 Friedrichsruhe-Willerswalde | WEA 1 | $2,87 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 2 | $2,87 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 3 | $2,87 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 4 | $2,87 \cdot 10^{-7}$ |
| | Summe | $1,15 \cdot 10^{-6}$ |

Im Unterschied zum Eisabwurf wird hier keine Abhängigkeit der Auftreffwahrscheinlichkeit vom Abstand zur WEA betrachtet, da hierfür keine Datenbasis vorhanden ist. Innerhalb des Gefährdungsradius von 300 m wird die gleiche Auftreffwahrscheinlichkeit angenommen. Daher sind die Trefferwahrscheinlichkeiten für alle WEA identisch.

Ein Individualrisiko von $1,15 \cdot 10^{-6}$ bedeutet im Mittel alle 871.000 Jahre einen lebensbedrohlichen Treffer durch Bauteilversagen. Eine Angabe des Zeitpunkts, zu dem sich der Treffer ereignet, ist nicht ableitbar.

6.2.2 Kollektivrisiko

Das Kollektivrisiko berechnet sich nach den Randbedingungen für das Individualrisiko und nach der ermittelten Verkehrsdichte auf der B96 [10]. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{vj} * h_{Ev} * h_{Tej} * A_T * h_{AVT} * P_{Aj}$$

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

Mit

- H_{Tj} Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr;
- H_T Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr;

- h_{Ev} Anzahl Bauteile pro Bauteilversagen (100 als konservative Schätzung);
- h_{vj} Häufigkeit Bauteilversagen pro Jahr ($4,11 \cdot 10^{-4}$);
- h_{Tej} Häufigkeit der Treffer pro m² Straße im Bereich j pro Bauteilversagen;
- A_T Trefferfläche des Fahrzeugs: Gesamtfläche ca. 10 m².
- h_{aVT} Verkehrsdichte: 10.733 Fahrzeuge pro Tag (nach [10]).
- P_{Aj} Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Gefährdungsbereich j eintritt: $P_{Aj} = \left(\frac{l_j}{v_f}\right) / 24$; l_j : Länge des Gefährdungsbereichs (400 m je WEA), $v_f = 60 \text{ km/h}$

Damit erhält man die in der folgenden Tabelle dargestellte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko). Dabei wird konservativ angenommen, dass jeder Treffer des Kraftfahrzeugs einen Unfall mit Personenschaden zur Folge hat.

Tabelle 6: Kollektivrisiko pro Jahr bei Bauteilversagen

| Verkehrsweg | WEA | Treffer eines Fahrzeugs (Gefährdung des Straßenverkehrs) |
|-------------------------------------|-------|---|
| B96 Friedrichsruhe- Willerswalde | WEA 1 | $2,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 2 | $2,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 3 | $2,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 4 | $2,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | Summe | $9,99 \cdot 10^{-3}$ |

Im Unterschied zum Eisabwurf wird hier keine Abhängigkeit der Auftreffwahrscheinlichkeit vom Abstand zur WEA betrachtet, da hierfür keine Datenbasis vorhanden ist. Innerhalb des Gefährdungsradius von 300 m wird die gleiche Auftreffwahrscheinlichkeit angenommen. Daher sind die Trefferwahrscheinlichkeiten für alle WEA identisch.

Das ermittelte Kollektivrisiko (für alle 4 WEA) bedeutet, dass sich im Mittel alle 100 Jahre ein schwerer Unfall durch Bauteilversagen ereignet. Eine Aussage zum Zeitpunkt lässt sich daraus nicht ableiten.

6.3 Risiko durch Brand

Eine offizielle Statistik zu Bränden an WEA gibt es nicht.

In [18] und [19] sind Brände an WEA aus den letzten Jahren dokumentiert:

- 2008: 1 Ereignis
- 2009: 2 Ereignisse
- 2010: 3 Ereignisse
- 2011: 2 Ereignisse
- 2012: 6 Ereignisse
- 2013: 6 Ereignisse
- 2014: 2 Ereignisse
- 2015: 4 Ereignisse
- 2016: 8 Ereignisse
- 2017: 5 Ereignisse
- 2018: 12 Ereignisse
- 2019: 5 Ereignisse (bis Mai)

Bezieht man die Brandereignisse auf die Gesamtzahl der installierten WEA in dem jeweiligen Jahr, erhält man ein Unfallrisiko durch Brand von maximal $4,11 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr (für 2018 mit 29.213 installierten Anlagen).

6.3.1 Individualrisiko

Wie beim Bauteilversagen wird konservativ eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 60 km/h angenommen (was die Aufenthaltsdauer im Gefährdungsbereich gegenüber einer höheren Windgeschwindigkeit deutlich erhöht).

Trifft das Bauteilversagen zeitlich und örtlich mit dem zu betrachtenden Fahrzeug überein, besteht eine Gefährdung des Verkehrs:

Es gilt folgender Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{vj} * h_{Ev} * h_{Tej} * A_T * P_{VA} * P_{Aj}$$

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

Mit

H_{Tj} Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr;

H_T Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr;

h_{Ev} Anzahl Bauteile pro Brandfall (100 als konservative Schätzung);

h_{vj} Häufigkeit Brand pro Jahr ($4,11 \cdot 10^{-4}$);

h_{Tej} Häufigkeit der Treffer pro m² Straße im Bereich j pro Brandereignis;

A_T Trefferfläche des Fahrzeugs: Gesamtfläche ca. 10 m².

P_{VA} Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit; Beispiel Berufspendler, der die Straße an 225 pro Jahr zweimal am Tag passiert (Hin- und Rückweg). $P_{VA} = (225 * 2) / 365$

P_{Aj} Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Gefährdungsbereich j eintritt: $P_{Aj} = \left(\frac{l_j}{v_f}\right) / 24$; l_j : Länge des Gefährdungsbereichs (400 m je WEA), $v_f = 60 \text{ km/h}$

Damit erhält man die in der folgenden Tabelle dargestellte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko). Dabei wird konservativ angenommen, dass jeder Treffer des Kraftfahrzeugs einen Unfall mit Personenschaden zur Folge hat.

Tabelle 7: Individualrisiko pro Jahr bei Brand

| Verkehrsweg | WEA | Treffer eines Fahrzeugs bei 60 km/h |
|---------------------------------|-------|-------------------------------------|
| B96 Friedrichsruhe-Willerswalde | WEA 1 | $2,87 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 2 | $2,87 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 3 | $2,87 \cdot 10^{-7}$ |
| | WEA 4 | $2,87 \cdot 10^{-7}$ |
| | Summe | $1,15 \cdot 10^{-6}$ |

Im Unterschied zum Eisabwurf wird hier keine Abhängigkeit der Auftreffwahrscheinlichkeit vom Abstand zur WEA betrachtet, da hierfür keine Datenbasis vorhanden ist. Innerhalb des Gefährdungsradius von 300 m wird die gleiche Auftreffwahrscheinlichkeit angenommen. Daher sind die Trefferwahrscheinlichkeiten für alle WEA identisch.

Ein Individualrisiko von $1,15 \cdot 10^{-6}$ bedeutet im Mittel alle 871.000 Jahre einen lebensbedrohlichen Treffer durch Brand. Eine Angabe des Zeitpunkts, zu dem sich der Treffer ereignet, ist nicht ableitbar.

6.3.2 Kollektivrisiko

Das Kollektivrisiko berechnet sich nach den Randbedingungen für das Individualrisiko und nach der ermittelten Verkehrsdichte auf der B96 [10]. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$H_{Tj} = h_{vj} * h_{Ev} * h_{Tej} * A_T * h_{aVT} * P_{Aj}$$

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

Mit

H_{Tj} Anzahl gefährlicher Treffer im Bereich j pro Jahr;

H_T Anzahl gefährlicher Treffer pro Jahr;

h_{Ev} Anzahl Bauteile pro Brandereignis (100 als konservative Schätzung);

h_{vj} Häufigkeit Brand pro Jahr ($4,11 \cdot 10^{-4}$);

h_{Tej} Häufigkeit der Treffer pro m² Straße im Bereich j pro Brandereignis;

A_T Trefferfläche des Fahrzeugs: Gesamtfläche ca. 10 m².

h_{aVT} Verkehrsdichte: 10.733 Fahrzeuge pro Tag (nach [10]).

P_{Aj} Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis während eines Aufenthalts im Gefährdungsbereich j eintritt: $P_{Aj} = \left(\frac{l_j}{v_f}\right) / 24$; l_j : Länge des Gefährdungsbereichs (400 m je WEA), $v_f = 60 \text{ km/h}$

Damit erhält man die in der folgenden Tabelle dargestellte Trefferhäufigkeit pro Jahr (Individualrisiko). Dabei wird konservativ angenommen, dass jeder Treffer des Kraftfahrzeugs einen Unfall mit Personenschaden zur Folge hat.

Tabelle 8: Kollektivrisiko pro Jahr bei Brand

| Verkehrsweg | WEA | Treffer eines Fahrzeugs (Gefährdung des Straßenverkehrs) |
|-------------------------------------|-------|---|
| B96 Friedrichsruhe- Willerswalde | WEA 1 | $2,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 2 | $2,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 3 | $2,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | WEA 4 | $2,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | Summe | $9,99 \cdot 10^{-3}$ |

Im Unterschied zum Eisabwurf wird hier keine Abhängigkeit der Auftreffwahrscheinlichkeit vom Abstand zur WEA betrachtet, da hierfür keine Datenbasis vorhanden ist. Innerhalb des Gefährdungsradius von 300 m wird die gleiche Auftreffwahrscheinlichkeit angenommen. Daher sind die Trefferwahrscheinlichkeiten für alle WEA identisch.

Das ermittelte Kollektivrisiko bedeutet, dass sich im Mittel alle 100 Jahre ein schwerer Unfall durch Brand ereignet. Eine Aussage zum Zeitpunkt lässt sich daraus nicht ableiten.

7. Modell- und Datenunsicherheiten

Die Risikoanalyse verwendet vereinfachte Annahmen und Randbedingungen, um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten und den Analyseaufwand zu begrenzen.

Sämtliche Annahmen und Randbedingungen sind dabei konservativ gewählt.

Modellrechnungen erfassen die Realität lediglich annähernd, sie können daher nur als Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung dienen. Die ermittelten Risikowahrscheinlichkeiten gelten

nur unter den genannten Randbedingungen. Insbesondere die Abgrenzung der Gefährdungsbereiche im Ereignisfall ist in der Realität nicht so scharf, wie hier dargestellt. Das gilt in besonderem Maße für das Brandrisiko und das Risiko des Bauteilversagens. Die dargestellten Ergebnisse dienen der Orientierung.

8. Bewertung und Empfehlungen

Die nachstehende Tabelle fasst die errechneten Unfallwahrscheinlichkeiten bei Eisfall, Bauteilversagen und Brand zusammen:

Tabelle 9: Unfallrisiken beim Betrieb von 4 WEA nahe der B96

| Risiko Unfall an B96 | Eisfall | Bauteilversagen | Brand |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Individualrisiko | $1,38 \cdot 10^{-6}$ | $1,15 \cdot 10^{-6}$ | $1,15 \cdot 10^{-6}$ |
| Kollektivrisiko | $1,35 \cdot 10^{-2}$ | $9,99 \cdot 10^{-3}$ | $9,99 \cdot 10^{-3}$ |

Das Individualrisiko liegt in allen Fällen im tolerablen Bereich zwischen $1,0 \cdot 10^{-6}$ und $1,0 \cdot 10^{-5}$. Gleiches gilt für das Kollektivrisiko, das im tolerablen Bereich $1,4 \cdot 10^{-2}$ bis $1,4 \cdot 10^{-3}$ liegt (vgl. Kap.4.2).

Nach dem ALARP Prinzip [7] sind in diesem Fall jedoch Maßnahmen zur Risikominderung erforderlich, bzw. zu prüfen. Folgende Maßnahmen werden dazu vorgeschlagen:

Eisfall:

Einsatz eines erweiterten Eiserkennungssystems, das Eisansatz auch im Stillstand erkennt (Labkotec Sensor) und automatische Warnmeldungen an das Betriebspersonal sendet. Ein solches System ist für die eno 126 optional erhältlich [2].

Bauteilversagen:

Blatt- und Turmschäden müssen durch geeignete Schwingungsmessverfahren im Vorfeld eines Bauteilversagens erkannt werden. Entsprechende Messgeräte sind nach Angaben des Herstellers im Turm und im Antriebsstrang der eno 126 eingebaut. Bei Überschreitung kritischer Grenzwerte muss sichergestellt werden, dass die Anlage automatisch gestoppt wird. Vor einem Wiederanlauf ist die Ursache der Grenzwertüberschreitung durch qualifiziertes Fachpersonal zu ermitteln.

Die Funktionsfähigkeit der eingebauten Messsysteme (Schwingungssensorik) sollte mindestens 2x pro Jahr durch qualifiziertes Fachpersonal geprüft werden.

Brand:

Zur Minimierung des Brandrisikos durch Blitzeinschlag ist eine regelmäßige jährliche Prüfung des Blitzschutzkonzepts der eno 126 [12] durch einen Sachverständigen notwendig. Die Funktionsfähigkeit der Sicherheitseinrichtungen (Temperatursensoren, Strommesser) nach Kap.8 des Brandschutzdokuments [11] sollte mindestens 2x pro Jahr durch qualifiziertes Fachpersonal geprüft werden.

9 Verwendete Abkürzungen

| | |
|-------|---|
| IEC: | International Electrotechnical Commission |
| Rev. | Revision |
| TR: | Technische Richtlinie |
| ü.Gr. | über Grund |
| ü NN: | über Normal Null |
| WEA: | Windenergieanlage |

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Luftbild und Detailkarte des Windparks Willerswalde mit Neuplanung (rot). Die B96 verläuft unmittelbar westlich der WEA 2-4, bzw. östlich der WEA 1.

Abbildung 2: Karte der Eisfallwahrscheinlichkeiten. Der blaue Kreis ist der Gefährdungsbereich (Radius 395m), der schwarze Kreis der Rotorkreis (Durchmesser 126m).

Abbildung.3: Gefährdungsradien (Berechnung s. Kap. 6.1.2) rings um die WEA in Straßennähe.

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Windstatistiken im Windpark Willerswalde (Monate November bis März, langjährige Mittelwerte).

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten WEA und des gefährdeten Straßenbereichs.

Tabelle 3: Individualrisiko pro Jahr bei Eisabfall

Tabelle 4: Kollektivrisiko pro Jahr bei Eisabfall

Tabelle 5: Individualrisiko pro Jahr bei Bauteilversagen

Tabelle 6: Kollektivrisiko pro Jahr bei Bauteilversagen

Tabelle 7: Individualrisiko pro Jahr bei Brand

Tabelle 8: Kollektivrisiko pro Jahr bei Brand

Tabelle 9: Unfallrisiken beim Betrieb von 4 WEA nahe der B96

Literaturverzeichnis

- (1) https://de.wikipedia.org/wiki/Minimale_endogene_Mortalität, Abruf vom 22.2.2019
- (2) eno_wtg_Maßnahmen_bei_Eisansatz_de_rev3.docx; 31.3.2017. eno energy GmbH
- (3) eno1xx_Brandschutz_de_rev4.doc. 16.3.2017. eno energy GmbH
- (4) Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen. Ergebnisse und Empfehlungen aus einem EU – Forschungsprojekt. H. Seifert, Deutsches Windenergie – Institut GmbH, Wilhelmshaven, Deutschland. Oktober 1999
- (5) Wind Energy in Cold Climate, WECO. Seifert, Henry; Tammelin, Bengt: Icing of wind turbines: Final report; Jou2-CT93-0366 /Deutsches Windenergie-Institut, Wilhelmshaven (Herausgeber); Finnish Meteorological Institute, Helsinki. Wilhelmshaven: DEWI, 1997,
- (6) eno_wtg_Maßnahmen_bei_Eisansatz_de_rev3.docx; 31.3.2017
- (7) <https://de.wikipedia.org/wiki/ALARP>, Abruf vom 22.2.1019
- (8) <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/PolizeilichErfassteUnfaelle.html> , Abruf von 22.2.2019
- (9) <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeugbestand>
- (10) Straßenverkehrszählung an der B96 bei Willerswalde (2019). Landesamt für Straßenbau und Verkehr M-V, Rostock
- (11) eno1xx_Brandschutz_de_rev4.doc. 16.3.2017. eno energy GmbH
- (12) eno126_Blitz_Ueberspannungsschutz_de_rev2.docx. 8.9.2017. eno energy GmbH
- (13) GBE Hest 52-Sterblichkeit, Todesursachen und regionale Unterschiede. Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE) 2013
- (14) Trbojevic V.M. Risk Criteria in EU, ESREL 2005. 27-30 June 2005
- (15) Störfall Kommission. Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung. SFK-GS-41, 2004
- (16) Hauptmanns, U., Marx, M. : Kriterien für die Beurteilung von Gefährdungen durch technische Anlagen, Verlag VdTÜV-Band 16, 2010
- (17) 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.
- (18) <http://mrandreasmarciniak.blogspot.com/2016/08/liste-von-unfallen-windkraftanlagen-in.html>. Abruf vom 22.3.2019
- (19) WKA Störfallregister. <https://www.vernunftkraft.de/unfaelle-mit-windkraftanlagen/>. Abruf vom 1.6.2019

