



Gutachten zu Risiken durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen am Standort Mückendorf

Referenz-Nummer:

2024-F-124-P4-R0

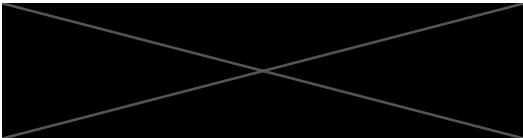
Auftraggeber:

Naturwind Potsdam GmbH
Hegelallee 41, 14467 Potsdam

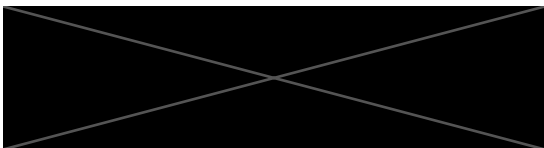
Die Ausarbeitung des Gutachtens erfolgte durch:

Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG
Borsteler Chaussee 178, 22453 Hamburg, www.f2e.de

Verfasser:



Hamburg, 19.12.2024



Hamburg, 19.12.2024

Urheber- und Nutzungsrecht:

Urheber des Gutachtens ist die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG. Der Auftraggeber erwirbt ein einfaches Nutzungsrecht entsprechend dem Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (UrhG). Das Nutzungsrecht kann nur mit Zustimmung des Urhebers übertragen werden. Veröffentlichung und Bereitstellung zum uneingeschränkten Download in elektronischen Medien sind verboten. Eine Einsichtnahme der gekürzten Fassung des Gutachtens gemäß UVPg §23 (2) über die zentralen Internetportale von Bund und Ländern gemäß UVPg §20 Absatz (1) wird gestattet.



Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung.....	3
2 Grundlagen.....	4
2.1 Vereisung.....	4
2.2 Regelungen in den Normen zum Eiswurf- / Eisfallrisiko.....	5
2.3 Eintrittshäufigkeiten und potentielle Gefährdungsbereiche für Bauteilversagen.....	7
2.4 Berechnung der Flugbahnen von Eisstücken.....	9
2.5 Vereisungshäufigkeiten.....	9
2.6 Berechnung der Flugbahn von Blattbruchstücken.....	11
2.7 Berechnung der Auftreffhäufigkeit nach Turmversagen.....	13
2.8 Grenzwerte und Risikobewertung.....	13
2.8.1 Grenzwerte individuelles Risiko.....	13
2.8.2 Grenzwerte kollektives Risiko.....	15
2.8.3 Grenzwerte kollektives Risiko für Ereignisse mit mehreren Todesfällen.....	16
2.8.4 Risikobewertung.....	17
2.8.5 Grenzwerte für Schäden an Öl- und Gasleitungen.....	21
2.8.6 Risikomindernde Maßnahmen.....	22
2.8.7 Addition von Risiken.....	24
2.9 Gültigkeit der Ergebnisse.....	26
2.10 Systeme zur Prävention und Enteisung.....	26
2.11 Verwendete Begriffe und Symbole.....	27
3 Eingangsdaten.....	28
3.1 Ausgangssituation.....	28
3.2 Winddaten am Standort.....	28
3.3 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte.....	29
3.4 Aufenthaltshäufigkeiten.....	33
3.5 Standortspezifische Grenzwerte für das kollektive Risiko.....	34
3.6 Vereisungsrelevante WEA-Systeme.....	34
3.6.1 WEA-interne Eiserkennungssysteme.....	34
3.6.2 Optionale Eiserkennungssysteme.....	35
3.6.3 Systeme zur Prävention und Enteisung.....	35
3.6.4 Betriebsführungssystem.....	35
3.7 Risikoreduzierende Maßnahmen.....	35
4 Durchgeführte Untersuchungen.....	36
4.1 Standortbesichtigung.....	36
4.2 Vereisungsbedingungen am Standort.....	36
4.3 Ermittlung der Gefährdungsbereiche.....	37
4.4 Betrachtung der Einzelrisiken.....	38
4.4.1 Bauteilversagen.....	39
4.4.2 Eiswurf.....	39
4.4.3 Eisfall.....	39
4.5 Bewertung des Gesamtrisikos.....	39
5 Weitere Maßnahmen.....	41
6 Zusammenfassung.....	43
7 Formelzeichen und Abkürzungen.....	47



8 Literaturangaben.....	47
Anhang A: Detaillierte Berechnungsergebnisse Bauteilversagen.....	50
A.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten von Blattbruchstücken.....	50
A.2 Schadenshäufigkeiten.....	51
Anhang B: Detaillierte Berechnungsergebnisse Eisfall.....	55
B.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten.....	55
B.2 Schadenshäufigkeiten.....	56

1 Aufgabenstellung

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG ist beauftragt worden, die vorliegende Windparkkonfiguration hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen ausgehend von sich in Betrieb befindlichen bzw. stillstehenden (trudelnden) Windenergieanlagen (WEA) zu betrachten. Weiterhin wird eine Gefährdung durch Rotorblattbruch, Turmversagen und Verlust der Gondel bzw. des Rotors an den WEA betrachtet.

Die Bewertung erfolgt auf Basis des Gesamtrisikos durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen.



2 Grundlagen

2.1 Vereisung

Abhängig von den Vereisungsbedingungen kann es auf dem Rotorblatt einer WEA zu starken Vereisungen kommen, in deren Folge eine Gefahr durch sich lösende bis zu mehreren Kilogramm schwere Eisstücke besteht.

Während des Betriebes der WEA erfahren diese Eisstücke einen deutlichen Anfangsimpuls durch das schnell rotierende Blatt. In diesem Fall wird daher von Eiswurf gesprochen. Während des Stillstandes der WEA trudelt diese mit deutlich niedrigeren Drehzahlen. In diesem Fall wird daher von Eisfall gesprochen. In beiden Fällen (Eiswurf und Eisfall) wirken auf die abgelösten Eisstücke durch den Wind weitere Kräfte. Bei Sturm und auch entlang eines abfallenden Geländes können so nennenswerte Flugweiten erreicht werden.

Vereisung tritt ein, wenn entweder unterkühlte Wassertropfen auf das Rotorblatt aufschlagen oder die Oberflächentemperatur des Rotorblattes unterhalb des Reifpunktes liegt und Wasserdampf auf der Oberfläche in Form von Reif resublimiert.

Im Temperaturbereich von ca. 0° bis -10°C bildet sich aus den Wassertropfen beim Auftreffen auf das Rotorblatt Eis. Bis etwa -4°C kommt es dabei aufgrund der verzögerten Eisbildung zu großflächiger Klareisbildung. Bei niedrigeren Temperaturen dominiert hingegen die Raueisbildung, mit geringer Haftoberfläche und einem milchigeren und rauerem Erscheinungsbild.

Unterhalb von -10°C können sich größere Ablagerungen von Raureif an den Profilkanten bilden. Der sich bei noch kälteren Temperaturen bildende Reif bildet typischerweise keine größeren Ablagerungen und spielt hinsichtlich einer Gefährdung durch Eisfall oder Eiswurf keine Rolle.

Grundsätzlich sollten bei der Gefährdung durch Eisfall bzw. Eiswurf daher zwischen großflächigen Eisplatten, die sich über einen großen Bereich der Profiltiefe ausbilden können, und schlankeren Eisstücken, die von der Profilkante abbrechen, unterschieden werden. Hinweise zu Form und Masse von Eisstücken finden sich z.B. in / 1.1/.

Aufgrund der extrem hohen Variabilität der Vereisungstage von Jahr zu Jahr werden langjährige Messungen benötigt, die möglichst auf einen klimatologischen Zeitraum, also 30 Jahre, zu beziehen sind /2.1/. Derart langjährige Messungen oder Beobachtungen liegen in Deutschland z.B. in Bodennähe für die Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes DWD vor. Messungen in Bodennähe unterliegen jedoch starken mikroskaligen Einflüssen, so dass sie bezüglich einer Vereisung schon wenige



hundert Meter entfernt nicht mehr aussagekräftig sein können, wenn sich dort z.B. aufgrund einer lokalen Senke kalte Luft sammelt. Diese mikroskaligen Effekte, die auf Nabenhöhe der Windenergieanlagen typischerweise keine Rolle mehr spielen, zu identifizieren und entsprechend zu korrigieren ist so gut wie nicht möglich. Hinzu kommt, dass die Daten der Klimastationen oft über mehr als 10km und auf andere Höhen über Meeresniveau übertragen werden müssen, so dass die Unsicherheiten in der Vorhersage der Vereisungstage nach dieser Methode insgesamt sehr groß sind.

Eine weitere mögliche Quelle stellen großflächige Vereisungskarten dar, wie sie z.B. in /1.1/ und /1.2/ dargestellt sind. Diese Karten liefern jedoch nur Hinweise und Tendenzen. In /1.2/ wird darauf hingewiesen, dass im Gegensatz zu den in den großflächigen Karten dargestellten Werten, die tatsächlichen Werte schon auf kurzen Distanzen stark schwanken können und die lokale Geländetopografie berücksichtigt werden sollte. Die daraus entstehenden Unterschiede in der Einschätzung der Vereisungstage können extrem groß sein, so dass diese Karten selbst zur Plausibilisierung lokaler Vereisungsdaten nur sehr bedingt geeignet sind.

Für Deutschland liegt mittlerweile eine hochaufgelöste Vereisungskarte des DWD vor, die die lokale Topografie berücksichtigt /1.8/. Sie stellt vor dem Hintergrund der dargestellten Zusammenhänge die zurzeit beste Datengrundlage zur Ermittlung der Vereisungstage für Standorte in Deutschland dar.

2.2 Regelungen in den Normen zum Eiswurf- / Eisfallrisiko

In /1.1/ findet sich für Regionen mit einer hohen Vereisungshäufigkeit die Empfehlung, einen Mindestabstand von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ zu gefährdeten Bereichen einzuhalten oder die Windenergieanlage bei Vereisungsbedingungen abzuschalten.

Der vorgeschlagene Mindestabstand von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ fand in Deutschland Eingang in die Muster-Liste der technischen Baubestimmungen bzw. die Muster-Verwaltungsvorschrift Technischen Baubestimmungen /2.2/. Dort heißt es in der Anlage zur Richtlinie für Windenergieanlagen:

„Abstände zu Verkehrswegen und Gebäuden sind unbeschadet der Anforderungen aus anderen Rechtsbereichen wegen der Gefahr des Eisabwurfs einzuhalten, soweit eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit nicht auszuschließen ist. Abstände größer als $1,5 \times (\text{Rotordurchmesser} + \text{Nabenhöhe})$ gelten im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen als ausreichend. In anderen Fällen ist die Stellungnahme eines Sachverständigen erforderlich.“

Soweit dieser Mindestabstand nicht eingehalten wird bzw. der Standort der Wind-



energieanlage in einer besonders eisgefährdeten Region liegt und der Mindestabstand daher keine Anwendung finden kann, ist also das Risiko durch Eiswurf standortspezifisch zu bewerten.

Weiterhin wird in /2.2/ ausgeführt, dass die gutachterliche Stellungnahme eines Sachverständigen zur Funktionssicherheit von Einrichtungen vorzulegen ist, durch die der Betrieb der Windenergieanlage bei Eisansatz sicher ausgeschlossen werden kann oder durch die ein Eisansatz verhindert werden kann. Dies hat immer dann zu erfolgen, wenn erforderliche Abstände wegen der Gefahr des Eisabwurfes nicht eingehalten werden.

Die gutachterliche Stellungnahme zur Funktionssicherheit von Einrichtungen zur Eiserkennung ist im Gegensatz zur gutachterlichen Stellungnahme bei Unterschreitung des in der Muster-Liste genannten Mindestabstandes von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ kein standortspezifischer Nachweis, sondern ein entweder vom Hersteller des Eiserkennungssystems bzw. für die Implementierung in eine spezifische Windenergieanlage vom Hersteller der Windenergieanlage einmalig für den jeweiligen Typ in Auftrag gegebenes Gutachten. Diese Systeme schließen damit den Betrieb bei potentiell gefährlichem Eisansatz aus, können aber nicht grundsätzlich Eisansatz verhindern. Das für eine Verhinderung des Eisansatzes in /2.2/ genannte Beispiel einer Rotorblattheizung ist an dieser Stelle typischerweise nicht als Sicherheitssystem konzipiert. Der Betrieb einer Rotorblattheizung wird daher durch einzelne Hersteller für Standorte, in deren Umgebung eventuell durch Eiswurf eine erhebliche Gefährdung besteht, sogar ausgeschlossen.

Damit ergibt sich die Situation, dass auch bei einem vorhandenen System zur Eiserkennung mit Eisfall (Ablösen von Eisstücken von der stillstehenden bzw. trudelnden Windenergieanlage) zu rechnen ist und damit auch in diesen Fällen bei Unterschreitung des Mindestabstandes von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ eine standortspezifische Bewertung des Risikos erfolgen sollte.

Der in der Abbildung 2.2.1 dargestellte Entscheidungsbaum für die Bewertung des Risikos durch Eiswurf und Eisfall fasst dies noch einmal zusammen.

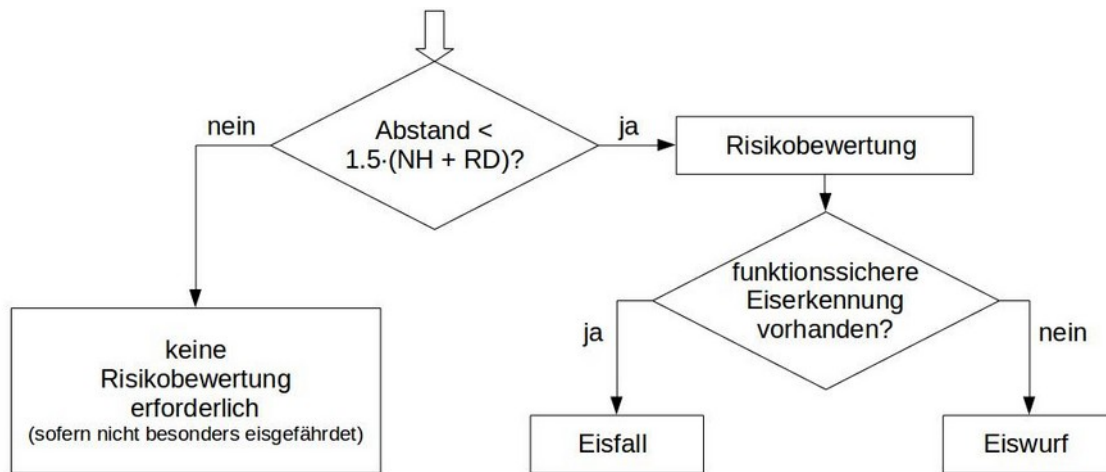


Abbildung 2.2.1: Entscheidungsbaum für die Bewertung des Risikos durch Eiswurf und Eisfall.

Auf internationaler Ebene wurden durch die International Energy Agency (IEA) Empfehlungen für die Risikobewertung von Eisfall und Eiswurf erarbeitet /2.1/. Neben der Risikobewertung beschäftigen sich die Empfehlungen der IEA auch mit der mathematischen Modellierung und den eingehenden Randbedingungen. Die Empfehlungen der IEA /2.1/ werden im Folgenden berücksichtigt.

2.3 Eintrittshäufigkeiten und potentielle Gefährdungsbereiche für Bauteilversagen

Die Eintrittshäufigkeiten für die Schadensfälle Rotorblattbruch, Turmversagen und Verlust der Gondel bzw. des Rotors werden typischerweise auf Basis bekannter Schadenereignisse eingeschätzt. Umfassende Untersuchungen hierzu finden sich z.B. in /1.11/. Hier werden folgende Versagenhäufigkeiten pro WEA pro Jahr genannt:

Tabelle 2.3.1: Versagenhäufigkeiten an WEA pro Anlage und Jahr sowie gemeldete und bestätigte Wurfweiten nach /1.11/.

Anlagenteil	Versagenhäufigkeiten pro WEA pro Jahr		Maximale Wurfweite
	Erwartungswert	Erwartungswert zuzüglich Sicherheitszuschlag	
Ganzes Blatt	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	150m
Turm	$5.8 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	Gesamthöhe der WEA
Gondel oder Rotor	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$4.0 \cdot 10^{-5}$	Rotorradius



Die Erwartungswerte zuzüglich des Sicherheitszuschlages werden im Folgenden als Eintrittshäufigkeiten zugrunde gelegt.

Die potentiellen Gefährdungsbereiche durch Bauteilversagen ergeben sich aus den in Tabelle 2.1.1 aufgeführten maximalen Wurfweiten. Der potentielle Gefährdungsbereich ist dabei als der Bereich definiert, innerhalb dessen ein im Hinblick auf die Risikobewertung relevantes Risiko bestehen kann.

Für unterirdisch verlegte Objekte wird als Gefährdungsbereich für Turmversagen die Nabenhöhe samt Gondel zugrundegelegt. Es wird davon ausgegangen, dass am havarierten Turm verbliebene Blattteile keine relevante Gefahr für unterirdische Objekte darstellen und die hauptsächliche Gefährdung durch den Aufprall von Turm und Gondel verursacht wird.

Wurfweiten für Blattbruchstücke erreichen deutlich größere Werte als die in /1.3/ angegebene und in Tabelle 2.1.1 aufgeführte Wurfweite für das ganze Blatt. Als potentieller Gefährdungsbereich für Blattbruch kann hier in guter Näherung der potentielle Gefahrenbereich für Eiswurf vom 1.5fachen der Summe aus Nabenhöhe und Rotordurchmesser angenommen werden.

Außerhalb des potentiellen Gefährdungsbereiches sinkt das Risiko in der Regel nicht auf Null, da es zu sehr seltenen Ereignissen kommen kann, bei denen z.B. die Flugweite einzelner Blattbruchstücke den potentiellen Gefährdungsbereich übersteigt. Das Risiko durch solche Ereignisse ist aber im Allgemeinen als vernachlässigbar anzusehen.

Bei kleinen WEA mit einer hohen Drehzahl oder z.B. bei stallgeregelten WEA mit verstellbaren Blattspitzen, deren Verlust als zusätzliches Risiko zu berücksichtigen ist, kann bei einer größeren Anzahl Bruchstücke eine höhere Wurfweite als die Ausdehnung des hier definierten potentiellen Gefährdungsbereichs erreicht werden. Dies wird im Einzelfall bei der Festlegung der Schutzobjekte in Kapitel 4.3 entsprechend berücksichtigt.

Im Gegensatz zum potentiellen Gefährdungsbereich, der zur Festlegung der zu betrachtenden WEA und Schutzobjekte dient, ergibt sich der standortspezifische Gefährdungsbereich aus der standortspezifischen Berechnung der Auftreffpunkte der Bruchstücke. Auch hier gilt, dass außerhalb des standortspezifischen Gefährdungsbereiches das Risiko in der Regel nicht Null beträgt, aber im Allgemeinen als vernachlässigbar anzusehen ist.

Eine mögliche Ursache für ein Umstürzen der WEA, einen Absturz des Rotors, einen Absturz der Gondel oder den Verlust des ganzen bzw. Teilen eines Rotorblattes ist ein Brand der WEA. Das durch einen Brand hierdurch verursachte Risiko ist daher in



der Risikobetrachtung für das Bauteilversagen enthalten und mit abgedeckt. Nicht mit abgedeckt ist das durch die Ausbreitung von brennenden Partikeln und Trümmern in der Umgebung bestehende Brandrisiko.

2.4 Berechnung der Flugbahnen von Eisstücken

Für die Berechnung der Flugbahnen der Eisstücke wird basierend auf den Luftwiderstandsbeiwerten, der Geometrie und der Masse der Eisstücke die Lage des Eisstückes während der gesamten Bewegung erfasst und verfolgt, so dass sich im Vergleich zu einer rein ballistischen Flugbahn ein realistischeres Bild der Flugweiten ergibt und auch solche Flugbahnen erfasst werden, bei denen im Einzelfall aufgrund von Auftriebskräften am Eisstück sehr hohe Flugweiten erreicht werden.

Im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation werden dabei folgende Größen zufällig im Rahmen der am Standort zu erwartenden Wahrscheinlichkeitsverteilung variiert:

- Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe,
- Windrichtung,
- Position des Eisstückes auf dem Blatt,
- Geometrie und Dichte des Eisstückes,
- Drehzahl und Stellung des Rotors im Moment der Ablösung des Eisstückes.

Für das Geländemodell in der Umgebung der WEA werden Daten aus /1.5/ berücksichtigt. Eine eventuell vorhandene Schutzwirkung durch Bewuchs oder Gebäude wird dabei vernachlässigt.

Das Berechnungsmodell wurde im Rahmen der Entwicklung der IEA Recommendations /2.1/ anhand von Messkampagnen in realen Windparks validiert.

2.5 Vereisungshäufigkeiten

Datengrundlage für die Bewertung der Vereisungshäufigkeit bildet die Vereisungskarte des Deutschen Wetterdienstes /1.8/. Für die Bestimmung der Häufigkeit atmosphärischer Vereisung wurden hierzu in /1.8/ verschiedene Wetter-Meldungen ausgewertet:

- Allgemeine Wetterereignisse:
 - leichter, mäßiger oder starker gefrierender Regen,
 - leichter, mäßiger oder starker gefrierender Sprühregen,
 - leichter, mäßiger oder starker Schneeregen,



- Eiskörner (gefrorene Regentropfen),
- Nebel mit Reifansatz
- Wetterereignisse bei Temperaturen $\leq 0^\circ$ Celsius:
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Sprühregen,
 - leichter, mäßiger oder starker Sprühregen mit Regen,
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Regen,
 - Nebel oder Nebel mit Reifansatz
- Wetterereignisse bei Temperaturen $> 0^\circ$ Celsius:
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Schneefall,
 - leichter, mäßiger oder starker Schneeregen- oder Schneeschauer,
- Wetterereignisse der letzten Stunde aber nicht zur Beobachtungszeit:
 - Schneefall,
 - Schneeregen oder Eiskörner,
 - gefrierender Regen,
 - Schneeschauer bei Temperaturen $> 0^\circ$ Celsius,
 - Nebel bei Temperaturen $\leq 0^\circ$ Celsius.

Damit werden eine Vielzahl von Ereignissen erfasst, die nicht in allen Fällen zu einer signifikanten Vereisung bzw. in einigen Fällen zu keiner Vereisung der WEA führen. Gleichzeitig beziehen sich die Meldungen auf Beobachterhöhe und nicht auf die Nabenhöhe der WEA. Es wurden daher Vergleiche mit verschiedenen Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt. Hierzu wurden langjährige (30 Jahre) Messreihen zum Tagesmittel der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur ausgewertet, um die Vereisungshäufigkeit auf Nabenhöhe zu bestimmen. Der Vergleich zeigt, dass die in /1.8/ auf Beobachterhöhe ermittelten Vereisungshäufigkeiten konservativere Ergebnisse liefern. Eine Umrechnung auf Nabenhöhe der WEA ist daher unter Berücksichtigung der in /1.8/ betrachteten Ereignisse nicht erforderlich.

Gemäß /1.8/ sind für Standorte in großen Höhen besondere Betrachtungen erforderlich, wenn diese besonders exponiert oder besonders geschützt liegen. Entsprechende Orte wurden in /1.8/ daher gefiltert. Die niedrigste betroffene Höhe liegt bei ca. 700m üNN, so dass das hier verwendete Verfahren im Folgenden für Orte bis zu einer Höhe von 700m üNN ohne Korrekturen angewendet wird. In diesem Höhenbereich weist die in /1.8/ verwendete exponentielle Regression eine gute Annäherung an die



Daten auf und wird daher hier verwendet. Abbildung 2.5.1 zeigt die hierauf beruhende Vereisungskarte für Deutschland.

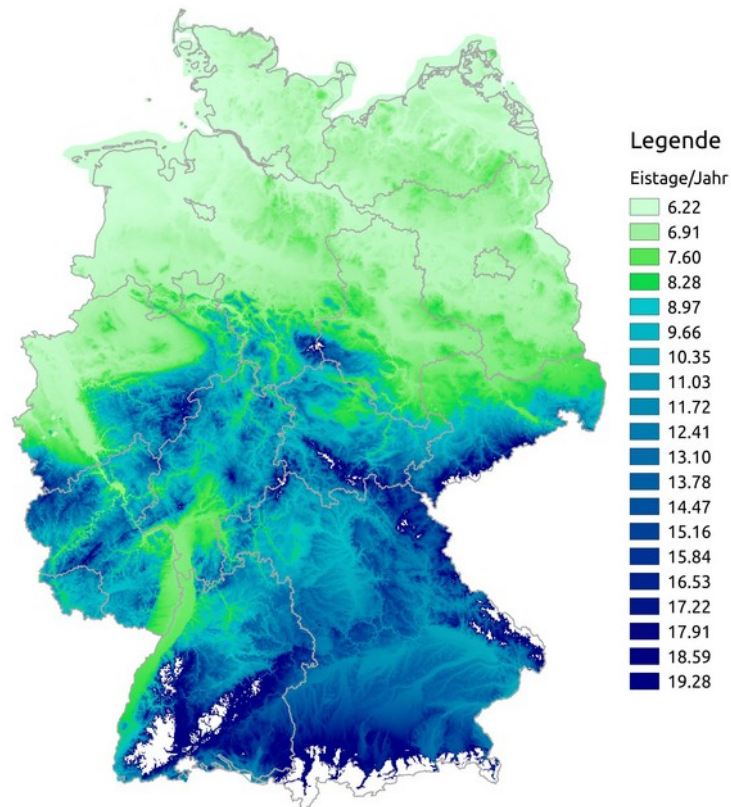


Abbildung 2.5.1: Eistage pro Jahr gemäß den Ergebnissen aus /1.8/ für Höhen bis 700m üNN.

2.6 Berechnung der Flugbahn von Blattbruchstücken

Für die Berechnung der Flugbahnen der Blattbruchstücke wird basierend auf den Luftwiderstandsbeiwerten, der Geometrie und der Masse der Blattbruchstücke die Lage des Blattbruchstückes während der gesamten Bewegung erfasst und verfolgt, so dass sich im Vergleich zu einer rein ballistischen Flugbahn ein realistischeres Bild der Flugweiten ergibt und auch solche Flugbahnen erfasst werden, bei denen im Einzelfall aufgrund von Auftriebskräften am Blattbruchstück sehr hohe Flugweiten erreicht werden. In Abbildung 2.6.1 ist eine beispielhafte Flugbahn visualisiert.

Für die Berechnung werden für die Leistungsklasse der WEA repräsentative Daten zu Blattmassenverteilung, Geometrie, aerodynamischen Beiwerten (Auftrieb-, Schub- und Momentenbeiwerte an verschiedenen Blattschnitten) sowie Pitch- und Drehzahlverlauf unterstellt. Der Bruch wird in allen Fällen als glatter, plötzlicher Abriss



modelliert, der während des Bruchvorgangs keine Energie verbraucht.

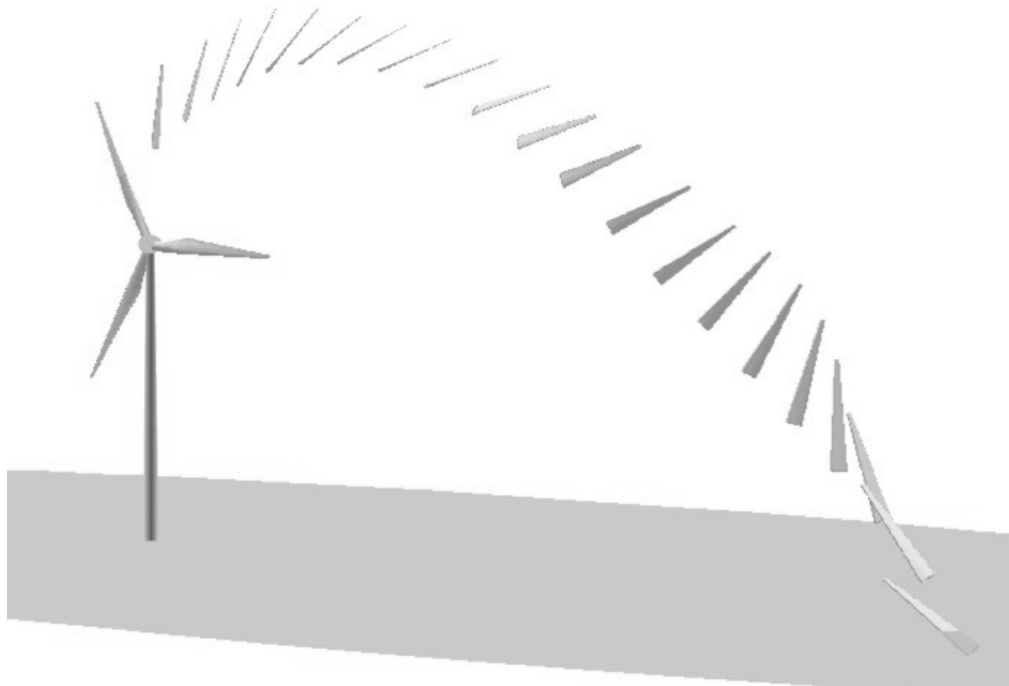


Abbildung 2.6.1: Beispielhafte Flugbahn eines Blattbruchstückes /1.12/.

Im Unterschied zu /1.11/, wo stets der Abriss des ganzen Blattes unterstellt wird, werden auch größere Blattbruchstücke betrachtet, die tendenziell zu größeren Flugweiten und damit zu einer konservativen Betrachtungsweise führen.

Folgende Randbedingungen wurden bei der Berechnung zugrunde gelegt:

- Abrisspunkte:
 - ganzes Blatt (50% der Ereignisse),
 - Bruchstücke von 90%, 70%, 50% und 30% der Blattlänge (jeweils 12.5% der Ereignisse).
- Windgeschwindigkeitsverteilung entsprechend Tabelle 3.2.1.
- Windrichtung in 1° Grad-Schritten gewichtet mit der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen entsprechend Tabelle 3.2.1.
- Rotorblattstellung zum Zeitpunkt des Abrisses: gleichverteilt in 2°-Schritten.
- Drehzahl der WEA: Abhängig von der Windgeschwindigkeit entsprechend Kennlinie der WEA (Überdrehzahl wird vernachlässigt, da dies als Ursache für Blattbruch vernachlässigbar ist /1.11/).



- Geländehöhe: für das Geländemodell in der Umgebung der WEA werden Daten aus /1.5/ berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Gesamthäufigkeit, dass ein Blattbruchstück auf einer Fläche von einem Quadratmeter in der Umgebung einschlägt, ist anschließend die Eintrittswahrscheinlichkeit von $8.4 \cdot 10^{-4}$ für einen Blattbruch pro WEA und pro Jahr nach Tabelle 2.3.1 mit in Betracht zu ziehen.

2.7 Berechnung der Auftreffhäufigkeit nach Turmversagen

Ermüdungsschäden an Türmen sind selten. Es kann angenommen werden, dass das Versagen eines Turmes aufgrund von Ermüdung durch die Bauüberwachung und wiederkehrenden Prüfungen weitestgehend ausgeschlossen werden kann /1.13/. Eine Gefährdung durch Turmversagen wird daher unterstellt, wenn es bei extremer Belastung (Sturm) aufgrund von Konstruktions-, Planungs- oder Wartungsfehlern zu einem Versagen des Turmes bzw. des Fundamentes kommt.

Aus den Abmaßen der WEA und der Lage der Schutzobjekte ergibt sich die Windrichtung aus denen die Starkwindlagen unterstellt werden müssen. Aus den Winddaten in Tabelle 3.2.1 werden anschließend die relativen Häufigkeiten für Starkwind mit einem 10-Minuten-Mittelwert von mehr als 16m/s auf Nabenhöhe für die jeweils zu betrachtenden Windrichtungen bestimmt. In Verbindung mit der Versagenshäufigkeit aus Tabelle 2.3.1 ergeben sich die Gesamthäufigkeiten.

2.8 Grenzwerte und Risikobewertung

2.8.1 Grenzwerte individuelles Risiko

Für Personenschäden findet sich in der Literatur das Konzept der minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) /2.3/. Die minimale endogene Sterblichkeit in entwickelten Ländern findet sich in der Gruppe der fünf bis 15jährigen. Sie liegt bei $2 \cdot 10^{-4}$ Todesfällen pro Person und Jahr. Eine neue Technologie sollte diese endogene Sterblichkeit nicht nennenswert erhöhen. Es wird daher gefordert, dass die einer neuen Technologie verbundene Sterblichkeit nicht mehr als $1 \cdot 10^{-5}$ Todesfälle pro Person und Jahr betragen darf.

An anderer Stelle wird das gesellschaftlich akzeptierte Todesfallrisiko abhängig vom Grad der Freiwilligkeit und möglichen Einflussnahme auf die Handlung dargestellt /1.7/. Die Akzeptanz sinkt, wenn zum einen die Möglichkeit sich durch adäquates Handeln zu schützen gegen Null geht und zum anderen sich die Person nicht freiwillig der Gefährdung aussetzt. Der unter diesen Randbedingungen defi-



nierte Grenzwert liegt bei $1 \cdot 10^{-5}$ Todesfällen pro Person und Jahr und entspricht damit dem definierten MEM-Kriterium.

Betrachtet man das Risiko in der Nähe einer WEA durch Eisfall, Eiswurf oder Bauteilversagen tödlich zu verunglücken, begibt man sich in der Regel weder freiwillig in diese Lage noch hat man durch persönliche Einflussnahme eine Möglichkeit das Risiko nennenswert zu minimieren. Der Ansatz des MEM-Kriteriums ist daher an dieser Stelle gerechtfertigt und sinnvoll.

Damit liegt eine inakzeptable Gefährdung durch Eiswurf, Eisfall oder Bauteilver-sagen nur vor, wenn der so definierte Grenzwert überschritten wird.

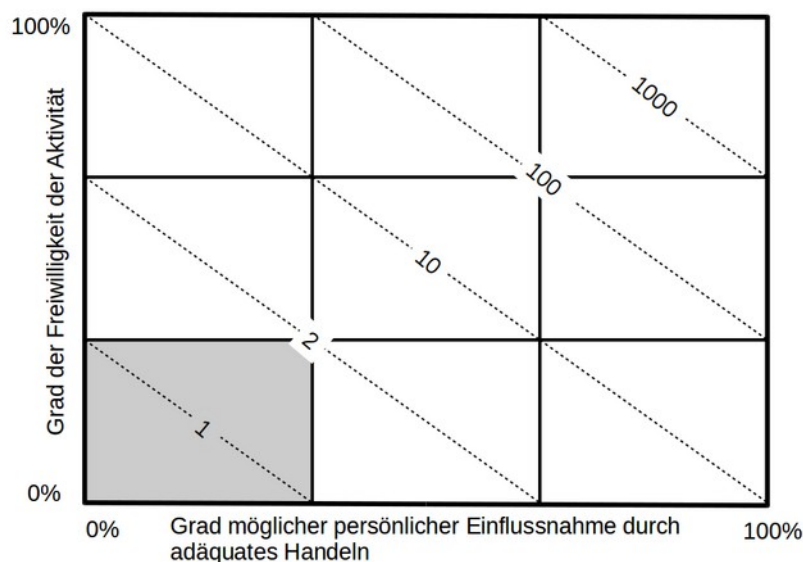


Abbildung 2.8.1.1: Akzeptiertes Todesfallrisiko pro 100 000 Personen /1.7/. Grau hinterlegter Bereich entspricht dem MEM-Kriterium /2.3/.

Um hier eine konservative Vorgehensweise zu gewährleisten, werden bezüglich des Eisfall/Eiswurf-Risikos folgende Annahmen getroffen:

- Ein Eisstück, das eine ungeschützte Person außerhalb eines Fahrzeuges oder Gebäudes im Bereich des Kopfes trifft, führt immer zu einer schweren Verletzung oder zum Tode.
- Bis zu einer Geschwindigkeit von 50km/h kann angenommen werden, dass eine Person innerhalb eines Fahrzeuges vor direkten tödlichen Treffern durch Eisstücke geschützt ist. Oberhalb von 50km/h kann es neben einem direkten tödlichen Treffer auch zu einem schweren Unfall mit tödlichem Ausgang kommen, wenn ein Eisstück auf das Fahrzeug oder dicht vor dem Fahrzeug aufschlägt. Das Risiko für einen solchen Unfall steigt überproportional mit der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die durchschnittliche Anzahl von Personen in einem



Kraftfahrzeug ist statistisch erfasst /1.6/, so dass sich hieraus eine Anzahl betroffener Personen ableiten lässt.

Mit dem Ausschluss leichter Verletzungen, der fehlenden Unterscheidung zwischen schweren und tödlichen Verletzungen wird hier ein konservativer Ansatz gewählt. Eine weitere Differenzierung gestaltet sich an dieser Stelle sehr schwierig und lässt sich statistisch zurzeit nicht ausreichend absichern.

2.8.2 Grenzwerte kollektives Risiko

Bei der Bewertung von Schutzobjekten, bei denen sich eine größere Anzahl von Personen in der Nähe der WEA aufhält, wie es typischerweise bei Verkehrswegen der Fall ist, ist gemäß /2.1/ das daraus resultierende Kollektivrisiko zu bewerten. Entsprechende Grenzwerte für das Kollektivrisiko werden in /2.1/ definiert. Diese liegen für das Kollektivrisiko zwei Größenordnungen oberhalb des MEM-Kriteriums /2.1/ und somit bei $1 \cdot 10^{-3}$ Todesfällen pro Jahr.

Gemäß /2.1/ kann für das Risiko im Straßenverkehr der Grenzwert für das kollektive Risiko basierend auf vorliegenden Unfallstatistiken ermittelt werden. Diese Vorgehensweise findet Anwendung für Straßen des Fernverkehrs und angeschlossene Straßen, die dem Durchgangsverkehr dienen. Dies sind in Deutschland die Bundesautobahnen, die Bundesstraßen und die Landesstraßen.

Das aktuelle Risiko ist dabei auf Basis der Todesfälle und der Schwerverletzten im Straßenverkehr zu ermitteln. Entsprechend der grundsätzlichen Idee des MEM-Kriteriums wird auch hier gefordert, dass ein bestehendes Risiko nicht nennenswert erhöht werden darf. Der anzusetzende Grenzwert für eine inakzeptable Gefährdung wird daher eine Größenordnung niedriger gewählt als das bestehende Risiko /2.1/.

Mit /1.3/ liegen entsprechende Unfallzahlen für Kfz-Benutzer gegliedert nach Straßenklasse, Ortslage und Unfallfolge vor. Tabelle 2.8.2.1 listet die entsprechenden absoluten Unfallzahlen pro Jahr für die betreffenden Straßengruppen.

Tabelle 2.8.2.1: Verunglückte Kfz-Benutzer gegliedert nach Straßenklasse pro Jahr /1.3/.

Straßenklasse	Getötete	Schwerverletzte
Bundesautobahn	344	5673
Bundesstraße (außerorts)	640	7742
Landesstraße (außerorts)	646	9210

In Verbindung mit der Inlandsfahrleistung auf den verschiedenen Straßenklassen lassen sich daraus die bestehenden Risiken bezogen auf die gefahrene Strecke bestimmen. Damit ist es möglich abhängig von der Verkehrsdichte straßenspezifische



Risikowerte festzulegen. Die Streckenlänge ist dabei so festzulegen, dass jeweils nur eine WEA zur Gefährdung beitragen kann, um auch hier zu gewährleisten, dass das von jeder WEA ausgehende Risiko unabhängig bewertet werden kann. Werden die Risikogrenzwerte standortspezifisch bestimmt, so sind sie in Kapitel 3 dargestellt. Für alle anderen Straßenklassen kann der oben definierte Grenzwert für das Kollektivrisiko von $1 \cdot 10^{-3}$ zugrunde gelegt werden.

2.8.3 Grenzwerte kollektives Risiko für Ereignisse mit mehreren Todesfällen

Der in 2.8.2 verwendete Begriff des kollektiven Risikos orientiert sich an den Empfehlungen der IEA /2.1/ und betrachtet die Summe aller Todesfälle, die sich durch Ereignisse mit jeweils nur einem oder sehr wenigen Todesfällen ergeben. Für Risiken, bei denen pro Ereignis eine große Zahl von Toten zu erwarten ist, wie z.B. bei einem Flugzeugabsturz, ist zu beachten, dass das gesellschaftlich akzeptierte Risiko niedriger anzusetzen ist.

Im Zusammenhang mit WEA kommt dies zum Tragen, wenn das Risiko durch Bauteilversagen für eine sehr stark befahrene Straße wie z.B. eine Bundesautobahn oder eine Bahnlinie mit Personenverkehr bewertet wird. In beiden Fällen ist entweder aufgrund der hohen Verkehrsdichte und Geschwindigkeit und den resultierenden Folgeunfällen oder wegen einem Entgleisen bei hohen Geschwindigkeiten damit zu rechnen, dass es in einem Schadensfall zu mehreren Todesfällen kommt. In diesen Fällen erfolgt die Grenzwertbestimmung anhand sogenannter F-N-Kurven / 2.1, 2.8/.

Es existieren verschiedene F-N-Kurven, die Ereignissen mit mehreren Toten unterschiedlich abnehmende Akzeptanzen zuweisen (sogenannte Risk-Aversion). Die IEA empfiehlt in /2.1/ eine F-N-Kurve mit einem Risk Aversion Faktor von eins. Dies entspricht auch dem für F-N-Kurven in /2.8/ angegebenen Beispiel und auch der aktuellen Praxis in Belgien /2.8/ und wird daher hier verwendet.

Bei sehr stark befahrenen Straßen wird standortspezifisch ermittelt, wie viele Tote pro Ereignis standortspezifisch zu erwarten sind. Im Anschluss wird die entsprechende F-N-Kurve auf den standortspezifischen Grenzwert bezogen.

Bei überregionalen Bahnstrecken mit Personenverkehr findet standortspezifisch eine konservative Abschätzung der Anzahl von Toten pro Ereignis statt.



2.8.4 Risikobewertung

Im Folgenden wird in allen Fällen das individuelle Risiko und das kollektive Risiko ermittelt. Anschließend wird in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen das individuelle oder kollektive Risiko für eine Bewertung zugrunde gelegt. In Anlehnung an /2.1/ kann dabei folgende Aufteilung verwendet werden:

- Individuelles Risiko:
 - land- und forstwirtschaftlich genutzte Wege, Wanderwege, Fahrradwege und Straßen mit geringer Verkehrsdichte,
 - Objekte wie Scheunen, Hütten etc., die regelmäßig durch den Besitzer oder durch einen kleinen Personenkreis genutzt werden.
- Kollektives Risiko:
 - stark genutzte Gemeindestraßen, Kreisstraßen, Landesstraßen, Bundesstraßen und Autobahnen,
 - Objekte, die von generellem Interesse für die Öffentlichkeit sind und entsprechend durch eine größere Personengruppe genutzt werden (öffentliche Parkplätze, Industrieanlagen etc.).
 - Ereignisse, bei denen pro Ereignis eine große Zahl von Toten zu erwarten ist.

Für die Bewertung des kollektiven Risikos sind dabei die Risiken aller zu betrachtenden Individuen zu addieren. In Fällen, bei denen pro Ereignis ein große Anzahl von Toten zu erwarten ist, sind die Grenzwerte für das kollektive Risiko entsprechend zu reduzieren.

Für die Bewertung des individuellen Risikos ist das sogenannte kritische Individuum maßgeblich, das aufgrund seiner Nutzung der Schutzobjekte dem höchsten Risiko ausgesetzt ist. Das individuelle Risiko ist im Gegensatz zum kollektiven Risiko daher nicht von der Gesamtanzahl der Personen abhängig, die die Schutzobjekte frequentieren. Auf kleineren Wegen, auf denen nur eine geringe Fahrgeschwindigkeit von Kfz zu unterstellen ist, ist das kritische Individuum z.B. in der Regel der Fußgänger oder Radfahrer. Aufgrund der geringe Eintrittshäufigkeit kann das Risiko durch Bauteilversagen von einer einzelnen WEA für einen individuellen Fußgänger im Allgemeinen keine unzulässigen Werte erreichen. Die Ausweisung und Bewertung des Risikos kann daher im Einzelfall auf die für die Gesamtbewertung relevanten WEA begrenzt werden (siehe Kapitel 2.8.7).

Das individuelle Risiko ist in der Regel für stark genutzte überregionale Verkehrswege nicht maßgeblich. Eine Ausnahme bilden hier die überregionalen

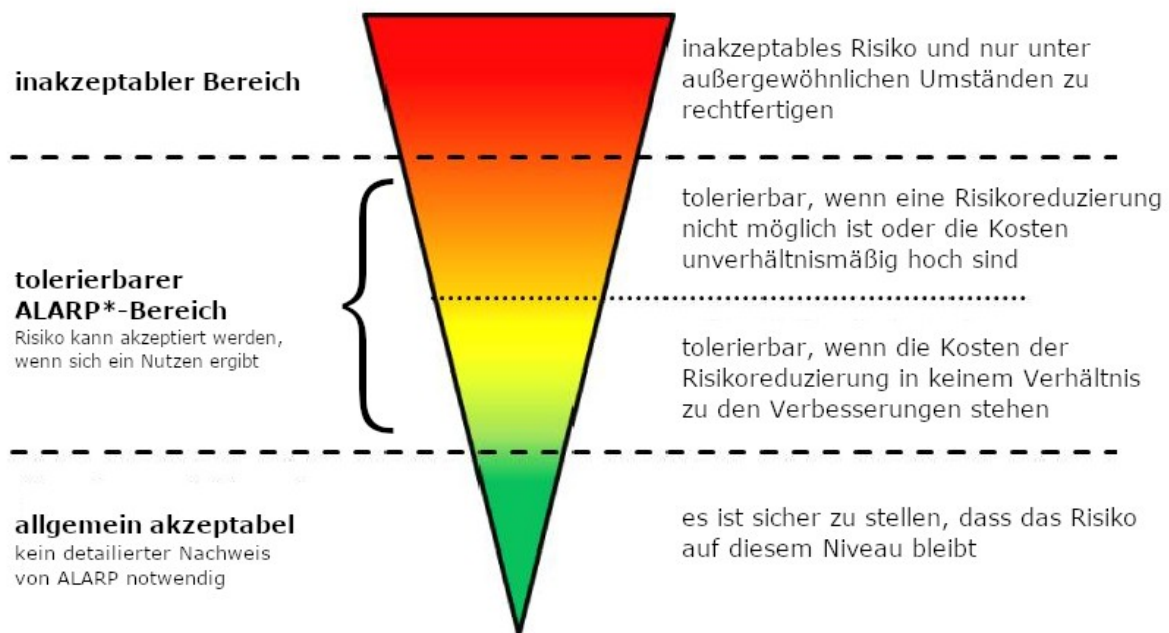


Bahnstrecken, da hier beim Szenario Eiswurf oder Eisfall nur wenige individuelle Personen, nämlich die Lokführer, gefährdet sind. Da es nicht praktikabel oder nicht möglich ist, das individuelle Risiko entlang einer gesamten Bahnstrecke zu bewerten, werden in diesem Fall die Grenzwerte für das individuelle Risiko um den Faktor zehn erniedrigt.

Beim Szenario Bauteilversagen gelten in der Nähe von Bahnstrecken die reduzierten Grenzwerte für das kollektive Risiko gemäß Kapitel 2.8.2, die in diesem Fall den hier definierten Grenzwerten für das individuelle Risiko entsprechen.

Entsprechend dem Vorgehen der UK Health and Safety Executive (HSE) /1.9/ werden in /2.1/ unterhalb des inakzeptablen Bereiches weitere Risikobereiche definiert, die unterschiedliche Maßnahmen erfordern.

Das MEM-Kriterium definiert für das individuelle Risiko dabei die Obergrenze des sogenannten ALARP-Bereichs (As Low As Reasonably Practicable, s. Abbildung 2.8.4.1). Risiken die höher als das MEM-Kriterium liegen, sind demnach nicht akzeptabel.



*: ALARP: as low as reasonably practicable
Risiko so niedrig, wie vernünftigerweise möglich

Abbildung 2.8.4.1: ALARP-Prinzip nach /1.9/. Die Grenze zum roten inakzeptablen Bereich wird für das individuelle Risiko durch das MEM-Kriterium /2.3/ definiert.



Darunter folgt der ALARP-Bereich, welcher sich über zwei Größenordnungen der Risikowerte erstreckt.

Liegt das Risiko im oberen ALARP-Bereich, sollen Maßnahmen in Betracht gezogen werden, um das Risiko weiter zu reduzieren. Die Maßnahmen sollten sich an den bekannten und etablierten Techniken und den am Standort gegebenen Möglichkeiten orientieren.

Liegt das Risiko im unteren ALARP-Bereich, sind Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos in der Regel nicht erforderlich. Im Rahmen des Gutachtens werden entsprechend nur im Einzelfall Maßnahmen vorgeschlagen.

Liegt das Risiko mehr als einen Faktor 100 unterhalb des MEM-Kriteriums, ist es ohne weitere Maßnahmen allgemein akzeptabel. Die Grenze zwischen dem ALARP-Bereich und dem allgemein akzeptablen Risiko liegt für das individuelle Risiko bei einer Sterbehäufigkeit von 10^{-7} pro Person und Jahr (einmal in 10 Millionen Jahren). Dies entspricht etwa dem Risiko durch Blitzschlag zu sterben /1.10/.

Dieser grüne Bereich erstreckt sich sinnvollerweise ebenfalls über eine Größenordnung der Risikowerte, da Risikowerte, die mehr als einen Faktor 1000 unterhalb des hier definierten Grenzwertes für das individuelle Risiko liegen, jenseits fast aller bekannten Risiken liegen. Entsprechend kann die Abbildung 2.8.4.1 nach unten um einen blauen Bereich erweitert werden, in dem das Risiko vernachlässigbar ist. Der einzige bekannte Wert für das individuelle Risiko, der sich nach /1.10/ noch diesem Bereich zuordnen lässt, ist die Sterbehäufigkeit durch einen Meteoriteneinschlag (siehe auch Abbildung 2.8.4.2).

Bei der Bewertung der individuellen und kollektiven Risiken wird entsprechend zwischen den fünf in Tabelle 2.8.4.1 genannten Bereichen unterschieden.



Tabelle 2.8.4.1: Risikobereiche für das individuelle und kollektive Risiko nach /2.1/ erweitert um einen Bereich für vernachlässigbares Risiko.*

Individuelles Risiko (Sterbehäufigkeit pro Person und Jahr)	Kollektives Risiko (Sterbehäufigkeit pro Jahr)	Bewertung	
$> 10^{-5}$	$> 10^{-3}$ oder standortspezifisch	Roter Bereich: Risiko inakzeptabel - Maßnahmen sind einzuleiten und deren Nutzen nachzuweisen	
10^{-6} bis 10^{-5}	10^{-4} bis 10^{-3} oder standortspezifisch	Oranger Bereich: Risiko tolerierbar - Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen	
10^{-7} bis 10^{-6}	10^{-5} bis 10^{-4} oder standortspezifisch	Gelber Bereich: Risiko tolerierbar - Maßnahmen in der Regel nicht erforderlich	
10^{-8} bis 10^{-7}	10^{-6} bis 10^{-5} oder standortspezifisch	Grüner Bereich: Risiko allgemein akzeptabel	
$< 10^{-8}$	$< 10^{-6}$ oder standortspezifisch	Blauer Bereich: Risiko vernachlässigbar	

* Für Szenarien, bei denen pro Ereignis mit einer großen Anzahl von Toten zu rechnen ist, sind die Erläuterungen in Kapitel 2.8.3 zu beachten.

Da Sachschäden hier in ihrer Schwere gegenüber Personenschäden vernachlässigbar sind, werden diese in der Regel nicht weiter bewertet und in den Detailergebnissen im Anhang nicht dargestellt.

Abbildung 2.8.4.2 veranschaulicht die Risikobereiche für das individuelle Risiko noch einmal, indem für die einzelnen Risikobereiche Beispiele für Tätigkeiten und Gefahren genannt werden. Zusätzlich wird in Abbildung 2.8.4.2 auch die jährliche Fahrleistung in Kilometern aufgeführt, bei der man als Kraftfahrer im deutschen Straßenverkehr die jeweiligen Grenzwerte zwischen den Risikobereichen erreicht. Man erkennt, dass bereits ab einer sehr geringen Fahrleistung von 3000km pro Jahr der hier definierte inakzeptable Bereich erreicht wird. Da sehr viele Tätigkeiten mit ihrem Risiko in den inakzeptablen Bereich fallen, wurde dieser in Abbildung 2.8.4.2 noch weiter untergliedert.



Farbe	Sterberisiko pro Person pro Jahr	Symbol / Bezeichnung	Beispiele für Sterberisiken	
			Kfz im Straßenverkehr (Fahrleistung pro Jahr) /1.6/	Andere Beispiele /1.10/
Rot	10^{-3}	- inakzeptabel	300.000 km	Bergsteigen
	10^{-4}		30.000 km	Hausarbeit
	10^{-5}		3.000 km	Arbeitsunfall
Orange	10^{-6}	+ tolerierbar	300 km	Gebäudebrand
Gelb	10^{-7}	++ tolerierbar	30 km	Blitzschlag
Grün	10^{-8}	+++ allgemein akzeptabel	3 km	Erdbeben
Blau		≈ 0 vernachlässigbar		Meteorit

Abbildung 2.8.4.2: Risikobereiche und Beispiele für das individuelle Sterberisiko.

2.8.5 Grenzwerte für Schäden an Öl- und Gasleitungen

Akzeptierte Grenzwerte für Schäden an Öl- und Gasleitungen finden sich in der DIN EN ISO 16708 /2.6/. Abhängig von der Art des transportierten Fluides, der Bevölkerungsdichte in der Umgebung der Leitung, dem Druck innerhalb der Leitung und dem Durchmesser der Leitung werden die maximal akzeptierten Versagenshäufigkeiten definiert. Diese beziehen sich auf ein Jahr und einen Kilometer der Leitung.

In Abbildung 2.8.5.1 sind die maximal akzeptierten Versagenshäufigkeiten pro Jahr und Leitungskilometer in Abhängigkeit vom Druck und Durchmesser der Leitung für die verschiedenen Sicherheitsklassen 1 bis 4 dargestellt. Die Sicherheitsklassen reichen von gering (1) an Orten mit einer mittleren Bevölkerungsdichte bis sehr stark (4) an Orten mit einer sehr hohen Bevölkerungsdichte. Die ebenfalls dargestellte



Klasse 5 entspricht dem individuellen Risiko für Personen die sich direkt über der Leitung aufhalten. Die daraus ermittelten maximal akzeptierten Versagenshäufigkeiten müssen noch für die Länge des jeweiligen betroffenen Streckenabschnitts angepasst werden.

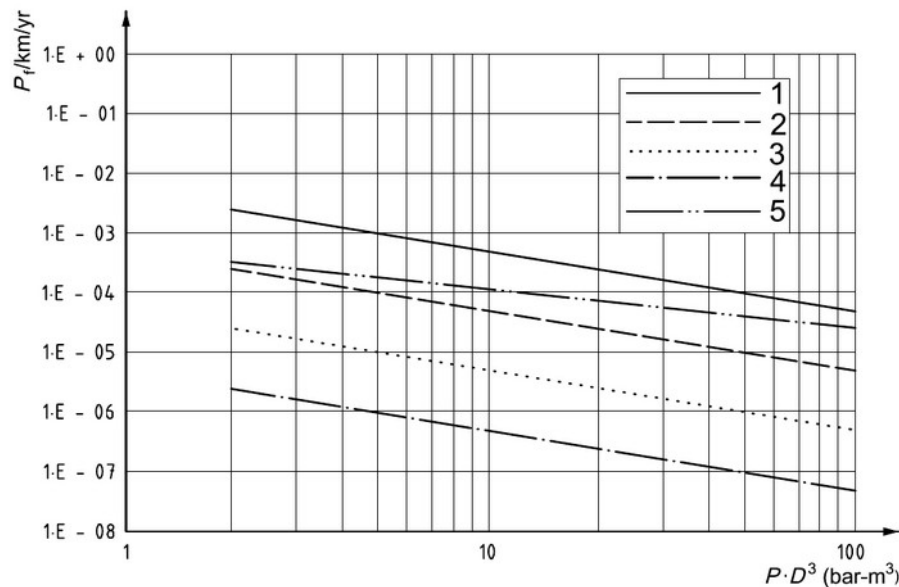


Abbildung 2.8.5.1: Maximal akzeptierte Versagenshäufigkeit für die Sicherheitsklassen 1 bis 4 und das individuelle Risiko (5) pro Kilometer und Jahr [2.6/].

Damit liegt eine Gefährdung nur vor, wenn der so definierte Grenzwert gemäß DIN EN ISO 16708 [2.6/] überschritten wird.

2.8.6 Risikomindernde Maßnahmen

Liegt das Risiko im inakzeptablen roten Bereich, ist ein Nachweis erforderlich, dass das Risiko durch geeignete Maßnahmen in den ALARP-Bereich verschoben werden kann. Gemäß [2.1/] kommen insbesondere folgende Maßnahmen in Frage, um das Risiko in den ALARP-Bereich zu verschieben:

- Fixierung der Azimut-Position des Rotors der WEA nach Abschaltung durch die Eiserkennung,
- Installation eines Systems zur Erkennung von strukturellen Schäden an den Rotorblättern,
- Wahl eines kleineren WEA-Typs,
- Verschiebung der WEA,



- Verlegung des betroffenen Schutzobjektes.

In allen Fällen ist durch eine erneute Berechnung nachzuweisen, dass das Risiko anschließend nicht mehr im roten inakzeptablen Bereich liegt /2.1/.

Liegt das Risiko im oberen orangen ALARP-Bereich sind etablierte risikomindernde Maßnahmen umzusetzen. Zu den empfohlenen Maßnahmen zählen:

- Fixierung der Azimut-Position des Rotors der WEA nach Abschaltung durch die Eiserkennung, wenn dies aufgrund der Lage der Schutzobjekte möglich und sinnvoll ist,
- Einsatz einer funktionssicheren Eiserkennung,
- Warnschilder,
- Warnleuchten, die mit dem Eiserkennungssystem der WEA gekoppelt sind,
- Physische Barrieren wie Schranken sofern dies vor Ort umgesetzt werden kann.
- Einbau zusätzlicher Monitoring- und Überwachungssysteme,
- Aufklärung der direkten Nachbarn und Nutzer des umliegenden Bereichs,
- verkürzte Intervalle für Wartung und Inspektion

Die Auswahl der Maßnahmen sollte sich an den bekannten und etablierten Techniken und den am Standort gegebenen Möglichkeiten orientieren.

Auf Freiflächen mit kontrolliertem und beschränktem Zutritt wie z.B. einem Betriebsgelände kann das Risiko durch Eisfall und Eiswurf auch durch Aufenthaltsbeschränkungen oder das Tragen eines Schutzhelmes reduziert werden. Bei der Quantifizierung dieser Maßnahmen kann gemäß /1.14/ davon ausgegangen werden, dass das Tragen eines Schutzhelmes mit einem Chancenverhältnis (odds ratio) für schwere und tödliche Kopfverletzungen von etwa $\frac{1}{3}$ verbunden ist.

Bei einer Fixierung der Azimut-Position wird die WEA nach einer Abschaltung durch die Eiserkennung in eine fixe Azimut-Position gefahren. Damit kann die Trefferhäufigkeit von Eisstücken auf die Schutzobjekte verringert werden, indem im Falle eines Verkehrsweges z.B. der Rotor parallel zum Fahrbahnrand ausgerichtet wird. Die Azimut-Position wird dabei definiert über den Azimutwinkel zwischen geografisch Nord und der Achsenrichtung der WEA.

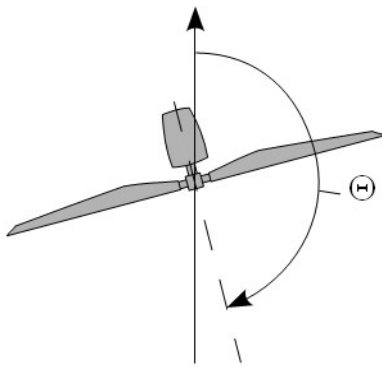


Abbildung 2.8.6.1: Definition des Azimutwinkels Θ .

Beim Einsatz von Warnschildern kann z.B. das von der IEA empfohlene Warnschilddesign verwendet werden. Dieses lässt sich auch um Hinweise zu Warnleuchten ergänzen.



Allgemeines Warnschild.

Allgemeines Warnschild mit Zusatzhinweis.

Abbildung 2.8.6.2: Warnschildbeispiele nach /2.1/.

2.8.7 Addition von Risiken

Die Risiken durch Eiswurf/Eisfall und durch Bauteilversagen sind grundsätzlich zu addieren und gemeinsam zu betrachten und zu bewerten.



Entlang von Verkehrswegen kann weiterhin in der Regel nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne oder alle Personen mehrere WEA passieren und damit einer Summe von Risiken ausgesetzt sind.

Dies spielt für den überregionalen Verkehr keine Rolle, da hier entweder direkt mit Grenzwerten verglichen wird, die auf die gefahrene Strecke bezogen sind (siehe Kapitel 2.8.2) oder bei Verwendung der pauschalen Grenzwerte dies gemäß /2.1/ begründet werden kann.

WEA an Autobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen können daher stets einzeln betrachtet werden. Hier sind benachbarte WEA nur dann von Interesse, wenn sich die Gefährdungsbereiche der zu bewertenden WEA und einer benachbarten WEA überlappen. Dasselbe gilt für die Risikobewertung von Schäden an Erdöl- und Erdgasleitungen, da auch hier die Grenzwerte auf die Leitungslänge bezogen werden.

Bei der Bewertung von Verkehrswegen des regionalen bzw. des Nahverkehrs werden die akzeptierten Grenzwerte für das individuelle bzw. kollektive Risiko herangezogen. Für Kreisstraßen, Gemeindestraßen und sonstige Verkehrswege ist daher zu prüfen, ob die übliche Nutzung dazu führt, dass die Gefährdungsbereiche mehrerer WEA passiert werden. Diese Betrachtung kann aufgrund des regionalen Charakters dieser Verkehrswege dabei auf den zu betrachtenden Windpark beschränkt werden.

In einem verzweigten Verkehrswegenetz innerhalb eines Windparks gibt es eine Vielzahl von Routen, die nicht alle betrachtet werden können. Es ist hier ausreichend eine repräsentative Route zu wählen, die eine konservative Bewertung gewährleistet.

In der Praxis kann für Verkehrswege des regionalen bzw. des Nahverkehrs folgendermaßen vorgegangen werden:

- Im ersten Schritt werden die Risiken ausgehend von jeder einzelnen WEA und bezogen auf die verschiedenen Schutzobjekte ermittelt. Wenn einzelne Risiken hier bereits im oberen ALARP-Bereich liegen, werden die entsprechenden Maßnahmen abgeleitet (siehe auch Kapitel 2.8.4)
- Im zweiten Schritt wird eine repräsentative Route festgelegt und hierfür das Risiko ermittelt und bewertet. Eventuell sind hieraus weitere risikomindernde Maßnahmen abzuleiten.
- Auf den zweiten Schritt kann verzichtet werden, wenn die Summe der Risiken über alle WEA die jeweils anzusetzenden Grenzwerte für das individuelle bzw. kollektive Risiko nicht übersteigen.
- Aufgrund der geringen Eintrittshäufigkeit kann das Risiko durch Bauteilver-



sagen von einer einzelnen WEA für einen individuellen Fußgänger im Allgemeinen keine unzulässigen Werte erreichen. In diesen Fällen reicht es daher aus, das Risiko durch Bauteilversagen für die WEA zu ermitteln, die im zweiten Schritt für das Risiko entlang der repräsentativen Route relevant sind.

2.9 Gültigkeit der Ergebnisse

Die für die Risikobewertung erforderliche Häufigkeitsverteilung von Eis- und Blattbruchstücken in der Umgebung der WEA hängt von mehreren Faktoren ab. Dies sind neben den WEA-Daten (Koordinaten, WEA-Typ, Nabenhöhe, Nennleistung, Betriebsweise der WEA sowie Vorhandensein und Art des Eiserkennungssystems), die Windbedingungen (Häufigkeitsverteilung der Windrichtung, sektorielle Weibull-Parameter der Windgeschwindigkeitsverteilung) und die Vereisungsbedingungen am Standort. Mit letzterem sind neben der Anzahl der Vereisungstage auch die zu erwartende Eismasse auf dem Rotorblatt sowie die Massen- und Formverteilung der sich lösenden Eisstücke gemeint. Weiterhin ist die Risikobewertung abhängig von der Aufenthaltshäufigkeit und dem Bewegungsmuster von Personen im Umfeld der WEA.

Jede Änderung dieser Randbedingungen erfordert daher eine Neubewertung des Risikos.

Änderungen in der Nabenhöhe von $\pm 1\text{m}$ und Verschiebungen der WEA um $\pm 2\text{m}$ liegen innerhalb der Toleranzen und sind durch die Ergebnisse abgedeckt.

Für alle Parameter, die einen Einfluss auf die Auftreffpunkte der Eis- oder Blattbruchstücke haben, lassen sich keine pauschalen konservativen Werte festlegen /2.1/. Dies bedeutet insbesondere, dass eine Reduzierung der Nabenhöhe nicht automatisch zu einer Reduzierung des Risikos führt. Auch sind die Ergebnisse eines Risikos durch Eiswurf nicht unbedingt abdeckend für das Risiko durch Eisfall von derselben WEA am selben Standort.

2.10 Systeme zur Prävention und Enteisung

Zurzeit gibt es keine gesicherten Erkenntnisse darüber, wie die Verteilung von Eisstückgrößen oder deren Anzahl und Dichte durch eine Rotorblattenteisung im Einzelfall beeinflusst wird. In /2.1/ liegen die Ergebnisse einer Fallstudie über die Veränderung der Eisstückzahl bei Einsatz der Rotorblattheizung im Trudelbetrieb bzw. bei Stillstand (De-Icing) und während des WEA-Betriebs (Anti-Icing) vor.

Nach derzeitigem Kenntnisstand führt der Einsatz einer Rotorblattenteisung wie zum Beispiel einer Rotorblattheizung dazu, dass die Größe der Eisstücke beim Eisfall













sinkt, gleichzeitig aber die Anzahl der Eisstücke deutlich zunehmen kann.

Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse werden in den Berechnungen entsprechend berücksichtigt. Dies ist jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden, da für eine Quantifizierung der risikoreduzierenden Effekte zurzeit noch nicht genügend Daten vorliegen /2.8/

2.11 Verwendete Begriffe und Symbole

Es ergeben sich folgende Begriffe und Symbole, die im Zusammenhang mit WEA im Gutachten verwendet werden:

Tabelle 2.11.1: Erläuterung der verwendeten Begriffe und Symbole.

Erläuterung der Begriffe		
	„geplante WEA“	WEA, deren Risiko im Rahmen des Gutachtens zu bewerten ist.
	„benachbarte WEA“	Alle weiteren WEA, die vom Auftraggeber übermittelt wurden. Es ist dabei unerheblich, ob sich einzelne benachbarte WEA ebenfalls in Planung oder Bau befinden. Entscheidend ist die Windparkkonfiguration, die als Vorbelastung für die geplanten WEA zu unterstellen ist. Alle benachbarten WEA sind in Tabelle 3.3.1 aufgeführt.
	„Referenzpunkt der Winddaten“	Jeweiliger Standort, auf dessen Koordinaten sich die verwendeten Winddaten beziehen.
Farbliche Zuordnung der Symbole		
	Zu bewertende WEA: geplante WEA, deren Risiko bewertet wird.	
	Zu berücksichtigende WEA: Benachbarte WEA, die aufgrund ihres Abstandes zu den geplanten WEA Einfluss auf das Risiko im Gefährdungsbereich der zu bewertenden WEA () nehmen bzw. aufgrund der Nutzung der Schutzobjekte innerhalb des Windparks potentiell zu berücksichtigen sind.	
	Benachbarte WEA, die aufgrund ihres Abstandes zu den geplanten WEA und ihrer Lage im Windpark nicht bei der Bewertung des Risikos der zu bewertenden WEA () zu berücksichtigen sind. Diese WEA sind eventuell nur zum Teil in Abbildung 3.3.1 dargestellt.	
	Referenzpunkte der Winddaten.	
	Referenzpunkt der Winddaten auf den Koordinaten einer (in diesem Fall geplanten) WEA.	



3 Eingangsdaten

3.1 Ausgangssituation

Am Standort Mückendorf (Brandenburg) plant der Auftraggeber die Errichtung von 24 Windenergieanlagen (WEA 1 - 24).

Am Standort befinden sich keine weiteren benachbarten WEA.

Die vom Auftraggeber übermittelten Daten zur Windparkkonfiguration und die Schutzobjekte sind in Tabelle 3.3.1 bzw. Abbildung 3.3.1 dargestellt.

In der Umgebung befinden sich die Bundesstraße B96, eine Bahnstrecke und ein Wanderweg, welche im Rahmen dieser Untersuchung vom Auftraggeber als Schutzobjekte definiert wurden (siehe Abbildung 3.3.1).

Im Folgenden wird eine Risikoanalyse der WEA 1 - 24 hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen durchgeführt.

3.2 Winddaten am Standort

Für die Berechnung von Eisfall und Eiswurf wurden die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und Windgeschwindigkeiten am Standort /3.1/ entnommen. Datengrundlage zur Abschätzung des Windpotentials am Standort Mückendorf bilden die Daten des anemos Windatlas für Deutschland mit einer räumlichen Auflösung von 3km und einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten. Der Referenzzeitraum deckt 20 Jahre von 2004 - 2023 ab /3.1/.

Entsprechend den Empfehlungen aus /2.1/ wurden die Daten aus /3.1/ für Perioden gefiltert, bei denen Eiswurf oder Eisfall potentiell auftreten kann. Die gefilterten Daten sind in Tabelle 3.2.1 als Datensatz 1 aufgetragen.

Für die Berechnung von Bauteilversagen wurden die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und Windgeschwindigkeiten am Standort /3.2/ entnommen. Sie sind in Tabelle 3.2.1 als Datensatz 2 dargestellt.

Die vorliegenden Daten werden als richtig und repräsentativ für die freie Anströmung am Standort Mückendorf vorausgesetzt.





Die Parameter der Weibull-Verteilung werden genutzt, um die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen auf die jeweiligen Windgeschwindigkeiten umzurechnen. Die Weibull-Parameter werden dabei soweit notwendig auf die jeweilige Nabenhöhe der WEA umgerechnet.

















Tabelle 3.2.1: Winddaten am Standort (f: Häufigkeit der Windrichtung; A und k: Skalen- und Formparameter der Weibull-Verteilung).

Wind-Datensatz Nr.	Parameter	N	NNO	ONO	O	OSO	SSO	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW	Koordinaten (UTM ETRS89/WGS84 Zone 33)	
1	A [m/s]	6.134	5.895	6.352	7.803	8.924	8.505	7.448	9.012	10.174	9.219	8.386	7.031	Höhe über Grund [m]	179
	k [-]	2.397	2.213	2.402	2.562	2.749	2.751	2.329	2.69	3.216	2.966	2.585	2.404	Ost	33395500
	f (100%=1)	0.0501	0.058	0.0774	0.0859	0.0866	0.0597	0.0455	0.0689	0.1305	0.1475	0.1271	0.0626	Nord	5773301
2	A [m/s]	5.29	5.54	6.12	7.02	7.79	7.34	6.99	8.57	9.59	8.65	7.54	6.17	Höhe über Grund [m]	179
	k [-]	2.18	2.13	2.27	2.37	2.35	2.3	2.25	2.28	2.65	2.75	2.57	2.47	Ost	33395500
	f (100%=1)	0.0424	0.0431	0.055	0.0672	0.0751	0.0619	0.0523	0.09	0.1621	0.159	0.1224	0.0695	Nord	5773301





3.3 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte

Tabelle 3.3.1: Windparkkonfiguration.

	Lfd. Nr. WEA	Bezeichnung	Hersteller WEA-Typ	P _N [MW]	NH [m]	RD [m]	Koordinaten (UTM ETRS89/WGS84 Zone 33)		Wind-Datensatz Nr.
							East	North	
	1	WEA 1	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33394516	5774541	1, 2
	2	WEA 2	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395102	5774459	1, 2
	3	WEA 3	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395813	5774291	1, 2
	4	WEA 4	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33396437	5774137	1, 2

	Lfd. Nr. WEA	Bezeichnung	Hersteller WEA-Typ	P _N [MW]	NH [m]	RD [m]	Koordinaten (UTM ETRS89/WGS84 Zone 33)		Wind- Datensatz Nr.
							East	North	
	5	WEA 5	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33394169	5774159	1, 2
	6	WEA 6	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395107	5774093	1, 2
	7	WEA 7	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395897	5773869	1, 2
	8	WEA 8	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33396526	5773758	1, 2
	9	WEA 9	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33394374	5773832	1, 2
	10	WEA 10	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33394976	5773565	1, 2
	11	WEA 11	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33396293	5773308	1, 2
	12	WEA 12	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33394507	5773300	1, 2
	13	WEA 13	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395433	5773384	1, 2
	14	WEA 14	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395975	5772910	1, 2
	15	WEA 15	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33394790	5772866	1, 2
	16	WEA 16	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33396648	5772620	1, 2
	17	WEA 17	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33396007	5772350	1, 2
	18	WEA 18	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33396369	5772272	1, 2
	19	WEA 19	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33396889	5772321	1, 2
	20	A2 WEA 1	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395033	5772281	1, 2



	Lfd. Nr. WEA	Bezeichnung	Hersteller WEA-Typ	P _N [MW]	NH [m]	RD [m]	Koordinaten (UTM ETRS89/WGS84 Zone 33)		Wind- Datensatz Nr.
							East	North	
	21	A2 WEA 2	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395305	5772647	1, 2
	22	A2 WEA 3	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33396460	5772906	1, 2
	23	A2 WEA 4	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33395397	5772062	1, 2
	24	A2 WEA 5	Nordex N175/6.X	6.80	179.00	175.00	33394811	5771926	1, 2

Alle Benennungen von WEA im Dokument beziehen sich auf die Nomenklatur von Spalte 2 (Lfd. Nr.) in Tabelle 3.3.1.

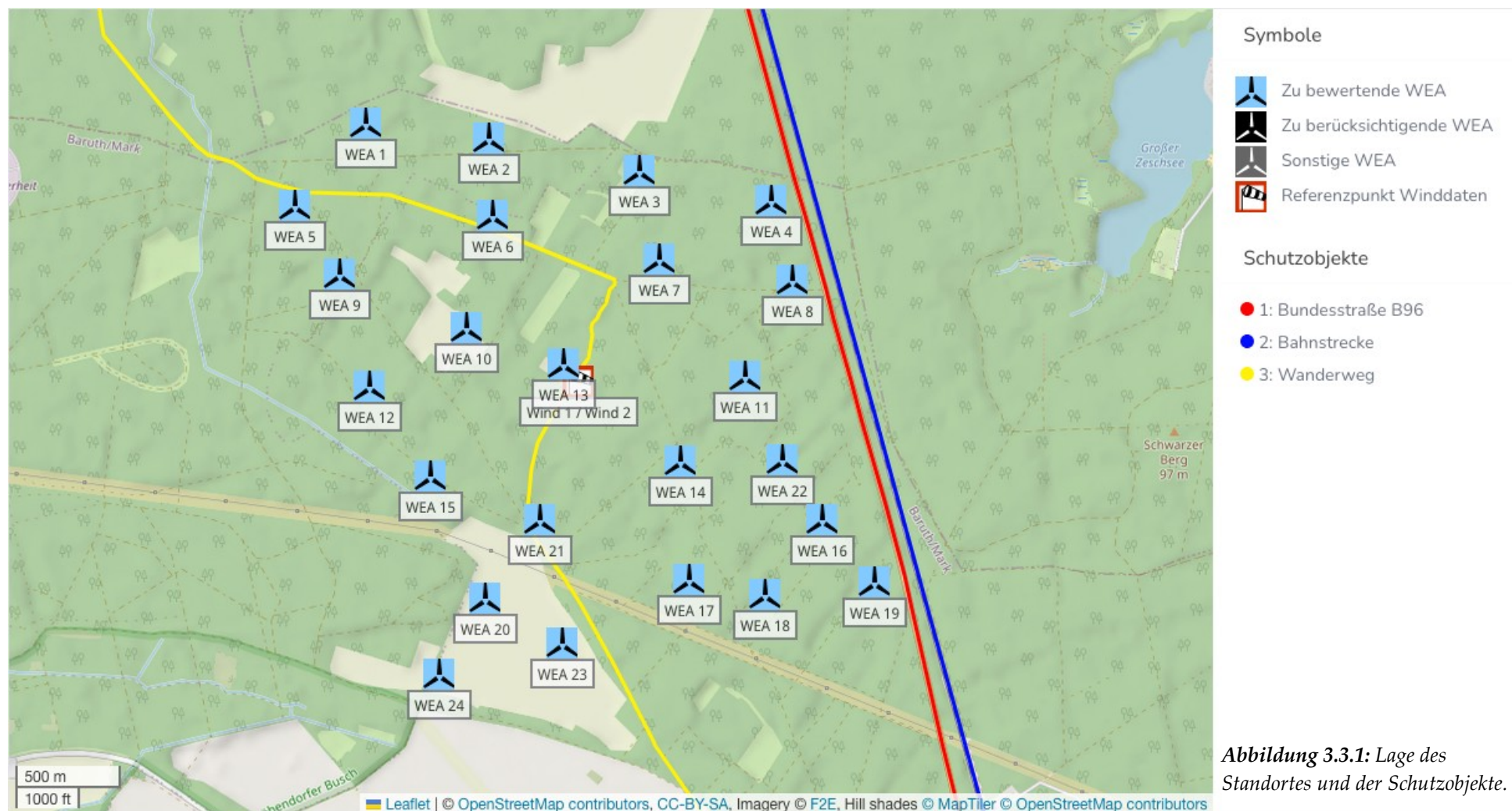


Abbildung 3.3.1: Lage des Standortes und der Schutzobjekte.



3.4 Aufenthaltshäufigkeiten

Tabelle 3.4.1: In den Auswertungen berücksichtigtes Verkehrs- und Personenaufkommen auf den Schutzobjekten im Bereich der WEA– Verkehrswege

Verkehrswege								
Schutzobjekt	Verkehrsaufkommen			Personenaufkommen				Kritisches Individuum
	Kfz/Tag	km/h*	Individuelle Nutzungshäufigkeit	Personen/ Tag		Individuelle Nutzungshäufigkeit		
				Radfahrer	Fußgänger	Radfahrer	Fußgänger	
Bundesstraße B96	3115 /3.3/	100**	---**	---	---	---	---	---
Wanderweg	---*	15***	dreimal pro Woche	---*	---*	dreimal pro Woche	dreimal pro Woche	Fußgänger
	Züge/Tag		km/h	Lokführer/Reisende		Individuelle Nutzungshäufigkeit		
Bahnstrecke	60****		100***	---***		4 Fahrten pro Tag pro Lokführer****		Lokführer

---* Bei Schutzobjekten, die gemäß Kapitel 2.8.4 dem individuellen Risiko zuzuordnen sind, ist für die Risikoabschätzung nur die eine individuelle Person mit der auf der individuellen Nutzungshäufigkeit basierenden größten Gefährdung maßgeblich (kritisches Individuum). Weitere Angaben zur Anzahl der Kfz und Personen pro Tag können daher entfallen.

---** Bei Schutzobjekten, die gemäß Kapitel 2.8.4 dem kollektiven Risiko zuzuordnen sind, muss für die Risikoabschätzung kein kritisches Individuum definiert werden. Angaben zur Nutzungshäufigkeit können daher entfallen.

---*** Bezüglich des individuellen Risiko ist für die Risikoabschätzung nur die eine individuelle Person mit der auf der individuellen Nutzungshäufigkeit basierenden größten Gefährdung maßgeblich (kritisches Individuum). Dies ist im Falle einer Bahnlinie der Lokführer. Bezüglich des kollektiven Risikos findet für überregionalen Bahnstrecken mit Personenverkehr eine konservative Abschätzung der Anzahl von Toten pro Ereignis statt (siehe Kapitel 2.8.3). Weitere Angaben zur Anzahl der Reisenden und Lokführer pro Tag können daher entfallen.

* Bis zu einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 50km/h kann das Risiko durch Eiswurf und Eisfall für Personen innerhalb des Fahrzeuges vernachlässigt werden (siehe Kapitel 2.8.1).

** Aufgrund zulässige Höchstgeschwindigkeit nach StVO.

*** Aufgrund von Wegbeschaffenheit und -verlauf im standortspezifischen Gefährdungsbereich angenommen.

**** Annahmen nach /3.4/.



Tabelle 3.4.1 enthält alle Angaben zum Verkehrs- und Personenaufkommen, die in den nachfolgenden Risikobewertungen für die Verkehrswege berücksichtigt werden. Für Schutzobjekte, die sich nicht im standortspezifisch ermittelten Gefährdungsbereich der WEA befinden, sind Angaben zur Frequentierung nicht erforderlich. Für Fußgänger und Radfahrer werden die jeweiligen Geschwindigkeiten mit 5km/h bzw. 15km/h zugrunde gelegt. Für Schutzobjekte, für die nach Kapitel 2.8.4 das individuelle Risiko maßgeblich ist, wird ein kritisches Individuum ermittelt und in Tabelle 3.4.1 aufgeführt.

3.5 Standortspezifische Grenzwerte für das kollektive Risiko

Für Bundesautobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen wurden die Grenzwerte auf Basis des vorhandenen Unfallrisikos bestimmt (siehe Kapitel 2.8.2). Tabelle 3.5.1 listet die ermittelten oberen Grenzwerte für ein inakzeptables Risiko.

Die weiteren Risikobereiche gemäß Tabelle 2.8.4.1 liegen jeweils eine Zehnerpotenz niedriger und sind nicht extra aufgeführt.

Tabelle 3.5.1: Spezifische obere Risikogrenzwerte für das kollektive Risiko.

Schutzobjekt	Kollektives Personenrisiko Grenzwert für ein inakzeptables Risiko pro km
Bundesstraße B96	$> 2.82 \cdot 10^{-3}$ (einmal in 355 Jahren)

Bei Bauteilversagen wird dieser Grenzwert auf den standortspezifischen Gefährdungsbereich angepasst. Pauschal wird hier ein Wert von 500 Metern zugrunde gelegt.

Bei der Bewertung von Bauteilversagen für sehr stark befahrene Straßen kann es dazu kommen, dass pro Ereignis mehr als ein Fahrzeug betroffen ist. Hier wird entsprechend das Konzept der F-N-Kurven (siehe Kapitel 2.8.3) auf Basis der standortspezifischen Risikogrenzwerte angewendet.

3.6 Vereisungsrelevante WEA-Systeme

3.6.1 WEA-interne Eiserkennungssysteme

Die WEA 1 - 24 sind mit dem Nordex-Eiserkennungssystem bestehend aus drei unabhängigen Verfahren zur Erkennung von Eisansatz ausgerüstet /3.5/. Dabei wird Eisansatz entweder durch Vibrationen infolge ungleichmäßigen Eisansatzes, durch eine Abweichung von der Soll-Kennlinie aufgrund verschlechterter Aerodynamik



oder durch eine Differenz zwischen der Schalensternanemometer- und der Ultraschallanemometer-Messung aufgrund vereister Anemometerschalen detektiert /3.5/.

3.6.2 Optionale Eiserkennungssysteme

Die WEA 1 – 24 sind nicht mit einem optionalen zertifizierten Eiserkennungssystem ausgestattet. Sie können zusätzlich mit dem Eiserkennungssystem IDD.Blade der Firma Wölfel zur Erkennung von Eisansatz ausgerüstet werden. Dabei wird Eisansatz aufgrund der dadurch veränderten bauteilcharakteristischen Kennwerte wie der Eigenfrequenz des Rotorblattes detektiert /3.6/.

Gemäß /3.7/ entspricht das System dem Stand der Technik und alle Ergebnisse sprechen dafür, dass eine Eisdicke erkannt wird, die geringer als die individuelle kritische Eisdicke ist. Erst ab einer kritischen Eisdicke besteht eine Gefahr für ungeschützte Personen /3.7/. In /3.7/ wurde die Kompatibilität von IDD.Blade mit den Nordex Betriebsführungs- und Sicherheitssystemen geprüft. Danach ist IDD.Blade als Eiserkennungssystem für Windenergieanlagen des Herstellers Nordex geeignet.

Für das Eiserkennungssystem liegt ein Typenzertifikat vor /3.8/.

3.6.3 Systeme zur Prävention und Enteisung

Die betrachteten WEA sind nicht mit einem System zur Enteisung (de-icing) oder einem System zur Reduzierung von Vereisung (anti-icing) ausgestattet.

3.6.4 Betriebsführungssystem

Nach einer Abschaltung durch das Eiserkennungssystem geht die WEA in einen definierten Zustand. Angaben zu Trudeldrehzahlen, Blattstellung und Windnachführung der WEA wurden gemäß /3.9/ umgesetzt.

3.7 Risikoreduzierende Maßnahmen

Die im Anhang B dargestellten Ergebnisse berücksichtigen keine risikoreduzierenden Maßnahmen.



4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Standortbesichtigung

Eine Standortbesichtigung ist im Rahmen der Bewertung des Risikos durch Eiswurf, Eisfall und Bauteilversagen nicht durch ein Regelwerk vorgeschrieben oder geregelt. Eine Standortbesichtigung empfiehlt sich, wenn die Situation vor Ort nicht ausreichend bekannt ist.

Im Rahmen der Standortbesichtigung werden die potentiellen Schutzobjekte vor Ort dokumentiert und besichtigt. Es werden Informationen zur Beschaffenheit der Schutzobjekte, wie z.B. Straßenbelag, Geschwindigkeitsbeschränkungen und Fahrverboten bei Verkehrswegen aufgenommen.

Die Standortbesichtigung dient nicht zur Bestimmung der Aufenthaltshäufigkeit von Personen in oder auf Schutzobjekten, der Bestimmung der Frequentierung von Verkehrswegen, der Bestimmung der Klimatologie des Standortes oder der Verifizierung der Windparkkonfiguration.

Der Standort Mückendorf wurde am 18.10.2024 besichtigt /3.10/. Die Ergebnisse der Standortbesichtigung sind in /3.10/ dokumentiert und werden soweit erforderlich in den weiteren Berechnungen berücksichtigt.

Werden im Rahmen der Standortbesichtigung weitere potentielle Schutzobjekte identifiziert, findet eine Berücksichtigung in Absprache mit dem Auftraggeber statt. Maßgeblich sind daher stets die in Kapitel 3.1 aufgeführten Schutzobjekte.

4.2 Vereisungsbedingungen am Standort

Die Vereisungshäufigkeit am Standort wurde entsprechend Kapitel 2.5 ermittelt.

Die Anzahl der insgesamt am Standort zu unterstellenden Eisstücke ergibt sich aus der Geländehöhe am Standort der jeweiligen WEA, der Anzahl der Eisstücke pro Vereisungsereignis und der Anzahl der Vereisungstage.

Für die WEA ist konservativ davon auszugehen, dass es an allen Vereisungstagen zu einer vollständigen Vereisung der WEA kommt.

In Übereinstimmung mit /2.1/ kann die insgesamt zu berücksichtigende Eismasse abhängig von der Blattgeometrie anhand des Vereisungslastfalles der internationalen Richtlinie für WEA /2.4/ definiert werden. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Masse der Eisstücke lässt sich daraus eine Anzahl Eisstücke pro Vereisung ableiten.



In Tabelle 4.2.1 sind exemplarisch die Vereisungsbedingungen für eine WEA am Standort dargestellt.

Tabelle 4.2.1: Exemplarische Vereisungsbedingungen im Windpark.

Lfd. Nr. WEA	Vereisungs- häufigkeit [%]	Vereisungstage pro Jahr	Eisstücke pro Jahr pro WEA	
			Eisfall	Eiswurf
4	1.9	6.9	1576	4729

4.3 Ermittlung der Gefährdungsbereiche

Gemäß Kapitel 2.2 und 2.3 ergeben sich für die einzelnen WEA die in Tabelle 4.3.1 aufgeführten zu betrachtenden Schutzobjekte für Bauteilversagen und Eiswurf/Eisfall.

Tabelle 4.3.1: Zu betrachtende Schutzobjekte.

Lfd.Nr. WEA	Schutzobjekte im potentiellen Gefährdungsbereich	Gefährdung durch			
		Eiswurf/ Eisfall	Blatt- bruch	Turm- versagen	Gondel- verlust
1	Wanderweg	X	X	-	-
2	Wanderweg	X	X	-	-
3	Wanderweg	X	X	-	-
4	Bundesstraße B96	X	X	X	-
	Bahnstrecke	X	X	X	-
5	Wanderweg	X	X	X	X
6	Wanderweg	X	X	X	X
7	Wanderweg	X	X	X	-
8	Bundesstraße B96	X	X	X	-
	Bahnstrecke	X	X	X	-
9	Wanderweg	X	X	-	-
10	Wanderweg	X	X	-	-
11	Bundesstraße B96	X	X	-	-
12	--	-	-	-	-
13	Wanderweg	X	X	X	X
14	--	-	-	-	-
15	Wanderweg	X	X	-	-



Lfd.Nr. WEA	Schutzobjekte im potentiellen Gefährdungsbereich	Gefährdung durch			
		Eiswurf/ Eisfall	Blatt- bruch	Turm- versagen	Gondel- verlust
16	Bundesstraße B96	X	X	-	-
	Bahnstrecke	X	X	-	-
17	Wanderweg	X	X	-	-
18	--	-	-	-	-
19	Bundesstraße B96	X	X	X	-
	Bahnstrecke	X	X	X	-
20	Wanderweg	X	X	-	-
21	Wanderweg	X	X	X	X
22	Bundesstraße B96	X	X	-	-
	Bahnstrecke	X	X	-	-
23	Wanderweg	X	X	X	-
24	--	-	-	-	-

In den potentiellen Gefährdungsbereichen der WEA 12 , 14, 18 und 24 befinden sich keine der definierten Schutzobjekte. Eine weitere Berücksichtigung dieser WEA ist im Rahmen der Risikobewertung daher nicht erforderlich.

4.4 Betrachtung der Einzelrisiken

Aus der in Kapitel 4.2 ermittelten Gesamtanzahl von Eisstücken, der Windgeschwindigkeitsverteilung gemäß Tabelle 3.2.1, der Geometrie und Betriebsweise der WEA sowie der Topografie am Standort, ergeben sich in der Umgebung einer WEA für jeden Punkt unterschiedliche Trefferhäufigkeiten von Eisstücken. Hinzu kommen die Trefferhäufigkeiten durch Bauteilversagen. Auf Basis dieser Trefferhäufigkeiten ist die spezifische Gefährdung von Personen abhängig von der Wegstrecke, den die Personen bzw. die mit Personen besetzten Fahrzeuge in der Umgebung der WEA nehmen, der Geschwindigkeit, mit der sie sich fortbewegen sowie der Häufigkeit, mit der ein bestimmter Weg genommen wird. Verkehrswege und andere Freiflächen bzw. Gebäude, die keinen Schutz gegen Eisstücke bieten, unterscheiden sich beim Risiko durch Eiswurf oder Eisfall nur dahingehend, dass die Wegstrecke bei Verkehrswegen deutlich vorgegeben ist, während sie bei Freiflächen typischerweise durch eine allgemeine Aufenthaltshäufigkeit ersetzt wird.

Eine spezifische Gefährdung lässt sich daher nicht in Form einer Gefährdungskarte in der Umgebung einer WEA darstellen, da für jeden Punkt in der Umgebung einer



WEA theoretisch unendlich viele Szenarien denkbar sind. Die Gefährdung ist daher stets in Bezug zu einem Schutzobjekt unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen zu ermitteln.

4.4.1 Bauteilversagen

Ein Risiko durch Bauteilversagen ist stets entsprechend der in Kapitel 2.3 aufgeführten Eintrittshäufigkeiten zu unterstellen.

Details zu den Berechnungen sind im Anhang A dargestellt.

4.4.2 Eiswurf

Aufgrund der vorhandenen Systeme zur Eiserkennung kann der normale Betrieb bei potentiell gefährlichem Eisansatz ausgeschlossen werden. Für diese WEA ist daher eine Gefährdung durch Eiswurf standortspezifisch nicht zu betrachten. Ein eventueller anomaler Betrieb der WEA mit Eisansatz wird im Szenario Eisfall berücksichtigt.

4.4.3 Eisfall

Aufgrund der vorhandenen Systeme zur Eiserkennung wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der normale Betrieb bei potentiell gefährlichem Eisansatz ausgeschlossen werden kann. Da für die Systeme zur Eiserkennung keine Zertifizierung vorliegt, wird angenommen, dass es trotz der Eiserkennung in 10% aller Fälle zu einem anomalen Betrieb der WEA mit Eisansatz und damit verbundenem Eiswurf während des Betriebes der WEA kommt.

Details zu den Berechnungen sind im Anhang B dargestellt.

4.5 Bewertung des Gesamtrisikos

Mit den Detailergebnissen für Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen ergeben sich am Standort Mückendorf die in Tabelle 4.5.1 dargestellten Gesamtrisiken.

Wie in Kapitel 2.8 dargestellt, erfolgt die Bewertung des individuellen und kollektiven Risikos durch eine Einteilung in fünf Bereiche von inakzeptabel bis vernachlässigbar. Dabei werden Schutzobjekte, die in den Berechnungen nicht von Eisstücken oder durch Bauteilversagen getroffen werden, aber im potentiellen Gefährdungsbereich liegen, dem vernachlässigbaren Risiko zugeordnet.

Es ist in Tabelle 4.5.1 jeweils nur das in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen zu betrachtende Risiko dargestellt (siehe Kapitel 2.8).



Sind gemäß Kapitel 2.8.7 Risiken verschiedener WEA zu addieren, wird die Bewertung der addierten Risiken in Tabelle 4.5.1 gesondert aufgeführt.

Sind für die Bewertung des Risikos durch Bauteilversagen und durch Eisfall/Eiswurf unterschiedliche Grenzwerte anzusetzen (siehe Kapitel 2.8.3), erfolgt die Bewertung getrennt. Dargestellt wird in Tabelle 4.2.1 in diesen Fällen die Bewertung für das führende, größere Risiko. Auch die Bewertung addierter Risiken wird dann für das maßgebliche Risiko durchgeführt.

Tabelle 4.5.1: Bewertung der Gefährdung durch Eis und Bauteilversagen.

Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
Bewertung der einzelnen WEA:			
1	Wanderweg	---	vernachlässigbar
2	Wanderweg	---	vernachlässigbar
3	Wanderweg	---	vernachlässigbar*
4	Bundesstraße B96	tolerierbar - Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen	---
	Bahnstrecke	allgemein akzeptabel	tolerierbar - Maßnahmen in der Regel nicht erforderlich
5	Wanderweg	---	tolerierbar - Maßnahmen in der Regel nicht erforderlich
6	Wanderweg	---	tolerierbar - Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen
7	Wanderweg	---	vernachlässigbar
8	Bundesstraße B96	tolerierbar - Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen	---
	Bahnstrecke	allgemein akzeptabel	tolerierbar - Maßnahmen in der Regel nicht erforderlich
9	Wanderweg	---	vernachlässigbar
10	Wanderweg	---	vernachlässigbar*
11	Bundesstraße B96	vernachlässigbar*	---
13	Wanderweg	---	tolerierbar - Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen
15	Wanderweg	---	vernachlässigbar*
16	Bundesstraße B96	vernachlässigbar	---
	Bahnstrecke	vernachlässigbar	vernachlässigbar



Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
17	Wanderweg	---	vernachlässigbar*
19	Bundesstraße B96	tolerierbar - Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen	---
	Bahnstrecke	allgemein akzeptabel	tolerierbar - Maßnahmen in der Regel nicht erforderlich
20	Wanderweg	---	vernachlässigbar
21	Wanderweg	---	tolerierbar - Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen
22	Bundesstraße B96	vernachlässigbar	---
	Bahnstrecke	vernachlässigbar*	vernachlässigbar*
23	Wanderweg	---	tolerierbar - Maßnahmen in der Regel nicht erforderlich
Bewertung addierter Risiken:			
4, 8	Bundesstraße B96	tolerierbar	---
1, 2, 5, 6, 7, 9, 13, 20, 21, 23	Wanderweg	---	tolerierbar

*: Die Ergebnisse zeigen, dass das Schutzobjekt in den Berechnungen nicht von Eis- oder Blattbruchstücken der WEA getroffen wird.

5 Weitere Maßnahmen

Liegt das Risiko im inakzeptablen oder im oberen orangen ALARP-Bereich sind etablierte risikomindernde Maßnahmen umzusetzen (siehe Kapitel 2.8.6). Die ermittelten Risiken für die WEA 4, 8 und 19 liegen für die Bundesstraße im oberen ALARP-Bereich. Weiterhin befinden sich die ermittelten Risiken für die WEA 5, 6, 13 und 21 für den Wanderweg im oberen ALARP-Bereich bzw. an der Grenze dazu.

Wir empfehlen daher für die WEA 4, 5, 6, 8, 13, 19 und 21 den Einsatz eines optionalen zertifizierten Eiserkennungssystems (siehe Kapitel 3.6.2).

Weiterhin empfehlen wir für die WEA 4, 8 und 19 nach Abschaltung auf Grund von Eisansatz den Rotor der WEA so auszurichten, dass möglichst wenige Eisstücke die Bundesstraße B96 treffen und entsprechend den Vorgaben des Herstellers die Azimutposition des Rotors bis zur maximal möglichen Windgeschwindigkeit beizubehalten. Die erforderlichen Werte sind in Tabelle 5.1 dargestellt (zur Definition des Azimutwinkels siehe Abbildung 2.8.6.1).



Tabelle 5.1: *Empfohlene Azimut-Positionen nach Abschaltung auf Grund von Eisansatz für den Rotor der WEA.*

Lfd. Nr. WEA	Azimutwinkel bei Stillstand [°]
4	255
8	255
19	255

Zusätzlich empfehlen wir entlang des Wanderwegs in der Umgebung der WEA 5, 6, 13 und 21 das Aufstellen von Warnschildern, welche die Öffentlichkeit vor einer erhöhten Gefahr durch Eiswurf und Eisfall von Windenergieanlagen warnen. Da die WEA den Weg in Teilen mit dem Rotor überstreichen, sind die Schilder mit einem Zusatzhinweis zu versehen, der auf das erhöhte Risiko hinweist und ausdrücklich vor der Nutzung des Weges bei Vereisungsbedingungen warnt.



6 Zusammenfassung

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG ist beauftragt worden, die vorliegende Windparkkonfiguration hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen ausgehend von den stillstehenden (trudelnden) bzw. in Betrieb befindlichen WEA zu betrachten und zu bewerten.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Risikoanalyse der WEA 1 - 24 hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf/Eisfall und Bauteilversagen zusammengefasst.

Als Schutzobjekte wurden die Bundesstraße B96, eine Bahnstrecke und ein Wanderweg in der Nachbarschaft der WEA definiert.

Eine mögliche Ursache für ein Umstürzen der WEA, einen Absturz des Rotors, einen Absturz der Gondel oder den Verlust des ganzen bzw. Teilen eines Rotorblattes ist ein Brand der WEA. Das durch einen Brand hierdurch verursachte Risiko ist daher in der Risikobetrachtung für das Bauteilversagen enthalten und mit abgedeckt. Nicht mit abgedeckt ist das durch die Ausbreitung von brennenden Partikeln und Trümmern in der Umgebung bestehende Brandrisiko.

Die abschließende Bewertung des Gesamtrisikos ist in Tabelle 6.1 für alle zu bewertenden WEA aus Tabelle 3.3.1 bezüglich der relevanten Schutzobjekte dargestellt.

Maßnahmen, die in den Berechnungen berücksichtigt wurden und entsprechend für die getroffene Aussage unabdingbar sind, werden in der Tabelle 6.1 in den Randbedingungen dargestellt.

Maßnahmen, die zur Verringerung des Risikos umgesetzt werden sollten, werden in Tabelle 6.1 in der Spalte „Maßnahmen zur Risikoreduzierung“ aufgeführt. Eine genauere Erläuterung der Maßnahmen erfolgt in Kapitel 5.

Tabelle 6.1: Übersicht über die Bewertung des Gesamtrisikos (Risikogrenzwert: - = überschritten, + = noch tolerierbar, ++ = tolerierbar, +++ = allgemein akzeptabel, ≈ 0 = vernachlässigbar).

Lfd. Nr. WEA	Randbedingungen der Berechnung					Ergebnisse		
	Eiserkennungssystem			Azimutwinkel nach Abschaltung	Anti- / De-Icing	Schutzobjekt	Bewertung Personenrisiko	Maßnahmen zur Risikoreduzierung (Kapitel 5)
	aktiv	Windrichtungs- sektor	Anteil Eiswurf *					
1	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---
2	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---
3	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---
4	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Bundesstraße B96	+	zertifizierte Eiserkennung Azimutausrichtung 255°
						Bahnstrecke	++	---
5	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	++	zertifizierte Eiserkennung Warnschild mit Zusatzhinweis
6	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	+	zertifizierte Eiserkennung Warnschild mit Zusatzhinweis
7	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---
8	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Bundesstraße B96	+	zertifizierte Eiserkennung Azimutausrichtung 255°
						Bahnstrecke	++	---
9	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---

Lfd. Nr. WEA	Randbedingungen der Berechnung					Ergebnisse		
	Eiserkennungssystem			Azimutwinkel nach Abschaltung	Anti- / De-Icing	Schutzobjekt	Bewertung Personenrisiko	Maßnahmen zur Risikoreduzierung (Kapitel 5)
	aktiv	Windrichtungs- sektor	Anteil Eiswurf *					
10	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---
11	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Bundesstraße B96	≈ 0	---
12	---					Kein Schutzobjekt im potentiellen Gefährdungsbereich		
13	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	+	zertifizierte Eiserkennung Warnschild mit Zusatzhinweis
14	---					Kein Schutzobjekt im potentiellen Gefährdungsbereich		
15	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---
16	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Bundesstraße B96	≈ 0	---
						Bahnstrecke	≈ 0	---
17	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---
18	---					Kein Schutzobjekt im potentiellen Gefährdungsbereich		
19	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Bundesstraße B96	+	zertifizierte Eiserkennung Azimutausrichtung 255°
						Bahnstrecke	++	---
20	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	≈ 0	---



Lfd. Nr. WEA	Randbedingungen der Berechnung					Ergebnisse		
	Eiserkennungssystem			Azimutwinkel nach Abschaltung	Anti- / De-Icing	Schutzobjekt	Bewertung Personenrisiko	Maßnahmen zur Risikoreduzierung (Kapitel 5)
	aktiv	Windrichtungs- sektor	Anteil Eiswurf *					
21	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	+	zertifizierte Eiserkennung Warnschild mit Zusatzhinweis
22	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Bundesstraße B96	≈ 0	---
						Bahnstrecke	≈ 0	---
23	ja	0 – 360°	10.00%	---	---	Wanderweg	++	---
24	---					Kein Schutzobjekt im potentiellen Gefährdungsbereich		

* In den Berechnungen wurde nur das interne System (siehe Kapitel 3.6.1) berücksichtigt. In diesem Gutachten wird davon ausgegangen, dass die WEA nicht mit dem optional verfügbaren System (siehe Kapitel 3.6.2) ausgestattet ist.



7 Formelzeichen und Abkürzungen

WEA	Windenergieanlage	
RD	Rotordurchmesser	
NH	Nabenhöhe	
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989	
UTM	Universale Transversale Mercator Projektion	
WGS84	World Geodetic System 1984	
ü. NN	über Normalnull	
MEM	Minimale endogen Sterblichkeit	
Kfz	Kraftfahrzeug	
A	Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung	[m/s]
k	Formparameter der Weibullverteilung	[-]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]
h	Höhe	[m]
Θ	Azimutwinkel	[°]

8 Literaturangaben

Allgemein

- /1.1/ Bengt Tammelin et. al.; Wind Energy Production in Cold climates; Meteorological publications No.41, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, February 2000.
- /1.2/ International Energy Agency (IEA), IEA Wind Task 19, State-of-the-Art of Wind Energy in Cold Climates, Edition October 2012.
- /1.3/ Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Verkehrstechnik Heft V 291, Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko; Bergisch Gladbach, August 2017.
- /1.4/ OpenStreetMap und Mitwirkende; siehe Internet: <http://www.openstreetmap.org>, <http://opendatacommons.org>, <http://creativecommons.org>.
- /1.5/ U.S. Geological Survey (USGS); EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global.
- /1.6/ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Mobilität in Deutschland 2008; Ergebnisbericht, Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends; Bonn und Berlin, Februar 2010.
- /1.7/ Schneider J., Schlatter H. P.; Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure; 1. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart, 1994.



- /1.8/ Wichura, B., 2013. The Spatial Distribution of Icing in Germany Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurements of Icing, Proceedings of the 15th International Workshop On Atmospheric Icing Of Structures (IWAIS 2013). Compusult Ltd., St. John's, Newfoundland and Labrador, September 8-11, 2013, pp. 303-309.
- /1.9/ HSE, Health and safety Executive. (n.d.); Risk analyses or 'predictive' aspects of comah safety reports guidance for explosives sites - The COMAH Safety Report Process for Predictive Assessment of Explosives Sites, downloaded 2014-08-21; Retrieved from <http://www.hse.gov.uk/comah/>
- /1.10/ Dirk Proske; Katalog der Risiken, 3. vollständig überarbeitete Auflage; Würenlingen 2021..
- /1.11/ C. J. Faasen, P. A. L. Franck, A. M. H. W. Taris; Handboek Risicozonering Windturbines, Eindversie, 3e geactualiseerde versie mei 2013, en Herziene versie 3.1 september 2014; Nederland.
- /1.12/ T. Hahm, J. Kröning; Rotorblattversagen – Gefährdungsanalyse für die Umgebung von Windenergieanlagen; 6. Deutsche Windenergie-Konferenz DEWEK 2002.
- /1.13/ J. Kesenheimer; Grundlagenforschung zur Restnutzungsdauer von Windenergieanlagen; Technische Universität Hamburg-Harburg, April 2003.
- /1.14/ Oliver J., Creighton P.; Road Accidents, Bicycle injuries and helmet use: a systematic review and meta-analysis; International Journal of Epidemiology, 2017, 278-292.

Normen

- /2.1/ International Energy Agency (IEA), IEA Wind TCP Task 19; Technical Report; International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments; April 2022.
- /2.2/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen Ausgabe 2023/1 (MVV TB 2023/1); Berlin, 17.04.2023.
- /2.3/ DIN EN 50126; Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS); Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000.
- /2.4/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1, Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements; Edition 4, 2019-12; Geneva, Switzerland (Deutsche Fassung: Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN IEC 61400-1 (VDE 0127-1); Windenergieanlagen – Teil 1: Auslegungsanforderungen (IEC 61400-1:2019); Dezember 2019; Berlin, Deutschland).
- /2.5/ DNV GL AS; Certification of condition monitoring, DNVGL-SE-0439:2016-06; June 2016.
- /2.6/ DIN EN ISO 16708; Erdöl- und Erdgasindustrie - Rohrleitungstransportsysteme - Zuverlässigkeitsanalysen (ISO 16708:2006); Englische Fassung EN ISO 16708:2006; Deutsches Institut für Normung e.V., August 2006.
- /2.7/ ISO 13623; Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems; ISO 13623:2000(E), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- /2.8/ International Electrotechnical Commission (IEC); Wind energy generation systems – Part 31: Siting Risk Assessment; IEC TS 61400-31 ED1, Edition 1.0, 2023-11.



Projektspezifisch

- /3.1/ anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH; anemos Windatlas für Deutschland, <https://awis.anemos.de/>, Winddaten zum Standort Mückendorf heruntergeladen am 25.10.2024.
- /3.2/ anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH; Windatlas Vorabschätzung für den Standort Mückendorf, Brandenburg: Berichts-Nr. 24-7657241590-Rev.00-WV-MEK; 22.10.2024, Reppenstedt, Deutschland.
- /3.3/ LGB (Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg); Straßennetzviewer, Verkehrsstärke 2021; siehe Internet: <https://viewer.brandenburg.de/strassennetz/>, abgerufen am 28.10.2024.
- /3.4/ ODEG; Fahrplan RE8 Süd; gültig ab 10.12.2023; siehe Internet: https://www.odeg.de/fileadmin/user_upload/Unternehmensseite/linien-fahrplaene/liniennetz-fahrplaene/2023_2024/WEB_2024_RE8Sued_592x290.pdf, abgerufen am 28.10.2024.
- /3.5/ Nordex Energy GmbH; Allgemeine Dokumentation, Integrierter Sensor zur Eiserkennung; 9016288, Rev. 00; 11.03.2024; Hamburg, Deutschland.
- /3.6/ Nordex Energy GmbH; General Documentation, Rotor Blade Ice Detection; 9016285, Rev. 00; 11.03.2024; Hamburg, Germany.
- /3.7/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG; Zusammenfassung des Gutachtens zur Bewertung der Funktionalität eines Eiserkennungssystems zur Verhinderung von Eisabwurf an NORDEX Windenergieanlagen; TÜV NORD Bericht Nr.: 8118 365 241 D Rev.1; 09.07.2021; Hamburg, Deutschland.
- /3.8/ DNV; Type Certificate, Ice Detection System IDD.Blade; Certificate No. TC-DNV-SE-0439-03577-3; Hamburg, 2023-01-17.
- /3.9/ Nordex Energy GmbH; Trudelbetrieb bei Eisansatz von Nordex Anlagen; per Email am 26.10.2020 und 8.3.2023.
- /3.10/ Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG; Dokumentation der Standortbesichtigung im Rahmen der Bewertung der Standorteignung sowie der Risikobewertung durch Eiswurf und Eisfall von WEA am Standort Mückendorf; Referenz-Nr.: 2024-F-124; Oktober 2024; Hamburg, Deutschland.



Anhang A: Detaillierte Berechnungsergebnisse Bauteilversagen

A.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten von Blattbruchstücken

In der Abbildung A.1.1 sind die daraus für die Umgebung der WEA resultierenden Auftreffhäufigkeiten pro Rasterfläche (16m^2) und Jahr dargestellt.

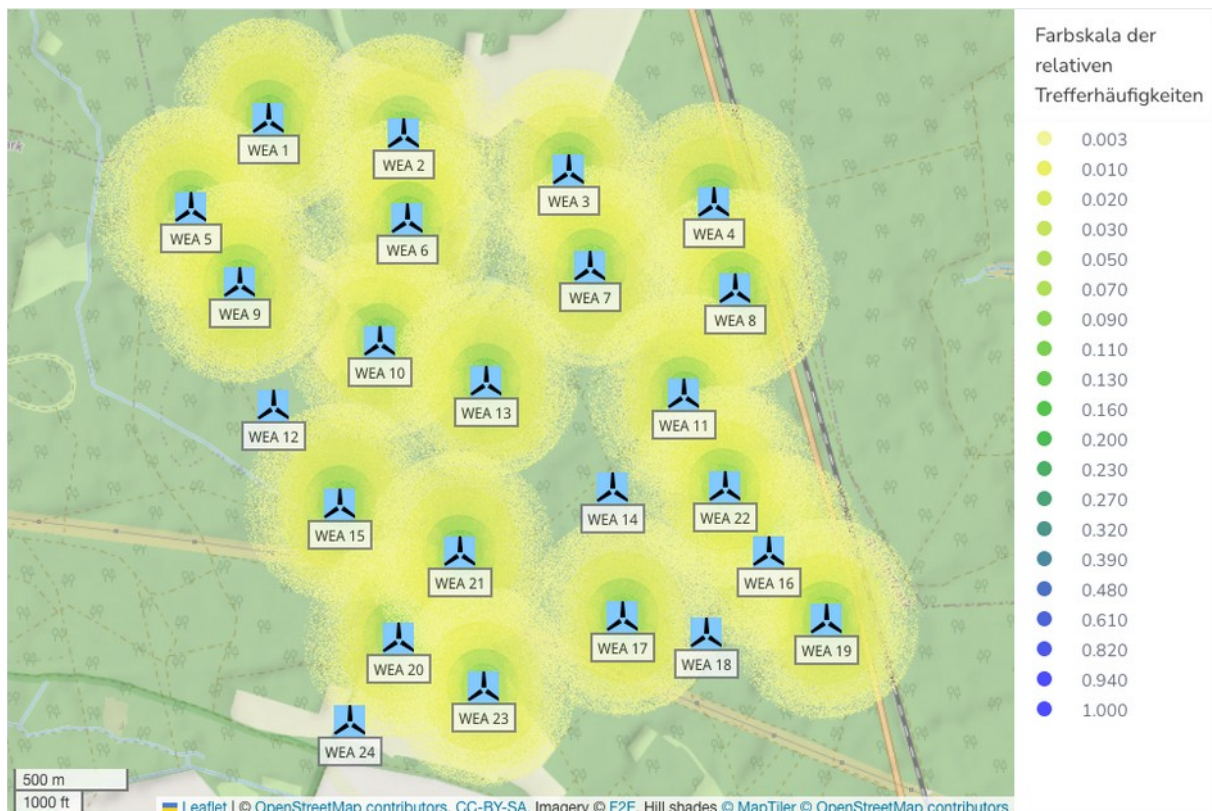


Abbildung A.1.1: Trefferhäufigkeiten von Blattbruchstücken pro Rasterfläche (16m^2) in einer Millionen Jahren.

Tabelle A.1.1 listet die maximal erreichte Flugweite der Bruchstücke bezogen auf den Fußpunkt der WEA auf.

Tabelle A.1.1: Maximale Flugweite der betrachteten Blattbruchstücke.

Lfd. Nr. WEA	Maximale Flugweite [m]
1	433.3
2	434.1
3	435.5
4	433.5



Lfd. Nr. WEA	Maximale Flugweite [m]
5	439.0
6	437.1
7	437.8
8	433.3
9	435.7
10	433.0
11	437.9
13	428.9
15	431.8
16	436.4
17	437.7
19	438.2
20	435.1
21	433.8
22	437.1
23	434.0

A.2 Schadenshäufigkeiten

Eine Gefährdung durch Blattbruch, Turmversagen oder Verlust der Gondel bzw. des Rotors ist gemäß Kapitel 4.3 zu unterstellen. Es ergeben sich die in Tabelle A.2.1 aufgelisteten Unfallhäufigkeiten bzw. Risiken.

Für die Bewertung von Personenschäden wird davon ausgegangen, dass jedes Kfz im Mittel mit 1.5 Personen besetzt ist. Dies entspricht der durchschnittlichen Besetzungszahl von Pkw in Deutschland /1.6/.

Aufgrund der Größe der betrachteten Anlagenteile wird im vorliegenden Fall davon ausgegangen, dass es in der Folge eines direkten Treffers eines Blattbruchstückes oder der umstürzenden WEA auf den Zug zu einem Entgleisen des Zuges kommt. Bei einem Treffer auf das Gleis wird die benötigte Strecke für eine Notbremsung berücksichtigt. Kommt es bei einer Notbremsung zu einer Kollision, wird auch von einem Entgleisen des Zuges ausgegangen.

In Tabelle A.2.1 ist jeweils nur das in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen zu betrachtende Risiko dargestellt.

Tabelle A.2.1: Kollektive und individuelle Risiken für Personenschäden durch Bauteilversagen.

Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Auftrefffhäufigkeit pro Jahr				Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
		Blattbruch	Turm- versagen	Verlust von Gondel oder Rotor	Tote pro Ereignis *		
Bewertung der einzelnen WEA:							
1	Wanderweg	1.56*10 ⁻⁶	---	---	---	---	3.03*10 ⁻¹⁰ (einmal in 3.2 Mrd. Jahren)
2	Wanderweg	3.49*10 ⁻⁷	---	---	---	---	6.79*10 ⁻¹¹ (einmal in 14.7 Mrd. Jahren)
3	Wanderweg	0	---	---		---	---
4	Bundesstraße B96	1.39*10 ⁻⁵	1.17*10 ⁻⁴	---	---	6.86*10 ⁻⁵ (einmal in 14 500 Jahren)	---
	Bahnstrecke	6.77*10 ⁻⁶	1.01*10 ⁻⁴	---	---	4.86*10 ⁻⁷ (einmal in 2 Mio. Jahren)	3.24*10 ⁻⁸ (einmal in 30.8 Mio. Jahren)
5	Wanderweg	2.42*10 ⁻⁵	1.09*10 ⁻⁴	6.67*10 ⁻⁶	---	---	1.25*10 ⁻⁷ (einmal in 8 Mio. Jahren)
6	Wanderweg	2.91*10 ⁻⁵	1.94*10 ⁻⁶	1.00*10 ⁻⁵	---	---	2.20*10 ⁻⁸ (einmal in 45.4 Mio. Jahren)
7	Wanderweg	1.10*10 ⁻⁶	8.17*10 ⁻⁸	---	---	---	7.74*10 ⁻¹⁰ (einmal in 1.2 Mrd. Jahren)

Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Auftrittshäufigkeit pro Jahr				Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
		Blattbruch	Turm- versagen	Verlust von Gondel oder Rotor	Tote pro Ereignis *		
8	Bundesstraße B96	$1.23 \cdot 10^{-5}$	$1.17 \cdot 10^{-4}$	---	---	$6.79 \cdot 10^{-5}$ (einmal in 14 700 Jahren)	----
	Bahnstrecke	$6.37 \cdot 10^{-6}$	$9.52 \cdot 10^{-5}$	---	---	$4.58 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 2.1 Mio. Jahren)	$3.05 \cdot 10^{-8}$ (einmal in 32.7 Mio. Jahren)
9	Wanderweg	$8.16 \cdot 10^{-7}$	---	---	---	---	$1.59 \cdot 10^{-10}$ (einmal in 6.2 Mrd. Jahren)
10	Wanderweg	0	---	---	---	---	---
11	Bundesstraße B96	0	---	---	---	---	---
13	Wanderweg	$2.69 \cdot 10^{-5}$	$9.70 \cdot 10^{-5}$	$7.22 \cdot 10^{-6}$	---	---	$1.15 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 8.7 Mio. Jahren)
15	Wanderweg	0	---	---	---	---	---
16	Bundesstraße B96	$1.39 \cdot 10^{-6}$	---	---	---	$6.53 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 1.5 Mio. Jahren)	---
	Bahnstrecke	$4.77 \cdot 10^{-7}$	---	---	---	$1.87 \cdot 10^{-9}$ (einmal in 536 Mio. Jahren)	$1.24 \cdot 10^{-10}$ (einmal in 8 Mrd. Jahren)
17	Wanderweg	0	---	---	---	---	---
19	Bundesstraße B96	$1.24 \cdot 10^{-5}$	$1.17 \cdot 10^{-4}$	---	---	$6.79 \cdot 10^{-5}$ (einmal in 14 700 Jahren)	----

Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Auftrittshäufigkeit pro Jahr				Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
		Blattbruch	Turm- versagen	Verlust von Gondel oder Rotor	Tote pro Ereignis *		
19	Bahnstrecke	$6.07 \cdot 10^{-6}$	$9.52 \cdot 10^{-5}$	---	---	$4.57 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 2.1 Mio. Jahren)	$3.04 \cdot 10^{-8}$ (einmal in 32.8 Mio. Jahren)
20	Wanderweg	$3.71 \cdot 10^{-7}$	---	---	---	---	$7.22 \cdot 10^{-11}$ (einmal in 13.8 Mrd. Jahren)
21	Wanderweg	$3.50 \cdot 10^{-5}$	$1.19 \cdot 10^{-5}$	$1.33 \cdot 10^{-5}$	---	---	$3.62 \cdot 10^{-8}$ (einmal in 27.5 Mio. Jahren)
22	Bundesstraße B96	$3.68 \cdot 10^{-8}$	---	---	---	$1.73 \cdot 10^{-8}$ (einmal in 57.9 Mio. Jahren)	---
	Bahnstrecke	0	---	---	---	---	---
23	Wanderweg	$6.06 \cdot 10^{-6}$	$1.16 \cdot 10^{-4}$	---	---	---	$6.60 \cdot 10^{-8}$ (einmal in 15.1 Mio. Jahren)
Bewertung der addierten Risiken:							
1, 2, 5, 6, 7, 9, 13, 20, 21, 23	Wanderweg	$1.25 \cdot 10^{-4}$	$3.36 \cdot 10^{-4}$	$3.72 \cdot 10^{-5}$	---	---	$3.65 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 2.7 Mio. Jahren)

*: Nur relevant für Ereignisse mit mehr als einem Todesfall (siehe Kapitel 2.8.3). Angegeben wird dann das Maximum der Toten pro Ereignis aus den Schadensszenarien Blattbruch, Turmversagen und Verlust von Gondel oder Rotor.



Anhang B: Detaillierte Berechnungsergebnisse Eisfall

B.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten

In der Abbildung B.1.1 sind die für die Umgebung der WEA resultierenden Treffer pro 16 Quadratmeter und Jahr dargestellt.

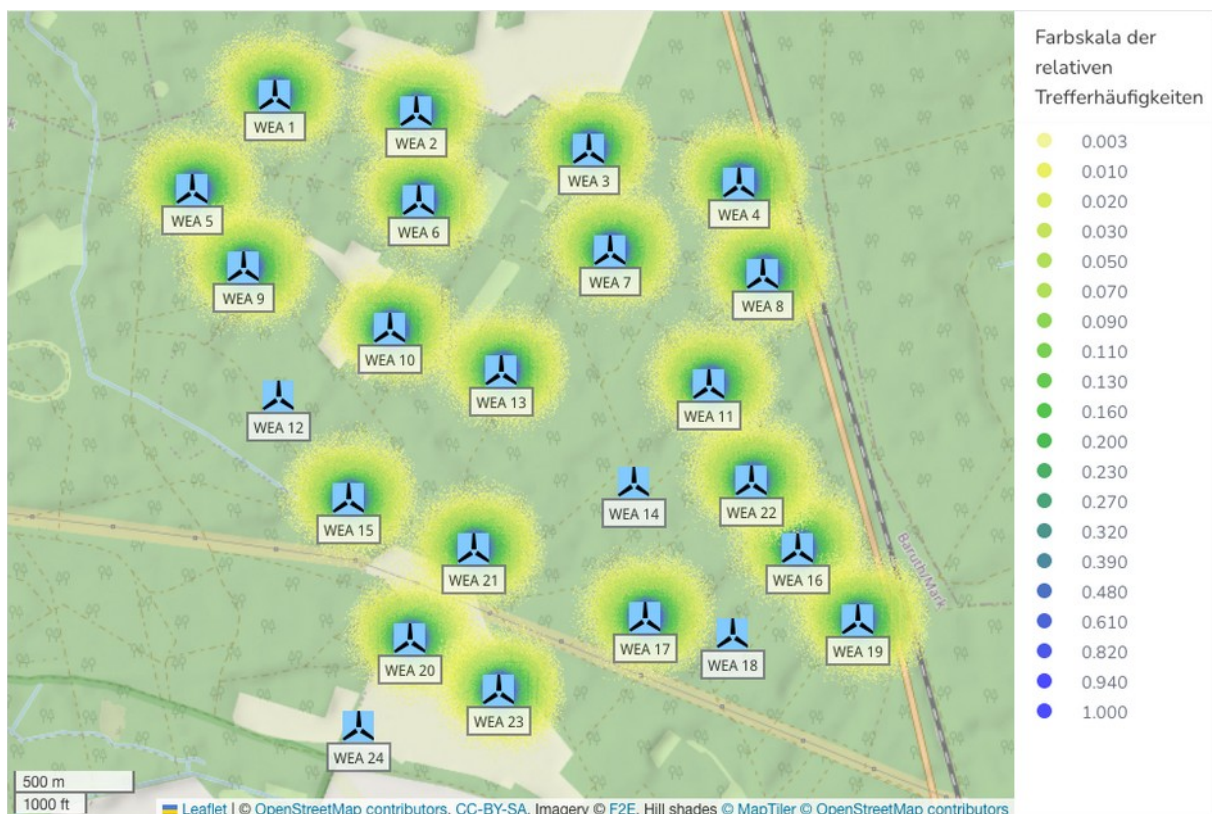


Abbildung B.1.1: Trefferhäufigkeiten von Eisstücken pro Rasterfläche (16m^2) und Jahr.

Tabelle B.1.1 listet die maximal erreichte Flugweite der Eisstücke bezogen auf den Fußpunkt der WEA auf.

Tabelle B.1.1: Maximale Flugweite der betrachteten Eisstücke.

Lfd. Nr. WEA	Maximale Flugweite [m]
1	321.1
2	327.0
3	314.7
4	318.2
5	321.1



Lfd. Nr. WEA	Maximale Flugweite [m]
6	315.1
7	329.7
8	322.3
9	322.4
10	315.4
11	319.8
13	313.8
15	329.1
16	326.1
17	326.2
19	324.0
20	312.6
21	328.3
22	314.7
23	321.3

B.2 Schadenshäufigkeiten

Aus den ermittelten Flugbahnen ergeben sich für die Gefährdungsbereiche der zu bewertenden WEA gemäß Kapitel 4.3 die in Tabelle B.2.1 aufgeführten Ergebnisse.

Für die Bewertung von Personenschäden wird davon ausgegangen, dass jedes Kfz im Mittel mit 1.5 Personen besetzt ist. Dies entspricht der durchschnittlichen Besetzungszahl von Pkw in Deutschland /1.6/. Eine infolge eines Treffers durch Eis resultierende Verkettung von Unfällen wurde nicht betrachtet.

Für die Bewertung von Personenschäden wird davon ausgegangen, dass nur bei Treffern auf die Frontscheibe des Zuges die nötige Energie erzielt wird, um die Scheibe zu durchschlagen. Dementsprechend ist nur der Zugführer einer unmittelbaren Gefahr durch herabfallende Eisstücke von den WEA ausgesetzt. Auf Grund der Sicherheitsfahrschaltung (Sifa) im Führerstand bremsst der Zug nach einiger Zeit automatisch, wenn der Zugführer nicht mehr handlungsfähig ist, so dass eine weitere relevante Personengefährdung ausgeschlossen werden kann.

In Tabelle B.2.1 ist jeweils nur das in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen zu betrachtende Risiko dargestellt.



Tabelle B.2.1: Kollektive und individuelle Risiken für Personenschäden.

Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Anzahl Treffer pro Jahr	Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
Risiken pro WEA:				
1	Wanderweg	0.0	---	---
2	Wanderweg	0.0	---	---
3	Wanderweg	0.0	---	---
4	Bundesstraße B96	17.6	$1.22 \cdot 10^{-3}$ (einmal in 821 Jahren)	---
	Bahnstrecke	5.6	---	$3.71 \cdot 10^{-8}$ (einmal in 26.9 Mio. Jahren)
5	Wanderweg	22.3	---	$7.98 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 1.2 Mio. Jahren)
6	Wanderweg	28.0	---	$9.99 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 1 Mio. Jahren)
7	Wanderweg	0.08	---	$2.97 \cdot 10^{-9}$ (einmal in 336 Mio. Jahren)
8	Bundesstraße B96	16.4	$1.13 \cdot 10^{-3}$ (einmal in 884 Jahren)	---
	Bahnstrecke	4.5	---	$3.01 \cdot 10^{-8}$ (einmal in 33.2 Mio. Jahren)
9	Wanderweg	0.0	---	---
10	Wanderweg	0.0	---	---
11	Bundesstraße B96	0.0	---	---
13	Wanderweg	25.3	---	$9.04 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 1.1 Mio. Jahren)
15	Wanderweg	0.0	---	---
16	Bundesstraße B96	0.03	$2.13 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 468 000 Jahren)	---
	Bahnstrecke	0.0	---	---
17	Wanderweg	0.0	---	---
19	Bundesstraße B96	14.8	$1.02 \cdot 10^{-3}$ (einmal in 979 Jahren)	---
	Bahnstrecke	4.4	---	$2.96 \cdot 10^{-8}$ (einmal in 33.8 Mio. Jahren)



Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Anzahl Treffer pro Jahr	Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
20	Wanderweg	0.0	---	---
21	Wanderweg	28.7	---	$1.02 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 975 000 Jahren)
22	Bundesstraße B96	0.0	---	---
	Bahnstrecke	0.0	---	---
23	Wanderweg	3.6	---	$1.28 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 7.8 Mio. Jahren)
Addierte Risiken:				
4, 8	Bundesstraße B96	34.0	$2.35 \cdot 10^{-3}$ (einmal in 426 Jahren)	---
5, 6, 7, 13, 21, 23	Wanderweg	108.0	---	$3.86 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 259 000 Jahren)