Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.

Unabhängige Analyse von Eisfall mit Risikoanalyse

BUSTERTKOPF (BW)

Bericht Nr.: MS-2401-031-BW-ICE-RA-de

Revision 0

Datum: 24.10.2024

Bericht verfasst von:

(Teilbereich Eisfallanalyse)

Dipl.-Ing (FH) Stefan Gresser
(Abteilung Wind Service Center)

Dipl.-Geogr. Florian Weber
(Gruppenleiter - Abteilung Wind Service Center)

Bericht verfasst von:

(Teilbereich Risikobewertung)

Dipl.-Phys. Thorsten Weidl
(Abteilung Sicherheits- und Risikomanagement)

Dipl.-Math Barbara Gleich
(Abteilung Sicherheits - und Risikomanagement)

Die auszugsweise Wiedergabe des Dokumentes und die Verwendung zu Werbezwecken bedürfen der schriftlichen Genehmigung der TÜV SÜD Industrie Service GmbH.

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfgegenstände.

Sitz: München
Amtsgericht München HRB 96 869
USt-IdNr. DE129484218
Informationen gemäß § 2 Abs. 1 DL-InfoV
unter tuvsud.com/impressum

Aufsichtsrat:
Reiner Block (Vors.)
Geschäftsführer:
Ferdinand Neuwieser (Sprecher)
Thomas Kainz
Simon Kellerer
Paula Pias Peleteiro

TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Energie und Systeme
Ludwig-Eckert-Str. 8
93049 Regensburg
Deutschland

tuvsud.com/de-is
Telefon: 0941 460212-0

Auftraggeber

Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG
Lotzbeckstr. 45
D-77933 Lahr/Schwarzwald

Angaben zum Angebot

Angebots-Nr.	Datum	Dienstleistung
AN-WG-2309-423-BW	13.12.2023	Analyse von Eisfall mit Risikoanalyse

Berechnete Konfigurationen

Lfd. Nr.	Konfig.-Nr.	Anzahl WEA	WEA-Typ	Leistung	Durchmesser	Nabenhöhe
01	I	2	Enercon E-175 EP5	6.0 MW	175 m	162 m

Ausgehändigte Berichte und Änderungen

Revision Nr.	Datum	Titel des Berichtes und Kurzbeschreibung der Änderung
0	24.10.2024	- Analyse von Eisfall mit Risikobewertung - Erstbericht

Hinweise

- Punkt anstatt Komma als Dezimaltrennzeichen
- Hochstrich als Zifferngruppierung
- Es existieren keine wirtschaftlichen oder weiterführenden geschäftlichen Verflechtungen mit dem Auftraggeber
- Notwendigkeit der Untersuchung ergibt sich auf Grund eines Untersuchungsobjekts innerhalb des durch die Richtlinie für Windenergieanlagen [1] definierten Radius von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe)

Inhalt

0 Zusammenfassung der Ergebnisse 5
1 Eingangsdaten für die Berechnungen 7
1.1 Karteninformationen 7
1.2 Windparkkoordinaten und anlagenspezifische Informationen 7
1.3 Technische Eingangsdaten zum Verhalten bei Eisansatzerkennung 7
1.4 Meteorologische Eingangsdaten 10
1.4.1 Windstatistik für die Eisfallberechnungen 10
1.4.2 Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage 12
1.5 Untersuchungsobjekte am Standort 12
1.6 Graphische Darstellung 14
2 Ermittlung des von den Anlagen ausgehenden Gesamtrisikos 16
2.1 Tabellarische Übersicht der Risikoermittlung am untersuchten Standort 18
2.2 Maßnahmenempfehlung 20
2.3 Räumliche Verteilung des Risikos am untersuchten Standort 21
2.3.1 WEA02, Risikoprofil für die B500 (Objekt B1.2) 24
2.3.2 WEA04, Risikoprofil für den Wanderweg (Objekt D4.4) 25
2.4 Risiko für Kranstellflächen und Zuwegung 26
3 Hinweise zur Erstellung der Analyse 27
4 Literaturverzeichnis 29
5 Anhang 32
5.1 Eiswurf und Eisfall bei Windenergieanlagen 32
5.2 Theoretische Berechnungsgrundlagen von Eiswurf bzw. Eisfall 35
5.3 Annahmen für die Eisfallberechnungen 36
5.4 Einfluss einer Blattheizung 37
5.5 Eismassen und Eistypen 37
5.6 Risiko und Risikoakzeptanzkriterien 39
5.6.1 Der Risikobegriff 39
5.6.1.1 Risikobewertung 39
5.6.1.2 Risikodarstellung - Risikomatrix 40
5.6.2 Risikoakzeptanzkriterien 42
5.6.2.1 Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) 42
5.6.2.2 Das ALARP-Prinzip 43
5.6.2.3 Kollektives Risiko 44
5.6.2.4 Im Rahmen der Untersuchung verwendete Akzeptanzkriterien 45
5.6.2.5 Vergleichsrisiken 46
5.7 Für die Risikoanalyse verwendete Methodik 47

5.7.1 Schadensausmaß 47
5.7.1.1 Die Probit-Funktion 47
5.7.1.2 Ermittlung von Sachschäden 48
5.7.1.3 Ermittlung der Eisansatztage 49
5.7.1.4 Betrachtete Expositionsszenarien 49
5.7.1.5 Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit H_T, P_T 51
5.7.1.6 Ermittlung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit P_A 52
5.7.1.7 Berücksichtigung eines Reduktionsfaktors 52
5.7.1.8 Ermittlung der Gefährdungswahrscheinlichkeit 52
5.7.2 Ermittlung des Risikos 53
5.7.3 Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen 53
5.8 Unsicherheitsbetrachtung 55
5.9 Abkürzungsverzeichnis 56

0 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wird eine unabhängige Analyse für den Standort Bustertkopf durchgeführt. Dabei wird der mögliche Eisfall am Standort durch die untersuchten, vereisungsbedingt abgeschalteten und im Trudelbetrieb befindlichen Anlagen, welche vom Auftraggeber vorgegeben sind, berechnet.

Die gemäß der Richtlinie für Windenergieanlagen – Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Landesentwicklung und Wohnen über Technische Baubestimmungen (Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – VwV TB), Ziffer 3.2 der Anlage A 1.2.8/6 [1] geforderten Unterlagen zur Funktionssicherheit des Eiserkennungssystems liegen für den geplanten WEA-Typ vor (siehe hierzu Abschnitt 1.3).

Entsprechend der Richtlinie für Windenergieanlagen – Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Landesentwicklung und Wohnen über Technische Baubestimmungen (Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – VwV TB), Ziffer 2 der Anlage A 1.2.8/6 [1] sind Verkehrswege und Gebäude in einem Radius von 1.5 x (Rotordurchmesser + Nabenhöhe) um die untersuchten Anlagen (Analysebereich) im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung der öffentlichen Sicherheit durch Eisabwurf zu betrachten. Nähere Angaben zu deren Lage sowie den jeweiligen Entfernungen zu den geplanten Anlagen sind im Abschnitt 1.5 zu finden.

Hinsichtlich der Risikobewertung der ermittelten Eisfallbereiche ist zusammenfassend festzuhalten, dass das Risiko für zwei Objekte im hohen Bereich verbleibt. Dies betrifft einerseits die Bundesstraße B500 (Objekt B1.2) im Einflussbereich der WEA02, andererseits den Wanderweg D4.4 im Wirkungsbereich der WEA04.

Das hohe Risiko an der B500 liegt am minimalen Abstand zur WEA02, der bei einer Gesamthöhe von ca. 250 m nur 190 m beträgt. Allerdings kann das Risiko durch eine temporäre Geschwindigkeitsbeschränkung an Tagen mit Eisfallbedingungen auf 70 km/h in den tolerablen Bereich reduziert werden.

Der gut ausgebaute Weg D4.4 hat einen minimalen Abstand von 20 m zur WEA04. Damit ist ein hohes Risiko verbunden. Mit der

- Aufstellung von an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchten mit Warnschildern die Fußgänger und Radfahrer eindeutig vor der Nutzung des Weges warnen

kann das Risiko in den tolerablen Bereich reduziert werden. Eine weitere Risikoreduktion lässt sich nur durch eine wirkungsvolle Absperrung und Verlegung des Weges im Winterhalbjahr erreichen. „Wirkungsvoll“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sie nicht problemlos umgangen werden kann.

Darüber hinaus werden für Kranstellflächen, Zuwegungen, für Wege, die die Kranstellfläche kreuzen, sowie für Wege die einen Abstand von 10 m oder weniger zur Windenergieanlage haben, umfangreichere Maßnahmen empfohlen:

Es ist dafür zu sorgen, dass ein unbefugtes Betreten des Gefahrenbereichs bei Eisfallbedingungen wirkungsvoll vermieden wird.

ENTWEDER

- Anbringen einer Umzäunung, mittels derer die Kranstellfläche großzügig abgesichert ist.

ODER

- Anbringen eines Schildes mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät.

ODER

- Großzügige Abschrankung aller Zuwegungen zur Kranstellfläche, mit einem eindeutigen Warn- oder Verbotsschild, um ein Betreten des Gefährdungsbereichs zu vermeiden.

Durch Realisierung mindestens einer der drei Maßnahmen lässt sich das Risiko ausreichend reduzieren.

1 Eingangsdaten für die Berechnungen

1.1 Karteninformationen

Das topographische Modell sowie das Höhenlinienmodell werden auf Basis des vorhandenen Materials [16] [22] angefertigt.

1.2 Windparkkoordinaten und anlagenspezifische Informationen

Die Standortkoordinaten für den Windpark werden vom Auftraggeber vorgegeben [6]. Die Angabe der Fußpunkthöhen entstammt aus der Interpolation des Höhenmodells und kann damit von feldvermessenen Werten abweichen. Die Angabe der vermessenen Fußpunkthöhen ist zum Zeitpunkt der Berechnung nicht verfügbar. Die Fußpunkthöhen unterliegen damit der Schwankung des eingegangenen Höhenmodells.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Koordinaten der betrachteten WEA sowie die anlagenspezifischen Informationen zum betrachteten WEA-Typ dargestellt.

Windparkkoordinaten - betrachteter Standort								
Windpark Bustertkopf	Anlagentyp	Nabenhöhe	Durchmesser	1.5 x (NH+D)	Leistung	Koordinatensystem		Höhe ü. NN (ca.)
						UTM Zone 32, ETRS89		Fußpunkt
	[-]	[m]	[m]	[m]	[MW]	O	N	[m]
WEA2_BUS	E-175 EP5	162.0	175	505.50	6.0	440'253	5'382'763	944
WEA4_BUS	E-175 EP5	162.0	175	505.50	6.0	440'440	5'382'010	898

Tabelle 1: Koordinaten und technische Daten der betrachteten WEA am Standort (Konfiguration I).

1.3 Technische Eingangsdaten zum Verhalten bei Eisansatzerkennung

Durch den Auftraggeber wird eine Anlagenkonfiguration zur Berechnung am Standort vorgegeben [6][30][31].

Die jeweiligen Eingangswerte für den betrachteten Anlagentyp werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Technische Daten								
Konfiguration	Anlagentyp	Blattheizung	Gondelarretierung		Maximale Drehzahl im Trudelbetrieb	Maximale Drehzahl im Betrieb	Anforderungen gemäß [1]	
			berücksichtigt	Richtung			Eiserkennungs-sytem	Integration in WEA-Technik
[-]	[-]	[-]	[-]	[°]	[U/min]	[U/min]	[-]	[-]
I	Enercon E-175 EP5	ja	nein	---	[0;1.5]	[4.6;8.75]	erfüllt	erfüllt

Tabelle 2: Zusammenfassung der technischen Daten der betrachteten WEA.

Wie aus der Tabelle hervorgeht, erfüllt das geplante Eiserkennungssystem für Konfiguration II die Anforderungen an [1] sowie auch die Integration des Eiserkennungssystems auf Basis der zur Verfügung gestellten Dokumente [23][24][25][26] die Anforderungen gemäß [1] erfüllen.

Wie im Gutachten Eisansatzerkennung an Rotorblättern von ENERCON Windenergieanlagen durch das ENERCON-Kennlinienverfahren und externe Eissensoren (Bericht Nr. 8111 7247 373 D Rev.2 vom 28.02.2022) [23] beschrieben, wird das IDD.Blade System von Wölfel in ENERCON Anlagen, das als redundantes und diversitäres System zur Eisansatzerkennung (neben dem serienmäßigen ENERCON-Kennlinienverfahren) am geplanten Standort zum Einsatz kommt [30], unter den genannten Voraussetzungen im Hinblick auf die zuverlässige Eisansatzerkennung und Abschaltung der WEA als ausreichend sicher und dem aktuellen Stand der Technik entsprechend bewertet (vgl. [23] in Verbindung mit [24][25]).

Nach [23] gilt, dass das serienmäßige Eisansatzerkennungssystem nach dem ENERCON-Kennlinienverfahren auch bei Einbau des zusätzlichen Wölfel Eisansatzerkennungssystems weiterhin aktiv bleibt. Wird durch das ENERCON-Kennlinienverfahren oder durch das Wölfel System Eisansatz erkannt, wird die WEA angehalten (Trudelbetrieb). Die hier betrachtete Einbindung des Eisansatzerkennungssystems Wölfel in ENERCON Windenergieanlagen ist neben dem serienmäßigen ENERCON-Kennlinienverfahren ein redundantes und diversitäres System zur Eisansatzerkennung. Die Einbindung in das Betriebsführungssystem erfolgt unter Berücksichtigung der definierten erforderlichen Schnittstellen.

Für eine wegen Eisansatz abgeschaltete Anlage stehen nach [23] für das Wiederanlaufen der WEA folgende Optionen zur Verfügung:

- Automatischer Wiederanlauf nach Tauwetter (Standardeinstellung)
- Automatischer 6-Stunden-Neustart (standardmäßig deaktiviert)
- Automatischer Wiederanlauf bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten (präventiver Halt nach Störungen, Standardeinstellung)
- Manueller Wiederanlauf (Standardeinstellung)

Eine Beschreibung der obigen Punkte ist [23] zu entnehmen. Unter der Voraussetzung der ordnungsgemäßen Parametrierung entsprechend den Standardeinstellungen und einer Schulung des verantwortlichen Personals (manueller Neustart) stellen obige Punkte gemäß [23] eine plausible und ausreichend sichere Möglichkeit für einen eisfreien Start der Anlagen dar.

Ein automatisches Wiederanfahren bei Windgeschwindigkeiten oberhalb von 5 m/s erfordert allerdings ein zusätzliches, externes Eiserkennungssystem (gemäß [23] eologix, fos4x oder Wölfel). Im vorliegenden Fall wird das zusätzliche externe Eiserkennungssystem IDD.Blade von Wölfel verbaut [30]. Somit kann Eisansatz auch im Stillstand oder im Trudelbetrieb der WEA erkannt werden und das automatische Wiederanfahren oberhalb von Windgeschwindigkeiten von 5 m/s ist als sicher zu bewerten [23].

Seitens des Auftraggebers wird bestätigt [31], dass die geplante Anlage mit einer Rotorblattheizung ausgestattet wird. Durch den Einsatz einer Rotorblattheizung kann, an einer wegen Eiserkennung gestoppten Anlage, die Zeit der Vereisung verkürzt und dadurch der Ertragsausfall vermindert werden. Um zu gewährleisten, dass der Einsatz der Blattheizung nicht zu unerwartetem Eiswurf führt, ist gemäß [23] der Betrieb der Rotorblattheizung mit den Standardeinstellungsparameter nur bei einer stillstehenden WEA möglich. Durch die Verwendung des externen Eiserkennungssystems IDD.Blade von Wölfel wird ein automatischer Wiederanlauf nach Vereisung und Einsatz einer Rotorblattheizung als ausreichend sicher bewertet [23]. Nach [23] wird keine Beeinflussung der Vereisungsmessung durch die Erwärmung der Luft im inneren des Rotorblatts angenommen, sofern die Hinweise nach [24] eingehalten werden.

Das Eiserkennungssystem ist nicht als Sicherheitssystem im Sinne der DIN EN 61508 [47] qualifiziert und gilt als betriebliches System. Damit kann dem Eiserkennungssystem auch keine hohe Effektivität als Sicherheitsfunktion zugeordnet werden. Im Rahmen von [47] gilt somit eine Versagenswahrscheinlichkeit von 10%. Dies bedeutet, dass davon ausgegangen werden muss, dass sich die Anlage in 10 % aller Fälle, bei denen Eisansatz herrscht, im Störbetrieb befindet.

Hinsichtlich der für die Analyse im Störbetrieb benötigten Betriebsdrehzahlkennlinie liegen keine anlagenspezifischen Daten vor. Entsprechend wird auf Basis des angegebenen Rotordrehzahlbereichs [28][29] eine konservative Annahme getroffen.

In [32] ist die Funktionsweise der Blattheizung bei Eisansatz beschrieben. Zur Enteisung ist vorgesehen für eine Dauer von 4 Stunden zu heizen, bevor die Anlage wieder in Betrieb gehen kann. Es wird konservativ davon ausgegangen, dass bei starkem Eisansatz ein weiterer Enteisungszyklus erforderlich ist, sodass von einer Heizdauer von 8 Stunden ausgegangen wird.

In dieser Zeit können sich Eisstücke durch das Abtauen der Blattheizung von den Rotorblättern lösen. Der Einfluss auf das Risiko durch die Blattheizung wird nach Abschnitt 5.4 berücksichtigt.

1.4 Meteorologische Eingangsdaten

1.4.1 Windstatistik für die Eisfallberechnungen

Für die Berechnungen wird die auf Basis des Berichts [7] für den Standort und für die hier betrachtete Nabenhöhe generierte Windstatistik und der Exponent der Windscherung (α) herangezogen. Aufgrund der unterschiedlichen Geländehöhen wird für beide Anlagen eine Windstatistik erzeugt und hier abgebildet.

Die nachfolgenden Tabellen stellen eine Zusammenfassung dieser Eingangsdaten dar.

Windstatistik			
Sektorielle Windstatistik in Nabenhöhe			
Sektor	**Häufigkeiten**	**A-Parameter**	**k-Parameter**
[°]	**[%]**	**[m/s]**	**[-]**
345 - 015	4.1	4.9	2.00
015 - 045	2.8	5.2	1.81
045 - 075	5.8	8.3	2.14
075 - 105	12.6	10.4	1.98
105 - 135	4.6	6.9	1.74
135 - 165	3.1	4.8	1.57
165 - 195	4.8	5.0	1.57
195 - 225	14.9	8.7	2.04
225 - 255	19.0	8.7	2.08
255 - 285	12.3	7.7	1.83
285 - 315	9.4	6.0	1.61
315 - 345	6.5	4.9	1.86

Windprofil	
Exponent der Windscherung	0.28

Windrose

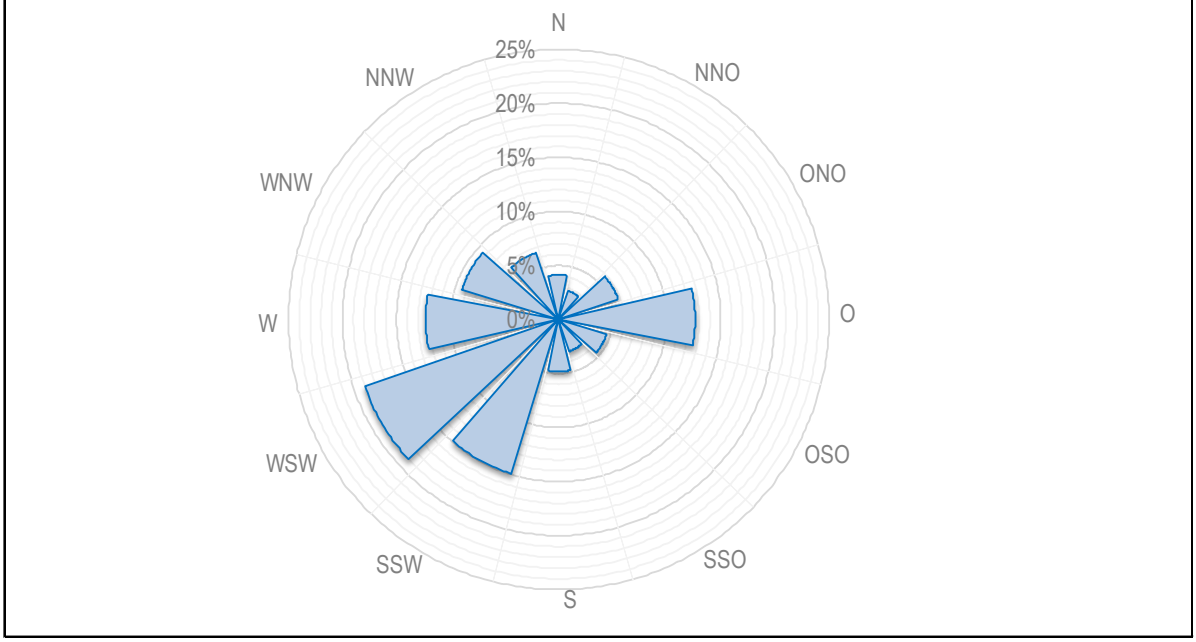


Tabelle 3: Zusammenfassung der wichtigsten Parameter der ausgewählten Windstatistik (WEA2_BUS).

Die höchsten Windgeschwindigkeiten (> 25 m/s) treten in dem Sektor O auf.

Windstatistik

Sektorielle Windstatistik in Nabenhöhe			
Sektor	**Häufigkeiten**	**A-Parameter**	**k-Parameter**
[°]	**[%]**	**[m/s]**	**[-]**
345 - 015	4.1	4.2	2.00
015 - 045	2.8	4.9	1.70
045 - 075	5.8	10.5	2.11
075 - 105	12.6	11.5	1.97
105 - 135	4.6	6.8	1.72
135 - 165	3.1	4.4	1.56
165 - 195	4.8	4.5	1.54
195 - 225	14.9	9.0	2.01
225 - 255	19.0	9.4	2.09
255 - 285	12.3	8.5	1.84
285 - 315	9.4	6.2	1.59
315 - 345	6.5	4.2	1.84

Windprofil	
onent der Windscherung	0.23

Windrose

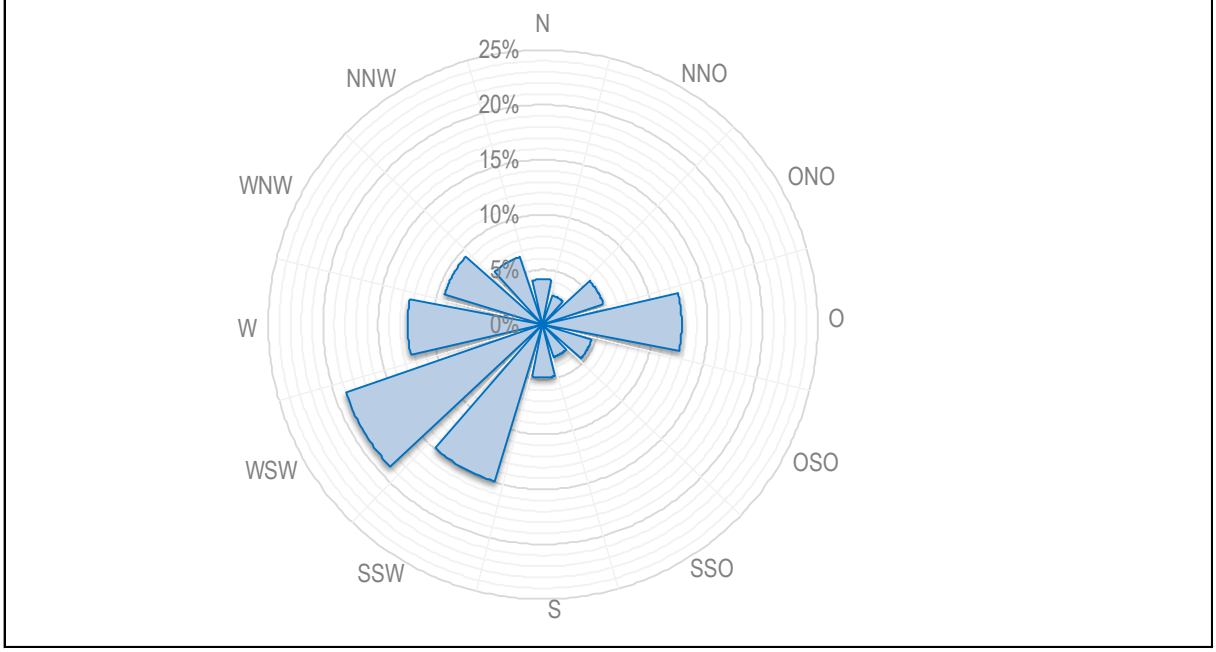


Tabelle 4: Zusammenfassung der wichtigsten Parameter der ausgewählten Windstatistik (WEA4_BUS).

Die höchsten Windgeschwindigkeiten (> 25 m/s) treten in dem Sektor O auf.

1.4.2 Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage

In Anlehnung an [44] werden als Eingangsdaten für die Risikobewertung die Anzahl der Tage pro Jahr mit Eisfallpotenzial standortspezifisch abgeschätzt.

Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage	
Standort	**Anzahl an Vereisungstagen**
Bustertkopf	38

Tabelle 5: Standortspezifische Abschätzung der Vereisungstage auf Basis von [44].

Die in obiger Tabelle angegebene Anzahl an Vereisungstagen ist stark abhängig von der Lage und der Höhe über NN. Genauere Angaben zur Herleitung sind in Abschnitt 5.7.1.3 zu finden.

1.5 Untersuchungsobjekte am Standort

Für die Bezeichnung der Untersuchungsobjekte wird folgende Nomenklatur verwendet: XY.Z. Dabei bezeichnet X einen bestimmten Objekttyp (z.B. Schiene, Landesstraße, Zuwegung). Gibt es mehrere Untersuchungsobjekte eines Typs, werden diese mit Y nummeriert. Z gibt den Bezug zur nächstgelegenen WEA an (siehe Tabelle 6).

Einheitliche Nomenklatur der Untersuchungsobjekte			
Form:	**XY.Z**		
Legende:			
X	Objekttyp	A	Schienenstrecke
		B	Landesstraße
		C	Gemeindeweg
		W	Kranstellfäche / Zuwegung
Y	Nummerierung der jeweiligen Objekttypen	1, 2, …	
Z	Nummerierung der WEA	1, 2, …	

Tabelle 6: Nomenklatur der Untersuchungsobjekte.

Entsprechend der Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Landesentwicklung und Wohnen über Technische Baubestimmungen (Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – VwV TB), Ziffer 2 der Anlage A 1.2.8/6 [1] werden mögliche Untersuchungsobjekte in einem Radius von 1.5 x (Rotordurchmesser + Nabenhöhe) um die untersuchten Anlagen ermittelt. Um aus risikoorientierter Sicht relevante Untersuchungsobjekte zu identifizieren, wird in einer Vorabanalyse eine konservative Berechnung durchgeführt und Objekte, für die das Risiko vernachlässigbar, aus der Betrachtung herausgenommen. Die relevanten Untersuchungsobjekte werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Hierbei werden die minimalen Abstände zu der jeweils nächstgelegenen WEA angegeben, wobei der Abstand auf 5 m gerundet wird. Des Weiteren soll hierbei beachtet werden, dass die Genauigkeit dieser Angabe auf die Genauigkeit der Kartengrundlage [16] zurückzuführen ist. Weiterhin werden in der folgenden Tabelle die relevanten Expositionsszenarien (Wegkategorien) gemäß Abschnitt 5.7.1.3 mit aufgeführt

Bezeichnung	Objekt	Minimaler Abstand zur jeweiligen WEA	Expositionszenario (Wegekategorie)
W1.2	Kranstellfläche	10 m (WEA 2)	Siehe Kapitel 2.4
W2.2	Zuwegung	35 m (WEA 2)	
W3.2	Fundament	0 m (WEA 2)	
B1.2	Bundesstraße B500	190 m (WEA 2)	10000 Kfz / d[1]
D1.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	105 m (WEA 2)	gelegentlich
D2.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	105 m (WEA 2)	regelmäßig
D3.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	190 m (WEA 2)	normalerweise nicht
E1.2	Waldweg	10 m (WEA 2)	regelmäßig
E2.2	Waldweg	100 m (WEA 2)	gelegentlich
E3.2	Waldweg	150 m (WEA 2)	gelegentlich
G1.2	Grillplatz	140 m (WEA 2)	180 min / Winterhalbjahr
W4.4	Kranstellfläche	10 m (WEA 4)	Siehe Kapitel 2.4
W5.4	Zuwegung	70 m (WEA 4)	
W6.4	Fundament	0 m (WEA 4)	
D4.4	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	20 m (WEA 4)	regelmäßig
D5.4	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	185 m (WEA 4)	regelmäßig
E4.4	Waldweg	0 m (WEA 4)	normalerweise nicht
E5.4	Waldweg	125 m (WEA 4)	normalerweise nicht
E6.4	Waldweg	135 m (WEA 4)	selten
E7.4	Waldweg	200 m (WEA 4)	selten

Tabelle 7: Objekte in der Umgebung der betrachteten Anlagenstandorte.

[1] Die Zahl ist eine Schätzung gemäß https://www.statistik-bw.de/Verkehr/KFZBelastung/DTV.jsp. Es liegen keine Daten für eine Verkehrszählung in der Nähe des Windparks vor.

1.6 Graphische Darstellung

Die nachfolgenden Abbildungen stellen einen Überblick der lokalen Situation dar. Es sind jeweils die betrachtete WEA und die Untersuchungsobjekte auf einer topographischen Karte abgebildet.

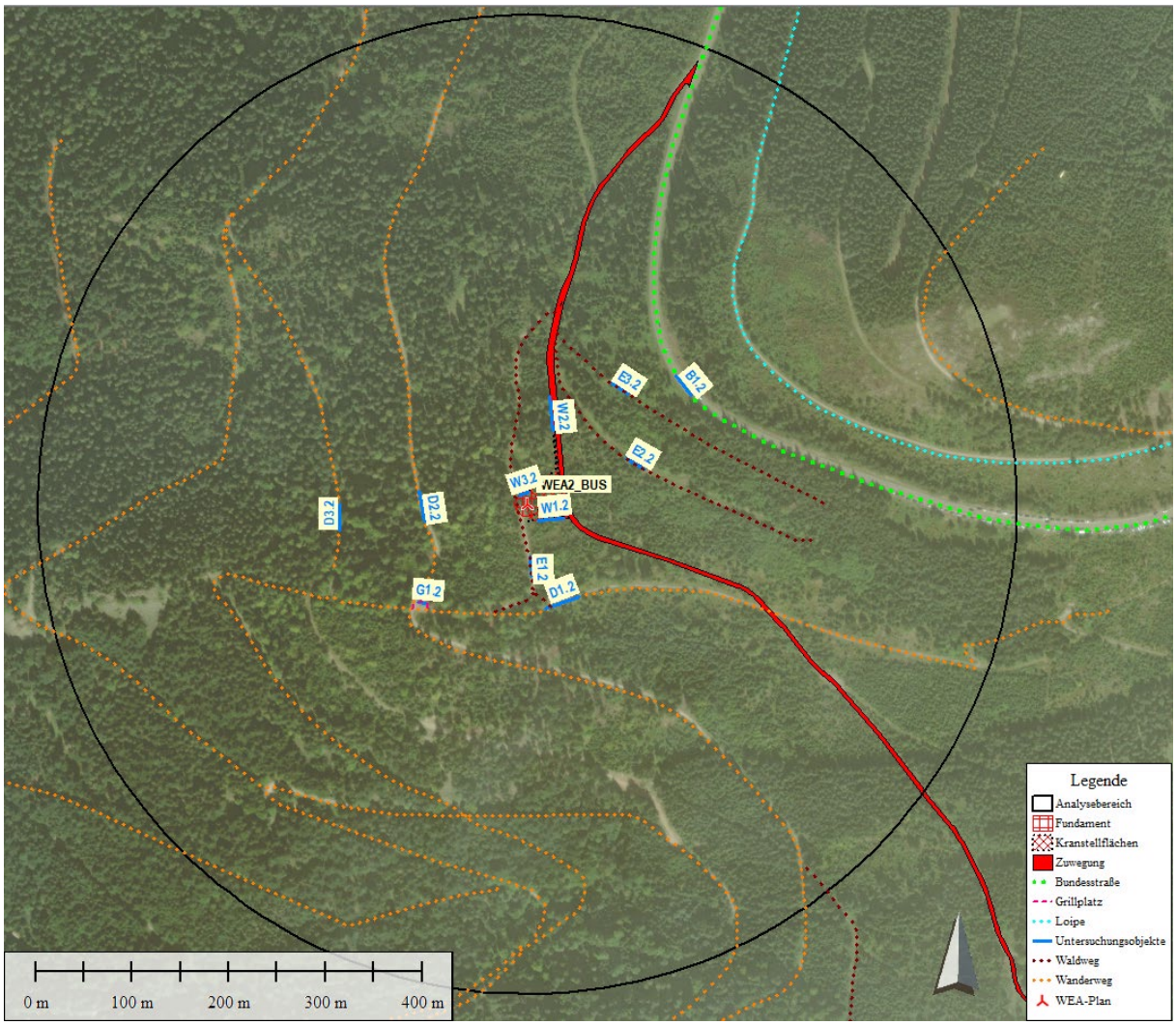


Abbildung 1: **Digitales Luftbild [16] mit den untersuchten Objekten am Standort (hellblaue Signatur) sowie Standort der betrachteten WEA 2 ( ).**

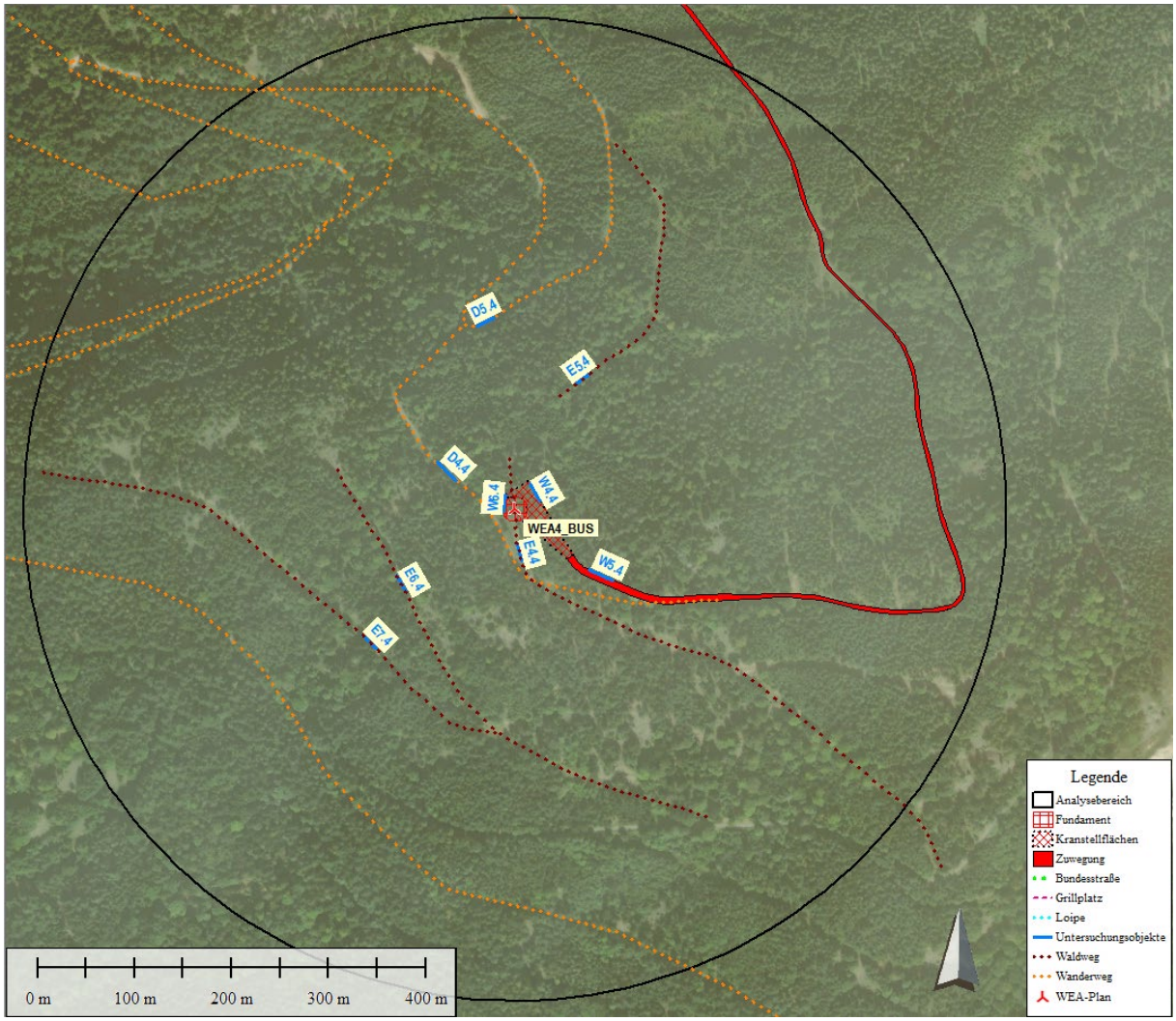


Abbildung 2: **Digitales Luftbild [16] mit den untersuchten Objekten am Standort (hellblaue Signatur) sowie Standorte der betrachteten WEA 4 ( ).**

2 Ermittlung des von den Anlagen ausgehenden Gesamtrisikos

In den folgenden Kapiteln werden die Risiken für alle Objekte aus

Bezeichnung	Objekt	Minimaler Abstand zur jeweiligen WEA	Expositionszenario (Wegekategorie)
W1.2	Kranstellfläche	10 m (WEA 2)	Siehe Kapitel 2.4
W2.2	Zuwegung	35 m (WEA 2)	
W3.2	Fundament	0 m (WEA 2)	
B1.2	Bundesstraße B500	190 m (WEA 2)	10000 Kfz / d
D1.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	105 m (WEA 2)	gelegentlich
D2.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	105 m (WEA 2)	regelmäßig
D3.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	190 m (WEA 2)	normalerweise nicht
E1.2	Waldweg	10 m (WEA 2)	regelmäßig
E2.2	Waldweg	100 m (WEA 2)	gelegentlich
E3.2	Waldweg	150 m (WEA 2)	gelegentlich
G1.2	Grillplatz	140 m (WEA 2)	180 min / Winterhalbjahr
W4.4	Kranstellfläche	10 m (WEA 4)	Siehe Kapitel 2.4
W5.4	Zuwegung	70 m (WEA 4)	
W6.4	Fundament	0 m (WEA 4)	
D4.4	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	20 m (WEA 4)	regelmäßig
D5.4	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	185 m (WEA 4)	regelmäßig
E4.4	Waldweg	0 m (WEA 4)	normalerweise nicht
E5.4	Waldweg	125 m (WEA 4)	normalerweise nicht
E6.4	Waldweg	135 m (WEA 4)	selten
E7.4	Waldweg	200 m (WEA 4)	selten

Tabelle 7 ermittelt, dargestellt und ggf. Maßnahmen empfohlen. Bei Objekten, die hier nicht betrachtet werden, obwohl sie in einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) liegen, ist es offensichtlich, dass das Risiko vernachlässigbar ist, da keine Treffer bzw. nur Einzeltreffer ermittelt wurden.

2.1 Tabellarische Übersicht der Risikoermittlung am untersuchten Standort

Objekt	Risiko (1/a) ohne Blattheizung	Risiko (1/a) mit Berücksichtigung der Blattheizung (s. Abschnitt 5.4)	Empfohlene Maßnahmen	Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen
W1.2	Siehe Kapitel 2.4			
W2.2				
W3.2				
B1.2 (kollektives Risiko)	2.74E-04 (hoch)	1.10E-04 (hoch)	Der Standort ist nahe bei der Bundesstraße, eine weitere Risikoreduktion kann erreicht werden, wenn auf der Bundesstraße im Gefährdungsbereich bei Eisfallbedingungen eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 70 km/h gilt.	Tolerabel bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 70 km/h
D1.2	8.72E-09 (vernachlässigbar)	3.49E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
D2.2	1.54E-07 (tolerabel)	6.16E-08 (akzeptabel)	keine	akzeptabel
D3.2	1.08E-10 (vernachlässigbar)	4.32E-11 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
E1.2	Maßnahmen analog Kranstellfläche, siehe Kapitel 2.4			
E2.2	2.12E-08 (akzeptabel)	8.72E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
E3.2	2.86E-09 (vernachlässigbar)	1.14E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
G1.2	1.72E-08 (akzeptabel)	6.88E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
W4.4	Siehe Kapitel 2.4			
W5.4				
W6.4				
D4.4	3.40E-06 (hoch)	1.36E-06 (hoch)	Aufstellen von an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchten mit Warnschildern die Fußgänger und Radfahrer eindeutig vor der Nutzung des Weges warnen. Ein weitere Risikoreduktion in den akzeptablen Bereich ist nur durch eine bauliche Sperrung des Weges erreichbar.	tolerabel
D5.4	1.81E-08 (akzeptabel)	7.24E-09 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

Objekt	Risiko (1/a) ohne Blattheizung	Risiko (1/a) mit Berücksichtigung der Blattheizung (s. Abschnitt 5.4)	Empfohlene Maßnahmen	Risikoeinschätzung nach Umsetzung der Maßnahmen
E4.4	Maßnahmen analog Kranstellfläche, siehe Kapitel 2.4			
E5.4	6.59E-10 (vernachlässigbar)	2.64E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
E6.4	1.44E-09 (vernachlässigbar)	5.76E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar
E7.4	2.89E-10 (vernachlässigbar)	1.16E-10 (vernachlässigbar)	keine	vernachlässigbar

Tabelle 8: Übersicht der Risikoanalyse für alle Untersuchungsobjekte

2.2 Maßnahmenempfehlung

Tabelle 8 stellt das Risiko aller Untersuchungsobjekte am untersuchten Standort dar. Dabei verbleibt für zwei Objekte das Risiko mit Berücksichtigung der Blattheizung im hohen Bereich. Dies betrifft einerseits die Bundesstraße B500 (Objekt B1.2) im Einflussbereich der WEA02, andererseits den Wanderweg D4.4 im Wirkungsbereich der WEA04.

Das hohe Risiko an der B500 liegt am minimalen Abstand zur WEA02, der bei einer Gesamthöhe von ca. 250 m nur 190 m beträgt[2]. Allerdings kann das Risiko durch eine temporäre Geschwindigkeitsbeschränkung an Tagen mit Eisfallbedingungen auf 70 km/h in den tolerablen Bereich reduziert werden.

Der gut ausgebaute Weg D4.4 hat einen minimalen Abstand von 20 m zur WEA04. Damit ist ein hohes Risiko verbunden. Mit der

- Aufstellung von an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchten mit Warnschildern die Fußgänger und Radfahrer eindeutig vor der Nutzung des Weges warnen

kann das Risiko in den tolerablen Bereich reduziert werden. Eine weitere Risikoreduktion lässt sich nur durch eine wirkungsvolle Absperrung und Verlegung des Weges im Winterhalbjahr des Weges erreichen. „Wirkungsvoll“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sie nicht problemlos umgangen werden kann.

[2] In der vorliegenden Analyse wird nur das Risiko durch Eisfall bzw. Eiswurf berücksichtigt. Risiken durch Havarie (Turmbruch, Rotorblattbruch und Gondelabwurf) werden nicht betrachtet.

2.3 Räumliche Verteilung des Risikos am untersuchten Standort

In diesem Abschnitt werden die Risikoprofile für die beiden relevanten Risiken aus Tabelle 8, die Lage der Untersuchungsobjekte sowie ein Umkreis von 505.5 m um die WEA, was einem Abstand von 1.5 x (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gemäß [1] entspricht, dargestellt.

Das Risiko wird für die Objekte B1.2 und D4.4, dargestellt und beurteilt. Dabei wird jeweils die maßgebliche Exposition verwendet (s.

Bezeichnung	Objekt	Minimaler Abstand zur jeweiligen WEA	Expositionszenario (Wegekategorie)
W1.2	Kranstellfläche	10 m (WEA 2)	Siehe Kapitel 2.4
W2.2	Zuwegung	35 m (WEA 2)	
W3.2	Fundament	0 m (WEA 2)	
B1.2	Bundesstraße B500	190 m (WEA 2)	10000 Kfz / d
D1.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	105 m (WEA 2)	gelegentlich
D2.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	105 m (WEA 2)	regelmäßig
D3.2	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	190 m (WEA 2)	normalerweise nicht
E1.2	Waldweg	10 m (WEA 2)	regelmäßig
E2.2	Waldweg	100 m (WEA 2)	gelegentlich
E3.2	Waldweg	150 m (WEA 2)	gelegentlich
G1.2	Grillplatz	140 m (WEA 2)	180 min / Winterhalbjahr
W4.4	Kranstellfläche	10 m (WEA 4)	Siehe Kapitel 2.4
W5.4	Zuwegung	70 m (WEA 4)	
W6.4	Fundament	0 m (WEA 4)	
D4.4	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	20 m (WEA 4)	regelmäßig
D5.4	Forst- und Feldweg teils deckungsgleich mit Wanderweg	185 m (WEA 4)	regelmäßig
E4.4	Waldweg	0 m (WEA 4)	normalerweise nicht
E5.4	Waldweg	125 m (WEA 4)	normalerweise nicht
E6.4	Waldweg	135 m (WEA 4)	selten
E7.4	Waldweg	200 m (WEA 4)	selten

Tabelle 7). Auf eine grafische Darstellung der Risiken für Objekte mit einem akzeptablen oder vernachlässigbarem Risiko wird verzichtet.

Hinweis für die Interpretation der georeferenzierten Ergebnisdarstellung in diesem Abschnitt: Das Gesamtrisiko (vgl. Abschnitt 5.6) wird entlang der untersuchten Wege berechnet, indem die durchschnittliche Geschwindigkeit eines Fußgängers mit der angesetzten Exposition und der simulierten Eisfallhäufigkeit verknüpft werden. Daher ist nicht das maximale („Peak“) Risiko auf einem Weg ausschlaggebend, vielmehr wird für die Risikobewertung das integrale Risiko berechnet, das sich für eine beliebige Person als Summe aller Einzelrisiken entlang eines Weges ergibt.

Die räumliche Verteilung des Risikos wurde ohne Berücksichtigung der Blattheizung dargestellt.

Die Darstellung des Risikoprofils in den nächsten Abschnitten ist schematisch in folgender Abbildung erläutert.

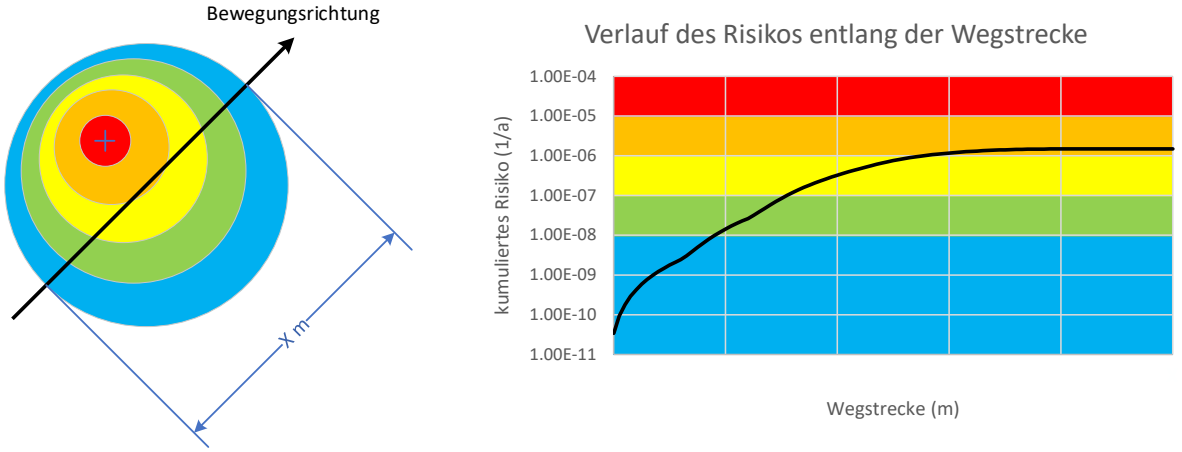
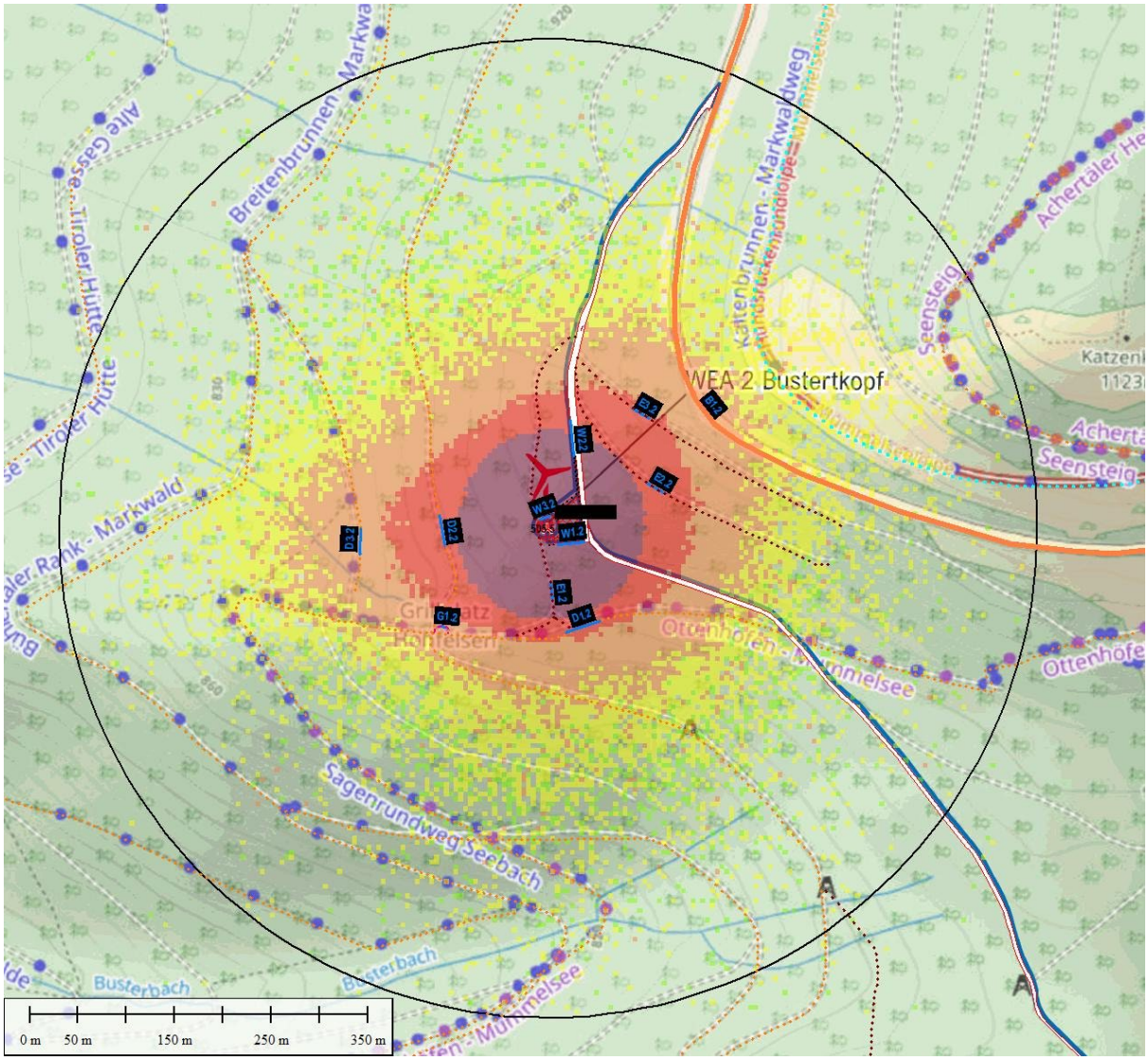


Abbildung 3: **Schematische Darstellung, wie sich das Risiko für einen Fußgänger entlang einer Wegstrecke entwickelt. Durchschreitet der Fußgänger den gesamten Gefährdungsbereich von X Meter so hat er sich in dem oben links eingezeichneten Weg (schwarzer Pfeil) in Summe einem hohen Risiko ausgesetzt. Wird der Weg verlegt, sodass er den orange schraffierten Bereich nicht mehr berührt, sinkt das aufsummierte Risiko in den tolerablen Bereich ab.**

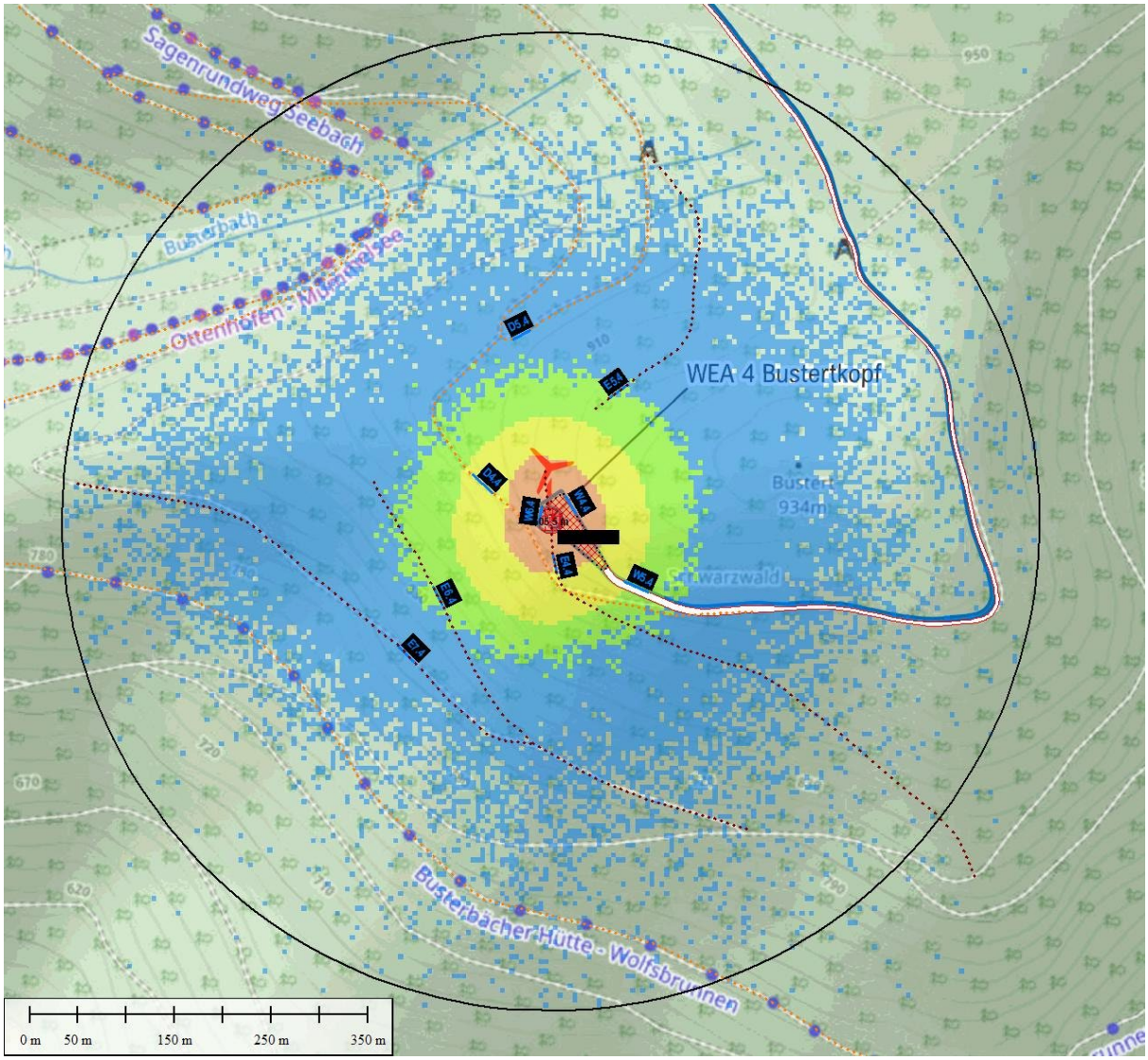
2.3.1 WEA02, Risikoprofil für die B500 (Objekt B1.2)



Legende der Risikokategorien			
	kein Treffer		hohes Risiko
	vernachlässigbares Risiko		sehr hohes, unakzeptables Risiko
	akzeptables Risiko		
	tolerables Risiko		

Abbildung 4: Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA02 inklusive des Umkreises von 500.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das kollektive Risiko für Autofahrer auf der B500. Dargestellt ist das Risiko ohne Blattheizung.

2.3.2 WEA04, Risikoprofil für den Wanderweg (Objekt D4.4)



Legende der Risikokategorien			
	kein Treffer		hohes Risiko
	vernachlässigbares Risiko		sehr hohes, unakzeptables Risiko
	akzeptables Risiko		
	tolerables Risiko		

Abbildung 5: **Übersicht zur Lage der Untersuchungsobjekte an der WEA04 inklusive des Umkreises von 500.5 m um die WEA herum und des Risikoprofils für das individuelle Risiko für Fußgänger auf dem Wanderweg D4.4. Dargestellt ist das Risiko ohne Blattheizung.**

2.4 Risiko für Kranstellflächen und Zuwegung

Bei den Kranstellflächen und dem Aufstellungsorten der betrachteten WEA gibt es eine größere freie Fläche, bei der davon ausgegangen werden muss, dass sie von Passanten bewusst benutzt wird, um in die Nähe der WEA zu gelangen. Hinsichtlich der Zuwegungen bzw. Stichwege, Kranstellflächen und Aufstellungsorte der WEA wird somit ein gewollter Aufenthalt eines Fußgängers im Gefahrenbereich unterstellt. Zusätzlich werden hier auch Wege, die in unmittelbarer Nähe der Windenergieanlage verlaufen (Abstand kleiner oder gleich 10 m) in diesem Abschnitt mit berücksichtigt, da hier das Risiko generell durch geeignete Maßnahmen beherrscht werden muss.

Bei Eisfallbedingungen besteht in diesem Fall bereits bei einmaligem Vorkommen ein hohes Risiko.

Es ist dafür zu sorgen, dass ein unbefugtes Betreten des Gefahrenbereichs bei Eisfallbedingungen wirkungsvoll vermieden wird.

Daher wird empfohlen, mindestens eine der folgenden gleichwertigen Maßnahmen umzusetzen:

ENTWEDER

- Anbringen einer Umzäunung, mittels derer die Kranstellfläche großzügig abgesichert ist.

ODER

- Anbringen eines Schildes mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät.

ODER

- Großzügige Abschrankung aller Zuwegungen zur Kranstellfläche, mit einem eindeutigen Warn- oder Verbotsschild, um ein Betreten des Gefährdungsbereichs zu vermeiden.

Durch Realisierung mindestens einer der drei Maßnahmen lässt sich das Risiko ausreichend reduzieren. Diese Maßnahmenempfehlung gilt für die Objekte W1.2, W2.2, W3.2, W4.4, W5.4, W6.4, E1.2 und E4.4.

3 Hinweise zur Erstellung der Analyse

- Bezugnehmend auf die Dokumente, die über die Eignung des Eiserkennungssystems zur zuverlässigen Abschaltung der Anlage bei Vereisung vorliegen (siehe Abschnitt 1.3), werden die Berechnungen bei einer im Trudelbetrieb befindlichen Anlage durchgeführt.
- Die Zuverlässigkeit des Eisansatzerkennungssystems ist von zentraler Bedeutung für die Risikobewertung, da die Rotordrehzahl eine entscheidende Rolle für die simulierten Fallweiten spielt. Für die funktionale Sicherheit dieses Systems werden die Vorgaben der IEC 61508-1 [46] angenommen.
- Als Eingangsparameter für die Umdrehungszahl im Trudelbetrieb sowie für die Drehzahl im Betrieb wird die über den Auftraggeber übermittelte bzw. vom Anlagenhersteller zur Verfügung gestellte Information verwendet[26][27][28].
- Da keine anlagenspezifischen Daten zur Betriebsdrehzahlkennlinie vorliegen, wird auf Basis des angegebenen Rotordrehzahlbereichs [28] eine konservative Annahme getroffen.
- Die Unsicherheitsbetrachtung des Prüfberichts [7] weist hinsichtlich der meteorologischen Eingangsdaten eine Unsicherheit von 10.8% bzw. der Windfeldmodellierung am Standort eine Unsicherheit von 4.9% aus. Dies ergibt eine kombinierte Unsicherheit von 11.9%.
- Für die Berechnungen wird eine ganzjährige Windstatistik verwendet, d.h. es werden die über das ganze Jahr verteilten Windereignisse in eine mittlere Windstatistik zusammengefasst. Die Betrachtung der jahreszeitlich abhängigen bzw. bei Eisfallbedingungen tatsächlich vorherrschenden Windverhältnisse ist basierend auf der verfügbaren Datengrundlage nicht möglich.
- Die Ergebnisse der Simulationen zeigen eine statistische Verteilung der Fallweiten von insgesamt 10 Millionen herunterfallenden Eisstücken. Eine Aussage über die Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit von auftretendem Eisfall am Standort wird nicht getroffen.
- Die Topographie des Standorts wird in der Eisfallsimulation in Form eines dreidimensionalen Geländemodells berücksichtigt. Eine evtl. Bewaldung wird bei der Berechnung der Fallweiten nicht berücksichtigt.
- Es ist ebenfalls zu beachten, dass sich der geplante Standort in einem geschlossenen Waldgebiet befindet, wobei Bäume in einigen Fällen eine abschirmende Wirkung für die naheliegenden Wege gegen abfallende Eisstücke haben können. Da jedoch nicht davon auszugehen ist, dass jedes Eisstück durch die Kollision mit einem Baum abgefangen wird und die Verteilung der Bäume sowie deren eventuell abschirmende Wirkung modellarisch nicht berücksichtigt werden kann, sind die Berechnungsergebnisse ebenfalls als leicht konservativ anzusehen.

Haftungsausschluss

Der vorliegende Bericht wurde nach bestem Wissen und Gewissen und nach allgemeinen Regeln der Technik angefertigt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass das durch den Auftraggeber bzw. Dritte zur Verfügung gestellte Material (Schriften, Aufzeichnungen, Daten, Diagramme, etc.) von der TÜV Süd IS nicht auf Richtigkeit geprüft werden konnte, daher hierfür keine Fehlerfreiheit garantiert und keine Haftung übernommen werden kann.

Die ermittelten Ergebnisse sind nur im Kontext mit dem gesamten Bericht und unter besonderer Berücksichtigung der Hinweise und ermittelten Unsicherheiten zu den Ergebnissen zu verstehen.

Es soll zudem darauf hingewiesen werden, dass alle prognostizierte Werte im Bereich der Windenergienutzung sehr hohen Unsicherheiten unterliegen, da modellarische Berechnungen und entsprechende Parametrisierungen unter Umständen erhebliche Abweichungen zu realen Werten oder weiteren Modellergebnissen aufzeigen können.

Des Weiteren kann nicht gewährleistet werden, dass die anlagenspezifischen Angaben und Daten des Herstellers (z.B. Leistungskennline, Schallpegel, Standsicherheitswerte, Schubbeiwerte) eingehalten werden. Hierzu sollte ein geeigneter und wirksamer Garantievertrag abgeschlossen werden.

Zukünftige Änderungen (z.B. Umgebungsbedingungen, Anlagenparametrisierung, Klimatologische Bedingungen), können sich auf das Ergebnis auswirken und konnten u.U. nicht berücksichtigt werden.

Jährliche Schwankungen des Klimas können von den vorliegenden langjährigen ermittelten Prognosewerten erheblich bis sehr stark abweichen und sollten berücksichtigt werden.

Der vorliegende Bericht entspricht dem Charakter einer Prognose mit den zusätzlichen im Kontext stehenden Angaben zu den Unsicherheiten.

Für eine auszugsweise Vervielfältigung wird keine Haftung oder Gewähr für die Prognosewerte übernommen.

4 Literaturverzeichnis

[1] Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Landesentwicklung und Wohnen über Technische Baubestimmungen (Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – VwV TB), vom 12. Dezember 2022 – Az.: MLW21-26-11/2, Anlage A 1.2.8/6 zur „Richtlinie für Windenergieanlagen“

[2] IEC 60050-415: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch, Berlin (D), 1999

[3] IEC 61400-1: Wind Turbines – Part 1: Design Requirements, International Electrotechnical Commission, Geneva (CH), Aug. 2005

[4] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Angebot AN-WG-2309-423-BW, Regensburg, 13.12.2023

[5] Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG, Stefan Böhler, Beauftragung Eisfallanalyse für WP Bustertkopf, Lahr/Schwarzwald, 18.12.2023

[6] Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG, Teresa Frenssen, Koordinaten des Windparks Bustertkopf, Anlage: A3_Übersichtsplan_WP_B500_10_07_2024.pdf, E-Mail vom 10.07.2024

[7] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Ermittlung Windstatistk im Rahmen des Windgutachtens für den Standort Bustertkopf, MS-2401-031-BW-de, vom 12.08.2024

[8] C. Morgan and E. Bossanyi, Wind turbine icing and public safety - a quantifiable risk?, Proceedings of Boreas III conference, Sariselka, Finland 1996

[9] E. Bossanyi and C. Morgan, Wind turbine icing – its implications for public safety, Proceedings of European Union Wind Energy Conference 1996

[10] C. Morgan, E. Bossanyi and H Seifert, Assessment of safety risks arising from wind turbine icing, Proceedings of EWEC ‘97 conference, Dublin 1997

[11] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Richtlinie für Windenergieanlagen, Berlin (D), 2004

[12] OVG-Rheinland-Pfalz, Urteil 1 A 11330/07.OVG vom 29.10.2008

[13] René Cattin, Alpine Test Site Guetsch – Handbuch und Fachtagung (Schlussbericht), Bern, 31.12.2008

[14] S. Biswas, P. Taylor and J. Salmon, A model of ice throw trajectories from wind turbines, Research Article – Wind Energy 2012; 15:889-901, 2011

[15] Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage

[16] Global Mapper v12.02 - world imagery, Stand: 30.09.2024

[17] Landesamt für Geoinformation und Landesentwicklung Baden-Württemberg, TOP10 Ortsplan 1:10‘000 Baden-Württemberg, Version1, 2008

[18] Landesamt für Geoinformation und Landesentwicklung Baden-Württemberg, ATKIS Digitale Topographische Karte 1:10‘000, Online verfügbar: https://www.geoportal-bw.de/#/(sidenav:search-candidates/), Stand: 26.09.2024

[19] Landesamt für Geoinformation und Landesentwicklung Baden-Württemberg, Basiskarte BW, Online verfügbar: https://www.geoportal-bw.de/#/(sidenav:karten), Stand: 26.09.2024

[20] Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG, Thomas Herdt, Informationen zur touristischen Freizeitwegen für den Windpark Bustertkopf, via https://e-werk-mittelbaden.sharefile.eu/d-se1b9861b857a40e1af3d239a32fa4bef vom 13.08.2024: A3_Lageplan_WP_Bustertkopf_dauerhafte_Flächen_13_08_2024.pdf

[21] Landesamt für Geoinformation und Landesentwicklung Baden-Württemberg, Topographische Freizeitkarte, Online verfügbar: https://www.geoportal-bw.de/#/(sidenav:menu),Stand: 26.09.2024

[22] Landesamt für Geoinformation und Landesentwicklung Baden-Württemberg, Digitales Geländemodell DGM25, 2013

[23] TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG, Bericht Nr.: 8111 7247 373 D Rev.2 vom 28.02.2022: Gutachten Eisansatzerkennung an Rotorblättern von ENERCON Windenergieanlagen durch das ENERCON Kennlinienverfahren und externe Eissensoren.

[24] DNV GL – Energy Renewables Certifcation, Report Nr.: 75148, Rev. 0 vom 21.10.2019: Gutachten Ice Detection System IDD.Blade.

[25] DNV, Type Certificate Ice Detection System IDD.Blade, Certificate No.: TC-DNV-SE-0439-03577-3, 2023-01-17, valid until: 2025-01-16

[26] Enercon GmbH, Christian Kremper: Bestätigung der Gültigkeit von [23] für den geplanten WEA-Typ, E-Mail vom 03.06.2024

[27] Enercon GmbH, Christian Kremper, Informationen zum Trudelbetrieb, E-Mail vom 03.06.2024
Anlage: D0630561_4.1_de_TB_Anhalten der Windenergieanlage.pdf

[28] Enercon GmbH, Christian Kremper, Informationen zum Rotordrehzahlbereich zur Annahme bzgl. Betriebsdrehzahlkennlinie, E-Mail vom 03.06.2024
Anlage: D02772001_5.0_de_General Design Conditions E-175 EP5 - 6000 kW.pdf

[29] Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG, Teresa Frenssen, Informationen zum Leistungsverhalten zur Annahme bzgl. Betriebsdrehzahlkennlinie, E-Mail vom 16.05.2024
Anlage: D02772017_2.0_de_Betriebsmodus OM-0-0 - E-175 EP5 - 6000 kW.pdf

[30] Enercon GmbH, Christian Kremper, Informationen zum geplanten Eiserkennungssystem, E-Mail vom 03.06.2024

[31] Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG, Teresa Frenssen, Informationen zur Rotorblattheizung, E-Mail vom 16.05.2024

[32] Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG, Teresa Frenssen, detaillierte Informationen zur Rotorblattheizung, E-Mail vom 24.06.2024
Anlage: D02814779_3.0_de_TB_Blattheizung (PI-CS).pdf

[33] Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG, Thomas Herdt, Information zum Untersuchungsobjekt – Zuwegung, Fundament und Kranstellfläche – bzgl. WP Bustertkopf, via https://e-werk-mittelbaden.sharefile.eu/d-se1b9861b857a40e1af3d239a32fa4bef vom 13.08.2024: WP_Bustertkopf_Planung_Eisfall_12_08_2024.shp

[34] Elektrizitätswerke Mittelbaden AG & Co. KG, Teresa Frenssen, Bestätigung der Untersuchungsobjekte bzgl. WP Bustertkopf, E-Mail vom 01.10.2024

[35] Internetportal des Bureau of Transportation Statistics (BTS),
http://www.bts.gov/btsprod/nts/

[36] DIN EN 50126 - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit (RAMS), März 2000

[37] Health and Safety Executive (HSE), *ALARP-Prinzip*
http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpglance.htm

[38] Health and Safety Executive (HSE), The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations, 1992 (Revised Edition), London: HMSO

[39] *„Risikomanagement im Rahmen der Störfallverordnung“,* Bericht der Störfallkommission beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, SFK-GS-41, 21.04.2004

[40] Methods for determining the Potential Damage, CPR16E, CIP-data of royal library

[41] Floyd D. J., Ball P. J., Societal Risks, Hongkong, 1993

[42] Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung, Proske, Dresden, 2004

[43] Risk Acceptance Criteria, Hoffmann A., Klein G., Weidl T., TÜV SÜD Industrie Service GmbH, 12th International Probabilistic Workshop, Weimar 2014

[44] The Spatial Distribution of Icing in Germany. Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurements of Icing, Bodo Wichura, Deutscher Wetterdienst, September 2013

[45] IEA Wind TCP Task 19: International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments, 2022

[46] IEC 61508-1: Functional Safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements, 2010

[47] DIN EN 61508-1:2011-02; Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 61508-1:2010); Deutsche Fassung EN 61508-1:2010

5 Anhang

5.1 Eiswurf und Eisfall bei Windenergieanlagen

Das Thema Eiswurf / Eisfall bei WEA wurde detailliert im WECO-Projekt der EU untersucht (Wind Energy Production in Cold Climate). Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf den daraus gewonnenen Erkenntnissen [13].

Eiswurf bzw. Eisfall tritt bei Windenergieanlagen in erster Linie in Abhängigkeit von der umgebenden Temperatur sowie der umgebenden Luftfeuchtigkeit auf. Man unterscheidet zwischen den zwei Begrifflichkeiten Eiswurf und Eisfall. Bei Eiswurf wird die Wurfweite einer sich in Betrieb befindlichen rotierenden Anlage untersucht, bei Eisfall die Fallweite einer stillstehenden WEA. Im Rahmen dieses Berichtes wird auch bei einer sich im Trudelbetrieb befindlichen WEA der Begriff Eisfall verwendet.

In Summe existieren sieben bekannte Möglichkeiten zur Erkennung von Eisansatz an einer Windkraftanlage:

- Eisdetektoren auf der Gondeloberseite: Speziell angebrachte Sensoren beobachten die Umgebungsbedingungen und schalten die Anlage bei Eisansatz ab. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass die meteorologischen Bedingungen auf der Gondel von denjenigen Bedingungen abweichen können, denen das Rotorblatt während der vollständigen Umdrehung ausgesetzt ist (z.B. durch tiefhängende Wolkenschichten).
- Leistungskurvenverfahren: Hierbei wird die Leistungskurve der Anlage detailliert verfolgt und mit der zu erwartenden Kennlinie bei entsprechenden Umgebungsbedingungen verglichen. Abweichungen sind auf Änderungen der aerodynamischen Eigenschaften durch Eisansatz an den Rotorblättern zurückzuführen und die Anlage wird abgeschaltet. Hierbei sollte berücksichtigt werden, dass im Idealfall zumindest ein verwendetes Gondelanemometer beheizt wird, um nicht ebenfalls durch Vereisungsbedingungen ausgelöste unzuverlässige Werte aufzuzeichnen.
- Vibrationsüberwachung: In Verbindung mit den notwendigen Umgebungsbedingungen kann eine auftretende Unwucht an der Rotornabe ebenfalls das Erkennen von wachsender Eisbildung an den Rotorblättern signalisieren.
- Eigenschwingungsanalyse: Bei Vereisung ändern sich die Eigenfrequenzen der Rotorblätter aufgrund der Massenzunahme. Dieses Prinzip wird zur Erkennung von Eisansatz verwendet. Ein Vorteil dieses Systems ist, dass die Massenzunahme und dadurch die Änderung der Eigenschwingung auch bei Stillstand der Anlagen erkannt werden. Zudem kann die Eisfreiheit der Anlage nach dem gleichen Prinzip zeitnah festgestellt werden.
- Verwendung zweier Anemometer: Bei dieser Art der Eisbeobachtung werden auf der Gondeloberseite zwei Referenzanemometer installiert. Davon ist je eines beheizt bzw. unbeheizt. Bei einem Einfrieren des unbeheizten Anemometers wird davon ausgegangen, dass Vereisungsbedingungen vorliegen und die Anlage wird abgestellt. Es ist jedoch ebenfalls zu beachten, dass die meteorologischen Bedingungen auf der Gondeloberseite und in den durch die Rotorblätter durchstreiften Höhen voneinander abweichen können.
- Eisdetektoren auf dem Rotorblatt: Hier werden mehrere autark arbeitende, flache, kapazitive Sensoren entlang jedes Rotorblattes aufgeklebt. Die Veränderung der Impedanz an der Oberfläche des Sensors erlaubt die Detektion von Vereisung und per Funk wird ein Signal an die Anlagensteuerung übertragen. Dieses System ist unabhängig vom Betriebszustand der Anlage und kann daher auch die Überprüfung auf Eisfreiheit nach dem Abtauen ermöglichen.

- Eisdetektoren via Kamerasystem: 3D-Kameras werden an den Anlagen installiert, mithilfe derer Eisfall beobachtet und ausgewertet wird. Auf Basis des Bildmaterials lässt sich Vereisung und deren Zeitpunkt sowie das Lösen von Eis vom Rotorblatt detektieren.

Als ein erstes Indiz für Vereisungsbedingungen am Standort kann auftretende Vereisung von Leiterseilen bei Hochspannungsleitungen oder Eisbruch in Wäldern angesehen werden.

Generell kann gesagt werden, dass sich erst ein nennenswerter Eisansatz in der Größenordnung von etwa 40% der Profiltiefe bilden muss, ehe sich einzelne Eisstücke vom Rotor lösen und durch die hohe Blattspitzengeschwindigkeit einer sich in Betrieb befindlichen Anlage weggeschleudert werden. Die Überwachung der Leistungskurve registriert einen Einbruch der erzeugten Energie jedoch bereits bei ca. 3% Eisansatz am Rotorblatt, da dadurch die Aerodynamik stark gestört wird.

Die notwendigen Funktionen der Fernüberwachung und das Eingreifen in die Anlagensteuerung sind mittlerweile Stand der Technik und können als zuverlässig eingestuft werden. Eine Kombination der oben genannten Punkte unterstützt die Sicherheit der Anlagenabschaltung, so dass Eiswurf einer im Betrieb befindlichen Anlage mit hoher Sicherheit verhindert werden kann.

Gemäß der Richtlinie für Windenergieanlagen – Technischen Baubestimmungen [1] wird der Nachweis, dass der Eiswurf von einer sich im Betrieb befindlichen Anlage sicher ausgeschlossen werden kann, in Form einer gutachterlichen Stellungnahme eines unabhängigen Sachverständigen zur Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems gefordert.

Bezugnehmend auf die zur Verfügung gestellten Dokumente wird in den Berechnungen angenommen, dass die Betriebsführung der Anlage den Vereisungsfall zuverlässig erkennt und diese in der Folge sicher abgestellt wird bzw. in den Trudelbetrieb übergeht.

Es sollte im Vorhinein der Verwirklichung eines Windparks ein Prozedere entwickelt werden, wie eine WEA nach einer Vereisungssituation wieder in Betrieb genommen wird, da Eisfall bei einer geparkten WEA am häufigsten vorkommt (hier gibt es bei einsetzendem Tauwetter abfallende Eisstücke, die in Lee-Richtung abfallen). Eine stillstehende WEA ist dabei prinzipiell mit jedem anderen hohen Gebäude (Türme, Hochspannungsmasten, etc.) zu vergleichen. Bei diesen anderen Gebäudetypen ist aufgrund der Situierung innerhalb einer Stadt ebenso mit einer prinzipiellen Gefährdung von Passanten durch Eisfall zu rechnen. Aufgrund der Planungssituation von WEA in deutlicher Entfernung zu Siedlungsgebieten, jedoch aufgrund der Zuwegung in der Nähe von ausgebauten Straßen, ist eine mögliche Gefährdung öffentlicher Straßen und Feldwege gegeben. Zusätzlich ist zu beachten, dass vereisungsbedingt abgestellte Anlagen oftmals nicht stillstehen, sondern sich im Trudelbetrieb befinden. Hierbei erhalten die Eisstücke durch die langsame, aber vorhandene Bewegung der Rotorblätter eine Anfangsgeschwindigkeit, die abhängig von der jeweiligen Umdrehungszahl zu höheren Fallweiten führen als bei einer stillstehenden WEA.

Bei einer WEA kommt es je nach Rotorstellung zu unterschiedlichen Fallweiten. Die hierfür notwendigen Eingangsdaten (Größe und Masse des Eisstücks, aerodynamische Eigenschaften, etc.) für die Berechnungen werden aus vorhandenen Forschungsergebnissen und Richtlinien [8][9][10][15][45] abgeschätzt.

Die Eisstücke lösen sich von den Rotorblättern ab und werden aufgrund der Rotation des Rotors (Trudeln bzw. Betrieb) mit einer gewissen Anfangsgeschwindigkeit und -richtung abgeworfen. Danach sind zwei Effekte relevant. Zum einen die Bewegung beim Start des Eisstücks und zum anderen die Verfrachtung durch die umgebenden Windbedingungen.

Die Fallweiten schwerer Klareisstücke sind daher überwiegend durch die Anfangsgeschwindigkeit beim Ablösen bestimmt. Bei leichteren Raueisstücken kommt der Einfluss der Verfrachtung durch den Wind hinzu, sodass diese Eisstücke überwiegend von der WEA aus in

Mitwindrichtung zu finden sind. Ebenso verhält es sich mit der Umgebungsgeschwindigkeit. Bei geringeren Windgeschwindigkeiten überwiegt der Einfluss der Startbewegung und bei höheren Windgeschwindigkeiten die Verfrachtung mit dem Wind. Die Kombination aller dieser Faktoren spiegelt sich in der statistischen Verteilung wider.

5.2 Theoretische Berechnungsgrundlagen von Eiswurf bzw. Eisfall

In einer Untersuchung im Rahmen des WECO-Projektes im Schweizer Hochgebirge [13] wurden wichtige Erkenntnisse im Umgang von WEA mit Vereisung gesammelt. So wurden Vereisungszeiten vornehmlich nachts festgestellt. Dabei konnte hinsichtlich der Abschaltung der WEA eine sehr gute Trefferquote erzielt werden, so dass ein möglichst gefahrloser Betrieb von Anlagen möglich ist. Das an der beobachteten Anlage für Eiserkennung angewandte Leistungskurvenverfahren zeigte gute Ergebnisse. Während an dem eingesetzten Sonic Anemometer Vereisung erst nach derjenigen der Flügel einsetze, zeigte die Leistungskennlinie bereits ab Beginn des Vereisungsprozesses eine Abweichung von der erwarteten Kennlinie.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Eiswurfmodell entwickelt, welches basierend auf den meteorologischen Bedingungen am Standort sowie der Charakteristik der Windenergieanlage die Bahnkurve eines Eisstücks bis zum Aufprall auf der Erde berechnet [14]. Mit Hilfe einer standortspezifischen Windstatistik kann somit die Eiswurf- bzw. Eisfalltrefferhäufigkeit um die Anlage unter Berücksichtigung der Windverhältnisse bestimmt werden.

Bei der Berechnung von Eiswurf bzw. Eisfall durch WEA sollten die folgenden Eingangsparameter berücksichtigt werden:

- Rotordurchmesser D und Nabenhöhe NH in m
- Windgeschwindigkeit U(z) in m/s als Funktion der Höhe z
- Größe der Eisstücke (Stirnfläche A_{Eis} in m²)
- Dichte der Eisstücke ρ_{Eis} in kg/m³ und Masse m in kg
- Widerstandsbeiwert der Eisstücke C_D
- Startposition des herabfallenden Eisstücks auf dem Rotorblatt, beschrieben durch die radiale Position auf dem Rotorblatt (r in m), den Winkel der Rotorstellung in Bezug auf die Horizontale (θ in rad) sowie den Azimuthwinkel der Rotorfläche (φ in rad)
- Windprofil am Standort der WEA zur Bestimmung der Anfangswindgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Rotorposition
- Dichte der Luft ρ in kg/m³.

Mit diesen Eingangsdaten können für die Berechnung des Eiswurfes bzw. Eisfalls die folgenden Bewegungsgleichungen aufgestellt werden, wobei die Position des Eisstücks durch die Koordinaten x, y und z beschrieben wird:

$$m\ddot{x} = -\frac{1}{2}\,\rho\, C_D\, A_{Eis}\,(\dot{x} - U(z))\, W_{rel}$$

$$m\ddot{y} = -\frac{1}{2}\,\rho\, C_D\, A_{Eis}\,\dot{y}\, W_{rel}$$

$$m\ddot{z} = -mg - \frac{1}{2}\rho\, C_D\, A_{Eis}\,\dot{z}\, W_{rel}$$

mit: $W_{rel} = \sqrt{(\dot{x} - U(z))^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ (relative Windgeschwindigkeit)[3]

Es wird davon ausgegangen, dass ein Eisstück zum Zeitpunkt des Lösens vom Rotorblatt eine Anfangsgeschwindigkeit als Vektor besitzt, welche auf der Umdrehungsgeschwindigkeit und der Lage des Rotors basiert. Im Flug unterliegt es der Erdanziehung, dem Luftwiderstand,

[3] Überpunkt stellt die Ableitung nach der Zeit dar ($^{d}/_{dt}$)

welcher das Teilchen abbremst, sowie der Kraft des Windes, welche es aus seiner Bahn ablenkt.

5.3 Annahmen für die Eisfallberechnungen

Für die im Rahmen der vorliegenden Analyse durchgeführten Berechnungen werden folgende Annahmen getroffen, sofern durch vorhandene meteorologische Daten keine Verbesserung der Eingabeparameter erfolgen kann:

- Die Eisfall- bzw. Eiswurfberechnungen werden mit einer ganzjährigen Windstatistik durchgeführt. D.h. es werden die über das ganze Jahr verteilten Windereignisse in eine mittlere Windstatistik zusammengefasst. Dabei wird die Windstatistik als Weibullverteilung modelliert. Die Betrachtung der jahreszeitlich abhängigen bzw. bei Eisfallbedingungen tatsächlich vorherrschenden Windverhältnisse ist gemäß Task 19 [45] nicht relevant.
- Die Zuverlässigkeit des Eisansatzerkennungssystems ist von zentraler Bedeutung für die Risikobewertung, da die Rotordrehzahl eine entscheidende Rolle für die simulierten Fallweiten spielt. Für die funktionale Sicherheit dieses Systems werden die Vorgaben der IEC 61508-1 [46] angenommen.
- Die Simulation des Eisfalls erfolgt bei einer Anlage im Trudelbetrieb. Als Eingangsparameter für die Umdrehungszahl im Trudelbetrieb wird die vom Anlagenhersteller mitgeteilte windgeschwindigkeitsabhängige Trudeldrehzahlkennlinie bzw. die maximale Umdrehungszahl verwendet. Sofern vom Hersteller des geplanten Anlagentyps mitgeteilt wird, dass bei einer vereisungsbedingt abgeschalteten Anlage von keinem Trudelbetrieb auszugehen ist und das zur Verfügung stehende Eiserkennungssystem nur bei Betrieb der Anlage funktioniert, wird im Rahmen des vorliegenden Berichtes eine worst-case-Analyse durchgeführt. In dieser Analyse wird die Situation beim Wiederanfahren der Anlage mit einer vom Anlagenhersteller mitgeteilten maximalen Umdrehungszahl einer startenden Anlage simuliert. Diese erhöhte Umdrehungszahl stellt somit ein worst-case-Szenario dar, wobei sich bei Wiederanfahren der Anlagen eventuell nicht abgetaute Eisstücke vom Rotorblatt lösen.
- Treffer von Eisstücken, die auf Grund einer zu geringen kinetischen Energie gemäß der Probit-Funktion (s. Abschnitt 5.7.1.1) zu keiner Verletzung führen, werden nicht dargestellt.
- Gondelarretierung: Bei den Windenergieanlagen wird die Gondelarretierung berücksichtigt, sofern dies mitgeteilt wird. Ohne Arretierung sind die Gondeln frei drehbar, sodass sich die Rotorebene immer senkrecht zur aktuellen Windrichtung befindet. Dadurch können die simulierten Eisstücke in alle Richtungen abgeworfen werden. Für den Fall, dass bei der Windenergieanlage die Gondel arretiert wird, befindet sich die Rotorebene in einem festen Winkel. Dadurch werden die simulierten Eisstücke in einem Winkel von 90° zur festgelegten Richtung bevorzugt abgeworfen.
- In einer Simulation werden die Startposition des Eisstücks auf dem Rotorblatt (Blattwurzel bis Blattspitze) sowie die Rotorstellung zufällig gewählt. Es werden mehrere Millionen Berechnungen durchgeführt, um aus den ermittelten Auftreffhäufigkeiten am Boden statistische Aussagen abzuleiten und sowohl die Windrichtungs- als auch die Windgeschwindigkeitsverteilung zu berücksichtigen.
- Die in der entsprechenden Starthöhe des Eisstücks herrschende Windgeschwindigkeit wird aus dem für den Standort bestimmten Windprofil (vertikale Windgeschwindigkeitsverteilung) abgeschätzt: $U(z) = U_{NH} \cdot \left(\frac{z}{NH}\right)^{\alpha}$.

- Die Geometrie der abfallenden Eisstücke wird nicht gesondert berücksichtigt. Stattdessen wird die mittlere Stirnfläche A_{Eis} berechnet (s. Abschnitt 5.5).
- Die Topographie des Standorts wird in der Simulation in Form eines dreidimensionalen Geländemodells berücksichtigt. Eine eventuelle Bewaldung wird bei der Berechnung der Fallweiten nicht berücksichtigt.

5.4 Einfluss einer Blattheizung

Falls die Windenergieanlagen im Windpark mit einer Blattheizung ausgerüstet sind, kann bei Eisansatzbedingungen der Betriebsmodus schneller wieder aufgenommen werden. Im Falle von Eisansatz wird der Rotor in den Trudelbetrieb versetzt und gleichzeitig die Blattheizung für N_B Stunden eingeschaltet. Nach dieser Zeit der Enteisung geht die Anlage wieder in den Betriebsmodus über. Ohne eine solche Blattheizung würde der Trudelbetrieb aufrecht erhalten werden bis die Umgebungstemperatur auf über +2°C steigt.

Aus diesem Grund verhindert die Blattheizung nicht, dass Eisansatz stattfindet, sondern verkürzt lediglich die potentielle Dauer von Eisfall. Unter der konservativen Annahme, dass im schlimmsten Fall zwei Enteisungszyklen notwendig sind, kann an Vereisungstagen (s. Abschnitt 1.4.2) von $2*N_B$ Stunden ausgegangen werden in denen Eisfall stattfinden kann. Das Risiko wird daher auf $2*N_B/24*100$ % reduziert.

Die zuverlässige Funktion des Eisansatzerkennungssystems und der Blattheizung ist daher von zentraler Bedeutung für die Risikobewertung bzgl. Eisfall. Ist die funktionale Sicherheit des Systems nicht nachgewiesen, wird gemäß [46] eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10% angenommen. Somit berechnet sich das Gesamtrisiko als die Summe aus 0.1 mal dem Risiko ohne Blattheizung und 0.9 mal dem reduzierten Risiko aufgrund der Blattheizung.

$$Risiko_{gesamt} = 0.1 \cdot Risiko_{ohne\ Heizung} + 0.9 \cdot Risiko_{reduziert}$$

5.5 Eismassen und Eistypen

Die Simulation beinhaltet zwei unterschiedliche Arten von Eis: Raureif und Klareis mit den jeweiligen Dichten von $\rho_{Reif} = 600\ kg/m^3$, bzw. $\rho_{Klar} = 900\ kg/m^3$. Im Folgenden wird auf der Basis von Informationen aus [13] daher davon ausgegangen, dass die Massen Lognormalverteilungen folgen, die ihr Maximum bei 60 g bzw. 360 g haben und deren 99%-Perzentil bei 1.5 kg bzw. 4.5 kg liegt. Des Weiteren wird eine A/m Verteilung auf der Basis von [45] angenommen.

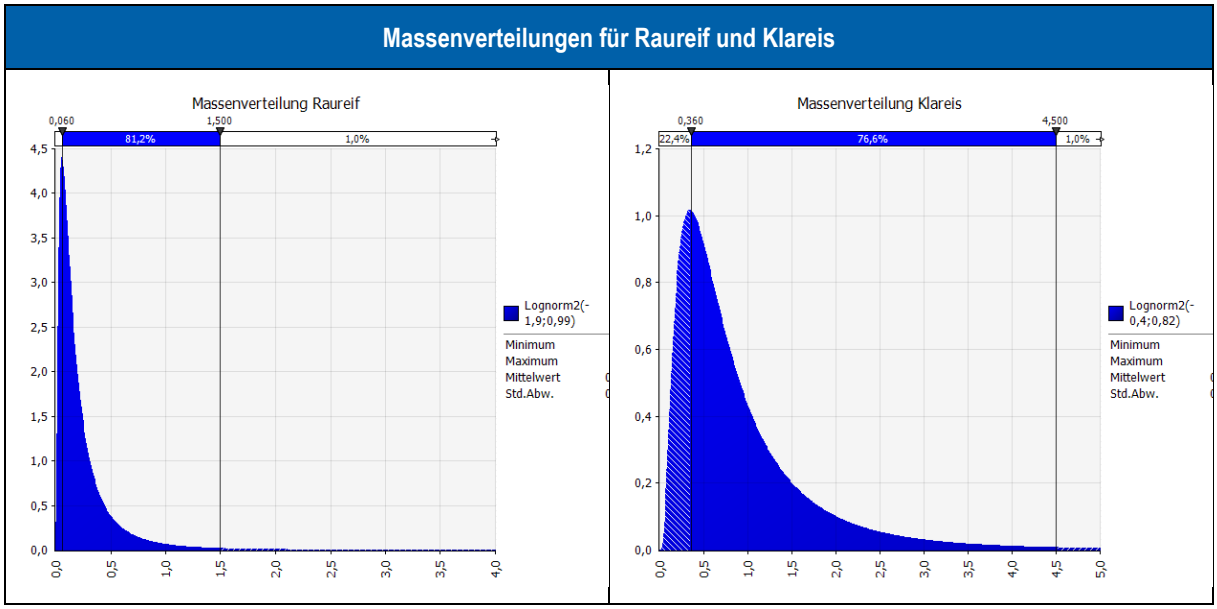


Abbildung 6: Angenommene Massenverteilung für Raureif (links) bzw. Klareis (rechts).

Die Kurven in Abbildung 6 ergeben sich mit diesen Annahmen für die Perzentile bzw. Maxima aus folgender Formel für die Wahrscheinlichkeitsdichte der Lognormalverteilung für die Masse m des Eisprojektils:

$$f(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot m} \cdot e^{-\left(\frac{(\ln m - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

mit

- $\mu = -1.99$ und $\sigma = 0.99$ für Raureif
- $\mu = -0.4$ und $\sigma = 0.82$ für Klareis

Die Entscheidung, ob ein Eisstück aus Raureif oder Klareis besteht, wird zufällig getroffen und zu einer gemeinsamen Massenverteilung kombiniert. D.h. im Mittel sind 50% der Teile Raureif und 50% der Teile Klareis. Die Geometrie der abfallenden Eisstücke wird nicht gesondert berücksichtigt. In [45] ist eine Verteilung für das Verhältnis der mittleren Stirnfläche und der Masse des Eisstücks (A_{Eis}/m) gegeben. Aus dieser Verteilung wird für jedes Eisstück ein Wert ermittelt und zusammen mit der unabhängig davon simulierten Masse die mittlere Stirnfläche A_{Eis} berechnet.

Diese Herangehensweise erlaubt jede mögliche Kombination von mittlerer Oberfläche und Masse. Damit werden auf der einen Seite kleine kompakte Eisstücke berücksichtigt, die bei einem Kopftreffer tödliche Verletzungen verursachen können, jedoch geringere Fallweiten aufweisen, da der Einfluss des Windes aufgrund des höheren Gewichts kleiner ausfällt. Auf der anderen Seite können auch leichte bzw. im Verhältnis zur Masse große plattenartige Stücke auftreten, die tendenziell ein geringeres Schadensausmaß aufweisen, jedoch aufgrund ihres geringeren Gewichtes weiter vom Wind verfrachtet werden. Damit wird die Berechnung auf keine bestimmte Form festgelegt.

Noch kleinere und leichtere Eisstücke als die im Rahmen dieser Analyse untersuchten Eisstücke können noch größere Fallweiten erreichen, sind jedoch in der Risikobewertung zu vernachlässigen, da aufgrund ihres geringen Gewichtes unwesentliche Beschädigungen bzw. Gefährdungen zu erwarten sind.

5.6 Risiko und Risikoakzeptanzkriterien

5.6.1 Der Risikobegriff

Risikoanalysen stellen ein geeignetes Instrumentarium dar, um die vorhandene Unsicherheit qualitativ oder quantitativ zu beschreiben und Entscheidungsvarianten eine kalkulierte Wirkung zuzurechnen. Hierfür wird in der Technik die bekannte „Formel“

Risiko = Eintrittshäufigkeit * Ausmaß der Auswirkungen eines Ereignisses

herangezogen. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass bei geringerem Schadensausmaß üblicherweise eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit akzeptiert wird. Steigt das Schadensausmaß an, muss die Häufigkeit des Ereignisses sinken, um in den akzeptablen Bereich zu gelangen. Hohe Schäden, die dazu noch häufig auftreten, sind hingegen nicht annehmbar. Intuitiv ist klar, dass zwischen den akzeptablen und den unakzeptablen Risiken ein Übergangsbereich liegt, in dem ggf. Verbesserungen möglich oder sinnvoll sind.

Die Begriffe in der obigen Formel sind wie folgt zu verstehen:

Die *Eintrittshäufigkeit* bezeichnet die Anzahl der Ereignisse innerhalb eines Zeitraums. Sie ist eine statistische Größe, d.h. sie spiegelt die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses in einem bestimmten Zeitraum wider. Das *Ausmaß der Auswirkungen* eines Ereignisses kann entsprechend des Verwendungszweckes einer Risikoanalyse unterschiedlich definiert werden. Sicherheitsorientierte Betrachtungen in der Technik bestimmen in erster Linie Ereignisse mit der möglichen Folge von Schäden für Leib und Leben. Umwelt- und/oder Sachschäden werden üblicherweise in Geldeinheiten ausgedrückt („monetarisiert“).

5.6.1.1 Risikobewertung

Ergebnis einer Risikoanalyse ist zunächst eine Aussage über das absolute Risiko. Um aber risikobasiert Entscheidungen vorbereiten zu können, muss dieser Risikowert durch Vergleich mit „üblicherweise akzeptierten“ Risiken eingeordnet und bewertet werden. Diese Aufgabe ist offensichtlich schwierig und mit Unwägbarkeiten behaftet, da der Übergangsbereich zwischen akzeptablem und inakzeptablem Bereich nicht eindeutig fixiert ist.

Beispiel:

Das Bewegen eines Fahrzeugs stellt eine (erlaubte) Gefährdung dar. Bei Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzungen wird grundsätzlich unterstellt, dass die Schadenshäufigkeit und Schadensauswirkung allgemein akzeptiert werden können. Eine explizite Quantifizierung dieses „Grenzrisikos“ existiert im deutschen Recht nicht.

Generell können dabei zwei Kriterien betrachtet werden (siehe Abbildung 7):

1. Übersteigt das Schadensausmaß eine bestimmte Grenze, muss immer Abhilfe geschaffen werden. Ein derartiges Ereignis liegt unabhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit stets im nicht akzeptablen Abschnitt der Graphik.

2. Ebenso verhält es sich mit Ereignissen, die zu häufig eintreten. Auch hier gibt es eine Grenze, ab der unabhängig vom Schadensausmaß der nicht akzeptable Bereich beginnt, da allein schon aus betrieblichen Gründen das Risiko zu hoch wird.

Zur Bestimmung der Lage der in Abbildung 7 dargestellten Akzeptanzgrenzen gibt es mehrere international übliche Vorgehensweisen, die letztendlich alle vergleichbare Ergebnisse bzw. Akzeptanzwerte liefern.

Bei einer Technologie, die mit sehr großen Ängsten behaftet ist, kann der Übergangsbereich sehr ausgedehnt sein. Ein weiterer Aspekt bei der Beurteilung eines Risikos ist der Grad der

Freiwilligkeit der Risikoexposition, da freiwillig eingegangene Risiken (z. B. Sport) eher akzeptiert werden als unfreiwillig eingegangene Risiken, wie sie etwa mit der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel, von Gebäuden oder der Erzeugung bestimmter Leistungen verbunden sind.

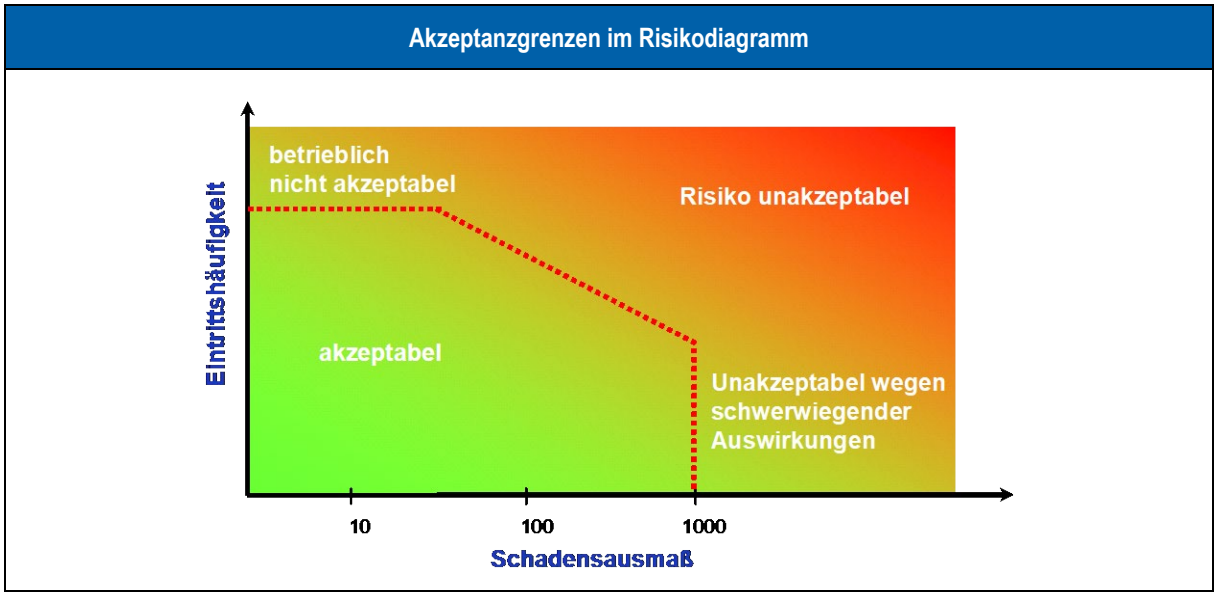


Abbildung 7: Akzeptanzgrenzen im Risikodiagramm.

Dies macht bereits deutlich, dass neben der „absoluten Risikobewertung“ einer Anlage auch die relative Risikobetrachtung von Bedeutung ist, d.h. die vergleichende Risikobetrachtung mit üblicherweise akzeptierten Risiken der Gesellschaft.

5.6.1.2 Risikodarstellung - Risikomatrix

Die Darstellung mittels eines Risikodiagramms ist nützlich, wenn Wahrscheinlichkeiten und Konsequenzen in präzisen Zahlen und eindeutigen Dimensionen angegeben oder berechnet werden können. In der Tat werden Risikoanalysen mit einer Vielfalt von quantitativen und qualitativen Methoden durchgeführt.

Sogenannte semi-quantitative Methoden haben den Vorteil, dass mit ihnen Ereignisdaten ebenso wie Expertenwissen berücksichtigt werden können. Sie erlauben es daher, subjektive Einschätzungen und objektive Erfahrungen miteinander zu verbinden. Dadurch ist es nicht mehr möglich, einzelne „Punkte“ im Risikodiagramm aufzuzeigen. Vielmehr sind nur noch Abschätzungen etwa der Größenordnung nach möglich.

Das Risikodiagramm wird damit zu einer Risiko-Matrix, wie sie die Abbildung 8 exemplarisch zeigt. Anstelle kontinuierlich verteilter Größen verwendet die Risiko-Matrix diskrete Kategorien für die Eintrittshäufigkeit (z. B. “1” bis “5”) und das Ausmaß (z. B. “A” bis “E”).

Diese Parameter werden qualitativ oder halbquantitativ geschätzt und umschrieben. So kann die “5” etwa “beinahe sicher” bedeuten, “1” hingegen “extrem unwahrscheinlich”. Entsprechend steht z.B. “E” für “katastrophale”, “A” für “vernachlässigbare Ereignisse“. Der logarithmischen Auftragung der Achsenwerte im Risikodiagramm entsprechend unterscheiden sich die benachbarten Kategorien dabei je um eine Größenordnung.

Der **Bereich I** (grüner Bereich) ist die Region akzeptabler Risiken (s. o. Risikobewertung). Befindet sich ein System in diesem Sektor, sind weitere risikoreduzierende Maßnahmen aus sicherheitstechnischer Sicht nicht notwendig. Im **Bereich II** (gelber und oranger Übergangsbereich) sind Verbesserungsmaßnahmen sinnvoll, im **Bereich III** (rot) sind sie unumgänglich.

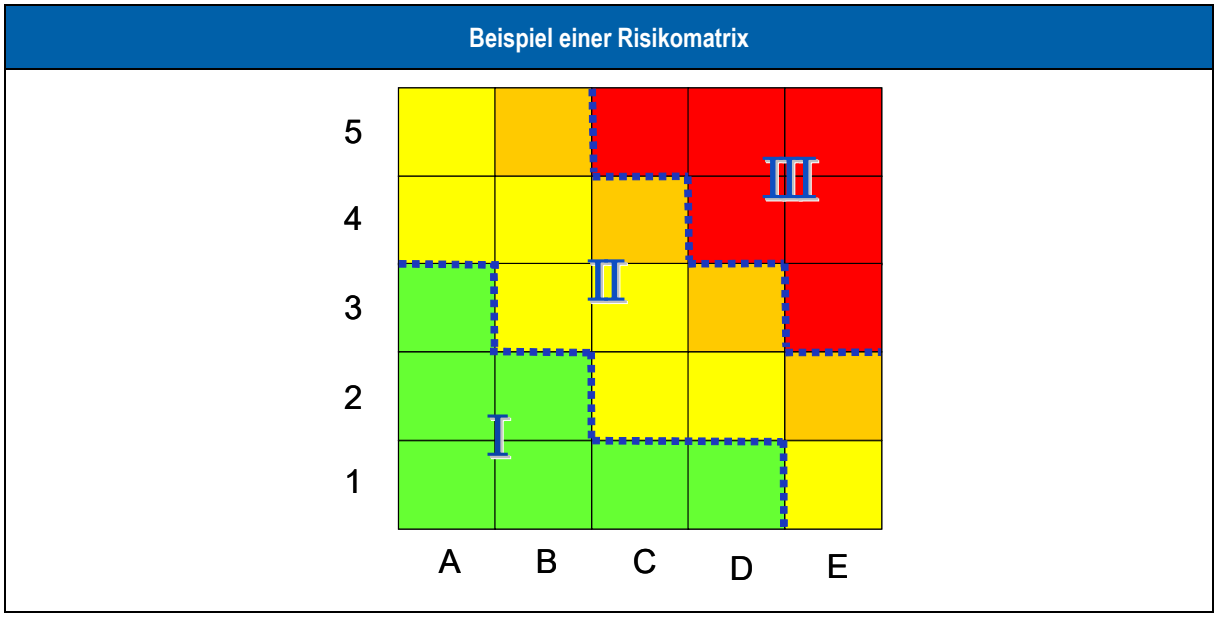


Abbildung 8: Beispiel einer Risikomatrix.

Da die Skalierungen und Festlegungen vor der Bewertung einzelner Ereignisse und Maßnahmen erfolgen, wird eine objektive und ergebnisoffene Bewertung einerseits erleichtert, andererseits bleibt aber auch jede einzelne getroffene Bewertung sehr transparent. Erläuterungen zu den einzelnen Farbkodierungen sind in Tabelle 9 zu finden.

Wo die Grenzwerte für die einzelnen Bereiche des Risikos liegen, wird im folgenden Kapitel ausgehend von international üblichen Vorgehensweisen hergeleitet. Dabei wird der Übergangsbereich (gelber und oranger Bereich) zwischen akzeptablen und unakzeptablen Risiken zur besseren Abstufung risikoreduzierender Maßnahmen nochmals unterteilt.

5.6.2 Risikoakzeptanzkriterien

Zur Bestimmung des akzeptablen Risikos gibt es mehrere international übliche Vorgehensweisen, die letztendlich alle vergleichbare Ergebnisse liefern. Zunächst muss geklärt werden, welches Risiko als Vergleichsrisiko herangezogen wird. Grundsätzlich gibt es zwei Arten ein Risiko zu ermitteln. Je nachdem welches Ziel mit der Analyse verfolgt wird, wird entweder das *kollektive Risiko* oder das *individuelle Risiko* ermittelt.

Das kollektive Risiko ist das Gesamtrisiko für die Summe aller betroffenen Personen im betrachteten Szenario. Das Risiko für einen Einzelnen ist dabei jedoch unbekannt.

Das individuelle Risiko ist das Risiko, dem eine einzelne Person ausgesetzt ist. Durch diese Reduktion auf eine vergleichbare Basis kann dieses Risiko mit anderen technischen Bereichen verglichen werden.

5.6.2.1 Prinzip der Minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM)

Die Frage, welches individuelle Risiko als akzeptabel gilt, hängt von mehreren Faktoren ab. Zunächst einmal muss geklärt werden, welche Risiken auf eine Person einwirken. Dazu wird in [36] das Prinzip der minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) eingeführt. Bei diesem Prinzip wird davon ausgegangen, dass der Tod sich aus vielen verschiedenen Ursachen ergibt. Eine dieser Ursachengruppe wird „Technologische Tatsachen“ genannt, z. B.

- Unterhaltung und Sport (Surfen, Extremsport usw.);
- Heimwerker-Aktivitäten (Rasenmähen usw.);
- Arbeitsmaschinen;
- Verkehr.

Diese Gruppe hat einen bestimmten Prozentsatz von Toten pro Jahr zur Folge, der je nach Alter der betrachteten Bevölkerungsgruppe unterschiedlich ist. Das entsprechende Risiko wird als „Endogene Sterblichkeit R“ bezeichnet. In wirtschaftlich gut entwickelten Ländern ist R für die Gruppe der 5- bis 15-jährigen am niedrigsten. Die unterste Stufe der endogenen Sterblichkeit, bekannt als „Minimale endogene Sterblichkeit“ und mit „Rm“ bezeichnet, wurde bestimmt als

$$Rm = 2 \cdot 10^{-4} \frac{Todesfälle}{Jahr}.$$

Daraus wird folgende Regel gebildet:

„Gefahren, die auf eine neue Industrieanlage zurückzuführen sind, dürfen *keine nennenswerte* Erhöhung der Zahl Rm verursachen.“

Damit werden mit dem MEM-Prinzip folgende Grenzwerte festgelegt:

- R1 ≤ 10^{-5} Todesfälle/Person x Jahr
- R2 ≤ 10^{-4} Schwerverletzte/Person x Jahr
- R3 ≤ 10^{-3} Leichtverletzte/Person x Jahr

Die hiermit festgelegten Grenzwerte können als absolute Obergrenze betrachtet werden. Risiken, die darüber liegen, sind für Privatpersonen absolut unakzeptabel[4]. Ein weiterer Aspekt, der sich aus diesen Grenzwerten ergibt, ist folgende empfohlene Umrechnungsvorschrift:

1 Toter = 10 Schwerverletzte = 100 Leichtverletzte

5.6.2.2 Das ALARP-Prinzip

Eine etwas andere Herangehensweise mit anderen Grenzwerten wird von der britischen HSE empfohlen [37][38]. Hier werden verschiedene Grenzwerte für verschiedene Bevölkerungsgruppen ermittelt. So gelten z. B. für Arbeiter Grenzwerte von 10^{-3} Todesfällen pro Jahr.

Insgesamt sieht die britische HSE bei einem jährlichen individuellen Todesfallrisiko von 1:1.000.000 (10^{-6}) die Schwelle erreicht, bei der zusätzliche Kosten zur Risikovorsorge nicht mehr im Verhältnis zum Sicherheitszugewinn stehen. Mit anderen Worten: Ausprägungen des individuellen Risikos, die kleiner als dieser Wert sind, gelten grundsätzlich als akzeptabel – es besteht kein Handlungsbedarf für weitere risikoreduzierende Maßnahmen.

Die zwischen diesen Schwellen befindliche Zone wird als ALARP-Zone angesehen, bei der fallbezogen und unter Berücksichtigung einer Kosten-Nutzenabwägung ein vertretbares Risiko von der Aufsichtsbehörde festgelegt wird. Die nachfolgende Abbildung 9 zeigt das ALARP-Prinzip im Überblick.

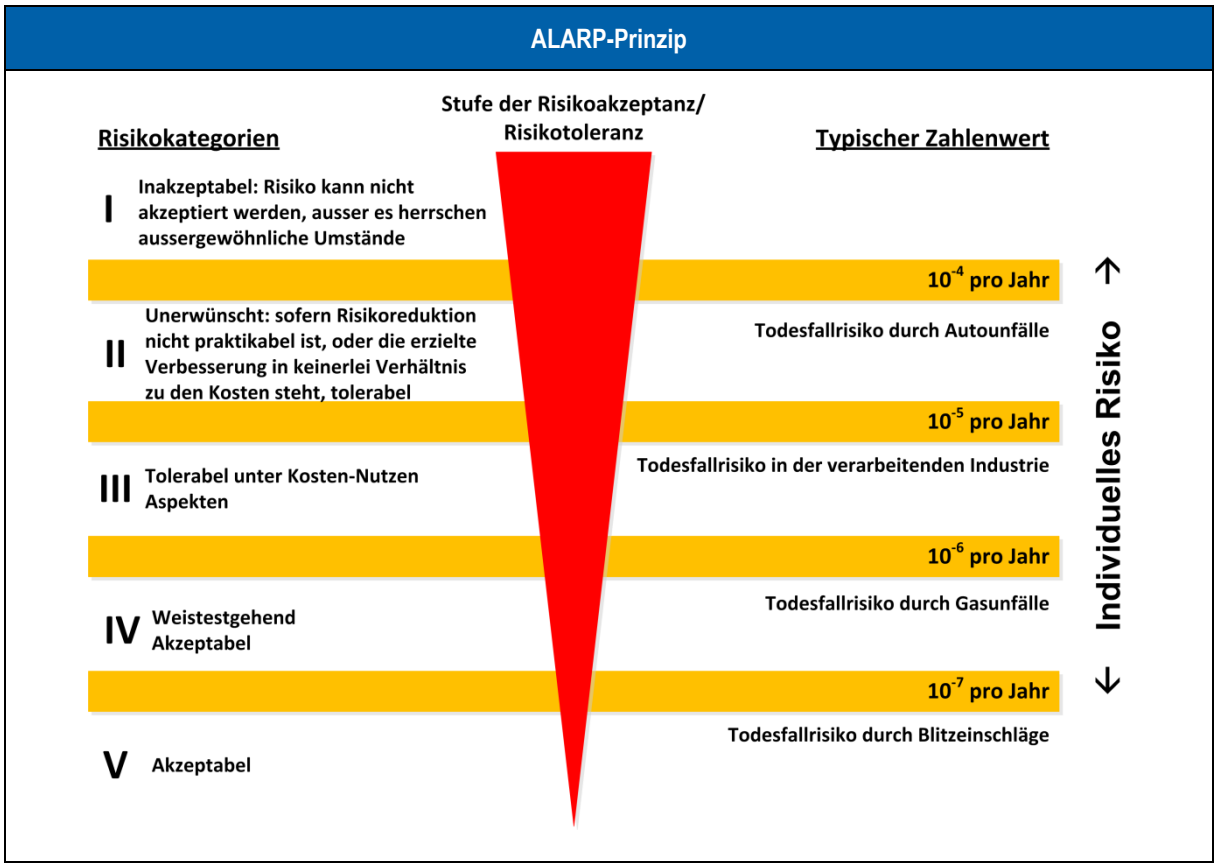


Abbildung 9: ALARP-Prinzip

[4] Für beruflich exponierte Personen wird im Allgemeinen ein um einen Faktor 10 höheres Risiko als Akzeptanzgrenze definiert.

Das ALARP Prinzip wird im Allgemeinen für die Darstellung der einzelnen Kategorien aus Abbildung 8 verwendet, so spricht man bei dem gelb gekennzeichneten Bereich auch vom „unteren ALARP Bereich“ und beim orange gekennzeichneten Bereich vom „oberen ALARP Bereich“.

5.6.2.3 Kollektives Risiko

Alle o.g. Werte gelten für das individuelle Risiko. Wird stattdessen das kollektive Risiko betrachtet, gibt es weniger gesicherte Quellen, welches Referenzrisiko zur Bewertung herangezogen wird.

Die in folgender Abbildung 10 dargestellte Vorgehensweise aus [41] fasst die Erkenntnisse anschaulich zusammen. Je höher die Anzahl der Personenschäden (x-Achse) ist, umso unwahrscheinlicher muss ein Ereignis sein. Im Fall von Windenergieanlagen ist das Schadensausmaß N mit 1 anzusetzen. Der kollektive Ansatz wird durch die Anzahl der gefährdeten Personen in die Betrachtung mit einbezogen.

Nach dieser Darstellung ist die untere Akzeptanzgrenze mit 10^{-5} Todesfällen pro Jahr und die obere Akzeptanzgrenze mit 10^{-3} Todesfällen pro Jahr definiert. Dies liegt einen Faktor 100 über den üblichen Akzeptanzgrenzen für das individuelle Risiko.

D. h., wenn auf einer vorbeiführenden Straße die Verkehrsdichte mit 100 Bewegungen pro Tag angenommen wird, so ist das kollektive Risiko um einen Faktor 100 größer als das individuelle Risiko.

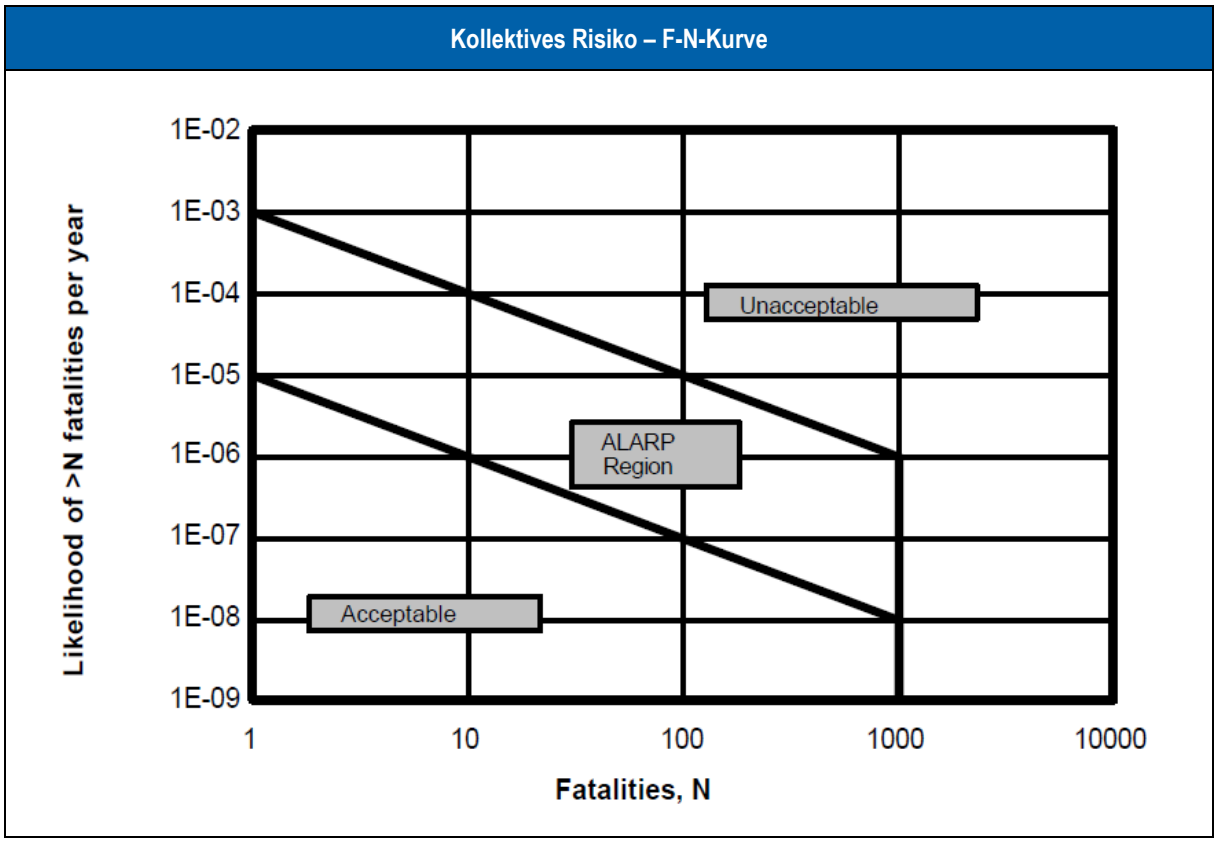


Abbildung 10: Kollektives Risiko – F-N-Kurve.

Die Risikobewertung ist jedoch identisch. Ist die Verkehrsdichte kleiner als 100 Bewegungen pro Tag, überwiegt das individuelle Risiko, ansonsten ist das kollektive Risiko zu betrachten.

5.6.2.4 Im Rahmen der Untersuchung verwendete Akzeptanzkriterien

Aus dem ALARP-Prinzip lässt sich ein Akzeptanzbereich von 10^{-4} – 10^{-6} Todesfällen pro Person und Jahr im Bereich der Arbeitssicherheit ableiten, für unbeteiligte Dritte (Spaziergänger oder Autofahrer) wird im Allgemeinen ein strengerer Akzeptanzbereich von 10^{-5} – 10^{-7} Todesfällen pro Person und Jahr angesetzt. Als Grenzen für das kollektive Risiko, z. B. bei stark befahrenen Straßen, wird nach Kapitel 5.6.2.3 ein Akzeptanzbereich von 10^{-3} – 10^{-5} Todesfällen pro Person und Jahr angesetzt. Dieser Bereich definiert für gewöhnlich das, was durch den aktuell verfügbaren Stand der Technik erwartet werden kann, und ist somit auch generell für die vorliegende Risikobetrachtung zu verwenden.

Es ist üblich verschiedene Kategorien, in denen das Risiko liegen kann, zu definieren. Dabei werden den Kategorien entsprechend der Einschätzung des Risikos verschiedene Farbkodierungen zugeordnet, in Anlehnung an die Farben des in Abbildung 7 dargestellten Risikodiagramms. In Tabelle 9 sind die in der vorliegenden Risikobetrachtung verwendeten Risikokategorien für Spaziergänger und Autofahrer dargestellt.

Risikokategorien	
Risikowert (1/a) und Farbkodierung	**Risikobewertung**
Kleiner als 10^{-08} (individuell) Kleiner als 10^{-07} (beruflich) Kleiner als 10^{-06} (kollektiv)	Das Risiko ist ***vernachlässigbar***. Es liegt weit unterhalb aller anderen aus dem Alltag bekannten Risiken.
Zwischen 10^{-08} und 10^{-07} (individuell) Zwischen 10^{-07} und 10^{-06} (beruflich) Zwischen 10^{-06} und 10^{-05} (kollektiv)	Das Risiko liegt im ***akzeptablen*** Bereich, es besteht aus risikoorientierter Sicht kein Handlungsbedarf.
Zwischen 10^{-07} und 10^{-06} (individuell) Zwischen 10^{-06} und 10^{-05} (beruflich) Zwischen 10^{-05} und 10^{-04} (kollektiv)	Das Risiko ist ***tolerierbar*** und liegt im unteren ALARP-Bereich. Sofern weitergehende Maßnahmen zur Risikoreduzierung bekannt sind, können diese unter Kosten-Nutzen-Aspekten geprüft werden. Eine Empfehlung, solche Maßnahmen umzusetzen wird jedoch nicht ausgesprochen.
Zwischen 10^{-06} und 10^{-05} (individuell) Zwischen 10^{-05} und 10^{-04} (beruflich) Zwischen 10^{-04} und 10^{-03} (kollektiv)	Das Risiko ist ***hoch*** und liegt im oberen ALARP-Bereich. Die Umsetzung von bekannten risikoreduzierenden Maßnahmen wird dringend empfohlen bzw. es wird empfohlen, nach weitergehenden risikoreduzierenden Maßnahmen auch über den Stand der Technik hinaus zu suchen.
Größer 10^{-05} (individuell) Größer 10^{-04} (beruflich) Größer 10^{-03} (kollektiv)	Das Risiko ist ***unakzeptabel hoch***. Maßnahmen zur Risikoreduktion müssen umgehend eingeleitet werden.

Tabelle 9: In der Analyse verwendete Risikokategorien inklusive der Farbcodierung [43].

Grundsätzlich kann für die Risikoanalyse folgende Faustregel getroffen werden: Bei Fuß- und Feldwegen kann von einer sehr geringen Verkehrsdichte ausgegangen werden (Ausnahme:

Sehenswürdigkeiten bzw. Ausflugsziele in der Nähe). Hier wird in der Regel das individuelle Risiko als abdeckend betrachtet.

Für jegliche Straße, an der Kfz-Verkehr herrscht, muss von einer Verkehrsdichte größer als 100 Bewegungen pro Tag ausgegangen werden. Hier wird das kollektive Risiko als Vergleichsmaßstab herangezogen.

5.6.2.5 Vergleichsrisiken

Um die später ermittelten Risiken korrekt einordnen zu können, ist es hilfreich diese an bekannten Vergleichsrisiken zu spiegeln. Nachfolgende Tabelle 10 gibt die Größenordnung verschiedener Vergleichsrisiken wieder [42][43].

	Ursache / Tätigkeit	**Todesfallrisiko / Jahr**
Berufsrisiken	Arbeiter auf Baustellen	1.0E-04
	Arbeiter in der Metallherstellung	5.5E-05
	Elektroingenieur	8.0E-06
verschiedene Verkehrsrisiken	Eisenbahn	4.4E-06 … 1.5E-05
	PKW-Fahrer	2.0E-04 … 2.2E-04
	Flugzeug (Passagiere)	0.67E-04 … 1.2E-04
Freizeitaktivitäten	Bergsteigen	1.0E-03 … 2.7E-03
	Fallschirmspringen (USA)	2.0E-03
	Urlaub (UK 1990)	1.0E-04
Alltagsrisiken	Hausarbeit	1.0E-04
	Gebäudebrand	8.0E-06
	Blitzschlag (UK, USA)	1.0E-07 … 5.0E-07

Tabelle 10: Vergleichsrisiken.

Aufbauend auf Tabelle 10 und weitergehenden Analysen wird in [43] für die Arbeitssicherheit ein maximales Berufsrisiko von ca. 10^{-4} Todesfällen pro Person und Jahr abgeleitet (Anmerkung: besonders risikoexponierte Tätigkeitsfelder wurden in Tabelle 10 nicht berücksichtigt). Für unbeteiligte Dritte wird im Allgemeinen eine um eine Zehnerpotenz niedrigere Akzeptanzgrenze angesetzt, was der oberen Grenze des in Kapitel 5.6.2.4 definierten Bereichs entspricht.

5.7 Für die Risikoanalyse verwendete Methodik

5.7.1 Schadensausmaß

Nach der in Abschnitt 5.6 gegebenen Definition wird das Risiko aus den Parametern Eintrittshäufigkeit und Schadensausmaß eines Ereignisses bestimmt. Dies unterscheidet Risikoanalysen von Gefährdungsanalysen, bei denen die Eintrittshäufigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Zur Bestimmung des Schadensausmaßes gibt es verschiedene Möglichkeiten, häufig wird lediglich abgeschätzt, ob eine leichte Verletzung, eine schwere Verletzung oder ein Todesfall zu erwarten ist.

5.7.1.1 Die Probit-Funktion

Um das Schadensausmaß realitätsnäher zu bestimmen, kann mit der in [40] beschriebenen Methodik der Probit-Funktion die Mortalitätsrate (die Wahrscheinlichkeit bei einem Treffer am Kopf durch ein Projektil ums Leben zu kommen) ermittelt werden.

Die Probit-Funktion ist hier definiert durch

$$Pr = -17.56 + 5.3 \cdot ln(E_{kin})$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$$

und somit ausschließlich von der kinetischen Energie des Projektils abhängig. Diese Funktion wird verwendet, um die Todesfallwahrscheinlichkeit zu ermitteln, wenn eine Person von einem Objekt mit einer Masse *m* bei einer Geschwindigkeit *v* am Kopf getroffen wird. Gültig ist diese Funktion für Massen zwischen 0.1 und 4.5 kg. Die Mortalität in Abhängigkeit vom Wert der Probit-Funktion lässt sich aus der von [40] entnommenen Tabelle 11 ableiten:

Todesfallwahrscheinlichkeit vs. Probit-Funktion										
%	**0.00**	**1.00**	**2.00**	**3.00**	**4.00**	**5.00**	**6.00**	**7.00**	**8.00**	**9.00**
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.90	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
-	**0.00**	**0.10**	**0.20**	**0.30**	**0.40**	**0.50**	**0.60**	**0.70**	**0.80**	**0.90**
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Tabelle 11: Zusammenhang zwischen Todesfallwahrscheinlichkeit und Wert der Probit-Funktion.

Folgende Beispiele erläutern, wie Tabelle 11 zu lesen ist:

- Beträgt der Wert der Probit-Funktion 2.67 (Zeile 2, Spalte 3), so ist die Todesfallwahrscheinlichkeit mit 1% anzusetzen.

- Beträgt der Wert der Probit-Funktion 5.36 (Zeile 8, Spalte 6), so ist die Todesfallwahrscheinlichkeit mit 64% anzusetzen.

Aus [15] kann für Objekte verschiedener Massen und Formen die Auftreffgeschwindigkeit *v(m)* in Abhängigkeit von der Masse des Projektils und unter Berücksichtigung des Luftwiderstandbeiwertes für die betrachteten Höhen ermittelt werden.

Die cw-Werte wurden anhand [15] (Seite B60) abgeschätzt. Demnach kann für Eisplatten ein cw-Wert von ca. 1 herangezogen werden.

5.7.1.2 Ermittlung von Sachschäden

Von Windenergieanlagen herabfallende Eisstücke können neben Personen- auch Sachschäden verursachen. Sollten im Rahmen dieser Analyse Sachschäden untersucht werden, wird zur Ermittlung des Schadensausmaßes nicht die kinetische Energie (s. Personenschäden), sondern der Impuls der aufschlagenden Eisstücke herangezogen. Überschreitet der Impuls einen definierten Grenzwert, so kann von einem Sachschaden ausgegangen werden. Dieser Grenzwert ist meist in entsprechenden technischen Regelwerken (z.B. DIN) festgelegt.

5.7.1.3 Ermittlung der Eisansatztage

Nach [44] ist die Anzahl der Eisansatztage in Deutschland (und damit näherungsweise für Mitteleuropa) sowohl von der absoluten Höhe über NN als auch von der geografischen Lage (Alpennähe und nicht-Alpennähe) abhängig. Auf der Basis der [44] zugrundeliegend Rohdaten, die vom DWD übermittelt wurden, können so zwei Formeln für die anzusetzenden Eisansatztage ermittelt werden:

1. Vereisungstage in Alpennähe

$$N = 33.337 \cdot \ln(x) - 210.32$$

2. Vereisungstage außerhalb der Alpen

$$N = 6.0707 \cdot e^{0.0017x}$$

Mit

N = Anzahl der Vereisungstage
x = Höhe über NN zuzüglich Nabenhöhe

5.7.1.4 Betrachtete Expositionsszenarien

Um die Risikobetrachtung weitestgehend zu standardisieren und vergleichbar zu machen, aber auch um ein realistisches und nicht zu konservatives Ergebnis zu erhalten, wurden die Wege in verschiedene Nutzungskategorien eingeteilt, aus denen sich dann Expositionsszenarien ergeben. Es werden folgende Unterscheidungen gemacht:

Fußgänger

Kategorie	Bedeutung
Regelmäßig benutzter Weg	Es muss auf Grund der Ausbaustufe des Weges, seiner Erreichbarkeit und seiner Lage zu Ortschaften davon ausgegangen werden, dass dieser Weg regelmäßig, d. h. beinahe täglich von Spaziergängern oder Joggern genutzt wird. Dabei ist es ausreichend, wenn ein einziger Spaziergänger oder Jogger diesen Weg regelmäßig nutzt.
Häufig benutzter Weg	Für Wege dieser Art treffen nicht alle der o. g. Merkmale zu. So führen z. B. eine größere Entfernung zu Ortschaften und ein schlechter Zugang dazu, dass davon ausgegangen wird, dass dieser Weg nicht an allen Tagen aber doch häufig von Spaziergängern bzw. Joggern benutzt wird.
Gelegentlich benutzter Weg	In diese Kategorie fallen Wege, die noch eindeutig als solche, jedoch eindeutig nicht als Hauptwege erkennbar sind, und deren Ausbaustufe und Erreichbarkeit auf eine gelegentliche Benutzung schließen lassen.
Selten benutzter Weg	In diese Kategorie fallen Wege, die noch als solche erkennbar sind, und deren Zustand und Erreichbarkeit auf eine seltene Benutzung schließen lassen.
Normalerweise nicht benutzter Weg	Wege, die aus der Vogelperspektive kaum noch zu erkennen sind, die eindeutig lediglich als Zufahrtswege für die Forst- bzw. Landwirtschaft erkennbar sind oder die sehr weit von der nächsten Wohnbebauung entfernt sind, werden als normalerweise nicht benutzt betrachtet. Die Exposition ermittelt sich aus einer Person, die sich zufällig an diesem Ort aufhält.

Tabelle 12: Kategorien der betrachteten Wege.

Autofahrer

Entsprechend den Angaben zur Risikoakzeptanz aus Kapitel 5.6.2.4 muss für Autofahrer das kollektive Risiko betrachtet werden, sofern von einer Verkehrsdichte von mehr als 100 Fzg. / Tag ausgegangen wird. Dies wird grundsätzlich für alle Straßen angenommen. Für Autofahrer wird das ermittelte individuelle Risiko eines Fahrers bei einfacher Fahrt ermittelt und mit der Anzahl der Fahrzeuge multipliziert.

Andere Personengruppen

Im Rahmen dieser Analyse werden beispielsweise Fahrradfahrer oder Langlaufskifahrer der Gruppe der Fußgänger zugeordnet. Dieser Absatz ist als konservativ zu bewerten. Als Grund hierfür ist insbesondere die geringeren Expositionszeit durch die vergleichsweise höhere Bewegungsgeschwindigkeit anzuführen.

Auch beruflich exponierte Personen, wie z.B. Forstarbeiter, Jäger oder Landwirte sind in dieser Analyse mit abgedeckt, da für diese weniger strenge Risikoakzeptanzgrenzen gelten (siehe Kapitel 5.6.2.4). Außerdem sind diese Personengruppen beim Befahren der Wege durch die Fahrzeugstrukturen geschützt und haben beim Durchqueren eines Gefährdungsbereiches eine geringere Expositionszeit im Vergleich zu den Fußgängern.

Zuwegungen und Stichwege und Kranstellflächen

Hinsichtlich Zuwegungen bzw. Stichwegen und Kranstellflächen an den Aufstellungsorten der WEA wird ein gewollter Aufenthalt eines Fußgängers im Gefahrenbereich unterstellt. Es wird ein 5-minütiger Aufenthalt in der unmittelbaren Nähe der WEA angenommen, woraus sich ein hohes Risiko ergibt. Dieses hohe Risiko muss generell durch geeignete Maßnahmen beherrscht werden, es wird empfohlen Kranstellflächen zu umzäunen oder als gleichwertige Alternative ein Schild mit einer an das Eisansatzerkennungssystem gekoppelten Warnleuchte/Lichtzeichen, das von Durchgang bei Eisfallbedingungen dringend abrät, aufzustellen.

5.7.1.5 Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit H_T, P_T

Auf Basis der übergebenen Rohdaten aus den Eisfallsimulationen wurde ein quadratisches Raster in 5 m Schritten erstellt und die relative Trefferhäufigkeit von Eisstücken unabhängig von Masse oder Eistyp innerhalb dieser Teilfläche ermittelt. Die Trefferhäufigkeit ist jedoch von der Anzahl der simulierten Eisstücke abhängig und spiegelt nicht die tatsächlich zu erwartende Anzahl an Eisstücken wider.

In einer Untersuchung im Rahmen des WECO-Projektes (Wind Energy Production in Cold Climate) wurde der Eisfall einer WEA auf der Gütsch im Schweizer Hochgebirge beobachtet. Hierbei wurden die von der Anlage abgefallenen bzw. abgeworfenen Eisstücke protokolliert [13].

In dem Untersuchungszeitraum von ca. 3 Jahren wurden etwa 200 Eisstücke identifiziert [13]. Da jedoch davon ausgegangen wird, dass nicht alle von der Versuchsanlage herabgefallenen Eisstücke tatsächlich gefunden wurden, z. B., weil sie in der Luft oder beim Aufprall zerbrochen sind, wird davon ausgegangen, dass ca. 200 Eisfälle pro Jahr vorgekommen sind. Für die vorliegende Analyse wird diese Anzahl noch quadratisch mit dem Rotorradius in Verhältnis gesetzt.

Werden die übermittelten relativen Eisfallhäufigkeiten auf diese Zahl normiert, so kann damit die absolute Trefferhäufigkeit H_T in ein 5x5m großes Rechteck pro Jahr ermittelt werden. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fahrzeug bzw. ein Fußgänger getroffen wird, hängt von der relevanten Querschnittsfläche ab. Dafür werden folgende Werte angesetzt:

Autofahrer

Relevante Trefferfläche: 2 m² (als relevant wird hier die Windschutzscheibe angenommen, damit ergibt sich eine Trefferwahrscheinlichkeit P_T von 0.08).

Fußgänger

Relevante Trefferfläche: 0.04 m² (als relevant wird hier ein Treffer am Kopf angenommen, damit ergibt sich eine Trefferwahrscheinlichkeit P_T von 0.0016).

5.7.1.6 Ermittlung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit P_A

Unter der Expositionsdauer wird die Zeit verstanden, in der eine Person der Gefahr ausgesetzt ist. Diese wird im Folgenden für die einzelnen 5x5m-Teilflächen ermittelt.

Als Paramater muss der Aufenthalt im Gefährdungsbereich bestimmt werden. Dies ist die Zeit, die eine Person benötigt, um den durch Eisfall gefährdeten Bereich zu durchqueren. Dafür werden für die einzelnen 5x5m-Teilflächen folgende Zeiten angesetzt:

- 0.3 s (bei einer angenommenen Geschwindigkeit von 60 km/h für Autofahrer)
- 3.6 s (bei einer angenommenen Geschwindigkeit vom 5 km/h für Fußgänger)

In Anlehnung an [44] kann die Anzahl der Tage pro Jahr mit Eisfallpotenzial abgeschätzt werden, unter der worst-case-Annahme, dass ein Vereisungstag einem Eisfalltag gleichzusetzen ist. In Abschnitt 1.4.2 ist eine standortspezifische Abschätzung von Vereisungstagen angegeben, die der Risikobewertung dieser vorliegenden Analyse zu Grunde liegt. Unter der Voraussetzung, dass sowohl Autofahrer als auch Fußgänger dieser Gefährdung zweimal pro Tag ausgesetzt sind, ergeben sich folgende Expositionszeiten:

- 0.6 s/d und Teilfläche für Autofahrer, bzw.
- 7.2 s/d und Teilfläche für Fußgänger.

Zusammen mit den jährlichen[5] Eisansatztagen (s. Abschnitt 1.4.2) berechnet sich die Aufenthaltswahrscheinlichkeit folgendermaßen:

$$P_A = \frac{0.6\,\frac{s}{d} \cdot N_{Eisansatztage}\,\frac{d}{a}}{15768000\frac{s}{a}}$$ für Autofahrer bzw.

$$P_A = \frac{7.2\,\frac{s}{d} \cdot N_{Eisansatztage}\,\frac{d}{a}}{15768000\frac{s}{a}}$$ für Fußgänger

in den einzelnen Teilflächen.

5.7.1.7 Berücksichtigung eines Reduktionsfaktors

Grundsätzlich gilt das nach Kapitel 5.7.1 ermittelte Schadensausmaß für Personen, die am Kopf getroffen werden. Dies ist nicht ohne Weiteres auf eine durch ein Fahrzeug geschützte Person übertragbar. Dennoch kann dieser Wert für Autofahrer zunächst übernommen werden.

In der Regel sollte die Karosserie sowie die Windschutzscheibe Eisstücke, die einen Spaziergänger töten würden, ohne größeren Schaden überstehen. Ähnliches erlebt man tagtäglich im Winter auf den Autobahnen, wenn sich Eisplatten z. B. von den Dächern von LKWs lösen und auf der Windschutzscheibe zerbersten. Somit ist von einer direkten tödlichen Auswirkung des Eisfalls nicht auszugehen.

Ein durchschnittlicher Autofahrer kann mit diesen Bedingungen umgehen und wird keinen Schaden davontragen. Dennoch wird davon ausgegangen, dass in 10% (Korrekturfaktor *K=0.1*) aller Fälle eine Reaktion des Autofahrers erfolgt, die zu einem mit Kapitel 5.7.1 vergleichbarem Schadensausmaß führt.

5.7.1.8 Ermittlung der Gefährdungswahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person (ein Fahrzeug) von einem Eisstück getroffen wird und daraus eine Verletzung resultiert, kann somit zu

[5] Es wird nur das Winterhalbjahr in Betracht gezogen.

$$P = H_T \cdot P_T \cdot P_A \cdot K \quad \text{(Autofahrer) bzw.}$$

$$P = H_T \cdot P_T \cdot P_A \quad \text{(Fußgänger)}$$

ermittelt werden.

5.7.2 Ermittlung des Risikos

Für jedes einzelne Eisstück in einem 5 x 5 m² großem Quadranten wird das Risiko durch eine Multiplikation von Schadensausmaß *C* und Gefährdungswahrscheinlichkeit *P* berechnet.

$$R_{Eistück\,i} = C_{Eisstück\,i} \cdot P_{Eisstück\,i}$$

Wobei die Wahrscheinlichkeit P_i für jedes Eisstück in einem Quadranten identisch ist. Somit ergibt sich für das Risiko in einem Quadranten in dem *N* Eisstücke gelandet sind

$$R_Q = P_i \cdot \sum_{i=1}^{N} C_{Eisstück\,i}$$

Für das Gesamtrisiko, wenn insgesamt *M* Quadranten betroffen sind, gilt

$$R_{gesamt} = \sum_{k=1}^{M} P_{ik} \cdot \sum_{i=1}^{N} C_{Eisstück\,ik}$$

5.7.3 Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen

Die Risikoreduktion durch geeignete Maßnahmen ist für Straßen/Wege erforderlich, die ein hohes / unakzeptabel hohes Risiko gemäß Kapitel 2 aufweisen.

Um die Risiken durch Eisfall zu reduzieren, bieten sich zwei prinzipielle Möglichkeiten an. Zum einen kann der Abstand der Straße/des Weges zur Windenergieanlage vergrößert werden, so dass die Trefferwahrscheinlichkeit mit einem Eisstück auf das erforderliche Maß verringert wird. Zum anderen kann die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Fahrzeuges auf der Straße / eines Fußgängers auf dem Weg reduziert werden.

In folgender Tabelle werden beispielhaft mögliche Sicherheitsmaßnahmen dargestellt und deren risikoreduzierendes Potential bewertet.

Kategorie	Sicherheitsmaßnahme	Wirksamkeit
Aufenthaltswahrscheinlichkeit reduzieren	Warnschilder über Eisfallbedingungen	Obligatorisch / geringer Effekt, maximal eine Größenordnung
	Regelmäßige (mindestens jährlich) Informationsveranstaltungen/ Flugblätter/ Durchsagen im Radio etc.	Reduktion des Risikos um maximal eine Größenordnung (z. B. vom hohen Risiko zum tolerablen Risiko)
	Sperrung der Straße/des Weges in Wintermonaten/zu Zeiten mit Eisfallbedingungen mittels Schranken/Warnlichtanlage mit dem Eiserkennungssystem gekoppelt	Reduktion des Risikos um zwei Größenordnungen (z. B. vom hohen Risiko zum akzeptablen Risiko)
Abstand vergrößern	Verlegung der Straße/des Weges	Abhängig vom gewählten neuen Abstand; prinzipiell ist eine Reduktion des Risikos bis in den vernachlässigbaren Bereich möglich
	Spezielle Wegführung in den Wintermonaten	
	Verlegung der WEA	

Tabelle 13: Wirksamkeit bestimmter Sicherheitsmaßnahmen.

5.8 Unsicherheitsbetrachtung

Die Bewertung von gefährlichen Ereignissen beinhaltet notwendigerweise die Vereinfachung, Idealisierung und Parametrisierung von tatsächlichen Prozessen und Abhängigkeiten. Unsicherheiten in den Ergebnissen von Risikobewertungen können sich aus jedem Parameter, jeder Annahme oder jedem Datenwert ergeben, der in die Analyse einfließt. Auch eine unvollständige oder fehlerhafte Gefahrenermittlung kann die Ergebnisse einer Risikobewertung systematisch beeinträchtigen.

Mathematische Modelle, die für die Abschätzung von Risiken verwendet werden, stellen immer eine Vereinfachung und Idealisierung der realen Bedingungen dar. So hängt beispielsweise die Flugbahn eines Eisstücks von einer Vielzahl von Faktoren ab, so dass sich einzelne Flugbahnen chaotisch und unvorhersehbar zu verhalten scheinen. Ein mathematisches Modell, das die Hauptkräfte auf ein solches Eisstück und vernünftige Annahmen für die Windverteilung beschreibt, wird im Allgemeinen nicht in der Lage sein, die tatsächliche Flugbahn eines realen Eisstücks zu beschreiben. Trotz dieser Einschränkung können dennoch gültige Ergebnisse für ein großes statistisches Ensemble solcher Flugbahnen abgeleitet werden.

Eine wichtige Quelle von Unsicherheiten bei der Risikobewertung für Eisfall und Eiswurf von Windparks sind die Unsicherheiten der Eingangsdaten und Parameter.

Daher wurden wesentliche Parameter auf der Grundlage von begründeten Annahmen oder Schätzungen ausgewählt, wie z. B. der cw-Wert für die Eisfragmente. Für Parameter, die eine klar vorhersehbare Auswirkung auf das Gesamtrisiko haben (z. B. die Anzahl der Eisstücke). wurde auf der Basis von durchgeführten Untersuchungen konservative Annahmen getroffen. Für alle Parameter gilt, dass sie so gut wie möglich auf der Grundlage verfügbarer Daten, der Literatur oder vergleichender Berechnungen abgeleitet wurden. Dabei wurde die Unkenntnis über die tatsächlichen realen Werte durch Verwendung konservativer Werte berücksichtigt. Dadurch ist sichergestellt, dass das ermittelte Endergebnis eine konservative Aussage über das bestehende Risiko und die zu ergreifenden Maßnahmen liefert.

5.9 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
A	[m/s]	Skalenparameter der Weibullverteilung
A_{Eis}	[m²]	Stirnfläche Eis
ALARP	[-]	As low as reasonably practicable
α	[-]	Exponent des Windprofils
B	[m]	Breite
C	[-]	Schadensausmaß
C_D	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
D	[m]	Rotordurchmesser
E_{kin}	[kg m²/s²]	Kinetische Energie
f	[-]	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
g	[m/s²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	Höhe
H_T	[-]	Trefferhäufigkeit
HW	[-]	Hochwert
IEC	[-]	International Electrical Commission
k	[-]	Formparameter der Weibullverteilung
K	[-]	Korrekturfaktor
L	[m]	Länge
m	[kg]	Masse des Eisstücks
MEM, Rm	[1/a]	Minimale Endogene Sterblichkeit
μ		Mittelwert
N	[-]	Nord, nördlich
n	[-]	Anzahl Eisansatztage
NH	[m]	Nabenhöhe
NN	[-]	Normal Null
O	[-]	Ost, östlich
P	[-]	Wahrscheinlichkeit (engl. probability)
Pr	[kg m²/s²]	Probit-Funktion
R		Risiko
RW	[-]	Rechtswert
ρ	[kg/m³]	Luftdichte
ρ_{Eis}	[kg/m³]	Dichte Eis
S	[-]	Süd, südlich
σ		Standardabweichung
U_0	[m/s]	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
v	[m/s]	Geschwindigkeit des Eisstücks
W	[-]	West, westlich
WEA, WKA	[-]	Windenergieanlage
W_{rel}	[m/s]	Relative Windgeschwindigkeit
x	[m]	Position (x,y,z)