EISRISIKOGUTACHTEN

für drei Windenergieanlagen

am Standort

Hundsrücken (Gemeinde Oberried)

Baden-Württemberg

Datum: 19.03.2026

Berichtsnummer: 26-1-3008-000-ERe

Auftraggeber

Ökostrom Consulting Freiburg GmbH

Goethestraße 64

79100 Freiburg

Auftragnehmer

Ramboll Deutschland GmbH

Elisabeth-Consbruch-Straße 3

34131 Kassel

Tel.: +49 561 288573-0

Das vorliegende Eisrisikogutachten für den Standort Hundsrücken auf dem Gebiet der Gemeinde Oberried wurde der Ramboll Deutschland GmbH von der Ökostrom Consulting Freiburg GmbH in Auftrag gegeben.

Das Urheberrecht und geistige Eigentum dieses Gutachtens liegt bei der Ramboll Deutschland GmbH. Inhaltliche Veränderungen bedürfen einer Zustimmung. Die Nutzungsrechte dieses Gutachtens, insbesondere die elektronische Weitergabe, Veröffentlichung und Vervielfältigung liegen bei der auftraggebenden Stelle und bedürfen deren Zustimmung.

Nr.	Datum	Bearbeiter:in	Beschreibung
000	17.03.2026	M. Rehage	Planung von drei WEA des Typs Enercon E-175 EP5 E2 mit 162,0 m Nabenhöhe

Hamburg, 19.03.2026



Moritz Rehage, M. Sc.
(Bearbeiter)



Anna Tomberge, M. Sc.
(Prüferin)

INHALT

1 Aufgabenstellung 5
2 Theoretischer Hintergrund 7
2.1 Entstehung von Eis und Eisabwurf 7
2.2 Rechtlicher Rahmen 8
3 Methode 10
3.1 Berechnung der Flugbahnen 10
3.2 Monte Carlo Simulation 11
3.3 Wahrscheinlichkeitsberechnung 12
3.4 Gefährdungsbereiche 12
3.4.1 Kritische Person 13
3.4.2 Kritisches Fahrzeug 14
3.5 Bewertung des Risikos 14
4 Projektbezug 17
4.1 Meteorologische Eingangsdaten 17
4.2 Vorbelastung 17
4.3 Vereisungsbedingungen 18
4.4 Gefährdungsbereiche 19
5 Ergebnisse 22
6 Bewertung der Ergebnisse 24
7 Literaturverzeichnis 25
8 Anhang 26
8.1 Glossar 26
8.2 Ergänzende Abbildungen und Tabellen 27

ZUSAMMENFASSUNG

Am Standort Hundsrücken auf dem Gebiet der Gemeinde Oberried ist die Errichtung von drei Windenergieanlagen (WEA) des Typs Enercon E-175 EP5 E2 mit 162,0 m Nabenhöhe geplant. Vor Ort befinden sich keine relevante WEA, die als Vorbelastung betrachtet werden. Am Standort Hundsrücken wurden zwei Gefährdungsbereiche (GB) ermittelt. Die potenziellen Gefahren für den Menschen durch Eisfall und Eiswurf ausgehend von den geplanten WEA sind als tolerables Restrisiko einzustufen. Mit einfachen Maßnahmen wie dem Aufstellen von Hinweisschildern kann eine weitere Risikominimierung um den Faktor 10 erreicht werden.

1 AUFGABENSTELLUNG

Am Standort Hundsrücken ist die Errichtung von drei Windenergieanlagen (WEA) des Typs Enercon E-175 EP5 E2 mit 162,0 m Nabenhöhe geplant. Die Kenndaten der geplanten WEA sind Tabelle 1 zu entnehmen und in Abbildung 1 ist eine Übersichtskarte dargestellt.

Tabelle 1: Kenndaten der geplanten WEA

Nr.	Typ	Naben-höhe (m)	Rotordurch-messer (m)	Gesamt-höhe (m)	Drehzahl bei Nennleistung (min^{-1})	UTM 32, ETRS89	
						Ost	Nord
01	Enercon E-175 EP5 E2	162,0	175,0	249,5	9,0	418.493	5.308.726
02	Enercon E-175 EP5 E2	162,0	175,0	249,5	9,0	418.580	5.308.220
03	Enercon E-175 EP5 E2	162,0	175,0	249,5	9,0	418.665	5.307.802

Wenn eine Vereisung durch die klimatischen Bedingungen an einem Standort nicht ausgeschlossen werden kann, ist für die Genehmigung eine Risikoermittlung durch das Risiko von Eisfall und Eiswurf an den geplanten WEA erforderlich [1]. Dabei soll die Wahrscheinlichkeit von Eisfall und Eiswurf sowie die Flugweite der Eisstücke ermittelt werden. Zudem wird eine Risikobewertung von Eisfall und Eiswurf durchgeführt, um die potenzielle Gefährdung für die am Standort vorbeiführenden Straßen, Wege und andere Aufenthaltsbereiche von Menschen abzuschätzen. Die Untersuchung ist hierbei auf potenziell tödliche Verletzungen begrenzt.

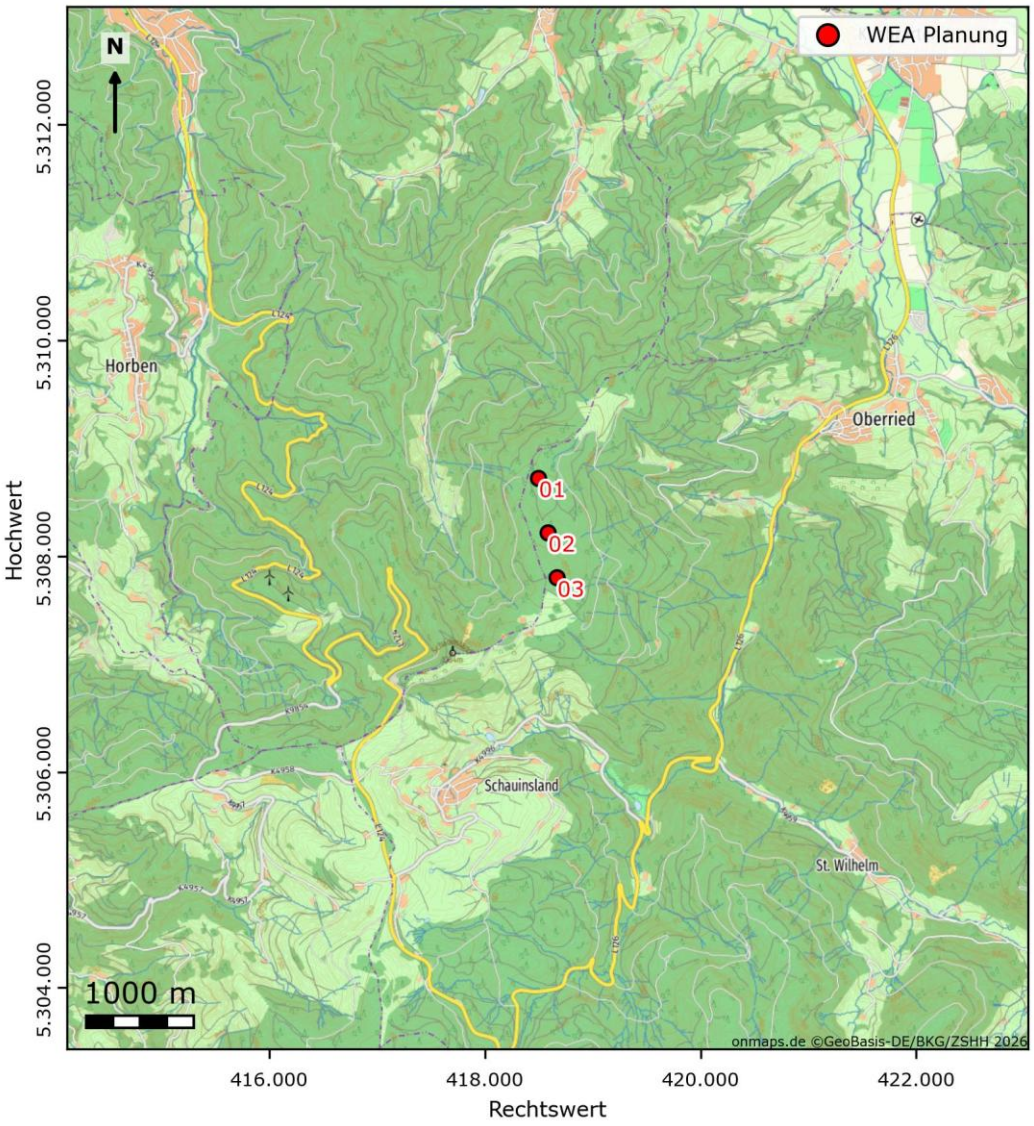


Abbildung 1: Übersichtskarte der WEA-Neuplanung am Standort Hundsrücken.

2 THEORETISCHER HINTERGRUND

2.1 Entstehung von Eis und Eisabwurf

Unter bestimmten meteorologischen Bedingungen kann an WEA – insbesondere an den Rotorblättern – Vereisung auftreten. Dabei lassen sich im Wesentlichen drei Eisarten unterscheiden:

- Raureif (porös und leicht) entsteht bei Resublimation von Wasserdampf, wenn sich die Rotorblätter in Wolken befinden,
- Raueis (Dichte: 0,4 – 0,8 g/cm^3, porös, geringe Zugfestigkeit und variable Kompressibilität) bildet sich beim Aufprall unterkühlter Wassertröpfchen an der Rotoranströmkante bei sofortigem Gefrieren,
- Klareis (Dichte: ~1 g/cm^3, transparent, dicht, homogene Struktur, sehr geringe Kompressibilität und hohe Zugfestigkeit) bildet sich beim Auftreffen von größeren Tröpfchen auf den Rotorblättern und dem Entlangfließen entlang des Rotors durch langsames Gefrieren. Charakteristisch sind Anwachs-/Ablösezyklen, die zu sägezahnartigen Eisprofilen führen.

Vereisung kann das gesamte Rotorblatt oder nur Teilbereiche betreffen und führt zu aerodynamischen Verlusten, Vibrationen sowie zu Eisabfall (Ablösen im Stillstand oder Abschleudern im Betrieb) [1], [2], [3], [4]. Die auf die Vereisung von WEA bezogenen Gefährdungen können in zwei verschiedene Kategorien eingeteilt werden:

- Eiswurf bezeichnet die Situation, in der die Bewegung des Rotorblatts einer betriebenen WEA den Eisstücken, die sich von der Blattoberfläche ablösen, eine erhebliche Anfangsgeschwindigkeit verleiht,
- Eisfall bezeichnet Eisstücke, die von einer WEA im Stillstand oder im Leerlauf abfallen.

Aufgrund der Anfangsgeschwindigkeit können die Eisstücke beim Eiswurf größere Entfernungen erreichen als beim Eisfall. Bei in Betrieb befindlichen WEA verursacht die Rotordrehung außerdem eine zusätzliche Bewegung der Rotorblattoberfläche gegenüber den in der Luft verteilten Wassertröpfchen, wodurch der Eisbildungsprozess verstärkt wird [1].

Das größte Unfallrisiko durch Eisfall und -wurf geht von Raueis und Klareis aus. Neben kalten Temperaturen bedingen eine hohe relative Luftfeuchtigkeit, ein positives Angebot an Flüssigwasser in der Atmosphäre und ausreichende Anströmung (vorhandener Wind) deren Entstehung. Für den Menschen gefährlicher Eisfall und -wurf ist grundsätzlich auf eine Distanz von 1,5 · (Nabenhöhe + Rotordurchmesser) um eine WEA beschränkt [5].

An WEA sind standardmäßig systemimmanente Eiserkennungssysteme installiert, die diese bei Eisansatz abschalten oder in den Trudelbetrieb überführen. So können Eisabwurfereignisse verhindert werden. In diesem Gutachten wird vorausgesetzt, dass die geplanten WEA mit einem entsprechenden und auf Funktionssicherheit geprüften Detektionsmechanismus ausgestattet sind.

2.2 Rechtlicher Rahmen

Das vorliegende Gutachten folgt den Empfehlungen des IEA Wind TCP, Task 19 „Wind Energy in Cold Climates" (2022) [6] sowie der Vornorm DIN IEC/TS 61400-31 (2024) [1].

Spezifische Regelungen zum Umgang mit Risiken aufgrund von Vereisungserscheinungen an WEA kennt das deutsche Recht nicht. Entsprechend kommen insbesondere allgemeine Rechtsregelungen nach Bau- und Anlagenrecht in Betracht, um die Genehmigungsfähigkeit der WEA zu bewerten und so die Fragen des Risikos bzw. erforderlicher Vorsorge- und/oder Abwehrmaßnahmen zu beantworten. Eisfallerscheinungen erfüllen zwar nicht den Tatbestand der schädlichen Umwelteinwirkung i.S.d. § 3 I u. II BImSchG, könnten allerdings als sonstige Gefahren i.S.d. § 5 I Nr. 2 BImSchG gelten [7]. Auch hat sich die Frage der Risikobewertung am bau- bzw. bauordnungsrechtlichen Regelungsgehalt zu orientieren, das im Rahmen der Genehmigungsvoraussetzungen i.S.d. § 6 I Nr. 2 i.V.m. § 13 BImSchG zu beachten ist. Zum Beispiel sind gemäß § 3 I LBO[1] bauliche Anlagen so anzuordnen und zu errichten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht bedroht werden und dass sie ihrem Zweck entsprechend ohne Missstände benutzbar sind. Der Inhalt des § 3 I LBO ist Ausdruck der staatlichen Schutzpflichten abgeleitet aus den Grundrechten nach Art. 2 II 1 GG und Art. 20a GG, mithin die Vorsorge und Schutz vor potenziellen Gefahren zur Sicherheit der Grundrechte. Allerdings muss nicht mit absoluter Sicherheit eine Grundrechtsgefährdung ausgeschlossen werden, da dies jegliche Nutzung von Technik ausschließen würde[2]. Entsprechend stellt sich die Frage ‚Wie sicher ist sicher genug?' bzw. wie ist das Risiko von Eisfall von WEA angesichts der staatlichen Schutzpflichten zu bewerten?

Unter dem Begriff des Risikos wird die Möglichkeit eines ungewissen Schadenseintritts verstanden. Hierbei kommt dem Begriff der Gefahr eine „Schlüsselrolle" zu, denn nicht jede Möglichkeit eines Schadenseintritts begründet auch eine Gefahr, die nicht hinzunehmen und entsprechend abzuwehren ist. Die Annahme der Gefährdungsbegründetheit steigt mit der Schwere und Häufigkeit des möglicherweise anzunehmenden Schadensausmaßes und Schadenseintritts [8].

Die Rechtsprechung hat die Frage des Risikos im Zusammenhang mit Vereisungserscheinungen bei WEA in diversen Entscheidungen tiefergehend betrachtet[3]. Danach ist zunächst eine Gefährdung durch Eiswurf anzunehmen und im Einzelfall zu bewerten. Bei installierten Eiserkennungs- bzw. Eissensoren und entsprechender Abschaltung der Anlage besteht i.d.R. eine Gefährdung durch Eiswurf nicht mehr[4].

[1] Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. März 2010, (GBl. Nr. 7, S. 588).
[2] BVerfGE 49, 89 (142 f.).
[3] VG Ansbach, Beschluss v. 19.12.2000 – AN 9 00.01759 u.a.; VG Freiburg, Beschluss v. 28.08.2003 – Az. 1 K 820/03; VG Osnabrück, Urt. v. 30. 01. 2004 - 2 A 92/02; OVG Magdeburg, Beschluss v. 09.02.2006; OVG Magdeburg, Urt. 22.06.2006 – 2 L 23/04; VG Saarlouis, Urt. v. 30.07.2008 – 5 K 6/08; OVG NRW, Urt. v. 28.08.2008 – Az. 8 A 2138/06; VGH München, Beschluss v. 31.10.2008 – 22 CS 08.2369; OVG Rheinland-Pfalz, Urt. v. 29.10.2008 – 1 A 11330/07.OVG; OVG Koblenz, Urt. 12.05.2011 – 1 A 11186/08; VG Minden, Beschluss v. 13.12.2012 – 11 L 529/12.
[4] VG Freiburg, Urt. v. 25.10.2005 - 1 K 653/04.

Eisdetektionssysteme können das Restrisiko – gemessen am „Maßstab der praktischen Vernunft“[5] – maximal erforderlich minimieren[6]. Verbliebende Risiken können als „allgemeine Lebensrisiken“ eingestuft werden[7].

[5] BVerfGE 49, 89 (143).
[6] OVG Koblenz, Urt. v. 12.05.2011 – 1 A11186/08 = NVwZ-RR 2011, 759 (762).
[7] VG Osnabrück, Urt. v. 30. 01. 2004 - 2 A 92/02; VG Freiburg: Urt. v. 25.10.2005 - 1 K 653/04; OVG Magdeburg, Beschluss v. 09.02.2006; dem folgend vgl. OVG Rheinland-Pfalz, Urt. v. 29.10.2008 – 1 A 11330/07.OVG; sich anschließend vgl. OVG Lüneburg, Urt. v. 01.06.2010 – 12 LB 31/07.

3 METHODE

Zur Risikobeurteilung durch Eisfall und Eiswurf werden die Flugbahnen von Eispartikeln unterschiedlicher Dichte aus diskreten Abwurfpositionen entlang der rotierenden Rotorblätter für repräsentative Windgeschwindigkeiten und -richtungen numerisch simuliert. Aus den Trajektorien wird eine räumliche Abwurfverteilung um die WEA abgeleitet und auf eine realistische jährliche Anzahl abgeworfener Partikel skaliert.

Durch die Überlagerung dieser Verteilung mit ausgewiesenen Gefährdungsbereichen (z. B. Straßen, Wanderwege, Skipisten, Aufenthaltsflächen) wird das Risiko bestimmt, dass eine Person in dem jeweiligen Bereich durch Eisfall/-wurf tödlich verletzt wird.

3.1 Berechnung der Flugbahnen

Bei Abwurf eines Eispartikels von einer WEA wird angenommen, dass die Anfangsgeschwindigkeit des Partikels die gleiche ist, wie die des Rotorblattes an der Abwurfposition und zur Abwurfzeit. Sie hängt also direkt von den Umdrehungen pro Minute der WEA (j) ab. Die Eispartikel werden hierbei als punktförmig angenommen.

Luftwiderstand und Gravitation definieren dann die Flugbahn, bis das Partikel den Boden berührt. Die Anfangsposition des Partikels wird bestimmt durch seine radiale Position r auf dem Rotorblatt und dem Winkel von dem Rotorblatt relativ zum Horizont θ. x, y und z werden als die Positionen des Eisfragments in Windrichtung, seitlicher Richtung und vertikaler Richtung betrachtet, relativ zu einem Koordinatensystem, dessen Ursprung sich an der Basis des Turms der Windkraftanlage befindet.

Die Bewegungsgleichungen eines Partikels mit Masse m und Querschnittsfläche A kann dann beschrieben werden durch folgende Differentialgleichungen [9]:

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = -\frac{1}{2}\rho C_D A\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + U(z)\cdot\sin(\mathrm{wdir(z)})\right)|V|,$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = -\frac{1}{2}\rho C_D A\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + U(z)\cdot\cos(\mathrm{wdir(z)})\right)|V|,$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2} = -mg - \frac{1}{2}\rho C_D A\left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\right)|V|,$$

$$|V| = \sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} - U(z)\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\right)^2}.$$

Hierbei ist g die Erdbeschleunigung, ρ die Luftdichte, C_D der Luftwiderstandskoeffizient, $U(z)$ und $\mathrm{wdir\,(z)}$ die Windgeschwindigkeit und Windrichtung in Höhe z über Grund.

3.2 Monte Carlo Simulation

Die Gleichungen werden für unterschiedliche Abwurfpositionen r, Massen m und Winkel θ gelöst. Als Abwurfpositionen r werden zufällige Positionen entlang des Rotors gewählt, wobei angenommen wird, dass die Wahrscheinlichkeit für Eisfall und Eiswurf radial entlang des Rotors zunimmt, da mit größerem Abstand von der Nabe die Geschwindigkeit und damit die Zentrifugalkraft steigt. Realistische Massen für Eispartikel lassen sich indirekt über Feldstudien zur Verteilung von A/m Werten errechnen. In Task-19 [6] werden aus vier Studien Daten zur A/m Häufigkeitsverteilung kombiniert. Eine GEV (General Extreme Value) Verteilung über die Daten dient in diesem Gutachten als Basis zur Auswahl von A/m Werten, wobei zufällige Werte je GEV-Wahrscheinlichkeit generiert werden (siehe Anhang: Abbildung 8). Die Simulation wird für eine große Anzahl an Partikeln durchgeführt und danach auf eine realistische Anzahl an Eispartikeln skaliert: Tabelle 2 zeigt die Anzahl an abgeworfenen Eispartikeln bei einer Feldstudie zu einer Enercon E-82 Turbine für verschiedene meteorologische Vereisungszeiträume und Betriebsmodi. Die Werte werden je nach tatsächlich verwendetem Rotordurchmesser skaliert.

Tabelle 2: Jährliche Anzahl an Eispartikeln basierend auf Feldstudien einer Enercon E-82 Turbine für verschiedene Operationsmodi [6].

Eis-klasse	Meteorologische Vereisung (% im Jahr)	Jährliche Anzahl an Eispartikeln pro WEA (Partikel / Jahr)			
		Leerlauf	Leerlauf IPS[8] Enteisung	Im Betrieb Inaktives IPS[8]	Im Betrieb IPS[8] Anti-Vereisung
5	> 10	> 3200	> 8800	9600	8000
4	5 - 10	1600	4400	4800	4000
3	3 - 5	800	2200	2400	2000
2	0,5 - 3	400	1100	1200	1000
1	0 - 0,5	80	220	240	200

Die Bestimmung der meteorologischen Vereisung erfolgt durch die Berechnung der Anzahl an Zeitpunkten im Jahr, bei denen die Bedingungen: Temperatur auf Nabenhöhe zwischen -10 und 0 $°C$, die relative Luftfeuchtigkeit über 90 %, die Windgeschwindigkeit über 3 ms^{-1} und der Wassergehalt der Wolke über 0.5 $mgkg^{-1}$ erfüllt sind [2] [3] [4]. Die meteorologischen Daten stammen von der vom ECMWF entwickelten globalen atmosphärischen Reanalyse ERA-5[9]. Für Höhen oder Zeitpunkte, für die keine Messungen vorhanden sind, werden Zwischenwerte interpoliert, um eine 10-minütige temporale Auflösung zu erhalten. Eine Vereisung an Rotorblättern wird angenommen, sofern die meteorologischen Vereisungsbedingungen über mindestens drei Stunden erfüllt sind, wobei maximal zwei Einzelwerte als Ausreißer zulässig sind. Tabelle 7 im Anhang zeigt die Eingangsdaten für die Simulation.

[8] Ice Protection System / Eisprotektionssystem
[9] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), ERA-5 Data: https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5

Es werden nur diejenigen WEA als Vorbelastung berücksichtigt, die im *risikorelevanten Bereich*[10] liegen.

3.3 Wahrscheinlichkeitsberechnung

Das Umfeld der WEA wird in $Q_A = 5 \cdot 5\,\mathrm{m}$ große Quadrate diskretisiert. Für jedes Feld i wird die Wahrscheinlichkeit p_i berechnet, dass es dort zu einem letalen Unfall kommt, während sich ein Individuum der Größe I_A (Person = 0,09 m² / Fahrzeug = 2 m²) in diesem Feld aufhält. p_i hängt einerseits davon ab, wie viele Partikel im Verhältnis zu den insgesamt abgeworfenen Partikeln im Feld i landen und andererseits von der kinetischen Energie der Partikel, die wiederrum eine Funktion der Masse und der Aufprallgeschwindigkeit ist (siehe Anhang: Abbildung 9). Das Individuum kann sich mit konstanter Geschwindigkeit entlang eines Weges durch die Ebene bewegen. Die Wahrscheinlichkeit entlang eines Weges durch das Auftreffen von Eisstücken zu verunglücken, ergibt sich durch wahrscheinlichkeitsmathematische Addition aller p_i der Felder, die der Weg kreuzt. Je länger der Weg durch ein bestimmtes Feld i verläuft, desto größer ist auch der Einfluss der dort berechneten Wahrscheinlichkeit p_i. Ein Individuum kann sich auch stationär für längere Zeit in einem bestimmten Bereich aufhalten. Die Wahrscheinlichkeit in diesem Bereich zu verunglücken, hängt dann maßgeblich von der Aufenthaltszeit ab. Welche Wege und Aufenthaltsbereiche bei der Risikoanalyse betrachtet werden, muss bei einer Standortbesichtigung erörtert werden. Diese werden dann als Gefährdungsbereiche (GB) klassifiziert.

3.4 Gefährdungsbereiche

Als Gefährdungsbereiche werden Routen[11] und Aufenthaltsorte im Umkreis der geplanten WEA klassifiziert, die aufgrund ihrer Nutzungshäufigkeit und/oder Wegführung im Vergleich zu anderen Routen das höchste zu erwartende Letalitätsrisiko durch Eisfall und Eiswurf aufweisen. Beispielsweise würde ein Wanderweg, der durch einen Windpark verläuft, als Gefährdungsbereich klassifiziert werden, nicht jedoch kleinere Wege, die von dem Wanderweg abführen. Es genügt, für die identifizierten Routen (Gefährdungsbereiche) mit erwarteter Spitzenexposition das Risiko nachzuweisen; daraus folgt konservativ ein mindestens ebenso niedriges Risiko für benachbarte, weniger exponierte Wege. Für jeden GB wird eine kritische Person (KP) bzw. ein kritisches Fahrzeug (KF) festgelegt. *Kritisch* ist die Nutzung mit dem höchsten erwarteten Risiko, in der Regel aufgrund hoher Nutzungsfrequenz und/oder langsamer Geschwindigkeit (= längere Exposition). Die KP und KF dienen als Bemessungsfälle der weiteren Risikobewertung. Zu erhebende Parameter je GB sind:

- Geschwindigkeit v oder Aufenthaltszeit t der KP / KF,
- Frequenz f (Anzahl der Wege / Fahrten, die die KP / das KF pro Jahr auf dem GB zurücklegt),

[10] Eisfall und Eiswurf treten überwiegend in einem Radius von 1,5 · (Rotordurchmesser + Nabenhöhe) um eine WEA auf [5]. Es werden daher nur Bestandsanlagen als potenzielle Vorbelastung geprüft, die innerhalb des zweifachen Radius 2 · (1,5 · (Rotordurchmesser + Nabenhöhe)) um die neugeplanten WEA liegen, um eine mögliche Addition der Wahrscheinlichkeiten für Eisfall bzw. Eiswurf einzubeziehen.
[11] Basierend auf realistischen Weg- und Straßenkombinationen für Personen und Kfz

- Population n (Anzahl der Personen / Fahrzeuge, die die Kriterien der KP / KF in dem jeweiligen GB erfüllen) [12].

Die Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Simulationsaufbaus.

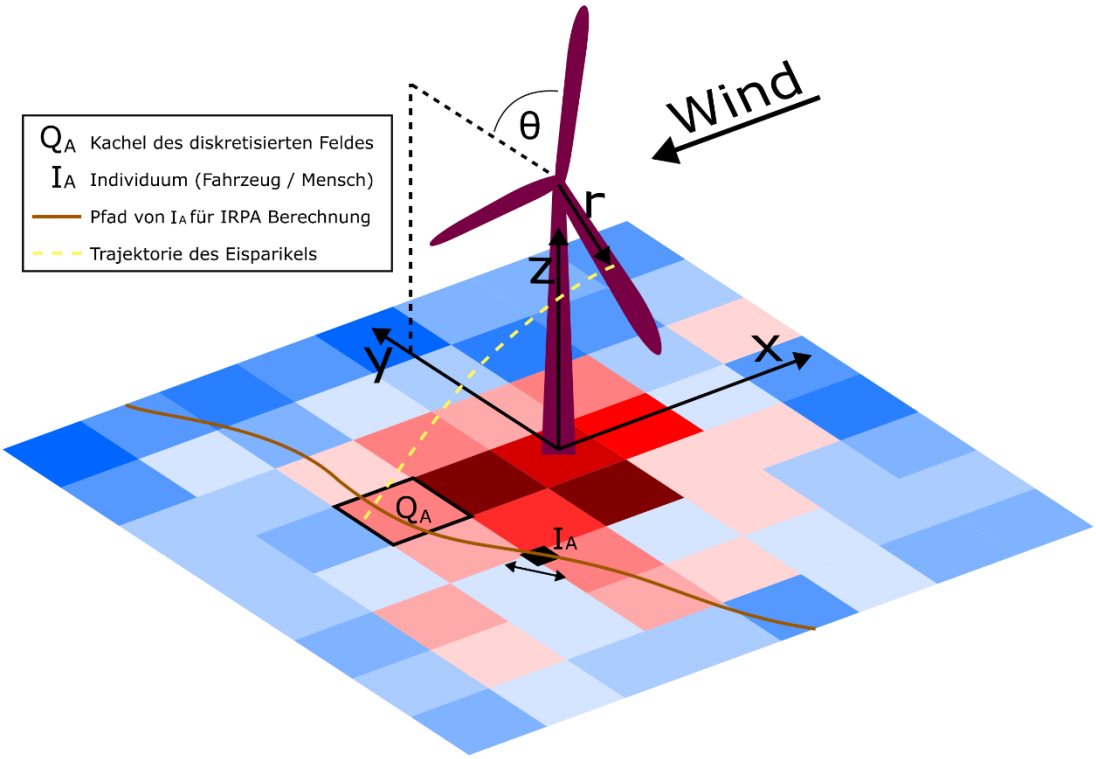


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Eissimulation

3.4.1 Kritische Person

Für die Frequentierungen von KP wird eine Kategorisierung entsprechend der verwendeten Route verwendet (Tabelle 3).

[12] Beispiel: Eine Joggerin benutzt wöchentlich einen ausgeschriebenen Sportpfad (f = 52). Sie rennt mit einer konservativen Geschwindigkeit von v = 7 kmh-1. Insgesamt gibt es in dem naheliegendem Ort 20 weitere Personen, die mutmaßlich ebenfalls einmal die Woche den gleichen Sportpfad benutzten (n = 20). Der Sportpfad wird möglicherweise auch von Fußgängern benutzt, diese weichen aber auch auf andere Wege aus und variieren in ihrer Häufigkeit und Wegführung. Um dieses Verhalten zu berücksichtigen, kann zusätzlich noch ein weiterer GB ausgewiesen werden, der eine worst-case Bewegung durch den Windpark beschreibt (z.B. ein Weg, der möglichst viele Windanlagen passiert).

Tabelle 3: Definitionen und Kategorien von Routen

Kategorie	Definition	Frequentierung pro Jahr (f)
Ständig genutzte Route	Angesichts des Zustands, der Zugänglichkeit und der Nähe zu Siedlungen ist davon auszugehen, dass die Route regelmäßig, d. h. praktisch täglich, von Spaziergängern oder Joggern genutzt wird. Für diese Einstufung reicht es aus, wenn ein einzelner Jogger oder Spaziergänger die Route regelmäßig nutzt.	365[13]
Häufig genutzte Route	Nicht alle der oben genannten Merkmale treffen auf diese Route zu; beispielsweise lassen die größere Entfernung zu Siedlungen und die schlechte Erreichbarkeit vermuten, dass diese Route nicht täglich, aber dennoch häufig von Joggern oder Spaziergängern bzw. als Arbeitsweg genutzt wird.	200[14]
Gelegentlich genutzte Route	Diese Kategorie umfasst Routen, die eindeutig als solche erkennbar sind, jedoch nicht eindeutig als Hauptroute identifizierbar sind und deren Beschaffenheit und Zugänglichkeit auf eine gelegentliche Nutzung hindeuten.	52[15]
Selten genutzte Route	Diese Kategorie umfasst Routen, die als solche erkennbar sind und deren Zustand und Zugänglichkeit auf eine seltene Nutzung hindeuten.	12[16]
Normalerweise ungenutzte Route	Routen, die eindeutig als Zufahrtswege für die Forst- oder Landwirtschaft erkennbar sind oder die weit entfernt von der nächsten Wohnsiedlung liegen, gelten im Allgemeinen als normalerweise ungenutzt.	6[17]

3.4.2 Kritisches Fahrzeug

Rückschlüsse auf die Frequentierung von Straßen können indirekt über Straßenverkehrszählungen gewonnen werden sowie der gutachterlichen Einschätzung, wie viele Fahrzeuge davon als KF kategorisiert werden können. In diesem Gutachten werden lediglich Straßen berücksichtigt, die eine Geschwindigkeit von über 50 km/h zulassen, da erst ab dieser Geschwindigkeit von tödlichen Folgen für die Insassen ausgegangen werden kann [6]. Die Bestimmung der Frequentierung und Population erfolgt anhand einer Standortbesichtigung und gutachterlichen Abschätzung der Umgebung.

3.5 Bewertung des Risikos

Das Risiko durch Eisfall und Eiswurf entlang eines GB letal zu verunglücken, wird als individuelles Risiko pro Jahr (Individual Risk Per Annum (IRPA)) ausgegeben. Dieses hängt nur von dem Weg, der Geschwindigkeit v und der Frequenz f ab, mit der das Individuum den Weg zurücklegt. Multipliziert man das individuelle Risiko mit der Größe der Population n, erhält man das kollektive Risiko PLL (Potential Loss of Life). Es ist der Erwartungswert an KP bzw. KF, die in einem Jahr verunglücken.

[13] Täglich
[14] Arbeitstage exkl. Urlaubs-, Krankheitstage, etc.
[15] Einmal die Woche
[16] Einmal im Monat
[17] Alle zwei Monate

Um das Risiko durch Eisfall und Eiswurf außerhalb von Gefährdungsbereichen zu bewerten wird zusätzlich das Localized Individual Risk per Annum (LIRA) berechnet. Es beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine stationäre und ungeschützte Person innerhalb eines Jahres durch Eisfall und Eiswurf getötet wird. Stationär beschreibt den hypothetischen Fall, dass die Person rund um die Uhr zu 365 Tagen im Jahr am selben Ort steht. Das Ergebnis wird anhand eines Konturplots visualisiert.

Auf kleinen lokalen Straßen, Wegen und Pfaden wie Feldwegen oder Wanderwegen ist das individuelle Risiko entscheidend. Für Autobahnen, Bundes- und Landstraßen wird das kollektive Risiko wichtig, um ein Ereignis mit vielen Todesopfern stärker zu gewichten als ein Ereignis mit weniger Todesopfern.

Um ein Risiko entsprechend den gegebenen Situationen zu bewerten, muss das Risiko quantifiziert werden. Dafür wird auf das Prinzip der minimalen endogenen Mortalität (MEM) zurückgegriffen [10]. Die MEM beschreibt das Maß des tolerablen Risikos, welches von der entsprechenden Technologie[18] ausgeht. Die individuelle Sterblichkeitsrate beträgt $2 \cdot 10^{-4}$ Todesfälle pro Jahr[19]. Gefahren, die von neuen Anlagen zu erwarten sind, dürfen zu keiner signifikanten Erhöhung der minimalen endogenen Mortalität führen. Als signifikant wurde eine Erhöhung um 5 % der MEM definiert [6]. Daraus ergibt sich, dass eine neue Anlage das individuelle Risiko (LIRA und IRPA) von 10^{-5} Todesfälle pro Jahr nicht überschreiten darf.

Um seltene Ereignisse mit vielen Betroffenen stärker zu gewichten (wie etwa auf Autobahnen) wird das kollektive Risiko über PLL bewertet (Todesfälle / Jahr). Der Orientierungswert für die Unzulässigkeitsgrenze liegt typischerweise zwei Größenordnungen über dem individuellen Grenzwert[20].

Liegen für den betrachteten Gefährdungsbereich belastbare Hintergrunddaten vor, kann ein standortspezifischer Akzeptanzwert angesetzt werden (etwa als 5 % des Hintergrunds: $PLL_B = 0{,}05 \cdot B$). Fehlen solche Daten, wird der genannte generische Orientierungswert herangezogen.

Um weitere Abstufungen im Risiko zu etablieren, hat die UK Health and Safety Executive [11] weitere Stufen in der Risikoeinstufung eingeführt: Tolerables und Akzeptables Risiko. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Risikostufen.

[18] Dies betrifft alle Lebensbereiche wie Arbeit, Verkehr und Freizeit.
[19] Zu Grunde gelegt wurde die Gruppe der 5- bis 15-jährigen, da in dieser Gruppe die Sterblichkeit in wirtschaftlich gut entwickelten Ländern am niedrigsten ist, vgl. DIN EN 50126.
[20] Bei 100 exponierten Personen führt die Obergrenze von IRPA = 10-5 zu PLL = 10-5 · 100 = 10-3

Tabelle 4: Grenzwerte für verschiedene Risikokategorien [6] [11]

Sterberisiko (yr^{-1})		Beschreibung	
Kollektiv (PLL)	Individuell (IRPA/LIRA)		
$> 10^{-3}$ oder standortspezifisch	$> 10^{-5}$	Inakzeptables Risiko: Maßnahmen sind einzuleiten und deren Nutzen nachzuweisen	
10^{-4} - 10^{-3} oder standortspezifisch	10^{-6} - 10^{-5}	Tolerables Risiko: Maßnahmen sind in Betracht zu ziehen	
10^{-5} - 10^{-4} oder standortspezifisch	10^{-7} - 10^{-6}	Tolerables Risiko: Maßnahmen sind in der Regel nicht erforderlich	
$< 10^{-5}$ oder standortspezifisch	$< 10^{-7}$	Akzeptables Risiko	

4 PROJEKTBEZUG

Die geplanten WEA befinden sich 2,5 km von Hofsgrund entfernt. Die WEA befinden sich in einem hügeligen Gelände auf einer Höhe von ca. 1.110 bis 1.227 m über NN. Das Gebiet ist geprägt durch bewaldete Flächen.

4.1 Meteorologische Eingangsdaten

Die Windrichtungsverteilung in 162,0 m Höhe (Nabenhöhe der geplanten WEA) ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Verteilung dient als Übersicht und es ist zu beachten, dass in anderen Höhen andere Windrichtungen und Stärken dominieren, die das Flugverhalten der Partikel anders beeinflussen.

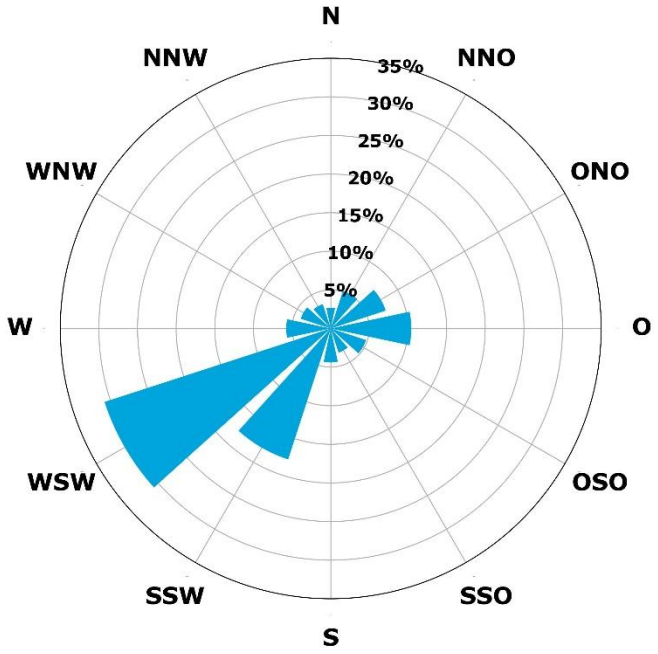


Abbildung 3: Windrichtungsverteilung in 162,0 m Höhe am Standort Hundsrücken von 1999 bis einschließlich 2025

4.2 Vorbelastung

Im risikorelevanten Bereich bestehen nach Informationen vom Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald [12] keine weiteren WEA bzw. werden keine weiteren WEA parallel geplant, die als potenzielle Vorbelastung geprüft werden (Abbildung 4).

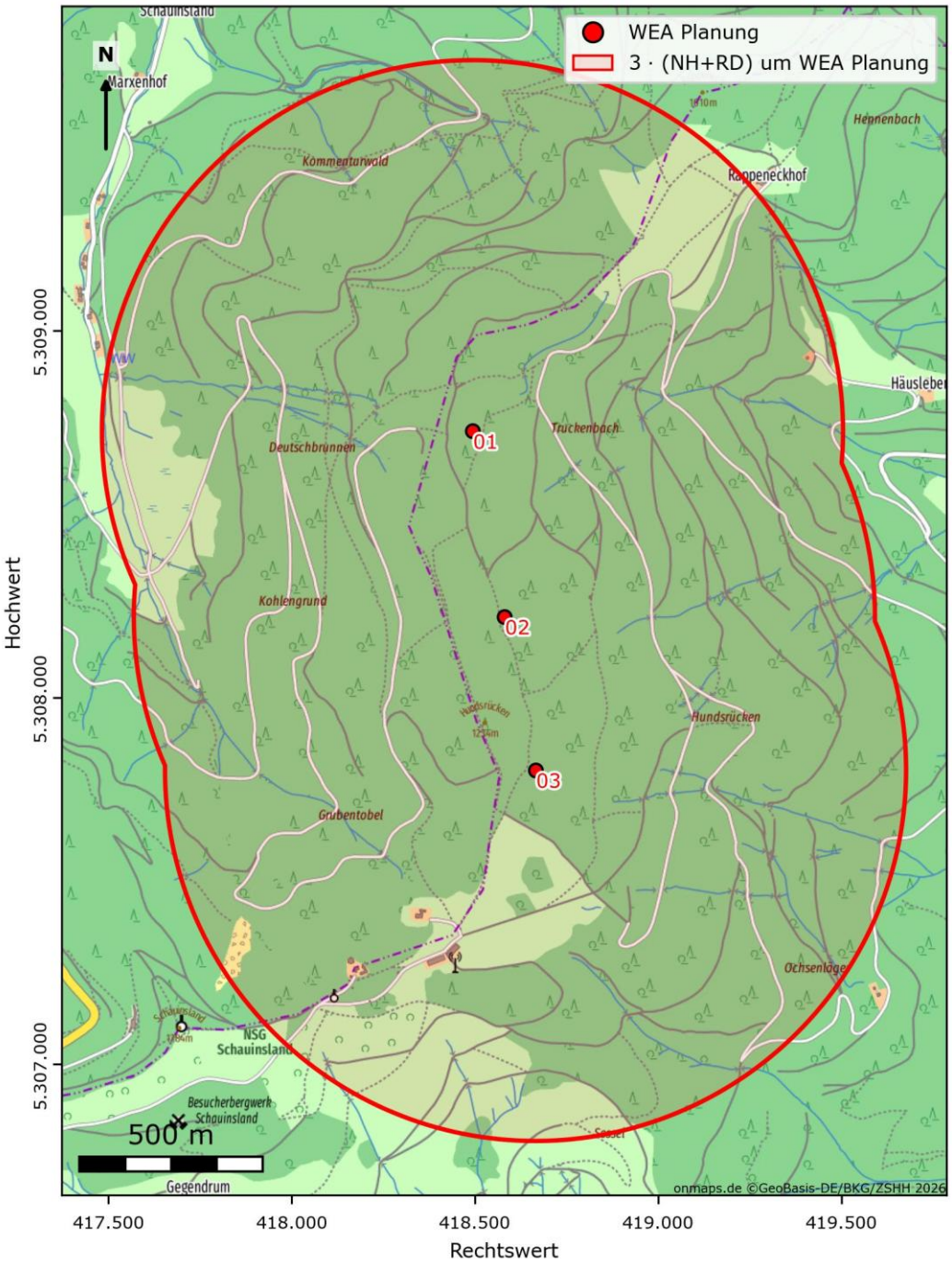


Abbildung 4: Risikorelevanter Bereich um die Neuplanung

4.3 Vereisungsbedingungen

In dem Zeitraum von 1999 bis einschließlich 2025 wurden 44.928 10 min Intervalle ermittelt, bei denen meteorologische Vereisung nach dem im Kapitel 3.2 beschriebenen Kriterium auftreten können. Dies entspricht einer Vereisungshäufigkeit von 3,2 % und somit der Eisklasse 3 (siehe Tabelle 2). Abbildung 5 zeigt die Zeitreihe der vier maßgebenden meteorologischen Parameter zur Bestimmung von

Zeitpunkten möglicher Vereisung der letzten Jahre am Standort Hundsrücken. Rote Striche zeigen die Zeitpunkte, die die Kriterien für eine mögliche Vereisung erfüllen.

Neben dem standardmäßig systemimmanenten Eiserkennungssystem ist für die geplanten WEA kein zusätzliches spezifisches Eiserkennungssystem vorgesehen. Um ein mögliches Versagen der Eiserkennungssysteme zu berücksichtigen, wird ein Anteil von 90 % Eisfall und 10 % Eiswurf angenommen [1]. Die Anzahl der abgeworfenen Eispartikel richtet sich nach Tabelle 2: Für Eisfall gemäß dem Modus Leerlauf und für Eiswurf gemäß dem Modus im Betrieb, inaktives IPS. Unter Berücksichtigung der Rotordurchmesser der WEA ergibt sich daraus eine jährliche Abwurfzahl von 5.121 Partikeln für Eisfall und 15.365 Partikeln für Eiswurf.

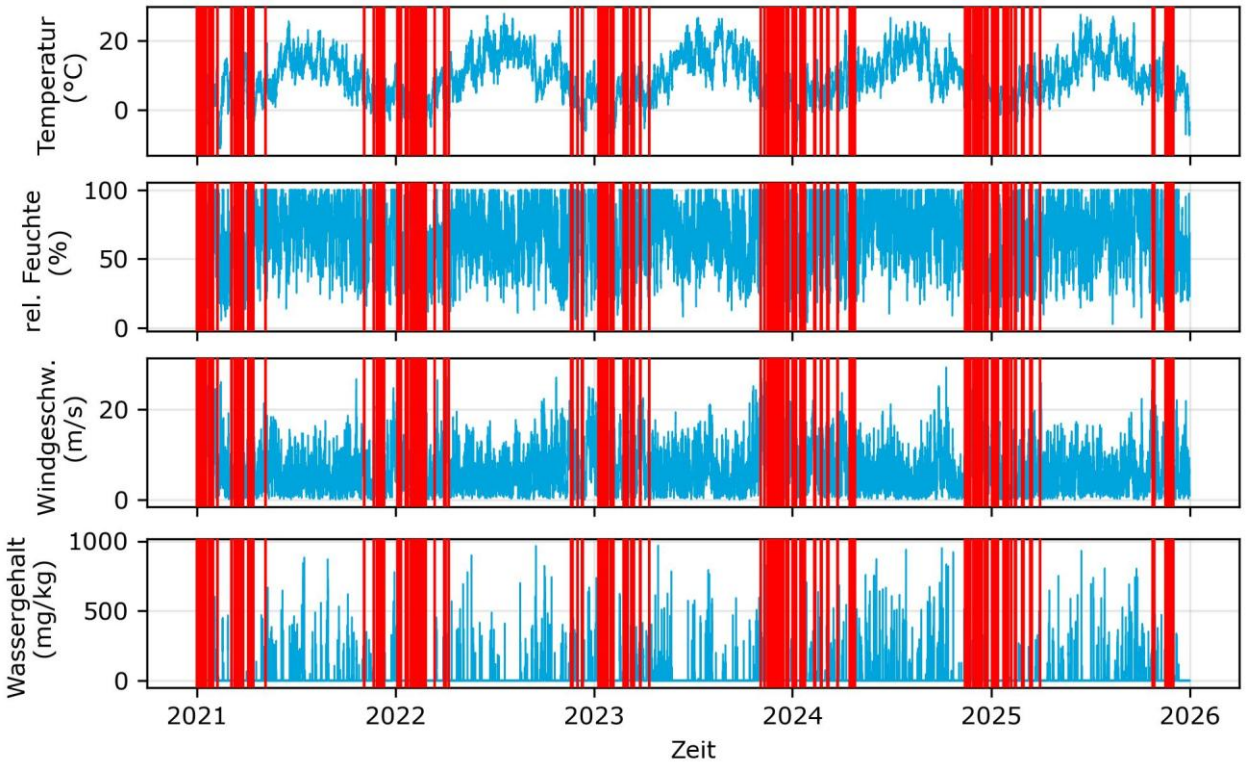


Abbildung 5: Zeitreihe meteorologischer Parameter in 162,0 m Höhe und Detektion von Zeitpunkten möglicher Vereisung (rote Linien) am Standort Hundsrücken nach der Definition in Kapitel 3.2

4.4 Gefährdungsbereiche

Für die Risikobewertung des Eisfalls am Standort Hundsrücken wurden im Einwirkungsbereich der Zusatzbelastung Gefährdungsbereiche auf Basis einer detaillierten ATKIS-Karte und einer Standortbesichtigung am 03.03.2026 ermittelt und untersucht. Die sich ergebenen GB sind in Abbildung 6 durch farbige Linien hervorgehoben.

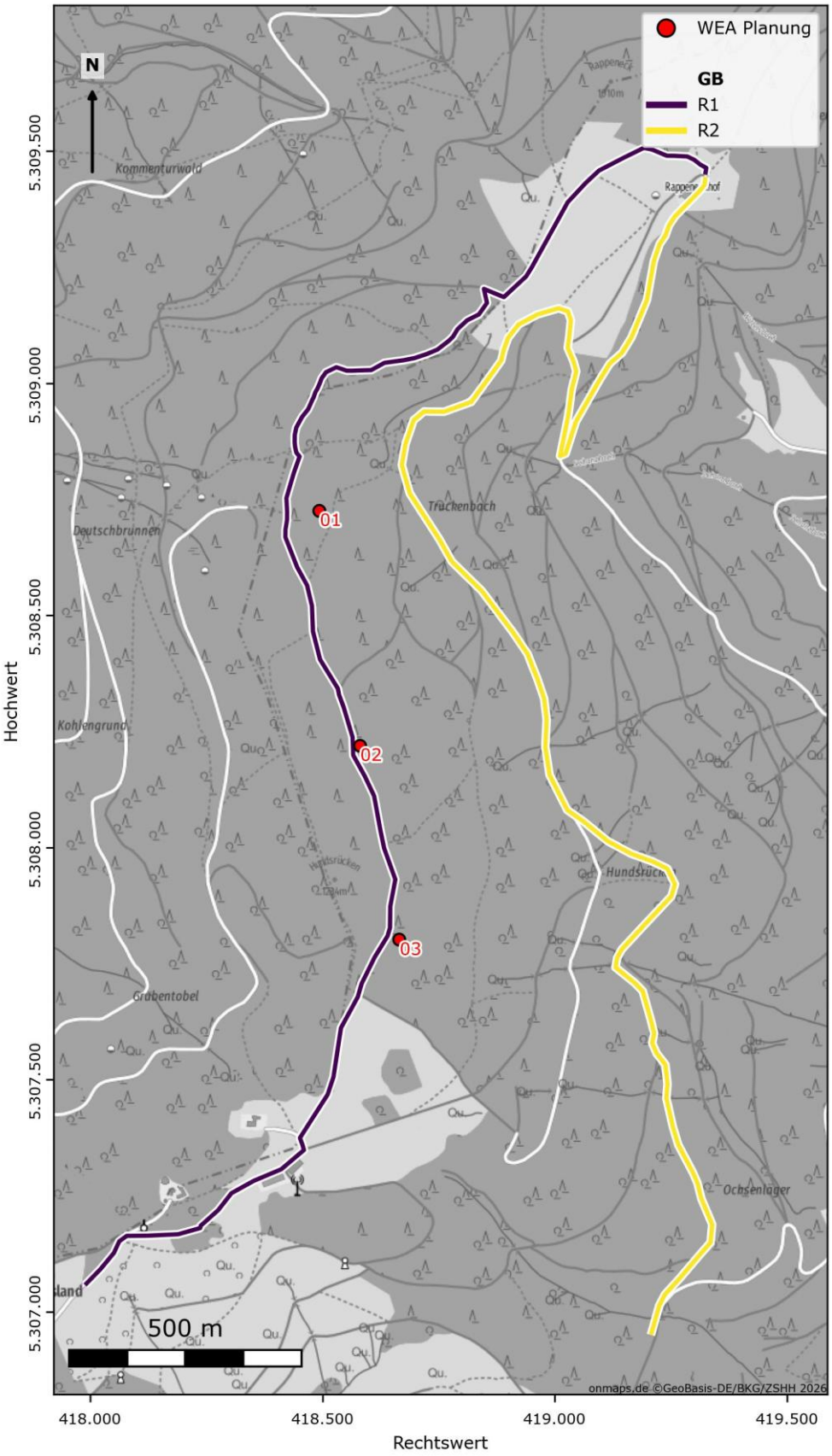


Abbildung 6: Gefährdungsbereiche am Standort Hundsrücken

Bei **R1** handelt es sich um eine Route, die Teile von Wanderwegen des Schwarzwaldvereins umfasst. Als KP wird eine Person definiert, die die Route konservativ geschätzt 12-mal pro Jahr (*selten genutzte* Route) mit einer Geschwindigkeit von 3 km/h als Wanderroute oder für Wartungsarbeiten an den WEA verwendet. Insgesamt wird konservativ geschätzt, dass 5 Personen dem Kriterium der KP genügen. R1 wird nicht von Fahrzeugen mit einer Geschwindigkeit von über 50 km/h verwendet.

Bei **R2** handelt es sich um eine Route, die Teile von unbefestigten Waldwegen umfasst. Als KP wird eine Person definiert, die die Route konservativ geschätzt 12-mal pro Jahr (*selten genutzte* Route) mit einer Geschwindigkeit von 3 km/h als Spazierroute verwendet. Insgesamt wird konservativ geschätzt, dass 5 Personen dem Kriterium der KP genügen. R2 wird nicht von Fahrzeugen mit einer Geschwindigkeit von über 50 km/h verwendet.

Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der Geschwindigkeiten, Frequenzen und Populationen der Gefährdungsbereiche.

Tabelle 5: Übersicht der Geschwindigkeiten, Frequenzen und Populationen der Gefährdungsbereiche[21]

Gefährdungs-bereich	v von KP ($km h^{-1}$)	f von KP	n von KP	v von KF ($km h^{-1}$)	f von KF	n von KF
R1	3	12	5	-	-	-
R2	3	12	5	-	-	-

[21, 21] Abkürzungen siehe Kapitel 3.4

5 ERGEBNISSE

Abbildung 7 zeigt die Risikokonturen für das individuelle Risiko (LIRA).

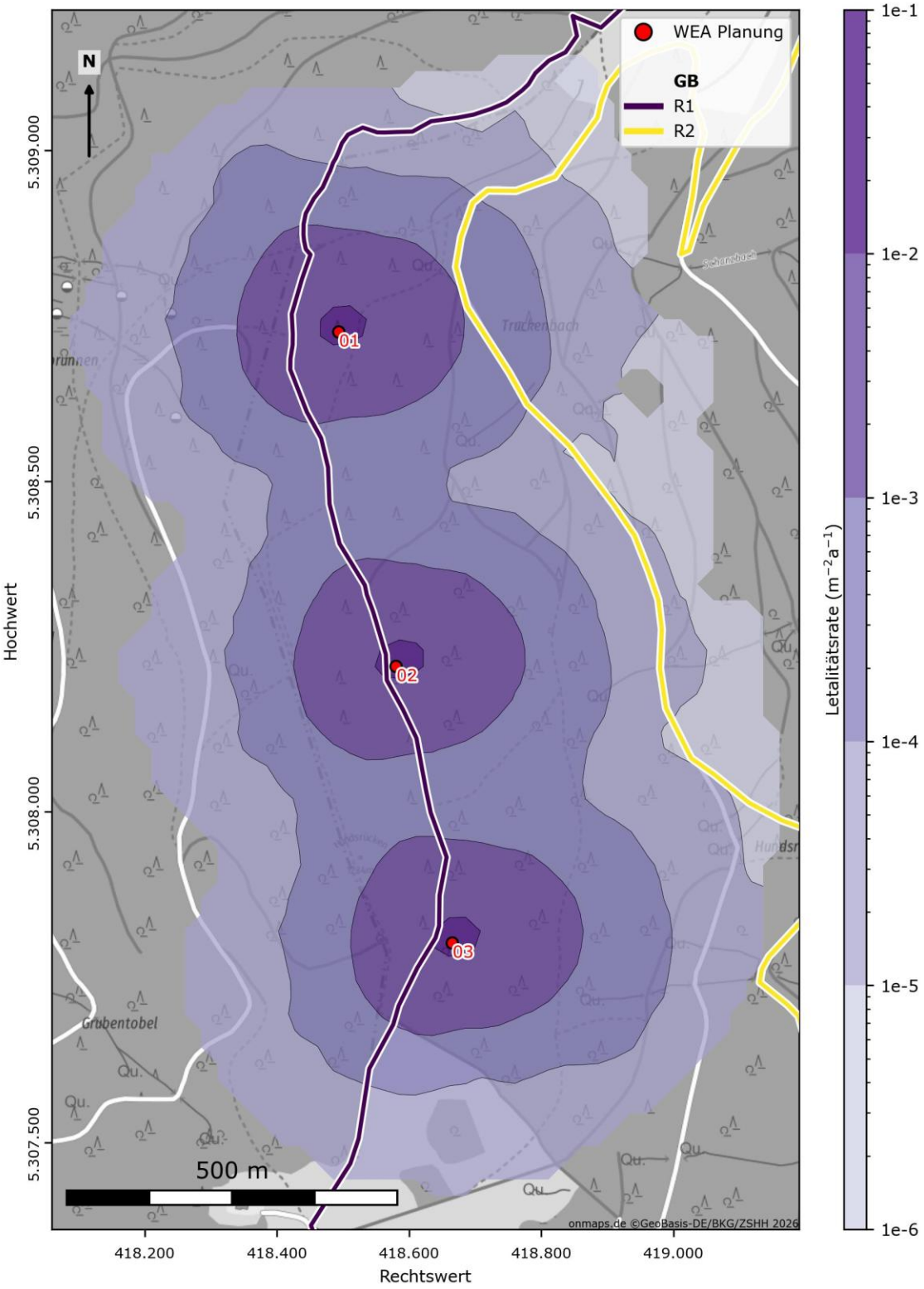


Abbildung 7: Konturplot für das LIRA mit Gefährdungsbereichen

Alle LIRA-Werte liegen unterhalb von 3,9 * 10^{-2}. Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der individuellen (IRPA) und kollektiven (PLL) Risiken der einzelnen Gefährdungsbereiche. Farben ordnen die Risiken entsprechend der Kategorien in Tabelle 4 ein.

Tabelle 6: IRPA und PLL Werte für Kritische Personen und Kritische Fahrzeuge je Gefährdungsbereich. Detailergebnisse sind im Anhang in Tabelle 8 zu finden.

Gefährdungsbereich	IRPA von KP	PLL von KP	IRPA von KF	PLL von KF
R1	2,0 * 10^{-7}	1,0 * 10^{-6}	-	-
R2	5,8 * 10^{-9}	2,9 * 10^{-8}	-	-

6 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Alle IRPA und PLL-Werte liegen im oder unter dem **tolerablen** Risikobereich. Nach dem ALARP-Prinzip sind risikoreduzierenden Maßnahmen in der Regel nicht erforderlich. Mit dem Aufstellen von Hinweisschildern kann eine Risikominimierung um den Faktor 10 erfolgen.

Wie bei allen Versuchen, natürliche Phänomene zu modellieren, sind auch die Ergebnisse dieser Bewertung des Eisfall- und Eiswurfrisikos mit Unsicherheiten behaftet. Das Risikoniveau wird häufig als Einzelwert dargestellt; dieser ist jedoch stets als Mittel- bzw. Erwartungswert zu verstehen. Eine präzise Abbildung des tatsächlichen Risikos ist nicht möglich, weil zahlreiche Einflussgrößen und Annahmen das Ergebnis bestimmen. Die Beurteilung von Gefährdungsprozessen erfordert unvermeidlich die Vereinfachung, Idealisierung und Parametrisierung realer Zusammenhänge. Unsicherheiten können aus jedem eingebrachten Parameter, jeder Annahme und jedem Datenwert entstehen. Zudem kann eine unvollständige oder fehlerhafte Gefährdungsermittlung die Resultate systematisch verzerren [1].

Zu den wichtigsten Unsicherheitsfaktoren gehören unter anderem [6]:

- die Verfügbarkeit und Genauigkeit der Wind- und Wetterdaten,
- die Masse, Form und Anzahl der abfallenden bzw. geschleuderten Eisfragmente,
- die räumliche Verteilung und das potenzielle Auftreffgebiet,
- die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit von Personen oder Fahrzeugen im Gefährdungsbereich,
- die Annahmen zur Verletzlichkeit und zu möglichen Schadensfolgen,
- die Wirksamkeit geplanter Risikominderungsmaßnahmen sowie
- die Festlegung und Interpretation von Akzeptanzkriterien für Risiken.

Darüber hinaus weisen viele der verwendeten Datensätze eine erhebliche interannuelle Variabilität auf (z. B. Häufigkeit und Dauer von Vereisungsereignissen). Diese Variabilität trägt wesentlich zur Bandbreite der Ergebnisse bei.

Die Wahl der Eingangsparameter erfolgte unter Anwendung eines vorsorgeorientierten Ansatzes, bei dem Unsicherheiten systematisch zu Lasten einer höheren Risikoeinschätzung berücksichtigt wurden. Entsprechend sind die berechneten Risikowerte als schutzorientierte Obergrenze des tatsächlichen Risikos zu interpretieren und nicht als dessen wahrscheinlichster Wert.

7 LITERATURVERZEICHNIS

[1] D. I. f. N. e. V., „Windenergieanlagen - Teil 31: Standort-Risikobeurteilung (IEC TS 61400-31 :2023)," Beuth Verlag, Berlin, 2024.

[2] M. Wadham-Gagnon, N. Swytink-Binnema, D. Bolduc, K. Tété und C. Arbez, „Ice detection methods and measurement of atmospheric icing," in *16th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS)*, 2015.

[3] M. Drapalik, L. Zajicek und S. Purker, „Ice aggregation and ice throw from small wind turbines," *Cold Regions Science and Technology,* Bd. 192, p. 103399, 2021.

[4] H. Seifert, „Technical requirements for rotor blades operating in cold climate," *DEWI-Magazin,* 2005.

[5] D. I. f. Bautechnik, „Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen," Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, 2025.

[6] A. Krenn, A. Stökl, C. Rittinghaus, H. Rodriguez, G. Schürmann, T. Weidl, U. Jenssen, R. E. Bredesen, K.-O. Ingebrigsten, A. Derrick, T. Hahm, S. Mäusling, N. Cromm und F. Lautenschlager, „IEA Wind TCP Task 19 Technical Report," 2022.

[7] Jarass, Hans D., BImSchG-Kommentar, 10. Auflage, 2013.

[8] H. D. Jarass und L. F. Neumann, Umweltschutz und Europäische Gemeinschaften: rechts-und sozialwissenschaftliche Probleme der umweltpolitischen Integration, Springer-Verlag, 2013.

[9] S. Biswas, P. Taylor und J. Salmon, „A model of ice throw trajectories from wind turbines," *Wind Energy,* Bd. 15, pp. 889--901, 2012.

[10] R. Breuer, Anlagensicherheit und Störfälle Vergleichende Risikobewertung im Atom- und Immissionsschutzrecht, Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ), 1990, p. 211.

[11] „Health and Safety Executive," [Online]. Available: https://www.hse.gov.uk/index.htm.

[12] L. Breisgau-Hochschwarzwald, „E-mail vom 02.02.2026: Vorbelastungsanfrage für geplante Windenergieanlagen bei Oberried".

8 ANHANG

8.1 Glossar

ALARP (As Low As Reasonable Practicable) Prinzip der Risikobewertung, nach dem ein Risiko so weit zu reduzieren ist, wie es mit vertretbarem Aufwand technisch und organisatorisch möglich ist.

Einwirkungsbereich Gebiet um WEA, innerhalb dessen Partikel mit einem Am^{-1} Verhältnis von 0,05 m^2kg^{-1} und Windgeschwindigkeiten von $\mu + 2\sigma$ fallen, wobei der μ Mittelwert und σ die Standardabweichung von historischen Windgeschwindigkeiten innerhalb eines 10° Windrichtungs-Bins sind.

GB (Gefährdungsbereich) Räumlich abgegrenzter Bereich (Aufenthaltsfläche oder Pfad), in dem aufgrund der berechneten Eiswurf- und Eisfallweiten einer WEA eine potenzielle Gefährdung für Personen oder Sachgüter besteht und für den daher eine risikobezogene Bewertung (IRPA/PLL) durchgeführt wird.

GEV (Generalized extreme value [distribution]) stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Beschreibung von Extrema von Zufallsgrößen.

IRPA (Individual Risk Per Annum) Jährliche Wahrscheinlichkeit, mit der eine einzelne Person unter Berücksichtigung der Nutzungshäufigkeit f eines Gefährdungsbereichs tödlich verunglückt.

KP / KF (Kritische Person / kritisches Fahrzeug) Person oder Fahrzeug, das aufgrund seiner Exposition, Frequentierung oder Geschwindigkeit das zu erwartende höchste letal Risiko je Gefährdungsbereich hat.

LIRA (Localized Individual Risk per Annum) Ortsabhängige jährliche Wahrscheinlichkeit, mit der eine sich permanent an einem bestimmten Punkt aufhaltende Person tödlich verunglückt. LIRA beschreibt damit die räumliche Verteilung des individuellen Risikos und wird als Konturkarte dargestellt.

MEM (Minimale endogene Mortalität) Hintergrundwahrscheinlichkeit, mit der eine Person unabhängig von äußeren Gefährdungseinflüssen innerhalb eines Jahres verstirbt. Sie dient als Referenzgröße zur Einordnung technischer oder umweltbedingter Risiken in Relation zur natürlichen, alters- und bevölkerungsabhängigen Grundmortalität.

PLL (Potential Loss of Life) Erwartete Anzahl tödlicher Ereignisse pro Jahr innerhalb eines betrachteten Gefährdungsbereichs. Der Wert ergibt sich aus der Kombination des individuellen Risikos (IRPA) mit der Anzahl exponierter Personen und beschreibt somit das kollektive Risiko.

Risikorelevanter Bereich Bereich mit Radius 3 · (Nabenhöhe + Rotordurchmesser) um Zusatzbelastung, innerhalb dessen Vorbelastungsanlagen auf ihre Relevanz geprüft werden.

v: Geschwindigkeit

f: Frequenz Anzahl der Wege / Fahrten, die die KP / das KF pro Jahr auf dem GB zurücklegt

n: Population Anzahl der Personen / Fahrzeuge, die die Kriterien der KP / KF in dem jeweiligen GB erfüllen

Am^{-1}: Fläche / Masse eines Eisparikels (invertierte Flächendichte)

8.2 Ergänzende Abbildungen und Tabellen

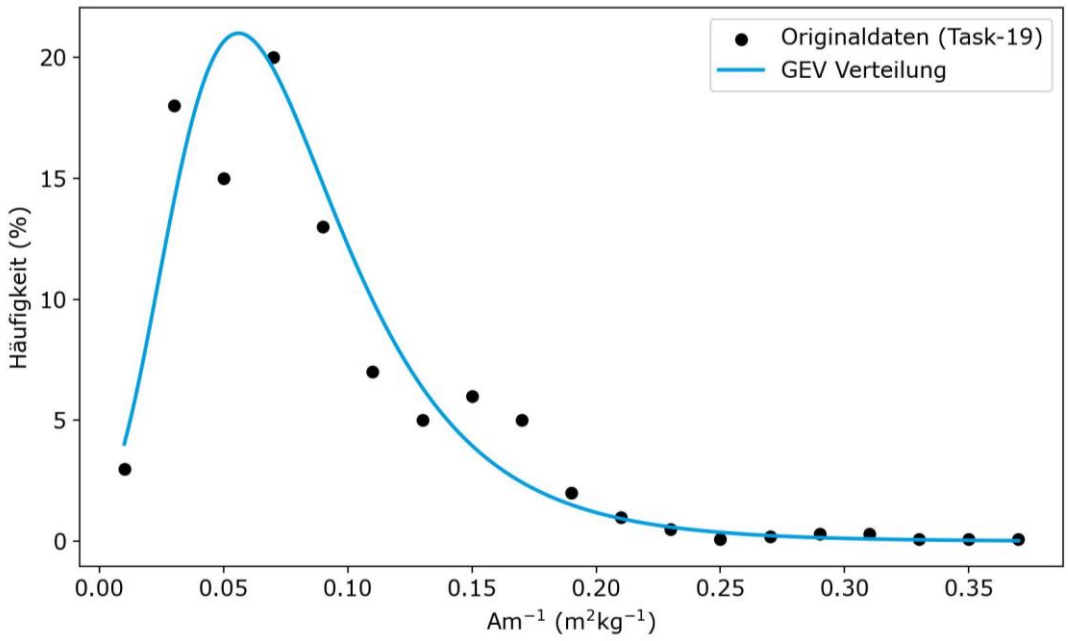


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung von Am^{-1} Werten

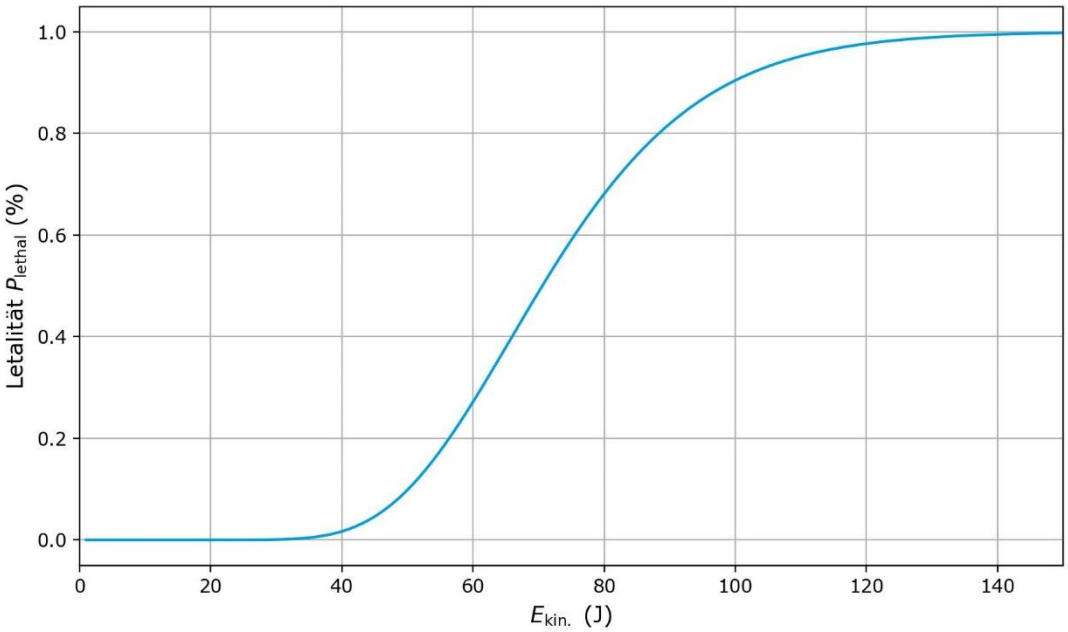


Abbildung 9: Zusammenhang von Letalität und kinetischer Energie

Tabelle 7: Eingangsdaten für Simulation

Physikalische Größen und Variablen	Wert (Einheit)
Luftdichte ρ	1,14 (kg m^{-3})
Erdbeschleunigung g	9,81 (m s^{-2})
Luftwiderstandskoeffizient c_w	1,1
Massen der Eispartikel m	0,001, 0,002, 0,004, 0,005, 0,010, 0,011, 0,023, 0,024, 0,185, 1,500 und 13,009 (kg)
Rotordurchmesser RD	175,0 (m)
Nabenhöhe NH	162,0 (m)
Winkel zwischen Rotorblatt und Horizont θ	$\in 0°, 10°, 20°, \ldots, 350°$
WEA Umdrehungszahl j	3,0 und 9,0 (min^{-1})
Radiale Abwurfposition entlang von Rotor r	0 – RD/2 (m)
Querschnittsfläche A	$m \propto A^{\frac{3}{2}}$ [9]
Windgeschwindigkeit U	(m s^{-1})
Windrichtung $wdir$	(∘)

Tabelle 8: Detailergebnisse (Einzelbeiträge der WEA je GB) für IRPA für Kritische Personen

	WEA 01	WEA 02	WEA 03	Summe
GB R1	5,7 * 10^{-8}	7,7 * 10^{-8}	6,6 * 10^{-8}	2,0 * 10^{-7}
GB R2	5,7 * 10^{-9}	6,4 * 10^{-11}	1,8 * 10^{-11}	5,8 * 10^{-9}
Summe	6,2 * 10^{-8}	7,7 * 10^{-8}	6,6 * 10^{-8}	2,1 * 10^{-7}