

Gutachten zum Risiko aufgrund Eisfall / Eiswurf durch zwei Windenergieanlagen

im

Windenergieprojekt Windpark Strullendorf

der

Gemeinde Strullendorf





Inhaltsverzeichnis

1	Kurzzusammenfassung.....	4
2	Einführung.....	4
3	Allgemeine Grundlagen.....	4
4	Standortspezifische Daten und Berechnungen.....	6
4.1	Schutzobjekte.....	7
4.2	Simulationen	11
4.3	Eislösungshäufigkeit.....	13
4.4	Aus- und Bewertung Eisfall	14
4.5	Aus- und Bewertung Eiswurf	18
5	Quellenverzeichnis	20



1 Kurzzusammenfassung

Die STR 1 stellt sowohl bei Eisfall als auch bei Eiswurf keine Gefahr für ein Schutzobjekt dar. Die STR 2 muss hingegen mit einer Einrichtung zur Eiserkennung und nachfolgender Abschaltung ausgerüstet werden, sonst werden die beiden Waldhäuser zu stark gefährdet. Mit dieser Einrichtung liegt die Gefährdung der beiden Waldhäuser in der Summe unter 0,1% des relevanten Grenzwertes (Einzelrisiko). Für Details siehe Tabelle 5 und Tabelle 8.

2 Einführung

Die Gemeinde Strullendorf plant im Viereck Zeegendorf, Teuchatz, Tiefenhöchstadt und Kälberberg im Landkreis Bamberg (Bundesland Bayern) im Windpark Strullendorf die Errichtung und den Betrieb von zwei Windenergieanlagen (WEA).

Für diesen Windpark ist ein Gutachten zur Bewertung des Risikos einer Gefährdung der Umgebung der WEA durch Eisfall/Eiswurf einzureichen. Dieses Gutachten wird mit diesem Bericht erbracht.

Die beiden WEA sind vom Typ Vestas V172, mit einer Nabenhöhe von 175 m, einem Rotordurchmesser von 172 m und 7,2 MW Nennleistung.

3 Allgemeine Grundlagen

Grundlagen des Gutachtens bilden die in gesetzlichen Normen festgelegten und in der üblichen Praxis durchgeführten Vorgehensweisen, Grenzwerte, Berechnungen usw. Insbesondere wird in den vom DIBt herausgegebenen technischen Baubestimmungen /1/ eine standortspezifische Untersuchung gefordert, falls Gebäude oder Verkehrswege näher als $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ an einer WEA liegen. Bei größeren Abständen ist eine solche Untersuchung nicht notwendig.

Für das Gebiet um eine WEA sind Schutzobjekte zu definieren, die dann im Weiteren bezüglich der verschiedenen Risiken untersucht werden.

Als Ziel für die Betrachtung wird gesetzt, dass eine WEA die „minimale endogene Sterblichkeit“ (Todesrisiko ohne äußere Einflüsse) nicht wesentlich erhöht. Damit ergeben sich bestimmte, nicht zu überschreitende Grenzwerte für Schädigungswahrscheinlichkeiten von Personen /2/.

Diese Grenzwerte sind davon abhängig, welche Personengruppen sich in einem Schutzobjekt aufhalten können. Ist dies eine sehr begrenzte Gruppe (z.B. Familienangehörige auf einem Privatgrundstück), wird das Einzelrisiko der am meisten gefährdeten Person betrachtet, dieses Todesrisiko darf den Wert von 10^{-5} Todesfällen pro Jahr nicht überschreiten. Sind in einem Schutzobjekt jedoch im Laufe der Zeit viele verschiedene Menschen anzutreffen (z.B. auf öffentlichen Straßen und Wegen), wird das Gruppenrisiko betrachtet, d.h. die Anzahl aller durch Schadensfälle verursachter Todesfälle. Der maximal erlaubte Grenzwert dafür ist 10^{-3} Todesfälle pro Jahr.



Die Eisbewegung wird mit Hilfe einer aerodynamischen Simulation viele Millionen Male berechnet, wobei jedes Mal andere Werte für Windrichtung und -geschwindigkeit, Azimut-Ausrichtung, Drehzahl, Loslösungspunkt vom Blatt und Eismasse angenommen werden. Dabei sind Windrichtung und -geschwindigkeit die wichtigsten Parameter, da diese den Bereich einiger abgeleiteter Parameter bestimmen. Diese Werte werden entsprechend den am Standort gültigen Windbedingungen zufällig gewählt, so dass sich mit der großen Anzahl der berechneten Simulationen ein gutes Bild für die Verteilung der Auftreffpunkte des Eises ergibt.

Bei Eiswurf produziert die Anlage auch bei Eisansatz Energie und die Rotordrehzahl ist entsprechend hoch. Bei Eisfall läuft die Anlage nach einer Abschaltung wegen erkanntem Eis nur noch mit geringen Trudeldrehzahlen. Dafür gibt es für alle marktgängigen WEA von den Herstellern verfügbare Zusatzmodule, die Eisansatz erkennen und die WEA dann abschalten können.

Des Weiteren wird bestimmt, wie oft ein Eislösungs-Ereignis (mit anschließendem Eiswurf/-fall) pro Jahr überhaupt stattfindet. Das hängt sowohl von der Anzahl der Eistage am Standort als auch von der angenommenen mittleren Anzahl der Eislösungsereignisse pro Eistag ab.

Zusammen ergibt sich daraus die Häufigkeit von Eistreffern auf die Schutzobjekte pro Jahr. Es wird ermittelt, wie oft sich Personen im Schutzobjekt aufhalten, entweder über Verkehrsdaten oder über angenommene Aufenthaltsdauern in flächigen Schutzobjekten.



4 Standortspezifische Daten und Berechnungen

Es handelt sich bei den beiden WEA um Anlagen vom Typ Vestas V172. Die folgende Tabelle gibt die Position in UTM 32 Koordinaten an.

Tabelle 1: Typ, Koordinaten (UTM 32) und Höhenwerte der betrachteten WEA

Nr.	Typ	Rechtswert in m	Hochwert in m	Geländehöhe in m	Nabenhöhe in m
STR 1	V172	648.950	5.525.547	529,4	175
STR 2	V172	649.572	5.525.752	558,2	175

Die folgende Abbildung zeigt die geplanten WEA und die weitere Umgebung.

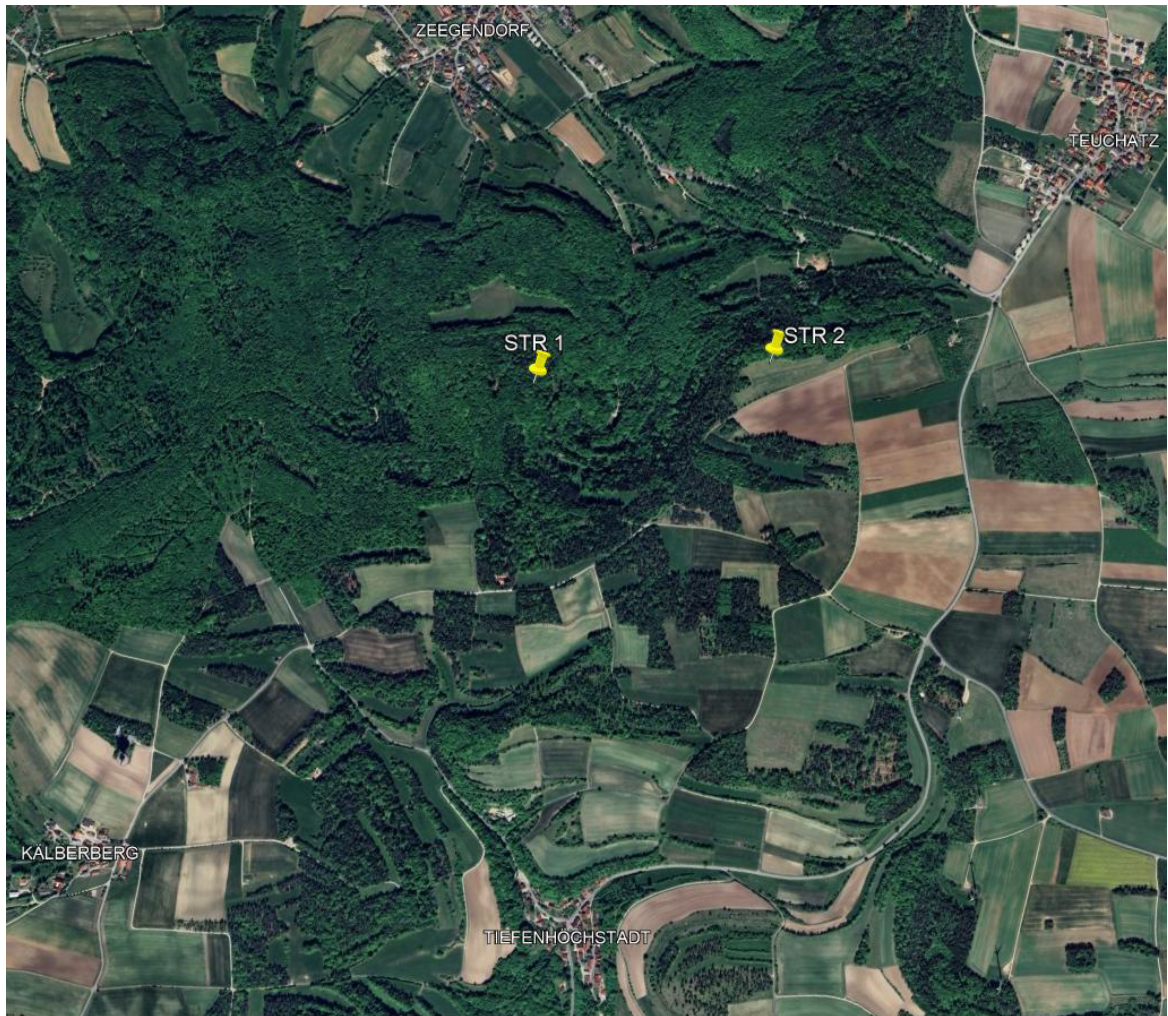


Abbildung 1: Standorte der geplanten WEA.

Die beiden WEA werden in Waldgebiet auf einer Anhöhe errichtet, die die umliegenden Ortschaften um 100 – 180 m überragt.

4.1 Schutzobjekte

Der kritische, nach /1/ zu betrachtende Abstand von einer WEA, über den hinaus nicht mehr mit Eistreffern zu rechnen ist, beträgt nach der in Kapitel 3 genannten Formel für beide WEA $r = 1,5 \cdot (175 \text{ m} + 172 \text{ m}) = 520,5 \text{ m}$.

Die folgende Abbildung 2 zeigt die nähere Umgebung der WEA und um sie die kritischen Kreise mit dem Radius von 520,5 m. Zusätzlich sind die in diesen kritischen Kreisen enthaltenen Verkehrswege und Häuser markiert.

Der Rest des kritischen Kreises besteht aus landwirtschaftlicher Fläche bzw. Wald, dort ist im Winter bei Eiswetter kein Aufenthalt von Personen zu erwarten.

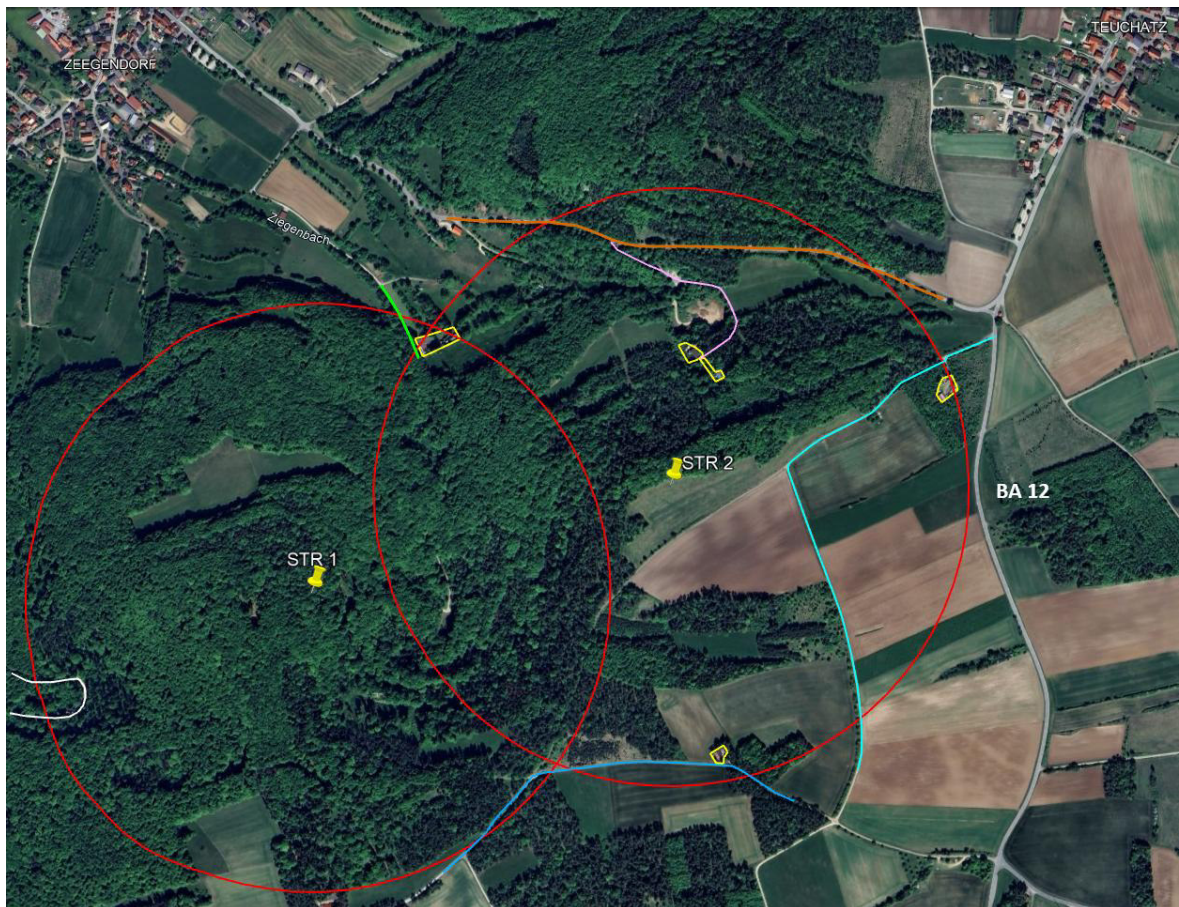


Abbildung 2: STR 1 und STR 2 mit kritischen Kreisen mit Radius 520,5 m sowie den enthaltenen Häusern (gelb) sowie einigen Straßen und Wegen als Schutzobjekten

Es wurden nicht alle vorhandenen Waldwege betrachtet. Im Winter bei Eiswetter ist mit einer Überquerung der Anhöhe auf diesen Wegen nicht zu rechnen. Der Weg von Zeegenendorf nach Tiefenhöchststadt kann über die Landesstraße L2188 (orange, im oberen Teil des kritischen Kreises um STR 2, bildet eine Schutzobjekt) und die BA 12 (verläuft in Nord-Süd-Richtung, liegt knapp außerhalb des kritischen Kreises um STR 2) schneller und sicherer erreicht werden, da diese Straßen im Winter beräumt werden und so deutlich höhere Geschwindigkeiten zulassen als die unberäumten Waldwege über die Anhöhe.



Es befinden sich 4 Häuser bzw. Häusergruppen innerhalb der kritischen Kreise. In der Nähe des nördlichen Schnittpunkts der kritischen Kreise befinden sich die „Häuser Nord“ und der von ihr wegführende „Nordweg“ (**grün**).



Abbildung 3: Die „Häuser Nord“ und der von ihnen nach Zeegendorf führende „Nordweg“

Nördlich der STR 2 befinden sich 2 Häuser im Wald („Waldhaus 1“ und „Waldhaus 2“) und ein sie zur L2188 (**orange**) verbindender „Waldhausweg“ (**violett**).



Abbildung 4: "Waldhaus 1" und "Waldhaus 2" mit dem sie zur L2188 verbindenden "Waldhausweg"



Östlich der STR 2 befindet sich das „Osthaus“ und der an diesem vorbeiführende „Ostweg“ (hellblau). Die ganze Ausdehnung des Ostwegs ist in Abbildung 2 zu erkennen.



Abbildung 5: Das "Osthaus" und ein Teil des "Ostweg".

Südlich der STR 2 befindet sich das „Südhaus“ und an diesem verläuft der „Südweg“ (dunkelblau), der nach Kälberberg führt.



Abbildung 6: Das "Südhaus" und der daran vorbeiführende "Südweg".



Neben diesen Häusern und den sie mit der Umgebung verbindenden Straßen gibt es noch ein weiteres in den kritischen Kreisen verlaufendes Schutzobjekt. Dies ist die „Schleife West“, Teil eines westlich an der Anhöhe vorbeilaufenden Wegesystems, das eine alternative Route von Zeegendorf nach Kälberberg und Tiefenhöchststadt darstellt.



Abbildung 7: Schutzobjekt "Schleife West" westlich der STR 1

Zusammengefasst werden damit 5 Flächenschutzobjekte betrachtet (Schutzobjekte, auf denen sich Personen nur mit geringer Geschwindigkeit bewegen und die dem Aufenthalt dienen). Es sind dies die **Häuser Nord**, das **Haus Süd**, das **Haus Ost**, das **Waldhaus 1** und das **Waldhaus 2**.

Alle diese Häuser sind Privathäuser. Dort verkehren nicht viele Personen, deshalb wird dort das **Einzelrisiko** der sich dort am häufigsten aufhaltenden Person betrachtet. In den Häusern selbst droht durch Eis keine Gefahr, deshalb sind auch die unmittelbare Umgebung und die Wege zu den Straßen mit in das Schutzobjekt einbezogen (siehe Abbildung 3 - Abbildung 6)

Weiterhin werden 5 Wegeschutzobjekte betrachtet (Schutzobjekte, auf denen sich Personen oder Fahrzeuge in Richtung eines Ziels bewegen): die **Schleife West**, der **Waldhausweg**, der **Nordweg**, die **L2188**, der **Ostweg** und der **Südweg**.

Von diesen dienen der Waldhausweg und der Nordweg nur der Verbindung von Waldhaus 1 und 2 bzw. der Häuser Nord in die Umgebung. Deshalb wird auch dort das Einzelrisiko betrachtet.

Die anderen Wegeschutzobjekte sind hingegen Durchgangsstraßen, auf denen viele Kfz unterwegs sind. Deshalb wird auf diesen das Gruppenrisiko betrachtet.



4.2 Simulationen

Als Anfangswerte für die Simulation von Eisfall/Eiswurf wurden die am Ort vorliegenden Windbedingungen betrachtet, so dass die Häufigkeiten der verschiedenen Kombinationen aus Windrichtung und Windgeschwindigkeit richtig abgebildet werden. Die folgende Tabelle 2 enthält die Häufigkeiten der Kombinationen aus Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 200 m Höhe (der ersten verfügbaren über Nabenhöhe).

Tabelle 2: Kombinationen aus Windgeschwindigkeit und -richtung am Standort in 200 m Höhe, wobei die Zahlen die jährliche Häufigkeit dieser Kombinationen in Stunden angeben.

WindBin	N	NNO	ONO	O	OSO	SSO	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW
0	10,4	10,6	10,9	11,2	11,6	12,9	13,9	12,2	14,3	12,5	12,5	10,8
1	30,4	29,5	27,7	29,2	29,2	33,7	39,3	38,6	42,2	41,3	39,3	35,6
2	44,4	38,1	38,8	39,9	45,1	51,3	59,4	61,9	68,4	66,5	66,7	51,1
3	46,9	49,4	45,2	48,2	54,6	64,6	75,8	75,3	90,4	92,6	84,1	63,7
4	50,7	52,5	49,9	56,3	65,6	74,7	75,7	79,0	110,3	117,2	99,8	69,1
5	43,4	57,5	61,3	66,1	73,1	69,7	75,6	78,6	135,1	142,3	102,4	67,2
6	40,8	59,9	67,9	72,5	72,4	61,9	73,7	79,5	168,5	156,2	97,5	63,4
7	28,2	54,2	68,6	75,7	67,0	58,0	68,2	82,8	192,6	142,9	79,7	48,0
8	15,7	35,8	64,8	74,4	61,5	51,2	64,1	83,3	182,0	117,8	56,0	25,8
9	7,5	21,8	55,9	64,9	59,2	44,2	60,2	77,5	146,4	90,5	37,9	12,3
10	2,0	11,9	46,7	62,5	54,5	33,4	55,7	63,8	112,1	64,4	23,0	5,7
11	0,9	6,0	30,4	53,8	40,6	21,8	40,9	47,4	77,4	46,0	14,1	2,9
12	0,2	3,0	16,9	35,7	22,8	11,0	24,7	28,6	52,4	31,0	8,2	1,2
13	0	0,7	8,2	18,0	9,7	4,1	12,7	13,6	33,0	20,0	4,0	0,5
14	0	0,4	3,9	7,5	2,0	1,0	7,5	7,3	24,1	13,4	1,7	0,2
15	0	0	0,9	2,1	0,9	0,6	3,4	2,5	14,2	7,4	0,8	0,1
16	0	0	0,4	0,7	0,4	0,1	1,1	1,2	7,3	4,4	0,7	0
17	0	0	0	0,3	0,2	0	0,5	0,4	4,4	2,8	0,3	0
18	0	0	0	0	0	0	0,2	0,2	2,1	1,9	0,2	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0,1	1,1	1,1	0,2	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,3	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,2	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,1	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,1	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0

Die zu Grunde liegenden Winddaten stammen vom „Copernicus regional reanalysis for Europe“ (CERRA) Programm für den Zeitraum von 1999 - 2024. Die Quelle der Daten ist das



Programm windPRO, das diese Daten als ca. 230.000 Datensätze von gleichzeitig bestimmten Windgeschwindigkeiten und -richtungen in Höhen von 15, 50, 75, 100, 150, 200, 300 und 500 m über Grund in Textform bereitstellt. Diese Daten entsprechen 1 h-Mittelwerten.

Im Intervall von -30 bis 1 °C wird eine Temperatur bestimmt, aus der die Luftdichte berechnet und eine entsprechende Größe des abfallenden Eisstückes (0 °C: 2 cm Durchmesser, -30 °C: 12 cm Durchmesser, linear interpoliert) festgelegt wird. In 75 % der Zeit wird eine Temperatur von -10 bis 1 °C angenommen, in 20 % der Zeit von -20 bis -10°C und in den verbleibenden 5 % der Zeit von -30 bis -20 °C.

Das Eisstück löst sich gleichverteilt von einem beliebigen Punkt des Rotorblattes. Das Rotorblatt befindet sich gleichverteilt auf seinem Umlauf.

Abhängig von der Windgeschwindigkeit wird der potenzielle Bereich der Rotordrehzahl ermittelt (abhängig davon, ob Eisfall oder Eiswauf betrachtet wird). Diese Werte stammen in Form jeweils einer Windgeschwindigkeits-Rotordrehzahlkurve aus Daten für die V172 /3/.

Die Rotordrehzahl wird als zufällig im Bereich 95 – 105 % dieser Drehzahlkurve angenommen.

Von Vestas ist für die V172 ein Eiserkennungssystem erhältlich, falls eine Abschaltung bei Eisansatz an den Blättern notwendig ist. Dieses System ist vom DNV zertifiziert /4/.

Zuletzt wird eine zufällige Azimut-Ausrichtung der Gondel bestimmt. Bei Windgeschwindigkeiten > 3 m/s wird die Anlage nachgeführt, so dass für die Gondel eine Abweichung von der Windrichtung gleichverteilt aus [-15°, 15°] angenommen wird. Da bei unter 3 m/s Wind keine Nachführung stattfindet, ist dort die Gondelstellung komplett zufällig über die Windrose verteilt.

Nachdem so die Anfangsbedingungen der Eisbewegung bestimmt wurden, erfolgt die aerodynamische Berechnung der Flugbahn des Eisstücks bis zum Auftreffen auf dem Boden. Anfangswerte und Daten zum Auftreffen auf dem Boden (Ort, Geschwindigkeit) werden in eine Log-Datei protokolliert. Insgesamt wurden so für beide WEA jeweils 50 Millionen Eisfall-Lastfälle und 50 Millionen Eiswaufastfälle berechnet.

Da es sich wie beschrieben um hügeliges bis bergiges Gelände handelt, wurde das Geländemodell in der Umgebung der WEA in der Genauigkeit von 5 m x 5 m aus /5/ verwendet.



4.3 Eislösungshäufigkeit

Die Jahreshäufigkeit von Eisbildung wird anhand einer Karte basierend auf /6/ bestimmt.

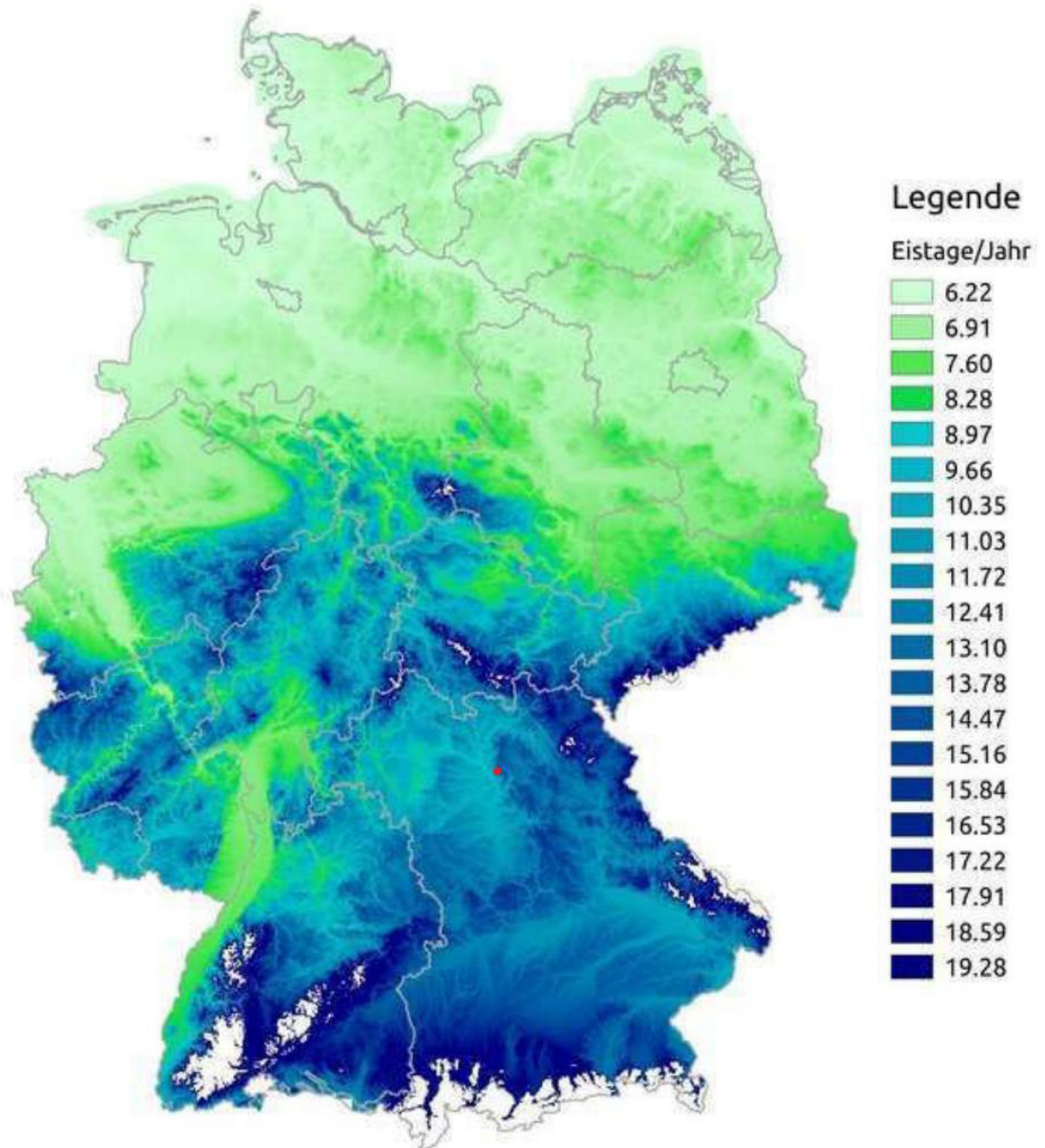


Abbildung 8: Verteilung der Eistage in Deutschland unterhalb 700 m NN, der Standort der WEA ist **rot markiert.**

Es ergeben sich 15,16 Eistage im Jahr für den Standort in der Nähe von Zeegendorf. Die Vereisung des Blattes und Loslösung von Teilen davon erfolgt an Eistagen wiederholt. Es wird daher von 200 Eislösungs-Ereignissen pro Eistag und pro WEA ausgegangen. Es ergeben sich damit jeweils $p_w = 200 \cdot 15,16 = 3.032$ Eislösungsereignisse pro Jahr und pro WEA.



4.4 Aus- und Bewertung Eisfall

Es werden bei der Auswertung für die 5 **Wegeschutzobjekte** nur Eistreffer mit einer Auftreffenergie größer als 28,1 J berücksichtigt.

Dieser Schwellwert entspricht dem oberen Energiewert der Hagelklasse H3 („Großer Hagel“) in „Hagel-Skala.pdf“ /7/. Untersuchungen zum Hagel und seinen Schäden sind direkt auf Eisfall anwendbar. Dort wird bis zu dieser Hagelklasse das Standhalten von Autoscheiben im Allgemeinen angenommen, mit möglichen Schädigungen im Einzelfall. Erst in der nächsthöheren Hagelklasse H4 werden Platzwunden und Prellungen bei Menschen erwartet bzw. das Durchdringen von Fahrzeugscheiben. Die Skala lehnt sich an die in wissenschaftlichen Arbeiten verwendete ANELFA-Skala für Hagelintensität in /8/ an, verwendet jedoch eine etwas andere Unterteilung der Klassen.

Die von der Europäischen Union herausgegebene Regulierung der Testverfahren für die Zertifizierung von Sicherheitsglas in Fahrzeugen in /9/ stellt dabei höhere Anforderungen, die diesen Schwellwert abdecken.

Für die 5 **Flächenschutzobjekte** werden alle Eistreffer verwendet.

Die Berechnung des Todesrisikos pro Jahr (p_R) durch Eisfall einer WEA auf ein **Wegeschutzobjekt** wie die L2188 ergibt sich nach folgender Formel

$$p_R = p_W \cdot p_T \cdot p_F \cdot M_F \quad (1)$$

Formel 1: Berechnungsformel Todesrisiko auf Wegeschutzobjekte

Der Wert p_W beschreibt die Auftretenshäufigkeit von Eisfall pro Jahr und wurde in Abschnitt 4.3 berechnet.

Weiterhin ist

- p_T die Wahrscheinlichkeit, dass bei Eisfall das Wegeschutzobjekt überhaupt getroffen wird,
- p_F die Wahrscheinlichkeit, dass ein auf dem Schutzobjekt fahrendes Fahrzeug bei einem Schadensereignis im Schutzobjekt (gefährlich) getroffen wird. Diese ergibt sich bei Eisfall aus dem Verhältnis der (gefährdeten) Fahrzeugfläche und der Wegfläche, auf der sich genau ein Fahrzeug befindet. Die genaue Berechnung wird weiter unten erklärt.
- M_F die mittlere Anzahl von Personen in einem solchen Fahrzeug.



Die Berechnung des Todesrisikos pro Jahr (p_R) durch Eisfall einer WEA auf ein **Flächenschutzobjekt** wie die Häuser Nord ergibt sich nach einer ähnlichen Formel

$$p_R = p_W \cdot p_T \cdot p_S \cdot p_B \quad (2)$$

Formel 2: Berechnungsformel Todesrisiko auf Flächenschutzobjekte

Dabei ist

- p_W , p_T wie für Formel 1 definiert, und
- p_S die mittlere Anzahl Personen, die sich zu jedem Zeitpunkt im Schutzobjekt befinden, und
- p_B die Wahrscheinlichkeit, dass eine sich zum Zeitpunkt eines Eistreffers im Schutzobjekt aufhaltenden Person auch von diesem Eistrefler getroffen wird.

Es werden jetzt die Trefferhäufigkeiten um die STR 1 und STR 2 graphisch dargestellt, danach folgt die numerische Auswertung dieser Trefferhäufigkeiten.

In allen Abbildungen mit Trefferhäufigkeiten wird das folgende Farbschema verwendet.

Tabelle 3: Farbcodierung Trefferhäufigkeit

Farbe	Treffer pro Jahr und m ²
Rot	mehr als 10 ⁻²
Orange	zwischen 10 ⁻³ und 10 ⁻²
Gelb	zwischen 10 ⁻⁴ und 10 ⁻³
Blau	zwischen 10 ⁻⁵ und 10 ⁻⁴

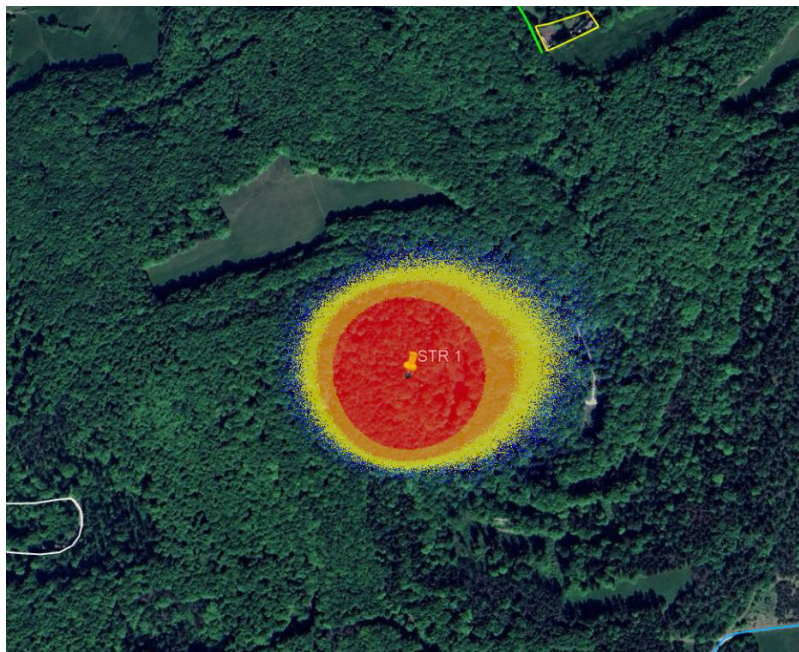


Abbildung 9: Trefferbild von Eisstücken bei Eisfall um die STR 1. Die Eistrefler liegen visuell weitab der Schutzobjekte.

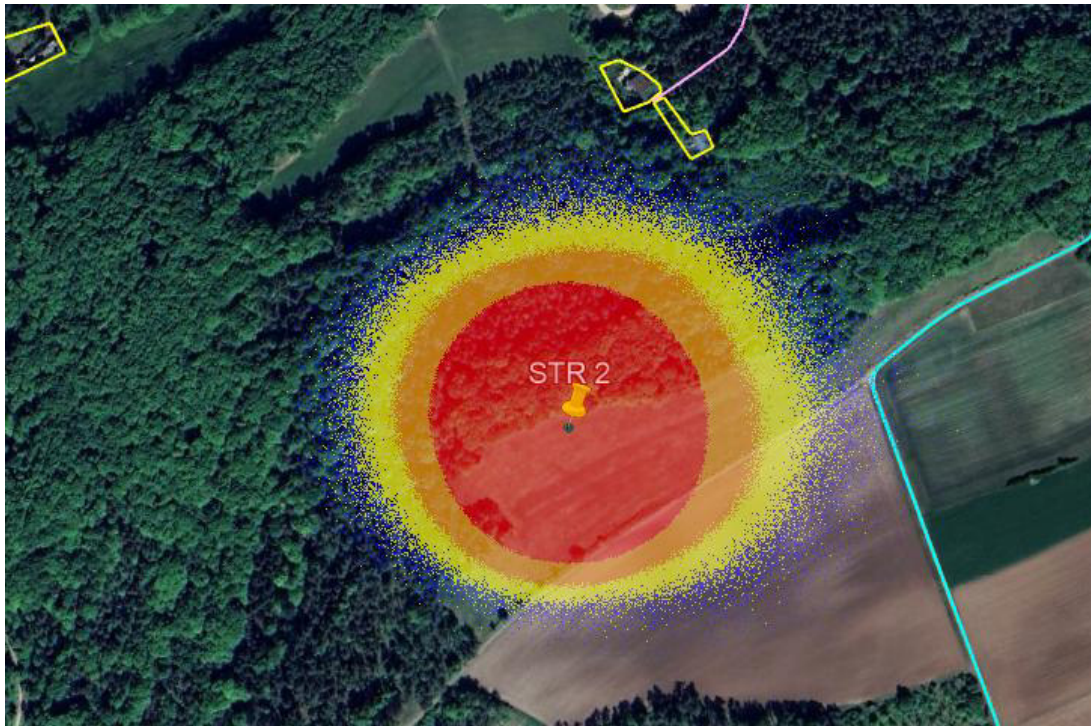


Abbildung 10: Trefferbild bei Eisfall um die STR 2. Die Eistreffer sind visuell in der Nähe von Waldhaus 2 und dem Ostweg.

Für die Betrachtung des Ostwegs sind jedoch nur die Eistreffer mit einer Energie ab 28,1 J relevant.

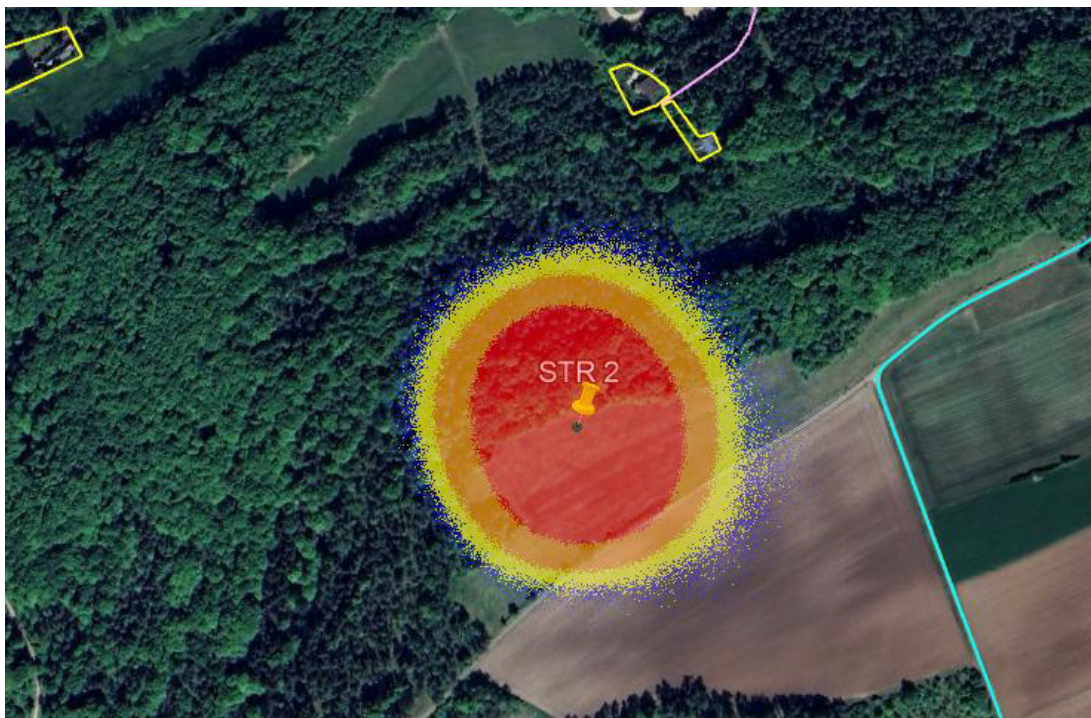


Abbildung 11: Trefferbild von Eisstücken mit Auftreffenergie > 28,1J bei Eisfall um die STR 2. Die Eistreffer sind nun visuell nicht mehr nahe am Ostweg.



Die programmatische Auszählung bestätigt, dass die STR 1 bei Eisfall keine Treffer auf irgendein Schutzobjekt hat (siehe Abbildung 9).

Die programmatische Auszählung bestätigt auch, dass die STR 2 bei Eisfall keine Treffer mit Auftreffenergie größer 28,1 J auf ein Wegeschutzobjekt hat (siehe Abbildung 11).

Allerdings gibt es Eistreffer auf das Waldhaus 1 und das Waldhaus 2 (die blauen Ausläufer der Eistreffer in Abbildung 10 sind auf dem grünen Untergrund nur schwer zu erkennen).

Es ergeben sich folgende Werte p_T (Häufigkeit, mit der ein Eistreffer das Schutzobjekt trifft):

Tabelle 4: Häufigkeiten (p_T), mit denen WEA Schutzobjekte bei Eisfall treffen. Andere Kombinationen von WEA und Schutzobjekt haben keine Treffer.

WEA	Schutzobjekt	p_T
STR 2	Waldhaus 1	$2,00 \cdot 10^{-8}$
STR 2	Waldhaus 2	$8,00 \cdot 10^{-8}$

Für alle 5 Flächenschutzobjekte (Häuser) wird angenommen, dass sich die dort am längsten aufhaltende Person im Winter durchschnittlich 1h pro Tag im Schutzobjekt (aber außerhalb des eigentlichen Hauses) aufhält. Damit ergibt sich der Wert p_s (mittlere Anzahl Personen im Schutzobjekt zu jedem Zeitpunkt) für Formel 2 zum selben Wert

$$p_s = 1h/24h \approx 0,0417$$

für alle Häuser.

Der Wert p_B (Wahrscheinlichkeit, bei Aufenthalt im Schutzobjekt zum Zeitpunkt eines Eistreffers dort getroffen zu werden) für Formel 2 ist das Verhältnis der (horizontalen) Querschnittsfläche eines Menschen zur Fläche des Schutzobjektes.

Der horizontale Querschnitt eines Menschen wird als 0,75 m Breite und 0,5 m Dicke angenommen, das ergibt eine Querschnittsfläche von 0,375 m².

Die Fläche des Schutzobjektes wurde aus den Koordinaten der Eckpunkte bestimmt.

Zusammen mit $p_W = 3032$, $p_s = 1h/24h$ und Tabelle 4 ergibt sich damit nach Formel 2

Tabelle 5: Todesrisiko p_R pro Jahr durch die STR1, STR2 bei Eisfall. Andere Kombinationen von WEA und Schutzobjekt haben das Risiko 0.

WEA	Schutzobjekt	Fläche Schutzobjekt in m ²	p_B	p_R
STR 2	Waldhaus 1	901	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-9}$
STR 2	Waldhaus 2	577	$6,50 \cdot 10^{-4}$	$6,57 \cdot 10^{-9}$

In Tabelle 5 wird, genau wie in späteren Tabellen, der Wert p_R farblich markiert, um seine Bedeutung sofort sichtbar zu machen. Die Farbe wird immer in Relation zum Grenzwert der für das Schutzobjekt geltenden Risikoart (hier Einzelrisiko $1 \cdot 10^{-5}$) dargestellt.

Tabelle 6: Farbcodierung Todeswahrscheinlichkeiten p_R in Relation zum Grenzwert des Risikos

Wertebereich	0	< 1 %	zwischen 1 % und 10 %	zwischen 10 % und 100 %	> 100 %
Farbe	Schwarz oder weggelassen	Grün	Blau	Violett	Rot

4.5 Aus- und Bewertung Eiswurf

Es ändern sich beim Eiswurf in Bezug auf den Eisfall nur die Trefferzahlen auf die Schutzobjekte. Die restlichen Daten wie die bereits berechneten Werte für p_B und p_S bleiben gleich.

Wieder werden alle Eisstücke für die Flächenschutzobjekte (Häuser) betrachtet, aber nur Eisstücke mit einer Auftreffenergie von mindestens 28,1 J für die Wegeschutzobjekte.

Die Trefferbilder für Eiswurf zeigen nun ein anderes Ergebnis im Vergleich zum Eisfall.

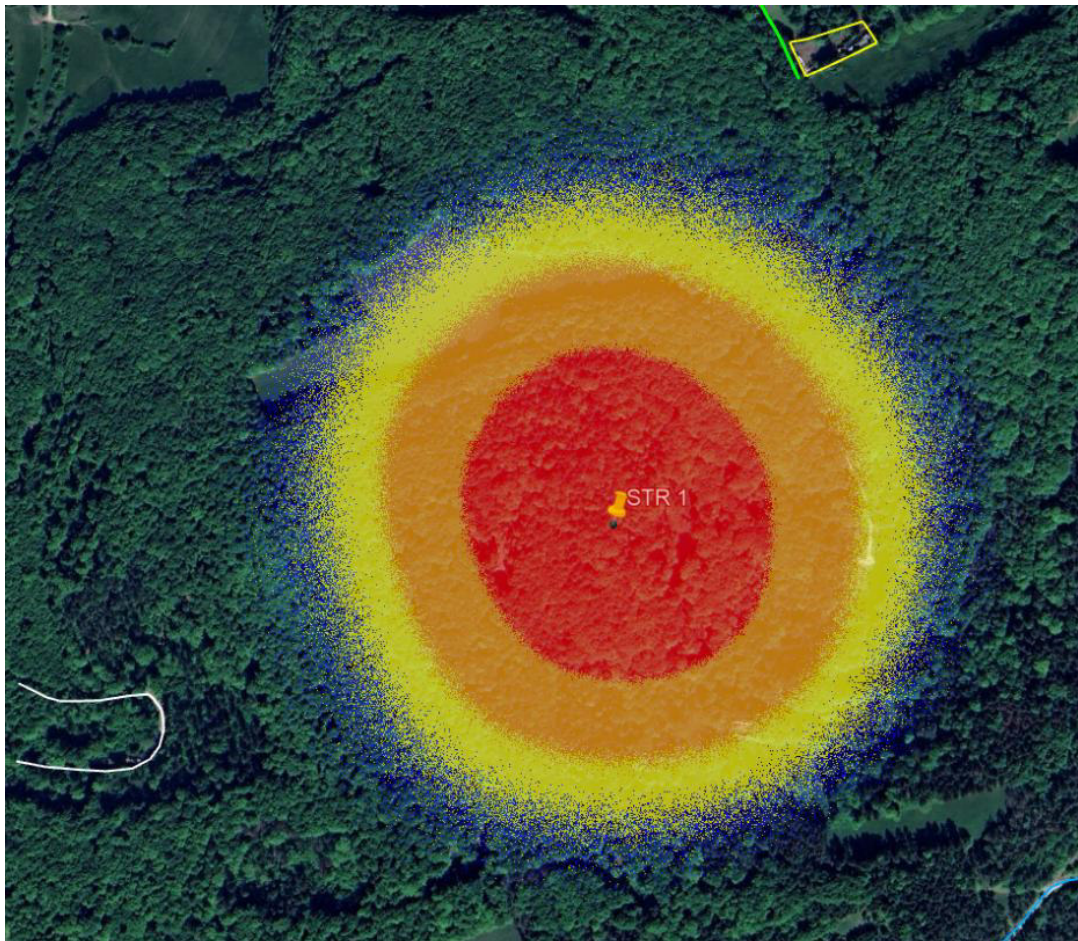


Abbildung 12: Trefferbild von Eisstücken bei Eiswurf um die STR 1.

Die Eisstücke fliegen wesentlich weiter als bei Eisfall (Abbildung 9). Das ist durch die mitgegebene höhere Anfangsgeschwindigkeit aufgrund der höheren Drehzahl begründet. Die Schleife West, der Südweg und die Häuser Nord werden visuell immer noch verfehlt, aber eine wenige Treffer sind nun nicht mehr auszuschließen.

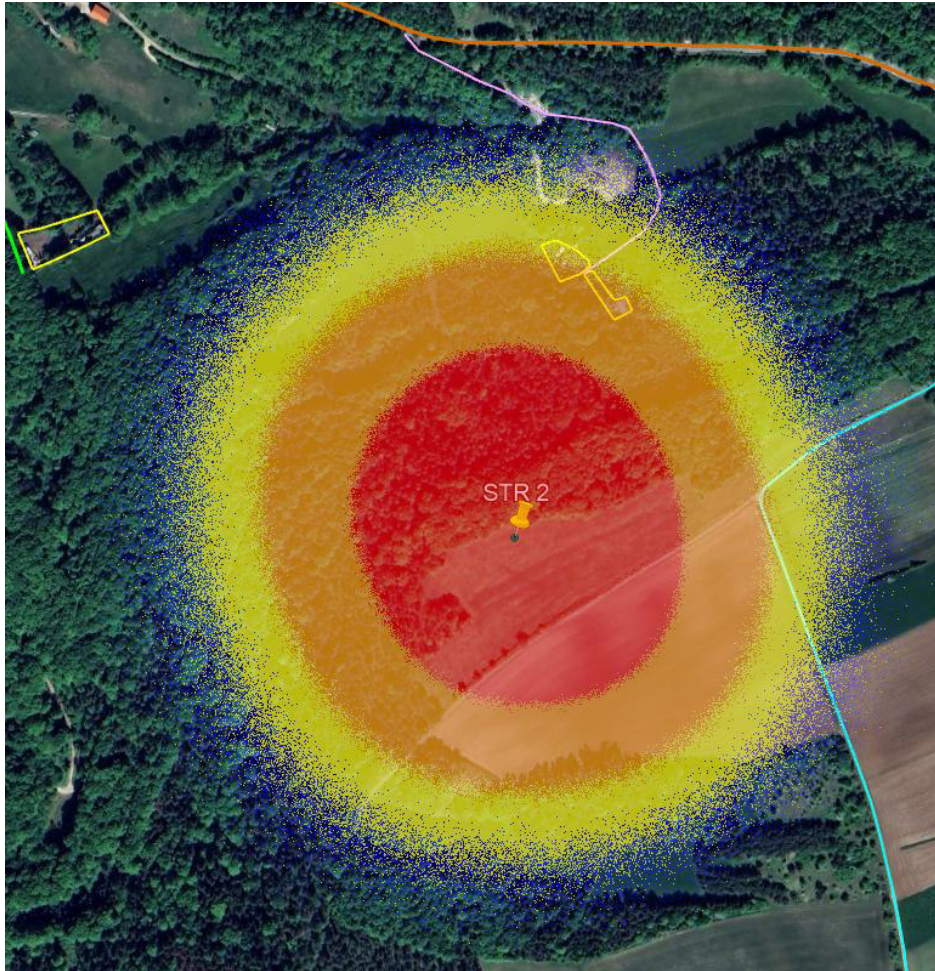


Abbildung 13: Trefferbild von Eisstücken bei Eiswurf um die STR 2.

Auch hier erkennt man die deutlich größere Verbreitung der Eistreffer. Waldhaus 1 und Waldhaus 2 werden nun nicht mehr nur von einigen wenigen Eisstücken getroffen, sondern liegen am äußeren Rand des orangenen Treffergebietes (Waldhaus 2) bzw. an der Grenze zum gelben Bereich (Waldhaus 1).

Die programmatische Auszählung der Treffer ergibt nun folgendes:

Die STR 1 hat auch bei Eiswurf keinerlei Treffer auf ein Schutzgebiet.

Die STR 2 trifft Waldhaus 1, Waldhaus 2, den Waldhausweg und den Ostweg. Es ergeben sich für Waldhaus 1 und Waldhaus 2 folgende Trefferhäufigkeiten analog zu Tabelle 4.

Tabelle 7: Häufigkeiten (p_T), mit denen WEA Waldhaus 1 und 2 bei Eiswurf treffen.

WEA	Schutzobjekt	p_T
STR 2	Waldhaus 1	$2,33 \cdot 10^{-4}$
STR 2	Waldhaus 2	$2,85 \cdot 10^{-4}$

Diese Häufigkeiten liegen 3 - 4 Zehnerpotenzen über den Werten des Eisfalls in Tabelle 4.



Die für die Berechnung der Todeswahrscheinlichkeit p_R bei Eiswurf nach Formel 2 nötigen Werte sind bereits für Eisfall berechnet worden und ändern sich nicht. Deshalb steigt die Todeswahrscheinlichkeit um den gleichen Faktor wie p_T und es ergibt sich

Tabelle 8: Todesrisiko p_R pro Jahr durch die STR2 bei Eiswurf auf Waldhaus 1 und Waldhaus 2.

WEA	Schutzobjekt	p_W	p_T	p_S	p_B	p_R
STR 2	Waldhaus 1	3032	$2,33 \cdot 10^{-4}$	0,0417	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
STR 2	Waldhaus 2	3032	$2,85 \cdot 10^{-4}$	0,0417	$6,50 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-5}$

Diese Werte liegen ca. 20% bzw. 130% über dem erlaubten Grenzwert und sind damit nicht tolerabel.

Eiswurf darf deshalb bei der STR 2 nicht zugelassen werden, in diese WEA muss die Eiserkennung /4/ eingebaut werden, um bei erkanntem Eisansatz auf den Blättern die WEA abzuschalten. Dann wirkt nur noch Eisfall, der im vorigen Abschnitt als unproblematisch nachgewiesen wurde.

Die STR 1 hat jedoch auch bei Eiswurf keine Treffer auf ein Schutzobjekt.

5 Quellenverzeichnis

- /1/ DIBt, (19. 01. 2021), Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) Ausgabe 2020/1, Berlin
- /2/ Deutsches Institut für Normung, (2000), DIN EN 50126, Bahnanwendungen, Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS), Berlin
- /3/ Vestas, (2022), RPM Curves EnVentus™ V162-7,2MW 50/60 Hz, Vestas
- /4/ DNV Energy Systems, (18. 10. 2021), Integration des BLADEcontrol Ice Detector BID in die Steuerung von Vestas Windenergieanlagen, Aarhus
- /5/ Geodaten Bayern, <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=dgm5> abgerufen am 07.10.2025
- /6/ Wichura, B, (2013), The Spatial Distribution of Icing in Germany Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurements of Icing 2013_IWAIS_Proceedings, Potsdam,
- /7/ Kaschuba, M, (2008), Abgerufen am 7. Mai 2025 von Hagelskala mit typischen verursachten Schäden: <https://www.skywarn-schulungszentrum.de/lernhilfen/pdf/Hagelskala.pdf>
- /8/ J,Dessens, C, B, (02 2007), A point hailfall classification based on hailpad measurements: The ANELFA scale, Atmospheric Research, Volume 83, Issues 2–4, Pages



132-139, doi:Pages 132-139

- /9/ EU, (31. 08. 2010), Official Journal of the European Union, Regulation No 43 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) —, Von [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42010X0831\(04\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42010X0831(04)) am 17.07.2025 abgerufen