



Gutachten zu Risiken durch Eiswurf und Eisfall am Standort Oberegg AI

Referenz-Nummer: F2E-2017-WND-028, Revision 1

Auftraggeber:

JH Wind GmbH
Lindenbergstraße 12
79199 Kirchzarten
Deutschland

Betreiber:

Appenzeller Wind AG
Wiesstrasse 13
9413 Oberegg
Schweiz

Die Ausarbeitung des Gutachtens erfolgte durch:

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

Verfasser:

Dipl.-Met. Nicole Stoffels, Sachverständige,

Hamburg, 20.03.2017

Gepprüft:

Dr.-Ing. Thomas Hahm, Sachverständiger,

Hamburg, 20.03.2017

Für weitere Auskünfte:

Tel.: 040 53303680-0

Fax: 040 5330368-79

Nicole Stoffels: stoffels@f2e.de oder Dr. Thomas Hahm: hahm@f2e.de



Urheber- und Nutzungsrecht:

Urheber des Gutachtens ist die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG. Der Auftraggeber erwirbt ein einfaches Nutzungsrecht entsprechend dem Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (UrhG). Das Nutzungsrecht kann nur mit Zustimmung des Urhebers übertragen werden. Veröffentlichung und Bereitstellung zum uneingeschränkten Download in elektronischen Medien sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1 Aufgabenstellung..... | 3 |
| 2 Grundlagen..... | 3 |
| 2.1 Vereisung..... | 3 |
| 2.2 Regelungen in den Normen..... | 4 |
| 2.3 Grenzwerte..... | 6 |
| 2.4 Berechnung der Flugbahnen von Eisstücken..... | 8 |
| 3 Randbedingungen..... | 10 |
| 3.1 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte..... | 10 |
| 3.2 Winddaten am Standort..... | 13 |
| 3.3 Aufenthaltshäufigkeiten..... | 14 |
| 4 Durchgeführte Untersuchungen..... | 14 |
| 4.1 Vereisungshäufigkeiten..... | 14 |
| 4.2 Anzahl sich lösender Eisstücke..... | 17 |
| 4.3 Eiswurf..... | 17 |
| 4.4 Eisfall..... | 17 |
| 5 Zusammenfassung..... | 19 |
| 5.1 Eiswurf..... | 19 |
| 5.2 Eisfall..... | 19 |
| 6 Formelzeichen und Abkürzungen..... | 20 |
| 7 Literaturangaben..... | 20 |
| Anhang A: Detaillierte Berechnungsergebnisse Eisfall..... | 22 |
| A.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten..... | 22 |
| A.2 Schadenshäufigkeiten..... | 23 |



1 Aufgabenstellung

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

2 Grundlagen

2.1 Vereisung

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

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

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

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

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

Grundsätzlich sollten bei der Gefährdung durch Eisfall bzw. Eiswurf daher zwischen großflächigen Eisplatten, die sich über einen großen Bereich der Profiltiefe ausbilden können, und schlankeren Eisstücken, die von der Profilkante abbrechen, unterschieden werden. Hinweise zu Form und Masse von Eisstücken finden sich z.B. in /1/.



Aufgrund der extrem hohen Variabilität der Vereisungstage von Jahr zu Jahr werden langjährige Messungen benötigt, die möglichst auf einen klimatologischen Zeitraum, also 30 Jahre, zu beziehen sind. Derart langjährige Messungen oder Beobachtungen liegen in Deutschland z.B. in Bodennähe für die Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes DWD vor. Messungen in Bodennähe unterliegen jedoch starken mikroskaligen Einflüssen, so dass sie bezüglich einer Vereisung schon wenige hundert Meter entfernt nicht mehr aussagekräftig sein können, wenn sich dort z.B. aufgrund einer lokalen Senke kalte Luft sammelt. Diese mikroskaligen Effekte, die auf Nabenhöhe der Windenergieanlagen typischerweise keine Rolle mehr spielen, zu identifizieren und entsprechend zu korrigieren ist so gut wie nicht möglich. Hinzu kommt, dass die Daten der Klimastationen oft über mehr als 10km und auf andere Höhen über Meeresebene übertragen werden müssen, so dass die Unsicherheiten in der Vorhersage der Vereisungstage nach dieser Methode insgesamt sehr groß sind.

Eine weitere mögliche Quelle stellen großflächige Vereisungskarten dar, wie sie z.B. in /1/ und /2/ dargestellt sind. Diese Karten liefern jedoch nur Hinweise und Tendenzen. In /2/ wird darauf hingewiesen, dass im Gegensatz zu den in den großflächigen Karten dargestellten Werten, die tatsächlichen Werte schon auf kurzen Distanzen stark schwanken können und die lokale Geländetopografie berücksichtigt werden sollte. Die daraus entstehenden Unterschiede in der Einschätzung der Vereisungstage können extrem groß sein, so dass diese Karten selbst zur Plausibilisierung lokaler Vereisungsdaten nur sehr bedingt geeignet sind.

Für Deutschland liegt mittlerweile eine hochaufgelöste Vereisungskarte des DWD vor, die die lokale Topografie berücksichtigt /10/. Sie stellt vor dem Hintergrund der dargestellten Zusammenhänge die zurzeit beste Datengrundlage zur Ermittlung der Vereisungstage für Standorte in Deutschland dar.

2.2 Regelungen in den Normen

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

Der vorgeschlagene Mindestabstand von $1,5 \cdot (\text{Nabenhöhe} + \text{Rotordurchmesser})$ fand in Deutschland Eingang in die Muster-Liste der technischen Baubestimmungen /3/. Dort heißt es in Anlage 2.7/12, Absatz 2 zur Richtlinie „Windenergieanlagen; Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“:

„Abstände zu Verkehrswegen und Gebäuden sind unbeschadet der Anforderungen aus anderen Rechtsbereichen wegen der Gefahr des Eisabwurfs einzuhalten, soweit



eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit nicht auszuschließen ist. Abstände größer als $1,5 \times$ (Rotordurchmesser plus Nabenhöhe) gelten im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen als ausreichend. In anderen Fällen ist die Stellungnahme eines Sachverständigen erforderlich.“

Soweit dieser Mindestabstand nicht eingehalten wird bzw. der Standort der Windenergieanlage in einer besonders eisgefährdeten Region liegt und der Mindestabstand daher keine Anwendung finden kann, ist also das Risiko durch Eiswurf standortspezifisch zu bewerten.

Weiterhin führt die Muster-Liste /3/ in Absatz 3.3 der Anlage 2.7/12 aus, dass die gutachterliche Stellungnahme eines Sachverständigen zur Funktionssicherheit von Einrichtungen vorzulegen ist, durch die der Betrieb der Windenergieanlage bei Eisansatz sicher ausgeschlossen werden kann oder durch die ein Eisansatz verhindert werden kann. Dies hat immer dann zu erfolgen, wenn erforderliche Abstände wegen der Gefahr des Eisabwurfes nicht eingehalten werden.

Die gutachterliche Stellungnahme zur Funktionssicherheit von Einrichtungen zur Eiserkennung ist im Gegensatz zur gutachterlichen Stellungnahme bei Unterschreitung des in der Muster-Liste genannten Mindestabstandes von $1,5 \cdot$ (Nabenhöhe + Rotordurchmesser) kein standortspezifischer Nachweis, sondern ein entweder vom Hersteller des Eiserkennungssystems bzw. für die Implementierung in eine spezifische Windenergieanlage vom Hersteller der Windenergieanlage einmalig für den jeweiligen Typ in Auftrag gegebenes Gutachten. Diese Systeme schließen damit den Betrieb bei potentiell gefährlichem Eisansatz aus, können aber nicht grundsätzlich Eisansatz verhindern. Das für eine Verhinderung des Eisansatzes in /3/ genannte Beispiel einer Rotorblattheizung ist an dieser Stelle typischerweise nicht als Sicherheitssystem konzipiert. Der Betrieb einer Rotorblattheizung wird daher durch einzelne Hersteller für Standorte, in deren Umgebung eventuell durch Eiswurf eine erhebliche Gefährdung besteht, sogar ausgeschlossen.

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

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

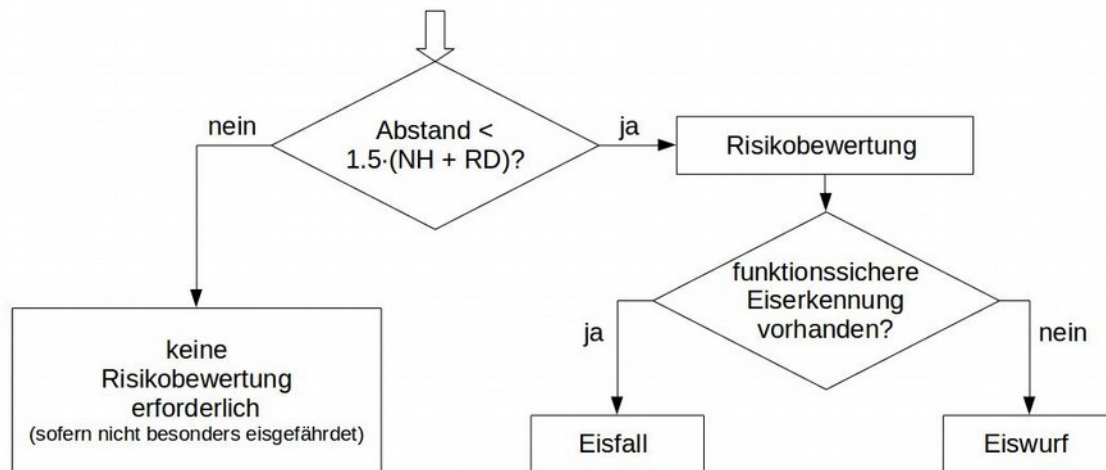


Abbildung 2.2.1: Entscheidungsbaum für die Bewertung des Risikos durch Eiswurf und Eisfall.

2.3 Grenzwerte

Für Personenschäden findet sich in der Literatur das Konzept der minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) /4/. Die endogene Sterblichkeit erfasst das Sterberisiko durch technologische Faktoren bei Sport, Heimwerkertätigkeiten, durch Arbeitsmaschinen oder den Verkehr. Krankheiten oder angeborene Missbildungen werden nicht betrachtet.

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

An anderer Stelle wird das gesellschaftlich akzeptierte Todesfallrisiko abhängig vom Grad der Freiwilligkeit und möglichen Einflussnahme auf die Handlung dargestellt /8/. Die Akzeptanz sinkt, wenn zum einen die Möglichkeit sich durch adäquates Handeln zu schützen gegen Null geht und zum anderen sich die Person nicht freiwillig der Gefährdung aussetzt. Der unter diesen Randbedingungen definierte Grenzwert liegt bei $1 \cdot 10^{-5}$ Todesfällen pro Person und Jahr und entspricht damit dem definierten MEM-Kriterium.

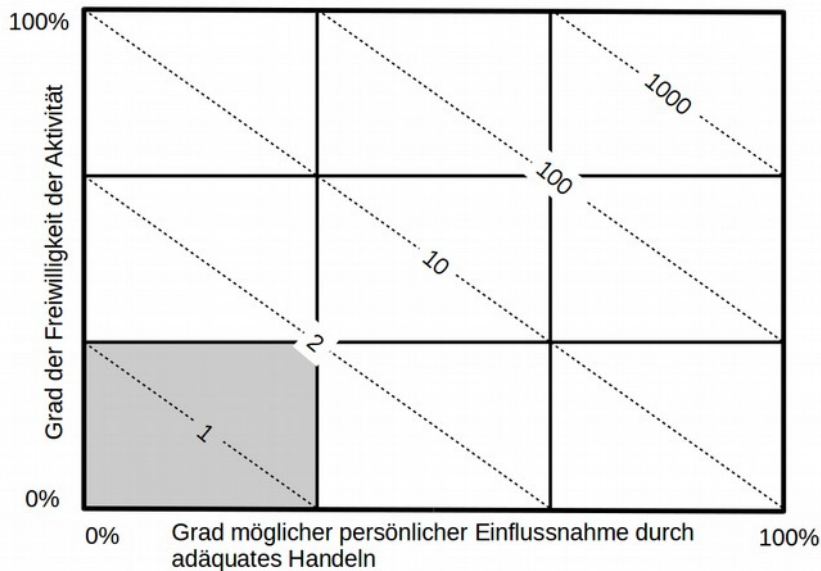


Abbildung 2.3.1: Akzeptiertes Todesfallrisiko pro 100 000 Personen /8/. Grau hinterlegter Bereich entspricht dem MEM-Kriterium /4/.

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

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

Um hier eine konservative Vorgehensweise zu gewährleisten, werden folgende Annahmen getroffen:

- Ein Eisstück, das eine ungeschützte Person außerhalb eines Fahrzeuges oder Gebäudes trifft, führt immer zu einer schweren Verletzung oder zum Tode.
- Ein Eisstück, das im Gefahrenbremsbereich eines Fahrzeuges oder direkt auf ein Fahrzeug auftrifft, führt stets zu einem Unfall. Die durchschnittliche Anzahl von Personen in einem Kraftfahrzeug ist statistisch erfasst /7/ ebenso wie die Häufigkeit schwerer und tödlicher Verletzungen in Folge eines Unfalls im Straßenverkehr /9/, so dass sich hieraus eine Anzahl betroffener Personen ableiten lässt.

Es ist offensichtlich, dass mit dem Ausschluss leichter Verletzungen, der fehlenden Unterscheidung zwischen schweren und tödlichen Verletzungen sowie der weitreichenden Annahmen für das generelle Eintreten eines Unfalls hier ein sehr konserva-



tiver Ansatz gewählt wird. Eine weitere Differenzierung gestaltet sich an dieser Stelle jedoch sehr schwierig und lässt sich auch statistisch zurzeit nicht ausreichend absichern.

Bei der Bewertung von Schutzobjekten, bei denen sich eine größere Anzahl von Personen in der Nähe der WEA aufhält, wie es typischerweise bei Verkehrswegen der Fall ist, muss das daraus resultierende Kollektivrisiko bewertet werden. Entsprechende Grenzwerte für das Kollektivrisiko sind jedoch schwer zu definieren. Für frequentierte Verkehrswege kann man davon ausgehen, dass der Grenzwert für das Kollektivrisiko etwa zwei Größenordnungen günstiger ausfällt als das MEM-Kriterium. Bei schwach frequentierten Verkehrswegen, wie land- und forstwirtschaftlichen Wegen, kann das Kriterium für das Kollektivrisiko als identisch mit dem MEM-Kriterium angesetzt werden.

Im Folgenden wird abdeckend in allen Fällen als Grenzwert das MEM-Kriterium zugrunde gelegt.

Damit kann bei einem Vergleich mit dem MEM-Kriterium in der Umgebung von frequentierten Verkehrswegen jede WEA für sich und unabhängig von einer Vorbelastung bewertet werden.

In der Nähe von schwach frequentierten Verkehrswegen, wie land- und forstwirtschaftlichen Wegen, sind entsprechende kumulierte Risiken zu betrachten, wenn mehrere WEA zur Gefährdung beitragen. Praktisch liegt man in der Regel aber bei schwach frequentierten Verkehrswegen soweit unterhalb des MEM-Kriteriums, dass diese Effekte vernachlässigbar sind und nicht explizit betrachtet werden müssen. Sollte dies im Einzelfall dennoch erforderlich sein, wird dies in den detaillierten Berechnungsergebnissen dargestellt und berücksichtigt.

Umgekehrt wird bei der Bewertung mehrerer Schutzobjekte im Einflussbereich einer WEA eine Summe nur über die Schutzobjekte gebildet, für die das Kriterium für das Kollektivrisiko als identisch mit dem MEM-Kriterium angesetzt werden muss. Ansonsten werden die einzelnen Schutzobjekte im Einflussbereich einer WEA getrennt bewertet.

Da Sachschäden hier in ihrer Schwere gegenüber Personenschäden vernachlässigbar sind, erübrigt sich in der Regel eine gesonderte Bewertung von Sachschäden.

2.4 Berechnung der Flugbahnen von Eisstücken

Für die Berechnung der Flugbahnen der Eisstücke wird basierend auf den Luftwiderstandsbeiwerten, der Geometrie und der Masse der Eisstücke die Lage des Eisstückes während der gesamten Bewegung erfasst und verfolgt, so dass sich im Vergleich zu



einer rein ballistischen Flugbahn ein realistischeres Bild der Flugweiten ergibt und auch solche Flugbahnen erfasst werden, bei denen im Einzelfall aufgrund von Auftriebskräften am Eisstück sehr hohe Flugweiten erreicht werden.

In der Summe wurden ca. eine Million Flugbahnen ausgewertet.

Folgende Randbedingungen werden bei der Berechnung zugrunde gelegt:

- definierte Größe und Masse der Standard-Eisstücke:
 - ca. 500*60*30mm, 0.63kg
 - ca. 500*1150*10mm, 4.1kg
- Standortspezifische Windgeschwindigkeitsverteilung sowie zusätzliche Sturmereignisse, die dadurch konservativ in ihrer Häufigkeit überbewertet werden.
- Windrichtung in 1°-Schritten gewichtet mit der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen.
- Rotorblattstellung zum Zeitpunkt des Eiswurf bzw. Eisfalls: gleichverteilt in 5°-Schritten.
- Abwurfpunkte gleichmäßig verteilt über das Rotorblatt. Verlustfreie Ablösung der Eisstücke.
- Drehzahl der WEA: Normalbetrieb für Eiswurf und Trudelbetrieb für Eisfall (Der Trudelbetrieb wird abhängig von der Windgeschwindigkeit mit 0.1 bis 0.8 Umdrehungen pro Minute angenommen).
- Geländehöhe: es wurden Geländehöhen aus /6/ berücksichtigt.

Eine eventuell vorhandene Schutzwirkung durch Bewuchs oder Gebäude wird vernachlässigt.



3 Randbedingungen

3.1 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte

Am Standort Oberegg AI (Appenzell, Schweiz) plant der Auftraggeber die Errichtung von zwei Windenergieanlagen (WEA 1 und 2).

Die vom Auftraggeber übermittelten Daten zur Windparkkonfiguration sind in Tabelle 3.1.1 bzw. Abbildung 3.1.2 dargestellt.

In der Umgebung befinden sich die Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße und zwei Wanderwege, welche im Rahmen dieser Untersuchung als Schutzobjekte definiert wurden (siehe Abbildung 3.1.1).

Die WEA 1 und 2 liegen in unmittelbarer Nähe zu den Schutzobjekten und werden im Folgenden hinsichtlich einer Gefährdung durch Eiswurf und Eisfall betrachtet.



Abbildung 3.1.1: Betrachtete Schutzobjekte Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße (blau) und Wanderwege (orange) in der Umgebung der WEA 1 und 2 am Standort Oberegg AI (Satellitenbild/13/).





| | Lfd.Nr. WEA | Bezeichnung | Koordinaten (UTM ETRS89/WGS84 Zone 32) | | Hersteller | WEA-Typ | P _N [MW] | RD [m] | NH [m] |
|---|----------------|-------------|---|---------|------------|-----------|------------------------|-----------|-----------|
| | | | East | North | | | | | |
|  | 1 | WEA 1 | 539488 | 5249976 | ENERCON | E-126 EP4 | 4.2 | 127.0 | 135.0 |
|  | 2 | WEA 2 | 539215 | 5250310 | ENERCON | E-126 EP4 | 4.2 | 127.0 | 135.0 |

Tabelle 3.1.1: Windparkkonfiguration

Alle Benennungen von WEA im Dokument beziehen sich auf die Nomenklatur von Spalte 2 (Lfd. Nr.) in Tabelle 3.1.1.

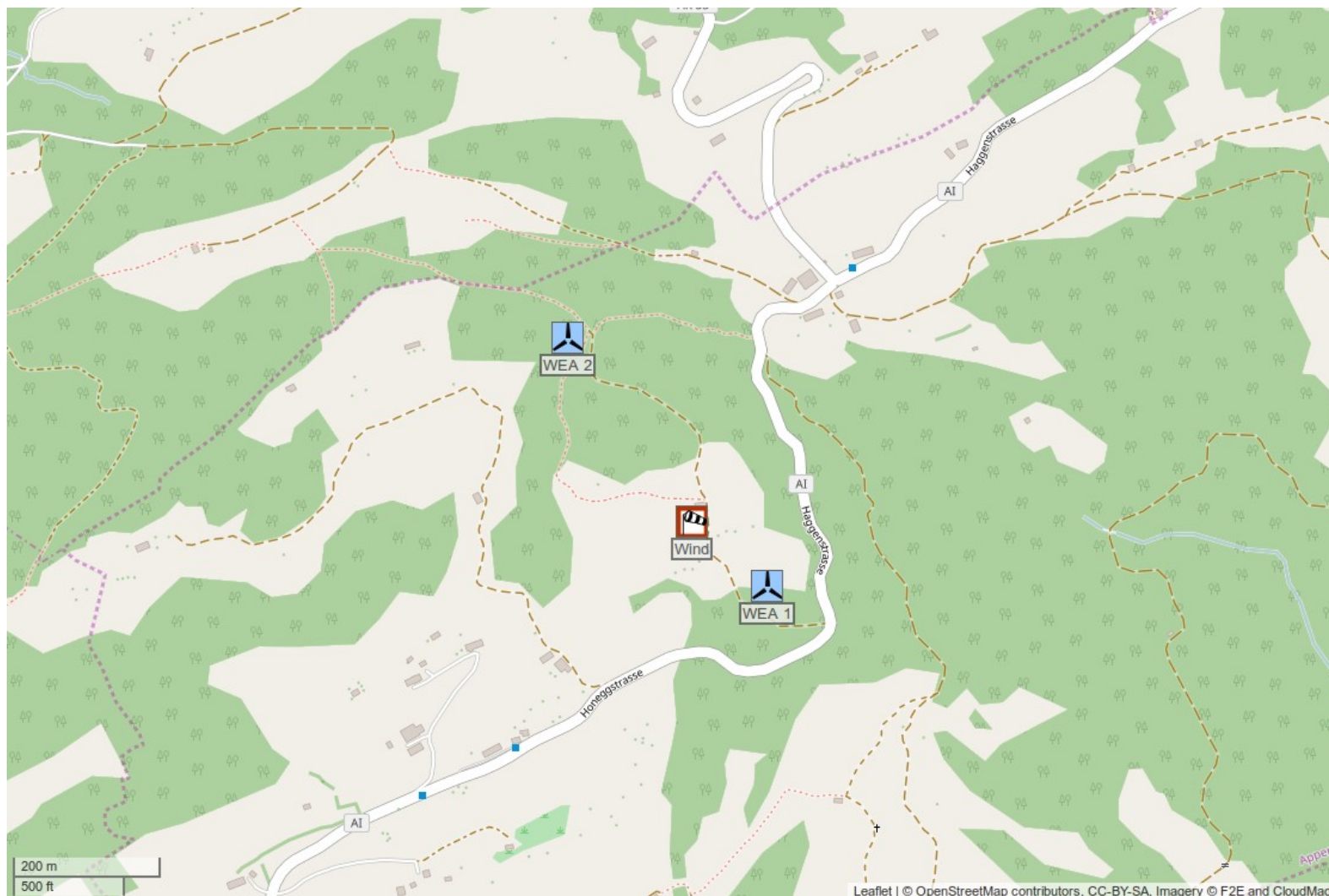




Abbildung 3.1.2:
Lage des Standortes,
Karte 15/.

-  betrachtete WEA
-  Referenzpunkt der
Winddaten



3.2 Winddaten am Standort

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und Windgeschwindigkeiten am Standort wurden /12/ entnommen und sind in Tabelle 3.2.1 dargestellt.

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

| Richtungssektoren | Relative Häufigkeit (100%=1) | Weibullverteilung | |
|---|---------------------------------|-------------------|--------|
| | | A | k |
| N | 0.0515 | 4.333 | 2.199 |
| NNO | 0.0595 | 5.125 | 2.109 |
| ONO | 0.0294 | 3.717 | 1.516 |
| O | 0.0294 | 2.728 | 1.782 |
| OSO | 0.0334 | 2.800 | 1.811 |
| SSO | 0.0877 | 5.061 | 1.938 |
| S | 0.1595 | 7.307 | 1.756 |
| SSW | 0.0518 | 3.916 | 1.556 |
| WSW | 0.1152 | 7.579 | 1.961 |
| W | 0.2303 | 8.696 | 1.918 |
| WNW | 0.1082 | 5.734 | 1.690 |
| NNW | 0.0441 | 4.167 | 1.796 |
| gesamt | 1.0000 | 6.233 | 1.561 |
| Bezugswerte | | | |
| Koordinate des Referenzpunktes Schweizer Landeskoordinaten CH1903 (LV03) | | East | North |
| | | 757245 | 252310 |
| Höhe über Grund h | | 99m | |

Tabelle 3.2.1: Winddaten am Standort.

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



3.3 Aufenthaltshäufigkeiten

Vom Auftraggeber wurde für die Verkehrsbelastung auf der Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße zwischen Honegg und Haggen ein Wert von 100 - 200 Kfz pro Tag übermittelt. Konservativ wird im folgenden von 300 Kfz pro Tag ausgegangen.

Auf der Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße gibt es keine Geschwindigkeitsbegrenzung. Aufgrund der Beschaffenheit der Straße ist jedoch eine Geschwindigkeit von 40 km/h als realistisch zu betrachten. Konservativ wird von einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h ausgegangen.

Für die Wanderwege wurde vom Auftraggeber ein Personenaufkommen von 20 Wanderern täglich übermittelt. Im Folgenden wird konservativ von einem Personenaufkommen von 30 Personen pro Tag ausgegangen.

4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Vereisungshäufigkeiten

Datengrundlage für die Bewertung der Vereisungshäufigkeit bildet die Vereisungskarte des Deutschen Wetterdienstes /10/. Für die Bestimmung der Häufigkeit atmosphärischer Vereisung wurden hierzu in /10/ verschiedene Wetter-Meldungen ausgewertet:

- Allgemeine Wetterereignisse:
 - leichter, mäßiger oder starker gefrierender Regen,
 - leichter, mäßiger oder starker gefrierender Sprühregen,
 - leichter, mäßiger oder starker Schneeregen,
 - Eiskörner (gefrorene Regentropfen),
 - Nebel mit Reifansatz
- Wetterereignisse bei Temperaturen $\leq 0^\circ$ Celsius:
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Sprühregen,
 - leichter, mäßiger oder starker Sprühregen mit Regen,
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Regen,
 - Nebel oder Nebel mit Reifansatz
- Wetterereignisse bei Temperaturen $> 0^\circ$ Celsius:
 - durchgehender oder unterbrochener leichter, mäßiger oder starker Schnee-



- fall,
- leichter, mäßiger oder starker Schneeregen- oder Schneeschauer,
 - Wetterereignisse der letzten Stunde aber nicht zur Beobachtungszeit:
 - Schneefall,
 - Schneeregen oder Eiskörner,
 - gefrierender Regen,
 - Schneeschauer bei Temperaturen $> 0^{\circ}$ Celsius,
 - Nebel bei Temperaturen $\leq 0^{\circ}$ Celsius

Damit werden eine Vielzahl von Ereignissen erfasst, die nicht in allen Fällen zu einer signifikanten Vereisung bzw. in einigen Fällen zu keiner Vereisung der WEA führen. Gleichzeitig beziehen sich die Meldungen auf Beobachterhöhe und nicht auf die Nabenhöhe der WEA. Es wurden daher Vergleiche mit verschiedenen Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt. Hierzu wurden langjährige (30 Jahre) Messreihen zum Tagesmittel der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur ausgewertet, um die Vereisungshäufigkeit auf Nabenhöhe zu bestimmen. Der Vergleich zeigt, dass die in /10/ auf Beobachterhöhe ermittelten Vereisungshäufigkeiten konservativere Ergebnisse liefern. Eine Umrechnung auf Nabenhöhe der WEA ist daher unter Berücksichtigung der in /10/ betrachteten Ereignisse nicht erforderlich.

Gemäß /10/ sind für Standorte in großen Höhen besondere Betrachtungen erforderlich, wenn diese besonders exponiert oder besonders geschützt liegen. Entsprechende Orte wurden in /10/ daher gefiltert. Die niedrigste betroffene Höhe liegt bei ca. 700m üNN, so dass das hier verwendete Verfahren im Folgenden für Orte bis zu einer Höhe von 700m üNN ohne Korrekturen angewendet wird. In diesem Höhenbereich weist die in /10/ verwendete exponentielle Regression eine gute Annäherung an die Daten auf und wird daher hier verwendet. Abbildung 4.1.1 zeigt die hierauf beruhende Vereisungskarte für Deutschland.

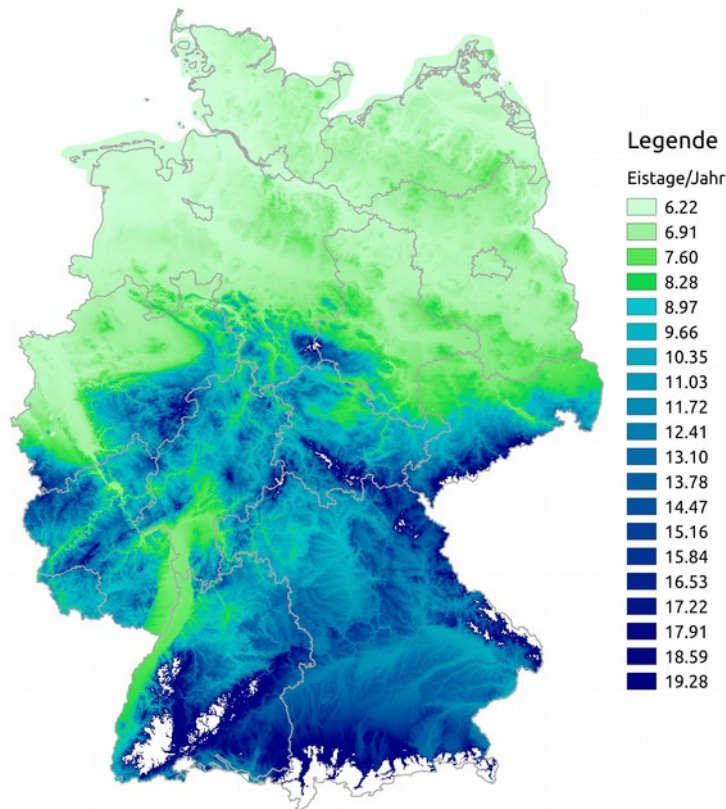


Abbildung 4.1.1: Eistage pro Jahr gemäß den Ergebnissen aus /10/ für Höhen bis 700m üNN.

Der Standort Oberegg AI liegt auf einer Höhe von ca. 1110m üNN in der Schweiz ca. 15km von der Grenze zu Deutschland entfernt. Aufgrund der Nähe zu Deutschland kann die Vereisungskarte des DWD für den Standort Oberegg AI grundsätzlich angewendet werden.

Bezüglich der Höhenlage sind gesonderte Betrachtungen erforderlich. Die gemäß der Vereisungskarte des DWD für diese Höhenlage ermittelten Werte wurden daher mit anderen Quellen für die Schweiz verglichen. In der Vereisungskarte der Schweiz des Bundesamtes für Energie BFE /18/ liegt die Anzahl der Vereisungstage in der Region Appenzell in 100m Höhe über Grund bei 8 - 16 Tagen pro Jahr. In der Vereisungskarte in /1/ ist die betroffene Region mit 8 - 14 Vereisungstagen pro Jahr angegeben. Demgegenüber liefert die Methode der linearen Regression gemäß /10/ einen deutlich konservativeren Wert von 34.9 Vereisungstagen.

Im Folgenden wird daher am Standort Oberegg AI eine Vereisungshäufigkeit von 9.6% entsprechend 34.9 Vereisungstagen pro Jahr angenommen.



4.2 Anzahl sich lösender Eisstücke

Die Anzahl der insgesamt am Standort zu unterstellenden Eisstücke ergibt sich aus der Anzahl der Eisstücke pro Vereisungsereignis und der Anzahl der Vereisungstage. Für die WEA ist konservativ davon auszugehen, dass es an allen Vereisungstagen zu einer vollständigen Vereisung der WEA kommt.

Im aktuellen Entwurf der internationalen Richtlinie für WEA /11/ wird für den Vereisungslastfall die insgesamt zu berücksichtigende Eismasse abhängig von der Blattgeometrie definiert. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Masse der Eisstücke lässt sich daraus eine Anzahl Eisstücke pro Vereisung ableiten. Die Anzahl ist dabei unabhängig davon, ob ein Risiko durch Eisfall oder Eiswurf betrachtet wird, und ergibt im vorliegenden Fall 120.1 Eisstücke pro Vereisung. Damit ergeben sich bei 34.9 Vereisungsfällen insgesamt 4191 Eisstücke pro Jahr.

4.3 Eiswurf

Die WEA 1 und 2 sind mit einer Eiserkennung nach dem Leistungskurvenverfahren /14/ ausgestattet.

Optional können die WEA zusätzlich mit einem Labko-Sensor ausgestattet werden /15/. Der Sensor wird auf der Gondel installiert und kann Eisansatz auf Nabenhöhe auch während der Stillstandzeiten der WEA registrieren.

Die Bewertung der Funktionssicherheit dieser Systeme ist nicht Bestandteil des Gutachtens wurde aber in /16/ vorgenommen. Gemäß /16/ entspricht das System dem Stand der Technik und viele Indizien sprechen dafür, dass eine Eisdicke erkannt wird, die geringer als die kritische Eisdicke ist. Erst ab einer kritischen Eisdicke besteht eine Gefahr für ungeschützte Personen /16/.

Die in /16/ betrachteten WEA -Typen schließen die WEA-Typen ENERCON E-126 EP4 und E-141 EP4 nicht mit ein. Das in /16/ begutachtete Verfahren wird jedoch auch für diese WEA-Typen verwendet /17/.

Aufgrund der vorhandenen Systeme zur Eiserkennung wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der Betrieb bei potentiell gefährlichem Eisansatz ausgeschlossen werden kann. Damit ergibt sich keine Gefährdung durch Eiswurf von den betrachteten WEA.

4.4 Eisfall

Entsprechend Kapitel 2.2 besteht auch bei vorhandener funktionssicherer Eiserkennung stets ein Risiko durch Eisfall in der Umgebung einer WEA. Dieses Risiko ist



daher standortspezifisch zu bewerten.

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

Aus den Erläuterungen wird klar, dass sich eine Gefährdung nicht in Form einer Gefährdungskarte in der Umgebung einer WEA darstellen lässt, da für jedem Punkt in der Umgebung einer WEA theoretisch unendlich viele Szenarien denkbar sind. Die Gefährdung ist daher stets in Bezug zu einem Schutzobjekt unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen zu ermitteln.

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt liegt dann eine Gefährdung durch Eisfall vor, wenn der dort definierte Grenzwert überschritten wird. Damit ergeben sich bezogen auf die betrachteten WEA folgende Ergebnisse für das Szenario Eisfall.

| Gesamtbewertung der einzelnen WEA | | |
|-----------------------------------|-------------|--------------------------|
| Lfd. Nr. WEA | Bezeichnung | Gefährdung durch Eisfall |
| 1 | WEA 1 | nicht vorhanden |
| 2 | WEA 2 | nicht vorhanden |

Tabelle 4.4.1: *Gefährdung durch Eisfall am Standort Oberegg AI.*

Details der zugrunde liegenden Berechnungen sind im Anhang A dargestellt.



5 Zusammenfassung

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

Als Schutzobjekte wurden die Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße und zwei Wanderwege in der Nachbarschaft der WEA definiert.

5.1 Eiswurf

Abschließend kann festgestellt werden, dass aufgrund der vorhandenen Systeme zur Eiserkennung keine Gefährdung durch Eiswurf von den betrachteten WEA zu unterstellen ist.

5.2 Eisfall

Abschließend kann festgestellt werden, dass sich aus der Gesamtbewertung der jeweiligen betrachteten WEA 1 und 2 bezüglich der Schutzobjekte keine Gefährdung durch Eisfall ergibt.



6 Formelzeichen und Abkürzungen

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

7 Literaturangaben

- /1/ Bengt Tammelin et. al.; Wind Energy Production in Cold climates; Meteorological publications No.41, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, February 2000.
- /2/ International Energy Agency (IEA), IEA Wind Task 19, State-of-the-Art of Wind Energy in Cold Climates, Edition October 2012.
- /3/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen - Fassung Juni 2015.
- /4/ DIN EN 50126; Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS); Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000.
- /5/ OpenStreetMap und Mitwirkende; siehe Internet: <http://www.openstreetmap.org>, <http://opendatacommons.org>, <http://creativecommons.org>.
- /6/ Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2006, Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- /7/ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Mobilität in Deutschland 2008; Ergebnisbericht, Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends; Bonn und Berlin, Februar 2010.
- /8/ Schneider J., Schlatter H. P.; Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure; 1. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart, 1994.
- /9/ Statistisches Bundesamt; Verkehr – Verkehrsunfälle - 2012, Fachserie 8 Reihe 7; Wiesbaden, 2013.



- /10/ Wichura, B., 2013. The Spatial Distribution of Icing in Germany Estimated by the Analysis of Weather Station Data and of Direct Measurements of Icing, Proceedings of the 15th International Workshop On Atmospheric Icing Of Structures (IWAIS 2013). Compusult Ltd., St. John's, Newfoundland and Labrador, September 8-11, 2013, pp. 303-309.
- /11/ International Electrotechnical Commission (IEC); IEC 61400-1 Ed. 4, Wind turbines - Part 1: Design requirements; 88/521/CD Committee Draft, 22. Oktober 2015.
- /12/ JH Wind GmbH; Winddaten zum Standort Oberfeld; als Datei 'WinOberegg JH Wind .xlsx' per E-Mail vom Auftraggeber am 07.11.2016.
- /13/ © 2016 Google Inc.; © 2009 GeoBasis-DE/BKG.
- /14/ ENERCON GmbH; Technische Beschreibung ENERCON Eiserkennung, Leistungskurvenverfahren; Dokument D0154407-3, 14.05.2014.
- /15/ ENERCON GmbH; Technische Beschreibung ENERCON Eiserkennung, Labko-Sensor; Dokument D0154408-2, 28.10.2010.
- /16/ TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG; Gutachten zur Bewertung der Funktionalität von Eiserkennungssystemen zur Verhinderung von Eisabwurf an ENERCON Windenergieanlagen: Eisansatzerkennung nach dem ENERCON-Kennlinienverfahren; TÜV Nord Bericht Nr.: 8111 881 239 Rev.1; Hamburg, 22. August 2016.
- /17/ ENERCON GmbH; Herstellerklärung, Gegenstand der Erklärung: Gültigkeit des Gutachtens zur Eisansatzerkennung nach dem ENERCON Kennlinienverfahren für alle aktuellen ENERCON Windenergieanlagen; 25.10.2016; Aurich, Deutschland.
- /18/ Schweizer Eidgenossenschaft, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE; Vereisungskarte der Schweiz, Schlussbericht 31. Mai 2010.



Anhang A: Detaillierte Berechnungsergebnisse Eisfall

A.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten

Tabelle A.1.1 listet die maximal erreichte Flugweite der Bruchstücke bezogen auf den Fußpunkt der WEA auf. Die Häufigkeitsverteilung der Flugweiten ist für die WEA in Abbildung A.1.1 aufgetragen.

| WEA | Maximale Flugweite [m] | Maximale Flugweite / (Nabenhöhe + Rotordurchmesser) |
|-------|------------------------|--|
| WEA 1 | 574.3 | 2.192 |
| WEA 2 | 358.7 | 1.369 |

Tabelle A.1.1: Maximale Flugweite der betrachteten Eisstücke am Standort Oberegg AI.

Die Flugweiten erreichen einen Maximalwert vom 2.192fachen aus Nabenhöhe plus Rotordurchmesser der WEA. Sie liegen damit unter dem in /1/ bei pauschaler Betrachtung geforderten konservativen Abstand vom 1.5fachen aus Nabenhöhe plus Rotordurchmesser der WEA.

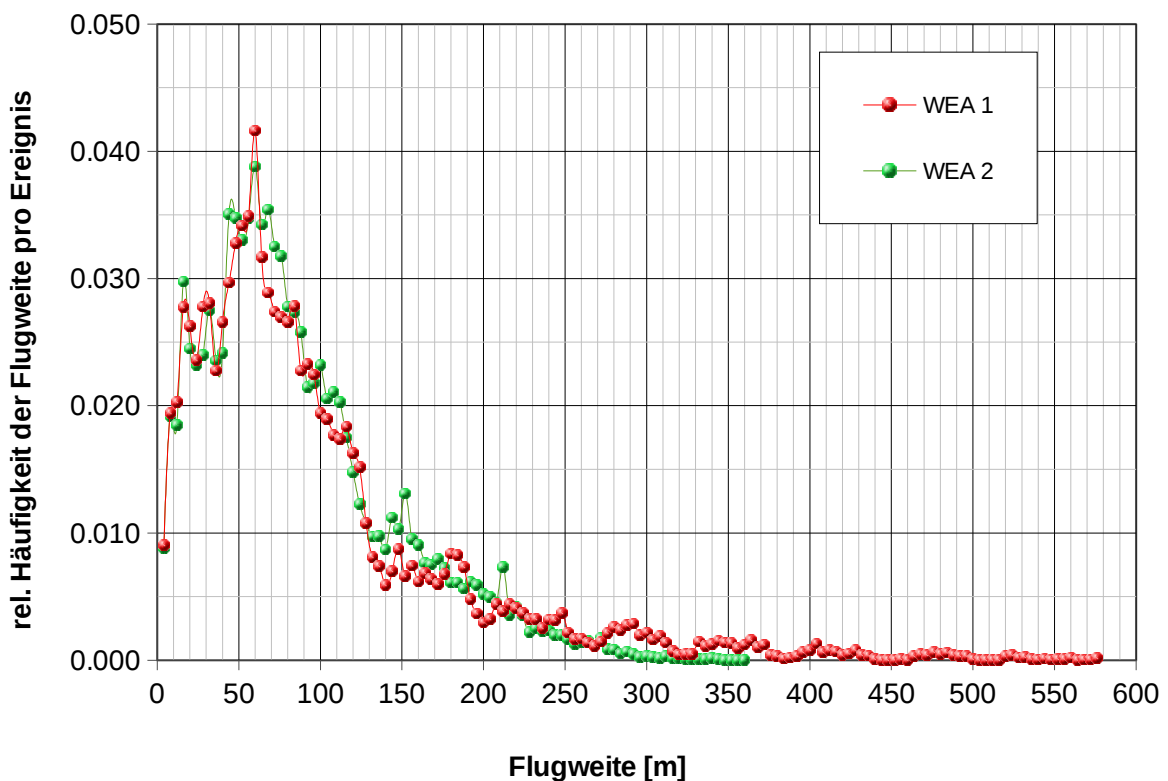


Abbildung A.1.1: Häufigkeitsverteilung der Flugweiten von Eisstücken für die betrachteten WEA.



In der Abbildung A.1.2 sind die für die Umgebung der WEA resultierenden Treffer pro 16 Quadratmeter und Jahr dargestellt.

Zur Auswertung wurden georeferenzierte Satellitenbilder aus Google Earth verwendet /13/. Auf Grund der Unsicherheit bei der Georeferenzierung wurde ein zusätzlicher räumlicher Toleranzbereich von 2m für die Schutzobjekte berücksichtigt.

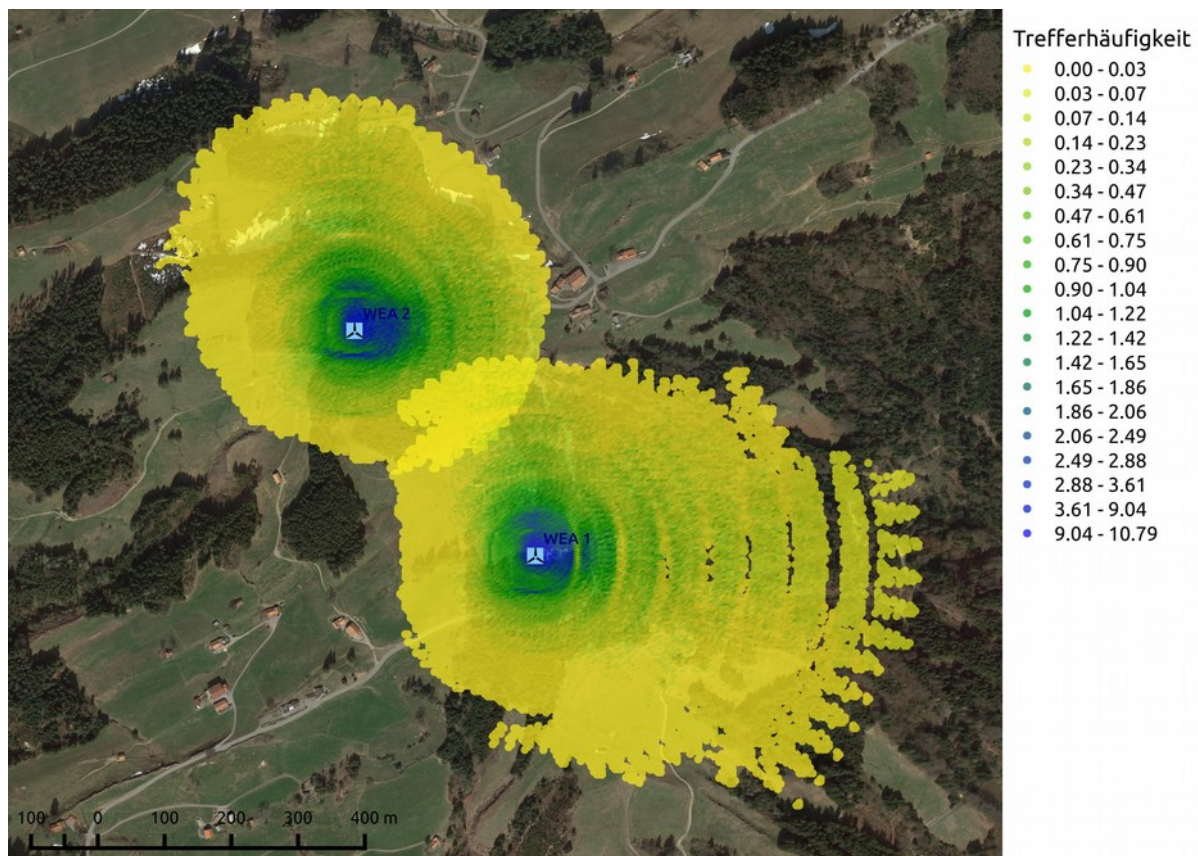


Abbildung A.1.2: Trefferhäufigkeiten von Eisstücken pro Rasterfläche (16m²) und Jahr in der Umgebung der WEA 1 und 2 am Standort Oberegg AI (Satellitenbild /13/).

A.2 Schadenshäufigkeiten

Aus den ermittelten Flugbahnen ergeben sich für die Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße und die Wanderwege im Bereich der WEA die in Tabelle A.2.1 aufgeführten Randbedingungen.



| WEA | Schutzobjekt | Durch Eisfall gefährdete Fläche [m ²] | Anzahl Treffer pro Jahr |
|-------|--|---|-------------------------|
| WEA 1 | Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße | ~6345 | 125.9 |
| | Wanderwege | ~4550 | 19.2 |
| WEA 2 | Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße | ~1215 | 3.1 |
| | Wanderwege | ~3400 | 19.0 |

Tabelle A.2.1: Randbedingungen für die Bewertung von Sach- bzw. Personenschäden am Standort Oberegg AI.

Für die wirksame Trefferfläche eines Kfz wird angenommen, dass sie sich proportional zum Anhalteweg des Fahrzeugs verhält. Dies berücksichtigt, dass auch das Auftreffen im Nahbereich des Kfz eine Fehlreaktion beim Fahrer auslösen kann, in dessen Folge es zu einem Unfall kommt. Dabei steigt das Risiko überproportional mit der Fahrgeschwindigkeit. Für die Bewertung von Personenschäden wird weiterhin davon ausgegangen, dass jedes Kfz im Mittel mit 1.5 Personen besetzt ist. Dies entspricht der durchschnittlichen Besetzungszahl von Pkw in Deutschland /7/. Eine infolge eines Treffers durch Eis resultierende Verkettung von Unfällen wurde nicht betrachtet.

Legt man die Verkehrsunfälle mit Personenschaden zugrunde, liegt die Wahrscheinlichkeit bei einem Unfall außerorts (ohne Autobahnen) tödlich zu verunglücken bei 0.029, die Wahrscheinlichkeit tödlich zu verunglücken oder schwer verletzt zu werden liegt bei 0.38 /9/. Dementsprechend wird im folgenden davon ausgegangen, dass 38% der durch Eiswurf und Eisfall verursachten Verkehrsunfälle tödlich sind oder zu schweren Verletzungen führen. Dabei gilt eine Person als schwerverletzt, wenn sie mindestens 24 Stunden stationär in einer Klinik behandelt wurde.

Mit den genannten Ausführungen ergeben sich die in Tabelle A.2.2 aufgelisteten Unfallhäufigkeiten bzw. Risiken.

Überschreitungen des MEM-Kriteriums sind in Tabelle A.2.2 jeweils fett gedruckt. Die zugrunde gelegten Parameter sind noch einmal in Tabelle A.2.3 aufgeführt.



| WEA | Schutzobjekt | Sachschäden pro Jahr | Personenschäden pro Jahr |
|-------|--|--|---|
| WEA 1 | Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße | $1.52 \cdot 10^{-5}$ (einmal in 65 000 Jahren) | $8.64 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 115 000 Jahren) |
| | Wanderwege | --- | $2.56 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 3.9 Mio. Jahren) |
| WEA 2 | Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße | $1.96 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 510 000 Jahren) | $1.12 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 896 000 Jahren) |
| | Wanderwege | --- | $4.55 \cdot 10^{-7}$ (einmal in 2.1 Mio. Jahren) |

Tabelle A.2.2: Risiko für Sach- bzw. Personenschäden am Standort Oberegg AI.

| Einflussparameter | Wert |
|---|--------------|
| Vereisungshäufigkeit pro Jahr | 0.096 (9.6%) |
| Vereisungshäufigkeit der WEA bei Vereisungsbedingungen | 1 (100%) |
| Eisstücke pro Vereisungsereignis | 120.1 |
| Vereisungsereignisse pro Jahr (vollständige und dickschichtige Vereisung) | 34.9 |
| Gesamtanzahl Eisstücke pro Jahr | 4191 |
| Für die Statistik berücksichtigte Anzahl an Eisstück-Flugbahnen | ~ 1 000 000 |
| Verkehrsaufkommen auf der Kantonsstraße Honeggstraße/Haggenstraße Kfz/Tag | 300 |
| Personenaufkommen auf den Wanderwegen Personen/Tag | 30 |
| Anzahl Personen pro Kfz | 1.5 |
| Wahrscheinlichkeit bei einem Verkehrsunfall mit Personenschaden außerorts (ohne Autobahnen) tödlich zu verunglücken oder schwer verletzt zu werden | 0.38 |

Tabelle A.2.3: Auflistung der verwendeten Einflussparameter.