



Gutachten zu Risiken durch Bauteilversagen an Windenergieanlagen für den Standort Miltzow

Referenz-Nummer:

F2E-2019-RIA-027, Rev. 0 ungekürzte Fassung

Auftraggeber:

WP Miltzow GmbH
Schlossweg 3, 18516 Griebenow

Bauherren:

Altenhagen Wind GmbH & Ko. KG
noordenwin Ingenieurgesellschaft mbH
wpd Windpark Nr. 263 Renditefonds GmbH & Co. KG

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,

Dipl.-Met. Nicole Stoffels, Sachverständige,

Hamburg, 20.12.2019

Geprüft:


Dr.-Ing. Thomas Hahm, Sachverständiger,

Dr.-Ing. Thomas Hahm, Sachverständiger,

Hamburg, 20.12.2019

Für weitere Auskünfte:

Tel.: 040 53303680-0

Fax: 040 53303680-79

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. Eine Einsichtnahme der gekürzten Fassung des Gutachtens gemäß UVPG §23 (2) über die zentralen Internetportale von Bund und Ländern gemäß UVPG §20 Absatz (1) wird gestattet.

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung.....	3
2 Grundlagen.....	3
2.1 Grenzwerte und Risikobewertung.....	4
2.1.1 Grenzwerte individuelles Risiko.....	4
2.1.2 Grenzwerte kollektives Risiko.....	5
2.1.3 Risikobewertung.....	6
2.1.4 Addition von Risiken.....	9
3 Eingangsdaten.....	11
3.1 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte.....	11
3.2 Winddaten am Standort.....	15
3.3 Aufenthaltshäufigkeiten.....	16
3.4 Standortsspezifische Grenzwerte für das kollektive Risiko.....	16
4 Durchgeführte Untersuchungen.....	17
4.1 Abriss Blatt.....	17
4.1.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten.....	17
4.2 Turmversagen.....	20
4.2.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten.....	21
4.3 Verlust der Gondel bzw. des Rotors.....	21
4.4 Schadenshäufigkeiten.....	21
4.5 Bewertung des Risikos.....	22
5 Zusammenfassung.....	23
6 Formelzeichen und Abkürzungen.....	24
7 Literaturangaben.....	24



1 Aufgabenstellung

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG ist beauftragt worden, die vorliegende Windparkkonfiguration hinsichtlich einer Gefährdung durch Rotorblattbruch, Turmversagen und Verlust der Gondel bzw. des Rotors an den Windenergieanlagen (WEA) zu betrachten und zu bewerten.

Dabei werden in einem ersten Schritt die Häufigkeiten und Flugweiten einzelner Blätter bzw. Blattbruchstücke sowie die Häufigkeit für Turmversagen und Verlust der Gondel bzw. des Rotors ermittelt. Für definierte Schutzobjekte werden anschließend die Trefferhäufigkeiten berechnet und die daraus entstehenden Risiken bewertet.

2 Grundlagen

Die Eintrittshäufigkeiten für die Schadensfälle Rotorblattbruch, Turmversagen und Verlust der Gondel bzw. des Rotors werden typischerweise auf Basis bekannter Schadenereignisse eingeschätzt. Umfassende Untersuchungen hierzu finden sich z.B. in /1/. Hier werden folgende Versagenhäufigkeiten pro WEA pro Jahr genannt:

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

Tabelle 2.1: Versagenhäufigkeiten an WEA pro Anlage und Jahr sowie gemeldete und bestätigte Wurfweiten nach /1/.

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

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



2.1 Grenzwerte und Risikobewertung

2.1.1 Grenzwerte individuelles Risiko

Für Personenschäden findet sich in der Literatur das Konzept der minimalen endogenen Sterblichkeit (MEM) /2/. 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 /10/. 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.

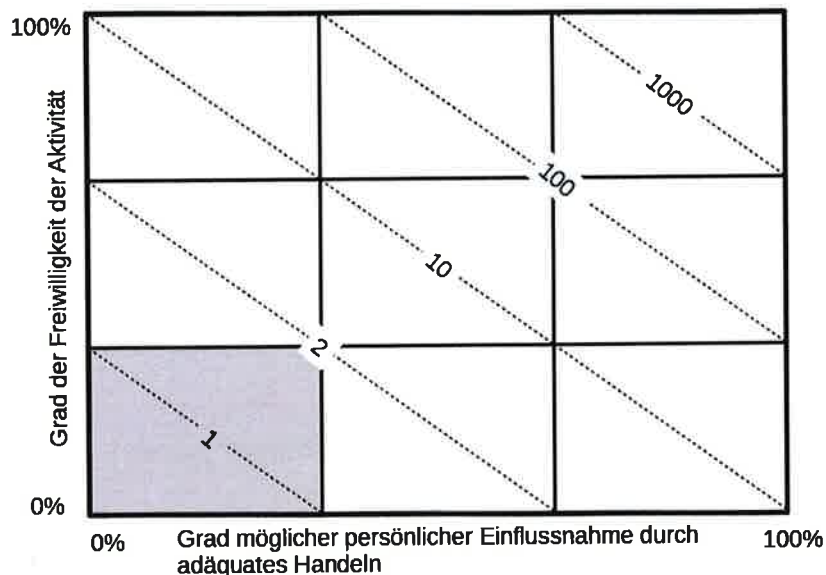


Abbildung 2.1.1.1: Akzeptiertes Todesfallrisiko pro 100 000 Personen /10/. Grau hinterlegter Bereich entspricht dem MEM-Kriterium /5/.

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



Stelle gerechtfertigt und sinnvoll.

Damit liegt eine inakzeptable Gefährdung durch Bauteilversagen an einer WEA nur vor, wenn der so definierte Grenzwert überschritten wird.

2.1.2 Grenzwerte kollektives Risiko

Bei der Bewertung von Schutzobjekten, bei denen sich eine größere Anzahl von Personen in der Nähe der WEA aufhält, wie es typischerweise bei Verkehrswegen der Fall ist, ist in der Regel das daraus resultierende Kollektivrisiko zu bewerten. Entsprechende Grenzwerte für das Kollektivrisiko für Eisfall- und Eiswurf von Windkraftanlagen werden in /9/ definiert und für das Risiko von Bauteilversagen übernommen. Nach /9/ liegt das Kollektivrisiko zwei Größenordnungen oberhalb des MEM-Kriteriums /9/.

Gemäß /9/ kann für das Risiko im Straßenverkehr der Grenzwert für das kollektive Risiko basierend auf vorliegenden Unfallstatistiken ermittelt werden. Diese Vorgehensweise findet Anwendung für Straßen des Fernverkehrs und angeschlossene Straßen, die dem Durchgangsverkehr dienen. Dies sind in Deutschland die Bundesautobahnen, die Bundesstraßen und die Landesstraßen.

Das aktuelle Risiko ist dabei auf Basis der Todesfälle und der Schwerverletzten im Straßenverkehr zu ermitteln. Entsprechend der grundsätzlichen Idee des MEM-Kriteriums wird auch hier gefordert, dass ein bestehendes Risiko nicht nennenswert erhöht werden darf. Der anzusetzende Grenzwert für eine inakzeptable Gefährdung durch Bauteilversagen wird daher eine Größenordnung niedriger gewählt als das bestehende Risiko /9/.

Mit /11/ liegen entsprechende Unfallzahlen für Kfz-Benutzer gegliedert nach Straßenklasse, Ortslage und Unfallfolge vor. Tabelle 2.1.2.1 listet die entsprechenden absoluten Unfallzahlen pro Jahr für die betreffenden Straßengruppen.

Tabelle 2.1.2.1: Verunglückte Kfz-Benutzer gegliedert nach Straßenklasse pro Jahr /11/.

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

In Verbindung mit der Inlandsfahrleistung auf den verschiedenen Straßenklassen lassen sich daraus die bestehenden Risiken bezogen auf die gefahrene Strecke bestimmen. Damit ist es möglich abhängig von der Verkehrsdichte straßenspezifische Risikowerte festzulegen. Die Streckenlänge ist dabei so festzulegen, dass jeweils nur



eine WEA zur Gefährdung beitragen kann, um auch hier zu gewährleisten, dass das von jeder WEA ausgehende Risiko unabhängig bewertet werden kann. Die so standortspezifisch ermittelten Risikogrenzwerte werden in Kapitel 3.4 dargestellt.

Für alle anderen Straßenklassen kann der oben definierte Grenzwert für das Kollektivrisiko von $1 \cdot 10^{-3}$ zugrunde gelegt werden.

2.1.3 Risikobewertung

Im Folgenden wird daher in allen Fällen das individuelle Risiko und das kollektive Risiko ermittelt. Anschließend wird in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen das individuelle oder kollektive Risiko für eine Bewertung zugrunde gelegt. In Anlehnung an /9/ kann dabei folgende Aufteilung verwendet werden:

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

Entsprechend dem Vorgehen der UK Health and Safety Executive (HSE) /10/ werden in /9/ unterhalb des inakzeptablen Bereiches weitere Risikobereiche definiert, die unterschiedliche Maßnahmen erfordern.

Das MEM-Kriterium definiert für das individuelle Risiko dabei die Obergrenze des sogenannten ALARP-Bereichs (As Low As Reasonably Practicable, s. Abbildung 3.1.1). Risiken die höher als das MEM-Kriterium liegen, sind demnach nicht akzeptabel.

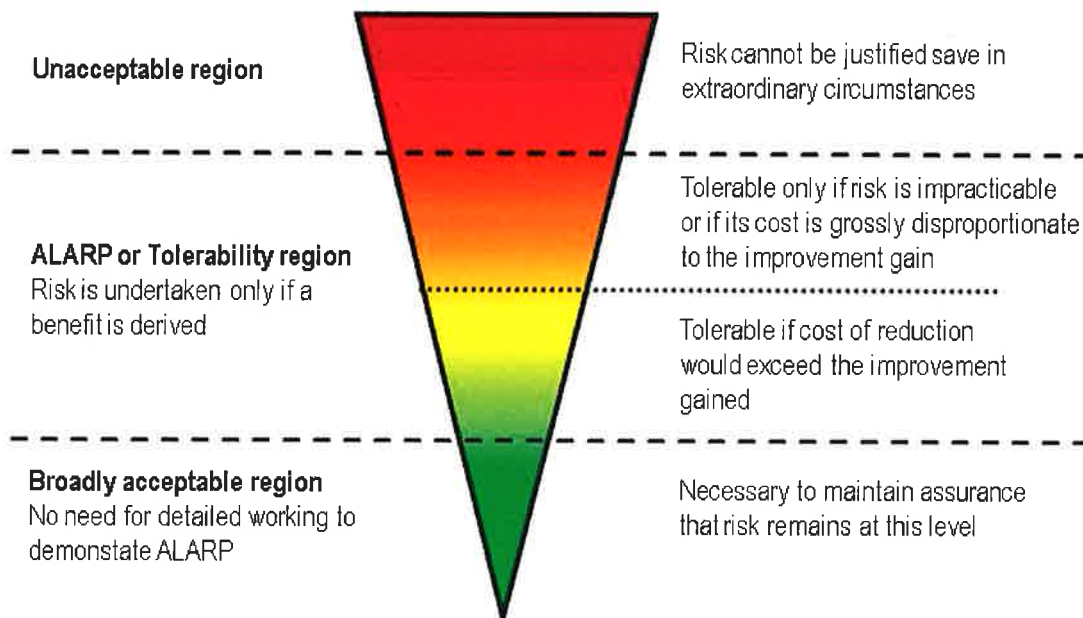


Abbildung 2.1.3.1: ALARP-Prinzip /10/. Die Grenze zum roten inakzeptablen Bereich wird für das individuelle Risiko durch das MEM-Kriterium /2/ definiert.

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

Liegt das Risiko im ALARP-Bereich, sind Maßnahmen zur weiteren Reduzierung des Risikos durch Bauteilversagen auf Grundlage des ALARP-Prinzips in der Regel nicht erforderlich. Im Rahmen des Gutachtens werden entsprechend nur im Einzelfall Maßnahmen vorgeschlagen. Liegt das Risiko mehr als zwei Größenordnungen unterhalb des MEM-Kriteriums, ist es ohne weitere Maßnahmen uneingeschränkt akzeptabel.

Bei der Bewertung der individuellen und kollektiven Risiken wird entsprechend zwischen den vier in Tabelle 3.1.1 genannten Bereichen unterschieden:



Individuelles Risiko	Kollektives Risiko	Bewertung
$> 10^{-5}$	$> 10^{-3}$ oder standortspezifisch	Roter Bereich: Risiko inakzeptabel - Maßnahmen sind einzuleiten und deren Nutzen ggf. nachzuweisen
10^{-6} bis 10^{-5}	10^{-4} bis 10^{-3} oder standortspezifisch	Oranger Bereich: Risiko akzeptabel - Maßnahmen nur im Einzelfall in Betracht zu ziehen
10^{-7} bis 10^{-6}	10^{-5} bis 10^{-4} oder standortspezifisch	Gelber Bereich: Risiko akzeptabel - Maßnahmen in der Regel nicht erforderlich
$< 10^{-7}$	$< 10^{-5}$ oder standortspezifisch	Grüner Bereich: Risiko uneingeschränkt akzeptabel

Tabelle 2.1.3.1: Risikobereiche für das individuelle und kollektive Risiko nach /9/.

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

- Installation eines Systems zur Erkennung von strukturellen Schäden an den Rotorblättern ,
- Wahl eines kleineren WEA-Typs,
- Verschiebung der WEA,
- Verlegung des betroffenen Schutzobjektes.

Bei Verschiebungen der WEA oder des Schutzobjektes bzw. einem kleineren WEA-Typ ist durch eine erneute Berechnung nachzuweisen, dass das Risiko anschließend nicht mehr im roten inakzeptablen Bereich liegt /9/.

Wenn mehrere WEA zur Gefährdung z.B. entlang einer Wegstrecke auf einem Verkehrsweg beitragen und sich z.B. die Gefährdungsbereiche überlappen, kann es erforderlich sein, entsprechende kumulierte Risiken zu betrachten.

Umgekehrt wird bei der Bewertung mehrerer Schutzobjekte im Einflussbereich einer WEA eine Summe über die Schutzobjekte gebildet, für die dies aufgrund der Nutzung erforderlich ist.

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



2.1.4 Addition von Risiken

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

Dies spielt für den überregionalen Verkehr keine Rolle, da hier mit Grenzwerten verglichen wird, die auf die gefahrene Strecke bezogen sind (siehe Kapitel 2.1.2).

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

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

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











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

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

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



Tabelle 2.1.4.1: Erläuterung der verwendeten Begriffe und Symbole.

Erläuterung der Begriffe		
	„geplante WEA“	WEA, deren Risiko im Rahmen des Gutachtens zu bewerten ist.
	„benachbarte WEA“	Alle weiteren WEA, die vom Auftraggeber übermittelt wurden. Es ist dabei unerheblich, ob sich einzelne benachbarte WEA ebenfalls in Planung oder Bau befinden. Entscheidend ist die Windparkkonfiguration, die als Vorbelastung für die geplanten WEA zu unterstellen ist. Alle benachbarten WEA sind in Tabelle 3.1.1 aufgeführt.
	„Referenzpunkt der Winddaten“	Jeweiliger Standort, auf dessen Koordinaten sich die verwendeten Winddaten beziehen.
Farbliche Zuordnung der Symbole		
	Zu betrachtende WEA: geplante WEA, deren Risiko bewertet wird.	
	Zu berücksichtigende WEA: Benachbarte WEA, die aufgrund ihres Abstandes zu den geplanten WEA Einfluss auf das Risiko im Gefährdungsbereich der zu betrachtenden WEA () nehmen bzw. aufgrund der Nutzung der Schutzobjekte innerhalb des Windparks zu berücksichtigen sind.	
	Benachbarte WEA, die aufgrund ihres Abstandes zu den geplanten WEA und ihrer Lage im Windpark nicht bei der Bewertung des Risikos der zu betrachtenden WEA () zu berücksichtigen sind. Diese WEA sind eventuell nur zum Teil in Abbildung 3.1.2 dargestellt.	
	Referenzpunkte der Winddaten.	
	Referenzpunkt der Winddaten auf den Koordinaten einer (in diesem Fall geplanten) WEA.	



3 Eingangsdaten

3.1 Windparkkonfiguration und Schutzobjekte

Am Standort Miltzow (Mecklenburg-Vorpommern) plant der Auftraggeber die Errichtung von sieben Windenergieanlagen (WEA 1 - 7).

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 Bundesstraße B96, die Landesstraße L30 und die Kreisstraße K16, welche im Rahmen dieser Untersuchung als Schutzobjekte definiert wurden (siehe Abbildung 3.1.1).

Die WEA 1 - 7 liegen in unmittelbarer Nähe zu den Schutzobjekten und werden im Folgenden hinsichtlich einer Gefährdung durch Bauteilversagen betrachtet.

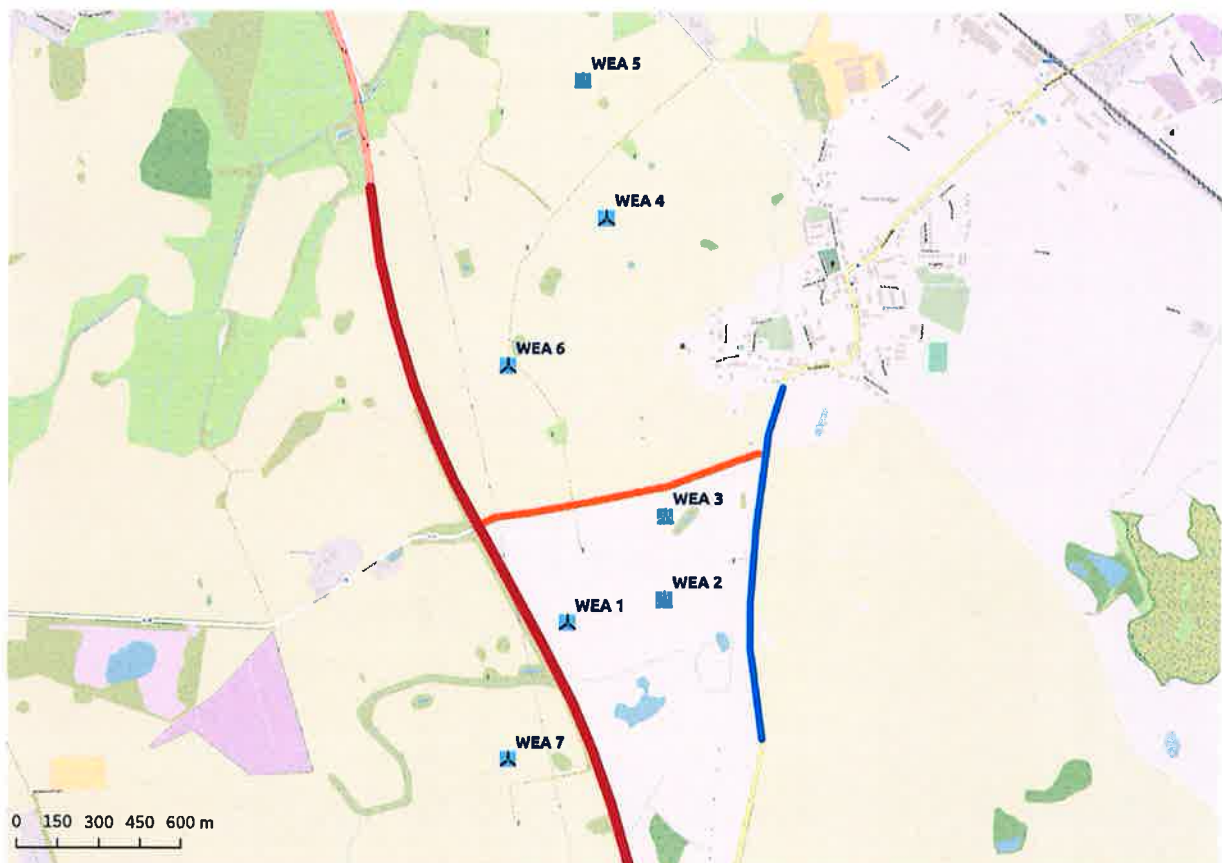


Abbildung 3.1.1: Betrachtete Schutzobjekte (B96: rot, L30: blau, K16: orange) in der Umgebung der WEA 1 - 7 am Standort Miltzow (Karte /5/).





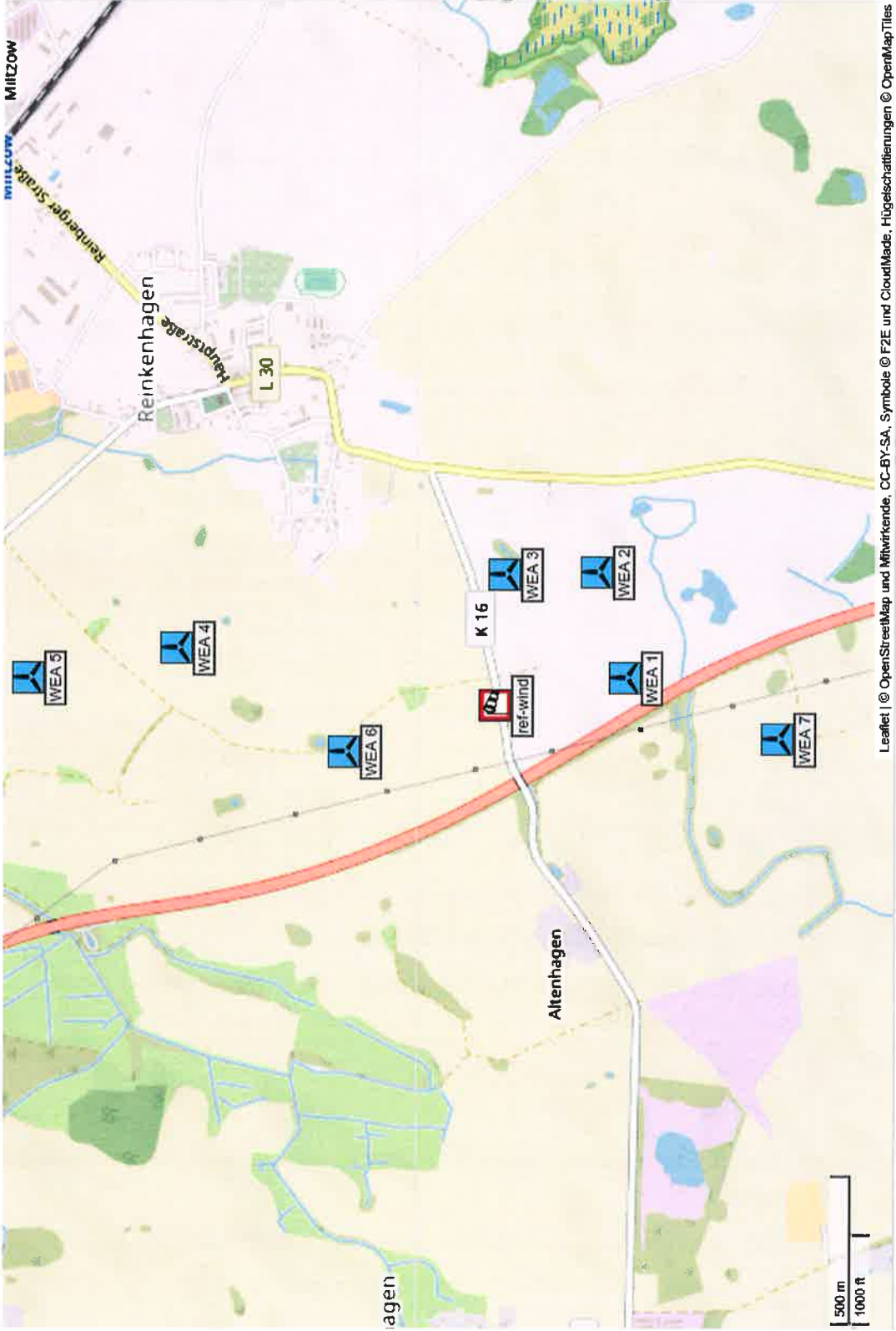
Lfd.Nr. WEA	Bezeichnung	Koordinaten (UTM ETRS89 Zone 33)		Hersteller	WEA-Typ	P _N [MW]	RD [m]	NH [m]
		East	North					
 1	W1	380632	6005318	Vestas	V112	3.3	112.0	140.0
 2	W2	380985	6005403	Vestas	V112	3.3	112.0	119.0
 3	W3	380987	6005709	Vestas	V112	3.3	112.0	119.0
 4	W5	380769	6006803	Vestas	V112	3.3	112.0	119.0
 5	W6	380681	6007305	Vestas	V112	3.3	112.0	119.0
 6	W10	380408	6006259	Vestas	V112	3.3	112.0	119.0
 7	W7.2	380415	6004816	Vestas	V136	4.2	136.0	166.0

Table 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.





Die WEA 1 - 7 liegen in unmittelbarer Nähe zu den Schutzobjekten. Folgende Abstände wurden für die betreffenden WEA ermittelt:






	Lfd.Nr. WEA	Bezeichnung	Schutzobjekt	Abstand [m]
	1	W1	Bundesstraße B96	~110
			Landesstraße L30	~670
			Kreisstraße K16	~420
	2	W2	Bundesstraße B96	~455
			Landesstraße L30	~315
			Kreisstraße K16	~405
	3	W3	Bundesstraße B96	~630
			Landesstraße L30	~335
			Kreisstraße K16	~105
	4	W5	Bundesstraße B96	~845
			Landesstraße L30	~890
			Kreisstraße K16	~1005
	5	W6	Bundesstraße B96	~820
			Landesstraße L30	~1345
			Kreisstraße K16	~1505
	6	W10	Bundesstraße B96	~345
			Landesstraße L30	~990
			Kreisstraße K16	~545
	7	W7.2	Bundesstraße B96	~295
			Landesstraße L30	~900
			Kreisstraße K16	~840

Tabelle 3.1.2: Abstände zu den Schutzobjekten.

Aus dem Vergleich mit den Wurfweiten entsprechend Tabelle 2.1 ergibt sich für die zu betrachtenden WEA:

- Eine Gefährdung durch Verlust der Gondel bzw. des Rotors ist nicht zu unterstellen.
- Eine Gefährdung durch ein Versagen des Turmes ist für die WEA 1 und 3 zu unterstellen.
- Eine Gefährdung durch Abwurf eines ganzen Rotorblattes ist für die WEA 1



und 3 zu unterstellen. Da die Wurfweiten für Blattbruchstücke deutlich größer sein können, ist eine Gefährdung durch Blattbruch auch für größere Bruchstücke für alle betrachteten WEA zu unterstellen.

3.2 Winddaten am Standort

Die relativen Häufigkeiten der Windrichtung und Windgeschwindigkeiten am Standort wurden /6/ entnommen und sind in Tabelle 3.2.1 dargestellt.

Die vorliegenden Daten werden als richtig und repräsentativ für die freie Anströmung auf Nabenhöhe der WEA am Standort Miltzow vorausgesetzt.

Höhe über Grund		N	NNO	ONO	O	OSO	SSO	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW	Ges.
119m	A	7.2	7.6	7.6	8.0	7.7	7.8	8.9	9.0	9.0	9.2	8.6	7.5	8.4
	k	2.24	2.16	2.82	2.73	2.62	2.81	2.77	2.48	2.57	2.23	2.14	2.31	2.39
	f	0.040	0.039	0.061	0.086	0.080	0.058	0.072	0.115	0.159	0.146	0.094	0.049	0.999
140m	A	7.6	7.9	7.9	8.4	8.0	8.2	9.4	9.5	9.6	9.5	9.0	7.8	8.9
	k	2.22	2.14	2.79	2.70	2.59	2.79	2.74	2.46	2.54	2.21	2.12	2.29	2.37
	f	0.040	0.039	0.061	0.086	0.080	0.058	0.072	0.115	0.159	0.146	0.094	0.049	0.999
150m	A	7.7	8.1	8.1	8.6	8.2	8.4	9.5	9.7	9.8	9.7	9.1	8.0	9.0
	k	2.21	2.13	2.78	2.69	2.58	2.78	2.73	2.44	2.54	2.21	2.11	2.28	2.36
	f	0.040	0.039	0.061	0.086	0.080	0.058	0.072	0.115	0.159	0.146	0.094	0.049	0.999
Bezugswerte														
Koordinaten des Referenzpunktes (UTM ETRS89 Zone 33)									East			North		
									380550			6005750		

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

In der Berechnung werden die Winddaten auf 119m Höhe den WEA 2 - 6 zugeordnet, die Winddaten auf 140m der WEA 1 und die Winddaten auf 150m der WEA 7.

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

Nach /13/ wurde am Zählpunkt auf der Bundesstraße B96 zwischen Wilmshagen und Brandshagen eine Verkehrsbelastung von 11623 Kfz pro Tag ermittelt.

Nach /14/ wurde am Zählpunkt auf der Landesstraße L30 zwischen Wilmshagen und Reinberg eine Verkehrsbelastung von 2086 Kfz pro Tag ermittelt.

Im Folgenden wird von einem Verkehrsaufkommen von 12000 Kfz pro Tag auf der B96 und von 2200 Kfz pro Tag auf der L30 ausgegangen. Auf Grund von Straßenbeschaffenheit und -verlauf wird davon ausgegangen, dass die mittlere Fahrzeug-Geschwindigkeit bei 100 Kilometern pro Stunde liegt.

Auf der K16 zwischen Reinkenhausen und Hildebrandshagen existiert kein Zählpunkt. Es wird eine Verkehrsbelastung von 1000 Kfz pro Tag angenommen.

Auf Grund von Straßenbeschaffenheit und -verlauf wird davon ausgegangen, dass die mittlere Fahrzeug-Geschwindigkeit im Bereich der K16 zwischen 70 und 80 Kilometern pro Stunde liegt.

3.4 Standortsspezifische Grenzwerte für das kollektive Risiko

Für Bundesautobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen, wurden die Grenzwerte auf Basis des vorhandenen Unfallrisikos bestimmt (siehe Kapitel 2.1.2). Tabelle 3.4.1 listet die ermittelten oberen Grenzwerte für ein inakzeptables Risiko. Die weiteren Risikobereiche gemäß Tabelle 2.1.3.1 liegen jeweils eine Zehnerpotenz niedriger und sind nicht extra aufgeführt.

Tabelle 3.4.1: Spezifische obere Risikogrenzwerte für das kollektive Risiko.

Schutzobjekt	Kollektives Personenrisiko Grenzwert für ein inakzeptables Risiko
Bundesstraße B96	$> 1.05 \cdot 10^{-2}$ (einmal in 95 Jahren)
Landesstraße L30	$> 2.73 \cdot 10^{-3}$ (einmal in 366 Jahren)

Für Kreisstraßen und sonstige Straßen, für die das kollektive Risiko maßgeblich ist, gilt der pauschale Grenzwert für das kollektive Personenrisiko von $1.0 \cdot 10^{-3}$ (siehe Kapitel 2.1.2).



4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Abriss Blatt

Entsprechend den Ergebnissen in Kapitel 3.1 wird im Folgenden eine Gefährdung durch Abriss größerer Blattfragmente sowie zusätzlich des ganzen Blattes unterstellt.

4.1.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten

4.1.1.1 Auftreffhäufigkeiten pro Ereignis

Für die Berechnung der Flugbahnen der Blattbruchstücke wird basierend auf den Luftwiderstandsbeiwerten, der Geometrie und der Masse der Blattbruchstücke die Lage des Blattbruchstückes während der gesamten Bewegung erfasst und verfolgt, so dass sich im Vergleich zu einer rein ballistischen Flugbahn ein realistischeres Bild der Flugweiten ergibt und auch solche Flugbahnen erfasst werden, bei denen im Einzelfall aufgrund von Auftriebskräften am Blattbruchstück sehr hohe Flugweiten erreicht werden. In Abbildung 4.1.1.1 ist eine beispielhafte Flugbahn visualisiert.

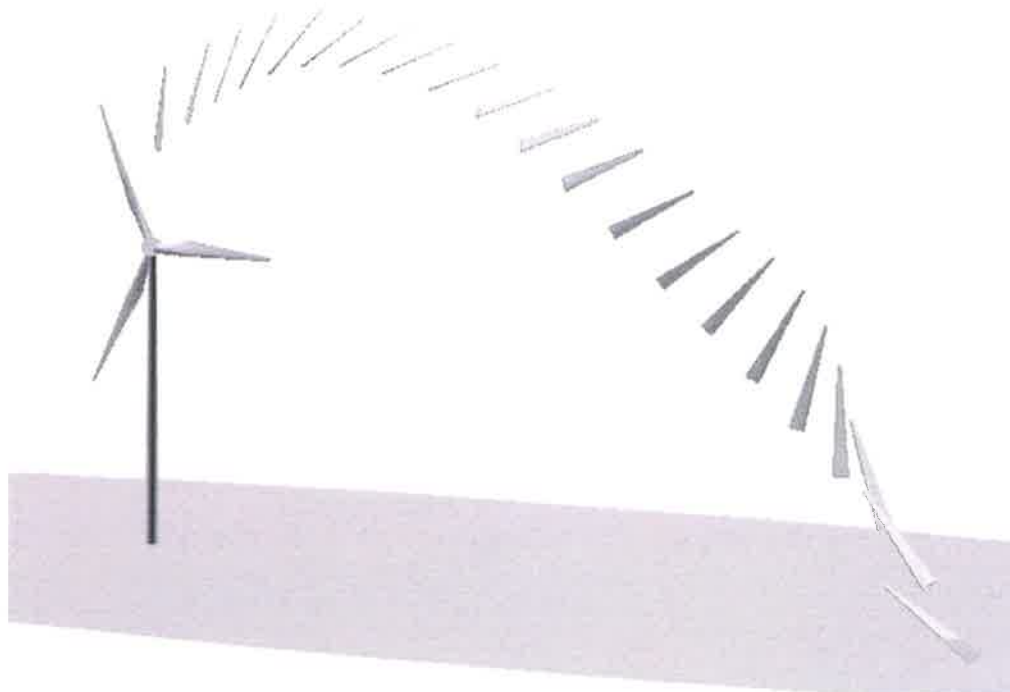


Abbildung 4.1.1.1: Beispielhafte Flugbahn eines Blattbruchstückes /3/.

Für die Berechnung werden für die Leistungsklasse der WEA repräsentative Daten zu Blattmassenverteilung, Geometrie, aerodynamischen Beiwerten (Auftrieb-, Schub- und Momentenbeiwerte an verschiedenen Blattschnitten) sowie Pitch- und Dreh-



zahlverlauf unterstellt. Der Bruch wird in allen Fällen als glatter, plötzlicher Abriss modelliert, der während des Bruchvorgangs keine Energie verbraucht.

Im Unterschied zu /1/, wo stets der Abriss des ganzen Blattes unterstellt wird, werden auch größere Blattbruchstücke betrachtet, die tendenziell zu größeren Flugweiten und damit zu einer konservativen Betrachtungsweise führen.

In der Summe wurden ca. 5.5 Millionen Flugbahnen ausgewertet.

Folgende Randbedingungen wurden bei der Berechnung zugrunde gelegt:

- Abrisspunkte:
 - ganzes Blatt (50% der Ereignisse),
 - Bruchstücke von 90%, 70%, 50% und 30% der Blattlänge (jeweils 12.5% der Ereignisse).
- Windgeschwindigkeitsverteilung entsprechend Tabelle 3.2.1.
- Windrichtung in 1° Grad-Schritten gewichtet mit der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen entsprechend Tabelle 3.2.1.
- Rotorblattstellung zum Zeitpunkt des Abrisses: gleichverteilt in 2°-Schritten.
- Drehzahl der WEA: Abhängig von der Windgeschwindigkeit entsprechend Kennlinie der WEA (Überdrehzahl wird vernachlässigt, da dies als Ursache für Blattbruch vernachlässigbar ist /1/).
- Geländehöhe: für das Geländemodell in der Umgebung der WEA werden Daten aus /12/ berücksichtigt.

Tabelle 4.1.1.1 listet die maximal erreichte Flugweite der Bruchstücke bezogen auf den Fußpunkt der WEA auf.

Lfd. Nr. WEA	Maximale Flugweite [m]
1	319.7
2	314.0
3	310.8
4	307.1
5	311.2
6	309.2
7	353.2

Tabelle 4.1.1.1: Maximale Flugweite der betrachteten Blattbruchstücke am Standort Miltzow.



4.1.1.2 Ermittlung der Gefährdungsbereiche

Aus den Berechnungen ergeben sich folgende WEA, die zum Risiko im Gefährdungsbereich der zu betrachtenden WEA beitragen:

Tabelle 4.1.1.2: Für das Gesamtrisiko der zu betrachtenden WEA zu berücksichtigende WEA am Standort Miltzow.

Zu betrachtende WEA	Beiträge benachbarter WEA
WEA 1	WEA 7
WEA 2	---
WEA 3	---
WEA 4	---
WEA 5	---
WEA 6	---
WEA 7	WEA 1

4.1.1.3 Gesamthäufigkeit

Für die Ermittlung der Gesamthäufigkeit, dass ein Blattbruchstück auf einer Fläche von einem Quadratmeter in der Umgebung einschlägt, ist die Eintrittswahrscheinlichkeit von $8.4 \cdot 10^{-4}$ für einen Blattbruch pro WEA und pro Jahr nach Tabelle 2.1 mit in Betracht zu ziehen.

In der Abbildung 4.1.1.2 sind die daraus für die Umgebung der WEA 1 - 7 resultierenden Auftreffhäufigkeiten pro Rasterfläche (25m²) und Jahr dargestellt. Erkennbar sind die größeren Auftreffhäufigkeiten quer zur Hauptwindrichtung.

Von den WEA 2 und 4 - 6 kommt es zu keinen Treffern auf die Schutzobjekte.

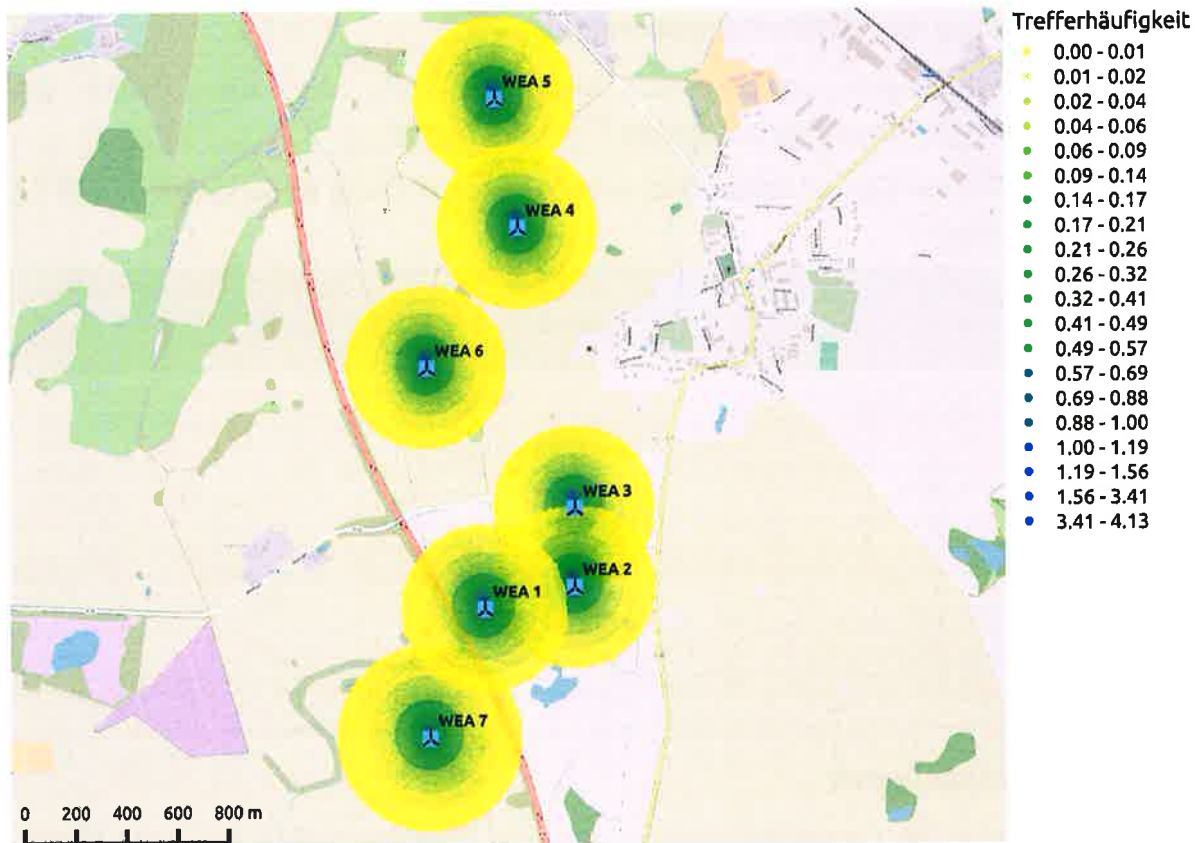


Abbildung 4.1.1.2: Auftreffhäufigkeiten von Blattbruchstücken pro Rasterfläche (25m²) in einer Millionen Jahren in der Umgebung der WEA 1 - 7 am Standort Miltzow (Karte 15/).

Die sich in der Summe für die Gefährdungsbereiche der zu betrachtenden WEA ergebenden Häufigkeiten sind in Tabelle 4.1.1.3 dargestellt.

Lfd.Nr. WEA	Schutzobjekt	Auftreffhäufigkeit eines Blattbruchstückes pro Jahr
1	Bundesstraße B96	3.16*10 ⁻⁵
3	Kreisstraße K16	3.92*10 ⁻⁵
7	Bundesstraße B96	2.62*10 ⁻⁶

Tabelle 4.1.1.3: Auftreffhäufigkeiten von Blattbruchstücken für die Gefährdungsbereiche am Standort Miltzow.

4.2 Turmversagen

Der Abstand zu den Schutzobjekten liegt für die WEA 1 und 3 unterhalb des in Tabelle 2.1 genannten maximalen Einflussbereiches für den Fall Turmversagen. Eine Gefährdung der Schutzobjekte infolge Turmversagen ist daher für diese WEA zu unterstellen.



4.2.1 Berechnung der Auftreffhäufigkeiten

Ermüdungsschäden an Türmen sind eine Seltenheit. Es kann angenommen werden, dass das Versagen eines Turmes aufgrund von Ermüdung durch die Bauüberwachung und wiederkehrenden Prüfungen weitestgehend ausgeschlossen werden kann /4/. Eine Gefährdung durch Turmversagen wird daher unterstellt, wenn es bei extremer Belastung (Sturm) aufgrund von Konstruktions- oder Planungsfehlern zu einem Versagen des Turmes bzw. des Fundamentes kommt.

Aus den Abmaßen der WEA und der Lage der Schutzobjekte ergibt sich die Windrichtung aus denen die Starkwindlagen unterstellt werden müssen. Aus den Winddaten in Tabelle 3.2.1 werden anschließend die relativen Häufigkeiten für Starkwind mit einem 10-Minuten-Mittelwert von mehr als 16m/s auf Nabenhöhe für die jeweils zu betrachtenden Windrichtungen bestimmt. In Verbindung mit der Versagenshäufigkeit aus Tabelle 2.1 ergeben sich in der Summe für die Schutzobjekte die in Tabelle 4.2.1.1 dargestellten Häufigkeiten.

Lfd.Nr. WEA	Schutzobjekt	Auftreffhäufigkeit infolge Turmversagens pro Jahr
1	Bundesstraße B96	$6.31 \cdot 10^{-6}$
3	Kreisstraße K16	$2.24 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 4.2.1.1: Auftreffhäufigkeiten infolge Turmversagen für die Gefährdungsbereiche am Standort Miltzow.

4.3 Verlust der Gondel bzw. des Rotors

Der Abstand der Schutzobjekte liegt oberhalb des in Tabelle 2.1 genannten maximalen Einflussbereiches für einen Verlust der Gondel bzw. des Rotors. Eine Gefährdung der Schutzobjekte durch einen Verlust der Gondel bzw. des Rotors wird daher ausgeschlossen.

4.4 Schadenshäufigkeiten

Es wird das individuelle Risiko ermittelt, entweder direkt getroffen zu werden oder einen Einschlag in unmittelbarer Nähe zu erfahren, d. h. das unmittelbare Risiko im Moment des Aufpralls. Dabei wird davon ausgegangen, dass es bei jedem der betrachteten Versagensszenarien zu einem Schadensfall kommt. 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/. In die wirksame Trefferfläche des Kfz und der betrachteten Bruchstücke wird jeweils der Anhalteweg des Fahrzeugs eingerechnet.



Dies berücksichtigt, dass auch das Auftreffen im Nahbereich des Kfz zu einer Kollision führen kann bzw. dass eine Fehlreaktion beim Fahrer ausgelöst wird, in deren Folge es zu einem Unfall kommt. Dabei steigt das Risiko überproportional mit der Fahrgeschwindigkeit. Eine infolge eines Treffers durch Trümmer resultierende Verkettung von Unfällen wurde nicht betrachtet.

Mit den genannten Ausführungen ergeben sich für die Schutzobjekte die in Tabelle 4.4.1 aufgelisteten Unfallhäufigkeiten bzw. Risiken. Das in Abhängigkeit von der Aufenthaltshäufigkeit von Personen zu betrachtende Risiko ist in Tabelle 4.4.1 jeweils fett gedruckt.





	Lfd.Nr. WEA	Schutz- objekt	Häufigkeit von Schäden pro Jahr	
			Kollektives Personenrisiko	Individuelles Personenrisiko
Risiken pro WEA:				
	1	Bundesstraße B96	$2.62 \cdot 10^{-5}$ (einmal in 38 000 Jahren)	$2.91 \cdot 10^{-9}$ (einmal in 343 Mio. Jahren)
	3	Kreisstraße K16	$5.43 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 184 000 Jahren)	$7.24 \cdot 10^{-9}$ (einmal in 138 Mio. Jahren)
	7	Bundesstraße B96	$1.59 \cdot 10^{-6}$ (einmal in 628 000 Jahren)	$1.77 \cdot 10^{-10}$ (einmal in 5.6 Mrd. Jahren)
Addierte Risiken:				
	1, 7	Bundesstraße B96	$2.78 \cdot 10^{-5}$ (einmal in 36 000 Jahren)	$3.09 \cdot 10^{-9}$ (einmal in 324 Mio. Jahren)

Tabelle 4.4.1: Kollektive und individuelle Risiken für Personenschäden am Standort Miltzow durch Blattbruch und Turmversagen.

4.5 Bewertung des Risikos

Unter der konservativen Annahme, dass alle hier betrachteten Personenschäden zum Tode führen, liegen die in Tabelle 4.4.1 ermittelten Risiken sämtlich im uneingeschränkt akzeptablen Risikobereich gemäß Tabelle 2.1.3.1. Weitere Maßnahmen zur Senkung der Risiken sind daher nicht erforderlich.



5 Zusammenfassung

Die Fluid & Energy Engineering GmbH & Co. KG ist beauftragt worden, die vorliegende Windparkkonfiguration hinsichtlich einer Gefährdung durch Rotorblattbruch, Turmversagen und Verlust der Gondel bzw. des Rotors zu betrachten und zu bewerten.

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

Als Schutzobjekte wurde die in der Nähe verlaufende Bundesstraße B96, die Landesstraße L30 und die Kreisstraße K16 definiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bundesstraße B96 und die Kreisstraße K16 durch Blattbruchstücke von den WEA 1, 3 und 7 und im Falle eines Turmversagens durch die umstürzende WEA 1 und 3 getroffen werden können.

Die abschließende Bewertung des Risikos durch Bauteilversagen ist in Tabelle 5.1 für alle WEA bezüglich der relevanten Schutzobjekte dargestellt.

Maßnahmen, die in den Berechnungen berücksichtigt wurden und entsprechend für die getroffene Aussage unabdingbar sind, werden in der Spalte „Maßnahmen - erforderlich“ aufgeführt.

Maßnahmen, die im Einzelfall umgesetzt werden sollten, weil das Risiko im oberen ALARP-Bereich (siehe Kapitel 2.1) liegt, werden in der Spalte „Maßnahmen - empfohlen“ aufgeführt.

Lfd. Nr. WEA	Schutzobjekt	Risiko- bewertung	Maßnahmen	
			erforderlich	empfohlen
1	Bundesstraße B96	akzeptabel	---	---
3	Kreisstraße K16	akzeptabel	---	---
7	Bundesstraße B96	akzeptabel	---	---

Tabelle 5.1: Bewertung des Risikos durch Bauteilversagen.

Ergänzend ist anzumerken, dass aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren die Ergebnisse nur die Größenordnung der betrachteten Häufigkeiten wiedergeben können. Die gewählten Randbedingungen und getroffenen Annahmen wurden jedoch stets so gewählt, dass konservativ abdeckende Werte ermittelt wurden.



6 Formelzeichen und Abkürzungen

WEA	Windenergieanlage	
RD	Rotordurchmesser	
NH	Nabenhöhe	
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989	
UTM	Universale Transversale Mercator Projektion	
MEM	Minimale endogen Sterblichkeit	
Kfz	Kraftfahrzeug	
Pkw	Personenkraftwagen	
A	Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung	[m/s]
k	Formparameter der Weibullverteilung	[-]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]
h	Höhe	[m]

7 Literaturangaben

- /1/ C. J. Faasen, P. A. L. Franck, A. M. H. W. Taris; Handboek Risicozonering Windturbines, Eindversie, 3^e geactualiseerde versie mei 2013, en Herziene versie 3.1 september 2014; Nederland .
- /2/ DIN EN 50126; Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS); Deutsches Institut für Normung e.V., März 2000.
- /3/ T. Hahm, J. Kröning; Rotorblattversagen – Gefährdungsanalyse für die Umgebung von Windenergieanlagen; 6. Deutsche Windenergie-Konferenz DEWEK 2002.
- /4/ J. Kesenheimer; Grundlagenforschung zur Restnutzungsdauer von Windenergieanlagen; Technische Universität Hamburg-Harburg, April 2003.
- /5/ OpenStreetMap und Mitwirkende; siehe Internet: <http://www.openstreetmap.org>, <http://opendatacommons.org>, <http://creativecommons.org>.
- /6/ WIND-consult GmbH; Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen von Windenergieanlagen an einem Standort und die Bestimmung der Standortgüte, Standort: Miltzow (Mecklenburg-Vorpommern), Prüfbericht WICO 204WG717/01; 04.08.2017; Bargeshagen, Deutschland.
- /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/ International Energy Agency (IEA), IEA Wind TCP Task 19; International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments; October 2018.



- /10/ HSE, Health and safety Executive. (n.d.); Risk analyses or 'predictive' aspects of comah safety reports guidance for explosives sites - The COMAH Safety Report Process for Predictive Assessment of Explosives Sites, downloaded 2014-08-21; Retrieved from <http://www.hse.gov.uk/comah/>
- /11/ Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Verkehrstechnik Heft V 291, Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko; Bergisch Gladbach, August 2017.
- /12/ Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2006, Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- /13/ Bundesanstalt für Straßenwesen; Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesfernstraßen, Aktuelle Ergebnisse 2018; siehe Internet: https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/Fachthemen_node.html, abgerufen am 11. Dezember 2019.
- /14/ Landesamt für Straßenbau und Verkehr Mecklenburg-Vorpommern; Verkehrsmengenkarte Mecklenburg-Vorpommern 2015.

