

# **GUTACHTEN ZUR GESAMTTURBULENZ UND STANDORTEIGNUNG GEM. DIBT 2012**

für den Standort

**D - 46325 BORKEN-MARBECK**

**FÜR GEPLANTE WEA**

**TYP ENERCON E-138/EP3-E2 MIT 160,0 M NABENHÖHE**

**TYP ENERCON E-138/EP3-E3 MIT 160,0 M NABENHÖHE**

**TYP ENERCON E-160/EP5-E3 MIT 166,6 M NABENHÖHE**

**AUFTRAGGEBER:** Windkraft Stadtlohn GmbH & Co.  
Marbecker Betriebs KG  
Timpenweide 2  
D- 48703 Stadtlohn

**AUFTRAGNEHMER:** Ingenieurbüro PLANKon  
Dipl. Ing. Roman Wagner vom Berg  
Blumenstr. 26  
26121 Oldenburg  
Tel.: 0441-390340

**BERICHTSNUMMER:** PK 2021041-GTG

**DATUM:** 22.03.2023



---

## Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung	3
1	Standortbeschreibung und Anlagenkonfiguration	4
2	Turbulenzintensität der Umgebung und Windverteilungen	6
3	Nachweiserfordernis und Nachweis des 50-Jahres Windes in Nabenhöhe	9
4	Nachweis der Topografischen Komplexität	10
5	Typenstatik und Eignung des Standortes gemäß DIBt /2/	12
6	Turbulenzannahmen gemäß DIBt /1/, /2/, /3/	13
7	Methodik zur Ermittlung Gesamtturbulenz für jeden WEA Standort	14
8	Ermittlung Gesamtturbulenz $i_{\text{eff}}$ - für jeden WEA Standort	16
9	Ermittlung Gesamtturbulenz $i_{\text{eff}}$ – Sonderbetrachtung vorh. WEA 07	18
10	Abweichungen von der Akkreditierung	19
11	Schlussbetrachtung	20
12	Literaturhinweise	22
13	Anlagen zum Gutachten der Gesamtturbulenz am Standort Borken-Marbeck	22

---

## 0 Einleitung

In der vorliegenden Berechnung wird der Standort Borken-Marbeck hinsichtlich der Gesamtturbulenz, entspricht  $I_{\text{eff}}$  gemäß /1/ und/oder /2/, unter Berücksichtigung der Nachstromturbulenz benachbarter WEA und der sektoriellen Turbulenzintensität der natürlichen Umgebung am Standort untersucht.

Auf der Leeseite von Windenergieanlagen bilden sich in der sogenannten Nachstromblase (engl.: wake) infolge von Windverwirbelungen Turbulenzen. Ein mit den Turbulenzen verbundener Über- und Unterdruck ist als Belang der Standsicherheit im Sinne der Bauordnung und als Umwelteinwirkung im Sinne des § 3 Abs. 2 BImSchG zu beurteilen. Die Turbulenzen können im Nachstrom einer WEA je nach Abstand auch auf andere Windenergieanlagen einwirken. Dies kann zu Ermüdungserscheinungen des Materials mit Folgen für die Lebensdauer der Anlagen führen. Beträgt der Abstand zwischen WEA weniger als das Fünffache des Rotordurchmessers der beantragten Anlage, kann durch ein standortbezogenes Gutachten nachgewiesen werden, dass der Abstand sicherheitstechnisch keine nachteiligen Folgen für die in Lee befindlichen Anlage(n) haben kann.

Unter Verwendung der Software „WindPRO“ (Vers. 3.1) von EMD wird unter Eingabe des Turbulenzwertes je Sektor die Gesamtturbulenz für jeden WEA-Standort unter Berücksichtigung der Beeinflussung durch benachbarte WEA gemäß der entsprechenden DIBt-Richtlinien /1/, /2/, /3/ für Windkraftanlagen ermittelt.

Die hier vorgenommene Begutachtung erfolgt gemäß der Prozessbeschreibung zur Erstellung eines Turbulenzgutachtens der Gesamtturbulenz nach DIBt-Richtlinie /1/, /2/ und /3/ laut Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-PL-11014-01-00.

Die Umgebungsturbulenz wurde durch ein vorgeschaltetes Gutachten /8/ durch die Fa. PLANKon bestimmt. Die Details zur Ermittlung der Umgebungsturbulenz sind diesem Gutachten zu entnehmen.

In diesem Gutachten werden ebenso die gemäß /2/ notwendigen Parameter der Standorteignung untersucht und mit den Vorgaben gemäß /2/ und der Typenstatik verglichen.

## 1 Standortbeschreibung und Anlagenkonfiguration

Der Standort befindet sich im westlichen Münsterland, ca. 2,7 km südlich des Dorfes Marbeck, Ortsteil der Stadt Borken im gleichnamigen Kreis (NRW). Direkt am Standort werden bereits zehn WEA betrieben, von denen drei für ein sogenanntes Repowering phasenweise zurückgebaut werden. Hier plant der Auftraggeber eine WEA des Typs Enercon E-138/EP3/E2 mit 160,0 m Nabenhöhe, 138,0 m Rotordurchmesser und 4,2 MW Nennleistung, eine Enercon E-138/EP3/E3 mit 160,0 m Nabenhöhe, 138,0 m Rotordurchmesser und 4,26 MW Nennleistung und drei Enercon E-160/EP5/E3 mit 166,6 m Nabenhöhe, 160,0m Rotordurchmesser und 5,56 MW Nennleistung je WEA. Zudem wird eine genehmigte WEA als Fremdplanung berücksichtigt.

Die geplanten und vorhandenen WEA können der nachstehenden Tabelle entnommen werden:

Anzahl	Typ	Nabenhöhe [m]	Rotor- durchmesser [m]	Nennleistung [kW]	Status
1	Enercon E-138/EP3/E2	160,0	138,0	4.200	geplant
1	Enercon E-138/EP3/E3	160,0	138,0	4.260	geplant
3	Enercon E-160/EP5/E3	166,6	160,0	5.560	geplant
1	Enercon E-138/EP3/E2	160,0	138,0	4.200	genehm. Fremdplanung
3	Enercon E-115/3 MW	149,0	115,0	3.050	vorhanden
4	GE 1.5sl	96,0	77,0	1.500	vorhanden
1	GE 1.5sl	96,0	77,0	1.500	Rückbau
1	Enercon E-48	75,0	48,0	800	Rückbau
1	Enercon E-48	75,0	48,0	800	späterer Rückbau

Der folgenden Tabelle können die Koordinaten (*System: UTM ETRS89, Zone 32*) der berücksichtigten WEA, sowie die nächste benachbarte WEA mit Entfernung entnommen werden:

WEA Nr.	Typ	Rechtswert	Hochwert	naheste WEA	Entfernung	Entfernung
		m	m		m	Durchmesser
WEA-1	E-138/EP3-E2	355.458	5.739.382	WEA-3	531	3,3-3,8
WEA-2	E-138/EP3-E3	355.989	5.739.575	WEA-1	565	4,1
WEA-3	E-160/EP5-E3	355.375	5.739.906	WEA-4	459	2,9
WEA-4	E-160/EP5-E3	355.253	5.740.349	WEA-3	459	2,9
WEA-5	E-160/EP5-E3	356.436	5.741.057	WEA-4	1.379	8,6
WEA 01	E-138/EP3-E2	356.822	5.739.365	WEA 02	277	2,0-3,6
WEA 02	GE 1.5sl	356.860	5.739.091	WEA 01	277	2,0-3,6
WEA 03	GE 1.5sl	357.341	5.739.777	WEA 08	183	1,6-2,4
WEA 04	GE 1.5sl	357.366	5.739.516	WEA 03	262	3,4
WEA 05	GE 1.5sl	357.349	5.739.241	WEA 04	276	3,6
<b>WEA 07</b>	<b>E-48</b>	<b>355.944</b>	<b>5.739.419</b>	<b>WEA-1</b>	<b>487</b>	<b>3.1-10,5</b>
WEA 08	E-115/3.0 MW	357.350	5.739.960	WEA 03	183	1,6-2,4
WEA 09	E-115/3.0 MW	357.170	5.738.925	WEA 02	352	3,0-4,6
WEA 10	E-115/3.0 MW	357.111	5.738.363	WEA 09	565	4,9

Die WEA mit der Bezeichnung *WEA 07* (Typ Enercon E-48) soll bis zum Bau und bis vor Inbetriebnahme der geplanten WEA-2 weiterbetrieben werden. Für diesen Fall wurde eine Sonderbetrachtung durchgeführt und in Kapitel 9 dokumentiert.

Die WEA mit den Bezeichnungen WEA 03 – 05 (Typ GE 1.5sl) und WEA 08 – 10, (Typ Enercon E-115/3.0 MW) sind gemäß DIBT /1/ und /2/ nicht von der aktuellen Planung betroffen. Auf diese WEA wird in der weiteren Untersuchung nicht mehr eingegangen. Sie sind deshalb auch nicht bei den Untersuchungsergebnissen aufgeführt.

Die Entfernungen in Durchmesser variieren z.T. wenn die Abstände ausgehend von der WEA mit dem größeren oder dem kleineren Rotor gesehen werden.

Die Aufstellung der WEA zueinander können auch dem Lageplan im Anhang entnommen werden. Die Koordinaten der WEA wurden durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellt und werden als richtig vorausgesetzt.

Die Standortbeschreibung der Umgebung ist dem Turbulenzgutachten /8/ zu entnehmen. Im Rahmen der Erstellung des Wind- und Ertragsgutachtens /7/ zum Standort wurde am 17.01.2023 von Herrn Dipl.-Ing. Roman Wagner vom Berg eine Ortsbegehung durchgeführt. Es wurden Rundumaufnahmen des Standortes und der näheren Umgebung erstellt sowie Hindernisse im Umkreis von 1.000 m kartiert und bewertet. Diese Parameter wurden in den Berechnungen berücksichtigt.

## 2 Turbulenzintensität der Umgebung und Windverteilungen

Die Turbulenzintensität  $T_u$  wird zur Beschreibung des turbulenten Anteils der Luftströmung bestimmt. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Standardabweichung  $S_u$  der turbulenten Fluktuationen des Windes zum Mittelwert  $V_m$  der Windgeschwindigkeit. Die genaue Angabe einer Turbulenzintensität lässt sich nur durch Windmessungen am Standort selbst ermitteln. Sie hängt stark von den Umgebungsbedingungen wie Oberflächenrauigkeit, Höhenprofil, Hindernisse und Höhe über Grund ab. Im vorliegenden Gutachten zur Turbulenzintensität /8/ wurden die Turbulenzintensitäten der Umgebung bei 15,0 m/s in Nabenhöhe wie folgt bestimmt:

### Turbulenzintensitäten in 160,0 m Nabenhöhe (NH)

Sektor	Berechnungshöhe	Umgebungsturbulenz	repräsentative Umgebungsturbulenz	Häufigkeit
	[m]	[%]	[%]	[%]
N	160,0	10,9	13,7	4,2
NNO	160,0	11,0	13,8	4,7
ONO	160,0	10,9	13,7	6,4
O	160,0	11,1	13,9	7,8
OSO	160,0	11,4	14,3	4,9
SSO	160,0	11,3	14,2	5,0
S	160,0	11,2	14,1	9,1
SSW	160,0	10,8	13,6	15,9
WSW	160,0	10,8	13,6	17,9
W	160,0	10,4	13,0	11,4
WNW	160,0	10,4	13,1	7,3
NNW	160,0	11,1	13,9	5,4
<b>Mittel/Summe</b>		10,9	13,7	<b>100,0</b>

### Turbulenzintensitäten in 166,6 m Nabenhöhe (NH)

Sektor	Berechnungshöhe	Umgebungsturbulenz	repräsentative Umgebungsturbulenz	Häufigkeit
	[m]	[%]	[%]	[%]
N	166,6	10,6	13,3	4,2
NNO	166,6	10,6	13,4	4,7
ONO	166,6	10,6	13,3	6,4
O	166,6	10,8	13,5	7,8
OSO	166,6	11,1	13,9	4,9
SSO	166,6	11,0	13,8	5,0
S	166,6	10,9	13,7	9,1
SSW	166,6	10,5	13,2	15,8
WSW	166,6	10,5	13,2	17,9
W	166,6	10,1	12,6	11,4
WNW	166,6	10,1	12,7	7,3
NNW	166,6	10,8	13,5	5,4
<b>Mittel/Summe</b>		10,5	13,2	<b>100,0</b>

Zur Bestimmung der Turbulenzintensität wird die ermittelte Umgebungsturbulenzintensität infolge möglicher Unsicherheiten und zur Berücksichtigung der bei Messungen ermittelbaren Standardabweichungen um den Ansatz  $I_{\sigma} = 20 \%$  erhöht. Für die Berechnung der repräsentativen Turbulenz wurde die Umgebungsturbulenz um die 1,28-fache Standardabweichung  $I_{\sigma}$  (Ansatz  $I_{\sigma} = 20 \%$ ) erhöht. Hiermit wird die Forderung des Ansatzes der 1,28-fachen Standardabweichung der Turbulenzintensität nach /2/ erfüllt.

Die Jahresmittelwindgeschwindigkeit an diesem Standort beträgt gem. Gutachten PLANKon /7/ 7,05 m/s in 160,0 m und 7,14 m/s in 166,6 m Höhe.

Der Standort liegt gem. DIN 1055, *Lastannahmen*, und DIN 4133, *Schornsteine aus Stahl*, in der Windzone 2.

Die Hauptwindrichtungen gem. den Ergebnissen der durchgeführten Windfeldanalyse für den untersuchten Standort sind Westsüdwest und Südsüdwest. Es sind die Windrichtungen mit dem größten Windaufkommen an dem Standort.

Die ermittelte Luftdichte  $\rho$  auf den dargestellten Höhen beträgt gemäß /8/ 1,219 kg/m<sup>3</sup> auf 160,0 m NH und 1,218 kg/m<sup>3</sup> auf 166,6 m NH.

Die Windverteilung bzw. Häufigkeitsverteilung stellt sich gem. Gutachten PLANKon /7/ wie folgt dar:

### Windverteilung am Standort in 160,0 m Nabenhöhe (NH)

Sektor	A-Parameter	Wind- geschwindigkeit	k-Parameter	Häufigkeit
	[m/s]	[m/s]		[%]
N	5,77	5,11	2,076	4,2
NNO	6,37	5,64	2,213	4,7
ONO	7,12	6,31	2,482	6,4
O	7,99	7,09	2,518	7,8
OSO	6,78	6,01	2,264	4,9
SSO	6,35	5,62	2,162	5,0
S	8,38	7,45	2,662	9,1
SSW	9,49	8,45	2,771	15,9
WSW	9,09	8,08	2,611	17,9
W	8,01	7,09	2,287	11,4
WNW	7,17	6,35	2,264	7,3
NNW	6,26	5,54	2,307	5,4
Mittel/Summe	7,96	7,05	2,318	<b>100,0</b>

### Windverteilung am Standort in 166,6 m Nabenhöhe (NH)

Sektor	A-Parameter	Wind- geschwindigkeit	k-Parameter	Häufigkeit
	[m/s]	[m/s]		[%]
N	5,84	5,17	2,072	4,2
NNO	6,45	5,71	2,209	4,7
ONO	7,20	6,38	2,475	6,4
O	8,09	7,18	2,514	7,8
OSO	6,86	6,07	2,256	4,9
SSO	6,43	5,70	2,158	5,0
S	8,47	7,53	2,658	9,1
SSW	9,60	8,55	2,768	15,8
WSW	9,20	8,17	2,607	17,9
W	8,10	7,18	2,283	11,4
WNW	7,26	6,43	2,260	7,3
NNW	6,33	5,61	2,303	5,4
Mittel/Summe	8,05	7,14	2,314	<b>100,0</b>



### 3 Nachweiserfordernis und Nachweis des 50-Jahres Windes in

#### Nabenhöhe

Gemäß /2/ ist standortspezifisch zu untersuchen, ob durch lokale Turbulenzerhöhungen infolge der Einflüsse benachbarter Windenergieanlagen oder durch die Standortwindbedingungen die Standorteignung gefährdet wird.

Die auf die Windenergieanlage einwirkenden Lasten wurden in diesem Gutachten den standortspezifisch errechneten gemessenen Werten der Windparameter ermittelt.

Der Einfluss der lokalen Turbulenzerhöhung auf die Standorteignung braucht gemäß /2/ nicht untersucht zu werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$a \geq 8D \quad \text{für} \quad v_{b,0}(h) \leq 40 \text{ m/s} \quad (\text{GL5})$$

$$a \geq 5D \quad \text{für} \quad v_{b,0}(h) \geq 45 \text{ m/s} \quad (\text{GL6})$$

**a:** Abstand zwischen den Turmachsen benachbarter Windenergieanlagen

**D:** der jeweils größere Rotordurchmesser

**$v_{b,0}(h)$ :** maximaler 50-Jahres-Wind in Nabenhöhe als 10 min Mittelwert

Für Zwischenwerte von  $v_{b,0}(h)$  ist  $a$  linear zu interpolieren. Dabei sind die in Deutschland auftretenden Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Geländekategorie bereits berücksichtigt.

**H:** Nabenhöhe

Die zulässigen Abstände werden in der untersuchten Konfiguration z.T. unterschritten und macht eine Untersuchung erforderlich.

Die 50-Jahr-Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe  $v_{b,0}(h)$  muss weiterhin unterhalb des für die in der Zertifizierung angegebenen Windzone liegen. Diese sind bei der hier betrachteten WEA des Typs Enercon E-138/EP3-E2 die Windzone 2 und für die WEA des Typs E-138/EP3-E3 und E-160/EP5-E3 die Windzone S gemäß DIBt 2012. Für alle WEA-Typen gilt eine zulässige 50-Jahr-Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe  $v_{b,0}(h)$  von 37,5 m/s.

Die Berechnung der Werte für den Standort erfolgt über eine 20-jährige Mesoskalen-Datenreihe (WRF/ERA5, Quelle Fa. EMD), die in Ihrem Mittelwert über die errechnete mittlere Windgeschwindigkeit skaliert wurde. Da die ERA5-Datenreihe nur mit

stündlichen Werten vorliegt wurde über eine Gumbel-Verteilung eine Annäherung an einen 10-min-Mittelwert vorgenommen. Gemäß Angabe des Software-Herstellers hat diese Annäherung einen möglichen Fehler von 5-10 %. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Daten der verwendeten Zeitreihe nicht um langjährige Messdaten handelt, sondern um von Reanalysedaten abgeleitete Mesoskalendaten, die auf das Windgeschwindigkeitsniveau der Nabenhöhen am Standort skaliert wurden. Der von der Software berechnete Wert für  $v_{b,0}(h)$  beträgt 29,0 m/s auf 160,0 m NH und 29,4 m/s auf 166,6 m/s. Bei einem Unsicherheitsaufschlag von 20 % für mögliche Berechnungsfehler für die Ableitung von 10-min-Mittelwerten aus 1-h-Mittelwerten ergibt sich ein Wert von 34,8 m/s auf 160,0 m NH und 35,3 m/s auf 166,6 m NH für  $v_{b,0}(h)$ . Diese Werte liegen unter den Auslegungswerten gemäß Typenprüfung der WEA-Klasse für die hier betrachteten WEA.

Die Ergebnisse für alle untersuchten WEA sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

WEA Nr.	Typ	Turbulenzkategorie	max. $v_{b,0}(h)$ zul.	ber. $v_{b,0}(h)$	$v_{b,0}(h)$ zzgl. U 20 %
		gem. /2/	m/s	m/s	m/s
WEA-1	E-138/EP3-E2	A	37,5	29,0	34,8
WEA-2	E-138/EP3-E3	A	37,5	29,0	34,8
WEA-3	E-160/EP5-E3	A	37,5	29,4	35,3
WEA-4	E-160/EP5-E3	A	37,5	29,4	35,3
WEA-5	E-160/EP5-E3	A	37,5	29,4	35,3
Mittelwert	-	-	-	29,2	35,1

#### 4 Nachweis der Topografischen Komplexität

Für die Standorteignung muss gemäß /5/ die topographische Komplexität des Standortes nachgewiesen werden. Dazu muss im Nahfeld um jede WEA die Geländeneigung und – veränderlichkeit geprüft werden. Die Prüfung der topographischen Komplexität des Geländes ist kein alleiniges KO-Kriterium. Es soll helfen komplexe Standorte zu erkennen. Bei komplexen Standorten wird dann ggf. die Umgebungsturbulenz mit einem Korrekturfaktor ( $C_{ct}$ ) für die Turbulenzstruktur korrigiert. Durch die Korrektur wird der Umstand, dass die sich sonst meist maßgeblich aus der horizontalen Komponente sich

ergebende Umgebungsturbulenz im komplexen Gelände durch relevante Anteile aus der vertikalen Komponente erhöht werden kann.

Die folgenden Tabellen zeigen die unteren Schwellenwerte der topographischen Geländekomplexitätskategorien L, M und H gemäß /5/:

Index der Geländeneigung (*TSI*):

Radius / Abstand	Anzahl Sektoren	Sektoren weite	Index der Geländeneigung	Index der Geländeneigung	Index der Geländeneigung
			L	M	H
5xNH	1	Omni. (360°)	10°	15°	20°
5xNH	12	Sektor (30°)	10°	15°	20°
10xNH	12	Sektor (30°)	10°	15°	20°
20xNH	12	Sektor (30°)	10°	15°	20°

Index der Geländeabweichung (*TVI*):

Radius / Abstand	Anzahl Sektoren	Sektoren weite	Index der Geländeabweichung	Index der Geländeabweichung	Index der Geländeabweichung
			L	M	H
5xNH	1	Omni. (360°)	2%	4%	6%
5xNH	12	Sektor (30°)	2%	4%	6%
10xNH	12	Sektor (30°)	2%	4%	6%
20xNH	12	Sektor (30°)	2%	4%	6%

In der verwendeten Software WindPRO wird eine Anzahl von Ebenen in Form von Ringen und „Tortenstücken“ um die WEA an das Gelände und die Geländeneigung angenähert. Die Veränderungen jeder Ebene werden einzeln evaluiert. Im Folgenden werden die Anforderungen näher beschrieben. Die Software nutzt dazu das digitale Höhenmodell (DHM), welches im Projekt hinterlegt ist.

Die Auflösung eines Höhenrasters wurde mit 50\*50 m gewählt. Dies entspricht den Forderungen nach /5/. Das gewählte Raster wird durch die Auflösung der verwendeten Höhendaten abgedeckt.

Im Ergebnis wird die Komplexitäts-Kategorie (GK) gemäß /5/ für jede WEA-Position dargestellt. Hierbei wird die Geländekomplexität abgestuft wiedergegeben mit „Hoch“ (high=H), „Mittel“ (medium=M) und „Niedrig“ (low=L). Liegen die Schwellenwerte unter den Grenzwerten ( $TSI < 10^\circ$  und  $TVI < 2\%$ ), so ist eine Anlagen-Position nicht komplex („Keine“ Komplexität). In diesem Fall wird kein Korrekturparameter ( $C_{ct}$ ) für die Turbulenzstruktur (Umgebungsturbulenz) angewendet. Die Ergebnisse der Geländekomplexitäten (GK) sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

WEA – Nr.	WEA-1	WEA-2	WEA-3	WEA-4	WEA-5
GK	Keine	Keine	Keine	Keine	Keine

Bei den untersuchten WEA ist die Komplexitäts-Kategorie (GK) = „Keine“. Der Standort der untersuchten WEA ist somit als nicht-komplex zu bewerten. Weitere Zuschläge zu den Turbulenzwerten sind nicht erforderlich. Die diesbezüglichen Ergebnisberichte aus der verwendeten Software liegen im Anhang bei.

## 5 Typenstatik und Eignung des Standortes gemäß DIBt /2/

Gemäß der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen von 2012 /2/ werden WEA für verschiedene Lastklassen zertifiziert. Alle geplanten und hier betrachteten WEA-Typen sind für die Windklasse III zertifiziert. Der Standort Borken-Marbeck befindet sich gemäß DIN 1055, *Lastannahmen*, DIN 4133, *Schornsteine aus Stahl* und nach DIBt *Richtlinie für Windenergieanlagen; Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung*, Anhang B, Fassung März 2004 /1/, in der Windzone 2 (Landkreis Borken), gem. Nachweis in Kap. 4, in nicht komplexem Gelände und erfüllt somit die Vorgabe der in der Typenstatik angestrebten Auslegungsbedingung für Geländekategorie II gem. DIN EN 1991-1-4.

## 6 Turbulenzannahmen gemäß DIBt /1/, /2/, /3/

Gemäß der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen von 2004 /1/ und der neueren Fassung von 2012 /2/ ist der Einfluss benachbarter WEA auf Auswirkungen für die Turbulenzintensität zu untersuchen. Dies erfolgt windgeschwindigkeitsabhängig basiert. Die Turbulenzintensität, auf deren Basis eine WEA auszulegen ist, wurde in der älteren Fassung der DIBt-Richtlinie für Windkraftanlagen von 1993 /3/ konstant mit 20% für alle Windgeschwindigkeiten angenommen.

Es wird ermittelt, welche sich durch den Windpark und seine Konfiguration entstehenden Turbulenzintensitäten ergeben. Diese werden mit der in der Auslegung der WEA zugrunde gelegten, maximal zulässigen Turbulenzintensität verglichen.

Im vorliegenden Fall wird aufgrund der geplanten WEA gemäß der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen von 2012 /2/ und der bestehenden WEA auf Basis der DIBt-Richtlinie von 2004 /1/ und 1993 /3/ gerechnet.

Für die verschiedenen WEA ergibt sich zulässige Turbulenzintensitäten je Anlagentyp und Auslegung gemäß der nachfolgenden Tabelle:

WEA Nr.	Typ	Durchmesser Rotor	max. TI zul.	bei v Wind *)	Turbulenzkategorie	Windzone
		m	%	m/s	gem. /2/	gem. /2/
WEA-1	E-138/EP3-E2	138,0	18,0	15,0	A	2
WEA-2	E-138/EP3-E3	138,0	18,0	15,0	A	S
WEA-3	E-160/EP5-E3	160,0	18,0	15,0	A	S
WEA-4	E-160/EP5-E3	160,0	18,0	15,0	A	S
WEA-5	E-160/EP5-E3	160,0	18,0	15,0	A	S
WEA 01	E-138/EP3-E2	138,0	18,0	15,0	A	2
WEA 02	GE 1.5sl	77,0	20,0	konstant	-	-
WEA 07	E-48	48,0	18,0	15,0	A	3

\*) Die windgeschwindigkeitsabhängige Darstellung der zulässigen Turbulenzintensität erfolgt hier vereinfacht für das Intervall 15 m/s, die Darstellung der übrigen Intervalle ist der Ergebnistabelle zu entnehmen. Die Turbulenzklasse ergibt sich gemäß den festgesetzten Annahmen in der Typenstatik der jeweiligen WEA.

Diese zulässigen Turbulenzintensitäten werden an diesem Standort durch die umgebenden Anströmungsstörungen nicht erreicht. Zur Untersuchung der zulässigen Turbulenzintensitäten muss jedoch auch die Nachlaufströmung der WEA berücksichtigt werden.

## 7 Methodik zur Ermittlung Gesamtturbulenz für jeden WEA Standort

Die Annahmen des verwendeten Berechnungsmodells in der Software „WindPRO“ (Vers. 3.1) für die Turbulenzberechnung des Nachlaufes basieren auf dem Modell von S. Frandsen und M.L. Thogersen /4/. Die Implementierung dieses Modells ist auch Gegenstand der DIBt – Richtlinie /1/ und /2/ und wird in den Richtlinien empfohlen. Die zugrundeliegenden Formeln der DIBt-Richtlinie aus dem Modell /4/ sind im Folgenden dargestellt.

Die Gesamtturbulenz  $I_{eff}$  (Umgebung und Nachstrom benachbarter WEA) für jede WEA wird für die verschiedenen Windgeschwindigkeitsintervalle gemäß /1/ und /2/ mit den nachfolgenden Formeln ermittelt. Der Einfluss erhöhter Turbulenzen in der Nachlaufströmung während des Betriebes benachbarter, im Abstand  $a_i$  von der betrachteten Anlage stehender Windenergieanlagen  $i$ , darf beim Nachweis der Ermüdungssicherheit durch eine effektive Turbulenzintensität  $I_{eff}$  berücksichtigt werden.

Mit  $s_i = a_i/D$ , wobei für  $D$  der jeweils größere Rotordurchmesser einzusetzen ist, gilt für den Fall, dass  $\min s_i \geq 10$ :

$$I_{eff} = \frac{\sigma_1}{v_{hub}} \quad (1)$$

für den Fall das  $\min s_i < 10$

$$I_{eff} = \left[ (1 - n \cdot p_w) \cdot \left( \frac{\sigma_1}{v_{hub}} \right)^m + p_w \sum_{i=1}^n I_T^m \cdot (s_i) \right]^{1/m} \quad (2)$$

Dabei ist:

$p_w$  die Wahrscheinlichkeit der Nachlaufsituation; sie wird mit  $p_w = 0,06$  angenommen

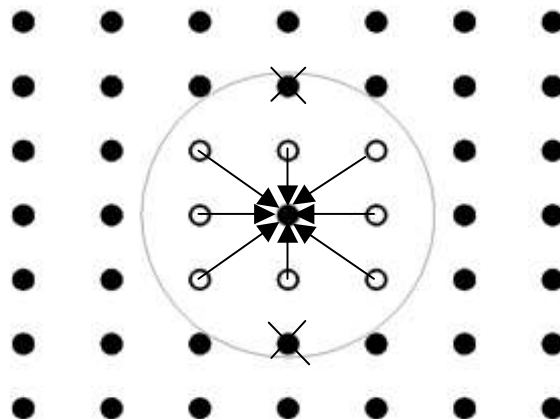
$I_T$  die maximale Turbulenzintensität in Nabenhöhe der jeweiligen Anlage

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{\left[ 1,5 + 0,8 \cdot \frac{s_i}{\sqrt{C_T}} \right]^2} + \left( \frac{\sigma_1}{v_{hub}} \right)^2} \quad (3)$$

- 
- $s_i$  der auf den größten Rotordurchmesser bezogene dimensionslose Abstand von der Turmachse der betrachteten Windenergieanlage zur Turmachse der benachbarten Windenergieanlage  $i$
- $n$  die Anzahl der benachbarten Windenergieanlagen
- $m$  der Exponent der Wöhler-Kurve für den Werkstoff des betrachteten Bauteiles, für Stahl  $m = 3$ , für GFK  $m = 10$
- $\sigma_1$  die Standardabweichung der örtlichen Umgebungsturbulenz in Meter pro Sekunde
- $v_{hub}$  die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe in Meter pro Sekunde
- $C_T$  Schubbeiwert des Rotors, bezogen auf die umschriebene Rotorfläche

Einflüsse durch die Nachlaufströmung von Windenergieanlagen, die durch weitere Anlagen verdeckt sind, brauchen gemäß /1/ und /2/ nicht berücksichtigt zu werden. So sind z. B. von den in einer Reihe angeordneten Anlagen nur die beiden unmittelbar benachbarten Anlagen zu berücksichtigen. Bei einer Windparkanordnung ist die Anzahl  $n$  der bei der Ermittlung von  $I_{eff}$  zu berücksichtigenden benachbarten Windenergieanlagen dem Bild unten zu entnehmen.

Die Anzahl der benachbarten WEA wird wie folgt festgelegt:



Als benachbart gelten die WEA in dem Kreis

Für nur 2 WEA wird  $N = 1$  gesetzt.

Für 1 Reihe von WEA wird  $N = 2$  gesetzt.

Für 2 Reihen von WEA wird  $N = 5$  gesetzt.

Für mehr als 2 Reihen von WEA wird  $N = 8$  gesetzt.

Sollten im Park mehr als fünf Reihen hintereinander gelegen sein, die mit dem gewählten Modell nicht mehr abgedeckt sind, ist davon auszugehen, dass der Park selbst stark das umgebende Windgeschehen beeinflusst. Ebenso, wenn der Abstand zwischen WEA in Reihen senkrecht zur Hauptwindrichtung weniger als drei Rotordurchmesser beträgt, muss ein Anstieg der durchschnittlichen Turbulenz berücksichtigt werden. In diesem Falle werden die Berechnungen der Turbulenzintensität durch die Formeln (4) und (5) vorgenommen.

$$\sigma'_1 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_1^2} + \sigma_1 \quad (4)$$

Dabei ist

$$\sigma_w = \frac{0,36 \cdot v_{hub}}{1 + 0,2 \cdot \sqrt{\frac{s_r \cdot s_f}{C_T}}} \quad (5)$$

mit

$s_r, s_f$  die auf den größten Rotordurchmesser bezogenen dimensionslosen Abstände innerhalb einer Reihe bzw. zwischen den Reihen

$C_T$  Schubbeiwert des Rotors, bezogen auf die umschriebene Rotorfläche

## 8 Ermittlung Gesamtturbulenz $I_{eff}$ - für jeden WEA Standort

Mit den in Kap. 7 beschriebenen Methoden bei Annahme des Wöhler Exponenten  $m = 10$  für GFK wurden für jeden WEA-Standort die Nachstromturbulenzen unter Berücksichtigung der in /8/ ermittelten Umgebungsturbulenz bzw. der repräsentativen Umgebungsturbulenz ermittelt. Maßgeblich ist die sich durch Wichtung der Windhäufigkeiten ergebende mittlere auftretende Turbulenzintensität. Unter Berücksichtigung der Umgebungsturbulenzen nach /4/ und /5/ ergeben sich dann durch



die benachbarten WEA gemäß dem Modell in /1/ bzw. /2/ max. Gesamtturbulenzen für jeden WEA-Standort entsprechend den nachfolgenden Tabellen:

### Berechnungsergebnisse für 1 geplante WEA Typ Enercon E-138/EP3-E2

WEA Nr.	DIBt 1993	DIBt 2012 / Turbulenzkategorie A											
	Windgeschwindigkeitsklassen in m/s												
	konst.	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
	zulässige Auslegungswerte Turbulenzintensität in %												
	20	41,9	29,9	24,8	22,0	20,1	18,9	18,0	17,3	16,7	16,3	15,9	15,6
gem. DIBt 1993 und/oder DIBt 2012 - berechnete Werte I eff in %													
WEA-1 - E-138/EP3-E2	-	16,2	15,5	15,1	14,9	14,7	14,5	14,4	14,3	14,2	14,2	14,1	14,1

\*) Berechnete Werte, die oberhalb der zulässigen Auslegungswerte liegen, werden *kursiv* dargestellt.

### Berechnungsergebnisse für 1 geplante WEA Typ Enercon E-138/EP3-E3

WEA Nr.	DIBt 1993	DIBt 2012 / Turbulenzkategorie S - analog Dok.: D1018674/3.2-de											
	Windgeschwindigkeitsklassen in m/s												
	konst.	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
	zulässige Auslegungswerte Turbulenzintensität in %												
	20	45,6	30,7	25,1	22,1	20,2	18,9	18,0	17,3	16,7	16,3	15,9	15,6
gem. DIBt 1993 und/oder Herstellerangabe - berechnete Werte I eff in %													
WEA-2 - E-138/EP3-E3	-	19,2	17,8	17,0	16,5	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4	15,3	15,2	15,2

\*) Berechnete Werte, die oberhalb der zulässigen Auslegungswerte liegen, werden *kursiv* dargestellt.

### Berechnungsergebnisse für 3 geplante WEA Typ Enercon E-160/EP5-E3

WEA Nr.	DIBt 1993	DIBt 2012 / Turbulenzkategorie S - analog Dok.: D02251887/2.0-de											
	Windgeschwindigkeitsklassen in m/s												
	konst.	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
	zulässige Auslegungswerte Turbulenzintensität in %												
	20	45,6	30,7	25,1	22,1	20,2	18,9	18,0	17,3	16,7	16,3	15,9	15,6
gem. DIBt 1993 und/oder Herstellerangabe - berechnete Werte I eff in %													
WEA-3 - E-160/EP5-E3	-	17,2	16,2	15,6	15,2	14,9	14,7	14,5	14,4	14,2	14,1	14,1	14,0
WEA-4 - E-160/EP5-E3	-	15,1	14,7	14,5	14,3	14,2	14,1	14,0	13,9	13,8	13,8	13,7	13,7
WEA-5 - E-160/EP5-E3	-	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3

\*) Berechnete Werte, die oberhalb der zulässigen Auslegungswerte liegen, werden *kursiv* dargestellt.

### Berechnungsergebnisse für eine fremdgeplante WEA Typ Enercon E-138/EP3-E2

WEA Nr.	DIBt 1993	DIBt 2012 / Turbulenzkategorie A											
	Windgeschwindigkeitsklassen in m/s												
	konst.	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
	zulässige Auslegungswerte Turbulenzintensität in %												
	20	41,9	29,9	24,8	22,0	20,1	18,9	18,0	17,3	16,7	16,3	15,9	15,6
gem. DIBt 1993 und/oder DIBt 2012 - berechnete Werte $I_{eff}$ in %													
WEA 01 - E-138/EP3-E2	-	19,2	17,8	17,0	16,5	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4	15,3	15,2	15,2

\*) Berechnete Werte, die oberhalb der zulässigen Auslegungswerte liegen, werden *kursiv* dargestellt.

### Berechnungsergebnisse für 1 vorhandene WEA Typ GE 1.5sl

WEA Nr.	DIBt 1993	DIBt 2004 / Turbulenzkategorie A											
	Windgeschwindigkeitsklassen in m/s												
	konst.	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
	zulässige Auslegungswerte Turbulenzintensität in %												
	20	42,0	30,0	24,9	22,0	20,2	18,9	18,0	17,3	16,7	16,3	15,9	15,6
gem. DIBt 1993 und/oder DIBt 2004 - berechnete Werte $I_{eff}$ in %													
WEA 02 - GE 1.5sl	18,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\*) Berechnete Werte, die oberhalb der zulässigen Auslegungswerte liegen, werden *kursiv* dargestellt.

Insgesamt treten an keiner der betrachteten WEA eine Überschreitungen der zulässigen Auslegungswerte auf. Es kann von Empfehlungen zu richtungs- und windgeschwindigkeitsabhängigen Schaltungen für die Windparkplanung abgesehen werden.

## 9 Ermittlung Gesamtturbulenz $i_{eff}$ – Sonderbetrachtung vorh. WEA 07

Der Auftraggeber plant den befristeten Weiterbetrieb der zurückzubauenden WEA 07 des Typs Enercon E-48 am Standort, bis das betreffende Repowering durch die geplante WEA-2 in Betrieb geht. Dadurch werden wegen einem Teil der dann bereits in Betrieb genommenen geplanten WEA (WEA-1 und WEA -3) Überschreitungen der zulässigen Gesamtturbulenz entstehen:

## Berechnungsergebnisse für eine vorhandene WEA Typ Enercon E-48

WEA Nr.	DIBt 1993	DIBt 2004 / Turbulenzklasse A											
	Windgeschwindigkeitsklassen in m/s												
	konst.	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
	zulässige Auslegungswerte Turbulenzintensität in %												
	20	42,0	30,0	24,9	22,0	20,2	18,9	18,0	17,3	16,7	16,3	15,9	15,6
gem. DIBt 1993 und/oder DIBt 2004 - berechnete Werte $I_{eff}$ in %													
WEA 07 - E-48	-	20,5	19,2	18,4	17,9	17,6	17,2	17,0	16,9	16,8	16,8	16,8	16,8

\*) Berechnete Werte, die oberhalb der zulässigen Auslegungswerte liegen, werden *kursiv* dargestellt.

Die geplante WEA-1 muss wegen Überschreitungen der zulässigen Turbulenzwerte  $I_{eff}$  an der vorhandenen WEA 07 ab 19,0 m/s (Bin 18-20 m/s) abgeschaltet werden. Die Abschaltung erfolgt nur bei Windanströmung in einem Gradbereich von 248,6° bis 279,4° (260°±15,4°). Die Winkel beziehen sich auf den geographischen Norden, wobei Nord gleich 0° ist. **Es kann alternativ bei den gleichen Windgeschwindigkeiten und dem gleichen Gradbereich auch die von Überschreitungen betroffene vorhandene WEA 07 abgeschaltet werden.**

Die geplante WEA-3 muss wegen Überschreitungen der zulässigen Turbulenzwerte  $I_{eff}$  an der vorhandenen WEA 07 ab 19,0 m/s (Bin 18-20 m/s) abgeschaltet werden. Die Abschaltung erfolgt nur bei Windanströmung in einem Gradbereich von 296,7° bis 321,3° (309°±12,3°). Die Winkel beziehen sich auf den geographischen Norden, wobei Nord gleich 0° ist. **Es kann alternativ bei den gleichen Windgeschwindigkeiten und dem gleichen Gradbereich auch die von Überschreitungen betroffene vorhandene WEA 07 abgeschaltet werden.**

## 10 Abweichungen von der Akkreditierung

Im Gutachten und bei der Erstellung des Gutachtens sind folgende Abweichungen zur Akkreditierung zu vermerken:

Abweichung gegenüber /1/ /2/ und den Anforderungen der Mindeststandards für Turbulenzgutachten

Keine.

---

Abweichung gegenüber eigenen Festlegungen / Akkreditierungsanforderungen

Keine.

## 11 Schlussbetrachtung

Für den Standort Borken-Marbeck sind für den Nachweis der Standsicherheit die gemäß /2/ notwendigen Parameter der Standorteignung und die Gesamtturbulenz  $I_{\text{eff}}$  berechnet worden. Die in die Berechnung eingehenden Umgebungsturbulenzen sowie die durchschnittlichen und sektoriellen Windparameter sind dem Kap. 2 zu entnehmen.

Die Jahresmittelwindgeschwindigkeit an diesem Standort beträgt gemäß Gutachten PLANKon /7/ 7,05 m/s in 160,0 m und 7,14 m/s in 166,6 m Höhe. Die Ergebnisse der Windfeldberechnung /7/ und der Umgebungsturbulenzberechnung /8/ sind die Eingangswerte der Gesamtturbulenzberechnung. Zur Begutachtung des Standortes wurde von PLANKon eine Ortsbegehung durchgeführt.

Zur Bestimmung der Turbulenzintensität wird die ermittelte Umgebungsturbulenzintensität infolge möglicher Unsicherheiten und zur Berücksichtigung der bei Messungen ermittelbaren Standardabweichungen um den Ansatz  $I_{\sigma} = 20 \%$  erhöht. Für die Berechnung der repräsentativen Turbulenz wurde die Umgebungsturbulenz um die 1,28-fache Standardabweichung  $I_{\sigma}$  (Ansatz  $I_{\sigma} = 20 \%$ ) erhöht. Hiermit wird die Forderung des Ansatzes der 1,28-fachen Standardabweichung der Turbulenzintensität nach /2/ erfüllt.

Die Aufstellung ist mit den Typenstatiken und den Auslegungsgrundlagen gemäß /1/ und /2/ der betroffenen Standorte unter dem Gesichtspunkt der Gesamtturbulenz  $I_{\text{eff}}$  je WEA gemäß den vorliegenden Berechnungen als verträglich anzusehen.

Mit dem hier eingesetzten Verfahren, sowie den angesetzten Randbedingungen ergeben sich gegenüber einer detaillierten Lastberechnung konservative Werte für die effektiven Turbulenzintensitäten. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei Durchführung einer detaillierten Lastrechnung im Vergleich zum verwendeten Verfahren eventuell geringere Abschalt-Szenarien für die betrachteten WEA möglich sind.

---

Eine Gewähr für die sich tatsächlich einstellenden Turbulenzen kann aufgrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge der Thematik nicht übernommen werden.

Die vorliegende Berechnung wurde vom Ing.-Büro PLANKon gemäß dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen unparteiisch erstellt.

Oldenburg, den 22.03.2023

Erstellt durch:



A handwritten signature in black ink, reading 'R. Wagner vom Berg', is written over a blue circular professional seal. The seal contains the text 'INGENIEURKAMMER NIEDERSACHSEN', 'MITGLIED DER', 'Dipl.-Ing. (FH)', 'ROMAN WAGNER VOM BERG', and '1304'.

---

Dipl.-Ing. Roman Wagner vom Berg  
(Technischer Leiter)

---

## 12 Literaturhinweise

- /1/ Richtlinie des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) „Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“ Fassung März 2004; DIBt, Berlin
- /2/ Richtlinie des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) „Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“ Fassung Oktober 2012; DIBt, Berlin
- /3/ Richtlinie des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) „Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“ Fassung Juni 1993; 2. Auflage 1995; DIBt, Berlin
- /4/ S. Frandsen M.L. Thorgersen, Integrated Fatigue Loading for Wind Turbines in Wind Farms by Combining Ambient Turbulence and Wakes, Wind Engineering, Volume 23, No. 6. 1999
- /5/ DIN EN 61400-1 Windenergieanlagen - Teil 1: Auslegungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 61400-1:2005 + A1:2019
- /6/ Technische Richtlinie Teil 6 (TR 6) „Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen“ der Fördergesellschaft für Windenergie, Revision 11 vom 21.09.2020
- /7/ PLANKon, Windgutachten gem. TR 6 (Rev. 11) am Standort Borken-Marbeck, Bericht Nr. PK 2041041-EGW-A vom 27.01.2023
- /8/ PLANKon, Gutachten zur Turbulenzintensität der freien Anströmung am Standort Borken-Marbeck, Bericht Nr. PK 2021041-UTG vom 20.03.2023

## 13 Anlagen zum Gutachten der Gesamtturbulenz am Standort Borken-Marbeck

2 Blatt Lageplan mit Darstellung der WEA

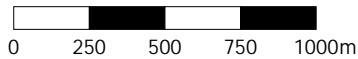
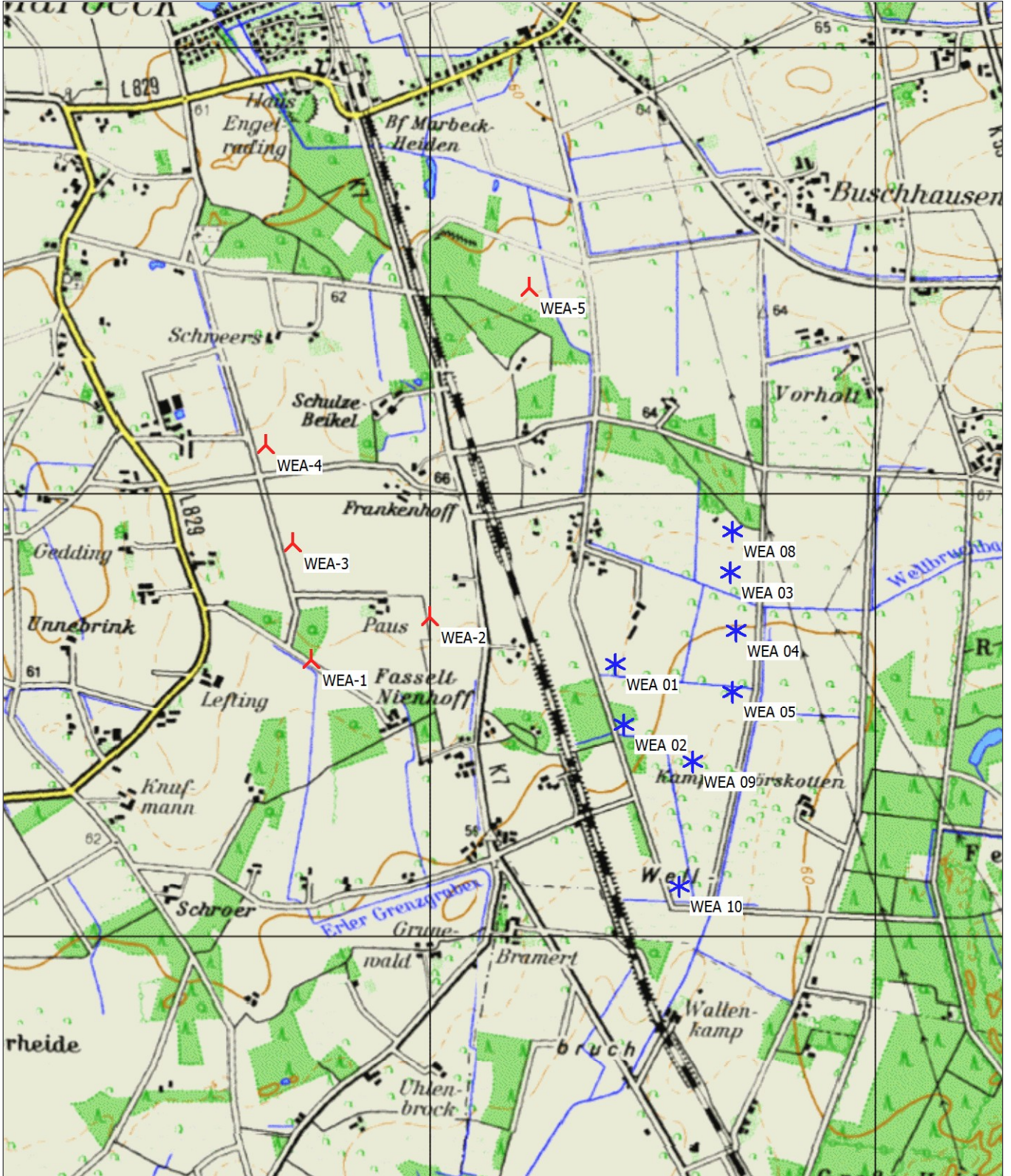
2 Blatt Berechnung Nachweis der topografischen Komplexität des Geländes  $i_c$

2 Blatt Berechnung der mittleren Luftdichte

5 Blatt Berechnung des 50-Jahres Windes

## PARK - Karte

Berechnung: Konfiguration - Stand 03.2023 mit gepl. WEA-2

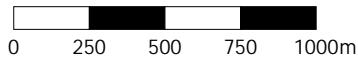
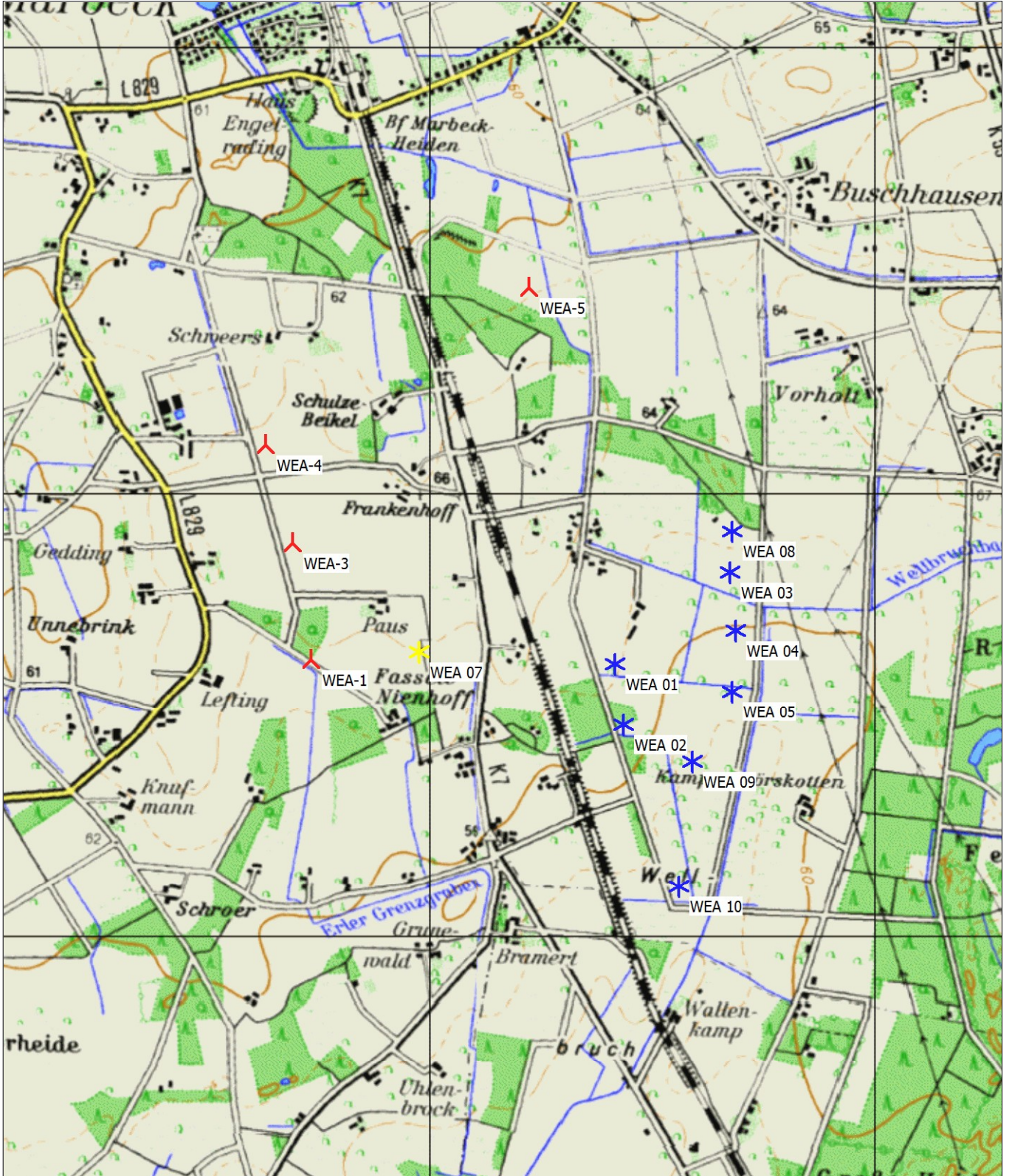


Karte: TK50\_Borken\_Marbeck , Maßstab 1:25.000, Mitte: UTM (north)-ETRS89 Zone: 32 Ost: 356.309 Nord: 5.739.710

▲ Neue WEA      \* Existierende WEA

## PARK - Karte

Berechnung: Konfiguration - Stand 03.2023 mit vorh. WEA 07



Karte: TK50\_Borken\_Marbeck , Maßstab 1:25.000, Mitte: UTM (north)-ETRS89 Zone: 32 Ost: 356.309 Nord: 5.739.710

▲ Neue WEA      \* Existierende WEA



## SITE COMPLIANCE - Komplexität Gelände

Berechnung: Enercon E-138/EP3-E2 & E-138/EP3-E3  
Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 4 (2019)

Ergebnis: **OK**

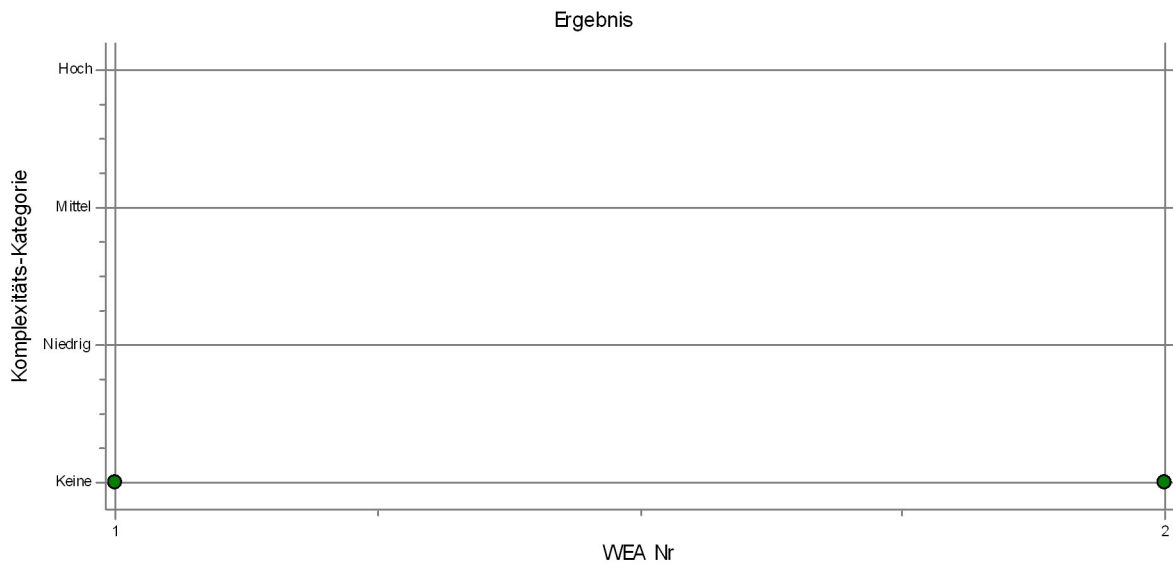
### Grundlagen der Prüfung

Verwendete Methode	Aktives DHM
Methodendetails	Höhenmodell (Linien- oder Höhenraster-Objekt)
	Rasterweite: 50,00 m
Verfügbare Methoden	Aktives DHM
Anwender-Anmerkung	

### IEC-Limits

	Keine	Niedrig	Mittel	Hoch
Höchste TVI	<2%	=2%	=4%	=6%
Höchste TSI	<10°	=10°	=15°	=20°
Cct	1,00	1,05	1,10	1,15

### Ergebnis (Grafik)



### Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	Komplexitäts-Kategorie	Cct	Höchste TSI [Deg]	Höchste TVI [%]
ENERCON E-138 / EP3 E2 4200 138.0 !O! NH: 160,0 m (Ges:229,0 m) (75)	IIIA	Keine	1,00	0,4	0,0
ENERCON E-138 EP3 E3 4260 138.3 !O! NH: 160,0 m (Ges:229,1 m) (76)	IIIA	Keine	1,00	0,3	0,0

## SITE COMPLIANCE - Luftdichte

Berechnung: Enercon E-138/EP3-E2 & E-138/EP3-E3  
Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 4 (2019)

Ergebnis: **OK**

### Grundlagen der Prüfung

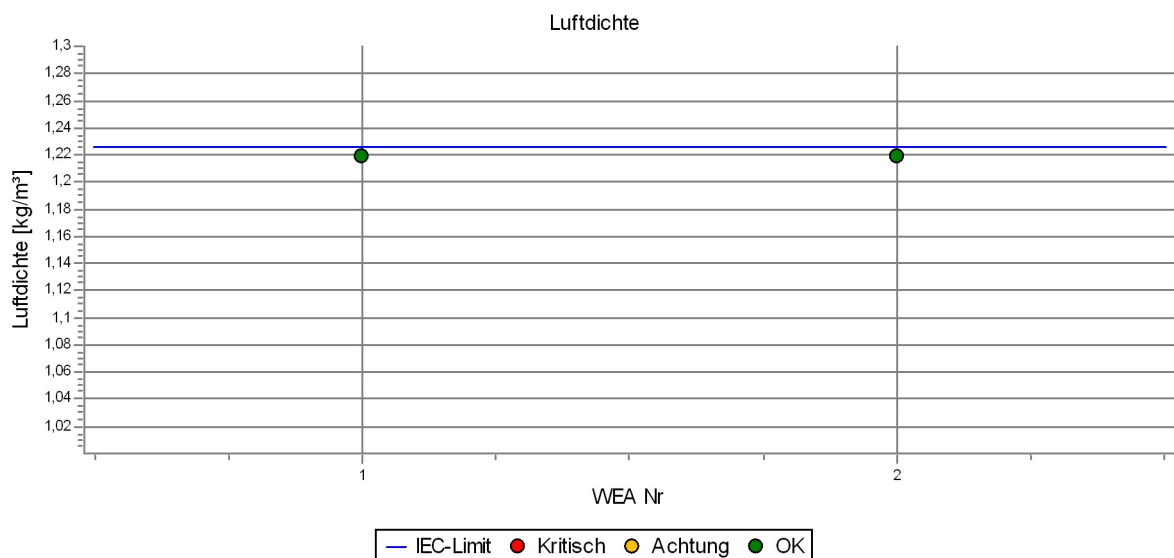
Verwendete Methode	Mast_EMD-WRF Europe+ (ERA5)_N51,78764_E006,886963 (1)	(Qualität: A/B)
Methodendetails	Standort- oder Messmast mit Temperaturdaten (+ Druck) Mast: EMD-WRF Europe+ (ERA5)_N51,78764_E006,886963 (1) Keine Korrektur der mittl. Windgeschw.	
Verfügbare Methoden	Mast	(Qualität: A/B)
	GHCN	(Qualität: C)
Anwender-Anmerkung		

### IEC-Limits

Mittlere Luftdichte

[kg/m<sup>3</sup>]  
Max 1,225

### Ergebnis (Grafik)



### Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	Mittlere Luftdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Höhenunterschied [m]	Mittlere Temperatur Nabenhöhe [°C]	Mittlerer Druck Nabenhöhe [hPa]
ENERCON E-138 / EP3 E2 4200 138.0 !O! NH: 160,0 m (Ges:229,0 m) (75)	IIIA	1,219	163	8,7	986
ENERCON E-138 EP3 E3 4260 138.3 !O! NH: 160,0 m (Ges:229,1 m) (76)	IIIA	1,219	164	8,7	986

### Basisdaten

Mittlere Temperatur	9,7 °C
Höhe über Meeresspiegel	62 m
Atmosph. Temperaturgradient	-0,0065 K/m
Molare Masse trockene Luft	0,02896442 kg/mol
Erdbeschleunigung	9,80665 m/s <sup>2</sup>
Mittlerer Druck Meeresspiegel	1013,25 hPa
Luftdichte	1,239 kg/m <sup>3</sup>

## SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: Enercon E-138/EP3-E2 & E-138/EP3-E3

Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 4 (2019)

Ergebnis: **OK**

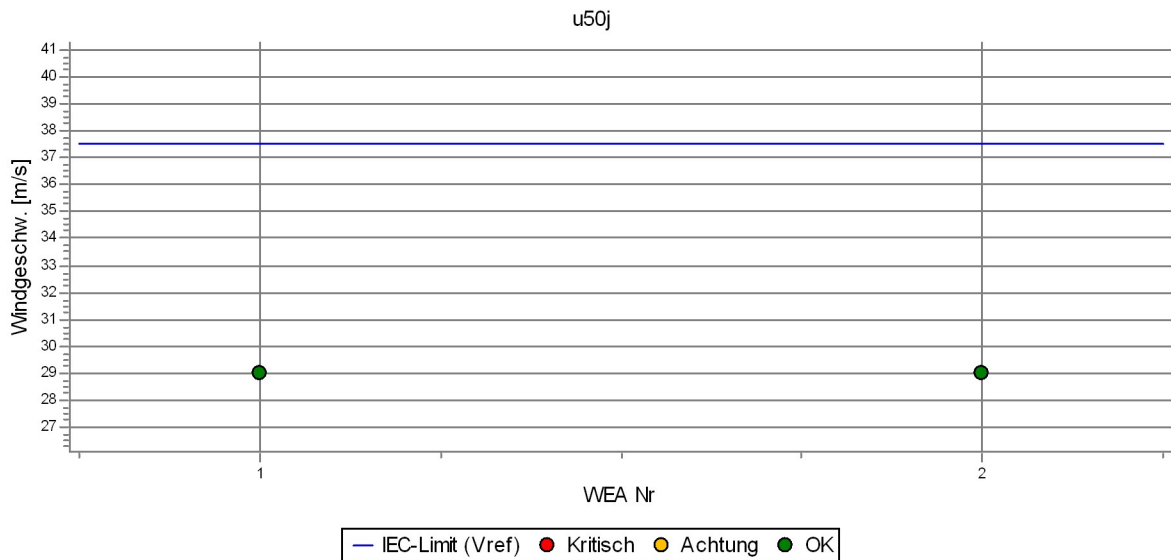
### Grundlagen der Prüfung

Verwendete Methode	AM_Kein Modell	(Qualität: A+C)	
Methodendetails	<u>Statistisches Modell</u>	Jährliches Maximum & Gumbel *)	
	<u>Ausbreitungsmodell</u>	Kein Modell (Mast ist repräsentativ)	
	<u>Weitere Einstellungen</u>	Luftdichtekorrektur	Individuelle Mittelwerte aus Luftdichte-Prüfung verwenden
		Sicherheitsfaktor für COV > 0,15 (IEC61400-1 Ed. 4)	
Verfügbare Methoden	<u>Statistisches Modell</u>	<u>Ausbreitungsmodell</u>	<u>Weitere Einstellungen</u>
	AM (A)	WASP-CFD / Flowres (erweiterte Mast-WEA Speed-ups) (C)	Luftdichtekorrektur
	POT-N (B)	WEng (Sektorweise Mast-zu-WEA Speed-Up) (C)	Langzeit-Indexkorrektur
	Weibull (C)	WASP (Sektorweise Speed-Up) (C)	k-Parameter vorkonditioniert
		Shear (nur sektorweise Vertikalextrapolation) (C)	3s-Bö Schätzung
		Kein Modell (Mast ist repräsentativ) (C)	Sicherheitsfaktor für COV > 0,15 (IEC61400-1 Ed. 4)
Anwender-Anmerkung			

### IEC-Limits

IEC-Klasse	Max Extremwind (Vref)
	[m/s]
IIIA	37,5

### Ergebnis (Grafik)



### Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	Mast	u50j [m/s]	Luftdichtekorrektur [-]	Sqrt(?) (Sicherheitsfaktor) [-]
ENERCON E-138 / EP3 E2 4200 138.0 !O! NH: 160,0 m (Ges:229,0 m) (75)	IIIA	A	29,0	1,00	1,00
ENERCON E-138 EP3 E3 4260 138.3 !O! NH: 160,0 m (Ges:229,1 m) (76)	IIIA	A	29,0	1,00	1,00

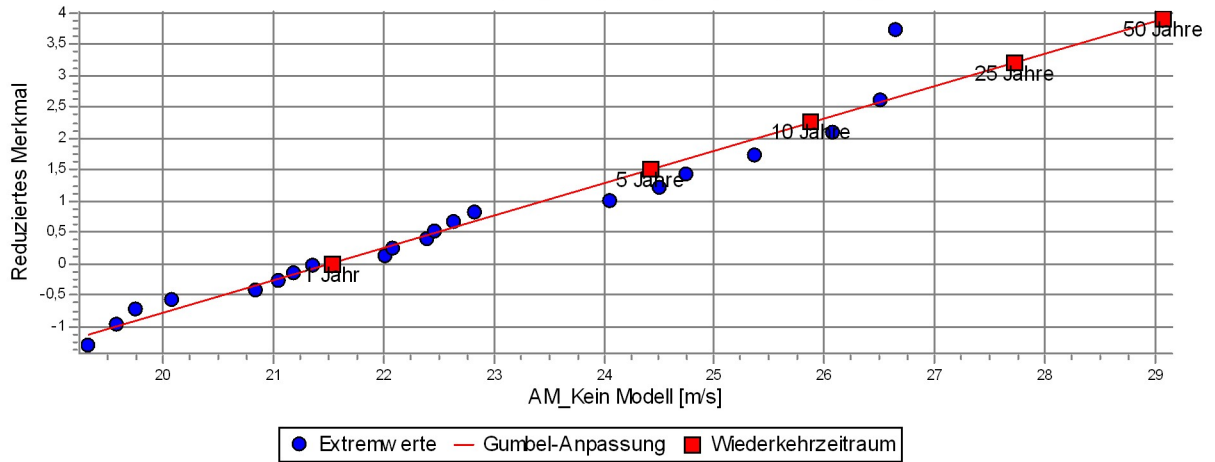
### SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: Enercon E-138/EP3-E2 & E-138/EP3-E3

Gumbel-Anpassung Kritischste WEA

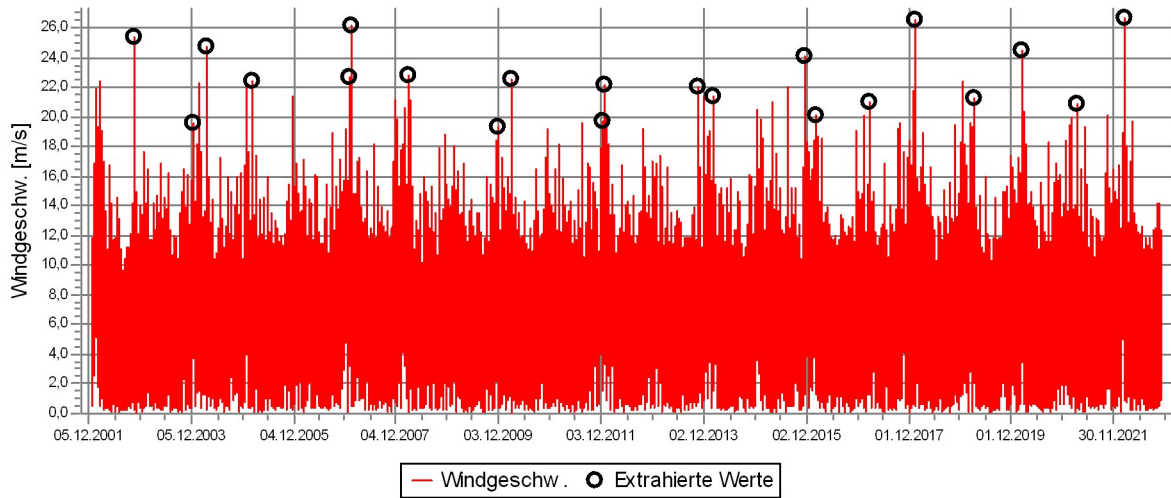
ENERCON E-138 / EP3 E2 4200 138.0 !O! NH: 160,0 m (Ges:229,0 m) (75)

Mast: EMD-WRF Europe+ (ERA5)\_N51,78764\_E006,886963 (1)



### Extrahierte Werte

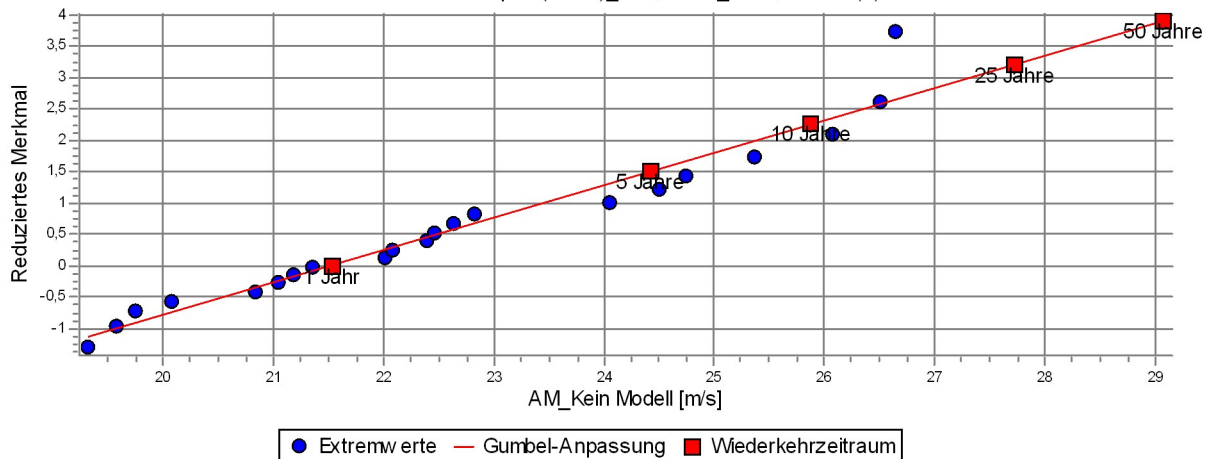
EMD-WRF Europe+ (ERA5)\_N51,78764\_E006,886963 (1)



### Gumbel-Anpassung

ENERCON E-138 EP3 E3 4260 138.3 !O! NH: 160,0 m (Ges:229,1 m) (76)

Mast: EMD-WRF Europe+ (ERA5)\_N51,78764\_E006,886963 (1)



## SITE COMPLIANCE - Komplexität Gelände

Berechnung: Enercon E-160/EP5-E3

Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 4 (2019)

Ergebnis: **OK**

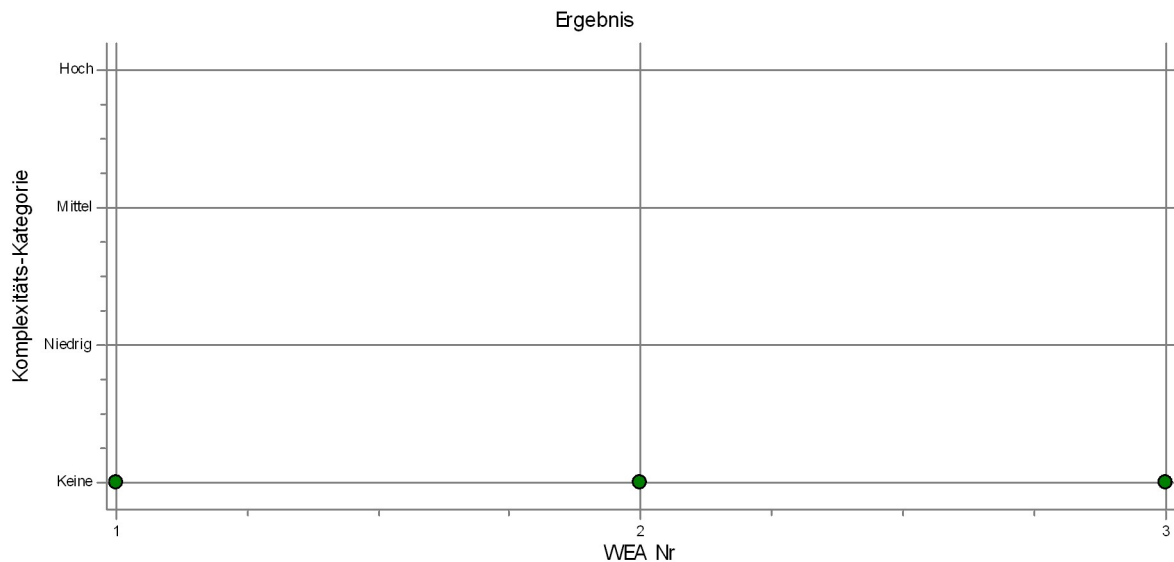
### Grundlagen der Prüfung

Verwendete Methode	Aktives DHM
Methodendetails	Höhenmodell (Linien- oder Höhenraster-Objekt)
	Rasterweite: 50,00 m
Verfügbare Methoden	Aktives DHM
Anwender-Anmerkung	

### IEC-Limits

	Keine	Niedrig	Mittel	Hoch
Höchste TVI	<2%	=2%	=4%	=6%
Höchste TSI	<10°	=10°	=15°	=20°
Cct	1,00	1,05	1,10	1,15

### Ergebnis (Grafik)



### Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	Komplexitäts-Kategorie	Cct	Höchste TSI [Deg]	Höchste TVI [%]
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (77)	IIIA	Keine	1,00	0,3	0,1
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (78)	IIIA	Keine	1,00	0,4	0,1
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (79)	IIIA	Keine	1,00	0,4	0,0

## SITE COMPLIANCE - Luftdichte

Berechnung: Enercon E-160/EP5-E3  
Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 4 (2019)  
Ergebnis: **OK**

### Grundlagen der Prüfung

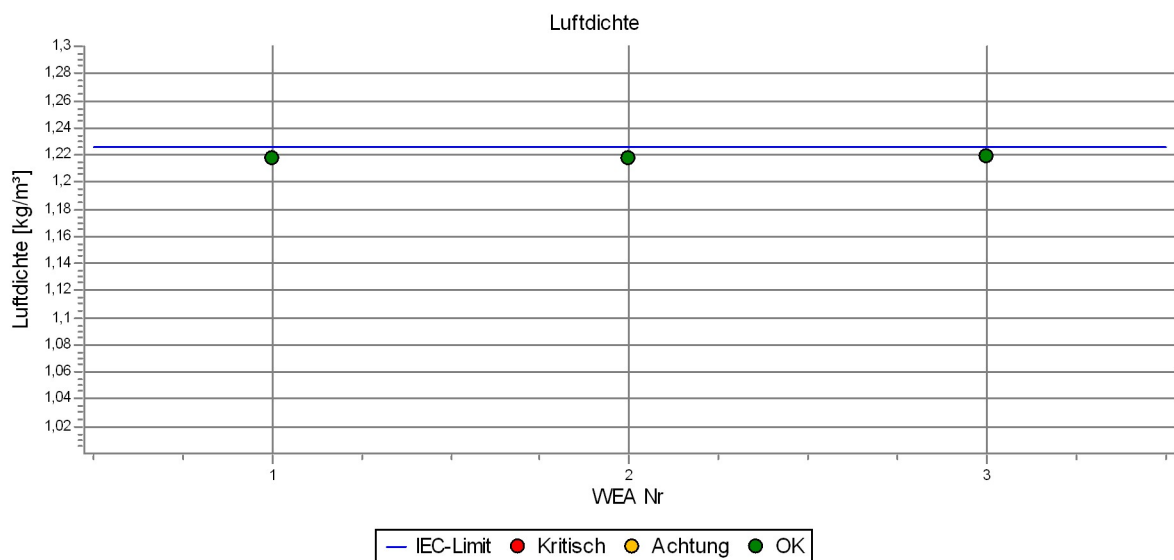
Verwendete Methode	Mast_EMD-WRF Europe+ (ERA5)_N51,78764_E006,886963 (1)	(Qualität: A/B)
Methodendetails	Standort- oder Messmast mit Temperaturdaten (+ Druck)	
	Mast: EMD-WRF Europe+ (ERA5)_N51,78764_E006,886963 (1)	
	Keine Korrektur der mittl. Windgeschw.	
Verfügbare Methoden	Mast	(Qualität: A/B)
	GHCN	(Qualität: C)
Anwender-Anmerkung		

### IEC-Limits

Mittlere Luftdichte

[kg/m<sup>3</sup>]  
Max 1,225

### Ergebnis (Grafik)



### Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	Mittlere Luftdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Höhenunterschied [m]	Mittlere Temperatur Nabhöhe [°C]	Mittlerer Druck Nabhöhe [hPa]
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (77)	IIIA	1,218	172	8,6	985
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (78)	IIIA	1,218	172	8,6	985
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (79)	IIIA	1,218	167	8,6	986

### Basisdaten

Mittlere Temperatur	9,7 °C
Höhe über Meeresspiegel	62 m
Atmosph. Temperaturgradient	-0,0065 K/m
Molare Masse trockene Luft	0,02896442 kg/mol
Erdbeschleunigung	9,80665 m/s <sup>2</sup>
Mittlerer Druck Meeresspiegel	1013,25 hPa
Luftdichte	1,239 kg/m <sup>3</sup>

## SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: Enercon E-160/EP5-E3

Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 4 (2019)

Ergebnis: **OK**

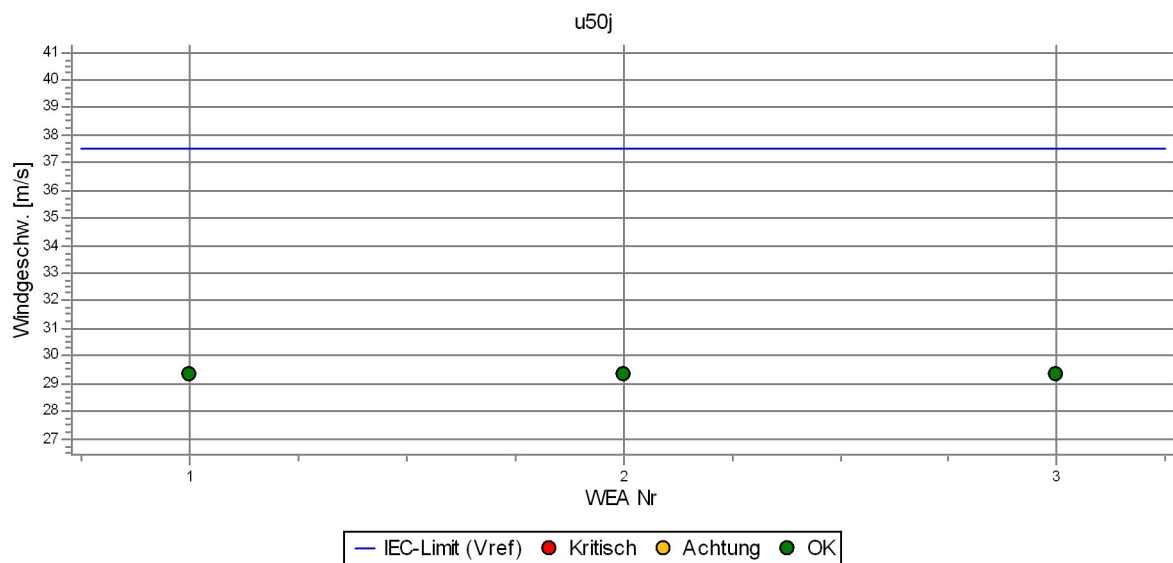
### Grundlagen der Prüfung

Verwendete Methode	AM_Kein Modell	(Qualität: A+C)	
Methodendetails	<u>Statistisches Modell</u>	Jährliches Maximum & Gumbel *)	
	<u>Ausbreitungsmodell</u>	Kein Modell (Mast ist repräsentativ)	
	<u>Weitere Einstellungen</u>	Luftdichtekorrektur	Individuelle Mittelwerte aus Luftdichte-Prüfung verwenden
		Sicherheitsfaktor für COV > 0,15 (IEC61400-1 Ed. 4)	
Verfügbare Methoden	<u>Statistisches Modell</u>	<u>Ausbreitungsmodell</u>	<u>Weitere Einstellungen</u>
	AM (A)	WAsP-CFD / Flowres (erweiterte Mast-WEA Speed-ups) (C)	Luftdichtekorrektur
	POT-N (B)	WEng (Sektorweise Mast-zu-WEA Speed-Up) (C)	Langzeit-Indexkorrektur
	Weibull (C)	WAsP (Sektorweise Speed-Up) (C)	k-Parameter vorkonditioniert
		Shear (nur sektorweise Vertikalextrapolation) (C)	3s-Bö Schätzung
		Kein Modell (Mast ist repräsentativ) (C)	Sicherheitsfaktor für COV > 0,15 (IEC61400-1 Ed. 4)
Anwender-Anmerkung			

### IEC-Limits

IEC-Klasse	Max Extremwind (Vref)
	[m/s]
IIIA	37,5

### Ergebnis (Grafik)



### Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	Mast	u50j	Luftdichtekorrektur	Sqrt(?) (Sicherheitsfaktor)
			[m/s]	[-]	[-]
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (77)	IIIA	A	29,4	1,00	1,00
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (78)	IIIA	A	29,4	1,00	1,00
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (79)	IIIA	A	29,4	1,00	1,00

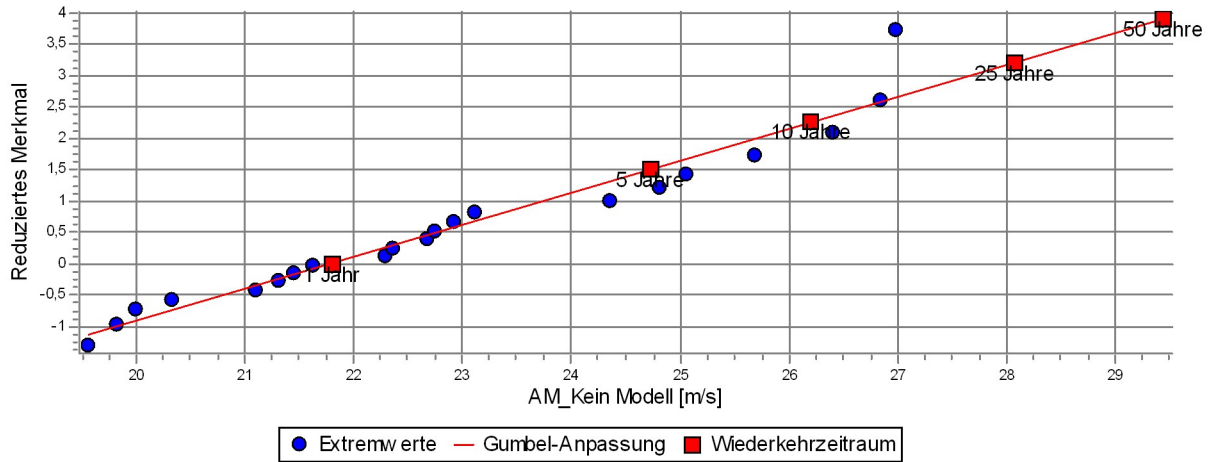
### SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: Enercon E-160/EP5-E3

Gumbel-Anpassung Kritischste WEA

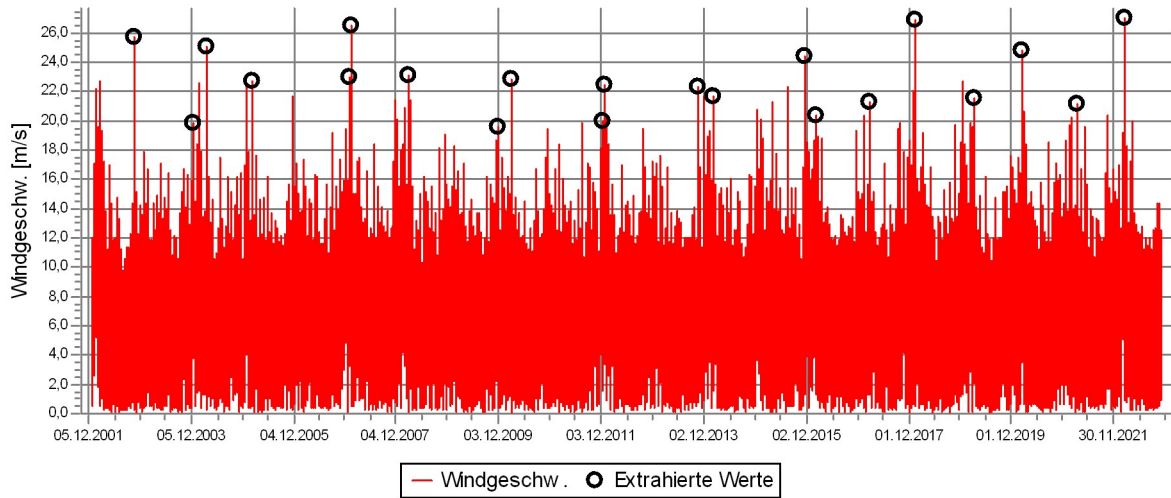
ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (77)

Mast: EMD-WRF Europe+ (ERA5)\_N51,78764\_E006,886963 (1)



### Extrahierte Werte

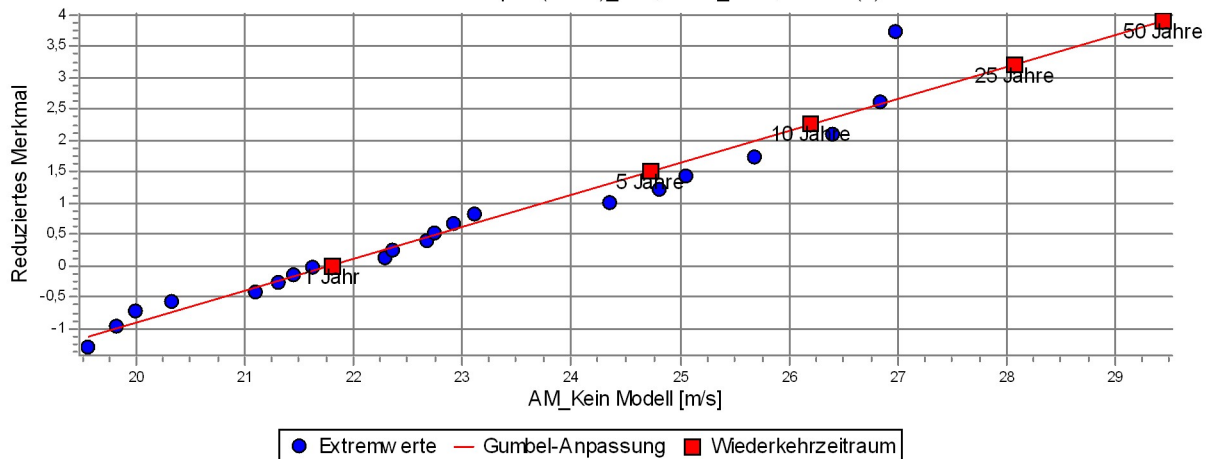
EMD-WRF Europe+ (ERA5)\_N51,78764\_E006,886963 (1)



### Gumbel-Anpassung

ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (78)

Mast: EMD-WRF Europe+ (ERA5)\_N51,78764\_E006,886963 (1)





## SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: Enercon E-160/EP5-E3

Gumbel-Anpassung

ENERCON E-160 EP5 E3 5560 160.0 !O! NH: 166,6 m (Ges:246,6 m) (79)

Mast: EMD-WRF Europe+ (ERA5)\_N51,78764\_E006,886963 (1)

