

GUTACHTEN ZUR GESAMTTURBULENZ

für den Standort

39365 DRUXBERGE

FÜR

3 WINDENERGIEANLAGEN

TYP NORDEX N149/5.X STE MIT 164,0 M NABENHÖHE

IM PARK MIT 70 WEITEREN VORHANDENEN WEA

AUFTRAGGEBER: Naturwind GmbH
Schelfstraße 35
D-19055 Schwerin

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

BERICHTSNUMMER: PK 2013052-GTG

DATUM: 15.06.2022

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	8
4	Nachweis der Topografischen Komplexität	10
5	Typenstatik und Eignung des Standortes gemäß DIBt /2/	12
6	Turbulenzannahmen gemäß DIBt /1/, /2/, /3/	12
7	Methodik zur Ermittlung Gesamtturbulenz für jeden WEA Standort	13
8	Ermittlung Gesamtturbulenz i_{eff} für jeden WEA Standort	16
9	Abweichungen von der Akkreditierung	18
10	Schlussbetrachtung	19
11	Literaturhinweise	21
12	Anlagen zum Gutachten der Gesamtturbulenz am Standort Druxberge	21

0 Einleitung

In der vorliegenden Berechnung wird der Standort Druxberge hinsichtlich der Gesamtturbulenz, entspricht I_{eff} gemäß /1/ und /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 /6/ durch die Fa. PLANKon bestimmt. Die Details zur Ermittlung der Umgebungsturbulenz sind diesem Gutachten zu entnehmen.

1 Standortbeschreibung und Anlagenkonfiguration

Am untersuchten Standort Druxberge, im Börde Kreis, Sachsen-Anhalt plant der Auftraggeber die Errichtung von 3 Windenergieanlagen vom Typ Nordex N149/5.X STE. Die Nabenhöhen betragen 164,0 m, der Rotordurchmesser misst 149,1 m und die Nennleistung beträgt 5.700 kW. Zudem befinden sich am Standort noch weitere 70 Windenergieanlagen.

Übersicht der vorhandenen und geplanten WEA:

Anzahl	Typ	Nabenhöhe	Rotor- durchmesser	Nennleistung	Status
		[m]	[m]	[kW]	
3	Nordex N49/5.X STE	164,0	149,1	5.700	geplant
12	Enercon E-66/18.70	98,0	66,0	1.800	vorhanden
1	Enercon E-70/E4	98,0	70,4	2.000	vorhanden
1	Enercon E-82/E2	138,4	82,0	2.300	vorhanden
13	Nordex N60	69,0	60,0	1.300	vorhanden
6	Nordex N62	69,0	62,0	1.300	vorhanden
37	Vestas V80	95,0	80,0	2.000	vorhanden

Der folgenden Tabelle können die Koordinaten (*System: UTM ETRS89, Zone 32*) der am Standort vorhandenen und geplanten WEA, sowie die jeweils nächste benachbarte WEA mit Entfernung entnommen werden:

WEA Nr.	Typ	Rechtswert	Hochwert	naheste WEA	Entfernung	Entfernung
		m	m		m	Durchmesser
WEA 01	N149/5.X	655.520	5.780.794	WEA 03 / N149/5.X	461	3,1
WEA 02	N149/5.X	656.330	5.780.800	WEA 7 / E-82/E2	394	2,6 - 4,8
WEA 03	N149/5.X	655.893	5.781.064	WEA 7 / E-82/E2	359	2,4 - 4,4
WEA 13	N60	653.379	5.780.305	WEA 9 / N60	334	5,6
WEA 58	V80	652.803	5.781.563	WEA 59 / V80	275	3,4
WEA 59	V80	653.026	5.781.403	WEA 58 / V80	275	3,4
WEA 61	V80	653.503	5.781.038	WEA 10 / N60	336	4,2 - 5,6
WEA 8	N60	653.863	5.780.377	WEA 9 / N60	337	5,6

WEA Nr.	Typ	Rechtswert	Hochwert	naheste WEA	Entfernung	Entfernung
		m	m		m	Durchmesser
WEA 9	N60	653.585	5.780.568	WEA 10 / N60	334	5,6
WEA 10	N60	653.313	5.780.760	WEA 9 / N60	334	5,6
WEA 12	N60	652.698	5.781.193	WEA 11 / N60	377	6,3
WEA 1	N60	652.691	5.780.305	WEA 2 / N60	349	5,8
WEA 2	N60	653.040	5.780.306	WEA 13 / N60	339	5,7
WEA 11	N60	653.005	5.780.975	WEA 10 / N60	375	6,3
WEA 60	V80	653.871	5.781.003	WEA 55 / V80	322	4,0
WEA 14	N62	655.595	5.781.851	WEA 15 / N62	303	4,9
WEA 15	N62	655.890	5.781.920	WKA 4 / V80	283	3,5 - 4,6
WEA 16	N62	656.298	5.781.997	WEA 5 / V80	275	3,4 - 4,6
WEA 17	N62	655.299	5.782.537	WEA 18 / N62	394	6,4
WEA 18	N62	655.693	5.782.523	WEA 17 / N62	394	6,4
WEA 19	N62	656.222	5.782.441	WKA 6 / V80	303	3,8 - 4,9
WEA 48	V80	657.222	5.782.247	WEA 49 / V80	385	4,8
WEA 49	V80	657.538	5.782.466	WEA 48 / V80	385	4,8
WEA 42	V80	656.384	5.782.902	WEA-28 / V80	269	3,4
WEA 43	V80	656.771	5.783.035	WEA 42 / V80	409	5,1
WEA 44	V80	656.529	5.782.673	WEA 45 / V80	256	3,2
WEA 45	V80	656.669	5.782.458	WEA 46 / V80	256	3,2
WEA 46	V80	656.807	5.782.243	WEA 45 / V80	256	3,2
WEA 47	V80	657.850	5.782.706	WEA-23 / V80	290	3,6
WEA 50	V80	658.153	5.783.164	WEA-24 / V80	273	3,4
WEA 51	V80	658.528	5.783.184	WEA 50 / V80	375	4,7
WKA 1	V80	655.383	5.782.127	WEA 14 / N62	348	4,3 - 5,6
WKA 2	V80	655.439	5.781.275	WEA 4 / V80	259	3,2
WKA 4	V80	655.958	5.781.645	WEA 15 / N62	283	3,5 - 4,6
WKA 5	V80	656.726	5.781.859	WEA 46 / V80	392	4,9
WKA 6	V80	656.082	5.782.709	WEA 19 / N62	303	3,8 - 4,9
WEA-20	V80	657.137	5.783.392	WEA-21 / V80	264	3,3
WEA-22	V80	657.519	5.783.023	WEA-23 / V80	257	3,2
WEA-27	V80	656.037	5.783.292	WEA-28 / V80	260	3,2
WEA-21	V80	657.331	5.783.213	WEA-20 / V80	264	3,3
WEA-23	V80	657.773	5.782.986	WEA-22 / V80	257	3,2
WEA-24	V80	658.015	5.783.400	WEA 50 / V80	273	3,4
WEA-25	V80	658.002	5.783.719	WEA-24 / V80	320	4,0
WEA-26	V80	658.139	5.784.014	WEA-25 / V80	325	4,1
WEA-28	V80	656.176	5.783.072	WEA-27 / V80	260	3,2
WEA 4	V80	655.493	5.781.528	WKA 2 / V80	259	3,2
WEA 5	V80	656.313	5.781.722	WEA 6 / V80	275	3,4
WEA 6	V80	656.438	5.781.477	WEA 5 / V80	275	3,4
WEA 7	E-82/E2	656.232	5.781.182	WEA 03 / N149/5.X	359	2,4 - 4,2
WEA 4	N60	654.353	5.779.672	WEA 5 / N60	378	6,3
WEA 5	N60	654.723	5.779.748	WEA 4 / N60	378	6,3
WEA 6	N60	654.550	5.780.099	WEA 5 / N60	391	6,5
WEA 53	V80	654.582	5.780.740	WEA 52 / N60	278	3,5
WEA 54	V80	654.861	5.780.487	WEA 53 / N60	377	4,7
WEA 55	V80	654.028	5.780.722	WEA 56 / V80	282	3,5
WEA 56	V80	654.233	5.780.527	WEA 55 / V80	282	3,5

WEA Nr.	Typ	Rechtswert	Hochwert	naheste WEA	Entfernung	Entfernung
		m	m		m	Durchmesser
WEA 57	V80	655.018	5.780.901	WEA 54 / V80	443	5,5
WEA 7	N60	654.162	5.780.215	WEA 56 / V80	320	4,0 - 5,3
WEA 3	N60	653.980	5.779.769	WEA 4 / N60	386	6,4
WEA 52	V80	654.374	5.780.925	WEA 53 / V80	278	3,5
WEA 29	E-66/18.70	655.248	5.785.014	WEA 32 / E-66	342	4,9
WEA 30	E-66/18.70	654.966	5.784.750	WEA 31 / E-66	224	3,2
WEA 31	E-66/18.70	655.004	5.784.529	WEA 30 / E-66	224	3,2
WEA 32	E-66/18.70	655.579	5.784.926	WEA 33 / E-66	255	3,6
WEA 33	E-66/18.70	655.541	5.784.674	WEA 32 / E-66	255	3,6
WEA 34	E-66/18.70	655.304	5.784.402	WEA 35 / E-66	293	4,2
WEA 35	E-66/18.70	655.498	5.784.183	WEA 34 / E-66	293	4,2
WEA 36	E-66/18.70	656.039	5.784.856	WEA 37 / E-66	220	3,1
WEA 37	E-66/18.70	656.000	5.784.639	WEA 36 / E-66	220	3,1
WEA 38	E-66/18.70	655.913	5.784.397	WEA 41 / E-70	214	3,0 - 3,1
WEA 39	E-66/18.70	656.110	5.784.169	WEA 38 / E-66	302	4,3
WEA 40	E-66/18.70	655.768	5.784.001	WEA 41 / E-70	215	3,0 - 3,1
WEA 41	E-70/E4	655.803	5.784.213	WEA 38 / E-66	214	3,0 - 3,1

Nur die vorhandenen WEA mit den Bezeichnungen WEA 7 (Typ Enercon E-82/E2) und WKA 2, WKA 4, WEA 4, WEA 54 und WEA 57 (Typ Vestas V80) sind gemäß DIBT /1/ und /2/ von der aktuellen Planung betroffen. Nur auf diese WEA wird deshalb noch in der weiteren Untersuchung eingegangen. Nur sie sind in 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.

Es wurde am 17.03.2022 durch Herrn B. Eng. Hennes Hake eine Ortsbegehung zur Aufnahme der Standortgegebenheiten durchgeführt.

Die Standortbeschreibung der Umgebung ist dem Turbulenzgutachten /6/ zu entnehmen.

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 /6/ wurde die Turbulenzintensität der Umgebung bei 15,0 m/s in Nabenhöhe wie folgt bestimmt:

Tabellarische Darstellung der Berechnungsergebnisse 164,0 m Nabenhöhe (NH)

Sektor	Berechnungshöhe	Umgebungsturbulenz	repräsentative Umgebungsturbulenz	Häufigkeit
	[m]	[%]	[%]	[%]
N	164,0	9,8	12,3	4,8
NNO	164,0	9,8	12,3	3,8
ONO	164,0	9,4	11,8	5,1
O	164,0	9,7	12,2	5,4
OSO	164,0	9,6	12,1	6,6
SSO	164,0	9,5	12,0	9,4
S	164,0	9,6	12,1	7,6
SSW	164,0	9,9	12,4	10,6
WSW	164,0	9,5	11,9	12,1
W	164,0	9,6	12,0	16,6
WNW	164,0	9,7	12,2	11,7
NNW	164,0	9,8	12,4	6,3
Mittel/Summe		9,6	12,1	100,0

Zur Bestimmung der repräsentativen Turbulenzintensität wird die ermittelte Umgebungsturbulenzintensität infolge möglicher Unsicherheiten um 20 % erhöht. Hiermit wird die Forderung des Ansatzes der 1,28-fachen Standardabweichung der Turbulenzintensität nach /2/ erfüllt.

Die Jahresmittelwindgeschwindigkeit an diesem Standort beträgt gemäß Berechnung PLANKon ca. 7,30 m/s in 164,0 m Höhe. Für die weiteren Berechnungen wurde die Häufigkeitsverteilung von PLANKon, die sich auf den verschiedenen Nabenhöhen leicht verändert, verwendet.

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

Die Hauptwindrichtung gemäß den Aussagen der durchgeführten Windfeldanalyse für den untersuchten Standort ist. Es ist die Windrichtung mit dem größten

Windaufkommen an dem Standort. Alle anderen Windrichtungen sind als Nebenwindrichtungen zu betrachten.

Die Windverteilung bzw. Häufigkeitsverteilung ist gemäß Berechnung der Fa. PLANKon wie folgt dargestellt:

Standort auf 164,0 m Nabenhöhe

Sektor	A-Parameter	Wind- geschwindigkeit	k-Parameter	Häufigkeit
	[m/s]	[m/s]		[%]
N	5,96	5,28	2,041	4,1
NNO	5,66	5,02	2,068	3,7
ONO	6,42	5,69	2,209	5,0
O	6,97	6,17	2,205	6,2
OSO	7,22	6,39	2,244	7,7
SSO	6,96	6,16	2,201	6,5
S	7,00	6,20	2,002	5,9
SSW	8,56	7,58	2,271	8,0
WSW	9,51	8,43	2,416	12,2
W	10,60	9,41	2,600	20,0
WNW	8,61	7,63	2,342	14,1
NNW	6,43	5,70	2,096	6,6
Mittel/Summe	8,24	7,30	2,096	100,0

Die ermittelte Luftdichte ρ auf der dargestellten Höhe beträgt gemäß Berechnung der Fa. PLANKon $1,212 \text{ kg/m}^3$ im Mittel.

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 unterschritten und diese 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 ist bei der vorliegenden WEA des Typs Nordex N149/5.X STE nach Herstellerangabe die Windzone S gemäß DIBt 2012. Gem. Angabe des Herstellers ergibt sich eine zulässige 50-Jahr-Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe $v_{b,0}(h)$ von 42,0 m/s.

Die Berechnung des Wertes für den Standort erfolgt über eine 20-jährige EMD-WRF Datenreihe, die in Ihrem Mittelwert über die errechnete mittlere Windgeschwindigkeit skaliert wurde. Da die EMD-WRF 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 auf Nabenhöhe am Standort skaliert wurden.

Der von der Software berechnete Wert für $v_{b,0}(h)$ beträgt 27,7 m/s. Bei einem Unsicherheitsaufschlag von 15 % für den möglichen Berechnungsfehler für die Ableitung von 10-min-Mittelwerten aus 1-h-Mittelwerten ergibt sich ein Wert von 31,9 m/s für $v_{b,0}(h)$. Diese Werte liegen unter den Auslegungswerten gemäß der WEA Klasse für diesen WEA-Typ.

Das Ergebnis für die betrachtete WEA ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

WEA Nr.	Typ	Turbulenzklasse	max. $v_{b,0}(h)$ zul.	ber. $v_{b,0}(h)$	$v_{b,0}(h)$ zzgl. U 15 %
		gem. /2/	m/s	m/s	m/s
WEA 1	N149/5.X STE	S	42,0	27,7	31,9
WEA 2	N149/5.X STE	S	42,0	27,7	31,9
WEA 3	N149/5.X STE	S	42,0	27,7	31,9
Mittelwert	-	-	-	27,7	31,9

4 Nachweis der Topografischen Komplexität

Für die Standorteignung muss gemäß /2/ 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 für die Turbulenzstruktur korrigiert. Durch die Korrektur wird der Umstand, dass die sich sonst meist maßgeblich aus der horizontale Komponente sich ergebende Umgebungsturbulenz im komplexen Gelände durch relevante Anteile aus der vertikalen Komponente erhöht werden kann.

Die folgende Tabelle zeigt die Grenzwerte der topographischen Komplexität gemäß /2/:

Radius / Abstand	Anzahl	Anpassungsart	Max. Neigung	Max. vertikale Abweichung	Max. zulässige Fläche mit Überschreitung der Abweichung
5xNH	1	Omni. (360°)	10°	0.3xNH	5xNH ²
10xNH	12	Sektor (30°)	10°	0.6xNH	5xNH ²
20xNH	12	Sektor (30°)	10°	1.2xNH	5xNH ²

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 maximal 100 m gewählt. Dies entspricht den Forderungen nach /2/. Alternativ ist auch nach /2/ ein maximales Raster von 1,5 x NH möglich. Das gewählte Raster wird durch die Auflösung der verwendeten Höhendaten abgedeckt.

Im Ergebnis wird der Komplexitäts-Index i_c gemäß /2/ für jede WEA-Position dargestellt. Ist der Index 1, so ist eine Anlagen-Position komplex, ist der Index 0, ist sie nicht komplex. Liegt der Index zwischen 0 und 1, deutet das auf einen teilweise komplexen Standort hin. Die diesbezüglichen Ergebnisberichte aus der verwendeten Software liegen im Anhang bei.

Tabelle mit Ergebnis der Geländekomplexitäten:

WEA – Nr.	01	02	03
i_c	0	0	0

Bei der untersuchten WEA ist der Komplexitäts-Index $i_c = 0$. Der Standort ist somit als nicht-komplex zu bewerten. Weitere Zuschläge zu den Turbulenzwerten sind nicht erforderlich.

5 Typenstatik und Eignung des Standortes gemäß DIBt /2/

Gemäß der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen von 2012 /2/ werden WEA für verschiedene Lastklassen zertifiziert. Die hier betrachteten WEA des Typs Nordex N149/5.X STE sind für die Windklasse S zertifiziert. Der Standort Druxberge befindet sich gemäß DIN 1055, *Lastannahmen*, DIN 4133, *Schornsteine aus Stahl* und Anhang B in DiBt-Richtlinie: „Richtlinie für Windenergieanlagen; Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“; Fassung März 2004 /1/, in der Windzone II (Börde-Kreis, Sachsen-Anhalt). Gem. Nachweis in Kap. 4, in nicht komplexem Gelände und erfüllt die Vorgabe der in der Typenstatik zulässigen Geländekategorie II gem. DIN EN 1991-1-4.

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

Gemäß der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen von 2012 /2/ ist der Einfluss benachbarter WEA auf Auswirkungen für die Turbulenzintensität zu untersuchen.

In der neueren Fassung der DIBt-Richtlinie von 2012 /2/ sowie der Fassung der DIBt-Richtlinie von 2004 /1/ werden WEA auf Basis einer windgeschwindigkeitsabhängigen Turbulenzintensität ausgelegt. 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 hier 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 werden die geplanten WEA und Teile der bestehenden WEA gemäß der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen von 2012 /2/ und der restliche Teil der bestehenden WEA auf Basis der DIBt-Richtlinie von 2004 /1/ 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 *)	Turbulenzklasse*)	Windzone
		m	%	m/s	gem. /2/	gem. /2/
WEA 01 - 03	N149/5.X STE	149,0	17,3	15,0	S	S
WEA 7	E-82/E2/2,3	82,0	18,0	15,0	IIA	4
WKA 2 & 4, WEA 4, 54 & 57	V80	80,0	18,0	15,0	IIA	2

*) 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.

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 $m = 10$

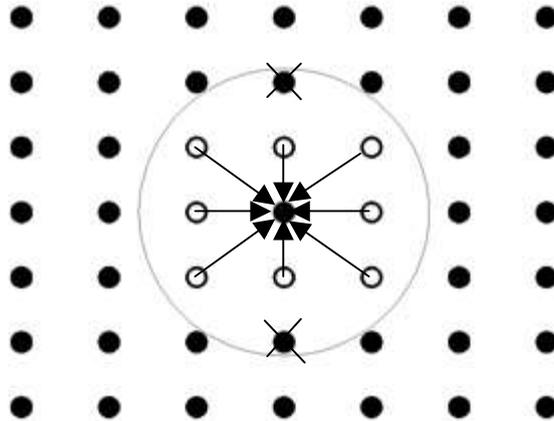
σ_1 die Standardabweichung der örtlichen Umgebungsturbulenz in Meter pro Sekunde

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 /6/ und /7/ 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 der nachfolgenden Tabelle:

Darstellung der Berechnungsergebnisse der geplanten WEA

WEA Nr.	DIBt 1993	analog Dokument: N149/5.7 Delta 50Hz NCV TCS164B-01 (N21)											
	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	33,2	25,3	21,9	20	18,8	17,9	17,3	16,9	16,5	16,2	15,9	15,7
gem. DIBt 1993 und/oder DIBt S; berechnete Werte i_{eff} in %													
gepl. WEA 01 - N149/5.X	-	17,3	16,0	15,3	14,8	14,5	14,3	14,2	14,0	13,9	13,8	13,7	13,7
gepl. WEA 02 - N149/5.X	-	19,3	18,0	17,1	16,5	16,0	15,7	15,4	15,1	14,9	14,7	14,5	14,3
gepl. WEA 03 - N149/5.X	-	24,5	21,9	20,3	19,2	18,3	17,7	17,1	16,7	16,3	16,0	15,7	15,5

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

Darstellung der Berechnungsergebnisse vorhandene WEA (DIBt 1993/DIBt 2012)

WEA Nr.	DIBt 1993	DIBt 2012												
	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	29,9	24,8	22,0	20,1	18,9	18	17,3	16,7	16,3	15,9	15,6	
gem. DIBt 1993 und/oder DIBt 2012 berechnete Werte I_{eff} in %														
vorh. WEA 7 - E-82/E2	-	22,8	20,9	19,7	18,8	18,2	17,7	17,2	16,9	16,6	16,3	16,1	15,9	

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

Darstellung der Berechnungsergebnisse vorhandene WEA (DIBt 1993/DIBt 2004)

WEA Nr.	DIBt 1993	DIBt 2004												
	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 %														
vorh. V80 - WKA 2	-	19,5	18,1	17,3	16,8	16,4	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4	15,3	15,2	
vorh. V80 - WKA 4	-	24,2	21,6	20,1	19,1	18,3	17,8	17,3	17,0	16,7	16,5	16,3	16,2	
vorh. V80 - WEA 4	-	19,4	18,2	17,5	17,0	16,6	16,4	16,1	16,0	15,8	15,7	15,6	15,5	
vorh. V80 - WKA 54	-	19,2	17,7	16,9	16,4	16,0	15,8	15,6	15,4	15,3	15,2	15,1	15,1	
vorh. V80 - WKA 57	-	21,1	19,3	18,2	17,5	17,0	16,6	16,3	16,1	15,9	15,7	15,6	15,5	

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

Die maximale mittlere Gesamtturbulenz bei Windgeschwindigkeiten 14-16 m/s ergibt sich an der vorhandenen WEA WKA 4 / Typ Vestas V80 mit 17,3 %.

Die geplante WEA 03 muss wegen geringer Überschreitungen der zulässigen Turbulenzwerte I_{eff} an der vorhandenen WEA WKA 4 ab 19,0 m/s (Bin 18-20 m/s) abgeschaltet werden. Die Abschaltung erfolgt nur bei Windanströmung in einem Gradbereich von 173,5° bis 202,9° ($188,2^\circ \pm 14,7^\circ$). Die Winkel beziehen sich auf den geographischen Norden, wobei Nord gleich 0° ist.

Die geplante WEA 03 muss wegen geringer Überschreitungen der zulässigen Turbulenzwerte I_{eff} an der vorhandenen WEA 7 ab 21,0 m/s (Bin 20-22 m/s) abgeschaltet werden. Die Abschaltung erfolgt nur bei Windanströmung in einem Gradbereich von 230,5° bis 273,1° ($251,8^\circ \pm 21,3^\circ$). Die Winkel beziehen sich auf den geographischen Norden, wobei Nord gleich 0° ist.

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 Abstände zwischen den betrachteten WEA möglich sind.

9 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

Es lag kein vollständiges Wind- und Ertragsgutachten gem. TR 6 /3/ sondern nur eine gutachtenreife Ertragsberechnung gem. TR 6 /3/ vor. Diese deckt sich jedoch zur Winddatenermittlung im Untersuchungsumfang und der Bearbeitungstiefe vollständig mit den Anforderungen der TR 6 /3/.

Abweichung gegenüber eigenen Festlegungen / Akkreditierungsanforderungen

Es lag kein vollständiges Wind- und Ertragsgutachten gem. TR 6 /3/ sondern nur eine gutachtenreife Ertragsberechnung gem. TR 6 /3/ vor. Diese deckt sich jedoch zur Winddatenermittlung im Untersuchungsumfang und der Bearbeitungstiefe vollständig mit den Anforderungen der TR 6 /3/.

10 Schlussbetrachtung

Für den Standort Druxberge sind für den Nachweis der Standsicherheit die gemäß /2/ notwendigen Parameter der Standorteignung und die Gesamtturbulenz I_{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 Berechnung PLANKon 7,30 m/s in 164,0 m Höhe. Die Ergebnisse der Windfeldberechnung /7/ und der Umgebungsturbulenzberechnung /6/ sind die Eingangswerte der Gesamtturbulenzberechnung. Zur Begutachtung des Standortes wurde von PLANKon eine Ortsbegehung durchgeführt.

Die Parameter der Standorteignung liegen nicht im Rahmen der Vorgaben gemäß /1/ /2/ /3/ und die Aufstellung ist mit den Auslegungsgrundlagen gemäß /1/ /2/ /3/ der betroffenen Standorte unter dem Gesichtspunkt der Gesamtturbulenz I_{eff} je WEA gemäß der vorliegenden Berechnung zur Zeit nicht als verträglich anzusehen.

Zur Sicherung der Standorteignung sind in Kapitel 8 Abschaltvorgaben errechnet worden. Die WEA besitzen aufgrund der geringen mittleren Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe am Standort auch noch Lastreserven. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei Durchführung einer detaillierten Lastrechnung im Vergleich zum verwendeten Verfahren eventuell partiell empfohlene Abschaltungen reduziert oder vermieden werden können.

Bei Anwendung der vorgeschlagenen Abschaltungen ist die Aufstellung mit der Typenstatik und den Auslegungsgrundlagen gemäß /1/ und /2/ der betroffenen Standorte unter dem Gesichtspunkt der Gesamtturbulenz I_{eff} je WEA gemäß der vorliegenden Berechnung als verträglich anzusehen.

Eine Gewähr für die sich tatsächlich einstellenden Turbulenzen kann aufgrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge nicht übernommen werden. Für die Berechnung der repräsentativen Turbulenz wurde die Umgebungsturbulenz um die 1,28-fache Standardabweichung I_{σ} (Ansatz $I_{\sigma} = 20\%$) erhöht.

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

Oldenburg, den 15.06.2022

Erstellt durch:


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

11 Literaturhinweise

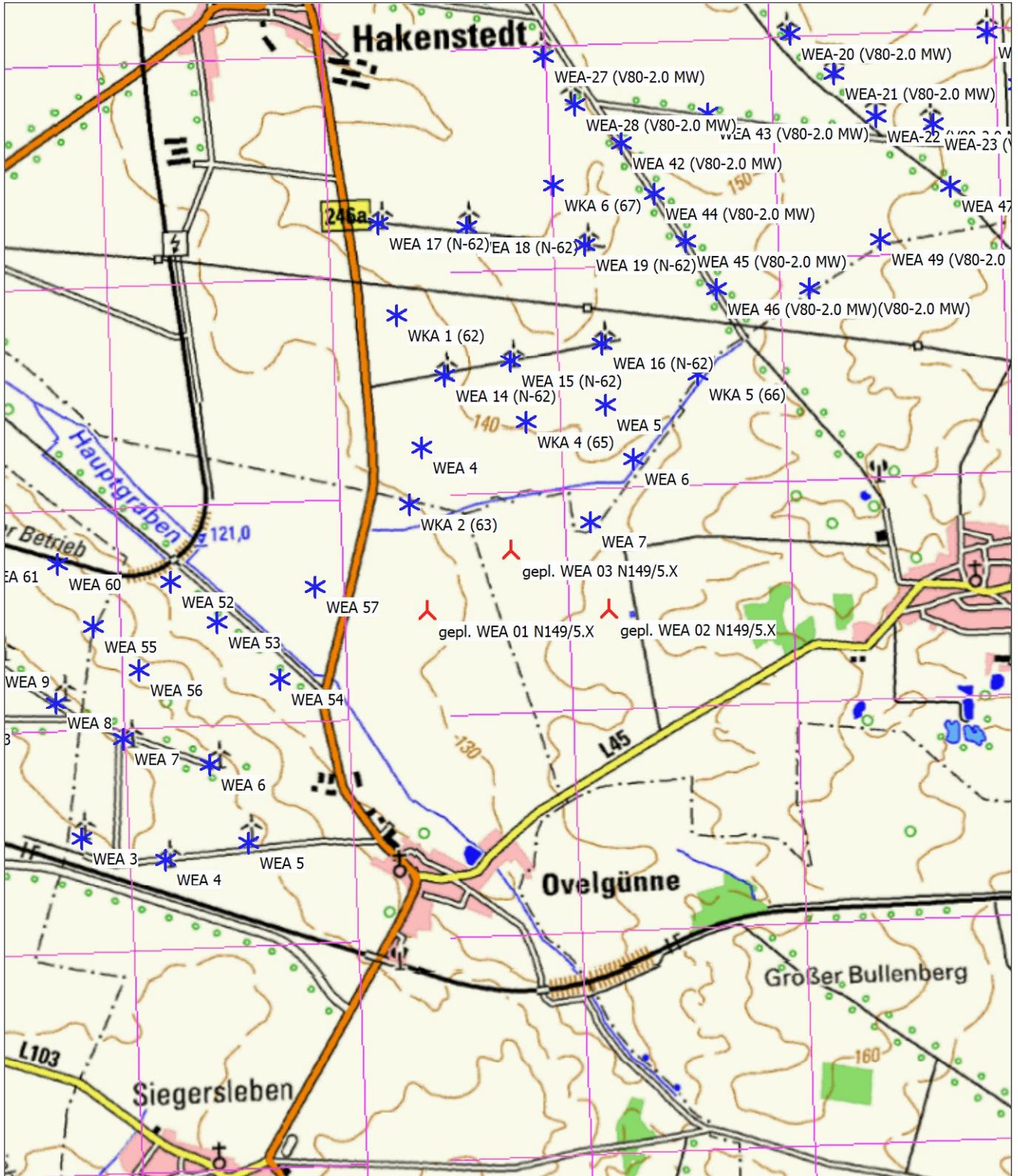
- /1/ Richtlinie des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) „Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung“ Fassung März 2004; DIBt, Berlin
- /2/ Richtlinie des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) „Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen 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 + A1:2010
- /6/ PLANKon, Turbulenzabschätzung am Standort Druxberge, Bericht Nr. PK 2013052-UTA vom 14.06.2022
- /7/ Technische Richtlinie Teil 6 (TR 6) „Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen“ der Fördergesellschaft für Windenergie, Revision 10 vom 26.10.2017

12 Anlagen zum Gutachten der Gesamtturbulenz am Standort Druxberge

- 1 Blatt Lageplan mit Darstellung der WEA
- 3 Blatt Berechnung des 50-Jahres Windes
- 1 Blatt Berechnung der Luftdichte
- 1 Blatt Berechnung Nachweis der topografischen Komplexität des Geländes i_c

PARK - Karte

Berechnung: 3 Nordex N149/5.X mit 164,0m Nh



Karte: TK50t , Maßstab 1:25.000, Mitte: Germany UTM ETRS89 Zone: 32 Ost: 2.655.960 Nord: 5.781.052

▲ Neue WEA

* Existierende WEA

SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: 3 Nordex 149/5.X STE mit 164,0m NH

Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 3 (2010)

Ergebnis: **OK**

Grundlagen der Prüfung

Verwendete Methode AM_Kein Modell (Qualität: A+C)
Methodendetails

Statistisches Modell Jährliches Maximum & Gumbel *)
Ausbreitungsmodell Kein Modell (Mast ist repräsentativ)

Verfügbare Methoden

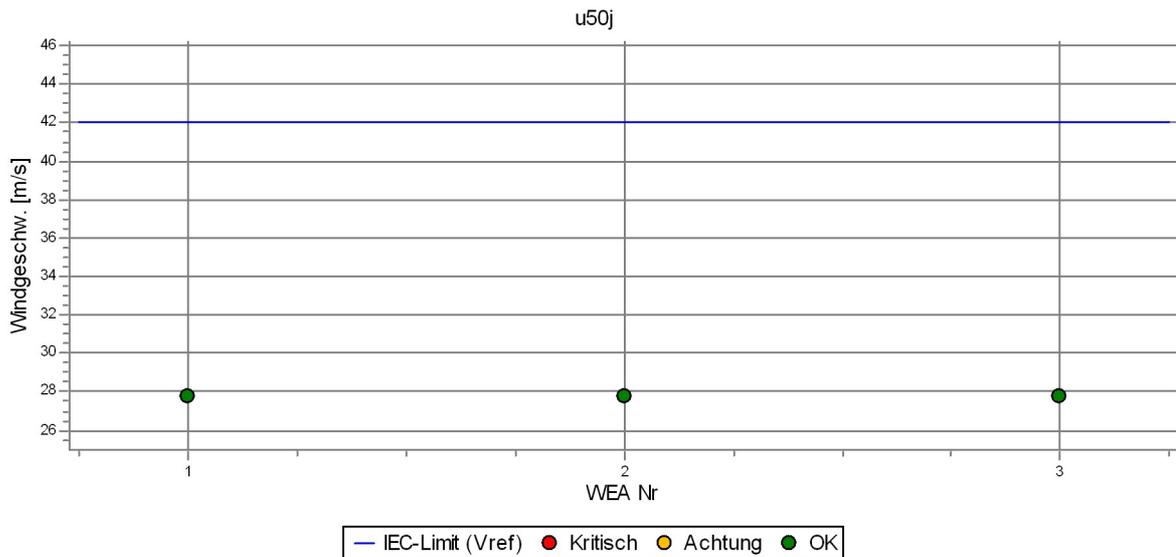
<u>Statistisches Modell</u>	<u>Ausbreitungsmodell</u>	<u>Weitere Einstellungen</u>
AM (A)	WASP-CFD / Flowres (erweiterte Mast-WEA Speed-ups) (C)	Luftdichtekorrektur
POT-N (B)	WEing (Sektorweise Mast-zu-WEA Speed-Up) (C)	Langzeit-Indexkorrektur
Weibull (C)	WASP (Sektorweise Speed-Up) (C)	k-Parameter vorkonditioniert
	Shear (nur sektorweise Vertikalextrapolation) (C)	3s-Bo 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]
S	42,0

Ergebnis (Grafik)

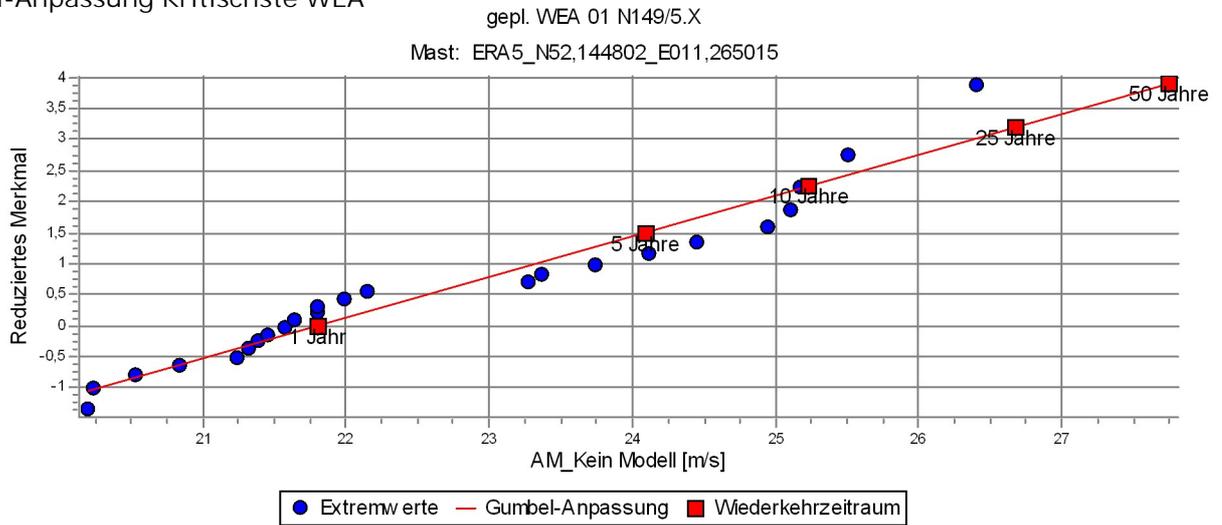


Ergebnis (Tabelle)

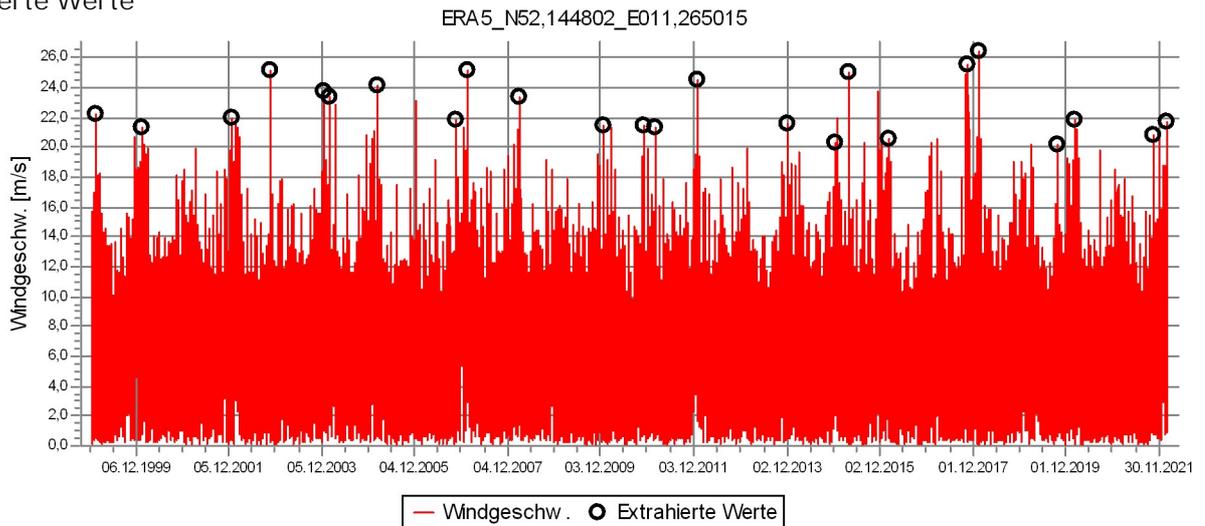
WEA	Klasse	Mast	u50j [m/s]
gepl. WEA 01 N149/5.X	S	A	27,7
gepl. WEA 02 N149/5.X	S	A	27,7
gepl. WEA 03 N149/5.X	S	A	27,7

SITE COMPLIANCE - Extremwind

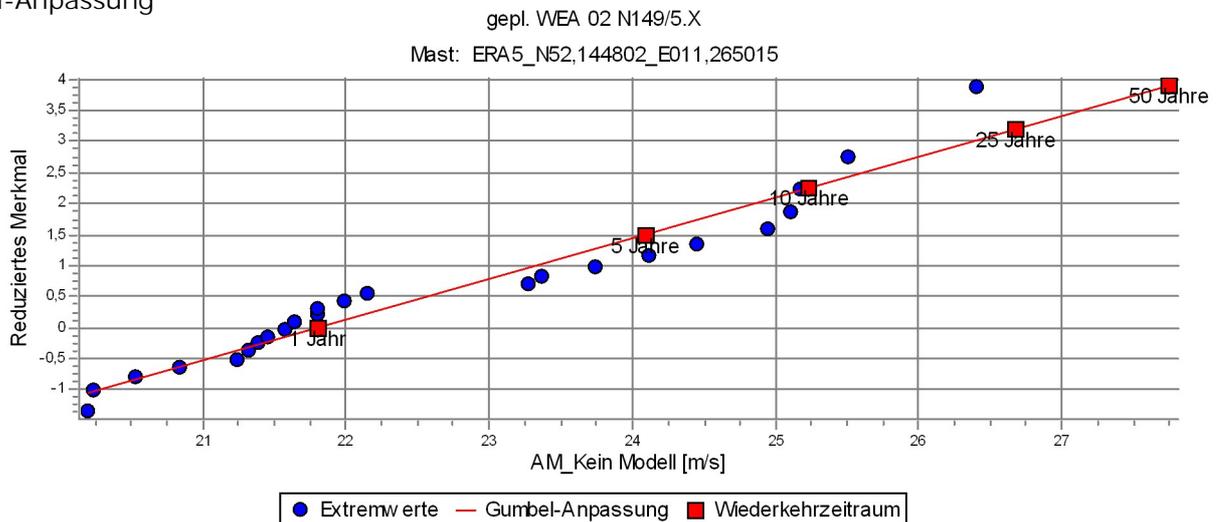
Berechnung: 3 Nordex 149/5.X STE mit 164,0m NH
Gumbel-Anpassung Kritischste WEA



Extrahierte Werte

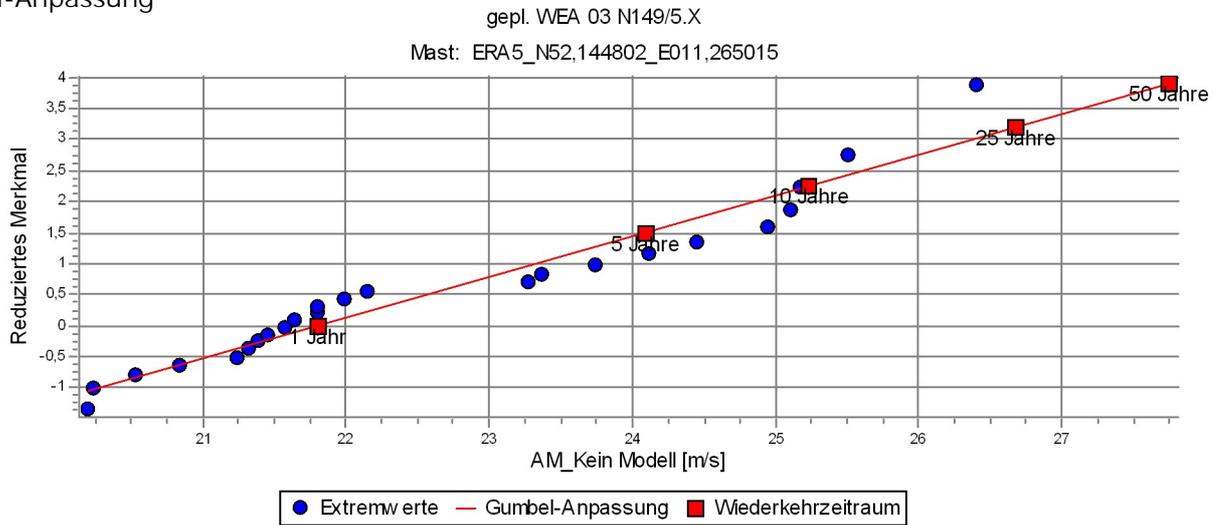


Gumbel-Anpassung



SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: 3 Nordex 149/5.X STE mit 164,0m NH
Gumbel-Anpassung



SITE COMPLIANCE - Luftdichte

Berechnung: 3 Nordex 149/5.X STE mit 164,0m NH
Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 3 (2010)

Ergebnis: **OK**

Grundlagen der Prüfung

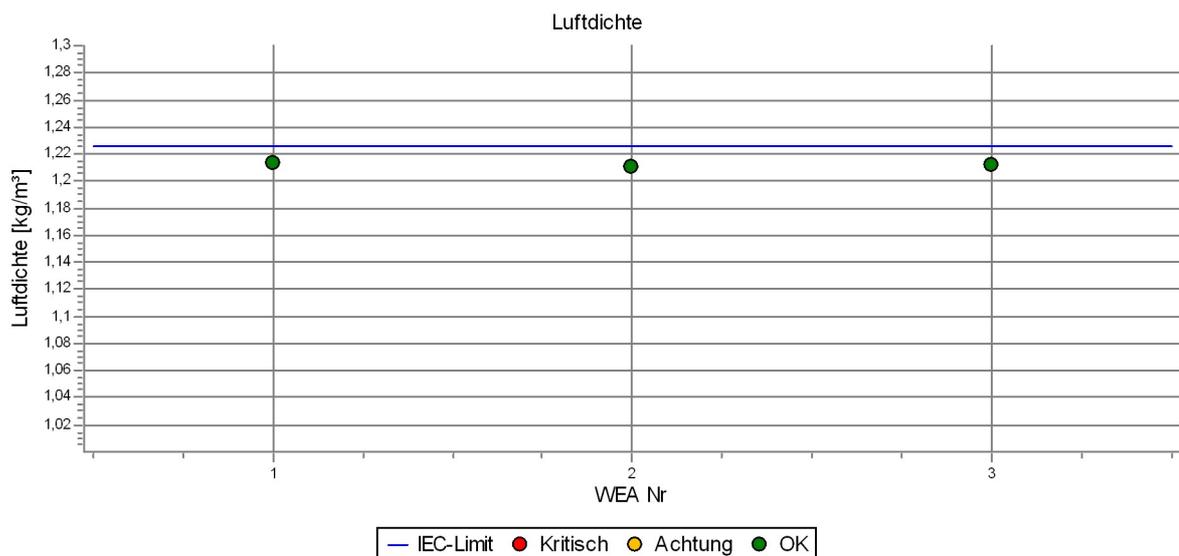
Verwendete Methode	Mast_ERA5_N52,144802_E011,265015	(Qualität: A/B)
Methodendetails	Standort- oder Messmast mit Temperaturdaten (+ Druck)	
	Mast: ERA5_N52,144802_E011,265015	
	Keine Korrektur der mittl. Windgeschw.	
Verfügbare Methoden	Mast	(Qualität: A/B)
	GHCN	(Qualität: C)
Anwender-Anmerkung		

IEC-Limits

Mittlere Luftdichte

[kg/m³]
Max 1,225

Ergebnis (Grafik)



Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	Mittlere Luftdichte [kg/m ³]	Höhenunterschied [m]	Mittlere Temperatur [°C]	Nabenhöhe	Mittlerer Druck [hPa]	Nabenhöhe
gepl. WEA 01 N149/5.X	S	1,213	143	8,7	7,8	978	
gepl. WEA 02 N149/5.X	S	1,211	159	8,7	7,7	976	
gepl. WEA 03 N149/5.X	S	1,212	147	8,7	7,7	977	

Basisdaten

Mittlere Temperatur	8,7 °C
Höhe über Meeresspiegel	150 m
Atmosph. Temperaturgradient	-0,0065 K/m
Molare Masse trockene Luft	0,02896442 kg/mol
Erdbeschleunigung	9,80665 m/s ²
Mittlerer Druck Meeresspiegel	1013,25 hPa
Luftdichte	1,230 kg/m ³

SITE COMPLIANCE - Komplexität Gelände

Berechnung: 3 Nordex 149/5.X STE mit 164,0m NH
Auslegungsnorm: IEC61400-1 ed. 3 (2010)

Ergebnis: **OK**

Grundlagen der Prüfung

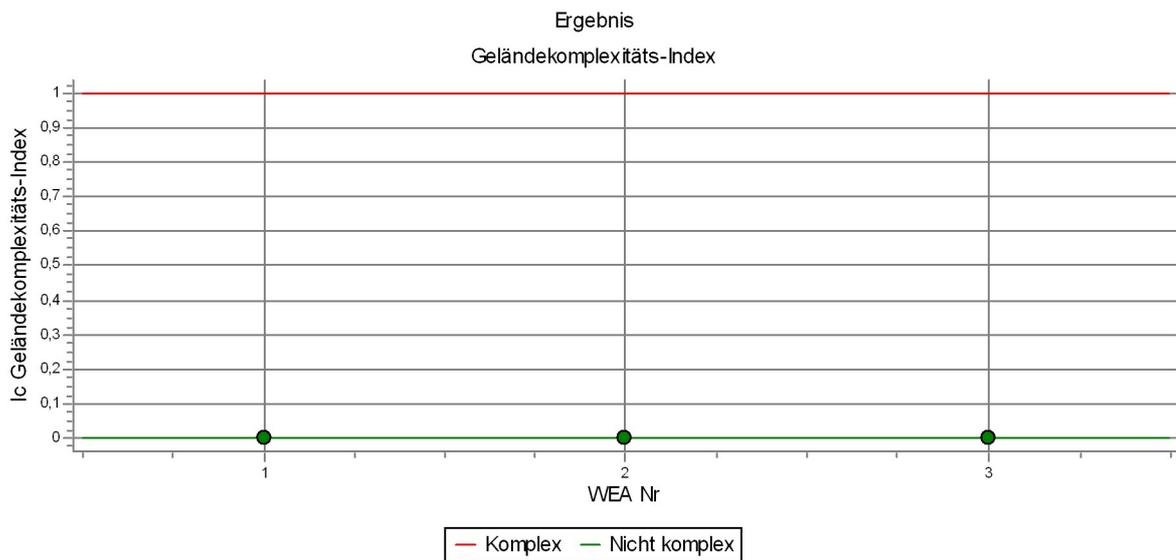
Verwendete Methode Aktives DHM
Methodendetails Höhenmodell (Linien- oder Höhenraster-Objekt)
Rasterweite: 100,00 m
Verfügbare Methoden Aktives DHM
Anwender-Anmerkung

IEC-Limits

Geländekomplexitäts-Index, I_c

Komplex $I_c = 1$
Teilweise komplex $0 < I_c < 1$
Nicht komplex $I_c = 0$

Ergebnis (Grafik)



Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	I_c	Energie komplexe Sektoren [%]
gepl. WEA 01 N149/5.X S	S	0,0	0,0
gepl. WEA 02 N149/5.X S	S	0,0	0,0
gepl. WEA 03 N149/5.X S	S	0,0	0,0