13 LASTEN - STANDSICHERHEIT

13.0 LASTEN – SITE COMPLIANCE 664

13.1 Einführung, Begriffserklärungen und Schritt-für-Schritt-Anleitung 664
13.1.1 Anforderungen der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 (2010)..... 664
13.1.2 Typische Anwendungsmöglichkeiten..... 665
13.1.3 Schritt für Schritt-Anleitung 666
13.2 Einstellungen der SITE COMPLIANCE Berechnung 667
13.2.1 Hauptteil 668
13.2.1 Messmastdaten 669
13.2.2 Layout (WEA) 670
13.2.3 Mast – WEA 671
13.2.4 Langzeitkorrektur 672
13.2.5 WAsP 673
13.2.6 WEng 674
13.3 Berechnungen - Hauptprüfungen..... 676
13.3.1 Komplexität Gelände 677
13.3.2 Extremwind..... 681
13.3.3 Effektive Turbulenz 689
13.3.4 Windverteilung..... 700
13.3.5 Neigung der Anströmung 703
13.3.6 Windshear 705
13.3.7 Luftdichte..... 708
13.4 Andere Prüfungen 713
13.4.1 Erdbebenrisiko..... 713
13.4.2 Temperaturbereich 716
13.4.3 Blitzrate 720
13.5 Alle neu berechnen 722
13.6 Export und Ergebnis in Datei 723
13.7 Ergebnisbericht 724
13.7.1 Hauptergebnis 724
13.7.2 WEA-Ergebnisse 725
13.7.3 Annahmen..... 726
13.7.4 Detailergebnisse und Einstellungen (für jede Prüfung) 727
13.8 Referenzen 729
Anhang I - Gumbel's Theory of Extremes and more..... 730
Anhang II - Frandsen Effective turbulence model..... 735
Anhang III - Critical, Caution & OK limits in SITE COMPLIANCE 738

13.0 LASTEN – SITE COMPLIANCE

13.1 Einführung, Begriffserklärungen und Schritt-für-Schritt-Anleitung

Ein vernünftiges Layout und einen passenden Anlagentyp auszuwählen gehören zu den wichtigsten Schritten bei der Entwicklung eines Windenergie-Projekts. Windenergieanlagen sind gemäß einer Reihe von klimatischen Anforderungsstandards, z.B. den IEC Klassen, für eine Laufzeit von 20 Jahren ausgelegt. Die römische Zahl definiert dabei die Windgeschwindigkeitsklasse I, II oder III und der Buchstabe steht für die Turbulenzklasse A, B oder C. IEC IA beschreibt damit die stärkste Auslegungsklasse, die schwächste ist IEC IIIC.

Die Errichtung einer ungeeigneten WEA an einem Standort einer höheren Beanspruchungsklasse kann zu vorzeitigem Verschleiß führen und ein Projekt ruinieren. Andererseits kann der Einsatz einer zu hoch klassifizierten WEA unnötig hohe Kosten verursachen, die das Projekt unfinanzierbar machen.

Das WindPRO-Modul SITE COMPLIANCE hilft dem Anwender bei der Entscheidung, welche Anlagenklasse für den Standort geeignet ist. Mit verschiedenen Methoden der IEC Klassifizierung unterstützt das Modul zudem dabei, die Risiken eines Projekts zu erkennen.

Die Anforderungen der WEA Auslegungs-Klassen sind festgelegt in der internationalen Richtlinie:

IEC 61400-1 ed. 3 (2010) “Wind turbines Part 1 - Design requirements” [1, 2]

Die meisten Abschnitte betreffen Designanforderungen der Standard-WEA-Klassen. Kapitel 11 beschreibt “assessment of a wind turbine for site-specific conditions”, also die Bewertung, ob ein Anlagentyp für die betreffenden Standortbedingungen und das Layout geeignet ist, mit anderen Worten: Ob “SITE COMPLIANCE“ vorliegt.

13.1.1 Anforderungen der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 (2010)

Tabelle 1, entnommen der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 (im Folgenden „IEC-Richtlinie“ genannt), definiert die grundlegenden Design-Parameter der oben beschriebenen Standard-Auslegungsklassen.

WEA Klasse		**I**	**II**	**III**	**S**
	V_{ref} [m/s]	50,0	42,5	37,5	Werte sind
A	**I_{ref} [-]**	0,16			vom
B	**I_{ref} [-]**	0,14			Hersteller
C	**I_{ref} [-]**	0,12			anzugeben

Abb. 1. Tabelle 1 aus IEC 61400-1 ed. 3 (2010)

Abschnitt 11 der IEC-Richtlinie nennt sieben Hauptparameter zur Standort-Beurteilung. Der erste Parameter beschreibt die topographische Komplexität des Terrains, die anderen sechs Parameter betreffen die Windverhältnisse am Standort. Die sieben Hauptparameter sind:

- Topographische Komplexität des Terrains
- Extrem-Wind
- Effektive Turbulenz
- Windgeschwindigkeitsverteilung
- Windgradient (Windshear)
- Neigung der Anströmung
- Luftdichte

Die Richtlinie beinhaltet zudem einige zusätzliche Umgebungsbedingungen, die bewertet werden sollen. Hiervon wurden drei Parameter ausgewählt, die gelegentlich kritisch sein können und sich für eine Abschätzung eignen. Diese Parameter, bezeichnet als „Andere Prüfungen“ sind:

- Erdbebenrisiko
- Blitzrate
- Extremer und normaler Temperaturbereich

Die derzeitig noch nicht erfassten Parameter sind: „Vereisung, Hagel und Schnee“, „Feuchtigkeit“, „Sonneneinstrahlung“, „chemisch aktive Substanzen“ und „Salzhaltigkeit“.

13.1.2 Typische Anwendungsmöglichkeiten

SITE COMPLIANCE kann mit unterschiedlichen Eingangsdaten und externen Berechnungsmodellen verwendet werden. Es gibt drei Hauptanwendungsarten:

(I) Mast und Strömungsmodell
(II) Nur Messmastdaten
(III) Keine Messmastdaten

Die volle Funktionalität wird erreicht, wenn sowohl Messmastdaten mit mehreren Messhöhen für das Projekt vorliegen als auch die externen Berechnungsmodelle WAsP[1] und WAsP Engineering (ab Version 3.0, im folgenden „WEng“)[2] verfügbar sind (eigene Lizenzen werden benötigt).

Unter Verwendung von WAsP kann das Modul in Modus I (Hauptmodus) arbeiten. In diesem Modus ist eine WEng-Lizenz nicht zwingend notwendig, ermöglicht aber weitere Berechnungs-Optionen, die die Qualität der Ergebnisse verbessern können.

Minimale Anforderungen gelten in Modus II **Nur Messmastdaten**. Dieser Modus benötigt lediglich die Daten eines Messmasts am Standort mit verschiedenen Messhöhen und keine externen Software-Lizenzen, um die Hauptprüfungen durchzuführen.

Modus III, **Keine Messmastdaten**, findet Anwendung, wenn kein Messmast am Standort errichtet ist, es aber viele WEA in der Gegend gibt, wie in Deutschland oder Dänemark. Dieser Modus erfordert gültige Lizenzen für WAsP und WEng sowie regionale Windstatistiken (Windatlas- / lib-Datei) um alle sieben IEC Hauptprüfungen durchzuführen.

In Modus I gibt es zwei Einstellungsmöglichkeiten für WAsP: **Windstatistik mit Langzeitbezug** und **Messmastdaten**. Die erste Möglichkeit findet Verwendung, wenn per MCP für jeden Messmasten am Standort eine Windstatistik mit Langzeitbezug erstellt wurde. Dadurch wird erreicht, dass die Ergebnisse dieser WAsP-Berechnung denen der PARK-Berechnungen entsprechen, die auf diesen Windstatistiken basieren.
Die zweite Möglichkeit (**Messmastdaten**) beinhaltet die STATGEN-Berechnung für jeden Messmast und vereint so beide Schritte der WAsP-Prozedur unter Verwendung der Messmastdaten. Diese Option bietet auf einem zusätzlichen Register die Möglichkeit einer vereinfachten Langzeitkorrektur im SITE COMPLIANCE-Modul, wie es in der IEC-Richtlinie gefordert ist, wenn die Windmessdaten nicht langzeit-repräsentativ sind.

[1] http://www.wasp.dk/Products/WAsP.aspx
[2] http://www.wasp.dk/Products/WEng.aspx

13.1.3 Schritt für Schritt-Anleitung

Wählen Sie den Modus:

(I) Mast und Strömungsmodell
(II) Nur Messmastdaten
(III) Keine Messmastdaten

Modus I (Mast und Strömungsmodell)

- Wählen Sie das gewünschte **Strömungsmodell**
- Wählen Sie die WAsP-Option **Windstatistik mit Langzeitbezug** oder **Messmastdaten**
- Definieren Sie die **WEA-Auslegungsklasse** - wenn nicht bereits individuell in den WEA-Eigenschaften definiert
- Wählen Sie den / die **Standortmasten** mit **Haupthöhe** und **Höhen für die Shear-Berechnung**
- Wählen Sie einen Mast mit Zweck **Langzeit-Referenz**, wenn ein solcher verfügbar ist
- Definieren Sie das **WEA-**Layout
- Definieren Sie die **Mast – WEA** Zuordnung, wenn mehrere Masten vorhanden sind
- In WAsP **Messmastdaten**-Modus: Berechnen und evaluieren Sie die **Langzeitkorrektur**
- Wählen Sie (ein) *Terraindatenobjekt*(e) (Zweck STATGEN) und starten Sie die **WAsP Berechnung**
- Wählen Sie ein *Terraindatenobjekt* und starten Sie die **WEng-Berechnung**, wenn Sie über eine Lizenz verfügen
- Register **Berechnungen:** Wählen Sie die relevanten **Hauptprüfungen** und **Andere Prüfungen**
- Klicken Sie **Bearb.** für jede gewählte Berechnung, ändern Sie die **Einstellungen**, wenn nötig und drücken Sie **Berechnen**
- Prüfen Sie die Ergebnisse jedes Parameters und das Gesamtergebnis aller Prüfungen
- Drücken Sie OK, überprüfen Sie die Berichte und exportieren Sie Ergebnisse mit „Ergebnis in Datei“

Modus II (Nur Messmastdaten)

- Definieren Sie die **WEA-Auslegungsklasse** – wenn nicht bereits individuell in den WEA-Eigenschaften definiert
- Wählen Sie den / die **Standortmaste**n mit **Haupthöhe** und **Höhen für die Shear-Berechnung**
- Wählen Sie einen Mast mit Zweck **Langzeit-Referenz**, wenn ein solcher verfügbar ist
- Definieren Sie das **WEA-**Layout
- Definieren Sie die **Mast – WEA** Zuordnung, wenn mehrere Masten vorhanden sind
- Berechnen und evaluieren Sie die **Langzeitkorrektur**
- Register **Berechnungen**: Wählen Sie die relevanten **Hauptprüfungen** und **Andere Prüfungen**
- Klicken Sie **Bearb.** für jede gewählte Berechnung, ändern Sie die **Einstellungen**, wenn nötig und drücken Sie **Berechnen**
- Prüfen Sie die Ergebnisse jedes Parameters und das Gesamtergebnis aller Prüfungen
- Drücken Sie OK, überprüfen Sie die Berichte und exportieren Sie Ergebnisse mit „Ergebnis in Datei“

Modus III (Keine Messmastdaten)

- Wählen Sie das gewünschte **Strömungsmodel**l
- Definieren Sie die **WEA-Auslegungsklasse** – wenn nicht bereits individuell in den WEA-Eigenschaften definiert
- Definieren Sie das **WEA-**Layout
- Wählen Sie (ein) *Terraindatenobjekt*(e) (Zweck STATGEN) und starten Sie die WAsP Berechnung
- Wählen Sie ein *Terraindatenobjekt* und starten Sie die WEng-Berechnung
- Register **Berechnungen**: Wählen Sie die relevanten **Hauptprüfungen** und **Andere Prüfungen**
- Klicken Sie **Bearb.** für jede gewählte Berechnung, ändern Sie die **Einstellungen**, wenn nötig und drücken Sie **Berechnen**
- Prüfen Sie die Ergebnisse jedes Parameters und das Gesamtergebnis aller Prüfungen
- Drücken Sie OK, überprüfen Sie die Berichte und exportieren Sie Ergebnisse mit „Ergebnis in Datei“

13.2 Einstellungen der SITE COMPLIANCE Berechnung

Bevor Sie mit der SITE COMPLIANCE-Berechnung beginnen, stellen Sie sicher, dass Sie eine lizenzierte Version des SITE COMPLIANCE-Moduls besitzen (grüner Pfeil vor Modulname) und dass Ihr Projekt in WindPRO 2.9 die folgenden Daten / Lizenzen beinhaltet:

1. Ein Layout mit WEA-Objekten
2. Ein digitales Höhenmodell (Linien- oder Höhenraster-Objekt)

3A. Ein Messmast mit verschiedenen Messhöhen (alle sorgfältig geprüft und auf eine Anzahl von vollen Jahren bereinigt)

und / oder

3B. Ein Terraindatenobjekt (mit Windstatistik)

Eine gültige WAsP Lizenz

Eine gültige WEng 3.0 Lizenz

Die folgenden Abschnitte 13.2.1 – 13.2.6 beschreiben die wichtigsten Schritte zu den Einstellungen einer SITE COMPLIANCE-Berechnung Register für Register. Bitte beachten Sie, dass nicht jedes Register in jedem Berechnungsmodus verfügbar ist.

13.2.1 Hauptteil

Im Register **Hauptteil** des SITE COMPLIANCE-Moduls sind die Grundeinstellungen des zu verwendenden Modus zu treffen unter **Standort- und Layoutcheck mit**. Die passende Auswahl hängt ab von den verfügbaren Messmastdaten und Lizenzen für die Strömungsmodelle WAsP und WEng.

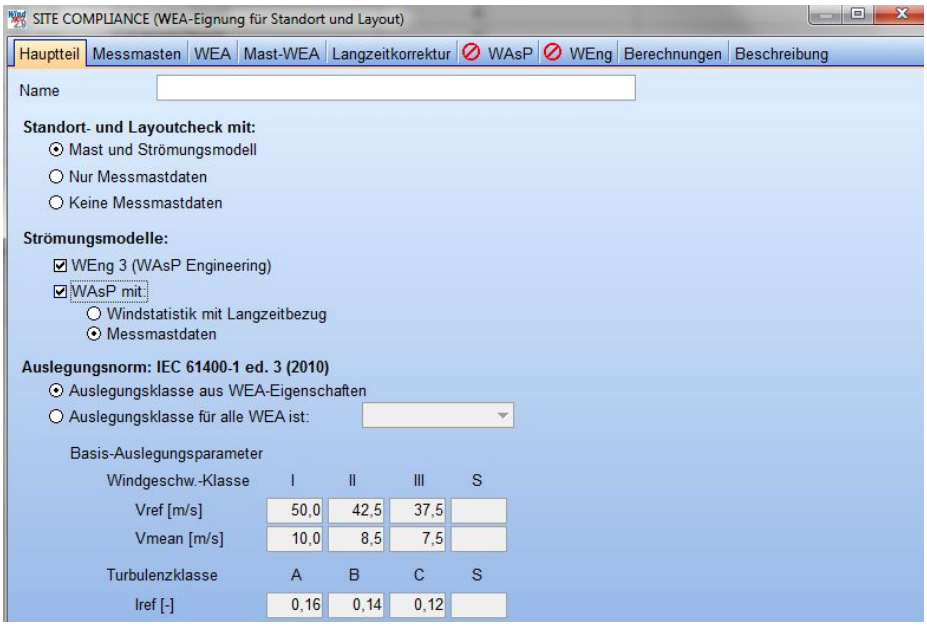


Abb. 2. Grundeinstellungen im SITE COMPLIANCE-Modul

Die **Strömungsmodelle** mit gültigen Lizenzen sollten ausgewählt werden. Bitte beachten Sie, dass als Grundvoraussetzung für die Verwendung von WEng eine Installation der Software mit gültiger Lizenz vorhanden sein muss. Die Gültigkeit der Lizenz wird regelmäßig online überprüft.

Wenn keine individuelle Auslegungsklasse der WEA in den einzelnen Objektdaten angegeben wurde, kann die Option **Auslegungsklasse für alle WEA** angewendet und eine passende Klasse definiert werden. Die Grundparameter jeder Auslegungsklasse sind in der Tabelle unter der Auswahl aufgeführt. Wenn *Klasse S* ausgewählt wird, werden die leeren Felder für Klasse S in der Übersichtstabelle editierbar und müssen mit dem passenden Eintrag gefüllt werden.

13.2.1 Messmastdaten

Im Register **Messmasten** müssen zunächst die relevanten **Standortmasten** ausgewählt werden. Anschließend erweitert sich die Ansicht und die **Haupthöhe** wird ausgewählt. Auf dieser Höhe basieren alle IEC- und WAsP-Berechnungen, wenn der Modus **Nur Messmastdaten** gewählt ist. Wenn Datensätze in mehreren Messhöhen vorliegen, müssen die Höhen ausgewählt werden, die zusätzlich zur Haupthöhe zur **Shear-Berechnung** (Veränderung der Winddaten über die Höhe) verwendet werden sollen.

Bitte beachten Sie rot markierte Felder wie **Messintervall, Dauer** oder **Verfügbarkeit**, hier könnten Probleme auftreten, da die IEC-Richtlinie 10-minütige Messintervalle für Standortmessungen fordert und diese Daten nicht jahreszeitlich gewichtet sein dürfen, d.h. es dürfen nur volle Jahre der Messung verwendet werden.

Wenn vorhanden, können hier auch die **Langzeit-Referenz**-Daten gewählt werden. Hierfür muss nach dem Anklicken der Zweck auf **Langzeit-Referenz** gesetzt werden. Zudem ist noch ein dritter Zweck einstellbar: **Klimadaten** wird genutzt, wenn am Standortmast keine Temperaturmessung durchgeführt worden ist.

SITE COMPLIANCE (WEA-Eignung für Standort und Layout)

Hauptteil | Messmasten | WEA | Mast-WEA | Langzeitkorrektur | Berechnungen | Beschreibung

Name	Zweck	Haupt-höhe	für Shear-Berechnung (min. 2 Höhen)	Mess-intervall [min]	Dauer (aktiviert) [Jahre]	Verfügb. (aktiviert) [%]	Anfang	Ende
Mast 1	Standortmast							
48,0m -		⊙	☑	10,0	1,0	100,0	01.11.2001 00:10	01.11.2002 00:00
Mittlere Windgeschw.								
Windrichtung								
Turbulenzintensität								
47,0m -		○	☑	10,0	1,0	100,0	01.11.2001 00:10	01.11.2002 00:00
Mittlere Windgeschw.								
Windrichtung								
Turbulenzintensität								
24,0m -		○	☑	10,0	1,0	100,0	01.11.2001 00:10	01.11.2002 00:00
Mittlere Windgeschw.								
Windrichtung								
Turbulenzintensität								
Temperatur								
MERRA	Langzeit-Refe							
50,0m -		⊙		60,0	30,0	99,9	01.01.1982 01:00	31.12.2011 23:00
Mast 2	Standortmast							
50,0m -		⊙	☐	10,0	2,2	95,1	14.01.1994 18:30	09.04.1996 19:10

*Abb. 3. Register **Messmasten** mit Standortmasten und **Langzeit-Referenz***

13.2.2 Layout (WEA)

Im Register **WEA** werden die relevanten WEA ausgewählt. Im SITE COMPLIANCE-Modul werden die IEC-Prüfungen nur für *Neue WEA* (rotes Kartensymbol) durchgeführt. *Existierende WEA* (blaues Kartensymbol) werden, wenn sie ausgewählt wurden, in den relevanten Berechnungen berücksichtigt (z.B. Nachlaufeffekte), es werden jedoch keine individuellen Ergebnisse angezeigt. Wählen Sie den / die Layer mit **Neuen WEA** und passen im unteren Registerbereich die entsprechende Auswahl an, wenn nicht alle WEA verwendet werden sollen.

Ganz unten auf der Seite ist einstellbar, ob die Beschreibung oder die Anwenderkennung in den Tabellen, Grafiken und Berichten erscheinen soll.

Die Verwendung von WEA in *schallreduziertem Modus* sollte vermieden werden, da die Windgeschwindigkeit bei Nennleistung aus der Leistungskennlinie entnommen wird und Teil der IEC-Hauptprüfungen ist. Dies könnte bei Leistungskennlinien in reduziertem Modus ungünstig sein.

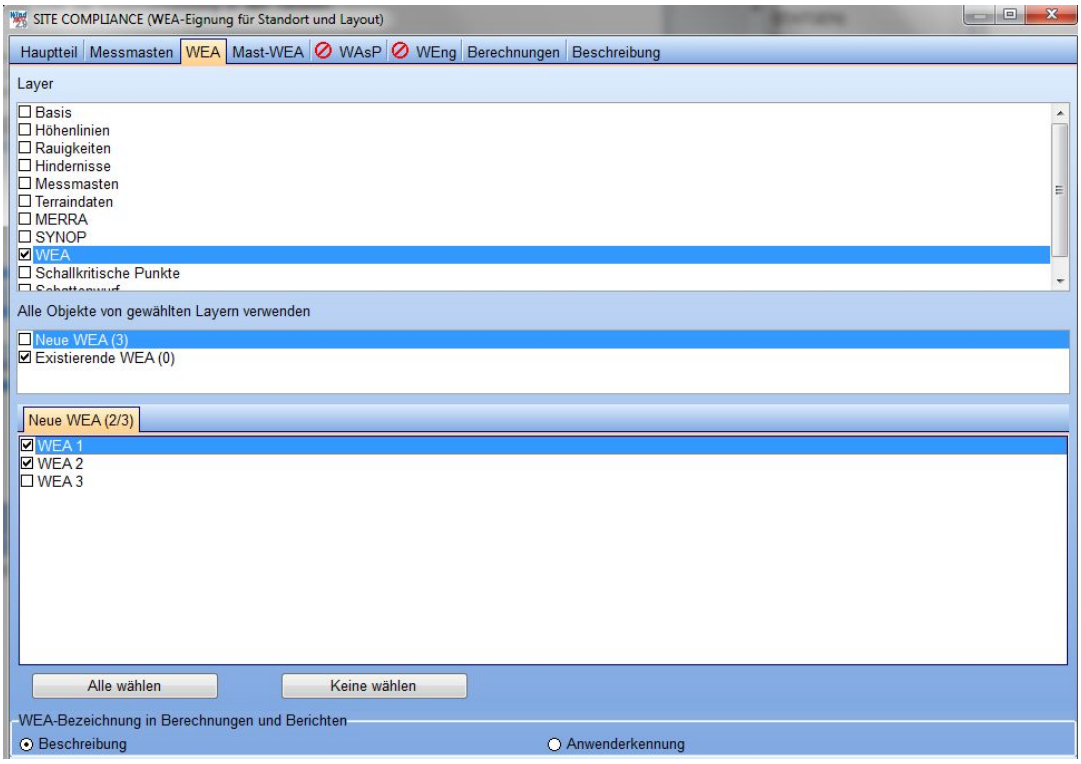


*Abb. 4. Register **WEA**, in dem die relevanten WEA (Neue WEA) gewählt werden*

13.2.3 Mast – WEA

Dieses Register ist nur in *Modus I* und *II* verfügbar. Hier erfolgt die Zuordnung welcher Windmessmast für welche WEA genutzt werden soll. Die Standardeinstellung wählt für jede WEA den nächstgelegenen Messmast. Dennoch ist eine **manuelle Zuordnung** möglich, wenn mehrere Messmasten vorhanden sind.

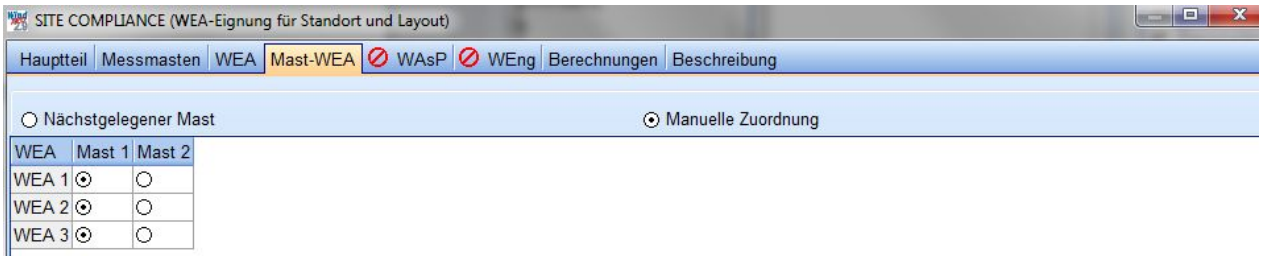


*Abb. 5. Register **Mast-WEA** - für jede WEA sollte der geeignete Mast ausgewählt werden*

13.2.4 Langzeitkorrektur

Dieses Register ist nur verfügbar in *Modus I* und *II* und wenn im **Hauptteil** bei WAsP **Messmastdaten** angehakt ist. Nur dann ist eine Langzeitkorrektur sinnvoll und kann direkt in SITE COMPLIANCE durchgeführt werden.

Dieses Register bietet eine Alternative zur üblichen Erstellung von langzeitkorrigierten Windstatistiken für jeden Mast via MCP und Nutzung der WAsP-Option **langzeitkorrigierte Windstatistik** im Hauptteil.

Die Langzeitkorrektur in SITE COMPLIANCE ergänzt die Methodik des MCP-Moduls durch einen Wind*geschwindigkeits*-Index, während MCP auf einem Wind*energie*-Index basiert. Dies ist darin begründet, dass der Fokus von SITE COMPLIANCE auf den Lasten und nicht auf der Energieberechnung liegt.

Wählen Sie **Keine Korrektur – Daten sind repräsentativ**, werden keine weiteren Eingaben benötigt. Wenn im Register **Messmasten** eine **Langzeit-Referenz** gewählt wurde, und diese mit den Daten der Standortmasten gut korreliert, kann die **Windgeschwindigkeits-Indexkorrektur** gewählt werden. Wird diese gewählt, wird das Feld **Korrekturen berechnen** aktiviert und muss angeklickt werden. Prüfen Sie das Ergebnis für jeden vorhandenen Standortmast in Bezug auf **Index** und **R²** (Korrelations-Koeffizient). Die Grafik wird für die ausgewählten Messreihen dargestellt.

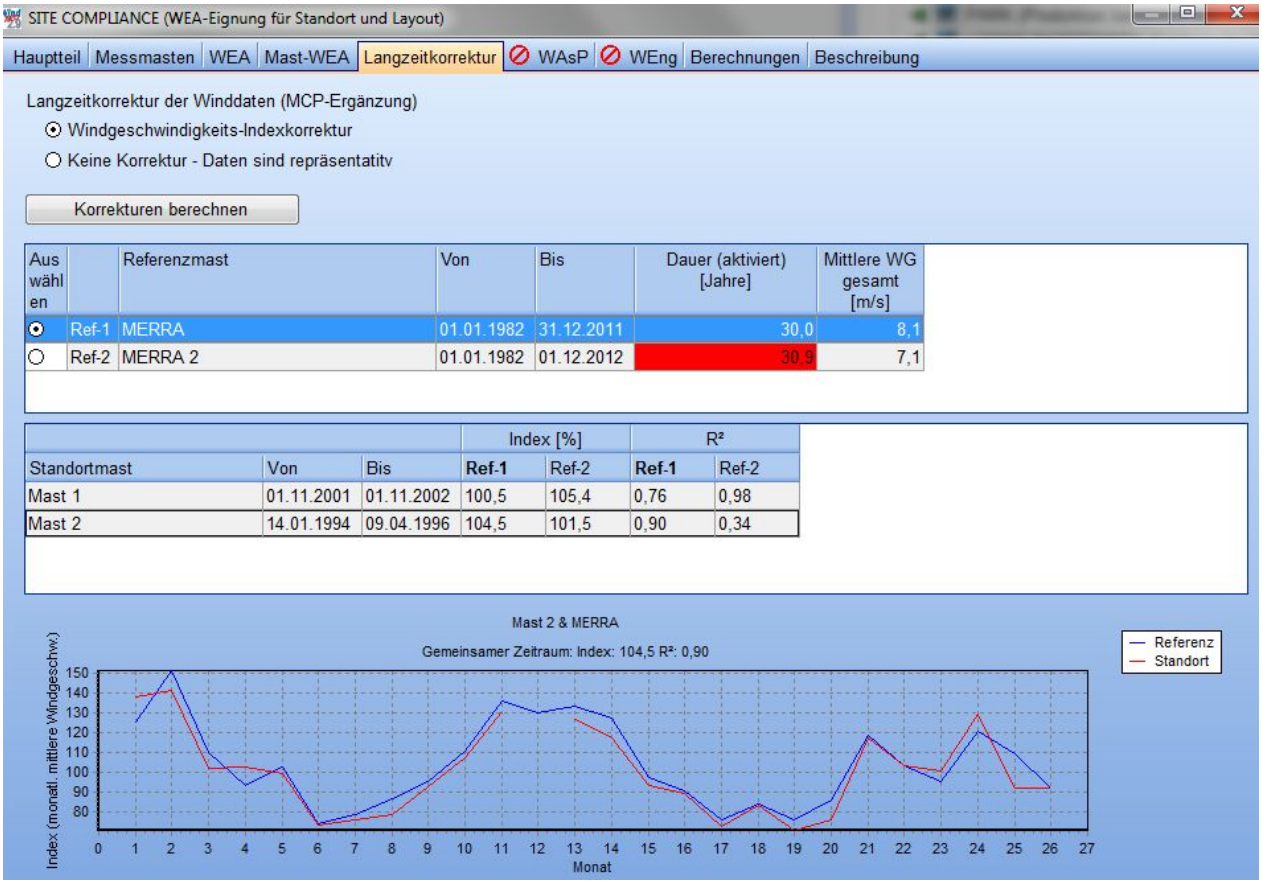


*Abb. 6. Register **Langzeitkorrektur***

Ein Index von 100% bedeutet, dass der Messzeitraum langzeit-repräsentativ ist. Bei Werten darüber oder darunter sollte die am Standort gemessene mittlere Windgeschwindigkeit mit dem entsprechenden Wert (Kehrwert des Index) korrigiert werden, um das langjährige Windklima darzustellen.

Der Index wird aus den Langzeit-Referenzdaten berechnet. Hierfür wird das Verhältnis der mittleren Windgeschwindigkeit des überlappenden Messzeitraumes zur mittleren Windgeschwindigkeit des kompletten Messzeitraumes gebildet. Die Korrelations-Koeffizienten basieren auf den mittleren Windgeschwindigkeiten der überlappenden Messperiode, welche auch in der Grafik dargestellt sind.

13.2.5 WAsP

Das Register **WAsP** ist verfügbar, wenn im **Hauptteil WAsP** gewählt wurde. Die Auswahlmöglichkeiten auf diesem Register hängen vom verwendeten WAsP-Modus ab: Im Modus **Messmastdaten** muss ein **Terraindatenobjekt** (Zweck: STATGEN) gewählt werden, um die Gelände- und die Rauigkeitsdaten an WAsP übermitteln zu können (s.u.).

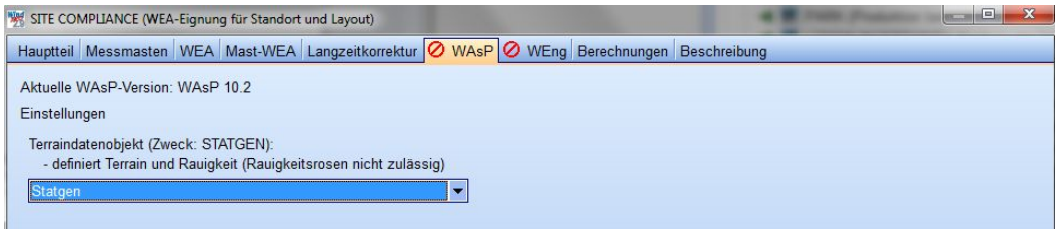


*Abb. 7. Register **WAsP** im Modus **Messmastdaten***

Bei Verwendung von SITE COMPLIANCE im WAsP-Modus **Windstatistik mit Langzeitbezug** muss für jeden Messmasten ein **Terraindatenobjekt** (Zweck: Energieberechnung mit WAsP) gewählt werden. Bitte stellen Sie sicher, dass in den verwendeten Terraindatenobjekten die jeweils passende Windstatistik mit Langzeitbezug für den betreffenden Messmast ausgewählt wurde.

*Abb. 8. Register **WAsP** im Modus **Windstatistik mit Langzeitbezug***

Im Modus **Keine Messmastdaten** wird im Register **WAsP** die Eingabe der zu verwendenden *Terraindaten-objekte* benötigt. Für jede WEA wird das jeweils nächstgelegene Terraindatenobjekt genutzt.

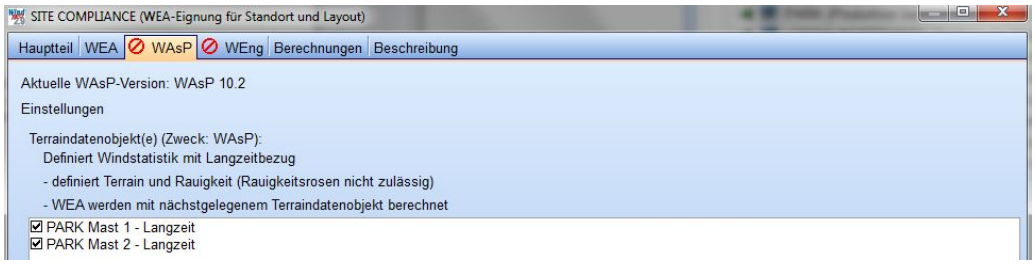


*Abb. 9. Register **WAsP** im Modus **Keine Messmastdaten***

Nach der Wahl des / der Terraindatenobjekte(s) startet die WAsP-Berechnung durch Klicken auf das gelbe Feld **WAsP-Berechnung durchführen**. Die **WAsP-Parameter** können durch Klicken auf das obere Feld angepasst werden.

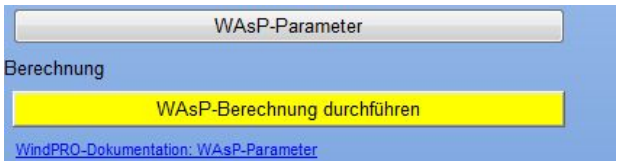


*Abb. 10. Register **WAsP** – Berechnung starten oder WAsP-Parameter anpassen*

*Abb. 11. Register **WAsP** vor und nach erfolgreicher Berechnung*

Wenn die WAsP-Berechnung abgeschlossen ist, erscheint das Feld wieder grau und die rote Markierung im Registerkopf wird durch einen grünen Haken ersetzt. Wurde für Messmasten oder WEA eine *Verdrängungshöhe* angegeben, wird diese immer in der WAsP-Berechnung benutzt.

13.2.6 WEng

Das SITE COMPLIANCE-Modul bietet eine bedienerfreundliche Einbindung von WAsP Engineering (WEng). Durch die komplette externe Installation und Lizensierung von WEng, wird WindPRO zur grafischen Benutzeroberfläche des Strömungsmodells. Dieses ermöglicht eine deutliche Vereinfachung der Einstellungen und Verwendung von WEng. Im Gegensatz zu WAsP ist WEng ein *raster*basiertes Model, welches die Strömungsparameter (außer Turbulenz) für jeden Rasterpunkt einer zuvor definierbaren, rechteckigen Berechnungsfläche modelliert.

Zuerst muss ein **Terraindatenobjekt** (Zweck WAsP oder STATGEN) ausgewählt werden, um die Gelände- und Rauigkeitsdaten an WEng zu übermitteln. Anschließend muss ein **Bereich um alle Masten / WEA** angegeben werden, der die Ausdehnung der Berechnungsfläche definiert. Voreingestellt ist ein Wert von 5 km, welcher einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungsdauer bietet. Wenn besondere Rauigkeitswechsel oder starke Veränderungen der Landschaft etwas weiter als 5 km entfernt vorliegen, sollte der Berechnungsbereich entsprechend ausgedehnt werden, um diese zu erfassen.

Die voreingestellte **Rasterweite** liegt bei 50 m. Diese sollte normalerweise ausreichen und nur bei starken Terrainveränderungen, wie z.B. einem schmalen Felsrücken, sollte eine feinere Auflösung gewählt werden.

Wird der Bereich oder die Rasterweite verändert, wird die Anzahl der Gitterpunkte automatisch angepasst. Die Berechnungszeit von WEng wird optimiert, wenn die Anzahl der Gitterpunkte gerade unter 170, 340, 680…usw. bleibt. Dies liegt an der Berechnungsmethodik von WEng.

Die derzeitige Version des SITE COMPLIANCE-Moduls unterstützt keine Verwendung von Hindernissen in der WEng-Modellierung.

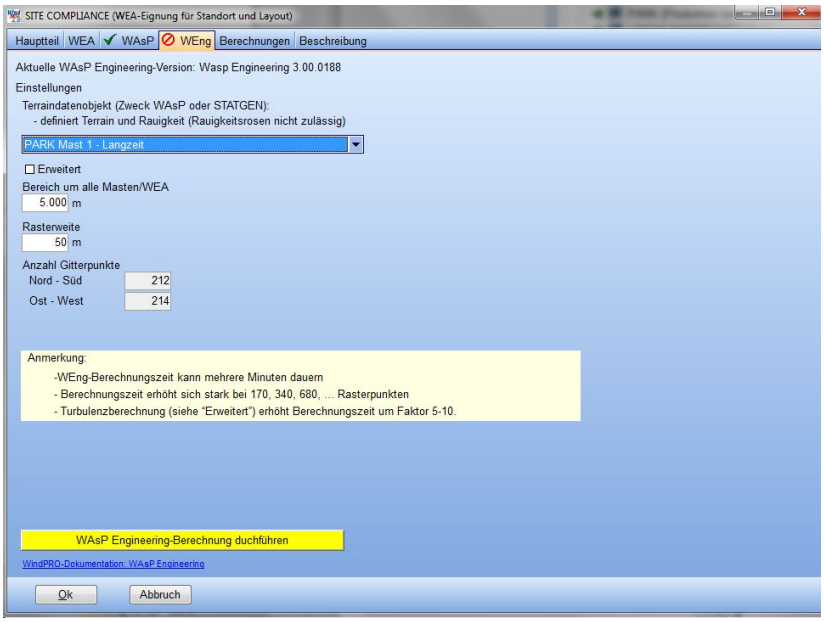


*Abb. 12. Register **WEng***

Wenn die passenden Einstellungen gesetzt wurden, startet die Berechnung mit Klick auf das gelbe Feld **WAsP Engineering-Berechnung durchführen**. Insbesondere durch die Modellierung der Turbulenz für jede Messmast- und WEA-Position kann eine WEng-Berechnung mehrere Minuten dauern.

*Abb. 13. Register **WEng** vor und nach erfolgreicher Berechnung*

13.2.6.1 Erweiterte WEng-Einstellungen

Bevor die WEng-Berechnung gestartet wird, können die **Erweitert**en Optionen geprüft und angepasst werden.

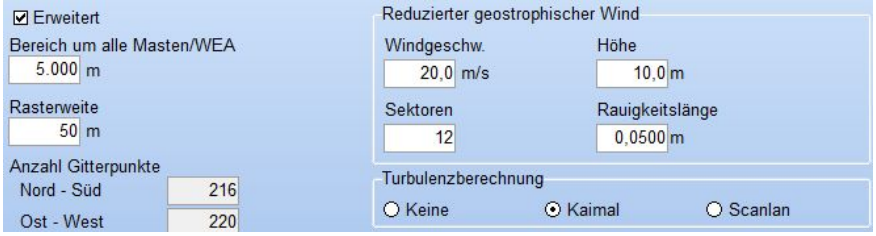


*Abb. 14. Register **WEng**, erweiterte Einstellungen*

Diese Einstellungsmöglichkeiten zeigen, wie die Strömungsmodellierung in WEng ausgeführt wird. Über den **reduzierten geostrophischen Wind** können **Windgeschwindigkeit**, **Höhe**, Anzahl der **Sektoren** und die **Rauigkeitslänge** angepasst werden.

Da WEng ein lineares Modell ist, basieren die Ergebnisse der Strömungsmodellierung, Speed-Up und Turbulenzintensität nicht auf diesen Einstellungen. Nur im besonderen Fall von Offshore- oder Semi-Offshore-Bedingungen ist besondere Vorsicht geboten, da die Linearität aufgrund der zunehmenden Rauigkeit (Wellengang) mit höheren Windgeschwindigkeiten nicht mehr gegeben ist. In diesen besonderen Fällen ist es ratsam WEng anzuwenden, SITE COMPLIANCE zu schließen und die Ergebnisse von WEng mit Rechtsklick auf die Berechnung und *Result-to-file* zu exportieren. Die Windgeschwindigkeiten, die so für jede WEA prognostiziert werden, sollten in etwa den Extremwindgeschwindigkeiten der WEA entsprechen. Sind die Ergebnisse zu hoch oder zu niedrig, kann die geostrophische **Windgeschwindigkeit** in den **erweiterten** WEng-Einstellungen angepasst werden, um eine korrekte Modellierung der Extremwindbedingungen zu erreichen.

Bei **Turbulenzberechnung** können Sie auswählen, ob **keine** Turbulenzberechnung durchgeführt werden soll, bzw. das Modell **Scanlan** oder **Kaimal** genutzt wird. Voreingestellt und empfohlen ist die Turbulenzberechnung mit Hilfe des **Kaimal**-Modells.

Wenn eine *Verdrängungshöhe* für einen Mast im Meteo-Objekt oder für ein WEA-Objekt angegeben ist, wird diese immer in der WEng-Berechnung berücksichtigt. Üblicherweise werden dabei die Windgeschwindigkeiten verringert, während Turbulenz und Windscherung normal ansteigen.

13.3 Berechnungen - Hauptprüfungen

Wenn alle Einstellungen abgeschlossen sind und die WAsP- und WEng-Berechnungen (wenn verwendet) durchgeführt wurden, können die Prüfungen nach IEC 61400-1 ed. 3 (2010) auf dem Register **Berechnungen** beginnen. Hierfür markieren Sie die benötigten Felder in der Spalte **Calc**. Empfohlen wird die Durchführung aller **Hauptprüfungen**. Sollte etwas aus den vorangegangen Einstellungen fehlen oder unvollständig sein, wird dieses durch **Benötigt: …** in der Spalte **Berechnen** der betreffenden Prüfung gekennzeichnet.

Für einige Prüfungen wird **Benötigt: …** angezeigt bis andere Prüfungen durchgeführt wurden. **Effektive Turbulenz** benötigt zur Berechnung das Ergebnis der Kalkulation **Komplexität Terrain**. Wenn keine WEng-Ergebnisse verfügbar sind, benötigt die Berechnung **Neigung der Anströmung** ebenfalls zuvor die **Komplexität Terrain.**

Die Ergebnislegende erläutert die optische Bewertung der Berechnungsergebnisse.

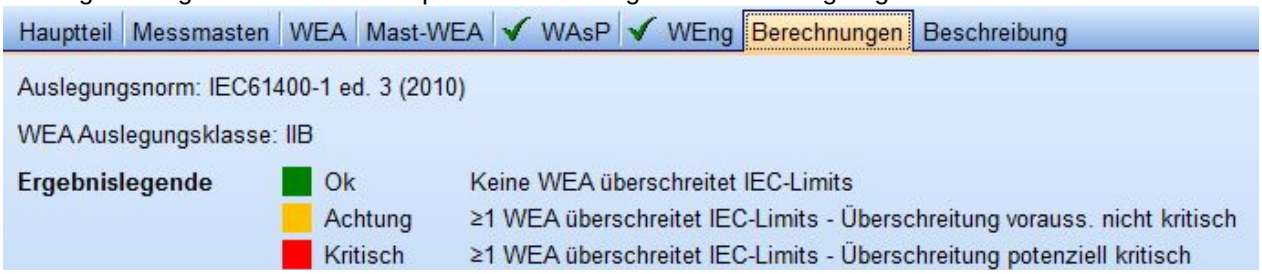


*Abb. 15. Die Ergebnislegende des Registers **Berechnungen***

Nach Abschluss einer jeden Prüfung wird als Gesamtergebnis des Windparks in der Spalte **Ergebnis** die Bewertung der *ungünstigsten WEA* farblich angezeigt. Mit Klick auf **Bearb.** werden im Unterregister **Ergebnis (Tabelle)** bzw. **Ergebnis (Grafik)** die Resultate jeder einzelnen WEA angezeigt.

*Abb. 16. Register **Berechnungen** mit den markierten Hauptprüfungen vor der Berechnung*

Um die Berechnung der **Hauptprüfungen** zu starten, klicken Sie jeweils auf das Feld **Bearb**. Die erste Berechnung sollte dabei **Komplexität Terrain** sein.

Achtung!
Nur geringe Überschreitungen einzelner Werte eines Projektes mit Kennzeichnung **Kritisch** bedeutet nicht unbedingt, dass der gewählte Anlagentyp für den Standort ungeeignet ist. **Kritische** Werte sollten mit dem betreffenden Anlagenhersteller abgeklärt werden. Nur der Anlagenhersteller kennt die Lastreserven seiner WEA und kann über detaillierte aerodynamische Modellierungen feststellen, ob die Überschreitung der Grenzwerte ausgeglichen werden kann.

13.3.1 Komplexität Gelände

Beschreibung und Grenzen

Die IEC-Richtlinie beschreibt ausgeklügelte Details für die Prüfung der topographischen Komplexität. In der Nähe jeder WEA wird die die Geländeneigung und -veränderlichkeit geprüft. Eine Anzahl von Ebenen in Form von Ringen und „Tortenstücken“ um die WEA müssen an das Gelände und die -neigung angenähert werden und die Veränderungen jeder Ebene müssen evaluiert werden. Im Folgenden werden die Anforderungen näher beschrieben.

Die Prüfung der topographischen Komplexität des Geländes ist kein alleiniges Kriterium, das ein Projekt zum Scheitern verurteilt. Es unterstützt vielmehr dabei komplexe Standorte zu erkennen und die gemessene Turbulenz mit einem Korrekturfaktor für die Turbulenzstruktur zu korrigieren. Diese Korrektur ist eine Kompensation dafür, dass Schalensternanemometer nur die horizontale Komponente der Turbulenz erfassen, im komplexen Gelände jedoch bedeutende Anteile der turbulenten kinetischen Energie in der vertikalen Komponente enthalten sein können.

Einstellungen, Berechnung und Ergebnis

Die Einstellungen und Durchführung der Berechnung für die IEC Komplexitätsprüfung sind sehr einfach in SITE COMPLIANCE. Das Modul nutzt das aktive digitale Höhenmodell (DHM), welches im Projekt definiert ist. Das Modell kann sowohl als Liniendatei eines Linienobjektes als auch als Höheraster definiert sein.

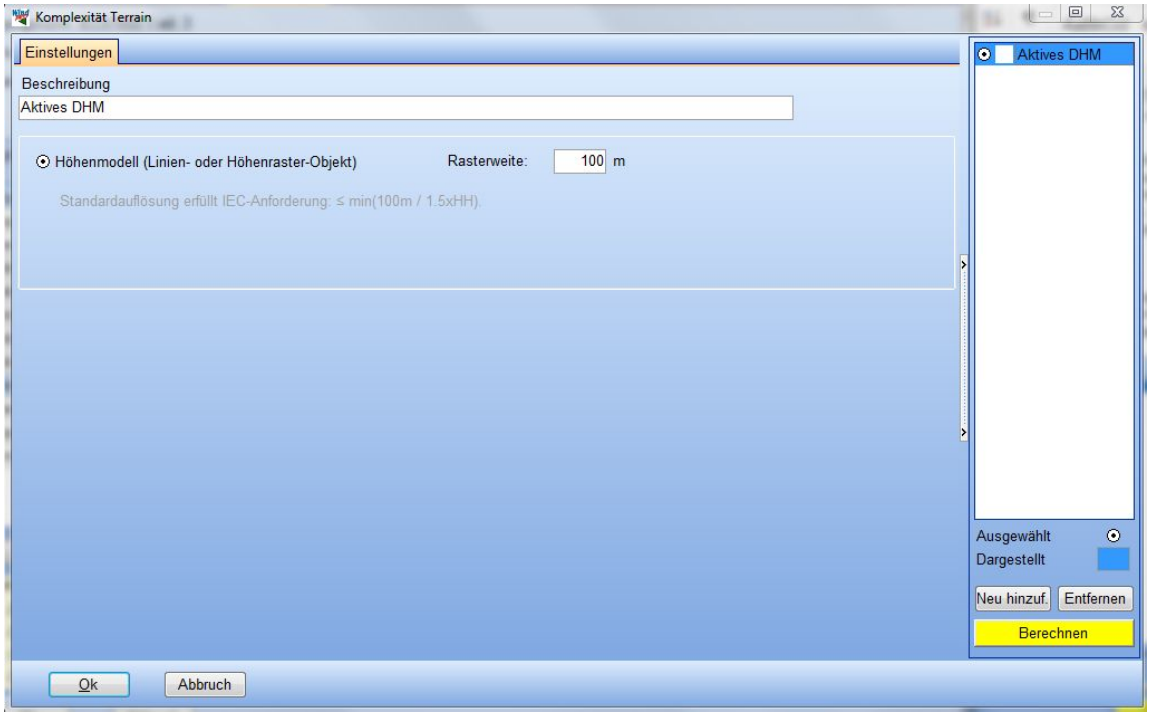


Abb. 17. ***Einstellungen*** *und Berechnung der Prüfung* ***Komplexität Gelände***

Die einzig veränderbare Einstellung ist hier die **Rasterweite**, welche die Auflösung eines passenden quadratischen Höhenrasters definiert, das zu dem Höhenmodell des Geländes und den Annäherungen der Ebenen passt. Die voreingestellte Auflösung entspricht der Anforderung der IEC, die eine Auflösung von höchstens 100 m und 1,5xNH verlangt. Dennoch ist es aufgrund der verfügbaren Höhendaten häufig nicht möglich eine feinere Auflösung zu verwenden.

Durch Klicken auf **Berechnen** startet die Prüfung der Gelände-Komplexität. Die Kalkulation dauert etwas länger, falls die Triangulierung vorher noch nicht berechnet wurde. Nach Durchführung der Berechnung erscheinen mehrere neue Ergebnisregister. Automatisch springt das Modul auf das Register **Ergebnis (Grafik)**, das eine Übersicht des Hauptergebnisses zeigt. Auf diesem Register wird der sogenannte Komplexitäts-Index i_c laut IEC-Richtlinie 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.

Im Kasten oben rechts neben dem Berechnungsnamen erscheint ein grünes Quadrat. Dies bedeutet, dass das Ergebnis *OK* ist und keine Probleme oder Risiken in Bezug auf die Komplexität des Geländes zu erwarten sind.

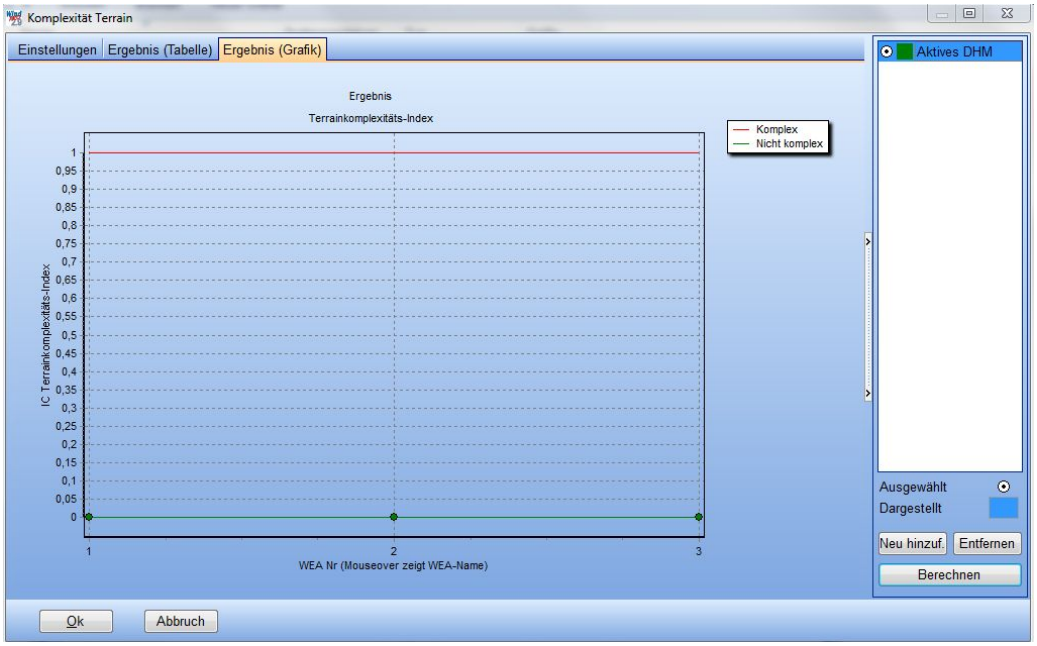


*Abb. 18. Register **Ergebnis (Grafik)** zeigt eine einfache Übersicht der Resultate der Gelände-Komplexität*

SITE COMPLIANCE ermöglicht dem Benutzer durch **Neu hinzuf.** weitere Berechnungen mit anderen Einstellungen (in diesem Fall Rasterweite) hinzuzufügen. Dies geschieht durch Klicken auf **Neu hinzuf.**, Auswahl der gewünschten Einstellung und Klicken auf die gelbe **Berechnen**-Schaltfläche. Auf diese Weise können zusätzliche Berechnungen durchgeführt werden, um zu prüfen, wie stark das Ergebnis durch die jeweiligen Annahmen beeinflusst ist. Empfehlenswert ist es, den *Namen jeder Berechnung* gleich auf dem Register **Einstellungen** anzupassen – dieses kann jedoch auch nach der Berechnung erfolgen. Die Einstellungen- und Ergebnis-Register einer Berechnung werden durch Klicken auf die jeweilige Kalkulation in der Liste angezeigt. Die gezeigte Berechnung ist blau unterlegt.

Bevor die Prüfung durch Klicken auf die **OK**-Schaltfläche abgeschlossen wird, muss eine der durchgeführten Berechnungen als endgültiges Ergebnis **Ausgewählt** werden.

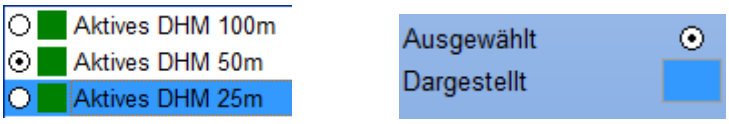


*Abb. 19. Links: Die Liste der Berechnungen mit mehreren Berechnungseinstellungen und der mittleren als **Ausgewählt** (markiert) aber der unteren Berechnung als **Dargestellt** (blau unterlegt). Rechts: Die „Anzeigelegende“, die die dargestellten Berechnungen aus der Liste definiert.*

Das Register **Ergebnis (Tabelle)** fasst die Ergebnisse des Geländekomplexität-Index‘ für jede WEA zusammen. Eine Farbkodierung kennzeichnet den Komplexitätsindex grün, wenn alle 0 (d.h. OK) sind und orange (d.h. ACHTUNG), wenn ein Index 0 überschreitet.

Werden die Ergebnisse einer WEA durch Klicken auf “+” ausgeklappt, werden die drei Unterstufen „R=5xNH“, „R=10xNH“ und „R=20xNH“ dargestellt. Die Erweiterung einer dieser Stufen zeigt die Ergebnisse der Anpassung mit dem entsprechenden Radius in Bezug auf Neigung und deren Richtung sowie die verfügbare Energie, die im Richtungssektor dieser Ebenen-Anpassung vorhanden ist. Im Folgenden werden weitere Details zur Durchführung der Anpassung gezeigt.

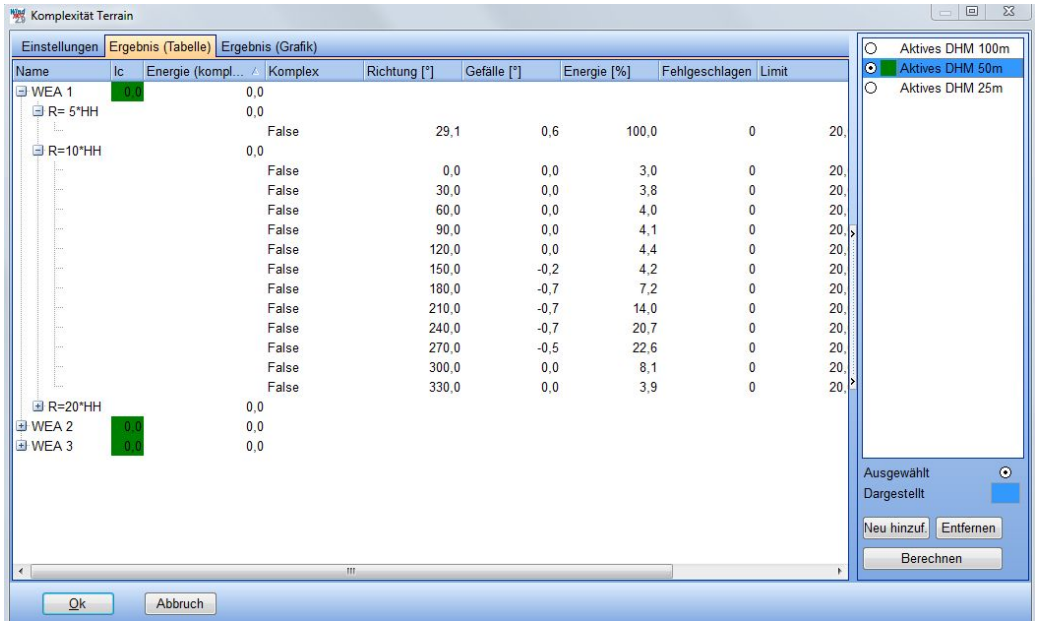


Abb. 20. ***Ergebnis (Tabelle)*** *zeigt Details der durchgeführten Annäherungen der Komplexitäts-Prüfung*

IEC Anforderungen – topographische Komplexität

Die IEC-Richtlinie definiert wie mehrere Ebenen verschiedener Form und Größe an das Gelände um jede WEA-Position angenähert werden müssen, der folgende Text beschreibt diese Anforderungen aus [2]. Insgesamt 25 Ebenen mit den folgenden Eigenschaften müssen an die WEA-Position, Mittellinie durch den Turmfuß verlaufend, angenähert werden:

- Eine kreisförmige Ebene mit dem Radius 5xNH, zentriert um die WEA
- 12 „Tortenstück"-förmige Ebenen im Radius von 10xNH, eine angepasste Ebene pro Sektor
- 12 „Tortenstück"-förmige Ebenen im Radius von 20xNH, eine angepasste Ebene pro Sektor

Die Anpassungen für eine Höhendatei werden unten mit den verwendeten Punkten für einige Beispiele gezeigt. Für die „Tortenstück"-Anpassung werden alle Punkte gezeigt, die verwendeten Punkte im Nord-Sektor sind hervorgehoben. Die Anforderung des IEC-Standards verlangt eine Auflösung von mindestens 100 m und 1,5xNH.

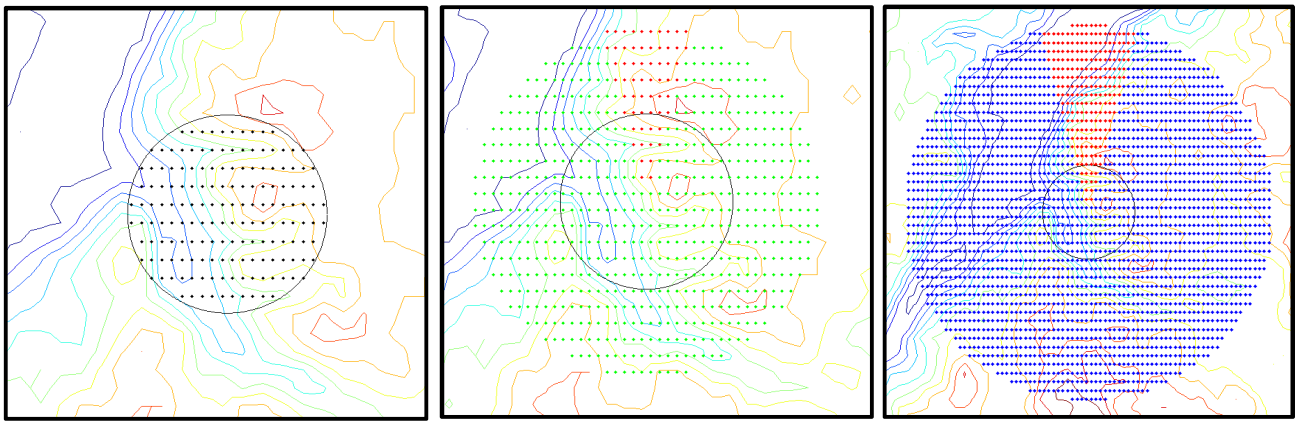


Abb. 21. Illustration der erforderlichen Flächenanpassungen der Gelände-Komplexitäts-Prüfung. Links: Die omni-direktionale Anpassung bei 5xNH mit entsprechenden Rasterpunkten. Mitte: Die Rasterpunkte der Anpassung für 10xNH mit Hervorhebung der Punkte im Nord-Sektor Rechts: Die Rasterpunkte der Anpassung für 20xNH mit Hervorhebung der Punkte im Nord-Sektor (zur Skalierung wird jeweils der Kreis von 5xNH gezeigt).

Für jede Anpassung wird eine Neigung ermittelt. Für die Anpassung des Abstands 5xNH entspricht die Richtung der Neigung der maximalen Neigung, für die 2x12 „Tortenstücke" (10 und 20xNH) entspricht die Neigung der Sektor-Mittellinie. Übersteigt die Neigung +/-10° wird die Anpassung als gescheitert betrachtet.

Zusätzlich zur Neigung muss eine Geländeanpassung für jede der 25 angepassten Ebenen erfolgen. Bestimmt wird die Abweichung aus dem Abstand der angenäherten Ebene und dem Gelände an den Oberflächenpunkten einer vertikalen Linie.

Die folgende Tabelle zeigt die Grenzwerte der topographischen Komplexität gemäß IEC-Richtlinie:

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	$5xNH^2$

Abb. 22. Zusammenfassung der Prüfungen jeder Annäherung, die bei der Gelände-Komplexitätsprüfung erforderlich sind [2]

Die Richtlinie definiert einen Komplexitäts-Index i_c, welcher aus dem Ergebnis der Annäherungen definiert wird. Für jede Annäherung wird der Anteil der relativen Energie aus den jeweiligen sektoriellen Weibull-Parametern ermittelt. Die omni-direktionale Annäherung (5xNH) repräsentiert 100% der Energie. Wenn weniger als 5% der Energie in Sektoren auftritt, die die Prüfung der Neigung oder der vertikalen Abweichung verfehlen, wird die WEA-Position als nicht komplex betrachtet. Wenn mehr als 15% der Energie in Sektoren auftritt, die eine der Prüfungen verfehlen, wird die WEA-Position als komplex betrachtet und der Komplexitäts-Index i_c =1. Wenn zwischen 5% und 15% der Energie in Sektoren auftreten, die eine der Prüfungen verfehlen, wird der Komplexitäts-Index linear zwischen 0 und 1 interpoliert.

Vorsicht ist geboten, wenn der Komplexitäts-Index über 0 liegt. Die Richtlinie verlangt in diesem Fall eine zusätzliche Korrektur der Turbulenzberechnung. Diese Korrektur ist eine Kompensation dafür, dass Schalensternanemometer nur die horizontale Komponente der Turbulenz erfassen, im komplexen Gelände jedoch bedeutende Anteile der turbulenten kinetischen Energie in der vertikalen Komponente enthalten sein können. Die Richtlinie definiert einen *Korrekturfaktor für die Turbulenzstruktur,* C_{CT}, der aus dem Komplexitäts-Index berechnet wird. Dieser Korrektur-Parameter muss auf die gemessenen Turbulenzwerte angewendet werden, wenn der Komplexitäts-Index 0 überschreitet. Die Information wird automatisch zur Prüfung der **Effektiven Turbulenz** übernommen.

In einer Fußnote erwähnt die IEC-Richtlinie, dass der Neigungswinkel der Ebene der omni-direktionalen Anpassung mit dem Radius 5xNH als Anströmungswinkel angenommen werden kann. Wir ermöglichen diese Option in SITE COMPLIANCE und die relevanten Anströmungswinkel werden automatisch von der Prüfung der **Komplexität Gelände** zur Prüfung des **Anströmwinkels** übernommen.

13.3.2 Extremwind

13.3.2.1 Beschreibung und Grenzen

Die Extremwindprüfung ist eine der wichtigsten und kritischsten Prüfungen der SITE COMPLIANCE-Berechnung. Gründe dafür sind die sehr hohe Unsicherheit der Annahmen zu Extremwindereignissen und dass hier eine extreme Last dargestellt wird, die nicht durch Reserven bei anderen Ergebnissen aus dem Bereich der Ermüdungslasten kompensiert werden kann.

Die IEC-Richtlinie definiert den Extremwind als 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit mit einem Wiederkehrzeitraum von 50 Jahren. Der Wiederkehrzeitraum (T) ist ein statistischer Begriff, abgeleitet aus dem strengeren Begriff „jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit“ (R) durch die einfache Gleichung $T = 1/R$. Ein 50-Jahres-Extremwind hat demnach eine jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2%.

Die Designannahmen der IEC-Richtlinie für den Extremwind V_{ref} sind für jede Auslegungsklasse in Tabelle 1 der Richtlinie dargestellt (siehe auch Abb. 1 dieses Handbuches). So ist z.B. eine Klasse 1-WEA ausgelegt für Extremwindgeschwindigkeiten von bis zu 50 m/s bei einer Standardluftdichte von 1,225 kg/m³.

Die meisten Methoden zur Extremwindabschätzung beruhen auf der Theorie von E. Gumbel in [3]. Anhang I beschreibt die Grundlagen der Theorie und die Details, die in diesem Modul Verwendung finden.

13.3.2.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Einstellungen, Berechnungen und Bewertung der Ergebnisse einer typischen Extremwindberechnung durchgeführt werden. Die Einstellungen dieser Prüfung sind in drei Gruppen aufgeteilt: **Statistisches Modell**, **Ausbreitungsmodell** und **Zusätzliche Modelleinstellungen**. Details der verschiedenen Optionen in diesen drei Gruppen werden nach Vorstellung des Workflows genauer beschrieben. Abb. 23 zeigt die **Einstellungen** der Extremwindprüfung. Für die verschiedenen Methoden gibt es diverse Eingangsparameter, die mit ihren Abkürzungen dargestellt sind.

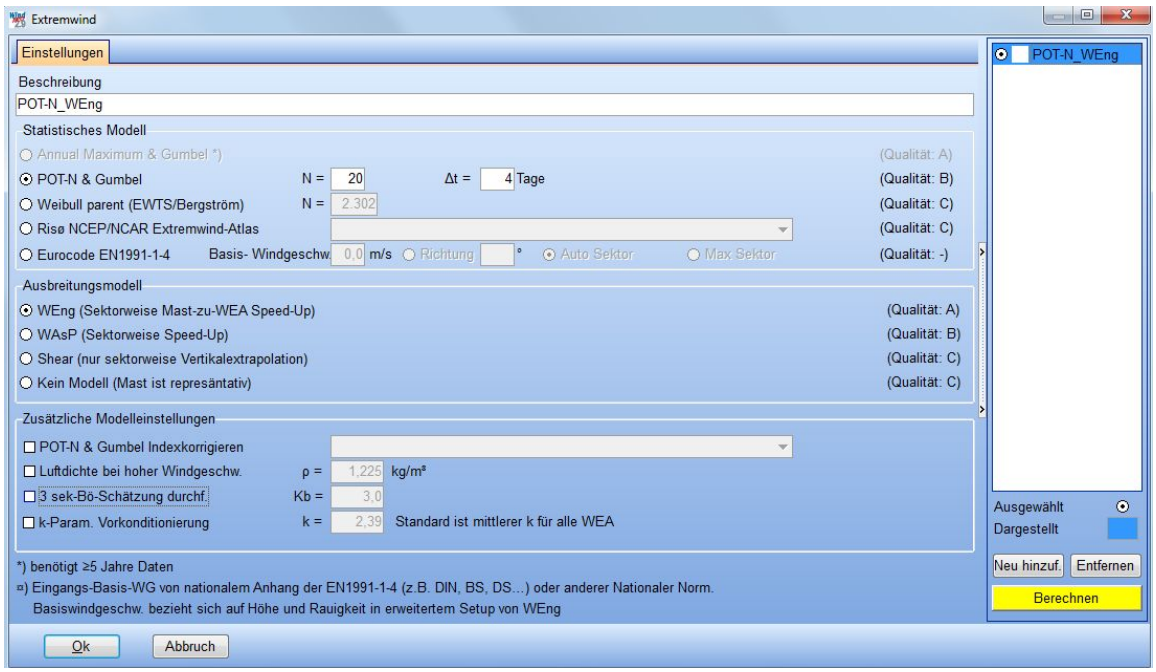


*Abb. 23. Das Register **Einstellungen** der Extremwind-Prüfung. Beachten Sie die ausgegraute Option **Jährliches Maximum & Gumbel**: Diese ist nicht hier verfügbar, da der Messzeitraum kürzer als 5 Jahre ist.*

POT-N & Gumbel

N ist die Anzahl der Extremereignisse, die aus der Zeitreihe entnommen werden

Δt ist der minimale zeitliche Abstand zwischen zwei Extremwindereignissen, um diese als unabhängig zu betrachten

Weibull parent (EWTS/Bergström)

N ist die angenommene Anzahl unabhängiger 10-min Windgeschwindigkeitswerte pro Jahr

Eurocode EN1991-1-4

Basis-Windgeschwindigkeit ist die Auslegungswindgeschwindigkeit bei Normal-Bedingungen des nationalen Anhangs des Eurocodes oder einer anderen nationalen Norm

Richtung wird benötigt, um die Speed-Up-Faktoren der Basis-Windgeschwindigkeit zu wählen, wenn bekannt oder im nationalen Anhang gegeben, kann diese hier direkt eingegeben werden

Auto Sektor lässt SITE COMPLIANCE den wahrscheinlichsten Extremwind-Sektor anhand der Weibull-Parameter berechnen

Max Sektor nimmt den Speed-Up des Sektors mit dem höchsten Speed-Up-Faktor (worst case)

Zusätzliche Modelleinstellungen

ρ ist die Luftdichte bei hohen Windgeschwindigkeiten

K_b ist der normalisierte Böenfaktor, wobei der Standard-Wert 3,0 einer 3-Sekunden-Bö entspricht

Beachten Sie, dass die **Zusätzlichen Modelleinstellungen** nicht standardmäßig aktiviert sind. Um diese verwenden zu können, müssen sie immer manuell aktiviert und mit den passenden Eingangsparametern versehen werden. Ist eine der **Zusätzliche Modelleinstellungen** nicht auswählbar oder ausgegraut liegt dies an fehlenden Eingangsdaten, wie z.B. fehlendem Langzeitreferenz-Mast für die Option **POT-N & Gumbel indexkorrigieren**.

Zum Starten der Extremwind-Berechnung mit Standard-Einstellungen klicken Sie rechts unten auf **Berechnen**. Nach Durchführung der Berechnung erscheinen neue Register:

Das Register **Extrahierte Daten (Tabelle)** zeigt eine Tabelle mit den extrahierten Extremwindereignissen aus der Zeitreihe der Messmasten.

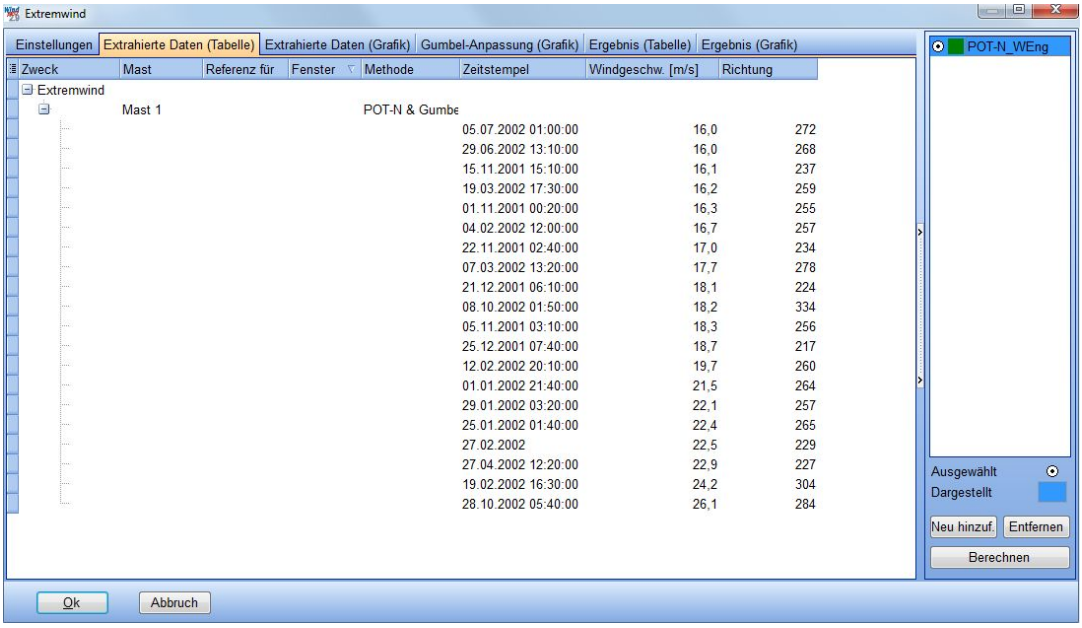


*Abb. 24. Das Register **Extrahierte Daten (Tabelle)***

Auf dem Register **Extrahierte Daten (Graphik)** werden die Zeitreihen der Messmastdaten grafisch dargestellt und die entnommenen Extremwerte markiert. Mit Hilfe der Schaltflächen **Zurück** und **Weiter** unten links kann zwischen den verschiedenen Messmasten gewechselt werden.

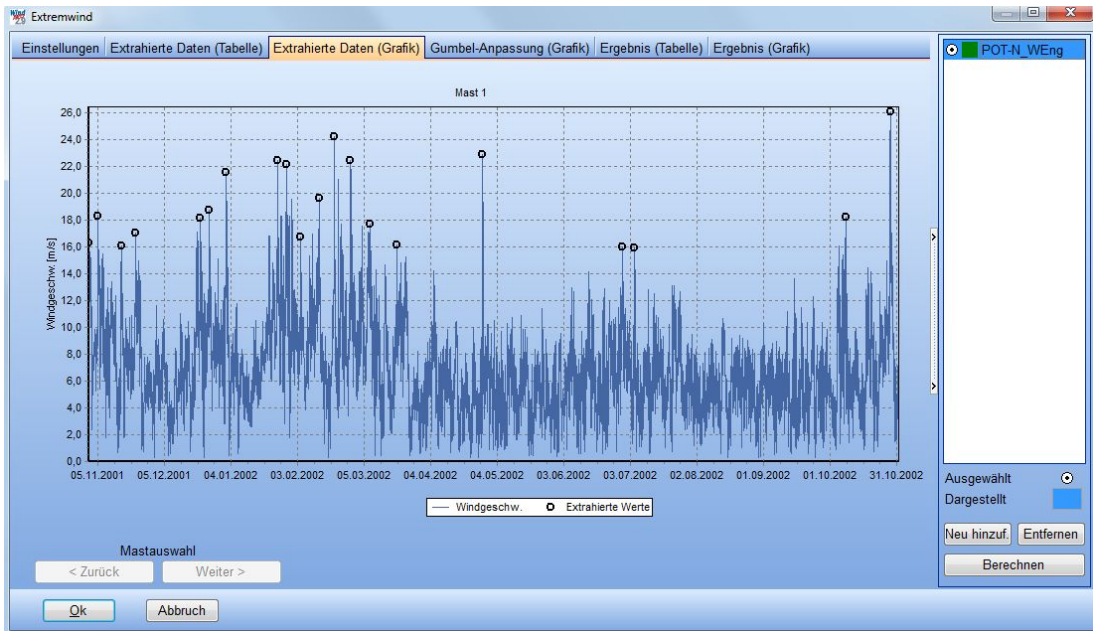


*Abb. 25. Das Register **Extrahierte Daten (Grafik)***

Das Register **Gumbel-Anpassung (Grafik)** zeigt die statistische Anpassung für jede WEA und die Extrapolation auf den benötigten Wiederkehrzeitraum, typischerweise 50 Jahre. Durch Klicken auf **Weiter** gelangen Sie zur nächsten WEA.

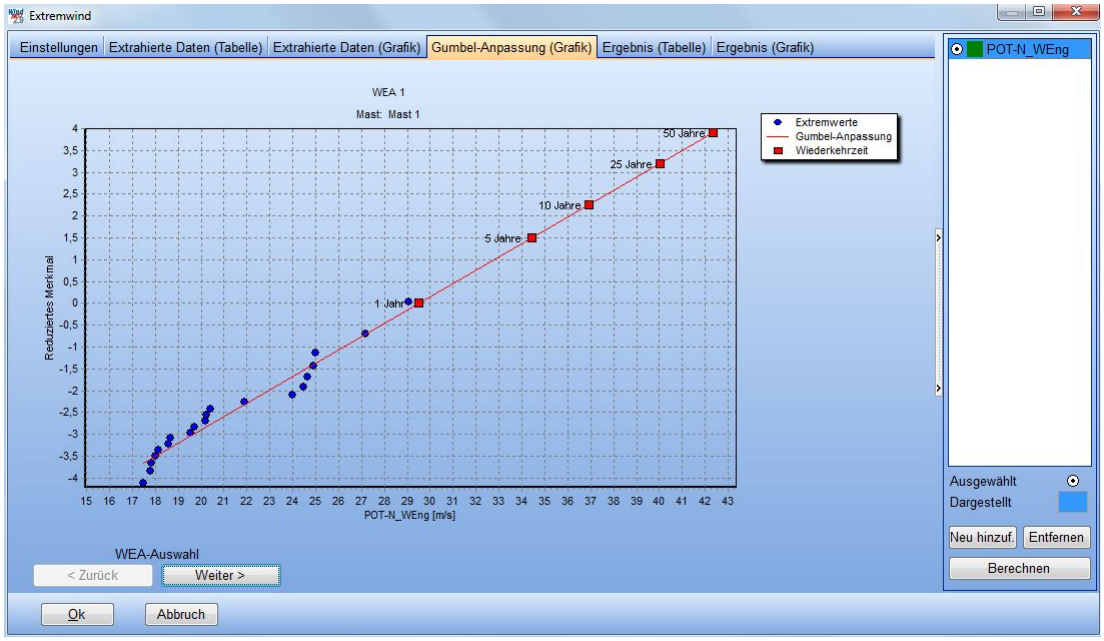


*Abb. 26. Das Register **Gumbel-Anpassung (Grafik)***

Das Register **Ergebnis (Tabelle)** zeigt das Endergebnis der 50-Jahres-Extremwindgeschwindigkeit für jede WEA sowie die IEC-Grenze für die jeweilige Auslegungsklasse (V_{ref}). Im gezeigten Beispiel sind alle WEA grün (OK) und damit ist das Gesamtergebnis für den Windpark, oben rechts, ebenfalls grün (OK).

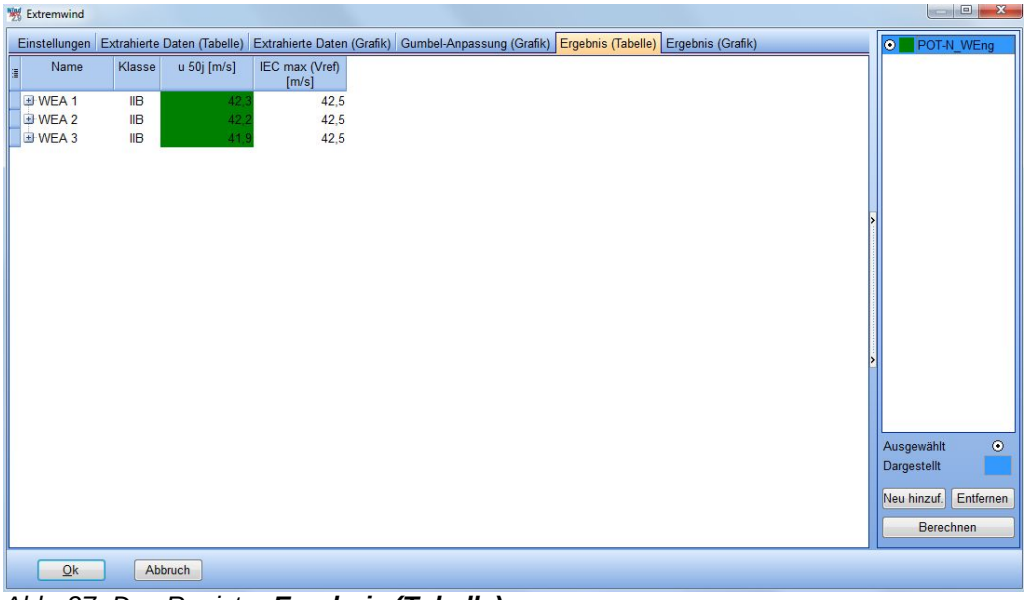


*Abb. 27. Das Register **Ergebnis (Tabelle)***

Das Register **Ergebnisse (Grafik)** gibt eine grafische Übersicht über die Ergebnisse im Vergleich zum IEC-Grenzwert. Im gezeigten Beispiel liegen alle WEA innerhalb des IEC-Limits.

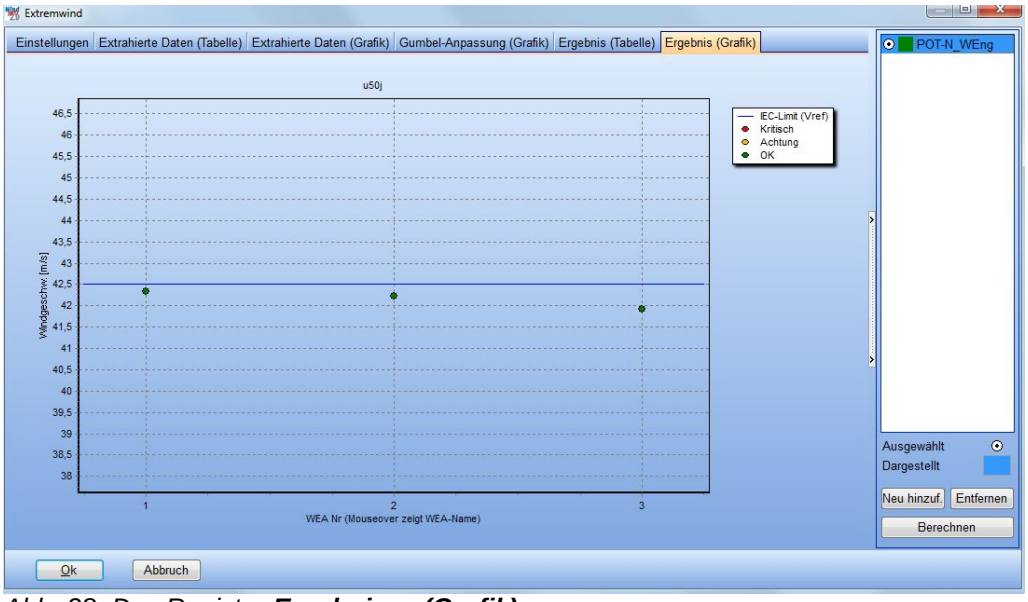


*Abb. 28. Das Register **Ergebnisse (Grafik)***

Mit **Neu hinzuf.** (rechts unten) können Sie eine weitere Berechnung mit neuen Einstellungen für die Extremwindberechnung hinzufügen, z.B. mit einer anderen Berechnungsmethode oder geänderten Parametern der vorigen Berechnung. Dies ermöglicht einen einfachen Vergleich der Berechnungsergebnisse. Bei Verwendung von WEng kann der *Risø NCEP/NCAR Extremwind-Atlas* gewählt werden, welcher große Teile Europas und der USA abdeckt. Jede neue Berechnung fügt eine weitere Zeile im Kasten auf der rechten Seite hinzu. Bei Auswahl einer der Berechnungen, werden wiederum deren Einstellungen und Ergebnisse angezeigt.

WICHTIG: Das Ergebnis der mit ⊙ markierten Berechnung wird in der endgültigen Auswertung verwendet!

13.3.2.3 Statistisches Modell

Die Einstellungen in diesem Bereich definieren das **statistische Modell** zur Entnahme der Extremereignisse aus den Winddaten und wie diese - gemäß der gewählten Methode - an das statistische Gumbel-Modell angepasst werden. Im Folgenden werden die gewählten Modelle beschrieben.

*Abb. 29. Die Einstellungen des **statistischen Modells** der Extremwindprüfung. Beachten Sie, dass die obere Option nur mit mindestens 5 Jahren Messdaten aller Standortmasten anwendbar ist*

Jährliches Maximum & Gumbel (benötigt ≥5 Jahre Messdaten für alle Masten)

Diese Methode ist nur anwendbar, wenn für alle Standortmasten für mindestens fünf Jahre Windmessdaten vorliegen, da nur der höchste Windgeschwindigkeitsmesswert eines jeden Jahres aus der Zeitreihe entnommen wird. Mit weniger als fünf Jahren und damit weniger als fünf Werten, wird die Anpassung an das Gumbel-Modell sehr vage. Nach üblichen Empfehlungen sollten mindestens sieben Jahre an Messdaten vorliegen, um mit der Jährlichen Maximum-Methode (JM) verlässliche Ergebnisse zu bekommen. Diese ist die klassische, von Gumbel entwickelte Methode und wird immer noch als verlässlichste betrachtet, vorausgesetzt, dass eine genügende Anzahl von Eingangswerten vorliegt, was bei der Entwicklung von Windenergieprojekten leider selten der Fall ist.

Nach der Entnahme der jährlichen Maximalwerte werden sie gemäß der klassischen Gumbel-Extremwert-Methode weiterverarbeitet, resultierend in einem sogenannten Gumbel-Plot. Die Anpassung der Gumbel-Asymptote wird unter Verwendung der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente („Probability Weighted Moments (PWM)“) ausgeführt. In [4] oder Anhang I finden Sie weitere Details der Gumbel-Theorie.

POT-N & Gumbel

Diese Methode ist verfügbar, wenn mindestens ein Mast mit Zeitreihendaten in den Haupteinstellungen ausgewählt wurde. Die statistische Methode ist nahezu identisch mit der *Extremwind-Abschätzung* aus WindPRO bis Version 2.7. Das Namenskürzel bedeutet *Peak-Over-Threshold* (Spitze über einem Schwellwert) und das *N* steht dafür, dass dieser Schwellwert nicht wie üblich über die Windgeschwindigkeit, sondern anhand einer festen Anzahl (*N*) von Werten definiert wird. Häufig wird diese Methode auch als „Method of Independent Storms (MIS)“ (Methode unabhängiger Stürme) bezeichnet (siehe [5] und Anhang I), obwohl die eigentliche MIS [5] einen anderen Ansatz der Datenextraktion verwendet.

Bei dieser Methode gibt es keine Untergrenze für die Dauer der Zeitreihe, es wird jedoch deutlich empfohlen eine Anzahl voller Jahre, also mindestens ein volles Jahr, zu verwenden. *N* definiert die Anzahl von Stürmen, die der Zeitreihe entnommen werden sollen (voreingestellt sind 20) und *Δt* den minimalen zeitlichen Abstand, um die Unabhängigkeit zwischen den Starkwindereignissen sicher zu stellen (voreingestellt sind 4 Tage). Die Einstellung erfolgt aus dem typischen Zeitabstand von synoptischen Sturmereignissen.

Nach der Entnahme werden die Werte gemäß der Gumbel-Methode, aber mit dem Zwischenschritt der Korrektur für die jährliche Sturmrate verarbeitet (siehe [5] oder Anhang I für weitere Details). Die Anpassung an die Gumbel-Asymptote basiert auf den klassischen Plot-Positionen (siehe [6]) und der traditionellen Anpassung der kleinsten Quadrate mit der Windgeschwindigkeit als unabhängiger Variable.

Weibull parent (EWTS/Bergström)

Der European Wind Turbine Standard (EWTS) [7] beschreibt eine Extremwindmethode basierend auf der Charakteristik der Enden der Weibull-Verteilungskurven der mittleren Windgeschwindigkeit (*parent distribution*). Zu Grunde liegt das Prinzip, dass Standorte mit kleineren Weibull-k-Faktoren eine höhere Wahrscheinlichkeit extremer Windgeschwindigkeiten zeigen.

Die Methode basiert auf zwei Grundannahmen:

1. Die Windverteilung entspricht einer Weibullverteilung
2. Die Anzahl der statistisch unabhängigen Windwerte pro Jahr ist bekannt (und gleich für alle Standorte)

Die EWTS-Publikation nennt die Anzahl von 23037 10-minütigen, unabhängigen Ereignissen pro Jahr (Referenz zu einer Veröffentlichung von Bergström 1992 [8]). Dies ist jedoch ein Schreibfehler in der EWTS-Publikation, der korrekte Wert aus dem Originaldokument von Bergström [8] ist 2302. Als Weibull Form-Parameter wird die „kombinierte Weibullverteilung“ [18] zu Grunde gelegt, die aus einer Kombination der sektoriellen Weibullverteilungen, typischerweise aus einer WAsP-Berechnung, in eine omni-direktionale Weibull-Verteilung mit gleichem ersten (Windgeschwindigkeit) und dritten (Energie) Moment resultiert.

Risø NCEP/NCAR Extrem-Windatlas

Die Risø NCEP/NCAR Extrem-Windatlas-Methode nutzt eine Datenbasis von *Regional Extreme Wind Climate* (REWC)-Dateien, die als Teil eines Forschungsprojektes bei Risø [9] für WEng 2 entwickelt wurden. Dieser Windatlas basiert auf den globalen NCEP/NCAR-Reanalyse-Daten, die mit Korrekturen zum Ausgleich der groben zeit- und räumlichen Auflösung versehen wurden.

Diese Methode benötigt die vorhergehende Ausführung von WEng. Es sollte eine der vier nächstgelegenen REWC-Dateien gewählt werden. Jede REWC-Datei beinhaltet 12x30 reduzierte geostrophische Windgeschwindigkeiten, für jede der zwölf Richtungssektoren in jedem der dreißig Jahre des Referenzzeitraums. Diese werden über die Strömungsmodellierung von WEng auf die einzelnen WEA-Positionen übertragen, um die jährlichen Maximalwerte für jedes Referenzjahr zu ermitteln. Diese Werte werden dann wie bei der Methode Jährliches Maximum weiter verarbeitet (s.o.).

Eurocode EN1991-1-4

Alle nationalen Bauvorschriften in der Europäischen Gemeinschaft wurden inzwischen im Eurocode (EN) harmonisiert. Eurocode EN1991-1-4 beinhaltet die Vorschriften für Windlasten und definiert die Richtlinien zur Handhabung von Extremwindgeschwindigkeiten. Für jedes Land gibt es einen Nationalen Anhang (NA) zur EN1991-1-4, in dem die *Basiswindgeschwindigkeit* der verschiedenen Regionen sowie Details zu Korrekturen festgelegt sind. Entsprechend wird die regional zu verwendende Norm mit dem passenden Länderkürzel gekennzeichnet, z.B. DIN EN1991-1-4/NA.

Die eingehende *Basiswindgeschwindigkeit* ist im Nationalen Anhang aufgeführt. Sie ist definiert als 50-Jahres-Extremwindgeschwindigkeit bei standardisierten Bedingungen: Auf 10 m Höhe über Grund, flachem Gelände und gleichmäßiger Rauigkeit (Rauigkeitsklasse 2, z_0= 0,05m).

Die Windzone 1, mit Basiswindgeschwindigkeit 22,5 m/s beinhaltet den überwiegenden Teil Südwest-deutschlands, während die Binnengebiete Nord- und Ostdeutschlands in Windzone II mit Basiswindgeschwindigkeit 25 m/s liegen. Die küstennahen Gebiete liegen in den Windzonen 3 und 4 mit Basiswindgeschwindigkeiten von 27,5-30 m/s.

Die Basiswindgeschwindigkeit wird ausgehend von standardisierten Bedingungen (10 m Höhe u.G., flaches Gelände, gleichmäßige Rauigkeit) über das WEng-Strömungsmodell auf die spezifischen Gelände-bedingungen jeder WEA umgerechnet. Eine WEng-Berechnung ist also Voraussetzung für diese Methode. Weichen die Standardbedingungen für die Basiswindgeschwindigkeit von den Voreinstellungen in WEng **erweiterte** Einstellungen (reduzierter geostrophischer Wind) ab, sollten an dieser Stelle die passenden Parameter des Nationalen Anhangs eingegeben werden.

Auch einige Staaten außerhalb Europas, u.a. Südafrika, Australien, Neuseeland und Singapur, haben, oder sind dabei, Elemente des Euro-Codes als Design-Richtlinie zu übernehmen.

13.3.2.4 Ausbreitungsmodell

Wenn die einzelnen Extremereignisse mit der Jährlichen Maximum- oder POT-N-Methode aus der Zeitreihe der Messung extrahiert wurden, werden sie auf die WEA-Positionen übertragen. Abb. 30 zeigt, welche **Ausbreitungsmodelle** gewählt werden können.

*Abb. 30. Einstellungen der **Ausbreitungsmodelle** in der Extremwindberechnung*

WEng und **WAsP** nutzen dazu die sektoriellen Speed-Up-Faktoren zwischen Mast und WEA, die in der zu Grunde liegenden WEng bzw. WAsP-Berechnung kalkuliert wurden. Die Option **Shear** verwendet die sektorweise berechnete Windscherung, um die Speed-Up-Faktoren der Messhöhe auf die Nabenhöhe zu übertragen. Bei der Auswahl **Kein Modell** wird keine Korrektur der Extremwinddaten durchgeführt.

Der Gumbel-Fit wird immer erst nach Skalierung der extrahierten Werte durchgeführt.

13.3.2.5 Zusätzliche Modelleinstellungen

Die Extremwindprüfung bietet folgende **zusätzliche Modelleinstellungen**:

*Abb. 31. **Zusätzliche Modelleinstellungen***

POT-N & Gumbel indexkorrigieren

Diese Methode zur Langzeitkorrektur zur Extremwindabschätzung basiert auf einer Studie, die bei der EWEA-Konferenz 2010 [10] veröffentlicht wurde und ist nur mit POT-N möglich. Bei der Extremwindabschätzung wurden überwiegend zwei Fehlerquellen beobachtet:

1) Zu kurze Zeitreihen (führen zu statistischen Zufallsfehlern)
2) Systematische Fehler durch die Gumbel-Anpassung

Zudem ist bekannt, dass die Jährliche-Maximum-Methode so gut wie frei von Fehlerquelle zwei, den systematischen Fehlern durch die Gumbel-Anpassung, ist [11].

Grundidee dieser Index-Korrektur ist die Berechnung eines Extremwindindexes für den Zeitraum der Standortmessung über eine überlappende Langzeitreferenz-Messreihe, die in Bezug auf Sturmereignisse repräsentativ für den Standort ist. Für den überlappenden Zeitraum werden die gleichen Einstellungen wie für die POT-N-Berechnung angewandt, die JM-Methode wird mit PWM-Anpassung für den gesamten Zeitraum verwendet. Der Index ist nun definiert als das Verhältnis der POT-N-Berechnung für den Kurzzeitraum zur JM-Methode für den kompletten Zeitraum. Die Korrektur der Extremwindabschätzung des Messmasts erfolgt dann über den Kehrwert des Extremwindindexes.

Zur Validierung wird für jedes Jahr der Standortmessung und der Referenzzeitreihe ein Index berechnet. Über einen grafischen Vergleich der Index-Kurven kann beurteilt werden, ob die Extremwinddaten der Referenzzeitreihe das lokale Extremwindklima abbilden.

Die Indexkorrektur sollte mit besonderer Vorsicht angewendet werden, wenn der überlappende Zeitraum nur ein Jahr beträgt und somit keinen Vergleich der Index-Kurven zulässt. Für den Fall, dass mehrere überlappende Jahre vorliegen, sollte eine kritische Betrachtung der Index-Kurven durchgeführt werden.

Luftdichte bei hohen Windgeschwindigkeiten

Die aerodynamische Schubkraft ist proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit und zur Luftdichte. Eine Reduktion der Luftdichte führt demnach zu einem reduzierten Schub. Die IEC-Richtlinie definiert den Grenzwert der Extremwindgeschwindigkeit bei Standardluftdichte 1,225 kg/m³. Unter der Annahme, dass der

Schub gleich bleibt, aber die Luftdichte durch den Standardwert ersetzt wird, können Extremwindangaben bei anderer Luftdichte auf Standardluftdichte korrigiert werden.

Die eingegebene Luftdichte sollte dem Wert entsprechen, der für hohe Windgeschwindigkeiten erwartet wird. Als Annäherung wird häufig die mittlere Luftdichte verwendet.

3 sek-Bö-Schätzung durchführen

Aus den Maximalwerten der 10-min-Messdaten, die häufig mit aufgenommen werden, können Böen abgeschätzt werden. Die Mittelung dieser Werte ist jedoch meist unbekannt. Die IEC-Richtlinie verlangt 3-sek-Mittelwerte für die Böenabschätzung. Anstelle der Maximalwerte aus 10-min-Messungen kann auch eine Abschätzung der Böen bei einer Mittelungszeit t gemäß Davenport erfolgen:

$$u_t = u_{10min}(1 + k_b(t)TI)$$

Dabei ist K_b der normalisierte Spitzenfaktor gleich 3,0 für t=3s gemäß Cook (1990) in [12], TI ist die erwartete Turbulenzintensität (10-min-Mittel), die aus den gemessenen Turbulenzwerten der extrahierten Datenpunkte gemittelt wird. Die Turbulenz wird nicht auf die Einzelpositionen angepasst, der Böenfaktor am Mast wird auf die WEA-Positionen angewendet.

k-Parameter Vorkonditionierung

Die Gumbel-Methode beruht auf einem asymptotischen Modell mit der Annahme, dass die Anzahl von unabhängigen Extremwindereignissen pro Jahr gegen unendlich geht. In [5] beschreibt Cook, dass der durch diese Annahme entstehende Fehler mit dem Weibull-k-Parameter zusammenhängt. Ist der k=1 (auch Exponential-Verteilung genannt), ist der Fehler gleich Null, unabhängig von der Werteanzahl. Für alle k größer als eins, nimmt der Fehler zu. Der entstehende Fehler führt durch eine Überschätzung des Gumbel-Fits zu konservativen Ergebnissen.

Um den Fehler zu reduzieren, kann die Windgeschwindigkeitsverteilung vor der Gumbel-Anpassung zu einer Weibull-Verteilung mit k=1 transformiert werden. Dies geschieht durch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit mit Exponent k. Nach der Gumbel-Anpassung und Extrapolation zur Abschätzung des 50-Jahres-Wertes werden die Windgeschwindigkeiten zurücktransformiert, indem die Wurzel k gezogen wird. Oft wird ein Standard-Wert von k=2 angenommen, der voreingestellte Wert hier ist jedoch der kombinierte Wert aller WEA [18]. Der typische Effekt der k-Parameter Vorkonditionierung ist eine Reduktion der Extremwindabschätzung um 5-10%.

Die Verwendung der k-Parameter-Vorkonditionierung beruht demnach auf einer soliden statistischen Basis.

13.3.3 Effektive Turbulenz

13.3.3.1 Beschreibung und Grenzen

Die Prüfung der Effektiven Turbulenz ist zusammen mit der Extremwindprüfung ein Kernpunkt der IEC Hauptprüfungen. Während die Extremwindgeschwindigkeit die Extremlasten bestimmt, wirkt die Effektive Turbulenz als Ermüdungslast („Fatigue load“), die die längerfristig zunehmende strukturelle Schädigung der WEA beschreibt. Die Berechnungsmethode der Effektiven Turbulenz wird beschrieben in der Version IEC 61400-1:2005 + A1:2010 [2]. Das Effektive-Turbulenz-Modell, auch Frandsen-Modell genannt, basiert auf der Publikation [13] von Sten Frandsen, Risø/DTU.

Die Auslegungsgrenzen der Effektiven Turbulenz sind durch das “Normale Turbulenzmodell” festgelegt und werden ausgehend vom Basisparameter I_{ref} in Tabelle 1 (Kap. 13.1.1) bestimmt. I_{ref} hat die Werte 0,12; 0,14 und 0,16 für die jeweiligen Standard-Turbulenzklassen C, B und A. Bitte beachten Sie, dass diese NICHT die Grenzwerte für die berechnete Turbulenzintensität sind, sondern nur zur Berechnung der Grenzwerte dienen. Die berechnete Effektive Turbulenz basiert auf dem 90sten Perzentil der gemessenen Umgebungsturbulenz und wird dem Normal-Turbulenzmodell (Auslegungsgrenzen) für einen bestimmten Windgeschwindigkeitsbereich gegenüber gestellt. Dieser liegt bei bekannter Leistungskennlinie zwischen 60% der Windgeschwindigkeit bei Nennleistung bis zur Abschaltwindgeschwindigkeit. Bei Berechnung der Effektiven Turbulenz in SITE COMPLIANCE ist der Anlagentyp mit Leistungskennlinie immer schon im WEA-Objekt festgelegt. Anhang II beschreibt weitere Details des Modells.

Die Effektive Turbulenz wird als Funktion der Windgeschwindigkeit berechnet. Dafür wird für jede Windgeschwindigkeitsklasse eine Integration der Richtungsvariation der Turbulenz über alle Richtungen vorgenommen. Dennoch ist die Effektive Turbulenz kein wirklich MESSBARER Wert, da die Richtungsanteile mit einer speziellen Wichtung für die Materialermüdung über den materialabhängigen Wöhler-Exponent kombiniert werden, daher auch der Name EFFEKTIVE Turbulenz. Vor der Integration über alle Richtungen für jede Windgeschwindigkeitsklasse wird die Turbulenzerhöhung durch den Nachlauf mit dem 90sten Perzentil der Umgebungsturbulenz an jeder WEA kombiniert.

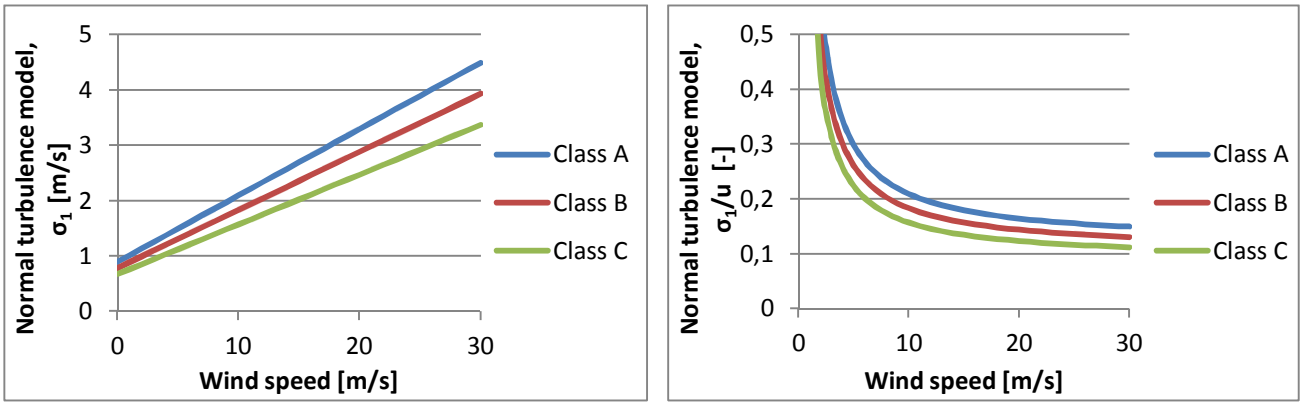


Abb. 32. Das “normale Turbulenzmodell” zeigt die Auslegungsgrenzen gemäß IEC für die Prüfung der Effektiven Turbulenz. Links als Standardabweichung der Windgeschwindigkeit, rechts als Turbulenzintensität.

13.3.3.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Achtung:
Bevor die Berechnung der Effektiven Turbulenz ausgeführt werden kann, muss die Gelände-Komplexitätsprüfung erfolgt sein. Grund dafür ist, dass daraus der Komplexitäts-Index i_c hervorgeht, was der in der IEC-Richtlinie definierte Korrekturfaktor für die Turbulenzstruktur ist.

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Einstellungen, Berechnungen und Bewertung der Ergebnisse einer typischen Turbulenzberechnung durchgeführt werden. Die Einstellungen dieser Prüfung sind in fünf Gruppen aufgeteilt: *Turbulenzdaten, Ausbreitungsmodell, Turbulenzstruktur-Korrektur, Frandsen-Modell* und *Sektormanagement*. Detaillierte Beschreibungen der Optionen in den jeweiligen Gruppen folgen nach dieser Beschreibung des Ablaufes und der einzelnen Register.

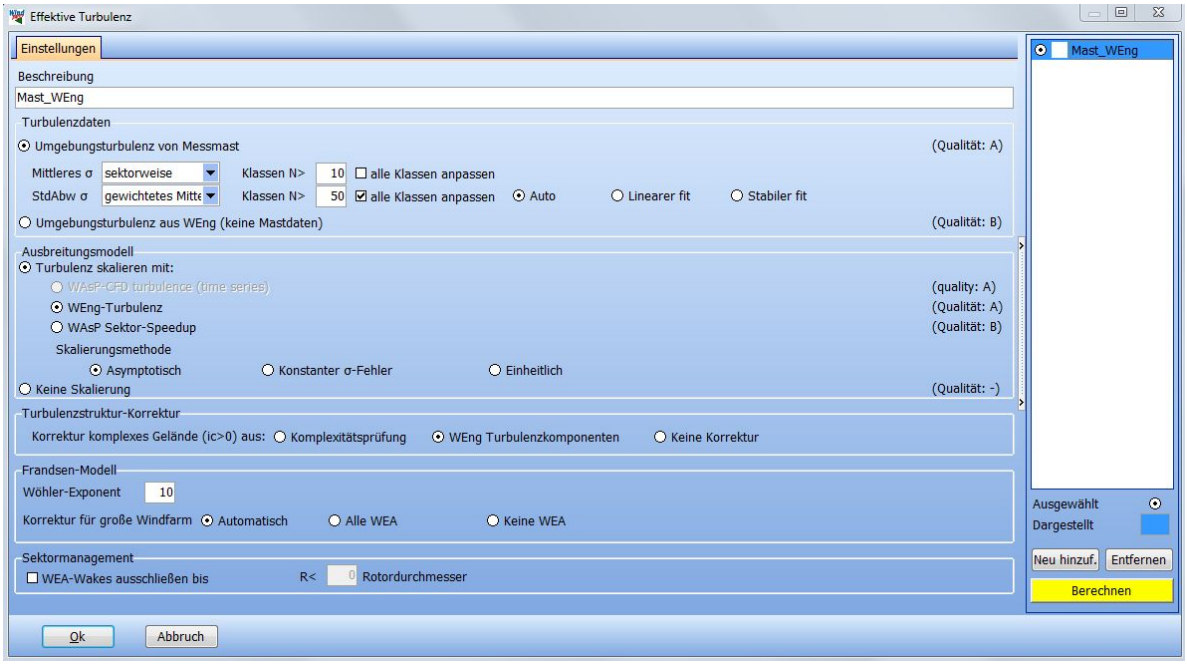
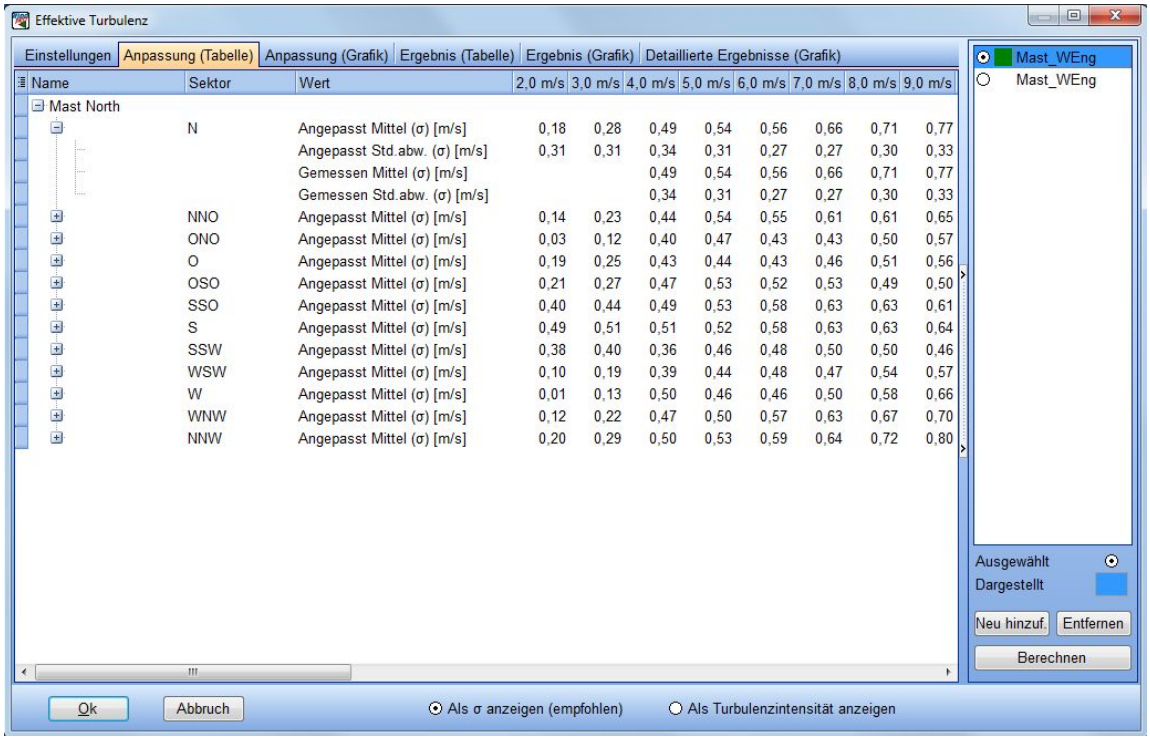


*Abb. 33. Register **Einstellungen** der Effektiven Turbulenz-Prüfung*

Über die gelbe Schaltfläche **Berechnen** unten rechts startet die Berechnung der Effektiven Turbulenz mit den Standard-Einstellungen. Nach Abschluss der Berechnung erscheinen oben neue Register.

Wenn gemessene Turbulenzdaten von einem Messmast in der Berechnung verwendet werden, müssen die Daten analysiert werden. Um Datenlücken zu füllen und eine Extrapolation der Turbulenzwerte und deren Standardabweichungen auf Windgeschwindigkeitsklassen durchzuführen, in denen keine ausreichenden Messdaten vorliegen, muss ein entsprechendes Modell angepasst werden. Das Resultat ist im Register **Anpassung (Tabelle)** sektorweise dargestellt.

Unten im Fenster ist es möglich, zwischen der Darstellung als **Standardabweichung** und **Turbulenzintensität** zu wechseln. Empfehlenswert ist die Darstellung als Standardabweichung, da dies der gemessene Wert ist, und die Grundannahme des Frandsen-Modells lautet, dass die Lasten sich proportional zur Standardabweichung verhalten. Durch die Darstellung als Turbulenzintensität wird der Fokus des Betrachtetenden leicht auf den unteren Windgeschwindigkeitsbereich gelenkt, der für die Lasten bedeutungslos ist. Zudem werden durch diese Darstellung unbedeutende Abweichungen der Anpassungen in diesem Bereich leicht überbewertet.



Name	Sektor	Wert	2,0 m/s	3,0 m/s	4,0 m/s	5,0 m/s	6,0 m/s	7,0 m/s	8,0 m/s	9,0 m/s
Mast North										
	N	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,18	0,28	0,49	0,54	0,56	0,66	0,71	0,77
		Angepasst Std.abw. (σ) [m/s]	0,31	0,31	0,34	0,31	0,27	0,27	0,30	0,33
		Gemessen Mittel (σ) [m/s]			0,49	0,54	0,56	0,66	0,71	0,77
		Gemessen Std.abw. (σ) [m/s]			0,34	0,31	0,27	0,27	0,30	0,33
	NNO	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,14	0,23	0,44	0,54	0,55	0,61	0,61	0,65
	ONO	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,03	0,12	0,40	0,47	0,43	0,43	0,50	0,57
	O	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,19	0,25	0,43	0,44	0,43	0,46	0,51	0,56
	OSO	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,21	0,27	0,47	0,53	0,52	0,53	0,49	0,50
	SSO	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,40	0,44	0,49	0,53	0,58	0,63	0,63	0,61
	S	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,49	0,51	0,51	0,52	0,58	0,63	0,63	0,64
	SSW	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,38	0,40	0,36	0,46	0,48	0,50	0,50	0,46
	WSW	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,10	0,19	0,39	0,44	0,48	0,47	0,54	0,57
	W	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,01	0,13	0,50	0,46	0,46	0,50	0,58	0,66
	WNW	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,12	0,22	0,47	0,50	0,57	0,63	0,67	0,70
	NNW	Angepasst Mittel (σ) [m/s]	0,20	0,29	0,50	0,53	0,59	0,64	0,72	0,80

*Abb. 34. Register **Anpassung (Tabelle)** der Turbulenzprüfung*

Anpassung (Grafik) zeigt die Anpassung der gemessenen Turbulenzdaten in grafischer Form. Über die Schaltflächen unten links kann zwischen den verschiedenen Standort-Masten und Richtungssektoren gewechselt werden. Dabei zeigen die:

- Sternchen die Messwerte
- offenen Kreise die gewählten Werte
- roten Linien das Modell der Anpassung

Wo die Sternchen innerhalb der offenen Kreise liegen, erfüllen die Messwerte die im Register Einstellungen getroffenen Kriterien (Mindestanzahl der Werte pro Bin). Weichen die offenen Kreise von der Position der Sternchen ab, wurden die Kriterien verfehlt und die angepassten Werte verwendet. Die offenen Kreise liegen dann immer auf der roten Linie.

Bei Verwendung der Standardeinstellungen ist die Standardabweichung der Turbulenz (σ_σ) in allen Sektoren gleich. Grund dafür ist die üblicherweise dürftige Datenlage des Wertes (Standardabweichung der Standardabweichung) aus einer 1-Jahres-Messung. Die IEC-Richtlinie erlaubt in einer Fußnote [2] die Verwendung des gewichteten Mittels von σ_σ, um ein stabileres Verfahren zu erhalten.

Um die Datenauswahl oder die Anpassung zu modifizieren, kann über **Neu hinzuf.**, rechts unten, eine neue Berechnung mit geänderten Einstellungen durchgeführt werden.

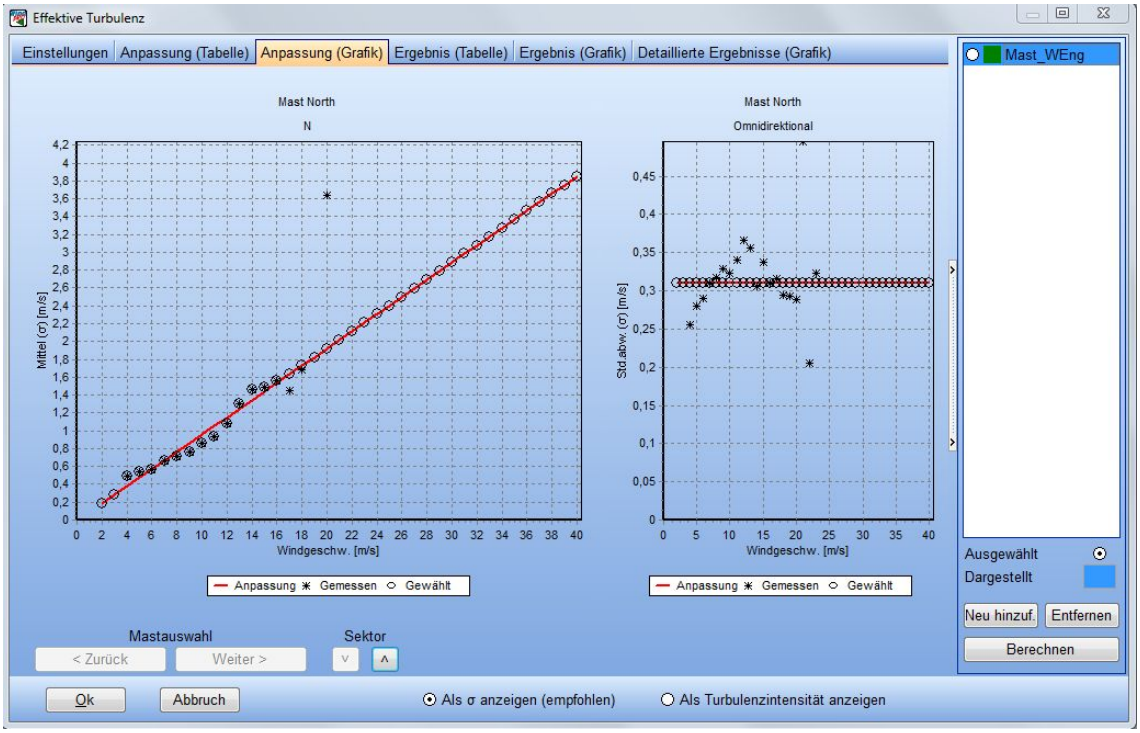
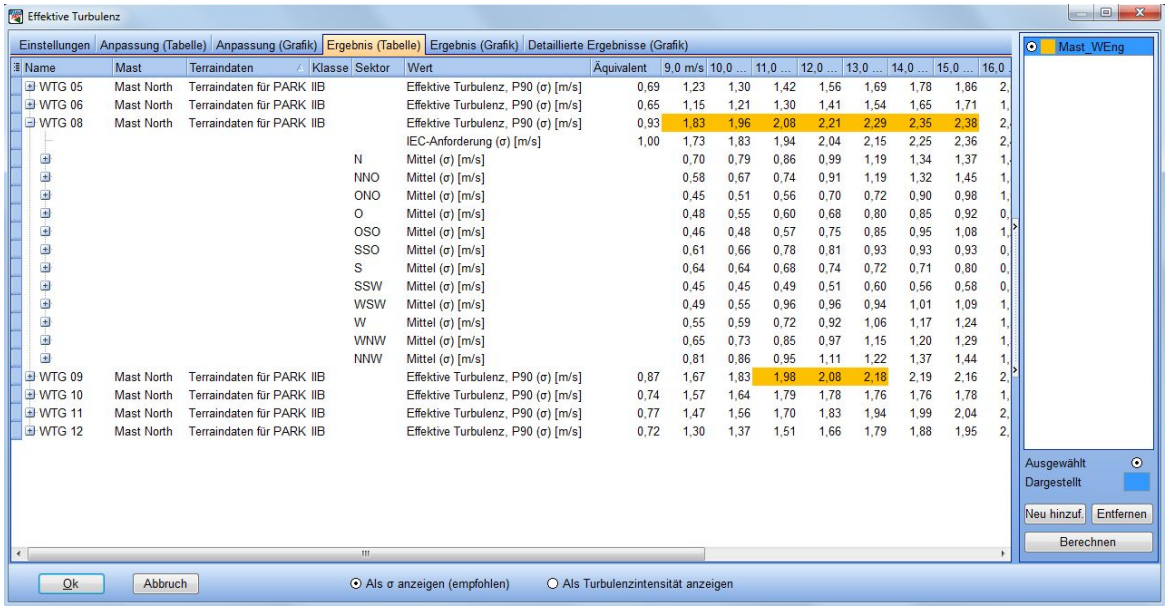


*Abb. 35. Register **Anpassung (Grafik)** der Turbulenzprüfung: Die „Ausreißer-Sternchen" der linken Grafik sind Messwerte, die nicht gewählt wurden, da in diesen Bins zu wenige Werte vorlagen. Stattdessen wurden in diesen Bins die angepassten Werte (Kreise auf der roten Linie) gewählt. Die Grenzwerte sind im Register **Einstellungen** festgelegt.*

Die berechneten Werte der Effektiven Turbulenz sind auf dem Register Ergebnis (Tabelle) zusammen gefasst und zeigen die Ergebnisse für jedes Bin des erforderlichen Windgeschwindigkeitsintervalls gemäß IEC-Richtlinie. Dieses Intervall (siehe auch *Beschreibung und Grenzen*) wird über die Windgeschwindigkeit bei Nennleistung aus der Leistungskennlinie der WEA-Objekte bestimmt.

Jedes Bin, das die Auslegungsgrenzen gemäß der entsprechenden IEC-Klasse überschreitet, ist in der Tabelle farbig markiert. Erscheint die komplette Tabelle weiß, heißt dies im Umkehrschluss, dass für keine Windgeschwindigkeitsklasse eine Überschreitung vorliegt. Die gelbe Markierung bedeutet Achtung, z.B. wenn für eine WEA ein IEC-Grenzwert überschritten ist, diese Überschreitung aber unkritisch ist, da in anderen Bins die Grenzen unterschritten werden und damit die Gesamtbelastung der Anlage noch tolerabel ist. Rote Markierung bedeutet, dass die Überschreitung der Einzelwerte insgesamt zu einer kritischen Belastung führen kann.

Für jede WEA zeigt die erste Zeile der Tabelle das Ergebnis der Effektiven Turbulenz für jede Windgeschwindigkeitsklasse. Die zweite Zeile zeigt den jeweiligen IEC-Grenzwert der Klassen. In der Spalte **Äquivalent** wird die summierte äquivalente Turbulenz, angepasst auf die jeweilige IEC-Design-Annahme, berechnet, die in die Lastannahmen eingeht. In der Reihe **IEC-Anforderung** steht daher bei **Äquivalent** immer 1. Die Markierung *Kritisch (rot)* wird erreicht, wenn der Wert Äquivalent größer ist als 1. Die darunter folgenden Zeilen beinhalten alle sektoriellen Teil-Ergebnisse und Skalierungsfaktoren für jede WEA.



Name	Mast	Terraindaten	Klasse	Sektor	Wert	Äquivalent	9,0 m/s	10,0 ...	11,0 ...	12,0 ...	13,0 ...	14,0 ...	15,0 ...	16,0
WTG 05	Mast North	Terraindaten für PARK IIB			Effektive Turbulenz, P90 (σ) [m/s]	0,69	1,23	1,30	1,42	1,56	1,69	1,78	1,86	2,
WTG 06	Mast North	Terraindaten für PARK IIB			Effektive Turbulenz, P90 (σ) [m/s]	0,65	1,15	1,21	1,30	1,41	1,54	1,65	1,71	1,
WTG 08	Mast North	Terraindaten für PARK IIB			Effektive Turbulenz, P90 (σ) [m/s]	0,93	1,83	1,96	2,08	2,21	2,29	2,35	2,38	2,
					IEC-Anforderung (σ) [m/s]	1,00	1,73	1,83	1,94	2,04	2,15	2,25	2,36	2,
				N	Mittel (σ) [m/s]		0,70	0,79	0,86	0,99	1,19	1,34	1,37	1,
				NNO	Mittel (σ) [m/s]		0,58	0,67	0,74	0,91	1,19	1,32	1,45	1,
				ONO	Mittel (σ) [m/s]		0,45	0,51	0,56	0,70	0,72	0,90	0,98	1,
				O	Mittel (σ) [m/s]		0,48	0,55	0,60	0,68	0,80	0,85	0,92	0,
				OSO	Mittel (σ) [m/s]		0,46	0,48	0,57	0,75	0,85	0,95	1,08	1,
				SSO	Mittel (σ) [m/s]		0,61	0,66	0,78	0,81	0,93	0,93	0,93	0,
				S	Mittel (σ) [m/s]		0,64	0,64	0,68	0,74	0,72	0,71	0,80	0,
				SSW	Mittel (σ) [m/s]		0,45	0,45	0,49	0,51	0,60	0,56	0,58	0,
				WSW	Mittel (σ) [m/s]		0,49	0,55	0,96	0,96	0,94	1,01	1,09	1,
				W	Mittel (σ) [m/s]		0,55	0,59	0,72	0,92	1,06	1,17	1,24	1,
				WNW	Mittel (σ) [m/s]		0,65	0,73	0,85	0,97	1,15	1,20	1,29	1,
				NNW	Mittel (σ) [m/s]		0,81	0,86	0,95	1,11	1,22	1,37	1,44	1,
WTG 09	Mast North	Terraindaten für PARK IIB			Effektive Turbulenz, P90 (σ) [m/s]	0,87	1,67	1,83	1,98	2,08	2,18	2,19	2,16	2,
WTG 10	Mast North	Terraindaten für PARK IIB			Effektive Turbulenz, P90 (σ) [m/s]	0,74	1,57	1,64	1,79	1,78	1,76	1,76	1,78	1,
WTG 11	Mast North	Terraindaten für PARK IIB			Effektive Turbulenz, P90 (σ) [m/s]	0,77	1,47	1,56	1,70	1,83	1,94	1,99	2,04	2,
WTG 12	Mast North	Terraindaten für PARK IIB			Effektive Turbulenz, P90 (σ) [m/s]	0,72	1,30	1,37	1,51	1,66	1,79	1,88	1,95	2,

*Abb. 36. Register **Ergebnis (Tabelle)** der Turbulenzprüfung. Hier sind die IEC-Grenzwerte in einigen Bins überschritten, da die Überschreitung nicht als kritisch betrachtet wird (Äquivalent<1) erfolgt die Markierung in gelb.*

Das Register **Ergebnis (Grafik)** zeigt die Ergebnisse der Effektiven Turbulenz als Funktion der Windgeschwindigkeit für jede WEA. Über die Schaltflächen links unten wird die gewünschte WEA angezeigt. Jede Überschreitung der IEC-Grenzwerte pro Windgeschwindigkeitsklasse wird mit einer roten Schattierung hervorgehoben.

Auch die Effektive Umgebungsturbulenz wird hier als gestrichelte Kurve dargestellt, hierin sind die Nachlaufeffekte nicht vorhanden. Der Anteil der Nachlaufeffekte wird daher im Vergleich der beiden roten Kurven sehr deutlich. Ab einer Windgeschwindigkeit von 12-13 m/s verringert sich der Wake-Einfluss, da die Schubbeiwerte der meisten WEA in diesem Bereich stark abnehmen und die Nachlaufeffekte somit gemindert werden.

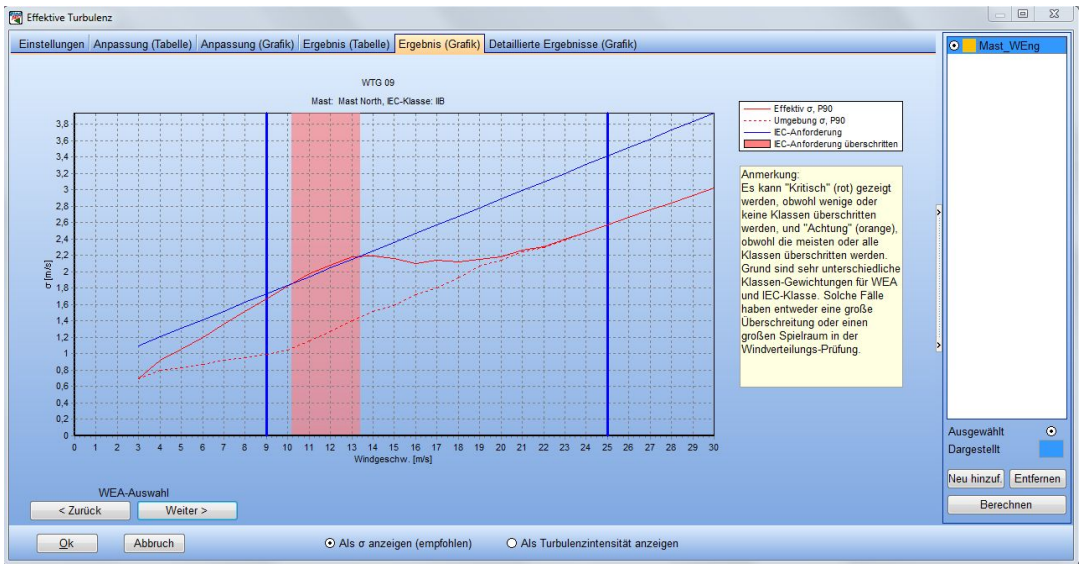


*Abb. 37. Register **Ergebnis (Grafik)** der Turbulenzprüfung*

Das Register ganz rechts **Detaillierte Ergebnisse (Grafik)** zeigt die verschiedenen Anteile bzw. Teilergebnisse der Berechnung der Effektiven Turbulenz in Abhängigkeit von der Windrichtung. Über die Ankreuzfelder unter der Grafik können die einzelnen Werte ausgeblendet werden. Zur Anzeige anderer Windgeschwindigkeitsklassen wird der Schieberegler genutzt. Wird das Kästchen **Alle** markiert, werden alle WEA im Parklayout dargestellt. Für jede WEA wird die Ergebnisgrafik dann entsprechend klein angezeigt. Hierdurch wird leicht nachvollziehbar, wie sich der Nachlaufeffekt auf die Turbulenzerhöhung der benachbarten WEA auswirkt, besonders, wenn alle Werte bis auf **Wake-Turbulenz** ausgeschaltet werden. So kann erkannt werden, welche WEA ggf. eine Überschreitung der Effektiven Turbulenz an einer bestimmten WEA-Position verursacht.

Die Grafiken auf diesem Register vermitteln ein besseres Verständnis der Berechnung der Effektiven Turbulenz sowie der Turbulenz-Probleme, die durch das WEA-Layout auftreten können. Liegt die Überschreitung an einer hohen Umgebungsturbulenz oder an der engen Layout-Planung? In welchen Sektoren treten die größten Probleme auf?

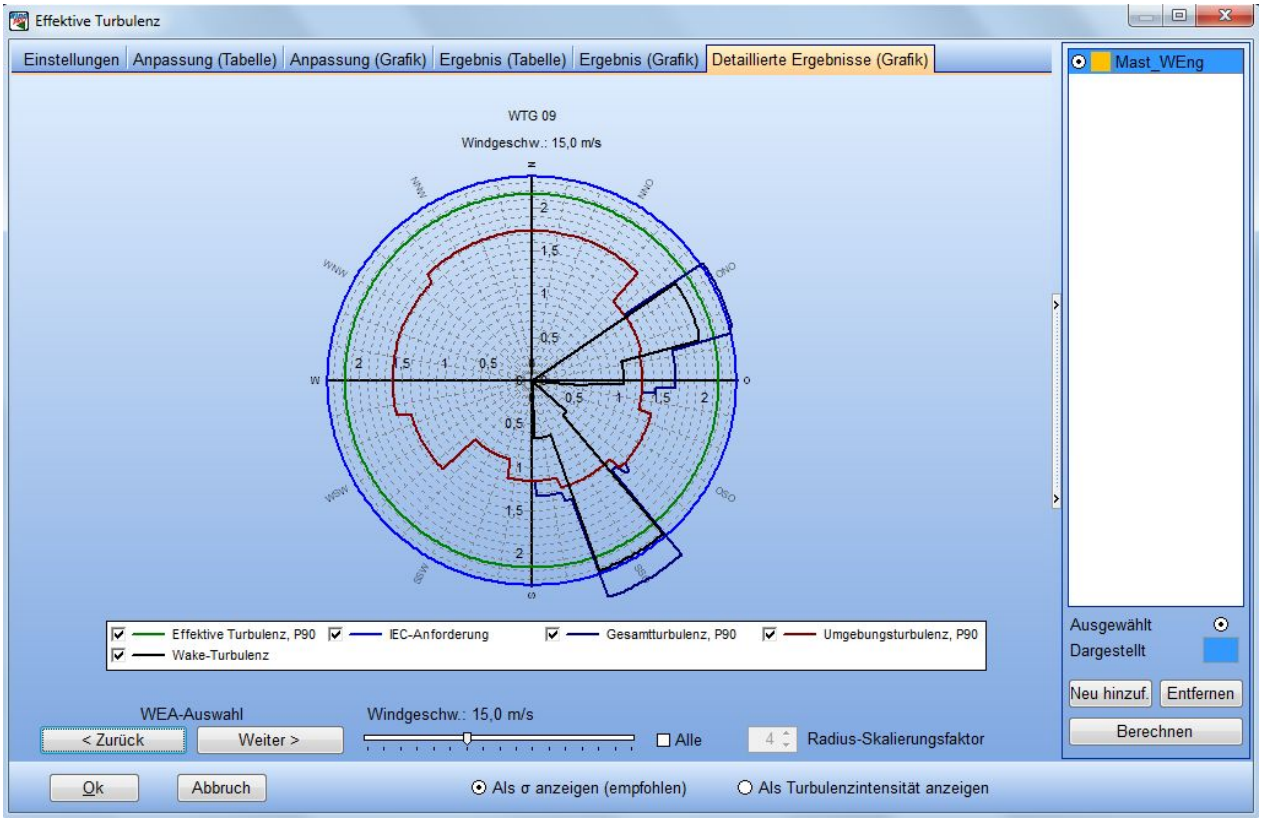


*Abb. 38. Register **Detaillierte Ergebnisse (Grafik)** der Turbulenz-Prüfung*

13.3.3.3 Turbulenzwerte (Umgebungsturbulenz)

Als erster Schritt zur Berechnung der Effektiven Turbulenz muss die Umgebungsturbulenz des Standortes ermittelt werden.

Abb. 39. Standard-Einstellungen der Eingangsdaten zur Umgebungsturbulenz

Umgebungsturbulenz aus Windmessung

Wenn Turbulenzdaten aus einer Windmessung (Messmast) aufgezeichnet wurden, muss bestimmt werden, wie mit Ausreißern oder Messlücken umgegangen wird, um zuverlässige Eingangsdaten zu erhalten. Dies

geschieht über die Definition von Auswahlkriterien für zu verwendende Datenpunkte und ein Modell, mit dem die fehlenden Werte angepasst/extrapoliert werden.

Die erste Einstellungsmöglichkeit für die mittlere Turbulenz (**Mittlere σ**) ist die Auswahl, ob die Werte **sektorweise** verwendet werden sollen oder das **gewichtete Mittel** über alle Richtungen. Voreingestellt und empfohlen ist die erste Möglichkeit. Das gewichtete Mittel sollte hier nur experimentell genutzt werden, z.B. bei einer sehr schlechten Datenbasis.

Die zweite Auswahlmöglichkeit ist die Anzahl der Werte (**N**) pro Windgeschwindigkeitsklasse, die vorliegen müssen, um die daraus gemittelte Turbulenz zu verwenden. Der Turbulenzwert in Bins mit weniger als **N** Werten wird mit dem Wert aus dem Anpassungsmodell ersetzt. Der voreingestellte Wert für **N** wurde auf Basis von Tests an einer Reihe von Messmasten festgelegt. Die Anpassung erfolgt über die Methode der kleinsten Quadrate bei gleicher Gewichtung der einzelnen Klassen-Werte. Eine Überbewertung der unteren Windgeschwindigkeitsklassen, in denen meist deutlich mehr Werte vorliegen als in den höheren, die für die Belastung der WEA viel entscheidender sind, wird dadurch vermieden. Bei einer Gewichtung der einzelnen Klassen über die Werteanzahl, würden ansteigende Tendenzen der Anpassungslinie von σ(u) bei höheren Windgeschwindigkeiten wie in Wäldern oder an Offshore, bzw. küstennahen Standorten, ignoriert. Dies könnte zur Unterschätzung der Turbulenz bei höheren Windgeschwindigkeiten führen, wie in der Abb. gezeigt.

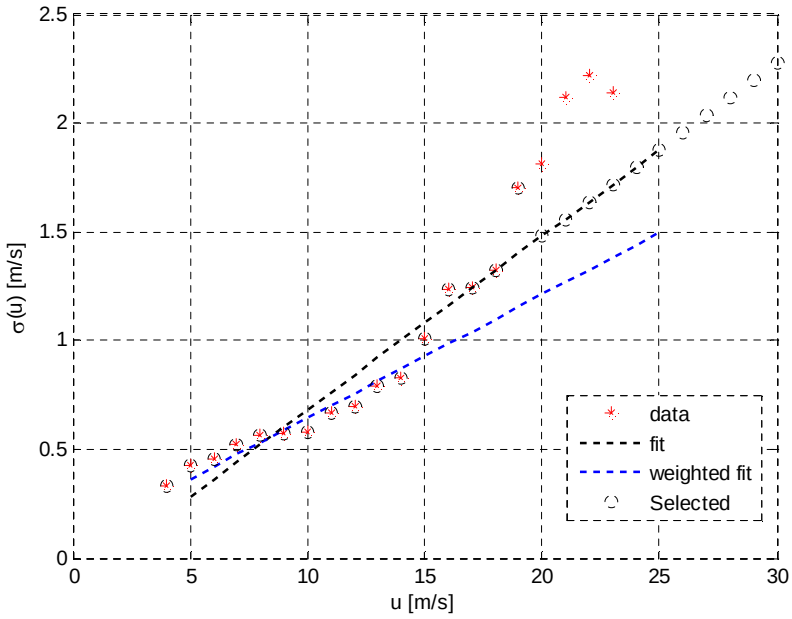


Abb. 40. Die Grafik zeigt den Unterschied zwischen gewichteter Anpassung (weighted fit, blau) und der in SITE COMPLIANCE durchgeführten Anpassung (schwarz). Die gewichtete Anpassung führt hier zu einer deutlichen Unterschätzung der Werte in den wichtigen Klassen 15 bis 20 m/s.

Die letzte Auswahlmöglichkeit ist die Auswahl von **alle Klassen anpassen**. Ist dies aktiviert, wird die Anpassung unabhängig von der Werteanzahl für alle Windgeschwindigkeitsklassen durchgeführt. Diese Möglichkeit ist nur dann angeraten, wenn die Daten sehr instabile Tendenzen zeigen und dennoch eine grobe Annäherung gewünscht ist.

Die Einstellungen für den Umgang der Messdaten der Standardabweichung der Turbulenz (d.h. σ_σ) zeigen die gleichen drei Möglichkeiten, die voreingestellten Werte weichen jedoch ab. Die IEC-Richtlinie [2] erlaubt die Verwendung des gewichteten Mittels für σ_σ, welches eine bessere Abschätzung dieses sonst sehr instabilen Parameters ermöglicht. Außerdem ist die Werteanzahl von min. 50 Messwerten pro Bin voreingestellt sowie **alle Klassen anpassen**. Dadurch wird eine stabilere Anpassung von σ_σ erreicht. Dennoch haben interne Auswertungen mehrerer Messmasten gezeigt, dass bei einer Messperiode von nur einem Jahr eine noch robustere Abschätzung erforderlich sein kann. Um eine bessere Anpassung zu erreichen gibt es hierfür die Auswahl **Auto**, **Linearer Fit** oder **Stabiler Fit**. Voreingestellt ist die automatische Option, eine lineare Anpassung wird verwendet, wenn das Bestimmtheitsmaß R^2 der Anpassung größer als 0,8 ist. Liegt R^2 unter 0,8, wird die Mittelwert-Abtastung verwendet, eine sehr stabile Methode, die unempfindlich auf Ausreißer ist. Unabhängig von der Höhe von R^2 kann über die Auswahl **Linearer Fit** oder **Stabiler Fit** (d.h. Mittelwert-Methode) statt **Auto** die entsprechende Anpassung forciert werden.

Umgebungsturbulenz aus WEng (kein Messmast)

Ist kein Messmast mit Turbulenzdaten am Standort vorhanden, wird die Turbulenz am Standort durch WEng berechnet. In den mit WEng kalkulierten Daten für jede WEA sind jedoch die Anteile der thermisch generierten Turbulenz sowie der Standardabweichung der Turbulenz nicht berücksichtigt. Bei der Entwicklung des Windfarm Assessment Tool (WAT) von Risø/DTU [14], das als Zubehör zu WEng erhältlich ist, wurde entschieden, die fehlenden Parameter aus der IEC-Richtlinie zu übernehmen. Daraus entsteht die folgende Gleichung für das 90%-Fraktil der Turbulenz für jeden Sektor und jede WEA, für die der alleinige Input die durch WEng ermittelte Turbulenz (TI_{WEng}) ist.

$$\sigma_{90} = TI_{Weng} u_{HH} + 7.47\, TI_{Weng}$$

Es hat sich gezeigt, dass der Ansatz von Risø/DTU (WAT) für die meisten Standorte sehr konservativ ist. An einer Kalibrierung der obigen Gleichung in SITE COMPLIANCE wird derzeit noch gearbeitet, um vergleichbare Werte zu einer Turbulenzmessung zu erhalten. Bisher liegen jedoch noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor, um eine wirkliche Anpassung vorzunehmen, daher wird in dieser Version von SITE COMPLIANCE noch die Umgebungsturbulenz von WEng mit den gleichen Annahmen wie von Risø/DTU [14, 15] genutzt.

13.3.3.4 Ausbreitungsmodell

Gemessen an einem Mast gelten die Turbulenzwerte nur für den Maststandort und die jeweilige Messhöhe. Auf anderen Positionen und anderen Höhen können die Turbulenzbedingungen deutlich abweichen. Um für jede WEA-Position repräsentative Werte zu bekommen, können in SITE COMPLIANCE mehrere Möglichkeiten zur Skalierung der Messwerte verwendet werden. Die Skalierungseinstellungen werden unter **Ausbreitungsmodell** vorgenommen. Wenn der Messmast repräsentativ für den/die WEA-Standort(e) ist, kann hier auch die Option **Keine Skalierung** gewählt werden.

*Abb. 41. Einstellungen des **Ausbreitungsmodells** zur Definition der Skalierung von Mast-Position und Messhöhe auf jede WEA-Position und Nabenhöhe*

Die Skalierung kann auf den sektoriellen WEng-Ergebnissen für Turbulenz und Speed-Up basieren oder auf den sektoriellen WAsP-Speed-Up-Faktoren. Zusätzlich stehen drei verschiedenen Grundannahmen für die Durchführung der Skalierung zur Auswahl:

1) Asymptotisch
2) Konstanter σ-Fehler
3) Einheitlich

Basierend auf den WEng-Ergebnissen sind alle drei Annahmen auswählbar.

Asymptotische Skalierung mit WEng

Diese Methode basiert auf zwei Annahmen:

a) Dass WEng als neutrales Modell die Variation der mechanisch erzeugten Turbulenz gut widergibt. Daher muss das Verhältnis der WEng-Turbulenz (Mast zu WEA) dem Verhältnis der realen Standortturbulenz (Mast zu WEA) im oberen Windgeschwindigkeitsbereich näherungsweise entsprechen.

$$\sigma^t_{mast}(u,\theta)/\sigma^t_{WTG}(u,\theta) \rightarrow \sigma^p_{mast}(u,\theta)/\sigma^p_{WTG}(u,\theta) \qquad \text{für } u \rightarrow \infty$$

b) Dass die thermisch erzeugte Turbulenz den unteren Windgeschwindigkeitsbereich bestimmt und eine allgemeingültige Eigenschaft des Standorts ist (d.h. eine Konstante).

$$\sigma^t_{mast}(u,\theta)/\sigma^t_{WTG}(u,\theta) \rightarrow 1 \qquad \text{für } u \rightarrow 0$$

Index *t* steht hier für "true", was am Mast die gemessene Turbulenz und am WEA-Standort den zu bestimmenden Wert meint. Index *p* steht für "predicted" und damit für die WEng-Ergebnisse. Der resultierende Skalierungsfaktor ist eine Funktion des Richtungssektors und der Windgeschwindigkeit.

Konstanter σ-Fehler mit WEng
Diese Methode nimmt an, dass sich der Fehler der von WEng berechneten Turbulenz (σ) über den Standort konstant verhält. Gemeint sind hier die Anteile der Turbulenz, die im mikroskaligen WEng-Modell nicht erfasst werden, wie großräumige oder thermische Effekte.

$$\sigma_{WTG}^{t}(u,\theta) - \sigma_{WTG}^{p}(u,\theta) = \sigma_{mast}^{t}(u/c,\theta) - \sigma_{mast}^{p}(u/c,\theta)$$

Für den Speed-Up am Standort werden die WEng-Mast-zu-WEA Speed-Up-Faktoren verwendet $c = u_{WTG}/u_{mast}$ (in obiger Gleichung wird u für u_{WTG} verwendet). Indizes sind benannt wie oben und auch hier ist der resultierende Skalierungsfaktor eine Funktion des Richtungssektors und der Windgeschwindigkeit.

Einheitliche Skalierung mit WEng
Die einheitliche Skalierung basiert auf der stark vereinfachten Annahme, dass das wahre („true") Verhältnis von Mast zu WEA-Position dem Verhältnis der WEng-Ergebnisse entspricht, welches für alle Windgeschwindigkeiten eines Sektors konstant ist. Der Skalierungsfaktor ist nur vom Richtungssektor abhängig.

$$\sigma_{WTG}^{t}(u,\theta)/\sigma_{mast}^{t}(u,\theta) = \sigma_{WTG}^{p}(u,\theta)/\sigma_{mast}^{p}(u,\theta)$$

Hier ist kein Speed-Up enthalten und keine geschwindigkeitsabhängige Änderung des Skalierungsfaktors. Vergleichen mit den anderen auf WEng-Ergebnissen basierenden Methoden ist diese sehr grob, durch die starke Vereinfachung jedoch auch sehr stabil.

Konstanter σ-Fehler mit WAsP
Diese Skalierungsmethode ähnelt *Konstanter σ-Fehler mit WEng* (siehe oben), jedoch in einer vereinfachten Form, da keine modellierten Ergebnisse („predicted") zur Verfügung stehen. Die Turbulenzwerte, die oben mit WEng berechnet wurden, werden auf Null gesetzt, um die entsprechende WAsP-Version der Gleichung zu erhalten.

$$\sigma_{WTG}^{t}(u,\theta) = \sigma_{mast}^{t}(u/c,\theta)$$

Die Grundannahme ist hier, dass Turbulenz σ sich bei bestimmten Verhältnissen (Geschwindigkeit und Richtung) am Maststandort über die Standortfläche konstant verhält. Dennoch ändert sich die Turbulenz auf den unterschiedlichen Positionen, da sich die Windverhältnisse über die Standortfläche nicht gleichmäßig verhalten, sondern abhängig von Rauigkeit und Gelände verändern.

Einheitliche Skalierung mit WAsP
Der einheitlichen Skalierung mit WAsP liegt eine ähnlich vereinfachte Annahme zu Grunde wie der einheitlichen Skalierung mit WEng. Der Skalierungsfaktor wird für alle Windgeschwindigkeiten als konstant angenommen und umgekehrt proportional zum WAsP-Ergebnis des Speed-Up-Verhältnisses von Mast zu WEA.

$$\sigma_{WTG}^{t}(u,\theta) = 1/c\ \sigma_{mast}^{t}(u,\theta)$$

Keine Skalierung
Hier wird davon ausgegangen, dass die Messwerte ohne jegliche Skalierung für alle WEA im Park repräsentativ sind.

$$\sigma_{WTG}^{t}(u,\theta) = \sigma_{mast}^{t}(u,\theta)$$

Diese Annahme wird nur für sehr einfache und kleine Standorte mit sehr geringer Geländevariation zwischen Mast und WEA empfohlen oder wenn die Skalierungsmöglichkeiten nicht als passend empfunden werden. Auch für Offshore-Standorte wird diese Annahme meist passen.

13.3.3.5 Turbulenzstruktur-Korrektur

Gemäß IEC-Richtlinie muss eine Korrektur der Turbulenzwerte erfolgen, wenn ein WEA-Standort in der Geländekomplexitätsprüfung als komplex oder teilweise komplex beurteilt wurde, d.h. wenn der Komplexitäts-Index I_C>0 ist, wird eine Korrektur der Turbulenzwerte vorgenommen. Grund für die Turbulenzerhöhung ist die in komplexem Gelände stattfindende Transformation der turbulenten kinetischen Energie von der horizontalen

in die vertikale Komponente, während Schalensternanemometer nur die horizontale Komponente messen. Um die nicht gemessenen Anteile zu kompensieren wurde in der IEC-Richtlinie der Turbulenzstruktur-Korrekturfaktor C_{CT} eingeführt.

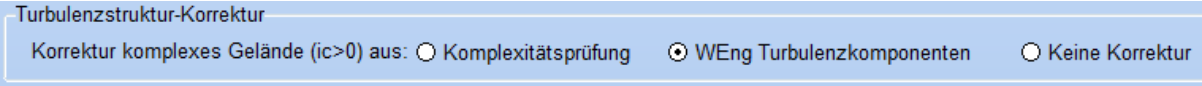


*Abb. 42. Einstellungen der **Turbulenzstruktur-Korrektur***

Bei den Einstellungen zur Anwendung der Turbulenzstruktur-Korrektur gibt es drei Möglichkeiten.

Komplexitätsprüfung

In der IEC-Richtlinie ist beschrieben, wie C_{CT} aus dem Geländekomplexitätsindex (I_C) jeder WEA-Position berechnet wird:

$$C_{CT} = 1 + 0.15 I_C$$

Die IEC-Richtlinie [2] fordert die Anwendung dieser Gleichung, wenn keine Berechnung oder Modellierung für die drei Komponenten der Turbulenz verfügbar ist.

Erfahrungen von diversen komplexen Standorten zeigten, dass diese Korrektur im Vergleich zur Modellierung der Turbulenzkomponenten sehr konservativ ist. Dies ist selbst der Fall, wenn ein lineares Modell wie WEng verwendet wird, welches dazu tendiert, die Anströmwinkel und damit die Transformation der horizontalen kinetischen Energie zur vertikalen/transversalen Komponente, zu überschätzen.

WEng Turbulenzkomponenten

Wenn eine Messung oder Modellierung der Turbulenzkomponenten vorliegt, soll gemäß IEC-Richtlinie folgende Gleichung zur Turbulenzstruktur-Korrektur genutzt werden:

$$C_{CT} = \frac{\sqrt{1 + \left({}^{\sigma_w}/_{\sigma_u}\right)^2 + \left({}^{\sigma_v}/_{\sigma_u}\right)^2}}{1.375}$$

Hier stehen σ_u, σ_v und σ_w für die drei Komponenten der Turbulenz (longitudinal, vertikal und transversal).
Diese drei Komponenten werden bei einer WEng-Berechnung für jede WEA-Position ermittelt und verwendet, wenn **WEng Turbulenzkomponenten** gewählt wird. Wenn eine WEng-Berechnung durchgeführt wurde, ist dies die Standard-Einstellung.

Gemessene Turbulenzwerte in drei Komponenten können derzeit von SITE COMPLIANCE nicht verwendet werden.

Keine Korrektur

Diese Option sollte nur gewählt werden, wenn der Komplexitätsindex für alle WEA Null ist, d.h. für eindeutig nicht komplexes Gelände. Die einzige Einschränkung ist die Verwendung von berechneten Turbulenzwerten aus WEng. In diesem Fall ist **Keine Korrektur** die Standardeinstellung, da WEng die longitudinale Turbulenzkomponente modelliert und nicht die horizontale, wie von Schalensternanemometern gemessen. Die Entscheidung keine Korrektur zu verwenden ist vergleichbar mit der internen Weiterverarbeitung von WEng-Ergebnissen in den Tools von Risø/DTU, wie WAT.

13.3.3.6 Frandsenmodell

Das Modell der Effektiven Turbulenz nach Frandsen spielt eine zentrale Rolle in der IEC-Richtlinie und wird in deren Anhang D [1, 2] erläutert. Eine Zusammenfassung der theoretischen Hintergründe findet sich auch im Anhang II dieses Handbuchs.
Vereinfacht gesagt besteht das Frandsen-Modell aus mehreren Bestandteilen. Die erste Komponente ist ein Modell zur Berechnung der Wake-Turbulenz im Nachlauf einer WEA bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von einem Schubbeiwert (ct). Die zweite Komponente ist das Modell zur Kombination der Wake-Turbulenz mit der Umgebungsturbulenz zu einer „Gesamt“turbulenz für jede Richtung und jede Windgeschwindigkeitsklasse. Die dritte Komponente ist ein spezielles Integral über alle Richtungen, das sowohl die Häufigkeit der Richtung enthält, als auch eine nicht-lineare Wichtung, die im Bezug zur Akkumulation der Materialermüdung der unterschiedlichen WEA-Materialien steht. Als Eingangswert wird

daher ein Material-Parameter benötigt, der sogenannte Wöhler-Exponent. Die Berechnung wird für jede Windgeschwindigkeitsklasse durchgeführt und das Resultat ist die Effektive Turbulenz als Funktion der Windgeschwindigkeit.

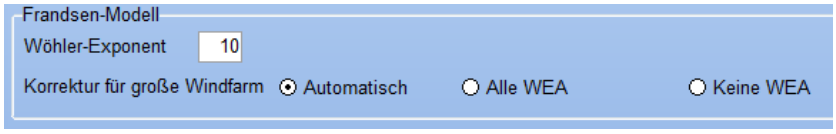


*Abb. 43. Einstellungen des **Frandsen-Modells** (Effektive-Turbulenz-Modell)*

Wöhler-Exponent

Der Wöhler-Exponent ist der Material-Parameter, der im Frandsen-Modell für die oben beschriebene Akkumulation der Materialermüdung verwendet wird. Üblich ist ein Wert von 10, der in etwa dem Material der Rotorblätter, GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff), entspricht. Ein Wert von 3 entspricht in etwa dem geformten Stahl z.B. von Turm und Hauptwelle. Die Verwendung eines höheren Wöhler-Exponenten ist eine konservative Annahme für Materialien eines geringeren Wöhler-Exponenten.

Korrektur für große Windfarm

Eine weitere, vierte Komponente des Frandsen-Modells ist die Korrektur für eine große Windfarm, in der die Entstehung zusätzlicher Turbulenz innerhalb eines großen Windparks berücksichtigt wird. Im Original wird von einem regelmäßigen Parklayout ausgegangen, was so in der Realität kaum anzutreffen sein wird, aber in [15] verallgemeinert wurde. Unsere Umsetzung bezieht sich auf die Verallgemeinerung: Für jeden Richtungssektor wird geprüft, ob eine Korrektur erforderlich ist, und die Anpassung wird gemäß Richtlinie durchgeführt. Nur die Anzahl der Nachbaranlagen entscheidet darüber, ob in einem Sektor die Korrektur angewendet wird.

13.3.3.7 Sektormanagement (vereinfachte Version)

SITE COMPLIANCE enthält in der aktuellen Version eine vereinfachte, aber wirkungsvolle Möglichkeit zur Modellierung eines Sektormanagements. Dafür wird ein Grenzwert in Rotordurchmessern um die WEA angegeben, z.B. 3 Rotordurchmesser. In der Berechnung wird dann der Nachlauf aller Nachbaranlagen ausgeschlossen, die sich in einer Richtung innerhalb dieses Abstands befinden, basierend auf der Annahme, dass die betreffenden WEA für diese Richtung abgeschaltet werden.

Dadurch kann man sehr leicht die Anforderung der meisten WEA-Hersteller berücksichtigen, dass alle WEA, die weniger als 3 Rotordurchmesser entfernt stehen, im Nachlauffall abgeschaltet sein sollen.

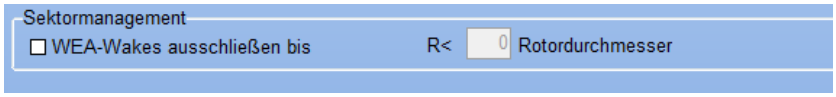


*Abb. 44. Einstellungen des **Sektormanagements***

13.3.4 Windverteilung

13.3.4.1 Beschreibung und Grenzen

Die Prüfung der Windverteilung geschieht über den Vergleich der Häufigkeit der Windklassen an jeder einzelnen WEA-Position zu der angenommenen Häufigkeitsverteilung der IEC-Richtlinie.

Die Auslegungsgrenze der IEC-Richtlinie entspricht einer Weibull-Verteilung mit Formfaktor k=2. Die mittlere Windgeschwindigkeit ist dabei definiert als 20% der Referenzwindgeschwindigkeit V_{ref} aus Tabelle 1 (siehe Kapitel 13.1.1), entsprechend 10 m/s, 8,5 m/s und 7,5 m/s für die jeweiligen Klassen I, II und III. Für jede Klasse muss der Windgeschwindigkeitsbereich von 20% bis 40% der V_{ref} geprüft werden.

Die IEC-Richtlinie verlangt, dass die angenommene Windgeschwindigkeitsverteilung langzeit-repräsentativ ist. Dafür muss die Repräsentativität der vorliegenden Winddaten ermittelt und ggf. eine Anpassung vorgenommen werden. In SITE COMPLIANCE gibt es dafür drei Möglichkeiten:

1) Die erste, und vermutlich gängigste Möglichkeit, ist die Verwendung von WAsP mit einer langzeitkorrigierten Windstatistik, z.B. erstellt mit dem WindPRO-Modul MCP. Die Einstellung wird bereits auf dem ersten Register, dem **Hauptteil**, unter **Strömungsmodell**, getätigt.
2) Die zweite Möglichkeit ist die direkte Nutzung der Messdaten (mit oder ohne WAsP-Berechnung) unter Anwendung einer vereinfachten Langzeit-Indexkorrektur auf dem Register **Langzeitkorrektur** (siehe Kap. 13.2.4).
3) Die dritte Möglichkeit ist die Annahme, dass die Daten langzeit-repräsentativ sind (Register **Langzeitkorrektur**, Haken bei **Keine Korrektur**). Sie findet Anwendung, wenn eine langjährige Messung vorliegt und davon ausgegangen werden kann, dass keine Langzeitkorrektur notwendig ist.

13.3.4.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Einstellungen, Berechnungen und Bewertung der Ergebnisse einer typischen Berechnung der Windgeschwindigkeitsverteilung durchgeführt werden. Für diese Prüfung gibt es nur drei Auswahlmöglichkeiten auf dem Register **Einstellungen**.

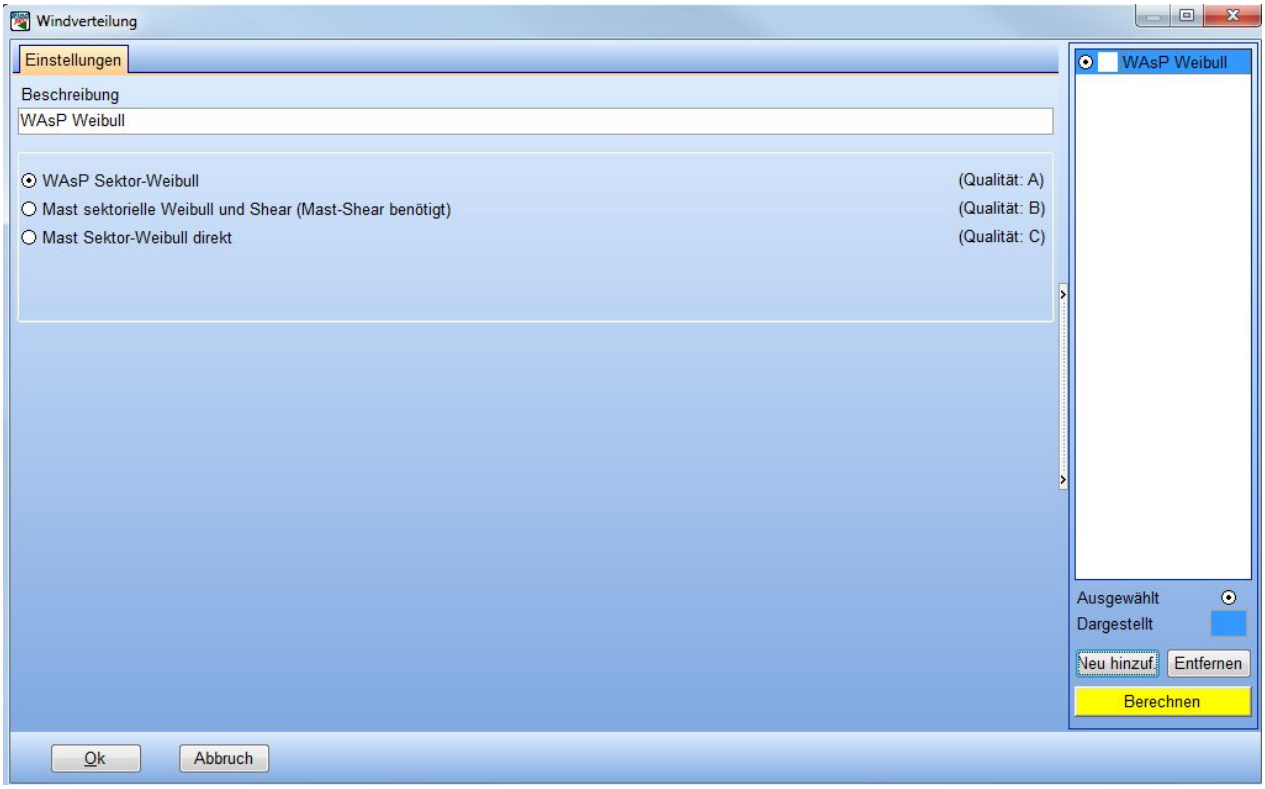
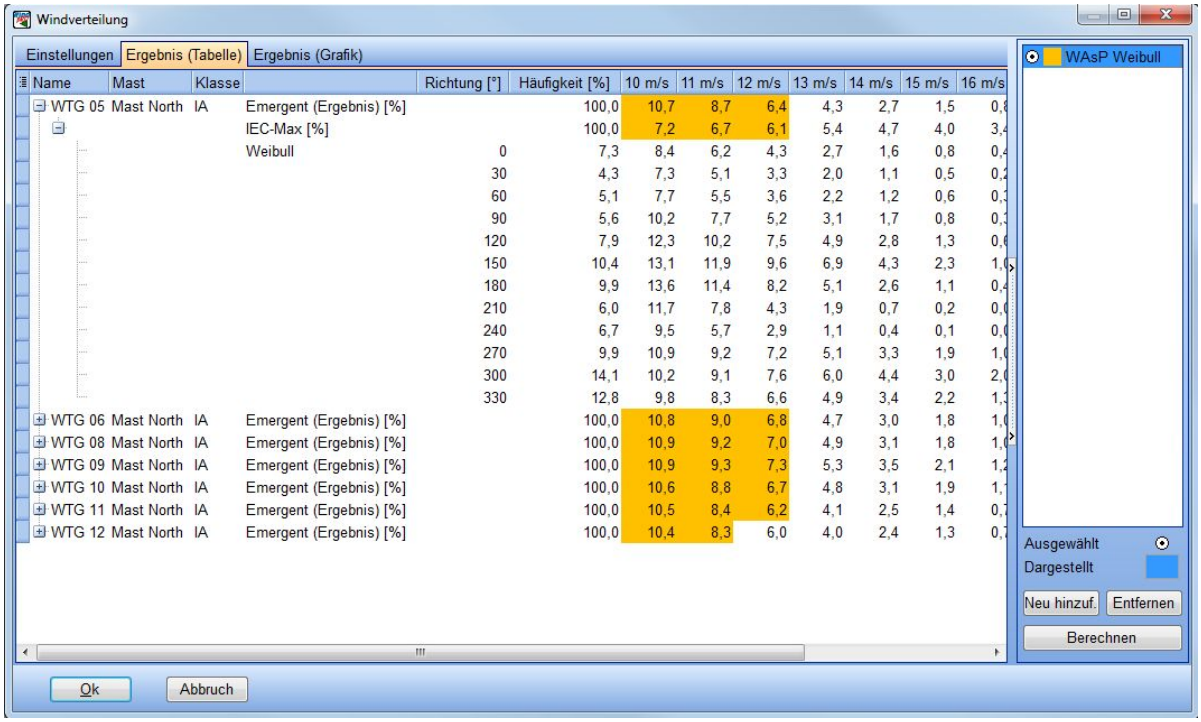


*Abb. 45. Register **Einstellungen** der Prüfung der Windverteilung*

In den meisten Fällen wurde bereits eine WAsP-Berechnung durchgeführt, die Standardeinstellung ist daher die Verwendung der WAsP-Ergebnisse für die einzelnen WEA-Positionen.

Das Register **Ergebnis (Tabelle)** zeigt die detaillierten Ergebnisse für alle relevanten Windgeschwindigkeitsklassen an jeder WEA. Erscheint eine Windgeschwindigkeitsklasse farbig markiert, überschreitet die Häufigkeit dieser Klasse die IEC-Grenzen. Ist die Summe der Überschreitungen für eine WEA *kritisch*, erscheint eine rote Markierung, wird lediglich der Grenzwert überschritten, erscheint die Markierung *Achtung* in orange.

Die erste Zeile jeder WEA zeigt die Häufigkeit der jeweiligen Windgeschwindigkeitsklasse für diese WEA. Die zweite Zeile zeigt die Grenzwerte der gewählten IEC-Klasse. Mit Klick auf können weitere Zeilen ausgeklappt werden, die die sektorielle Verteilung der Windgeschwindigkeitsklassen enthalten.



Name	Mast	Klasse		Richtung [°]	Häufigkeit [%]	10 m/s	11 m/s	12 m/s	13 m/s	14 m/s	15 m/s	16 m/s
WTG 05	Mast North	IA	Emergent (Ergebnis) [%]		100,0	10,7	8,7	6,4	4,3	2,7	1,5	0,
			IEC-Max [%]		100,0	7,2	6,7	6,1	5,4	4,7	4,0	3,
			Weibull	0	7,3	8,4	6,2	4,3	2,7	1,6	0,8	0,
				30	4,3	7,3	5,1	3,3	2,0	1,1	0,5	0,
				60	5,1	7,7	5,5	3,6	2,2	1,2	0,6	0,
				90	5,6	10,2	7,7	5,2	3,1	1,7	0,8	0,
				120	7,9	12,3	10,2	7,5	4,9	2,8	1,3	0,
				150	10,4	13,1	11,9	9,6	6,9	4,3	2,3	1,
				180	9,9	13,6	11,4	8,2	5,1	2,6	1,1	0,
				210	6,0	11,7	7,8	4,3	1,9	0,7	0,2	0,
				240	6,7	9,5	5,7	2,9	1,1	0,4	0,1	0,
				270	9,9	10,9	9,2	7,2	5,1	3,3	1,9	1,
				300	14,1	10,2	9,1	7,6	6,0	4,4	3,0	2,
				330	12,8	9,8	8,3	6,6	4,9	3,4	2,2	1,
WTG 06	Mast North	IA	Emergent (Ergebnis) [%]		100,0	10,8	9,0	6,8	4,7	3,0	1,8	1,
WTG 08	Mast North	IA	Emergent (Ergebnis) [%]		100,0	10,9	9,2	7,0	4,9	3,1	1,8	1,
WTG 09	Mast North	IA	Emergent (Ergebnis) [%]		100,0	10,9	9,3	7,3	5,3	3,5	2,1	1,
WTG 10	Mast North	IA	Emergent (Ergebnis) [%]		100,0	10,6	8,8	6,7	4,8	3,1	1,9	1,
WTG 11	Mast North	IA	Emergent (Ergebnis) [%]		100,0	10,5	8,4	6,2	4,1	2,5	1,4	0,
WTG 12	Mast North	IA	Emergent (Ergebnis) [%]		100,0	10,4	8,3	6,0	4,0	2,4	1,3	0,

*Abb. 46. Register **Ergebnis (Tabelle)** der Windverteilungsprüfung*

Auf dem Register **Ergebnis (Grafik)** wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Häufigkeit der einzelnen Windgeschwindigkeitsklassen) grafisch mit der gemäß IEC festgelegten Kurve verglichen. Das relevante Windgeschwindigkeitsintervall befindet sich zwischen den blauen Linien, jede Überschreitung wird durch eine rote Markierung des entsprechenden Intervalls hervorgehoben. Über die **WEA-Auswahl** unten links kann die jeweils nächste oder vorige WEA angezeigt werden.

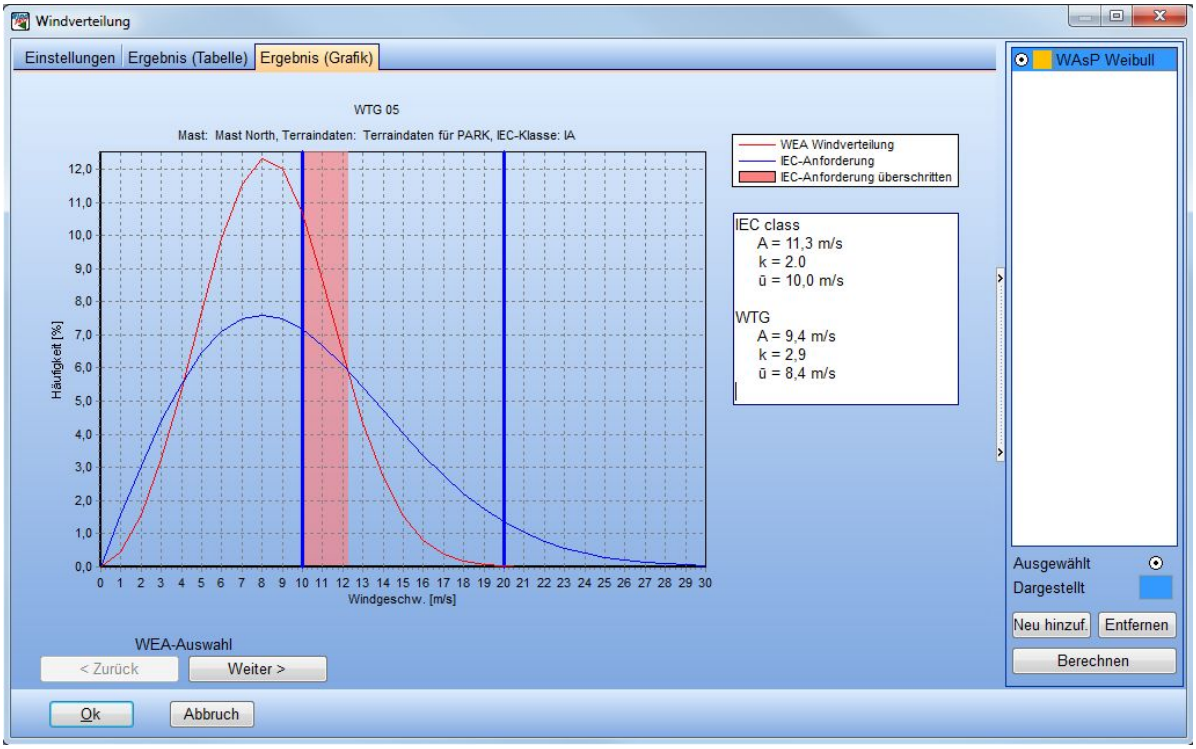


*Abb. 47. Register **Ergebnis (Grafik)** der Windverteilungsprüfung*

13.3.4.3 Berechnungsoptionen

Für die Windverteilungsprüfung existieren nur sehr wenige Berechnungsoptionen, die übliche ist WAsP Sektor-Weibull. Die anderen beiden Möglichkeiten sollten nur gewählt werden, wenn der Mast absolut repräsentativ für die WEA-Positionen ist.

Bekanntermaßen ist das WAsP-Modell in sehr steilem, bzw. komplexem Gelände nur beschränkt verwendbar und neigt zu Überschätzungen des Speed-Ups. Ist der Messmast jedoch repräsentativ für die WEA positioniert, sollte dies keine größeren Probleme bereiten.

WAsP Sektor-Weibull

Mit dieser Einstellung wird die laut WAsP-Nomenklatur sogenannte “emergent wind speed distribution” berechnet. Jede der sektoriellen Weibull-Verteilungen wird mit der Häufigkeit des jeweiligen Sektors gewichtet und addiert, um die richtungsunabhängige Verteilung der Windgeschwindigkeitsklassen zu erhalten. Die resultierende Verteilung ist normalerweise keine wirkliche Weibull-Verteilung und kann daher Besonderheiten wie z.B. mehrere Maxima aufweisen. Sie wird anschließend im relevanten Windgeschwindigkeitsbereich mit den IEC-Grenzen verglichen.

Mast sektorielle Weibull und Shear (Mast-Shear benötigt)

Basiert die Vertikal-Extrapolation auf der gemessenen Windscherung am Mast, wird vorausgesetzt, dass die Windscherung über die Höhe konstant ist, was in Bereichen mit starken Speed-Up-Effekten nicht der Fall ist. Weiterhin wird die horizontale Veränderung als vernachlässigbar angenommen.

Diese Option kann genutzt werden, wenn die Mast-Position repräsentativ für die WEA-Positionen und keine WAsP-Berechnung/-Lizenz vorhanden ist. Hier werden die sektoriellen Weibull-Parameter für die Haupthöhe des Messmasts verwendet. Der A-Parameter wird anschließend über die jeweilige, aus der Messung ermittelte, Windscherung pro Sektor von der Mast-Haupthöhe auf die Nabenhöhe der WEA skaliert. Anschließend wird wiederum über die sektorielle Wichtung die resultierende Verteilung ermittelt.

Mast Sektor-Weibull direkt

Bei dieser Berechnungsoption wird die resultierende Verteilung direkt aus der sektoriellen Weibullverteilung des Messmasts berechnet. Diese Möglichkeit sollte nur angewendet werden, wenn die Mastposition sowohl horizontal als auch vertikal repräsentativ für die WEA-Position(en) ist (d.h. Messhöhe = Nabenhöhe).

13.3.5 Neigung der Anströmung

Die Prüfung der Neigung der Anströmung erfolgt sektorweise und bestimmt den Sektor mit der höchsten absoluten (positiven oder negativen) Neigung der Anströmung für jede WEA. Die resultierenden Werte werden mit den Auslegungsgrenzen gemäß IEC-Richtlinie verglichen.

13.3.5.1 Beschreibung und Grenzen

Die Auslegungsgrenzen gemäß IEC liegen für die Neigung der Anströmung bei +8° bzw. -8° für den Sektor mit der stärksten Neigung. Demnach liegen alle Werte über +8° und unter -8° außerhalb der Grenzen.

Die IEC-Richtlinie erlaubt zur Abschätzung der Neigung die Verwendung der Geländeanpassung aus der Komplexitätsprüfung im Nahbereich (5 x NH). Diese Option kann auch in SITE COMPLIANCE verwendet werden, die Ergebnisse weichen üblicherweise nur gering von den genaueren Resultaten ab, die mit Verwendung von WEng erreicht werden.

13.3.5.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Einstellungen, Berechnungen und Bewertung der Ergebnisse einer typischen Prüfung der Neigung der Anströmung durchgeführt werden. Für diese Prüfung gibt es nur zwei Auswahlmöglichkeiten auf dem Register **Einstellungen**.

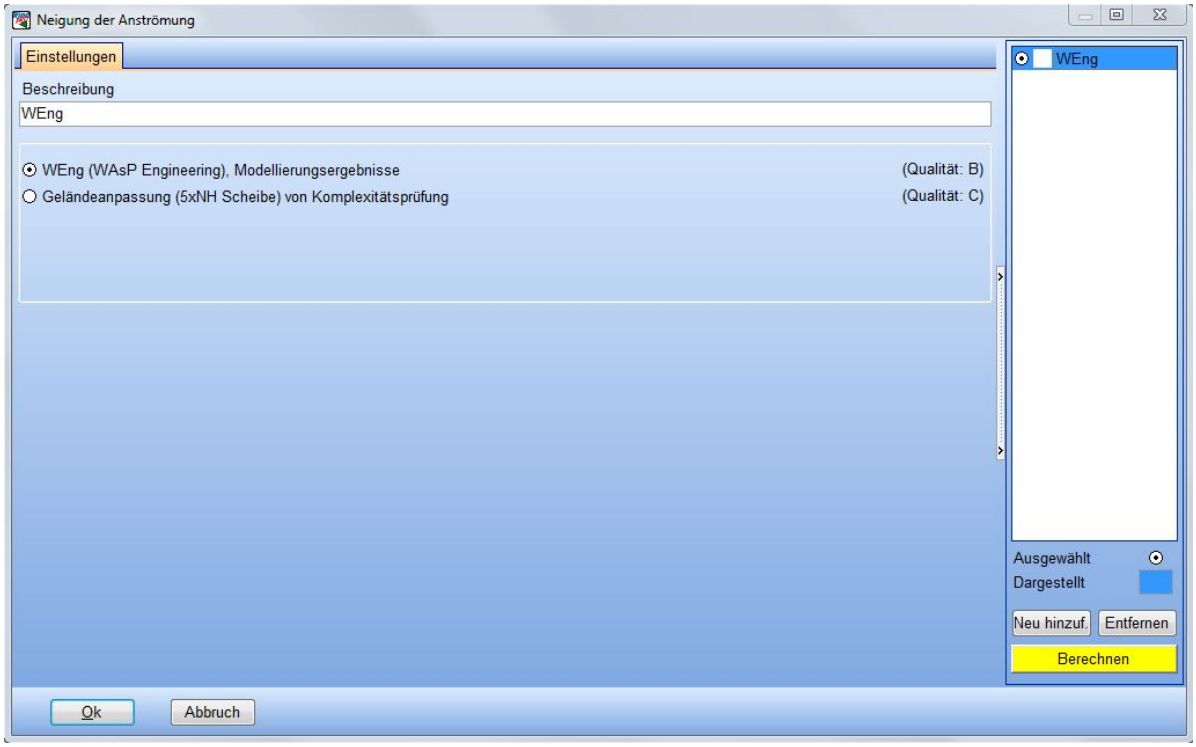
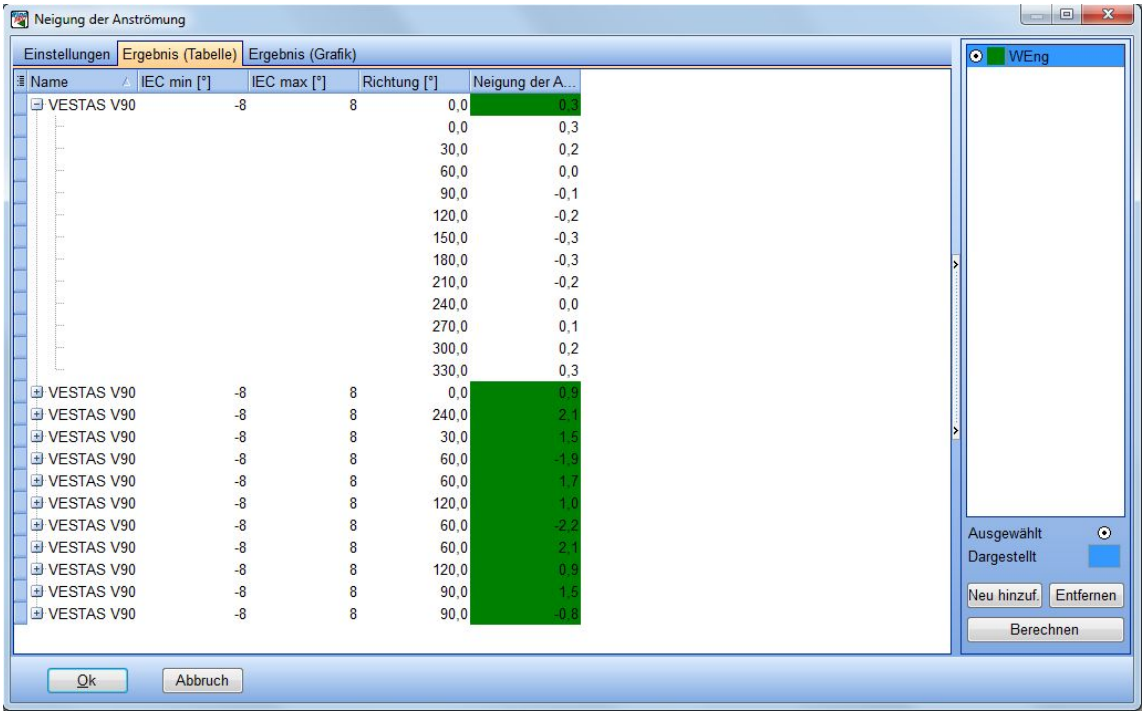


*Abb. 48. Register **Einstellungen** der Prüfung der Neigung der Anströmung*

Wurde bereits eine WEng-Berechnung durchgeführt, ist die Verwendung der Modellierungsergebnisse von WEng die Standardeinstellung.

Nach der Berechnung zeigt das Register **Ergebnis (Tabelle)** die Resultate für jede WEA, d.h. die maximale Neigung und den Sektor, in dem diese auftritt. In der erweiterten Ansicht der Tabelle ist die Neigung jedes Sektors dargestellt. Die sektorielle Ansicht ist jedoch nur bei Verwendung der WEng-Berechnung möglich, in der Geländeanpassung der Komplexitätsprüfung sind keine sektoriellen Werte verfügbar.



Name	IEC min [°]	IEC max [°]	Richtung [°]	Neigung der A...
VESTAS V90	-8	8	0,0	0,3
			0,0	0,3
			30,0	0,2
			60,0	0,0
			90,0	-0,1
			120,0	-0,2
			150,0	-0,3
			180,0	-0,3
			210,0	-0,2
			240,0	0,0
			270,0	0,1
			300,0	0,2
			330,0	0,3
VESTAS V90	-8	8	0,0	0,9
VESTAS V90	-8	8	240,0	2,1
VESTAS V90	-8	8	30,0	1,5
VESTAS V90	-8	8	60,0	-1,9
VESTAS V90	-8	8	60,0	1,7
VESTAS V90	-8	8	120,0	1,0
VESTAS V90	-8	8	60,0	-2,2
VESTAS V90	-8	8	60,0	2,1
VESTAS V90	-8	8	120,0	0,9
VESTAS V90	-8	8	90,0	1,5
VESTAS V90	-8	8	90,0	-0,8

*Abb. 49. Register **Ergebnis (Tabelle)** der Prüfung der Neigung der Anströmung*

Das Register **Ergebnis (Grafik)** zeigt die Resultate, d.h. die maximale Neigung, für alle WEA. Die IEC-Grenzen bei ±8° sind als horizontale blaue Linien dargestellt.

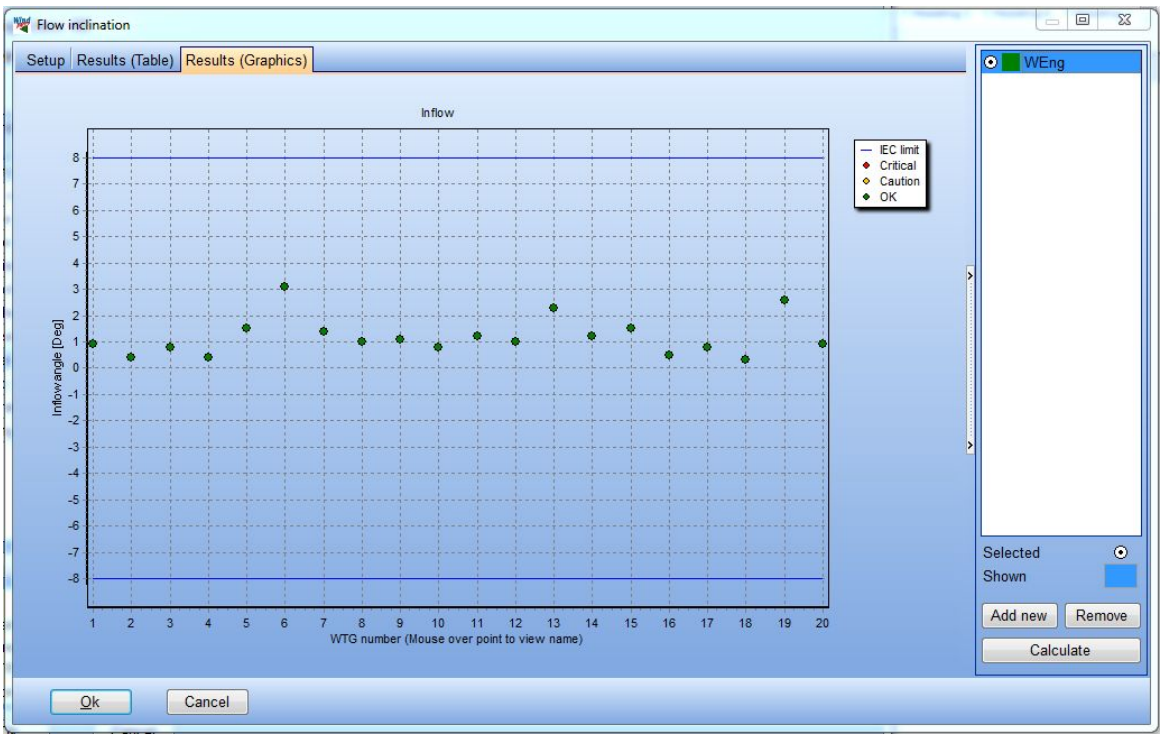


*Abb. 50. Register **Ergebnis (Grafik)** der Prüfung der Neigung der Anströmung*

13.3.5.3 Berechnungsoptionen

WEng (WAsP Engineering), Modellierungsergebnisse

WEng ist ein weit verbreitetes und anerkanntes Strömungsmodell, entwickelt als Grundlage für Eingangsdaten zu Lastberechnungen. Bei den erweiterten Einstellungen der WEng-Berechnung kann die Anzahl der Sektoren verändert werden. Durch Auswahl einer größeren Anzahl an Richtungssektoren statt der Standardeinstellung von 12 Sektoren kann eine feinere Auflösung des Anströmwinkels erreicht werden. Achtung: Als lineares Strömungsmodell neigt WEng zu einer Überschätzung der Anströmwinkel in steilem, komplexen Gelände.

Geländeanpassung (5xNH) aus der Komplexitätsprüfung

Details zur Bestimmung der Geländeanpassung sind in Kap. 13.3.1 aufgeführt. Diese Option ist in der IEC-Richtlinie ausdrücklich erlaubt.

13.3.6 Windshear

13.3.6.1 Beschreibung und Grenzen

Die Prüfung der Windscherung evaluiert die vertikale Veränderung der Windgeschwindigkeit über die Rotorfläche. Angegeben wird die Windscherung über den Höhenwindexponent α.

Die IEC-Auslegungsgrenze für Windshear liegt zwischen 0 und 0,2 für alle Design-Klassen.

Die IEC-Richtlinie beschreibt nicht eindeutig, wie die Bildung des Standortmittelwerts zu erfolgen hat, dieser könnte sich auf den omnidirektionalen Mittelwert beziehen oder den Mittelwert der Exponenten jeder Richtung. Da die Ermittlung der Windscherung nicht linear ist, unterscheiden sich die Ergebnisse dieser Methoden, wenn auch nicht drastisch. Die maximale Größe der Richtungssektoren wird in der IEC-Richtlinie [1], Kap. 11.3, mit 30° angegeben. In SITE COMPLIANCE wird als Standortmittelwert das gewichtete Mittel der sektoriellen Höhenwindexponenten verwendet. Dadurch ist eine bessere Anpassung der sektoriellen Werte möglich. Diese Interpretation des Standortmittelwertes des Höhenwindexponenten entspricht auch der Annahme von DTU im Windfarm Assessment Tool (WAT) [15].

13.3.6.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Auf dem Register **Einstellungen** gibt es fünf verschiedene Möglichkeiten, um die Windscherung zu ermitteln. Die oberen zwei kombinieren die Ergebnisse der Standortmessung(en) mit Strömungsmodellen, die nächsten zwei basieren nur auf Strömungsmodellen, die letzte Option beinhaltet nur die Messdaten ohne Modellierung.

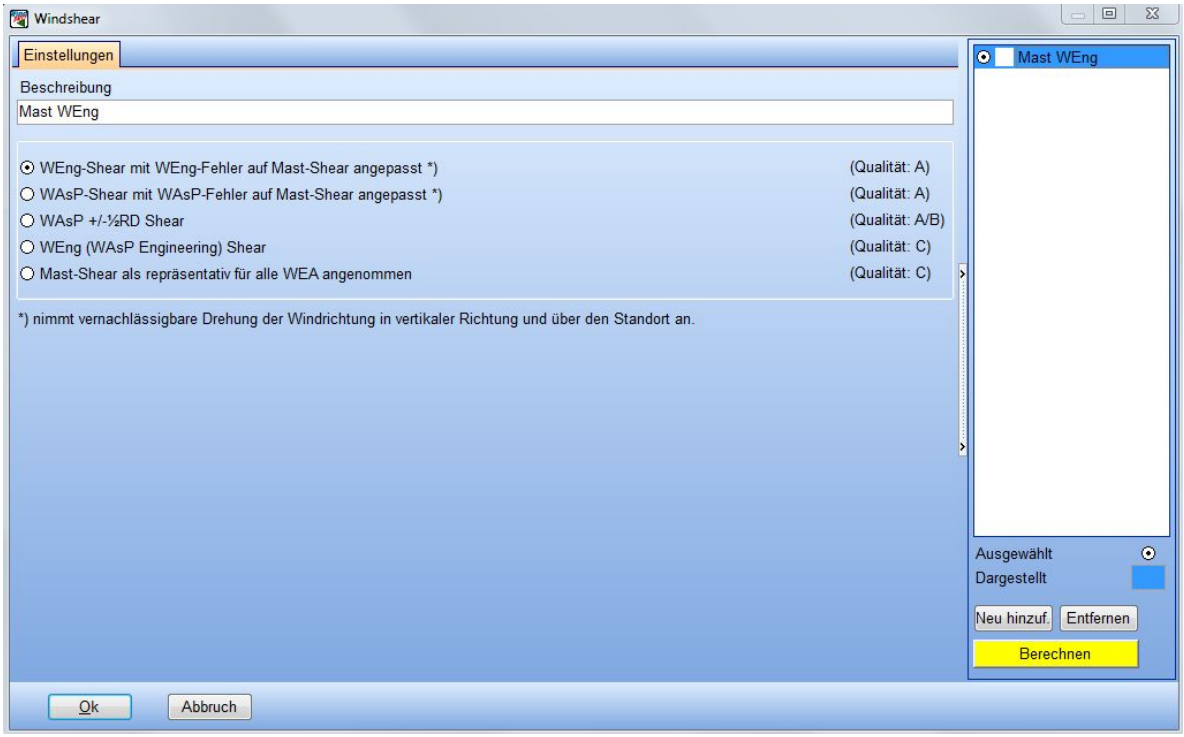


*Abb. 51. Register **Einstellungen** der Windshear-Prüfung*

Das Register **Ergebnis (Tabelle)** zeigt den unteren und oberen IEC-Grenzwert sowie die ermittelte Windscherung für jede WEA. Die Detailergebnisse bei ausgeklappten Zeilen einzelner WEA zeigen die sektoriellen Windshear-Werte und die Häufigkeiten der jeweiligen Sektoren.

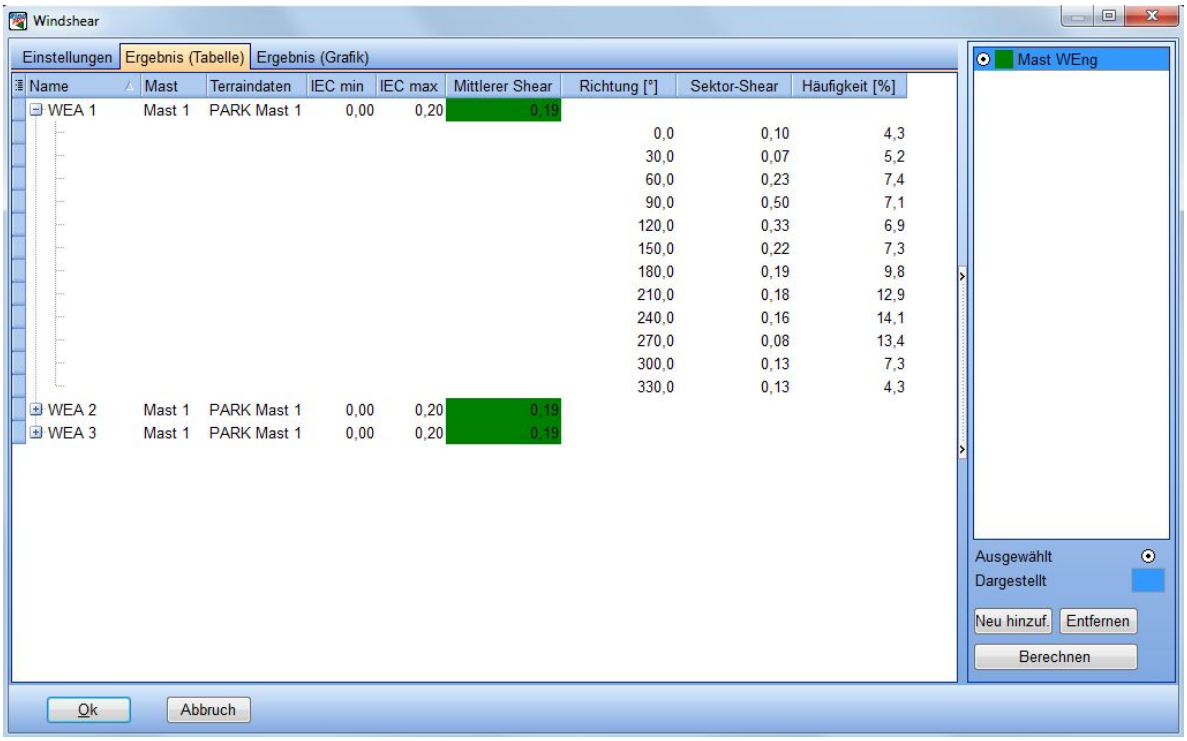


*Abb. 52. Register **Ergebnis (Tabelle)** der Windshear-Prüfung*

Ergebnis (Grafik) zeigt die grafische Übersicht aller WEA-Ergebnisse. Die IEC-Grenzen sind als blaue Linien dargestellt.

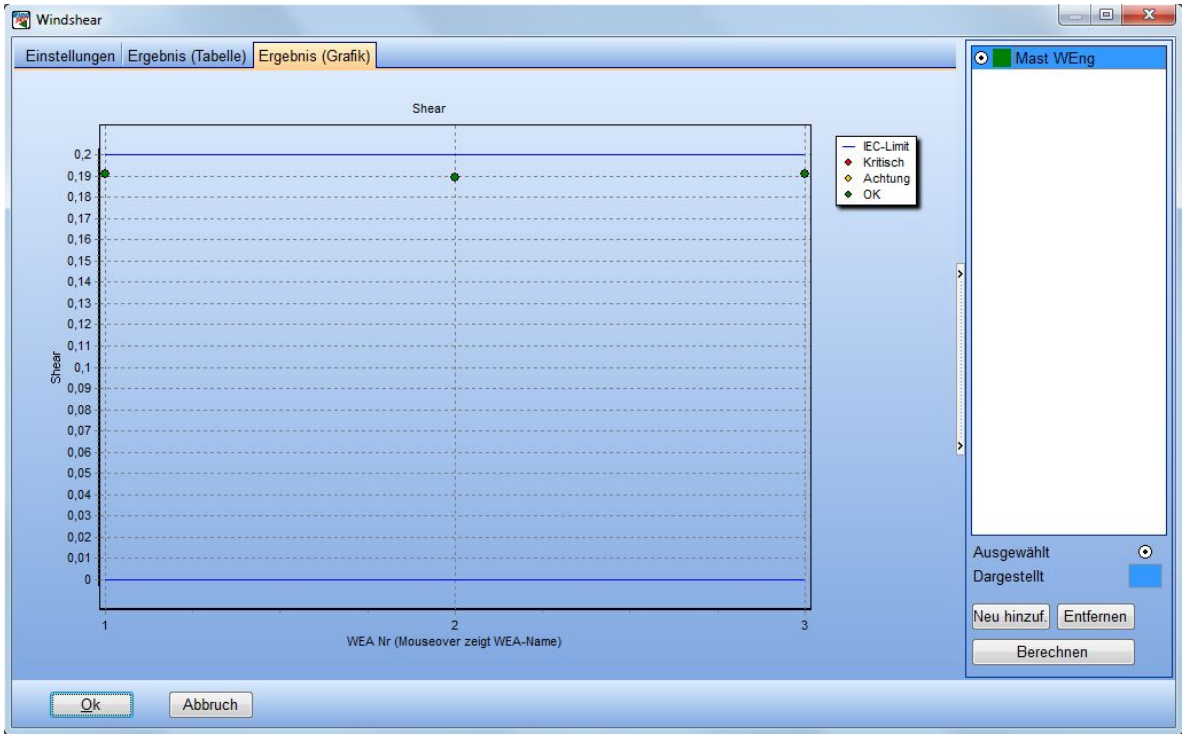


Abb. 53. ***Ergebnis (Grafik)*** *der Windshear-Prüfung*

13.3.6.3 Berechnungsoptionen

Im Folgenden werden die Berechnungsoptionen und die zugrunde liegenden Annahmen der Windshear-Prüfung erläutert.

○ WEng-Shear mit WEng-Fehler auf Mast-Shear angepasst *)	(Qualität: A)
○ WAsP-Shear mit WAsP-Fehler auf Mast-Shear angepasst *)	(Qualität: A)
○ WAsP +/-½RD Shear	(Qualität: A/B)
○ WEng (WAsP Engineering) Shear	(Qualität: C)
○ Mast-Shear als repräsentativ für alle WEA angenommen	(Qualität: C)

*) nimmt vernachlässigbare Drehung der Windrichtung in vertikaler Richtung und über den Standort an.

Abb. 54. Berechnungsoptionen der Windshear-Prüfung

WEng-Shear mit WEng-Fehler auf Mast-Shear angepasst

Die sektoriellen Höhenwindexponenten direkt aus den WEng-Ergebnissen sind üblicherweise etwas nach unten verschoben, da WEng eine neutrale atmosphärische Schichtung annimmt. Diese Abweichung kann für jeden Sektor der Messmastdaten bestimmt werden, und als Korrektur der WEng-Windshear für jeden Sektor der WEA-Position übertragen werden. Um den Standortmittelwert zu erhalten, werden die korrigierten sektoriellen Windscherungswerte mit der jeweiligen Häufigkeitsverteilung der WEA-Position richtungsgewichtet.

Mit dieser Methode wird versucht, die bestmögliche Kombination aus Messdaten und Strömungsmodellierung zu erreichen. Durch Messungen lässt sich die Windscherung an einem festen Punkt bestimmen, normalerweise der Mastposition, dieser Punkt ist aber nicht immer repräsentativ für den kompletten Standort. Ein Strömungsmodell kann die Variation der Windscherung über den Standort widergeben, benötigt jedoch eine gewisse Skalierung.

Die Methode basiert auf der Annahme, dass keine starke Verdrehung der Windrichtungen über den Standort, also von Mast- zu WEA-Position stattfindet. Je größer die Sektorbreite, desto eher trifft diese Annahme zu, Verdrehungen betragen üblicherweise deutlich weniger als die 30° der Standard-Sektorbreite (Verwendung von 12 Sektoren). In sehr komplexem Gelände können jedoch signifikante Verdrehungen auftreten. Sehr wichtig ist allerdings auch die Kontrolle, dass die Richtungssektoren konsistent sind, fehlerhafte Messungen haben einen deutlichen Einfluss auf die Berechnung.

WAsP-Shear mit WAsP-Fehler auf Mast-Shear angepasst

Diese Methode ist vergleichbar mit der oben beschriebenen WEng-Anpassung. Einziger Unterschied ist, dass die relative Variation der Windscherung aus den Ergebnissen der WAsP-Modellierung stammt. Das Stabilitätsmodell in WAsP führt zu deutlichen Unterschieden der berechneten Profile von WAsP und WEng.

WAsP +/-½RD shear

Standardmäßig berechnet WAsP alle Ergebnisse auf Nabenhöhe (NH), aber auch auf NH+½RD und NH½RD (Rotordurchmesser). Werden die Werte auf diesen drei Höhen ermittelt, kann daraus die Windscherung über die Rotorfläche für jeden Sektor und damit die mittlere Windscherung berechnet werden.

Die Qualität dieser Berechnungsoption hängt davon ab, wie gut das WAsP-Profil validiert und auf den Standort angepasst ist. Gute Ergebnisse werden erreicht, wenn die Stabilitäts-Parameter dem Standort entsprechend angepasst worden sind und das WAsP-Profil das gemessene Profil gut nachbildet.

Da die WAsP-Standards über Messungen aus Nord-Europa angepasst wurden, neigt das WAsP-Profil bei Standard-Einstellungen in tropischen und mittleren Breiten zur Überschätzung.

WEng (WAsP Engineering) Shear

Ergebnisse der Strömungssimulation mit WEng entsprechen genau der Nabenhöhe. Da WEng jedoch eine neutrale atmosphärische Schichtung annimmt, wird die Windscherung in WEng üblicherweise deutlich unterschätzt. Die Verwendung dieser Methode wird daher nicht empfohlen, sie ist lediglich zu Vergleichszwecken hier mit aufgeführt.

Mast-Shear als repräsentativ für alle WEA angenommen

Diese Methode ist nur empfehlenswert, wenn der Messmast repräsentativ für alle WEA-Positionen und die Nabenhöhe ist. Das heißt, dass der gesamte Standort in Bezug auf Rauigkeit und Orografie recht gleichmäßig strukturiert sein sollte.

13.3.7 Luftdichte

13.3.7.1 Beschreibung und Grenzen

Die IEC-Richtlinie fordert eine Angabe der Luftdichte auf Nabenhöhe. Die Auslegungsluftdichte gemäß IEC entspricht der Standard-Luftdichte von 1,225 kg/m³. Eine geringe Luftdichte am Standort führt zu einer geringeren Belastung der Anlage, eine höhere entsprechend zu einer höheren Belastung.

Prinzipiell verlangt die IEC-Richtlinie die Angabe der Luftdichte lediglich als Mittelwert für Windgeschwindigkeiten größer als Nennwindgeschwindigkeit. Tests haben allerdings ergeben, dass die Abweichung zwischen dem Jahresmittel der Luftdichte und der mittleren Luftdichte für Windgeschwindigkeiten größer als Nennwindgeschwindigkeit nur bei 1-2% liegt. In Anbetracht anderer Unsicherheiten bei der Ermittlung der Luftdichte wird dieser kleine Unterschied nicht als entscheidend angesehen. Zudem ist es auch bei WEA-Herstellern übliche Praxis, die mittlere Luftdichte anzunehmen, diese Praxis wird auch in SITE COMPLIANCE verwendet.

Das Anpassungsmodell der Temperatur- (und Druck-) verhältnisse der Messmasthöhe (über Normalnull) zur WTG-Nabenhöhe ü. NN basieren auf der ISO Standard-Atmosphäre, wie in der IEC-Richtlinie festgelegt.

Die relative Feuchte geht nicht in die Berechnung ein, da sie nur einen geringen Einfluss auf die Luftdichte hat, wie unten gezeigt. Ein Effekt der relativen Feuchte von mehr als 2% ist nur vorhanden, wenn die mittlere Lufttemperatur 35°C übersteigt und die mittlere Feuchte bei fast 100% liegt. Das höchste Jahresmittel der Temperatur ist 34°C (in Dalol, Äthiopien[3]). Demnach liegt der Einfluss der relativen Feuchte auf die Luftdichte für die meisten Standorte bei <1%. Zudem vermindert die relative Feuchte eher die Luftdichte und damit die aerodynamischen Lasten. In Bezug auf die WEA-Belastung ist es daher eine sehr leicht konservative Annahme die relative Feuchte nicht zu betrachten.

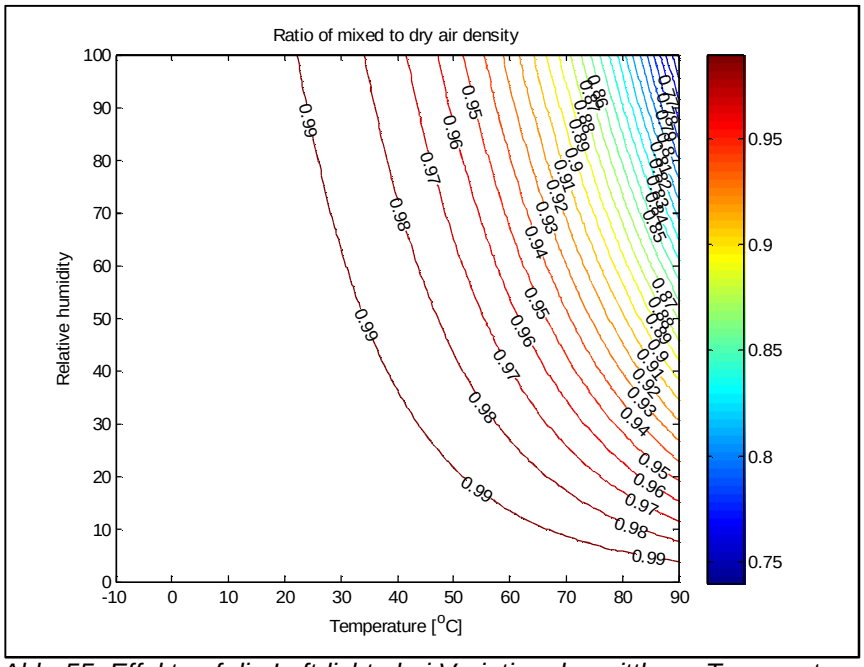


Abb. 55. Effekt auf die Luftdichte bei Variation der mittleren Temperatur und der relative Feuchte

13.3.7.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Das Register **Einstellungen** der Luftdichte-Prüfung ermöglicht nur die Wahl der Eingangsdaten. Ist ein **Standortmast** mit Temperaturdaten (zusätzlich optional Luftdruck) vorhanden, kann dieser ausgewählt werden. Pro Berechnung ist jedoch nur ein Mast verwendbar. Alternativ können auch WindPRO-Online-Daten verwendet werden. Diese müssen mit Temperaturdaten (und ggf. Druck) in einem METEO-Objekt vorhanden und auf dem Register **Messmastdaten** der SITE COMPLIANCE-Berechnung als **Klimadaten** definiert sein.

Sind keine Standortmessdaten der Temperaturen vorhanden, können Daten aus der Klimadatenbank des Global Historical Climatological Network (GHCN) ausgewählt werden. Standardmäßig wird die nächstgelegene Station ausgewählt. Falls eine andere nahgelegene Station besser zur Geländehöhe ü. NN des Standortes passt, kann diese über die Schaltfläche **Klimadatenbank** gewählt werden.

[3] http://www.weatherexplained.com/Vol-1/Record-Setting-Weather.html#b

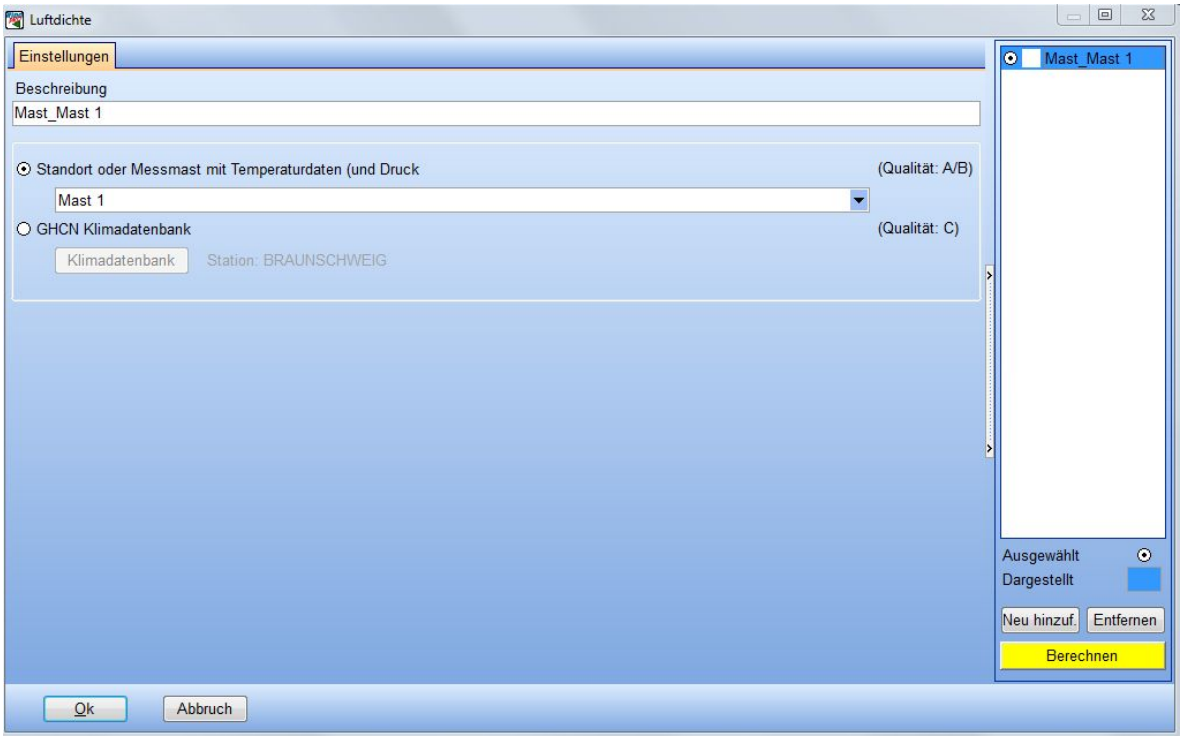


*Abb. 56. Register **Einstellungen** der Luftdichte-Prüfung*

Nach Durchführung der Berechnung über die gelbe Schaltfläche **Berechnen** erscheinen drei weitere Register. Das Register **Basisdaten** listet das Jahresmittel der verwendeten Temperaturdaten auf, die Höhe ü. NN, die relevanten atmosphärischen Parameter sowie am Ende die berechnete Luftdichte am Mast.

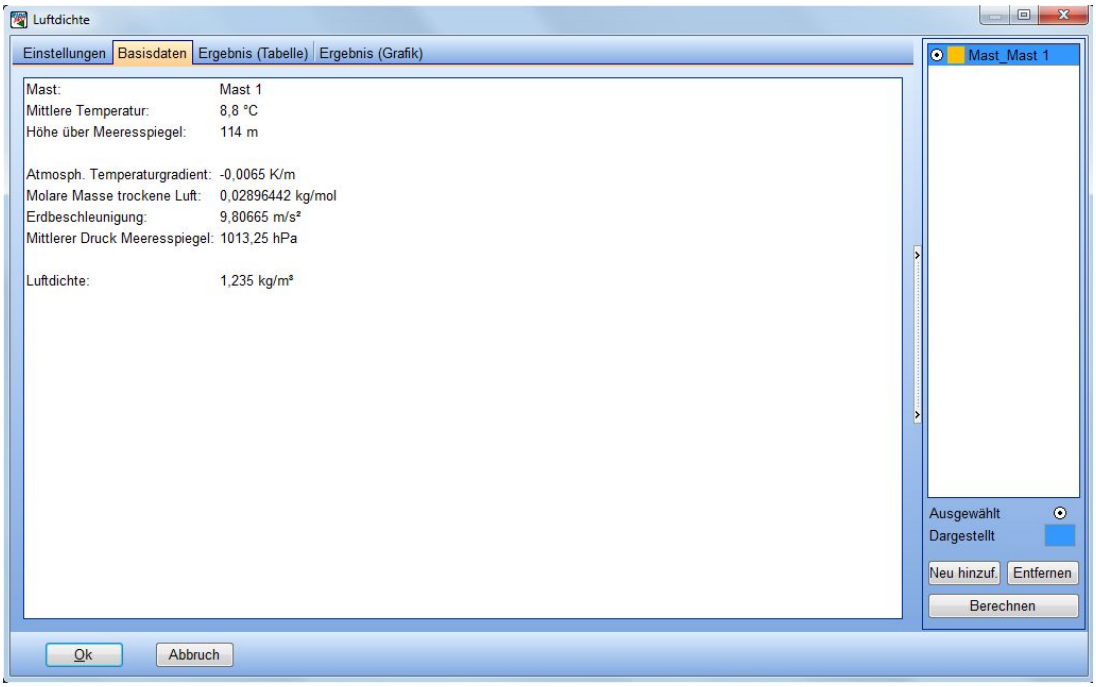


*Abb. 57. Register **Basisdaten** der Luftdichte-Prüfung.*

Das Register **Ergebnis (Tabelle)** zeigt das Jahresmittel der Luftdichte für jede WEA. Der Höhenunterschied zur Messmasthöhe, die mittlere Temperatur und Druck wird in den weiteren Spalten dargestellt.

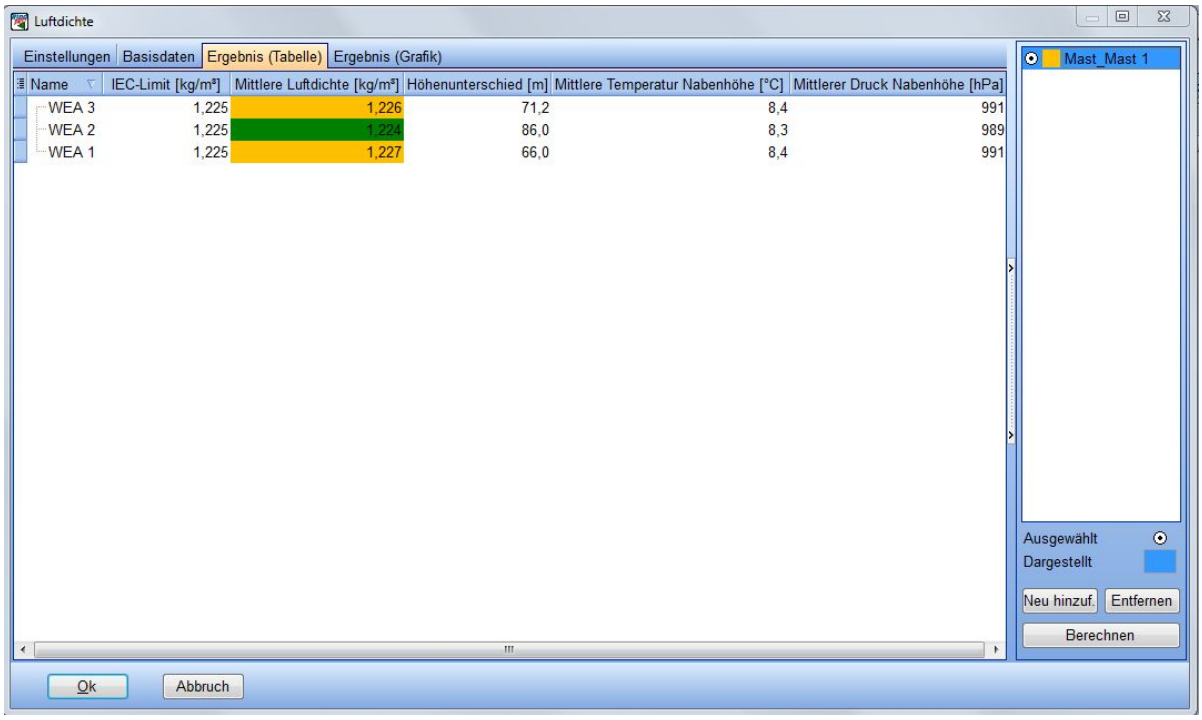


*Abb. 58. Register **Ergebnis (Tabelle)** der Luftdichte-Prüfung.*

Das Register **Ergebnis (Grafik)** bietet wiederum die grafische Übersicht aller WEA-Ergebnisse und der IEC-Auslegungsgrenze.

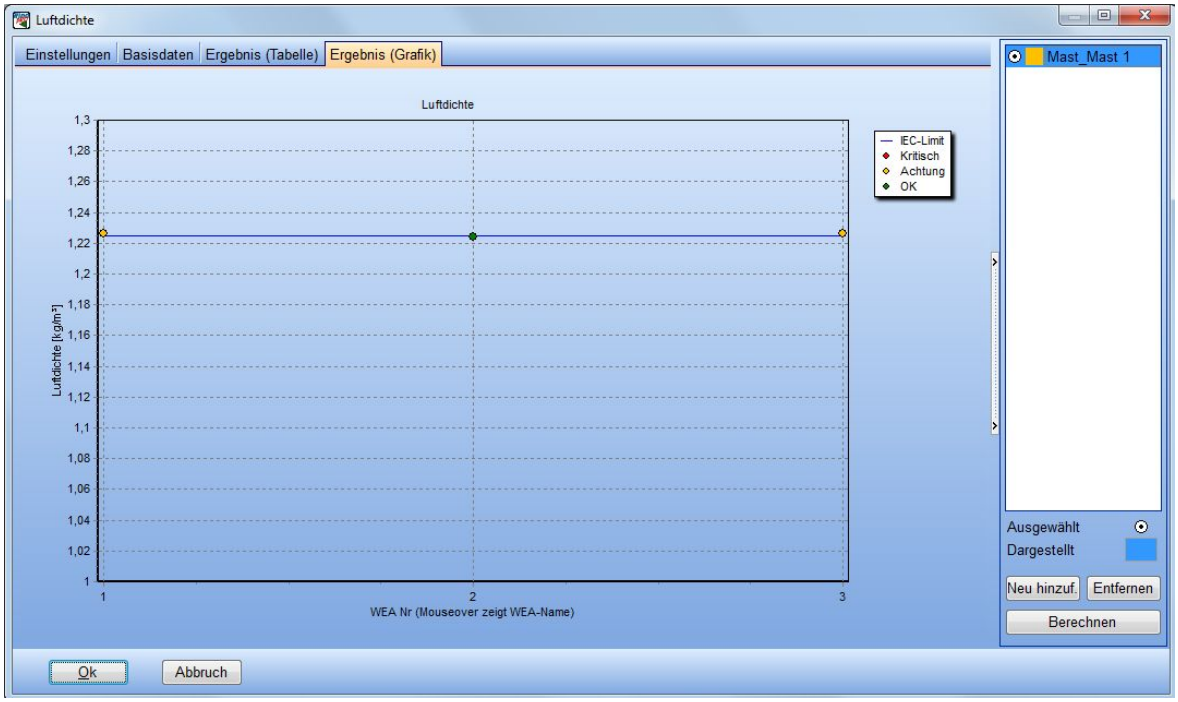


*Abb. 59. Register **Ergebnis (Grafik)** der Luftdichte-Prüfung..*

13.3.7.3 Berechnungsoptionen

Für beide Berechnungsoptionen wird dasselbe Extrapolationsmodell verwendet. Die mittlere Temperatur wird über den atmosphärischen Temperaturgradienten von -0,0065 K/m von Mess- auf Nabenhöhe umgerechnet. Sind Druckmesswerte vorhanden, werden auch diese über den Temperaturunterschied und die hydrostatische Gleichung korrigiert. Liegen keine Messwerte des Luftdrucks vor, wird der Luftdruck bei NN über das Standard-Atmosphärenmodell auf die WEA-Nabenhöhe umgerechnet.

Standortmast oder Klimadaten mit Temperatur (und Druck)

Sind gemessene Daten für Temperatur (und Druck) vorhanden, können diese zur Berechnung ausgewählt werden (s.o.).

GHCN Klimadatenbank

GHCN ist eine Datenbank[4] gepflegt von der US-Institution NOAA (National Oceanic And Atmospheric Administration). Diese Datenbank enthält historische Klimastatistiken einer großen Anzahl von Messstationen (weltweit).

[4] http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/

13.4 Andere Prüfungen

Die IEC-Richtlinie [1] enthält eine Reihe *sonstiger Bedingungen*, die bewertet und mit den Auslegungsbedingungen verglichen werden sollen. Darüber hinaus muss das Erdbebenrisiko am Standort evaluiert werden. Die zusätzlich zu bewertenden Parameter sind:

- **Erdbebenrisiko**
- **Normaler and extremer Temperaturbereich**
- **Blitzrate**
- Vereisung, Hagel und Schnee
- Feuchtigkeit
- Sonneneinstrahlung
- Chemisch aktive Substanzen
- Salzhaltigkeit

In SITE COMPLIANCE sind bisher nur die hier fett gedruckten Parameter in den **Anderen Prüfungen** enthalten. Die Auswahl der Parameter erfolgte aufgrund der Kombination aus Relevanz und Möglichkeit einer einfachen Abschätzungsmethode, bzw. vorhandener Datenbasis.

13.4.1 Erdbebenrisiko

13.4.1.1 Beschreibung und Grenzen

Die IEC-Richtlinie fordert eine Abschätzung der Bodenbeschleunigung für einen Wiederkehrzeitraum von 475 Jahren. Dieser Zeitraum entspricht einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,2%. Da die IEC keine wirklich konkreten Grenzwerte für die Bodenbeschleunigung angibt, wurde die generelle Risikoeinschätzung des GSHAP, *Global Seismic Hazard Assessment Program*, übernommen. „Niedriges Risiko“ entspricht dabei **OK**, „mittleres Risiko“ **Achtung**, „hohes“ und „sehr hohes Risiko“ **Kritisch**, um den Bedarf einer detaillierteren Untersuchung zu betonen.

SITE COMPLIANCE verwendet zur Bestimmung der Bodenbeschleunigung eine Datenbank des von der UN geförderten GSHAP. Die GSHAP-Datenbank beinhaltet Daten aus verschiedenene regionalen und nationalen Unter-Projekten und gibt die Bodenbeschleunigung in m/s² in einer Auflösung von 0,1° mal 0,1° an. Die Daten sind verfügbar über die Homepages der ETH Zürich oder des GeoForschungsZentrums Potsdam. Die Abbildung zeigt die globale Karte des Erdbebenrisikos.

Die dargestellte Bodenbeschleunigung der GSHAP-Karte basiert auf Standard-Bodenbedingungen, d.h. Fels (Fels / fester Boden in den USA und Kanada). Weichen die lokalen Bodenbedingungen stark davon ab, wie bei weichen Sedimentböden, kann dadurch eine Verstärkung der Erdbewegungen erfolgen, die deutlich über den Bedingungen der GSHAP-Karte liegt. Dennoch können die GSHAP-Daten als verlässliche Quelle zur Abschätzung des Erdbebenrisikos (bzw. der Bodenbeschleunigung) betrachtet werden, da sie eine Zusammenfassung von zahlreichen regionalen Studien von lokalen Experten und Behörden darstellen.

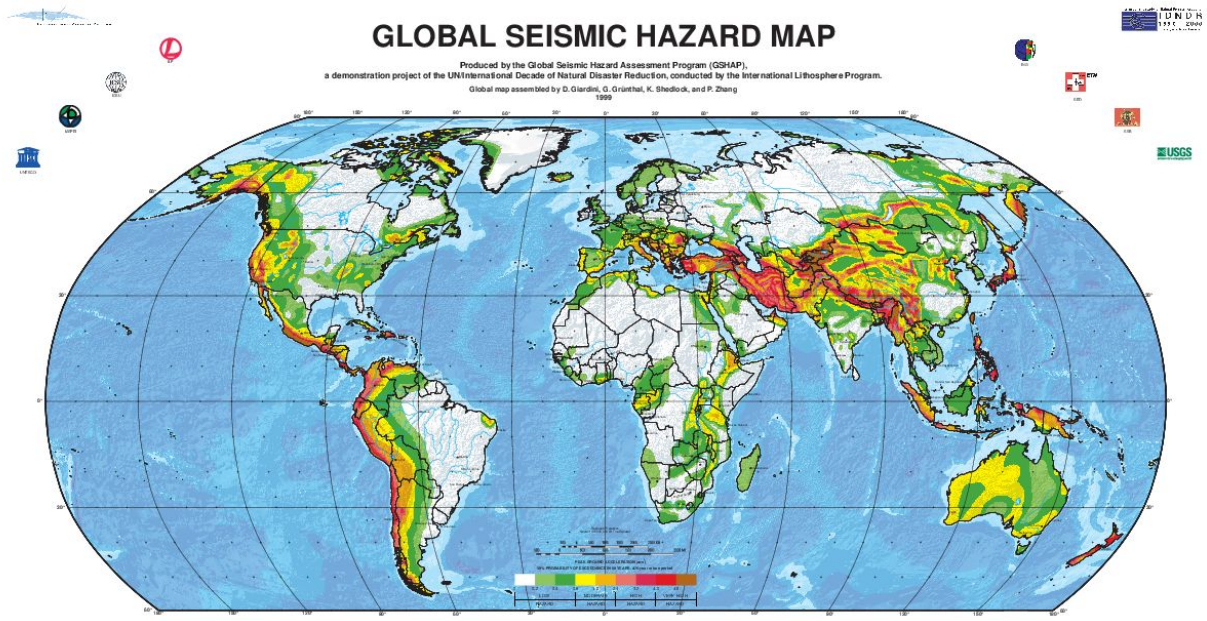


Abb. 60. Die GSHAP-Karte des Erdbebenrisikos zeigt die globale Verteilung der Bodenbeschleunigung [16].

13.4.1.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Da nur die GSHAP-Datenbank zur Verfügung steht, können hier keine weiteren Eingaben getätigt werden.

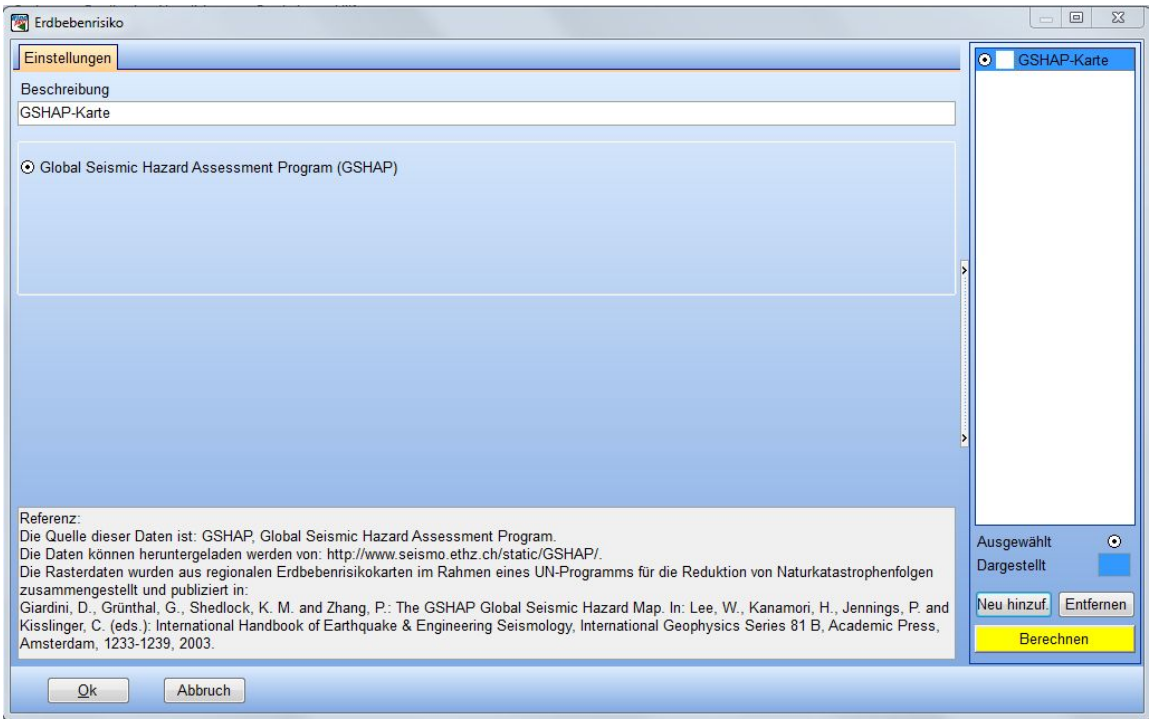


*Abb. 61. Register **Einstellungen** der Erdbebenrisiko-Prüfung*

Das Register **Ergebnis (Tabelle)** zeigt die Spitzenbeschleunigung des Standorts in m/s² und die Einschätzung des erwarteten Risikos.

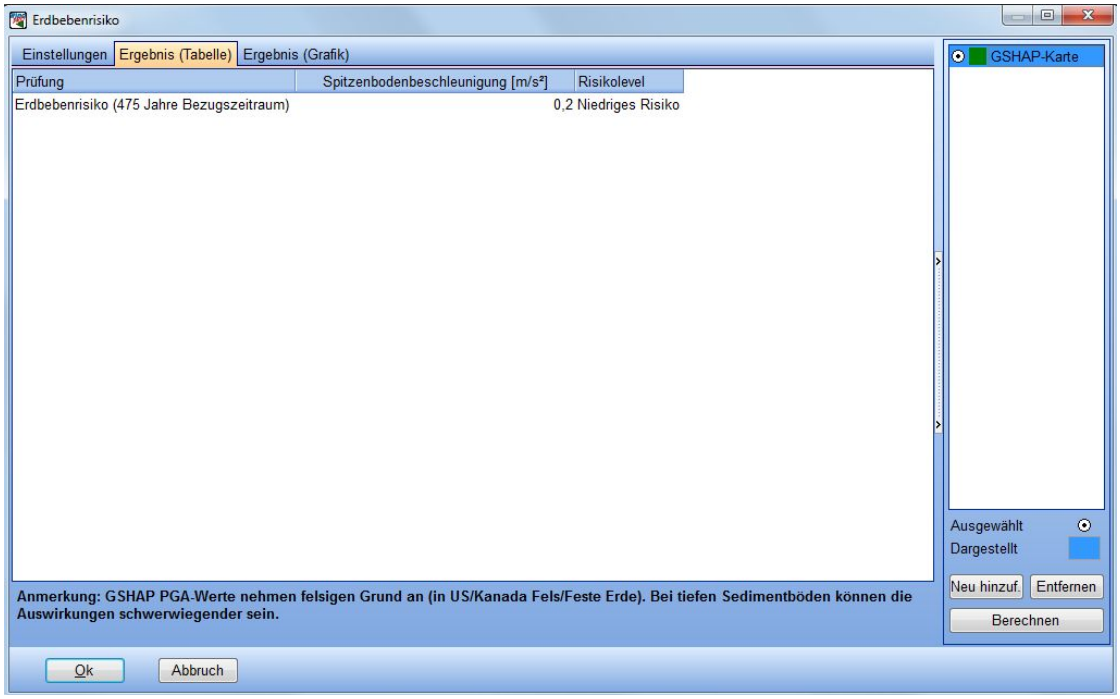


*Abb. 62. Register **Ergebnis (Tabelle)** der Erdbebenrisiko-Prüfung*

Das dritte Register der Prüfung zeigt eine Karte des Erdbebenrisikos in einem Gebiet von etwa 1000 km mal 1000 km um den Standort. Aufgrund der Zusammensetzung der GSHAP-Daten aus verschiedenen Studien kann es in manchen Gebieten sprunghafte Veränderungen der Werte geben, z.B. an Landesgrenzen.

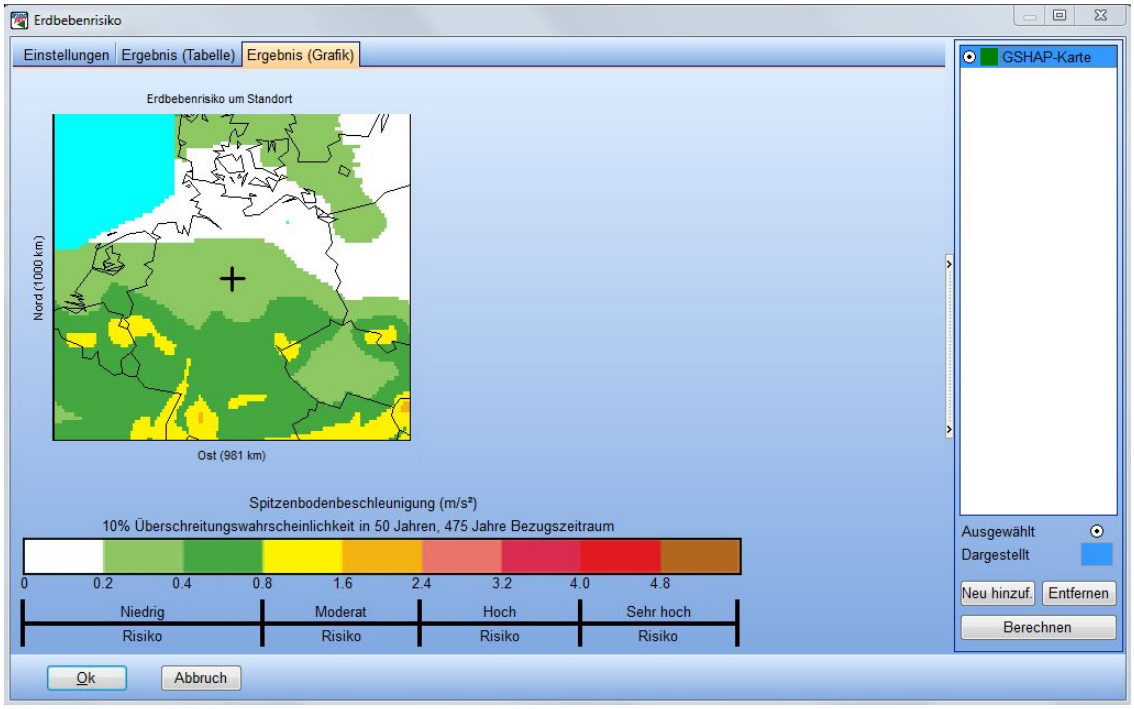


*Abb. 63. Register **Ergebnis (Grafik)** der Erdbebenrisiko-Prüfung*

13.4.2 Temperaturbereich

13.4.2.1 Beschreibung und Grenzen

Windenergieanlagen sind für den Betrieb in einem bestimmten Temperaturbereich ausgelegt, den Betriebsbereich bzw. *normalen Temperaturbereich*. Auch Temperaturen außerhalb des normalen Bereiches kann eine WEA ertragen, jedoch nur im Stillstand. Wenn Temperaturen außerhalb des *extremen Temperaturbereichs* erreicht werden, können Anlagenkomponenten nachhaltige Schäden davontragen.

Normaler Temperaturbereich der IEC Standard-Klassen: -10°C bis +40°C.
Extremer Temperaturbereich der IEC Standard-Klassen: -20°C bis +50°C.

Die meisten Hersteller entwickeln WEA-Versionen mit einem erweiterten Temperaturbereich für spezielle Regionen (HCV-, bzw. CCV-Anlagen: Hot / Cold climate version). Diese können als Klasse S kategorisiert werden. Üblicherweise wird der Standard-Temperaturbereich um 10°C erweitert. Auch Anpassungen als Klasse S können in SITE COMPLIANCE verwendet werden (s.u.).

13.4.2.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Auf dem Register **Einstellungen** der Prüfung des Temperaturbereichs finden sich zwei Einstellungsgruppen: **Daten und Anpassung** und **Auslegungsbereich der Temperatur**. In der ersten Gruppe wird zuerst ein Mast mit Temperaturdaten gewählt, anschließend die Art der Anpassung festgelegt. Hier wird entschieden, ob der gesamte Datenbereich der Messung (**ganze Normalverteilung**) genutzt werden soll oder nur die Extremwerte (**nur Extreme**). In dem Fall werden nur die Endbereiche der Verteilung angepasst. Standardmäßig werden dafür die höchsten und niedrigsten 10% verwendet.

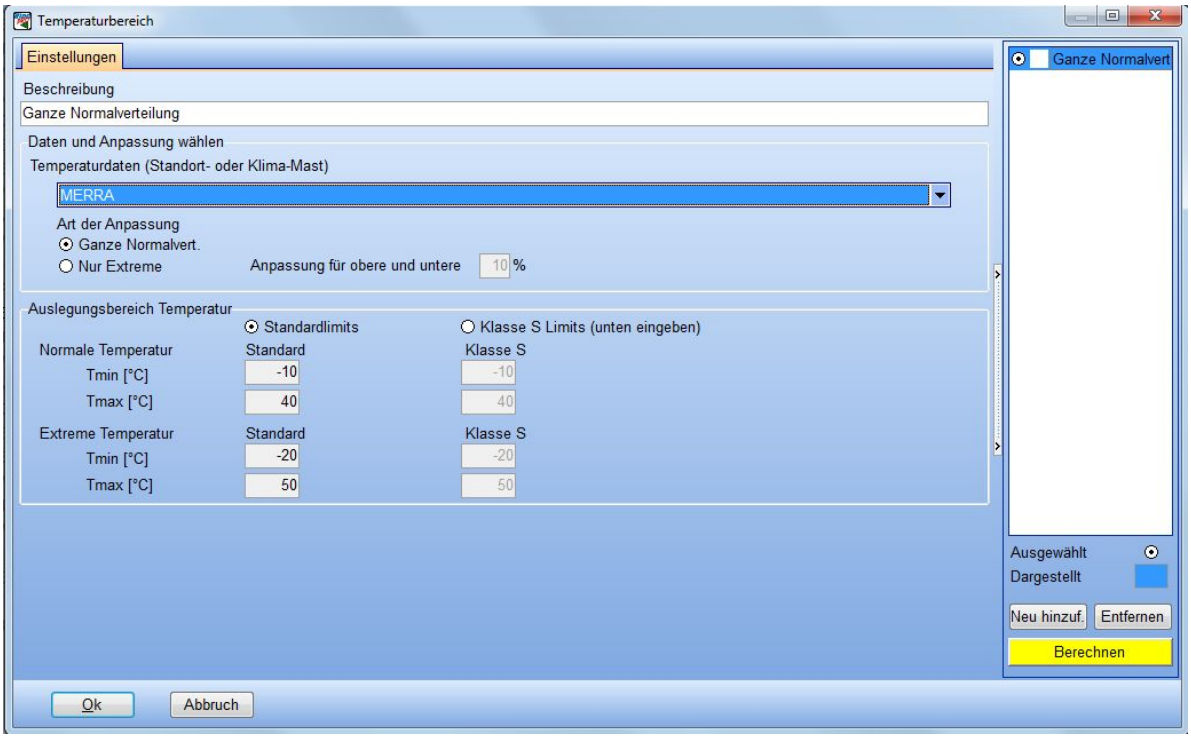


*Abb. 64. Register **Einstellungen** der Prüfung des Temperaturbereichs*

Nach Abschluss der Berechnung über die gelbe Schaltfläche erscheinen wieder neue Register. Register **Basisdaten** zeigt die gewählten Temperaturmessungen, Mastdetails sowie die mittlere WEA-Nabenhöhe ü. NN, die zur Bestimmung des Standortmittelwerts genutzt wird.

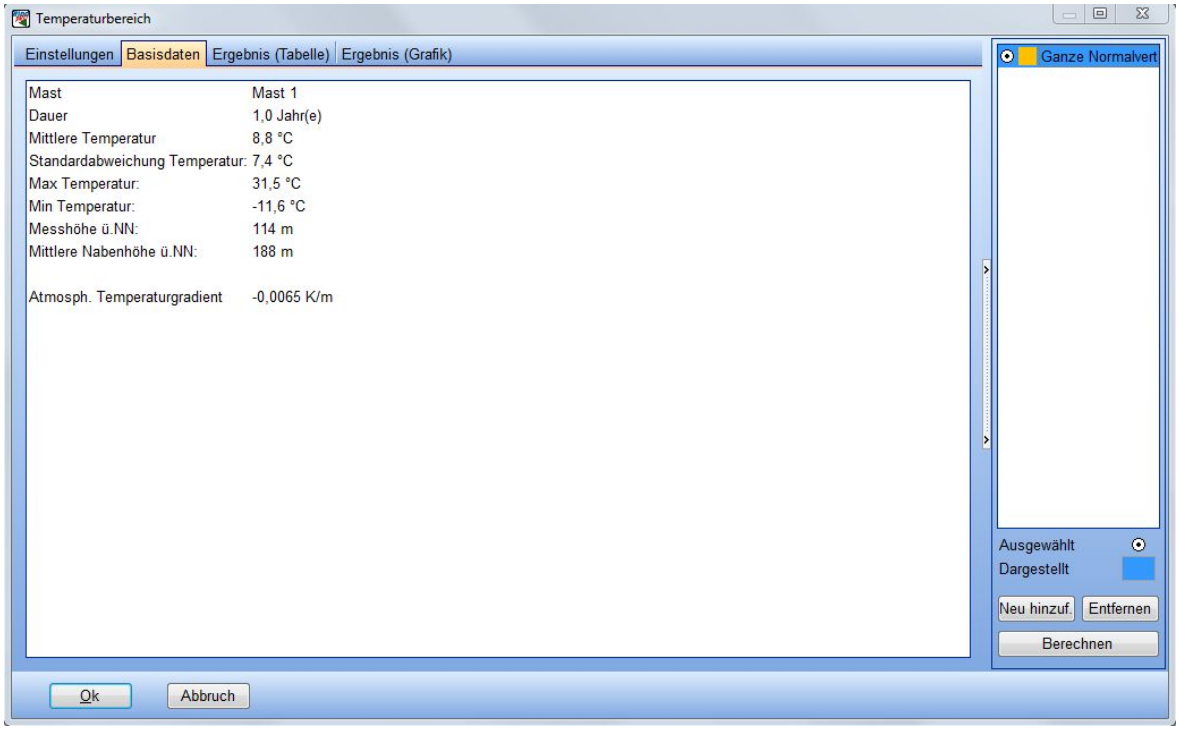


*Abb. 65. Register **Basisdaten** der Prüfung des Temperaturbereichs*

Ergebnis (Tabelle) zeigt die Grenzwerte des normalen und extremen Temperaturbereichs. In der Spalte **h < Tmin [h/Jahr]** wird die Dauer von Temperaturen unterhalb der Grenzwerte aufgeführt, **h > Tmin [h/Jahr]** zeigt die Summe der Zeiten mit Temperaturen, die oberhalb der Grenzwerte liegen. Ganz rechts findet sich der Gesamtwert der Stunden außerhalb des zulässigen Temperaturbereichs.

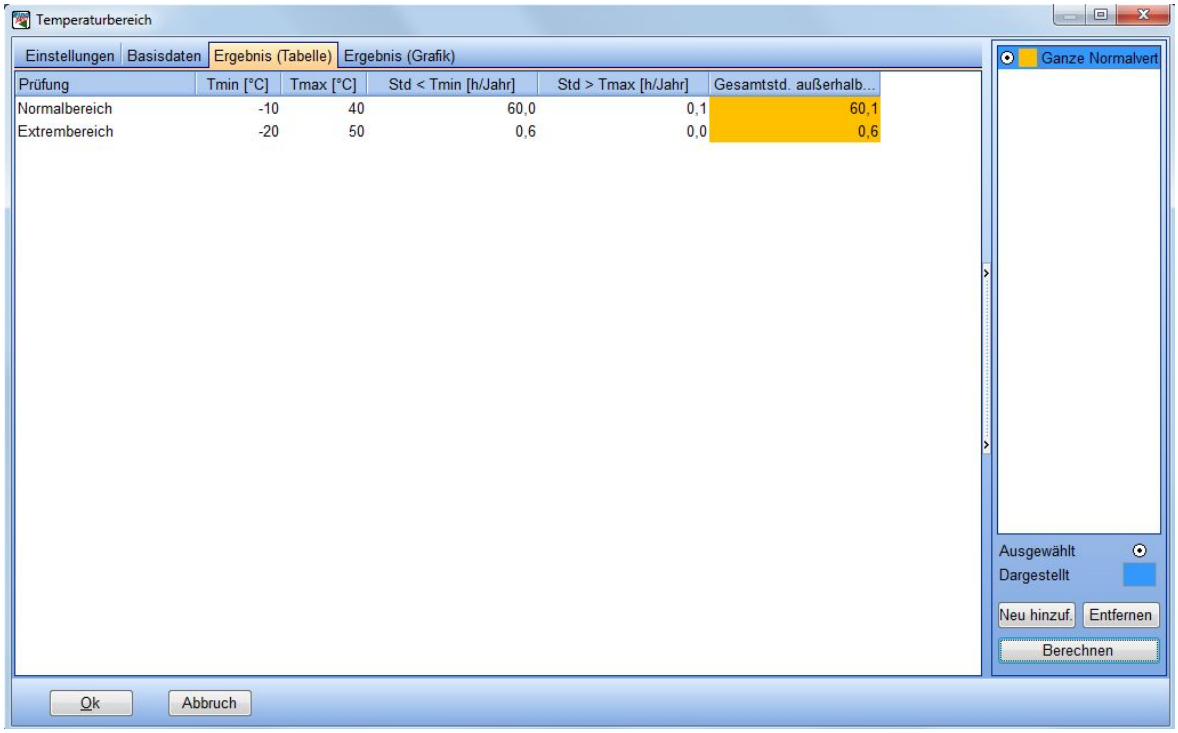


*Abb. 66. Register **Ergebnis (Tabelle)** der Prüfung des Temperaturbereichs*

Auf dem Register **Ergebnis (Grafik)** werden die Messwerte und die Anpassungen dargestellt. Die obere Grafik zeigt die kumulative Verteilungsfunktion, Normal- und Extrembereich sind durch die roten Linien begrenzt. Wurde die ganze Normalverteilung als Art der Anpassung gewählt, wird diese in blau dargestellt.

Die unteren Grafiken zeigen das obere bzw. untere Quartil (25%) der Werte. Die Wahrscheinlichkeits-Achse (y-Achse) wurde transformiert, um eine direkte Anzeige der Stunden pro Jahr unter- (linke Grafik) oder oberhalb der Temperaturen auf der x-Achse zu zeigen. Auch die Anpassungen sind hier dargestellt. Die Stunden unter- oder oberhalb der Grenzwerte lassen sich also direkt an dem Punkt ablesen, wo die Anpassungskurve die rote Linie schneidet.

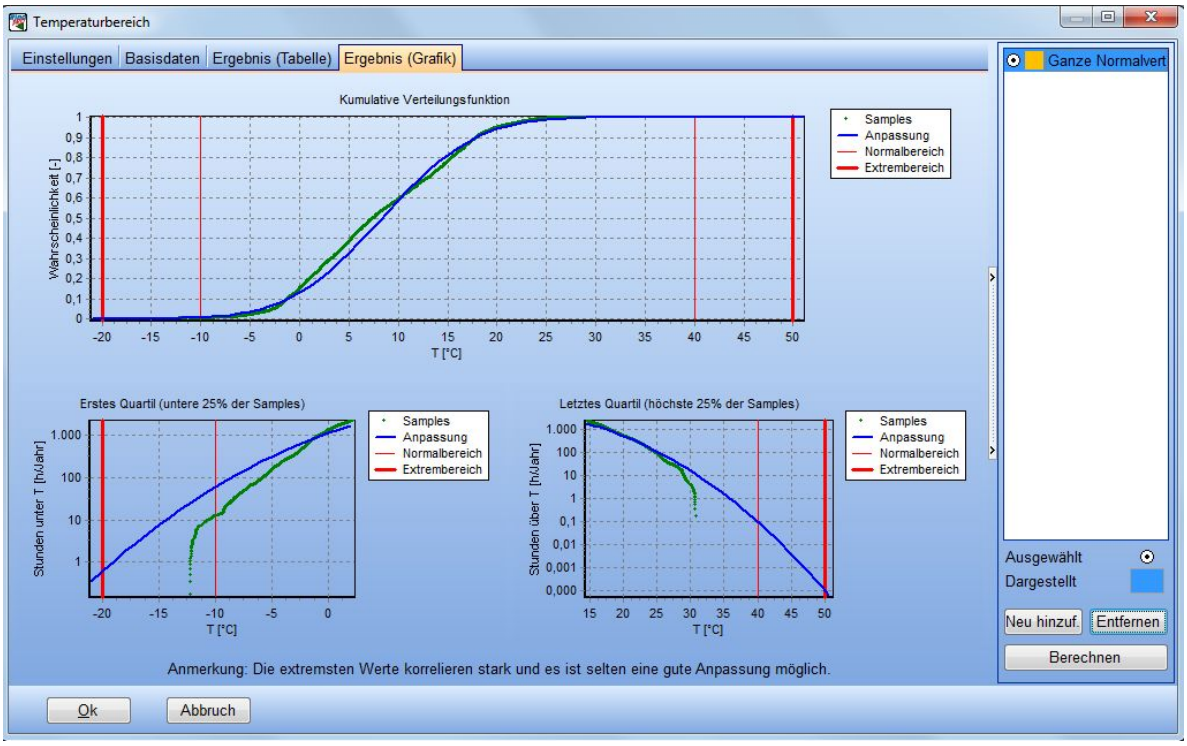


*Abb. 67. Register **Ergebnis (Grafik)** der Prüfung des Temperaturbereichs*

13.4.2.2 Berechnungsoptionen

Daten und Anpassung wählen

Wie unten gezeigt, kann ein Mast mit Temperaturdaten ausgewählt werden. SYNOP- oder MERRA-Daten sind oft eine gute Alternative, wenn keine Messdaten am Standort vorliegen. Sehr wichtig ist, dass die Geländehöhe des Masts über NN im METEO-Objekt korrekt angegeben wird, da diese das Ergebnis deutlich beeinflusst. Üblicherweise ist die Geländehöhe in der Kopfzeile der Zeitreihen-Dateien im METEO-Objekt angegeben.

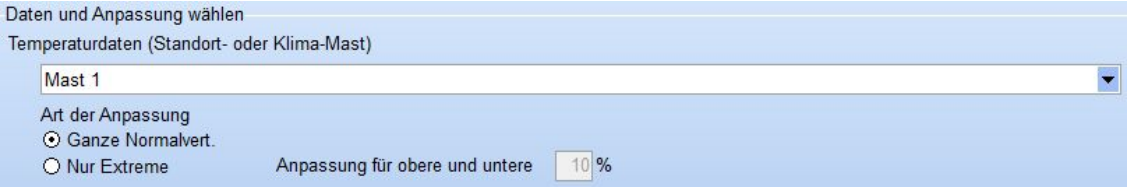


*Abb. 68. Einstellungen **Daten und Anpassung wählen** der Prüfung des Temperaturbereichs*

Ganze Normalverteilung

Diese Auswahl passt den gesamten Wertebereich einer Gaußschen Normalverteilung an, mit demselben Mittelwert und der Standardabweichung der Messwerte. Diese Methode ist sehr stabil, aber für viele Standorte nicht zufriedenstellend.

Anpassung nur der Extremwerte
Bei dieser Option werden nur die Enden der Gaußverteilung, d.h. die Extremwerte, angepasst. Voreingestellt sind hier die 10% der höchsten und 10% der geringsten Messwerte. Die Anpassung wird über die Normalverteilung der geordneten Werte an die theoretischen Gauß-Quantile angepasst, hier aber nur für den jeweiligen Extrembereich.

Auslegungsbereich der Temperatur

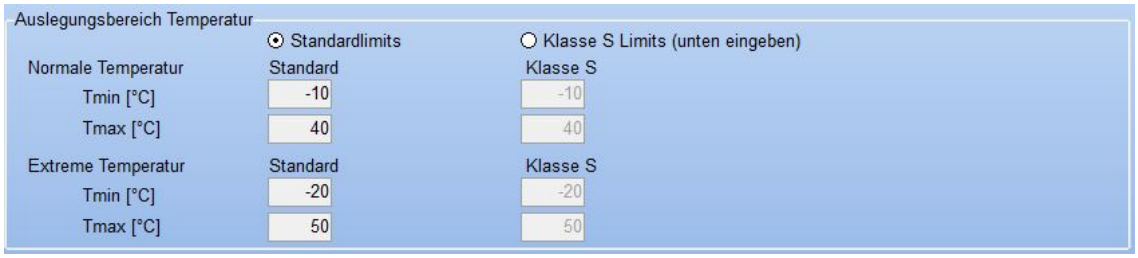


*Abb. 69. Einstellungen des **Auslegungsbereiches der Temperatur***

Standardlimits
Die voreingestellten **Standardlimits** werden für die Standard-WEA-Klassen oder die Vorabschätzung des Temperaturbereiches verwendet. Einige WEA-Hersteller wie z.B. Vestas haben den normalen Temperaturbereich für alle Standardanlagen auf -20°C ausgedehnt. Obwohl diese keine besonderen CCV- oder HCV-WEA sind, sollten hier die Temperaturgrenzen im Feld **Klasse S Limits** eingegeben werden.

Klasse S Limits
Wenn der untersuchte WEA-Typ als CCV oder HCV, also für besonders geringe oder besonders hohe Temperaturen, ausgelegt ist, sollten die Klasse S Limits für den normalen und extremen Temperaturbereich angepasst werden. Diese Option kann auch für experimentelle Zwecke verwendet werden, wenn z.B. die Standardauslegungsgrenzen überschritten werden und geprüft werden soll, welche Grenzen noch akzeptabel wären. Üblicherweise werden die Standardauslegungsgrenzen um 10°C oder 20°C erweitert, um bei einer CCV-Anlage z.B. -30°C für den normalen Temperaturbereich und -40°C für den extremen Bereich zu erhalten.

13.4.3 Blitzrate

13.4.3.1 Beschreibung und Grenzen

Die Abschätzung der Blitzrate in SITE COMPLIANCE basiert auf einer Datenbank des NASA Global Hydrology and Climate Center (GHCC) [17]. Die Daten wurden mit Hilfe von LIS (Lightning Imaging Sensor) und OTD (Optical Transient Detector) gesammelt.

Die IEC-Richtlinie gibt keine Grenzwerte für die Blitzrate an.

13.4.2.2 Einstellungen, Berechnungen und Ergebnisse

Bei den Einstellungen zur Prüfung der Blitzrate gibt es keine Auswahlmöglichkeit.

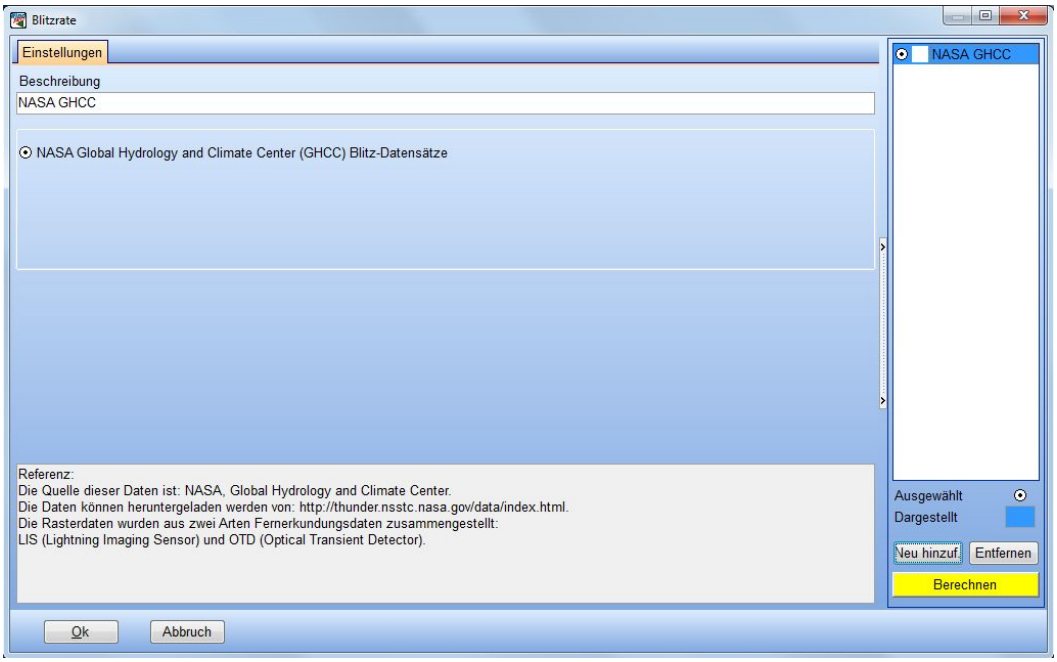


*Abb. 70. Register **Einstellungen** der Blitzraten-Prüfung*

Das Register Ergebnis **(Tabelle)** enthält die erwartete Blitzrate für den Standort.

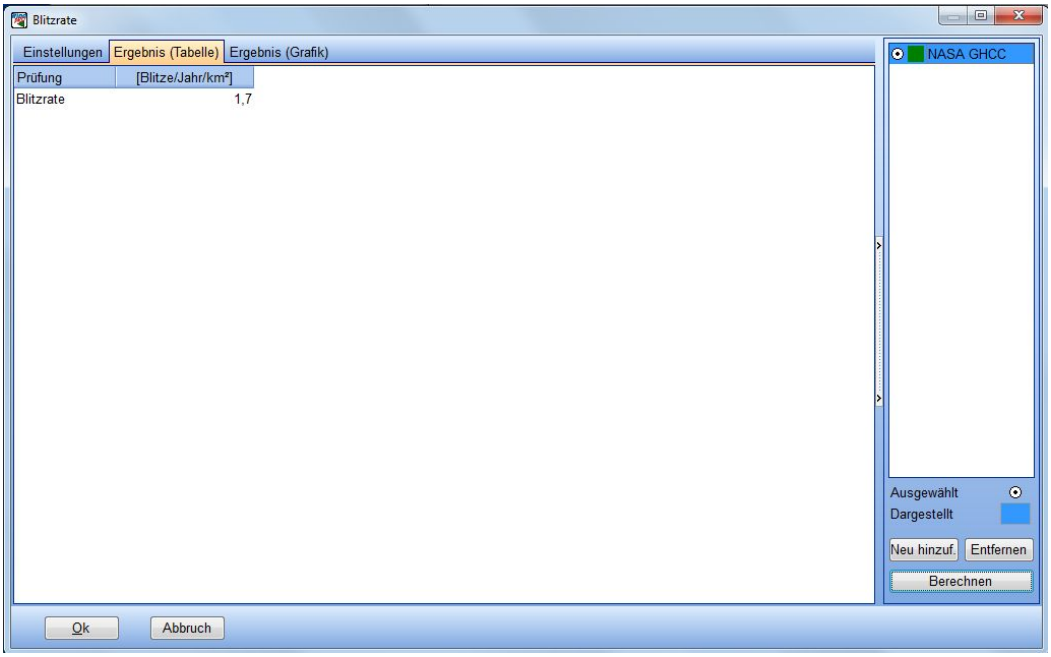


*Abb. 71. Register **Ergebnis (Tabelle)** der Blitzraten-Prüfung*

Das letzte Register **Ergebnis (Grafik)** zeigt die Blitzrate in einem Quadrat von 1.000 km mal 1.000 km Seitenlänge um den Standort.

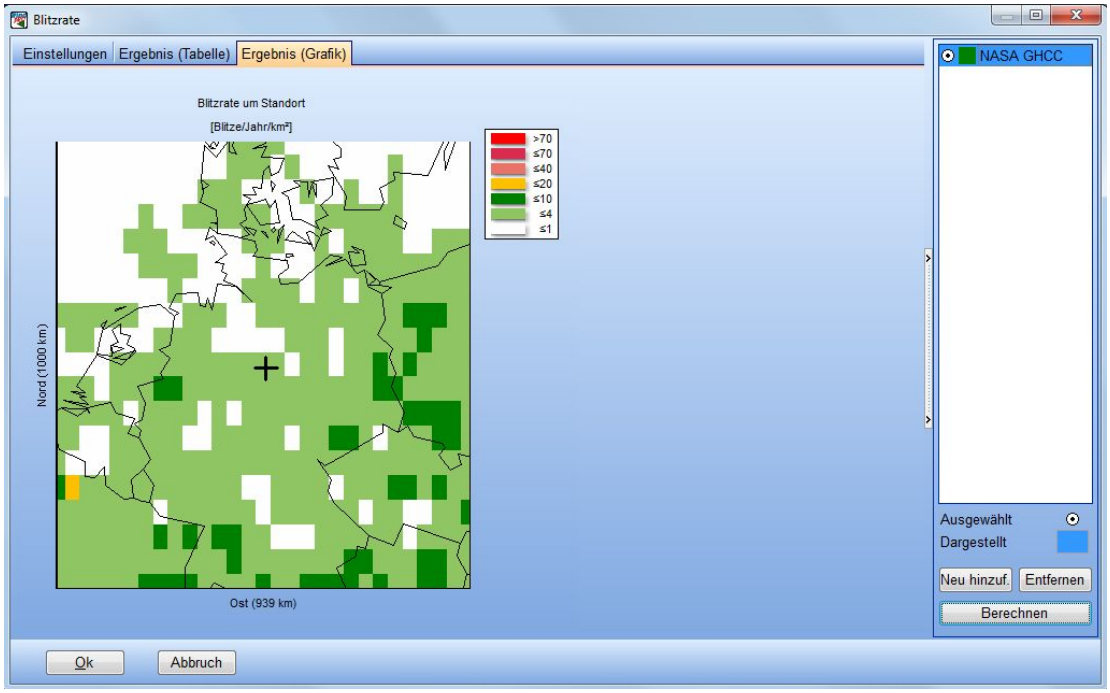


*Abb. 72. Register **Ergebnis (Grafik)** der Blitzraten-Prüfung*

13.5 Alle neu berechnen

Nachdem eine komplette SITE COMPLIANCE-Berechnung durchgeführt wurde, kann eine Auswertung der Ergebnisse erfolgen. Sollte die ursprünglich gewählte Auslegungsklasse stark überschritten sein, kann sehr schnell und einfach die Klasse testweise verändert und die Prüfungen erneut durchgeführt werden.

Dafür wird im Register Hauptteil die IEC-Klasse geändert.

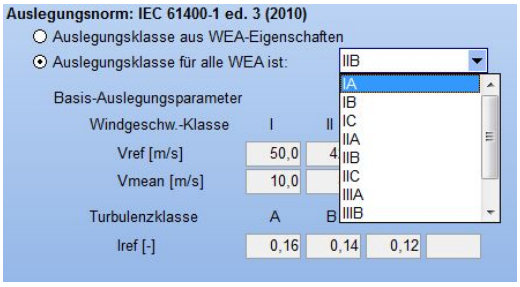
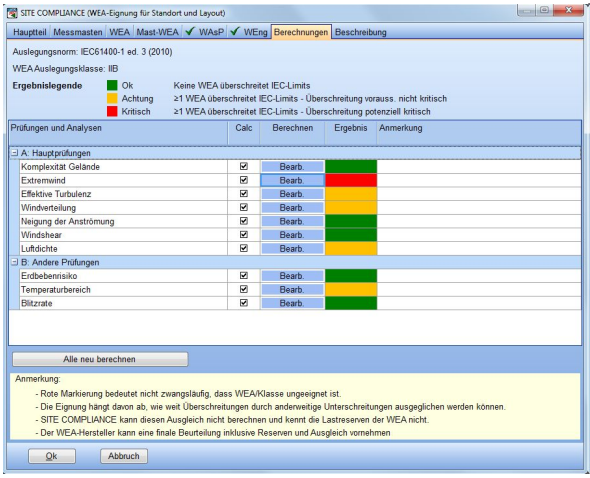


*Abb. 73. Register **Hauptteil** mit Auswahl der Auslegungsklasse*

Nun kann direkt zurück auf das Register **Berechnungen** geschaltet werden, wo durch die Änderung der Basisdaten die Berechnungsergebnisse gelöscht wurden. Um diese mit den gleichen Einstellungen der vorigen Berechnung wieder zu erzeugen, klicken Sie **Alle neu berechnen**. Nach kurzer Berechnungsdauer sind die Ergebnisse für die geänderte Auslegungsklasse sichtbar.

Klasse IIB



Klasse IA

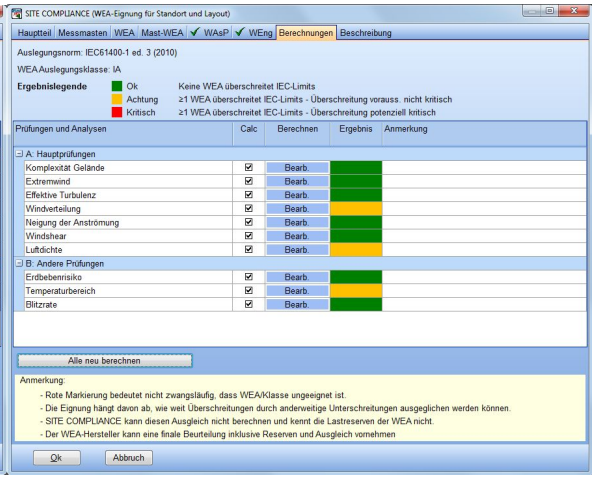
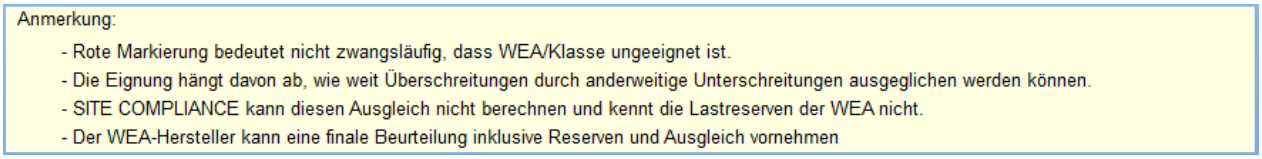


Abb. 74. Links: Ergebnisse für die ursprüngliche Klasse IIB, rechts: Neu-Berechnung für Klasse IA.

SITE COMPLIANCE bietet den Vergleich der Standortbedingungen mit den Auslegungsbedingungen. Eine Lastberechnung kann mit WindPRO nicht durchgeführt werden, da hierfür die aerolastischen Modelle der WEA vorliegen müssten, die die Hersteller jedoch nicht veröffentlichen. Durch die Komplexität der Modellierung kann hier keine exakte Grenze angegeben werden, welche Überschreitungen durch Reserven in den Bauteilen ausgeglichen werden können und welche tatsächlich den Einsatz am betrachteten Standort verbieten. Die genauen Grenzen der WEA kennt nur der Hersteller. In SITE COMPLIANCE wurde daher die gelbe Kategorie (Achtung) eingeführt, um darauf hinzuweisen, dass es zwar Überschreitungen gibt, diese jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit durch andere Reserven ausgeglichen werden können.



13.6 Export und Ergebnis in Datei

Alle Ergebnis-Tabellen innerhalb der SITE COMPLIANCE-Prüfungen können per Rechtsklick kopiert und z.B. in Excel eingefügt werden.

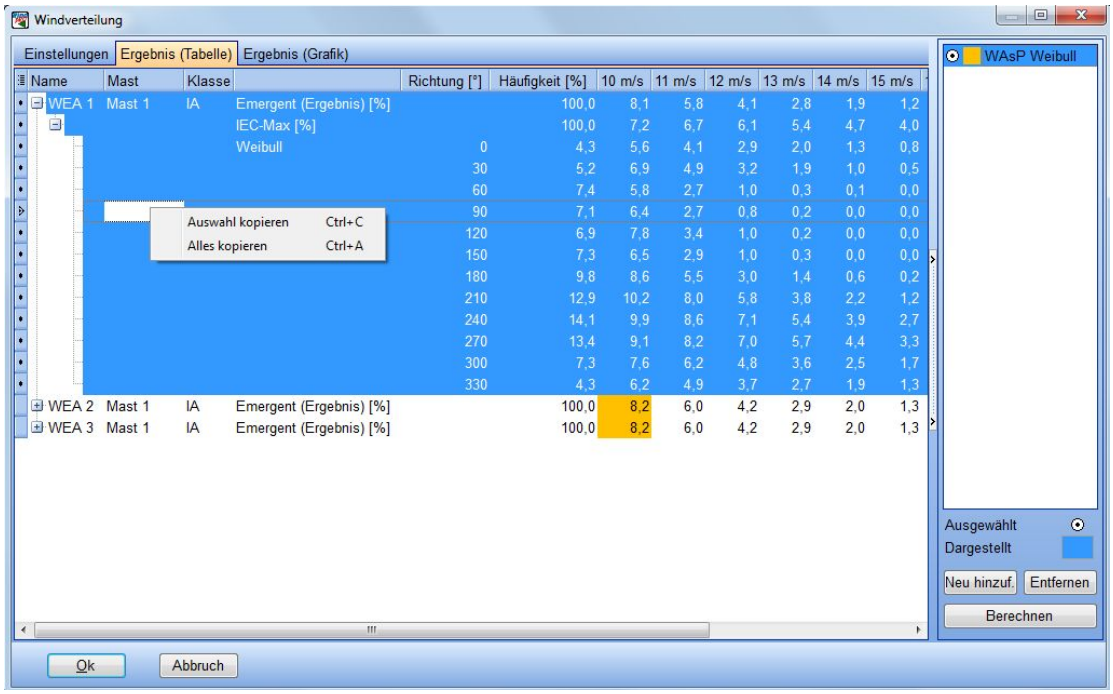


*Abb. 75. Beispiel wie die Ergebnisse einer Detailprüfung kopiert werden können. Bei der Option **Alle kopieren** werden auch die normalerweise eingeklappten Details mitkopiert.*

Nach Abschluss der kompletten SITE COMPLIANCE-Berechnung gibt es noch einen anderen Weg die Ergebnisse und weitere Daten zu exportieren. Mit Rechtsklick auf die Berechnungsüberschrift kann die Option **Ergebnis in Datei** gewählt werden. Verschiedene Exportmöglichkeiten werden in einem neuen Fenster angezeigt (s.u.).

Hier können auch - falls vorhanden - die Zwischenergebnisse der WAsP- und WEng-Berechnungen für die Einzelstandorte exportiert werden. Die zwei anderen Optionen sind

1) Details Standortmast
2) Zusammenfassung der WEA-Ergebnisse

Diese beiden Optionen enthalten die typischen Daten, die von WEA-Herstellern üblicherweise zur ersten Einschätzung des Standorts angefordert werden. Beide Exporte enthalten Informationen zur Qualität der Messungen und zu den in den Prüfungen verwendeten Methoden.

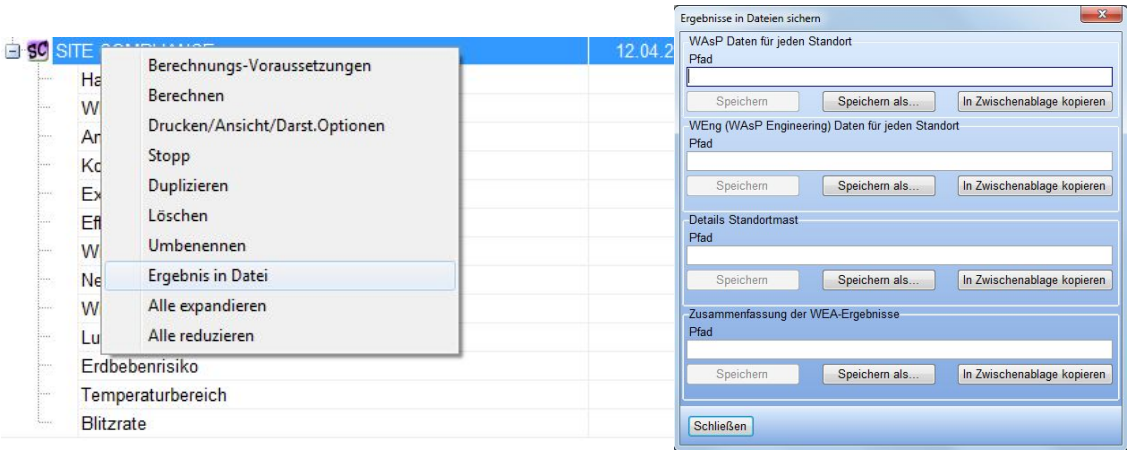


*Abb. 76. **Ergebnis in Datei**, erreichbar über Rechtsklick auf die Berechnungsüberschrift*

13.7 Ergebnisbericht

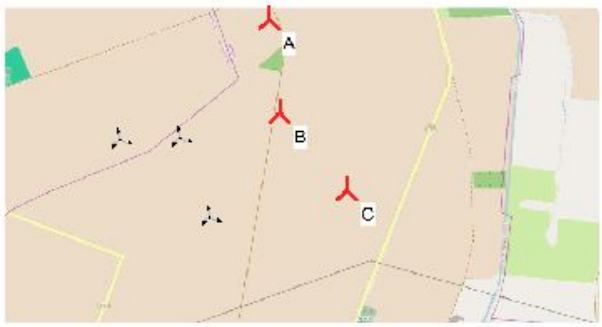
13.7.1 Hauptergebnis

SITE COMPLIANCE - Hauptergebnis

Berechnung: Handbuch

Zusammenfassung der Daten/Berechnungen

Auslegungsnorm	IEC61400-1 ed. 3 (2010)
Neue WEA	3
WEA-Klasse IA	ersetzt Klasse aus WEA-Katalog
Nabenhöhe	100,0 m
Standortmasten	1
Mast 1	48m, 1,0Jahr(e), 100% verfügbar
WAsP-Berechnung	WAsP 11 Windstatistik mit Langzeitbezug Standard-WAsP-Parameter
WEng-Berechnung	Wasp Engineering 3.00.0196 Standard-WAsP-Parameter
Durchgeführte Prüfungen	7 von 7 Hauptprüfungen 3 von 3 Andere Prüfungen



Maßstab: 25.000

Hauptergebnis

Hauptprüfungen

Komplexität Gelände	OK
Extremwind	OK
Effektive Turbulenz	OK
Windverteilung	*Achtung*
Neigung der Anströmung	OK
Windshear	OK
Luftdichte	*Achtung*

Andere Prüfungen

Erdbebenrisiko	OK
Temperaturbereich	*Achtung*
Blitzrate	OK

Ergebnisdetails

			WEA-Klasse	Methode	Qualität	WEA Mittel	Max WEA	Min WEA	WEA OK	WEA Achtung	WEA Kritisch
Hauptprüfungen											
Komplexität Gelände	ic	[-]		Aktives DHM		0,00	0,00	0,00	3	0	0
Extremwind	u50j	[m/s]	IA	POT-N	B+A	42,4	42,6	42,3	3	0	0
Effektive Turbulenz	σeff(u)*	[-]	IA	Mast	A+A	-	-	-	3	0	0
Windverteilung	pdf(u)*	[-]	IA	WAsP Weibull	A	-	-	-	0	3	0
Neigung der Anströmung	φmax	[°]		WEng	B	1	1	-1	3	0	0
Windshear	α	[-]		Mast WEng	A	0,18	0,19	0,18	3	0	0
Luftdichte	ρ	[kg/m³]		Mast	A/B	1,226	1,227	1,224	1	2	0
Andere Prüfungen											
Erdbebenrisiko	PGA	[m/s²]		GSHAP-Karte		0,2	-	-			
Temperaturbereich											
Normalbereich, Stunden außerhalb		[h/Jahr]	Std	Ganze Normalverteilung		60,1	-	-			
Extrembereich, Stunden außerhalb		[h/Jahr]	Std	Ganze Normalverteilung		0,6	-	-			
Blitzrate		[Blitze/Jahr/km²]		NASA GHCC		1,7	-	-			

* Parameter für Windgeschwindigkeits-Bereich geprüft (u), Zusammenfassung in einem Wert nicht möglich.

WindPRO, entwickelt von EMD International A/S, Niels Jernesvej 10, DK-9220 Aalborg Ø, Tel. +45 96 35 44 44, Fax +45 96 35 44 46, e-mail: windpro@emd.dk

Abb. 77. Das Hauptergebnis gibt einen zusammenfassenden Überblick der Ergebnisse des Site Assessments.

13.7.2 WEA-Ergebnisse

SITE COMPLIANCE - WEA-Ergebnisse

Berechnung: Handbuch

Hauptprüfungen - WEA

Kriterien	Masten		Terraindaten	
Kritisch	1	Mast 1	A	PARK Mast 1 - Langzeit
Achtung				
OK				

	WEA-Name	Klasse	Mast	Terraindaten	Komplexität Gelände [-]	Extremwind [m/s]	Effektive Turbulenz [-]	Windverteilung [-]	Neigung der Anströmung [°]	Windshear [-]	Luftdichte [kg/m³]	Gesamt
A	WEA 1	IA	1	A	0,0	42,3	OK	Achtung	-1	0,19	1,227	Achtung
B	WEA 2	IA	1	A	0,0	42,6	OK	Achtung	1	0,18	1,224	Achtung
C	WEA 3	IA	1	A	0,0	42,3	OK	Achtung	1	0,18	1,226	Achtung

Abb. 78. Die zweite Seite stellt die Ergebnisse der Hauptprüfungen (Spalten) für jede WEA (Reihen) dar.

13.7.3 Annahmen

SITE COMPLIANCE - Annahmen

Berechnung: Handbuch

Allgemeine Daten, WEA-Ergebnisse

		WEA Mittel	Min WEA	Max WEA
u50j (Extremwind)	[m/s]	42,4	42,3	42,6
Mittlere Windgeschw.	[m/s]	7,7	7,7	7,7
k-Parameter ('kombinierte Weibull')	[-]	2,5	2,5	2,5
I15 (Mittlere TI@15 m/s)	[-]	0,11	0,11	0,11

Auslegungsparameter IEC-Klassen

		Klasse IA
Vref (Extremwind)	[m/s]	50,0
Mittlere Windgeschw.	[m/s]	10,0
k-Parameter	[-]	2,0
Iref (Mittlere TI@15m/s)	[-]	0,16

Mastdaten

Name	Zweck	Haupthöhe [m]	Shear-Höhen [m]	Dauer [Jahr(e)]	Verfügbarkeit [%]	Weitere Signale	Terraindaten
Mast 1	Standortmast	48,0	48,0;47,0;24,0	1,0	100,0	TI,T	PARK Mast 1 - Langzeit
MERRA	Langzeitreferenz	50,0		30,0	99,9	T	
MERRA 2	Langzeitreferenz	50,0		30,9	99,9		

WAsP-Parameter

WAsP 11
Standard-WAsP-Parameter
Terraindaten
PARK Mast 1 - Langzeit

WAsP Engineering Parameter

Wasp Engineering 3.00.0196

Sektoren	12
Reduziert geostrophisch	h=10m, z0=0,05m, u=20m/s
Domäne	Bereich: 5000m, Auflösung: 50m, Punkte N-S: 212, Punkte O-W: 212
Turbulenzmodell	Kaimal
Terraindaten	PARK Mast 1 - Langzeit

Langzeitkorrektur

WAsP-Windstatistik mit Langzeitbezug

WEA

	GK (3 deg)-DHDN/PD/Bessel (DE 1995 <±5m) Zone: 3								Leistungskennlinie	
	Ost	Nord	Z [m]	Hersteller	Typ	Nennleistung [kW]	Rotordurchmesser [m]	Nabenhöhe [m]	Quelle	Name
A	3.589.531	5.784.446	80,0	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2.300	113,0	100,0	EMD	Level 0 - Calculated - Std. 105 dB - 02-2013
B	3.589.578	5.784.107	100,0	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2.300	113,0	100,0	EMD	Level 0 - Calculated - Std. 105 dB - 02-2013
C	3.589.824	5.783.831	85,2	Siemens	SWT-2.3-113-2300	2.300	113,0	100,0	EMD	Level 0 - Calculated - Std. 105 dB - 02-2013

Abb. 79. Die Seite Annahmen zeigt die Details der Annahmen und Basisdaten für die einzelnen Berechnungen.

13.7.4 Detailergebnisse und Einstellungen (für jede Prüfung)

Für jede durchgeführte Prüfung ist ein separater Bericht verfügbar. In diesem sind die gewählten sowie die verfügbaren Methoden für diese Prüfung und die grafische und tabellarische Darstellung der Ergebnisse enthalten. Hier im Beispiel ist der Bericht der Extremwindprüfung gezeigt (2 Seiten).

SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: Handbuch

Ergebnis: OK

Grundlagen der Prüfung

Verwendete Methode POT-N_WEng (Qualität: B+A)

Methodendetails

Statistisches Modell	POT-N & Gumbel	N = 20, Δt = 4 Tage
Ausbreitungsmodell	WEng (Sektorweise Mast-zu-WEA Speed-Up)	

Verfügbare Methoden

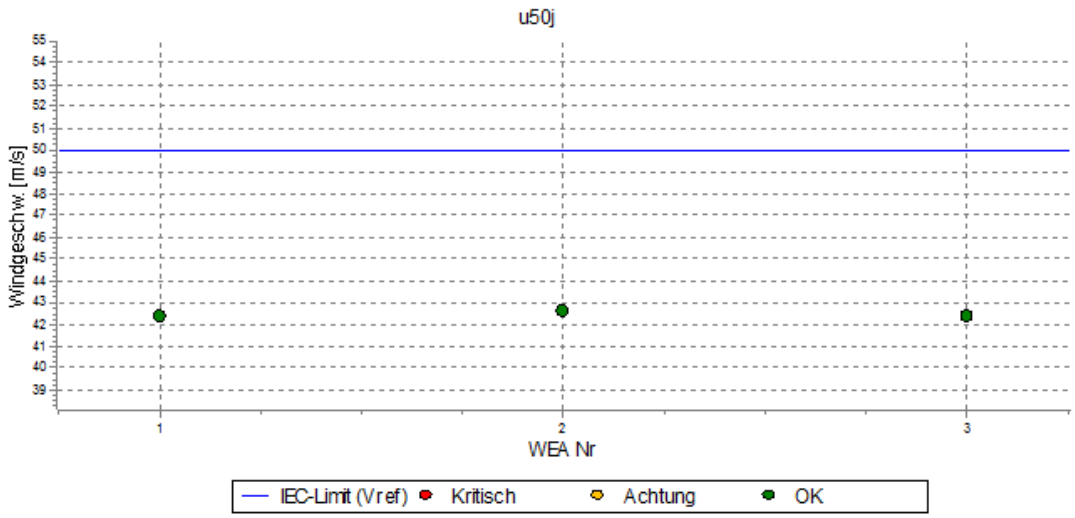
Statistisches Modell	Ausbreitungsmodell	Weitere Einstellungen
POT-N (B)	WEng (Sektorweise Mast-zu-WEA Speed-Up) (A)	Luftdichtekorrektur
Weibull (C)	WAsP (Sektorweise Speed-Up) (B)	Langzeit-Indexkorrektur
Risø (C)	Shear (nur sektorweise Vertikalextrapolation) (C)	k-Parameter vorkonditioniert
Eurocode (-)	Kein Modell (Mast ist repräsentativ) (C)	3s-Bö Schätzung

Anwender-Anmerkung

IEC-Limits

IEC-Klasse	Max Extremwind (Vref) [m/s]
IA	50,0

Ergebnis (Grafik)



Ergebnis (Tabelle)

WEA	Klasse	Mast	Terraindaten	u50j [m/s]
WEA 1	IA	1	A	42,3
WEA 2	IA	1	A	42,6
WEA 3	IA	1	A	42,3

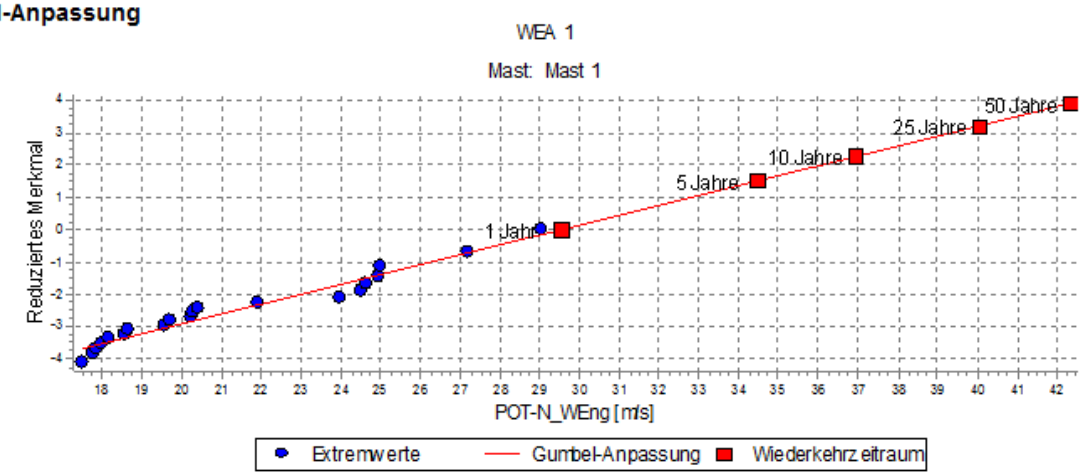
WindPRO, entwickelt von EMD International A/S, Niels Jernesvej 10, DK-9220 Aalborg Ø, Tel. +45 96 35 44 44, Fax +45 96 35 44 46, e-mail: windpro@emd.dk

Abb. 80. Erste Seite der Extremwind-Prüfung.

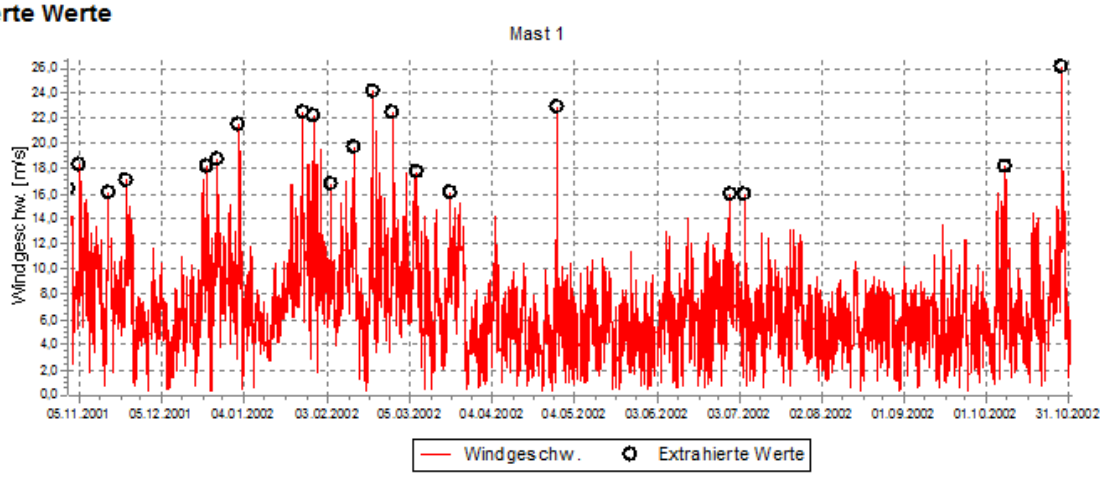
SITE COMPLIANCE - Extremwind

Berechnung: Handbuch

Gumbel-Anpassung



Extrahierte Werte



WindPRO, entwickelt von EMD International A/S, Niels Jernesvej 10, DK-9220 Aalborg Ø, Tel. +45 96 35 44 44, Fax +45 96 35 44 46, e-mail: windpro@emd.dk

Abb. 81. Zweite Seite der Extremwind-Prüfung.

13.8 Referenzen

[1] IEC 61400-1 ed. 3, 2005, Wind turbines – Part 1: Design requirements.
[2] IEC 61400-1 ed. 3, 2010, Amendment 1.
[3] Gumbel, E., 1958, Statistics of Extremes, Columbia University Press.
[4] Abild, J., Andersen, E. Y. and Rosbjerg, D., 1992, The Climate of Extreme Winds at the Great Belt, Denmark, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 41-4, p. 521-532.
[5] Cook, N., 1982, Towards better estimation of extreme events, *Journal of Wind Engineering and Industrial* Aerodynamics, vol. 9, p. 295-323.
[6] Makkonen, L., 2007, Problems in the extreme value analysis, *Structural Safety*, vol. 30, p. 405-419.
[7] Winklaar, D. (ed.), 1998, *European Wind Turbine Standards II, part I: Load Spectra and Extreme Wind Conditions*.
[8] Bergström, H., 1992, DISTRIBUTION OF EXTREME WIND SPEED, *Wind Energy Report WE 92:3*, Department of Meteorology, Uppsala University.
[9] Larsén, X. G. and Mann, J. 2009, Extreme winds from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Wind Energy*, vol 12, p556-573. DOI: 10.1002/we.318.
[10] Svenningsen, L. et al., 2010, An Index-like correction to reduce uncertainty of extreme wind estimates from short-term data, Proceedings of the European Wind Energy Conference.
http://ewec2010proceedings.info/proceedings/index2test.php?page=info2&id=6&id2=326&ordre=19&tr=&searchin=&what=&searchtext=&day=1&top=&fil1=&fil2=&fil2&ord1=&sess=
[11] Unpublished Monte Carlo study of extreme wind estimation presented at Vindkraftnet meeting at Risø/DTU 2010.
[12] Cook, N. J., 1990, The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures, Butterworths. (Book)
[13] Frandsen, S. T., 2007, Turbulence and turbulence generated loading in wind turbine clusters, Risø report R-1188.
[14] Nielsen, M., WAT tool Help file, 2011, Risø/DTU.
[15] Nielsen, M., Jørgensen, H. E. and Frandsen, S. T., 2009, Wind and wake models for IEC 61400-1 site assessment, Proceedings of the European Wind Energy Conference (EWEC 2009).l
[16] Giardini, D., Grünthal, G., Shedlock, K. M. and Zhang, P., 2003, The GSHAP Global Seismic Hazard Map. In: Lee, W., Kanamori, H., Jennings, P. and Kisslinger, C. (eds.): International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, International Geophysics Series 81 B, Academic Press, Amsterdam, 1233-1239.
[17] NASA, Global Hydrology and Climate Center. http://thunder.nsstc.nasa.gov/data/index.html.
[18] Troen, I. and Petersen, E. L., 1989, European Wind Atlas, Risø National Laboratory. (Book)

Anhang I - Gumbel's Theory of Extremes and more

Emil J. Gumbel's model of extremes published in "Statistics of Extremes" [3] in 1958 is the classical standard model for describing the statistics of extreme events. The model is also called Fisher-Tippett Type 1 asymptote or Generalized Extreme Value model (GEV) type 1. The Gumbel model describes the distribution function of annual extremes, i.e. the cumulative probability, G(u), that a yearly maximum wind speed of u is not exceeded and takes the form:

$$G(u) = e^{-e^{-(u-\beta)/\alpha}}$$

Where the parameters β and α, are called mode and dispersion or sometimes location and scale.

There is a simple relation between the Gumbel distribution of annual extremes and the cumulative mean distribution of all wind speeds samples, F(u). The mean distribution, also called the parent distribution, is typically assumed to be Weibull. The simple relation states that the probability that a given extreme wind speed is the largest among N samples is given as the cumulative parent distribution multiplied by itself N times. For large N the exact distribution of annual extremes converges asymptotically to the Gumbel distribution:

$$G(u) = e^{-e^{-(u-\beta)/\alpha}} \approx F(u)^N$$

The error of using the Gumbel asymptote is related to the number of independent samples in a year as well as the k-parameter of the Weibull parent distribution (i.e. the tail behaviour). For lower k-parameters the rate of convergence (i.e. more accurate already for small N) is much faster than for higher k-factors. It is also important to note that all N samples are assumed to be independent, i.e. not correlated. In real life this is not the case for all 10-minute or hourly wind speed samples in a year. The demand for independence leads to considerable complexity. Thus, usually the Gumbel distribution is not estimated from the parent distribution, but rather, directly from extracted extreme samples of the time series and then combining these with theoretical estimates of the cumulative probability of non-exceedance ($P_i \approx G(u_i)$) called "plotting positions". A Gumbel distribution is then fitted to (u_i, P_i) to obtain the Gumbel distribution parameters, α and β.

In the original Gumbel approach the annual maximum samples (u_i) are extracted for each year of an N year time series. These extreme samples are then ranked (i) smallest to largest (i equals 1 to N) and attributed the plotting positions, P_i, the theoretical estimates of the cumulative distribution function, approximating the probability that the annual maximum wind speed u_i is not exceeded. Several formulas for plotting positions have been suggested. The original Gumbel formula is:

$$P_{i,Classic} = \frac{i}{N+1} \approx G(u_i)$$

which in fact was introduced by Weibull (Makkonen, 2004) [6].

An alternative plotting position is due to Hazen (Makkonen, 2004) [6], which is used in the extreme wind plots in for example, most Risø/DTU software (e.g. WAsP Engineering):

$$P_{i,Hazen} = \frac{i-0.5}{N}$$

The extreme wind speed samples, u_i, are then plotted on the x-axis versus a transform of the chosen P-values, called the reduced variate, y:

$$y_i = -\ln(-\ln(P_i))$$

With this transform the Gumbel asymptote takes a very convenient linear form:

$$y = -\ln\big(-\ln\big(G(u)\big)\big) = au+b = \frac{1}{\alpha}u - \frac{\beta}{\alpha}$$

Thus, a linear fit to a plot of (u_i, y_i) provides the parameters of the Gumbel distribution.

The IEC design criterion for extreme wind speed is a 50-year event, where "50" is referred to as the return period. In other words the design criterion is the wind speed that is expected to occur only once in 50 years. The return period is related to the annual risk of exceedance (R) via:

$$R(u_T) = 1 - G(u_T) = \frac{1}{T}$$

Thus, for T=50 years the annual risk of exceedance is R=2%, which is a much more stringent and basic definition of the design criterion than "50 years return period".

Once the Gumbel parameters, α and β, have been obtained from a linear fit to (u_i, y_i) the extreme wind estimate for T=50 years (i.e. R=2%) may be obtained from:

$$u(T) = \alpha y(T) + \beta = \alpha(-\ln\left(-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right)) + \beta$$

Where y(T=50) equals 3.9. Thus, to obtain the estimate of the 50-year wind speed, the linear Gumbel fit of (u_i, y_i) must be extrapolated to y=3.9.

Implicit assumptions in the choice of "plotting positions"
The plotting position associated to each of the extracted extremes is a theoretical estimate of the annual probability that this wind speed is not exceeded. As such this probability also implies an assumption of the return period of the highest of the extracted wind speeds.

For the classical Gumbel plotting position the max wind speed extracted is assumed to have a return period of:

$$T_{max} = \frac{1}{1-P_{max}} = \frac{1}{1-\frac{N}{N+1}} = N+1$$

Using the Hazen plotting positions the same max wind speed is assumed to have the return period:

$$T_{max} = \frac{1}{1-P_{max}} = \frac{1}{1-\frac{N-0.5}{N}} = 2N$$

As example with 10 years of data (i.e. N=10) employing the classical Gumbel plotting positions relies on the assumption that the overall maximum wind speed recording has a return period of 11 years. For the Hazen plotting positions the assumed return period is 20 years. A more extreme example is a time series of 25 years. Using the Hazen estimates assumes the max recording to have a return period of 50 years. Thus, it is obvious that the Hazen plotting positions are much less conservative than those of the classical Gumbel method.

Extreme wind speed estimate at return period 1 year
The IEC standard also mentions that the extreme wind speed for T=1 year must be estimated although it is not used directly in the extreme wind check. However, the exact expression above for y(T) is not defined for T=1 year. Instead the most likely extreme to encounter any given year is usually chosen as the most appropriate estimate; this value equals the ***mode*** of the Gumbel distribution, i.e. the parameter β from the linear fit (which does not exactly equal the mean as the distribution is not symmetric). So we employ the definition of the extreme wind estimate with return period of 1 year as:

$$u(T=1) \equiv \beta$$

This definition is consistent with the equation derived using a Poisson process (see for example, [4]).

Fitting the Gumbel asymptote

The linear fit to (u_i, y_i) described above represents is the basis of Gumbel's asymptotic model of extremes. However, this linear fit may be performed in various ways. Firstly it is worth noting that the fit is performed on (u_i, y_i), i.e. with the reduced variate as the dependent variable. The reason for this is the implicit assumption in the standard least-squares fitting routine that the dependent variable (here, y) has much higher uncertainty than the independent one (u). The argument is that the wind speeds are measured using high quality equipment whereas y (reduced variate) is a transform of a theoretical estimate of the annual probability of each wind speed not being exceeded, which is associated with considerable uncertainty.

The standard fit is performed using the least-squares method. Monte Carlo simulations (not published) have shown that typically this fit introduces a slight conservative bias.

An alternative fit is done using the Probability Weighted Moments, PWM (Abild, 1992) [4] which only takes the ranked wind speeds as input, and, hence, does not utilize the reduced variate. In this way the PWM fit avoids the main source of method-induced bias. The PWM expressions for the fit parameters to the Gumbel asymptote, scale (α) and location (β) are:

$$\alpha = \frac{2b_1 - b_0}{\ln(2)} \quad \text{and} \quad \beta = b_0 - 0.5772\alpha$$

With estimates of the sample probability weighted moments given as:

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} u_i \quad \text{and} \quad b_1 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{i-1}{N-1} u_i$$

Monte Carlo simulations (not published) have shown that the PWM fit to the Gumbel asymptote does not introduce a bias in the Gumbel fit. Unfortunately, the PWM fit does not work equally well with all the ways of extracting the extreme samples. It seems that PWM only is only bias-free for the traditional Gumbel approach where only the annual extremes are extracted.

Annual maximum method (AM)

The traditional Gumbel method only extracts the most extreme sample of each year, or from alternatively the most extreme sample of each period of fixed length sub-dividing the time series. Hence, the method is referred to as the Annual Maximum method (AM) or Periodical Maximum method.

The drawback of the AM method is the requirement of relatively long time series for the fit to the Gumbel asymptote to be meaningful. Typically, at least 5-10 years is recommended to constrain the fit parameters reasonably well.

In SITE COMPLIANCE at least 5 years of data are required for the AM method to be available.

Fit

The PWM fit is used with the AM method as it guarantees the least bias in the fitting. Since the PWM fit does not require plotting positions no Gumbel plot is needed. But is used for visual presentation, however.

Peak-Over-Threshold method (POT)

In some applications this method is also referred to as method independent storms. In most applications 5-10 years of on-site measurements are rarely available and within each year there may be more than one significant storm event. Hence a group of extreme wind methods have been developed which utilize more than a single storm from each year. These methods are referred to as Peak-Over-Threshold methods. Storms are typically extracted by defining a high threshold to select only high wind events which exceed this threshold. To ensure that the storm events are statistically independent events a minimum time difference is required between the extracted events, typically a few days. The extracted extreme samples may then be analysed in a way very similar to that of the standard AM Gumbel approach.

Normally, the recommendation for POT methods is given as the number of events to be extracted as 20-50 extremes. This makes the selection of a proper threshold an iterative procedure. As a more efficient way of extracting the extreme samples in SITE COMPLIANCE we have introduced a variation of the POT method which we call POT-N. Instead of defining a threshold the wished number of extremes is defined directly and the program then internally selects the proper threshold to obtain this number of extremes.

As in the AM method the extracted extreme samples are ranked and the “plotting position” (P_i) is attributed to each of the extracted extremes, i.e. the theoretical estimate of the probability of not being exceeded. For POT-N we have decided to use the classical Gumbel plotting positions in SITE COMPLIANCE

Instead of a “storm rate” of just one storm/year as in the AM method the storm rate is λ storms/year in a POT-estimation. Thus, a direct Gumbel fit to the extracted extremes would <u>not</u> yield the distribution of annual extremes, but simply the distribution of the extracted storms. To compensate for this the plotting positions, P_i, may be raised to the λth power provides an estimate of the PDF of the annual extremes (see Cook, 1982 [5]). This transformation is equivalent to a simple shift on the y-axis, i.e. the standard reduced variates are shifted by ln(λ):

$$y_{annual} = y_{storm} - \ln(\lambda)$$

After this transform the POT Gumbel plot is fully equivalent to the AM plot, with $y_{annual} = 3.9$ for T=50 years.

Fit

Our studies have shown that the PWM fit does not work well for the POT method as for the AM, unfortunately. Instead, a linear leat squares fit to the (u,y) is used. The classical Gumbel plotting positions are used as the implicit assumption of return period of the max wind recording seems more sensible than for the Hazen plotting positions.

Weibull parent (EWTS/Bergström) method

The occurrence of high extreme events is closely linked to the tail behaviour of the wind speed distribution. The heavier the tail the more likely are high extreme events to occur. For Weibull distributions commonly adopted in wind energy the shape of the tail is determined by the Weibull shape or k-parameter. A lower k-parameter means a heavier tail and that extreme events are more likely.

This effect has been quantified in the European Wind Turbine Standard (EWTS) that includes a method for extreme wind estimation based on the "Parent"-distribution in this case the Weibull distribution. The method simply assumes a universal number of independent extremes per year (N). The so-called "exact distribution" of the annual maximum is then obtained by raising the Weibull cumulative distribution function to the power of this number, N.

There is an error in the EWTS publication in the number of independent samples which they set to 23037 per year with reference to Bergström (1992) [8]. However, in Bergström (1992) [8] the correct number for 10-minute data is n=2302 independent samples per year, or around every 20th 10-minute sample. For hourly-averaged data the number is 883 or approximately every 10th hourly sample. The error arises due to an exponent of effective frequency which is incorrectly transferred a factor of 10 in EWTS.

The slope and offset of the Gumbel asymptote (for high n) to the "extracted distribution" of annual extremes are given as (Bergström, 1992 [8], EWTS, 1998 [7]):

$$\alpha = \frac{A}{k}[\ln(n)]^{1/k-1}$$

$$\beta = A[\ln(n)]^{1/k}$$

The difference between the "exact" and Gumbel asymptote is not significant, and working with the Gumbel asymptote allows a fully consistent plotting with the other extreme wind estimation methods.

Omni-directional or sector-wise

The EWTS/Bergström method requires omni-directional Weibull parameters. In the WAsP context Weibull parameters are sector-wise, which is much more realistic and allows for multimodal omni-directional total distribution (several peaks). However, an omni-directional Weibull distribution called "Combined" may be estimated from the sector-wise Weibulls according to the method in the European Wind Atlas [18].

Fit - is the WAsP Weibull fit appropriate for extreme wind estimation?

The WAsP-type Weibull fit, fits exactly the third moment (energy) and frequency above the mean speed of the table data (no power curve or truncation is applied). Thus, the WAsP fit has a very strong emphasis on the tail behaviour. This is in contrast to ordinary least-squares or maximum-likelihood fits, that fit the wind speeds (and not the energy). These fits tend to fit well around the mean where the highest frequencies of occurrence are, at the cost of reproducing the tail behaviour less well. In conclusion, the WAsP Weibull-fit is in fact better than most other fits at reproducing the right tail behaviour, which is of main importance in extreme wind estimation.

Preconditioning

The Gumbel distribution is an asymptotic distribution. As the number of independent (i.e. not correlated) samples in the pool from which the extremes are extracted, e.g. 1 year, approaches infinity, the Gumbel asymptote becomes exact. The accuracy of the asymptotic assumption depends on the number of independent samples but also on the shape of the parent distribution, i.e. the Weibull distribution. For a k-parameter of 1, the convergence is extremely fast and the asymptote practically exact for just few samples. For higher k-factors the convergence is much slower (see Cook, 1982 [8]).

The deviation of the true annual extreme distribution from the Gumbel asymptote is a slight curvature of the extreme samples when plotting the reduced variate, y, on the y-axis versus wind speed on the x-axis. This curvature will be curved downwards (i.e. concave) and generally results in a conservative fit (over-estimation) which is further exaggerated upon extrapolation to high return periods like 50 years (y=3.9) and higher.

A possible solution is to precondition the data before fitting the slope and offset. The wind speeds are transformed so that the parent distribution becomes a Weibull with a k-parameter of 1 for which the convergence is extremely fast and thus the Gumbel approximation always very good (Cook, 1982 [8]). To achieve this, the wind speeds of the extreme samples are simply raised to the power of k, where k is the parent Weibull distribution. Often k=2 is used as a common assumption in wind energy. In addition using k=2 makes the transformed wind speeds proportional to the dynamic pressure, related to the thrust exerted by the wind. However, the real argument for preconditioning is purely statistical and is illustrated in the graphs below.

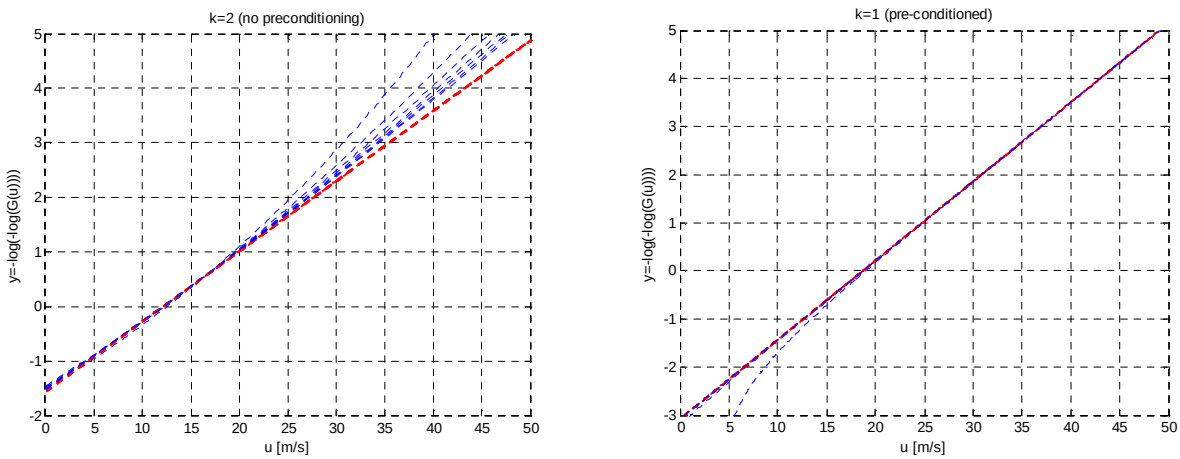


Abb. 1. Illustration of the asymptotic nature of the Gumbel model. In the both graphs blue curves show the exact distribution for an annual number of independent samples of N=10^1 to 10^7 in steps of 10. Red curves show the Gumbel asymptote assuming N is infinite (hidden behind the blue curves on the right graph).Note that as N increases the blue curves converges to the red. Left graph illustrates the situation for k=2 and the right graph for k=1, which is equivalent to using preconditioning.

Anhang II - Frandsen Effective turbulence model

The following text describes the main assumptions and steps in the implementation of the Frandsen model or Effective turbulence model. Most assumptions are directly specified in the IEC standard [1, 2] or in Frandsens original publication [13].

The Frandsen model [1, 2, 13] defines the so-called effective turbulence as a combination of ambient and wake generated turbulence integrated overall directions in a way that accounts for accumulation of fatigue using material properties. In the edition specified in the IEC61400-1 ed. 3 2010 amendment [2], the effective turbulence is calculated using the 90th percentile of ambient turbulence.

The illustration below gives a simplified overview of the calculation steps of effective turbulence for a WTG.

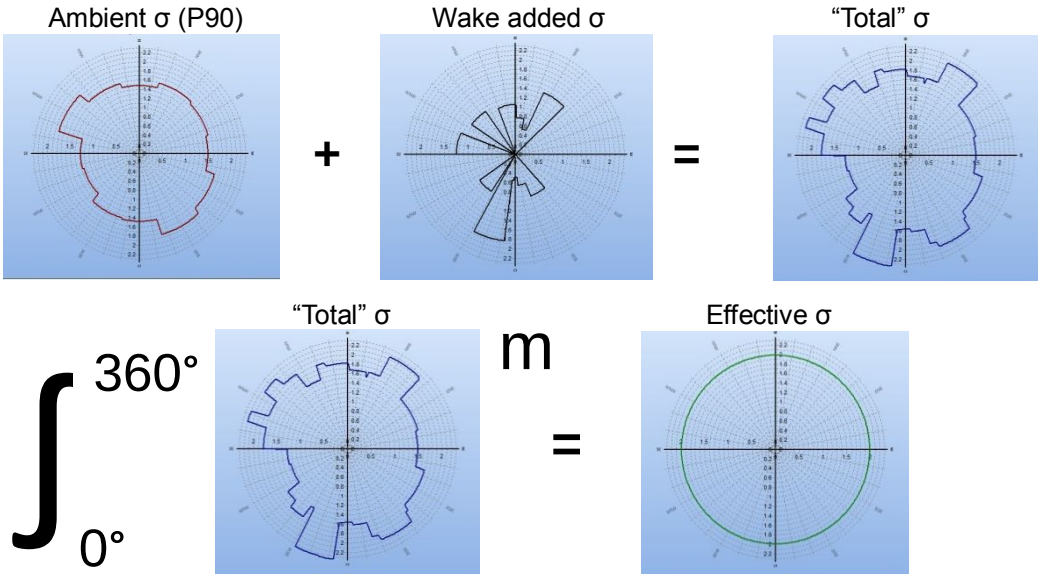


Abb. 1. Simplified illustration of the main calculation steps in the Frandsen effective turbulence model. M is the material parameter Wöhler exponent.

For each WTG position in the calculation the Frandsen model needs the following input:

1. $\hat{\sigma}(\theta, u)$ and $\hat{\sigma}_{\sigma}(\theta, u)$ - Ambient turbulence (mean & st.dev. functions of direction and speed)
2. $W(A_i, k_i)$ & $f(\theta_i)$ - Sector-wise frequencies and Weibull distributions
3. C_T (turbine thrust curve) and park geometry
4. m - Relevant material fatigue property "Wöhler exponent

Input 1 is used to calculate the ambient characteristic turbulence, i.e. the 90th percentile.

Input 2 is used to calculate the directional wind sped distribution conditioned on wind speed.

Input 3 is used to calculate the wake generated contribution to turbulence.

Input 4 is used in the fatigue weighted combination model of single directions to obtain an omnidirectional effective turbulence as a function of wind speed only.

A main decision in SITE COMPLIANCE regarding the implementation of the Frandsen has been working directly with standard deviations of wind speed (σ) instead of turbulence intensity (TI) which is more common. There are several arguments supporting this decision. Firstly, Frandsen's original publication [13, p. 84] states directly that "The model is expressed in terms of standard deviation of wind speed fluctuations rather than turbulence intensity. Secondly, a fundamental assumption in Frandsen's model is that loads are proportional to σ, the standard deviation of wind speed. Thirdly, the variation of σ with wind speed assumed in the IEC design limit ("Normal turbulence model") is linear for (u,σ), but not for (u,TI).

The implementation of Frandsen's model as specified in [1, 2] includes on a number of assumptions and calculation steps. The main assumptions in the SITE COMPLIANCE implementation are (most are directly given in the standard [1, 2]):

- "No reduction of mean wind speed inside the wind farm shall be assumed" (no wake deficit!) [1, 2]
- Only wake from nearest neighbour WTG considered i wakes overlap [1, 2]
- Turbulence structure correction is applied to both σ and σ_σ
- Wakes have a fixed angular width of 22° independent of distance [13, 15]

The main steps in the calculation of effective turbulence (as illustrated in Abb. 1) are:

- "Total" turbulence (σ_T) is calculated in each direction combining measured 90th percentile of ambient turbulence (σ_C) and calculated wake added turbulence (σ_{wake}) [1, 2] - "^" indicates measured data:

  $$\hat{\sigma}_T = \sqrt{\sigma_{wake}^2 + \hat{\sigma}_c^2}$$

  where

  $$\hat{\sigma}_c = \hat{\sigma} + 1.28\hat{\sigma}_\sigma \quad \text{(90th percentile of ambient turbulence)}$$

  and

  $$\sigma_{wake} = \begin{cases} 0 & \text{If overall nearest neighbour distance is } > 10\text{RD} \\ \dfrac{u}{1.5 + \dfrac{0.8\text{d}/RD}{\sqrt{C_T(u)}}} & \text{In wake affected directions} \\ & \text{d is distance and } \text{C}_\text{T} \text{ is thrust coefficient} \end{cases}$$

- "Effective turbulence" is calculated from "Total turbulence" raised to the power of m (Wöhler exponent) and integrated (numerically) over all directions weighted by its relative frequency (f):

  $$I_{eff.}(u) = \frac{1}{u}\left[\int_0^{2\pi} \hat{\sigma}_T(\theta \mid u)^m f(\theta \mid u) d\theta\right]^{1/m}$$

The Frandsen model requires a "large wind farm correction" when certain conditions are met, but [1, 2] only considers the special case of a regular rectangular layout. In SITE COMPLIANCE a more general sector-wise version of this large wind farm correction has been implemented. For each sector the following evaluation is performed:

- If >5 neighbour WTGs in a sector, the sector is a "large wind farm sector":
  - In direct wake directions σ_T is calculated as above (no correction of ambient level) [1, 2]
  - In non-wake directions (>10RD), ambient σ_c is adjusted using [1, 2]:

    $$\sigma_c = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\hat{\sigma}_w^2 + \hat{\sigma}^2} + \hat{\sigma}\right) + 1.28\hat{\sigma}_\sigma$$

  where

  $$\hat{\sigma}_w = \frac{0.36u}{1+0.2\sqrt{\frac{d_r d_f}{C_T}}} \approx \frac{0.36u}{1+0.2\sqrt{\frac{0.5\Delta\theta d_{max}^2}{N_{sec} C_T}}}$$

The latter fraction on the right in the above equation was proposed in [15] as a more generally applicable version of the fraction on the left which is given explicitly in the standard, covering only regular rectangular layouts). The square root argument represents a "thrust versus area". In the fraction on the right the rectangular expression is replaced with an angular expression with the area of an "pie slice" $A = 0.5\Delta\theta d_{max}^2$. N_{sec} is the number of WTGs within the "slice" or sector, d_{max} the radius of the slice and thus distance to the furthest neighbour WTG in the sector.

Calculation of Equivalent effective turbulence (not part of the IEC standard)

This calculation is not part of the IEC standard, but is based on considerations presented in Frandsen's original paper [13]. The Equivalent effective turbulence is used to decide when the calculated Effective turbulence exceeds the IEC design limit to evaluate if this exceedance is critical or not. The main assumption is the same as in the Frandsen model, but an extra calculation step is added: integrating the effective turbulence over all relevant wind speeds where Frandsens model only integrates over directions. This second integration over wind speeds assumes that the sensitivity of the WTG to wind speed fluctuations is constant for the relevant

wind speed range which is a significant extension to the approximation of the Frandsen model and further validation of this approximation is ongoing. The Equivalent effective turbulence is calculated as following:

$$\sigma_{eq} = \left(\int_{u_1}^{u_2} \sigma_{eff.}(u)^m f(u)\, du \right)^{1/m}$$

Where m is Wöhler exponent, *f(u)* is total frequency of a wind speed bin (omnidirectional) and $\sigma_{eff.}(u)$ is effective turbulence as a function of wind speed bin, i.e. the result from the Frandsen models effective turbulence calculation.

The effective turbulence result for a particular WTG is compared the IEC design limit for the WTG class by calculating the equivalent effective turbulence for the relevant IEC design class (turbulence and frequency values) and for the actual WTG results. These results for the actual WTG result are normalized by the result for the IEC class. If the normalized result (ratio) exceeds 1 the IEC exceedance is considered critical. The integration limits are set to match the IEC check interval.

Anhang III - Critical, Caution & OK limits in SITE COMPLIANCE

The following values are used in the WindPRO SITE COMPLIANCE module to help the user evaluate if an obtained check value is critical or not. They are based on experience from a large number of projects but further validation and improvement are on-going.

General decisions:

For all checks the result of a calculation is green/"Ok" if the result is fully within the IEC limits. If the result for a check exceeds the IEC limit the result will be orange/"Caution" or red/"Critical", depending on the degree of exceedance. Caution is used when the exceedance is not considered critical.

At WTG level:

- A WTG is set to Critical if just one check is Critical, Caution if just one check is Caution, and only Ok if all checks are Ok.

At Park level:

- A check is set to Critical for the park if just one WTG is Critical for the check, it is Caution if just one WTG is Caution and only Ok if all WTGs are Ok.

Assessment of Critical, Caution and Ok for each Site Compliance check:

Terrain complexity (I_c):

IEC limit: (none/see details of terrain check)

- Critical: Never
- Caution: If $I_c > 0$
- Ok: if $I_c = 0$

Wind shear (α):

IEC limits: $0 \leq \alpha \leq 0.2$

- Critical: if $\alpha > 0.3$ or $\alpha < 0$
- Caution: if $0.3 \geq \alpha > 0.2$
- Ok: if $0 \leq \alpha \leq 0.2$

Air density (ρ):

IEC limits: 1.225 kg/m^3 is assumed in design

- Critical: Never
- Caution: $\rho > 1.225$ kg/m^3
- Ok: $\rho \leq 1.225$ kg/m^3

Inflow angle (φ_{max}):

IEC limits: $\varphi \leq 8°$ & $\varphi \geq -8°$

- Critical: $\varphi > 12°$ or $\varphi < -12°$
- Caution: $12° \geq \varphi > 8°$ or $-12° \leq \varphi < -8°$
- Ok: $\varphi \leq 8°$ & $\varphi \geq -8°$

Extreme wind (u_{50y}):

IEC limits: $V_{ref} \geq u_{50y}$

- Critical: $u_{50y} > Vref$ or gust $> 1.4*Vref$
- Caution: Never
- Ok: $V_{ref} \geq U_{50y}$ or $1.4*Vref \geq$ gust

Effective turbulence ($\sigma_{eff.}(u)$):

IEC limits: $\sigma_1(u) > \sigma_{eff.\ WTG}(u)$ for all u

- Critical: $\sigma_{eq,\ WTG} > \sigma_{eq,\ IEC}$
- Caution: $\sigma_{eq,\ WTG} < \sigma_{eq,\ IEC}$
- Ok: $\sigma_{eff,\ IEC}(u) > \sigma_{eff.\ WTG}(u)$ for all u

$\sigma_{eq,\ XXX}$ is the Equivalent effective turbulence for WTG for IEC design class. See Appendix II for a description of the calculation of this quantity.

Wind distribution (pdf(u)):

IEC limits: $f_{IEC}(u) > f_{WTG}(u)$ for all u

- Critical: $F_{hi} < 0$ or $(F_{hi} + F_{lo} < 0)$
- Caution: $F_{hi} \geq 0$ & $(F_{hi} + F_{lo} \geq 0)$
- Ok: $f_{IEC}(u) > f_{WTG}(u)$ for all u

Where:

$$F_{hi} = \int_{0.3V_{ref}}^{0.4V_{ref}} \left(f_{IEC}(u) - f_{WTG}(u)\right) du$$

$$F_{lo} = \int_{0.2V_{ref}}^{0.3V_{ref}} \left(f_{IEC}(u) - f_{WTG}(u)\right) du$$

- The main point here is that exceedances at the lower half of the check interval is not as severe as those in the upper half at higher wind speeds where loads are expected to be higher.

Seismic hazard (PGA):

- Critical: PGA > 2.4
- Caution: 2.4 ≥ PGA > 0.8
- Ok: 0.8 ≥ PGA

Lightning rate:

- Critical: rate > 20
- Caution: 20 ≥ rate > 10
- Ok: 10 ≥ rate

Temperature range (T):

Normal range

- Critical: h outside > 240h
- Caution: h outside > 24h
- Ok: 24 h ≥ h outside

Extreme range

- Critical: h outside > 1h
- Caution: 1h ≥ h outside > 0.0 h
- Ok: 0.0 h outside