

Meteorological and Oceanographic Conditions at the FINO Platforms During the Severe Storms CHRISTIAN and XAVER



Meteorologische und ozeanografische Messungen auf den FINO-Plattformen während der Orkantiefs CHRISTIAN und XAVER

T. Leiding¹, B. Tinz¹, G. Rosenhagen¹, C. Lefebvre¹, S. Haeseler¹, S. Hagemann², I. Bastigkeit², D. Stein³, P. Schwenk³, S. Müller⁴, O. Outzen⁵, K. Herklotz⁵, F. Kinder⁶, T. Neumann⁶

¹ Deutscher Wetterdienst Hamburg, ² Fraunhofer IWES, Bremerhaven, ³ DNV GL Hamburg (vormals GL GH),

⁴ WIND-consult GmbH Bargeshagen, ⁵ Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie Hamburg (BSH), ⁶ DEWI GmbH Wilhelmshaven

EXTERNAL ARTICLE

ENGLISH - DEUTSCH

Introduction

Towards the end of the year 2013, the severe storms CHRISTIAN and XAVER crossed northern Europe in short temporal sequence, causing destruction and disrupting travel. Due to high wind speeds trees were toppled and buildings damaged. Power outages were reported. Shipping, rail, and air traffic shut down temporarily. XAVER caused several consecutive storm surges in the German Bight region. On the islands, dunes and sand were eroded. Hallig lowlands were flooded (German: „landunter“). At the research platforms in the North Sea and the Baltic Sea, FINO1, 2 and 3, very high wind speeds and turbulence intensities were measured providing new insights about the required load of offshore wind energy platforms.

Development of the Storms

Storm CHRISTIAN formed on 26th October 2013 over the Western Atlantic as a secondary depression of the low-pressure system BURKHARD. On its way eastward, the remnants of an ex-tropical storm provided an additional input of energy. With a forward speed of 1200 km in 12 hours, CHRISTIAN was classified as a “rapid moving low” [DWD

Einleitung

Gegen Ende des Jahres 2013 überquerten in kurzer Folge die Orkantiefs CHRISTIAN und XAVER Nordeuropa. Sie sorgten für Verwüstungen und Verkehrschaos. Aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten kippten Bäume um und Häuser wurden beschädigt. Es kam zu Stromausfällen, zeitweise wurde der Schiffs-, Zug- und Flugverkehr eingestellt. Während XAVER traten im Bereich der Deutschen Bucht mehrere aufeinanderfolgende Sturmfluten auf. Auf den Inseln gab es Dünenabbrüche und Sandabtragungen, für die Hallig-Bewohner hieß es „landunter“. An den Forschungsplattformen in der Nord- und Ostsee, FINO1, 2 und 3, wurden sehr hohe Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten gemessen, die neue Erkenntnisse über die notwendigen Auslegerparameter von Offshore-Windkraftanlagen liefern.

Entwicklung der Stürme

Das Orkantief CHRISTIAN entstand am 26. Oktober 2013 als Randtief aus dem Tiefdruckkomplex BURKHARD über dem Westatlantik. Auf seinem Weg nach Osten sorgten u.a. die Reste eines ehemaligen tropischen Wirbelsturms für eine

2013a]. In the early hours of 28th October, the storm crossed the south of the United Kingdom and moved across the southern North Sea towards Denmark. About noon, the first hurricane force gusts (12 Beaufort (Bft), ≥ 32.7 m/s, ≥ 118 km/h) were measured on the German North Sea coast. The weather station at Sankt Peter Ording recorded a gust of 47.7 m/s at 12:30 UTC, the maximum value in the meteorological network of Deutscher Wetterdienst (German National Meteorological Service). At that time, the centre of the storm was located off the northwest coast of Denmark with a core pressure of about 968 hPa. Remarkable about this storm event were the high sustained winds. Not only the gusts but also the 10-minute sustained wind speeds reached hurricane force, especially in northern Schleswig-Holstein. At the station Strucklahnungshörn, e.g., a 10-minute sustained wind of 38 m/s was recorded. During the storm's further shift towards southern Scandinavia, the Danish weather station of Kegnaes Fyr, a lighthouse on the Baltic Sea coast near the border of Schleswig-Holstein/Germany, recorded a gust of 53.5 m/s (Fig. 1).

About one month later, on 4th December 2013, low XAVER formed from a warm front wave across the North Atlantic south of Greenland. It rapidly strengthened to a severe storm [DWD 2013b]. On its way to Southern Sweden, a squall line in connection with the cold front of the storm reached northwestern Germany in the afternoon of 5th December, along which the first hurricane force gusts occurred in the German area. Storm XAVER hit its peak development on 5th December at 18 UTC with a central pressure of 960 hPa over southern Sweden. At that time, the cold front lay across the Western Baltic Sea and caused hurricane force gusts also in that region. Across the North Sea, the wind turned to northwestern directions which led to several severe storm surges. While on 6th December XAVER relocated only slowly towards the Baltic states, the German North Sea and the Baltic Sea regions still experienced stormy weather with peak gusts of hurricane force. In the course of the day, the wind turned from west to north-west also on the Baltic Sea. The highest gusts on 5th and 6th December were between 40 m/s and 45 m/s. Notable are the sustained high wind speeds, persisting during the 6th December and weakening only during the course of 7th December in the Baltic Sea. The wind speed showed noticeable variations of intensity due to high atmospheric instability.

Overall, storm XAVER caused mostly lower wind speeds in the German North Sea area and in Schleswig-Holstein than storm CHRISTIAN, while it was the opposite in the German Baltic Sea region.

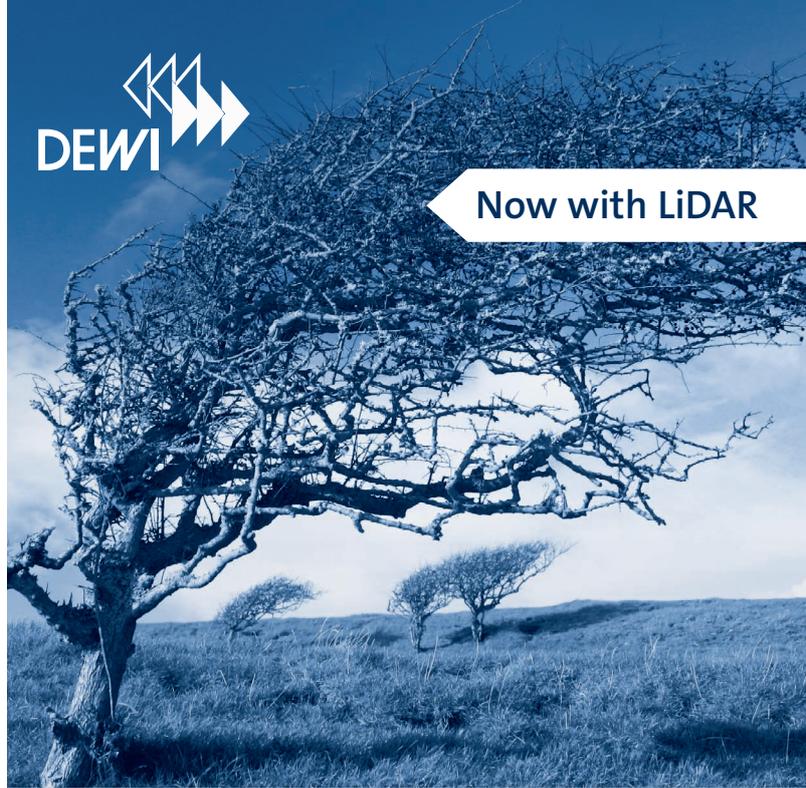
Results of the Measurements at the FINO Platforms

FINO1

Storm CHRISTIAN approached FINO1 from the southwest. Already during the early morning of 28th October 2013 (4 UTC) atmospheric pressure decreased below 990 hPa at the height of the platform deck (22.5 m, in the following all heights refer to marine chart zero/



Now with LiDAR



POWER CURVE

The measurement of wind turbine power curves is one of the key activities in the range of services of DEWI. Together with an assessment of the wind climate at the site, it forms the basis for an energy yield analysis. Wind turbine suppliers can use the results of power performance measurements to optimize their machines. Project developers will base warranty formulations on the assessment of individual turbines in a wind farm. Current innovations include the measurement with LiDAR technologies for the complete wind profile onshore and the use of forward-looking LiDAR in offshore power curve measurements.

As one of the leading international consultants in the field of wind energy, DEWI offers all kinds of wind energy related measurement services, energy analyses and studies, on-/offshore wind turbine and component certification, further education, technological and economical consultancy for industry, wind farm developers and banks. DEWI GmbH is a member of MEASNET and is recognized as an independent institution in various measurement and expertise fields.

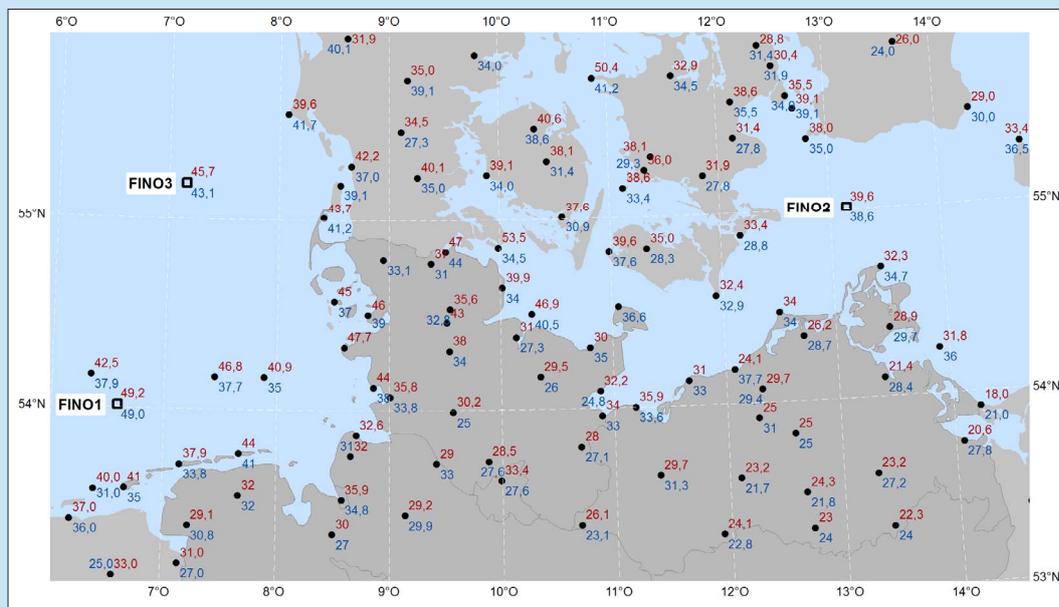


Fig. 1: Peak gusts in m/s (primarily measured in 10 m above ground) in the German North Sea and Baltic Sea region during the storms CHRISTIAN (red) and XAVER (blue). The values of the FINO platforms are measured in 100 m above ground.

Abb. 1: Höchste Böen im deutschen Nord- und Ostseeraum in m/s während der Orkane CHRISTIAN (rot) und XAVER (blau) überwiegend in 10 m über Grund. Die Daten der FINO-Plattformen wurden abweichend in 100 m Höhe erfasst.

Platform	Severe storm	Maximum 1-sec-values [m/s]		Maximum 10-min wind speed [m/s]		Minimum atmospheric pressure [hPa]	
		30 m	100 m	30 m	100 m	30 m	90 m
FINO1	Christian	45.9	49.2	36.6	38.0	973 (20m)	-
	Xaver	42.1	49.0	28.7	32.4	992 (20m)	-
FINO2	Christian	37.6	39.6	28.9	33.2	979	972
	Xaver	37.5	38.6	29.3	31.9	976	969
FINO3	Christian	42.0	45.7	32.6	37.1	966	957
	Xaver	41.8	43.1	30.8	34.6	982	973

Tab. 1: Maximum wind speeds and minimum atmospheric pressure measured at the FINO stations.

Tab. 1: Maximale Windgeschwindigkeiten und minimaler Luftdruck gemessen an den FINO-Plattformen.

lowest astronomical tide). Starting at 10 UTC wind speeds over 25 m/s (10 Bft corresponding to storm) had been recorded. Between 10:30 UTC and 13:30 UTC 12 Bft (hurricane force) was reached (Fig. 2). The maximum wind speed of 49.2 m/s at 103 m height was recorded at 12:30 UTC after the cold front had passed. At this time atmospheric pressure was rising quickly from its lowest value of 973 hPa at 12 UTC and the wind direction turned to WSW. The highest 10-minute mean of 38 m/s at 103 m height was measured at 11:20 UTC. During the afternoon the storm moved in northeast direction.

On 5th December the storm XAVER passed north of FINO1 from northwest to southeast crossing the south of Scandinavia. After 3 UTC the mean wind speed (10-minute average) increased from ca. 15 m/s at 103 m height to the highest value of 32.4 m/s at 18:30 UTC. The maximum 1-second value of 49 m/s at this height was recorded at 13:30 UTC. Ten minutes before that, the mean atmospheric pressure attained 992 hPa. The wind direction turned from WSW to W continuing to NW within 10 minutes. It should be noted that the anemometer at 103 m height is positioned in the wind shadow of a lightning rod during

zusätzliche Energiezufuhr. Mit einer Verlagerungsgeschwindigkeit von zunächst 1200 km in 12 Stunden war CHRISTIAN ein sogenannter Schnellläufer [DWD 2013a]. In der Nacht zum 28. Oktober überquerte das Orkantief den Süden Großbritanniens und zog weiter über die südliche Nordsee Richtung Dänemark. Die ersten Orkanböen (12 Bft, $\geq 32,7$ m/s, ≥ 118 km/h) traten an der deutschen Nordseeküste zur Mittagszeit auf. Die höchste Windböe im Messnetz des Deutschen Wetterdienstes wurde an der Station Sankt Peter Ording mit 47,7 m/s um 12:30 UTC registriert. Zu diesem Zeitpunkt lag das Tief mit einem Kerndruck von unter 968 hPa vor der Nordwestküste Dänemarks. Besonders bemerkenswert an diesem Sturmereignis waren die hohen mittleren Windgeschwindigkeiten. Nicht nur in Böen, auch im 10-Minuten-Mittel erreichte der Wind Orkanstärke, vor allem im nördlichen Schleswig-Holstein. An der Station Strucklahnungshörn trat z. B. ein 10-Minuten-Mittel von 38 m/s auf. Während der weiteren Verlagerung in Richtung Südkandinavien wurde an der dänischen Wetterstation Kegnaes Fyr, einem Leuchtturm an der Ostseeküste nahe der schleswig-holsteinischen Grenze, sogar eine Böe von 53,5 m/s registriert (Abb. 1).

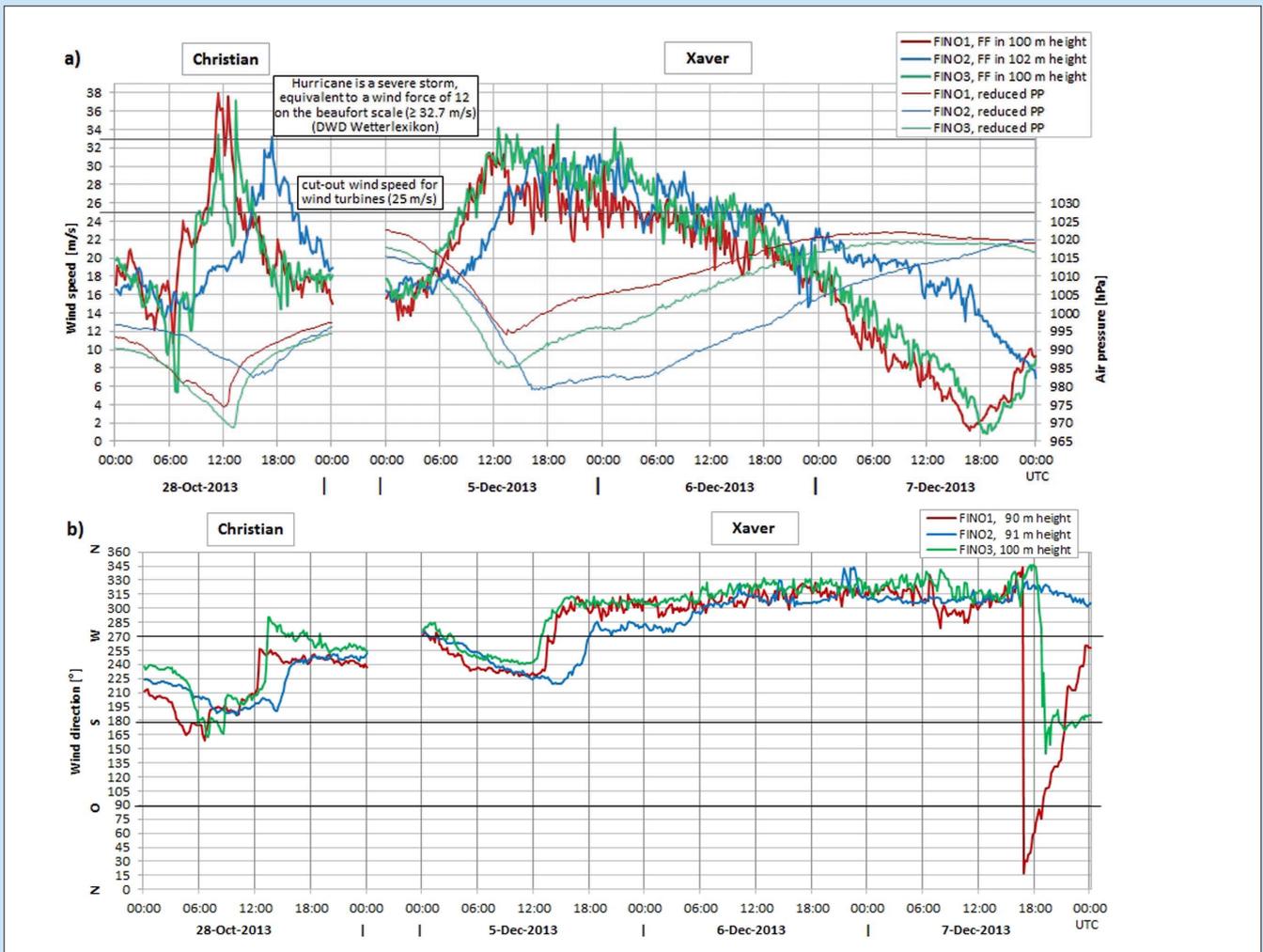


Fig. 2: 10-minute average of wind speed and air pressure (a), and wind direction (b) during severe storms CHRISTIAN (left) and XAVER (right) on the FINO platforms.

Abb. 2: 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeit und des Luftdrucks (a) sowie der Windrichtung (b) während der Orkane CHRISTIAN (links) und XAVER (rechts) auf den drei FINO-Plattformen.

westerly wind direction. During the short time, while the wind veered into the westerly direction, wind speed measurements were therefore lower. Until midnight wind gusts of hurricane force were recorded and until 22 UTC of 6th December 10 Bft was measured. As XAVER moved eastward only slowly, the wind decreased slowly during the following day. Steady NW-wind direction then prevailed, and the multi-annual mean of 10 m/s was reached again in the morning of 7th December (Fig. 2).

Both CHRISTIAN and XAVER broke the record wind speed at FINO1. Until then the maximum wind speed has been recorded during passage of the low-pressure system KARLA on 30th December 2006 at 23:50 UTC when 45.7 m/s were measured at 103 m height. At this time the 10-minute average represented 37 m/s.

FINO2

The maximum wind speed during the storm CHRISTIAN exceeded all recorded wind speeds so far. Until then, the maximum 10-minute average of 29.5 m/s had been recorded on 7th/8th February 2011, whereas the maximum 1-second gust had been measured on 9th November 2009.

Bereits am 4. Dezember 2013, entwickelte sich aus einer Warmfrontwelle über dem Nordatlantik südlich von Grönland das Tiefdruckgebiet XAVER. Es verstärkte sich auf seinem Weg nach Südschweden zum Orkantief [DWD 2013b]. Am Nachmittag des 5. Dezembers erreichte in Verbindung mit der Kaltfront des Orkantiefs eine Gewitterlinie den Nordwesten Deutschlands, an der die ersten Orkanböen im Bereich der deutschen Nordseeküste auftraten. Das Orkantief XAVER erlebte den Höhepunkt seiner Entwicklung am 5. Dezember um 18 UTC mit einem Kerndruck von 960 hPa über Südschweden. Zu diesem Zeitpunkt lag die Kaltfront über der westlichen Ostsee und ließ auch hier die Böen auf Orkanstärke ansteigen. An der Nordsee drehte der Wind auf nordwestliche Richtungen, wodurch mehrere schwere Sturmfluten verursacht wurden. Während sich XAVER am 6. Dezember nur noch langsam in Richtung Baltikum verlagerte, herrschte im deutschen Nord- und Ostseeraum weiterhin Sturm mit Spitzenböen in Orkanstärke. Dabei drehte der Wind im Tagesverlauf auch an der Ostsee von W auf NW. Die höchsten Windböen am 5./6. Dezember lagen zwischen 40 m/s und 45 m/s. Während des Orkantiefs XAVER waren die lang anhaltenden hohen Windgeschwindigkeiten

During CHRISTIAN the wind speed values were 33.2 m/s (10-minute average) and 39.6 m/s (1-second gust), respectively, i.e. the highest 10-minute average recorded before CHRISTIAN was exceeded significantly. The air pressure during this storm reached a minimum value of 979 hPa. Compared to the measurements at FINO1 and FINO3 in the North Sea, CHRISTIAN did not cause such extreme sudden changes in wind speed (Fig. 2). The maximum difference between two consecutive 10-minute averages was 5.3 m/s. When looking at the wind direction, the maximum change between two consecutive 10-minute average values was 8°.

All in all, the storm CHRISTIAN was much less critical with regard to loads on wind turbines in the southern Baltic Sea compared to the conditions in the North Sea. Storm XAVER nearly reached the maximum wind speed values of CHRISTIAN. Thus, during a period of slightly more than one month, the two heaviest storm events since the beginning of the FINO2 measurement in 2007 occurred.

The maximum 10-minute average was 31.9 m/s and the maximum 1-second gust was 38.6 m/s. The lowest air pressure recorded during XAVER was 976 hPa and therefore even a bit lower than during CHRISTIAN.

In contrast to FINO1 and FINO3 the changes between two consecutive 10-minute values of 6.5 m/s and 25° were higher than during CHRISTIAN (Fig. 2). The remarkable fact of XAVER was its long duration. The wind speed exceeded for 35 consecutive hours the value of 20 m/s. If a wind turbine had a cut-out wind speed of 25 m/s this would have been exceeded for 27 hours. The meteorological measuring chain has survived both storms without any incident.

FINO3

The highest wind speeds during the hurricane force storm CHRISTIAN as measured on FINO3 at 100 m above sea level exceeded 37 m/s in the 10-minute average (Fig. 2) and 45 m/s in the 1-second interval. Those values represent the highest wind speeds recorded since the beginning of the meteorological measurement on FINO3 in fall 2009. However, these wind speeds of more than 30 m/s were measured only within a short period of a few hours, compared to the storm XAVER a few weeks later. The highest wind speeds were associated with an extremely low air pressure of 966 hPa at 23 m above sea level, which corresponds to a sea level pressure of 968 hPa. Even such a low air pressure had never been recorded on FINO3. The culmination of CHRISTIAN on FINO3 was preceded by a very pronounced change in wind speed. At 30 m above sea level the 10-minute wind speed average increased from 20 m/s to over 32 m/s within a single 10-minute interval. This represents a rarely observed and enormous wind increase feature.

While CHRISTIAN was a relatively short, though pretty violent storm, the storm XAVER as measured on FINO3 appeared less variable, with much less abrupt wind speed and wind direction changes. However, XAVER had a significantly longer duration of action, with wind speeds well in excess of 30 m/s (in the 10-minute average at 100 m) persisting over periods of several hours. The value of 25 m/s was exceeded even for a period of more than 24 hours

auffällig, die den 6. Dezember über andauerten und an der Ostsee erst im Laufe 7. Dezembers abnahmen. Aufgrund der hohen Labilität der Atmosphäre wies die Windgeschwindigkeit deutliche Intensitätsschwankungen auf.

Insgesamt erreichte der Orkan XAVER an der Nordsee und über Schleswig-Holstein meist geringere Windgeschwindigkeiten als der Orkan CHRISTIAN, während es sich im deutschen Ostseeraum genau anders herum verhielt.

Ergebnisse der Messungen auf den FINO-Plattformen

FINO1

Das Sturmtief CHRISTIAN näherte sich FINO1 von Südwest. Bereits in den frühen Morgenstunden des 28. Oktobers 2013 (ca. 4 UTC) fiel der Luftdruck auf Deckhöhe (22,5 m im folgenden beziehen sich alle Höhenangaben auf das „See-kartennull“ bzw. „Lowest astronomical tide“) unter 990 hPa. Ab 10 UTC wurden Windgeschwindigkeiten von über 25 m/s (Windstärke 10 Beaufort (Bft), entspricht schwerem Sturm) verzeichnet. Zwischen 10:30 UTC und 13:30 UTC wurden 12 Bft erreicht, die einem Orkan entsprechen (Abb. 2). Die höchste Windböe von 49,2 m/s in 103 m Höhe wurde um 12:30 UTC nach Durchzug der Kaltfront registriert. Zu diesem Zeitpunkt stieg der Luftdruck bereits von seinem Tiefstwert von 973 hPa um 12 UTC wieder schnell an und die Windrichtung drehte auf WSW. Der höchste 10-Minuten-Mittelwert in 103 m Höhe wurde um 11:20 UTC mit 38 m/s gemessen. Im Laufe des Nachmittags entfernte sich das Sturmtief in Richtung Nordost.

Am 5. Dezember zog das Sturmtief XAVER nördlich von FINO1 von Nordwest nach Südost über Südkandinavien. Ab 3 UTC stieg die mittlere Windgeschwindigkeit (10-Minuten-Mittel) von bis dahin ca. 15 m/s in 103 m Höhe auf den Maximalwert von 32,4 m/s um 18:30 UTC. Der höchste 1-Sekunden-Wert in dieser Höhe wurde um 13:30 UTC mit 49 m/s verzeichnet. 10 Minuten vorher betrug der mittlere Luftdruck 992 hPa. Der Wind drehte innerhalb von 10 Minuten von WSW nach W und dann weiter nach NW. Zu beachten ist, dass sich das Anemometer in 103 m Höhe bei Westwind im Windschatten eines Blitzfangstabes befindet und daher für kurze Zeit etwas zu geringe Windgeschwindigkeit gemessen hat. Bis Mitternacht wurden Orkanböen verzeichnet und bis 22 UTC am 6. Dezember Windstärke 10 Bft. Da sich XAVER nur langsam Richtung Osten bewegte, nahm der Wind bei stetiger NW-Richtung über einen weiteren Tag hinweg langsam ab bis er am Morgen des 7. Dezember wieder das mehrjährige Mittel von 10 m/s erreichte (Abb. 2).

Die bisherige Rekordwindgeschwindigkeit an FINO1 brachen sowohl CHRISTIAN als auch XAVER. Während des Sturmtiefs KARLA am 30. Dezember 2006 um 23:50 UTC wurde an FINO1 in 103 m Höhe der bis dahin höchste Windgeschwindigkeitswert von 45,7 m/s gemessen. Der 10-Minuten-Mittelwert zu dieser Zeit betrug 37 m/s.

FINO2

Die maximalen Windgeschwindigkeiten während des Sturms CHRISTIAN übertrafen die höchsten seit Sommer 2007 aufgezeichneten Windgeschwindigkeiten. Das bislang maximale 10-Minuten-Mittel wurde in der Nacht vom 7. auf den 8. Februar 2011 aufgezeichnet und betrug

WE MEASURE WIND



scanning LiDAR system

remote sensing and
mast-based
measurement solutions for

- wind
- wind profile
- meteorology

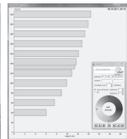
sales - service - rental



sensors



SoDAR



data service



LiDAR



systems

GWU-Umwelttechnik GmbH

GWU-Umwelttechnik GmbH



+49.(0) 22 35.9 55 22-0

info@gwu-group.de

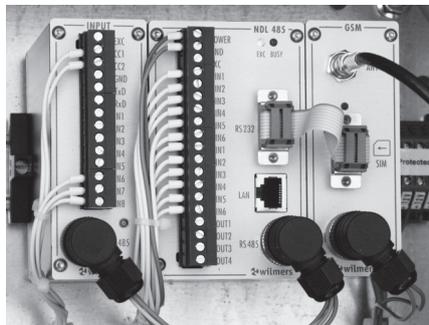
www.gwu-group.de

WIND MEASUREMENT SOLUTIONS



autonomous power supply

- up to 10 months autonomy
- remote access via Internet
- ideal supply for heated sensors



modular data logger systems

- direct Internet access
- measured data are sent via e-mail and FTP
- integrated, intuitive web interface



wind measurement masts

- mountable lattice masts
- including complete instrumentation
- worldwide installation



Environment • Measurement • Systems

Capturing the Future

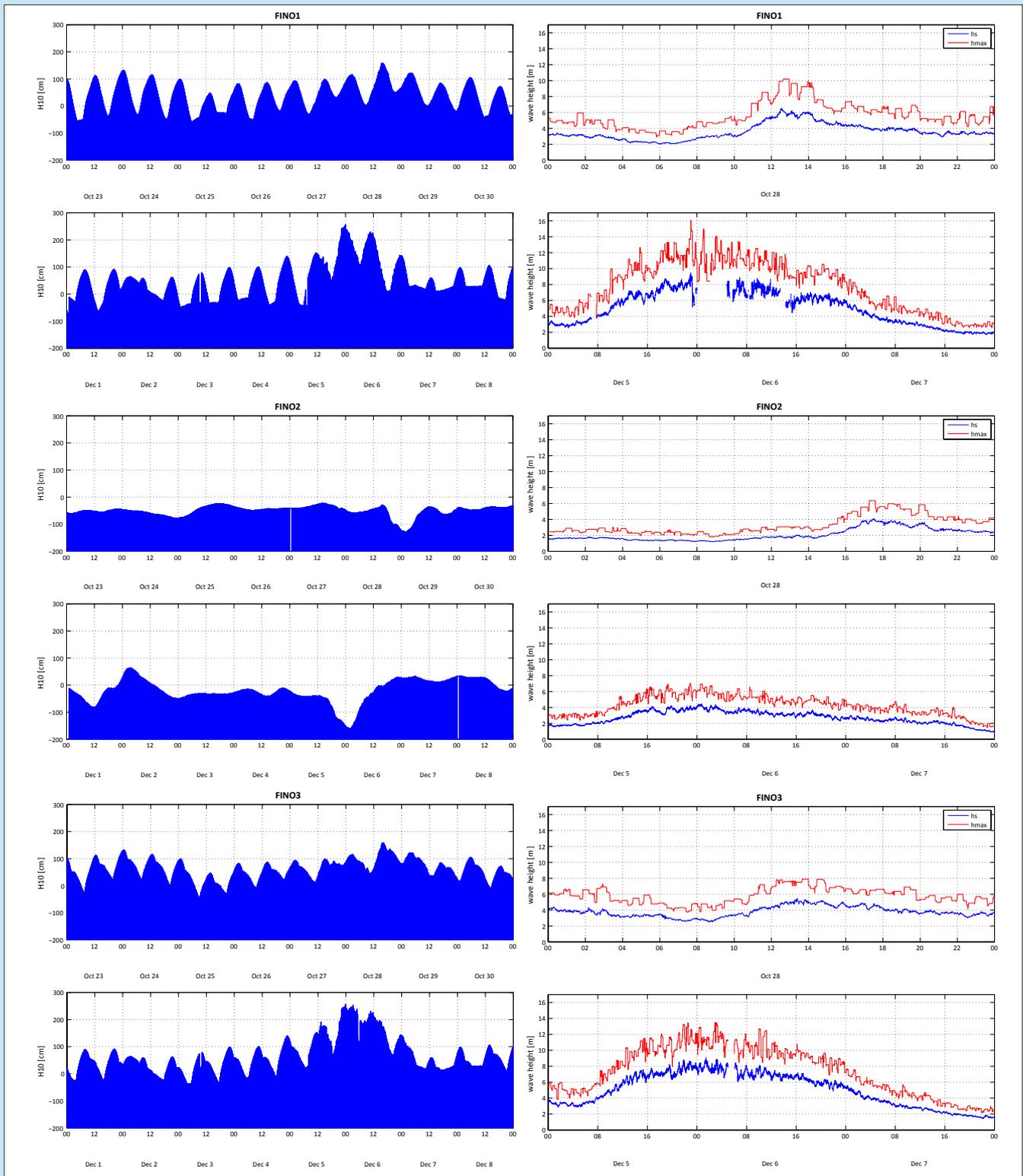


Fig. 3: Water level and sea state at the FINO stations during the storms CHRISTIAN and XAVER.

Abb. 3: Wasserstand und Seegang an den FINO-Stationen während der Stürme CHRISTIAN und XAVER.

Tab. 2: Maximum exceedance of turbulence category A for FINO1, 2 and 3 during CHRISTIAN and XAVER.

Tab. 2: Maximale Überschreitung der Turbulenzkategorie A für die Plattformen FINO1, 2 und 3 zu den Starkwindereignissen CHRISTIAN und XAVER.

CHRISTIAN, 28.10.2013, Maximum Value ($Tl_{\text{measured}} > Tl_A$)

Mast	Date & Time	Tl_{measured}	Tl_A	Tl_B	TI	Frequency $Tl_{\text{measured}} > Tl_A$
FINO3	28.10.2013 07:00	0.27	0.21	0.18	0.16	2

XAVER, 5.12.-7.12.2013, Maximum Value ($Tl_{\text{measured}} > Tl_A$)

FINO1	07.12.2013 04:50	0.20	0.19	0.16	0.14	2
FINO2	06.12.2013 23:05	0.19	0.18	0.16	0.13	2
FINO3	06.12.2013 16:10	0.17	0.16	0.14	0.12	4

(Fig. 2). This, together with the prevailing northwesterly wind direction, led to heavy storm surges along the German North Sea coast. The maximum wind speed recorded on the position FINO3 during this storm was only slightly below those of CHRISTIAN. According to the operator, FINO3 has weathered both storms without significant damage.

Water level and sea state

At the North Sea platforms FINO1 and FINO3 CHRISTIAN caused high tides 0.5 m – 1 m higher than normal high tides (Fig. 3). The duration of the storm was one full tidal circle only, so the following tides had regular heights again. In the Baltic Sea (FINO2) the strong wind from westerly directions produced temporally low water levels.

At FINO1 on 28th October 2013 shortly after 12:00 UTC, the sea state reached values of 6 m significant wave height (H_s) and more than 10 m maximum wave height (H_{Max}). At FINO3 the highest waves arrived later, at 13:50 UTC. At this location H_s reached 5.3 m and H_{Max} was nearly 8 m. For Baltic Sea conditions, high numbers of 4.1 m H_s and 6.3 m H_{Max} were measured at FINO2 at 17:30 UTC. Despite the extreme high wind speeds, CHRISTIAN oceanographically was not an extreme event.

The data for sea level and sea state measured during XAVER shows a different characteristic. For two and a half days the storm was raging in the German Bight. The water level was rising over several tides, as the water could flow back only slightly towards westerly directions during low tide. In the early hours of 6th December water levels at the stations FINO1 and FINO3 during low tide were higher than high tide values normally. The German North Sea coast experienced extreme storm surges. The waves also grew over several days and reached measured values close to 10 m H_s and 16 m H_{Max} at FINO1. At FINO3 measured wave heights were 9.1 m H_s and 13.5 m H_{Max} .

Impacts on Wind Turbines

For the operation of wind turbines offshore, knowledge about load on the turbines, for instance caused by turbulence, is essential. The IEC 61400-1 [IEC61400-1] is used as a guideline for loads, which the turbines are designed to withstand. In the following it is shown if and how often the turbulence intensities of strong wind incidents such as the storms CHRISTIAN and XAVER mentioned here exceeded the limits of the turbulence classes within the IEC-norm.

The turbulence intensity of the measured wind speed is calculated from the 10-minute mean values and the respective standard deviations. The measured wind speed is also the basis for calculating the standard deviation of the turbulence with the normal turbulence model, using the parameters for the reference turbulence intensities of the turbulence categories A, B and C, where A indicates the largest turbulence [IEC 61400-1]. With this value in combination with the measured wind speed, the upper limit of the turbulence intensities of the respective wind turbine classes and turbulence categories are calculated. In the course of storm CHRISTIAN the upper limit for the turbulence intensity in turbulence category A was exceeded only at FINO3, twice. In comparison, during XAVER at all

29,5 m/s. Der maximale 1-Sekunden-Wert wurde am 9. November 2009 mit 39,1 m/s gemessen. Bei CHRISTIAN wurden Maximalwerte von 33,2 m/s für das 10-Minuten-Mittel (Abb. 2) und von 39,6 m/s für den 1-Sekunden-Wert verzeichnet. Insbesondere das bisherige 10-Minuten-Mittel wurde also deutlich überschritten. Der Luftdruck erreichte während dieses Sturms Minimalwerte von 979 hPa in 30 m Höhe. Verglichen mit den Messungen an den in der Nordsee errichteten Stationen FINO1 und FINO3 weist CHRISTIAN weniger starke Windgeschwindigkeitssprünge auf. Die maximale Differenz zweier aufeinanderfolgender 10-Minuten-Mittel betrug 5,3 m/s. Das gleiche Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Windrichtung: Hier ist die maximale Differenz zweier aufeinanderfolgender 10-Minuten-Mittel 8°. Der Sturm CHRISTIAN war somit im Bereich der südlichen Ostsee im Hinblick auf auftretenden Belastungen an Windenergieanlagen wesentlich weniger kritisch als auf der Nordsee. Die maximalen Windgeschwindigkeitswerte des Sturmes CHRISTIAN wurden beim Sturm XAVER ebenfalls fast erreicht.

Das maximale 10-Minuten-Mittel betrug bei XAVER 31,9 m/s und der maximale 1-Sekunden-Wert 38,6 m/s. Der minimale Luftdruck in 30 m Höhe war mit 976 hPa sogar etwas niedriger als bei CHRISTIAN. Anders als bei den Stationen FINO1 und FINO3 waren die Änderungen zweier aufeinanderfolgender 10-Minuten-Mittel mit 6,5 m/s bzw. 25° höher als bei CHRISTIAN (Abb. 2). Das Bemerkenswerte an XAVER war dessen zeitliche Ausdehnung. Die Windgeschwindigkeit war an 35 zusammenhängenden Stunden mindestens 20 m/s, die angenommene Abschaltwindgeschwindigkeit von 25 m/s wäre an insgesamt 27 Stunden überschritten worden. Somit wurden in einer knapp über einem Monat andauernden Periode die zwei bisher stärksten Stürme seit Errichtung der Plattform im Jahr 2007 aufgezeichnet. Die meteorologische Messkette hat beide Stürme unbeschadet überstanden.

FINO3

Die auf FINO3 während des Orkans CHRISTIAN gemessenen maximalen Windgeschwindigkeiten in 100 m über dem Meeresspiegel stellen mit Messwerten von über 37 m/s im 10-Minuten-Mittel (Abb. 2) und mit einem 1-Sekunden-Wert von über 45 m/s die höchsten bis dahin erfassten Werte seit Errichtung der Plattform und Beginn der Messung im Herbst 2009 dar. Allerdings wurden diese extrem hohen Windgeschwindigkeiten von über 30 m/s nur innerhalb eines vergleichsweise kurzen Zeitraums von wenigen Stunden überschritten, im Vergleich zum Orkan XAVER. Die höchsten Windgeschwindigkeiten gingen dabei einher mit einem extrem niedrigen Luftdruck von 966 hPa auf 23 m Höhe, was einem Druck auf Meereshöhe von 968 hPa entspricht. Auch ein solch niedriger Luftdruck war bisher auf FINO3 unerreicht. Dem Höhepunkt von CHRISTIAN auf der FINO3-Position ging ein sehr ausgeprägter Windgeschwindigkeitssprung voraus. Die Windgeschwindigkeit erhöhte sich dabei in 30 m Höhe im 10-Minuten-Mittel von 20 m/s auf über 32 m/s innerhalb von lediglich einem 10-Minuten-Intervall. Dies stellt generell eine selten beobachtete und enorme Windzunahme dar.

Während der Orkan CHRISTIAN als relativ kurzer wenn auch heftiger Sturm auftrat, wirkte sich der Orkan XAVER auf der

measurement locations the upper limit in turbulence category A was exceeded two to four times (see Tab. 2, Fig. 4).

For example at 100 m height, which is a typical hub height of offshore wind turbines, at FINO3 the wind speed increased from 23 m/s to 37 m/s within 10 minutes (Fig. 2) which equals to 14 m/s per 10 minutes. Such a sudden increase of wind speed could lead to serious loads on rotor, drive train or wind turbine structure of a nearby wind turbine (e.g. at wind farm DanTysk which is under construction and in short distance to FINO3) if it was not operating in save mode yet after a shut down due to storm. The change of wind direction of ca. 70° from 220° to 290° observed at the same time could also pose a tremendous challenge to the yaw drive in the nacelle of a wind turbine.

This shows the necessity for ongoing discussion of standards due to current research results.

Acknowledgement

This article was produced within the research project "FINO-Wind" which is supported by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety and Projektträger Jülich. The objective of the research project is the development of standardizations for the analysis of the meteorological measurements at FINO1, 2 and 3. This is to ensure on the one hand a better comparability of the data of the three platforms as well as a consistent archiving in the BSH FINO database. On the other hand the results of the wind speed measurements shall be compared with regard to the wind climates in the North and Baltic Sea. If applicable, suggestions for the adjustment of the technical measurement system and the data analysis shall be developed.

For more information see www.dwd.de/fino-wind.

Position FINO3 insgesamt weniger sprunghaft aus, d.h. mit wesentlich weniger abrupten Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsänderungen. XAVER wies allerdings eine wesentlich längere Wirkdauer auf, mit Windgeschwindigkeiten von deutlich über 30 m/s (im 10-Minuten-Mittel auf 100 m Höhe), die über Zeiträume von mehreren Stunden anhielten. Der Wert von 25 m/s wurde sogar während einer Dauer von mehr als 24 Stunden überschritten (Abb. 2). Dies, zusammen mit der vorherrschenden nordwestlichen Windrichtung, hat zu den z.T. sehr schweren Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste geführt. Die maximal erreichten Windgeschwindigkeiten während dieses Orkans lagen auf der Position FINO3 nur unwesentlich unter denen von CHRISTIAN. Laut Aussage des Betreibers hat FINO3 beide Stürme ohne nennenswerte Schäden überstanden.

Wasserstand und Seegang

An den Nordseeplattformen FINO1 und FINO3 hat der Orkan CHRISTIAN im Vergleich mit normalen Tiden für einen ca. 0,5 m - 1 m höheren Wasserstand gesorgt (Abb. 3). Die Dauer des Orkans betrug aber nur einen kompletten Tidenzyklus, so dass die nächsten Gezeiten wieder reguläre Wasserstände zeigten. In der Ostsee (FINO2) führte der starke Wind aus westlichen Richtungen zu einem kurzzeitigen Niedrigwasser.

An der FINO1 erreichte der Seegang am 28. Oktober 2013 kurz nach 12 UTC Werte von knapp über 6 m signifikanter Wellenhöhe (H_s) und über 10 m maximaler Wellenhöhe (H_{Max}). An der FINO3 traten die höchsten Wellen etwas später, gegen 13:50 UTC auf. Hier erreichte H_s 5,3 m und H_{Max} knapp 8 m. An der Plattform FINO2 wurden um 17:30 UTC für die Ostsee hohe Werte von 4,1 m H_s und 6,3 m H_{Max} gemessen. Der Orkan CHRISTIAN bildete, trotz der extrem hohen Windgeschwindigkeiten, aus ozeanographischer Sicht kein Extremereignis.

Die an der Nordsee gemessenen Wasserstands- und Seegangsdaten, die der Orkan XAVER mit sich brachte, zeigen ein anderes Bild. Der Zeitraum, über dem der Sturm in der Deutschen Bucht tobte, war mit zweieinhalb Tagen deutlich länger. Der Wasserstand erhöhte sich über mehrere Tiden, da das Wasser bei Ebbphasen nur noch geringfügig nach Westen abfließen konnte. An den Stationen FINO1 und FINO3 war der Wasserstand bei Ebbe in der Nacht vom 5. auf den 6. Dezember deutlich höher als normalerweise die Hochwasser. An der Nordseeküste liefen extreme Sturmfluten auf. Auch der Seegang baute sich über mehrere Tage auf und erreichte gemessene Werte von knapp 10 m H_s und 16 m H_{Max} an der FINO1. An der FINO3 wurden Wellenhöhen von 9,1 m H_s und 13,5 m H_{Max} gemessen.

Auswirkungen auf Windenergieanlagen

Für den Betrieb von Windenergieanlagen offshore sind Kenntnisse über die Belastungen wie z.B. durch Turbulenz, die auf die Anlagen wirken, unerlässlich. Als Richtlinie für die Belastungen auf die die Anlagen ausgelegt sind, wird die IEC 61400-1 [IEC61400-1] verwendet. Im Folgenden wird dargestellt, ob und wie oft die Turbulenzintensitäten bei den hier betrachteten Stürmen CHRISTIAN und XAVER die Grenzen der Turbulenzklassen in der IEC-Norm überschritten.

Literatur

- [IEC61400-1] IEC 61400-1 International Standard Wind turbines – Part 1: Design requirements.
- [DWD 2013a] Deutscher Wetterdienst: Orkantief CHRISTIAN am 28. Oktober 2013, www.dwd.de, Stand: 13.11.2013.
- [DWD 2013b] Deutscher Wetterdienst: Orkantief XAVER über Nordeuropa vom 5. bis 7. Dezember 2013, www.dwd.de, Stand: 30.12.2013.
- [DWD Wetterlexikon] www.dwd.de, Stand: 20.01.2014.

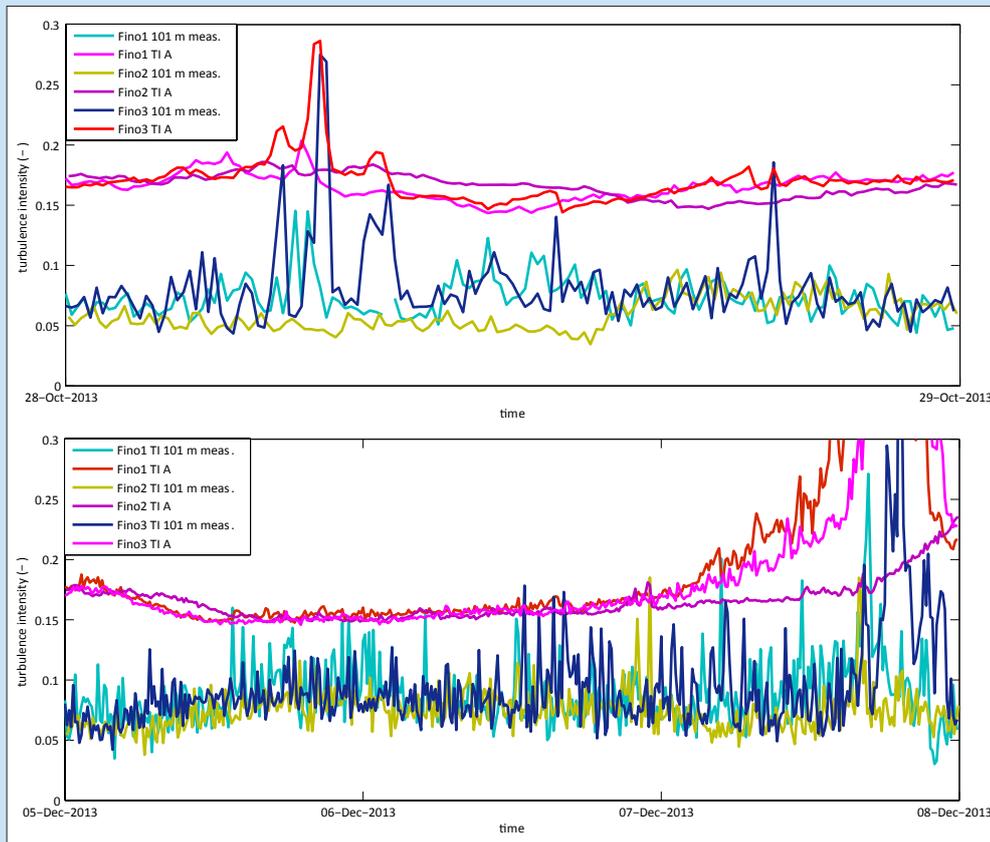


Fig. 4: Time series of the measured turbulence intensity and the upper limits of turbulence intensity in the turbulence categories A, B and C of the IEC 61400-1 for FINO3 during storm CHRISTIAN, and for all 3 masts during storm XAVER.

Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der gemessenen Turbulenzintensität in Relation zu den Obergrenzen der Turbulenzintensität in den Turbulenzkategorien A, B, C der IEC 61400-1 für FINO3 während des Sturms CHRISTIAN und für alle drei FINO-Masten während XAVER.

Die Turbulenzintensität der gemessenen Windgeschwindigkeit wird aus den 10-Minuten-Mitteln der Windgeschwindigkeit und der dazugehörigen Standardabweichung ermittelt. Die gemessene Windgeschwindigkeit wird ebenfalls dazu genutzt, um die Standardabweichung der Turbulenz mit dem normalen Turbulenzmodell zu berechnen, unter Berücksichtigung der Parameter für die Referenzerturbulenzintensität der Turbulenzkategorien A, B und C, wobei Kategorie A der höchsten Turbulenz entspricht. Unter Verwendung der gemessenen Windgeschwindigkeit kann so die Obergrenze der Turbulenzintensität der jeweiligen Windkraftanlagenklasse und Turbulenzkategorie errechnet werden.

Im Verlauf des Sturms CHRISTIAN wurde der Grenzwert für die Turbulenzintensität in der Turbulenzkategorie A nur am Standort FINO3 und dort insgesamt zweimal überschritten. Im Vergleich hierzu wurde während des Orkans XAVER an allen Standorten der Grenzwert für die Turbulenzintensität in der Turbulenzkategorie A zwei bzw. vier Mal überschritten. (Tab. 2, Abb. 4).

Auf der Plattform FINO3 gab es beispielsweise in 100 m Höhe – also in typischen Nabenhöhen für Offshore-Windenergieanlagen (WEA) – eine Windzunahme von 23 m/s auf 37 m/s innerhalb von 10 Minuten (siehe Abb. 2), also einen Sprung um etwa 14 m/s in 10 Minuten. Ein solch schlagartiger Anstieg der Windgeschwindigkeit könnte für eine WEA in der Nähe (wie z. B. von dem in Bau befindlichen DanTysk-Windpark in kurzer Entfernung zu FINO3), die sich möglicherweise noch nicht im sicheren Betriebsmodus nach einer Sturmabschaltung befindet, zu erheblichen Las-

ten auf Rotor, Triebstrang oder Anlagenstruktur führen. Die beobachtete zeitgleiche Änderung in der Windrichtung um ca. 70 ° von 220 ° auf 290 ° dürfte ebenfalls eine enorme Herausforderung an die Richtungsnachführung einer WEA, d.h. auf den sogenannten YAW-Antrieb der Gondel, darstellen.

Dies zeigt die Notwendigkeit für eine fortlaufende Diskussion von Normen anhand von aktuellen Forschungsergebnissen.

Danksagung

Dieser Artikel ist im Rahmen des Forschungsprojektes „FINO-Wind“ entstanden, welches durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und den Projektträger Jülich gefördert wird. Ziel des Forschungsprojektes ist die Erarbeitung von Standardisierungen in den Auswertungen der meteorologischen Messungen an FINO1, 2 und 3. Dadurch soll zum einen eine bessere Vergleichbarkeit der Daten der drei Plattformen gewährleistet und eine konsistente Ablage der Messergebnisse in der FINO-Datenbank des BSH ermöglicht werden. Zum anderen sollen die Ergebnisse der Windgeschwindigkeitsmessungen in Hinblick auf die Windklimata der Nord- und Ostsee verglichen werden. Hieraus sollen gegebenenfalls auch Vorschläge zur Anpassung des messtechnischen Aufbaus und für Auswertemethoden abgeleitet werden.

Weitere Informationen dazu sind unter www.dwd.de/fino-wind zu finden.