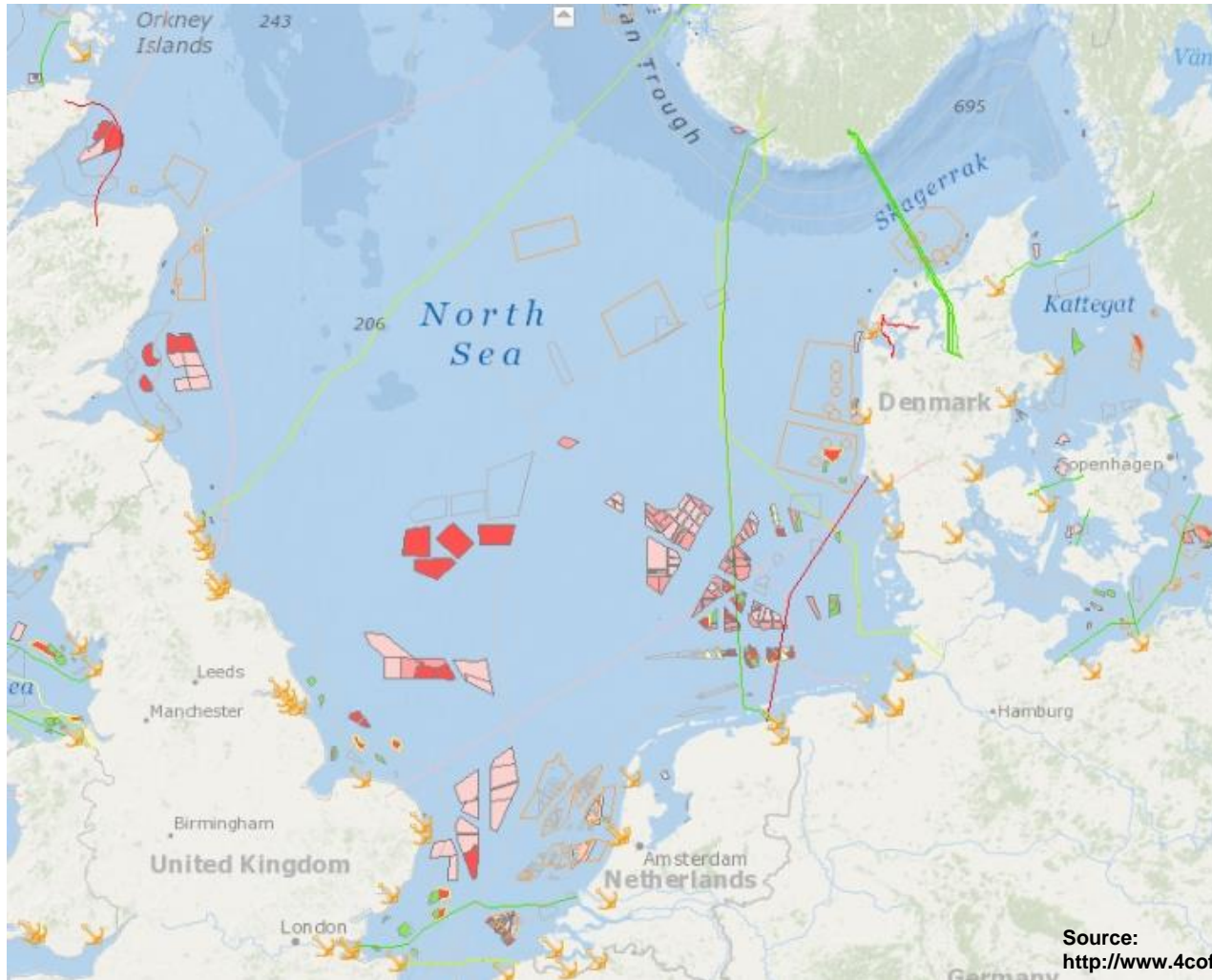


# Untersuchungen zu dem Fernfeld von Nachläufen der großen Offshore-Windparks in der Nordsee

Stefan Emeis  
stefan.emeis@kit.edu

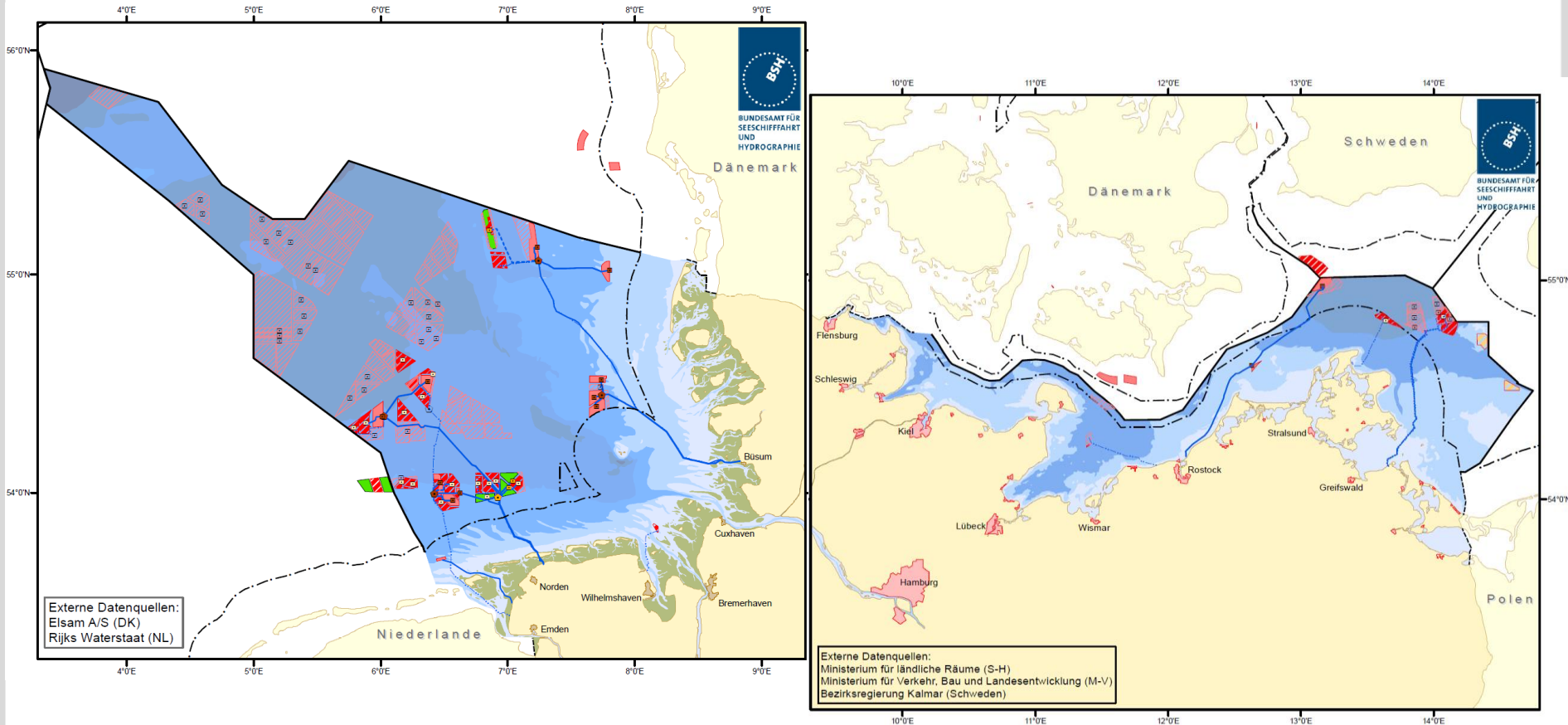
INSTITUTE OF METEOROLOGY AND CLIMATE RESEARCH, Atmospheric Environmental Research

## Errichtete und geplante Windparks in der Nordsee



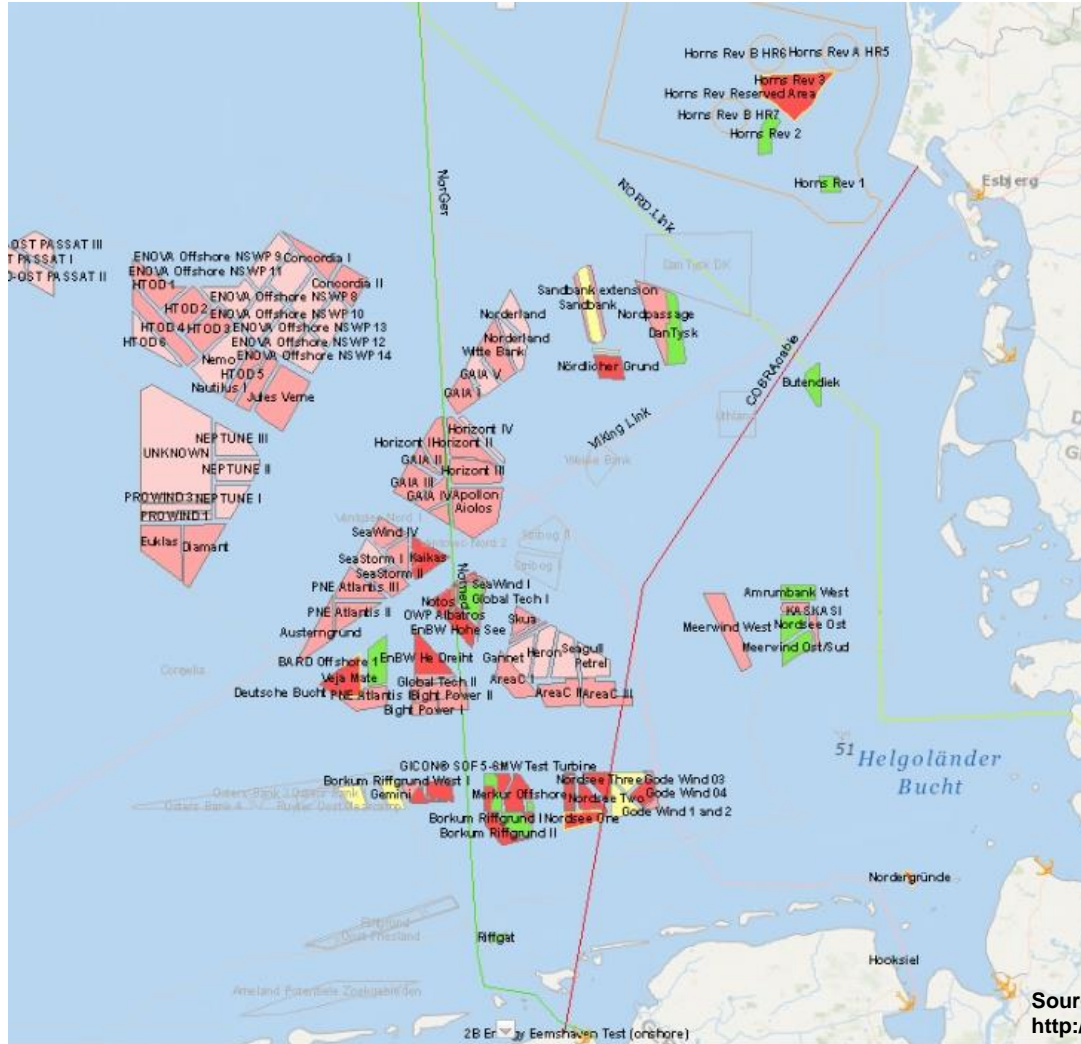
Source:  
<http://www.4coffshore.com/offshorewind/>

# Errichtete und geplante Windparks in deutschen Gewässern



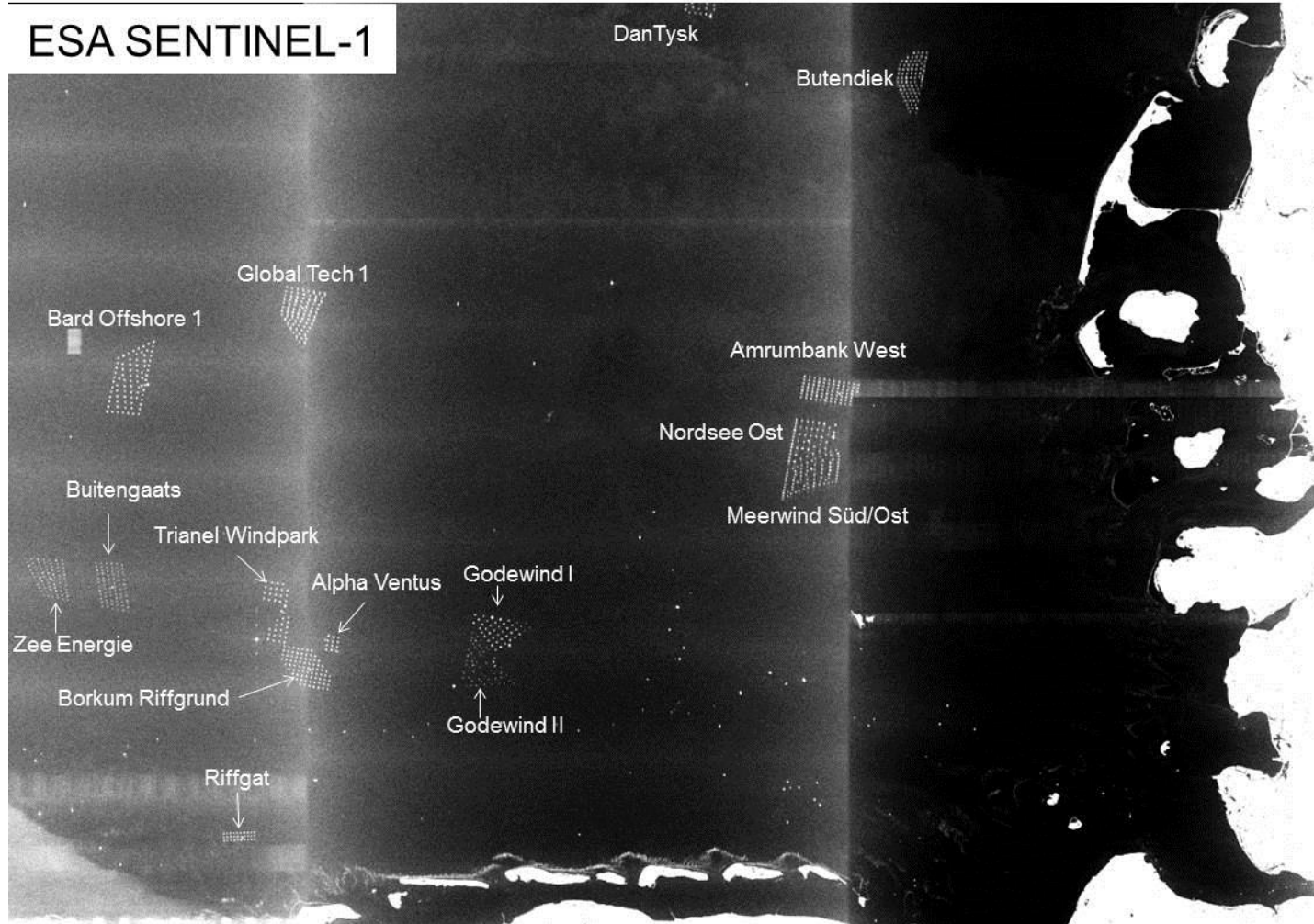
Source: <http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/CONTIS-Informationssystem/index.jsp>

# Errichtete und geplante Windparks in der Nordsee



Source:  
<http://www.4coffshore.com/offshorewind/>

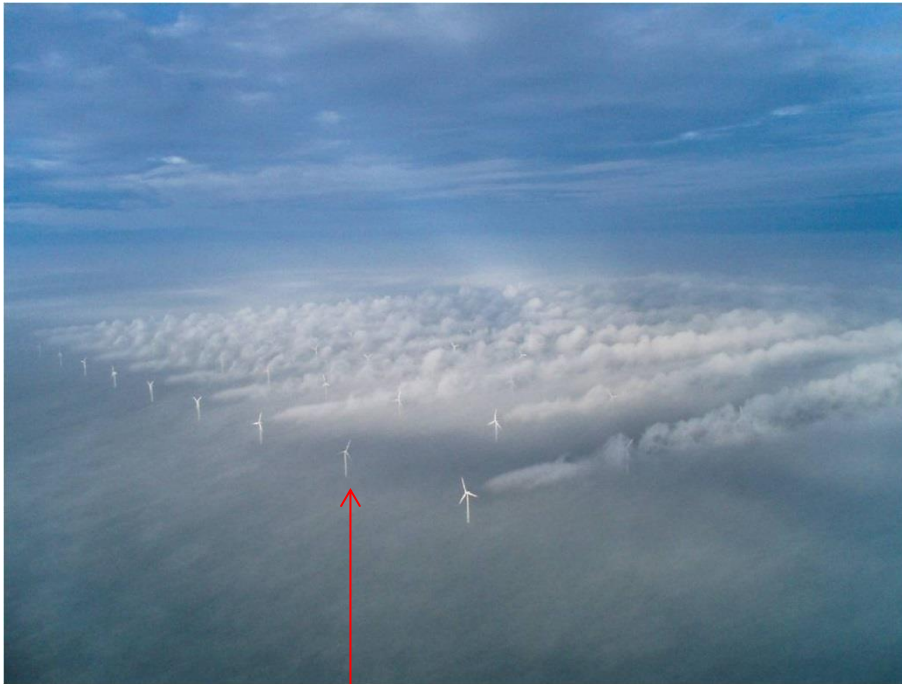
# Gegenwärtiger Ausbauzustand in der Nordsee (SAR-Satellitenbild)



Dez. 2015 ,  
 produced from  
 ESA remote  
 sensing data

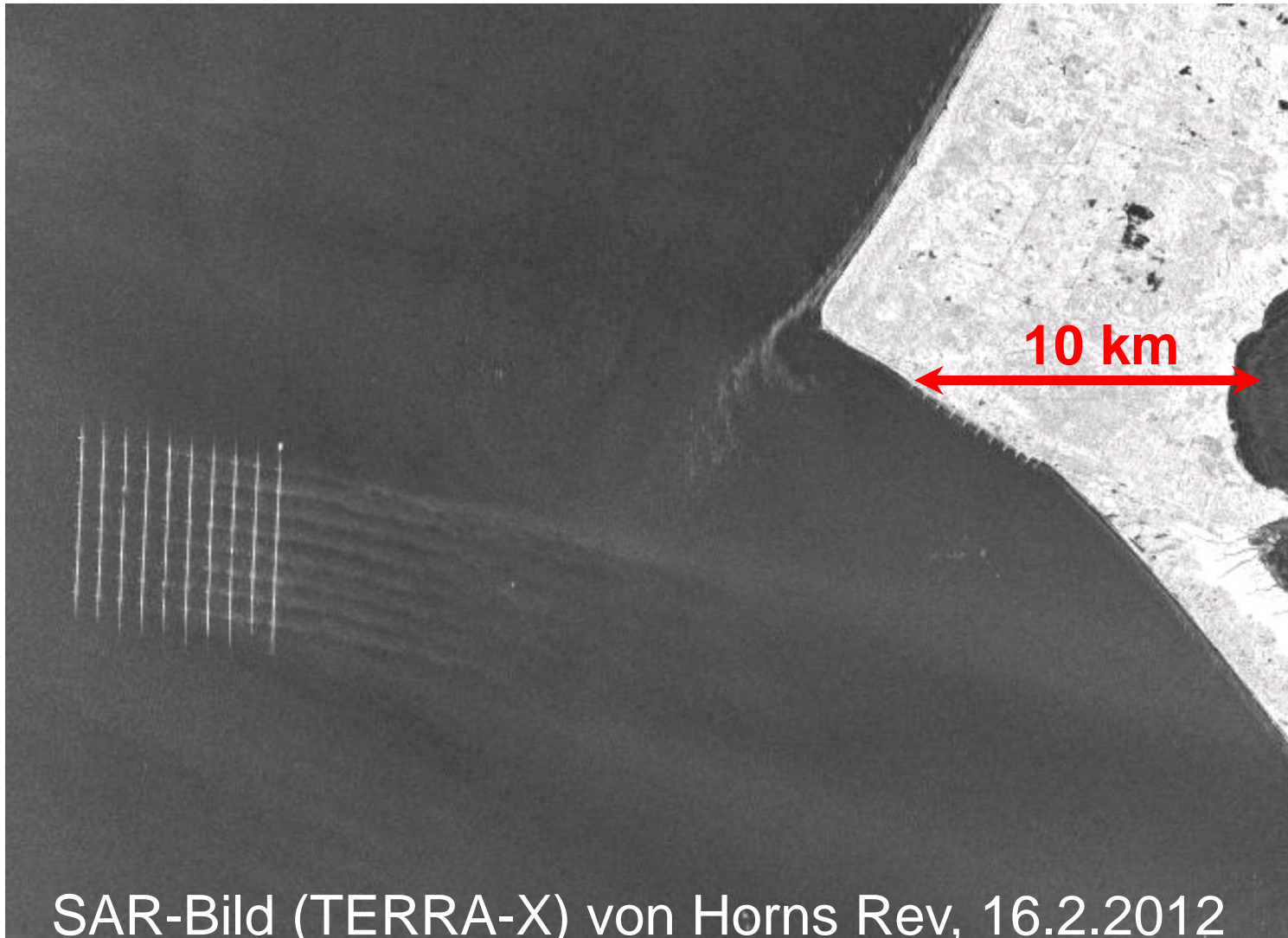
(@) European  
 Space Agency –  
 ESA

## Nachläufe: von Turbinen und ganzen Parks

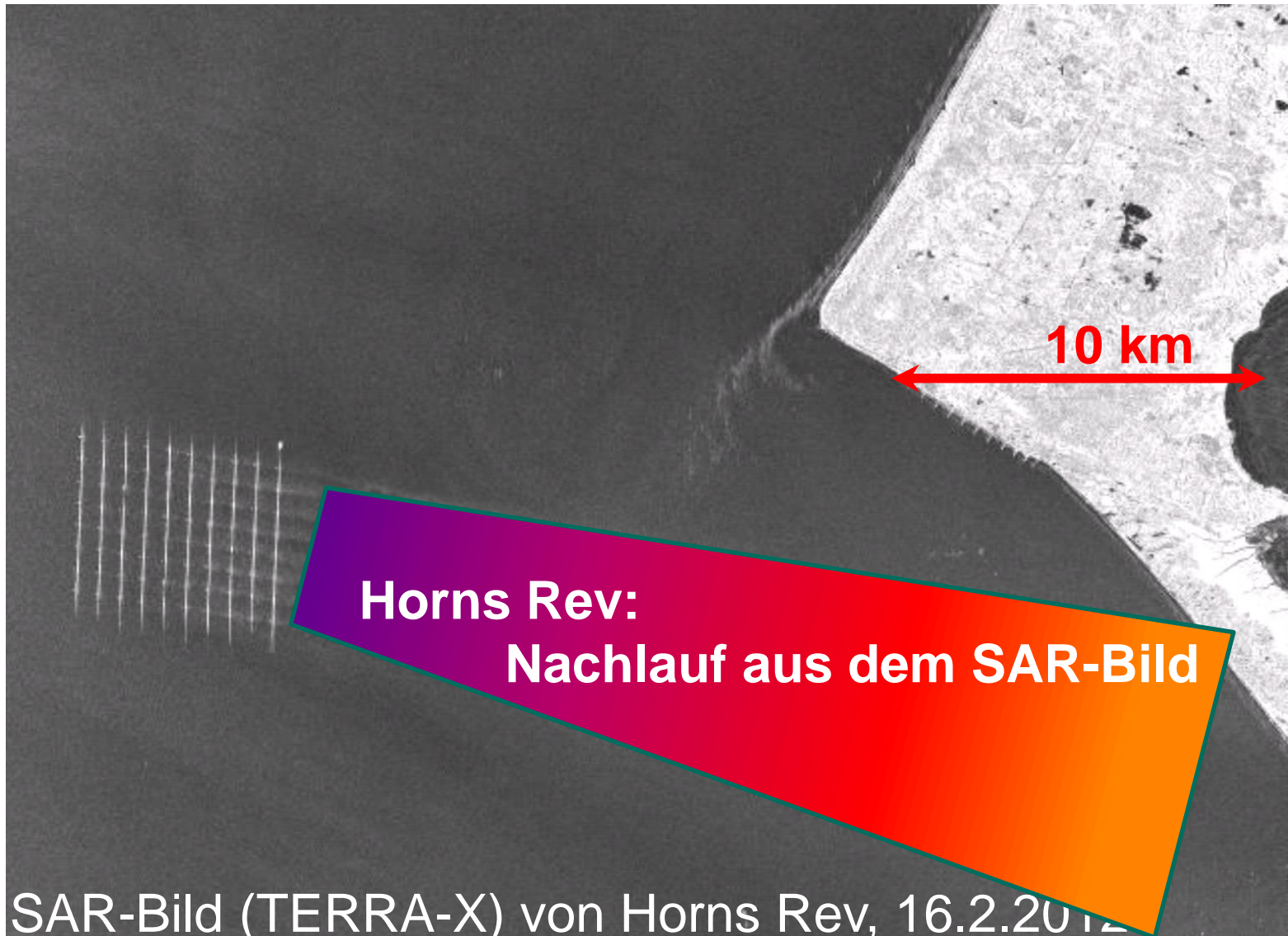


Horns Rev, 12. Februar 2008, Fotograf: Christian Steiness, Vattenfall

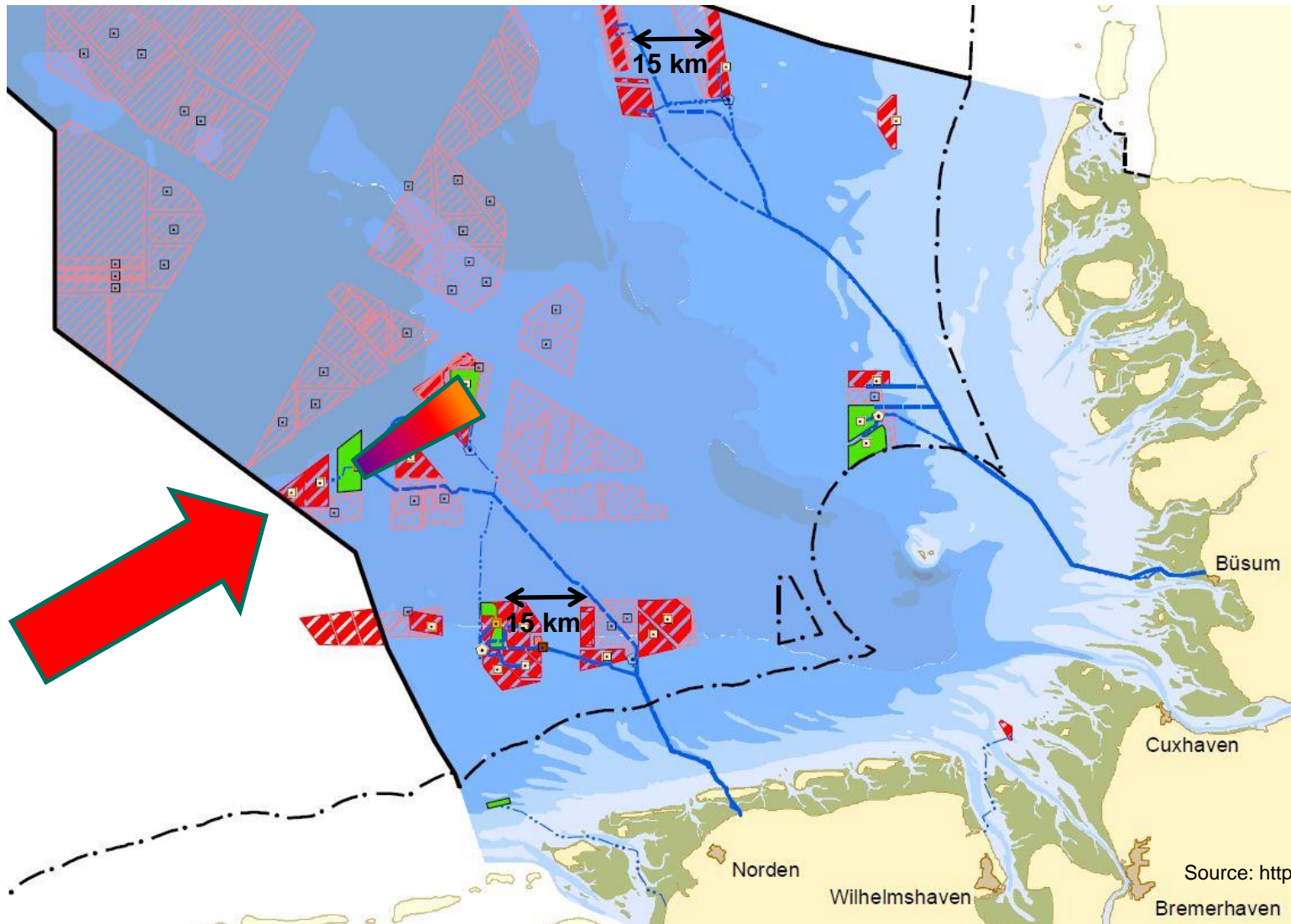
diese Turbine war nicht in Betrieb!



(c) DLR 2012  
TerraSar-X





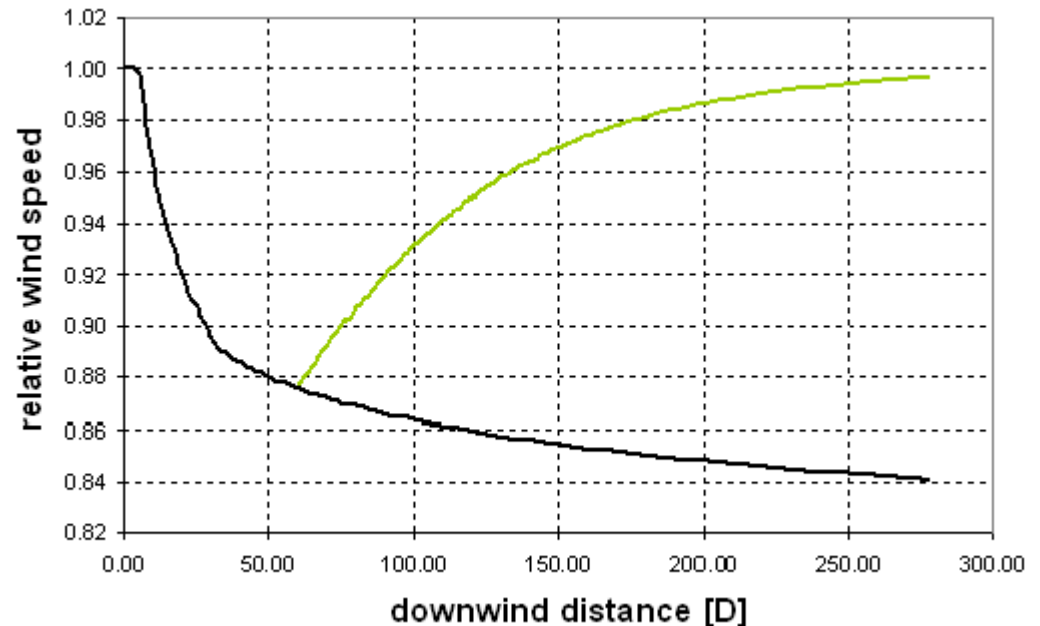


**Wie kann die wahre Länge von Windpark-Nachläufen ermittelt werden?**

**Und wovon hängt sie ab?**

## 1 Eine Möglichkeit: analytische Modelle ohne thermische Schichtung Modelliert als exponentielle Funktion

$$u_r = u_1 \left( 1 - \left( 1 - \frac{u}{u_1} \right) * 0.5^{\frac{x - x_{start}}{x_{50\%}}} \right)$$



[Quelle: Garrad Hassan, Windfarmer Theory Manual, Jan.2011]

### Nachteile:

- Ad-hoc-Ansatz basierend auf zwei Punktmessungen (Masten) im Lee von 'Horns Rev'
- Keine Modellierung der Erholung quer zur Windrichtung
- Keine Aussagen zum Verhalten bei unterschiedlichen meteorologischen Verhältnissen (Stabilität etc.)

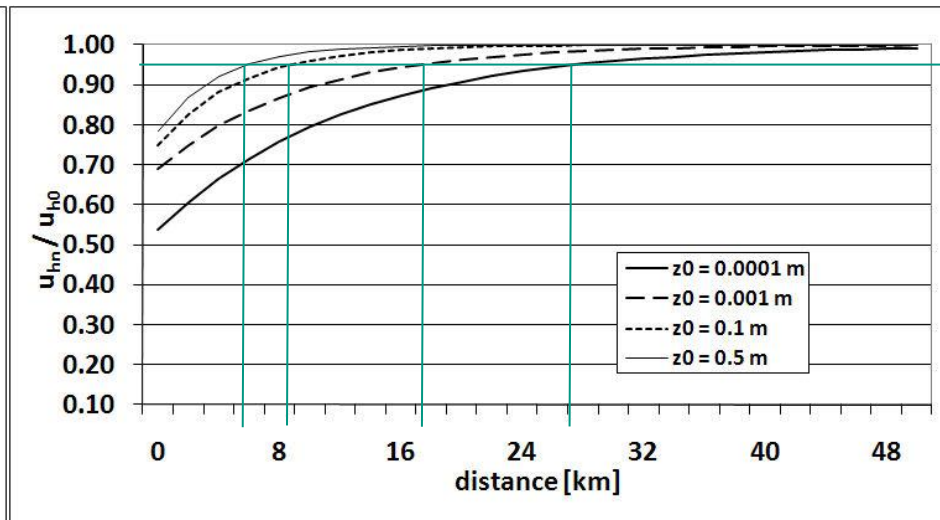
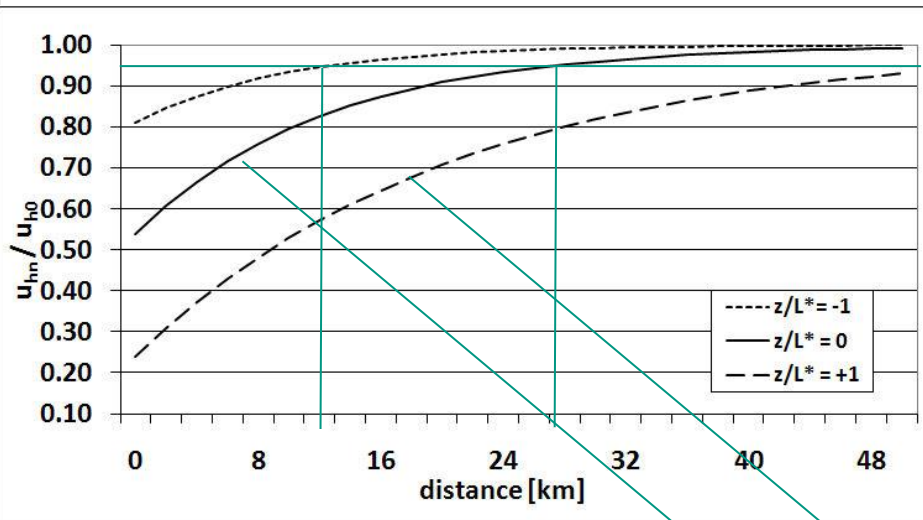
## 2 Analytisches Modell mit Berücksichtigung der atmosphärischen Schichtung

**sehr lange Windpark-Nachlaufängen**  
 (Erholung auf 95 % des ungestörten Werts)

starke Abhängigkeit von der thermischen Schichtung der Grenzschicht

$z_0 = 0.0001 \text{ m}$   
 (offshore)  
 verschiedene Stabilitäten

neutrale  
 Schichtung  
 verschiedene Rauiglängen



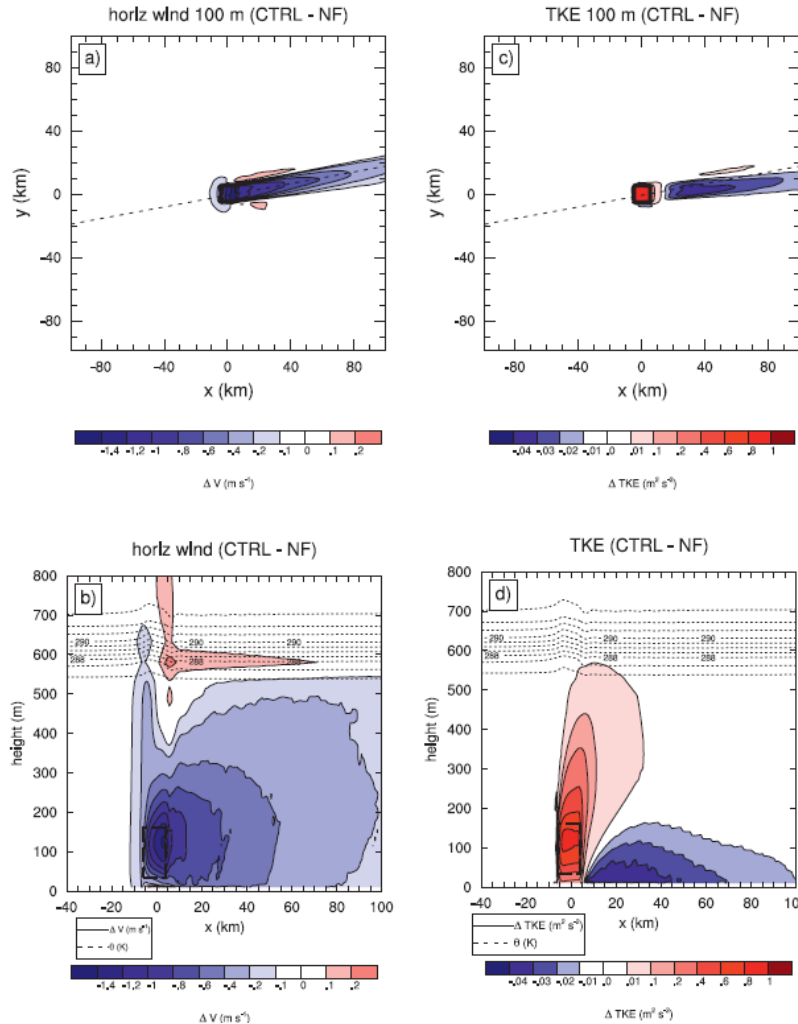
neutral stabil

[Quelle: Emeis 2012: Wind Energy Meteorology. Springer]

SEPTEMBER 2012

FITCH ET AL.

31



### 3 numerische Simulation des Nachlaufs mit WRF

bis zu 100 km lange Nachläufe

neutrale Schichtung mit Inversion in ca. 600 m Höhe

[Quelle: Fitch et al. 2012, MWR 140, 3017-3038]

## Was wir bisher über Windpark-Nachläufe wissen:

Reduktion der Windgeschwindigkeit: offshore stärker als onshore

- (teilweise) Kompensation der höheren Windgeschwindigkeiten
- offshore erfordert größere Abstände zwischen den Turbinen

Länge der offshore-Nachläufe ist einige Mal länger als onshore

- offshore erfordert größere Abstände zwischen den Windparks

analytische Modelle sind stark vereinfachend

- nur für erste Abschätzungen geeignet, exakte Simulationen mit numerischen Modellen sind notwendig (e.g., WRF). Diese müssen mit Daten validiert werden!

- daher WIPAFF



## **Kürzlich gestartet: WIPAFF (Wind Park Far Fields)**

**11.2015 – 02.2019**

**5 Partner:**            **KIT, Institut für Meteorologie und Klimaforschung**  
**Technische Universität Braunschweig (Astrid Lampert)**  
**Helmholtz-Zentrum Geesthacht (Johannes Schultz-Stellenfleth)**  
**UL International GmbH (ex: DEWI) (Thomas Neumann)**  
**Universität Tübingen (Jens Bange)**

- Flugzeugbeobachtungen (Do 128) der Nachläufe**
- Analyse von SAR-Satellitenbildern der Nachläufe**
- Windfeldmodellierung mit WRF (Wellenmodell, Park-Parametrisierung)**
- Anpassung analytischer und industrieller Windpark-Modelle**
- Untersuchung der Auswirkung auf das lokale Klima**

# WIPAFF-Arbeitspaketplanung

A Modellierung	B Satelliten- beobachtungen	C Messungen in der marinen Grenzschicht	D Windpark- Fernfeld	E Endprodukt Verwertung
A1 Integration eines Seegangmodells und Windparkparametrisierung in WRF	B1 Anpassung und Optimierung der SAR-Windfeldanalyse	C1 Plattform- und Bojenmessungen	D1 Auswertung von Turbulenz und turb. Flüssen hinter Windparks	E1 Bereitstellung eines Modellsystems zur Begleitung des Off-shore Windpark-Ausbaus
A2 WRF-Simulationen des Windfeldes und Überprüfung der Parametrisierungen	B2 Beschaffung SAR-Daten und Auswertung	C2 Ausarbeitung Flugmesskampagnen, Installation Laser-Altimeter	D2 Analyse von Windparknachläufen aus SAR-Daten	E2 Bereitstellung eines SAR-basierten Systems zur Erfassung von Windparknachläufen
A3 Validierung und Verbesserung von Industriemodellen wie Windfarmer etc.	B3 Zusammenhang atm. Stabilität und SAR-Winden	C3 Flugmesskampagnen im Nachlauf von existierenden Windparks	D3 Um- und Überströmungseffekte bei großen Windparks	E3 Bereitstellung von Ergebnissen zu Wind und Turbulenz im Fernfeld von Windparks
A4 Validierung und Verbesserung eines analytischen Windparkmodells	B4 Einfluss des Seegangs, Integration von Altimeter-Daten	C4 Auswertung der Altimeter-Daten	D4 Analyse der Auswirkungen von Windparks auf das regionale (Wind-)Klima	E4 Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit
D5 Szenarienrechnungen auf der Basis des geplanten Ausbaus der Windparks in der Deutschen Bucht				



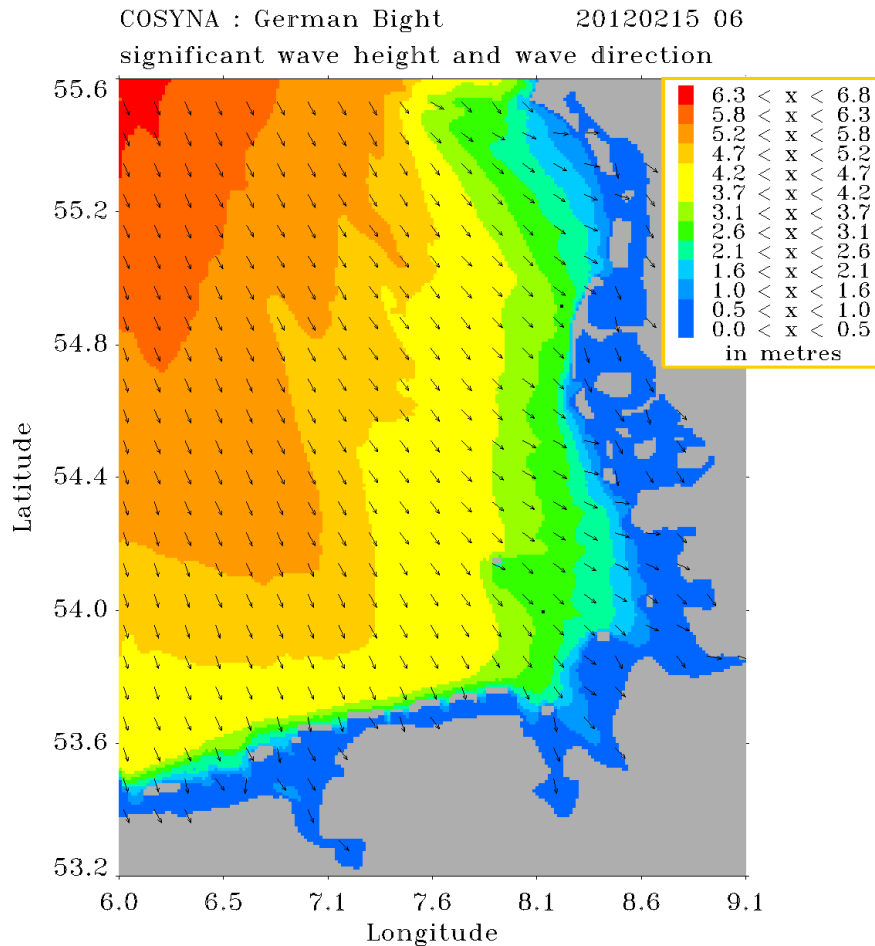
## Arbeitspakete A

**KIT/HZG:**

**Modellerweiterung WRF um Seegangmodell, um realistische Rauigkeiten zu simulieren**

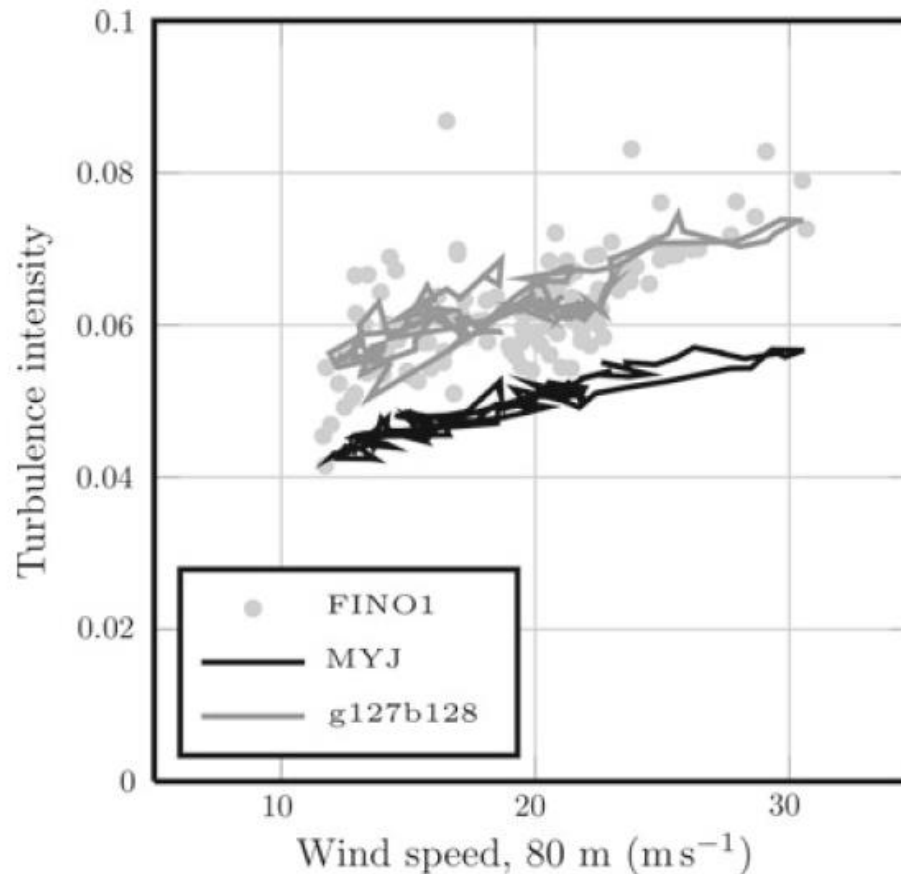
**Signifikante Wellenhöhe und Wellenrichtung für den 15.02.2012 6:00 UTC berechnet aus dem Seegangmodell WAM, das als Teil des COSYNA Systems am HZG prä-operationell betrieben wird (räumliche Auflösung 1 km).**

The data were provided by the COSYNA system operated by Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH



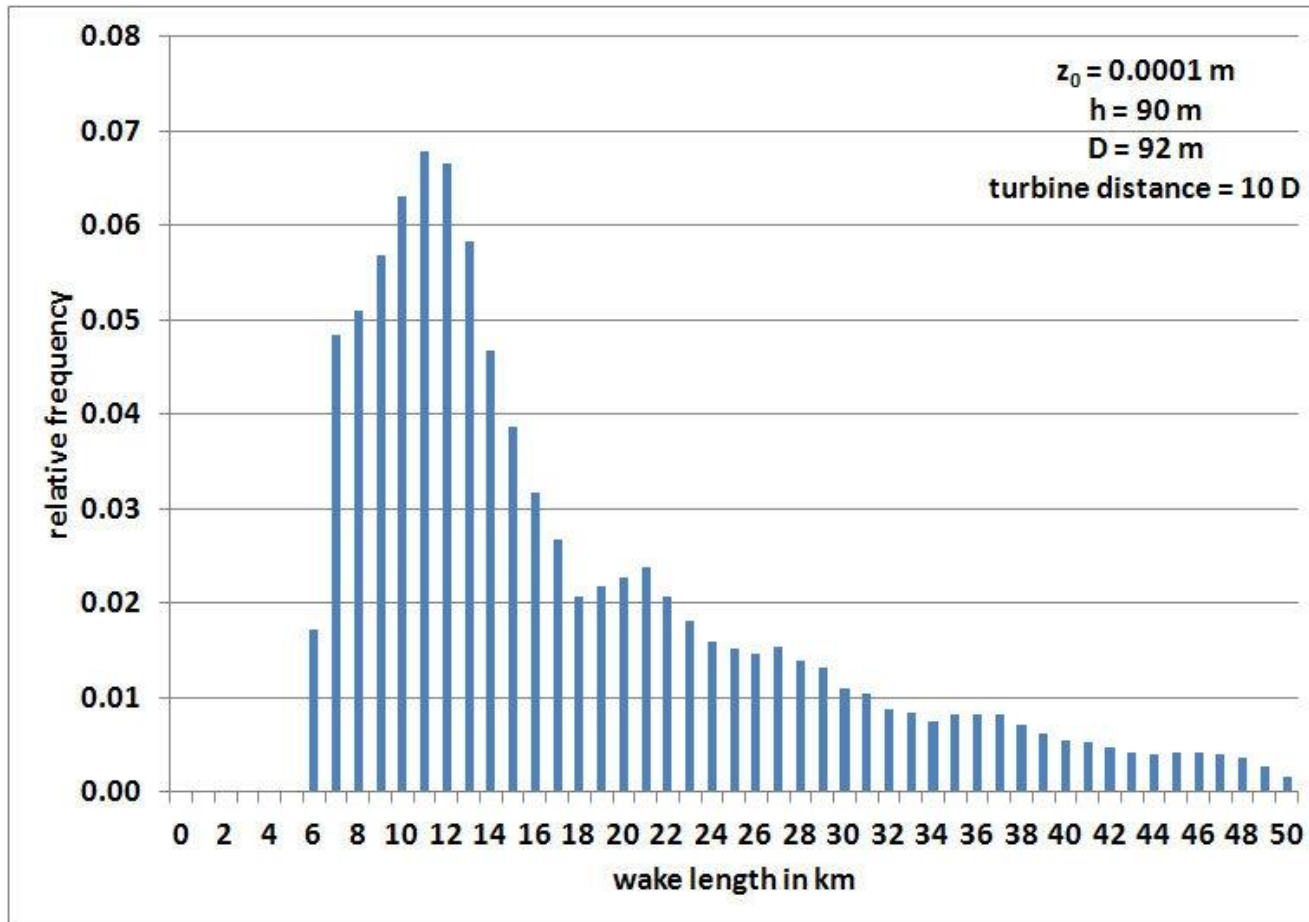
## KIT/DEWI: vorhandene Modellverbesserungen aus vorangegangenen Vorhaben nutzen

### WRF: Wind- und Turbulenzmodellierung (Ergebnis aus VERITAS (=OWEA AP5))

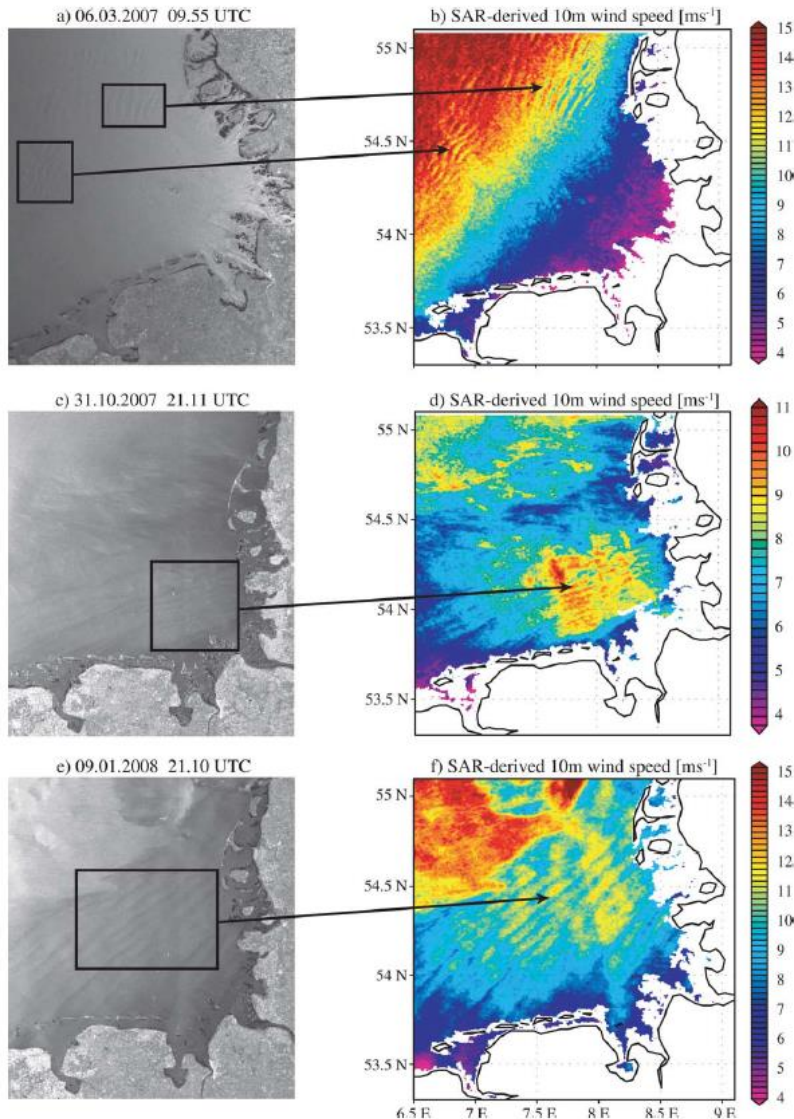


(Quelle: Foreman und Emeis 2012:  
 Boundary-Layer Meteorol, 145, 329–349.)

## KIT/DEWI: analytisches Modell: Häufigkeitsstatistik für die Länge des Nachlaufs großer Windparks und Industriemodelle wie Windfarmer



## Arbeitspakete B



## HZG:

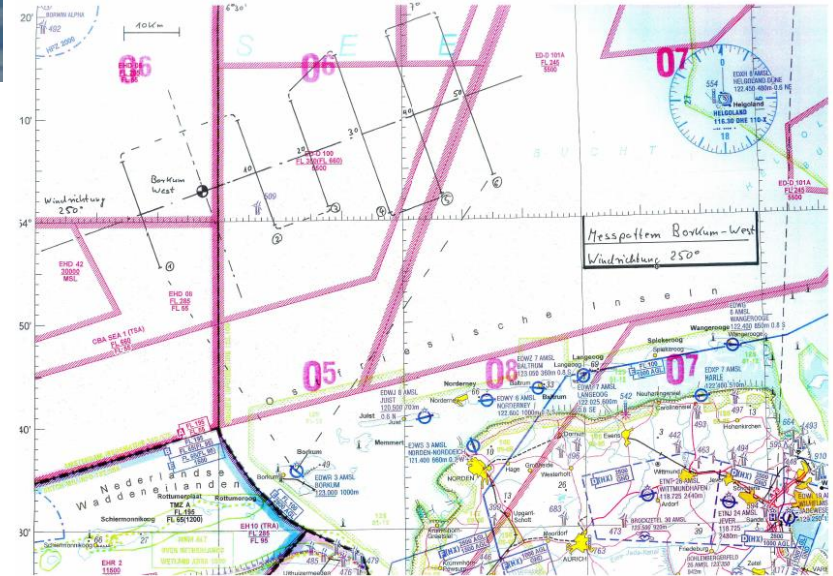
aus SAR-Daten abgeleitete  
 Windverteilung in 10 m Höhe in der  
 Deutschen Bucht bei drei verschiedenen  
 Wetterlagen

aus: Müller, S. E.V. Stanev, J. Schulz-  
 Stellenfleth, J. Staneva, W. Koch, 2013:  
 Atmospheric boundary layer rolls:  
 Quantification of their effect on  
 the hydrodynamics in the German Bight.  
 JGR 118, 5036–5053.

## Arbeitspakete C

# Do 128 der TU Braunschweig

(Quelle für die Bilder: IFF, TU Braunschweig)



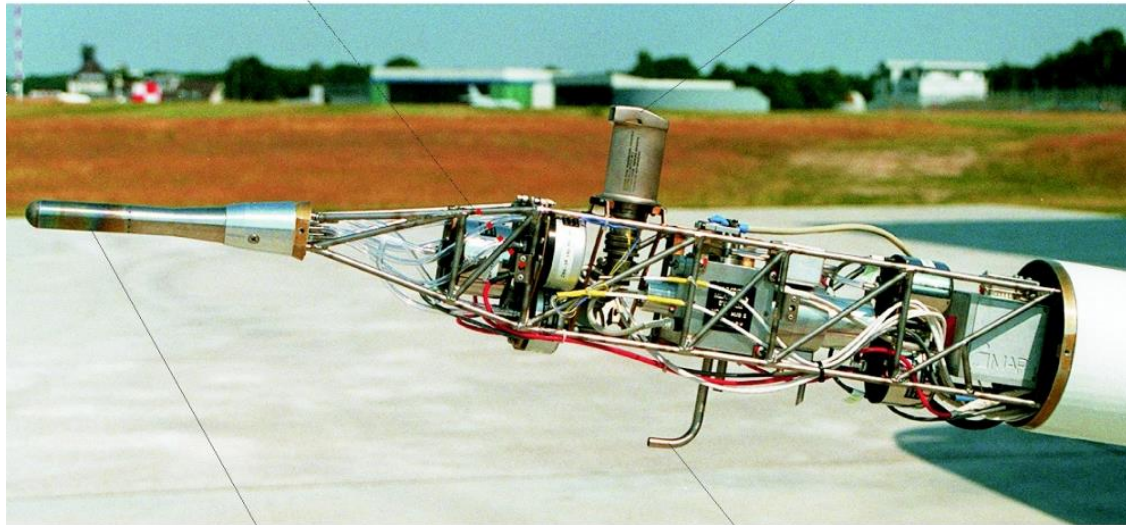


## Nasenmast der Do 128 der TU Braunschweig

(Quelle für das Bild: IFF, TU Braunschweig)

Schneller Rosemount-Temperatursensor  
(durch Druckwandler verdeckt)

Langsamer Rosemount-  
Temperatursensor

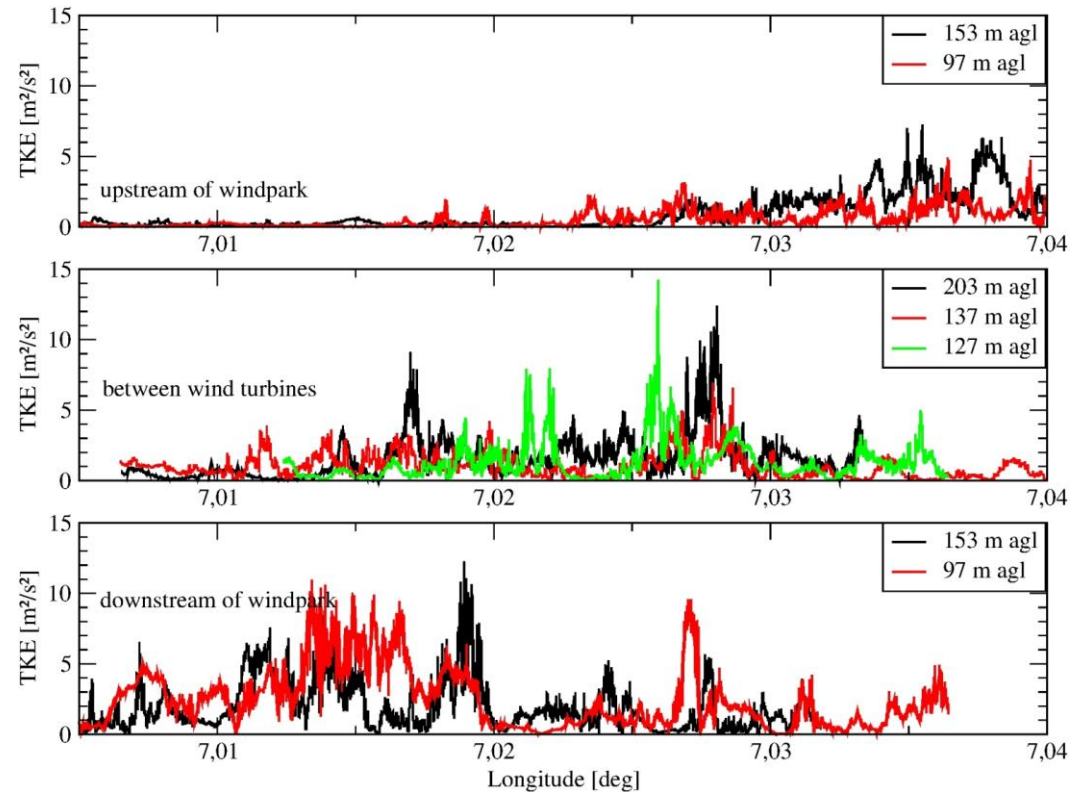
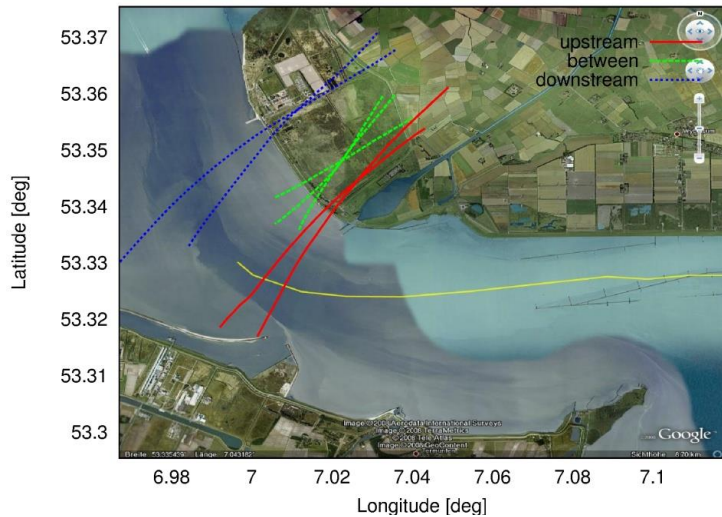


Fünf-Loch-Sonde

Einlass Feuchtemessungen

# Helipodmessungen der TU Braunschweig/ Datenauswertung Universität Tübingen

(Quelle für die Bilder: Jens Bange, Universität Tübingen)



## Aussagen am Ende des Projekts

**Auswertungen und Analysen zum Nachlauf-Fernfeld (Arbeitspakete D)**

**Endprodukte (Arbeitspakete E)**

## Arbeitspakete D

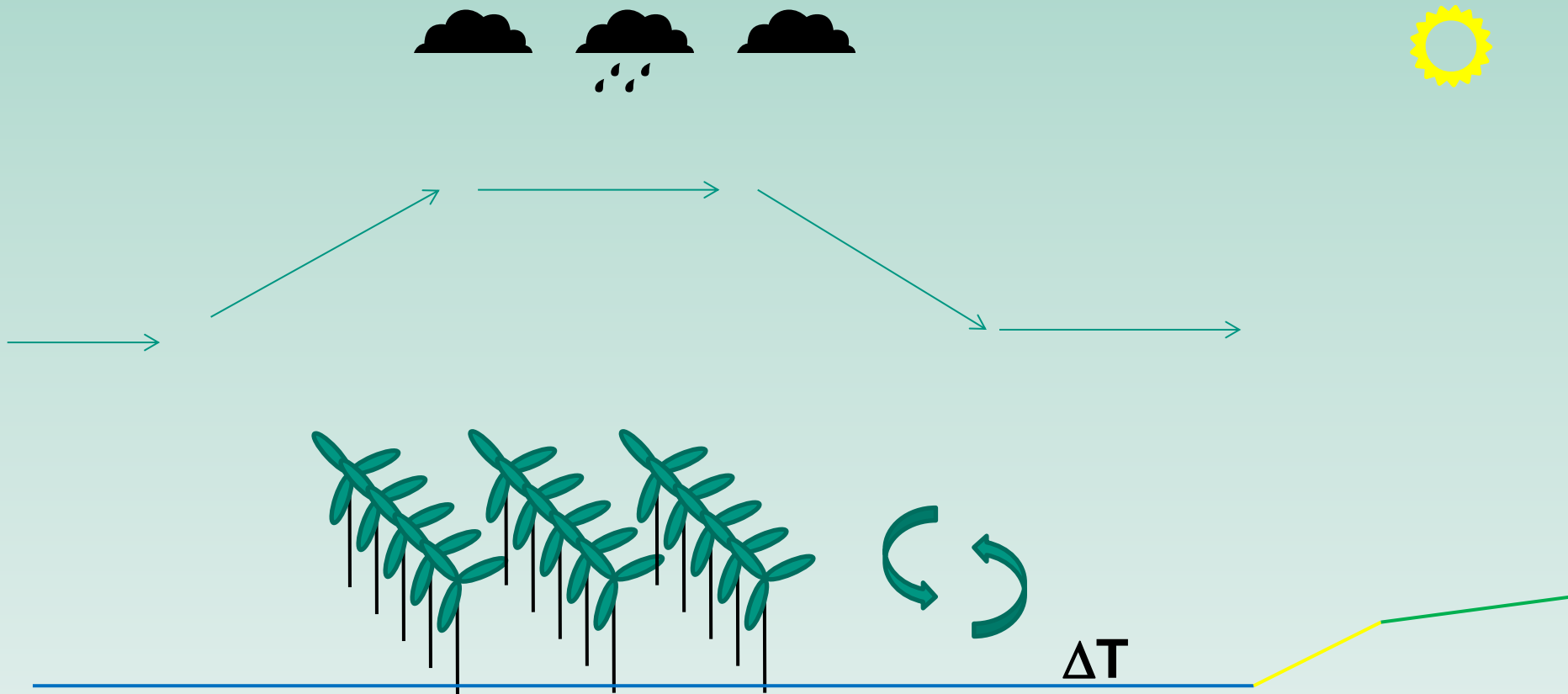
## Übersicht Arbeitspakete D

- **Auswertung von Turbulenz und turbulenten Flüssen hinter Windparks**
- **Analyse der Nachläufe aus den Flugzeug- und Satellitenmessungen**
- **Um – und Überströmungsanalysen von ganzen Windparks**
- **Abschätzung der klimatischen Auswirkungen**
- **Szenarienrechnungen für die geplanten Windparkkonfigurationen**

## Auswirkung auf das regionale Klima

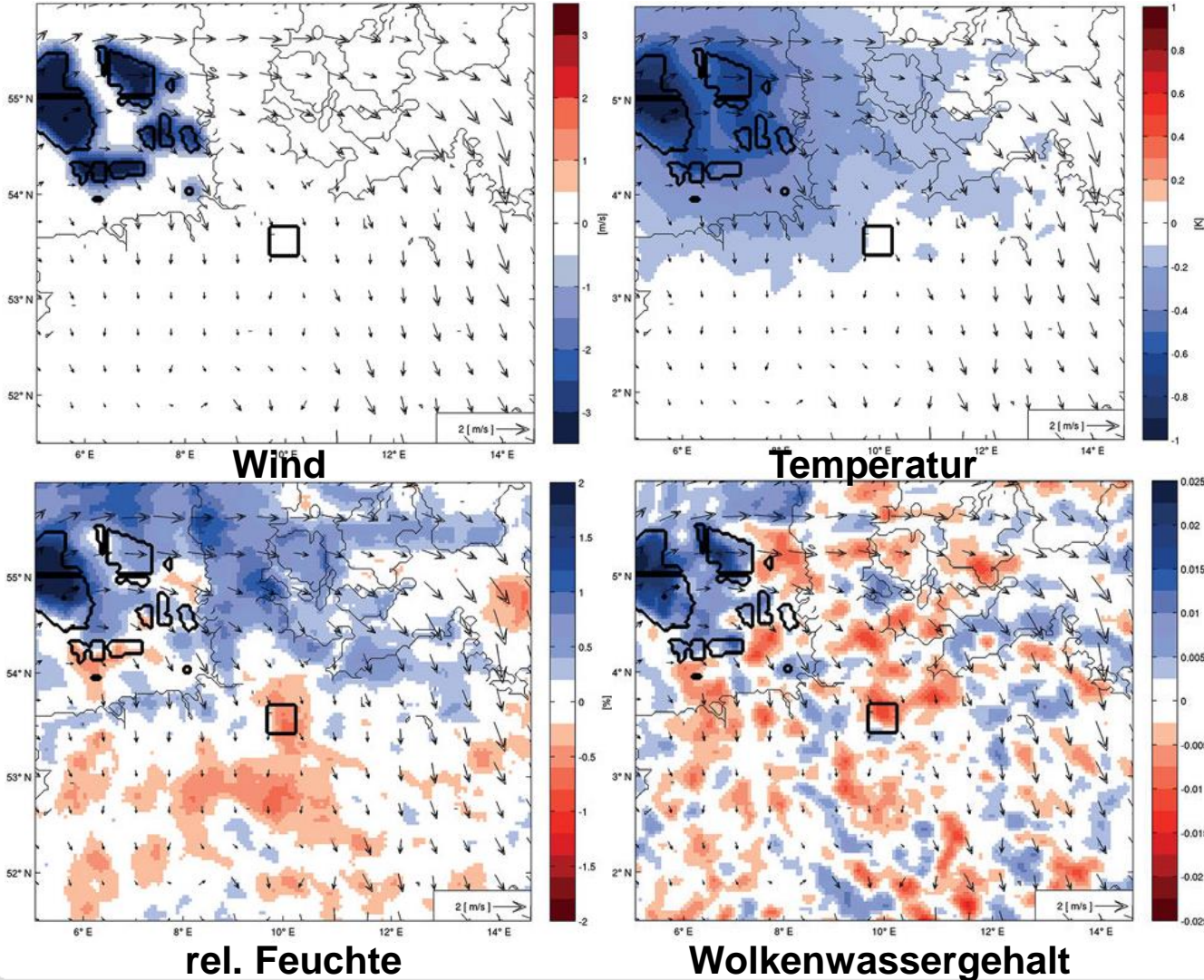
**Wolkenbildung,**  
**Modifikation der Niederschlagsverteilung**  
**Modifikation der Sonnenscheindauer**  
**Modifikation des Windfeldes**

...



# Influence of large offshore wind farms on North German climate

MARITA BOETTCHER<sup>1\*</sup>, PETER HOFFMANN<sup>2,3</sup>, HERMANN-J. LENHART<sup>4</sup>, K. HEINKE SCHLÜNZEN<sup>1</sup> and ROBERT SCHOETTER<sup>2,5</sup>



**METRAS-Simulation:  
Auswirkung auf das  
Sommerklima**

**Gitterweite: 4 km**

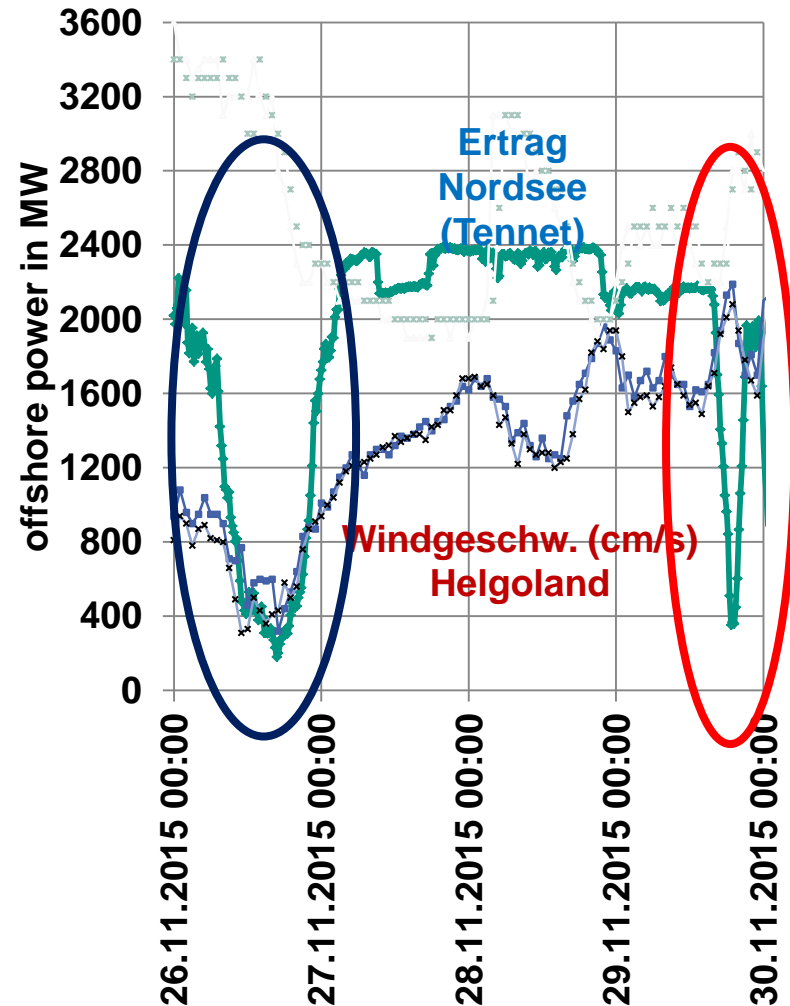
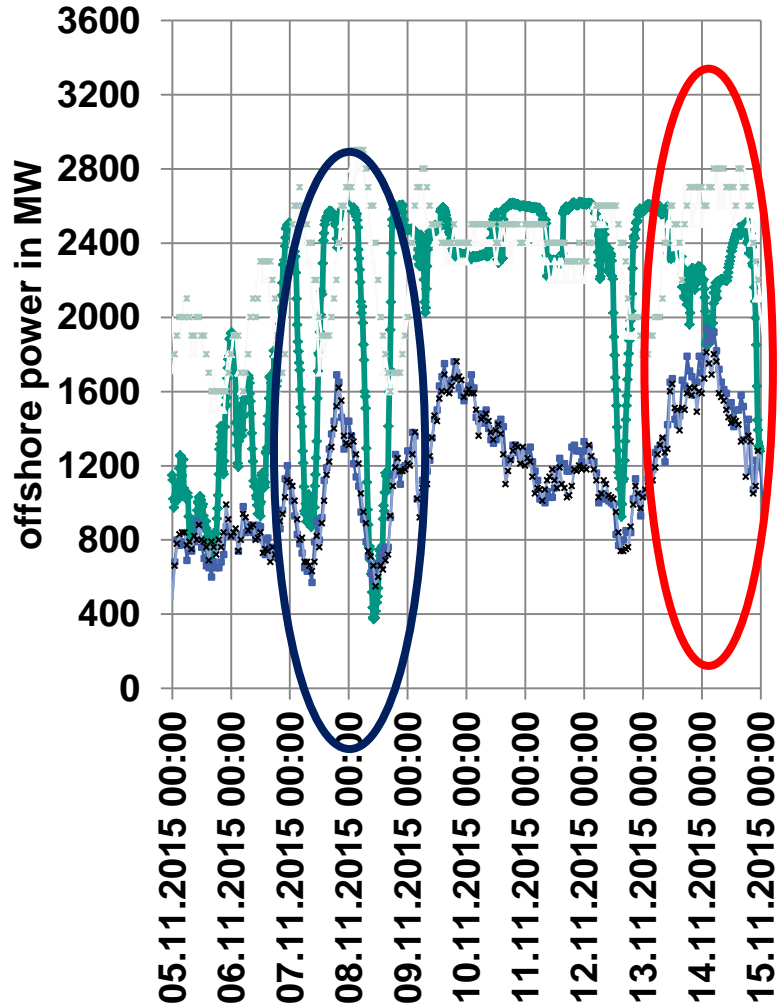
**Parametrisierung:  
Entzug kinetischer  
Energie in Nabenhöhe**

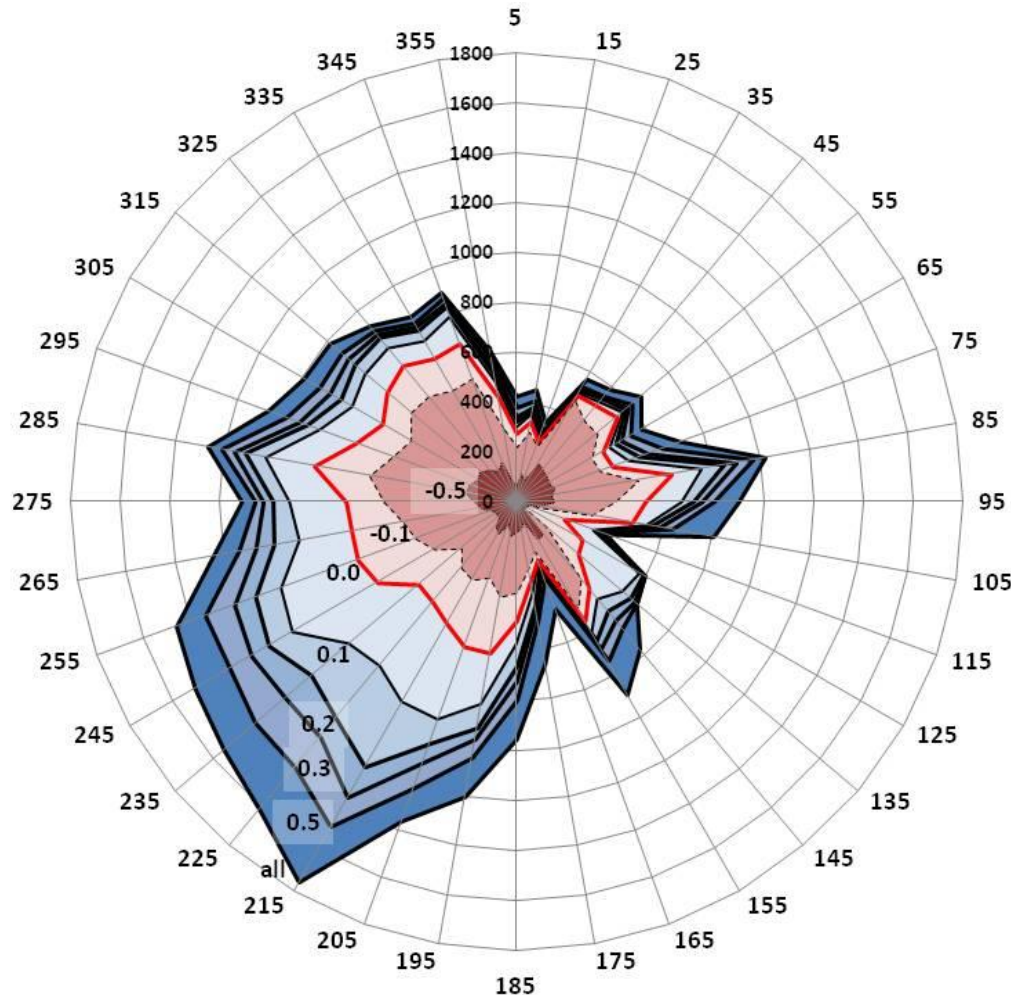
(Quelle: Boettcher et al., 2015, MetZet)

## Ausblick



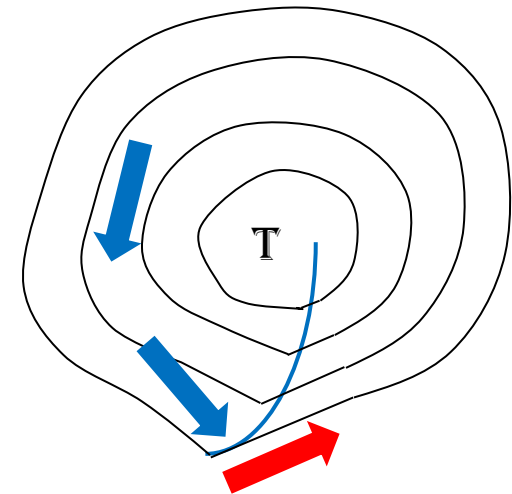
## Einfluss von cut-in (blue) und cut-off (red) Windgeschw. (eigene Grafik, Datenquellen: Tennet, DWD)





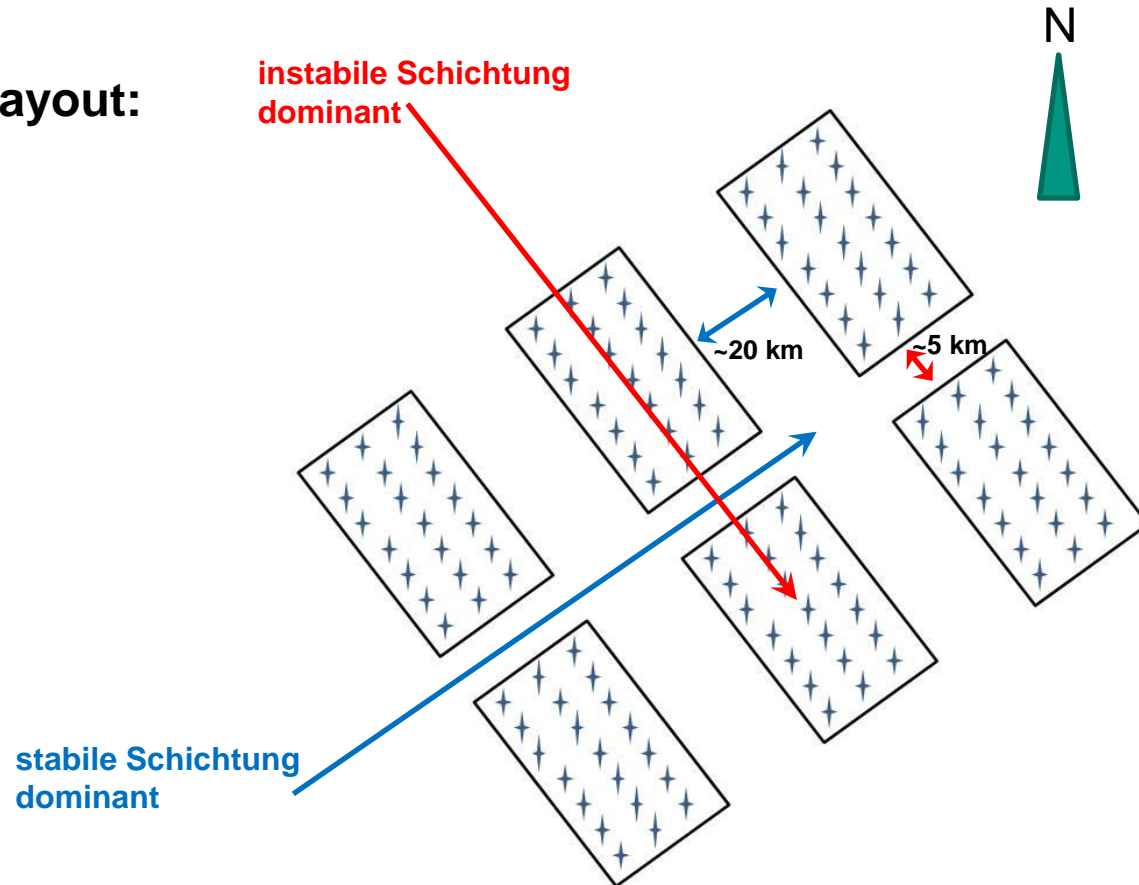
## Korrelation von Windrichtung und thermischer Schichtung in der marinen ABL

**stabile Bedingungen dominieren in der Hauptwindrichtung**



## Vorschlag:

## angepasstes Park-Layout:





**Thank You  
for your  
attention**

