

4/5
9/3.0



Deutscher Wetterdienst
Seewetteramt

KURATORIUM FÜR FORSCHUNG
IM KÜSTEN-INGENIEURWESEN
POSTFACH 44 67 - TEL. (04 31) 33 94 -
2300 KIEL 1

21. Dez. 1992

25. Jan. 1993

MTK 385

Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen

von
Heiner Schmidt und Johannes Pätsch

Hamburg, August 1992

Abschlußbericht

zum KFKI-Forschungsvorhaben:
"Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt"

Teilprojekt: "Naturmessungen"

Unterauftrag: "Meteorologie" (Projekt 104 des Deutschen Wetterdienstes)
gefördert durch den BMFT.

Deutscher Wetterdienst
-Seewetteramt-
Postfach 30 11 90
2000 Hamburg 36

029945 2.1

Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen

von HEINER SCHMIDT und JOHANNES PÄTSCH

Zusammenfassung

Für verschiedene Orte auf Norderney wird die Richtungsabhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit aus vierjährigen Messungen dargestellt. Wegen der großen Unterschiede der Bodenrauigkeit auf der Insel ergeben sich zum Teil erhebliche Differenzen in der Windgeschwindigkeit. Die Simulation der Windverhältnisse mit einem dreidimensionalen numerischen Modell der Luftströmung ergibt eine befriedigende Übereinstimmung. Aus der flächendeckenden Modellrechnung können richtungsabhängige Faktoren zur Umrechnung der Windwerte von verschiedenen Meßorten auf die freie See abgeleitet werden.

Abstract

For different locations on Norderney island the directional dependancy of the mean wind speed is given from measurements over four years. Due to strongly varying surface roughnesses large differences of the wind speed can be found. A simulation of the wind conditions using a three-dimensional numeric air flow model shows a satisfactory correspondence. From the model calculations direction dependent factors can be deduced for a transformation of the wind speed of different locations towards the open sea.

029945

1. Einleitung

Es gibt heute in den küstennahen Seegebieten kaum noch ständig verfügbare Windmeßstellen. Da eine physikalische Zuordnung von Seegang, Windstau u.ä. vernünftigerweise nur zum Wind auf See vorgenommen werden sollte, ist eine Methode zur Korrektur der landgestützten (und vom Land selbst beeinflussten) Windmessungen erforderlich. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" in dem Teilprojekt "Naturmessungen" auch ein meteorologisches Programm vorgesehen.

Das meteorologische Programm wurde vom Seewetteramt (SWA) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt. Es bestand aus einem Windmeßprogramm, um das notwendige Basismaterial bereitzustellen und um auch die anderen Teilprojekte mit Zeitserien des Windes versorgen zu können. Außerdem sollte anhand der Messungen auf Norderney versucht werden, eine auch auf andere Orte übertragbare Methode anzugeben, um von den auf einer Insel oder an der Küste gemessenen Werten approximativ auf die Windverhältnisse der freien See schließen zu können.

2. Die Windmessungen

In der Meteorologie ist seit langem bekannt, daß die Windverhältnisse an einem Meßort (-punkt) zum einen natürlich von den großräumigen Klimabedingungen, zum andern aber von der Höhe über Grund und kleinräumig ganz entscheidend von der Rauigkeit des Erdbodens in der näheren und weiteren Umgebung sowie von orographischen Strukturen geprägt werden. Als Beispiele für die sehr umfangreiche Literatur zu diesem Thema seien hier nur CHRISTOFFER u. ULBRICHT-EISSING (1989) sowie TROEN u. PETERSEN (1990) genannt.

Daher bestückte das SWA auf der Insel Norderney zusätzlich zu den bestehenden Windmeßeinrichtungen "Wetterstation" (DWD) und "Wattpfahl" (Forschungsstelle Küste) noch vier weitere Orte ("Hafen", "Flugplatz", "Wasserwerk" und "Nordpfahl") mit Meß-

einrichtungen. Die Lage der Stationen ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Es wurde versucht, mit den Stationen im Rahmen der logistischen Gegebenheiten möglichst viele unterschiedliche Umgebungsbedingungen zu erfassen. Die Station "Hafen" mißt in den vier Niveaus 4, 10, 16 und 24 m, die anderen messen nur in einem Niveau nahe 10 m über Grund.

Drei der neuen Stationen konnten nach Überwindung von Baurechts- und Naturschutz-Hindernissen im Januar 1988 in Betrieb genommen werden. Die Station "Nordpfahl" wurde auf dem seeseitigen der beiden 1989 im Bühnenfeld D1-E1 eingespülten Meßpfähle der Forschungsstelle Küste montiert. Nach verschiedenen Schwierigkeiten (u.a. durch Blitzschlag) waren die Windmessungen hier erst ab Juni 1991 verfügbar. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Verfügbarkeit aller Windmeßeinrichtungen.

Die Windmessungen erfolgten auf konventionelle Weise mit einem Schalenstern-Anemometer für die Windgeschwindigkeit und einer Einblatt-Windfahne für die Windrichtung. An drei der neuen Stationen wurden moderne Sensoren verwendet, deren digitale Signale direkt von einer elektronischen Meßwertverarbeitung (Fa. Siggelkow, Hamburg) im Takt von 1 Sekunde aufgenommen und über je 10 Minuten zu Mittelwert, Standardabweichung und Maximalwert von Richtung und Geschwindigkeit verarbeitet wurden. Die abgeleiteten Größen wurden auf Cassetten gespeichert. Vom gleichen Typ (nur mit Fernübertragung) ist die Station "Wattpfahl" der Forschungsstelle Küste. Die Station "Hafen" war ebenfalls ähnlich, nur war die Erfassungseinheit schon sehr alt. Sie hatte in zunehmendem Maße Ausfälle in einigen Niveaus und mußte zum Ende des Projektes gegen eine neue Anlage von Siggelkow ausgetauscht werden. Die Wetterstation ist mit einer modernen Windmeßanlage der Fa. Thies, Göttingen, ausgerüstet.

Das Staatliche Amt für Insel- und Küstenschutz (STAIK, Norden) hat Ende 1991 in unmittelbarer Nähe zu unserer Station "Hafen" das Oberfeuer Riffgat mit einer Windmeßanlage (Höhe 18 m, Fa. Lambrecht, Göttingen, und Fa. Ott, Kempten) ausgerüstet. Die Daten werden auf einen PC in Norden fernübertragen und dienen dem Sturmflutwarndienst. Die Windverhältnisse vom "Hafen" sind

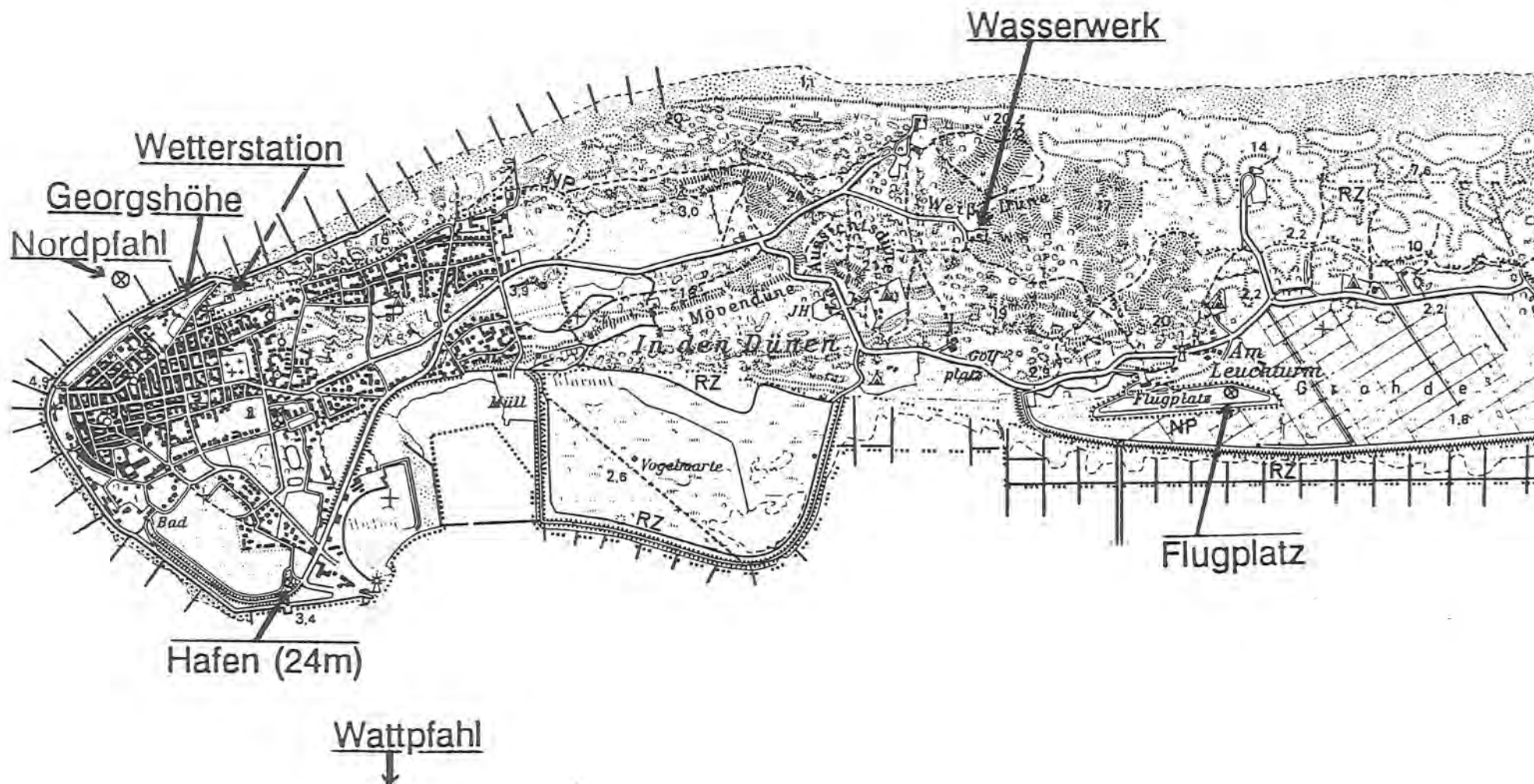


Abbildung 2.1:
Die Lage der Windmeßeinrichtungen auf der Insel Norderney.

unmittelbar auf die Messungen des STAIK übertragbar.

3. Das numerische Modell MKW/SWA

Das SWA verfügt seit längerem über ein numerisches, dreidimensionales Modell zur Simulation der Luftströmung über orographisch gegliedertem Gelände mit wechselnder Bodenrauigkeit. Dieses relativ einfache statische (nicht zeitabhängige) Modell wurde vom SWA aus dem NOAA Boundary Layer Model (NOABL) weiterentwickelt (SHERMAN, 1976; TRACI, 1978). Es besitzt ein gleichabständiges Gitter in der Horizontalen. Die Vertikale wird durch eine geländefolgende Koordinate beschrieben, die Gitterabstände wachsen hier mit zunehmendem Abstand vom Boden.

Das Modell wandelt ein vorzugebendes Anfangswindfeld in ein massen-konsistentes Windfeld (daher der Name MKW) um. Das Modell kann hier nicht eingehend beschrieben werden, einige grundsätzliche vereinfachte Anmerkungen mögen zum Verständnis genügen.

Die Reibung der Atmosphäre an der rauhen Erdoberfläche erzeugt eine turbulente Durchmischung und damit einen vertikalen Impulsfluß, der beständig Impuls aus dem Wind entnimmt und in den Boden abführt. Unter idealen Bedingungen ("unendliche horizontale Homogenität") bildet sich ein vertikales Gleichgewichtsprofil aus, das "logarithmische Windprofil", bei dem das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten u in zwei Höhen z_1 und z_2 über Grund nur durch die Rauigkeit (hier beschrieben durch eine Rauigkeitslänge z_0) der Erdoberfläche und eine Verdrängungshöhe d bestimmt wird:

$$(1) \quad \frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln(z_2-d) - \ln(z_0)}{\ln(z_1-d) - \ln(z_0)}$$

Die Verdrängungshöhe kommt nur dann zum Tragen, wenn der Untergrund sehr dicht mit Hindernissen besetzt ist, etwa in einem Kornfeld, einem Wald oder einer Stadt. In diesen Fällen beträgt d etwa $4/5$ der mittleren Hindernishöhe, ansonsten ist d annähernd gleich Null. Für die Stadt Norderney wurde $d=7\text{m}$ gesetzt.

Das Windprofil wird gewissermaßen um die Höhe d vom Erdboden nach oben verdrängt, unterhalb d ist die mittlere Windgeschwindigkeit klein. Typische Werte für die Rauigkeitslänge auf Norderney gibt die Tabelle 2.

Tabelle 2: Rauigkeitslänge z_0 in Meter

Stadt	0,7
Dünengelände	0,3
Marschwiesen	0,01
Strand	0,001
Meer	0,00025

Wenn der Wind von einem Gebiet geringerer Rauigkeit auf eines mit höherer Rauigkeit übertritt, wird das Gleichgewicht am Boden gestört. Eine interne Grenzschicht bildet sich aus, deren Höhe mit zunehmender Entfernung vom Rauigkeitssprung wächst. Unterhalb der Grenzschicht stellt sich der Wind mit einer erhöhten Turbulenz schnell auf die neue Rauigkeit ein, oberhalb herrschen noch die alten Verhältnisse. Bei einem Rauigkeitssprung von rauh nach glatt ist es ähnlich, nur dauert die Anpassung an die neuen Verhältnisse länger, da die aus dem rauheren Gebiet herangeführte Turbulenz nur allmählich gedämpft wird.

In Abbildung 3.1 wird die Behandlung eines Rauigkeitssprungs von kleiner nach grösserer Rauigkeit (See $\rightarrow$ Land) für eine Fallstudie dargestellt. Die durch MKW berechneten Profile geben den oben geschilderten Prozess wieder: mit zunehmender Entfernung vom Rauigkeitssprung etabliert sich das neue (Land-) Profil zuerst in Bodennähe und frißt sich dann sozusagen in den gesamten Raum hinein. Abbildung 3.2 zeigt den umgekehrten Fall der Rauigkeitsabnahme (Land $\rightarrow$ See); dabei wird die etwas langsamere Zunahme der Windgeschwindigkeit gegenüber dem Fall des Abbremsens (Abbildung 3.1) gerade in Bodennähe deutlich.

Beim Überströmen einer Insel (wie Norderney) erfolgt nun ein ständiger Wechsel der Bodenrauigkeit. Auch sind quer zur Strömungsrichtung unterschiedliche Rauigkeiten vorhanden. Die dar-

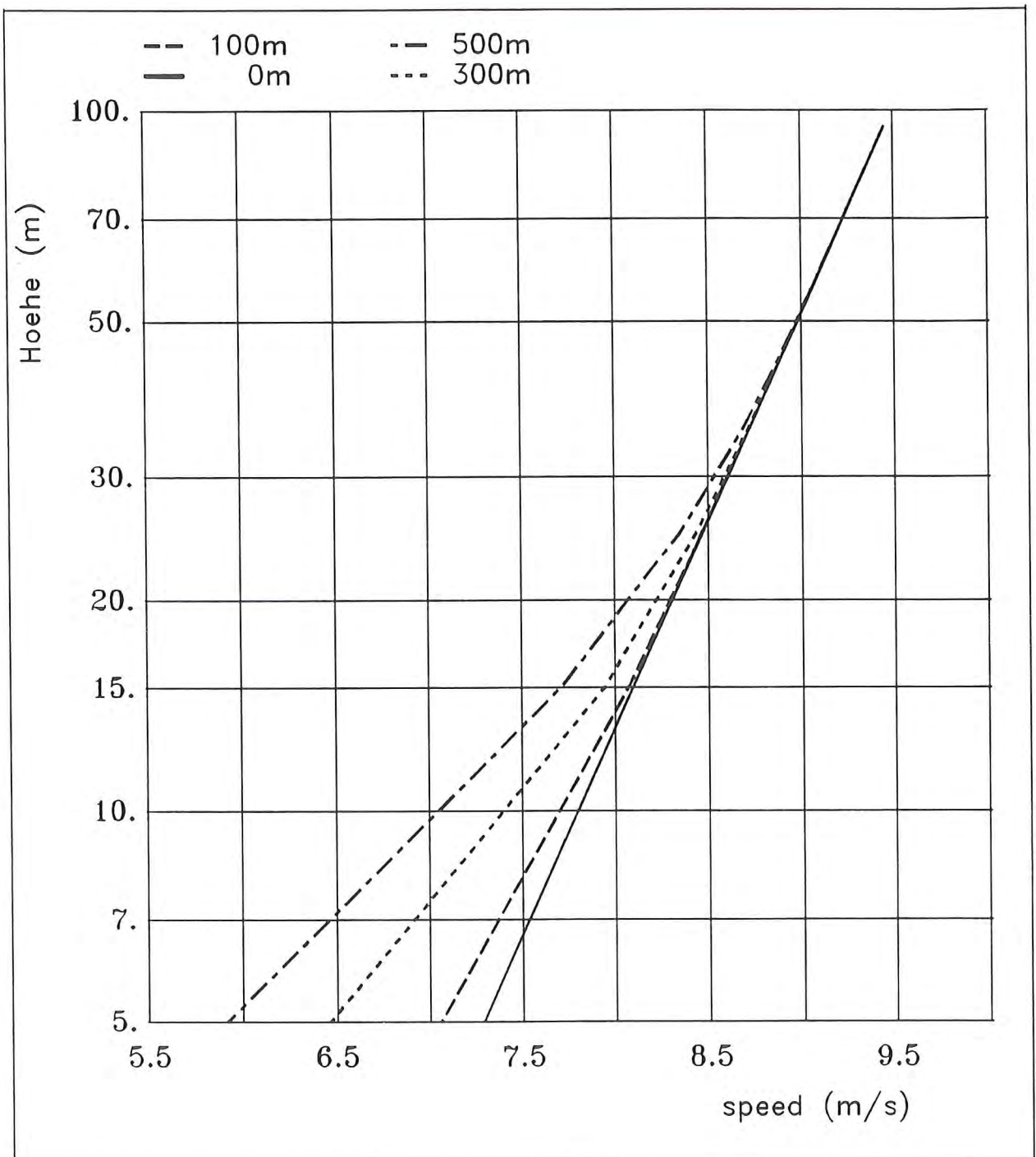


Abbildung 3.1:

Entwicklung der Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit hinter einem Rauigkeitssprung von See nach Land. Der Wind stellt sich vom Boden her allmählich auf die neue größere Rauigkeit ein. Die interne Grenzschicht, deren Lage am Knick des jeweiligen Profils zu erkennen ist, hat nach einem Fetch von 500m eine Höhe von knapp 50m erreicht. Darüber hinaus ist die Information über den Rauigkeitswechsel am Boden noch nicht vorgedrungen, hier besteht noch das Seeprofil.

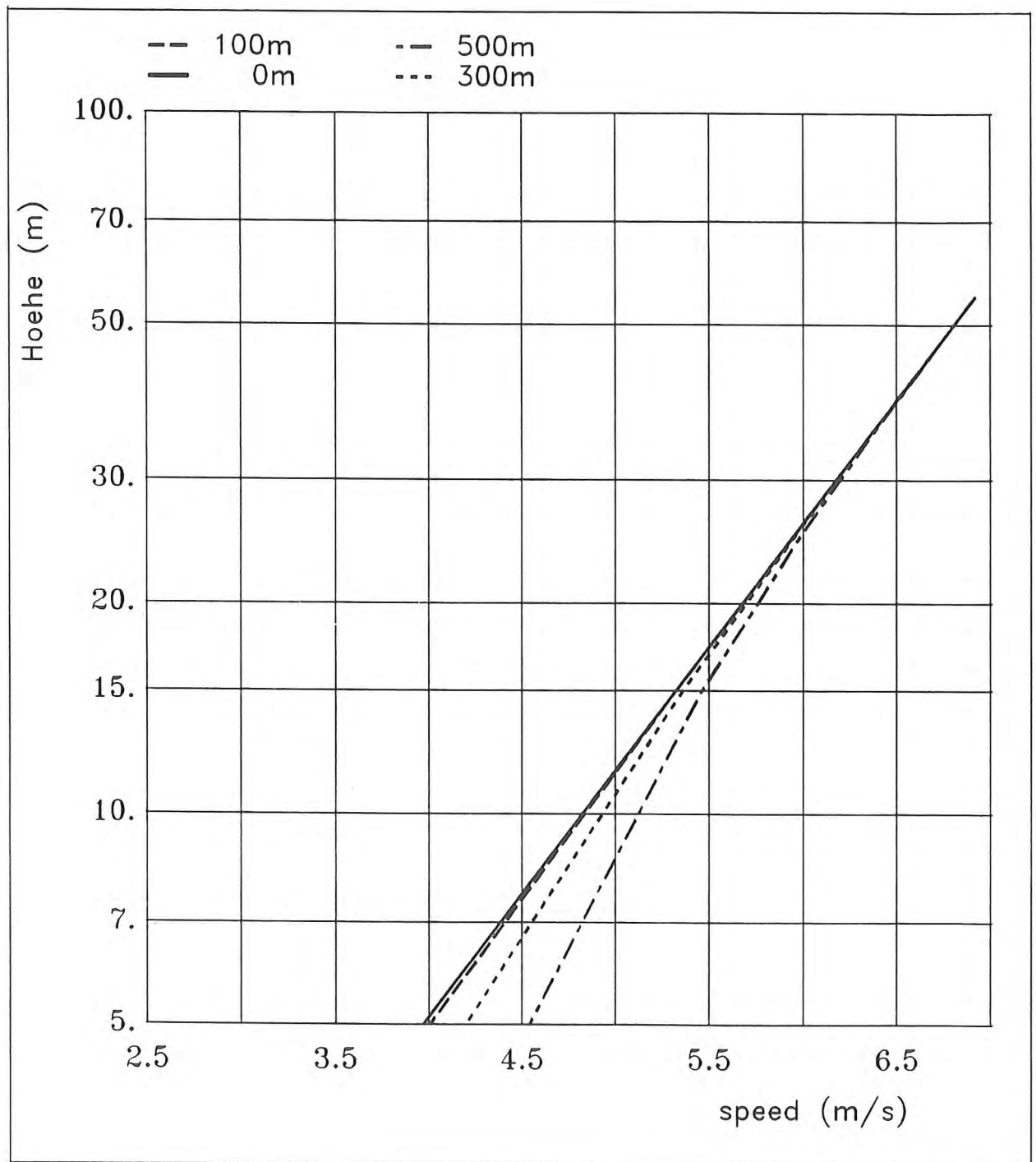


Abbildung 3.2:

Entwicklung der Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit hinter einem Rauigkeitssprung von Land nach See. Der Wind stellt sich langsamer als im vorigen Fall (Abb. 3.1) auf die neue glattere Bodenbeschaffenheit ein.

aus resultierenden Geschwindigkeitsunterschiede werden im Verlauf der Strömung durch horizontale Vermischung ausgeglichen. Abbildung 3.3 zeigt in einem von Nord nach Süd verlaufenden Schnitt durch die Insel die stark ausgebildete Leefahne des rauhen Geländes bei Nordwind mit Isolinien der Windgeschwindigkeit (bezeichnet in m/s). Deutlich wird hier auch die vertikale Ausbreitung der Geschwindigkeitsreduktion. Das Rechengebiet ist hellgrau, die Insel dunkelgrau gerastert.

Die beschriebenen Vorgänge werden in dem Modell MKW/SWA in dem ersten Programmteil approximativ behandelt. Es berechnet zu einer in einer bestimmten Höhe vorzugebenden generellen Strömungsrichtung und -geschwindigkeit ein dreidimensionales Anfangswindfeld in geländefolgenden Koordinaten über der Orographie.

Das Anfangswindfeld ist im allgemeinen nicht massenkonsistent, d.h. in eine Gitterzelle kann mehr Luft einströmen als wieder hinaus fließt oder umgekehrt. Ein zweiter Programmteil besorgt die Massenkonsistenz mittels eines iterativen Potentialströmungs-Ausgleichs. Dabei werden an den drei Windkomponenten jeder Gitterzelle so lange kleine Korrekturen angebracht, bis das gesamte Windfeld an jedem Punkt massenkonsistent (divergenzfrei) ist. Die Iteration minimiert die Summe der Quadrate der Zusatzvektoren. Die Lösung der zugehörigen Differentialgleichung wird sehr effizient mit einem modernen Mehrgitter-Verfahren vorgenommen (HACKBUSCH 1985). Durch den Potentialströmungs-Ausgleich ergeben sich auch die Effekte seitlicher Umströmung von Hindernissen, eine Strömungsüberhöhung über Kuppen und Kämmen sowie Vorstau- und Lee-Effekte; alles ähnlich, wie es vom Wasser her bekannt ist.

Bei dem erfolgreichen Einsatz des Modells im KFKI-Projekt "Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in Ästuarien der Deutschen Bucht" konnte bereits eine Optimierung des Modellverhaltens im Fernfeld (1-20 km) hinter Rauigkeitssprüngen durch Vergleich mit dem sehr aufwendigen Grenzschichtmodell GESIMA der GKSS (Geesthacht) erreicht werden. Anhand der Windmessungen auf Norderney wurde auch das Verhalten im Nahfeld (50-

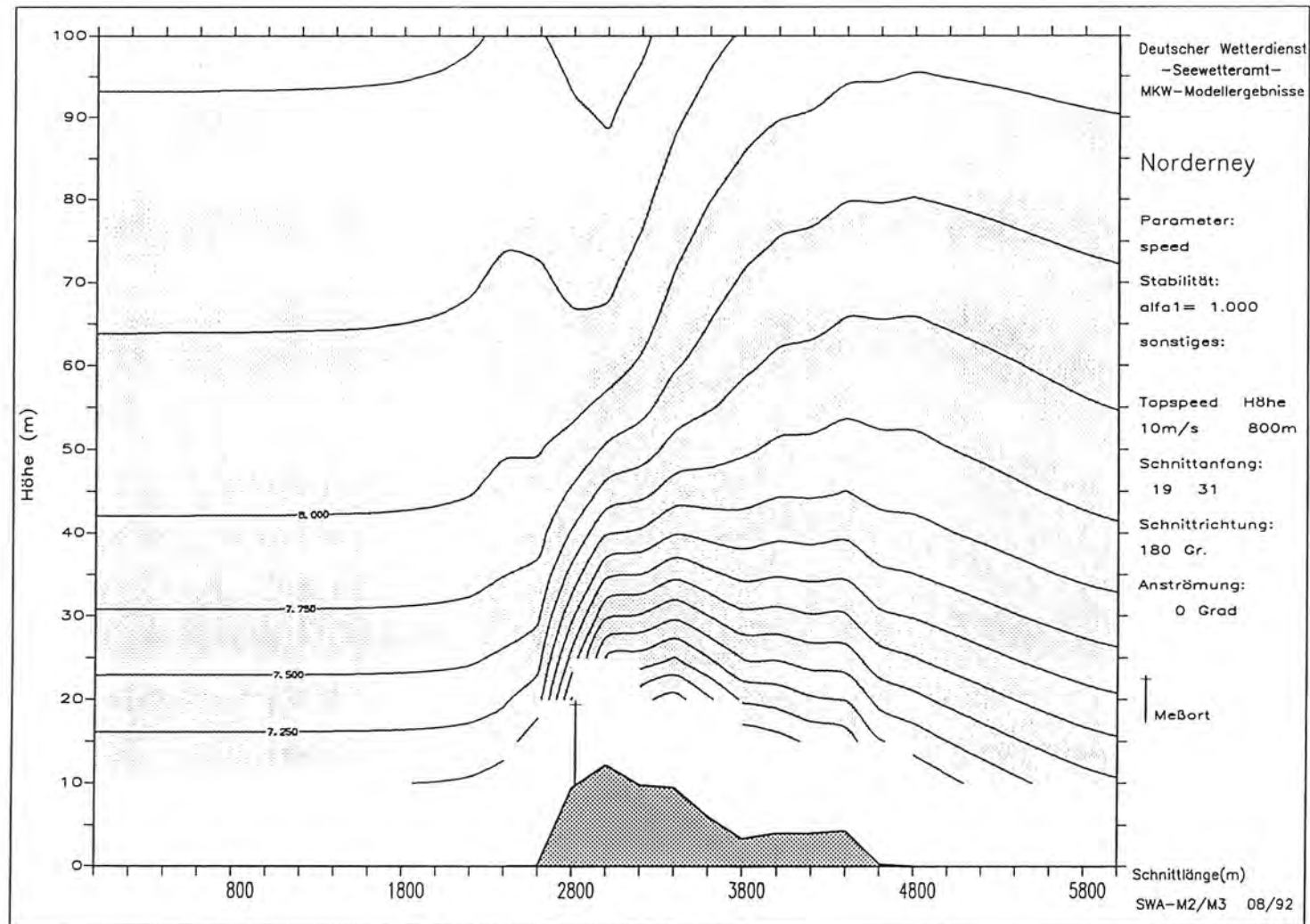


Abbildung 3.3:
Von Nord nach Süd verlaufender Schnitt durch das Rechengebiet an der Wetterstation. Der simulierte Nordwind wird hier durch eine Anströmung von links dargestellt.

1000 m) sowie die grundsätzliche Einstellung der wenigen freien Parameter ("Schrauben") des Modells der Natur angepaßt.

Da für die Simulation von Windverhältnissen an einem bestimmten Punkt (z.B. der Wetterstation) weiter entfernte Strukturen nur grob behandelt werden müssen, während nahe Hindernisse in der Strömung möglichst exakt wiederzugeben sind, wurde im MKW - Modell ein Nesting-Verfahren implementiert, welches diesen Gedanken verfolgt: Auf einem relativ groben Raster (in Norderney 200m) wird für ein großes Gebiet (hier die gesamte Insel mit umgebendem Wasser) eine vollständige Simulation erstellt, die in sich geschlossen ist und auch schon als Ergebnis betrachtet werden kann. Ausgehend von diesem Urergebnis kann nun eine weitere Rechnung folgen, in der die Windverhältnisse in einem Teilgebiet des Gesamtfeldes unter Berücksichtigung feinerer Strukturen (Topographie und Rauigkeit) simuliert werden. Das neue Ergebnis ist dann eine Aufbesserung des Urergebnisses. Diese Strategie wurde bei der Modellierung der Insel Norderney vorgenommen; die Gebiete um die Meßstationen wurden als solche Nester nachbehandelt, deren Gitterweiten 50 m betrugen. Abbildung 3.4 zeigt die Lage der Nester.

Das Modell MKW/SWA ist bezüglich der Geschwindigkeit vollständig linear, d.h. bei gleichem Rechengebiet und gleicher Anströmrichtung unterscheiden sich die Ergebnisse für zwei verschiedene Anströmgeschwindigkeiten nur durch einen konstanten Faktor, der für alle Gitterpunkte des dreidimensionalen Windfeldes gültig ist. Diese Eigenschaft resultiert aus vereinfachenden Annahmen. Sie ist in der Natur nur angenähert erfüllt. Sie ist aber sehr nützlich, denn so kann die Modellrechnung zunächst mit einer beliebigen Anströmgeschwindigkeit gestartet werden. Durch Vorgabe eines tatsächlichen Windwertes (z.B. eines Meßwertes) an einem Gitterpunkt ist der Faktor zur Skalierung des gesamten Feldes eindeutig bestimmt. Bei gleichzeitiger Vorgabe mehrerer Stützpunkte muß eine Ausgleichung vorgenommen werden. Für die Norderney-Rechnung wurden 5 Stützpunkte je Richtung verwendet.

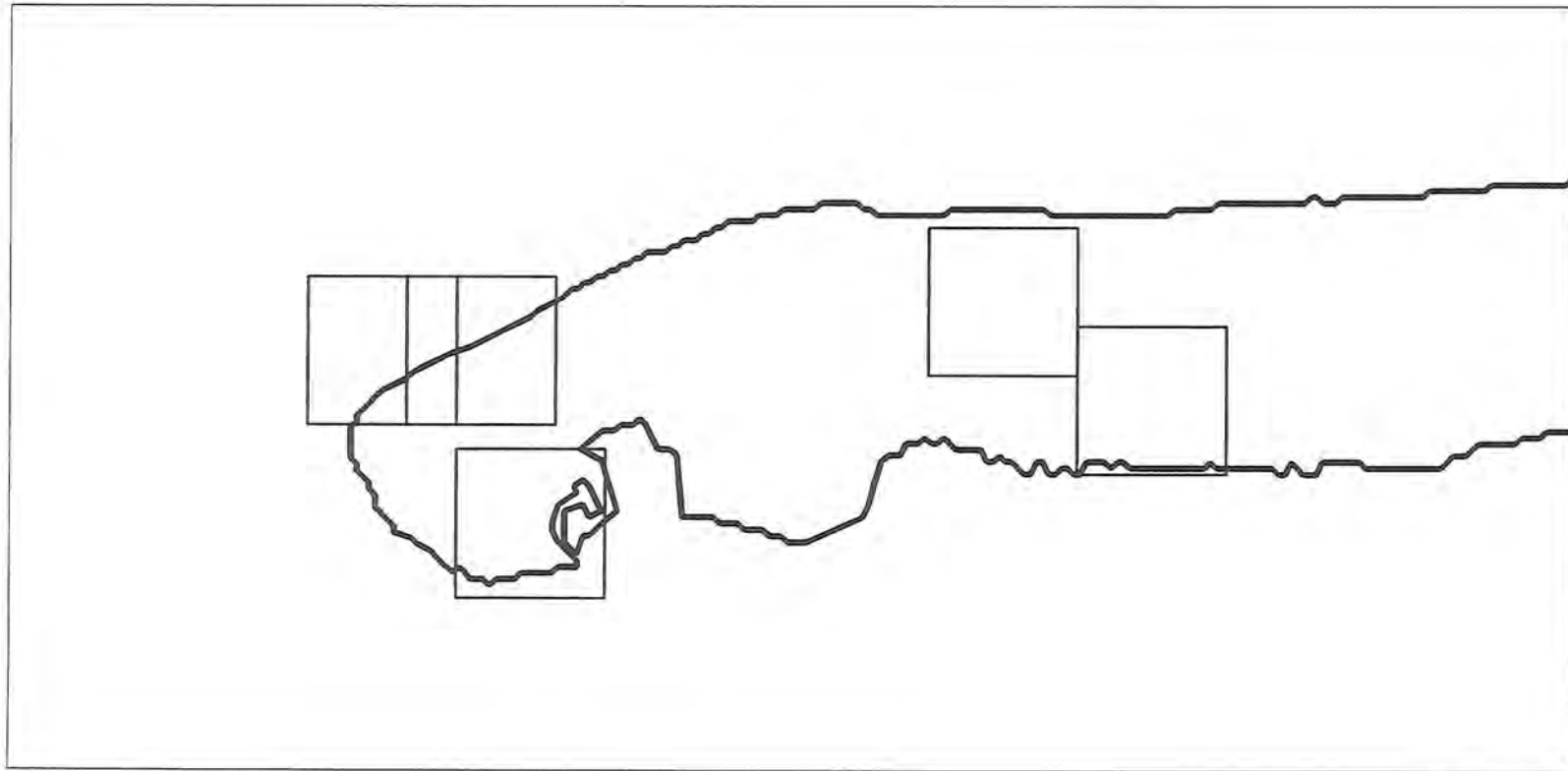


Abbildung 3.4:
Die Lage der "Nester", es sind die Gebiete, in denen die
Simulationsrechnungen zusätzlich zu einer horizontalen 200m -
Auflösung noch einmal mit 50m Gitterweite behandelt wurden.

4. Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen und die Ableitung von Faktoren zur Übertragung auf die freie See

4.1 Vorbemerkungen

In der Meteorologie ist die Windrichtung definiert als die Richtung, aus der der Wind kommt; anders in der Ozeanographie, dort wird ein Strom mit der Richtung bezeichnet, in die er setzt. Die Windrichtung beginnt mit 0° bei Nordwind und zählt im Uhrzeigersinn, so daß 90° Ostwind bedeutet usw. Die Windgeschwindigkeit wird hier in Meter/Sekunde angegeben (obgleich in der Meteorologie sonst wegen der Belange der Luft- und Seefahrt die Einheit "Knoten", kn = Seemeilen/Stunde vorherrscht; $1 \text{ kn} = 0.51444 \text{ m/s}$).

Aus den Messungen des vierjährigen Projekt-Zeitraums (Januar 1988 bis Dezember 1991) können verlässliche Angaben zu den langfristigen Klimaverhältnissen nur bedingt gewonnen werden, der Zeitraum ist zu kurz. Häufigkeitsverteilungen und insbesondere Mittelwerte des Windes beginnen sich wegen der großen Variabilität des Windes in allen Zeitskalen erst etwa ab einem 10-jährigen Zeitraum zu stabilisieren. Für viele Anwendungen werden in der Klimatologie sogar 30 Jahre ("Klima-Normal-Perioden") verwendet. Hier werden nur einige abgeleitete Ergebnisse zu den 10 Jahren 1982-1991 dargestellt.

Anders als Mittelwerte stabilisieren sich Verhältniszahlen, die die mittlere Relation zwischen der Windgeschwindigkeit an zwei Orten beschreiben, schon nach relativ kurzer Zeit. Ein halbes Jahr an stündlichen Parallelmessungen reichen im allgemeinen zu ihrer empirischen Bestimmung aus. Das Ziel, Übertragungsfaktoren (die ja Verhältniszahlen sind) zur Umrechnung des Windes vom einem Ort auf einen anderen zu bestimmen, ist daher mit den vierjährigen Messungen des Projektes gut zu erreichen.

4.2 Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen

Bei der Beschreibung des Modells (Abschnitt 3) wurde bereits deutlich, daß der Wind über vorwiegend ebenem Gelände (wie in Norderney) an einem Punkt im wesentlichen durch die stromauf vorhandene Rauzigkeit der Erdoberfläche bestimmt wird. Daher muß hier eine Unterscheidung nach Windrichtungen vorgenommen werden. Die Klassenbreite der Richtung beträgt 30° , die 12 Klassen sind zentriert auf 0, 30, 60 Grad usw.

Die Windrichtung ist bei geringen Geschwindigkeiten sehr variabel und nicht mehr allein durch die Dynamik der Luftströmung bestimmt. Daher wurden für die folgende Auswertung alle gleichzeitig an den verschiedenen Orten auf der Insel gemessenen Windwerte außer Betracht gelassen, wenn die Windgeschwindigkeit am Hafen in 24 m Höhe (als Stundenmittelwert) kleiner als 4 m/s war. Unter dieser Bedingung wurden die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für die 12 Richtungsklassen über den gesamten vierjährigen Meßzeitraum berechnet. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4.1 und 4.2 als dicke Linien mit Symbolen dargestellt.

Die Abb. 4.1 enthält die Verhältnisse für die Wetterstation, den Hafen (24 m) und den Flugplatz, die Abb. 4.2 die für das Wasserwerk und den Nordpfahl. Für den Watterpfahl lagen nicht genügend Messungen vor. Es zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den Stationen, die zusätzlich noch mit der Windrichtung stark variieren. So ergeben sich z.B. für den Nordpfahl, der im aerodynamisch glatten Wasser steht, meist um 2-3 m/s höhere Werte als für das Wasserwerk, das allseits vom relativ rauhen Dünen Gelände umschlossen ist (Abb.4.2). Südöstlicher Wind ($120-150^\circ$) ist am Nordpfahl dagegen geringer, weil der Pfahl sich dann im Lee der extrem rauhen Stadt Norderney befindet. Hier macht sich die Tatsache besonders bemerkbar, daß die Meßhöhe am Nordpfahl noch niedriger ist als die mittlere Dachhöhe der Häuser. Ähnliche Unterschiede zeigen sich auch beim Vergleich der Wetterstation mit dem Hafen. Diese Stationen liegen bei unterschiedlichen Windrichtungen im Lee der Stadt.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für die 12 Anströmrichtungen sind in den Abbildungen 4.1 und 4.2 für die fünf Stationen zusätzlich als dünne Linienzüge eingetragen. Eine Zuordnung zu den Kurven der Messungen (dicker, mit Symbolen) ist leicht möglich, da sie immer nahe beieinander liegen. Die Modellrechnungen (die in der näheren Umgebung der Stationen in einem horizontalen Raster von 50m, in größerer Entfernung zu ihnen im 200m-Raster erfolgten) geben die gemessenen Windverhältnisse folglich sehr gut wieder. Die mittlere Abweichung, über alle Richtungen und alle fünf Stationen berechnet, beträgt $\pm 0,3$ m/s. Wir schließen daraus, daß die Modellrechnung eine entsprechende Güte auch an allen anderen Gitterpunkten aufweist, was allerdings unbeweisbar ist, da es dort keine Messungen gibt.

Als sehr dicke Linie sind in Abb. 4.2 die Windwerte für die ungestörte Anströmung der Modellrechnung in 10 m Höhe eingetragen. Diese Werte entsprechen den Windverhältnissen auf der "freien See". Dies ist nun nicht die Mitte der Nordsee, sondern ein Punkt etwa 5-10 km nördlich der Insel Norderney. Er liegt also noch im Küstenvorfeld. Es ist zu beachten, daß auch die Linie für die "freie See" mit den anderen Linien der Abb 4.1 und 4.2 konsistent ist. Das heißt, es gilt die Einschränkung, daß in die Berechnung der Mittelwerte nur Werte eingehen, wenn am Hafen in 24m Höhe der Wind größer als 4 m/s ist.

Bei der Erläuterung des Modells (Abschnitt 3) wurde erwähnt, daß sich bei der Umströmung von Hindernissen auch örtliche Abweichungen der Windrichtung von der Generalrichtung ergeben. Dies ist auch bei der Überströmung von Norderney der Fall. Die Abweichungen betragen aber in Höhen von 10 m und mehr über Grund an den Meßorten nur wenige Grad, so daß wir hier auf eine Erörterung verzichten können. Die Winkelabweichung wird für die praktische Anwendung gleich Null gesetzt.

4.3 Ableitung der Übertragungsfaktoren

Die Ableitung der mittleren windrichtungsabhängigen Faktoren f zur Übertragung der Windgeschwindigkeit u von einem Ort 1 auf

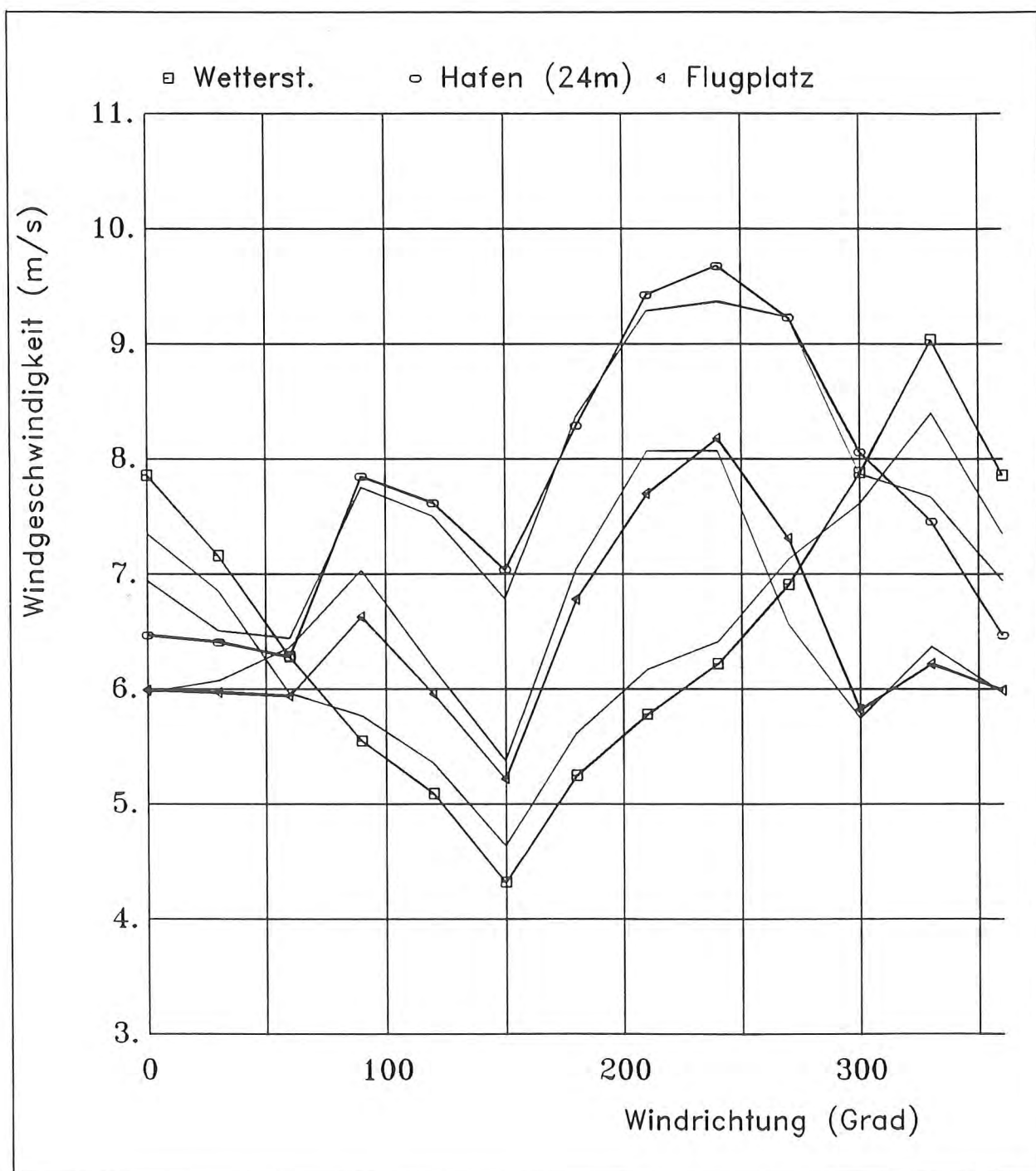


Abbildung 4.1:

Mittlere Vergleichs-Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung für die Orte "Wetterstation", "Hafen 24m" und "Flugplatz", berechnet nur für die Fälle, bei denen die Windgeschwindigkeit am Hafen (24m) mehr als 4 m/s betrug. (Dicke Linien mit Symbolen: Aus Messungen. Dünne zugehörige Linien: Modellrechnungen).

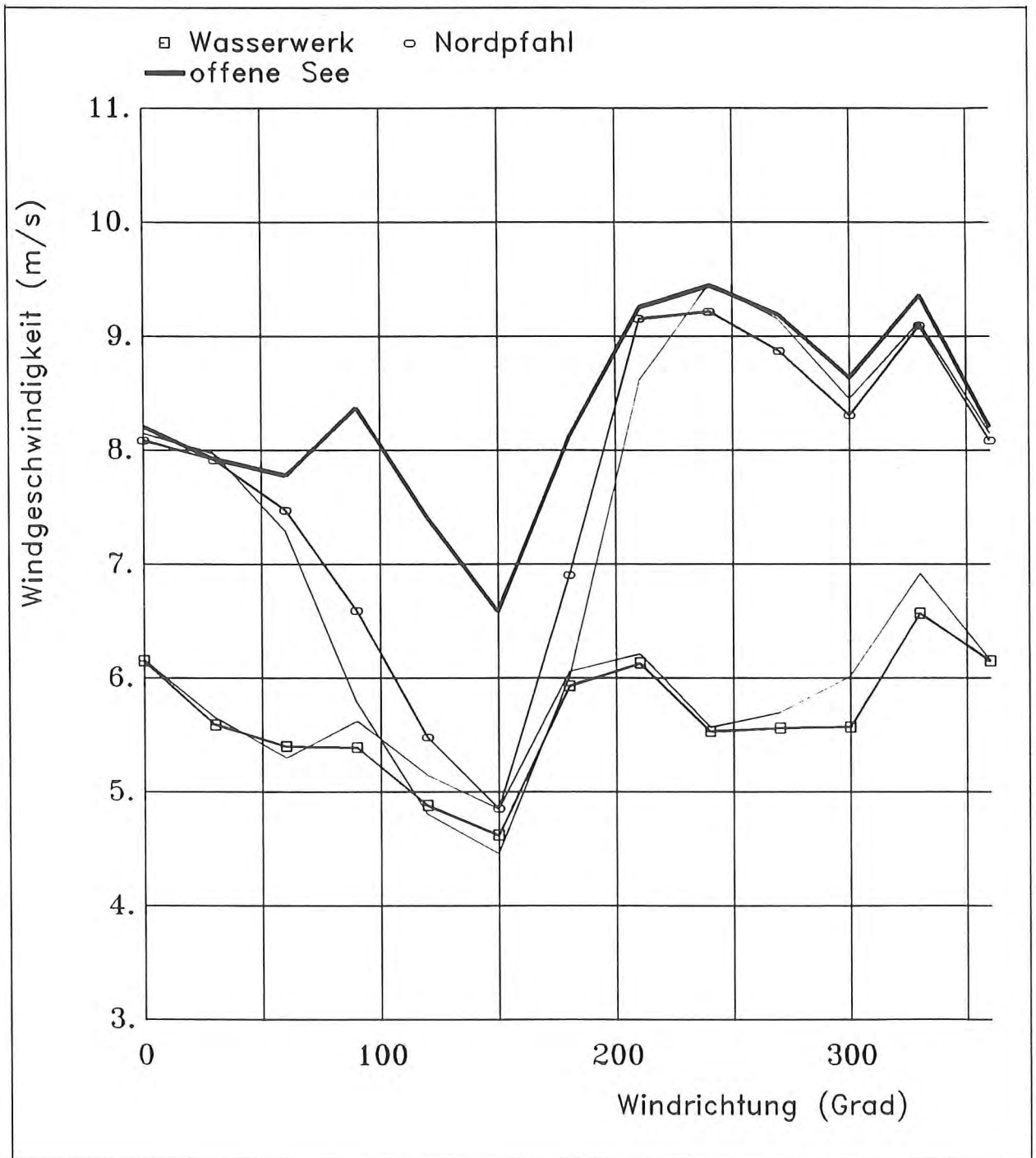


Abbildung 4.2:

Wie Abb. 4.1, für die Orte "Nordpfahl" und "Wasserwerk". Die sehr dicke einzelne Linie bezeichnet die Modellrechnung für die freie See.

einen anderen Ort 2 ist nun als gute Näherung sehr einfach. Es sind die Quotienten der in den Abb. 4.1 und 4.2 dargestellten (gemessenen oder modellierten) Vergleichs-Windgeschwindigkeiten u_v für jede Richtungsklasse i :

$$(2) \quad f_{i,1-2} = \frac{u_{v,i,2}}{u_{v,i,1}}$$

Diese Übertragungsfaktoren verwenden wir nun nicht nur zur Transformation von Mittelwerten, sondern auch für beliebige Einzelwerte der Windgeschwindigkeit:

$$(3) \quad u_2 = f_{i,1-2} * u_1$$

Dabei ergibt sich der Index i aus der zu u_1 gehörigen Windrichtung. In der Praxis der Übertragung von Einzelwerten interpolieren wir meist noch Zwischenwerte von f entsprechend der Windrichtung.

Diese Methode wurde schon für die Darstellung der Windverhältnisse am Nordpfahl (Abb. 4.2) verwendet, der nur im Zeitraum Juni bis Dezember 1991 Messungen lieferte. Hier wurden zunächst für diese 7 Monate nach (2) die entsprechenden empirischen Faktoren zur Übertragung von der Wetterstation auf den Nordpfahl berechnet und dann mit (3) die vierjährigen Mittelwerte der Wetterstation transformiert.

In der Abbildung 4.3 und numerisch in der Tabelle 3 sind nun die richtungsabhängigen Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeiten verschiedener Meßorte auf die freie See angegeben. Sie wurden zur Wahrung der inneren Konsistenz nur aus den Ergebnissen der Modellrechnungen berechnet, denn nur dadurch ist es möglich, Übertragungsfaktoren auch für Orte anzugeben, an denen es keine Messungen gibt. Es zeigt sich, daß die Windwerte der Wetterstation zur Übertragung auf die Seeverhältnisse bis zu 50% angehoben werden müssen, und zwar ausgerechnet für die Hauptwindrichtung Südwest (210-240°).

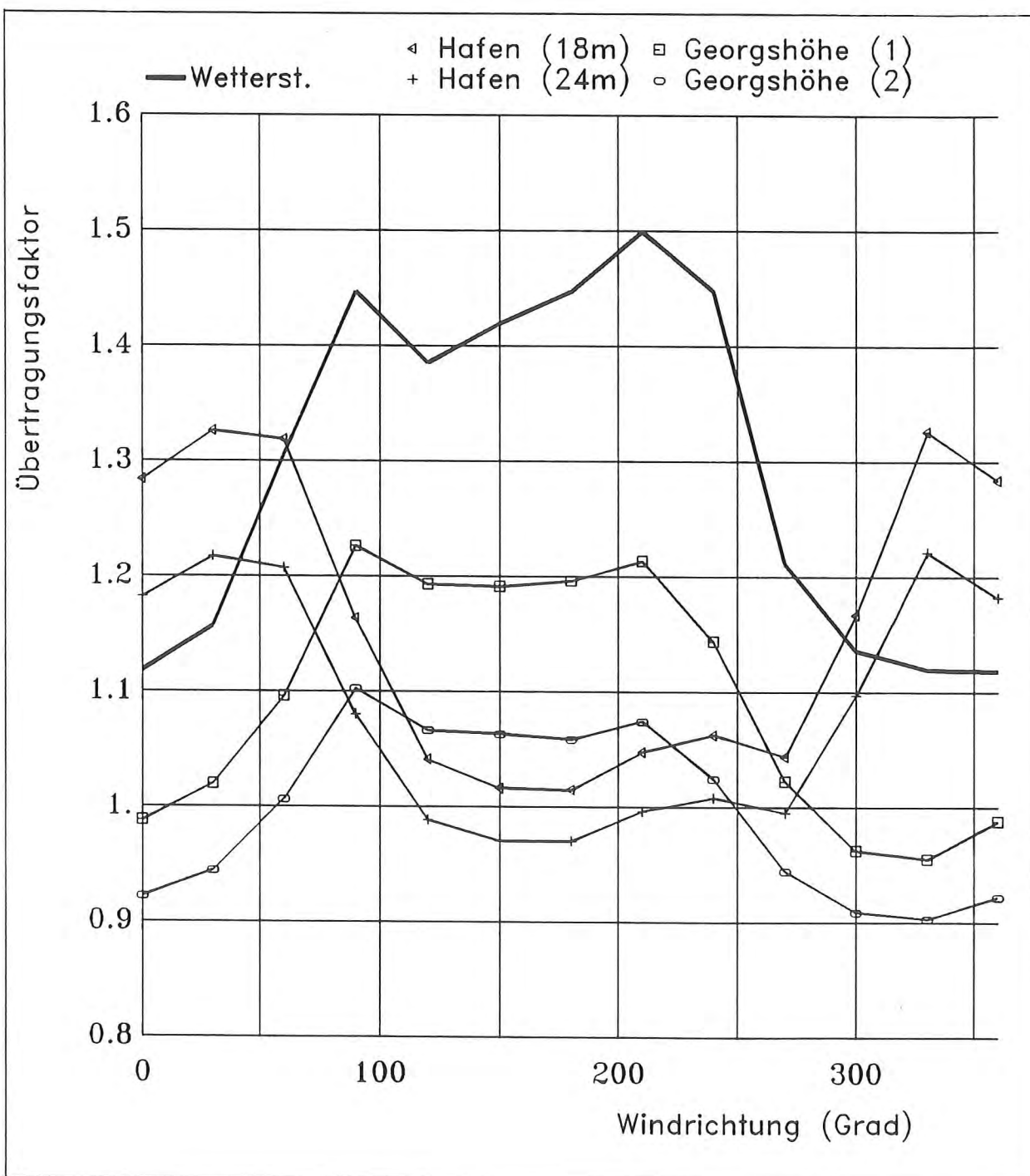


Abbildung 4.3:
Windrichtungsabhängige Faktoren zur Übertragung der
Windgeschwindigkeiten von fünf Orten der Insel Norderney auf die
freie See. Die Faktoren und eine Erläuterung zu den Orten sind
in Tabelle 3 angegeben.

Mit der Bezeichnung "Wetterstation" ist deren heutiger Standort am Januskopf gemeint, der am 1.9.1981 eingerichtet wurde. Die Meßhöhe beträgt hier 12 m über Grund (23 m über NN). Vorher befand sich die Wetterstation auf der "Georgshöhe", etwa 200 m westlich der heutigen Station. Die Höhe des Windmessers betrug dort vom 5.10.60-12.4.66 33m über NN, vom 12.4.66-11.12.78 44m über NN und vom 11.12.78-31.8.81 wieder 34m über NN. Für den ersten und letzten Zeitraum können die gleichen Faktoren "Georgshöhe (1)", für den mittleren "Georgshöhe (2)" verwendet werden. "Hafen 18m" stellt die Übertragungsfaktoren für die neue Station des STAIK am Oberfeuer Riffgat dar.

Es ist zu bedenken, daß die Übertragungsfaktoren mittlere Werte sind. Ihre Anwendung auf längerfristige richtungsabhängige Mittelwerte des Windes ergibt an der Zielstation mit einer Streuung von ca. $\pm 5\%$ gute Ergebnisse. Bei der Übertragung einzelner Windwerte müssen deutlich höhere (aber unsystematische) Abweichungen von etwa $\pm 10-15\%$ in Kauf genommen werden. Hier führt auch die Annahme der gleichen Windrichtung in Ausgangs- und Zielstation zu einer Unsicherheit von etwa $\pm 20^\circ$. Sehr schlecht werden die Übertragungs-Ergebnisse für Einzelwerte bei schwachem Wind, etwa unterhalb 3 m/s. Für die meisten technisch-wissenschaftlichen Anwendungen, wie etwa den Sturmflut- und Wind-Warndienst oder die Ermittlung des Windstaus, der Wellenanfachung und des Windenergiepotentials sind Fehler bei Schwachwind jedoch belanglos.

Die eingehende Untersuchung der empirischen Übertragungsfaktoren zwischen den fünf Stationen zeigt außerdem, daß der Faktor für eine Windrichtung keine wirkliche Konstante ist, sondern noch eine leichte Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweist, die aber im Rahmen der zuvor genannten Genauigkeit zu vernachlässigen ist.

4.4 Weitere Ergebnisse

In Abbildung 4.4 sind die 10-jährigen klimatologischen Mittelwerte (Linie mit Symbolen, 1982-91) des Windes im Vergleich mit den 4-jährigen (dünne Linie, 1988-91) des Projektzeitraums für die Wetterstation dargestellt. Die Anwendung der Umrechnungs-

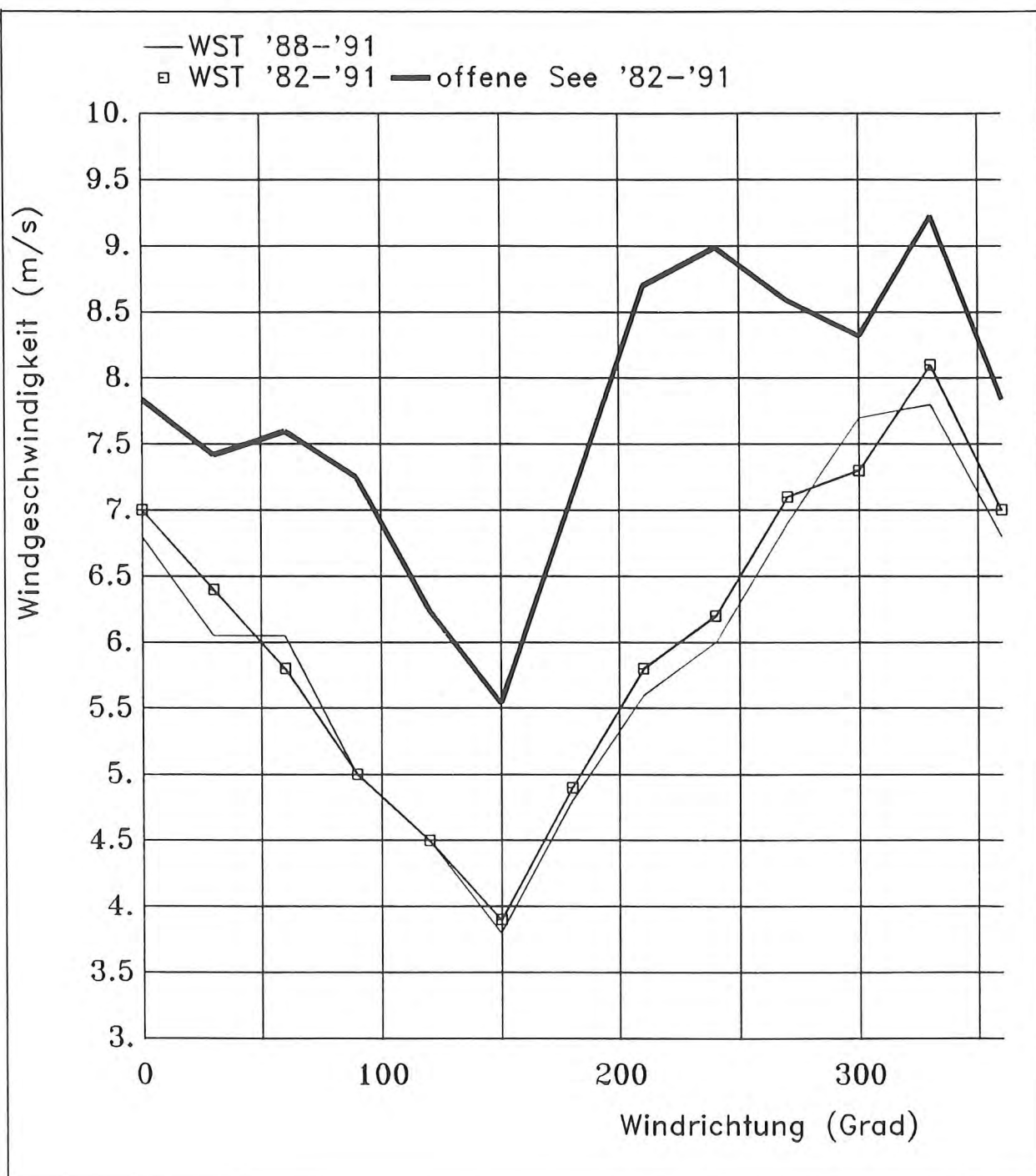


Abbildung 4.4:
Richtungsabhängige klimatologische Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für die Jahre 1982-1991 an der Wetterstation (WST) und auf der freien See. Zum Vergleich für die Wetterstation auch das Mittel über den Projektzeitraum 1988-1991 (dünne Linie).

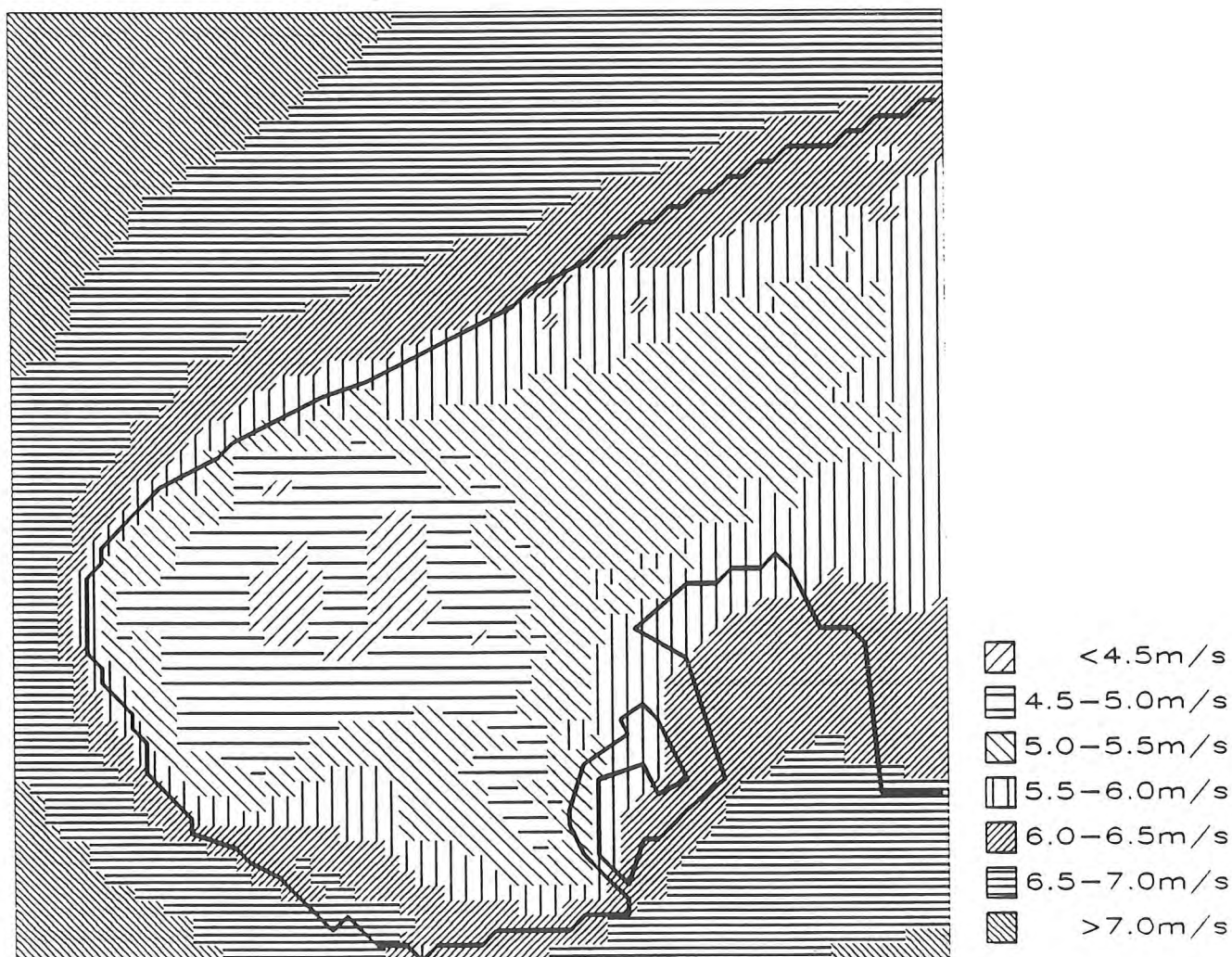


Abbildung 4.5:
Klimatologische Mittelwerte (1982-1991) der Windgeschwindigkeit
über dem Westkopf der Insel Norderney in 10m Höhe aus
Modellrechnungen.

faktoren (Tabelle 3) auf den 10-jährigen Zeitraum ergibt die richtungsabhängigen Mittelwerte des Windes für die freie See (genauer: etwa 5-10 km nördlich von Norderney). Dies ist die dicke Linie. Die Werte in Abb. 4.4 sind wirkliche klimatologische Mittelwerte, hier wurden in jeder Richtungsklasse alle Geschwindigkeitswerte zur Mittelbildung herangezogen (im Gegensatz zu den Abb. 4.1 und 4.2, siehe Abschnitt 4.2).

Wenn man die Modellrechnung für jede Richtung nun so skaliert, daß sich an dem Gitterpunkt, der der Meßhöhe an der Wetterstation entspricht, genau deren 10-jähriger Mittelwert ergibt, und dann die Felder für die 12 Richtungen (mit den zugehörigen Häufigkeiten gewichtet) mittelt, ist das Ergebnis ein raumdeckendes Feld der mittleren Windgeschwindigkeit. Eine Schicht daraus, in 10m Höhe über Grund (bzw. über der in Abschnitt 3 erwähnten Verdrängungshöhe), ist in Abbildung 4.5 in einem Raster von 50m für den Westkopf der Insel Norderney dargestellt. Das quadratische Rechengebiet hat eine Seitenlänge von 3,15 km (63 Gitterzellen).

Die mittlere Windgeschwindigkeit variiert erheblich, sie reicht von mehr als 7 m/s in der nordwestlichen und südwestlichen Ecke auf dem Wasser bis zu weniger als 4,5 m/s über der Stadt (da hier die Verdrängungshöhe 7m beträgt, ist dieser Windwert 10m höher, also 17m über dem Straßenniveau zu finden).

5. Schlußbemerkung

Es hat sich gezeigt, daß die Windmessungen auf Norderney keineswegs für die Windverhältnisse auf See repräsentativ sind. Vielmehr müssen die Werte für einige Windrichtungen zur Übertragung nach See erheblich modifiziert werden. Mit wenigen Ausnahmen gilt dies für alle Küsten- und Inselmeßstellen.

Das dargestellte Verfahren, approximative Faktoren zur Übertragung des Windes von einem auf andere Orte über Modellrechnungen zu bestimmen, ist nun ohne wesentliche Einschränkungen auch auf andere Gebiete an den deutschen Küsten übertragbar. Es kann

sogar auf geplante Anemometer-Standorte angewendet werden, an denen es noch keine Vergleichsmessungen gibt, denn man benötigt nur relative Geschwindigkeitsunterschiede. Modellrechnungen sind allerdings aufwendig. Die Orographie und die Bodenrauigkeit müssen in einem feinen Raster bereitgestellt werden und die Rechnungen kosten relativ viel Rechenzeit.

Wir danken den Mitarbeitern der Forschungsstelle Küste für die freundliche Hilfe bei der Planung, Einrichtung und Betreuung unserer Windmeßeinrichtungen auf Norderney.

6. Literaturverzeichnis

CHRISTOFFER, J. und ULBRICHT-EISSING: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 147, 2. Auflage, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 1989

TROEN, I. u. PETERSEN, E.L.: Europäischer Windatlas. Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark, 1990

TRACI, R.M., PHILLIPS, G.T. u. PATNIAK, P.C.: Wind Energy Site Selection Methodology Development, RLO/2440-78/2, 1978

SHERMAN, C.A.: A Mass-Consistent Model for Windfields Over Complex Terrain, Lawrence Livermore Laborator Report UCRL-76171, Rev. 1, 1976

HACKBUSCH, W.,: Multi - Grid Methods and Applications, Berlin, Heiselberg, New York, Tokyo, Springer 1985

Tabelle 1: Verfügbarkeit der Windmessungen an den Meßstellen auf Norderney

	1988	1989	1990
	1 7 1 7 1		
Hafen 24m	-----*4	-----	-----
Flugplatz	---	-----	-----
Wasserwerk	-----	-----	-----
Wetterstation	-----	-----	-----
Wattpfahl		I-----	
Nordpfahl			

	1990	1991	1992
	1 7 1 7 1		
Hafen 24m	-----	-----*5	*8-----
Flugplatz	--*1	-----	-----
Wasserwerk	--*3	-----	-----
Wetterstation	-----	-----	-----
Wattpfahl			
Nordpfahl	I---*2	*6-----	*7-----

*1 (Umbau Flughafen Mast)
 *2 (Blitzschlag)
 *3 (Stromausfall)
 *4 (Messanlage def.)

*5 (Anlage ausgefallen)
 *6 (nach *2 nur Richtung)
 *7 (Messeinrichtung OK)
 *8 (Neue Siggelkow Anlg)

Tabelle 3: Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeit auf die freie See für einige Orte auf Norderney

	Windrichtung (Grad)											
Ort	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
A	1,12	1,16	1,31	1,45	1,39	1,42	1,45	1,50	1,45	1,21	1,14	1,12
B	0,99	1,02	1,10	1,23	1,19	1,19	1,20	1,21	1,14	1,02	0,96	0,95
C	0,92	0,94	1,01	1,10	1,07	1,06	1,06	1,07	1,02	0,94	0,91	0,90
D	1,18	1,22	1,21	1,08	0,99	0,97	0,97	1,00	1,01	1,00	1,10	1,22
E	1,28	1,33	1,32	1,16	1,04	1,02	1,01	1,05	1,06	1,04	1,17	1,33

A: Derzeitige Wetterstation (WST), ab 1.9.1981
 B: Ehem. WST Georgshöhe (1), 5.10.60-12.4.66 u. 11.12.78-31.8.81
 C: Ehem. WST Georgshöhe (2), 12.4.66-11.12.78
 D: Hafen 24m (Projektmeßstelle)
 E: Hafen 18m, Station des STAIK Oberfeuer Riffgat, ab Dez. 1991

Anhang

Projekt 104 des DWD, Windmessungen auf Norderney P R O T O K O L L

- 16.05.86 Projektgenehmigung beantragt vom SWA, Az.: M2/64.30.25/425.86
02.07.86 Genehmigung des Projektes durch P, Az.: F4/44.06.10/44.05.10
28.10.86 Übereinkunft zwischen der Forschungsstelle Küste, Norderney
und dem SWA über Bewirtschaftung der Projektmittel
02.03.87 1. Ausschreibung über 3 Windmeßeinrichtungen (+1 Ersatz)
durch IAH: B47
24.03.87 Erweiterung der o.a. Ausschreibung wegen Projekt 114
(Helgoland). Letzter Abgabetermin: 30.04.87
14.07.87 Einleitung der Beschaffungsmaßnahmen von 2 10-m-Masten
durch IAH
19.06.87 Benachrichtigung über Bewilligung der Mittel für
1987 - 89 durch Forschungsstelle Küste, Az.:63-09-4/9
19.08.87 Auftrag an Fa. Siggelkow über Windmeßeinrichtungen,
Best.-Nr. 8008/87-11
01. - Besuch der Insel Norderney durch H. Schmidt und
03.09.87 H. Christiansen. Festlegung der Standorte Hafen
am Oberfeuer (24m-Mast), Wasserwerk II (10 m-Mast),
Flughafen (Windsack-Mast Ost, Aufstockung auf ca. 10 m)
16.09.87 Genehmigung für die Aufstellung des 10 m - Mastes
am Wasserwerk II durch Stadtwerke Norderney
17.09.87 Antragstellung auf Deichbaurechtliche Genehmigung für
den 24 m - Mast durch SWA, Az.: M2/64.70.104/493.87
19.10.87 Genehmigung für Station Wasserwerk durch Nationalpark-
verwaltung, Az.: IV/61-9701-
20.10.87 Deichbaurechtliche Genehmigung durch Landkreis Aurich,
Az.: IV/672/67N/663305
22.10.87 Lieferung von 4 Alu-Geräteträgern durch Fa. BEMEG, HH.
für 24m-Mast
22.10.87 Transport von Gerätschaften (24m-Mast) von WST. List
zur AMBF Ahrensburg
30.11.87 Containertransport Ahrensburg - Norderney, Fa. Hoyer
30.11.-
04.12.87 Installierung des 24m-Mastes auf Norderney am Hafen
durch Christiansen / Hofmann
- Einweisung des H. Flessner / Fst. Küste in die
Problematik des 24m-Mastes
- Bestückung, Kanal-Nummern u. Lageplan s. Anlagen 1-3
04.12.87 16.00 MEZ Aufnahme des Versuchsbetriebs der Wind-
registrieranlage "Regensburg" am 24m- Mast
09.12.87 Antrag auf Zustimmung gem. Par. 82 der Niedersächs.
Bauordnung für den 24m-Mast an Bezirksregierung Weser-
Ems in Oldenburg durch SWA über Fst. Küste,
Az.: M2/64.70.104/703.87
09./10.12 Genehmigung der Aufstockung des Windsackmastes am
Flughafen durch Fst. Küste / Fluhaney usw.
23.12. Zustimmung gem. Par. 82 der NBauO. durch Bezirksregierung
Weser-Ems für den 24m-Mast, Az.: 310.2-24231-52020(119/87)
13.01.88 Lieferung der Siggelkow - Registrieranlagen, 1 in SWA,
2 + Ersatzfühler für Norderney. Ersatzfühler in blauem
Koffer liegen in der WST, Lieferschein IAH 0029
17. - Installation der Meßanlagen Wasserwerk II und Flughafen
24.01.88 durch Christiansen u. Hofmann u. IAH (Wasserw. nur)
- Anschluß am Wasserwerk nur provisorisch mit Gummi-
leitung bis Anschlußkasten (Wasserwerkseit.) fertig

- Auftrag für Erdkabel und Blitzschutz am Wasserwerk wird über H. Peinecke / FST. Küste vergeben
 - Kein bzw. nur schlechter Empfang der DCF-77 am Wasserwerk
 - Am Flughafen nicht optimaler Empfang der DCF-77 (beständiges Leuchten der Anzeigediode)
 - Probleme bei Anlauf der Registrierungen Wasserwerk und Flughafen (obwohl Strom da, keine Anzeigen der Registrierungen); erst bei erneuter Steckerbetätigung Anzeige. Registrierung auf Kassette also fraglich, wenn Strom wieder da nach Stromausfall.
 - Wassereintritt bei den 3 unteren Elektronikboxen, daher also auch der Ausfall zahlreicher Sensoren. Mit Kabelkitt alle Boxen abgedichtet. Neuinstallation s. Anlage 2. Niveau 1 wurde nicht bestückt, da Stromzufuhr in Boxen 1 defekt; wurde vom IAH später repariert.
 - Diverse Chips im Windrechner ausgetauscht. Justierlampe in Magnetbandgerät 1 war ausgefallen. Lampe aus Magnetbandgerät 2 genommen. Aufzeichnung läuft also im Moment nur auf Tape 1.
- 23.01.88 12.45 MEZ Station Flughafen eingeschaltet.
19.00 MEZ Anlage "Regensburg" wieder in Betrieb genommen.
- 24.01. 10.10 MEZ Station Wasserwerk eingeschaltet.
- 02.-04.03 H. Schmidt Besuch auf Norderney.
- Wieder stand die Anlage am Wasserwerk, Strom war da, aber keine Direktanzeige. Auswertung ergab später, daß tatsächlich keine Daten nach Stromunterbrechung auf Kassette waren. Siggelkow (H. Pierrot) schlug später den Austausch der Mikroprozessoren vor. Daraufhin wurde der sich im SWA befindliche Shelter bereits umgerüstet. 2 Mikroprozessoren werden auf der nächsten Fahrt nach Norderney mitgenommen.
 - DCF77-Antenne am Wasserwerk ausgetauscht, bester Empfang. Defekte Antenne über H. Witzel an Siggelkow zwecks Tausch abgegeben.
 - Magnetbandgerät 2 im Container wieder in Betrieb genommen.
- 02.03. H. Schmidt besucht Niedersächsisches Hafenamt (H. Giebel) in Norddeich. SWA kann die Thies-Windmeßanlage nutzen.
- 04.06. H. Siggelkow besucht Norderney: Antenne am Wasserwerk o.k., im Shelter aber Wasser? Antenne am Flughafen ausgetauscht: Jetzt bester Empfang.
- 15.06. Nachricht von H. Flessner(Forsch.-Stelle Küste): 10m-Mast hat festen el. Anschluß und einen Blitzschutz erhalten.
- 26.-29.7 Reparatur an der Elektronik des 24m-Mastes durch H. Schroers aus München, Christiansen, Hofmann. Etliche Chips waren defekt. Bei Ankunft gingen nur noch 1 Windfahne und 1 Anemometer. Bei Abfahrt am 29.7. war folgender Stand:
4m-Niveau : 1 Anemometer, 9m-Niveau: 1 Windfahne,
15m-Niveau: 3 Anemometer, 1 Windfahne(mit Ausfällen)
24m-Niveau: 1 Anemometer, 1 Windfahne.
Defekt waren 3 Anemometer-Kanäle.
Wasserwerk: Wieder etwas Wasser im Shelter. Anlage sonst o.k.
Flughafen: Anlage o.k.
Besprechung Schmidt-Fst. Küste: Alter Pfahl im Wasser vor der Georgshöhe soll nicht für den DWD aufgearbeitet werden, da erneute Deckwerksquerung erforderlich. Fst. Küste spült einen neuen Pfahl ein, den der DWD mitbenutzen kann.

- Norddeich: Besuch der Thiess-Windregistrieranlage im Hafenamt durch Christiansen: Die Registrierrollen werden nach Sommer-/Winterzeit aufgelegt, keine Kor. an den Werten.
- 19.8.88 Besuch des 24m-Mastes durch H. Hofmann: Registrierung wie bei Abfahrt am 29.7., aber alle Windfahnen ausgefallen. Chips wurden im Rechner ausgetauscht. Bei Abfahrt von H. Hofmann war folgender Stand:
- | | | | |
|--------------|---|------------|------------------|
| 4m - Niveau: | 1 | Anemometer | o.k. |
| 10m - " : 1 | " | und | 1 Windfahne o.k. |
| 15m - " : 3 | " | o.k. | 1 " tot. |
| 24m - " : 1 | " | und | 1 " o.k. |
- 4.10.88 Besuch von H. Hofmann auf Norderney. Windrechner am 24m-Mast steht. Wurde zur Reparatur ins SWA gebracht. Sensoren zeigten das Ergebnis v. 19.8., also soweit o.k.
- 9.-11.11. Christiansen u. Hofmann auf Norderney. Der Windrechner wurde gegen den Einschub von H. Dr. Schroers ausgewechselt. Ergebnis:
- | | | | |
|------------|---|------------|------------------|
| 4m-Niveau: | 1 | Anemometer | o.k. |
| 10m- " : 3 | " | und | 1 Windfahne o.k. |
| 15m- " : 3 | " | o.k. | 1 " tot |
| 24m- " : 1 | " | und | 1 " o.k. |
- Die Windfahne (Styropur weggeplatzt) im 10m-Niveau ausgewechselt gegen Ersatz von Siggelkow. Der Sensor wurde gelassen.
- 29.-30.5.89 Christiansen/Hofmann auf Norderney. Alle Stationen o.k. Erprobung der Seepfahlstat. an Land mit Hilfe des Seekabels. o.k.
- 02.12.89 Hofmann auf Norderney. 24m-Mast: Kan 1,4,5,7,8,9,A,F o.k.
- 23.02.90 Demontage am Flughafen (neuer Windsack-Mast).
- 12.-13.6.90 Hofm./Christiansen auf Norderney. Siggelkow-Anlage für Seestation in Container der FST. Küste installiert. Sensoren waren vorher durch FST. installiert worden. Nicht o.k.
- 31.7. Beginn der Messung an Seestation: Fehlerhaft.
- 9.-10.10.90 Hofmann / Christiansen auf Norderney. 24m-Mast: nur noch Kan. 9,A,F. Platinen 2 + 3 aus altem Windrechner in den "neuen" eingebaut. Alten Windrechner nach Hamburg mitgen. Station am Nordstrand: Blitzableiter ab, 1 Draht (Taktgeber WG) gezogen: Daten o.k. ? Flugplatz: DD 180 Gr. verdreht. Auch hier wird Blitzableiter demnächst wieder montiert. Sensorhöhe 8 m.
- Jan. 91 Vergl. ergeben: WR Nordstrand ab 09.10.90 o.k., FF nicht. FF Flugplatz ab 09.10.90 o.k., DD ca 180 Gr. verdreht.
- 07.01.91 DD Flugplatz wieder eingenordet (von FST Küste). Betrag?
- 9.-11.4.91 Hofmann/Christiansen auf Norderney. Alte Anlage am 24m-Mast demontiert. Neue (2x2-Sensoren)-Siggelkow-Anlage montiert. (Niveau 53 und 54).
- 20.06.91 FF an Nordstrand-Anl. von FST. ausgetauscht, jetzt auch FF o.k.
- 5.-7.11.91 Hofmann/Christiansen auf Norderney. Erdkabel am 24m-Mast verlegt (Stromversorgung Container). Flughafen Styropur-Windfahne gewechselt.
- 31.12.91 Projektende
- 12.6.92 Abschluß der Auswertarbeiten.
- 8.7.92 Bericht für "DIE KÜSTE" fertiggestellt.
- 11.8.92 Abschlußbericht fertiggestellt.