

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen
Postfach 44 67 - 24043 Kiel
Hindenburgufer 247 - 24106 Kiel

10. Juli 1995 17.07 Sep. 1995

Doppel

3
1

Institut für Erdmessung
Universität Hannover
Juni 1995

Schlußbericht zum
BMFT-Forschungsvorhaben

Präziser Höhenanschluß des Helgoländer Pegels

Förderungskennzeichen: MTK 0525 2

Bearbeiter: Dipl. Ing. H.-J. Goldan
Projektleiter: Prof. Dr. Ing. G. Seeber, Prof. Dr. Ing. W. Torge

031129-1

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen
Postfach 44 67 - 24043 Kiel
Hindenburgufer 247 - 24106 Kiel

E 10. Juli 1995 17 07. Sep. 1995

031129

Institut für Erdmessung
Universität Hannover
Juni 1995

Schlußbericht zum
BMFT-Forschungsvorhaben

Präziser Höhenanschluß des Helgoländer Pegels

Förderungskennzeichen: MTK 0525 2

Bearbeiter: Dipl. Ing. H.-J. Goldan
Projektleiter: Prof. Dr. Ing. G. Seeber, Prof. Dr. Ing. W. Torge

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Darstellung des Gesamtvorhabens	6
1.1 Zielsetzung des Vorhabens	6
1.2 Ablauf der Arbeiten im Projekt	6
1.3 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangsstand	7
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2 Der Helgoländer Pegel	9
2.2 Pegelmessungen auf Helgoland	10
2.3 Historische Höheneinmessungen	10
2.4 Überprüfungen des Pegelnullpunktes Helgoland	12
3 Höhensysteme	15
4 Meßstationen	16
4.1 Besetzte GPS-Meßstationen	16
4.2 Messungen auf der Forschungsplattform Nordsee	19
5 Das Fehlerkonzept beim GPS	21
5.1 Allgemeines	21
5.2 Auswertung der GPS Messungen	22
5.3 Allgemeiner Fehlerhaushalt	23
6 GPS-Meßkampagnen	31
6.1 Erste Kampagne 1991 mit Ashtech Empfängern	31
6.2 Zweite Kampagne 1992 mit Ashtech Empfängern	34
6.3 Dritte Kampagne 1993 mit Trimble Empfängern	36
6.4 Vierte Kampagne 1994 mit Trimble Empfängern	37
7 Auswertung der GPS-Kampagnen	40
7.1 Auswertung der ersten GPS-Kampagne 1991	40
7.2 Auswertung der zweiten, dritten und vierten GPS-Kampagne 1992-1994	42
7.3 Kombination aller vier Meßkampagnen	46
7.4 Einmessung der HPPS-Stationen und Friedrichskoog	48
7.5 Endgültige ellipsoidische Koordinaten	49
7.6 Vergleich mit früheren GPS-Kampagnen	50
8 Schweremessungen	52
8.1 Seegravimetrie	52
8.1.1 Daten früherer Schiffseinsätze	52
8.1.2 Vermessungsfahrt ATAIR 58	55
8.1.3 Vermessungsfahrt VICTOR-HENSEN	56

8.1.4	Auswertung der Seegravimetriedaten	58
8.2	Wattvermessung	60
8.3	Ergänzungen der Schweredatenbank	62
9	Geoidbestimmung	63
10	Höhenberechnung	65
10.1	Höhenberechnung für die Pegelstationen und Helgoland	65
10.2	Die Höhen der Permanentstationen	69
10.3	Die Höhe der Forschungsplattform	70
11	Bewertung der Ergebnisse	72
12	Literaturverzeichnis	73
13	Anhang	79
13.1	Übersicht der gemessenen GPS Sessionen	79
13.2	Konfidenzellipsen der GPS-Auswertungen	83
13.3	Ergebnisse der Wattgravimetrie	89
13.4	Punktbeschreibungen	94

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Balkenplan des Arbeitsablaufes	6
Abb. 2.1: Historische Lage der Pegel auf Helgoland (Rohde 1982)	11
Abb. 2.2: Beziehung von Helgoländer-Null und Normal-Null zum Pegelnullpunkt . .	14
Abb. 4.1: Lageskizze aller am Höhennetz beteiligten Meßstationen	18
Abb. 4.2: Forschungsplattform Nordsee	20
Abb. 6.1: Satellitensichtbarkeiten am 9.9.1991 für Helgoland	32
Abb. 6.2: Gemessene Satellitenkonfiguration am 9.9.1991 auf der Station Helgoland	33
Abb. 6.3: Satellitensichtbarkeiten am 5.5.1992 für Helgoland	34
Abb. 6.4: Gemessene Satellitenkonstellation am 6.5.1992 auf der Station Helgoland .	35
Abb. 6.5: Satellitensichtbarkeiten am 16.3.1993 auf der Station Helgoland	36
Abb. 6.6: Gemessene Satellitenkonstellation am 16.3.1993 auf der Sation Helgoland .	37
Abb. 6.7: Satellitensichtbarkeiten am 10.5.1994 für Helgoland	38
Abb. 6.8: Gemessene Satellitendaten am 10.5.1994 auf Helgoland	39
Abb. 7.1: Doppelte Differenzen L0 Helgoland-Büsum am 12.9.1991	41
Abb. 7.2: Lage der IGS und DÖNAV Stationen	43
Abb. 7.3: Sessionresiduen der 2.-4. Kampagne gegenüber einer gemeinsamen Netzlösung	46
Abb. 7.4: Höhenresiduen aller Sessions innerhalb der Projektlösung ZWWW5	47
Abb. 8.1: Fahrt GAUSS 33	53
Abb. 8.2: Fahrt GAUSS 49, Magnetik, Gravimetrie	53
Abb. 8.3: Fahrt GAUSS 52, Magnetik, Gravimetrie	54
Abb. 8.4: Fahrt GAUSS 99	54
Abb. 8.5: Fahrt ATAIR 9	55
Abb. 8.6: Kursplot der Profilfahrt ATAIR 58	56
Abb. 8.7: Kursplot der Profilfahrt VICTOR-HENSEN	57
Abb. 8.8: Verteilung aller 164 gravimetrischen Wattpunkte	61
Abb. 8.9: Gravimetrische Datenbank Ende 1994	62
Abb. 9.1: Isoliniendarstellung der Quasigeoidlösung	64
Abb. 13.1: Aufteilung der sechs Beobachtungssessions der Meßkampagne 1991	79
Abb. 13.2: Aufteilung der fünf Beobachtungssessions 1992	80
Abb. 13.3: Aufteilung der fünf Beobachtungssessions 1993	81
Abb. 13.4: Netzbild aller Sessions der Kampagne 1994	82
Abb. 13.5: Fixed-Lösung der 1. Kampagne 1991	83
Abb. 13.6: Float-Lösung der 1. Kampagne 1991	84
Abb. 13.7: Float-Lösung (W) der 2. Kampagne 1992	85
Abb. 13.8: Float-Lösung (W) der 3. Kampagne 1993	86
Abb. 13.9: Float-Lösung (W) der 4. Kampagne 1994	87
Abb. 13.10: Netzbild der Projektlösung	88

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1: Gemessene Landstationen in den GPS-Kampagnen	19
Tab. 5.1: Bekannte Driftwerte in der Höhenkomponente	28
Tab. 6.1: DÖNAV-Stationen zur absoluten Lagerung des GPS-Netzes 1991	32
Tab. 7.1: Koordinaten der DÖNAV-Stationen im WGS84	42
Tab. 7.2: GEONAP Rechenläufe für die Sessionen der Kampagnen 1992-1994	43
Tab. 7.3: Höhendifferenzen zwischen verschiedenen Programmläufen zur WWW-Lösung	44
Tab. 7.4: Standardabweichungen der Kampagnenresiduen zur Projektlösung	47
Tab. 7.5: Standardabweichungen der Höhendifferenzen auf den Basislinien nach Helgoland	48
Tab. 7.6: Ellipsoidische Koordinaten im WGS84 (ITRF93)	49
Tab. 7.7: Standardabweichungen der Basislinien zu Helgoland	50
Tab. 7.8: Differenz der Projektlösung zu KUESTMAC87	51
Tab. 7.9: Differenz der Projektlösung zu PEGEL90	51
Tab. 8.1: Frühere Fahrten mit Schiffen des BSH	52
Tab. 8.2: Genauigkeiten und Ergebnisse einzelner Seegravimetriefahrten	58
Tab. 8.3: Gesamtausgleichung der Kreuzungspunktdifferenzen	59
Tab. 9.1: Höhenanomalien aller Stationen	64
Tab. 10.1: Ausgleichung über alle 10 Pegelstationen, mit Neigung	67
Tab. 10.2: Ausgleichung über 9 Pegelstationen (ohne Borkum), ohne Neigung	68
Tab. 10.3: Höhen der Permanentstationen 0001 und 0008	70
Tab. 10.4: Höhenanschluß der Forschungsplattform Nordsee	71
Tab. 13.1: Ergebnisse der gravimetrischen Einmessung der Hafenananschlußpunkte	89
Tab. 13.2: Ergebnisse Wattgravimetrie 16.-30.9.1992	90
Tab. 13.3: Ergebnisse Wattgravimetrie 1.-21.10.1992	91
Tab. 13.4: Ergebnisse der Wattgravimetrie 19.6.-8.7.1993	92
Tab. 13.5: Ergebnisse der Wattgravimetrie 13.-28.8.1993	93

Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war es, den Höhenbezug des Helgoländer Pegels zum amtlichen Höhensystem des Festlandes herzustellen. Pegelregistrierungen auf Helgoland können damit auf das Höhenbezugssystem der Küstenpegel bezogen und mit diesen verglichen werden. Das Projekt liefert einen Beitrag zu den Fragen des „Global Change“ und des Küstenschutzes. Der Helgoländer Pegel trägt mit seinen langfristigen Ablesungen zu Aussagen über einen möglichen säkularen Anstieg des Meeresspiegels bei.

Die Messungen zur Höhenübertragung konnten unter Nutzung von Signalen der operationellen Satelliten des Global Positioning System GPS ausgeführt werden. Aus GPS Ergebnissen liegen die Höhenunterschiede zum Festland in dem ellipsoidischen Referenzsystem WGS84 vor. Das amtliche Höhensystem der Bundesrepublik Deutschland ist bisher das Normal-Null (NN) System mit normal-orthometrischen Höhen. Seitens der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen (AdV) wurde nach der deutschen Wiedervereinigung beschlossen, die Normalhöhen als amtliches Höhensystem (NHN Normalhöhen-Null) einzuführen. Im Küstenbereich hat dieser Wechsel des Bezugssystems jedoch keine Auswirkung. In diesem Vorhaben war angestrebt, die Höhenlage von Helgoland mit einer Zentimeter-Genauigkeit zu berechnen. Der Übergang von ellipsoidischen Höhen zu den NN-Höhen soll über ein präzises Quasigeoidmodell mit gleicher Genauigkeit erfolgen.

Die bisherige Schweredatenbank am Institut für Erdmessung (IfE) ließ für den Bereich der Deutschen Bucht nicht die geforderte Genauigkeit für ein Quasigeoidmodell erwarten. Im Rahmen des Projektes mußten daher gravimetrische Verdichtungsmessungen erfolgen. Auf der Nordsee waren dies zwei Schiffskampagnen mit Seegravimetern und GPS-Positionierung. Im Wattenmeer konnten trockenfallende Areale mit Relativgravimetern vermessen werden.

Die Arbeiten in diesem Projekt umfaßten im wesentlichen folgende Punkte:

- Höhenmessungen mit GPS in vier Kampagnen und Auswertung dieser statischen Messungen.
- Gravimetrische Messungen auf der Nordsee (Seegravimetric) mit Auswertung der Positionierung mit GPS und der Gravimeterdaten.
- Gravimetrische Vermessungen in den Wattgebieten und Anschlüsse zum Schweregrundnetz.
- Berechnung eines Quasigeoidmodells auf der Grundlage von Schweremessungen und topographischen Daten.
- Verknüpfung der GPS-Ergebnisse mit dem Quasigeoidmodell zur Höhenberechnung für Helgoland.

Die vier statischen GPS-Kampagnen wurden mit dem Programmpaket GEONAP ausgewertet. Die kinematischen GPS-Messungen an Bord der Schiffe zur Seegravimetrie wurde mit dem am IfE entwickelten Programmsystem GEONAV verarbeitet. Ebenso wurden alle Gravimeterdaten mit den Programmsystemen SEAGRA und GRAV ausgewertet und ausgeglichen. Eine abschließende Quasigeoidberechnung erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes „Europegeoid“ des IfE.

Die Kombination der GPS-Ergebnisse mit dem Quasigeoidmodell ergab für die bisherige Höhenreferenzfläche auf Helgoland eine Lage von 23,3 cm oberhalb der NN-Fläche. Bisherige Höhenangaben auf Helgoland sind um diesen Betrag zu vergrößern. Als Genauigkeit dieses Wertes wurden 2 cm ermittelt.

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangsstand

Für die präzise Auswertung der GPS-Daten liegt am Institut für Erdmessung das Programmpaket GEONAP (GEOdätische NAVSTAR Positionsbestimmung) vor. Diese Software wurde in der Arbeitsgruppe des Projektleiters mit den theoretischen Ansätzen entwickelt, welche bei *Wübbena (1988, 1989, 1991a, 1991b)* beschrieben sind. Dieses Programmpaket ermöglicht geodätische GPS-Auswertungen zur Bestimmung hochpräziser Antennenpositionen.

Schon 1989 wurde von *Seeber, Wübbena (1989)* auf die Möglichkeit der Bestimmung ellipsoidischer Höhendifferenzen mit einer Genauigkeit von 2-5 cm über 100-150 km Entfernungen mit GPS hingewiesen. Während des Projektes hat sich der Ausbauzustand mit GPS Satelliten weiter erhöht, so daß vier Satelliten nahezu über 24 Stunden verfügbar waren und optimale Voraussetzungen vorlagen.

Die Höhendifferenzen aus GPS beziehen sich auf das ellipsoidische Referenzsystem WGS84 (World Geodetic System). Der Übergang zu normal-orthometrischen Höhen im NN-System kann mit einem Quasigeoidmodell erfolgen. Zu Beginn des Forschungsprojektes lag am IfE ein präzises Quasigeoidmodell für Niedersachsen vor (*Denker 1988*). Mit zusätzlichen Messungen im Seebereich der Deutschen Bucht kann das Geoidmodell auch auf den Bereich bis Helgoland mit Zentimeter Genauigkeit erweitert werden. Eine Schwerefelddatenbank wird am IfE seit 1975 kontinuierlich ausgebaut. Die Programme zur Auswertung der gravimetrischen Daten (SEAGRA, GRAV) und zur Berechnung eines Geoides wurden am IfE entwickelt oder stehen dort zur Verfügung.

Mit der Kombination der Teilbereiche GPS und Gravimetrie ergeben sich gute Erfolgsaussichten zur Realisierung der Höhenübertragung nach Helgoland.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde durch eine Projektgruppe des *Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)* begleitet. Hierdurch wurde eine optimale Zusammenarbeit aller beteiligten Stellen ermöglicht. Folgende Stellen waren in der Projektgruppe vertreten (in alphabetischer Reihenfolge):

- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz,
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg,
- Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel,
- Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein, Kiel,
- Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, - Landesvermessung -, Hannover,
- Wasser und Schifffahrtsdirektion Nord, Kiel,
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Aurich.

Im weiteren wurde mit folgenden Stellen zusammengearbeitet oder es erfolgte eine Bereitstellung von Daten, Meßgeräten oder Schiffskapazitäten (in alphabetischer Reihenfolge):

- Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), Bremerhaven,
- Allsat GmbH, Hannover,
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe,
- Institut für Geophysik der Universität Hamburg,
- Institut für Vermessungswesen der TU Braunschweig,
- Landesvermessungsamt Brandenburg, Potsdam,
- Landesvermessungsamt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin,

- Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover,
- Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen (WTD71), Eckernförde.

Allen genannten Stellen sei in dieser Stelle für die sehr gute Zusammenarbeit und Unterstützung gedankt, ohne deren Hilfe die Durchführung des Projektes nicht möglich gewesen wäre.

2 Der Helgoländer Pegel

2.1 Variationen des Meeresspiegels

In erdgeschichtlichen Zeiträumen von einigen 10.000 Jahren kam es durch Klimaschwankungen beim Wechsel der Warm- und Kaltzeiten zu natürlichen Schwankungen des Meeresspiegels um bis zu 100 m. Die maximalen Veränderungen lagen bei bis zu 2-3 m pro Jahrhundert (2-3 cm/Jahr) (*Kellettat 1990*). Noch vor 5.000 Jahren lag der Wasserspiegel um ca. 2 m tiefer als heute. Derzeit befinden wir uns in einer Phase, in welcher der Meeresspiegel ansteigt.

Seit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert hat sich durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre um 23% erhöht. Dieser Effekt ist unter der Bezeichnung Treibhaus-Effekt bekannt, wobei es zu einer verminderten Wärmeabstrahlung an der Erdoberfläche kommt. Hiermit verbunden ist die Erwärmung der Atmosphäre und sekundär auch der Weltmeere. Die Zunahme der Temperatur der Weltmeere um $+1^\circ$ Celsius bewirkt eine Vergrößerung des Wasservolumens und damit einen klimatologisch bedingten Anstieg der Weltmeere von ca. 10-15 cm. Weitaus größer sind die Folgen eines Abschmelzen der Eismassen an den Polen. Beides bedingt einen säkularen Anstieg des Meeresspiegels und verstärkt noch den natürlichen Effekt.

Derzeit wird ein globaler Anstieg der Weltmeere von etwa 10-15 cm pro Jahrhundert beobachtet. Für die deutsche Nordseeküste läßt sich aus Pegelregistrierungen über den Zeitraum 1959 bis 1983 ein verstärktes Ansteigen des mittleren Tidehochwassers um 0,64 cm/Jahr ableiten (*Führböter, Jensen 1985*). Auf 100 Jahre extrapoliert würde dies einen Anstieg um 64 cm bedeuten. *Töppe (1993)* warnt davor, aus der 25-jährigen Zeitreihe eine 100-jährige Vorhersage abzuleiten. Sie hat die Einflüsse der astronomischen Tiden, des Luftdrucks und des Windstaueffektes auf die von *Führböter* und *Jensen (1985)* benutzten Zeitreihen eliminiert. Nach Abzug dieser Faktoren wurde für die letzten Jahrzehnte keine signifikante Beschleunigung festgestellt, was allerdings nicht als Entwarnung mißverstanden werden soll. Neuere, auf Klimamodellrechnungen basierende Prognosen über Meeresspiegeländerungen lassen bis zum Jahr 2100 ein um etwa 50 ± 25 cm höheres Meeresspiegelniveau erwarten (*Wigley, Raper 1992*).

Als Folge für die Küstengebiete führt ein Meeresspiegelanstieg auch zu einer stärkeren Überflutung der schwindenden Wattgebiete und damit einer größeren Wellenenergie an der Küste. Die Erosionswirkung des Wasser nimmt damit zu, und mit erheblichen Strand- und Vordeichverlusten ist zu rechnen. Die Menschen und Besiedlungen an den Küsten sind damit direkt vom Ansteigen des Meeresspiegels betroffen. Solange Deicherhöhungen möglich und machbar sind, sind die Marschgebiete nicht gefährdet.

Die wichtigsten Instrumente zur Überwachung der Wasserstände sind Pegel mit lang zurückreichenden Meßreihen. Die Höhenlage und Stabilität der Pegel muß gesichert und bekannt sein, um die Ablesungen auf ein gemeinsames Höhenbezugssystem zu reduzieren. Mit einem in seiner Höhe nicht stabilen Pegel können keine sicheren Aussagen zu den Klimaveränderungen getroffen werden, zumal die vertikalen Bewegungen an der Deutschen Nordseeküste in der gleichen Größenordnung wie der vermutete Anstieg des Meeresspiegels liegen. *Augath (1993)* nennt signifikante Senkungen der Deutschen Nordseeküste um bis zu 14 cm pro Jahrhundert. Wird diese Senkung nicht beachtet, so scheint es an den Pegeln zu einem Anstieg des Meeresspiegels in der gleichen Größenordnung zu kommen. Nur eine

präzise geodätische Überwachung kann gesicherte Aussagen zu vertikalen Bewegungen der Pegel treffen und letztlich die Ursachen des registrierten Meeresspiegelanstiegs klären.

Pegel messen die Wasserstände für ein regional begrenztes Gebiet. Die Ablesungen werden direkt von der Morphologie des Meeres, der Küste und den Strömungsverhältnissen vor Ort beeinflusst. Die Küstenpegel lassen damit keine direkten Aussagen zu den Meeresspiegelständen zu. Bauliche Veränderungen (wie Ausbaggern) zeigen Einflüsse auf die Ablesungen. Der Pegel auf Helgoland stellt einen Hochseepegel dar und ist weitestgehend frei von lokalen Störungen. Für Aussagen zu der Thematik des Meeresspiegelanstieges ist dieser Pegel daher sehr bedeutsam, allerdings stellt die Höhenzuordnung ein bisher nicht befriedigend gelöstes Problem dar. Mit dem *Global-Positioning-System* (GPS) und einem präzisen Quasigeoidmodell kann aus heutiger Sicht dieses Problem gelöst werden.

2.2 Pegelmessungen auf Helgoland

Auf den Konferenzen zur Europäischen Gradmessung 1864 und 1867 wurde die Aufstellung von registrierenden Pegeln in den beteiligten Ländern gefordert. Möglichst viele Küstenpegel sollten von den an das Meer grenzenden Ländern errichtet werden, um eine Bestimmung des Mittelwassers der betreffenden Meere zu ermöglichen (*Helmert 1895*). Der mittlere Meeresspiegel stellt eine Annäherung an das Geoid dar und damit eine geeignete Bezugsfläche für Höhensysteme (*Torge, 1975*). Für die Deutsche Nordsee wurden als Pegelstandorte Helgoland (neben Bremerhaven) gewählt (*Lohrberg 1966*).

Da die Insel Helgoland von 1814 bis 1890 zu Großbritannien gehörte, mußte für die Errichtung eines Pegels die zuständige Behörde um Erlaubnis gefragt werden. Ein Standpunkt auf Helgoland hatte die damals begründeten Vorteile „... *einen richtigen Vergleich der mittleren Höhen der Meeresoberfläche mit den Meßorten an der Küste zu erhalten.*“, „... *die kontinentalen Hebungen und Senkungen zu beurteilen, denen die Küsten ausgesetzt sind.*“ und „... *um über die Richtigkeit der Tidewelle an der deutschen Nordseeküste Kenntnis zu erhalten.*“ (Brief (1877) von Dr. C. Börgen, Direktor des Kaiserlichen Observatoriums, an den Gouverneur von Helgoland, *Rohde 1982*).

Abbildung 2.1 zeigt die unterschiedlichen historischen Standpunkte des Pegels auf Helgoland bis heute. 1880 konnte mit Erlaubnis des britischen Kolonialministeriums ein erster Schreibpegel in der Mitte der Südostküste auf der Insel Helgoland [1, Abb. 2.1] errichtet werden (*Rohde 1982*). Nach 1900 wurde der Pegel oftmals verlegt und erst nach dem 2. Weltkrieg, nachdem die Insel wieder unter deutscher Verwaltung war, fest installiert. Die Beobachtungen des 1952 errichteten Pegels [2] im Südhafen wurden bis 1959 in den *Gewässerkundlichen Jahrbüchern* veröffentlicht. Dieser Schwimmerfernpegel wurde 1964 zum Standpunkt am Westdamm [5] verlegt und arbeitet noch heute als *Pegel Südhafen* parallel zum Hauptpegel. Dieser Hauptpegel Helgoland (*Pegel Binnenhafen*) wurde 1959 am Binnenhafen [4] errichtet. Seine Ablesungen werden seitdem in den *Gewässerkundlichen Jahrbüchern* veröffentlicht.

2.3 Historische Höheneinmessungen

Um die gemessenen mittleren Meereshöhen auf der Insel Helgoland mit den Registrierung an der Küste vergleichen zu können, ist ein Anschluß des Pegel-Nullpunktes (PNP) an das Höhennetz des Festlandes erforderlich. Ein Pegel ist nach der *Pegelvorschrift (1978)* so zu

installieren, daß seine Null-Marke (Pegel-Nullpunkt) bei der ersten Festlegung eine Höhe von 5,000 m unter Normal-Null (NN) bekommt (Abb. 2.2). Die Ablesungen eines Pegel variieren mit dem örtlichen Tidehub somit um einen Mittelwert von ca. 5 m. Die Höhenlage des PNP zu NN wird durch sogenannte Pegelfestpunkte mindestens alle zwei Jahre überprüft und gegebenenfalls berichtigt. Für die Küste ist der Grenzwert auf zwei Zentimeter festgelegt worden. Alle 15-20 Jahre werden die Küstenpegel durch ein Nivellement an das Deutsche Haupthöhennetz (DHHN) angeschlossen.

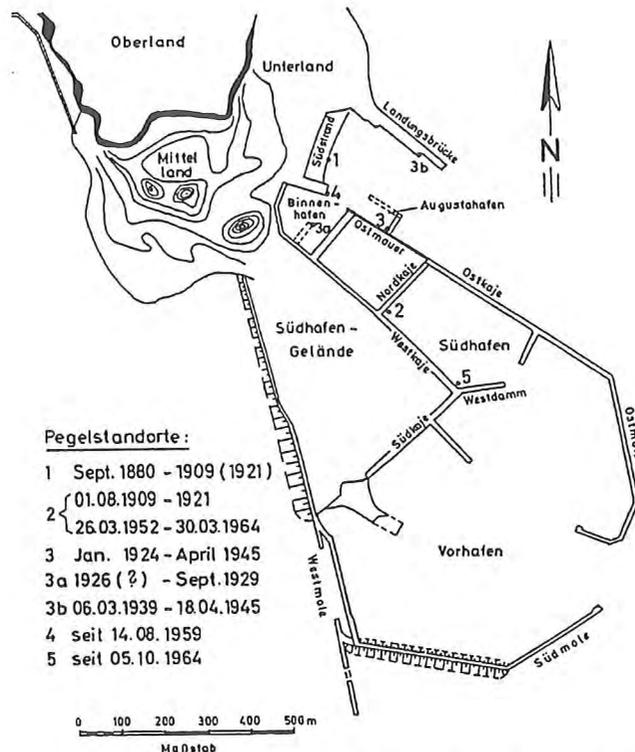


Abb. 2.1: Historische Lage der Pegel auf Helgoland (Rohde 1982)

Auf Helgoland war zur Zeit der Errichtung des ersten Pegels kein Bezug zum NN Höhensystem vorhanden. Es wurden in den darauffolgenden Jahren Höhenübertragungen vorgenommen. Das Ergebnis dieser ersten Berechnungen stellt die noch heute gültige Festlegung des amtlichen NN-Höhensystems auf Helgoland dar. In der heutigen Zeit werden Abweichungen dieser Realisierung zum NN-System vermutet. Genaue Angaben werden noch später in diesem Kapitel gemacht. Das amtliche Höhensystem auf Helgoland ist zwar das NN-Höhensystem, aber es liegt ein abweichendes Bezugssystem vor, welches im folgenden das „Helgoländer-Null“-System (auch HN) genannt werden soll. Die Entstehung dieses Helgoländer-Null-Systems soll im folgenden beschrieben werden.

1878 erfolgte die erste trigonometrische Höhenübertragung nach Helgoland mit gegenseitigen und gleichzeitigen Zenitdistanzen. Sie wurde vom Preußischen Geodätischen Institut zum heute zerstörten Astronomischen Pfeiler (A.P.) auf dem Oberland vorgenommen (Helmert 1895). Gemessen wurde ein Netz mit drei Linien zwischen Stationen auf Neuwerk

(Leuchtturm), auf Wangerooge (Turmpfeiler) und auf Helgoland mit Universalinstrumenten. Als Ziele dienten Heliotrope auf den Stationen.

Die Tagesmittel der gemessenen Höhenunterschiede 1878 weisen große Differenzen zueinander auf. So liegen die Höhenunterschiede für Helgoland-Wangerooge in einem Bereich von 24,5-27,5 m und für Helgoland-Neuwerk bei 21,9-25,3 m. Einige Meßtage mit besonders großen Abweichungen wurden daher nicht genutzt. Für die Auswertung wurde eine Auswahl der trigonometrischen Ergebnisse vorgenommen, wobei die Gruppenmittel von zwei Tagesbeobachtungen möglichst übereinstimmen sollten. Die Genauigkeiten der gemittelten Höhenunterschiede betrug nach *Helmert (1895)* ca. 0,10 m (zu Wangerooge) und 0,21 m (zu Neuwerk) (entsprechend 0,5" bzw. 0,9").

1881 fanden nochmals Messungen auf der ungenaueren Verbindung Neuwerk und Helgoland statt. Die Ergebnisse zeigten Abweichungen von etwa 1 m zu denen von 1878. *Helmert* schreibt hierzu, daß diese Ergebnisse wenig Vertrauen verdienen, da nur diese einzige Linie beobachtet wurde und der Luftzustand nicht über die zusätzliche Verbindung Wangerooge-Neuwerk kontrolliert werden konnte. Eine erste Auswertung der Ergebnisse Helgoland-Neuwerk zeigte eine Streuung der Ergebnisse, je nachdem ob zur Ebbe- oder Flutzeit gemessen wurde. Die Begründung ist in den Strahlkrümmungen über den großen Wattarealen vor Neuwerk zu suchen. Zwischen Helgoland und Wangerooge zeigte sich dieser Effekt nicht. In einer Messung mit den Punkten in Schilling, Roter Sand (Leuchtturm) und Wangerooge wurde 1888 der Beobachtungspunkt auf Wangerooge an Normal-Null angeschlossen.

Das Endergebnis für Helgoland ist in einem Brief vom 10. Juli 1891 von Prof. *Helmert* an Oberst Morsbach, dem Chef der Trigonometrischen Abteilung der Königl. Preuß. Landesaufnahme, handschriftlich zu entnehmen (vom BSH überlassen). Darin gibt *Helmert* die Höhe des astronomischen Pfeilers (A.P.) zu 56,141 m aus trigonometrischen Messungen nach Wangerooge an. Aus Beobachtungen des Mittelwassers auf Helgoland 1882 und 1884 zu Cuxhaven ergab sich eine Höhe des A.P. von 56,80 m über dem Mittelwasser. Das gerundete Mittel beider Werte gibt eine Höhe des A.P. von **56,50 m**. Da beide Zahlenwerte um mehrere Dezimeter unsicher sind, erschien die Mittelbildung und Festsetzung dieser Höhe damals als einziger Weg um zu einer brauchbaren Lösung für Helgoland zu kommen. Das Höhensystem auf Helgoland hat daher zu den Pegelbestimmungen über Cuxhaven eine Differenz von 30 cm.

Das damalige Ziel, den neuen Pegel auf Helgoland höhenmäßig an die Küste anzuschließen, konnte nicht erreicht werden. Ein Niveauunterschied zwischen dem auf Helgoland gemessenen Mittelwasser und auf dem Festland konnte nicht nachgewiesen werden, zumal in die Höhenberechnung selbst die Zielgröße des Mittelwassers einfloß. Der Pegel auf Helgoland wurde mit einem Pegelnullpunkt (PNP) von -5,00 m installiert, welches einer Höhe im „Helgoländer-Null“ System (HN) entspricht.

2.4 Überprüfungen des Pegelnullpunktes Helgoland

In der folgenden Zeit wurden wiederholt Versuche zum Anschluß des Pegels auf Helgoland an das NN-System unternommen (*Lohrberg 1966, 1980 und 1987*):

- 1932 wurde von *Weinold* die Fehllage des Pegelnullpunkt (PNP) Helgoland um 1930 zu **30 cm** (-470 cm ü. NN.) aus Vergleichen mit den mittleren Tidemittelwasser der Pegel Süderhöft und Wilhelmshaven bestimmt.

- Eine Berechnung aus Tidemittelwasser (Tmw) ergab für die Jahre 1939 bis 1945 eine Differenz der Höhen für Helgoland und Cuxhaven von **38,4 cm**. Die Eignung der Aufzeichnungen des Pegels Cuxhaven erscheint nach *Lohrberg (1966)* durch noch vorhandene Einflüsse der Elbe eingeschränkt.
- 1951 ermittelte das damalige *Deutsche Hydrographische Institut (DHI)* aus Vergleichen des MTmw mit dem Pegel Cuxhaven die Fehllage des PNP auf Helgoland zu **38 cm** (- 462 cm ü. NN.).
- Ein hydrostatisches Nivellement durch das *Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG)* scheiterte 1950 an den hohen Kosten und der Beschaffung des nötigen Schlauches.
- *Lohrberg* berechnet 1966 einen Höhenunterschied zwischen NN und Helgoländer-system von **32 cm** (± 1 cm) (-468 cm ü. NN.) über Anschlüssen zu den Pegeln Büsum und Roter Sand (*Lohrberg 1966*).
- Die Arbeitsgruppe „HN-Modelle“ des Kuratoriums für Küsteningenieurwesen (KFKI) berechnete aus einer Tide des Jahres 1976 die Fehllage zu ca. **35 cm** (-465 cm ü. NN.).
- 1978 ermittelte *Liese* eine Fehllage von **20-22 cm** aus mittleren Tidehalbwassern (MT1/2w) aus Wasserstandsreihen der Jahre 1966/75. Wurden nur „Seepegel“ genutzt, so ergab sich eine Fehllage von **27,5 cm**. Ein Vergleich nur der Pegel Helgoland und Cuxhaven ergab aus diesen Meßreihen **43 cm**.
- *Lohrberg (1980)* gibt für den PNP Helgoland einen Versatz von **33 cm** aus MTmw Beobachtungen zu anderen Pegeln von 1953-77 an. Wie in anderen Veröffentlichungen wird für den Pegel Cuxhaven ein um 6 cm zu hoher Wert für MTmw ermittelt, weshalb dieser Pegel für Höheraussagen von Helgoland nicht geeignet erscheint. In Cuxhaven sind noch lokale Einflüsse der Elbe vorhanden.
- Nach *Monka (1984)* konnte eine Fehllage von **20 cm** vermutet werden. Dieser Wert wurde aus einem Gitter mit Mean-Sea-Level (MSL) Höhen berechnet.
- *Siefert/Lassen (1985)* geben aus einem Vergleich der Wasserstände 1975/79 eine Fehllage von **20 cm** an (- 480 cm ü. NN.).
- *Lassen (1989)* nennt **25,7 cm $\pm 1,3$ cm** aus Auswertungen von MTmw Ergebnissen der Jahre 1975/79 und 1982/86 in Verbindung mit Küstenpegeln.
- In den *Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern*, Küstengebiet der Nord- und Ostsee, wird die Höhe des Helgoländer-Null (HN) mit NN + **30 cm** geführt.

Diese Aufstellung soll nicht vollständig sein, zeigt aber, daß wiederholt eine Fehllage des Pegelnullpunktes (PNP) auf Helgoland berechnet wurde. Das bisher als „NN-Höhen“ bezeichnete Höhensystem auf Helgoland erfordert damit eine Korrektur bei einer Verbindung zum NN-System des Festlandes. Die Größenordnung dieser Fehllage ergab sich bisher zu 20-40 cm und zwar in dem Sinne, daß die Bezugsfläche Helgoländer-Null um diesen Betrag oberhalb der NN Bezugsfläche liegt (vereinfachte Skizze in Abb. 2.2). Um die Wasserstandswerte von Helgoland mit anderen Pegeln vergleichen zu können, muß die Höhe der Systemdifferenz den Ablesungen hinzuaddiert werden.

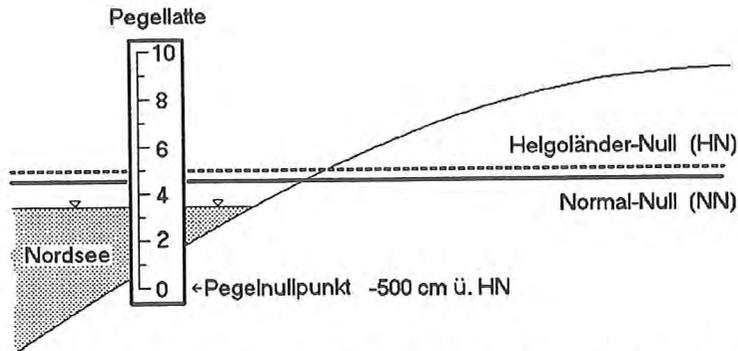


Abb. 2.2: Beziehung von Helgoländer-Null und Normal-Null zum Pegelnullpunkt

Eine Höhenübertragung mit GPS kann eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern bereitstellen. Die berechnbaren Koordinaten aus diesem Meßsystem liegen in dem ellipsoidischen Referenzsystem WGS84 vor. Der Übergang zu den normalorthometrischen Normal-Null Höhen muß über die Verknüpfung mit einem Quasigeoidmodell entsprechender Genauigkeit erfolgen.

Die *Bundesanstalt für Gewässerkunde* (BfG) hat bereits im November 1986 Höhenübertragungen mit GPS nach Helgoland (Kampagne HELMAC86) über Stationen in Cuxhaven, Bremerhaven und Wilhelmshaven mit Ein-Frequenzgeräten Makrometer V1000 durchgeführt (*Meiswinkel 1987, BfG 1987*). Da Geoidmodelle zu der Zeit noch keine ausreichende Genauigkeit besaßen, kann die räumliche Veränderung der Pegel nur anhand der ellipsoidischen Höhen überwacht werden. Die Messung von 1986 stellt darin eine Null-Messung dar. Kontrollmessungen erfolgten im Januar 1987 (Kampagne HELMAC87) mit Makrometer V1000 und 2-Frequenzgeräten Makrometer II (*BfG 1988*). Als Standardabweichungen aus beiden Kampagnen ergeben sich für die ellipsoidischen Höhenunterschiede 3,8 cm.

Im Oktober 1987 unternahm die BfG die GPS Kampagne KUESTMAC87 mit Ein-Frequenzgeräten Makrometer V1000 als Kontrollmessung auf 22 Stationen (*BfG 1988*). Die Standardabweichungen der ellipsoidischen Höhen lagen bei 1,8 bis 3,4 cm, wobei die Höhendifferenzen zwischen den Stationen eine höhere Genauigkeit besaßen (*BfG 1989*).

1990 wurden weitere umfangreiche GPS-Messungen im Küstenbereich der Nord- und Ostsee im Rahmen der PEGEL90-Kampagne auf 44 Stationen mit 8 Zweifrequenz Ashtech L-XII Empfängern durchgeführt. Die damaligen Ergebnisse zeigen Standardabweichungen in der ellipsoidischen Höhenkomponente von 1,2 bis 4,2 cm nach der Auswertung, wobei die Koordinaten der Station in Cuxhaven festgehalten wurden (*TerraSat 1991*).

Im Rahmen des hier behandelten Vorhabens wurden vier GPS Meßkampagnen 1991 bis 1994 zur genauen Feststellung des Pegelnullpunktes Helgoland durchgeführt. Da diese Messungen auf den gleichen Stationen erfolgten wie schon seitens der BfG, können die Höhendifferenzen aus allen Projekten miteinander verglichen werden. Das bisherige Geoidmodell des IfE wurde durch Schweremessungen auf der Nordsee im Bereich der Deutschen Bucht um Helgoland und bisher noch fehlenden Daten auf den Wattgebieten verbessert und erlaubt den Übergang zu normal-orthometrischen Höhen. Ein Vergleich der Ergebnisse des IfE mit den Daten früherer Kampagnen erfolgt im Kapitel 7.6.

3 Höhensysteme

Die übliche Forderung an ein Höhensystem ist, daß zwei Punkte mit einer gleichen Höhe auch auf der gleichen Äquipotentialfläche liegen. Ein Höhensystem muß sich daher am Schwerfeld der Erde orientieren. Eine mögliche Bezugsfläche der nivellierten Höhen ist das Geoid mit den abgeleiteten *orthometrischen Höhen*. Das Geoid ist eine Äquipotentialfläche, welche sich höhenmäßig an den ruhenden mittleren Meeresspiegel anschließt.

Das Nivellement liefert den geometrischen Höhenunterschied zwischen zwei Stationen. Um aus nivellierten Höhenunterschieden orthometrische Höhen abzuleiten, muß eine orthometrische Korrektur an den Messungen angebracht werden. Diese kann über gemessene Schwerewerte an der Oberfläche entlang des Nivellementsweges und Schwerewerte auf dem Geoid ermittelt werden. Da letztere nicht gemessen werden können, sind hypothetische Annahmen über die Massenverteilung in der oberen Erdkruste nötig.

Bei der Anlage des deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) lagen keine Schweremessungen längs der Nivellementslinien vor. Die nötigen Schwerekorrekturen wurden aus dem Normalschwerfeld (Modellschwerewerte) der Erde berechnet. Es entstanden damit die *normal-orthometrischen Höhen*. Werden diese Höhen (NN-Höhen) von den Oberflächenpunkten nach unten abgetragen, so ist die Bezugsfläche nicht das Geoid, sondern die sogenannte *NN-Fläche*. Diese Bezugsfläche wird durch die Gesamtheit der Punkte 1. Ordnung des DHHN gebildet. Sie ist nicht stetig und hat weder physikalische noch geometrische Bedeutung. Die Höhe der NN-Fläche wurde vom Amsterdamer-Pegel an den Normalnullpunkt der früheren Berliner Sternwarte übertragen und festgehalten. Das Ergebnis eines Nivellements mit normal-orthometrischer Korrektur ist vom Weg des Nivellements abhängig.

Wird die Korrektur des Nivellement aus heute vorliegenden gemessenen Schwerewerten an der Oberfläche und dem Normalschwerfeld unterhalb der Oberfläche berechnet, so entsteht das System der *Normalhöhen*. Dieses Höhensystem ist hypothesenfrei. Werden die Normalhöhen von den Oberflächenpunkten nach unten abgetragen, so entsteht als Bezugsfläche das *Quasigeoid*.

Die Höhensysteme werden bei *Torge (1975)*, *Leismann u. a. (1992)*, *Schödlbauer (1993)* und *Grote u. a. (1995)* ausführlich besprochen. Die Differenzen zu einem Niveauellipsoid sind beim Geoid die Geoidundulation N , beim Quasigeoid die Höhenanomalie ζ und bei der NN-Fläche die NN-Undulation U_{NN} .

Die Differenzen zwischen orthometrischen Höhen, Normalhöhen und NN-Höhen liegen im Flachland bei wenigen Millimetern (*Wübbelmann 1993b*). Diese verschiedenen Höhen können in diesem Projekt so als gleich angesehen werden. Mit den Höhenanomalien-differenzen $\Delta\zeta$ aus einem Quasigeoid können die NN-Höhendifferenzen ΔH aus den ellipsoidischen Höhendifferenzen Δh zwischen zwei Punkten 1 und 2 nach

$$\Delta H_{12} = \Delta h_{12} - \Delta\zeta_{12} \quad (3.1)$$

berechnet werden. Am IfE wurden wiederholt Berechnungen eines Quasigeoidmodells für Deutschland durchgeführt (*Denker 1988* und *Denker 1989*). Mit der Ausweitung des Quasigeoidmodells auf den Bereich der Deutschen Bucht kann der Höhenanschluß von Helgoland an das NN-System erfolgen.

4 Meßstationen

4.1 Besetzte GPS-Meßstationen

Ziel dieses Forschungsprojektes war es, die Höhenlage des Pegels auf Helgoland im Normal-Null-Höhensystem (NN) zu bestimmen. Dazu mußten auf dem Festland eine Reihe von Höhenpunkten als Anschlußpunkte dienen. Da die Höhen der miteinzubeziehenden Küstenpegel auch untereinander vergleichbar sein sollten, war es ratsam, die Anschlußpunkte auf dem Festland ebenfalls in die unmittelbare Nähe von Pegelstationen zu legen.

Die GPS-Meßstationen wurden in Abstimmung mit der *BfG* in der Nachbarschaft von bedeutsamen Pegeln ausgewählt, möglichst auf identischen Punkten der GPS Kampagne PEGEL90. Eine Übersichtskarte mit allen Stationen ist in der Abbildung 4.1 gezeigt. In Frage kommen als höhenmäßig definierte Standpunkte sogenannte Pegelkontrollpunkte (Pegelfestpunkte) oder Höhenfestpunkte (NivP) der Landesvermessungen.

Die Aufgabe von Pegelkontrollpunkten ist die Höhengsicherung der eigentlichen Pegellatte (Schreiber). Die Höhenlage eines jeden Pegels soll durch mindestens drei voneinander unabhängige Pegelkontrollpunkte kontrolliert werden (*Pegelvorschrift, 1978*). Der auf Millimeter-Niveau nivellierte Höhenunterschied zwischen jedem Pegelfestpunkt und dem Pegelnullpunkt, dem sogenannten Sollhöhenunterschied, soll dabei durch einmalige Aufstellung eines Nivelliers gewährleistet sein und erfordert damit eine geringe Entfernung zwischen den Punkten. Die Nivellements müssen wenigstens alle zwei Jahre erfolgen. Die Pegelpunkte sind nach der *Pegelvorschrift (1978)* an das amtliche Normal-Null Höhengsystem über Höhenpunkte (NivP) anzuschließen und fortzuführen. Daher kann von einem Anschluß aller Pegelkontrollpunkte an das NN-System ausgegangen werden. Leider ist die Fortführung der Anschlußmessungen an Normal-Null nicht immer auf dem neuesten Stand, so daß ein unterschiedlicher Höhenstatus vorliegen kann. Eine Überprüfung des Höhenstatus aller genutzten Stationen war daher eine wichtige zusätzliche Aufgabe im Projekt.

Die GPS-Meßstationen müssen für die wiederholten Kampagnen auch eine genaue Lagedefinition zur exakten Zentrierung der Antenne besitzen. Die gemessenen Rohrfestpunkte hatten hierfür eine markierte Lagedefinition. Ebenso durfte die GPS Beobachtung nicht durch Abschattungen behindert werden. In der Nähe einiger Pegelstandpunkte konnte kein Pegelfestpunkt oder NivP gefunden werden, der allen Anforderungen entsprach. Schon für die PEGEL90 Kampagne wurden daher seitens der örtlichen Wasser- und Schifffahrtsämter Hilfspunkte in Bremerhaven, Wilhelmshaven und Dagebüll sowie auf Helgoland eingerichtet und an das Landeshöhennetz angeschlossen.

Die Tabelle 4.1 enthält eine Zusammenstellung aller gewählten Meßstationen. Die meisten Stationen werden auch bei den entsprechenden Stellen der Landesvermessungsämter als NivP geführt, und Informationen über den jeweiligen Höhenstatus liegen vor. In diesem Falle sind die amtlichen Punktnummern in der Tabelle enthalten. Übrige Stationen wurden durch die Wasser- und Schifffahrtsbehörden oder dem *IfE* an amtliche Höhenfestpunkte (NivP) durch ein Nivellement angeschlossen. Die Punktnummern der Anschlußpunkte, sowie die zuständigen Wasser- und Schifffahrtsdirektionen (WSD) sind ebenfalls in der Tabelle enthalten. Auf allen Stationen außer Pellworm und Hörnum wurden bereits in der PEGEL 90 GPS-Kampagne der *BfG* als großräumiges Pegelkontrollnetz vom 14.-24. August 1990 Messungen ausgeführt.

Alle Höhen der Festlandstationen (Tab. 4.1) lagen nach den Überprüfungen oder Messungen in einem einheitlichen Höhenstatus vor. Das Höhenbezugssystem ist das Deutsche

Haupthöhenetz DHHN 85 in der Ausgleichung von 1985 (*Wübbelmann 1993a*). Die Höhe der Stationen wird bei der Landesvermessung in Niedersachsen als Höhenstatus 140 und in Schleswig-Holstein als Höhenstatus 185 geführt. Schleswig-Holstein beabsichtigt mit der Einführung der Normalhöhen die Statusangabe auf die AdV-mäßig vereinbarte Statusangabe 140 zurückzuführen. Dieses soll voraussichtlich noch 1995 geschehen. Nachfolgend soll jede der in das Vorhaben einbezogenen Meßstation des Projektes kurz beschrieben werden. Im Anhang befinden sich Lageskizzen und Photos der einzelnen GPS Meßstationen.

Borkum: Dieser Rohrfestpunkt wurde 1990 eingerichtet und über ein hydrostatisches Nivellement an das Festland angebunden.

Wilhelmshaven: Der Meßpunkt wurde ca. 1988 als Hilfspunkt für GPS-Messungen errichtet und kann als ein Exzentrum des TP´s 2114-0-10600 gelten (nach *WSA Wilhelmshaven*). Der vorliegende NN-Anschluß wurde vom *IfE* zu dem NivP 2414-9-00023 überprüft.

Bremerhaven: Bei diesem Punkt handelt es sich ebenfalls um einen gesonderten Hilfspunkt für GPS-Messungen. Die 1990 eingebrachte Vermarkung besteht nur aus einem ca. 30 cm langen Stahlrohr (nach *WSA Bremerhaven*). Der Anschluß an das NN-Höhensystem wurde vom *IfE* über den NivP 2417-9-00026 überprüft.

Cuxhaven: Dies ist der älteste Rohrfestpunkt im Projekt. Erste Höhenangaben stammen von 1929 und der Punkt ist damit vermutlich für das erste Nordseeküsten-Nivellement (NKN I) entstanden.

Büsum: Erste Höheninformationen über diesen Rohrfestpunkt liegen von der Landesvermessung Schleswig-Holstein aus dem Jahre 1982 vor.

Pellworm: Die Station ist 1991 vom WSA am neuen Niedrigwasser-Anleger als Schraub-eisen eingerichtet worden. Die Höheneinmessungen erfolgten über ein hydrostatisches Nivellement. Diese Station konnte noch nicht in der PEGEL 90 Kampagne beobachtet werden.

Dagebüll: Hierbei handelt es sich um einen 1990 für GPS-Messungen entstandenen Rohrfestpunkt. Die Höhenlage wurde durch ein Nivellementsanschluß an den NivP 1218-9-00130 durch das *IfE* überprüft.

Wittdün: Höheninformationen für diesen Rohrfestpunkt nach der Hamburger Bauart liegen ab 1989 bei der Landesvermessung Schleswig-Holstein vor.

Hörnum: Diese Station wurde 1991 vom WSA als Rohrfestpunkt errichtet.

List: Die Station ist als Rohrfestpunkt der Oldenburger Bauart ausgeführt und bis 1953 zurückdatiert.

Helgoland: Diese Station wurde als geeigneter Rohrfestpunkt für GPS 1990 vom WSA für die GPS Messungen errichtet. Die Station liegt auf dem örtlichen Tonnenhof und damit in der unmittelbaren Nähe des *Pegels Südhafen*.

Plattform: Während der zweiten GPS-Meßkampagne 1992 wurde eine Meßstation auf der *Forschungsplattform Nordsee* (FPN) betrieben. Zweck der Messungen war der höhenmäßige Anschluß des dort vorhandenen Pegels an das NN-System. Die Forschungsplattform wurde 1992 abgebaut, weshalb keine späteren Messungen mehr erfolgen konnten. Kapitel 3.2 behandelt die Messungen auf dieser Station.

Höhenbestimmung Helgoland

Pegelstationen

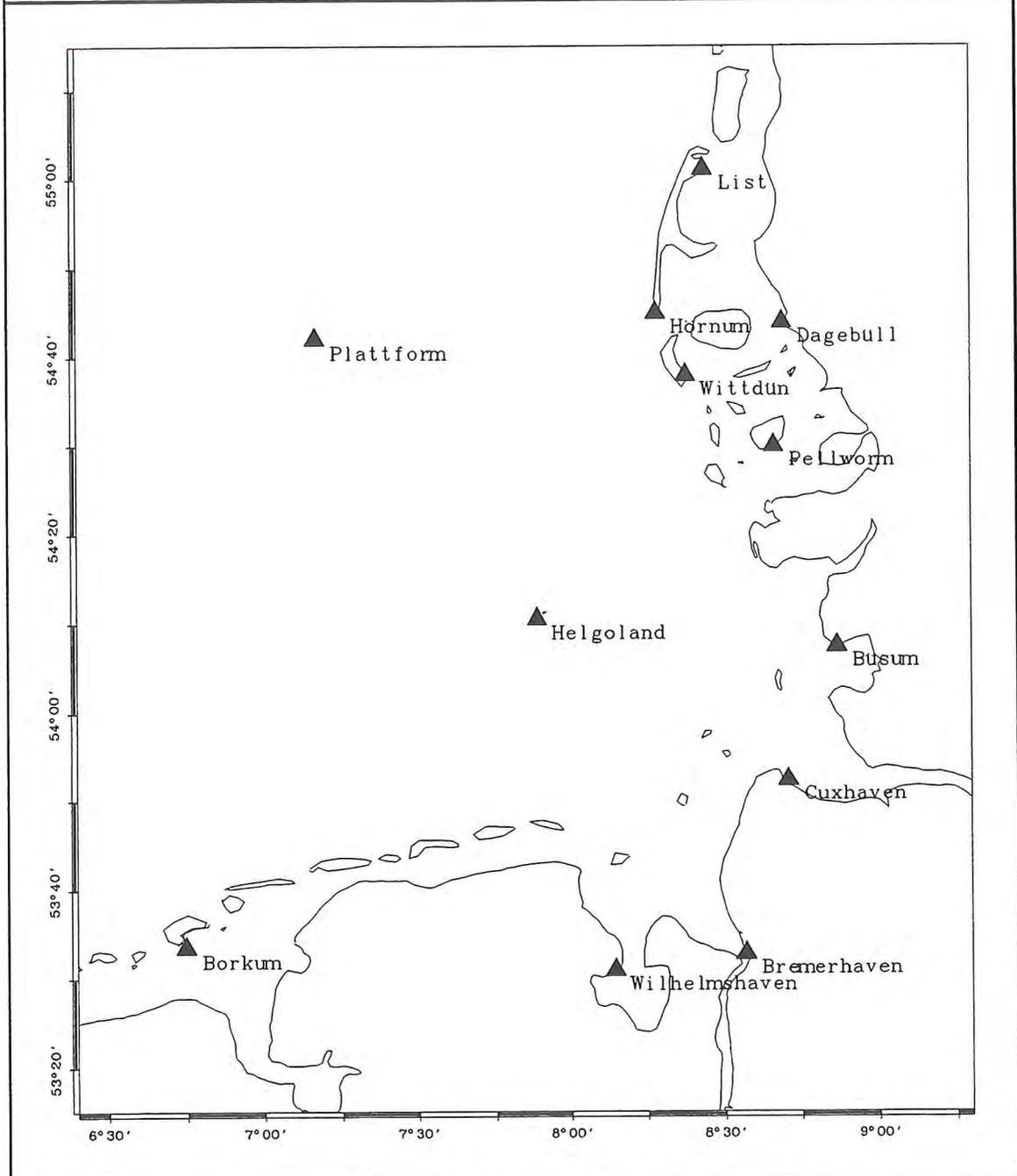


Abb. 4.1: Lageskizze aller am Höhennetz beteiligten Meßstationen

Abk.	Name	Punkt-Nr.	Höhe NN [m]	WSD	PEGEL 90	Bemerkungen
BORK	Borkum	2306-9-00668	4.502	NW	-	Ausfall in PEGEL90
WILH	Wilhelshaven	2414-0-10601 ¹⁾	6.359	NW	x	Niv. zu 2414-9-00023 (IfE), GPS-Hilfspunkt
BREM	Bremerhaven	RB 10 ²⁾	4.084	NW	x	Niv. zu 2417-9-00026 (IfE), GPS-Hilfspunkt
CUXH	Cuxhaven	2118-9-00045	3.088	N	x	
BUES	Büsum	1819-9-00184	4.696	N	x	
PELL	Pellworm	1418-9-00139	3.493	N		1991 von WSD erst.
DAGE	Dagebüll	RF 04 ³⁾	7.662	N	x	Niv. zu 1218-9-00130 (IfE), GPS-Hilfspunkt
WITT	Wittdün	1316-9-00113	2.998	N	x	
HOER	Hörnum	1215-9-00113	4.419	N		1991 von WSD erst.
LIST	List	0916-9-00105	4.063	N	x	
HELG	Helgoland	RF 88 ⁴⁾	4.190	N	x	von WSD für GPS erst.

¹⁾ Punkt Wilhelmshaven hat keine Punktnummer; Identifikation als Exzentrum des TP 4. Ordnung 2414-0-106; nur für GPS-Messungen erstellt.

²⁾ Punkt Bremerhaven hat keine amtliche Punktnummer; Identifikation als GPS geeigneter Hilfspunkt für RF 66/18 bei Stromkilometer 66.7 rechtes Ufer.

³⁾ Punkt Dagebüll nur für GPS errichtet; keine amtliche Punktnummer, RF 04 als laufende örtliche Punktnummer vergeben.

⁴⁾ Höhe des Punktes Helgoland im bisherigen amtlichen NN-System.

Tab. 4.1: Gemessene Landstationen in den GPS-Kampagnen

4.2 Messungen auf der Forschungsplattform Nordsee

1976 wurde ca. 40 Seemeilen nordwestlich von Helgoland die *Forschungsplattform Nordsee* (FPN) errichtet. Sie war ein Schwerpunktprojekt im Gesamtprogramm Meeresforschung und Meerestechnik. Aufgabe dieser Plattform war die Datensammlung für die Meeresforschung und Überwachung der marinen Umwelt. Als zentrale Meß- und Erprobungsstation bot sie über viele Jahre Naturwissenschaftlern und Ingenieuren Beobachtungsmöglichkeiten (*Salzmann et al. 1975*). Die Forschungsplattform ist in der Zeichnung 4.2 wiedergegeben. Ein fester Blasenpegel wurde in einem der Standbeine der Plattform betrieben.

1992 wurde die Forschungsplattform abgebaut, wobei der Gründungskörper am Meeresboden verblieb. Seitens der KFKI-Beratergruppe wurde noch 1991 vorgeschlagen, den dortigen Pegel im Rahmen des Projektes höhenmäßig einzumessen. Mit den Messungen sollte ebenfalls die Höhenlage der Oberkante des Gründungskörpers bestimmt werden. Für spätere Beschickungen kann damit das ehemalige Fundament einen Höhenreferenzpunkt bilden.

Durch den Abbau der Station konnte nur noch eine Messung während der zweiten GPS-Kampagne im Mai 1992 erfolgen. Um die Meßziele zu erreichen, wurde vom BSH Hamburg ein Druckpegel bereitgestellt. Dieser wurde in einem sogenannten „Käfig“ für die Zeit der GPS-Kampagne auf dem Gründungskörper versenkt. Die Unterkante des Käfigs ruht direkt auf dem Fundament und ergibt die Höhe des Gründungskörpers. Die Druckdifferenzen zwischen dem versenkten Druckpegel und dem installierten Blasenpegel auf der Plattform

geben Aufschluß über den Höhenunterschied beider Pegel. Zur Höheneinmessung des Käfigs wurde ein Meßdraht an diesem befestigt und mit definierter Zugspannung bis über das Helikopterdeck gespannt. Die GPS-Antenne wurde auf dem Helikopterdeck aufgebaut. Abbildung 4.2 zeigt schematisch die Meßanordnung.

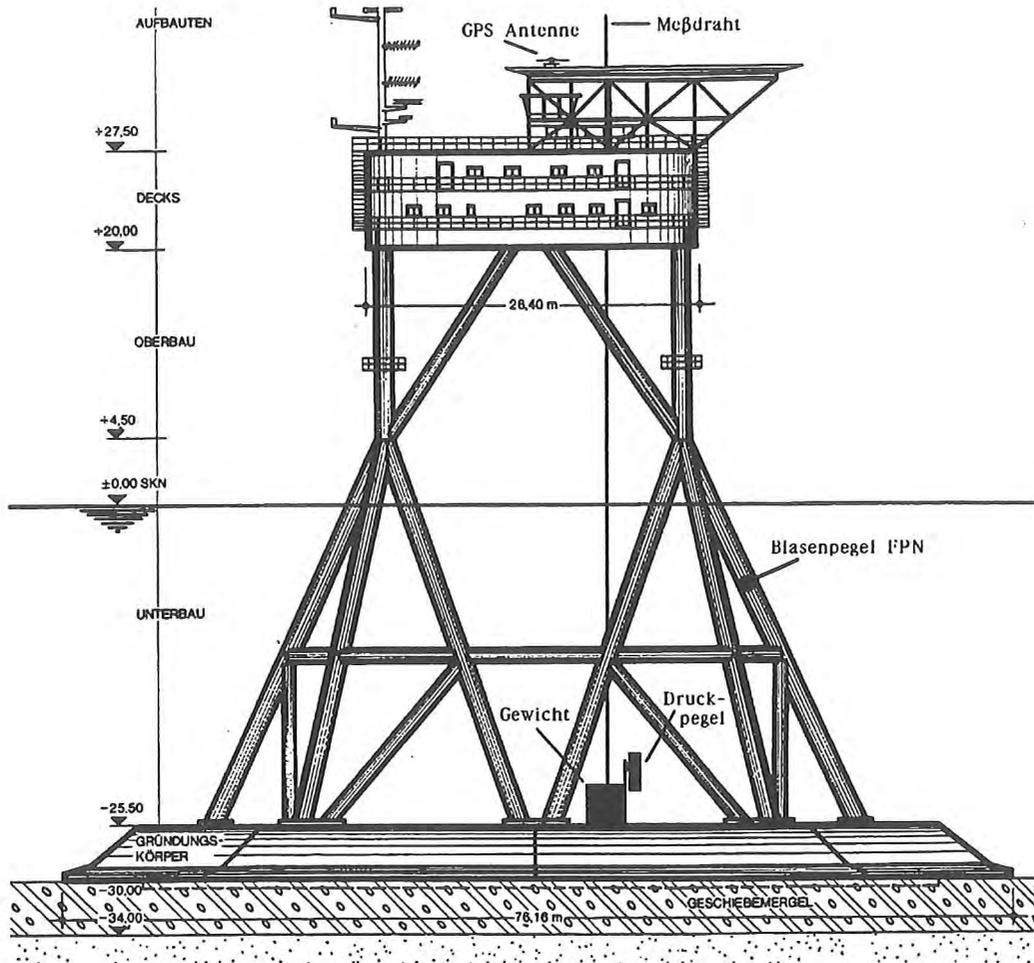


Abb. 4.2: Forschungsplattform Nordsee

5 Das Fehlerkonzept beim GPS

5.1 Allgemeines

GPS ist ein Einwegemeßsystem, wobei mehrere Satelliten aus einer Umlaufbahn von 20.000 km Höhe Signale auf jeweils zwei Trägersignalen aussenden. Diese beiden Trägersignale werden durch Vervielfachung einer Grundfrequenz von 10,23 MHz aus Atomfrequenznormalen abgeleitet. Die Wellenlängen betragen 19,05 cm (L_1) und 24,45 cm (L_2). Auf diesen Trägerwellen sind eindeutig codierte Signale aufmoduliert. Dies ist der P-Code auf L_1 und L_2 mit einer Wellenlänge von 29,31 m und der ungenauere C/A-Code auf L_1 mit 293,1 m Wellenlänge. Ebenso sind auf den Trägerwellen Datensignale enthalten, welche die Bahnelemente und andere Informationen zu den Satelliten enthalten.

Ein entsprechender GPS-Empfänger kann die Trägersignale empfangen und die codierten Signale entschlüsseln. Mit Hilfe der Codesignale kann der Aussendezeitpunkt der Signale bestimmt werden und damit aus Laufzeitmessung eine Streckenmessung zu den sichtbaren Satelliten gewonnen werden. Ein Bogenschnitt ergibt mit den bekannten Positionen der Satelliten die Position der Antenne auf der Erde in dem ellipsoidischen Referenzsystem WGS84 (Geodätisches Weltsystem). Da die Empfängeruhren nicht exakt auf den GPS-Zeitrahmen synchronisiert sind, ergeben die Laufzeitmessungen nicht die exakten Entfernungen zu den Satelliten, sondern sogenannte *Pseudoentfernungen*. Aus den Signalen zu vier Satelliten läßt sich der Empfängeruhrfehler und die 3D-Position der Antenne ableiten (Seeber 1989, Wells 1986).

Aus der Wellenlänge und der Meßauflösung der Empfänger ergeben sich begrenzte Genauigkeiten bei Messungen mit Codesignalen. Diese liegen je nach Empfänger und Code-Signal bei wenigen Metern oder einigen Dezimetern. Bedingt durch Sicherheitsmaßnahmen seitens der Betreiber des GPS, wird diese Genauigkeit auf ca. 100 m künstlich begrenzt (*Selective Availability* (SA)). Mit Relativmessungen zwischen zwei oder mehreren GPS-Empfängern können diese und andere Fehlereinflüsse weitestgehend aufgehoben oder zumindest vermindert werden. Seit 1994 ist mit *Anti-Spoofing* (AS) eine weitere Sicherheitsmaßnahme aktiviert worden. Hierdurch wird der genauere P-Code zum Y-Code verschlüsselt.

In der Geodäsie werden, bedingt durch die geringe Meßauflösung von einigen Dezimetern der Code-Signale, ausschließlich die Pseudoentfernungsmessungen aus Trägerphasenmessungen genutzt. Trägerphasenmessungen ergeben eine Meßauflösung von wenigen Millimetern und erlauben eine entsprechende Genauigkeiten in der Punktbestimmung. Ein Problem bei der Trägerphasenmessung ist die Bestimmung der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten (Anzahl der vollen Wellenzüge) des Signales. Aus langen Meßreihen können diese aber üblicherweise mit Differenzbildungen zwischen mehreren Satelliten und Empfängern (*Double Differences*) in einer Ausgleichung gelöst werden (Fixed-Lösung).

Die GPS-Signale durchlaufen auf ihrem Weg bis zu den Empfangsantennen die Erdatmosphäre. Hierdurch kommt es zu Signalverzögerungen, welche die Messungen beeinflussen. Dabei wird zwischen den Einflüssen der Troposphäre und der Ionosphäre unterschieden. Die Ionosphäre ist ein dispersives Medium und deren Einflüsse 1. Ordnung können durch Messungen mit zwei verschiedenen Trägerfrequenzen modelliert werden (Wanninger 1994). Die Fehlereinflüsse der Troposphäre können durch Relativmessungen bei entsprechender räumlicher Korrelation der Effekte verringert werden.

Für die Trägerphasenmessungen müssen die aufmodulierten Code-Signale vollständig vom Trägersignal entfernt werden. Dies kann durch Subtraktion des jeweiligen bekannten Codes

erreicht werden. Empfänger ohne Kenntnis des genaueren P-Code können keine Messungen auf der L_2 Trägerwelle bereitstellen. Eine Messung kann dennoch durch Quadrierung des Signales erfolgen, was aber eine Halbierung der Trägerwellenlänge und Erhöhung des Meßrauschens zur Folge hat (Ashtech C/A-Code Empfänger). Nach der Verschlüsselung der P-Code Signale (AS) können die Trägerwellenmessungen nur noch mit dem Verfahren der Kreuzkorrelation oder anderen Verfahren in modernen Empfängern (Trimble SSE, Ashtech Z12) bereitgestellt werden (Wells 1986, Seeber 1993).

5.2 Auswertung der GPS Messungen

Im Rahmen dieses Projektes erfolgte die Auswertung der Beobachtungsgrößen mit dem Programmpaket GEONAP (Wübbena 1988, 1989, 1991a und 1991b). Dieses Programmpaket nutzt in der Auswertung das Auswertekonzept der Parameterschätzung. Es werden alle unbekannt Modellparameter in einem funktionalen und stochastischen Prozeß aus den Pseudostreckenbeobachtungen der Trägerphasen geschätzt. Unbekannte sind:

- die Koordinaten der Antennenstandpunkte,
- die Empfängeruhrfehler,
- die Satellitenuhrfehler,
- die Mehrdeutigkeiten,
- die troposphärischen Laufzeitverzögerungen,
- ein Modell der Ionosphärenverzögerungen und
- die Keplerschen Bahnparameter in einem *Short-Arc* Ansatz.

Das Auswerteprogramm ermöglicht es Linearkombinationen der beiden Trägerwellen L_1 und L_2 zu bilden. Dies hat Auswirkung auf die effektive Wellenlänge und das Meßrauschen, sowie auf die Laufzeitverzögerungen der Ionosphäre. Die Mehrdeutigkeiten des kombinierten Signales stehen in einer festen Beziehung zu den originären Signalen (Wübbena 1991a).

Zu nennen wäre hierbei zunächst die Kombination $L_1 - L_2$, der sogenannten *Widelane* (L_w). Sie besitzt eine Wellenlänge von 86,2 cm (bei Quadriertechnik auf L_2 43,1 cm) mit einem Meßrauschen von etwa 2 cm. Mit diesem Signal können die resultierenden Mehrdeutigkeiten von 86,2 cm auch über größere Entfernungen bei ungestörten Signalen gelöst werden. Die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen 1. Ordnung sind auf diesem Signal nicht beseitigt und begrenzen die Einsatzmöglichkeit dieses Signales. Mit Lösung der *Widelane*-Mehrdeutigkeiten ist die Differenz der Mehrdeutigkeiten auf L_1 zu denen auf L_2 festgelegt. Es gilt, daß alle Mehrdeutigkeiten in allen Linearkombinationen bestimmt sind, wenn sie für zwei Signale festgesetzt wurden.

Die ionosphärischen Laufzeitverzögerungen 1. Ordnung sind auf dem ionosphärenkorrigierten Signal L_0 beseitigt. Dieses Signal ergibt sich näherungsweise aus der Kombination $9 \times L_1 - 7 \times L_2$. Die effektive Wellenlänge beträgt 5,4 cm (bei Quadriertechnik auf L_2 2,7 cm) bei einem Meßrauschen von ca. 1 cm (Wanninger 1994). In diesem Projekt ergibt sich die endgültige Koordinatenschätzung aus diesem Signal.

Mit dem Programmpaket GEONAP ist es möglich, verschiedene Modellansätze zu verwenden. Optional konnten in diesem Projekt folgende Parameter eingeführt oder geschätzt werden:

- Berechnung der Satellitenkoordinaten mit *Broadcast* oder *Präzisen Bahnelementen* (Seeber 1989), wobei letztlich immer die Präzisen Ephemeriden genutzt wurden.

- Troposphärenparameter für alle Stationen mit verschiedenen zeitlichen Korrelationen.
- Parameterschätzung für ein Ionosphärenmodell.
- Einführung von absoluten Koordinaten einer oder mehrerer Stationen zur Lagerung des Meßnetzes.
- Einführung von Koordinaten mehrerer Stationen (Fiducial-Station) zur Schätzung von Bahnparametern.
- Berücksichtigung der Gezeiten der festen Erde.
- Berechnung von *Floatlösungen* ohne eine Mehrdeutigkeitsschätzung.

Die Auswertung erfolgte zunächst durch Wandlung der binären Rohdaten in das Empfänger-unabhängige RINEX Format (*Gurtner u. a. 1989*). Die empfangenen Satellitenephemeriden aller Stationen wurden hiernach mit dem Programm RIMSRT getestet, sortiert und für jede Session zusammengefaßt. Mit dem Programm GNSNGL wurde für jede Station und jede Session eine Einzelstationslösung bestimmt mit Berechnung vorläufiger Stationskoordinaten, gekürzter Beobachtungen und den Widersprüchen aus der gemessenen Entfernung zu den berechneten Entfernungen aus Näherungskordinaten. Desweiteren Uhrparameter für die Empfänger- und Satellitenuhren, sowie troposphärische Parameter und Korrektur des Antennenstandpunktes auf den Bodenpunkt.

Im eigentlichen Hauptprogramm GEONAP wurden die Mehrdeutigkeiten der Trägersignale oder der kombinierten Trägersignalen berechnet. Für alle Stationen einer Session wurden ausgeglichene Koordinaten des Bodenpunktes und eine vollständige Kovarianzmatrix berechnet. Verschiedene Modellparameter (s.o.) können bei der Koordinatenschätzung berücksichtigt werden.

In einem Nachverarbeitungsprogramm GNPNET wurden die Lösungen der Sessionen einer Kampagne oder des gesamten Projektes zu einer Lösung in einer Netzausgleichung verknüpft. Als Ergebnis lag ein Satz von Koordinaten der einzelnen Stationen mit Kovarianzmatrix vor.

5.3 Allgemeiner Fehlerhaushalt

Allgemein können die Fehler beim GPS in Fehler am Sender (Satellit), Fehler während der Ausbreitung der Signale und Fehler am Empfänger unterschieden werden. Weitere Aussagen sind unter *Seeber (1989)*, *Wells u. a. (1986)* und *Santerre, Lavoie (1991)* zu finden.

Ziel des Projektes ist die Höhenübertragung nach Helgoland mit Zentimetergenauigkeit. Die größte Entfernung im Projekt nach Helgoland liegt bei 100 km zu Borkum, hieraus ergibt sich eine Genauigkeitsforderung von $0,01 / 100.000 = 0,1 \text{ ppm}$ für die Höhenkomponente. Für die Lage ergibt sich Erfahrungsgemäß eine dreimal höheren Genauigkeit von etwa $0,03 \text{ ppm}$ (*Santerre, Lavoie 1991*). Die Fehler der GPS-Messungen sind mit diesem hohen Genauigkeitsniveau zu untersuchen. In den folgenden Kapiteln sollen die möglichen Fehlerquellen beschrieben und Strategien zur Minimierung beschrieben werden.

5.3.1 Bahnfehler der Satelliten

Der Bahnfehler eines Satelliten wirkt in der relativen Positionsbestimmung im Verhältnis der Basislänge b und der Satellitenentfernung ρ (*Seeber 1989*). In Näherung gilt

$$\frac{db}{b} = \frac{d\rho}{\rho} \quad (5.3.1)$$

Bei $db/b = 0,1$ ppm ergibt sich mit $\rho = 25.000$ km die Forderung eines tolerierbaren Bahnfehlers von 2,5 m. Die Genauigkeit der *Broadcast Ephemeriden* liegt bei 2...10 m und unter SA bei 10...100 m. Es wird daraus ersichtlich, dass die Genauigkeit der *Broadcast Ephemeriden* für dieses Projekt nicht hoch genug ist. Es muß von daher auf die *Präzisen Ephemeriden* zurückgegriffen werden. Für 1991 und 1992 konnten diese vom *National Geodetic Survey* (NGS) der USA bezogen werden. Für 1993 und 1994 lagen Berechnungen vom *International GPS Geodynamics Service* (IGS) des Astronomischen Instituts der Universität Bern (CODE) vor. Untersuchungen zu den Bahnfehlern ergaben Genauigkeiten der Präzisen Ephemeriden von 20-30 cm. Nähere Ausführungen sind ausführlich bei *Lichten (1990)*, *Beutler u.a. (1993)* und *Gendt (1993)* zu finden.

5.3.2 Fehler in der absoluten Lagerung des GPS-Netzes

Ein Absolutfehler in der Lagerung des GPS-Netzes wirkt sich wie ein Bahnfehler der Satelliten auf die relativen Koordinaten aus (*Seeber, Wübbena 1989*). Nach entsprechender Anwendung von Gl. (5.3.1) kann für die Genauigkeit der absoluten Lagerung der Stationskoordinaten wieder 2,5 m geschätzt werden.

5.3.3 Fehler in den relativen Koordinaten durch Transformation aus ungenau gelagerten absoluten kartesischen Koordinaten

Gravierender als in Kapitel 5.3.2, entstehen Fehler durch die Transformation von ungenauen absoluten kartesischen Koordinaten in ellipsoidische Koordinaten. Die Berechnungen in ellipsoidische Koordinaten werden in diesem Fall mit Transformationsparametern für eine benachbarte, um den Fehlerbetrag verschobene Station durchgeführt. Die Transformation der kartesischen Koordinaten \bar{X}_i einer Station i in ellipsoidische Koordinaten \bar{P}_i erfolgt über die Transformationsmatrix F_i (*Seeber, Wübbena 1989*):

$$\bar{P}_i = F_i \cdot \bar{X}_i \quad (5.3.2)$$

Für die Koordinatendifferenzen $d(\cdot)$ gilt:

$$d\bar{P}_i = (F_2 - F_1) \cdot d\bar{X}_i \quad (5.3.3)$$

Die zunächst in allen Stationen gleichen absoluten Verschiebungen in den kartesischen Koordinaten mit $\Delta\bar{X}_1 = \Delta\bar{X}_2 = \Delta\bar{X}_i$ ergeben nach der Transformation für jede Station unterschiedlich gerichtete Verschiebungen in den ellipsoidischen Koordinaten. Werden die einzelnen absoluten Koordinaten \bar{X}_i verschoben, so ergeben sich Differenzen in den relativen ellipsoidischen Koordinaten nach:

$$d(\bar{P}_i + \Delta\bar{P}_i) = (F_2 - F_1) \cdot d(\bar{X}_i + \Delta\bar{X}_i) \quad (5.3.4)$$

Für die kartesischen Koordinatendifferenzen gilt $d(\Delta\bar{X}_i) = 0$, wohingegen $d(\Delta\bar{P}_i)$ ungleich 0 wird. Nach *Seeber, Wübbena (1989)* ergibt sich aus einem absoluten kartesischen Lagefehler von 10 m eine Auswirkung in den ellipsoidischen Koordinaten von 0,0 cm für die Lage- und 17,5 cm für die Höhendifferenzen bei einem Punktabstand von 111 km. Ein absoluter

Höhenfehler von 10 m bei gleichem Punktabstand bewirkt einen Fehler in den Lagedifferenzen von 0,6 cm und -0,2 cm in den Höhendifferenzen. Ellipsoidische Höhendifferenzen sind besonders sensitiv gegenüber absoluten Lagefehlern. Für dieses Projekt sind die tolerierbaren absoluten Lagerungsfehler in der Höhe ca. 5 m und in der Lage ca. 0,6 m.

Insgesamt ergeben sich aus den Kapiteln 5.3.2 und 5.3.3 absolute Lagerungsgenauigkeiten im WGS84 von besser als 0,5 m. Dies konnte durch Anpassung der gemessenen Netze an Stationen aus DÖNAV (Deutsch-Österreichische-Navstar Kampagne) (bei der GPS-Kampagne 1991) oder über IGS-Stationen an das ITRF (International-Terrestrial-Reference-Frame) (bei den GPS-Kampagnen 1992-1994) erfolgen.

5.3.4 Fehlereinflüsse durch die Ionosphäre

Die Problematik der Fehlereinflüsse der Ionosphäre auf die relative Positionierung wurde umfassend von *Wanninger(1994)* behandelt. Er unterscheidet dabei:

1. Beeinflussung des Empfängerhaltens,
2. Probleme bei der Mehrdeutigkeitslösung und
3. Auswirkung auf Einfrequenz Auswertung.

Der letzte Punkt hatte für dieses Projekt keine Auswirkung, da insgesamt nur Zweifrequenz-Daten gemessen wurden. Die Wirkung der Ionosphäre resultiert aus unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Elektronendichten, welche die Brechkraft für beide Meßfrequenzen verschieden beeinflussen. Diese Effekte sind für niedrige Satelliten stärker, da die Signalwege in der Ionosphäre länger werden und können für die L_1 und L_2 Trägerwellen um mehrere Zehner-Meter auseinanderliegen. Auf- oder untergehende Satelliten sind hiervon besonders betroffen. Bedingt durch die Sonneneinstrahlung steigt der Elektronengehalt der Ionosphäre tags an und bildet nachts ein Minimum. Das Tagesmaximum ist abhängig von der Sonnenaktivität. Vorteilhafter sind Messungen in den Nachtstunden.

Ein GPS-Empfänger selbst kann durch die Ionosphäre gestört werden, wenn zwischen zwei aufeinanderfolgenden internen Messungen (< 1 sec) die Verzögerung der Signale in der Ionosphäre größer als eine Trägerwellenlänge wird, wenn die hieraus resultierende Dopplerverschiebung der Signale die Empfängerbandbreite übersteigt oder wenn es durch resultierende Schwankungen der Signalstärke zum Verlust des Satellitensignales kommt. Diese Effekte treten in den mittleren Breiten seltener auf, sondern mehr in den äquatorialen und polaren Regionen, so daß das Empfängerverhalten im Projekt nicht durch die Ionosphäre in Form von vermehrten *Cycle-Slips* (Phasensprüngen) gestört wird.

Für eine sichere Lösung von Mehrdeutigkeiten und Bestimmung von *Cycle-Slips* darf die Refraktion zwischen zwei registrierten Meßepochen nicht über 0,5 Zyklen der Meßwellenlänge steigen. Für die mittleren Breiten betrifft dies nur die niedrig stehenden Satelliten. Durch eine kürzere Aufzeichnungsrate bleibt die Refraktionsrate deutlich unter 0,5 Zyklen. In diesem Projekt wurde eine ausreichende Aufzeichnungsrate von 30 Sekunden genutzt.

Die Ionosphäre weist verschiedene Störungen in der Elektronendichte auf. Dies sind zum einen kurzzeitige Szintillationen durch kleinräumige Störungen (unter einer Minute) oder sehr großräumige wandernde Störungen (TID) mit Perioden über mehreren Minuten. Diese Störungen sind von der geographischen Breite abhängig. Da der ionosphärische Durchstoßpunkt sehr weit vom Meßort entfernt sein kann (ca. 1000 km bei 10° Elevationsgrenz-

winkel), treten die polaren Szintillationen für einen Beobachtungsort in den mittleren Breiten fast nur für niedrigstehende nördliche Satelliten auf ($<20^\circ$). Ein geringes zeitliches Maximum liegt in den Nachmittagsstunden bis Mitternacht. Diese Szintillationen sind von der Sonnenaktivität abhängig. Großräumige Störungen (TID) bilden sich über den äquatorialen Gebieten und haben in den mittleren Breiten nur Auswirkungen auf südliche Satelliten ($<50^\circ$). Diese Störungen bilden ein Maximum in den Tagesstunden. Alle Effekte sind abhängig von der Sonnenaktivität und sollten nach den ersten erfolgten GPS-Meßkampagnen abklingen.

Um Auswirkungen dieser Effekte zu verringern, muß die Beobachtungsdauer deutlich länger als die Periodendauer der Störungen sein. In diesem Projekt wurden mindestens acht Stunden beobachtet, wonach keine Auswirkungen mehr auf die Positionslösungen zu erwarten sind. Die Effekte 1. Ordnung können durch die Wahl einer geeigneten Linearkombination der Trägerphasen (L_0) korrigiert werden.

5.3.5 Einfluß der Troposphäre

Im Gegensatz zur Ionosphäre ist die Troposphäre kein dispersives Medium. Das heißt, beide GPS-Trägerwellen werden in gleicher Weise von der Refraktionswirkung beeinträchtigt. Die Brechkraft ergibt sich aus den Zustandsgrößen Lufttemperatur, Luftdruck (beides trockene Anteile) und dem partiellen Wasserdampfdruck (als feuchter Anteil). Durch Messung von Lufttemperatur und Luftdruck kann der trockene Anteil auf $\pm 1\%$ modelliert werden. Für den feuchten Anteil liegt die Meßgenauigkeit bei etwa $\pm 20\%$. Im allgemeinen beträgt der feuchte Anteil jedoch nur 10% des gut modellierbaren trockenen Anteils (*Wübbena 1991a*).

Die Einführung tatsächlicher Wettermessungen an der Bodenstation im Programmsystem GEONAP ist möglich. Meteorologische Messungen am Antennenstandpunkt ergeben einen Meßwert an der Untergrenze der Troposphäre und sind nicht repräsentativ für den gesamten Signalweg durch die Troposphäre. Der trockene Anteil (Luftdruck und Lufttemperatur) kann gut erfaßt werden. Die Messung der Luftfeuchte am Boden repräsentiert dagegen nur sehr schlecht den Wasserdampfgehalt entlang des gesamten Signalweges. Gerade bis in die Schichten bis zu einer Höhe von 50-100 m über der Erdboden ist die Atmosphäre noch nicht gut durchmischt, und ein Mikroklima erzeugt hier starke Unterschiede. So ergibt die Messung am Boden eine schlechtere Erfassung der Laufzeitverzögerungen als ein Standardmodell der Atmosphäre (*Brunner, Welsch 1993* und *Hollmann, Welsch 1990*).

Das Programmsystem GEONAP nutzt für die troposphärischen Laufzeitkorrekturen ein erweitertes Troposphärenmodell von *Hopfield* und *Black* (*Wübbena 1991a*). Restfehler des Troposphärenmodelles können durch die Bestimmung eines Maßstabsfaktor für jede Station erfaßt werden. Untersuchungen bei *Seeber, Wübbena (1989)* haben gezeigt, daß mit diesem Troposphärenmodell und einem Maßstabsfaktor die Fehler in der Höhenkomponente auf wenige Zentimeter reduziert werden können. Durch lange Messungen bei verschiedenen Wetterlagen sollten die Restfehler auf unter 1 cm verringert werden können. Aus diesem Grunde wurde für das gesamte Projekt an 22 Tagen in vier Kampagnen beobachtet. Es ist zu erwarten, daß sich die Restfehler des tatsächlichen Troposphärenzustandes zu den Modellansätzen zufällig verhalten und sich im Mittel aufheben.

Bei der relativen Positionsbestimmung haben nur die meteorologischen Differenzen zwischen zwei Stationen Auswirkungen, welche nicht vom Modell erfaßt werden. Bei diesem Projekt liegen alle Stationen etwa auf der gleichen Höhe, so daß die Modellrechnungen mit der

Stationshöhe als Eingangsgröße gleiche Laufzeitverzögerungen auf allen Stationen ergeben. Modellschwächen haben erst bei größeren Höhenunterschieden in einem Meßnetz Auswirkungen und sollten sich in diesem Projekt nicht bemerkbar machen. Abweichungen der örtlichen Meteorologie können durch einen zeitlich variablen Maßstabsfaktor erfaßt werden. Das Programmsystem GEONAP erlaubt die Schätzung von Maßstabsfaktoren mit verschiedenen zeitlichen Korrelationslängen für jede Station. Da die Stationen in diesem Projekt alle in der Nähe der Nordsee liegen, sollten die meteorologischen Differenzen durch das herrschende Meeresklima gedämpft sein.

5.3.6 Deformation des terrestrischen Bezugssystemes

Bei der Beschreibung von Stationskoordinaten müssen verschiedene Effekte durch eine Höhenvariation berücksichtigt werden. In Frage kommende vertikale Bewegungen sind (*Dietrich 1993*):

1. Erdgezeitendeformationen,
2. Auflastdeformationen durch Meereszeiten (Ocean Loading),
3. Auflastdeformationen durch die Atmosphäre,
4. Vertikale Ausgleichsbewegungen und
5. Plattentektonik.

zu 1.: Die Erdgezeitendeformation ist in der Regel in GPS-Auswerteprogrammen enthalten. Bei GEONAP können die Deformationen optional berücksichtigt werden. Die Größenordnungen sind 0,5 m über 10 000 km. Auswirkungen haben bei der relativen Positionsbestimmung nur die differentiellen Effekte zwischen den Stationen. In diesem Projekt sind weniger als 5 mm über 100 km zu erwarten und daher unterhalb der Meßgenauigkeit. Durch lange Meßdauer über verschiedene Tidezustände mitteln sich diese Effekte heraus.

zu 2.: Zu dieser Thematik liegen Modellrechnungen von *H.-G. Scherneck (1994)* für die Stationen Borkum und Helgoland vor. Es ergeben sich durch den zeitlich variablen Auflastdruck des Meeresswassers Höhenschwankungen zwischen diesen beiden repräsentativen Stationen. Helgoland bewegt sich absolut gesehen vertikal um ± 4 mm und Borkum um ± 7 mm. Die Amplitude der Höhenänderungen beträgt differentiell durch Phasenverschiebung ca. 8 mm. Über lange Beobachtungsreihen sollten sich diese Effekte herausmitteln. *Dietrich (1993)* nennt allgemein für diese Problematik ähnliche Größenordnungen.

zu 3.: Nach *Dietrich (1993)* ergeben sich durch witterungsbedingte Variationen des Luftdrucks Höhenänderungen von wenigen Millimetern über 100 km. Diese Effekte sind in diesem Projekt zu vernachlässigen.

zu 4.: Diese vertikalen Bewegungen resultieren zumeist aus postglazialen Ausgleichsbewegungen oder aus dem Abbau von Lagerstätten. Im Bereich der Nordseeküste sind diese Bewegungen aus Nivellements nachgewiesen worden. Die Bewegungsraten liegen nach Auswertung des NKN III (Nordsee-Küsten-Nivellement) bei einem Absinken von 1-2 mm pro Jahr (*Kulle 1993*). Der im Projekt genutzte Höhenstatus aus der Nivellementsausgleichung des DHHN (Deutsches-Haupt-Höhen-Netz) von 1985 beruht auf Messungen Anfang der 80iger Jahre. Eine erst in den 90iger Jahren gemessene Höhe von Helgoland ergibt eine dortige Höhe im System des DHHN85. Fehler in dieser Annahme sind differentiell zwischen den Stationen über ca. 15 Jahre zu betrachten und liegen im Bereich der angestrebten Genauigkeit.

Die Tabelle 5.1 zeigt die vorliegenden Werte für Höhenänderungen von einigen Stationen im Projekt nach Auskunft der *Niedersächsischen Landesvermessung*. Falls der Meßpunkt in älteren Unterlagen nicht zu identifizieren ist, so nennt die Tabelle Werte für einen Punkt in der Nachbarschaft.

Station	Höhe [m]	Drift [mm/a]	Status	Entstehung	Bemerkungen
BORK	4.502	(-0.4)	140	1990	Drift über Punkte im Stadtgebiet
WILH	6.359	-2.0	140	ca. 1988	ist Hilfspunkt, der Anschlußpunkt seit 1928
BREM	4.084	-0.8	140	ca. 1990	ist Hilfspunkt, der Anschlußpunkt seit 1929
CUXH	3.088	-0.6	140	1929	
DAGE	7.662	-0.8	185	1990	ist Hilfspunkt, der Anschlußpunkt seit 1969

Tab. 5.1: Bekannte Driftwerte in der Höhenkomponente

Die dargestellte Problematik zeigt bisher nicht eindeutig geklärte Probleme. Die Marschgebiete an der Küste sollen nach neuesten bisher nicht veröffentlichten Ergebnissen der *Landesvermessung Niedersachsen* an einer Absenkung teilnehmen. Alle Pegelstationen liegen in diesen problematischen Zonen. Eine Einbeziehung stabiler Stationen in das Meßnetz wäre wünschenswert. Durch die geringen Bewegungsraten könnte dies mit nivellitischen Messungen erfolgen. Für dieses Forschungsprojekt liegen die vertikalen Bewegungen der Stationen der letzten 15 Jahren unterhalb der Meßgenauigkeit.

zu 5: Die Bewegungsrate der Plattentektonik liegen in einer Größenordnung von wenigen cm pro Jahr zwischen verschiedenen tektonischen Platten. Auf einer Platte sind die differentiellen Bewegungen sehr viel geringer. Durch Anpassung aller Lagekoordinaten an das ITRF können die absoluten Koordinaten an die Plattenbewegung angepaßt werden (*Boucher u.a. 1994*). Wie aber schon in Kapitel 5.3.1 gesagt wurde, sind die Größenordnungen für dieses Projekt belanglos.

5.3.7 Einfluß der Satellitenüberdeckung

Durch die Inklination der GPS-Satellitenbahnen von 55° (für Block II Satelliten) überdecken die Satelliten einen Bereich von $\pm 55^\circ$ geographischer Breite. In unseren Breiten befinden sich daher keine Satelliten im nördlichen Quadranten um den Himmelsnordpol. Hieraus resultiert eine ungleichmäßige Satellitenverteilung mit Auswirkung auf die Genauigkeit der relativen Positionierung. Umfangreiche Untersuchungen wurden von *Santerre (1991)* vorgenommen. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind:

- Bei einem theoretischen Elevationsgrenzwinkel von 0° wäre die zu erwartende Standardabweichung für die Höhenkomponente um den Faktor 2 größer als für die Lage. Dies ist durch eine Satellitenüberdeckung nur oberhalb des Horizontes bedingt.
- Mit höheren Elevationsgrenzwinkeln wird dieses Verhältnis für die Höhenkomponente immer ungünstiger und liegt bei einem Grenzwinkel von 20° beim Faktor 3,0. Dies bedeutet, für eine Höhenbestimmung möglichst geringe Elevationsgrenzwinkel zu nutzen, was aber der Forderung zur Minimierung der Fehler aus der Ionosphäre und Troposphäre entgegensteht.

- Konfidenzellipsen für die Lage haben eine Orientierung der größten Halbachse in Nord-Süd Richtung bei gelösten Mehrdeutigkeiten. Die kleine Halbachse in Ost-West Richtung ist um den Faktor 1,4..1,9 kleiner. Ursache für die Unsymmetrie sind die ungleiche Satellitenüberdeckung mit fehlenden Satelliten im Norden.
- Die Schätzung eines Maßstabsfaktors für die Troposphäre läßt die Standardabweichung für die Höhe ansteigen. Dies ist begründet durch die hohe Korrelation der beiden Unbekannten.

Um Einflüsse einer ungenügenden Satellitenüberdeckung entgegenzuwirken, sollte daher möglichst lange beobachtet werden, wodurch der Himmelsbereich besser überdeckt wird. Der Elevationsgrenzwinkel sollte möglichst niedrig sein.

5.3.8 Floatlösung

Bei einer sogenannten *Floatlösung* werden die ungelösten Mehrdeutigkeiten als „nuisance Parameter“ aufgefaßt, d.h. sie werden zwar modelliert, aber aus den Systemgleichungen wieder eliminiert. Der ganzzahlige Charakter der Mehrdeutigkeiten wird bei der Lösung nicht genutzt. Die Erstellung einer solchen Lösung ist ohne größere Eingriffe des Auswerters möglich. *Santerre und Lavoie (1991)* haben die Auswirkungen auf die relativen Positionen eingehender untersucht. Dabei sind die Abweichungen des Konfidenzhyperboloides von einer sogenannten „Fixed-Lösung“ (gelöste Mehrdeutigkeiten) aufgezeigt. Bei „Fixed-Lösungen“ hat die Satellitenüberdeckung als Ganzes Einfluß auf die resultierenden Genauigkeiten, wohingegen bei der Floatlösung zusätzlich die Längen und Orientierungen der Satellitenbahnbögen betrachtet werden müssen.

Bei „Fixed-Lösungen“ liegen die größten Unsicherheiten in der Höhenkomponente, wobei die Konfidenzellipsen für die Lagekomponenten eine Orientierung der großen Halbachse in Nord-Süd Richtung besitzen. Bei einer „Float-Lösung“ hingegen existiert ebenfalls eine größere Unsicherheit in der Höhe, aber in einem kleineren Verhältnis zur Lageunsicherheit als bei der „Fixed-Lösung“ (Neigung des Konfidenzhyperboloides). In der Lage zeigt sich die größte Halbachse der Konfidenzellipse in Ost-West Richtung, der vornehmlichen Bewegungsrichtung der Satelliten. Ein Satellitenbahnbogen stabilisiert eine „Fixed-Lösung“ in der Ebene des Satelliten, wohingegen bei einer „Float-Lösung“ in dieser Ebene die größeren Unsicherheiten entstehen.

Simulationen ergeben eine Vergrößerung des Konfidenzhyperboloides im Vergleich zu einer „Fixed-Lösung“ um etwa den Faktor 2 bei einer sechsständigen vergleichbaren Beobachtung. Mit zunehmender Beobachtungsdauer nähert sich die „Float-Lösung“ seitens der Stochastik der „Fixed-Lösung“ an. Beobachtungszeiten über 6 Stunden lassen fast gleiche Genauigkeiten wie für eine „Fixed-Lösung“ erwarten. Bei längeren Beobachtungszeiten ist die Zunahme an Genauigkeit nur noch gering.

5.3.9 Mehrwegeausbreitung und Antenneneinflüsse

Mehrwegeausbreitungsfehler entstehen durch Interferenz des direkten Empfangssignales mit einem reflektierten Umwegesignal. Die entstehenden Fehler sind abhängig von der Entfernung des Reflektors zur Antenne und deren Signalstärke. Die Entfernungsfehler betragen bei Trägerphasenmessungen maximal 5 cm bei einer Periodenlänge von einigen Minuten. Lange Beobachtungszeiten mitteln die Fehler bei Störung der Mehrdeutigkeitslösung heraus.

Das Antennenphasenzentrum nicht baugleicher Antennen zeigt bei der relativen Positionierung eine elevations- und azimutabhängige Laufzeitverzögerung der eintreffenden Satellitensignale. Die Größenordnung beträgt wenige Zentimeter. Bei modernen Antennen sind diese Effekte geringer. Werden nur baugleiche Antennen innerhalb einer Beobachtungssession genutzt, so treten keine Effekte bei der relativen Positionsbestimmung auf. In diesem Projekt wurden nur baugleiche Antennen und Empfänger innerhalb einer Kampagne genutzt.

6 GPS-Meßkampagnen

Während des Projektes konnten vier GPS-Meßkampagnen zur Höhenübertragung nach Helgoland gemessen werden. Innerhalb eines jeden Projektjahres wurde dabei eine Meßkampagne beobachtet. Zeitlich sollte seitens der Planung die Messung zu verschiedenen Jahreszeiten mit unterschiedlichen troposphärischen Bedingungen erfolgen. Hierdurch können die systematischen Effekte bei den GPS-Messungen, welche durch die Troposphäre bedingt sind, durch die gemeinsame Projektlösung aus allen einzelnen Meßkampagnen eines jeden Jahres minimiert werden (Kap. 5.3).

Allerdings war es nicht möglich, zu völlig verschiedenen Jahreszeiten zu messen, weil logistische Gründe sowohl gegen die Sommer- als auch die Winterzeit sprachen. Während der Sommermonate ist es sehr schwierig Quartiere für die einzelnen Beobachter an den Küstenstationen zu bekommen. In dieser Zeit ist die touristische Hauptsaison, und Unterkünfte sind auf lange Zeit im voraus zu reservieren, welches im Projekt nicht möglich war, da die Anzahl an verfügbaren GPS-Empfängern und damit Beobachtern erst relativ kurz vor einer Meßkampagne fest stand. Während der Wintermonate ist es andererseits aus Witterungsgründen nicht möglich die Beobachter acht bis zehn Stunden in einem Kraftfahrzeug vor Ort ihre Messungen machen zu lassen. Ebenso war die Anfahrbarkeit aller Meßstationen während der Wintermonate nicht immer gewährleistet.

Die Messungen fanden daher 1991 im September, 1992 im Mai, 1993 im März und im letzten Projektjahr 1994 wieder im Mai statt. Die Witterungsbedingungen waren während der einzelnen Kampagnen nie genau gleich. Durch die vielen Meßtage im gesamten Projekt kann deshalb eine Minimierung der troposphärischen Effekte erwartet werden.

6.1 Erste Kampagne 1991 mit Ashtech Empfängern

Die erste Meßkampagne zur Höhenübertragung nach Helgoland wurde in der Zeit vom 9.-15. September 1991 gemessen. Insgesamt konnten acht Ashtech GPS-Empfangsanlagen genutzt werden. Vier C/A-Code Empfänger vom Typ Ashtech LD XII wurden vom *Alfred-Wegener-Institut* AWI in Bremerhaven zur Verfügung gestellt. Diese Empfänger stellen die volle Trägerphase auf L_1 und die quadrierte Trägerphase auf L_2 bereit. Das *IfE* selbst hatte damals noch vier weitere Empfangsanlagen. Zwei dieser Geräte waren, wie jene des AWI, Ashtech L-XII C/A-Code Empfänger und die restlichen zwei Geräte waren damals als Neuheiten Ashtech LM-XII P-Code Empfänger, welche auch die vollen Trägerphasen auf L_2 messen.

Die Messungen fanden für acht Stunden an insgesamt sechs Tagen statt. Da der Ausbau des GPS Raumsegmentes noch nicht beendet war, mußte ein günstiges Beobachtungsfenster mit möglichst vielen, aber mindestens vier Satelliten über einem Elevationsgrenzwinkel von 15° gefunden werden. Verfügbar waren zu der Zeit insgesamt 16 Satelliten, davon 5 Block I Satelliten. Abbildung 6.1 zeigt die vorausberechneten Satellitensichtbarkeiten am 9.9.1991 für Helgoland. Das größte Beobachtungsfenster liegt in den Abendstunden, wobei aus logistischen Gründen in einem Fenster von 17^{00} bis 1^{00} UT über 8 Stunden gemessen wurde. Das Fenster verschob sich an den folgenden Meßtagen um jeweils vier Minuten nach vorn, weshalb der Einfachheit halber die Messungen jeweils fünf Minuten vorher begannen.

Visibility of GPS Satellites

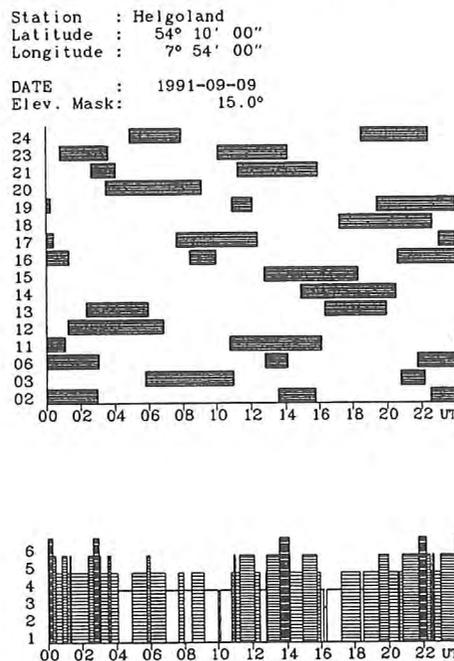


Abb. 6.1: Satellitensichtbarkeiten am 9.9.1991 für Helgoland

Wie schon in Kapitel 5.3 beschrieben wurde, hat die Genauigkeit der absoluten räumlichen Lagerung eines GPS-Netzes einen Einfluß auf die Relativkoordinaten. Um für dieses Netz die absolute Lageinformation zu bekommen, wurde an den ersten beiden Tagen mit jeweils vier Empfängern auf Punkten der DÖNAV (*Deutsch-Österreichische-Navstar*) Kampagne (*Ehlert 1992*) gemessen. Diese Punkte weisen geozentrische WGS84-Koordinaten mit einer Genauigkeit von 10-20 cm durch den Anschluß an das ITRF-System auf. Dies stellt für das Gebiet der Deutschen Bucht eine damalige bestmögliche Realisation des WGS84 dar.

Ausgewählt wurden insgesamt vier DÖNAV Stationen, die möglichst weit im Inland liegen oder nur gering an einer möglichen Absenkung der Küste teilnehmen (*Leonhard 1988*). Die gewählten trigonometrischen Punkte sind in Tabelle 6.1 zusammengestellt und umschließen räumlich das Pegelnetz.

Abk.	Name	Punkt-Nr.
DAME	Damme, Fladderlohhausen	3414-018-01
HOHB	Hohenbünstorf	2928-013-11
PANK	Panker, Hessenstein	1629-002-11
KAMP	Kampen, Sylt	1016-001-02

Tab. 6.1: DÖNAV-Stationen zur absoluten Lagerung des GPS-Netzes 1991

Über diese Punkte sollte das Netz auch an das amtliche Höhensystem der Netzausgleichung von 1985 angeschlossen werden, da damals vermutet wurde, daß alle Pegelkontrollstationen nicht einheitlich auf diesen Bezugshorizont bezogen sind. Zum Abschluß des Projektes liegen die Höhen aller Pegelkontrollpunkte im Bezugshorizont 1985 fest, und auf den Anschluß über die DÖNAV-Punkte kann verzichtet werden. Bei der Auswertung hat sich auch gezeigt, das die Entfernungen zu diesen Stationen zu groß sind, um zu einer sicheren Lösung der Mehrdeutigkeiten zu kommen.

Alle beteiligten 15 Stationen wurden im Beobachtungszeitraum während der Kampagne mindestens zweimal besetzt, um eine hohe Zuverlässigkeit bei Meßproblemen zu erreichen. In Abstimmung aller logistischen Nebenbedingungen, wie Fährverbindungen und möglichst kurzen Fahrstrecken beim Umsetzen zwischen zwei Stationen, wurden insgesamt drei verschiedene Meßkonfigurationen in je zwei Sessionen gemessen. Während der ersten Meßkonfiguration (9. und 10.9.) waren die DÖNAV-Stationen an den Messungen beteiligt. In den folgenden beiden Meßkonfigurationen befanden sich alle acht Empfänger auf Pegelstationen. Die drei Stationen Borkum (BORK), Helgoland (HELG) und Wittdün (WITT) wurden nicht umgesetzt und während der gesamten Kampagne beobachtet. Da nur ein Empfänger sich auf Sylt befand, wurde die Verbindung von List (LIST) nach Hörnum (HOER) nicht direkt beobachtet. Im Anhang (Seite 79) auf Abbildung 13.1 ist eine Übersicht der gemessenen Netzkonfigurationen gezeigt.

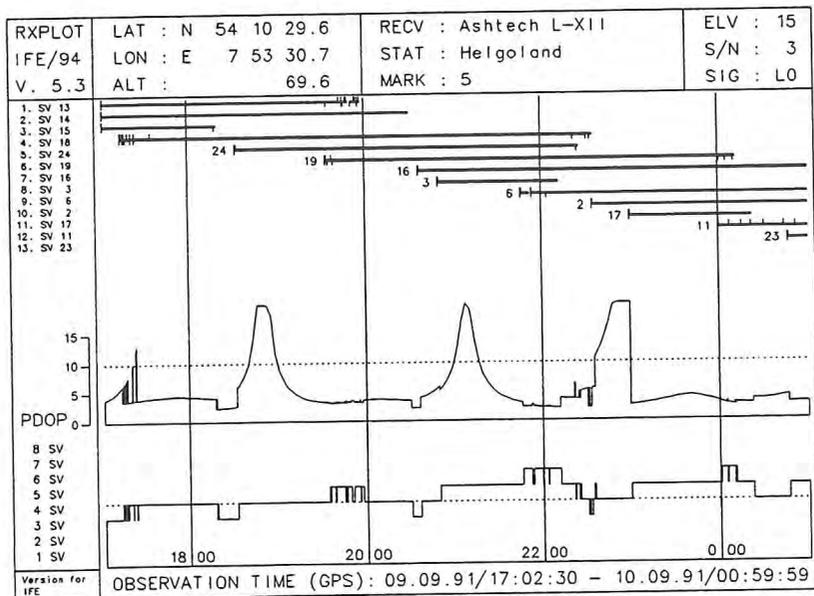


Abb. 6.2: Gemessene Satellitenkonfiguration am 9.9.1991 auf der Station Helgoland

Die Darstellung in Abbildung 6.2 zeigt graphisch visualisiert die tatsächlich gemessene Satellitenkonfiguration am Beispiel der Station Helgoland für den Tag 9.9.1991. Die Darstellung wurde mit dem Programm RXPLO erzeugt und zeigt zuoberst Angaben zur Station und zuunterst zur Meßzeit. In einer oberen Balkengraphik ist die Meßdauer für einzelne Satelliten gegenüber der Zeit dargestellt. Die Balken zeigen Markierungen nach oben und nach unten. Eine Markierung nach oben bedeutet, daß ein Cycle-Slip vorliegt. Eine Markierung nach unten besagt, daß eine Beobachtungslücke vorhanden ist. Das betrachtete Meßsignal ist die ionosphärisch korrigierte Trägerphasenkombination L_0 . Hierunter folgt der

zeitliche Verlauf der aus den Satellitensignalen resultierenden PDOP-Kurve. Zuunterst ist die momentane Anzahl an gemessenen Satelliten gegenüber der Zeit gezeigt. Es waren während der Meßzeit fast immer mindestens vier Satelliten verfügbar. Drei Satelliten sind nur kurzzeitig zu erkennen. Vorhanden sind während der Messung insgesamt drei Anstiege der PDOP-Funktion für ca. eine halbe Stunde. Diese kurzzeitigen Anstiege sind für eine statische Auswertung der Daten nicht gravierend, da die Daten über das gesamte Meßfenster ausgeglichen werden und alle Bahnbögen kombiniert werden (Kap. 5.3).

6.2 Zweite Kampagne 1992 mit Ashtech Empfängern

Die zweite GPS-Meßkampagne fand vom 5.-9. Mai 1992 statt. Als Meßinstrumente standen wieder 8 Ashtech GPS-Empfänger mit L_1 und L_2 Trägerphasenmessungen bereit. Diesmal konnten ein L-XII C/A-Code Empfänger und zwei LM-XII3 P-Code Empfänger vom AWI, zwei L-XII C/A-Code Empfänger von der *Bundesanstalt für Gewässerkunde* (BfG) und ein C/A-Code Empfänger LM-XII bei der Firma *Allsat GmbH* in Hannover ausgeliehen werden. Mit den eigenen beiden P-Code Empfängern LM-XII3 des IfE standen damit vier C/A-Code und vier P-Code Empfänger zur Verfügung. Die C/A-Code Empfänger stellten nicht die vollen Wellenlänge auf der L_2 -Trägerwelle bereit, sondern nur das quadrierte Signal.

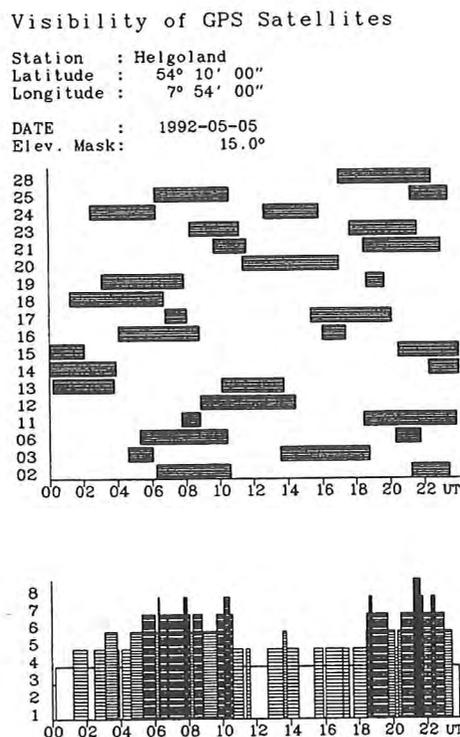


Abb. 6.3: Satellitensichtbarkeiten am 5.5.1992 für Helgoland

Die Messungen erfolgten für jeweils acht Stunden an fünf Tagen. Seit der ersten Kampagne 1991 wurden zwei weitere Satelliten in ihre Umlaufbahnen gebracht. Insgesamt standen damit 18 Satelliten (davon 5 Block I) für das Meßprojekt zur Verfügung. Trotz dieser schon recht guten Tagesüberdeckung gab es noch immer Zeitintervalle mit weniger als vier

Satelliten. Ein günstiges Meßfenster mußte daher wieder bestimmt werden. Abbildung 6.3 zeigt die vorausberechnete Satellitenüberdeckung für Helgoland am 5.5.1992 mit einem Elevationsgrenzwinkel von 15°. Als längstes Meßfenster mit 8 Stunden wurde der Zeitraum von 3⁰⁰ bis 11⁰⁰ UT gewählt. Um die Verschiebung des Beobachtungsfensters auszugleichen, begann jede Session fünf Minuten früher.

Die Meßkonfiguration wurde so gestaltet, daß die Stationen Borkum (BORK), Helgoland (HELG) und Cuxhaven (CUXH) nicht umgesetzt wurden und permanent an den Messungen beteiligt waren. Alle übrigen Pegelstationen wurden durch einmaliges Umsetzen gemessen, wobei jede Station in mindestens zwei Sessions besetzt wurde. Mit P-Code Empfängern wurden die Stationen Helgoland (HELG), Borkum (BORK) und auf Sylt (HOER, LIST) ausgerüstet. Die gemessenen Netzkonfigurationen sind in der Abbildung 13.2 (Anhang, Seite 80) gezeigt. Durch das Umsetzen der Empfänger wurde für jeden Meßtag eine unterschiedliche Kombination der Stationen gemessen. Der P-Code Empfänger auf Sylt hatte am ersten (5.5.) und letzten (9.5.) Meßtag einen Ausfall, wodurch die Station Hörnum (HOER) nur in einer Session gemessen wurde. Die Verbindung Hörnum-List konnte wieder nicht direkt beobachtet werden, da nur ein Empfänger auf Sylt eingesetzt wurde.

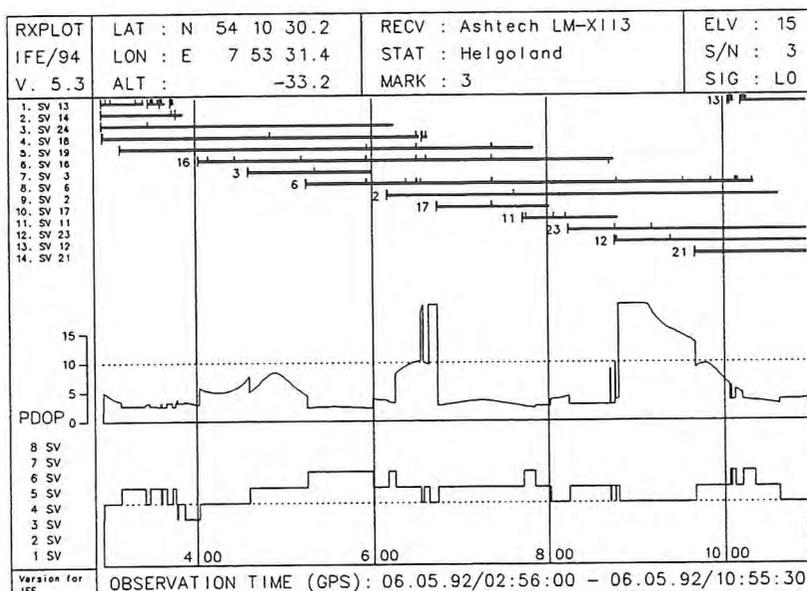


Abb. 6.4: Gemessene Satellitenkonstellation am 6.5.1992 auf der Station Helgoland

Durch Einbeziehung einer GPS Station auf der *Forschungsplattform Nordsee* (FPN) in der Kampagne 1992 sollte zum einen die Höhenlage des dortigen Pegels zum NN-Höhensystem ermittelt und die Bestimmung der Höhenlage für die Oberkante der Betonfundamente möglich sein. Über die langjährigen Beobachtungen des Pegels auf der Plattform kann somit ein neuer Stützpunkt für die Differenz NN zu *Seekartennull* (SKN) geschaffen werden. Ein Stützpunkt ist nach der Beendigung dieses Forschungsprojektes die Insel Helgoland. Ohne die Forschungsplattform kann die Differenz NN-SKN für dieses Gebiet nur von Helgoland aus ungenau extrapoliert werden. Die Durchführung der Beobachtungen wurde in Kapitel 4.2 genauer beschrieben. GPS Messungen wurden während jeder der fünf Sessions mit dem vierten Ashtech P-Code Empfänger auf dem Helikopterdeck der Forschungsplattform ausgeführt.

Die Darstellung in Abbildung 6.4 zeigt wieder die gemessenen Daten der Station Helgoland am 6.5.1992 nach dem Programm RXPLOT. Es ist zu erkennen, daß während der gesamten Meßzeit 4-5 Satelliten aufgezeichnet wurden und daß zwei Bereiche mit einem großen PDOP (> 10) vorlagen. Der zweite Bereich geht über eine Stunde und ist besonders lang. Ebenso ist zu erkennen, daß der hier benutzte Ashtech P-Code Empfänger mehr Cycle-Slips aufweist, als ein Ashtech C/A-Code Empfänger. Dies wird deutlich aus einem Vergleich mit der Darstellung der Messung vom 9.9.1991 in Abbildung 6.2 (Marken an den Balken nach oben).

6.3 Dritte Kampagne 1993 mit Trimble Empfängern

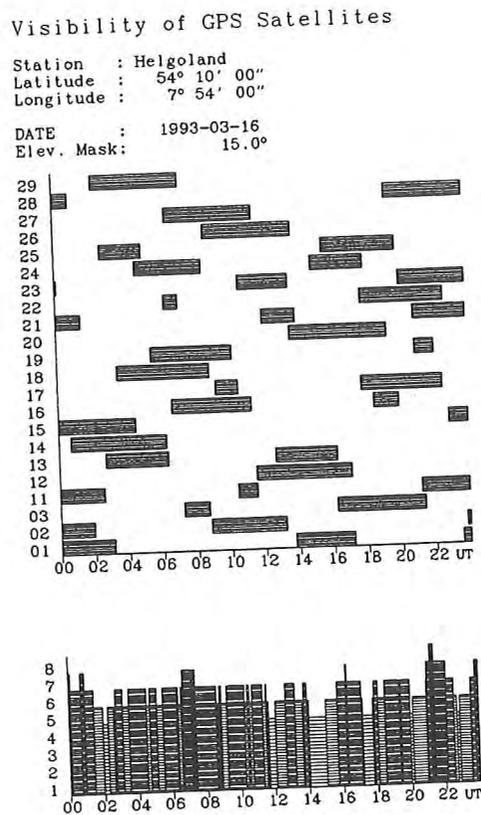


Abb. 6.5: Satellitensichtbarkeiten am 16.3.1993 auf der Station Helgoland

In der Zeit vom 10.-13. März 1993 wurde die dritte Meßkampagne gemessen. Diesmal konnten 8 Trimble SSE Empfänger eingesetzt werden. Diese Empfänger stellen auf beiden Trägerwellen L_1 und L_2 den P-Code bereit und damit die volle Trägerwellenlänge. Zwei Geräte konnten vom *Institut für Vermessungswesen* der TU Braunschweig, drei Geräte vom *Landesvermessungsamt Mecklenburg-Vorpommern*, und drei Geräte vom *Landesvermessungsamt Niedersachsen* bereitgestellt werden. Damit standen wie in den vorherigen Einsätzen 1991 und 1992 ebenfalls acht Geräte für die Vermessung des Pegelnetzes zur Verfügung.

Zur Meßzeit im März 1993 war das GPS-Satellitensystem bereits mit 22 Satelliten (davon 4 Block I Satelliten) ausgebaut. Abbildung 6.5 zeigt die vorab geplanten Satellitensichtbarkeiten für den 16. März. Erstmals zeigt die Planung eine ganztägige Überdeckung mit

mindestens vier Satelliten. Auf die Auswahl eines günstigen Beobachtungsfensters konnte daher verzichtet werden. Der Beobachtungszeitraum mit 10 Stunden wurde auf 7⁰⁰ bis 17⁰⁰ UT für fünf Tage festgelegt.

Die Stationsbesetzung während der fünf Kampagnen ist in Abbildung 13.3 (Anhang, Seite 81) gezeigt. Am 18. März (bei der 3. Session) mußte ein Empfänger von Wittdün nach Pellworm umgesetzt werden. Da die Messungen diesmal am Tage stattfanden, konnten für diesen Empfänger während der 3. Session keine Messungen erfolgen, da die Fährfahrt nach Pellworm nur am Tage während der Meßzeit erfolgen konnte.

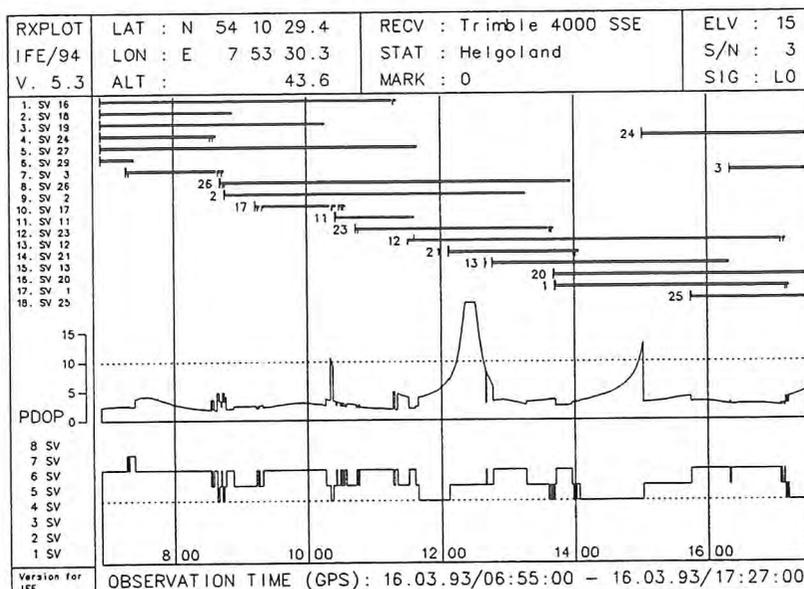


Abb. 6.6: Gemessene Satellitenkonstellation am 16.3.1993 auf der Station Helgoland

Die gemessenen Satellitendaten sind wieder mit dem Programm RXPLOT in der Darstellung 6.6 gezeigt. Aufgezeichnet werden konnten 4-6 Satelliten im Verlauf der Messungen. Die PDOP-Werte sind bei dieser Kampagne fast während der gesamten Meßzeit unter 5, ausgenommen von zwei Anstiegen innerhalb einer Stunde. Auffallend ist, daß es bei dem Trimble Empfänger zu fast keinen Signalunterbrechungen mit Cycle-Slips kommt. Von seiten der Datenaufzeichnung liegen sehr gute Daten für diese Kampagne vor.

6.4 Vierte Kampagne 1994 mit Trimble Empfängern

In der letzten Kampagne im Forschungsprojekt konnten 11 Trimble Empfänger eingesetzt werden. Vier Instrumente konnten vom *Landesvermessungsamt Brandenburg* und sieben Empfänger wieder vom *Landesvermessungsamt Niedersachsen* ausgeliehen werden. Ein zusätzlicher Trimble Empfänger der Landesvermessung Niedersachsen wurde auf einer Station in Friedrichskoog aufgebaut. Dieser Punkt wurde im Rahmen des BMFT-Forschungsprojektes „Optimierung der Beschickung im Küstenbereich der Deutschen Bucht“ in das bestehende Netz eingeschaltet. Dieses Kooperationsprojekt wird vom *Kartographischen Institut (IfK)* der Universität Hannover ausgeführt, das IfE unternimmt Positionsbestimmungen mit GPS von einigen Pegelstationen. Für dieses weitere Projekt wurden auch die

Referenzstationen (Hochpräzisen Permanenten Positionierungs-Service (HPPS)) Cuxhaven und Wilhelmshaven des Landesvermessungsamtes Niedersachsen mit einbezogen und in dieser Kampagne in der Auswertung genutzt. Für diese drei zusätzlichen Stationen konnten damit präzise Koordinaten und das Datum der Stationen im WGS84 berechnet werden.

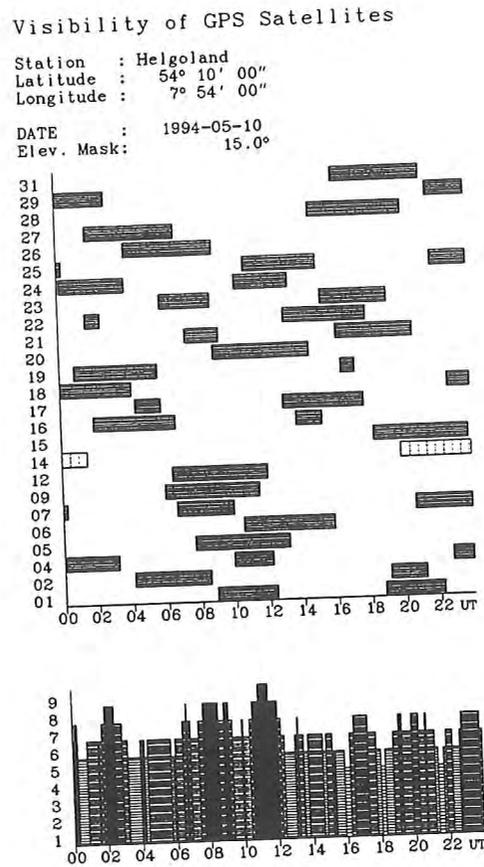


Abb. 6.7: Satellitensichtbarkeiten am 10.5.1994 für Helgoland

Die vorausberechneten Satellitenverfügbarkeiten sind in der Abbildung 6.7 dargestellt. Im Verlauf des gesamten Tages sind 5-7 und mehr Satelliten oberhalb des Elevationsgrenzwinkels von 15°. Mit nunmehr 25 Satelliten (davon noch 3 Block I Satelliten) hatte das Raumsegment einen fertigen Ausbauzustand erreicht. Zur Meßkampagne war die Sicherheitsmaßnahme *Anti-Spoofing* (AS) bereits aktiviert. Dies bedeutet, daß der P-Code für Block II Satelliten nicht mehr auf die Trägersignale moduliert wird und nur noch autorisierte Nutzer befugt sind die genaueren Codemessungen (jetzt Y-Code) zu entschlüsseln. Die Trimble SSE Empfänger können die L₂ Trägerwelle durch ein Korrelationsverfahren mit der L₁ Trägerwelle entschlüsseln. Letztendlich konnten damit L₁ und L₂ Trägerphasen mit der vollen Wellenlänge gemessen werden.

Die Netzkonfiguration der Kampagne ist in Abbildung 13.4 im Anhang wiedergegeben. Durch die genügende Anzahl an Empfangsanlagen konnte auf allen Stationen permanent beobachtet werden. Ein Umsetzen der Empfänger, wie es in den drei vorgehenden Kampagnen nötig war, konnte entfallen. Die Beobachtungsdauer für jede Station ist damit sehr lang.

Durch einen Bedienungsfehler wurden auf der Station Wittdün keine L_2 Trägerphasenbeobachtungen aufgezeichnet. Da die Auswertung mit einer ionosphärisch korrigierten Trägerphasenkombination aus L_1 und L_2 gerechnet wurde, kommt dieser Bedienfehler einem Totalausfall der Station gleich. Im Netzbild ist diese Station daher nicht enthalten.

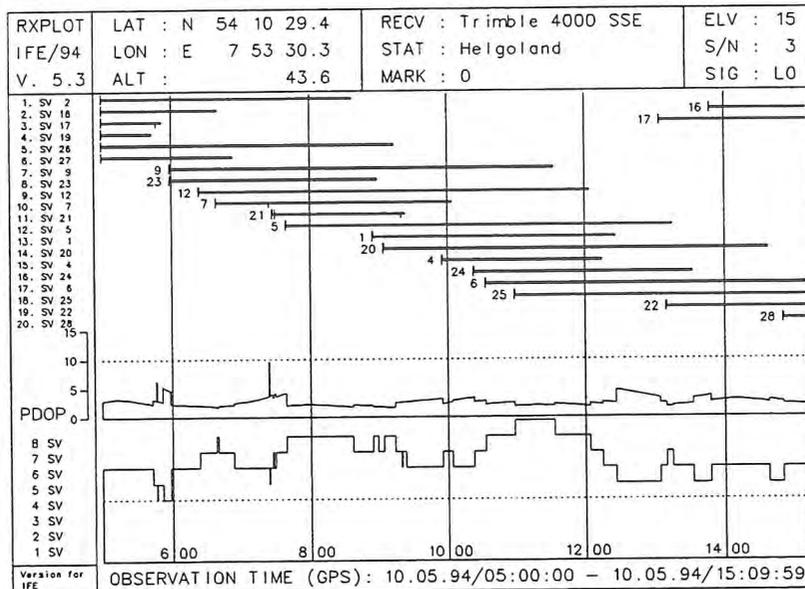


Abb. 6.8: Gemessene Satellitendaten am 10.5.1994 auf Helgoland

Die auf der Station Helgoland in der letzten Kampagne empfangenen Satellitensignale sind in der Abbildung 6.8 veranschaulicht. Während der Beobachtungszeit konnten 5-8 Satelliten gemessen werden. Das PDOP zeigt einen glatteren Verlauf unterhalb von 5 ohne kurzzeitige Spitzen. Der Empfänger hat wie schon in der dritten Kampagne 1993 keine *Cycle-Slips* erzeugt. Qualitativ sind die Messungen in dieser Kampagne die hochwertigsten während des gesamten Projektes.

7 Auswertung der GPS-Kampagnen

Die gesamte Auswertung erfolgte mit dem Programmsystem GEONAP wie im Kapitel 5.2 beschrieben. Im folgenden werden die Auswerteschritte der Prozessierung näher erläutert.

7.1 Auswertung der ersten GPS-Kampagne 1991

Zunächst ist es ein Ziel, die Mehrdeutigkeiten der Trägerfrequenzmessungen in jeder Session zu lösen. Da diese Kampagne mit zwei verschiedenen Empfängern beobachtet wurde, mußte zunächst eine spezielle Lösungsstrategie benutzt werden. Diese bestand darin, für die mit P-Code Empfängern beobachtete Basislinie die Widelane und das ionosphärisch korrigierte Signal zu lösen. Anschließend wurde das Meßnetz um jeweils eine C/A-Code Station erweitert, und es wurden die zusätzlichen Mehrdeutigkeiten gelöst.

Bei ersten Berechnungen war es nicht möglich, Mehrdeutigkeiten zwischen P-Code und C/A-Code Empfänger festzusetzen, ohne daß die Standardabweichung der a posteriori Gewichtseinheit der GPS-Auswertung erheblich anstieg. Darstellungen von „Doppelten Differenzen“ (*double differences*) liegen bei korrekt gelösten Mehrdeutigkeiten um Null. Es zeigten sich jedoch systematische Abweichungen, welche proportional zu den Dopplerfrequenzmessungen der Satelliten waren. Kombinationen nur ausschließlich mit P-Code oder C/A-Code Empfängern zeigten dieses Problem nicht.

Es wurde vermutet, daß die Meßzeitpunkte für die beiden Trägerphasen in einem C/A-Code Empfänger unterschiedlich sind. Laut Herstellerangaben war von einer unterschiedlichen Verzögerung der Meßsignale zwischen P-Code und C/A-Code Empfängern nichts bekannt. Mit einer Korrektur der Empfangszeiten für die quadrierte L_2 Messungen konnte dieses Problem behoben werden. Hierzu wurden die rohen Trägerphasen Φ_2 um $\Delta\Phi_2$ zeitlich um ΔT_s verschoben, wobei $\Delta\Phi_2$ über die gemessene Dopplerfrequenz D_1 auf der L_1 Frequenz nach

$$\Delta\Phi_2 = \Delta T_s \cdot 2 D_1 \frac{120}{154} \quad (7.1.1)$$

berechnet wurde. Eine Dopplerfrequenz auf der L_2 Trägerfrequenz (D_2) liegt bei Squaring-Empfängern nicht vor, kann aber in dieser Anwendung aus der L_1 Messung ausreichend genau durch Skalierung berechnet werden.

Der Wert für die zeitliche Verzögerung der L_2 Trägerphasenmessung konnte aus einer einfachen Testmessung bestimmt werden. Dazu wurden ein Ashtech P-Code und ein C/A-Code Empfänger an einer Antenne (Zerobaseline) betrieben. Verschiedene Korrekturen ΔT_s nach (7.1.1) wurden bei der Wandlung der Rohdaten in das RINEX-Format angebracht, und alle Mehrdeutigkeiten wurden gelöst. Ein Optimum der GPS-Auswertung konnte mit einem Wert von $27,3 \mu\text{sec}$ erlangt werden..

Nach Absprache mit der Geo++ GmbH (Autor der GEONAP-Software) wurde der Wert mit dortigen Messungen auf $26,5 \mu\text{sec}$ einheitlich abgestimmt. Die Fehlergrenze für ΔT_s beträgt $\pm 2 \mu\text{sec}$ ohne eine Verschlechterung der Trägerphasenmessung ($\pm 3 \text{ mm}$).

Nach der Beseitigung der genannten Problematik konnte die Auswertung mit einem Elevationsgrenzwinkel von 15° wie oben beschrieben erfolgen. Abbildung 7.1 zeigt die Doppelten Differenzen aus dem L_0 Signal zwischen den Stationen Helgoland (C/A-Code

Empfänger) und Büsum (P-Code Empfänger) zu allen Satelliten. Die Einheit der Doppelten Differenzen ist in Zyklen gegeben, entsprechend 2,7 cm bei dieser Linearkombination der Trägerwellen. Die Variationen liegen in einem Bereich von ca. ± 3 cm. Auffallend sind die großen Differenzen für drei Satellitenpaare ab 21⁰⁰ UT. Dies sind drei Satelliten, die sich flach oberhalb des nördlichen Horizontes unterhalb einer Elevation von 25° bewegen. Hier zeigen sich ionosphärische Störungen (Kap. 5.3), welche die Auswertung erheblich behinderten. Die Anfangsmehrdeutigkeiten und Cycle-Slips für diese Satelliten konnten nicht festgesetzt werden, und es ergibt sich die Darstellung in 7.1. Die Mehrdeutigkeiten für diese drei Satelliten konnten für die anderen Meßtage in nur wenigen Fällen festgesetzt werden. Es zeigten sich ferner bei einigen Satelliten kurzzeitige Störungen, die eine Wellenlänge überschreiten (in Abb. 7.1 um 22²⁰ UT). Hier liegen Meßfehler der Empfänger vor, die ebenfalls eine Mehrdeutigkeitslösung erschwerten. Diese Meßepochen mußten vor der Auswertung gesucht und eliminiert werden.

gnshow hel 255 helg,bues -dd -0 -cy
 Helgoland 1991

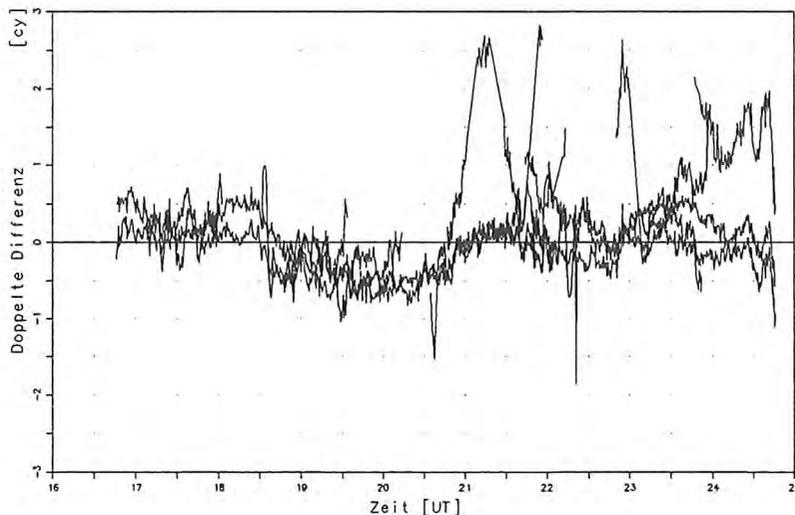


Abb. 7.1: Doppelte Differenzen L₀ Helgoland-Büsum am 12.9.1991

Zu erkennen ist in der Abbildung 7.1 eine periodische Störung der Doppelten Differenzen mit einer Amplitude von etwa 1,5 cm und einer Periodenlänge von ca. 6 Stunden. Dieses Bild zeigt sich nicht an allen Tagen so ausgeprägt. Diese Störung ist nicht mit der Tide korreliert, da die Gezeiten zwischen Helgoland und Büsum nur um max. 20 Minuten phasenverschoben sind (BSH 1990). Hier sind Laufzeitvariationen durch die Troposphäre zu vermuten. Diese liegen mit ihrer scheinbaren Periode unterhalb der Beobachtungszeit und gleichen sich über mehrere Meßtage aus.

Während der ersten beiden Meßtage wurde auf vier Meßpunkten der DÖNAV Kampagne (Kap. 6.1) beobachtet. Mit Einführung der ausgeglichenen Koordinaten aus DÖNAV (Ehlert 1992) erfolgte die absolute Lagerung aller Pegel-Stationen im WGS84. Tabelle 7.1 enthält die eingeführten Koordinaten dieser Stationen.

Stations-Abk.	geogr. Breite [° ' "]	geogr. Länge [° ' "]	ell. Höhe [m]
dame	52 34 10.1038	8 6 1.8588	84.760
hohb	53 3 2.3393	10 28 35.2226	149.779
kamp	54 56 48.9650	8 20 29.0455	67.429
pank	54 19 40.8323	10 32 44.7313	183.900

Tab. 7.1: Koordinaten der DÖNAV-Stationen im WGS84

Die GPS-Auswertung erfolgte auf der Basis von präzisen Ephemeriden. Die Lösungen jeder Session wurden mit dem ionosphärisch korrigierten Signal gerechnet. Aufgrund der schlechten Datenqualität konnte für die letzte Session nur eine Lösung für die Stationen Wittdün, Hörnum, Pellworm und Büsum erzeugt werden. Als Endergebnis lag ein Satz von Koordinaten mit vollständiger Kovarianzmatrix für jede der sechs Sessions vor. Eine Verknüpfung aller Sessions in einer Netzausgleichung ergab die Kampagnenlösung. Die Genauigkeit der relativen ellipsoidischen Höhen in diesem Netz beträgt ca. 2 cm. Eine vorab erstellte *Floatlösung* zeigt nur geringfügig schlechtere Genauigkeiten für die Höhenkomponenten.

7.2 Auswertung der zweiten, dritten und vierten GPS-Kampagne 1992-1994

Die Lösung der drei folgenden Meßkampagnen erfolgte in gleicher Art und Weise, so daß diese hier gemeinsam beschrieben werden sollen.

Seit 1992 liegen Beobachtungsdaten von Stationen aus Onsala (S), Kootwijk (NL), Herstmonceux (GB) und Wettzel (D) vor, die mit Rogue-Empfängern aufgezeichnet werden. Diese Stationen wurden ab 1992 in das Netz von IGS-Stationen (International GPS-Service for Geodynamics) integriert. Der IERS (International Earth Rotation Service) nutzt VLBI-, LLR-, SLR- und GPS-Daten, um ein globales Referenznetz im Rahmen des ITRF (Inertial Terrestrial Reference Frame) aufzubauen. Die genannten Stationen sind in den Berechnungen des ITRF enthalten und in *Boucher u.a. (1994)* wird die Lösung des ITRF93 zur Epoche 1993,0 vorgestellt. Die Genauigkeiten der genannten Stationen innerhalb des ITRF93 wird mit besser als 1 cm angegeben.

Die absolute Lagerung der GPS-Kampagnen in diesem Projekt konnte über diese vier Stationen mit ausreichender Genauigkeit (Kap. 5.3) erfolgen. Eingeführt wurden die Koordinaten aus dem ITRF93 zur Epoche 1993,0. Da die mittlere Meßzeit der vier Kampagnen im Projekt 1992,98 beträgt, ist das genannte ITRF93 zur Epoche 1993,0 ausreichend repräsentativ für jede einzelne Kampagne. Die Abbildung 7.2 zeigt die Lageverteilung der vier IGS-Stationen, die vier DÖNAV-Stationen und die übrigen Stationen des Projektes.

Bei der GPS-Auswertung können diese Stationen als *Fiducial-Stationen* mit den vorgegebenen Koordinaten eingeführt werden. Dadurch wurde gewährleistet, daß alle Pegelstationen des Projektes im ITRF93 bestimmt sind. Durch die großen räumlichen Distanzen von über 600 km zu den IGS-Stationen ist eine Lösung von Trägerphasenmehrdeutigkeiten nicht mehr möglich. Es wurden daher *Float-Lösungen* für die Kampagnen 1992-1994 bestimmt. Die zeitlichen Verzögerungen der L_2 Trägerphasenmessungen der C/A-Code Ashtech-Empfänger wurde für die zweite Meßkampagne wieder nach Kapitel 7.1 berücksichtigt.

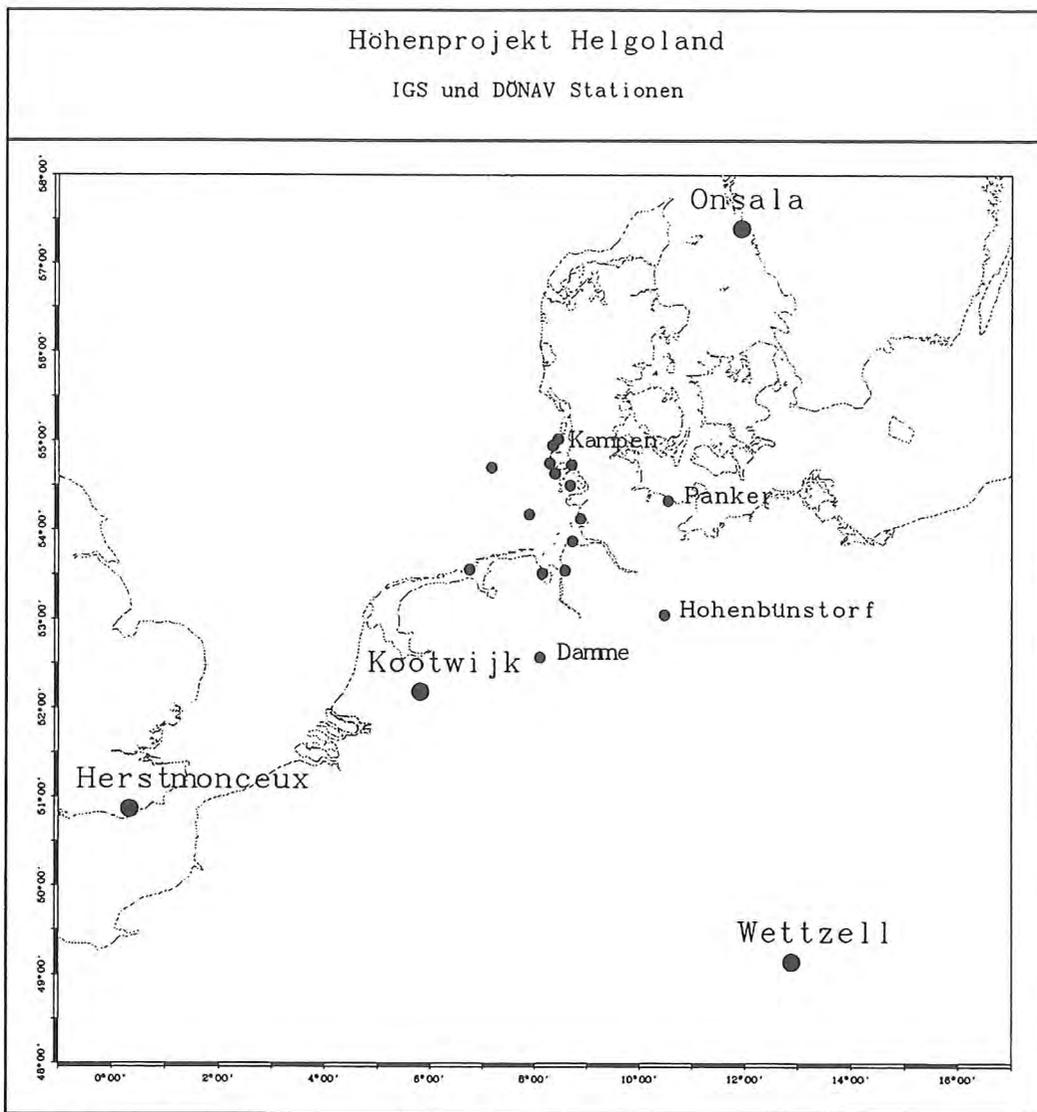


Abb. 7.2: Lage der IGS und DÖNAV Stationen

Durch Einbeziehung der IGS-Stationen als *Fiducial-Stationen* in die GPS-Auswertung kann eine Bahnbestimmung der GPS-Satelliten für den Meßzeitraum erfolgen. Ein Vergleich mit Lösungen über die *Präzisen-Ephemeriden* erlaubt, Aussagen über den Zugewinn an Genauigkeit zu treffen. Eine Bahnbestimmung kann nur zusammen mit der Schätzung von Troposphärenparametern erfolgen, da diese hoch mit der radialen Bahnkomponente korreliert sind. Nicht modellierte Laufzeitverzögerungen der Troposphäre würden durch die Bahnparameter aufgefangen (große Halbachse) und verfälschen diese.

Für die drei letzten Kampagnen wurden verschiedene GEONAP-Lösungen mit unterschiedlichen Ansätzen berechnet. Als Ergebnisse liegen für jede Session Koordinatensätze mit vollständiger Kovarianzmatrix vor. Die wesentlichen *Float-Läufe*, sind in folgender Tabelle 7.2 mit einer internen Bezeichnung aufgeführt.

Bezeichnung der Lösungen	Troposphären-Parameter mit Korr. Länge	IGS-Stationen	Orbit-Schätzung	Gezeiten	Präzise Ephemeriden
F	-	-	-	-	x
T	1 Wert	-	-	-	x
U	2 h	-	-	-	x
V	2 h	x	x	-	x
W	2 h	x	-	-	x

Tab. 7.2: GEONAP Rechenläufe für die Sessionen der Kampagnen 1992-1994

Die Netzlösung 'WWW' (W-Lösungen in allen Sessionen der drei Kampagnen) wurde für die folgenden Betrachtungen als Referenzlösung gewählt. Sie stellt auch die endgültige Lösung innerhalb der 2.-4. Kampagne dar. Die Tabelle 7.3 gibt Auskunft über die absoluten Höhendifferenzen aller Stationen zwischen den obigen Lösungen zur WWW-Lösung. Die Angabe 'Differenz' bezieht sich auf die mittlere Höhendifferenz zwischen beiden Koordinatensätzen. 'Streuung' ist die berechnete Standardabweichung aus allen einzelnen Höhendifferenzen. Aus der gemeinsamen Netzkombinationen aller Sessionen der drei Kampagnen ergeben sich Residuen jeder einzelnen Session zur kombinierten Lösung (Beispiel in Abb. 7.3). Die Standardabweichung dieser Residuen ist unter 'Residuen' angegeben und gibt eine Genauigkeitsaussage für die ellipsoidischen Höhen aus der Netzausgleichung an.

Anhand der Tabelle 7.3 wird aus dem Vergleich der WWW- und VVV-Lösungen deutlich, daß eine Orbitbestimmung für dieses Projekt keine wesentliche Veränderung der Koordinaten bewirkt. Die eingeführten *Präzisen Ephemeriden* besitzen für diesen Entfernungsbereich eine ausreichende Genauigkeit. Eine Verschiebung in der Höhe tritt nur bei der Forschungsplattform (plat) auf, allerdings ist diese nur in der 2. Kampagne 1992 besetzt worden, und Restfehler in der Troposphäre werden durch die Orbitbestimmung innerhalb der 2. Kampagne aufgefangen (s.o.). Damit entstehen auch Auswirkungen auf die Koordinaten der übrigen Stationen, wodurch diese Lösung als endgültige Lösung ausscheidet. Die Streuung der Sessionresiduen innerhalb der VVV-Lösung sind mit mit 21,3 mm geringfügig größer als mit 20,5 mm bei der WWW-Lösung.

Station	FFF [mm]	TTT [mm]	UUU [mm]	VVV [mm]	WWW [mm]
Helg	27.8	32.5	32.2	0.1	0.0
Witt	51.3	44.0	37.0	0.0	0.0
Bues	30.3	41.7	32.8	1.5	0.0
Cuxh	19.1	36.9	30.0	3.2	0.0
Brem	21.2	38.9	34.4	5.3	0.0
Bork	23.5	32.2	26.1	-1.3	0.0
List	45.8	41.3	34.8	-3.7	0.0
Dage	38.1	39.1	34.1	-0.8	0.0
Wilh	23.2	35.6	29.0	2.6	0.0
Hoer	45.3	40.0	36.0	-1.4	0.0
Pell	36.2	43.6	38.6	3.5	0.0
Plat	13.9	9.4	42.2	13.1	0.0
Streuung	12.0	9.3	4.4	4.4	-
Differenz	31.3	36.3	33.9	1.8	-
Residuen	24.1	25.9	20.8	21.3	20.5

Tab. 7.3: Höhendifferenzen zwischen verschiedenen Programmläufen zur WWW-Lösung

Für die Berechnung der UUU-Lösung wurden keine IGS-Stationen als Zwang in die GPS-Auswertung eingeführt. Zur Lagerung dieser, sowie der FFF und TTT-Lösung wurde die Station Helgoland aus der WWW-Lösung mit einer absoluten Genauigkeit der Koordinaten von 1 cm eingeführt. Durch dieses Vorgehen ergaben sich Verlagerung des Netzes von 33,9 mm, wobei die Residuen innerhalb der U-Lösung etwa denen der WWW-Lösung entsprechen. Eine Lageänderung dieser Größenordnung sollte keine Auswirkung auf eine Höhenübertragung in diesem Projekt haben (Kap. 5.3).

Die TTT-Lösung wurde mit einem zeitlich konstanten Troposphärenparameter für jede Station gerechnet. Vergleichbar ist hierzu die UUU-Lösung mit Troposphärenparametern mit einer Korrelationslänge von 2 Stunden. Hier zeigt sich deutlich eine Verschlechterung der Genauigkeit durch die zeitliche Invariabilität des Troposphärenparameters an den Koordinatendifferenzen und den Residuen.

Die FFF-Lösung wurde ohne Troposphärenparameter gerechnet und kann gut mit der UUU- oder TTT-Lösung verglichen werden, da diese drei Lösungen ohne *Fiducial-Stationen* erzeugt wurden. Es zeigt sich eine noch weitere Streuung in den Koordinaten für die FFF-Lösung.

Alle Session-Residuen innerhalb der WWW-Lösung sind in der Abbildung 7.3 dargestellt. Die Darstellung zeigt die Differenzen der Koordinaten aus allen 14 einzelnen Sessions zur kombinierten Netzlösung der 2.-4. Kampagne. Es zeigen sich die größten Residuen für die Ashtech Kampagne 1992 mit bis zu 7 cm, während die Trimble-Kampagnen (1993, 1994) homogene Koordinatenlösungen besitzen. Die Gesamtlösung der drei Kampagnen orientiert sich an den Trimble Kampagnen durch das höhere Genauigkeitsniveau. Die Netzbilder mit Konfidenzellipsen für die Lage und Standardabweichungen in der Höhenkomponente im Anhang (Abb. 13.7 bis 13.9) zeigen deutlich die geringere Genauigkeit der 2. Kampagne.

Session-Residuen zur Gesamtlösung, Höhe

Kampagnen 2-4: 2. hell . . . 4. dunkel

Lösung: WWW, $s_0=0.020486$

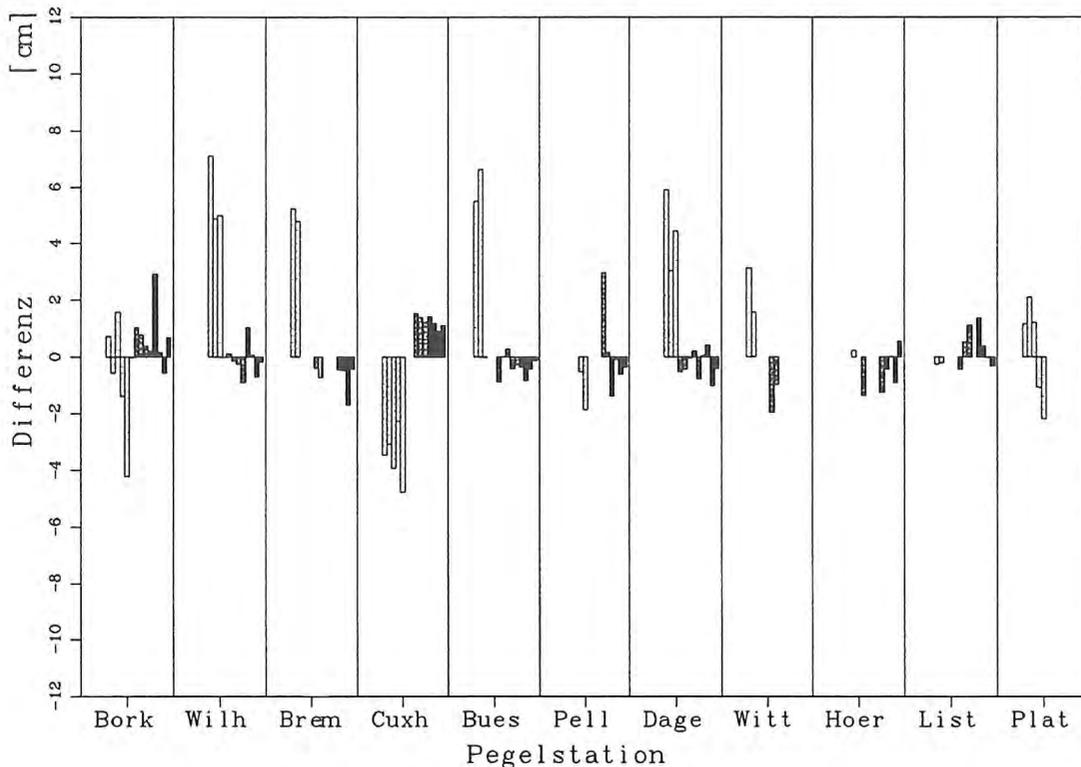


Abb. 7.3: Sessionresiduen der 2.-4. Kampagne gegenüber einer gemeinsamen Netzlösung

Die geringere Genauigkeit zeigt sich auch an den Residuen der 2. Kampagne in Abbildung 7.3. Es zeigen sich in der Abbildung auffällige Systematiken bei den Stationen Bremerhaven, Cuxhaven und Büsum. Während der 2. Meßkampagne wurden Empfänger und Antennen von Ashtech benutzt. Bei den Antennen wurden zum Teil die älteren Modelle von C/A-Code Antennen und auf einigen Stationen (Bork, Cuxh, Hoer, List und Plat) die neueren Typen (P-Code) genutzt. Um Variationen der Phasenzentren zwischen den beiden Antennentypen auszuschließen, welche die Residuen in Abbildung 7.3 erklären könnten, wurden am 29.4.1992 kleinräumige Testmessungen am IfE ausgeführt. Die Auswertung ergab keine nachweisbare Höhendifferenz zwischen den beiden Antennentypen. Die Ergänzung der Lösung mit der 1. Meßkampagne bestätigt, daß die offenbaren Systematiken eher zufälliger Art sind oder sich hier troposphärischen Effekte zeigen.

7.3 Kombination aller vier Meßkampagnen

Die endgültige Projektlösung wurde durch die Netzkombination aller Sessions der vier Kampagnen erzeugt. Bei der Kombination der WWW-Lösung mit den Fixed-Lösungen der 1. Kampagne ergaben sich große Differenzen für die ersten beiden Sessions der 1. Kampagne. In diesen beiden Sessions sind die DÖNAV-Stationen integriert mit großen

Entfernungen zum zentralen Meßgebiet. Die Gefahr von fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten ist daher sehr groß. Es wurden für diese beiden Sessions Float-Lösungen mit einem Troposphärenparameter pro Station als endgültige Lösungen benutzt. Die Abbildung 7.4 zeigt die Höhenresiduen aus jeder Session und für jede Stationen (Helgoland festgehalten) in der endgültigen Projektlösung. Auffallend sind die großen Streuungen der Ergebnisse für die beiden Ashtech-Kampagnen. Die beiden Trimble-Kampagnen zeigen homogenere Sessionslösungen. Aus den geringen Werten für die Streuung der Residuen dieser beiden Kampagnen wird auch deutlich, daß die Projektlösung im wesentlichen von den beiden Trimble-Kampagnen abhängt.

Session-Residuen zur Gesamtlösung, Höhe

Kampagnen 1-4: 1. hell . . . 4. dunkel

Lösung: ZWWW5, $s_0 = .028855$

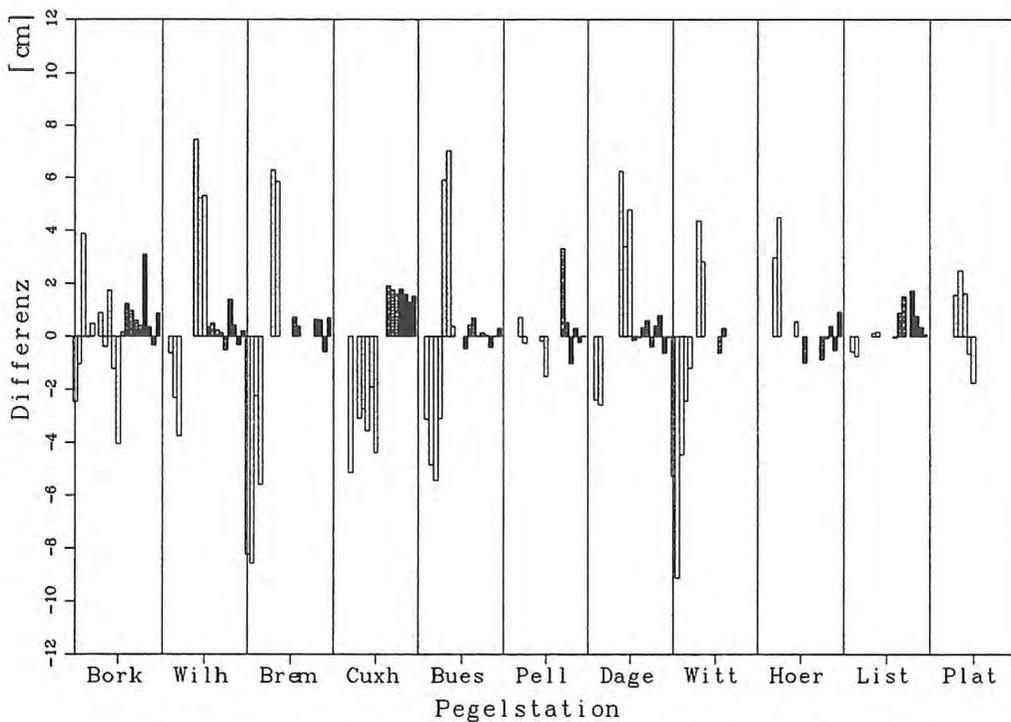


Abb. 7.4: Höhenresiduen aller Sessions innerhalb der Projektlösung ZWWW5

Aus den Residuen kann für jede Kampagne eine Standardabweichung geschätzt werden. Diese sind in der Tabelle 7.4 gegenübergestellt.

1. Kampagne	2. Kampagne	3. Kampagne	4. Kampagne	Projektlösung
41.7	37.4	9.7	8.9	28.9

ohne DÖNAV- und IGS-Stationen

Tab. 7.4: Standardabweichungen der Kampagnenresiduen zur Projektlösung

Die Tabelle 7.5 gibt Informationen zu den Genauigkeiten der Basislinien in den einzelnen Kampagnen. Aufgezeigt sind die minimalen, mittleren und maximalen Standardabweichungen der Höhendifferenzen von den Pegelstationen nach Helgoland.

Kampagne	min. s_h [mm]	mittl. s_h [mm]	max. s_h [mm]
1 (1991)	8.3	20.4	32.3
2 (1992)	14.9	19.8	30.9
3 (1993)	7.7	9.9	13.4
4 (1994)	9.7	10.0	10.9
Projektlösung	6.7	9.1	15.6

ohne DÖNAV- und IGS-Stationen

Tab. 7.5: Standardabweichungen der Höhendifferenzen auf den Basislinien nach Helgoland

Es bestätigt sich das gleichwertiges Genauigkeitsniveau für die beiden Kampagnen mit Trimble-Empfängern, bei denen die minimalen, mittleren und maximalen Werte über einen sehr kleinen Bereich streuen. Die Ashtech-Kampagnen (fixed und float) zeigen ähnliche Genauigkeiten zueinander, aber etwa um den Faktor 2 größere Standardabweichungen als die Trimble-Kampagnen. Es zeigt sich hier deutlich die Differenz in der Qualität der Satellitenmessungen zwischen den beiden Empfängertypen. Es muß aber auch bedacht werden, daß während des Projektes der Ausbau des GPS Satellitensystem vervollständigt wurde.

Im Anhang ist ein Netzbild aller einzelnen Kampagnen und der Projektlösung mit relativen Konfidenzellipsen für die Lage und Standardabweichungen für die Höhe in Abbildung 13.5 bis 13.10 gezeigt.

7.4 Einmessung der HPPS-Stationen und Friedrichskoog

Wie schon im vorangehenden Kapitel beschrieben wurde, waren für das BMFT-Forschungsprojekt „*Optimierung der Beschickung im Küstenbereich der Deutschen Bucht*“ eine Station in Friedrichskoog (frie) und die HPPS-Stationen Cuxhaven (0001), Wilhelmshaven (0008) in das Meßnetz integriert. Da auch Messungen einer Permanent-Station auf Norderney (0004) vorlagen, konnte auch diese Station einbezogen werden.

Die Messungen fanden nur während der 4. Kampagne statt. Die Koordinatenlösungen lassen eine geringere Genauigkeit als für die Pegelstationen erwarten, da troposphärische Einflüsse nicht durch mehrere Kampagnen gemittelt wurden. Wären die Stationen 0001 und 0008 in die GEONAP-Berechnungen und der Netzauswertung der 4. Kampagne übernommen worden, so hätten diese Stationen auch Auswirkungen auf direkt benachbarte Stationen (Cuxhaven und Wilhelmshaven), wodurch die Koordinatenschätzungen dieser Stationen gestört wären.

Die Stationen 0001 und 0008 liegen in der unmittelbaren Nachbarschaft der Stationen in Cuxhaven (Entfernung 985 m) und Wilhelmshaven (Entfernung 85 m). Mit nur den Daten dieser Basislinien konnten die Mehrdeutigkeiten aller Trägersignale gelöst werden. Die Standardabweichungen des Höhenunterschiedes der Basislinien aus der Fixed-Lösung betrug nach einer Netzkombination aller Sessions in der 4. Kampagne 1,0 mm. Diese präzisen Basislinien konnten über die Pegelstationen Cuxhaven und Wilhelmshaven in die Projektlösung eingerechnet werden, wodurch die Koordinaten bestmöglich an die Pegelstationen angeschlossen sind.

7.5 Endgültige ellipsoidische Koordinaten

Die Koordinatenergebnisse der Projektlösung (ZWWW5) sind in der Tabelle 7.6 aufgelistet. Das Datum der Koordinaten ist das ITRF93 zur Epoche 1993,0. Die Tabelle enthält zusätzlich die Standardabweichung der Koordinaten. Die Genauigkeit der Pegelstationen liegen bei etwa 7-9 mm. Ausnahmen mit 12,2 bzw. 15,8 mm sind die Station Wittdün (witt), welche in der 4. Kampagne ausfiel und die Forschungsplattform Nordsee (plat), da diese nur in der 2. Kampagne gemessen wurde.

Die angegebenen Höhen aller Stationen beziehen sich auf den Bodenpunkt. Ausnahmen hierzu bilden die HPPS-Stationen, bei denen die Referenzhöhe die Oberkante der Antennenabsorberplatte ist.

Station Abk.	geogr. Breite im WGS84	geogr. Länge im WGS84	ellipsoid. Höhe im WGS84 [m]	Standardabw. der Komponenten		
	[° ' "]	[° ' "]		Nord	Ost	Höhe
				[mm]		
helg	54 10 29.39483	7 53 30.34359	43.6444	4.5	4.7	7.3
bork	53 33 27.47758	6 44 48.58686	44.7321	4.5	4.7	7.2
wilh	53 30 53.03208	8 8 38.63088	46.3299	4.5	4.7	7.6
brem	53 32 43.53472	8 34 7.10542	43.7901	4.6	5.0	8.2
cuxh	53 52 18.85225	8 42 34.76583	42.4796	4.5	4.7	7.7
bues	54 7 23.12864	8 51 57.63783	44.3803	4.5	4.7	7.6
pell	54 30 38.54869	8 41 7.93221	43.2396	4.6	4.8	9.1
dage	54 43 47.49014	8 41 39.59306	47.7422	4.5	4.7	7.5
witt	54 37 45.40540	8 22 51.25381	42.8796	4.7	5.8	12.2
hoer	54 45 19.04415	8 17 36.48436	44.6193	4.6	5.0	8.6
list	55 1 3.09612	8 26 19.75484	44.7066	4.6	4.7	8.0
plat	54 42 3.32767	7 10 4.58603	72.3285	5.0	7.9	15.8
dame	52 34 10.10743	8 6 1.86704	84.8444	7.1	11.8	25.4
hohb	53 3 2.34432	10 28 35.22920	149.8331	8.6	13.3	27.1
pank	54 19 40.83643	10 32 44.73745	183.9873	8.9	14.2	30.2
kamp	54 56 48.96920	8 20 29.04912	67.6040	7.1	11.7	24.5
0001	53 51 52.87087	8 42 3.55875	69.8364	5.2	5.0	10.8
0008	53 30 50.37864	8 8 37.65299	60.0688	5.5	4.8	11.8
0004	53 42 3.10330	7 9 19.91995	51.5624	4.8	5.5	10.8
frie	53 59 59.04981	8 52 28.32885	41.9463	4.8	5.3	9.9

Tab. 7.6: Ellipsoidische Koordinaten im WGS84 (ITRF93)

Die Tabelle 7.7 enthält die relativen Standardabweichungen in der Höhe für die Basislinien zwischen allen Stationen und Helgoland. Die Genauigkeiten repräsentieren die Güte der ellipsoidischen Verbindungen nach Helgoland, welche in diesem Projekt vorrangig gesucht sind. Die Unsicherheiten in der Höhenkomponente entsprechen etwa denen der absoluten Höhen (Tab. 7.6). Für die Lagekomponenten ist die relative Genauigkeit deutlich höher.

Station Abk.	Standardabweichungen aller Koordinatenkomponenten der ellip. Basislinien nach Helgoland		
	Nord	Ost	Höhe
	[mm]		
bork	1.2	1.5	6.7
wilh	1.3	1.6	7.1
brem	1.4	2.3	7.7
cuxh	1.3	1.6	7.2
bues	1.2	1.6	7.1
pell	1.6	1.9	8.6
dage	1.2	1.5	7.0
witt	1.8	3.8	11.7
hoer	1.5	2.4	8.1
list	1.4	1.6	7.5
plat	2.4	6.6	15.6
dame	5.8	11.0	25.0
hohb	7.4	12.8	26.5
pank	7.6	13.8	29.7
kamp	5.5	10.8	24.1
0001	3.0	2.4	7.5
0008	3.4	2.0	7.1
0004	2.2	3.3	10.4
frie	2.0	3.0	9.5

Tab. 7.7: Standardabweichungen der Basislinien zu Helgoland

Die Genauigkeiten der Verbindungen von Helgoland zu den HPPS-Permanentstationen Cuxhaven (0001) und Wilhelmshaven (0008) entsprechen durch die Vorgehensweise aus Kapitel 7.4 in etwa denen der Anschlußpunkte. Die Stationen Norderney (0004) und Friedrichskoog (frie) wurden nur während der 4. Kampagne beobachtet. Die DÖNAV-Stationen weisen mit 24-30 mm die größten Unsicherheiten auf, welche durch die größeren Entfernungen bedingt sind.

7.6 Vergleich mit früheren GPS-Kampagnen

Ein Vergleich der ellipsoidischen Ergebnisse ist über identische Punkte mit der KUESTMAC87 und PEGEL90 Kampagne der BfG (Kap. 2.4) möglich. Zum Vergleich wurden die Niveaus der Koordinatensätze durch drei Translationen aufgrund verschiedener Datumsfestlegungen einander angeglichen. Die Tabelle 7.8 zeigt den Vergleich zur Kampagne KUESTMAC87 und die Tabelle 7.9 entsprechend zur Kampagne PEGEL90. Die

Identität der Stationen ist für die Kampagne KUESTMAC87 zweifelhaft, da einige Stationen nach Aussage der WSV erst ca. 1990 errichtet wurden.

Station	Δ Nord [cm]	Δ Ost [cm]	Δ Höhe [cm]
wilh	2.5	-2.6	-3.4
brem	6.1	3.4	5.8
cuxh	0.8	3.5	10.1
helg	-9.5	-7.0	-2.6
bues	0.5	7.9	18.6
plat	-1.1	-12.2	-15.6
list	-2.6	6.8	10.8
dage	-0.7	7.6	12.4

Tab. 7.8: Differenz der Projektlösung zu KUESTMAC87

Bei der Kampagne KUESTMAC87 wurde mit Ein-Frequenz-Empfängern beobachtet, wodurch Störungen durch die Ionosphäre nicht erfaßt werden konnten. Die Einflüsse der Troposphäre konnten durch Wiederholungsmessungen nicht minimiert werden. Wie zu erwarten, sind die Differenzen zur KUESTMAC87-Kampagne daher teilweise im Dezimeter-Bereich. Der Punkt auf der Forschungsplattform entspricht laut der damaligen Punktbeschreibung der Station in diesem Projekt.

Station	Δ Nord [cm]	Δ Ost [cm]	Δ Höhe [cm]
helg	0.9	-1.8	-4.1
brem	-1.8	1.8	-2.4
bues	-0.8	-0.6	-1.0
cuxh	-0.1	0.5	-1.9
dage	0.4	-1.7	-2.6
list	1.3	-2.6	1.2
pank	2.4	7.6	8.2
wilh	-1.7	-1.5	3.7
witt	-0.9	-1.9	-0.9

Tab. 7.9: Differenz der Projektlösung zu PEGEL90

Für die PEGEL90-Kampagne zeigen sich wesentlich geringere Differenzen. Hier ist die Punktidentität der aufgeführten Station sichergestellt. Die größten Abweichungen zeigt die Station Panker (pank). Diese besitzt aber auch den größten Abstand zum Kerngebiet. Die Differenzen in der Lage liegen für die Pegelstationen bei maximal 2,6 cm und für die Höhe bei 4,1 cm. Die Standardabweichungen der Differenzen betragen für die Nordkomponente 1,1 cm (mit pank 1,3 cm), für die Ostkomponente 1,7 cm (3,0 cm) und für die Höhenkomponente 2,5 cm (3,6 cm). Die Höhendifferenzen liegen im damalig berechneten Bereich und stellen eine unabhängige Bestätigung der hier erstellten Projektlösung dar.

8 Schweremessungen

Der Übergang der mit GPS gemessenen ellipsoidischen Höhen zu den amtlichen Höhen im *Normal-Null* System kann durch Kombination mit einem Geoidmodell erfolgen. Am IfE wurde bereits früher ein Quasigeoidmodell für Norddeutschland gerechnet (*Denker 1988, 1989*). Dieses Quasigeoidmodell entstand durch Kombination eines globalen Schweremodells mit topographischen Informationen und Schweredaten. Es liefert als Höhenfläche den Übergang zwischen ellipsoidischen Höhen und Normalhöhen. Für die flachen Gebiete Norddeutschlands entsprechen die Normalhöhen den amtlichen normal-orthometrischen Höhen (*Boljen 1995*). Um das Ziel dieses Projektes erreichen zu können, müssen sowohl die GPS-Höhen als auch das Geoidmodell eine Zentimeter-Genauigkeit aufweisen. Wie Voruntersuchungen ergeben haben, ist diese Genauigkeit bei der gravimetrischen Quasigeoidbestimmung mit einem Punktabstand von 3..10 km und einer Genauigkeit von 1..3 mgal für die Schwerewerte (*Denker 1988*) erreichbar. Vor Anlauf des Projektes enthielt die Schweredatenbank des IfE lediglich seegravimetrische Aufnahmen der Nordsee mit einem Profilabstand von etwa 10 Seemeilen (18 km); die Wattgebiete waren gänzlich unvermessen. Für eine hochauflösende Geoidbestimmung der Deutschen Bucht wurden deshalb zusätzlich verdichtende Schweremessungen mittels Seegravimetrie und eine gravimetrische Vermessung der trockenfallenden Wattareale durchgeführt. Als Abstand der Schiffsprofile und Punkte in den Wattgebieten wurden 2 Seemeilen festgesetzt.

8.1 Seegravimetrie

8.1.1 Daten früherer Schiffseinsätze

1991 konnten dem IfE Seegravimetriedaten des BSH für die Nordsee bereitgestellt werden. Diese wurden auf Meßfahrten der Forschungsschiffe GAUSS und ATAIR in den Jahren 1982 bis 1988 gewonnen. Die Auswertung der gravimetrischen Daten wurde vom IfE vorgenommen (*Niedfeld 1992*).

Schiff, Fahrt	Zeitraum	Fahrtstrecke
GAUSS 33	10.06.83 - 16.06.83	1350 km
GAUSS 49	25.07.83 - 02.08.83	1550 km
GAUSS 52	22.09.83 - 01.10.83	1570 km
GAUSS 99	22.05.87 - 12.06.87	3780 km
ATAIR 9	29.08.88 - 07.09.88	2190 km

Tab. 8.1: Frühere Fahrten mit Schiffen des BSH

Die Daten zu den Fahrten sind in der Tabelle 8.1 aufgeführt. Die Planung der Fahrten erfolgte nicht unbedingt in Hinsicht auf die gravimetrische Nutzung, sondern diente der Wracksuche oder anderen meereskundlichen Untersuchungen. So liegen keine deckende Raster sondern teilweise nur einzelne Meßstreifen vor. Es ergeben sich hierdurch in der

Auswertung zum Teil erhebliche Schwierigkeiten, da aufgrund der geringen Anzahl an Kreuzungspunkten eine Qualitätsverbesserung durch eine Kreuzungspunktanalyse kaum möglich ist.

In den folgenden Abbildungen 8.1 bis 8.5 sind die verwerteten Meßprofile der einzelnen Fahrten dargestellt. Wie aus den Darstellungen der Fahrtprofile hervorgeht, ist eine homogene Verdichtung des Gebietes der Deutschen Bucht mit diesen fünf Fahrten noch nicht erreicht. Zur ausreichenden Verdichtung auf etwa zwei Seemeilen wurden daher 1992 noch zwei Schiffseinsätze durchgeführt.

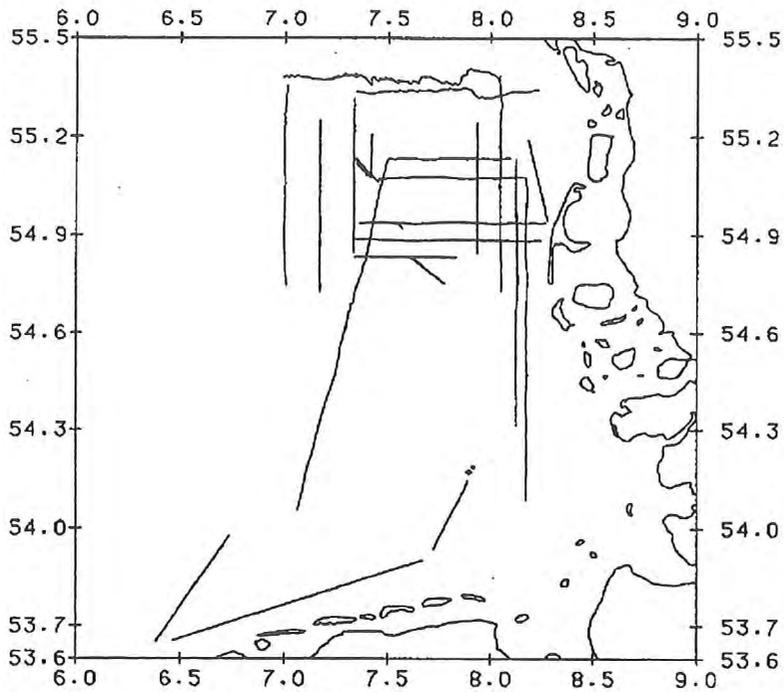


Abb. 8.1: Fahrt GAUSS 33

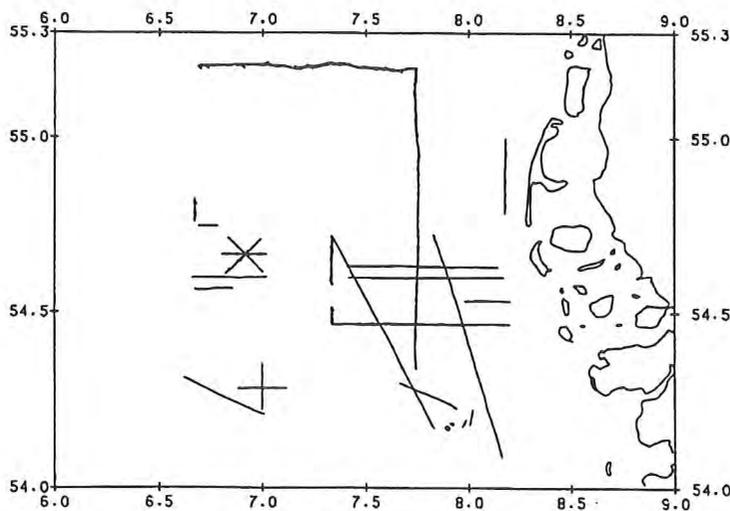


Abb. 8.2: Fahrt GAUSS 49, Magnetik, Gravimetrie

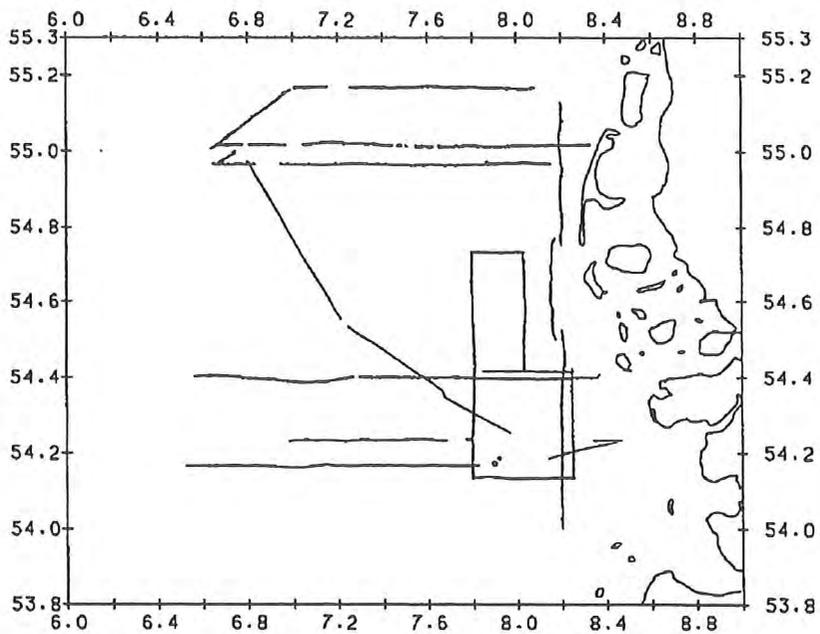


Abb. 8.3: Fahrt GAUSS 52, Magnetik, Gravimetrie

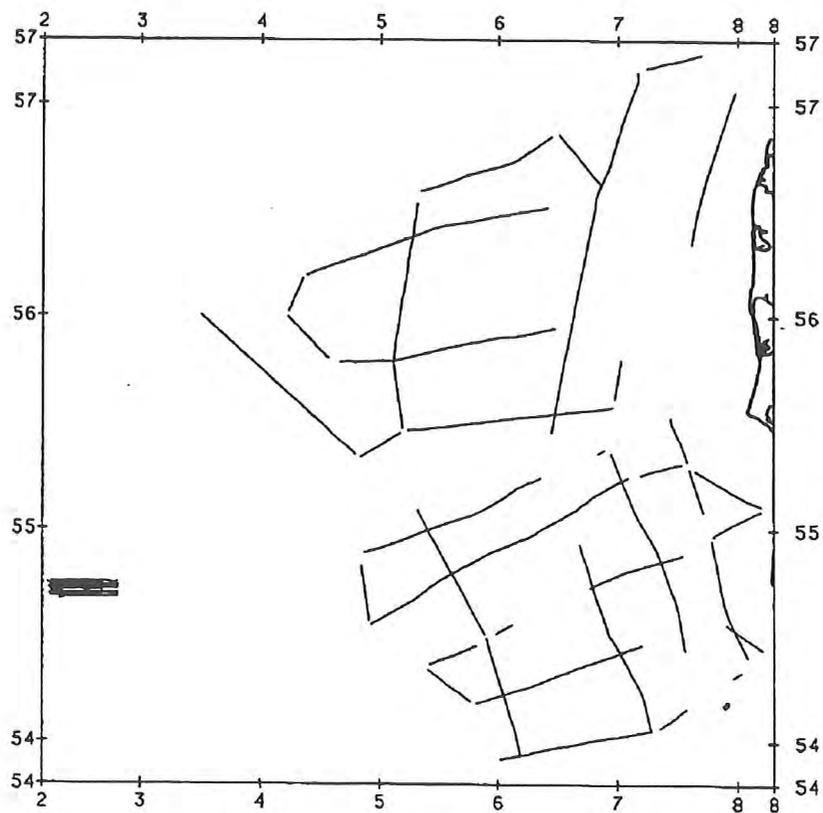


Abb. 8.4: Fahrt GAUSS 99

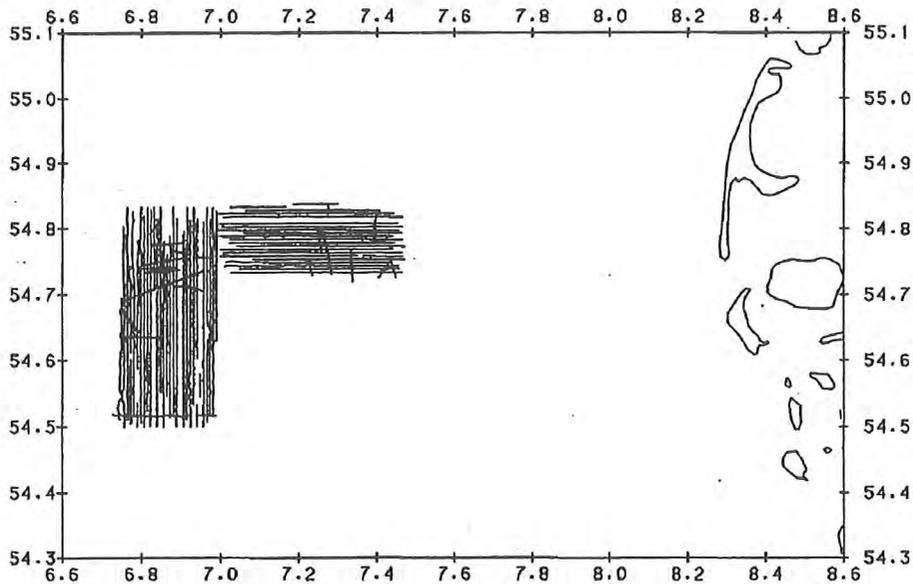


Abb. 8.5: Fahrt ATAIR 9

8.1.2 Vermessungsfahrt ATAIR 58

Die erste Vermessungsfahrt innerhalb des Projektes fand mit dem Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff (VWFS) ATAIR des BSH-Hamburg statt. Zielsetzung der 58. Fahrt des 51,4 m langen Schiffes (950 BRZ) war vorrangig die Verdichtung der Schwereprofillichte in der Deutschen Bucht auf 2 Seemeilen. Für die Fahrt wurde als Einsatzgebiet der Kernbereich der Deutschen Bucht um Helgoland gewählt. In der Zeit vom 31. August bis 11. September 1992 wurden ca. 1100 Seemeilen zurückgelegt. Neben der Seegravimetrie wurden seitens des BSH magnetische Messungen während der Profilmfahrt ausgeführt.

An Bord befanden sich die zwei Seegravimeter Askania Gss-3 Nr.1 (Prototyp) und Nr.55 gemeinsam auf einem Anschütz Kreiseltisch. Das System war in einem temperierten Container auf dem Arbeitsdeck am Heck installiert. Aufgezeichnet wurden an Bord zusätzlich automatisch Syledis- und Deccapositionen, Kreiseltkurs, Schiffsgeschwindigkeit und Wassertiefe mit einer Datenrate von 10 Sekunden.

Von großer Wichtigkeit bei der Seegravimetrie ist die Eötvös-Korrektur der Schwere-messungen, welche durch die Bewegung des Schweresensors auf der rotierenden Erde nötig ist. Um in mittleren Breiten eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ mgal zu erhalten, muß die Geschwindigkeit über Grund mit 0,05m/s oder 0,1 Knoten und der Kurs mit $0,5^\circ$ Genauigkeit erfaßt werden (Torge 1989). Da im Einsatzgebiet ein kontinuierlich störungsfreier Empfang von Syledis nicht gewährleistet und die Genauigkeit von Decca nicht ausreichend ist (Pelzer 1985), wurde die Position zusätzlich mit einem Ashtech P-Code Empfänger an Bord gemessen. Um die hohe Genauigkeit von GPS nutzen zu können, wurde im "Differential-Modus" (DGPS) gemessen. Hierzu wurde ein weiterer Ashtech P-Code Empfänger als Referenzstation auf Helgoland auf dem TP 1813-0-07600 betrieben. Die Aufzeichnungsrate betrug 5 Sekunden.

Die gefahrenen Profile sind in der Abbildung 8.6 dargestellt. Die Profilfahrt wurde zweimal aus Witterungsgründen unterbrochen und Helgoland angesteuert. Der dargestellte Kursplot zeigt die noch nicht bereinigten Profile und enthält noch die Anfahrten zu den Profilstrecken. Im nördlichen Bereich konnten aus zeitlichen Gründen vier geplante Profile nicht gefahren werden.

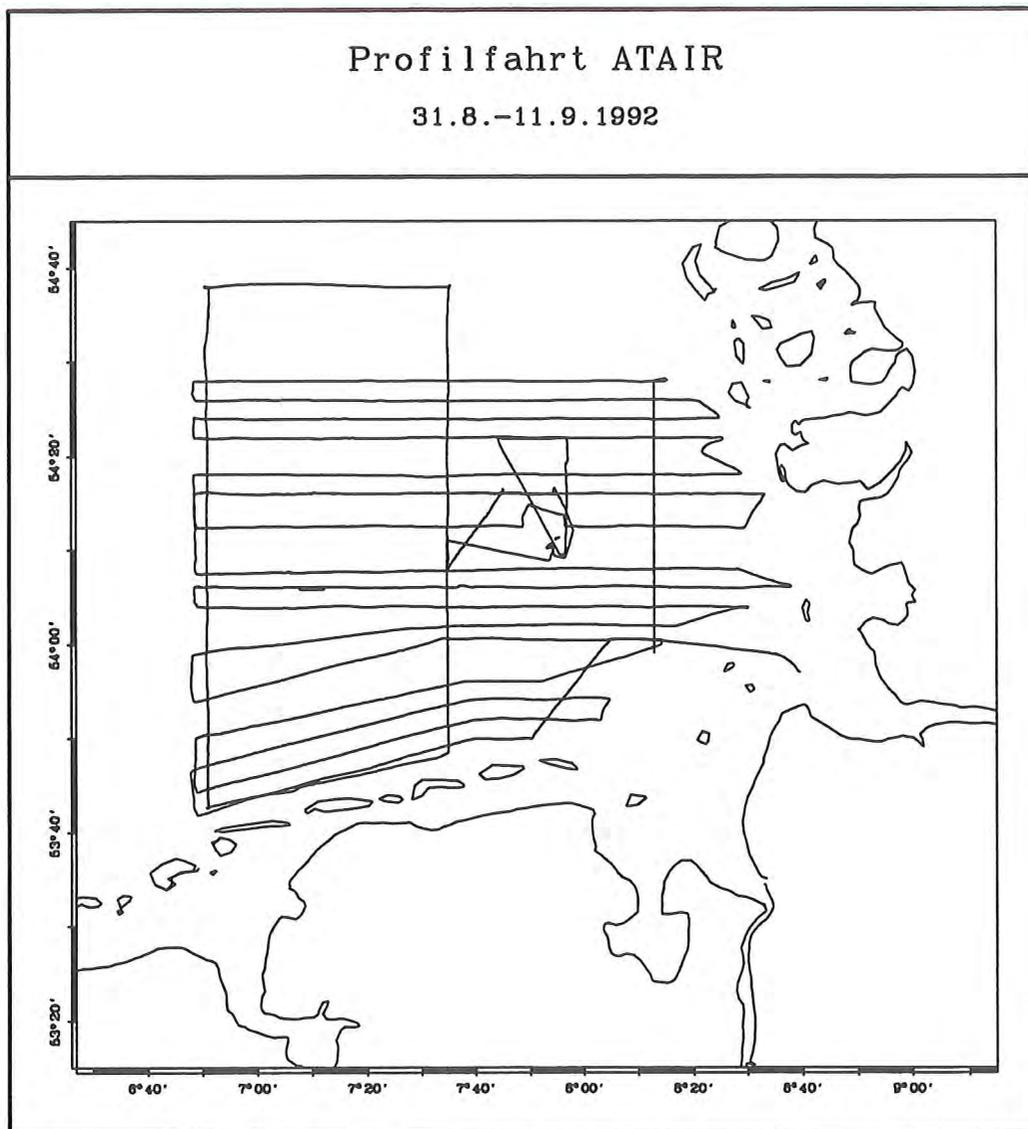


Abb. 8.6: Kursplot der Profilfahrt ATAIR 58

8.1.3 Vermessungsfahrt VICTOR-HENSEN

Als zweites Schiff stand dem IfE das Forschungsschiff VICTOR-HENSEN des Alfred-Wegener-Institutes (AWI) aus Bremerhaven zur Verfügung. Auf dieser Forschungsfahrt sollte ein großräumigeres Gebiet um Helgoland vermessen und eine Verdichtung der vorhandenen Profile auf ca. 5 Seemeilen erfolgen. Das Schiff ist mit einer Länge von 39 m und einer Verdrängung von 423 BRT kleiner als die ATAIR.

Die Profile wurden vom 24. September bis 6. Oktober 1992 gefahren. Bei günstigerer Witterung als bei der ATAIR-Fahrt konnten insgesamt ca. 1700 Seemeilen gefahren werden. Installiert war an Bord ein modernes Seegravimeter Askania Gss 30 des *Institutes für Geophysik* der Universität Hamburg in der Nähe des Schiffsschwerpunktes. Die Erfassung der Position des Schiffes erfolgte ausschließlich mit den im letzten Kapitel genannten Ashtech GPS-Empfängern. Wieder wurde *Differential-GPS* zu einem Referenzempfänger auf Helgoland (TP 1813-0-07600) verwirklicht. Abbildung 8.7 gibt den gefahrenen Kurs der Profilfahrt wieder. Die Ausfälle, die während der ATAIR-Fahrt im nördlichen Teil der Deutschen Bucht entstanden waren, konnten bei dieser Fahrt nachgemessen werden. Die Gravimeterdaten wurden an Bord mit einer Aufzeichnungsrate von 10 Sekunden registriert.

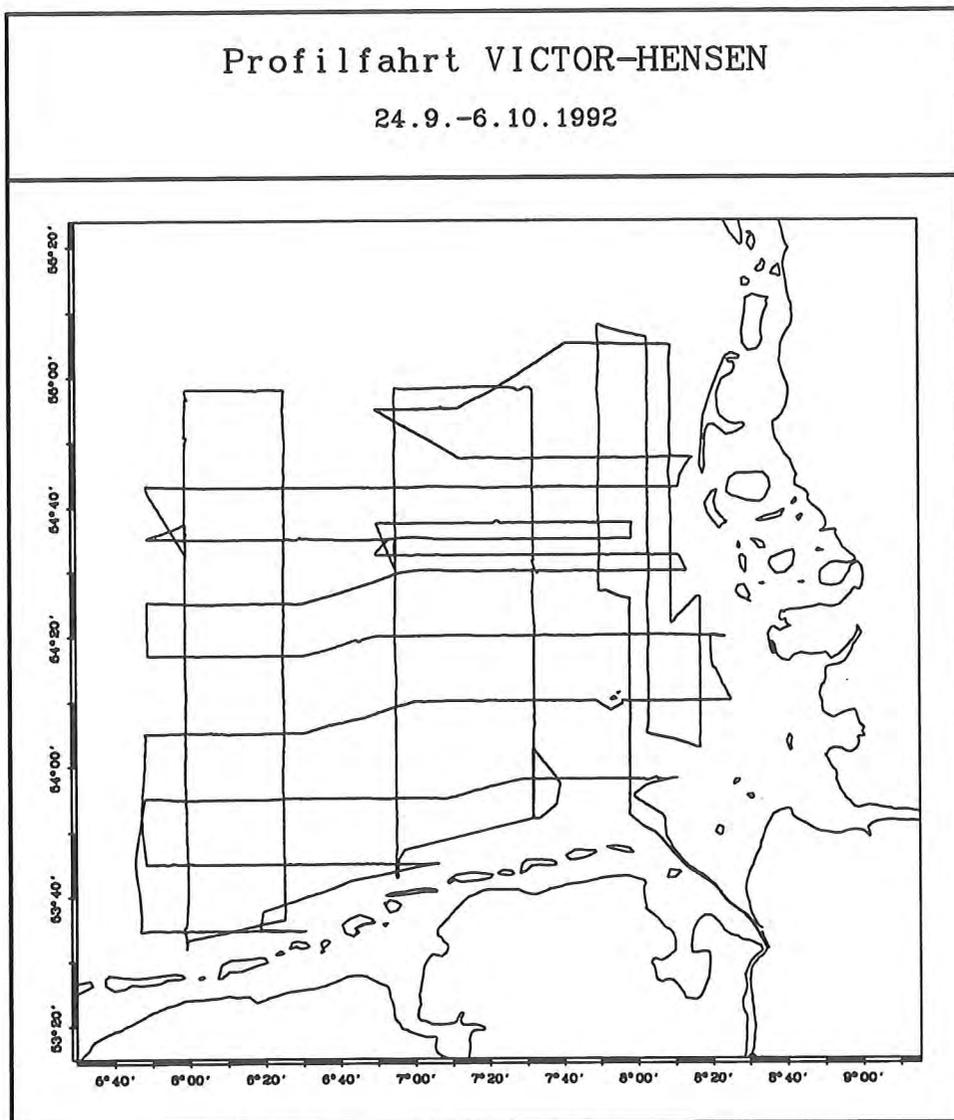


Abb. 8.7: Kursplot der Profilfahrt VICTOR-HENSEN

8.1.4 Auswertung der Seegravimetriedaten

Für die Fahrten ATAIR 58 und VICTOR-HENSEN mußte zunächst die GPS-Positionierung ausgewertet werden. Dies erfolgte mit dem am IfE entwickelten Programm GEONAV (Heimberg 1994). Das Programm nutzt Differentialkorrekturen der Referenzstation zur exakten Positionierung des bewegten Empfängers. Als Meßgröße wurden C/A-Code Messungen mit einer Trägerphasenglättung genutzt. Die P-Code-Daten der Empfänger waren durch AS-Experimente seitens der GPS-Betreiber gestört. Eine Trägerphasenlösung (PDGPS) war mit den zum Teil gestörten Daten und über die großen Entfernungen zur Referenzstation nicht möglich. Als Ergebnisse lagen nach der Auswertung die genauen Positionen, der Kurs und die Geschwindigkeit aus einem Filteralgorithmus vor. Die absolute Genauigkeit der DGPS Lösung des Schiffes wurde aus einem Höhenprofil zu 2-3 m abgeschätzt (Heimberg 1994). Die Lagegenauigkeit kann um den Faktor 1,5-2 besser angesehen werden. Die relative Genauigkeit zwischen aufeinanderfolgenden Epochen kann durch die Filterung und die vorhandene Korrelationen als sehr viel genauer angesehen werden. Hierbei ergeben sich Genauigkeiten von 0,5 m in der Höhenkomponente und 0,3 m für die Lagekomponente bei einem Epochenabstand von 10 sec.

Für die Fahrt ATAIR 9 und die Fahrten mit der GAUSS konnten nur herkömmliche Funkortungsverfahren für die Positionierung verarbeitet werden. Zur weiteren Auswertung wurden die Schweremessungen mit den Positionsdaten zu 10 Sekunden Datensätzen kombiniert. Der Kurs und die Geschwindigkeit des Schiffes wurden aus Positionsdifferenzen aus zwei aufeinanderfolgenden Epochen (Abstand 10 sec) berechnet. Der Fehleranteil Δv in der Geschwindigkeitsberechnung über GPS beträgt

$$\Delta v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{0,3m}{10s} = 0,03m/s. \quad (8.1.1)$$

Bei einer mittleren Geschwindigkeit v des Schiffes von 8 Knoten (4 m/s) kann der Kursfehler ΔK zu

$$\Delta K = \varrho \frac{b}{r} = \varrho \frac{0,3m}{4m/s \cdot 10s} = 0,4^\circ \quad (8.1.2)$$

abgeschätzt werden. Die GPS-Positionierung erlaubt die Erfassung der Eötvös-Korrektur innerhalb der genannten Grenzen. Ein Vorverarbeitungsprogramm filtert noch zusätzlich die Gravimeterregistrierungen, die Geschwindigkeiten und den Kurs des Schiffes.

Mit Hilfe des Programmes SEAGRA wurden die Differenzen an den Kreuzungspunkten sich schneidender Profile in ihrer Summe minimiert und so eine Qualitätssteigerung innerhalb einer Fahrt erreicht. Die Tabelle 8.2 gibt eine Übersicht zu den Genauigkeiten (RMS) an den Kreuzungspunkten vor und nach der Verarbeitung (Behrend u.a. 1995). Ebenso enthält sie Angaben über die genutzten Gravimeter und Navigationsgeräte. Zusätzlich sind Informationen zu den Meßfahrten, wie die gefahrene Strecke in Seemeilen und die Anzahl der für die Geoidberechnung bereitgestellten Schwerewerte enthalten.

Fahrt	RMS vor [mgal]	RMS nach [mgal]	Kreuz. Punkte	Gravimeter	Länge [SM]	Punkte	Navigation
GAUSS 33	2,3	1,1	21	Gss 3.1	730	2100	Decca
GAUSS 49	2,6	1,6	17	Gss 3.55	840	1400	Decca
GAUSS 52	2,2	1,2	20	Gss 3.55	850	2000	Decca
GAUSS 99	2,3	1,5	21	Gss 3.55	2040	4500	Decca
ATAIR 9	5,3	1,4	204	Gss 3.1	1180	2900	Syledis
ATAIR 58	2,2	0,9	44	Gss 3.55	1100	9400	DGPS, Sy.
VICTOR-HENSEN	0,9	0,5	56	Gss 30	1700	9600	DGPS

Tab. 8.2: Genauigkeiten und Ergebnisse einzelner Seegravimetriefahrten

Für die Fahrten ATAIR 58 und VICTOR-HENSEN (dieses Projekt) sind die Ergebnisse sehr gut, die Genauigkeit nach der Ausgleichung liegen bei 0,9 bzw. 0,5 mgal. Dies läßt sich begründen mit der guten Erfassung der Eötvös-Korrektur aus der DGPS-Navigation. Das bessere Ergebnis für die VICTOR-HENSEN Fahrt ist durch das modernere Gravimeter Gss 30, mit der optimaleren Aufstellung des Gravimeters im Schwerpunkt des Schiffes und der günstigeren Witterung begründet. Die früheren Fahrten mit der ATAIR und der GAUSS waren keine speziellen Fahrten zur Seegravimetrie. Die Profilgestaltung weist daher eine schlechte Verteilung der Kreuzungspunkte auf, die Ausgleichung ergibt dann nur eine unsichere Schätzung für die Genauigkeiten. Alle Seegravimetriefahrten wurden schließlich in einem Rechenlauf zu einer gemeinsamen Lösung kombiniert. In dieser Gesamtausgleichung wurden die einzelnen Fahrten an den Kreuzungspunkten zueinander optimiert. Die Tabelle 8.3 enthält Aussagen zu den Genauigkeiten der Seegravimetrie für die Quasigeoidberechnung. Die anfangs geforderte Genauigkeit konnte erreicht werden.

	vor der Kreuzungspunkt-Analyse [mGal]	nach der Kreuzungspunkt-Analyse [mGal]
RMS der Diff.	3,30	1,32
minimal Diff.	-17,81	-5,74
maximal Diff.	13,06	6,91
Mittel der Diff.	-0,31	0,00

Tab. 8.3: Gesamtausgleichung der Kreuzungspunktdifferenzen

8.2 Wattvermessung

Die Übergangszonen zwischen den dicht vermessenen Gebieten des Festlandes und den Bereichen der Seegravimetrie sind die Wattgebiete. Da diese Gebiete während des Niedrigwassers trocken fallen, ist hier eine Schwerevermessung mit normalen Relativgravimetern möglich. Zu diesem Zweck stand dem IfE das Tauch- und Arbeitsboot TB1 der Wehrtechnischen Dienststelle in Eckernförde zur Verfügung. Dieser ehemalige Minensucher besaß eine Länge von 20 m bei einem Tiefgang von 1,5 m und gestattete das Fahren in flachen Fahrwassern. Das Übersetzen des Meßtrupps auf die trockenen Wattgebiete geschah mit einem Schlauchboot, wodurch ein Aktionsradius von etwa einem Kilometer zum Schiff erreicht wurde. Die Messungen wurden tagsüber zwei Stunden vor und nach dem Niedrigwasser durchgeführt. Gemessen wurde mit dem Relativgravimeter LaCoste-Romberg D14, wobei die Messung auf einer Station etwa 15 Minuten beanspruchte. Abhängig von den Wetterbedingungen und den Anfahrwegen zwischen den Meßstationen konnten täglich zwei bis fünf Punkte vermessen werden.

Die Relativmessungen im Watt mußten an bekannte Landstationen angehängt werden. Daher erfolgte morgens vor dem Auslaufen aus einem Hafen und abends nach dem Einlaufen ein Schwereanschluß an Landstationen. Konnte abends aus zeitlichen Gründen kein Hafen angelaufen werden, so verblieb das Schiff nachts auf Reede. Die gravimetrischen Anschlußmessungen konnten dann erst einen Tag später erfolgen. Da in den angelaufenen Häfen meist keine vermessenen Schwerepunkte lagen, wurden neue Meßpunkte in den Häfen vermarktet, um eine spätere Anschlußmessung zu ermöglichen. Wenn möglich, wurde ein Höhenfestpunkt der Landesvermessung genutzt. Die Einmessung der zusätzlichen Hafentpunkte an das Hauptschwerenetz des Festlandes wurde im Winter 1992/93 mit Relativgravimetern durchgeführt.

Die Lagekoordinaten der Wattstationen wurden über GPS mit einem Magellan 5000 Handempfänger in Bezug auf das WGS84 gemessen. Da der Empfänger im absoluten Modus betrieben wurde, sind die Ergebnisse von SA-Maßnahmen (*Selective-Availability*) beeinträchtigt und die Genauigkeiten liegen damit in einem Bereich von etwa 100 m. Durch Mittelung mehrerer Messungen konnte eine Verringerung des Fehlers erwartet werden.

Die Höhen H_{SKN} der Wattstationen wurden später im *Seekarten-Null* (SKN)-System (mittlere Springtideniedrigwasser) aus Wattkarten abgegriffen. Aus der Karte des mittleren Springtidenhubs (*BSH 1990*) wurde für jede Meßstation der örtliche mittlere Springtidenhub $MThb$ interpoliert. Näherungsweise entspricht der halbe mittlere Springtidenhub der Differenz zwischen SKN und NN (*Hake 1982*). Die NN-Höhe einer Meßstation H_{NN} berechnet sich damit nach

$$H_{NN} = H_{SKN} - \frac{1}{2} MThb . \quad (8.2.1)$$

Die resultierende Genauigkeit der NN-Höhen darf nicht besser als wenige Dezimeter angesehen werden.

Die ersten Wattvermessungen begannen am 16. September 1992 bei Borkum und endeten am 21. Oktober 1992 bei Sylt. Während dieser Zeit konnten 93 gravimetrische Stationen im Watt vermessen werden. Eine flächendeckende Vermessung über den gesamten Küstenbereich gelang nur zum Teil. Durch technische Ausfälle und schlechtes Wetter entstanden Lücken von Wilhelmshaven über Cuxhaven bis nach Büsum.

1993 konnten nochmals mit der TB1 der Wehrtechnischen Dienststelle in Eckernförde zwei Fahrten unternommen werden. Ziel dieser Fahrten vom 19. Juni bis 8. Juli und 13. bis 28. August war die Vermessung der Wattgebiete zwischen Wilhelmshaven und Büsum. Insgesamt konnten 71 Stationen vermessen werden. Der genannte Bereich, welcher auch das zentrale Gebiet für die Verbindung nach Helgoland ist, wurde so mit einer dichten Vermessung überdeckt. Gemessen wurden im Projekt insgesamt 164 Stationen, deren Verteilung in der Abbildung 8.8 dargestellt ist.

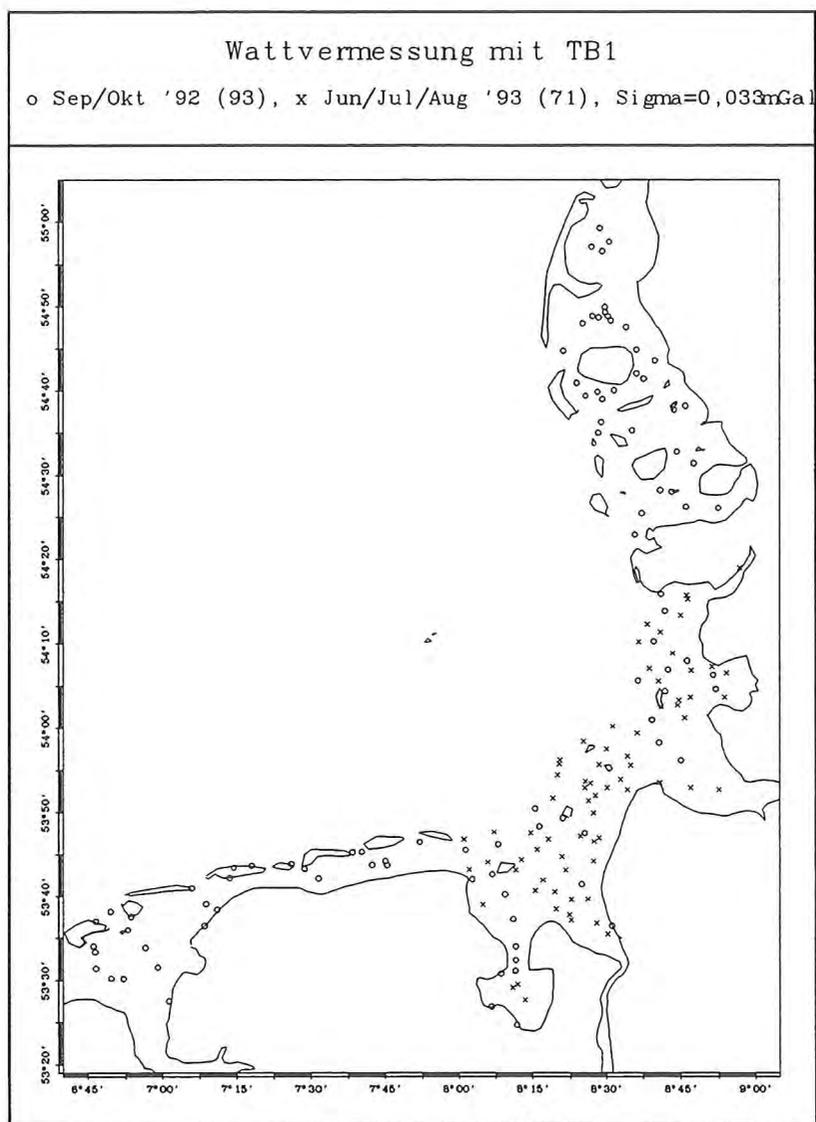


Abb. 8.8: Verteilung aller 164 gravimetrischen Wattpunkte

Die Auswertung der Schweredaten erfolgte mit dem Programmsystem GRAV (Autor Prof. Wenzel, Geod. Institut der Universität Karlsruhe, wird kommerziell vertrieben) am IfE, wobei alle Schweremessungen im Watt und Anschlußmessungen der Hafenecken gemeinsam ausgeglichen wurden. Als interne Genauigkeit ergeben sich 0,03 mgal für eine Schwere-messung. Die Genauigkeit einer Schwereanomalie im Watt ist nur durch die Höhenzuordnung begrenzt und liegt daher bei etwa 0,1 mgal. Die vollständigen Ergebnisse der Watt-gravimetrie sind im Anhang in Tabelle 13.1 bis 13.5 aufgeführt.

8.3 Ergänzungen der Schweredatenbank

Nach der Auswertung aller seegravimetrischen Fahrten und der Wattvermessung konnte die Schweredatenbank im Bereich der Deutschen Bucht erheblich erweitert werden. Abbildung 8.9 zeigt den Stand der gravimetrischen Datenbank zur Geoidberechnung für Ende 1994.

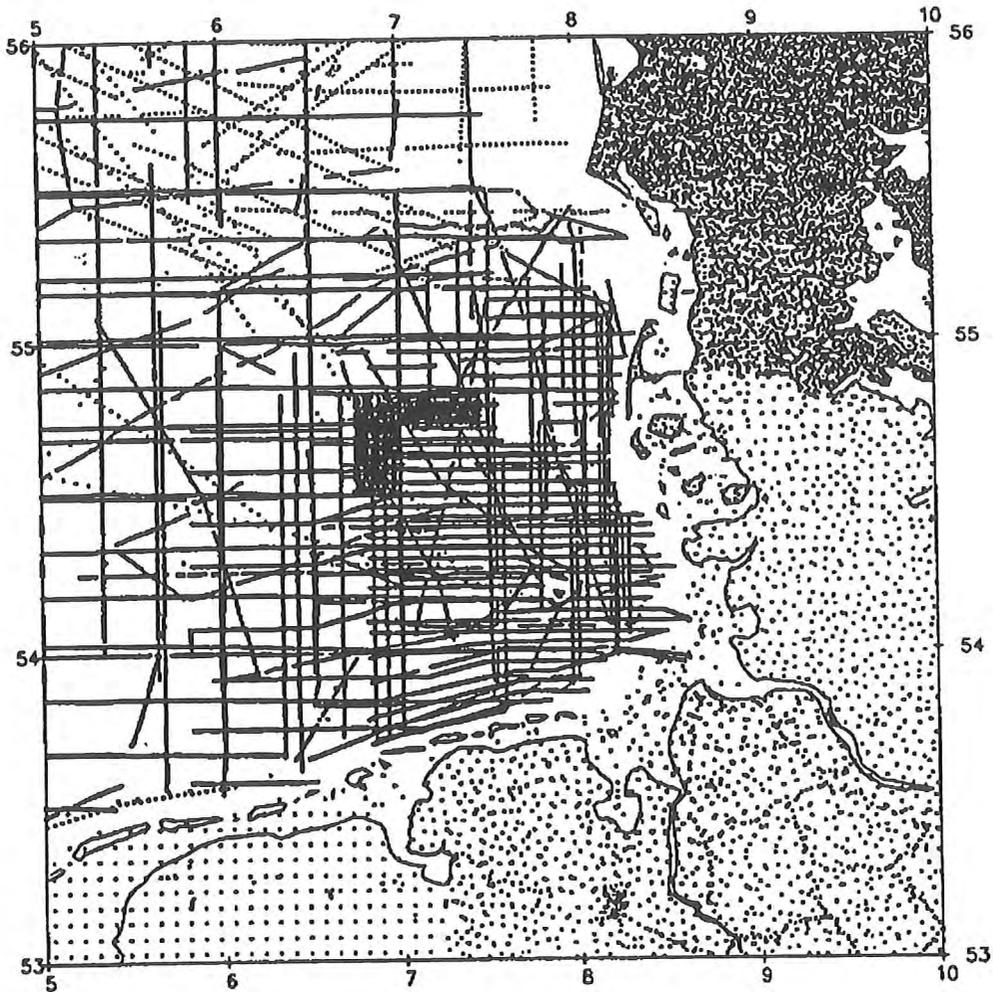


Abb. 8.9: Gravimetrische Datenbank Ende 1994

Die Verdichtung der Schweredatenbank durfte sich nicht nur auf den Bereich um Helgoland beschränken, sondern ging zur Vermeidung von Randeffekten auch über den Bereich der äußeren Pegelstationen Borkum und List hinaus. Dies konnte im westlichen Bereich bis in die holländischen Gewässer geschehen. Nördlich von List konnten keine Verdichtungen erfolgen. Geplant war für diesen Bereich eine Fahrt mit dem Forschungsschiff VALDIVIA der Universität Hamburg im Dezember 1992. Aufgrund von schlechten Wetterverhältnissen und vorrangigeren Arbeiten der Universität Hamburg konnten die gravimetrischen Vermessungen jedoch nicht durchgeführt werden. Die in Kapitel 8.1.1 vorgestellten früheren Vermessungsfahrten des BSH tragen in diesem Bereich zu einer Verdichtung der Profildaten bei.

9 Geoidbestimmung

Nach Integration der neuen Schweredaten in die Schweredatenbank des IfE (vgl. Abb. 8.9) wurde eine gravimetrische Quasigeoidbestimmung durchgeführt. Die Schwerewerte wurden mit einem Gravitationsmodell der Topographie (für die angrenzenden Landbereiche) und einer globalen Kugelfunktionsentwicklung des Gravitationspotentials kombiniert. Die Kombination erfolgte nach der heute üblichen „Remove-Restore“-Technik (*Denker u.a. 1986*):

- Zur Berechnung der langwelligen Schwerefeldstrukturen bis zu einer Wellenlänge von etwa 100 km wurde ein hochauflösendes globales Kugelfunktionsmodell verwendet. Dieses wurde durch Verknüpfung eines aus Satellitenbahnanalysen gewonnenen Schweremodells niedriger Auflösung mit mittleren Schwere- und Altimeterdaten (30'x30' bzw. 1°x1° Blockgröße) berechnet.
- Zur Bestimmung der mittelwelligen Feldanteile (etwa 5..100 km Wellenlänge) wurden die terrestrischen Punktschwerefelddaten herangezogen.
- Die kurz- und ultrakurzwelligen Feldinformationen wurden aus einem digitalen Geländemodell extrahiert.

Vor der eigentlichen Modellierung des Schwerefeldes wurde in einem Reduktionsschritt der Anteil des hochauflösenden Kugelfunktionsmodells sowie der topographische Anteil von den gemessenen Schwereanomalien subtrahiert (Tief- und Hochpaßfilterung der Schwerefeld-daten). Das entstandene glatte Restfeld residueller Schwereanomalien wurde mittels Feldtransformationen in ein Feld residueller Geoidhöhen überführt. Im abschließenden Schritt der Restitution wurden die Anteile des Kugelfunktionsmodells und der Topographie wieder aufaddiert.

In der neuen Geoidlösung wurden die langwelligen Schwerefeldinformationen dem bis Grad und Ordnung 360 vollständigen globalen Modell OSU91A (*Rapp u.a. 1991*) entnommen. Die kurzwelligen Schwerefeldstrukturen wurden mit der „Residual Terrain Model (RTM)“-Reduktionstechnik ermittelt. Die Feldtransformation der residuellen Schwereanomalien in entsprechende Geoidhöhen erfolgte durch Anwendung des Verfahrens der Spektralen Kombination (*Wenzel 1981*), wobei die Integralformel (eine modifizierte Stokes'sche Integralformel) mittels der schnellen Fouriertransformation (1D-FFT) ausgewertet wurde. Die Abbildung 9.1 zeigt eine Isoliniendarstellung dieser neuen Geoidlösung und die Tabelle 9.1 die expliziten Ergebnisse für die Stationen.

Die Anwendung der spektralen Kombination gestattet u.a. eine Fehlerschätzung der berechneten Geoidhöhen bzw. der Differenzen von Geoidhöhen. Für die neue Lösung ergaben sich Standardabweichungen von $\pm 15..25$ cm über 100..1000 km unter Zugrundelegung einer pessimistischen Fehlerschätzung für die terrestrischen Schweredaten (± 4 mgal). Wählt man einen optimistischeren Ansatz mit ± 1 mgal für die Schwerewerte, so verringern sich die Standardabweichungen auf $\pm 4..12$ cm über 100..1000 km. Aufgrund der hohen Güte der seegravimetrischen Daten (1.2 mgal, Kap. 8.1) ist der zweite Fehleransatz realistischer, so daß die Genauigkeit der Geoidhöhendifferenzen von Helgoland zur Küste mit 1.2 cm abgeschätzt werden kann. Diese interne Fehlerschätzung wird bestätigt durch Vergleiche mit unabhängigen GPS/Nivellement-Datensätzen wie beispielsweise der Kampagne HEINAC92 (*Grote u.a. 1995*) für Niedersachsen. Hier konnte eine erzielte Genauigkeit von $\pm 1..5$ cm über 10 km bis einige 100 km nachgewiesen werden.

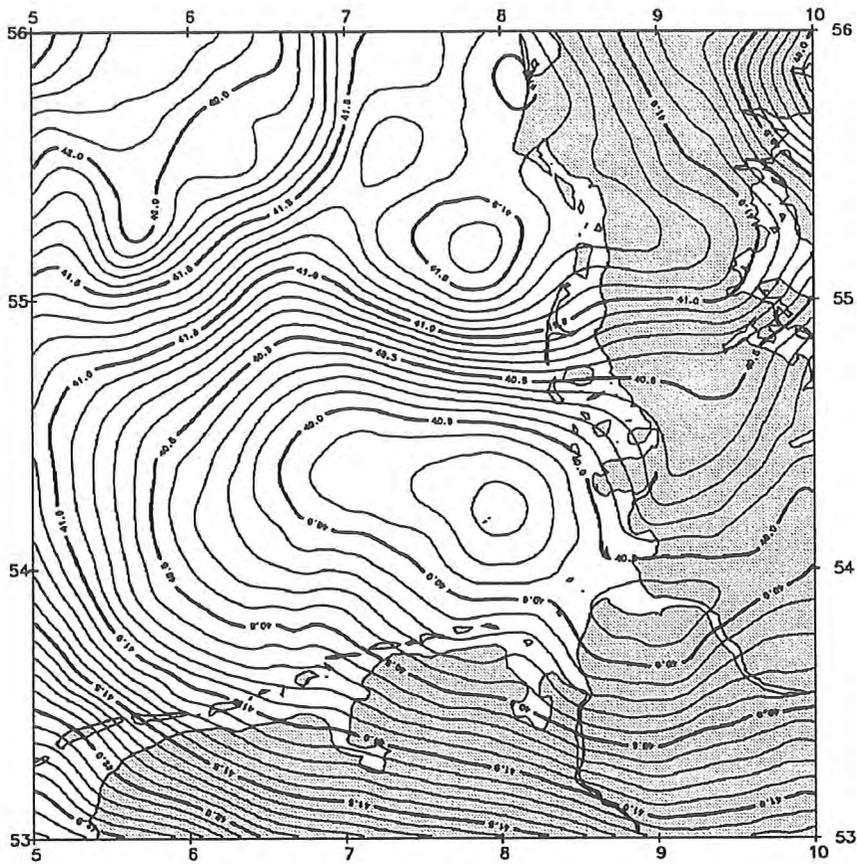


Abb. 9.1: Isoliniendarstellung der Quasigeoidlösung

Station Abk.	Quasigeoidhöhe [m]
helg	39.686
bork	40.798
wilh	40.451
brem	40.172
cuxh	39.861
bues	40.116
pell	40.222
dage	40.536
witt	40.335
hoer	40.665
list	41.132
plat	40.211
dame	43.338
hohb	41.146
pank	39.759
kamp	41.096
0001	39.860
0008	40.452
0004	40.482
frie	39.951

Tab. 9.1: Höhenanomalien aller Stationen

10 Höhenberechnung

10.1 Höhenberechnung für die Pegelstationen und Helgoland

Mit den vorliegenden ellipsoidischen Höhen h_{GPS} (Tab. 7.6) und den Höhenanomalien ζ (Tab. 9.1) kann die Höhenberechnung erfolgen. Aus den GPS-Beobachtungen mit ellipsoidischen Höhen und den NN-Höhen H_{NN} (Tab. 4.1) der Anschlußstationen ergeben sich zunächst Quasigeoidhöhen ζ_{GPS} zu

$$\zeta_{GPS} = h_{GPS} - H_{NN} . \quad (10.1.1)$$

Dies gilt unter der Annahme, daß die Normalhöhen und die normal-orthometrischen Höhen gleichgesetzt werden können. Die Ergebnisse für ζ_{GPS} können mit den Quasigeoidhöhen ζ aus der gravimetrischen Berechnung verglichen werden. Dabei liegen die Resultate aus GPS und Quasigeoidberechnung in einem geozentrischen System vor. Zur Erfassung deren unterschiedlichen absoluten Lagerung ist es zweckmäßig, eine konstante Verschiebung $\Delta\zeta$ zwischen den beiden Bezugsflächen mit

$$\Delta\zeta = \zeta_{GPS} - \zeta \quad (10.1.2)$$

zu berechnen (*Grote u.a. 1995*). Die Berechnung eines konstanten Versatzes kann mit einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (*Pelzer u.a. 1985*) erfolgen. Das funktionale Modell ist mit

$$\tilde{L} = \psi(\tilde{X}) = E \Delta\zeta \quad (10.1.3)$$

gegeben. Dabei sind \tilde{L} die „wahren“ Beobachtungen und \tilde{X} die „wahre“ Unbekannte $\Delta\zeta$. Das linearisierte Modell (Gauss-Markov-Modell) mit den gekürzten Beobachtungen \tilde{T} und Unbekannten \tilde{x} lautet

$$\tilde{l} = A\tilde{x} . \quad (10.1.4)$$

Die gekürzten Beobachtungen l ergeben sich mit (10.1.1) und (10.1.2) zu

$$l = L - L_0 = \zeta_{GPS} - \zeta = h_{GPS} - H_{NN} - \zeta . \quad (10.1.5)$$

Die Designmatrix A mit den partiellen Ableitungen der Beobachtungen nach den Unbekannten ist in diesem Fall ein Einheitsvektor. Im stochastischen Modell werden die Genauigkeiten der Beobachtungen erfaßt. Da a priori keine erwartungstreuen Schätzer für die Genauigkeit des Quasigeoides und des Nivellements vorliegen, wird keine unterschiedliche Gewichtung der Beobachtungen vorgenommen, die Standardabweichung der Gewichtseinheit ist 1,0. Die Ausgleichung wird dann wie üblich mit

$$P = Q_u = E \quad (10.1.6)$$

$$N = A^T P A \quad (10.1.7)$$

$$n = A^T P l \quad (10.1.8)$$

$$Q = N^{-1} \quad (10.1.9)$$

$$\hat{x} = Q n \quad (10.1.10)$$

$$v = A\hat{x} - l \quad (10.1.11)$$

$$s_0^2 = \frac{v^T P v}{n-u} \quad (10.1.12)$$

$$\Sigma_{\hat{x}\hat{x}} = s_0^2 Q \quad (10.1.13)$$

für alle Pegelstationen gerechnet ($n=10, u=1$). Es ergibt sich $\Delta\zeta = 47,5 \text{ cm} \pm 1,3 \text{ cm}$ bei einem s_0 der Beobachtungen l von 4,1 cm. Bei den Berechnungen zeigte sich, daß die Station auf Borkum extreme Verbesserungen von etwa 10 cm erhielt. Das Ausgleichungsmodell wurde dazu mit je einer Neigungskomponente ϵ_{OW} in Ost-West und ϵ_{NS} in Nord-Süd Richtung erweitert. Solche Neigungen können durch die Modellierung langwelliger Diskrepanzen (OSU91A-Modell) in der Quasigeoidberechnung auftreten (Grote u. a. 1995). Im funktionalen Modell (10.1.3) wird $\Delta\zeta$ damit zu

$$\Delta\zeta = \Delta\zeta' + \epsilon_{NS}\Delta\varphi + \epsilon_{OW}\Delta\lambda\cos\varphi \quad (10.1.14)$$

erweitert. Die Koordinatendifferenzen $\Delta\varphi$ und $\Delta\lambda$ der Stationen beziehen sich dabei auf die Koordinaten von Helgoland und φ auf die Breite der Station. Die Designmatrix erweitert sich zu

$$A = E \mid 1 \quad \Delta\varphi_i \quad \Delta\lambda_i\cos\varphi_i \mid . \quad (10.1.15)$$

Nach der Ausgleichung über alle Pegelstationen können zur Kontrolle für alle Stationen (auch die DÖNAV-Stationen und die Permanentstation (HPPS) auf Norderney) NN-Höhen aus (10.1.1), (10.1.2) und (10.1.14) nach

$$H'_{NN} = h_{GPS} - \zeta - \Delta\zeta' - \epsilon_{NS}\Delta\varphi - \epsilon_{OW}\Delta\lambda\cos\varphi \quad (10.1.16)$$

berechnet werden. Die berechneten NN-Höhen H'_{NN} können den bekannten NN-Höhen gegenübergestellt werden. Diese Differenzen entsprechen den Verbesserungen v nach (10.1.11). Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in der Tabelle 10.1 aufgezeigt.

Ausgleichungsergebnisse:			
$s_0 = 1.6 \text{ cm}$			
$\Delta\zeta' = -50.02 \text{ cm} \pm 0.65 \text{ cm}$			
$\epsilon_{NS} = -0.001'' \pm 0.018''$			
$\epsilon_{OW} = 0.173'' \pm 0.030''$			
Station Abk. 1	Niv. Höhe [m] 2	gerechnetes H_{NN} [m] 3	Differenz 2-3 [cm] 4
Bork	4.502	4.498	+0.4
Wilh	6.359	6.366	-0.7
Brem	4.084	4.081	+0.3
Cuxh	3.088	3.074	+1.4
Bues	4.696	4.712	-1.6
Pell	3.493	3.474	+1.9
Dage	7.662	7.663	-0.1
Witt	2.998	3.018	-2.0
Hoer	4.419	4.433	-1.4
List	4.063	4.045	+1.8
Pank	144.686	144.584	+10.2
Kamp	26.937	26.984	-4.7
Hohb	109.160	109.043	+11.7
Dame	41.970	41.995	-2.5
Frie	2.418	2.442	-2.4
0004	11.570	11.621	-5.1
Plat	-	32.657	-
Helg	4.190 ^{*)}	4.459	-26.9

^{*)} Höhe im Helgoländer System

Tab. 10.1: Ausgleichung über alle 10 Pegelstationen, mit Neigung

Die Ergebnisse zeigen keine signifikante Nord-Süd Neigung. Über die Anschlußpunkte Borkum bis List ergibt sich eine gute Anpassung mit einer Standardabweichung a posteriori von 1,6 cm. Dieser Wert enthält die Ungenauigkeiten von GPS, Quasigeoid und dem NN-Anschluß der Stationen.

Durch die geographische Verteilung (Abb. 2.1) der Stationen wird deutlich, daß die berechnete signifikante Ost-West Neigung nur durch die westlichste Station Borkum (Bork) bestimmt ist. Bei einer signifikanten Neigung müßten sich die östlichsten Stationen Panker (Pank) und Hohenbünstorf (Hohb) entsprechend anpassen. Diese Stationen zeigen aber Differenzen zwischen berechneten und örtlich gemessenen Höhen von über 10 cm. Auch die HPPS Station Norderney (0004), welche in der Nachbarschaft von Borkum liegt, zeigt größere Differenzen. Eine Berechnung ohne die Station Borkum ergibt bei der Berücksichtigung von Neigungstermen keine signifikanten Ergebnisse für beide Neigungsparameter.

Die Tabelle 10.2 enthält die Ergebnisse nach der Elimination der Station Borkum und ohne die Berücksichtigung von Neigungstermen. Bei dieser Lösung ergeben sich für alle Stationen geringe Differenzen zwischen den Ergebnissen aus GPS und Quasigeoid zu den nivellierten Höhen. Nur Borkum besitzt eine auffallend große Differenz von über 10 cm.

Die Pegelstationen zeigen insgesamt größere Differenzen als in der vorherigen Lösung, bei einem s_0 von 1,9 cm. Hier muß die unterschiedliche Anzahl an Freiheitsgraden der Ausgleichung beachtet werden. Mit Neigungskorrektur beträgt der Freiheitsgrad $f=10-3=7$, ohne Neigung und ohne die Station Borkum ist $f=9-1=8$. Für diese Lösung ohne Neigungsparameter spricht, daß alle DÖNAV-Stationen und Norderney sich gut an die nivellierten Höhen anpassen, obwohl die letzteren Stationen nur während einer Kampagne besetzt waren.

Ausgleichungsergebnisse:
 $s_0 = 1.9 \text{ cm}$
 $\Delta\zeta = -46.49 \text{ cm} \pm 0.64 \text{ cm}$

Station Abk. 1	Niv. Höhe [m] 2	gerechnetes H_{NN} [m] 3	Differenz 2-3 [cm] 4
Wilh	6.359	6.344	+1.5
Brem	4.084	4.083	+0.1
Cuxh	3.088	3.084	+0.4
Bues	4.696	4.730	-3.4
Pell	3.493	3.482	+1.1
Dage	7.662	7.671	-0.9
Witt	2.998	3.010	-1.2
Hoer	4.419	4.419	-0.0
List	14.063	4.040	+2.3
Bork	4.502	4.399	+10.3
Pank	144.686	144.694	-0.8
Kamp	26.937	26.973	-3.6
Hohb	109.160	109.152	+0.8
Dame	41.970	41.971	-0.1
Frie	2.418	2.460	-4.2
0004	11.570	11.545	+2.5
Plat	-	32.583	-
Helg	4.190 ^{*)}	4.423	-23.3

^{*)} Höhe im Helgoländer System

Tab. 10.2: Ausgleichung über 9 Pegelstationen (ohne Borkum), ohne Neigung

Die Stationen Hörnum und List passen plausibel in die Gesamtlösung, wobei bei List eine größere Abweichung zu erkennen ist. Da List im nördlichen Randgebiet der Seegravimetrie liegt und die Schweredatendichte hier geringer ist (Abb. 8.9), ist die Geoidberechnung in diesem Küstengebiet etwas weniger sicher. Die DÖNAV-Station Kampen (Kamp) liegt zwischen den Stationen Hörnum und List auf Sylt, paßt sich aber nicht an die Nachbarstationen an. Diese Station ist jedoch über die GPS-Messungen nicht direkt mit Hörnum und

List verbunden, wodurch relative Fehler in den ellipsoidischen Höhen von etwa 2,5 cm auftreten. Die Station Kampen kann daher nicht in die übrigen Pegelstationen eingeordnet werden.

Ein Signifikanztest mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit (*Pelzer 1985*) über die t-Verteilung ($t_{8,1-\alpha/2}=2,31$) ergibt, daß erst Höhendifferenzen über 4,4 cm signifikant sind. Dies trifft nur für die Station Borkum zu. Aus diesem Grunde ist eine Elimination der Station Borkum gerechtfertigt. Eventuell können hier zur Zeit nicht klärbare Punktverwechslungen, grobe Fehler des Nivellements oder andere Gründe vorliegen. Da die Station Borkum während der GPS-Messungen einundzwanzigmal aufgebaut wurde und die einzelnen Ergebnisse zueinander passen, kann ein Fehler nicht in den GPS-Messungen begründet sein. Auch ist eine lokale Störung im Quasigeoidmodell in dieser Größenordnung nicht zu erwarten.

Auffallend sind noch die größeren Differenzen von 3,4 cm für die Stationen Büsum (Bues) und 4,2 cm für Friedrichskoog (Frie). Vermutlich liegen hier lokale Effekte vor, da beide Abweichungen das gleiche Vorzeichen aufweisen. Die Abweichungen liegen jedoch unterhalb der Signifikanztestgrenze, so daß weitere Folgerungen nicht sinnvoll sind.

Der Höhenunterschied des derzeitigen Höhensystems auf Helgoland (HN) zum NN-Bezugssystem beträgt nach Tabelle 10.2 **23,3 cm**. Der Pegelnullpunkt (PNP) von Helgoland liegt demnach gegenüber NN bei **-477 cm**.

Die Genauigkeit der Höhenlage der Station auf Helgoland kann aus der Ausgleichung geschätzt werden. Nach (10.1.16) berechnet sich die Genauigkeit der NN-Höhe eines Neupunktes zu

$$\sigma H_{NN}^2 = \sigma h_{GPS}^2 + \sigma \zeta^2 + \sigma \Delta \zeta^2 . \quad (10.1.17)$$

σh_{GPS} kann nach Tabelle 7.7 zu 0,8 cm und $\sigma \Delta \zeta$ nach Tabelle 10.2 zu 0,6 cm geschätzt werden. Unbekannt ist die Genauigkeit $\sigma \zeta$ der Höhenanomalie des Quasigeoids bei Helgoland. Nach Kapitel 9 ist ein Wert von 1 cm realistisch. Damit ergibt sich für die NN-Höhe von Helgoland eine Genauigkeit von 1,4 cm. Bei einer pessimistischen Genauigkeit des Quasigeoides von 2 cm ergibt sich eine Genauigkeit der NN-Höhe von 2,2 cm. Ein realistischer Wert dürfte in einem Bereich von **1,5..2,0 cm** liegen.

10.2 Die Höhen der Permanentstationen

Die Permanentstationen Cuxhaven (0001) und Wilhelmshaven (0008) können direkt an die Nachbarstationen nach Formel (3.1) angehängt werden. Die Variationen der Höhenanomalien aus dem Quasigeoidmodell (Tab. 9.1) liegen um 1 mm für diese Stationen, wodurch die ellipsoidischen Höhendifferenzen weitestgehend dem NN-Höhenunterschied entsprechen. Die Höhe für die Permanentstation Norderney (0004) wurde von der Landesvermessung Niedersachsen bereitgestellt. Die Höhen der übrigen beiden Permanentstationen sind in der Tabelle 10.3 zusammengefaßt.

Station	HPPS	Höhe NN Ant. Platte [m]	Höhe NN OK. Pfeiler [m]	Genauigkeit [m]
Cuxhaven	0001	30.445	30.313	$(\text{Cuxh}^2 + 0.001^2)^{1/2}$
Wilhelmshaven	0008	20.097	19.961	$(\text{Wilh}^2 + 0.001^2)^{1/2}$

Tab. 10.3: Höhen der Permanentstationen 0001 und 0008

Im Projekt wurden die ellipsoidischen Höhen der HPPS-Stationen auf die Oberkante der Antennenabsorberplatte (Ant. Platte) bezogen. Die Höhendifferenzen zur Pfeileroberkante (OK. Pfeiler) wurden von der Landesvermessung Niedersachsen bereitgestellt.

10.3 Die Höhe der Forschungsplattform

In Kapitel 4.2 wurde über die Meßstation auf der Forschungsplattform Nordsee (FPN) berichtet. In Tabelle 10.2 ist die endgültige NN-Höhe der dortigen GPS-Station (Plat) angegeben. Während der GPS-Kampagne 1992 wurde mit einem Nivelliergerät der Höhenbezug des GPS-Punktes (einer Schraube auf dem Helikopterdeck) zu einem Stahlmeßdraht hergestellt. Auf den Gründungkörper der FPN wurde ein Druckpegel in einem „Käfig“ herabgelassen, an welchem der Meßdraht befestigt war.

Aus insgesamt 46 Messungen wurde ein roher Höhenunterschied zwischen GPS-Punkt und dem Gründungkörper zu

$$59,48 \text{ m} \pm 0,03 \text{ m}$$

bestimmt. Das Fehlermaß ergibt sich aus den einzelnen Abweichungen zum Mittelwert. Der Meßdraht zeigte sich schon während der Messung sehr anfällig für Windlast und Meeresströmungen, wodurch dieser von der Lotrichtung ausgebaucht wurde. Bei einem „Durchhang“ von 1 m ergibt sich nach *Großmann u. Kahmen (1985)* (Formel 2.11) ein Streckenfehler von 0,046 m. Da Windlast während der gesamten Messung herrschte, ist die obige Höhendifferenz eher noch kleiner zu erwarten. Genaue Messungen liegen nicht vor und waren vor Ort nicht zu machen. Für die Auswertung wird dieser Betrag nochmals um 3 cm abgerundet, um so die Auslenkung im Rahmen der Meßgenauigkeit aufzufangen. Die Meßgenauigkeit ist daher ungünstiger zu erwarten als oben genannt.

An einem Komparator wurde die Länge des Meßseiles mit der entsprechenden Zugspannung wie auf der FPN nachgemessen. Es wurde hierbei eine Korrektur der Länge um 0,243m gefunden. Der endgültige Höhenunterschied zwischen dem GPS-Punkt und der Oberfläche des Gründungkörpers beträgt damit

$$59,69 \text{ m}$$

bei einer eher als zu ungünstig geschätzten Genauigkeit von etwa einem Dezimeter. Die Höhenbezugsmarke des versenkten Druckpegels befand sich 1,05 m über dem Gründungkörper. Damit ergibt sich für den Pegelnullpunkt des Druckpegels eine Höhendifferenz zum GPS-Punkt von 58,64 m.

Das BSH hat den Höhenunterschied zwischen den Pegelnullpunkten des versenkten Druckpegels und dem installierten Blasenpegel an der FPN errechnet. Bei Auswertung von Pegelmessungen ab dem 6.5.1992 ergab sich der Wert zu 20,90 m \pm 5 cm (*Korrespondenz*

mit Dr. W. Ellmer, BSH). Der Pegelnullpunkt des Blasenpegels wurde mit diesen Messungen erstmalig festgelegt. Der Höhenunterschied des Blasenpegels an der FPN zum GPS-Punkt beträgt hiermit 37,74 m. Die Tabelle 10.4 enthält alle berechneten NN-Höhen der Forschungsplattform mit ihren geschätzten Genauigkeiten.

Die Höhengenaugigkeit des GPS-Punktes (Plat) auf der Forschungsplattform kann analog wie für Helgoland nach (10.1.17) berechnet werden. Für die ellipsoidischen Höhe ergibt sich nach Tabelle 7.6 ein Fehler von etwa 1,6 cm. Da die Seegravimetrie in diesem Bereich nicht die hohe Dichte wie um Helgoland aufweist, ist die Genauigkeit des Quasigeoides hier geringer. Ein Wert von etwa 2 cm erscheint plausibel. Damit ergibt sich für die NN-Höhe des GPS-Punktes eine Genauigkeit von 2,6 cm.

Die Pegelbögen des Blasenpegels der FPN sind am BSH vorhanden und eine nachträgliche Umrechnung der Registrierungen auf NN kann mit den Ergebnissen aus Tab. 10.4 erfolgen.

Punkt der FPN	Höhe NN [m]	Genauigkeit [m]
GPS-Punkt	32.58	0.03
OK Gründungskörper	-27.11	0.10
Blasenpegel FPN	-5.16	0.12

Tab. 10.4: Höhenanschluß der Forschungsplattform Nordsee

11 Bewertung der Ergebnisse

GPS-Messungen gewinnen in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. Lagebestimmungen großer Netze mit GPS (DREF, EUREF) erlauben Lagegenauigkeiten, wie sie von der Landesvermessung gefordert werden. Die Höhengenaugigkeit der GPS-Meßverfahren liegt etwas ungünstiger, wodurch die Genauigkeiten des klassischen Nivellement in lokalen Netzen bis etwa 50 km Ausdehnung nicht erreicht werden können. Über große Distanzen und bei gezielten Meßanordnungen können GPS-Messungen höhere Genauigkeiten erreichen. Dies ist besonders wichtig in Gebieten, wo ein Nivellement nicht möglich ist, wie etwa über Meeresgebiete. Verbunden ist mit der Höhenbestimmung immer eine Modellierung des Schwerefeldes, da sich gebräuchliche Höhenbezugsflächen an Äquipotentialflächen der Erde orientieren.

Zur Insel Helgoland konnte bisher keine genaue Höhenvermessung erfolgen. Dies hatte für die Hydrographie entscheidende Einschränkungen zur Folge. Mit diesem Forschungsvorhaben konnte der Höhenanschluß von Helgoland an das amtliche Höhensystem der alten Bundesländer mit einer Genauigkeit von etwa 2 cm erfolgen. Die bisherige Höhenbezugsfläche auf Helgoland liegt demnach 23,3 cm oberhalb der NN-Fläche. Dazu wurde ein neues Quasigeoidmodell für den Bereich der Deutschen Bucht erstellt. Mit diesem neuen Quasigeoidmodell werden künftige Höhenzuordnungen auf NN (NHN) über GPS im gesamten deutschen Nordseebereich mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern ermöglicht.

Alle gemessenen Pegelstationen an der Küste erlauben eine Verifikation der Höhenergebnisse durch das amtliche Nivellement. Für Helgoland gibt es keine Überprüfungsmöglichkeit durch ein unabhängiges Meßsystem. Ein möglicher vorhandener Fehler im Geoidmodell um Helgoland würde die NN-Höhenlage von Helgoland einseitig beeinflussen. Gesichert sind in diesem Zusammenhang nur die ellipsoidischen Ergebnisse durch die hohe Zahl an Wiederholungsmessungen. Das Ergebnis aus diesem Vorhaben deckt sich mit den Bestimmungen von *Monka (1984)*, *Siefert und Lassen (1985)* und *Lassen (1989)* (Kap. 2.4). Um Höhenänderungen von Pegelstationen nach einem größeren Zeitraum aufdecken zu können, sollten die ellipsoidischen Höhen genutzt werden. Das Vorhaben hat hierzu eine präzise Nullmessung geschaffen.

Im Rahmen des Vorhabens wurden auch die NN-Höhendifferenzen zwischen Pegelstationen an der Küste neu bestimmt. Ein Höhendatum wurde über alle Stationen gebildet. Es zeigte sich eine große Differenz bei dem Pegelkontrollpunkt auf Borkum, welcher noch eine Überprüfung verlangt. Alle Pegelstationen an der Küste repräsentieren Randstationen auf der NN-Fläche. Die Höhengenaugigkeit des Nivellements kann hier gewisse lokale Effekte aufweisen, die durch dieses Projekt überprüft werden konnten, dies gilt insbesondere für die Station Büsum. Alle übrigen Stationen passen mit etwa 1 cm Höhenfehler nach der Auswertung zueinander. Diese Höhenfehler wurden durch Kombination der GPS-Messungen mit dem Geoidmodell und den NN-Höhen berechnet. Dies bedeutet, daß die Fehler jeder einzelnen Meßkomponente jeweils geringer sein müssen. Damit wurde auch eine hohe Qualität des amtlichen Nivellements über große Distanzen nachgewiesen.

Das Projektziel konnte voll erreicht werden.

12 Literaturverzeichnis

- Alberding, J. (1990):** *Untersuchungen zur präzisen Höhenbestimmung aus hochgenauen Geoid- und GPS-Informationen.* Diplomarbeit, Geodätisches Institut, Universität Hannover, 1990.
- Augath, W. (1993):** *Stand und Weiterentwicklung der Höhenüberwachung der niedersächsischen Nordseeküste - Ein Beitrag der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung zum Küstenschutz und Umweltmonitoring -.* Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 43. Jg., Nr. 2, 78-92, 1993.
- Augath, W., M. Fröhlich, H.H. Kropp, W. Seifert, M. Strerat (1993):** *Aufbau von GPS-Permanentstationen in Niedersachsen.* Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 43. Jg. Nr. 3, 143-154, 1993.
- Baker, T.F. (1993):** *Absolute sea level measurements, climate change and vertikal crustal movements.* Global and Planetary Change, 8 (1993), Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, S. 149-159, 1993.
- Behrend, D., H. Denker, W. Torge (1995):** *Gravity Field Determination in the German Bight (North Sea).* Pres. Paper, Gen. Ass. IUGG 1995, Boulder, Colorado, USA.
- Beutler, G., J. Kouba, T. Springer (1993):** *Combining the orbits of the IGS Processing Centers.* IGS Position Paper, IGS Analysis Center Workshop, Ottawa, Canada, October 12.-14., 20-56, 1993.
- BfG, (1987):** *Jahresbericht 1986.* BfG, Koblenz.
- BfG, (1988):** *Jahresbericht 1987.* BfG, Koblenz.
- BfG, (1989):** *Jahresbericht 1988,* BfG, Koblenz.
- BfG, (1991):** *Jahresbericht 1990,* BfG, Koblenz.
- Boljen, J. (1995):** *Höhenbestimmung mit Hilfe des GPS.* Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation (SPN), Nr. 1, 7-14, 1995.
- Boucher, C., Z. Altamimi, L. Duhem (1994):** *Results and Analysis of the ITRF93.* IERS Technical Note No. 18, Observatoire de Paris, Oktober 1994.
- Brunner, F.K., W.M. Welsch (1993):** *Effect of the Troposphere on GPS Measurements.* GPS-World, Januar, 42-51, 1993.
- Denker, H. (1988):** *Hochauflösende regionale Schwerefeldbestimmung mit gravimetrischen und topographischen Daten.* Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover, 1988.
- Denker, H. (1989):** *A New Gravimetric Quasigeoid for the Federal Republic of Germany.* Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe B, Heft Nr. 291, 1989.
- Denker, H., D. Lelgemann, W. Torge, G. Weber, H.-G. Wenzel (1986):** *Strategies and requirements for a new European Geoid Determination.* Proc. Int. Symp. on the Definition of the Geoid, Vol. 1, 207-222, Int. Geogr. Mil. Ital., Italien, Florenz, 1986.

- Dietrich, R. (1993):** *Geodynamische Prozesse - Bestandteile der Modellbildung bei GPS-Anwendungen.* 31. DVW Seminar: GPS - eine universelle geodätische Methode, DVW Schriftenreihe, Band 11, 152-161, 1993.
- Dowe, E. (1990):** *Untersuchungen zur Höhenbestimmung mit GPS- und gravimetrischen Techniken.* Diplomarbeit, Institut für Erdmessung, Universität Hannover, 1990.
- Ehlert, u.a. (1992):** *Die DÖNAV-Kampagne. Abschlußbericht,* DGK-Reihe, bisher nicht veröffentlicht.
- Engelis, T., R.H. Rapp, Y. Bock (1985):** *Measuring orthometric height differences with GPS and gravity data.* Manuscripta Geodaetica, 10, 1985, 187-194, 1985.
- Führböter, A., J. Jensen (1985):** *Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht.* Die Küste, Heft 42, 78-100, 1985.
- Gendt, G. (1993):** *GPS-Bahndienst.* 31. DVW Seminar: GPS - eine universelle geodätische Methode, DVW Schriftenreihe, Band 11, 162-171, 1993.
- Goldan, H.-J., G. Seeber (1994):** *Precise Tide Gauge Connection to the Island of Helgoland.* Marine Geodesy, Vol. 17, No. 2, 147-152, 1994.
- Goldan, H.-J., G. Seeber, H. Denker, D. Behrend (1994):** *Precise Height Determination of the Tide Gauge Helgoland.* Proceedings of the International Symposium on Marine Positioning, INSMAP94, Hannover, 19.-23. Sep., Marine Geodesy Committee, Mont. Village, USA, 556-565, 1994.
- Großmann, W., H. Kahmen (1985):** *Vermessungskunde I.* Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1985.
- Grote, T., H. Denker, W. Torge (1995):** *Stellungnahme zu NN-Undulationen oder Geoidundulationen? Ein Beitrag zur Höhenbestimmung mit GPS.* Allgemeine Vermessungs Nachrichten (AVN), Heft 2, 74-85, 1995.
- Gurtner, W., G. Mader, D. MacArthur (1989):** *A Common Exchange Format for GPS Data.* Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexiko, 13.-17. März, 920-931, 1989.
- Hake, G. (1982):** *Kartographie.* Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1982.
- Hees, G.L., Liebe, T. (1988):** *Gravity Measurements at the North Sea.* Navgrav, Navigation and Gravimetric Experiment at the North Sea, Netherlands Geodetic Commission, No. 32, 1988.
- Heimberg, F. (1994):** *Untersuchungen zum operationellen Einsatz des Differential GPS.* Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover, 1994.
- Hein, G.W. (1990):** *Bestimmung Orthometrischer Höhen durch GPS und Schweredaten.* In: Moderne Verfahren der Landesvermessung, Beiträge zum 22. DVW-Seminar, 12.-14. April 1989, Schriftenreihe des Studienganges Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 38-1, 291-300, 1990.
- Heiskanen W.A., H. Moritz (1967):** *Physical Geodesy.* W.H.Freeman, San Francisco 1967.

- Helmert, F.R. (Hrsg.) (1895):** *Zenitdistanzen zur Bestimmung der Höhenlage der Nordsee-Inseln Helgoland, Neuwerk und Wangerooge*. Veröffentlichungen d. Kgl. Preuß. Geodät. Inst. Berlin, 1895.
- Hofmann-Wellenhof, B. (1986):** *GPS-The Geodetic Revolution?*. In: Determination of Heights and Height Changes, Pelzer, Niemeier (Hrsg.), Dümmler Verlag, Bonn, 227-243, 1986.
- Hollmann, R., Welsch, W.M. (1990):** *Vergleichende Untersuchungen der Auswirkung von Troposphärischen Korrekturen auf die Höhenbestimmung mit GPS-Phasenmessungen*. In: Moderne Verfahren der Landesvermessung, Beiträge zum 22. DVW-Seminar, 12.-14. April 1989, Schriftenreihe des Studienganges Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 38-1, 245-272, 1990.
- Kelletat, D. (1993):** *Meeresspiegelanstieg und Küstengefährdung*. DHyG-Info 030, Heft 10, 1-6, 1993.
- Kulle, U. (1993):** *Zur Praxis der Höhenauswertung in Niedersachsen*. Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 43. Jahrgang, Nr. 3, 164-175, 1993.
- Lassen, H. (1989):** *Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee*. Sonderdruck aus: Die Küste, Heft 50/1989.
- Leismann, M., R. Klees, H. Beckers (1992):** *Untersuchungen verschiedener Höhensysteme, dargestellt an einer Testschleife in Rheinland-Pfalz*. Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe B, Heft Nr. 296, 1992.
- Leonhard, T. (1988):** *Zur Berechnung von Höhenänderungen in Norddeutschland - Modelldiskussion, Lösbarkeitsanalyse und numerische Ergebnisse*. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover 1988.
- Lichten, S. (1989):** *High Accuracy Global Positioning System Orbit Determination: Progress and Prospects*. Global Positioning System: An Overview. IAG Symposium No. 102, Edinburgh, Scotland, August 7-8, Springer-Verlag, 146-164, 1989.
- Lohrberg, W. (1966):** *Die Lage der Nivellementspunkte auf Helgoland zu Normal-Null*. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Heft 6, 91. Jg., 184-193, 1966.
- Lohrberg, W. (1980):** *Die Höhen der mittleren Tidewasserstände an den Pegeln der Leuchttürme Roter Sand und Alte Weser und auf Helgoland im Vergleich mit denen einiger Küstenpegel an der Nordsee*. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen (DGM), 24. Jg., Heft 1, 25-31, 1980.
- Lohrberg, W. (1987):** *Pegelnullpunkt Helgoland*. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen (DGM), 31. Jg., Heft 4, 125-129, 1987.
- Meiswinkel, H.G. (1987):** *Einmessung des Pegels Helgoland über GPS*. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Heft 4, 112 Jg., 178-179, 1987.
- Monka, F.M. (1984):** *Zur Aufbereitung und Auswertung von GEOS-3 Satellitenradar-Alttermessungen*. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover, 1984.

- Niedfeld, S. (1992): *Aufbereitung und Auswertung mariner Schweredaten des BSH in der Deutschen Bucht*. Diplomarbeit, Institut für Erdmessung, Universität Hannover, 1992.
- Niemeier, W. (1986): *Observation Techniques for Height Determination and their Relation to usual Height Systems*. In: *Determination of Heights and Heights Changes*, Pelzer, Niemeier (Hrsg.), Dümmler Verlag, Bonn, 85-108, 1986.
- Pelzer, u. a. (1985): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 13, Konrad Wittwer, Stuttgart, 1985.
- Plate, E., u. a. (1993): *Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung*. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bericht des wiss. Beirats der DFG, VCH Verlag, Weinheim, 1993.
- Rapp, R.H., Y.M. Wang, N.K. Paveis (1991): *The Ohio State 1991 Geopotential and Sea Surface Topography Models*. Dept. of Geodetic Science and Surveying, Rep. No. 410, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 1991.
- Rohde, H. (1982): *Zur Geschichte des Pegels Helgoland*. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen (DGM), 26. Jg., Heft 5, 117-124, 1982.
- Rohde, H. (1990). *Die Pegel auf Helgoland*. Die Küste, 125-139, Heft 49/1990.
- Salzmann, u. a. (1975): *Meß- und Erprobungsplattform im deutschen Nordseeschelf*. Meerestechnik, Band 6, Nr. 5, 161-170, 1975.
- Santerre, R. (1991): *Impact of GPS satellite sky distribution*. Manuscripta Geodaetica, 16, 28-53, 1991.
- Santerre, R., Lavoie, R. (1991): *Propagation of GPS Errors for Ambiguities-fixed and Ambiguities-free Solutions*, Pres. Paper IUGG XX General Assembly, 13. August, Wien, 1991.
- Schenewerk, H. S. (1992): *The Effects of Troposphere Modelling Strategies upon Baseline Repeatability*. Proceedings of the sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio, 17.-20. März, 273-280, 1992.
- Scherneck, H.-G. (1991): *A parametrized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements*. Geophys. J. Int., 106, 677-694, 1991.
- Scherneck, H.-G. (1994): Persönliche Korrespondenz vom 11.4.1994.
- Schödlbauer, A. (1993): *Höhenbestimmung mit dem Global Positioning System*. In: *Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung*, Schriftenreihe des Studienganges Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 45, Neubiberg, 231-263, 1993.
- Schwarz, K.P., M.G. Sideris (1993): *Heights and GPS*. GPS World, Februar, 50-56, 1993.
- Siefert, W., H. Lassen (1985): *Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen*. Die Küste, 42, 1-77, 1985.

- Seeber, G. (1987): *Use of GPS for the Determination of Precise Height Differences - Models and Results*. Int. Symp. on the Definition of the Geoid, Vol. 1, 325-332, Int. Geogr. Mil. Ital., Florenze, Italien, 1986.
- Seeber, G. (1989): *Satellitengeodäsie*. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1989.
- Seeber, G. (1990): *Precise Height Determination with GPS, Concepts and Realization*. Pres. Paper at the Workshop on Precise Vertical Positioning, 8.-12. Oktober, Hannover, 1990.
- Seeber, G. (1993): *Satellitegeodesy*. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1993.
- Seeber, G., M. Schmitz, H.-J. Goldan (1994): *Precise GPS-Based Positioning at Sea*. Proceedings of the International Symposium on Marine Positioning, INSMAP94, Hannover, 19.-23. Sep., Marine Geodesy Committee, Mont. Village, USA, 11-24, 1994.
- Seeber, G. G. Wübbena (1986): *Experiences with GPS-Observations for the Determination of Precise Height Differences*. In: *Determination of Heights and Heights Changes*, Pelzer, Niemeier (Hrsg.), Dümmler Verlag, Bonn, 259-269, 1986.
- Seeber, G., G. Wübbena (1989): *Bestimmung ellipsoidischer Höhendifferenzen aus GPS-Beobachtungen*. Arbeits- und Ergebnisbericht zum Forschungsvorhaben, Schlußbericht, Hannover, 1989.
- Strang van Hees, G.L. (1992): *Practical formulas for the computation of the orthometric, dynamic and normal heights*. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Nr. 11, 117. Jg., 727-734, 1992.
- TerraSat (1991): *Bericht über die Auswertung der GPS Daten im Rahmen des Projekts "Pegel 90"*. Ergebnisbericht zur Auswertung der PEGEL90-Kampagne, TerraSat, Ottobrunn, 1991.
- Töppe, A. (1993): *Zur Analyse des Meeresspiegelanstieges aus langjährigen Wasserstands-aufzeichnungen an der Deutschen Nordseeküste*. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, Heft 120, 1993.
- Torge, W. (1975): *Geodäsie*. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1975.
- Torge, W. (1986): *Accuracy and Stability of the Height Reference Surface*. In: *Determination of Heights and Heights Changes*, Pelzer, Niemeier (Hrsg.), Dümmler Verlag, Bonn, 69-82, 1986.
- Torge, W. (1989): *Gravimetry*. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1989.
- Torge, W., H. Denker (1991): *Zur Entwicklung der Geoidmodellierung in Europa*. Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 116. Jg., Heft 5, 220-230, 1991.
- Torge, W., D. Behrend, H. Denker (1995): *Das Geoid in deutschen Nord- und Ostseebereich*. 37. DVW Seminar, Hydrographische Vermessungen -Heute-, Hannover, 28.-29. März, 10-15, 1995.
- Völksen, C. (1991): *Untersuchung über die Auswirkung von Selective Availability auf die Satellitensignale des GPS und auf geodätische Anwendungen*. Diplomarbeit, Institut für Erdmessung, Universität Hannover, 1991.

- Wanninger, L. (1994):** *Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS.* Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 201, Hannover, 1994.
- Wells, D., u.a. (1986):** *Guide to GPS Positioning.* Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1986.
- Wenzel, H.-G. (1981):** *Zur Geoidbestimmung durch Kombination von Schwereanomalien und einem Kugelfunktionsmodell mit Hilfe von Integralformeln.* Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 106. Jg., 102-111, 1981.
- Wigley, T.M.L., S.C.B. Raper (1992):** *Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios.* Nature, Heft 357, 293-300, 1992.
- Wübbelmann, H. (1993a):** *Die Wiederholungsmessungen im Deutschen Haupthöhennetz.* Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 43. Jg., Nr. 3, 155-163, 1993.
- Wübbelmann, H. (1993b):** *Vergleich zwischen Höhen im DHHN85 und im Nivellementsnetz 1960.* In: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen (AdV), AK Niv (Hrsg.), Die Wiederholungsmessungen 1980 bis 1985 im Deutschen Haupthöhennetz und das Haupthöhennetz 1985 der Bundesrepublik Deutschland, Bayer. Landesvermessungsamt, München, 1993.
- Wübbena, G. (1988):** *GPS Carrier Phases and Clock Modeling.* In: Groten, Strauß (Hrsg.): GPS Techniques Applied to Geodesy and Surveying. Workshop Darmstadt, Springer Verlag, Heidelberg, 381-392, 1988.
- Wübbena, G. (1989):** *The GPS Adjustment Software Package -GEONAP- Concepts and Models.* Proc. fifth Intern. Geod. Symp. on Satellite Positioning, Las Cruces, N.M., USA, 452-461, 1989.
- Wübbena, G. (1991a):** *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung.* Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 168, Hannover, 1991.
- Wübbena, G. (1991b):** *GEONAP Handbuch, Version 0.5.* Geo++ GmbH, Garbsen, 1991.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser und der Bundesminister für Verkehr (1978):** *Pegelvorschrift.* Hannover und Bonn, 1978.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (1990):** *Gezeitentafeln für das Jahr 1991.* Band I, Europäische Gewässer, Nr. 2115, 1990.

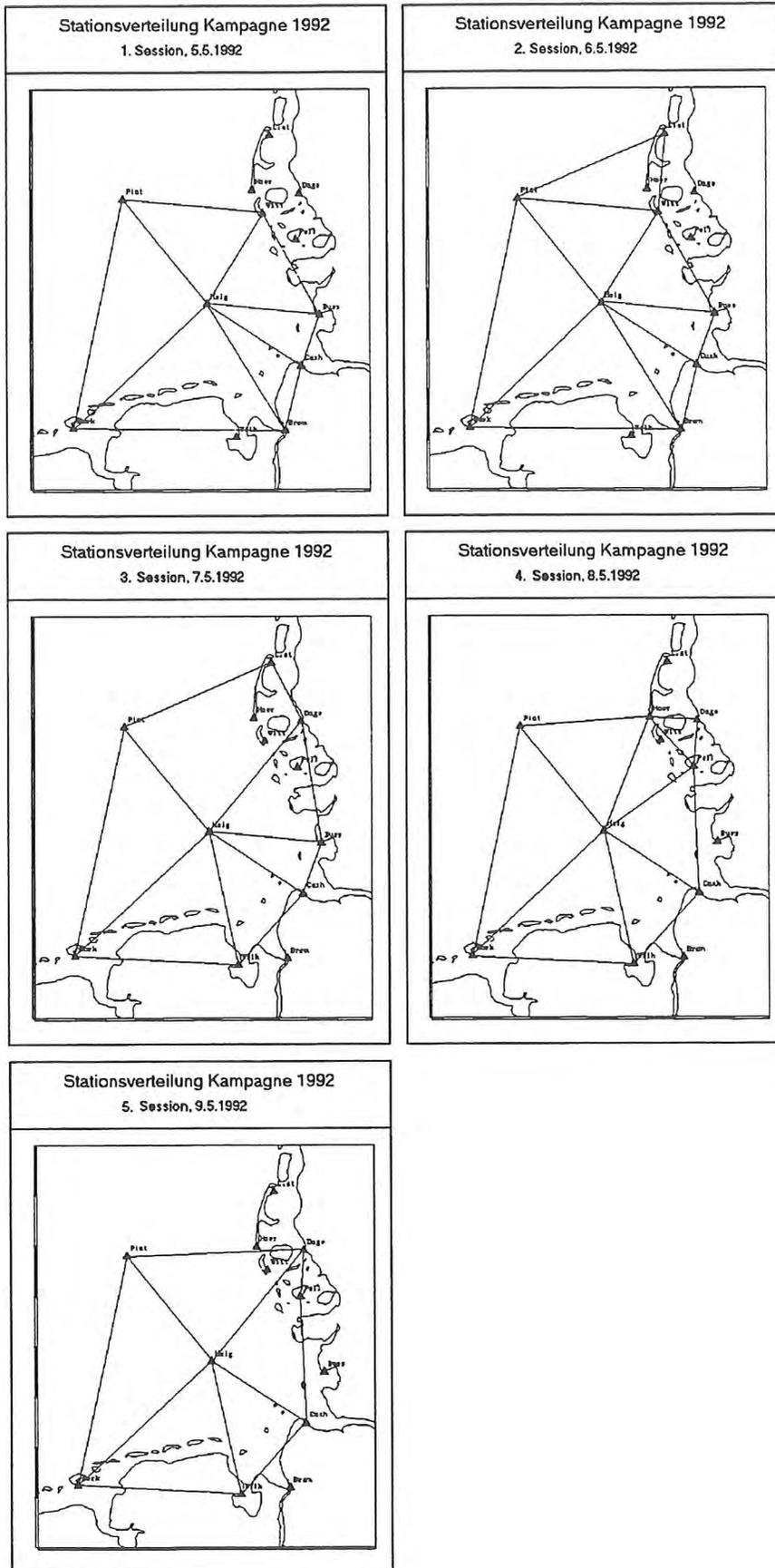


Abb. 13.2: Aufteilung der fünf Beobachtungssessionen 1992

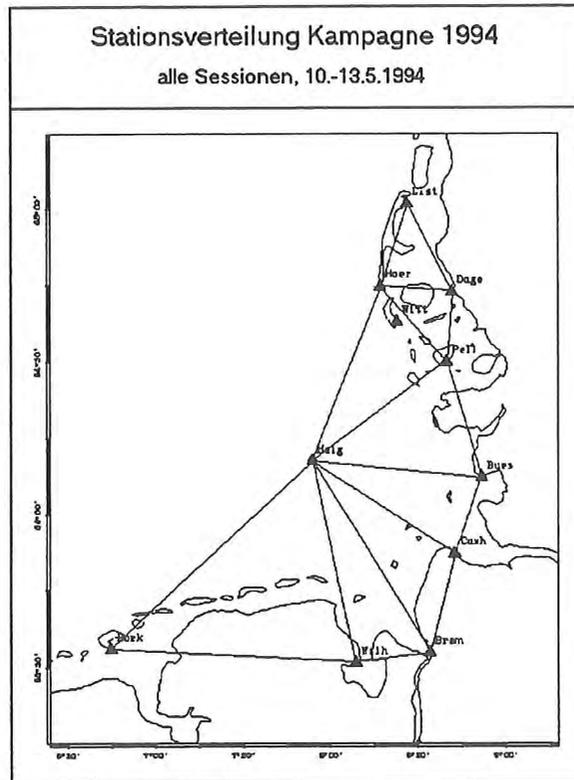
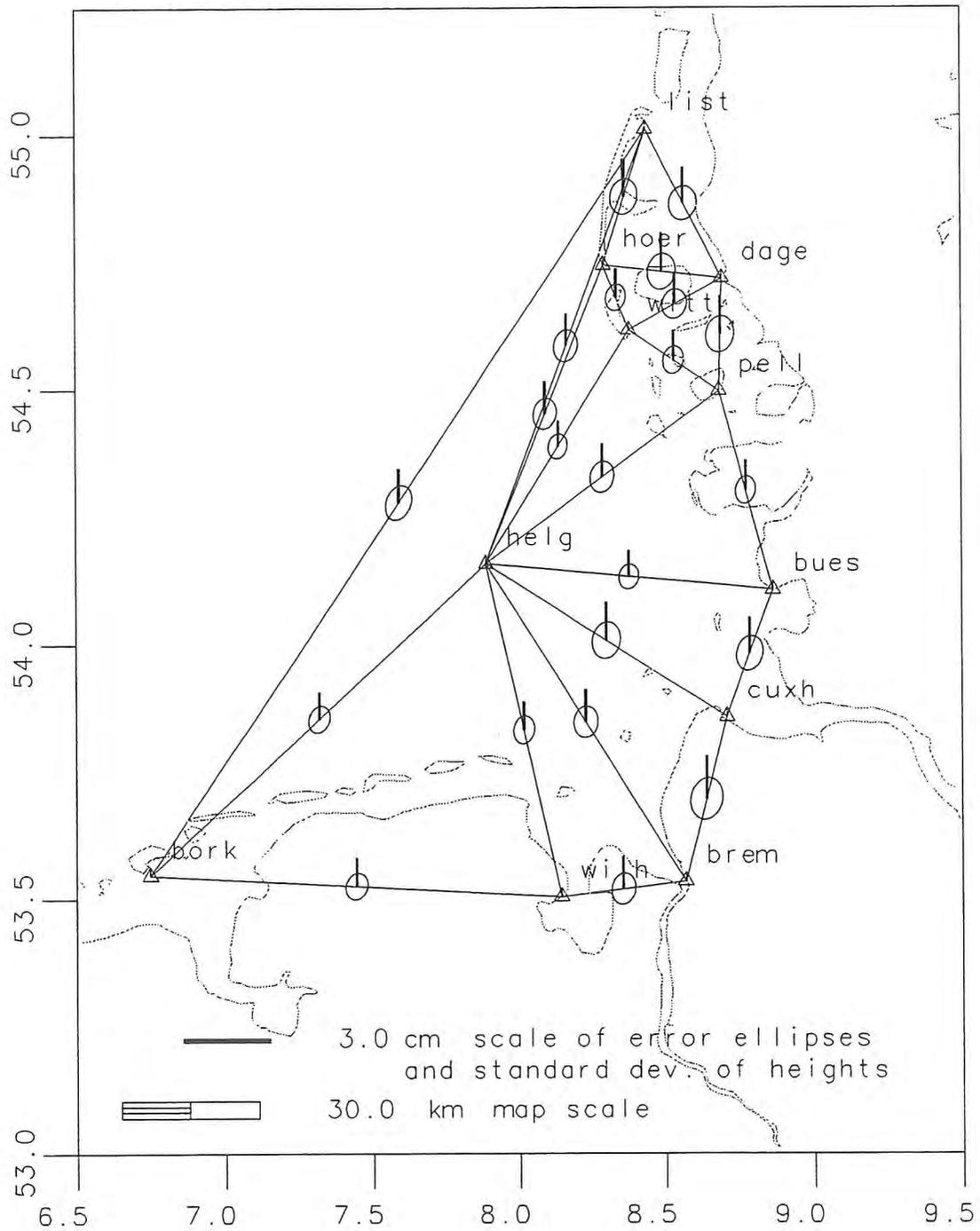


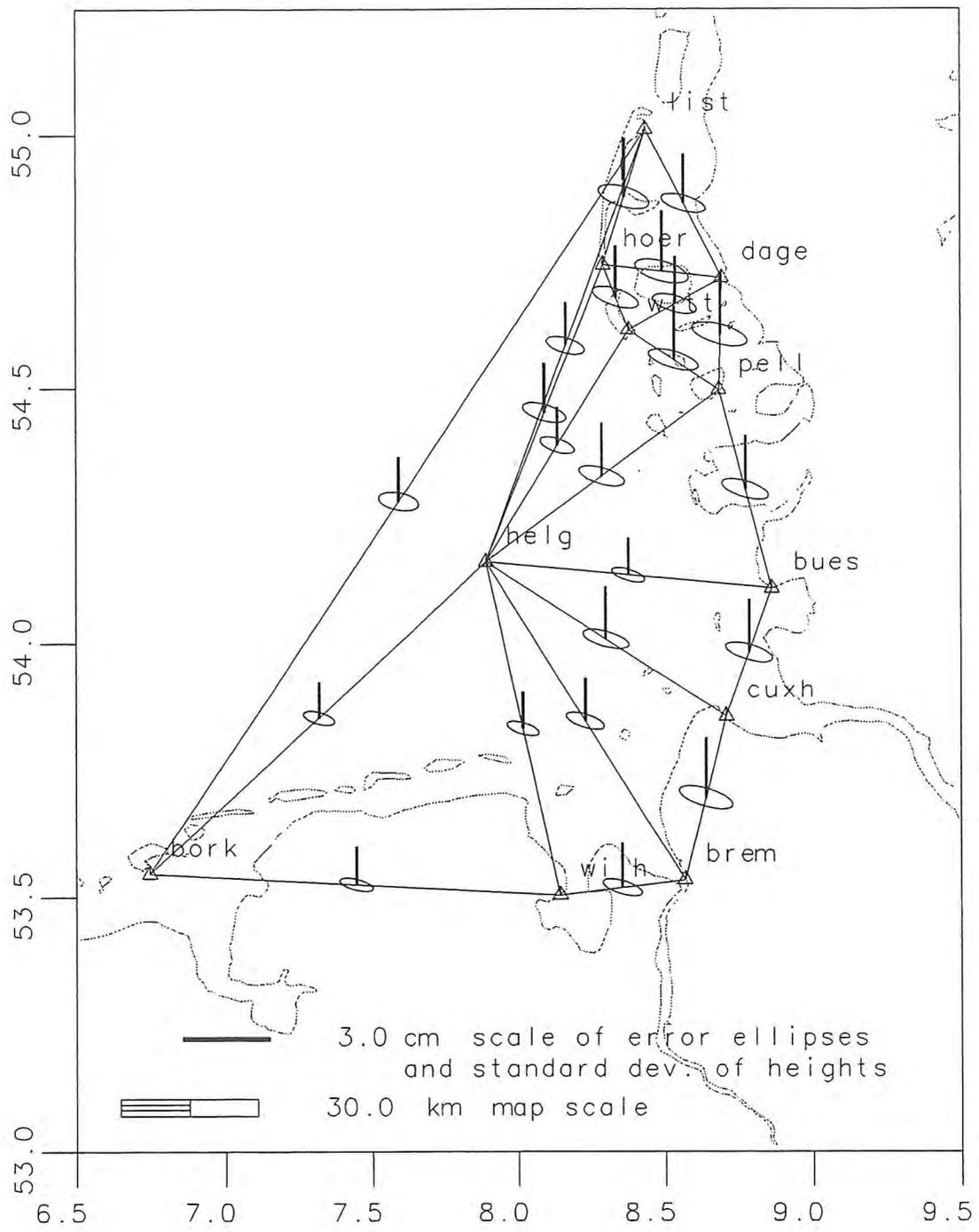
Abb. 13.4: Netzbild aller Sessionen der Kampagne 1994

13.2 Konfidenzellipsen der GPS-Auswertungen



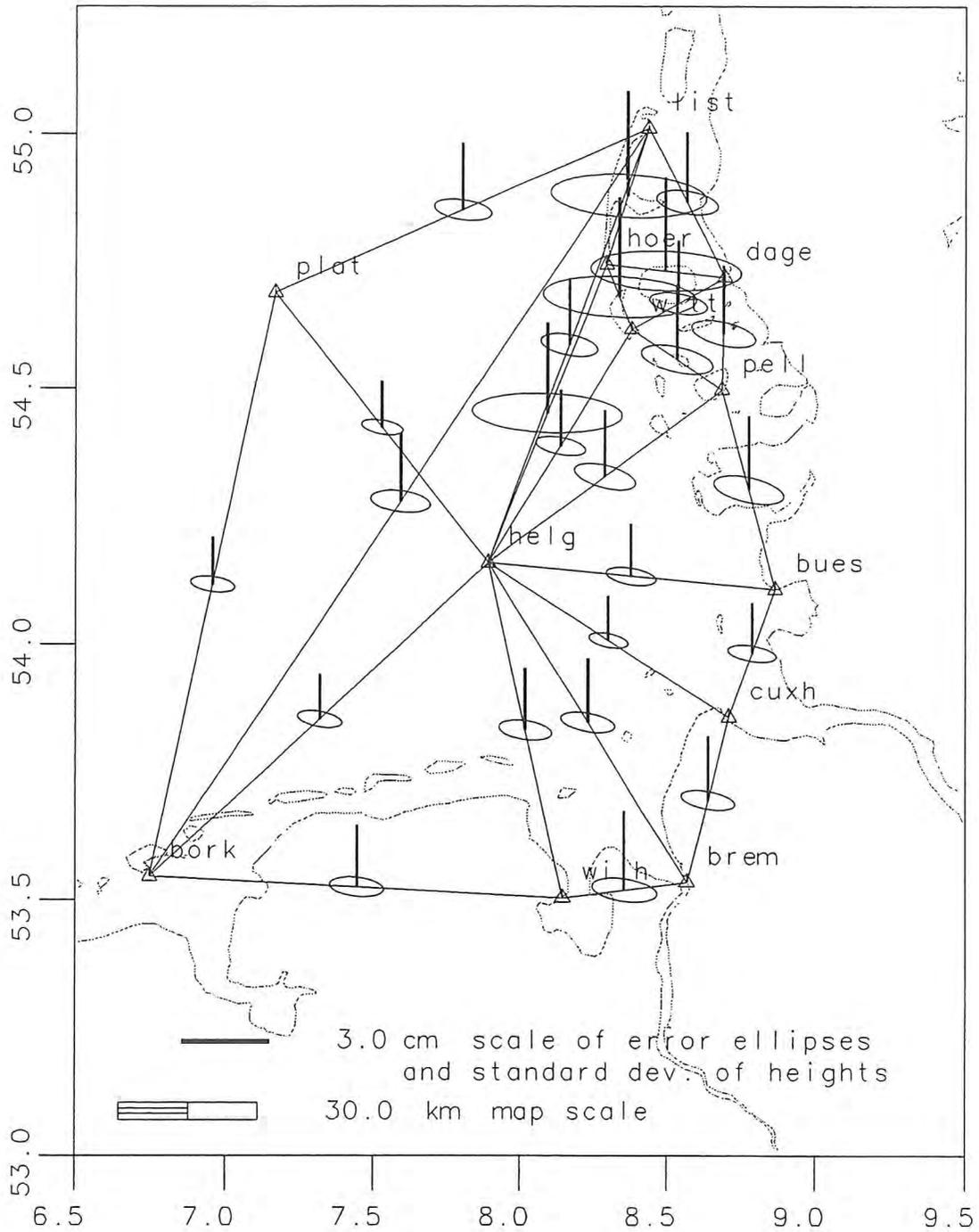
IFE Institut für Erdmessung
Universität Hannover

Abb. 13.5: Fixed-Lösung der 1. Kampagne 1991



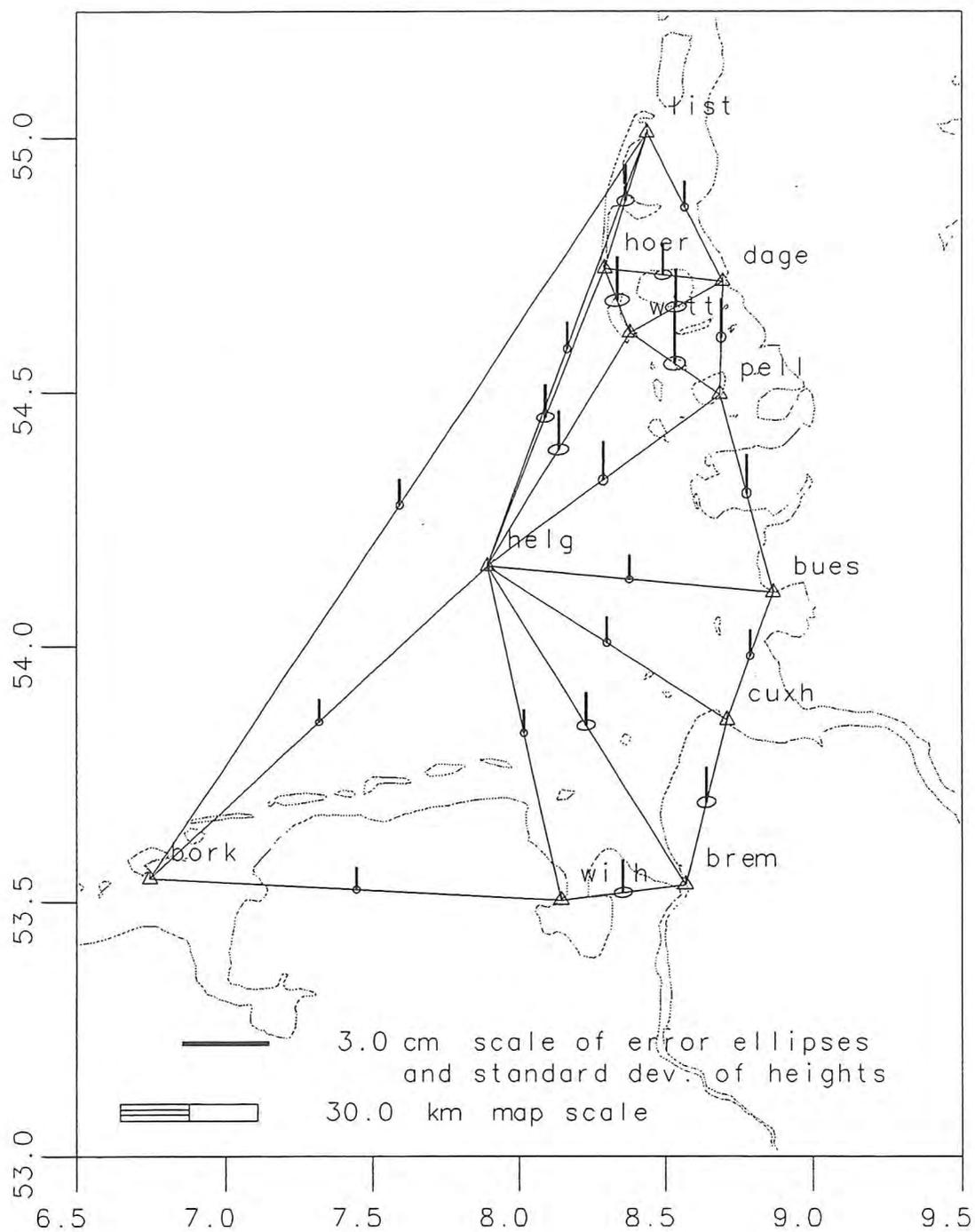
IFE Institut für Erdmessung
Universität Hannover

Abb. 13.6: Float-Lösung der 1. Kampagne 1991



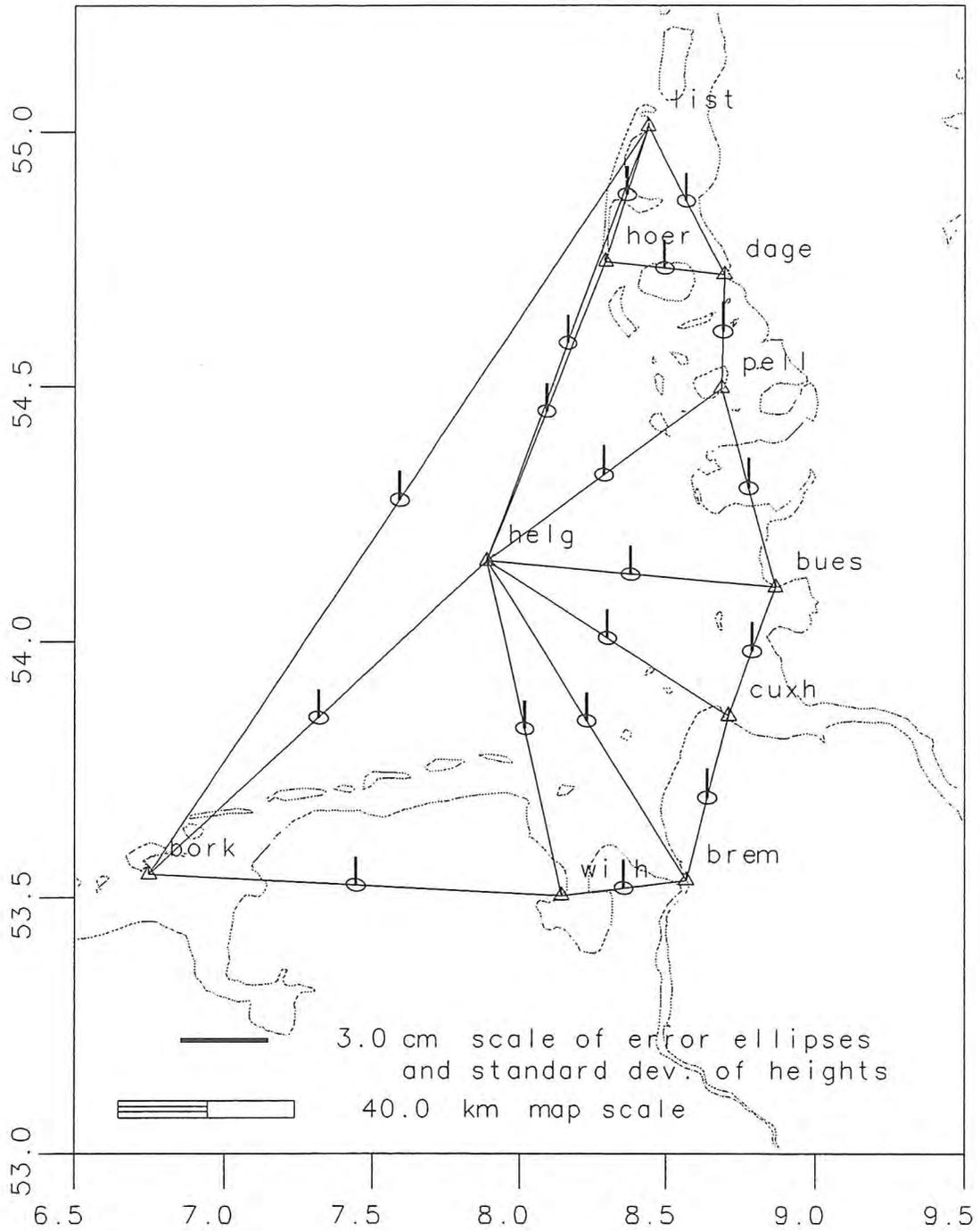
IFE Institut für Erdmessung
Universität Hannover

Abb. 13.7: Float-Lösung (W) der 2. Kampagne 1992



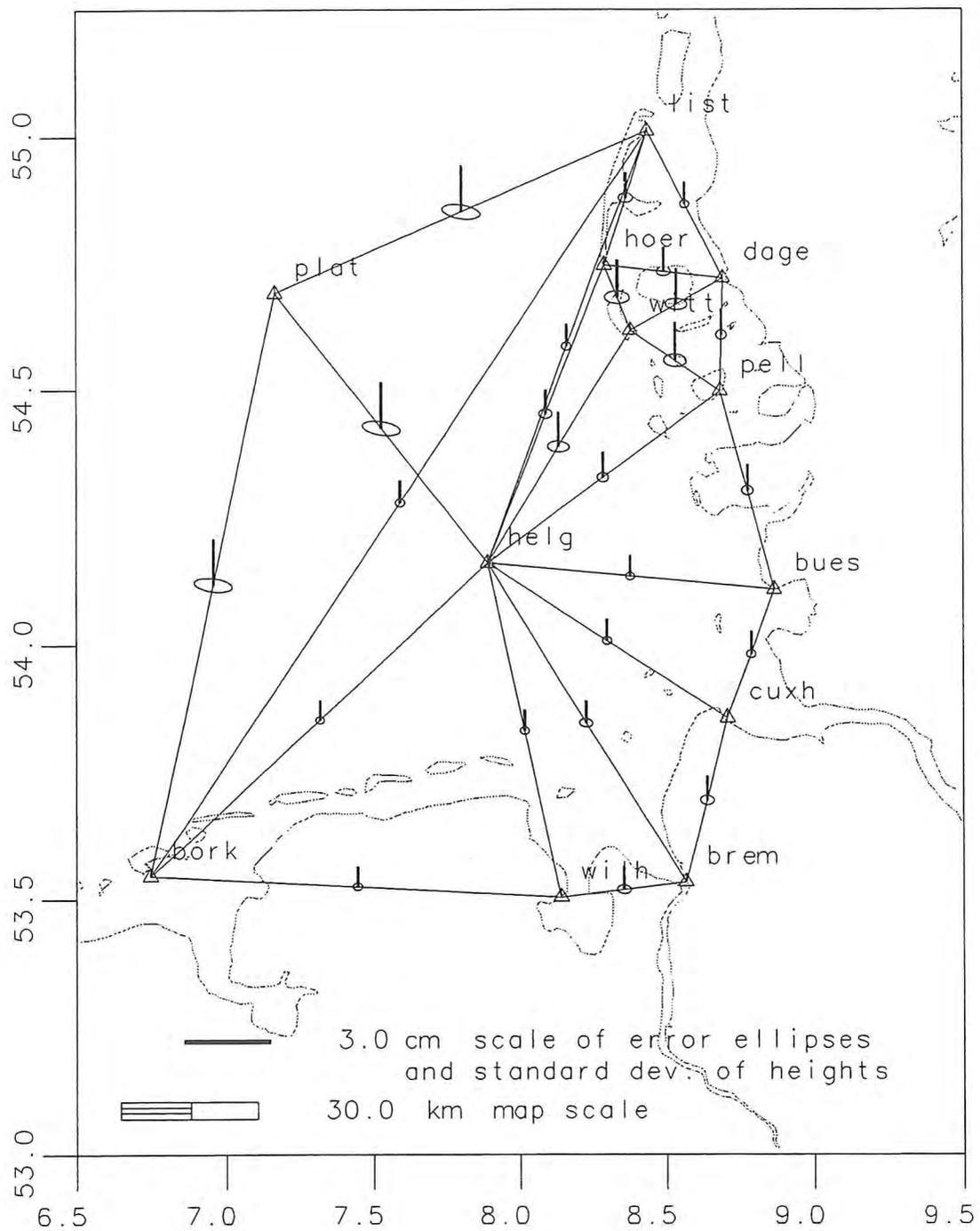
IFE Institut für Erdmessung
Universität Hannover

Abb. 13.8: Float-Lösung (W) der 3. Kampagne 1993



IFE Institut für Erdmessung
Universität Hannover

Abb. 13.9: Float-Lösung (W) der 4. Kampagne 1994



IFE Institut für Erdmessung
 Universität Hannover

Abb. 13.10: Netzbild der Projektlösung

13.3 Ergebnisse der Wattgravimetrie

Station	Breite WGS84 [°]	Länge WGS84 [°]	Höhe NN [m]	Schwere [mgal]	Stdabw. [μgal]
BORKUMHA	53.563194	6.751250	4.3	981368.2975	18.7
TP2306604	53.563097	6.756992	2.408	981368.4203	19.0
NORDERNEY	53.699694	7.162253	2.282	981379.7075	15.9
HB111	53.726969	7.494633	5.157	981376.9747	22.4
WANGTPF01	53.777433	7.867186	3.200	981388.6433	18.8
WHV24146	53.534644	8.158197	5.670	981366.9171	17.2
ERSATZWHV	53.535000	8.158000	5.456	981366.9147	18.5
MB66/24	53.545314	8.568703	4.455	981355.8194	16.0
CUX211842	53.868097	8.708256	3.219	981382.9642	15.3
BÜSUM113	54.126836	8.858261	5.021	981430.9121	15.4
PELLWO127	54.521917	8.684678	3.660	981456.3297	16.3
NIVPKT148	54.631844	8.384128	2.488	981468.7862	16.4
ZWPKT	54.730000	8.693888	4.100	981482.0922	21.6
NIVPKT139	54.691031	8.572506	4.414	981476.4646	25.0
NIVPKT114	54.758303	8.296186	2.463	981489.6522	21.8
LIST130	55.016522	8.440989	3.804	981519.3107	16.7

Tab. 13.1: Ergebnisse der gravimetrischen Einmessung der Hafenschlußpunkte

Station	Breite WGS84 [°]	Länge WGS84 [°]	Höhe NN [m]	Schwere [mgal]	Stdabw. [μgal]
16A	53.567222	6.769722	0.1	981369.0464	31.1
16B	53.555556	6.775556	0.2	981367.7228	31.1
17A	53.523333	6.778056	-0.5	981365.7886	33.0
17B	53.503333	6.827777	-0.2	981367.9093	38.2
17C	53.502500	6.868333	-0.5	981368.6837	38.2
17D	53.458611	7.020833	0.1	981363.2823	33.0
18A	53.635556	6.825556	0.5	981382.7827	32.5
18B	53.616111	6.777222	0.3	981375.0778	38.9
18C	53.599167	6.881389	0.1	981379.4338	41.4
18D	53.625000	6.892500	-0.5	981381.2017	40.9
19A	53.525278	6.983056	-0.1	981369.6529	37.2
19B	53.563889	6.942222	-0.7	981369.3704	29.1
20A	53.607222	7.140278	0.1	981372.8539	22.8
20B	53.639167	7.181389	0.1	981375.5087	22.8
21A	53.650278	7.145278	-1.1	981374.9880	26.0
21B	53.682222	7.099167	-0.2	981379.2377	27.2
21C	53.702500	7.224444	0.1	981380.8103	29.6
21D	53.722778	7.238611	0.1	981383.7969	29.6
22A	53.726667	7.300000	-0.1	981383.4797	30.6
22B	53.730556	7.434444	-1.4	981381.3042	35.8
22C	53.701944	7.523333	0.0	981374.7603	35.8
22D	53.721111	7.478056	0.0	981378.7441	30.7
23A	53.753611	7.638611	0.0	981378.0774	31.4
23B	53.754444	7.670000	0.0	981378.3180	37.7
23C	53.736667	7.751111	-0.6	981380.1642	39.7
23D	53.728056	7.756667	-1.0	981379.4559	38.0
23E	53.728611	7.705278	0.5	981378.0425	32.0
24A	53.773889	7.865000	-0.2	981388.7753	31.2
24B	53.758333	8.021667	0.0	981390.9222	35.9
24C	53.447778	8.111389	0.6	981358.4449	35.8
24D	53.411389	8.196111	1.0	981354.8877	30.9
29A	53.566389	8.192222	-0.4	981375.8457	31.5
29B	53.620556	8.183889	-1.6	981379.5608	35.0
29C	53.512500	8.143333	0.1	981361.9259	31.5
30A	53.539167	8.192500	-1.7	981369.1970	31.0
30B	53.518611	8.191667	-1.4	981362.3047	31.0

Tab. 13.2: Ergebnisse Wattgravimetrie 16.-30.9.1992

Station	Breite WGS84 [°]	Länge WGS84 [°]	Höhe NN [m]	Schwere [mgal]	Stdabw. [μgal]
101A	53.670000	8.156389	-1.1	981385.9714	31.7
101B	53.710000	8.113333	-0.5	981392.3373	37.9
101C	53.700278	8.113333	-0.1	981387.4428	39.9
101D	53.769444	8.133611	0.4	981394.9547	38.4
101E	53.607222	8.519722	0.4	981360.3445	32.9
103A	53.690278	8.414722	-1.5	981378.6453	32.8
103B	53.805000	8.272778	-0.6	981395.3021	38.4
103C	53.840278	8.258333	0.0	981399.6660	39.9
103D	53.791667	8.425000	-1.2	981388.1528	38.1
103E	53.821389	8.349444	0.1	981388.8117	32.1
107A	53.970556	8.677222	0.8	981408.6341	32.2
107B	53.935556	8.750833	-0.5	981396.8799	38.0
107C	54.015833	8.654167	-0.9	981416.2830	39.7
107D	54.093889	8.608889	-0.2	981420.6738	37.6
107E	54.115556	8.706944	-1.5	981428.8789	31.1
108A	54.072778	8.696667	0.1	981424.1386	31.8
108B	54.171389	8.660556	-0.1	981425.5002	38.4
108C	54.135833	8.771667	-0.3	981432.9657	40.4
108D	54.076944	8.865833	-1.1	981420.5372	38.4
108E	54.105278	8.856667	-1.2	981427.0830	31.8
112A	54.264167	8.684444	0.8	981434.6150	31.9
112B	54.231111	8.697222	-0.1	981431.7531	40.1
112C	54.381389	8.599444	-0.7	981442.7733	44.7
113A	54.435000	8.875278	-0.8	981458.1448	46.8
113B	54.437222	8.768889	-0.7	981454.6346	46.9
113C	54.424167	8.622778	0.5	981446.7359	44.8
113D	54.470000	8.682500	0.1	981452.8484	40.2
113E	54.466944	8.720833	0.1	981453.9173	32.2
114A	54.546528	8.738472	-0.8	981461.3989	30.5
114B	54.523611	8.794444	-0.3	981461.7207	35.5
114C	54.636806	8.767083	1.0	981471.7872	35.5
114D	54.629167	8.728611	1.0	981470.2353	30.5
115A	54.604444	8.483194	0.3	981464.5324	29.8
115B	54.538889	8.589722	0.4	981462.3263	29.8
116A	54.656472	8.429083	-0.5	981473.2590	32.1
116B	54.681528	8.398889	-0.7	981477.7587	39.5
116C	54.664250	8.470917	-0.8	981474.1179	43.1
116D	54.649806	8.487583	-0.2	981472.1220	43.9
116E	54.667306	8.527861	0.2	981474.7065	42.1
116F	54.700278	8.605417	-0.1	981478.9467	37.1
117A	54.747306	8.605917	-0.2	981485.3792	35.9
117B	54.690000	8.629167	-0.7	981477.8791	39.0
117C	54.725694	8.665833	-1.0	981482.3135	38.3
117D	54.583889	8.473056	-0.2	981461.7428	33.4
119A	54.811472	8.474917	-0.5	981497.2436	35.3
119B	54.813694	8.454361	-0.4	981498.1691	41.2
119C	54.821944	8.497361	-0.8	981498.4216	42.8
119D	54.832083	8.496667	-0.5	981500.0820	40.5
119E	54.745083	8.353056	0.1	981487.6003	33.8
120A	54.792139	8.570639	-0.3	981491.6810	35.3
120B	54.805000	8.516944	-0.8	981495.0562	41.2
120C	54.813806	8.507028	-0.9	981497.0138	42.8
120D	54.799444	8.419722	-0.6	981496.5450	40.5
121A	54.951111	8.450556	-0.7	981515.7918	33.8
121B	54.942417	8.488250	-0.8	981513.5862	38.2
121C	54.961028	8.511667	-0.8	981514.8025	37.7
121D	54.988056	8.479967	-0.6	981517.6276	32.1

Tab. 13.3: Ergebnisse Wattgravimetrie 1.-21.10.1992

Station	Breite WGS84 [°]	Länge WGS84 [°]	Höhe NN [m]	Schwere [mgal]	Stdabw. [μgal]
1121A	53.943333	8.573056	0.0	981405.6633	31.0
1121B	53.926389	8.583611	0.1	981401.3787	31.0
1122A	53.957500	8.500000	-1.0	981407.4411	31.0
1122B	53.973333	8.422222	-0.7	981407.4655	31.0
1123A	53.936389	8.340556	-0.6	981402.1946	32.9
1123B	53.928611	8.338056	-1.1	981402.7021	38.2
1123C	53.893611	8.428611	-0.6	981398.2405	38.2
1123D	53.890556	8.445833	-1.0	981397.8650	32.9
1125A	53.891111	8.678889	2.0	981388.3759	32.9
1125B	53.877500	8.573611	-0.5	981387.5346	38.2
1125C	53.897500	8.550556	-0.7	981394.1838	38.2
1125D	53.926944	8.473889	-0.3	981402.9891	32.9
1126A	53.989444	8.606389	0.1	981411.4849	28.8
1126B	54.003056	8.522500	-0.9	981411.0225	28.2
1128A	54.054167	8.743611	-0.7	981419.9511	29.3
1128B	54.060833	8.782222	-0.4	981419.3599	29.3
1129A	54.041667	8.684722	0.1	981420.0154	30.6
1129B	54.020000	8.763889	-0.3	981413.5968	34.2
1129C	54.045000	8.739444	0.4	981418.6238	30.6
1130A	54.060556	8.896111	-0.2	981420.5102	30.6
1130B	54.108889	8.903056	-0.6	981428.9183	34.2
1130C	54.122222	8.853333	-0.6	981431.1579	30.6
1101A	54.254444	8.775278	0.4	981439.2400	32.2
1101B	54.261944	8.770000	-0.9	981438.6420	39.6
1101C	54.316111	8.946944	2.0	981454.8483	42.8
1102A	54.205278	8.638889	-0.3	981428.5928	42.8
1102B	54.223333	8.750556	-0.4	981435.3368	39.6
1102C	54.189167	8.681944	-0.2	981427.8329	32.2
1105A	54.170000	8.611667	-1.4	981425.4162	29.3
1105B	54.148333	8.723056	-1.3	981430.5640	29.3
1106A	54.118611	8.645000	0.6	981423.7111	30.6
1106B	54.092778	8.675833	-0.5	981425.6354	34.2
1106C	54.114167	8.785833	-0.4	981430.0819	30.6
1108A	53.881944	8.781944	0.3	981386.5380	28.2
1108B	53.877778	8.876389	-0.1	981389.6796	28.8

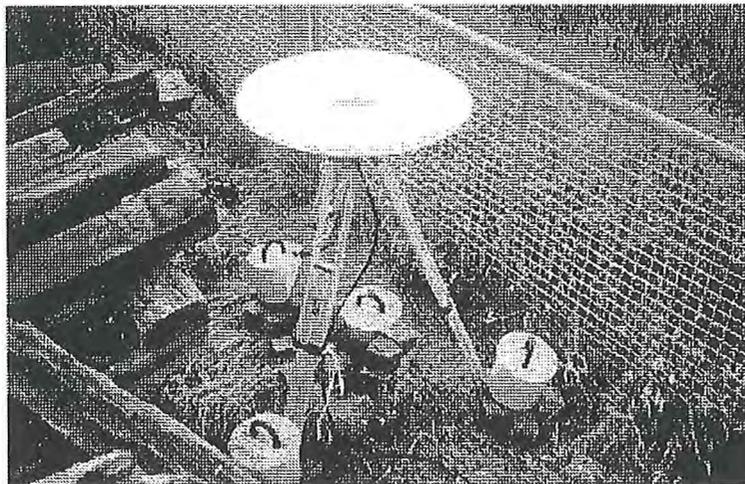
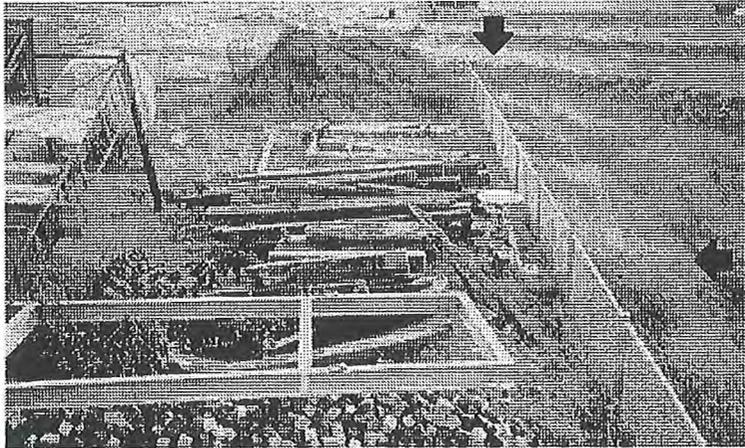
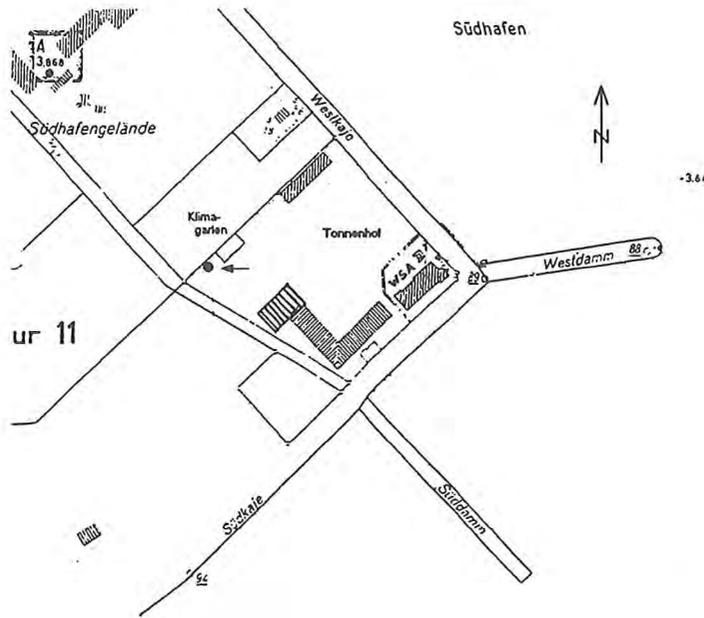
Tab. 13.4: Ergebnisse der Wattgravimetrie 19.6.-8.7.1993

Station	Breite WGS84 [°]	Länge WGS84 [°]	Höhe NN [m]	Schwere [mgal]	Stdabw. [μgal]
216A	53.880833	8.425000	-1.4	981396.4305	32.9
216B	53.856389	8.438333	-0.5	981393.2936	40.1
216C	53.831667	8.456667	0.5	981388.8622	43.9
216D	53.880833	8.503611	-0.5	981392.7988	45.0
216E	53.865833	8.462500	-1.2	981393.6163	43.7
217A	53.906389	8.331944	-0.3	981401.3239	39.8
217B	53.860278	8.317222	0.1	981395.0538	32.4
218A	53.461389	8.225556	0.4	981358.3032	31.5
218B	53.491667	8.199444	-1.5	981356.7638	35.0
218C	53.485000	8.181944	-0.4	981355.3809	31.5
219A	53.649722	8.082500	-0.2	981385.1697	31.1
219B	53.720000	8.035833	-0.2	981388.9614	36.2
219C	53.734167	8.098333	-1.6	981391.1358	36.5
219D	53.778889	8.016389	-0.1	981391.6214	32.1
220A	53.794167	8.119722	-0.8	981396.5553	34.0
220B	53.738611	8.211389	-1.2	981393.8422	39.1
220C	53.717778	8.193611	-1.2	981392.3626	39.1
220D	53.698611	8.285556	-1.4	981383.6384	34.0
221A	53.629167	8.372500	-1.4	981373.5962	34.4
221B	53.618889	8.379444	-1.2	981371.2191	40.6
221C	53.640000	8.328056	-0.3	981379.4911	42.5
221D	53.674722	8.322500	-0.5	981384.3400	40.6
221E	53.659722	8.378889	-0.6	981378.2295	34.4
223A	53.758889	8.265278	-0.2	981391.4767	34.0
223B	53.676944	8.259722	-0.7	981382.2876	39.1
223C	53.612500	8.465556	-0.4	981363.9582	39.1
223D	53.591389	8.505556	0.1	981358.9934	34.0
224A	53.781944	8.474722	-0.8	981380.6189	34.0
224B	53.775000	8.458333	-2.3	981382.5562	39.1
224C	53.735556	8.455278	-0.8	981379.3379	39.1
224D	53.785556	8.411111	-0.4	981388.2546	34.0
225A	53.791667	8.243889	-1.3	981396.4769	34.4
225B	53.780000	8.303056	-1.3	981388.9116	40.6
225C	53.744722	8.345833	-0.7	981385.8967	42.5
225D	53.718889	8.359722	-0.1	981385.9417	40.6
225E	53.660278	8.436667	-0.2	981372.2630	34.4

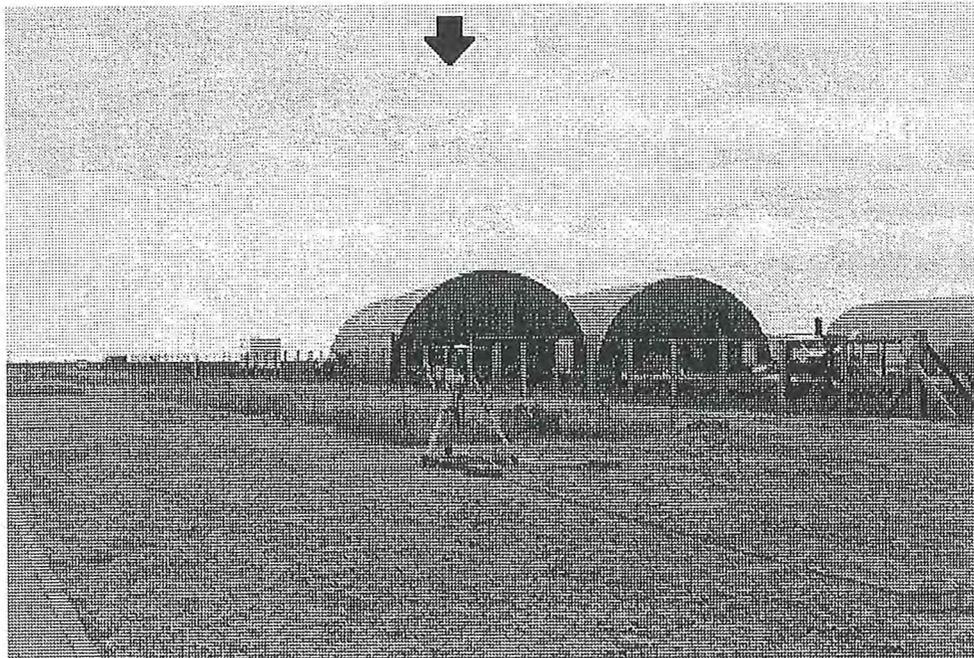
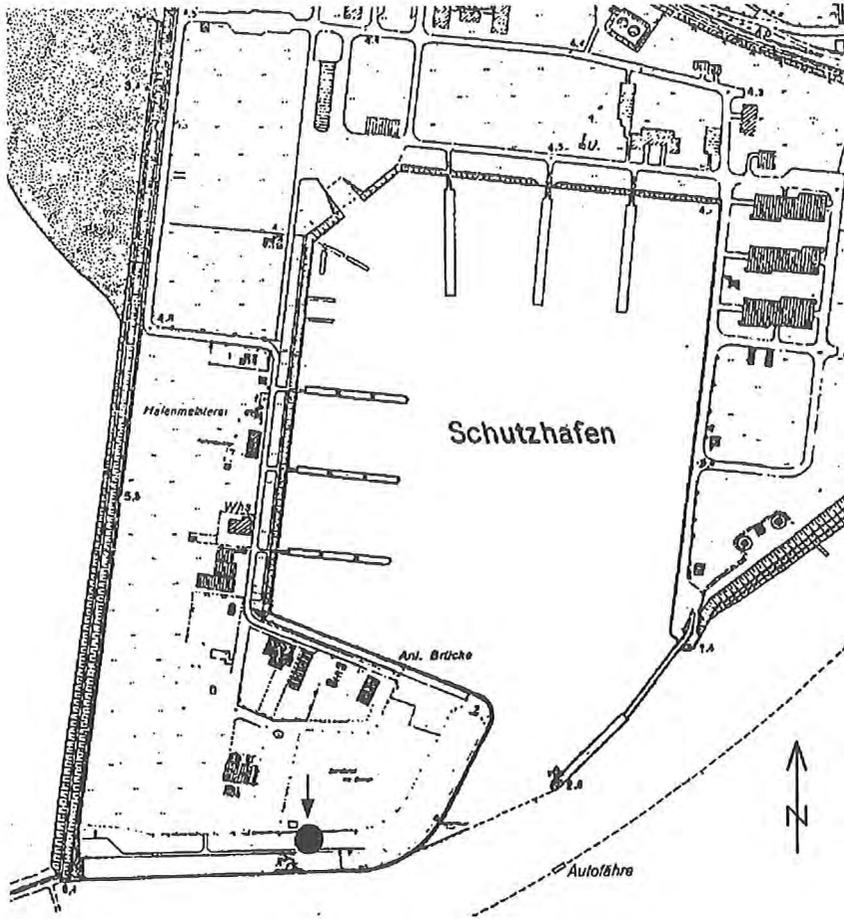
Tab. 13.5: Ergebnisse der Wattgravimetrie 13.-28.8.1993

13.4 Punktbeschreibungen

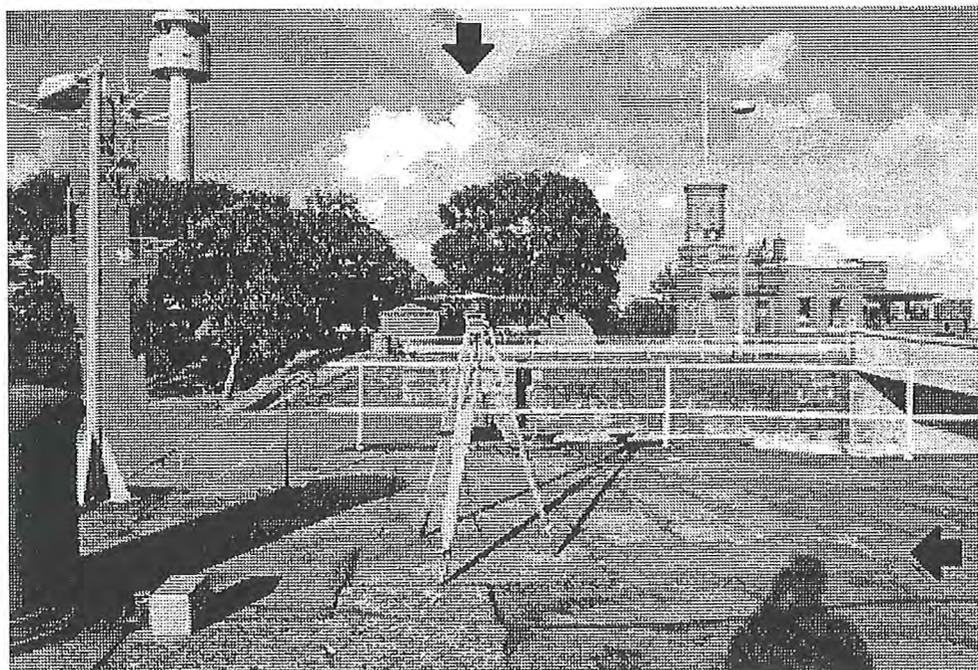
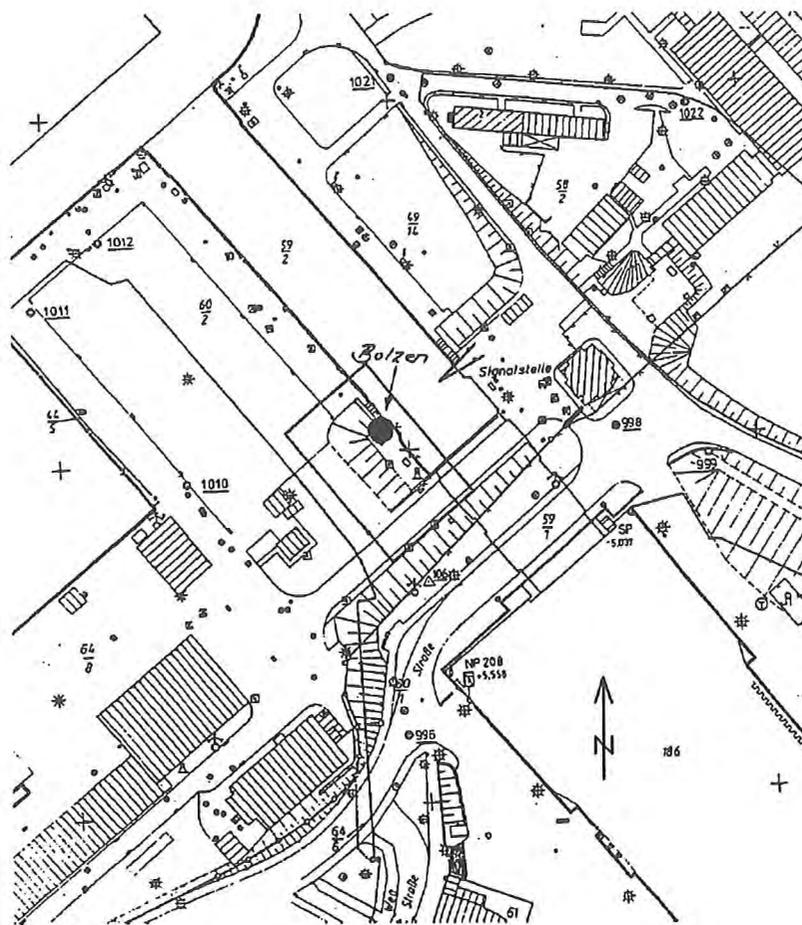
Helgoland - Helg -



Borkum
- Bork -

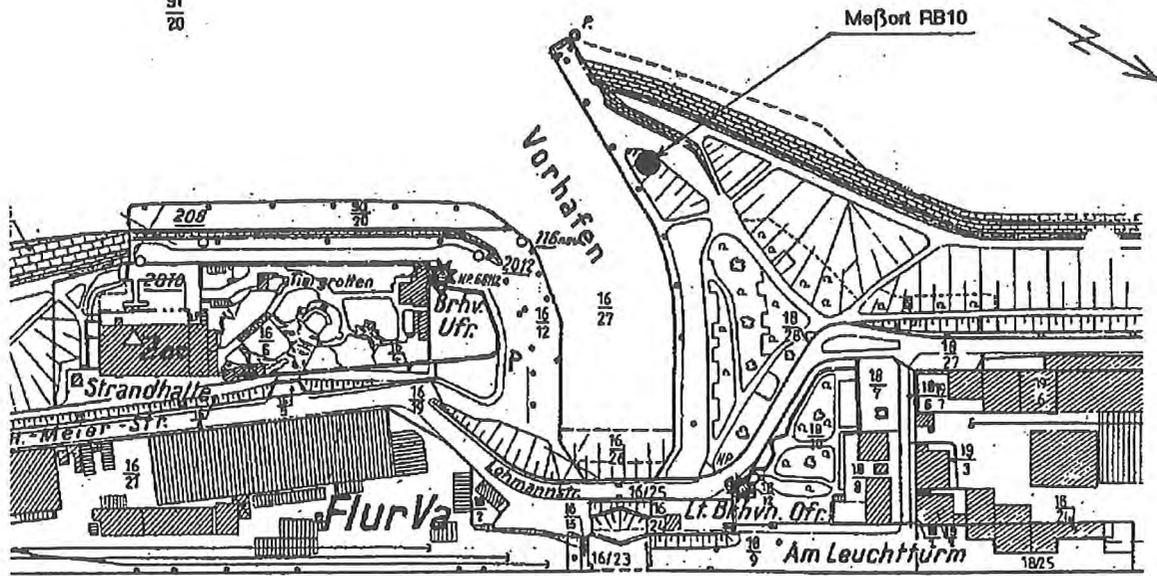


Wilhelmshaven
- Wilh -

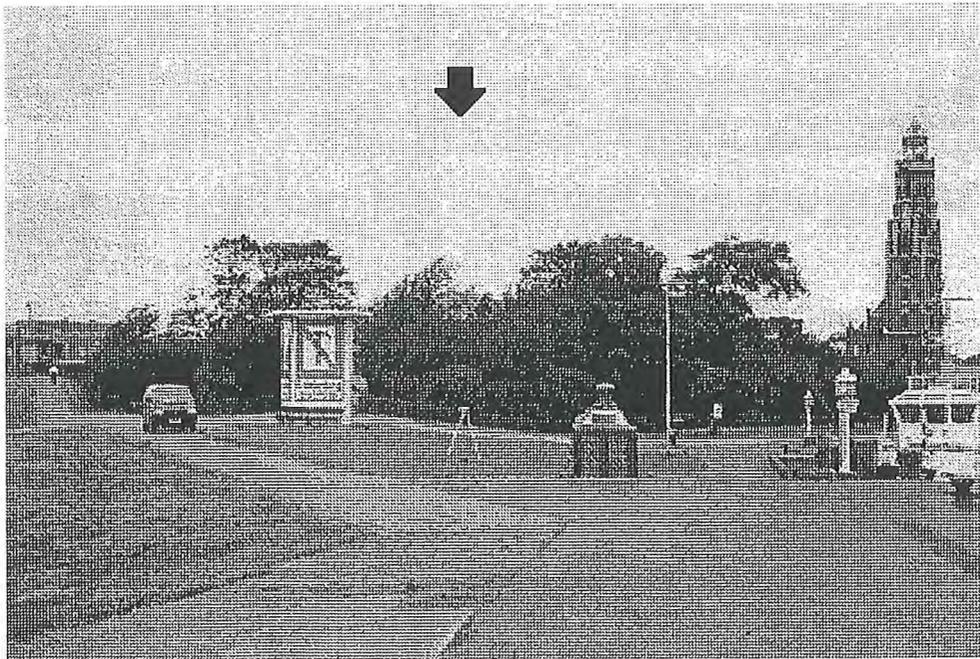
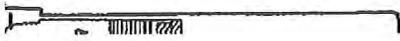


Bremerhaven
- Brem -

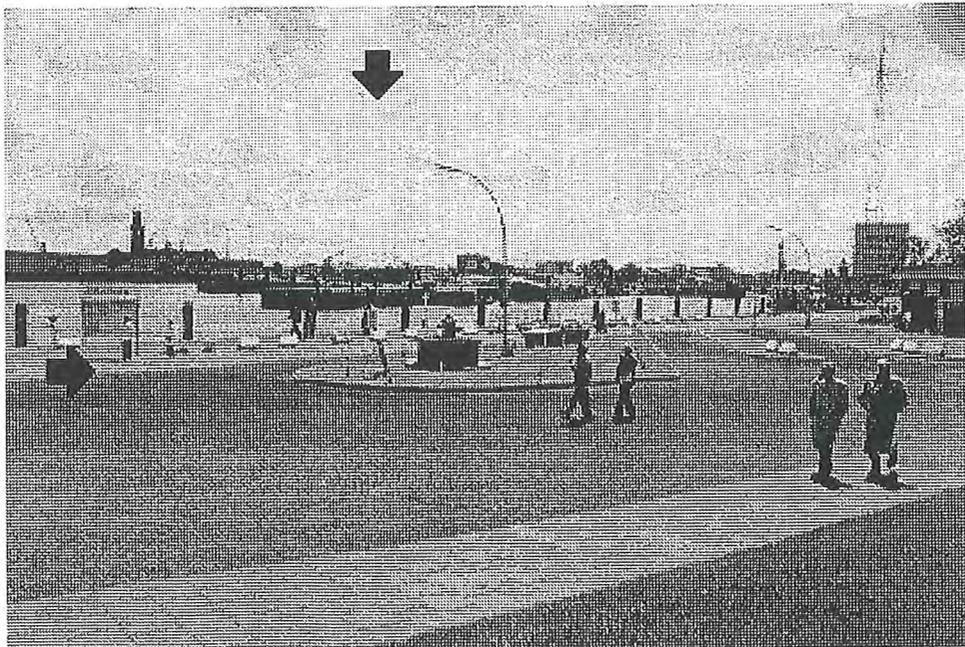
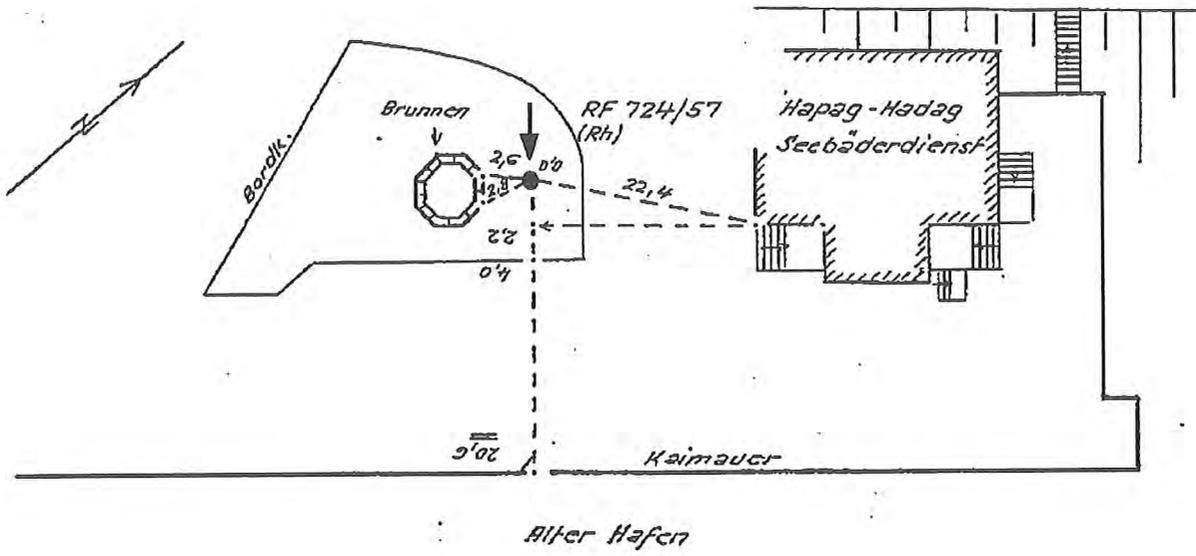
91
20



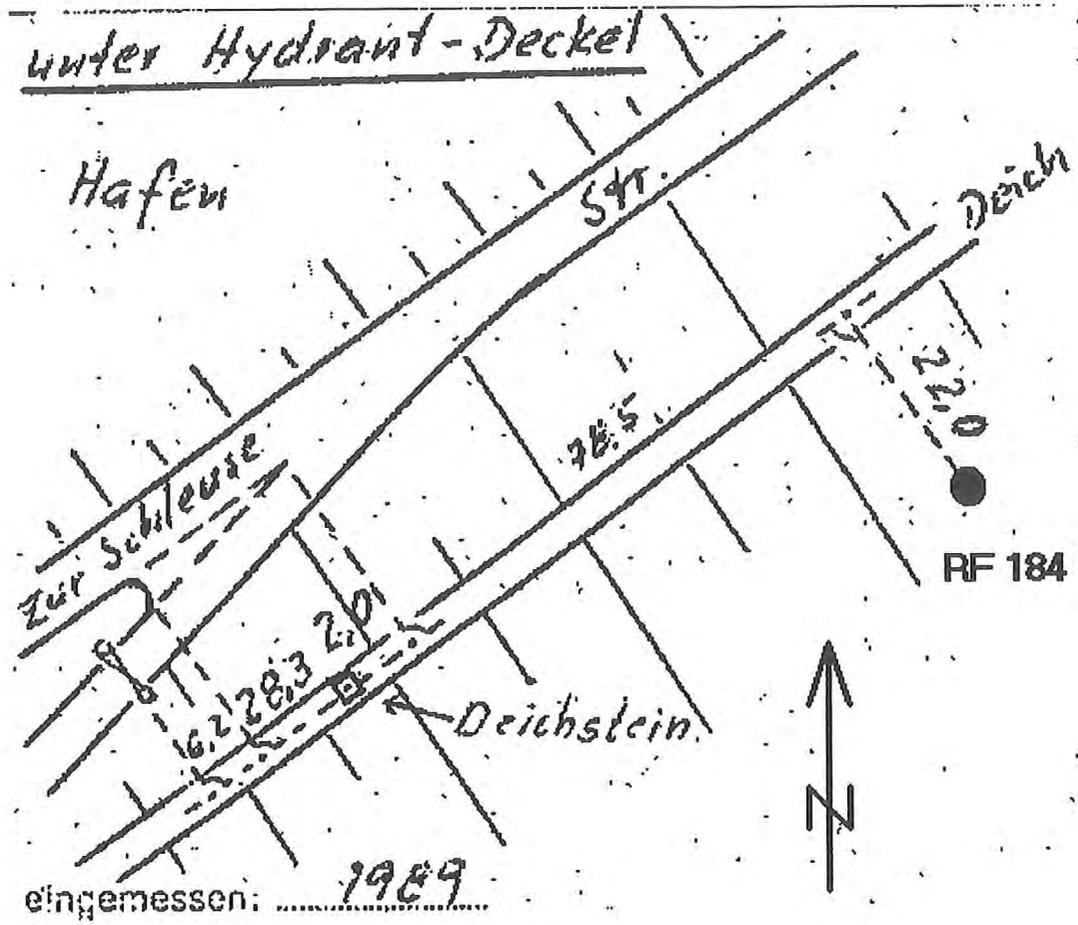
Neuer Hafen



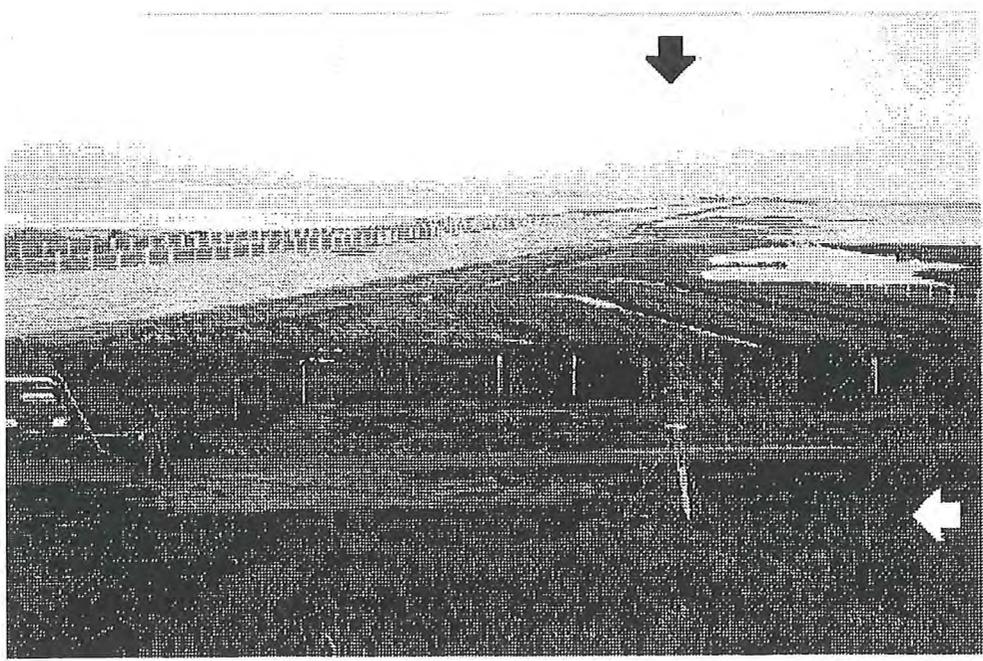
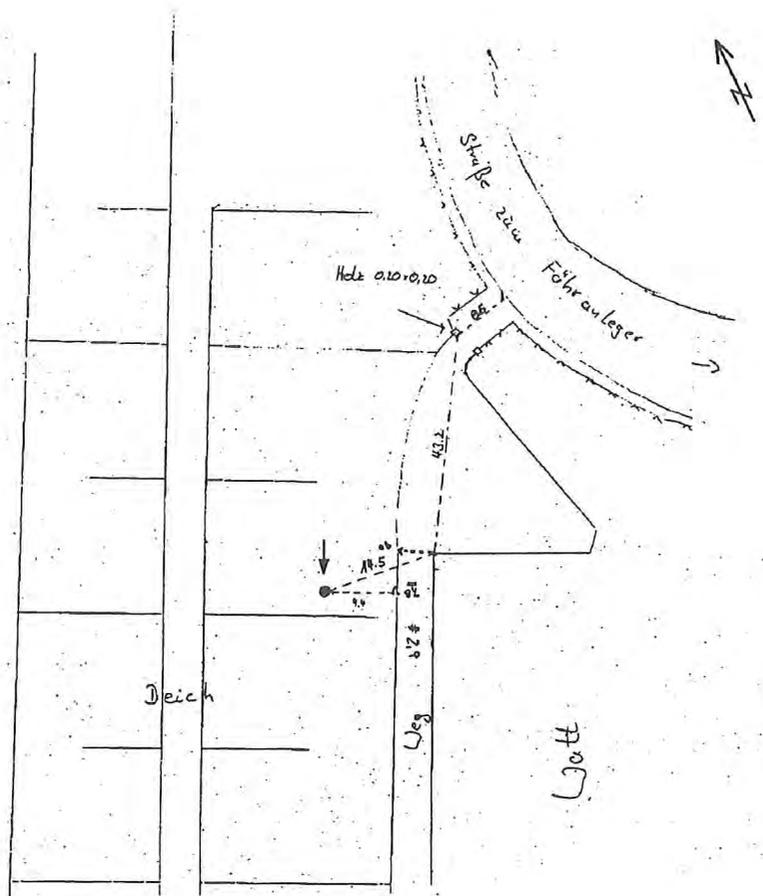
Cuxhaven
- Cuxh -



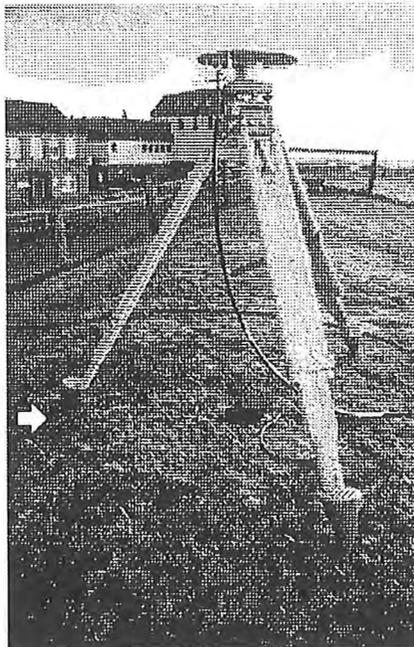
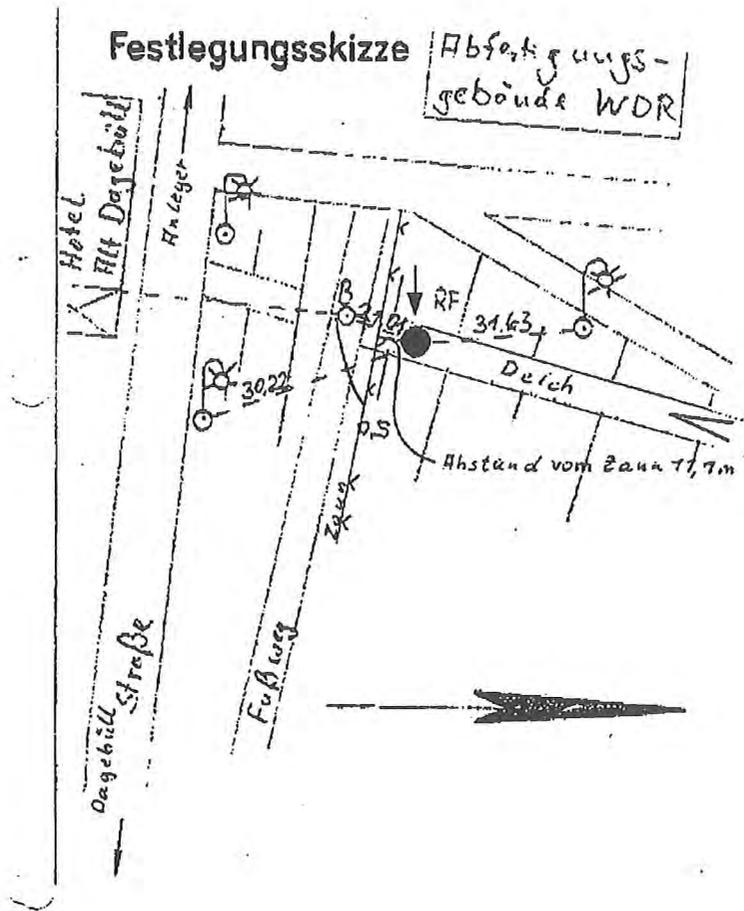
Büsum
- Bues -



Pellworm
- Pell -

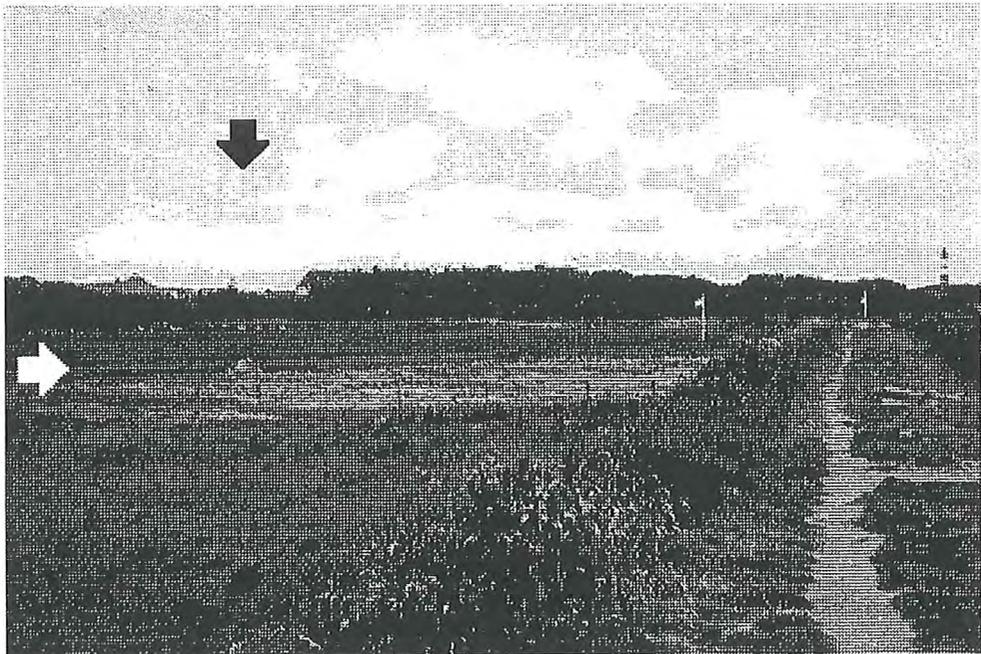
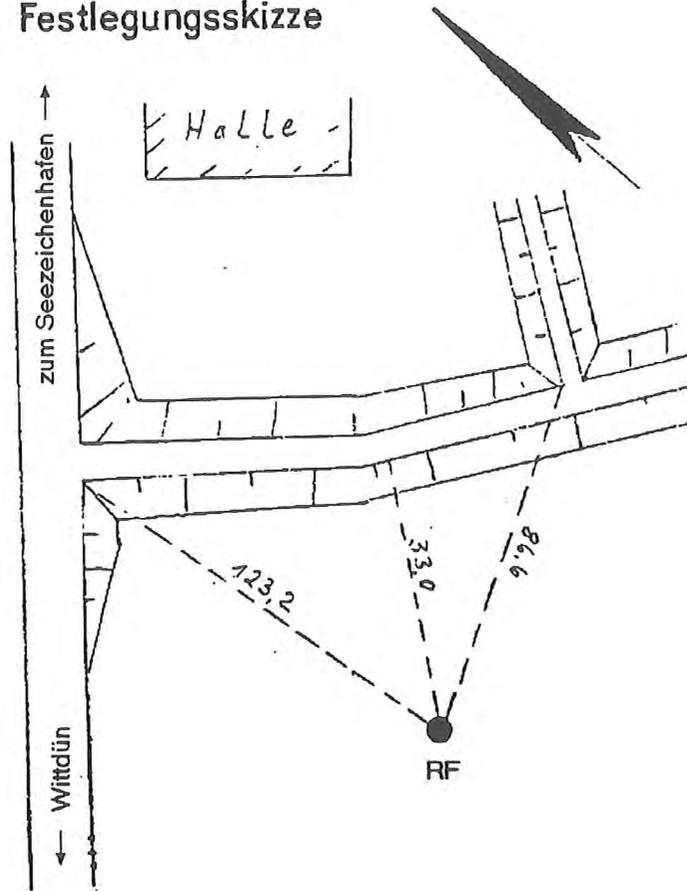


Dagebüll
- Dage -



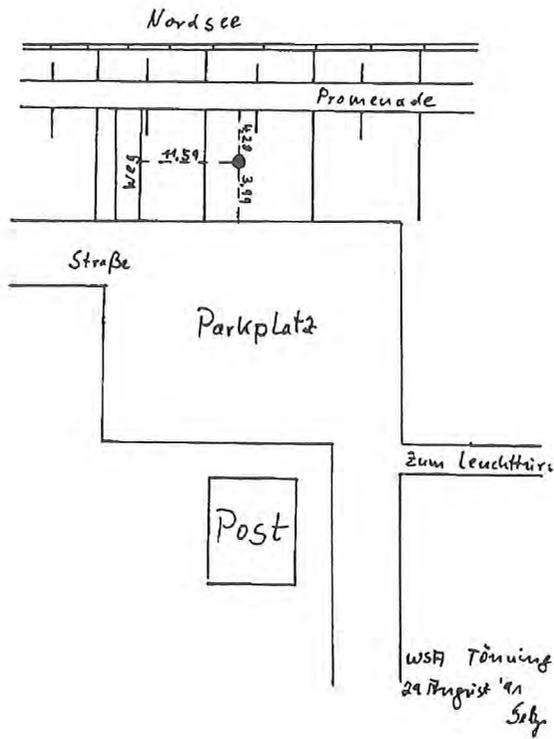
Wittdün/Amrum
- Witt -

Festlegungsskizze



Hörnum/Sylt
- Hoer -

GPS-Punkt Hörnum



List/Sylt
- List -

