

# Präzise Höhenbestimmung des Helgoländer Pegels

VON GÜNTER SEEBER, WOLFGANG TORGE,  
HEINER DENKER und HANS-JÜRGEN GOLDAN

## Zusammenfassung

Mit Hilfe der geodätischen Nutzung des NAVSTAR Global Positioning Systems GPS und in Verbindung mit einer detaillierten Geoidkenntnis ist es möglich geworden, präzise Höhenübertragungen über größere Entfernungen im Meeresbereich vorzunehmen. Der bereits 1880 eingerichtete Helgoländer Pegel ist wegen seiner Lage im offenen Meer von erheblicher Bedeutung für Untersuchungen zum Verhalten des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht. Die bisherige Höhenfestlegung gegenüber den Festlandspegeln ist jedoch um rund 30 cm falsch und erschwert damit zutreffende Interpretationen. In einem BMFT-geförderten Projekt wurde deshalb von 1991 bis 1994 eine präzise Höhenübertragung von ausgewählten Festlandspegeln nach Helgoland durchgeführt. Vier gezielte GPS-Kampagnen und eine lokale Geoidbestimmung auf der Grundlage des am Institut für Erdmessung (IfE) Hannover bearbeiteten Europegeoids EGG97 führten zu einem Höhenanschluß mit cm-Genauigkeit. Vorhandene mittelwellige Fehler im Geoid konnten durch Anpassung an das Festland-System reduziert werden.

## Summary

*Positioning with the NAVSTAR Global Positioning System, together with a detailed geoid model, can be used for a precise height transfer over larger distances at sea. The Helgoland tide gauge established already in 1880 and located in the open sea, has a special significance for mean sea level investigations in the area of the German Bay. Unfortunately, the present height connection to the tide gauges on the German mainland has an error of about 30 cm, which disturbs a common interpretation of mean sea level records in that area. In order to change this situation, a precise height transfer has been carried out between 1991 and 1994, in a project supported by the German Minister for Research and Technology. Dedicated GPS campaigns and a local geoid determination allowed a height connection of Helgoland to the mainland height system with „cm“-accuracy. The geoid height transfer is part of the European Gravimetric Geoid calculated at Institut für Erdmessung (IfE) Hannover, and affected by medium-wave errors of this continental solution, which could be reduced by fitting the geoid to the mainland control system.*

## Inhalt

1. Einleitung .....	40
2. GPS Technologie .....	42
3. Höhensysteme .....	45
4. Frühere Höhenübertragungen nach Helgoland .....	46
5. Das KFKI-Projekt zum Höhenanschluß des Helgoländer Pegels .....	47
5.1 Projektbeschreibung .....	47
5.2 Ellipsoidische Höhenübertragung mit GPS .....	48
5.3 Geoidhöhen-Übertragung in der Deutschen Bucht .....	51
5.4 Bestimmung der N.N.-Höhe für Helgoland .....	55
6. Schluß .....	59
7. Schriftenverzeichnis .....	60

## 1. Einleitung

Das zeitliche und räumliche Verhalten des Meeresspiegels an der deutschen Nordseeküste wird durch eine größere Zahl von Gezeitenpegeln überwacht (vgl. Abb. 1), die an das amtliche deutsche Höhensystem Normal Null (N.N.) angeschlossen sind. Dieses beruht auf Nivellements 1. Ordnung, bezieht sich auf den mittleren Meeresspiegel (MSL) in Amsterdam und wird in sogenannten normal-orthometrischen Höhen (vgl. Kap. 3.) angegeben.

Der auf der Insel Helgoland in etwa 55 km Entfernung vom Festland eingerichtete Pegel bezieht sich demgegenüber auf ein lokales Höhensystem, das mit Helgoländer Null (H.N.) bezeichnet werden soll. Der Gezeitenpegel auf Helgoland ist für regionale und globale Untersuchungen zur Modellierung des Meeresspiegelverhaltens von besonderer Bedeutung, da er zum einen von den in Küstennähe auftretenden Störungen wie Staueffekte im Flachwasser oder lokale Anomalien an Flußmündungen nicht oder nur wenig beeinflusst wird und da für ihn zum anderen seit mehr als 100 Jahren Pegelaufzeichnungen vorliegen.

Pegelregistrierungen lassen sich jedoch nur dann im regionalen und globalen Zusammenhang zutreffend interpretieren, wenn sie einem gemeinsamen Höhensystem und einem einheitlichen terrestrischen Bezugssystem (z. B. ITRF, vgl. Kap. 2.) zugeordnet sind. Die Abweichung des mittleren Meeresspiegels von einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes (Geoid) kann global etwa 1 m erreichen; regionale Variationen liegen zumeist unter wenigen dm. Die zeitlichen Änderungen des MSL werden mit mm/Jahr abgeschätzt und liegen damit in der Größenordnung vertikaler rezenter Krustenbewegungen. Allerdings lassen Szenarios der globalen Klimaänderung auch einen Meeresspiegelanstieg von 0,5 m/100 Jahren und mehr erwarten. Die Erfassung derartiger zeitlicher und regionaler Veränderungen, ebenso wie die Berechnung von Wasserständen für die Hydrographie und das Küsteningenieurwesen, erfordert eine Höhenkontrolle der Pegel mit cm-Genauigkeit.

Für die Verknüpfung benachbarter Gezeitenpegel entlang der Küste wird diese Forderung durch das klassische Nivellement erfüllt. Die Neuvermessung und Ausgleichung des Nivellementsnetzes 1. Ordnung in den 1980er Jahren führte im Küstenbereich zu Schleifenschlußfehlern  $< 1\text{ cm}$  (WÜBBELMANN, 1993). Ein exakter und kontrollierter Höhenanschluß von Hochseepegeln an das Pegelnetz des Festlandes war bisher mit klassischen geodätischen Hilfsmitteln jedoch nicht möglich. Das gegenwärtig benutzte Höhenreferenzsystem Helgoländer Null (H.N.) beruht auf einer trigonometrischen Höhenübertragung durch HELMERT im Jahre 1985. Aus späteren Analysen wurde aber deutlich, daß zwischen beiden Höhensystemen eine Differenz von mehreren Dezimetern besteht.

Etwa seit dem Ende der 80er Jahre stehen mit dem NAVSTAR Global Positioning System (GPS) und mit weitentwickelten Verfahren der Geoidbestimmung hochgenaue geodätische Bestimmungsmethoden zur Verfügung, die eine präzise Höhenübertragung über größere Entfernungen ohne die Notwendigkeit von gegenseitigen Sichtverbindungen erlauben. Es lag somit nahe, das bisher ungelöste Problem des präzisen Höhenanschlusses des Helgoländer Pegels mit der neuen Methodik zu bearbeiten.

Die beiden erstgenannten Autoren haben 1991 ein entsprechendes Projekt formuliert, wobei auf die langjährigen Erfahrungen der Arbeitsgruppen „GPS“ (SEEBER et al., 1994) und „Geoid“ (TORGE et al., 1995) des Instituts für Erdmessung (IfE) der Universität Hannover aufgebaut werden konnte. Projektziel war die „cm“-Höhenübertragung vom N.N.-System des deutschen Bereichs der Nordseeküste auf den Helgoländer Pegel. Durch den Höhenanschluß an eine ausgewählte Zahl von Festlandpegeln (Abb. 1) konnte zugleich die Qualität der Höhenverbindung zwischen diesen Pegeln kontrolliert werden. Weiterhin wurde die Forschungsplattform Nordsee in das Projekt einbezogen.

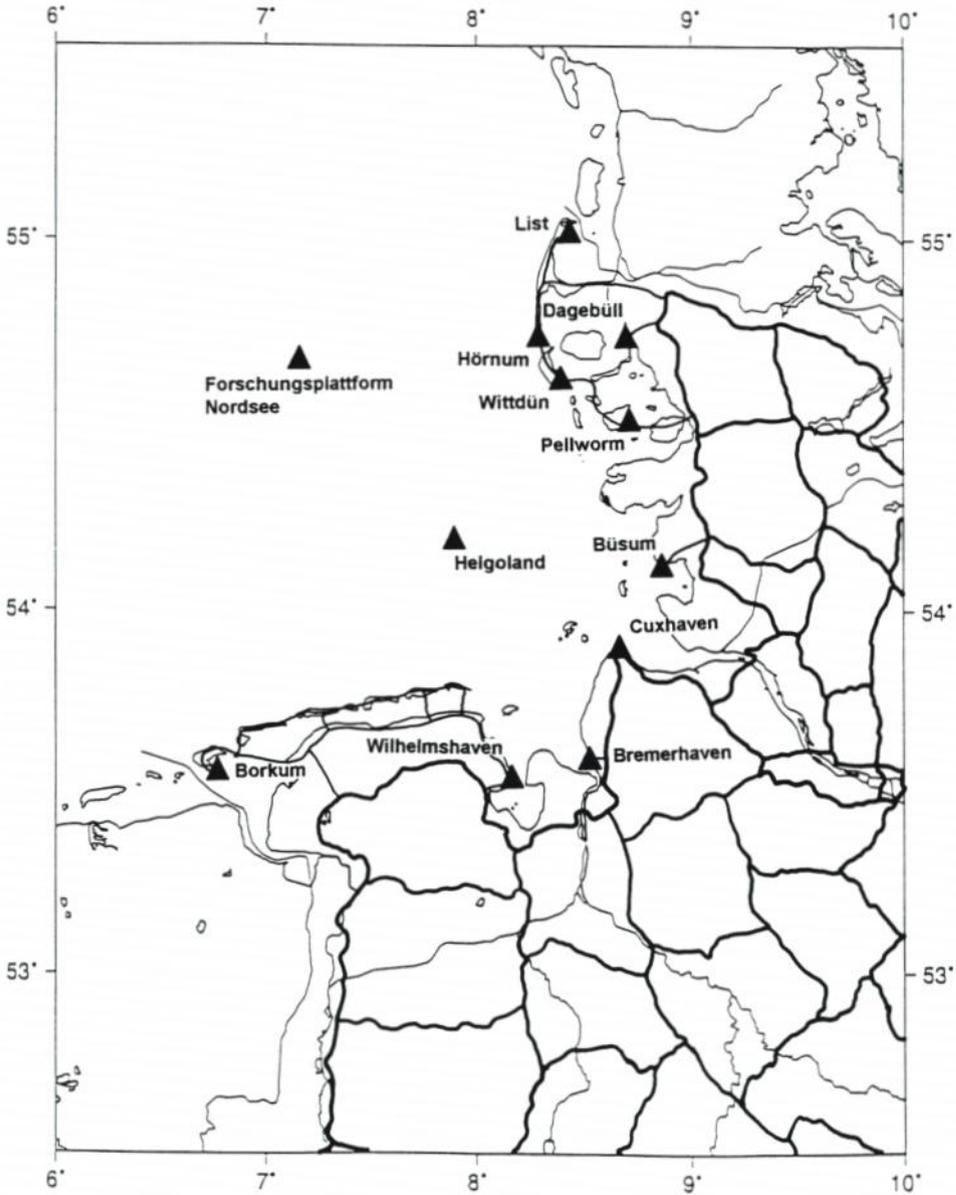


Abb. 1: Nivellementsnetz 1. Ordnung, Pegelanschlußnivellements und im Vorhaben benutzte Meerespiegel

Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), jetzt: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technik (BMBF) unter dem Kennzeichen MTK 0525-2 gefördert und von einer Projektgruppe des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begleitet. Eine große Zahl von staatlichen Dienststellen und Forschungseinrichtungen unterstützten das Projekt.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages werden die wesentlichen Ergebnisse aus dem Vorhaben sowie aus weiteren damit zusammenhängenden Untersuchungen am Institut für Erdmessung vorgestellt. Eine vollständige Dokumentation des Vorhabens findet sich bei SEEBER et al. (1997). Zur Erleichterung des Verständnisses werden einige Grundlagen der verwendeten Methodik erläutert.

## 2. GPS Technologie

Das NAVSTAR Global Positioning System, allgemein mit GPS bezeichnet, ist ein satellitengestütztes Navigationssystem, das im globalen Rahmen eine kontinuierliche Positionsbestimmung von Land-, See- und Luftfahrzeugen erlaubt. Es besteht aus 24 Satelliten in Bahnhöhen von etwa 20 200 km, die Meß- und Navigationssignale zur Echtzeitnutzung durch eine unbegrenzte Zahl von Anwendern aussenden. Der Grundgedanke des Verfahrens besteht darin, daß ein Nutzer gleichzeitig die Entfernungen zu mindestens vier Satelliten mißt, um daraus seine Standortkoordinaten sowie den Synchronisationsfehler zwischen der Satellitenuhr und der Empfängeruhr abzuleiten (Abb. 2). Die Entfernungsmessung erfolgt durch die Bestimmung der Signallaufzeit von den Satelliten zum Empfänger. Bei Kenntnis der jeweiligen Satellitenpositionen aus der mitübertragenen „Navigationssmessage“ ist eine Positionsbestimmung in Echtzeit und damit eine kontinuierliche Navigation möglich.

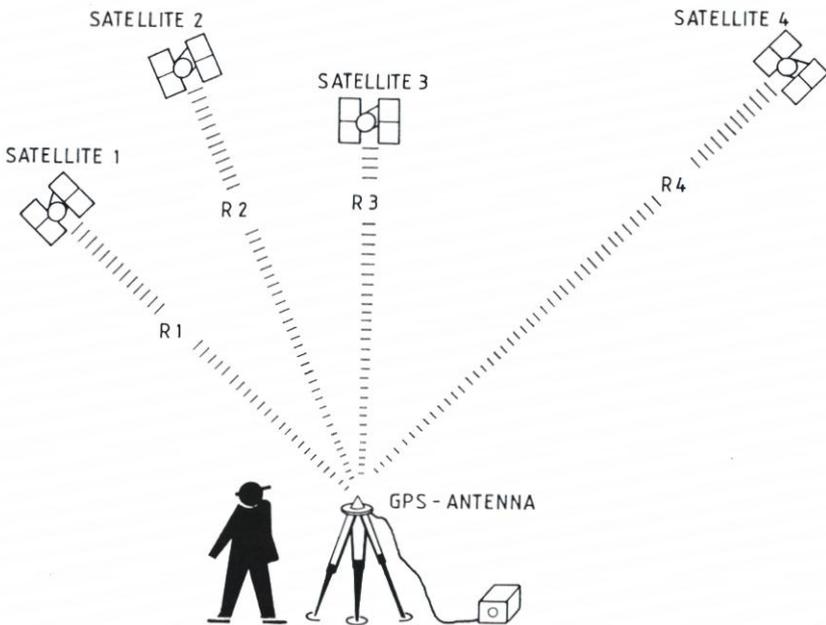


Abb. 2: Grundprinzip der Positionsbestimmung mit GPS

GPS ist ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium primär für militärische Anwendungen entwickeltes System. Zivilen Nutzern steht nur eine durch die Sicherungsmaßnahmen SA (Selective Availability) und AS (Anti Spoofing) eingeschränkte Genauigkeit zur Verfügung. Diese beträgt für einen auf sich allein beschränkten Nutzer, unabhängig von der Qualität des GPS-Empfangsgerätes, etwa 100 m. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, ist es zwingend erforderlich, relativ zu einer bekannten Referenzstation zu messen, um durch Differenzbildung den größten Teil der wirksamen Fehleranteile, insbesondere die künstliche Signalverschlechterung aufgrund von SA zu eliminieren. Dieses Verfahren wird „Differential GPS“ (DGPS) genannt und ermöglicht standardmäßig eine Genauigkeit von wenigen Metern relativ zu der benutzten Referenzstation. Weltweit werden von öffentlichen und kommerziellen Betreibern operationelle Referenznetze aufgebaut, die in der Regel gegen Gebühren kontinuierlich Korrektursignale abstrahlen. Es ist selbstverständlich auch möglich, individuell temporäre Referenzstationen zu installieren und die dort aufgezeichneten Daten im Zuge einer nachträglichen Berechnung zur Bestimmung der relativen Koordinaten zwischen den beteiligten Stationen heranzuziehen.

Bei höheren Genauigkeitsanforderungen im cm-Bereich genügt es nicht, die für die eindeutige Navigation vorgesehenen Codesignale mit einer Meßauflösung von wenigen Metern zu nutzen, sondern es muß auf die wesentlich höher auflösbaren Trägersignale mit Wellenlängen von etwa 20 cm zurückgegriffen werden. Die reine Meßauflösung beträgt hier 1 mm oder weniger. Wenn es gelingt, alle wirksamen Fehlereinflüsse zutreffend zu modellieren, kann mit dieser Technik eine Genauigkeit der Koordinatenbestimmung auf dem 1-cm-Niveau auch über Entfernungen von bis zu 100 km erzielt werden. Die wesentlichen genauigkeitsbegrenzenden Einflüsse werden dabei von den unzureichend modellierten Satellitenbahnen, der Signalverschlechterung durch SA und AS, dem Ausbreitungsverhalten der Satellitensignale in der Atmosphäre (Ionosphäre, Troposphäre) und in der Antennenumgebung (Multipath) sowie vom Beobachtungsrauschen der GPS-Empfänger verursacht. Um diese Einflüsse zu beherrschen, sind neben dem Gebrauch hochwertiger Empfangsanlagen und hochentwickelter Auswertemodelle vor allen Dingen lange Beobachtungszeiten (Stunden bis Tage), die simultane Beobachtung auf möglichst vielen Stationen und die wiederholte Beobachtung unter veränderten Rahmenbedingungen (z. B. zu unterschiedlichen Jahreszeiten) von Vorteil.

Eine besondere Rolle bei der Nutzung von Trägerphasenbeobachtungen spielt die Festlegung der Mehrdeutigkeiten, d. h. die Bestimmung der ganzen Zahl von Wellenzyklen in der Entfernung Satellit-Beobachter. Erst durch die Festsetzung (fixing) der Mehrdeutigkeiten kann das hohe Genauigkeitspotential von GPS voll ausgeschöpft werden. Bei größeren Stationsentfernungen (>10 km) kann das korrekte „fixing“ der Mehrdeutigkeiten durch wirksamen Fehlereinflüsse, insbesondere durch ionosphärische Störungen erheblich erschwert werden. Dies hat in den Anfangsjahren der GPS-Nutzung häufig zu erheblichem Rechenaufwand geführt, da wegen des nicht vollständigen Ausbaus der Satellitenkonstellation noch keine kontinuierlichen Beobachtungen über längere Zeiträume möglich waren.

Seit dem vollständigen Ausbau des Satellitensystems (etwa seit 1993) können ohne Schwierigkeiten kontinuierliche Beobachtungssegmente von acht und mehr Stunden genutzt werden, so daß auch realwertige Schätzungen der Mehrdeutigkeitsterme ohne Festsetzung auf ganze Zahlen durch die Häufung der Beobachtungen zu ebenso genauen Ergebnissen führen, wie die festgesetzten Lösungen. Diese sogenannten „ambiguity-float“ Lösungen werden deshalb heute bei größeren Stationsentfernungen oder bei gestörten Daten bevorzugt. Nähere Ausführungen zur Technologie genauer GPS-Verfahren findet man u. a. bei SEEBER (1993, 1996).

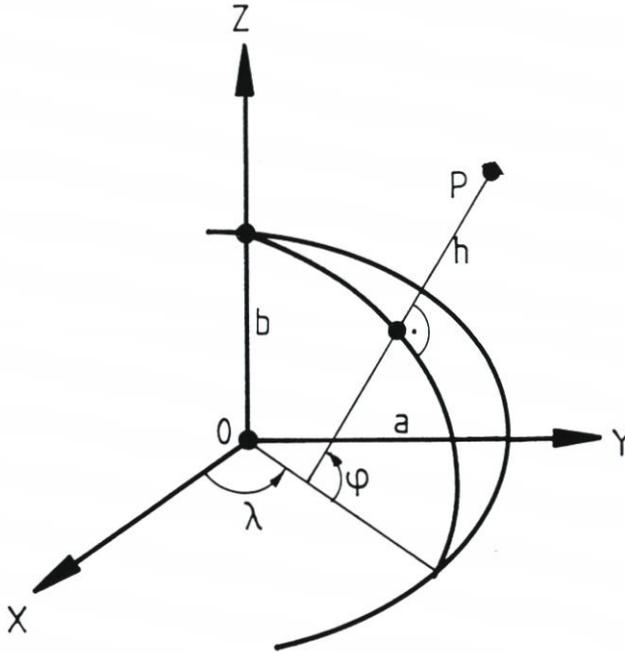


Abb. 3: Kartesische und ellipsoidische Koordinaten

Da die Satellitenbewegung in bezug auf den Massenmittelpunkt der Erde erfolgt, sind die aus der Satellitenbahnberechnung abgeleiteten Koordinaten von Haus aus dreidimensionale geozentrische Koordinaten. Sie werden üblicherweise als kartesische Koordinaten  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  formuliert, können aber mit strengen Formeln widerspruchsfrei in ellipsoidische Koordinaten  $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  transformiert werden (Abb. 3). Die aus Satellitenmessungen hervorgehende ellipsoidische Höhe  $h$  ist damit eine rein geometrisch definierte Größe ohne Bezug zum Erdschwerefeld. Wasser muß deshalb nicht zwingend von einem Ort größerer ellipsoidischer Höhe zu einem Ort geringerer ellipsoidischer Höhe fließen. Ellipsoidische Höhen sind damit für sich allein im Wasserbau oder auch im Küsteningenieurwesen wenig hilfreich sondern müssen mit Schwerefeldinformationen verknüpft werden (vgl. Kap. 3.).

Das geozentrische Bezugssystem, in dem die GPS-Bahnen gerechnet werden, heißt „World Geodetic System 1984“ (WGS 84). Die allein aus GPS-Messungen abgeleiteten Koordinaten beziehen sich folglich ebenfalls auf das WGS 84. Dem WGS 84 ist ein geozentrisches Ellipsoid mit den Dimensionen des Geodätischen Referenzsystems 1980 (GRS80, vgl. TORGE, 1991) zugeordnet. Ein solches Bezugssystem nennt man auch ein „Geodätisches Datum“. Wegen der unvermeidbaren Meßgenauigkeiten und insbesondere wegen der Sicherungsmaßnahmen SA ist eine durch Messungen erfolgte Realisierung des Bezugssystems WGS 84 nicht wesentlich genauer als 10 m, häufig auch deutlich ungenauer. Da Fehler in den absoluten Koordinaten auch fehlerbehaftete Relativkoordinaten insbesondere in der Höhenkomponente zur Folge haben (SEEBER, 1987), ist es erforderlich, ein anspruchsvolles GPS-Meßprojekt an Stationen mit bereits hochgenau bekannten Absolutkoordinaten anzuschließen. Ein solcher hochgenauer, geozentrischer Bezugsrahmen steht mit dem „International Terrestrial Reference Frame“ ITRF zur Verfügung.

ITRF wird jährlich auf der Grundlage aktueller Daten aus geodätischen Raumtechniken (z. B. Lasermessungen zu Satelliten, Langbasisinterferometrie zu Quasaren, GPS-Beobachtungen) neu gerechnet und mit der laufenden Jahreszahl gekennzeichnet. Für das hier vorgestellte Projekt wurden Koordinaten des ITRF93 genutzt. ITRF besitzt inzwischen global ein Genauigkeitsniveau von wenigen Zentimetern und in Europa von 1 bis 2 cm. Durch eine Verknüpfung von Pegeln mit dem ITRF ist damit die Einrichtung eines globalen Höhendaums als eine Voraussetzung für das Studium globaler Meeresspiegelschwankungen möglich. ITRF und WGS 84 können im Rahmen der jeweils zugehörigen Genauigkeit als voll kompatibel betrachtet werden.

### 3. Hö h e n s y s t e m e

Die allgemein übliche Forderung von Nutzerseite an ein Höhensystem ist, daß zwei Punkte mit dem gleichen Höhenwert auch auf der gleichen Äquipotentialfläche (Niveaufläche) liegen. Damit ruht eine Wasseroberfläche zwischen diesen beiden Punkten, und es kann zwischen ihnen kein Wasser fließen. Ein physikalisch sinnvolles Höhensystem muß sich deshalb am Schwerefeld der Erde orientieren. Eine allgemein akzeptierte Höhenbezugsfläche findet man in derjenigen Niveaufläche, die im Mittel mit der Oberfläche der ruhend angenommenen Ozeane zusammenfällt und die man sich, etwa in einem System kommunizierender Röhren, unter den Kontinenten fortgesetzt denkt. Diese Niveaufläche wird als Geoid bezeichnet (vgl. TORGE, 1991). Auf das Geoid beziehen sich die durch geometrisches Nivellement bestimmten orthometrischen Höhen. Dies sind, wenn hier zunächst von Feinheiten abgesehen wird, die Gebrauchshöhen in der Landesvermessung.

Die aus Satellitenmessungen abgeleiteten Höhen oder Höhendifferenzen beziehen sich, wie oben dargelegt wurde, auf ein Ellipsoid. Die Zusammenhänge sind in Abb. 4 dargestellt. Um von ellipsoidischen Höhen, die aus Satellitenmessungen gewonnen wurden, auf orthometrische Gebrauchshöhen überzugehen, benötigt man folglich mit entsprechender Genauigkeit eine Information über den Geoidverlauf im Arbeitsgebiet. Die Darstellung des Geoidverlaufs erfolgt anschaulich durch den lotrechten Abstand  $N$  des Geoids vom Ellipsoid.  $N$  heißt Geoidundulation. Detailstrukturen des Geoids können damit durch Isolinien veranschaulicht werden (vgl. Abb. 7). Zwischen Geoidundulation  $N$ , ellipsoidischer Höhe  $h$  und orthometrischer Höhe  $H$  besteht gemäß Abb. 4 die einfache Beziehung

$$H = h - N$$

oder bei einer Betrachtung von Höhendifferenzen

$$\Delta H = \Delta h - \Delta N.$$

Bei Vorliegen von zwei Größen kann die dritte berechnet werden. Dies bedeutet, bei Kenntnis des Geoidverlaufs und Messung ellipsoidischer Höhendifferenzen können orthometrische Höhendifferenzen abgeleitet werden. Andererseits steht hiermit ein Verfahren zur Kontrolle von Nivellementsergebnissen bzw. zur Abstützung von Geoidberechnungen zur Verfügung.

Orthometrische Höhen können streng nur berechnet werden, wenn der Schwereverlauf längs der Nivellementslinien sowie entlang der Lotlinien zwischen Geoid und Erdoberfläche bekannt ist. Beim Aufbau des deutschen Höhennetzes lagen keinerlei gemessene Schwere-

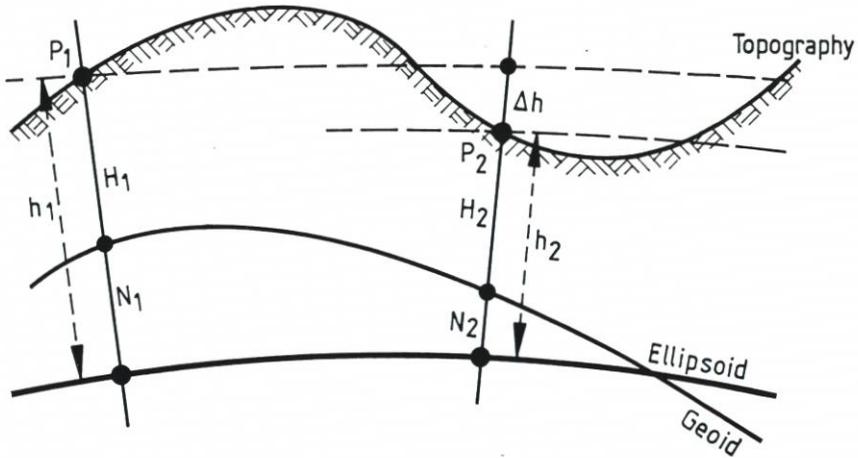


Abb. 4: Beziehung zwischen Ellipsoid, Geoid und Nivellementshöhe

werte vor. Statt dessen verwendete man gerechnete Schwerewerte aus einem theoretischen Normalschwerfeld (Niveauellipsoid). Diese „normal-orthometrischen“ Höhen beziehen sich folglich nicht streng auf das Geoid sondern erzeugen, wenn sie von der Erdoberfläche nach unten abgetragen werden, die N.N.-Fläche.

Ein weiteres heute bevorzugt verwendetes Höhensystem ist das der Normalhöhen, bei dem zur Bestimmung von Höhendifferenzen zwar gemessene Schwerewerte längs der Nivellementslinien genutzt werden, andererseits für Reduktionen längs der Lotlinie auf die Normalschwere zurückgegriffen wird. Die zugehörige Höhenbezugsfläche ist das Quasigeoid.

Man kann zeigen, daß bei geringen Höhenwerten, wie es im Küstenbereich und im norddeutschen Flachland der Fall ist, die drei genannten Höhen auf wenige mm übereinstimmen, so daß der Unterschied zwischen den zugeordneten Höhenbezugsflächen Geoid, NN-Fläche und Quasigeoid für die vorliegende Aufgabenstellung vernachlässigt werden kann. Nähere Erläuterungen zur Frage der Höhensysteme findet man bei TORGE (1991).

Will man heute das zeitaufwendige geometrische Nivellement durch operationelle GPS-Messungen ersetzen, dann ist es erforderlich, über Geoidinformationen mit entsprechender Genauigkeit zu verfügen. Hierin liegt der eigentliche Engpaß des Ansatzes begründet. Im globalen Maßstab ist das Geoid bislang nur mit einer Genauigkeit von wenigen Dezimetern bis Metern bekannt, da die erforderliche regelmäßige und dichte Überdeckung mit Schweredaten nicht gegeben ist. Die wesentlich günstigere Datensituation in Europa lieferte im Arbeitsgebiet vor Projektbeginn etwa eine Geoidgenauigkeit von 5 bis 10 cm. Um die angestrebte cm-Genauigkeit der Höhenübertragung nach Helgoland zu erreichen, mußten deshalb erhebliche Anstrengungen zur Verbesserung der Datenbasis unternommen werden, über die weiter unten berichtet wird.

#### 4. Frühere Höhenübertragungen nach Helgoland

Auf den Konferenzen zur Europäischen Gradmessung 1864 und 1867 wurde die Aufstellung von registrierenden Pegeln in den an das Meer grenzenden beteiligten Ländern gefordert, um eine Bestimmung des Mittelwassers der betreffenden Meere zu ermöglichen

(HELMERT, 1895). Für die deutsche Nordsee wurden als Pegelstandorte Bremerhaven und Helgoland ausgewählt (LOHRBERG 1966). Der daraufhin errichtete Pegel auf Helgoland ist mit einer Aufzeichnungslänge von mehr als 100 Jahren der einzige Hochseepegel Deutschlands. Um die Helgoländer Aufzeichnungen mit dem amtlichen Höhensystem des Festlandes verküpfen zu können, wurden bereits frühzeitig im letzten Jahrhundert und später wiederholt Höhenübertragungen nach Helgoland mit geodätischen und ozeanographischen Methoden vorgenommen.

Das Preußische Geodätische Institut führte unter der Leitung von Baeyer und später Helmert in drei Kampagnen (1878, 1881, 1888) trigonometrische Höhenmessungen zur Anbindung von Helgoland mit dem N.N.-Höhensystem des Festlandes durch (HELMERT, 1895; LOHRBERG, 1966). Zwischen Helgoland und den Inseln Wangerooge und Neuwerk (Entfernungen 40 bis 50 km) wurden gegenseitig – gleichzeitige Zenitwinkel beobachtet. Wangerooge und Neuwerk wurden entsprechend an die N.N.-Höhen der Festlandspunkte Schillig und Cuxhaven angeschlossen. Im Dreieck Wangerooge–Helgoland–Neuwerk streuten die täglichen Mittelwerte der hieraus abgeleiteten Höhenunterschiede um mehrere Meter. Nach Streichen von Beobachtungen aufgrund schlechter Sichtbedingungen und weiterer Auswahl konnte der Dreiecksschluß schließlich auf 4 cm verkleinert werden. Die Genauigkeit der hieraus abgeleiteten Höhenübertragung nach Helgoland wurde von Helmert selbst mit  $\pm 25$  cm abgeschätzt. Auf seinen Vorschlag wurde das Ergebnis dieser Übertragung auch zur Festlegung der amtlichen Höhenbezugsfläche für Helgoland (Helgoländer Null, H.N.) durch die Preußische Landesaufnahme benutzt.

Auf Helmert geht auch ein Versuch zur Höhenübertragung mittels ozeanographischem Nivellement in einfachster Form zurück. Unter der Annahme, daß der mittlere Meeresspiegel (MSL) in Helgoland und Cuxhaven dieselbe (N.N.) Höhenlage hat, ergibt sich eine Diskrepanz von 32 cm zur trigonometrischen Höhenübertragung (HELMERT, 1895, S. VII). Da eine Meeresspiegelneigung von rund 30 cm von der Küste bis Helgoland unwahrscheinlich ist, kommen als Ursachen wohl vorrangig Refraktionsunsicherheiten als Erklärung in Betracht (SEEBER u. TORGE, 1997).

In den folgenden Jahrzehnten benutzten Ozeanographen und Küsteningenieure mehrfach MSL-Registrierungen an der Festlandsküste zur Höhenübertragung nach Helgoland, wobei verschiedene Zeitintervalle und unterschiedliche Annahmen über die Meeresspiegelneigung zugrunde gelegt wurden. Bei GOLDAN (1996) sind zehn zwischen 1932 und 1985 durchgeführte Bestimmungen nachgewiesen, aus denen sich als einfaches Mittel eine Korrektur des Helgoländer Null (H.N.) um 30 cm ( $\pm 2$  cm, Streuung von 20 cm bis 40 cm) ergibt. LASSEN (1991) findet schließlich aus MSL-Registrierungen der Perioden 1975/79 und 1982/86 an neun Pegeln als Ergebnis für die Differenz H.N. – N.N. = + 25,7 cm mit einer Standardabweichung von  $\pm 1,3$  cm.

## 5. Das KFKI-Projekt zum Höhenanschluß des Helgoländer Pegels

### 5.1 Projektbeschreibung

Für den Höhenanschluß wurden unter Mitwirkung der KFKI-Projektgruppe die in Abb. 1 eingetragenen zehn Festlandspegel ausgewählt. Im Jahre 1992 wurde auch die Forschungsplattform Nordsee in das Vorhaben einbezogen, um einen N.N.-Höhenbezug für den dort betriebenen Blasenpegel zu erhalten. Wegen des noch 1992 erfolgten Abbaus der Plattform konnten die Messungen nicht fortgesetzt werden.

Die Festlandspegel sind durch Anschlußnivellements an das amtliche Nivellementsnetz 1. Ordnung angeschlossen (vgl. Abb. 1). Die Aufstellung der GPS-Antennen konnte naturgemäß nicht auf den Pegelpunkten selbst erfolgen. In Abstimmung mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurden in der Nachbarschaft der Pegel geeignete Pegelkontrollpunkte (Pegelfestpunkte) oder amtliche Höhenfestpunkte (NivP) der Landesvermessungen als höhenmäßig definierte Standpunkte ausgewählt. Die genauen Lageskizzen aller Aufstellungspunkte sind in einem umfassenden Forschungsbericht (SEEBER et al., 1997) nachgewiesen.

Durch Kontrollberechnungen wurde sichergestellt, daß sich die in der Tab. 8 nachgewiesenen Geoidhöhen für die GPS-Standpunkte und für die zugehörigen Pegelpunkte nicht unterscheiden. Dies gilt insbesondere auch für den Pegel Helgoland. Dort wurden die GPS-Beobachtungen auf dem Rohrfestpunkt RF88 in der Nachbarschaft des Pegels Südhafen durchgeführt. Der Pegelstandort Binnenhafen, auf den sich zahlreiche meereskundliche Untersuchungen beziehen, ist etwa 500 m entfernt. Der Unterschied in den Geoidhöhen für beide Standorte beträgt lediglich 1 mm. Die in diesem Beitrag mitgeteilten Geoidhöhen können folglich ohne Genauigkeitsverlust auf die jeweiligen Pegel angewendet werden.

In den Abschnitten 1. bis 3. wurde dargelegt, daß sich die Aufgabe der genauen Höhenübertragung nach Helgoland nur durch die Kombination einer ellipsoidischen Höhenübertragung mit GPS und einer präzisen Geoidberechnung für den Bereich der Deutschen Bucht lösen läßt. Die Bearbeitung dieser beiden Teilaufgaben wird im folgenden erläutert. Erste Ergebnisse aus dem Projekt wurden anlässlich einer internationalen Konferenz von GOLDAN et al. (1994) vorgestellt. Der Abschlußbericht für das BMFT-Vorhaben MTK 0525-2 wurde 1995 vorgelegt und als interner Bericht an interessierte Stellen verteilt. In der Dissertation GOLDAN (1996) werden die wissenschaftlichen Aspekte des Vorhabens, insbesondere der GPS-Vermessung, diskutiert.

Nach dem formalen Abschluß des Vorhabens haben neuere Geoidberechnungen am IfE die Resultate leicht verändert. Diese Ergebnisse, die dem neuesten Stand der Wissenschaft entsprechen, werden in dem vorliegenden Beitrag ebenfalls vorgestellt. Eine umfassende Dokumentation des Vorhabens, aus der alle wesentlichen Detailinformationen entnommen werden können, ist in Vorbereitung (SEEBER et al., 1997). Eine Kurzdarstellung des Vorhabens unter besonderer Berücksichtigung der Geoidberechnungen und der geodätisch relevanten Aspekte findet man bei SEEBER u. TORGE (1997).

## 5.2 Ellipsoidische Höhenübertragung mit GPS

Im Rahmen des Vorhabens wurden zwischen 1991 und 1994 vier gezielte GPS-Kampagnen zur Höhenübertragung von den Festlandspegeln nach Helgoland durchgeführt. Während der zweiten Kampagne 1992 konnte auch die Forschungsplattform Nordsee (FPN) einbezogen werden. Die Stationsabstände variieren von 30 bis 100 km. Die geographische Verteilung der Stationen ist in Abb. 1 nachgewiesen. Tab. 1 enthält einige statistische und sachliche Hinweise zu den einzelnen Kampagnen. Nähere Angaben findet man bei GOLDAN (1996) und SEEBER et al. (1997).

Während eines jeden Projektjahres wurde eine Kampagne beobachtet. Die ursprüngliche Absicht, zu unterschiedlichen Jahreszeiten zu beobachten, ließ sich aus logistischen Gründen nicht vollständig erreichen. Die Witterungsbedingungen waren während der Messungen jedoch sehr unterschiedlich, so daß durch die vielen Meßtage im Vorhaben eine Minimierung der troposphärischen Einflüsse erwartet werden kann.

Tab. 1: Statistische Angaben zu den GPS-Kampagnen 1991–1994

Kampagne	Zeitraum	Zahl u. Dauer der Sessions	verfügbare Satelliten	Empfänger
1	09.–15.9.1991	6 x 8 h	13	6 Ashtech (C/A) 2 Ashtech (P)
2	05.–09.5.1992	5 x 8 h	18	4 Ashtech (C/A) 4 Ashtech (P)
3	16.–19.3.1993	5 x 10 h	22	8 Trimble SSE(P)
4	10.–13.5.1994	4 x 10 h	25	11 Trimble SSE(P)

Jede Station wurde mindestens zweimal je Kampagne besetzt, drei Permanentstationen wurden in die Messungen einbezogen. 1994 konnten durch die größere Zahl der verfügbaren Empfänger erstmals alle Stationen gleichzeitig beobachtet werden. Das absolute Datum der GPS-Netze wurde aus den ITRF93-Koordinaten der Stationen Onsala (Schweden), Kootwijk (Niederlande), Herstmonceux (England) und Wetzell (Deutschland) abgeleitet. Diese aus permanenten Messungen im ITRF hochgenau bestimmten Stationen wurden als „fiducial stations“ mit Standardabweichungen für die Koordinaten von  $\pm 5$  mm eingeführt.

Tab. 1 macht auch die Entwicklung des GPS-Systems während der 90er Jahre deutlich. Während der ersten Kampagne 1991 stand nur eine begrenzte Zahl an Satelliten und damit auch nur ein zeitlich eingeschränktes Beobachtungsfenster zur Verfügung. Die Empfängerentwicklung war noch nicht abgeschlossen, so daß überwiegend C/A-Code-Geräte mit einem höheren Beobachtungsrauschen eingesetzt werden mußten. Da nicht genügend Geräte für eine Simultanbesetzung aller Stationen verfügbar waren, mußte in Teilnetzen beobachtet werden, die über mehrfach besetzte Stationen miteinander verknüpft wurden. Auch wenn diese erste Kampagne wegen der eingeschränkten Bedingungen noch keine optimalen Ergebnisse brachte, so wurden mit ihr doch wertvolle Erfahrungen für die Folgekampagnen gesammelt. Während der vierten Kampagne 1994 stand bereits die vollständig ausgebaute Satellitenkonfiguration zur Verfügung, und mit den Trimble SSE (P) Empfängern konnten ausgereifte Geräte eingesetzt werden, die auch unter Aktivierung der Sicherungsmaßnahmen SA und AS optimale Ergebnisse gewährleisten. Weiterhin war es möglich, wegen der genügenden Zahl verfügbarer Geräte auf allen Stationen simultan zu beobachten, so daß ein Umsetzen während der Kampagne nicht mehr nötig wurde.

Die Auswertung der Beobachtungen erfolgte mit dem Programmpaket GEONAP (WÜBBENA, 1991), wobei nachträglich verfügbare präzise Bahnephemeriden und ein Standard-Troposphärenmodell benutzt wurden. Für die erste Kampagne konnten alle Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden; wegen der großen Stationsentfernungen muß jedoch auch mit einzelnen falsch festgesetzten Mehrdeutigkeiten gerechnet werden. In den folgenden drei Kampagnen wurde wegen der längeren verfügbaren Beobachtungszeit die Float-Lösung ohne Festsetzung der Mehrdeutigkeiten auf ganze Zahlen bevorzugt. Außerdem wurde der troposphärische Refraktionseinfluß durch einen Stationsparameter mit einer Korrelationslänge von 2 Stunden zusätzlich modelliert.

Die endgültigen 3D-Koordinaten ergaben sich aus einer kombinierten Ausgleichung aller Kampagnen (Projektlösung). Abb. 5 zeigt die Geometrie des GPS-Netzes und die zugehörigen Fehlermaße. Aus den Residuen der Gesamtlösung wurden relative Fehlerellipsen für die Stationsverbindungen und Standardabweichungen für die Höhen und die

ausgeglichenen Höhendifferenzen nach Helgoland gerechnet. Tab. 2 stellt die Ergebnisse sowohl für die einzelnen Kampagnen als auch für die gesamte Projektlösung zusammen. Aus der Abb. 5 wird deutlich, daß die Höhenübertragung zur Forschungsplattform Nordsee unsicherer ist als für die anderen Stationen, da sie nur während einer Kampagne besetzt werden konnte. Die Projektlösung liefert für die FPN eine Höhengenauigkeit von  $\pm 1,7$  cm.

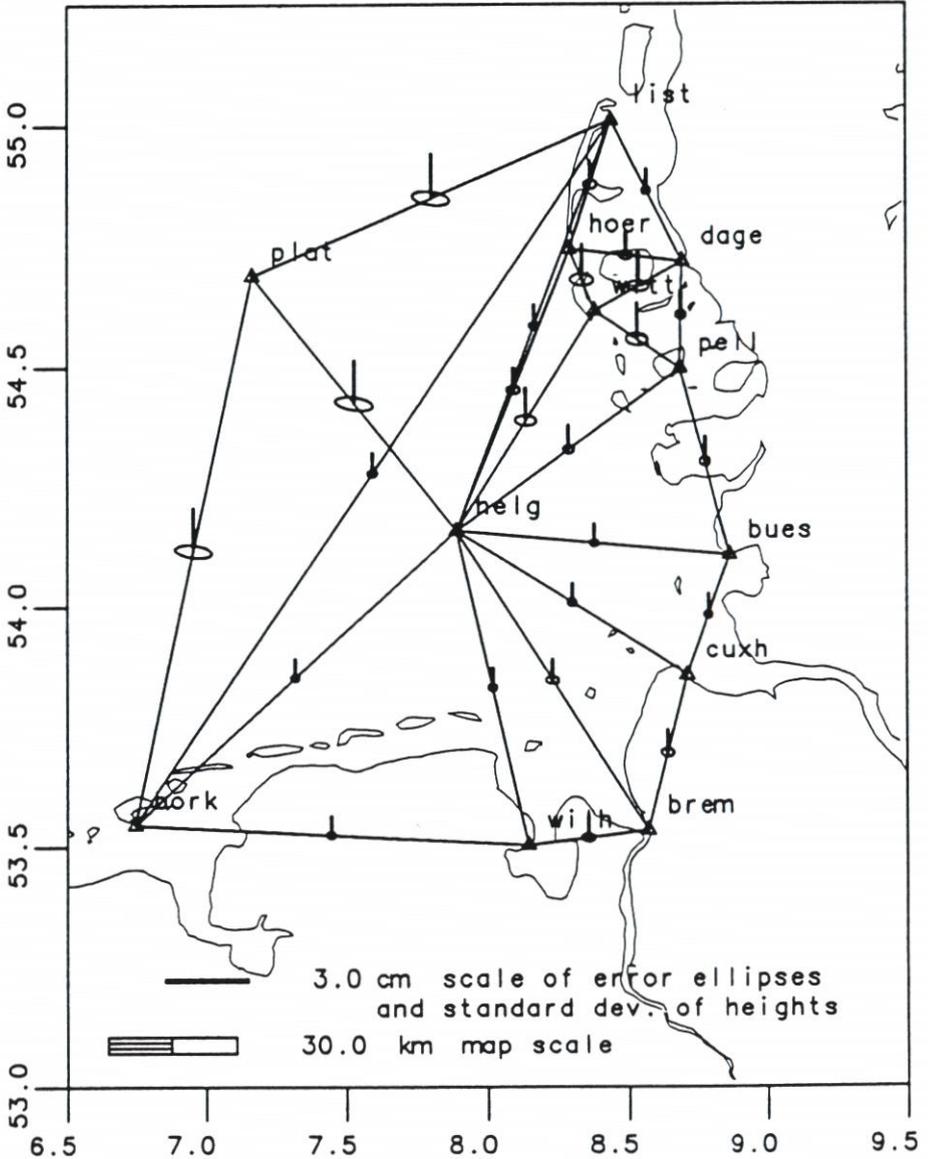


Abb 5: GPS-Netz und Fehlermaße der Projektlösung

Tab. 2: Genauigkeitsabschätzungen für die GPS-Höhenübertragung

Kampagne	Standardabweichung der Höhen aus Residuen der Sessions in cm	Standardabw. (Max.wert) der Höhendifferenzen nach Helgoland (ITRF 93) in cm
1 (1991)	± 4,2	± 2,0 (3,2)
2 (1992)	± 3,7	± 2,0 (3,1)
3 (1993)	± 1,0	± 1,0 (1,3)
4 (1994)	± 0,9	± 1,0 (1,0)
Projektlösung	± 2,9	± 0,8 (1,2)

Aus den Zahlen für die Genauigkeitsabschätzung wird deutlich, daß die Kampagnen 1993 und 1994 wesentlich genauere Ergebnisse als die früheren Messungen liefern. Dies ist, wie oben erläutert wurde, im wesentlichen auf neuere Empfängertypen und längere Beobachtungszeiten zurückzuführen, aber auch auf den vollständigen Ausbau des GPS-Raumsegments (vgl. Tab. 1). Die gesamte Projektlösung wird damit auch weitgehend von den letzten beiden Kampagnen bestimmt. Die endgültige ellipsoidische Höhe für die GPS-Station Helgoland ergibt sich mit einer Standardabweichung von  $\pm 0,8$  cm, so daß die Höhenübertragung eine Genauigkeit von besser als  $\pm 1$  cm ( $1\sigma$ ) aufweisen dürfte.

### 5.3 Geoidhöhen-Übertragung in der Deutschen Bucht

Die Übertragung der Geoidhöhen vom Festland nach Helgoland erfolgte mit der gravimetrischen Methode (TORGE, 1991). Hierzu ist eine globale Kenntnis der Schwereanomalien erforderlich, die je nach angestrebter Genauigkeit mit entsprechender Dichte vorliegen müssen. Für regionale Anwendungen geht man so vor, daß die langwelligen Anteile des Schwerefeldes aus einem globalen Kugelfunktionsmodell entnommen werden, und daß für die höherfrequenten Anteile im Arbeitsgebiet Schwereanomalien und Topographiedaten in größerer Dichte gesammelt werden. Am IfE wird im Rahmen des Arbeitsschwerpunktes „Schwerefeldmodellierung“ zu diesem Zwecke seit vielen Jahren eine umfassende Schwere-datenbank aufgebaut (DENKER, 1988).

Die angestrebte „cm“-Genauigkeit für die Höhenübertragung nach Helgoland setzt mittlere Schwerepunktabstände von einigen km und eine Anomalien-genauigkeit von wenigen  $10 \mu\text{m}/\text{s}^2$  ( $10 \mu\text{m}/\text{s}^2 = 1 \text{ mgal}$ ) voraus, wie globale und regionale Untersuchungen zum statistischen Verhalten des Schwerefeldes zeigen (TSCHERNING u. RAPP, 1974; DENKER, 1988). Die Unterschiede zwischen Geoid, Quasigeoid und N.N.-Fläche sind im Küstenbereich sehr gering (1cm) und können für die vorliegende Aufgabe vernachlässigt werden.

Die im KFKI-Vorhaben benötigte lokale Geoidbestimmung im Bereich der Deutschen Bucht wurde als Teil des gravimetrischen (Quasi)geoids für Europa angesehen (SEEBER u. TORGE, 1997), das am IfE Hannover (Rechenstelle der IAG-Geoidkommission) seit 1990 berechnet wird. Seitdem sind mehrere Geoidversionen vorgelegt worden (DENKER et al., 1995); die endgültige Fassung trägt den Namen EGG97 (European Gravimetric Geoid 1997). Diese Geoidberechnungen benutzen die in der IfE-Datenbank für Europa gesammelten gravimetrischen und topographischen Daten (z. Z. etwa 2,7 Mill. Schwereanomalien meist als Punktwerte und etwa 700 Mill. Höhenwerte), die auf einheitliche Bezugssysteme in Schwere, Höhe und Lage bezogen wurden. Strategie der Geoidmodellierung ist die „remove-restore-tech-

nique“. Hierbei wird ein hochauflösendes Kugelfunktionsmodell (langwellige Schwerefeldanteile) mit den terrestrischen Schwereanomalien (mittel- und kurzwellige Feldanteile) und dem aus dem digitalen Geländemodell abgeleiteten hochfrequenten Feldanteil optimal kombiniert (vgl. TORGE, 1994; DENKER, 1996). Die Feldtransformation (Schwereanomalien in Geoidhöhen) basiert auf einer Modifikation der Stokes'schen Integralformel (TORGE, 1991).

Vor Anlauf des Projektes lagen im Bereich der Deutschen Bucht nur seegravimetrische Profile mit einem Abstand von etwa 10 Seemeilen (sm) vor, und die logistisch schwierig zugänglichen Wattgebiete waren nicht vermessen. Eine ausführliche Datensichtung ergab, daß für einzelne lokale Bereiche hochauflösende Schweredaten vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg, übernommen werden konnten. Um die erforderliche Datenbasis zu schaffen, wurden 1992 im Rahmen des KFKI-Projektes in zwei Kampagnen (etwa 4 Wochen Meßzeit) systematisch seegravimetrische Messungen in der Deutschen Bucht und besonders um Helgoland durchgeführt. Zur Anwendung gelangten Askania-Gravimeter GSS3/GSS30. Die für die Eötvös-Korrektur erforderliche genaue Geschwindigkeitsbestimmung über Grund erfolgte mit eigens installierter DGPS-Navigation. Die gesamte Profillänge betrug 2800 sm, und es wurden 19 000 Schwerepunkte bestimmt. Die gemeinsame Bearbeitung der seegravimetrischen Profile reduzierte die mittlere Kreuzungspunktdifferenz von  $\pm 33 \mu\text{m/s}^2$  (vor der Ausgleichung) auf  $\pm 13 \mu\text{m/s}^2$  (nach der Ausgleichung). Das zentrale Gebiet um Helgoland ist jetzt mit Profilen im Abstand von 2 sm überdeckt, die Deutsche Bucht kann mit einem 5-sm-Gitter erfaßt werden.

Die Wattgebiete wurden 1992 und 1993 während insgesamt 11 Wochen Meßzeit von flachgehenden Booten ausgehend „zu Fuß“ während des Niedrigwassers vermessen. Zur Anwendung gelangten LaCoste-Romberg-Gravimeter. Als beste Meßzeit erwiesen sich jeweils zwei Stunden vor und nach der täglichen Niedrigwassertide. Je nach Gegebenheit konnten während einer Tideperiode zwischen zwei und fünf Punkte vermessen werden. Die Positionszuordnung erfolgte mit einfachen GPS-Handgeräten. Die Höhen wurden aus Seekarten abgegriffen und mit Hilfe der vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie herausgegebenen Karte des mittleren Springtidenhubs auf N.N. korrigiert. Die Genauigkeit der Höhenzuordnung wird mit 2 bis 3 dm abgeschätzt und entspricht damit der Genauigkeit der gravimetrischen Wattvermessung von etwa  $1 \mu\text{m/s}^2$ . Insgesamt wurden 164 Gravimeterpunkte im Watt bestimmt. Abb. 6 zeigt die Lage und Verteilung der gravimetrischen Daten der IfE-Datenbank im Bereich der Deutschen Bucht und ihrer Umgebung nach diesen Verdichtungsmessungen.

Für die Höhenübertragung wurden im Verlauf des Projektes und in der Zeit nach Abschluß des Vorhabens mehrere Geoidmodelle untersucht, von denen hier drei Lösungen vorgestellt werden sollen

- das globale Kugelfunktionsmodell OSU91A
- das gravimetrische Europa-Geoid EGG94.01
- das gravimetrische Europa-Geoid EGG97.

Das OSU91A Modell (RAPP et al., 1991) besitzt einen Entwicklungsgrad der Kugelfunktionen bis Grad und Ordnung 360 und eine entsprechende räumliche Auflösung von 50 km. Dieses Modell kann bestenfalls dm-Genauigkeit für die Höhenübertragung liefern und wird hier zu Vergleichszwecken aufgeführt.

Das EGG94.01 Europa-Geoid beruht auf dem OSU91A Modell und enthält zusätzlich Schweredaten aus der IfE-Datenbank mit Stand 1994. In diese Lösung sind die im Rahmen des KFKI-Projektes gewonnenen zusätzlichen Schweredaten im Bereich der Deutschen Bucht eingeflossen. Die im unveröffentlichten Abschlußbericht des Vorhabens und in

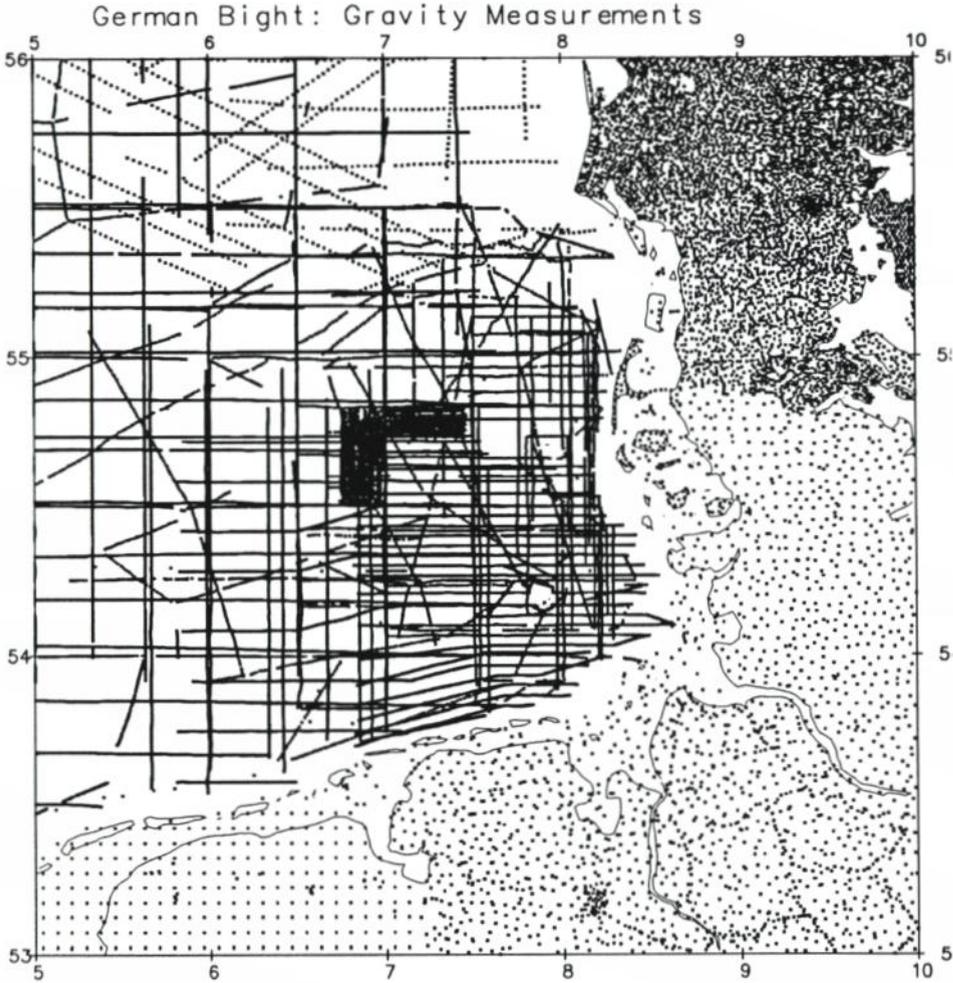


Abb. 6: Verteilung der Schweredaten im Bereich der Deutschen Bucht und Umgebung (IfE-Datenbank 1996; Seebereich: Profildaten, Landbereich: unterschiedlich dichte Punktdaten)

GOLDAN (1996) vorgestellten Ergebnisse der Höhenübertragung nach Helgoland beruhen auf dem Kenntnisstand von Ende 1994 und basieren auf diesem Geoidmodell.

Das EGG97 Europa-Geoid verwendet im langwelligen Teil das gegenüber dem OSU91A wesentlich homogenere globale Modell EGM96 der NASA und der US National Imagery and Mapping Agency (NIMA). Weltweit wird eine Genauigkeit von 0,5 m (See) bis 1 m (Land) abgeschätzt (RAPP u. NEREM, 1995). Der aus der IfE-Schweredatenbank in die Lösung eingebrachte Anteil unterscheidet sich von der EGG94.01 Lösung im wesentlichen durch höherauflösende inzwischen zugängliche Schwere- und Topographiedaten aus osteuropäischen Ländern. Außerdem wurde an dieser Lösung eine „zero order“ Korrektur von 50 cm angebracht, um den systematischen Unterschied zwischen den Bezugssystemen für GPS und für gravimetrische Daten abzufangen.

Die Geoidmodelle EGG94.01 und EGG97 liegen als Punktgeoidhöhen in einem  $1' \times 1.5'$ -Gitter (entsprechend etwa  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ ) vor. Der Vernachlässigungsfehler sollte damit  $< 1 \text{ cm}$  sein. In Gebieten mit guter Datenüberdeckung wird die Genauigkeit dieser Lösungen zu  $\pm 1 \dots 5 \text{ cm}$  über 10 bis einige 100 km abgeschätzt; Fehleranteile aus mittleren Wellenlängen von einigen 100 km können jedoch 10 cm und mehr erreichen (DENKER et al., 1995). Der Verlauf des Geoids EGG97 im Bereich der Deutschen Bucht und Umgebung ist in Abb. 7 mit Isolinien im 5-cm-Abstand dargestellt. Die Geoidhöhen für die im Projekt besetzten Pegelstationen sind in Tab. 8 nachgewiesen. Das EGG97 Modell wird voraussichtlich für die nächsten Jahre in Europa als Standard-Geoidmodell verwendet werden.

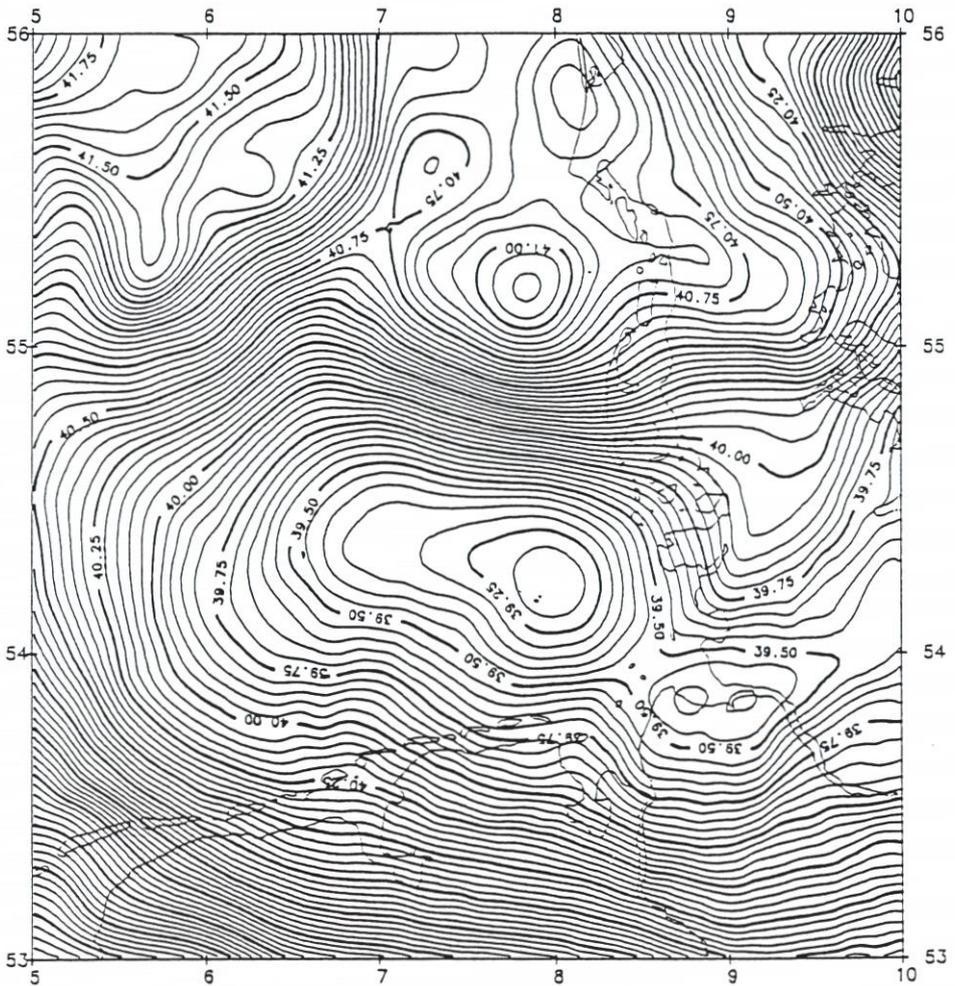


Abb. 7: Geoidverlauf (0,05 m Isolinien) im Bereich der Deutschen Bucht und Umgebung (Teil der Europa-Geoidlösung EGG97, Referenz GRS80)

## 5.4 Bestimmung der N.N.-Höhe für Helgoland

Mit den Ergebnissen der GPS-Lösung (5.2) und der Geoidberechnung (5.3) kann die eigentliche Übertragung der N.N.-Höhe von den 10 Pegelstationen nach Helgoland vorgenommen werden. Dabei wurden zwei Ansätze untersucht

$$H = h - (N + dN)$$

bzw.

$$H = h - (N + dN + \epsilon_{NS} \Delta\phi + \epsilon_{OW} \Delta\lambda \cos \phi)$$

Hierin bedeuten H die N.N.-Höhe, h die GPS-Höhe und N die Geoidhöhe. Wegen der o. g. Systemunterschiede zwischen GPS und dem gravimetrischen Geoid muß eine konstante Verschiebung dN (bias) zugelassen werden. Die in den Geoidmodellen gefundenen mittelwelligen Fehleranteile lassen sich durch eine Neigung mit NS- und OW-Komponenten  $\epsilon_{NS}$ ,  $\epsilon_{OW}$  abfangen. Auf diese Weise werden die Geoidmodelle lokal an die N.N.-Höhen der Festlandspunkte angepaßt, was genau der Zielsetzung des Projektes entspricht. Tab. 3 enthält die Ergebnisse der entsprechenden Ausgleichungen.

Tab. 3: Bias, Neigung und r.m.s. (maximale) Restklaffungen bei der Anpassung verschiedener Geoidmodelle an das GPS/Nivellementssystem (10 Festlandspegel)

Geoid-Modell	bias (cm)	Neigung (")		r.m.s. (max.) Restklaffungen	
		NS	EW	bias (cm)	bias + Neig. (cm)
OSU 91 A	- 36,3	+ 0,09	+ 0,12	± 8,0 (19,4)	± 6,9 (18,0)
EGG 94.01	- 47,5	0,00	+ 0,17	± 3,4 (9,3)	± 1,3 (2,0)
EGG 97	- 1,0	+ 0,05	+ 0,08	± 2,8 (6,3)	± 1,4 (2,1)

Es zeigt sich, daß die OSU91A-Übertragung überraschend genau ist, was auf das relativ glatte Schwerfeld im Arbeitsgebiet und die ausreichende Datenüberdeckung zurückzuführen ist. Eine Anpassung des Geoids durch das Einführen von Neigungsparametern kann die Lösung jedoch kaum verbessern. Beim Übergang zu den hochauflösenden Modellen EGG94 und EGG97 wird die Anpassung an die Festlandshöhenpunkte durch die Neigungskorrektur jedoch in den angestrebten „cm“-Bereich hinein verbessert. Ähnliche Neigungen im Geoid wurden auch bei unabhängigen Vergleichen in Norddeutschland gefunden (GROTE, 1996). Es dürfte deshalb realistisch sein, von verbleibenden mittelwelligen Geoidfehlern auszugehen, die durch die Neigungskorrektur abgefangen werden können. Deutlich wird auch die Beseitigung des Bias im Systemunterschied durch den geänderten globalen Anteil im EGG 97.

Die Restunsicherheiten nach der Anpassung von 1 bis 2 cm lassen sich mit der Genauigkeit der N.N.-Höhen aus dem Nivellement, dem GPS-Übertragungsfehler und den kurzwelligen Geoidfehleranteilen erklären. Sie entsprechen voll und ganz dem Genauigkeitsniveau der jeweiligen Methoden und stellen damit auch eine gewisse gegenseitige Kontrolle dar.

Als Ergebnis der verschiedenen Ausgleichungen zur Anpassung des Geoids an die Festlandspegel liegen die in Tab. 4 zusammengestellten Höhen im H.N. und im GPS-System so-

wie die Geoidhöhen verschiedener Modelle für den Bezugspunkt RF 88 vor. Dieser Punkt wurde 1990 als Rohrfestpunkt für die GPS-Höhenübertragung eingerichtet und im Rahmen des Projektes besetzt.

Tab. 4: Höhenwerte für den Helgoland-Anschlußpunkt RF 88

Höhenart	Höhenwert (m)		
H (H.N.)	4,190		
h (GPS)	43,644		
	roher Wert	bias-korr.	bias+Neig,-korr.
N (OSU 91A)	39,645	39,282	39,262
N (EGG 94.01)	39,686	39,211	39,185
N (EGG 97)	39,197	39,187	39,174

Die Differenz zwischen Helgoländer-Null H.N. und dem N.N.-System an der deutschen Nordseeküste ergibt sich aus

$$\text{H.N.} - \text{N.N.} = h - H(\text{H.N.}) - N.$$

Die entsprechenden Werte für die drei Anpassungen sind in Tab. 5 zusammengestellt.

Tab. 5: Unterschied zwischen dem N.N.-System des Festlands und dem Helgoländer H.N.-System

Geoid-Modell	H.N. - N.N. (cm)	
	bias-korr.	bias + Neig,-korr.
OSU 91 A	+ 17.2	+ 19.2
EGG 94.01	+ 24.3	+ 26.9 *)
EGG 97	+ 26.7	+ 28.0

\*) Dieser Wert wird in GOLDAN (1996) als Projektergebnis mitgeteilt.

Die Genauigkeit der gravimetrischen Höhenübertragung vom Festland nach Helgoland verbessert sich bei Verwendung eines regionalen Geoidmodells gegenüber einem globalen Modell um rund eine Größenordnung. Man kann davon ausgehen, daß zukünftige veränderte globale Modelle und zusätzliche regionale Daten, ebenso wie eine andere Auswahl der Stützpunkte an der Küste das Ergebnis nur noch um etwa 1 cm verändern werden. Das EGG-97-Resultat

$$\text{H.N.} - \text{N.N.} = 28,0 \text{ cm}$$

stellt damit einen gewissen Abschluß der Untersuchungen dar und dürfte für einen längeren Zeitraum Bestand haben. Es stimmt mit den ozeanographischen Übertragungen auf etwa 2 cm überein, was eine gewisse unabhängige Kontrolle darstellt (GOLDAN, 1996, S. 36 f.).

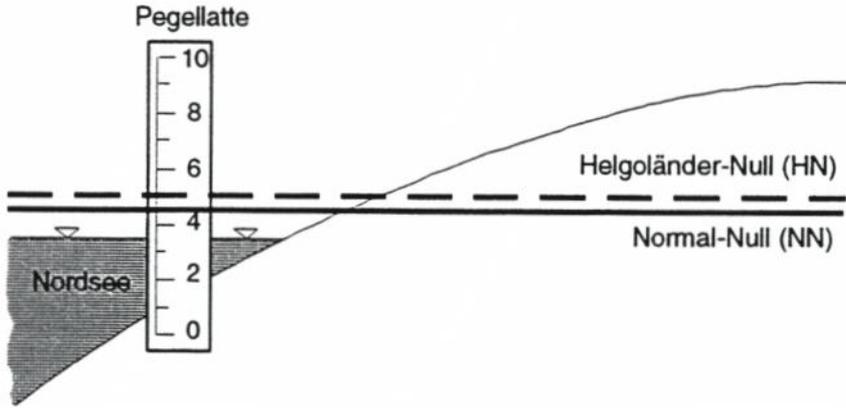


Abb. 8: Höhenbezugsflächen in Helgoland

Der Zusammenhang zwischen Normal-Null, Helgoländer-Null und Pegelnullpunkt ist in Abb. 8 als Prinzipskizze dargestellt. H.N. liegt nach den Ergebnissen dieses Projektes um etwa 28 cm über N.N. Dies bedeutet, daß die im bisherigen Höhennachweis von Helgoland vorliegenden Zahlenwerte um 28 cm vergrößert werden müssen, um auf N.N. bezogen zu werden. Der Pegelnullpunkt liegt, wenn der Zahlenwert von 28 cm als Systemdifferenz angehalten wird, gegenüber N.N. bei  $-473$  cm.

Tab. 6: Ausgleichsergebnisse der Geoidanpassung mit Bias und Neigung

Ausgleichsergebnisse:

EGG 97

$s_0 = 1,7 \text{ cm}$

$\Delta N = -1,0 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$

$\epsilon_{NS} = +0,053'' \pm 0,020''$

$\epsilon_{OW} = +0,078'' \pm 0,032''$

Station	Niv. Höhe [m]	gerechnetes $H_{NN}$ [m]	Differenz 2-3 [cm]
1	2	3	4
Borkum	4,502	4,498	+ 0,4
Wilhelmshaven	6,359	6,365	- 0,6
Bremerhaven	4,084	4,082	+ 0,2
Cuxhaven	3,088	3,072	+ 1,6
Büsum	4,696	4,712	- 1,6
Pellworm	3,493	3,474	+ 1,9
Dagebüll	7,662	7,663	- 0,1
Wittdün	2,998	3,019	- 2,1
Hörnum	4,419	4,434	- 1,5
List	4,063	4,044	+ 1,9
Plattform Helgoland	4,190	32,659 4,470	- 28,0

Durch die hochgenaue GPS-Netzlösung und die Anpassung der Geoidlösung an das Pegelnetz können die aus GPS und Geoidundulationen gerechneten Höhen  $H_{N,N}$  an den Pegelstationen den Nivellementshöhen gegenübergestellt werden und liefern damit auch eine Höhenkontrolle der 10 Pegelstationen an der Küste. Tab. 6 macht deutlich, daß die Abweichungen einen Betrag von 2,0 cm nicht übersteigen. In diesen Differenzen sind Einflüsse des Nivellements, der Geoidanpassung und der GPS-Lösung enthalten. Die Diskrepanzen sind bemerkenswert klein und bestätigen damit im Rahmen der Meßgenauigkeit die Höhenangaben für die in das Projekt einbezogenen Festlandspegel.

Im Zuge der zweiten Meßkampagne 1992 war auch die Forschungsplattform Nordsee (FPN) besetzt worden. Die ausgeglichene NN-Höhe für die dortige GPS-Station Plat ist in Tab. 7 mit 32,66 m angegeben. Während der Meßkampagne ist es auch gelungen, die Höhendifferenz zwischen dem GPS-Punkt und dem Gründungskörper sowie zwischen dem GPS-Punkt und dem Nullpunkt des an der FPN installierten Blasenpegels zu ermitteln. Die angegebenen Genauigkeitswerte beruhen auf einer Abschätzung der für die Anschlußmessungen verwendeten Verfahren. Nähere Einzelheiten sind in dem Forschungsbericht SEEBER et al. (1997) nachgewiesen. Die Ergebnisse sind in Tab. 7 zusammengestellt.

Tab. 7: Höhenanschluß der Forschungsplattform Nordsee

Punkt der FPN	Höhe NN [m]	Genauigkeit [m]
GPS-Punkt	32,66	0,03
OK Gründungskörper	- 27,03	0,10
Blasenpegel FPN	- 5,08	0,12

Abschließend werden für alle Pegelstationen die Geoid-Punkthöhen des EGG97 mit und ohne Anpassung an die Festlandspegel mitgeteilt. Die rohen Werte in der vorletzten Spalte der Tab. 8 entsprechen den Angaben, die von den Autoren der Geoidberechnung (DENKER u. TORGE, 1997) veröffentlicht sind, und die in Zukunft bei amtlichen Arbeiten der Landesvermessungen in Europa Verwendung finden werden.

Tab. 8: Punkthöhen des Europageoid EGG97 an den Pegelstationen

Station	Länge	Breite	Geoidhöhe roher Wert [m]	Geoidhöhe +bias+Neig. [m]
Borkum	53,557633	6,746830	40,303	40,234
Wilhelmshaven	53,514731	8,144064	40,000	39,965
Bremerhaven	53,545426	8,568640	39,732	39,708
Cuxhaven	53,871903	8,709657	39,418	39,407
Büsum	54,123091	8,866011	39,668	39,668
Pellworm	54,510708	8,685537	39,759	39,765
Dagebüll	54,729858	8,694331	40,066	40,079
Wittdün	54,629279	8,380904	39,858	39,860
Hörnum	54,755290	8,293468	40,181	40,185
List	55,017527	8,438821	40,648	40,662
Plattform	54,700924	7,167941	39,694	39,669
Helgoland	54,174832	7,891762	39,197	39,174

Die letzte Spalte enthält diejenigen Geoidhöhen, die bei einer Anpassung mit Verschiebung und Neigung an die Festlandspegel entstanden sind und mit den speziellen Ergebnissen des KFKI-Projektes übereinstimmen. Mit Kenntnis dieser Werte kann an den Pegelstationen unmittelbar ein Bezug zwischen dem mittleren Meeresspiegel und dem Geoid hergestellt werden.

## 6. Schluß

Durch das in den letzten Jahren zu einem leistungsfähigen Verfahren der präzisen dreidimensionalen Positionsbestimmung entwickelte Satellitennavigationssystem GPS und durch die bemerkenswerten Fortschritte in der Geoidberechnung ist es möglich geworden, entfernt liegende Stationen auf der Erdoberfläche mit hoher Genauigkeit höhenmäßig miteinander zu verbinden. Insbesondere eröffnet sich damit die Möglichkeit, GPS zur Höhenübertragung im Meeresbereich einzusetzen.

Die höhenmäßige Verbindung zwischen Meerespegeln und deren zeitliche Kontrolle sind früh als geodätisches Problem erkannt worden, da nur so die Pegelregistrierungen für ozeanographische Zwecke vollständig ausgewertet werden können. Das hier beschriebene Projekt zeigt exemplarisch am Beispiel des Helgoländer Pegels, daß die heute geforderte „cm“-Genauigkeit bei der Höhenfestlegung von Meerespegeln bei Stationsabständen von einigen zehn bis einigen hundert Kilometern (Deutsche Bucht) erzielt werden kann. Dies entspricht auch der Genauigkeit der nivellistischen Höhenkontrolle im Festlandsbereich.

Auf der Seite der GPS-Messungen war es dazu erforderlich, mehrere Kampagnen in einer netzförmigen Anordnung durchzuführen, wobei unterschiedliche Beobachtungsbedingungen angestrebt wurden. Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist dabei die Simultanbesetzung möglichst aller Stationen. Die GPS-Projektlösung bietet mit der hohen inneren Genauigkeit eine gute Grundlage, um bei späteren Wiederholungsmessungen Aussagen über eventuelle Höhenveränderungen der einbezogenen Pegelstandpunkte zu treffen. Wegen des inzwischen voll ausgebauten Satellitensystems wird es nicht mehr erforderlich sein, für spätere Epochenlösungen mehrere Meßkampagnen durchzuführen. Durch die Anbindung des GPS-Netzes an das globale ITRF-Bezugssystem ist es darüber hinaus möglich, das hier untersuchte Gebiet in globale Betrachtungen zum Meeresspiegelverhalten einzubeziehen.

Auf der Seite der Geoidbestimmung mit der gravimetrischen Methode war es notwendig, das Datenmaterial im Bereich der Deutschen Bucht zunächst zu verdichten, um die erforderliche hohe Detailauflösung zu erhalten. Flächenhaft verteilte Schwereanomalien mit Punktabständen von einigen km liefern bei Einbindung in eine global abgestützte regionale Geoidbestimmung (hier gravimetrisches Europegeoid) allerdings nur Relativgenauigkeiten von einigen cm in dem hier betrachteten Entfernungsbereich. Ursache sind lang- und mittelwellige Fehler der globalen und regionalen Schwerefeld Datensätze. Diese werden bei einer Anpassung an GPS/Nivellementsstützpunkte (hier in unmittelbarer Nähe der Festlandspegel gewählt) weitgehend beseitigt. Im vorliegenden Beispiel reichen hierzu eine Verschiebung und eine Neigung des Geoids aus. Die Restklaffungen an den Stützpunkten reduzieren sich dann auf  $\pm 1$  cm. Hierin sind auch die Fehler der GPS- und der Nivellementshöhen enthalten.

Durch die im Vorhaben durchgeführte Datensammlung und die systematische Anlage von Verdichtungsmessungen liegt jetzt eine zufriedenstellende Überdeckung mit Schwereanomalien in der Deutschen Bucht vor. Mit Hilfe des hochauflösenden Europegeoids EGG97 sollte es jetzt möglich sein, GPS-gestützte Höhenübertragungen im Bereich der deutschen Nordseeküste auch operationell vorzunehmen.

Mit der hier demonstrierten „cm“-Genauigkeit ist eine gewisse Grenze erreicht worden, die durch die Fehlerbudgets der beteiligten Datensätze bestimmt wird. Hierzu rechnen insbesondere die ermittelten Geoidhöhen, aber wohl auch die Nivellementsergebnisse und durch Grundwasserschwankungen bedingte Höhenänderungen der als „Festpunkte“ eingeführten Pegelfestlegungen. Mit dem vorgestellten Ergebnis dürfte jedoch eine solide Basis für Untersuchungen zum regionalen Verhalten des mittleren Meeresspiegels und zu seinen zeitlichen Änderungen gegeben sein.

Dank: Die Höhenübertragung nach Helgoland wurde im Rahmen des vom Bundesminister für Forschung und Technologie geförderten Forschungsvorhabens BMFT-MTK 0525-2 durchgeführt (Projektbearbeiter Dr.-Ing. H.-J. Goldan). Die Geoidberechnungen für den Bereich der Deutschen Bucht sind Teil der am Institut für Erdmessung (IfE) der Universität Hannover laufenden Arbeiten zur Bestimmung eines gravimetrischen Geoids für Europa (Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft in den Normalverfahren To 46/38-1 und To 46/43-1,2, Projektbearbeiter Dr.-Ing. H. Denker, Dipl.-Ing. D. Behrend).

Das Vorhaben wurde durch eine Projektgruppe des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begleitet, in der folgende Stellen vertreten waren:

- 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.

Bei der Durchführung des BMFT-Projekts wurde mit folgenden Stellen zusammengearbeitet:

- 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.

Mitarbeiter des IfE und Studierende haben in den Meßeinsätzen des Projektes die benötigten Daten gewonnen.

Allen beteiligten Institutionen und Personen wird für die Zusammenarbeit, Mitwirkung und Unterstützung gedankt.

## 7. Schriftenverzeichnis

- DENKER, H.: Hochauflösende regionale Schwerefeldbestimmung mit gravimetrischen und topographischen Daten. Wiss. Arb. Fachr. Verm.wesen, Univ. Hannover, Nr. 156, 1988.
- DENKER, H., BEHREND, D. u. TORGE, W.: The European Gravimetric Quasigeoid EGG 96. Bur. Grav. Int., Bull. d'Inf. No. 77/IGeS Bull. No. 4, Spec. Issue „New Geoids in the World“, 3-11, Toulouse/Milano, 1995.

- DENKER, H.: Stand und Aussichten der Geoidmodellierung in Europa. *Z.f. Verm.wesen* 121, 264–277, 1996.
- DENKER, H. u. TORGE, W.: The European Gravimetric Quasigeoid EGG97. Proc. IAG Symposium Rio de Janeiro, in Vorbereitung, 1997.
- GOLDAN, H.-J.: Beiträge zur GPS-gestützten Höhenbestimmung im Küstenbereich. *Wiss. Arb. Fachr. Verm.wesen, Univ. Hannover*, Nr. 215, 1996.
- GOLDAN, H.-J., SEEBER, G., DENKER, H. u. BEHREND, D.: Precise Height Determination of the Tide Gauge Helgoland. In: M. Kumar, G.A. Maul, G. Seeber (eds.), *Proceed. Internat. Symp. on Marine Positioning INSMAP 1994*, 556–565, Marine Geodesy Committee/MTS, Mont. Village, MD, USA, 1994.
- GROTE, T.: Regionale Quasigeoidmodellierung aus heterogenen Daten mit „cm“-Genauigkeit. *Wiss. Arb. Fachr. Verm.wesen, Univ. Hannover*, Nr. 212, 1996.
- HELMERT, F. R. (Herausg.): Zenitdistanzen zur Bestimmung der Höhenlage der Nordsee-Inseln Helgoland, Neuwerk und Wangerooge sowie des Leuchtturms auf Roter Sand über den Festlandspunkten Cuxhaven und Schillig. *Veröff. Königl. Preuss. Geod. Inst., Berlin*, 1895.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des mittleren Tidemittelwassers in der südöstlichen Nordsee. *Z. f. Verm.wesen* 116, 149–155, 1991.
- LOHRBERG, W.: Die Lage der Nivellementsunkte auf Helgoland zu Normal-Null. *Z.f. Verm.wesen* 91, 184–193, 1966.
- RAPP, R. H. u. NEREM, R. S.: A joint GSFC/DMA project for improving the model of the Earth's gravity field. *Proceed. Joint Symp. Int. Gravity Comm. and Int. Geoid Comm., Graz*, 1994. *IAG Symp. No. 113*, 413–420, Springer, 1995.
- RAPP, R. H., WANG, Y. M. u. PAVLIS, N. K.: The Ohio State 1991 geopotential and sea surface topography models. *OSU rep. no. 410*, Columbus, Ohio, 1991.
- SEEBER, G.: Use of GPS for the determination of precise height differences – models and results. *Proc. Symp. Definition of the geoid, Florence 1986*, *Boll. Geod. Scienc. Aff.* 16, 325–332, 1987.
- SEEBER, G.: *Satellite Geodesy – Foundations, Methods, and Applications*. Verlag W. de Gruyter, Berlin/New York, 1993.
- SEEBER, G.: Grundprinzipien zur Vermessung mit GPS. *Der Vermessungsingenieur*, 47, 53–64, 1996.
- SEEBER, G., SCHMITZ, M. u. GOLDAN, H.-J.: Precise GPS-Based Positioning at Sea. In: M. Kumar, G.A. Maul, G. Seeber (eds.), *Proceed. Internat. Symp. on Marine Positioning INSMAP 1994*, 11–24, Marine Geodesy Committee/MTS, Mont. Village, MD, USA, 1994.
- SEEBER, G. u. TORGE, W.: Eine GPS/Geoid-Höhenübertragung zum Meerespegel in Helgoland. *Z. f. Verm.wesen*, 122, im Druck, 1997.
- SEEBER, G., TORGE, W., GOLDAN, H.-J., DENKER, H. u. BEHREND, D.: Zentimeter-Höhenanschluß des Helgoländer Pegels mit GPS und Gravimetrie. *Wiss. Arb. Fachr. Verm.wesen, Univ. Hannover*, in Vorbereitung, 1997.
- TORGE, W.: *Geodesy*, 2. Auflage, Verlag W. de Gruyter, Berlin/New York, 1991.
- TORGE, W.: Development, State of the Art and Problems at Large-Scale Geoid Determinations. *Internat. Geoid Service Bull. No. 3*, 47–66, Milano, 1994.
- TORGE, W.: The involvement of IAG in Marine Geodesy. In: M. Kumar, G.A. Maul, G. Seeber (eds.), *Proceed. Int. Symp. on Marine Positioning INSMAP 1994*, 1–10, Marine Geodesy Committee/MTS, Mont. Village, MD, USA, 1994b.
- TORGE, W., BEHREND, D. u. DENKER, H.: Das Geoid im deutschen Nord- und Ostseebereich. In: *Hydrographische Vermessungen – Heute –. Schriftenreihe Deutscher Verein für Vermessungswesen* 14, 10–15, K. Wittwer, Stuttgart, 1995.
- TSCHERNING, C. C. u. RAPP, R. H.: Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations, and deflections of the vertical implied by anomaly degree variance models. *OSU Rep. no. 208*, Columbus, Ohio, 1974.
- WÜBBELMANN, H.: Die Wiederholungsmessungen im Deutschen Haupthöhennetz. *Nachr. Nieders. Verm. u. Kat.verw.* 43, 155–163, 1993.
- WÜBBENA, G.: Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. *Wiss. Arb. Fachr. Verm.wesen, Univ. Hannover*, Nr. 168, 1991.