



# **A B S C H L U S S B E R I C H T**

Entwicklung eines operationellen automatisierten Höhenüberwachungssystems für Pegel im  
Bereich der Deutschen Bucht (PEGASUS - Deutsche Bucht)

Zuwendungsempfänger:	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Förderkennzeichen:	03KIS077
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2008–31.03.2009
Berichtszeitraum:	01.10.2008–31.03.2009



## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung .....	11
2	Umfang der durchgeführten Arbeiten.....	20
2.1	Einbindung von Stationen der BfG und anderer Einrichtungen .....	20
2.1.1	Konfiguration und Aufbau von Stationen der BfG .....	20
2.1.2	Einbindung von GNSS-Stationen anderer Einrichtungen.....	36
2.2	Auswertung der gesammelten Beobachtungsdaten.....	39
2.2.1	Einbindung von Beobachtungsdaten und Produkten anderer Einrichtungen...	39
2.2.2	Aufbereitung der Beobachtungsdaten .....	42
2.2.3	Prozessierung der GNSS-Daten .....	44
2.2.4	Überführung in das amtliche Höhensystem .....	48
2.2.5	Publizierung der Ergebnisse im Internet .....	55
	Zusammenfassung.....	58



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Verteilung der GNSS-Stationen des IGS ( <a href="http://igsb.jpl.nasa.gov/">http://igsb.jpl.nasa.gov/</a> ).....	14
Abb. 1-2: Verteilung der GNSS-Stationen des EPN in Europa ( <a href="http://www.epncb.oma.be/">http://www.epncb.oma.be/</a> ). 15	15
Abb. 1-3: Verteilung der GNSS-Stationen des GREF in Deutschland (BKG, 2009).....	16
Abb. 1-4: Kombinationslösung aus GNSS- und Nivellementsdaten aus dem IKÜS-Projekt..	18
Abb. 2-1: GNSS-Antenne vom Typ Leica AT504GG (links) und PROCOM GXL900-3 GSM-Marineantenne (rechts).....	21
Abb. 2-2: Leica GRX1200+ GNSS Receiver mit Controller (links) und Leica AT504GG Antenne mit Bämpfer Dreifuß (rechts) .....	21
Abb. 2-3: Mobilfunkbasierter Kommunikationsweg zwischen dem Intranet der BfG und den GNSS-Stationen vor Ort.....	23
Abb. 2-4: Web-Interface eines Leica GRX1200+ GNSS Receivers (Steuerung der getrackten Signale).....	24
Abb. 2-5: Web-Interface eines Leica GRX1200+ GNSS - Receivers (Message Logfile).....	24
Abb. 2-6: Halterung für Messstäbe (links) und Messstäbe am Pegel Dagebüll.....	26
Abb. 2-7: Spitzen der Messstäbe (links) und Nutzung der Planplatte beim Anzielen (rechts)	26
Abb. 2-8: Definition der Instrumentenhöhe der BfG-Stationen.....	26
Abb. 2-9: Standorte der BfG-Stationen.....	27
Abb. 2-10: Unterfeuer Dwarsgat.....	28
Abb. 2-11: Konsole für die Aufnahme einer GNSS-Antenne.....	29
Abb. 2-12: Leica AT504GG mit Radom der Station FLDW.....	29
Abb. 2-13: Leica GRX1200+ GNSS (1), GFU24 (2), Netzteil (3) und Zeitschaltuhr mit Schaltschrank der Station FLDW.....	29
Abb. 2-14: Pegel Knock.....	30
Abb. 2-15: Leica AT504GG mit Radom auf dem Pegel Knock.....	30
Abb. 2-16: Leuchtturm Alte Weser am 04.11.2008 (links 10:00 Uhr, rechts 15:30 Uhr) .....	31
Abb. 2-17: Leica AT504GG mit Radom am Leuchtturm Alte Weser.....	32
Abb. 2-18: Schaltschrank mit Leica GRX1200+ GNSS (1), GFU24 (2), Netzteil (3), Timer (4), Hermes Microcom Datenfunkgerät (5), Stromversorgung Datenfunkgerät (6) .....	32
Abb. 2-19: Yagi-Antennen der Richtfunkstrecke LHAW(links) - Cuxhaven (rechts) .....	32
Abb. 2-20: Lage des Pegels Cuxhaven Steubenhöft.....	33
Abb. 2-21: Leica AT504GG mit Radom am Pegel Cuxhaven Steubenhöft .....	33
Abb. 2-22: Leica GRX1200 +GNSS Receiver mit GFU24 und GSM-Antenne.....	34

---

Abb. 2-23: Signalmast mit installierter Antenne und Schaltschrank im Pegelschacht der Station Büsum .....	35
Abb. 2-24: Lage der GNSS-Station Büsum an der Schleuse Büsum.....	35
Abb. 2-25: Pegelhaus mit GNSS-Station des Pegels Dagebüll (links) und Schaltschrank im Pegelhaus (rechts) .....	36
Abb. 2-26: Standorte von GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht .....	37
Abb. 2-27: Forschungsplattform FINO-1 (BSH) .....	37
Abb. 2-28: Radarpegel (links) und GNSS-Station (rechts) auf der FINO-1 .....	38
Abb. 2-29: Bestimmung der Höhendifferenz zwischen dem Nullpunkt des Radarpegels und der GNSS-Antenne.....	38
Abb. 2-30: GREF-Station Borkum (Quelle: BKG).....	39
Abb. 2-31: GREF-Station Helgoland (Quelle BKG) .....	39
Abb. 2-32: GREF-Station Hörnum 2 (Quelle: BKG) .....	39
Abb. 2-33: Zwischen September 2008 und März 2009 frei verfügbare GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht.....	40
Abb. 2-34: IGS-, ITRFG- und EPN-Stationen im Bereich der Nordsee.....	41
Abb. 2-35: Anzahl der Beobachtungen auf den BKG- und BfG-Stationen.....	43
Abb. 2-36: Anzahl von Beobachtungen der Reference frame sites des IGS im Untersuchungsgebiet .....	43
Abb. 2-37: MP-1 Werte der BKG- und BfG-Stationen .....	44
Abb. 2-38: MP-2 Werte der BKG und BfG-Stationen.....	44
Abb. 2-39: Verhältnis zwischen Beobachtungen und Phasensprüngen .....	44
Abb. 2-40: Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station Wettzell.....	47
Abb. 2-41: Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station Potsdam.....	47
Abb. 2-42: Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station Westerbork.....	48
Abb. 2-43: Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station FINO-1.....	48
Abb. 2-44: Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station Unterfeuer Dwarsgat.....	48
Abb. 2-45: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Borkum (BORJ, Quelle: BKG) .....	49
Abb. 2-46: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Helgoland (HELG, Quelle: BKG) .....	49
Abb. 2-47: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Hörnum (HOE2, Quelle: BKG).....	49

Abb. 2-48: Zeitreihe der Koordiantenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Hohenbünsdorf (HOBU, Quelle: BKG).....	50
Abb. 2-49: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Pegelstation FINO-1 (0702) .....	50
Abb. 2-50: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Pegelstation Knock (TGKN) .....	50
Abb. 2-51: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Unterfeuer Dwarsgat (FLDW).....	50
Abb. 2-52: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Leuchtturm Alte Weser (LHAW) .....	51
Abb. 2-53: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Cuxhaven-Steubenhöft (TGCU) .....	51
Abb. 2-54: Differenzen der ellipsoidischen Höhen gegenüber der Epoche 01.2009.....	51
Abb. 2-55: German Combined (Quasi)Geoid 2005 - Ausführung 2008.....	52
Abb. 2-56: Differenzen zwischen dem EGG97 und dem GCG05 (Ausführung 2008) .....	53
Abb. 2-57: FTP-Bereich mit den Beobachtungsdaten und Ergebnissen .....	55
Abb. 2-58: Ausschnitt aus dem SiteLog-File der GNSS-Pegelstation Borkum-Fischerbalje..	56



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bezeichnungskürzel und DOMES-Nr. der BfG-Stationen .....	27
Tabelle 2-2: Datenquellen für GNSS-Beobachtungsdaten und GNSS-Produkte.....	41
Tabelle 2-3: Referece frame sites des IGS05 im Bereich Europa.....	41
Tabelle 2-4: Ellip. Höhen, Höhenanomalien des GCG05 und resultierende Höhenangaben für die GNSS-Pegelstationen (ARP).....	53
Tabelle 2-5: Abweichungen der ETRS89/GCG05 Lösung zur amtlichen Höhe .....	55



# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Ausgangssituation

Für die Erledigung einer Vielzahl von Aufgaben im Küsteningenieurbereich sind korrekte Wasserstände eine zwingende Voraussetzung. Tektonische und anthropogene Einflüsse (z.B. Gasentnahmen) bewirken eine vertikale Bewegung der Erdoberfläche (rezente Krustenbewegungen), wodurch auch die auf der Erdoberfläche installierten Wasserstandssensoren (Pegel) diese Bewegung mit ausführen. Häufig überlagern sich reale Wasserstandsänderungen und rezente Krustenbewegungen, die in Teilbereichen der Nordseeküste eine Größenordnung bis zu einigen mm/Jahr annehmen können. Unerkannte bzw. nicht berücksichtigte Vertikalbewegungen der Pegel führen zu scheinbaren Wasserstandsänderungen und kausal hydrologisch bedingte Wasserstandsänderungen können nicht nachgewiesen werden (Weiß, R., Sudau, A., 2008). Die Pegelvorschrift (PV) trägt diesem Sachverhalt mit der Forderung regelmäßiger Kontrollen der Höhenlage der Pegel sowie regelmäßiger Anschlussnivellements der Pegel an die übergeordneten Nivellementsnetze der Landesvermessung Rechnung.

In der Vergangenheit wurden für die Anschlüsse an amtliche Höhensysteme hydrostatische und / oder geometrische Nivellements durchgeführt. Da die hydrostatische Messausrüstung des niederländischen Rijkswaterstaates nicht mehr zur Verfügung steht, bleibt im Küstenvorfeld als einzige Möglichkeit eine satellitengestützte Höhenüberwachung der Pegel mit dem Global Navigation Satellite System (GNSS), wobei zurzeit nur das Global Positioning System (GPS) und dessen russisches Pendant GLONASS zur Verfügung stehen. Untersuchungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, u. a. im Rahmen des KFKI-Projektes „Entwickeln einer Methodik zur universellen Höhenüberwachung von Küstenpegeln (NN-SAT)“ Augath, W., Broßmann, M., Sudau A., 2003) und anderer wissenschaftlicher und administrativer Einrichtungen haben gezeigt, dass eine präzise Höhenüberwachung der Pegel und somit zuverlässige Aussagen über Höhenänderungen nur mit permanent arbeitenden GNSS-Systemen, einer hochwertigen gerätetechnischen Ausstattung, einem homogenen Auswertekonzept und dem Einsatz von wissenschaftlichen Softwaresystemen erreicht werden können. Im Rahmen des KFKI-Projektes „Aufbau eines

integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS)“, Teilprojekt IKÜS-Pegel wurde ein Arbeitspaket „AP 4500: Aufgabendefinition und Konzeptentwicklung zum künftigen Pegelmonitoring“ bearbeitet. Das Ergebnis war ein Konzept, welches den o.a. Anforderungen Rechnung trägt (Wanninger, L., Jahn, C.H., Niemeyer, W., Sudau A, 2008). Es sieht vor, dass durch die Einrichtung eines Permanenten GNSS-gestützten Automatisierten und Standardisierten Überwachungssystems für Pegel (PEGASUS) die künftige Pegelüberwachung im Küstenbereich und im Küstenvorfeld qualitätsgesichert und wirtschaftlich durchgeführt werden kann.

Aufbauend auf den Ergebnissen des KFKI-Projektes IKÜS sollten im Rahmen von PEGASUS weitere GNSS-Stationen installiert und ein Auswertalgorithmus entwickelt werden, der sowohl wissenschaftlichen als auch administrativen Ansprüchen (z.B. der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)) genügt. Praktisch bedeutet dies eine Prozessierung der GNSS-Beobachtungen in einem globalen Referenzsystem (z.B. dem International Terrestrial Reference System (ITRS)) nach wissenschaftlichen Standards bzw. unter Nutzung wissenschaftlicher Auswertesoftware. Die sich ergebenden Koordinatenschätzungen beziehen sich auf das globale Referenzsystem und müssen in das amtliche Höhen Bezugssystem NormalHöhenNull (NHN) überführt werden. Neben den BfG-Stationen sollten auch alle weiteren frei verfügbaren GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht mit in die Auswertung einbezogen werden. Neben den BfG Stationen wurden auch GNSS-Stationen des Bundesamtes für Kartografie und Geodäsie (BKG) und eine Station des Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) genutzt, die sich in der Nähe von Pegelstationen befinden bzw. deren Höhendifferenz zu den Pegelnullpunkten bekannt ist. Bei diesen Stationen handelt es sich um die GNSS-Stationen:

- Forschungsplattform FINO-1
- Borkum-Südstrand
- Helgoland
- Hörnum

## 1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

### 1.2.1 Vorarbeiten der BfG und Unterstützung weiterer Einrichtungen

Bei der Durchführung der im Projekt vorgesehenen Arbeitspakete konnte auf Erfahrungen früherer Forschungsprojekte zurückgegriffen werden. Dies beinhaltet in erster Linie die Ergebnisse des Projektes IKÜS und die Erfahrungen früherer GNSS-Kampagnen zur GNSS-gestützten Höhenbestimmung von Offshore Pegeln. Im Rahmen von IKÜS wurde eine mobilfunkbasierte Datenkommunikationsmöglichkeit zwischen den GNSS-Receiver und der BfG entwickelt und zwei GNSS-Stationen in Zusammenarbeit mit den jeweils zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) installiert. Dabei handelt es sich um die Pegel Knock (Außenems) und Unterfeuer Dwarsgat (Außenweser). Die zuständigen WSÄ haben neben technischer Unterstützung auch die benötigten Schiffskapazitäten bereit gestellt. Darüber hinaus erfolgte von Seiten der WSÄ eine Ermittlung der Höhendifferenzen zwischen den Pegelfest-/Pegelnulppunkten und den Antennenreferenzpunkten.

### 1.2.2 Nutzung von GNSS-Beobachtungsdaten und GNSS-Produkten anderer Einrichtungen

#### a) International GNSS-Service

Der Internationale GNSS-Service (IGS) ist ein freiwilliger Zusammenschluss von mehr als 200 weltweit verteilten geodätischen Institutionen (<http://igsb.jpl.nasa.gov/>, 2009). Alle Einrichtungen haben sich darauf verständigt, die Beobachtungsdaten von nahezu 400 permanent arbeitenden, mit geodätischen GNSS-Empfängern ausgerüsteten GNSS-Stationen in Internet bereit zu stellen (Abb. 1-1). Darüber hinaus werden von verschiedenen IGS-Rechenstellen GNSS-Produkte (z.B. präzise Bahndaten) angeboten. Die angebotenen Daten sind von höchster Qualität und stellen einen quasi Standard im Bereich der Geoforschung und großräumigen geodätischen Anwendungen dar. Derzeit unterstützt der IGS das amerikanische GPS und das russische GLONASS. Nach eigener Aussage stellt der IGS die präziseste GPS-Anwendung dar (<http://igsb.jpl.nasa.gov/>, 2009). Die Produkte umfassen neben präzisen Bahndaten und Satelliteninformationen auch wöchentliche Koordinatenlösungen, die als eine wöchentliche Koordinatenrealisierung des ITRS angesehen

werden können. Lang- und kurzweilige Positionsänderungen der einzelnen Stationen werden damit erfasst und können bei den Prozessierungen berücksichtigt werden. Durch den IGS wird damit ein wöchentlich aktueller Referenzrahmen (Reference Frame) des ITRS bereitgestellt. Durch die IGS-Koordinatenlösungen, den IGS-Beobachtungsdaten und weiteren GPS-Produkten ist es möglich, die GNSS-Pegelstationen in die wöchentliche Koordinatenlösung des IGS mit einzubinden und damit die exakte Position der Pegelfest-/Pegelnulldpunkte in einem globalen Referenzsystem zu ermitteln.

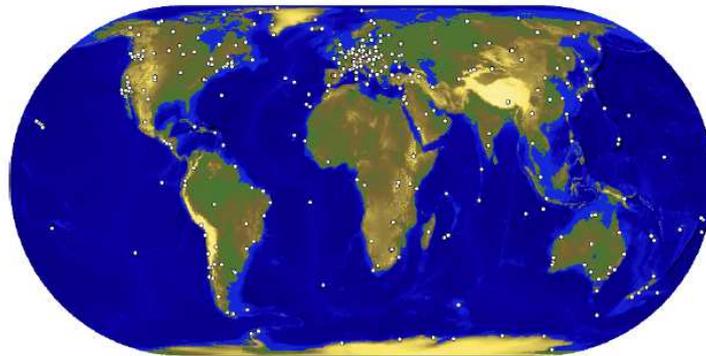


Abb. 1-1: Verteilung der GNSS-Stationen des IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/>)

#### b) EUREF Permanent Network (EPN)

EUREF ist eine Unterkommission (Europa) der International Association of Geodesy (IAG), die in die IAG Sub-Commission 1.3, Regionale Referenzrahmen implementiert ist. EUREF wurde 1987 auf der Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) in Vancouver gegründet (<http://www.epncb.oma.be/>, 2009). Eine Hauptaufgabe von EUREF liegt in dem Aufbau und der Pflege des European Terrestrial Reference Systems 89 (ETRS89) und dem European Vertical Reference System (EVRS). Für die Realisierung des ETRS89 existiert das EUREF Permanent Network (EPN), dessen Stationen analog zu den GNSS-Stationen des IGS mit geodätischen GNSS-Empfängern ausgestattet sind und kontinuierlich GNSS-Beobachtungsdaten aufzeichnen (Abb. 1-2). Zur Realisierung des EPN tragen mehr als 100 Institutionen bei. Analog zum IGS wird von EUREF eine wöchentliche Koordinatenlösung im Internet veröffentlicht. Das ETRS89 ist so definiert, dass der stabile Anteil der Eurasischen Platte keine Kontinentaldrift aufweist und das ETRS89 zur Epoche 1989 mit dem ITRS übereinstimmt (Habrich, H., 2004)

Die Rechenstelle des BKG wertet einen Teil des EPN aus und stellt diesen Teilbereich für eine Kombinationslösung bereit. Die wöchentlichen Koordinatenlösungen werden sowohl in einer Realisierung des ITRS (ITRFxx bzw. IGS05) als auch im ETRS89 abgegeben.

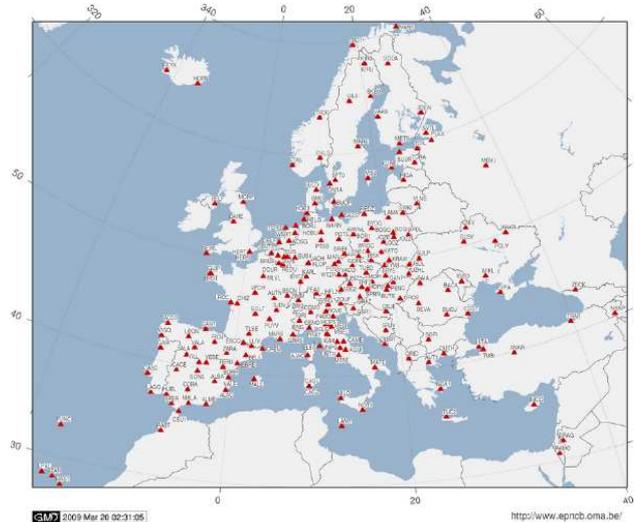


Abb. 1-2: Verteilung der GNSS-Stationen des EPN in Europa (<http://www.epncb.oma.be/>)

### c) Geodätisches Referenznetz Deutschlands (GREF)

Das BKG betreibt ein aus etwa 30 deutschlandweit verteilten permanenten GNSS-Referenzstationen bestehendes Netzwerk (GREF). Zu den Aufgaben des Netzwerkes zählen neben der Bereitstellung eines einheitlichen dreidimensionalen Referenzsystems auch die Integration der deutschen Stationen in das ETRS89 und das ITRS (Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, 2009). Die GREF-(Küsten-)Stationen Borkum, Helgoland, Hörnum, Kiel, Warnemünde und Saßnitz sind in der Nähe von WSV-Pegeln installiert. In Verbindung mit Nivellements der zuständigen WSÄ können aus den Koordinatenlösungen (insbesondere den Höhenwerten) Höhenangaben der Pegelnullpunkte im ETRS89 abgeleitet werden.

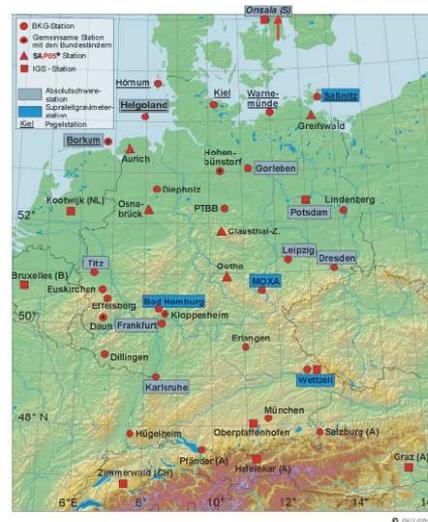


Abb. 1-3: Verteilung der GNSS-Stationen des GREF in Deutschland (BKG, 2009)

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Bearbeitung des Projektes PEGASUS mussten verschiedenen Aufgabenpakete bearbeitet werden. Hauptziel des Projektes war die Installation mehrerer GNSS-Stationen und die Entwicklung von möglichst weit automatisierten Auswertelgorithmen zur Bestimmung von Höhen und Höhenänderungen der Pegelnullpunkte. Die Aufgabenschwerpunkte umfassten im Wesentlichen

- Aufbau der Stationen Leuchtturm Alte Weser (LHAW), Cuxhaven-Steubenhöft (TGCU, Dagebüll (TGDA) und Büsum (TGBU)
- Prozessierung der Beobachtungsdaten in einem globalen Referenzsystem
- Überführung in ein amtliches Höhensystem
- Publizierung der Ergebnisse im Internet

### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangszustand

Die Pegelnull- und Pegelfestpunkte sollen nach der Pegelvorschrift in regelmäßigen Abständen (aller 10-15 Jahre) an das übergeordnete amtliche Höhenfestpunktfeld angeschlossen werden (LAWA und BMV (Hg.), 1997). Das amtliche Höhenfestpunktfeld basiert auf dem Präzisionsnivellement und geht von einem statischen Netz aus. Da den Landesvermessungsverwaltungen bekannt ist, dass ein statische Ansatz die Realität

unzureichend abbildet, wurden die amtlichen Höhennetze zu unterschiedlichen Messepochen wiederholt neu bestimmt und die resultierenden Ergebnisse als amtliche Höhen eingeführt. Im Bereich der Deutschen Bucht wurden bzw. werden die amtlichen Höhennetze im Rahmen des

- Deutschen Haupthöhennetzes 1912 (DHHN12)
- Nordseeküstennivellements I (NKNI, 1928-1932)
- Nordseeküstennivellements II (NKNI, 1954-1956)
- Deutschen Haupthöhennetzes 1984 (DHHN84)
- Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) 2006-2011

neu bestimmt. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Messepochen beträgt damit etwa 20-30 Jahre. Streng genommen können die einzelnen Messkampagnen nicht miteinander verglichen werden, da einzelne Parameter wie etwa Linienführung oder Netzgeometrie zwischen den Epochen variieren. Weiterhin ist bei Auswertungen zu berücksichtigen, dass zwischen den Epochen eine Vielzahl von Festpunkten verloren gegangen ist bzw. neue Höhenfestpunkte hinzu gekommen sind. Zusätzlich sind nicht alle Festpunkte immer repräsentativ für die nähere Umgebung. So überlagern sich groß- und kleinräumige Höhenänderungen gegeben falls mit Setzungserscheinungen der Festpunktträger. Ursachen von groß und kleinräumigen Höhenänderungen können sowohl tektonischer, als auch anthropogener Natur sein.

Anschlussmessungen zu Pegelfestpunkten und damit auch zu Pegelnullpunkten werden auch zwischen den großräumigen Nivellements durchgeführt. Derartige Anschlussnivellements bilden nur lokale Höhenänderungen zwischen den Anschlusspunkten des amtlichen Höhennetzes und den Pegelfestpunkten ab. Insbesondere bei einer räumlichen Nähe des amtlichen Festpunktfeldes und der Pegelfestpunkte werden meist keine Änderungen festgestellt. Im Fall einer großräumigen Messkampagne der Landesvermessung ergeben sich im Allgemeinen neue Höhen für das amtliche Höhennetz und damit auch für die Anschlusspunkte. In Verbindung mit einer erneuten Anschlussmessung ergeben sich häufig Höhenänderungen der Pegelfest-/Pegelnullpunkte im cm-Bereich.

Das KFKI-Projekt IKÜS hat gezeigt, dass insbesondere an der Küste eine Vielzahl von Bereichen existiert, in denen Vertikalbewegungen auftreten (Abb. 1-4, Wanninger, L., Jahn, C.H., Niemeyer, W., Sudau A, 2008). Technisch ist es seit einigen Jahren möglich, die dreidimensionalen Positionen im Raum über satellitengestützte Verfahren (GPS/GNSS) zu ermitteln. Großräumige Nivellementskampagnen der Landesvermessung oder der BfG bilden die Höhen zu einer bestimmten Epoche ab. Zwischen den einzelnen Messepochen (z.B. NKNI

oder NKNII) müssen Annahmen über Höhenänderungen getroffen bzw. die Höhenänderungen modelliert werden. Im Gegensatz dazu bieten satellitengestützte Verfahren die Möglichkeit, nahezu ohne Personalaufwand über einen längeren Zeitraum kontinuierlich die exakte Position eines Punktes im Raum zu bestimmen, wobei insbesondere die Nachbarschaftsgenauigkeit über große Distanzen aufrechterhalten wird. Für jeden mit GNSS-Systemen zu überwachenden Punkt wird eine GNSS-Ausrüstung (GNSS-Antenne und GNSS-Empfänger) benötigt. Somit lassen sich nur punktuell Höhen bestimmen bzw. Höhenänderungen überwachen. Da es sich bei Pegeln ebenfalls um punktuelle Messeinrichtungen handelt, eignen sich GNSS-Systeme für ein Monitoring der Pegelnullpunkte. Sofern eine feste Verbindung zwischen dem Antennenreferenzpunkt der GNSS-Systeme und dem Pegelnullpunkt besteht bzw. die Höhendifferenz regelmäßig überwacht wird, können die am Pegel erfassten Wasserstandsdaten direkt in einem global Referenzsystem georeferenziert werden.

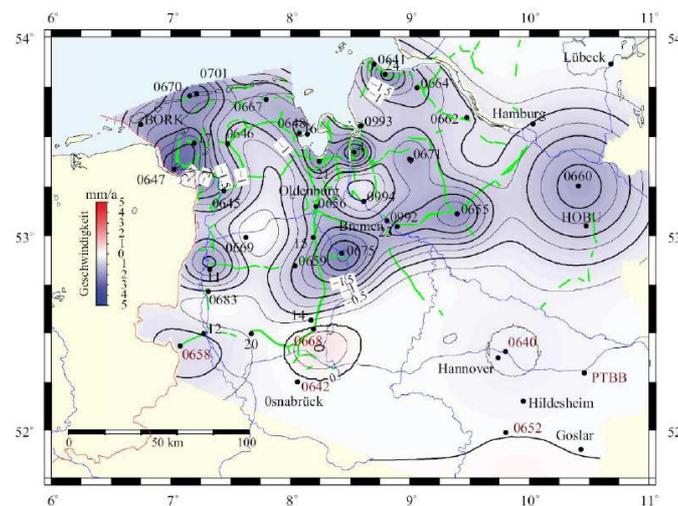


Abb. 1-4: Kombinationslösung aus GNSS- und Nivellementsdaten aus dem IKÜS-Projekt

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes PEGASUS wurde die BfG von Seiten der WSV und Dritter unterstützt. Dies beinhaltet insbesondere Unterstützung durch die

- Wasser- und Schifffahrtsdirektionen Nord und Nordwest
- Wasser- und Schifffahrtsämter Emden, Bremerhaven und Tönning

- Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein
- Hafengesellschaft Dagebüll mbH

Für die Prozessierung der GNSS-Beobachtungsdaten wurden Beobachtungsdaten und Produkte verschiedener Institutionen genutzt. Im Wesentlichen handelt es sich dabei GNSS-Beobachtungsdaten und GNSS-Produkte des

- International GNSS-Service (IGS)
- EUREF Permanent Network (EPN)
- Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG)
- Landesbetriebs für Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)

Die Prozessierung bzw. die Entwicklung von Auswertelgorithmen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem

- Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI)
- Bundesamt für Kartografie und Geodäsie.

Das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut in München verfügt über einen großen Erfahrungsschatz im Bereich der internationalen Referenzsysteme. Darüber hinaus beteiligt sich das DGFI an einem „Tide GAuge benchmark monitoring project“ (TIGA) des IGS. Im Rahmen dieser Aktivitäten prozessiert das DGFI ein Netzwerk von etwa 40 GNSS-Pegelstationen an der Atlantikküste (Nord- und Südatlantik).

## 2 Umfang der durchgeführten Arbeiten

### 2.1 Einbindung von Stationen der BfG und anderer Einrichtungen

#### 2.1.1 Konfiguration und Aufbau von Stationen der BfG

##### a) Genereller Aufbau der BfG Stationen

Für einen maximalen Nutzen müssen sowohl die eingesetzten GNSS-Ausrüstungen als auch die Auswertalgorithmen administrativen und wissenschaftlichen Ansprüchen genügen. Im Vergleich zu den Hardwareanforderungen von GNSS-Systemen, die im Rahmen von Messkampagnen zum Einsatz kommen, werden bei permanent arbeitenden GNSS-Systemen höhere Hardwareanforderungen gestellt. Zusätzlich zu den messtechnischen Anforderungen müssen permanent installierte GNSS Ausrüstungen über die Möglichkeit einer Fernadministration und eines automatischen Datentransfers der erfassten Beobachtungsdaten verfügen. Um diesen Ansprüchen zu genügen, wurden auf den BfG-Stationen folgende GNSS-Ausrüstungen installiert:

- Leica GRX1200+ GNSS - Referenzstationsempfänger
- Leica AT504GG - GNSS-Antenne mit Radom (Abb. 2-1), individuelle, absolute Kalibrierung durch Geo++
- Bämpfer Dreifuß
- Leica GFU24 GPRS Modul (Datenkommunikation)
- GSM-Marineantenne (Procom GLX900-H) (Abb. 2-1)
- Schaltschrank mit Zeitschaltuhr



**Abb. 2-1:** GNSS-Antenne vom Typ Leica AT504GG (links) und PROCOM GXL900-3 GSM-Marineantenne (rechts)



**Abb. 2-2:** Leica GRX1200+ GNSS Receiver mit Controller (links) und Leica AT504GG Antenne mit Bämpfer Dreifuß (rechts)

Die GNSS-Empfänger (Abb. 2-2) stellen den aktuellen Stand der Empfängertechnologie dar und sind speziell für Referenzstationen entwickelt worden. Neben der Möglichkeit, GNSS-Signale von GPS, GLONASS und Galileo parallel auf 72 Kanälen erfassen zu können, verfügen die GNSS-Empfänger über eine Ethernet-Schnittstelle, ein Webinterface (Abb. 2-4 - Abb. 2-5) und FTP-Funktionalitäten. Es ist somit möglich, die GNSS-Empfänger in vorhandene LAN-Netzwerke als einfache Clients einzubinden. Für die Administration der GNSS-Empfänger und die Datenübertragung sind damit weder Controller noch separate Computer nötig. Sofern entsprechende Rechte gesetzt sind, können die GNSS-Empfänger von jedem PC innerhalb eines LAN via Webinterface administriert werden. Zusätzlich ermöglichen die FTP-Funktionalitäten der GNSS-Empfänger einen automatischen, von Seiten der GNSS-Empfänger initiierten Transfer der Beobachtungsdaten zu einem FTP-Server innerhalb des LAN. Die Empfänger der BfG arbeiten mit folgenden Parametern:

- Tracking von GPS und GLONASS Signalen
- Loggingintervall: 10s
- Elevationsmaske 0°

- Speicherung der Beobachtungsdaten im probitären Leica Format und im komprimierten RINEX Format
- Zusätzliche ZIP-Komprimierung der RINEX-Daten
- FTP-Datentransfer der RINEX Daten zur BfG im Intervall von 6h

Die Loggingrate von 10 ist gegenüber den im IGS üblichen Loggingraten von 30s wesentlich höher, um eine spätere Analyse hochfrequenter Bewegungen der GNSS-Antenne zu ermöglichen. Zur Realisierung der Fernadministration und des automatischen Datentransfers muss das LAN der BfG bzw. das Intranet des BMVBS auf die GNSS-Stationen ausgedehnt werden. Aufgrund der exponierten Lage einiger Stationen ist eine direkte Anbindung an das Intranet des BMVBS nicht möglich. Aus diesem Grund wurde eine mobilfunkbasierte Anbindung realisiert bzw. die vorhandene Infrastruktur des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Verbindung mit einem Mobilfunkbetreiber (Vodafone D2) genutzt. Administrativ ist der DWD analog der WSV und der BfG dem BMVBS zugeordnet. Verschiedene Mobilfunkbetreiber bieten unter dem Name Corporate Data Access (CDA) einen Service an, bei dem jeder SIM-Karte und damit jeder zugehörigen Mobilfunknummer bzw. jedem zugehörigen Endgerät eine IP-Nummer zugewiesen wird. Praktisch wird damit ein Netzwerk geschaffen, mit dem alle im CDA registrierten SIM-Karten (und damit auch Endgeräte) verbunden sind. Auf den BfG-Stationen kommen Leica GFU24 GPRS-Module als Endgerät zum Einsatz. In jedem GPRS-Modul ist eine SIM-Karte vorhanden, die in einem CDA registriert ist und damit auch eine IP-Nummer innerhalb des CDA zugewiesen bekommt. Es wird damit ein „lokales Netzwerk“ zwischen den einzelnen GPRS-Modulen (und damit auch den GNSS-Receiver) und einem Server innerhalb des Netzwerkes des Mobilfunkbetreibers generiert. Der DWD nutzt einen entsprechenden Dienst zur Anbindung seiner Wetterstationen. Über einen VPN-Gateway des DWD können die Messstationen des DWD aus dem Intranet des BMVBS angesteuert bzw. Daten zum DWD übertragen werden. Praktisch bedeutet dies, dass es mit dieser Infrastruktur möglich ist, das Intranet des BMVBS via Mobilfunk auf jeden beliebigen Ort auszudehnen (sofern Mobilfunkempfang des jeweiligen Mobilfunknetzes vorhanden ist).

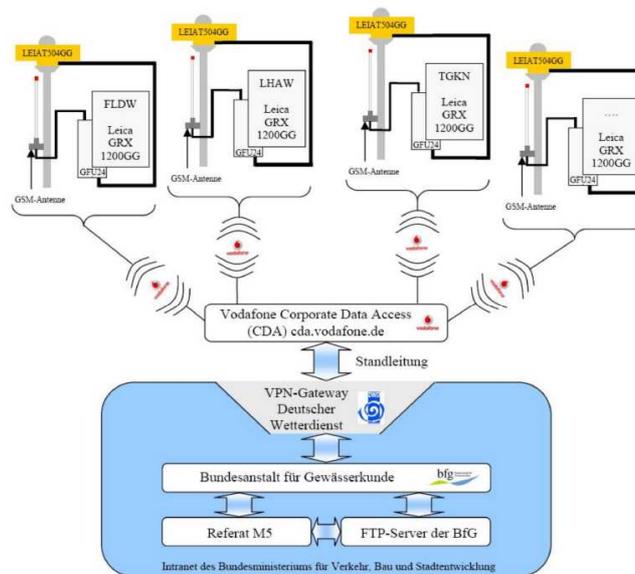


Abb. 2-3: Mobilfunkbasierter Kommunikationsweg zwischen dem Intranet der BfG und den GNSS-Stationen vor Ort

Im Rahmen von PEGASUS wurden die GNSS-Stationen der BfG in das System des DWD mit eingebunden. Von jedem Arbeitsplatz innerhalb der BfG ist damit eine bidirektionale Kommunikation zu den GNSS-Empfängern möglich. In Verbindung mit den FTP-Funktionalitäten der GNSS-Empfänger werden in einem zeitlichen Intervall von 6h die GNSS-Beobachtungsdaten via FTP auf einen FTP-Server der BfG übertragen. Im Testbetrieb der Stationen wurde die Erfahrung gemacht, dass die GPRS-Verbindung abreißen kann. In solchen Fällen werden weiterhin GNSS-Beobachtungen erfasst und gespeichert, diese aber nicht zum FTP-Server übertragen. Eine Steuerung der GNSS-Receiver ist bei abgerissener GPRS-Verbindung ebenfalls nicht möglich. Um einem Kontrollverlust bzw. dem Verlust der Datenübertragungskapazität vorzubeugen, werden alle Receiver wöchentlich neu gestartet. Nach einem Neustart wird die GPRS-Datenverbindung neu hergestellt und die verbleibenden Daten automatisch zur BfG übertragen (Abb. 2-3).

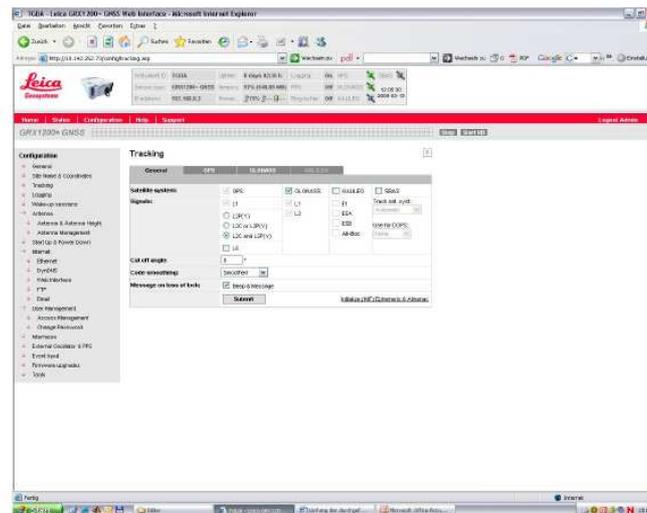


Abb. 2-4: Web-Interface eines Leica GRX1200+ GNSS Receivers (Steuerung der getrackten Signale)

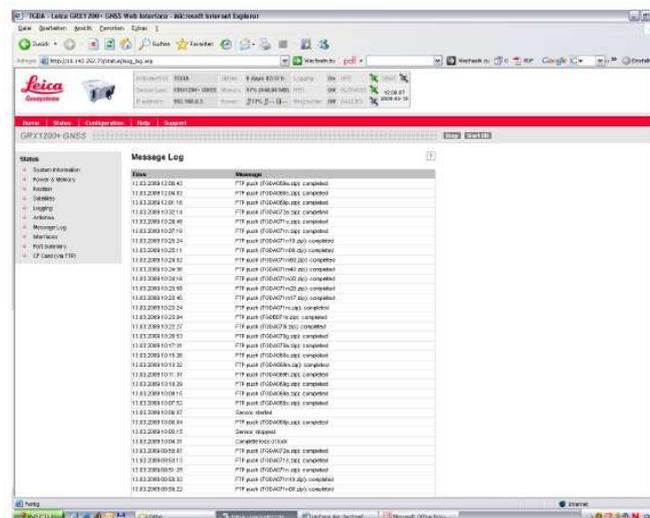


Abb. 2-5: Web-Interface eines Leica GRX1200+ GNSS - Receivers (Message Logfile)

Neben den GNSS-Receivern bzw. der Realisierung einer Datenanbindung dieser Geräte an das Intranet des BMVBS mussten auch GNSS-Antennen installiert werden. Sofern vorhanden, wurden die GNSS-Antennen auf bereits vorhandene Antennenhalterungen montiert. Neue Antennenhalterungen bestehen immer aus dickwandigen Stahlrohren, an deren oberen Ende Antennenhalterungen bzw. Halterungen für DreifüÙe montiert sind. Bei den DreifüÙen handelt es sich um massive DreifüÙe der Marke Bämpfer, die im Rahmen der absoluten Antennenkalibrierung mit kalibriert wurden. Während des Aufbaus wurde sehr großer Wert darauf gelegt, dass das endgültig installierte Antennensetup (DreifüÙ, Steckzapfen, GNSS-Antenne und Radom) exakt dem Antennensetup der Kalibrierung entspricht. Durch diese Maßnahmen sollen die Auswirkungen der „quasistatisch“ wirkenden

Nahfeldeffekte in der unmittelbaren Antennenumgebung (ca. 0,7m) minimiert werden (Wanninger L., 2008).

#### b) Verbindungsmessungen zwischen den GNSS-Antennen und den Pegelfestpunkten

Mithilfe der GNSS-Systeme werden prinzipiell nur die Lage und Höhe der GNSS-Antenne überwacht. Für Aussagen zu Höhenänderungen der Pegelfest- und damit auch der Pegelnullpunkte muss die geometrische Beziehung zwischen dem Antennenreferenzpunkt und den Pegelfestpunkten bekannt sein. Im Falle von PEGASUS sind sowohl GNSS-Antennen als auch Pegelfestpunkte an derselben physischen Struktur befestigt, wodurch der geometrische Zusammenhang zwischen GNSS-Antenne und den Pegelfestpunkten bzw. den Pegelnullpunkten als konstant angesehen werden kann. Bei den Stationen Unterfeuer Dwarsgat, Leuchtturm Alte Weser und Pegel Knock wurden im Rahmen von früheren Arbeiten der BfG Antennenhalterungen montiert (an die Pegelkonstruktionen angeschweißt) und die geometrische Beziehung zu den Pegelfestpunkten bestimmt. Im Fall der Stationen Cuxhaven Steubenhöft, Büsum und Dagebüll kamen kalibrierte Messstangen zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Messingstäbe, deren jeweilige exakte Länge bekannt ist und die zu einer Einheit verschraubt werden können. Mithilfe einer speziellen Halterung konnten die verbundenen Messstangen so montiert werden, dass das obere Ende auf dem Höhengniveau des Antennenreferenzpunktes (ARP) lag. Zur Vermeidung von neigungsbedingten Restfehlern in der Halterung wurden beim Stationsaufbau zwei Messstäbe symmetrisch zum ARP montiert (Abb. 2-6). Am unteren Ende der verbundenen Messstangen wurden Messingspitzen mit einer bekannten Länge eingeschraubt, die mit Hilfe eines Planplattennivelliers exakt angemessen werden können (Abb. 2-7). Über einen Rückblick auf eine klassische Nivellierlatte kann dann die Höhendifferenz zwischen dem Pegelfestpunkt und der Messingspitze und unter Berücksichtigung der Gesamtlänge der verbundenen Messstangen auch die Höhendifferenz zwischen dem ARP und dem Pegelfestpunkt bestimmt werden.



Abb. 2-6: Halterung für Messstäbe (links) und Messstäbe am Pegel Dagebüll

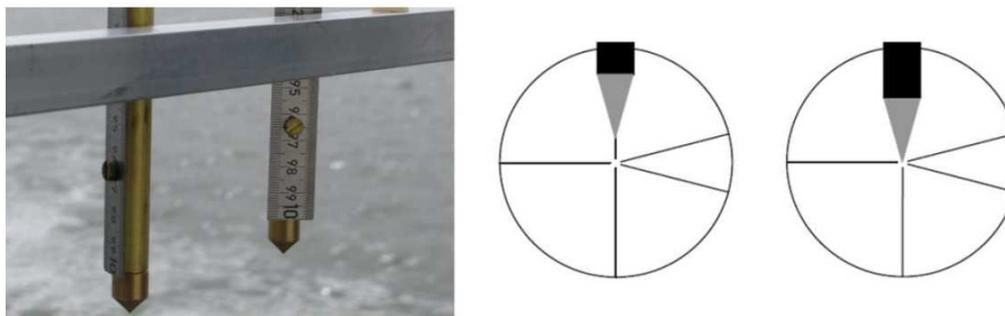


Abb. 2-7: Spitzen der Messstäbe (links) und Nutzung der Planplatte beim Anzielen (rechts)

Allen Stationen ist gemein, dass als Höhenbezugspunkt immer die Oberkante des 5/8“ Gewindes definiert ist. Die Antennenhöhe ergibt sich jeweils aus dem Abstand zwischen der Oberkante des 5/8“ Gewindes und dem ARP (Abb. 2-8). Die Bestimmung der Instrumentenhöhe erfolgte jeweils mithilfe einer Stechschieblehre.

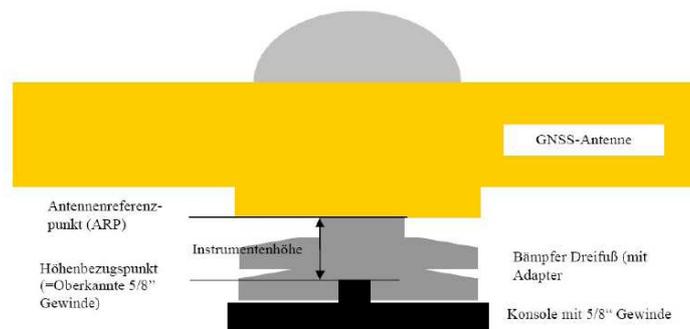


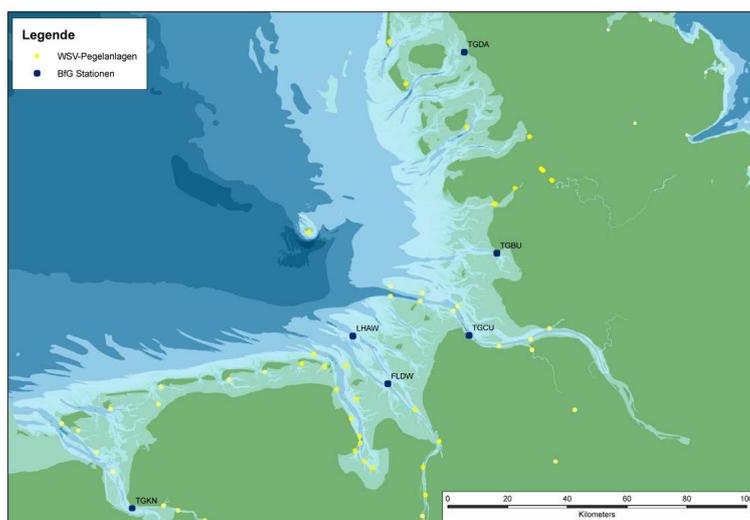
Abb. 2-8: Definition der Instrumentenhöhe der BfG-Stationen

### c) Installation der Stationen

Im Rahmen der KFKI-Projekte IKÜS und PEGASUS wurden auf sechs Pegelstationen die in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen GNSS-Systeme aufgebaut und jeder Station ein Code aus vier Zeichen zugewiesen. Hinter den Buchstabenkürzeln verbergen sich die in Tabelle 2-1 dargestellten GNSS-Pegelstationen. Zusätzlich ist jede der Stationen beim International Earth Orientation Service (IERS) registriert und mit einer DOMES-Nummer (Tab. 2-1) eindeutig identifiziert. Über die Registrierung wird sichergestellt, dass im Umfeld des IGS keine weiteren GNSS-Stationen mit gleichem Buchstabencode vorhanden sind. Die DOMES-Nummern werden nach einem bestimmten Code abgeleitet, wodurch sich aus den DOMES-Nummern auch Informationen über den Standpunkt ableiten lassen. In Abb. 2-9 ist die Lage der GNSS-Pegelstationen der BfG dargestellt. Der Aufbau aller Stationen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den örtlich zuständigen WSÄ und teilweise auch in Verbindung mit dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN) und der Hafengesellschaft Dagebüll mbH.

**Tabelle 2-1:** Bezeichnungskürzel und DOMES-Nr. der BfG-Stationen

Code	Pegel	DOMES-Nr.
TGKN	TideGauge KNOck (Pegel Knock)	14290M001
FLDW	FrontLight DWarsgat (Unterfeuer Dwarsgat)	14291M001
LHAW	LightHouse Alte Weser (Leuchtturm Alte Weser)	14292M001
TGCU	TideGauge CUxhaven Steubenhöft (Pegel Cuxhaven Steubenhöft)	14271M002
TGBU	TideGauge BUesum (Pegel Büsum)	14294M001
TGDA	TideGauge DAgebüll (Pegel Dagebüll)	14293M001



**Abb. 2-9:** Standorte der BfG-Stationen

### Unterfeuer Dwarsgat (FLDW)

Das Unterfeuer Dwarsgat liegt etwa auf halber Strecke zwischen Bremerhaven und dem Leuchtturm Alte Weser am Rand der Fahrrinne im Bereich der Außenweser. Im Jahr 2003 wurden unter Federführung der BfG GNSS-Messkampagnen auf verschiedenen Pegeln im Bereich der Außenjade bzw. der Außenweser durchgeführt. Im Zuge dieser Arbeiten wurden am Unterfeuer Dwarsgat Antennenhalterungen für GNSS-Antennen montiert. Darüber hinaus erfolgte 2004 die Bestimmung der Höhendifferenz zwischen den Antennenhalterungen und den Pegelfestpunkten bzw. dem Pegelnullpunkt. Bei dem Unterfeuer handelt es sich um eine feste Stahlkonstruktion. Es ist daher davon auszugehen, dass die innere Geometrie und somit auch die Höhendifferenz zwischen der Antennenhalterung bzw. dem ARP und den Pegelfestpunkten im Verlauf der Zeit konstant bleibt. Die permanente GNSS-Station wurde am 04.08.2008 installiert. Im Zuge einer ebenfalls ausgeführten Kontrollmessungen wurden die Höhendifferenzen zwischen verschiedenen Festpunkten im Bereich der Laterne des Unterfeuers Dwarsgat bestimmt. Die Ergebnisse stimmten mit den Messungen aus dem Jahr 2004 überein.



**Abb. 2-10:** Unterfeuer Dwarsgat



Abb. 2-11: Konsole für die Aufnahme einer GNSS-Antenne



Abb. 2-12: Leica AT504GG mit Radom der Station FLDW



Abb. 2-13: Leica GRX1200+ GNSS (1), GFU24 (2), Netzteil (3) und Zeitschaltuhr mit Schaltschrank der Station FLDW

## Pegel Knock (TGKN)

Aus den Ergebnissen früherer Messkampagnen und Forschungsprojekten ist bekannt, dass im Bereich Knock Landsenkungen auftreten (vgl. Abb. 1-4). Eine vermutete Ursache besteht in der Förderung von Erdgas im Bereich Groningen. Unabhängig von laufenden Forschungsprojekten wurde vom WSA Emden eine erneute GNSS-gestützte Anschlussmessung der Außenemspegel Dukegat, Knock und Emshörn geplant. Zur Vermeidung von Doppelarbeiten wurde daher bereits im Mai 2008 die GNSS-Ausrüstung der PEGASUS-Station Pegel Knock aufgebaut. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Datenanbindung zur BfG verfügbar war, wurde die zur Datenanbindung nötige Hardware am

03.11.2008 nachgerüstet. Ab diesem Datum erfolgt eine automatische Datenübertragung zur BfG nach Koblenz. Die GNSS-Antennenhalterung, die GNSS-Antenne und die Kabelverbindung zum GNSS-Receiver wurden im Rahmen der Nachrüstungen nicht verändert.



Abb. 2-14: Pegel Knock



Abb. 2-15: Leica AT504GG mit Radom auf dem Pegel Knock

#### Leuchtturm Alte Weser (LHAW)

Durch die exponierte Lage im Küstenvorfeld kann es Beeinträchtigungen beim Mobilfunknetz geben. Aus diesem Grund wurde auf dem Leuchtturm Alte Weser neben der in Abb. 2-3 dargestellten Kommunikationsmöglichkeit noch zusätzlich eine ein-direktionale Richtfunkstrecke installiert. Die Richtfunkstrecke ermöglicht die Übertragung von GNSS-Beobachtungen im Format RTCM3.1 zu einer Empfangsstation auf dem Festland. Das hierfür benötigte Hermes Microcom Datenfunkgerät (mit Stromversorgung) und eine Kathrein Yagi-Richtfunkantenne wurden im Rahmen des Stationsaufbaus mit installiert. Die

Empfangsstation befindet sich in Cuxhaven auf dem Hafenampt und besteht aus den gleichen Elementen. Der Betrieb dieser Richtfunkstrecke erfolgt mit Genehmigung der Bundesnetzagentur, die für diese Zweck eine Frequenz aus dem Frequenzspektrum der WSV zur Verfügung gestellt hat. Die Installation der gesamten Anlage erfolgte am 04. November 2008.

Analog zur Station Unterfeuer Dwarsgat erfolgte im Jahr 2003 eine Installation von Antennenhalterungen und Hilfspunkten auf dem Leuchtturm. Darüber hinaus erfolgten in 2004 Messungen zur Bestimmung der Höhendifferenz zwischen den Antennenhalterungen / Hilfspunkten im oberen Bereich und den Pegelfestpunkten im Sockelbereich des Leuchtturmes. Antennenhalterungen, Hilfspunkte und Pegelfestpunkte befinden sich an ein und dem selben Bauwerk, wodurch die geometrische Beziehung zwischen ARP und Pegelfestpunkt als langfristig konstant angesehen werden kann. Da die ursprünglich in 2003 genutzte Antennenhalterung durch eine neue Halterung ersetzt wurde, erfolgte in 2008 eine Höhenbestimmung der neuen Antennenhalterung in Bezug auf die im oberen Bereich des Leuchtturmes vorhandenen Hilfspunkte.



**Abb. 2-16:** Leuchtturm Alte Weser am 04.11.2008 (links 10:00 Uhr, rechts 15:30 Uhr)



Abb. 2-17: Leica AT504GG mit Radom am Leuchtturm Alte Weser



Abb. 2-18: Schaltschrank mit Leica GRX1200+ GNSS (1), GFU24 (2), Netzteil (3), Timer (4), Hermes Microcom Datenfunkgerät (5), Stromversorgung Datenfunkgerät (6)



Abb. 2-19: Yagi-Antennen der Richtfunkstrecke LHAW(links) - Cuxhaven (rechts)

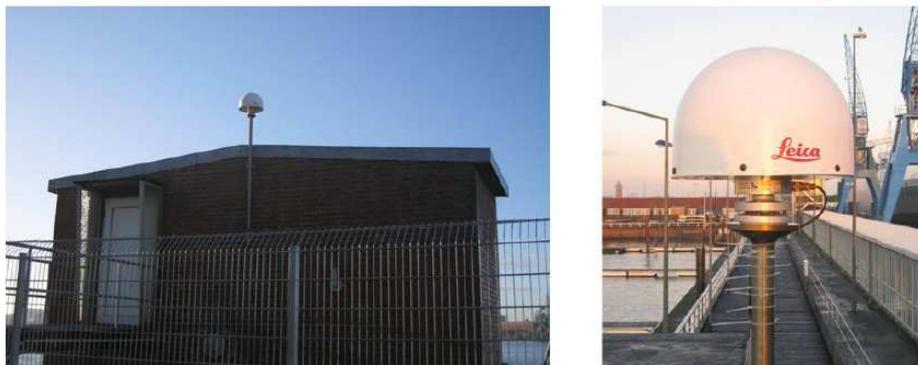
### Pegel Cuxhaven Steubenhöft (TGCU)

Die GNSS-Anlage des Pegels Cuxhaven Steubenhöft wurde am 09.12.2008 installiert. Eine Antennenhalterung musste nicht extra montiert werden, da in der Vergangenheit die Station Cuxhaven Steubenhöft im Rahmen von gemeinsamen Projekten zwischen der BfG und dem LGN als Referenzstation genutzt wurde und eine Antennenhalterung (Abb. 2-21) bereits installiert war. Im Gegensatz zu den ersten drei Stationen steht der Pegel Cuxhaven Steubenhöft an Land im gesicherten Hafengebiete.



**Abb. 2-20:** Lage des Pegels Cuxhaven Steubenhöft

Das System ist daher im Gegensatz zu den exponierten Pegelstationen Unterfeuer Dwarsgat, Leuchtturm Alte Weser und Pegel Knock problemlos ohne Schiffseinsatz zu erreichen. Aufgrund der Installation in einem Betonbauwerk an Land wurde auf eine Procom Marine GSM-Antenne verzichtet und eine einfache GSM Antenne direkt auf das GFU24 montiert (Abb. 2-22). Im Rahmen der Installation wurden Instrumentenhöhe und Höhendifferenzen zu Pegelfestpunkten mithilfe eines klassischen Nivellements durch die BfG bestimmt. Zur Überprüfung des Ergebnisses wurde im April 2009 die Bestimmung der Höhendifferenz zwischen Antennenreferenz- und Pegelfestpunkt unter Nutzung der kalibrierten Messstangen erneut bestimmt und das Ergebnis der ersten Messung bestätigt.



**Abb. 2-21:** Leica AT504GG mit Radom am Pegel Cuxhaven Steubenhöft



**Abb. 2-22:** Leica GRX1200 +GNSS Receiver mit GFU24 und GSM-Antenne

### Pegel Büsum (TGBU)

Am Pegel Büsum wird der Wasserstand im Vorhafen bzw. auf der Seeseite der Schleuse erfasst. Der Vorhafen ist relativ klein und grenzt unmittelbar an die offene See (Abb. 2-24). Der Pegel Büsum ist in der Schleusenmauer der Schleuse Büsum integriert und ein Pegelfestpunkt befindet sich auf der Schleusenmauer unmittelbar neben dem Pegelschacht. Weiterhin existiert direkt neben dem Pegelschacht ein Signalmast, an dessen oberes Ende eine Antennenhalterung mit GNSS-Antenne installiert wurde. Die Antennenhalterung ist fest mit dem Antennenmast verschraubt und sitzt z.T. auf angeschweißten Elementen. Eine Vertikalbewegung der Antennenhalterung und damit auch der Antenne kann daher als sehr unwahrscheinlich angesehen werden (Abb. 2-23). Die gesamte GNSS-Anlage wurde am 18.05.2009 installiert. GNSS-Empfänger, GFU24, Netzteil und Timer sind in einem (vom WSA Tönning) vormontierten Schaltschrank direkt neben der eigentlichen Pegelanlage in die Schleusenmauer integriert. Im Vorfeld der Installation wurde ein Stromkabel vom Verteilerkasten in den Pegelschacht verlegt. Der nötige Strom wird vom LKN-Schleswig Holstein bereitgestellt. Aufgrund der Installation der GNSS-Anlage im Pegelschacht kommt als GSM-Antenne eine externe Procom Marine GSM-Antenne zum Einsatz, die mit am Signalmast befestigt ist. Im Zuge der Installation erfolgte Bestimmung der Höhendifferenz zwischen dem Antennenreferenzpunkt und dem Pegelfestpunkt unter Nutzung der kalibrierten Messstangen.



Abb. 2-23: Signalmast mit installierter Antenne und Schaltschrank im Pegelschacht der Station Buisum



Abb. 2-24: Lage der GNSS-Station Buisum an der Schleuse Buisum

### Pegel Dagebüll (TGDA)

Der Pegel Dagebüll befindet sich am seeseitigen Ende der Hafensmole Dagebüll in einem Pegelhaus. Das zuständige WSA Tönning hat im Vorfeld der Installation eine Antennenhalterung montiert. Aufgrund der exponierten Lage wurde direkt neben der eigentlichen GNSS-Antenne eine Blitzfangstange installiert und die komplette Anlage (Schrankschrank, Antennenhalterung, Antenne usw.) für den Potenzialausgleich geerdet. Die Montage des Schaltschranks mit der GNSS-Anlage erfolgte im Pegelhaus. Analog zum Pegel Cuxhaven handelt es sich bei Dagebüll um ein Betonbauwerk mit Fenstern, wodurch auf eine Procom Marine GSM-Antenne verzichtet werden konnte und eine einfache GSM-Antenne auf den Schaltschrank gesetzt wurde. Im Rahmen der Installation erfolgte eine Bestimmung der Höhendifferenz zwischen der Antennenhalterung und einem direkt neben dem Pegelgebäude gelegenen Pegelfestpunkt. Die langfristige Höhenstabilität der Mole kann nicht als gegeben angesehen werden. Da sich ein Pegelfestpunkt direkt neben dem Pegelhaus

auf der Mole befindet, wird die geometrische Beziehung zwischen dem ARP und dem Pegelfestpunkt (und damit auch dem Pegelnullpunkt) als konstant angesehen.

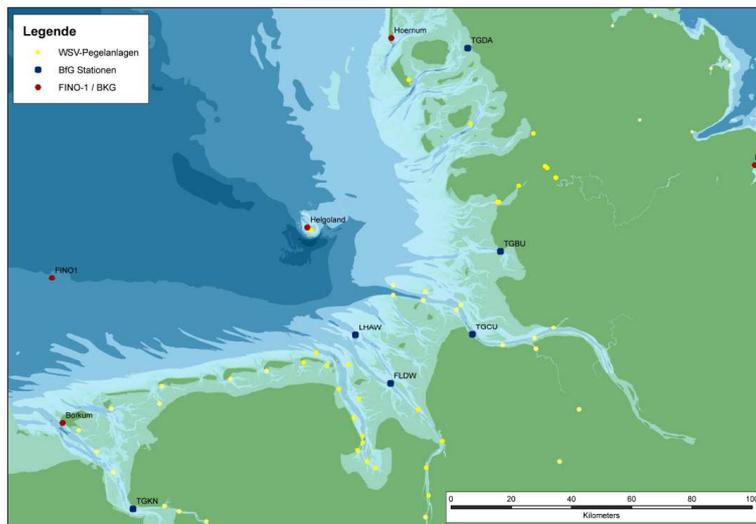


Abb. 2-25: Pegelhaus mit GNSS-Station des Pegels Dagebüll (links) und Schaltschrank im Pegelhaus (rechts)

## 2.1.2 Einbindung von GNSS-Stationen anderer Einrichtungen

### Einbindung der LGN-Station auf der Forschungsplattform FINO-1

Neben den BfG-Stationen existieren im Untersuchungsgebiet noch weitere GNSS-Stationen, in deren unmittelbaren Nähe sich Pegelanlagen befinden und deren geometrische Beziehungen zwischen den Antennenreferenzpunkten und Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkten bekannt sind. Sofern die Daten frei verfügbar sind, wurden die GNSS-Beobachtungen im Rahmen von PEGASUS mit prozessiert. Neben den Stationen des BKG wurden auch die GNSS-Beobachtungen der LGN-Station FINO-1 mit prozessiert. Bei der GNSS-Station auf der Forschungsplattform FINO-1 (Abb. 2-27) handelt es sich um eine GNSS-Station des LGN. Neben der GNSS-Station wurde auf der FINO-1 vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) ein Radarpegel der BfG installiert (Abb. 2-28). Der Radarpegel erfasst die Seegangparameter und den Wasserstand. Im Rahmen von PEGASUS wurde der geometrische Zusammenhang zwischen dem Nullpunkt des Radarpegels (Oberkannte Flansch) und der Antennenhalterung bzw. dem Antennenreferenzpunkt der GNSS-Antenne durch die BfG bestimmt (Abb. 2-29). Bei der FINO-1 handelt es sich analog zum Unterfeuer Dwarsgat oder dem Leuchtturm Alte Weser um eine Stahlstruktur. An diese Struktur wurden sowohl die GNSS-Station des LGN und der Radarpegel fest montiert. Die geometrische Beziehung zwischen dem Nullpunkt des Radarpegels und der GNSS-Antenne wird daher als konstant angesehen (www.fino-offshore.de, 2009).



**Abb. 2-26:** Standorte von GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht



**Abb. 2-27:** Forschungsplattform FINO-1 (BSH)



Abb. 2-28: Radarpegel (links) und GNSS-Station (rechts) auf der FINO-1

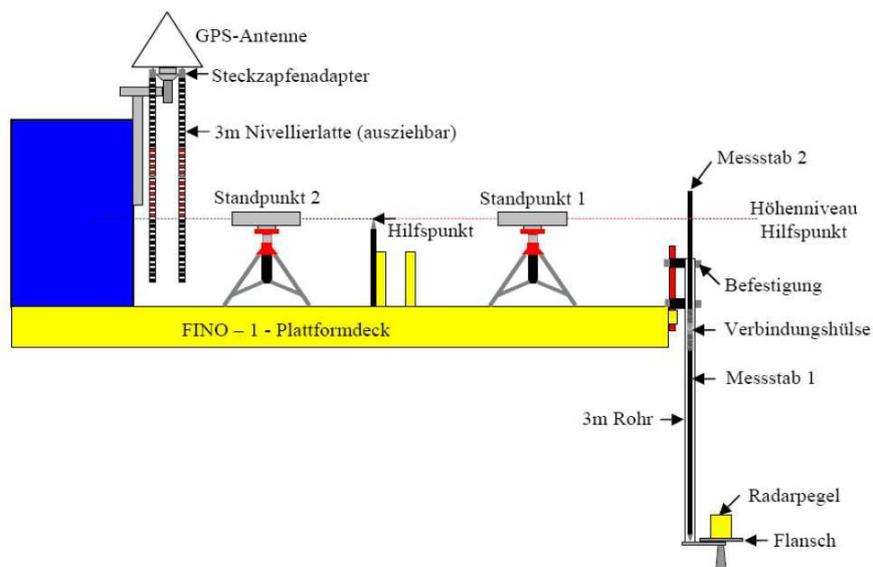


Abb. 2-29: Bestimmung der Höhendifferenz zwischen dem Nullpunkt des Radarpegels und der GNSS-Antenne

## Einbindung von GREF-Stationen des BKG

Teile des GREF Referenznetzwerkes des BKG befinden sich in unmittelbarer Nähe von WSV-Pegeln (Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, 2009). Die Beobachtungsdaten der Stationen sind im Internet verfügbar und wurden im Rahmen von PEGASUS mit ausgewertet. Es existiert eine Verwaltungsvereinbarung zwischen der BfG/WSÄ und der BKG wonach regelmäßige Kontrollen der Höhenlagen und Anschlussmessungen zwischen den Pegeln und den ARP der BKG-Stationen durchgeführt werden. Diese Stationen sind zwar nicht direkt auf den Pegelanlagen installiert, jedoch kann aufgrund der regelmäßigen Bestimmung der Höhendifferenzen die geometrische Beziehung zwischen der GNSS-Station und den Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkten als bekannt angenommen werden.



**Abb. 2-30:** GREF-Station Borkum (Quelle: BKG)



**Abb. 2-31:** GREF-Station Helgoland (Quelle BKG)



**Abb. 2-32:** GREF-Station Hörnum 2 (Quelle: BKG)

## 2.2 Auswertung der gesammelten Beobachtungsdaten

### 2.2.1 Einbindung von Beobachtungsdaten und Produkten anderer Einrichtungen

Um den wissenschaftlichen Anspruch zu erfüllen, ist es nötig, die GNSS-Stationen in übergeordnete, möglichst globale Referenzrahmen (IGS05) einzubinden. Für die Prozessierung sind daher neben den Beobachtungsdaten der GNSS-Pegelstationen auch die

Beobachtungsdaten und Produkte des IGS nötig. Ziel von PEGASUS ist ein Höhenmonitoring von GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht. Zielgröße sind somit die Höhen der Antennenreferenzpunkte der GNSS-Antennen auf den Pegelstationen und in Verbindung mit den Höhendifferenzen zu den Pegelfest/Pegelnulppunkten auch die Höhen der Pegelnulppunkte. Die GNSS-Pegelstationen sind daher als Neupunkte anzusehen sind. In Abb. 2-33 ist die Lage der verfügbaren GNSS-Pegelstationen dargestellt. Bei den Stationen handelt es sich um die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Pegelstationen mit Ausnahme der GNSS-Pegelstationen Büsum und Dagebüll. Diese Stationen wurden erst gegen Ende des Projektes installiert, wodurch eine Auswertung nicht mehr möglich war.



Abb. 2-33: Zwischen September 2008 und März 2009 frei verfügbare GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht

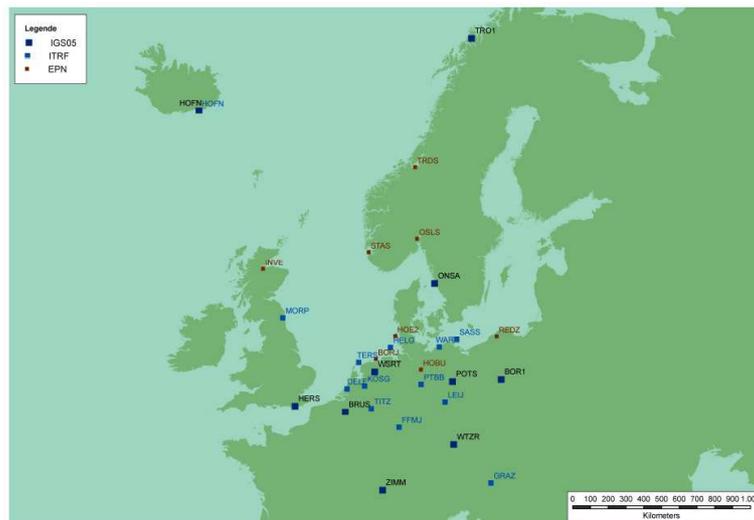
Die umliegende GNSS-Stationen des IGS (Reference frame sites (Tabelle 2-3) und andere IGS-Stationen) und des EPN werden als Referenzstationen genutzt bzw. als Kontrollpunkte mit prozessiert (Abb. 1-2). Die Beobachtungen und Produkte des IGS/EUREF sind im Internet für wissenschaftliche Anwendungen frei verfügbar, wobei innerhalb des IGS alle Beobachtungsdaten und GNSS-Produkte von drei Datenzentren bereitgestellt werden. Darüber hinaus hält das BKG auf seinem FTP-Server Beobachtungsdaten von IGS und EPN-Stationen vor. Aufgrund der Masse an Daten wurde im Rahmen von PEGASUS Skripte entwickelt, die einen automatischen FTP-Zugriff auf die Beobachtungen und Produkte realisieren. Im Rahmen von PEGASUS wurden die in Tabelle 2-2 dargestellten Quellen genutzt.

**Tabelle 2-2:** Datenquellen für GNSS-Beobachtungsdaten und GNSS-Produkte

Daten	Quelle
GNSS-Beobachtungsdaten (komprimiert) des GNSS-Beobachtungsdaten (komprimiert) des EPN	IGS ftp://igs.bkg.bund.de/IGS ftp://igs.bkg.bund.de/IGS
Uhrenparameter des IGS Präzise Bahndaten des IGS Erdorientierungsparameter IGS Wochenlösungen des IGS05	ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/orbits ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/orbits ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/orbits ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/orbits
Ionosphärenkarten für Europa	ftp://ftp.unibe.ch/BSWUSER50/ATM

**Tabelle 2-3:** Referenc frame sites des IGS05 im Bereich Europa

Abkürzung	Station	DOMES-Nr.
BOR1	Borowiec	12205M002
BRUS	Brüssel	13101M004
HERS	Herstmonceaux	13212M007
HOFN	Hoefn	10204M002
MORP	Morpeth	13299S001
ONSA	Onsala	10402M004
POTS	Potsdam	14106M003
TRO1	Tromsö	10302M006
WSRT	Westerbork	13506M005
WTZR	Wetzell	14201M010
ZIMM	Zimmerwald	14001M004



**Abb. 2-34:** IGS-, ITRFG- und EPN-Stationen im Bereich der Nordsee

## 2.2.2 Aufbereitung der Beobachtungsdaten

### a) Beobachtungsdaten und Qualitätscheck

Die Beobachtungsdaten des IGS und des EPN liegen in 24h Blöcken mit einer Loggingrate von 30s vor. Aus technischen Gründen wurden die Beobachtungsdaten der BfG-Stationen alle 6h auf den FTP-Server der BfG übertragen. Im Rahmen der Vorprozessierung wurden

- die mit dem Hatanaka Verfahren komprimierten RINEX-Daten entpackt
- die 6h-Blöcke der Beobachtungs- und Navigationsfiles zu einem Tagesblock zusammengefügt
- die Loggingrate auf 30s herabgesetzt
- die Header-Daten überarbeitet
- die Beobachtungsdaten einem TEQC<sup>1</sup> Qualitätscheck unterzogen.

Neben statistischen Angaben, wie etwa der Gesamtanzahl der erfassten Beobachtungen, der Aufzeichnungsrate, der Beobachtungsdauer oder der Gesamtzahl der Satelliten wurden noch weitere Angaben ermittelt. In den Abb. 2-35 und Abb. 2-36 sind die Anzahl der Beobachtungsdaten der ausgewerteten BKG-, BfG und IGS-Stationen dargestellt. Mit Ausnahme der Station FINO-1 handelt es sich bei allen GNSS-Pegelstationen um kombinierte GPS/GLONASS Empfänger. Im Gegensatz zu reinen GPS-Empfängern registrieren diese Empfänger auch GLONASS-Beobachtungen, wodurch die Anzahl der erfassten Beobachtungsdaten weitaus höher ist.

Neben der Anzahl der Beobachtungen wurden von TEQC mittlere Tägliche MP1 und MP2-RMS Werte berechnet. Diese sind von größerem Interesse, da sie als ein Maßstab für aufgetretene Mehrwegeeffekte auf der L1- und der L2-Frequenz angesehen werden können. Es handelt sich dabei Multipath RMS Werte, die aus den Pseudoranges und den Phasenmessungen abgeleitet werden ((Rocken C., Meertens C. u.a., 2002)). Auf den Berechnungsalgorithmus wird in diesem Bericht nicht näher eingegangen.

In den Abbildungen Abb. 2-37 und Abb. 2-38 werden die täglichen gemittelten MP1- und MP2-RMS Werte dargestellt. Anhand dieser Abbildungen wird deutlich, dass die BfG-Stationen gegenüber den BKG-Stationen höhere Mehrwegeeffekte aufweisen. Eine vermutliche Ursache liegt in den großen Flächen, die in der unmittelbaren Umgebung der

GNSS-Antennen vorhanden sind. Besonders betroffen ist die GNSS-Station auf dem Leuchtturm Alte Weser. Auf dieser Station befinden sich in unmittelbarer Umgebung der GNSS-Antenne große Metallreflektoren, die als eine Ursache für die sehr starken Mehrwegeeffekte angesehen werden können.

Darüber hinaus macht berechnet TEQC Angaben über das Verhältnis von Beobachtungen und Phasensprüngen. In Abbildung Abb. 2-39 sind entsprechende Angaben für die BKG-Stationen und die BfG-Stationen dargestellt. Anhand dieser Abbildung wird ersichtlich, dass im Beobachtungszeitraum auf den BfG-Stationen wesentlich mehr Phasensprünge aufgetreten sind.

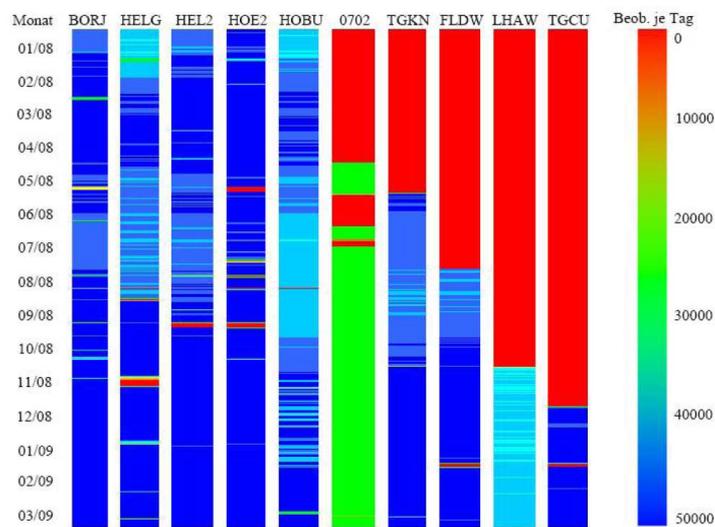


Abb. 2-35: Anzahl der Beobachtungen auf den BKG- und BfG-Stationen

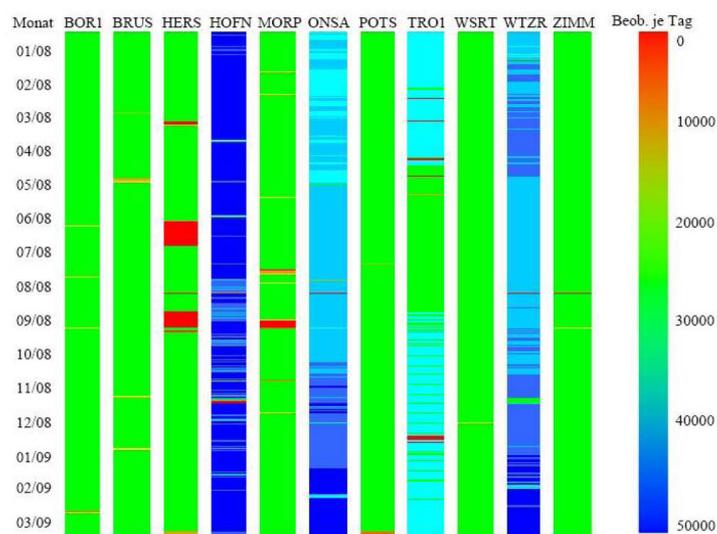


Abb. 2-36: Anzahl von Beobachtungen der Reference frame sites des IGS im Untersuchungsgebiet

<sup>1</sup> TEQC: ein frei verfügbares Analysetool für GNSS-Beobachtungsdaten

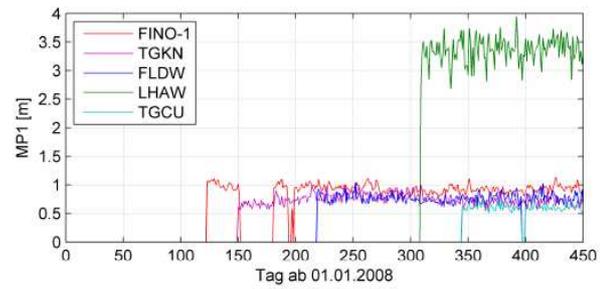
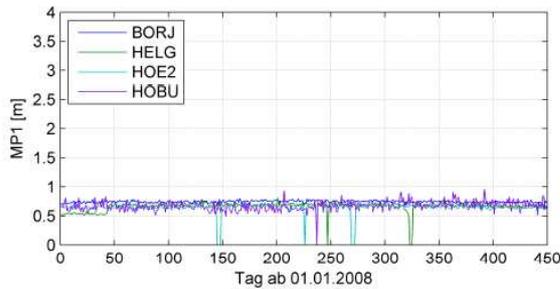


Abb. 2-37: MP-1 Werte der BKG- und BfG-Stationen

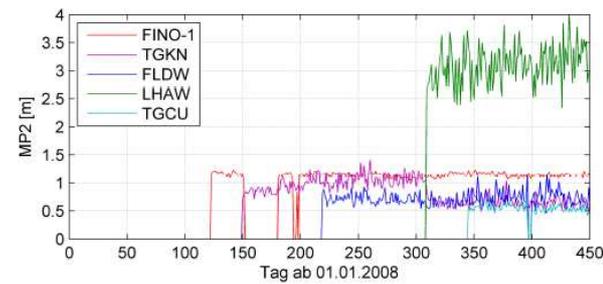
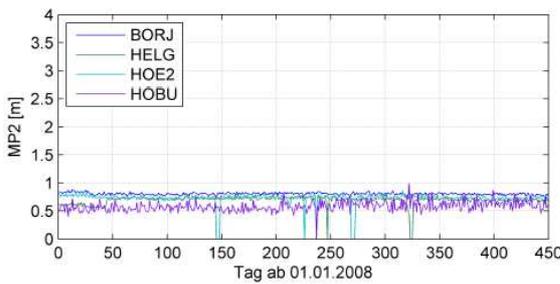


Abb. 2-38: MP-2 Werte der BKG und BfG-Stationen

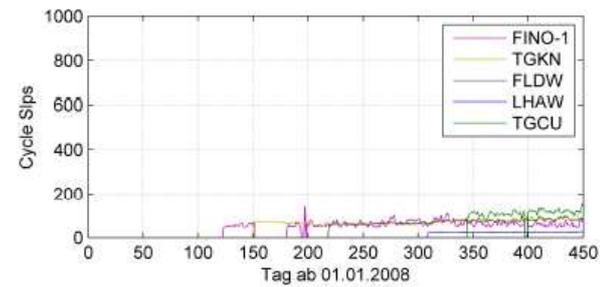
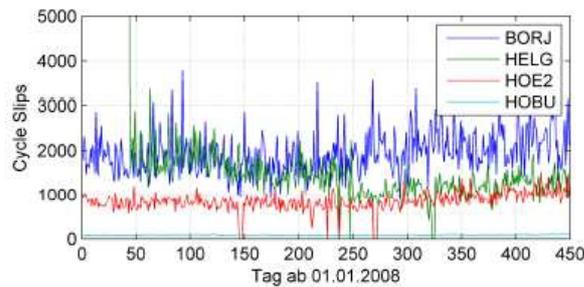


Abb. 2-39: Verhältnis zwischen Beobachtungen und Phasensprüngen

## 2.2.3 Prozessierung der GNSS-Daten

### a) Prozessierung der Koordinaten im IGS05

Die Prozessierung der Beobachtungsdaten erfolgte mit der Bernese Software 5.0. Bei dieser Software handelt es sich um eine wissenschaftliche Auswertesoftware, die eine Vielzahl von Eingangsparametern bzw. Eingangsinformationen verarbeitet. Dies beinhaltet u.a. Angaben zu Problemen und Informationen von Satelliten, Planetenephemeriden, Ozeangezeiten, Nutations- und Polmodelle u.v.m. Für die Prozessierung des GNSS-Netzwerkes wurden die in Tabelle 2-2 dargestellten Produkte / Beobachtungsdaten genutzt (Dach R., Hugentobler U., u.a. 2007). Vereinfacht lässt sich der Rechenablauf wie folgt darstellen:

- 1) Vorauswertung mit TEQC
- 2) Berechnung der Näherungskoordinaten von IGS Stationen  
Neben den Pegelstationen wurden auch alle weiteren verfügbaren GNSS-Stationen des EPN und des IGS mit prozessiert. Die Koordinatenangaben der IGS-Stationen beziehen sich auf die Epoche 2000. Aufgrund der Plattentektonik und anderer tektonischer Einflüsse wurden diese Koordinaten nicht als konstant angesehen. Neben den eigentlichen Koordinaten bietet der IGS auch Änderungsraten der Koordinaten an. Unter Nutzung der Änderungsraten wurden die Koordinatenangaben der Epoche 2000.0 in die jeweils benötigte Epoche überführt (z.B. GPS-Woche 1513 = 04.01.2009-10.01.2009) und als Näherungskoordinaten in die Prozessierung eingeführt.
- 3) Berechnung von präzisen Orbits unter Nutzung der präzisen Bahndaten und Erdorientierungsparameter des IGS  
Der IGS prozessiert eine wöchentliche Koordinatenlösung aller IGS-Stationen, die Grundlage für die ebenfalls vom IGS bereitgestellten Bahndaten bzw. Erdorientierungsparameter sind. Unter Nutzung dieser Informationen wurden durch die Bernese Software präzise Orbits berechnet und in die spätere Prozessierung eingeführt.
- 4) Importieren der RINEX-Beobachtungsdaten aller Stationen  
Alle GNSS-Rohbeobachtungen liegen primär im RINEX-Format vor. Für die Prozessierung wurden diese von der Bernese Software in ein geeignetes binäres Format überführt. Im Rahmen des Rohdatenimports erfolgte eine Kontrolle, ob alle nötigen Informationen (Empfängertyp, Antennentyp, Antennenphasenmodell etc.) vorhanden sind. Darüber hinaus wurden die RINEX-Daten auf Phasensprünge untersucht.
- 5) Code-Lösung  
Im Rahmen der Prozessierung erfolgte in einem ersten Schritt die Berechnung einer Codelösung und darauf aufbauend eine Code-basierte Uhrensynchronisation.
- 6) Erstellung und Prozessierung (Phase) von Single-Differenzen

Dieser Code-Lösung schloss sich die Bildung von Basislinien bzw. die Bildung von Singledifferenzen an. Darauf folgte eine Vorprozessierung der Singledifferenzen zur Aufdeckung weiterer Phasensprünge.

7) Koordinatenschätzung mit Bestimmung von Residuen Eliminierung schlechter Beobachtungen

Anschließend erfolgte eine erste Parameterschätzung (Float-Lösung) mit der Bildung von Residuen. Unter Nutzung dieser Residuen wurden schlechte Beobachtungsdaten markiert, um deren Einfluss auf das Gesamtergebnis bei späteren Prozessierungsschritten zu eliminieren. Zur Kontrolle schloss sich eine weitere Parameterschätzung ohne die markierten Beobachtungen an.

8) Lösung der Mehrdeutigkeiten

Nach der automatischen Auswahl der Basislinien erfolgt die endgültige Mehrdeutigkeitslösung. Als Lösungsstrategie wurde eine „Quasi Ionosphere-Free“ (QIF) angewendet.

9) Schätzen von Troposphärenparametern und Aufstellung der Normalgleichungen

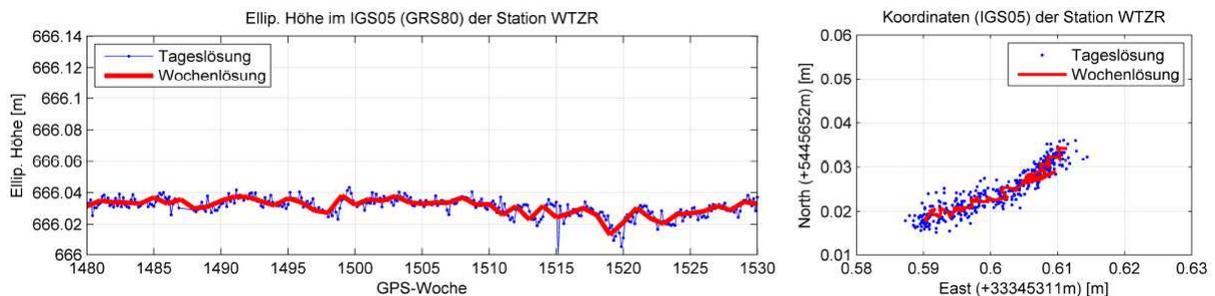
Nach der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten erfolgte eine endgültige Parameterschätzung (L3-Lösung) auf Basis von Doppeldifferenzen

10) Kombination der Normalgleichungssysteme von allen Tagen einer Woche zur Wochenlösung

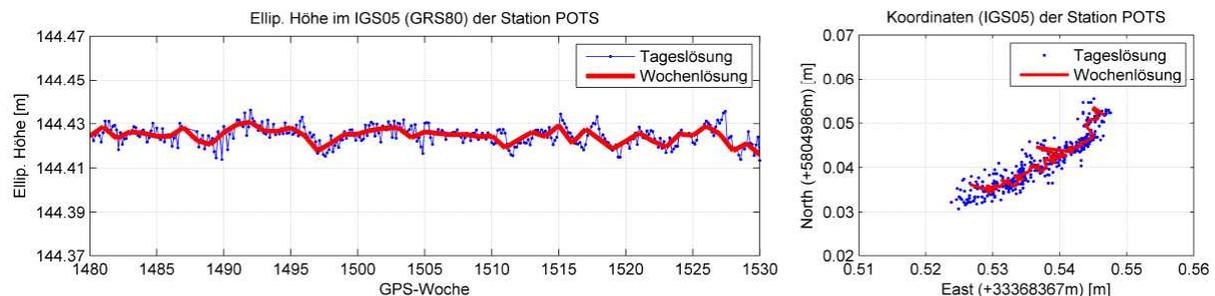
Die einzelnen Tageslösungen wurden zu Wochenlösungen kombiniert. Die Datumsfestlegung erfolgte über eine „Minimum constraint solution“, wobei die Reference frame sites des IGS (Abb. 1-1 bzw. Tabelle 2-3) als Bezugsstationen genutzt wurden. Bei den eingeführten Koordinaten handelte es sich um die Ergebnisse der jeweiligen Wochenlösung des IGS im IGS05. Durch diese Lösungsstrategie blieb die innere Geometrie der GNSS-Prozessierung erhalten und es erfolgte eine Lagerung in dem für die jeweilige GPS-Woche prozessierten IGS05 Reference-Frame.

Primäre Ergebnisse sind dreidimensionale Koordinaten im IGS05 Reference-Frame. Im Rahmen des Projektes wurden Skripte geschrieben, die eine automatische Umrechnung in ellipsoidische bzw. UTM-Koordinaten ermöglichten. Darüber hinaus wurden die

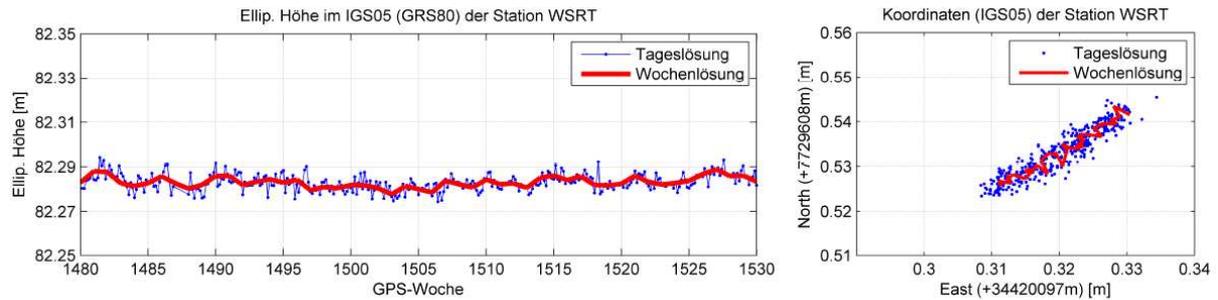
Wochenlösungen automatisch zu Zeitreihen zusammengefasst, deren grafische Darstellung mithilfe von Matlab realisiert wurde. Exemplarisch sind die Ergebniszeitreihen für die IGS Reference frame sites Wettzell (WZTR), Potsdam (POTS) und Westerbork (WSRT) in den Abb. 2-40 - Abb. 2-42 dargestellt. Der dargestellte Zeitraum zwischen GPS-Woche 1480 und 1530 entspricht in etwa einem Jahr (18.05.2008 - 09.05.2009). Basierend auf den Koordinatenlösungen der IGS Reference Frame Sites wurden die Koordinaten der GNSS-Pegelstationen abgeleitet. Exemplarisch sind die Zeitreihen der Stationen FINO-1 (Abb. 2-43) und Pegel Knock (Abb. 2-44) abgebildet. Neben den Höhenänderungen ist wird aus den Lageänderungen die Kontinentaldrift von Europa ersichtlich. Die Lagekoordinaten aller erfassten Stationen verändern sich im Verlauf eines Jahres um etwa den gleichen Betrag (etwa 3cm/a) bzw. in die gleiche Richtung (Richtung Nord-Ost). Im Gegensatz zu Realisierungen des ETRS89 gibt es im IGS05 keine Vorgabe, wonach die Bewegungen des europäischen Teil der Eurasischen Platte im Mittel null sein sollen. Die Kontinentaldrift muss sich demnach in den Koordinatenänderungen widerspiegeln.



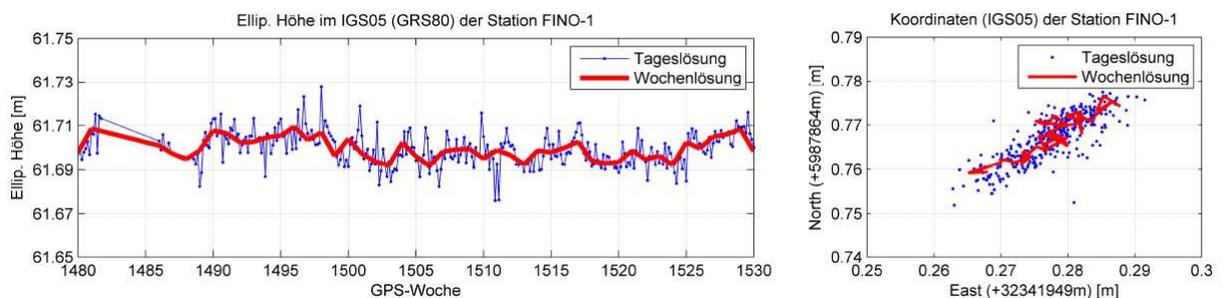
**Abb. 2-40:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station Wettzell



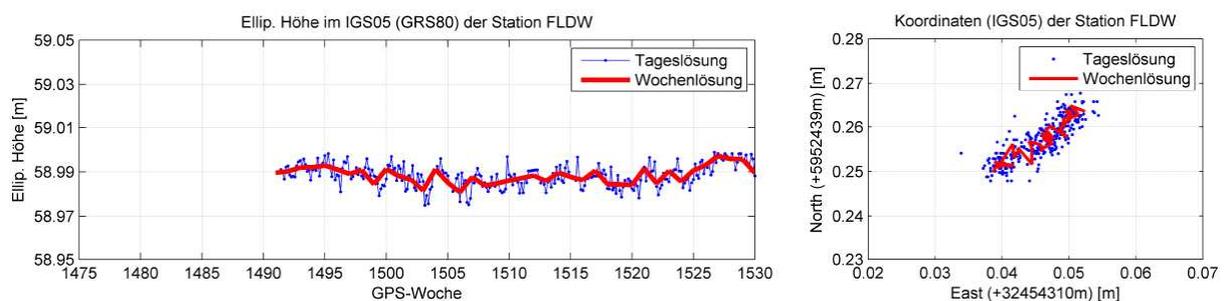
**Abb. 2-41:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station Potsdam



**Abb. 2-42:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station Westerbork



**Abb. 2-43:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station FINO-1



**Abb. 2-44:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (IGS05/GRS80) für die Station Unterfeuer Dwarsgat

## 2.2.4 Überführung in das amtliche Höhensystem

Die Koordinatenergebnisse im IGS05 sind für Aussagen zur amtlichen Höhe nur bedingt aussagekräftig. Beim IGS05 handelt es sich um ein globales Referenzsystem bzw. dessen Realisierung. Die Bewegungsanteile der Eurasischen Platte sind in den Koordinatenänderungen mit enthalten. Typischerweise werden resultierenden Koordinatenschätzungen als dreidimensionale kartesische Koordinaten dargestellt. Bei den daraus abgeleiteten ellipsoidischen Koordinaten handelt es sich um rein geometrische und damit nicht um physikalische Höhen.

Für eine Überführung in ein physikalisches bzw. amtliches Höhensystem sind Schwerefeldmodelle erforderlich, die in Form von Höhenanomalien bzw. Geoidundulationsmodellen vorliegen. Eingangsgrößen entsprechender Schwerefeldmodelle

sind Koordinatenangaben im Referenzsystem ETRS89 bzw. dessen Realisierung. Um die Höhenanomalien der Schwerefeldmodelle nutzen zu können, müssen die vorliegenden Ergebnisse der Prozessierung (bzgl. IGS05) in das ETRS89 überführt werden. Passpunkte der Überführung sind die GREF-Stationen Borkum (BORJ), Helgoland (HELG), Hörnum (HOE2) und Hohenbündorf (HOBU), deren IGS05 Koordinaten im Rahmen der Prozessierung bestimmt und deren ETRS89-Koordinaten wöchentlich durch das BKG ermittelt und bereitgestellt werden.

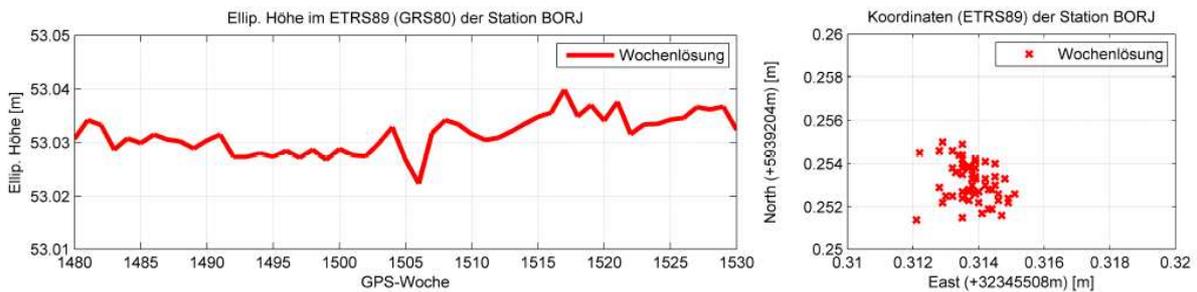


Abb. 2-45: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Borkum (BORJ, Quelle: BKG)

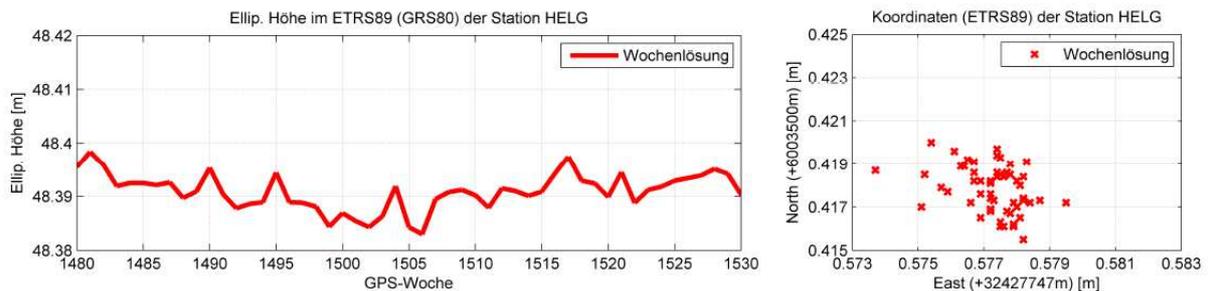


Abb. 2-46: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Helgoland (HELG, Quelle: BKG)

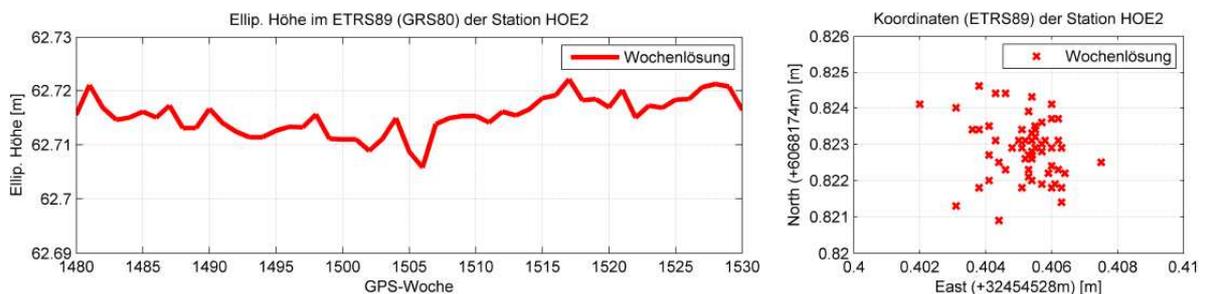
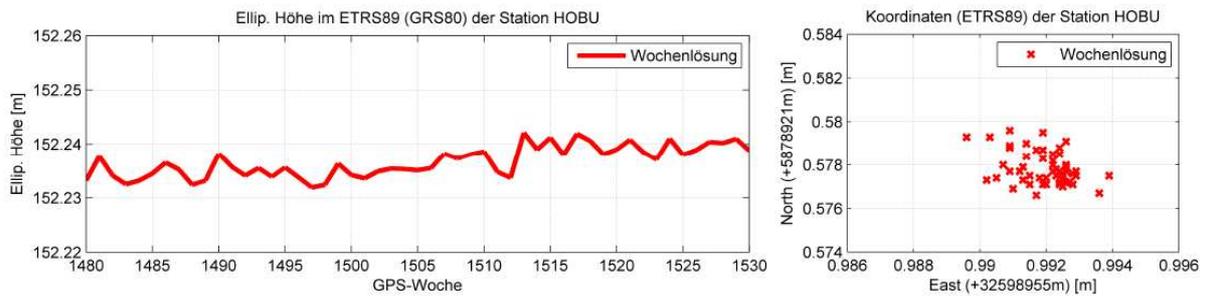


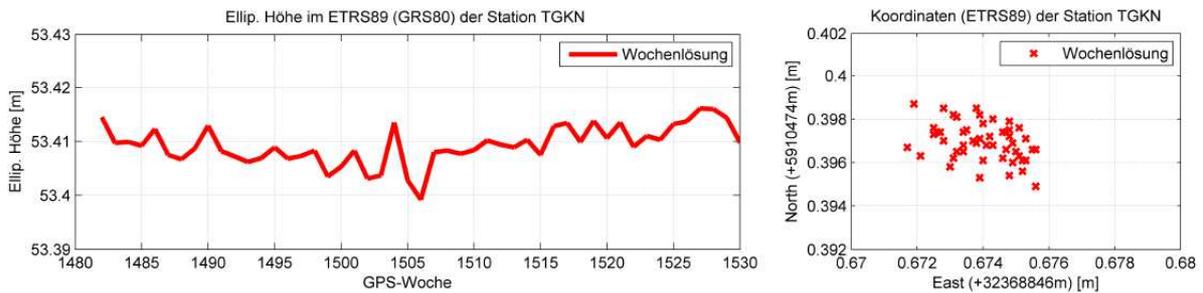
Abb. 2-47: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Hörnum (HOE2, Quelle: BKG)



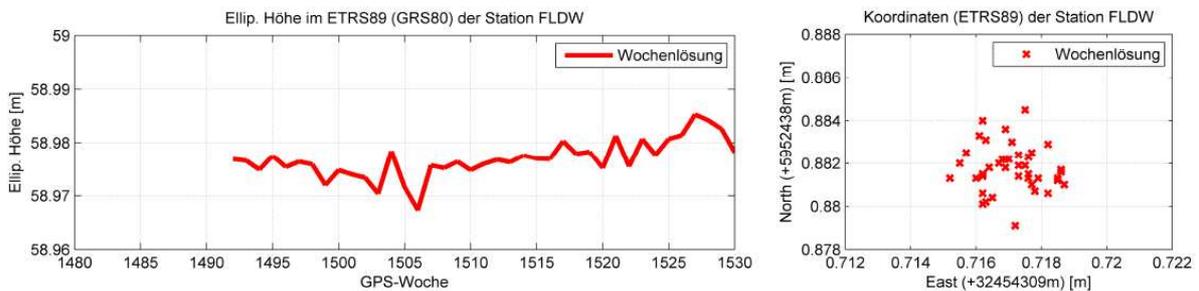
**Abb. 2-48:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Hohenbünsdorf (HOBU, Quelle: BKG)



**Abb. 2-49:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Pegelstation FINO-1 (0702)



**Abb. 2-50:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Pegelstation Knock (TGKN)



**Abb. 2-51:** Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Unterfeuer Dwarsgat (FLDW)

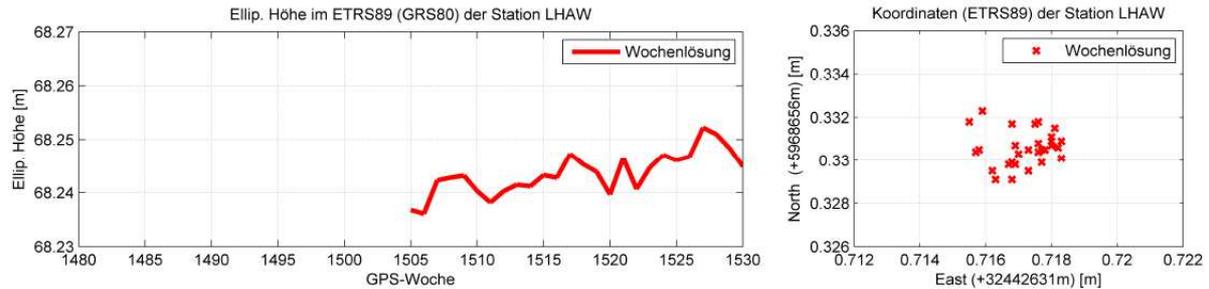


Abb. 2-52: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Leuchtturm Alte Weser (LHAW)

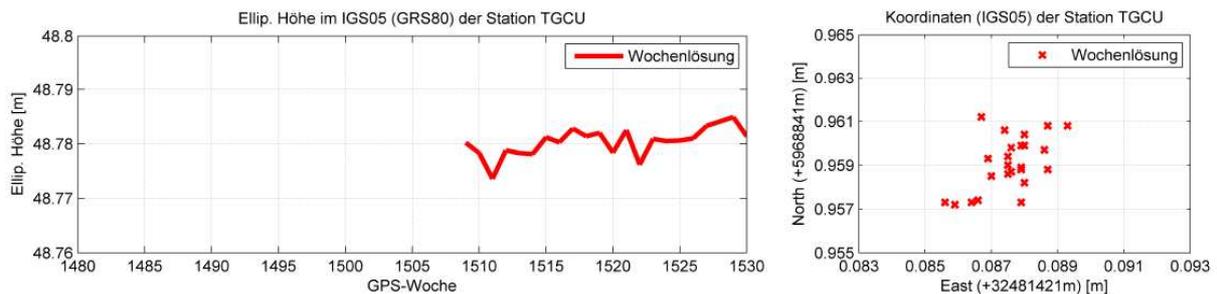


Abb. 2-53: Zeitreihe der Koordinatenlösung (ETRS89/GRS80) für die Station Cuxhaven-Steubenhöft (TGCU)

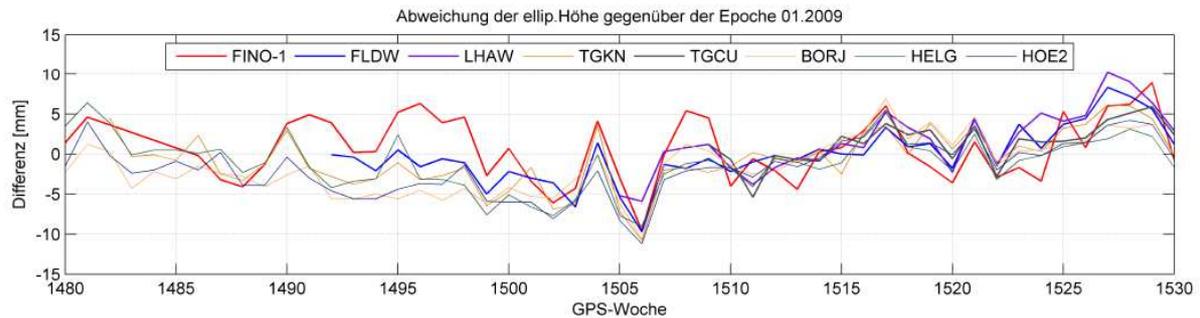
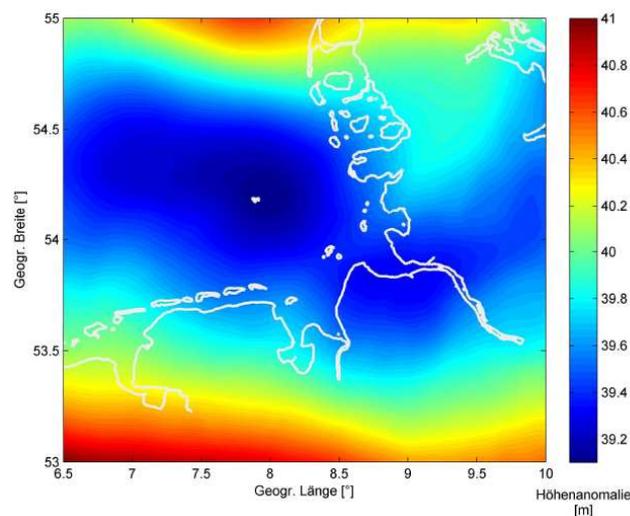


Abb. 2-54: Differenzen der ellipsoidischen Höhen gegenüber der Epoche 01.2009

Unter Nutzung der wöchentlichen Ergebnisse erfolgte je GPS-Woche eine Transformation der IGS05 Koordinaten in das ETRS89. Als Transformationsparameter wurden drei Translationen und drei Rotationswinkel geschätzt. Das Referenzsystem ETRS89 ist per Definition mit dem Referenzsystem ITRS zur Epoche 1989.0 identisch. Dies beinhaltet auch die Definitionen wie etwa Maßstab oder Ursprung (Habrich H, 2004). Aus diesem Grund wurde kein Maßstabsfaktor mit geschätzt. Die sich ergebenden Koordinatenzeitreihen im ETRS89 sind in den Abbildungen Abb. 2-45 - Abb. 2-53 dargestellt.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass die sich ergebenden Höhen Schwankungen unterworfen sind. Für weitere Auswertungen wurden die resultierenden Höhen der Epoche 01.2009 (Mittelwert der GPS-Wochen 1512-1516, Januar 2009) genutzt. Gegenüber diesem Wert ergeben sich die in Abbildung Abb. 2-54 dargestellten Abweichungen im Bereich von etwa  $\pm 10\text{mm}$ .

Für die Überführung ellipsoidischer Höhen (bzgl. ETRS89) in physikalische Höhen (DHHN92) existieren Schwerefeldmodelle bzw. in diesem Fall Höhenanomalieemodelle. In diesem Fall wurde für die Überführung das German Combined (Quasi)Geoid 2005 in der Ausführung 2008 (GCG05/2008) genutzt. Bei dem GCG05 handelt es sich um eine Kombinationslösung des BKG und des Instituts für Erdmessung der Universität Hannover (IfE-Hannover), bei der alle verfügbaren Datensätze (GPS/Nivellement, Schwere, Globale Schweremodelle, Topografie usw.) neu prozessiert wurden. BKG und IfE Hannover nutzten jeweils unterschiedliche Berechnungsansätze (Denker, H, 2006) auf die im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht näher eingegangen wird. Das endgültige GCG05 stellt eine Kombination aus beiden Berechnungsansätzen dar. In der Version ersten Version des GCG05 (2005) waren für das Küstenvorfeld keine Höhenanomalien verfügbar. Seit 2008 existiert eine erweiterte Version GCG05, die auch das Küstenvorfeld mit abdeckt (Abb. 2-55).



**Abb. 2-55:** German Combined (Quasi)Geoid 2005 - Ausführung 2008

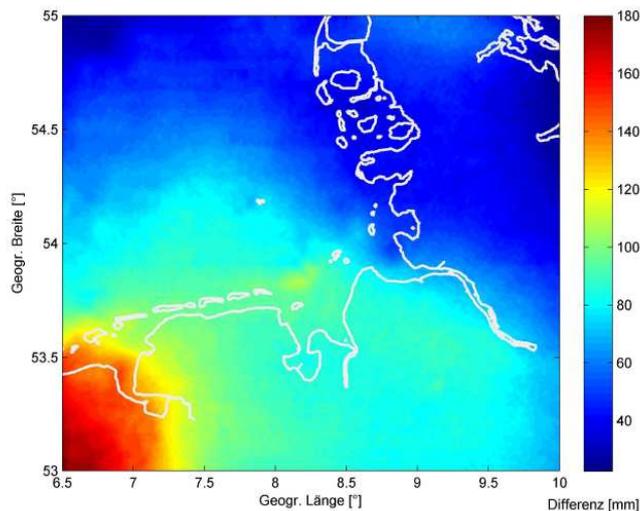


Abb. 2-56: Differenzen zwischen dem EGG97 und dem GCG05 (Ausführung 2008)

Das GCG05 stellt eine Verbesserung gegenüber dem früher genutzten EGG97 dar. Die Differenzen zu dem EGG97 Modell sind in Abb. 2-56 dargestellt. Aus dem Modell ergeben sich für die Pegelstandorte die in Tabelle 2-4 dargestellten Höhenanomalien und resultierende Höhen der Antennenreferenzpunkte. Theoretisch sollten aus einer Kombination der ellipsoidischen Höhen im ETRS89 und dem Anomalienmodell GCG05 quasi amtliche Höhen im Höhenstatus 160 resultieren (Tabelle 2-4).

Tabelle 2-4: Ellip. Höhen, Höhenanomalien des GCG05 und resultierende Höhenangaben für die GNSS-Pegelstationen (ARP)

GNSS-Station	Ellipsoidische Breite [°]	Ellipsoidische Länge [°]	Ellip. Höhe (01.2009) [m]	Höhenanomalie CGC05/08 [m]	Res. Höhe im HST 160 [m]
BORJ	53,57890476	6,66642618	53,033	40,144	12,889
HELG	54,17447847	7,89308789	48,392	39,119	9,273
HOE2	54,75874919	8,29338423	62,717	40,146	22,571
TGKN	53,32716825	7,03067838	53,410	40,480	12,930
FLDW	53,71862376	8,30762147	58,977	39,622	19,355
LHAW	53,86321999	8,12765746	68,242	39,495	28,747
TGCU	53,86772615	8,71746166	48,779	39,336	9,443
FINO-1	54,01482832	6,58775254	61,688	39,587	22,101

Bei dem Höhenstatus 160 handelt es sich um Normalhöhen im Deutschen Haupthöhensystem DHHN92. Aufgrund der Wiedervereinigung Deutschlands 1990 wurde ein einheitliches Haupthöhennetz erforderlich. Unter Nutzung des Messmaterials früherer großräumiger Messkampagnen und neuen Verbindungsmessungen zwischen den alten und neuen Bundesländern wurde das DHHN92 berechnet. Im Bereich der Deutschen Bucht handelt es

sich dabei um eine Neuprozessierung des Messmaterials früherer Messkampagnen (insbesondere des DHHN85). Daraus resultiert, dass aktuelle Höhenangaben im Höhenstatus 160 auf Messdaten aus den achtziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts basieren.

Zwischen den dem DHHN92 zugrunde liegenden Messkampagnen und heute haben sich die realen Höhen aufgrund von vertikalen Krustenbewegungen verändert. Bei Nutzung von permanenten GNSS-Systemen und Quasigeoidmodellen ergeben sich reale Höhen, die im Widerspruch zu den amtlichen (auf älteren Messdaten basierenden) Höhenangaben stehen. Die Widersprüche sind in der Tabelle 2-5 dargestellt. Die resultierenden Widersprüche ergeben sich aus der Summe aller Fehler der GNSS-Höhenbestimmung, der Überführung in das ETRS89 bzw. Restfehlern des GCG05 und realen Höhenänderungen gegenüber der Referenzepoche. Die Differenzen sind dabei nicht gleichmäßig sondern variieren je nach Ort und den dort auftretenden rezenten Krustenbewegungen.

Nach der Transformation der Ergebnisse in das ETRS89 und Überführung in physikalische Höhen besteht noch die Möglichkeit, unter Nutzung von Restanpassungen die Höhenangaben in einen amtlichen Höhenstatus zu überführen. Über Passpunkte, deren Koordinaten dann ebenfalls mit GNSS-Systemen bestimmt werden müssten, ließe sich unter Nutzung des GCG05 Widersprüche zwischen den amtlichen Höhenangaben und den Mithilfe der GNSS-Messung ermittelten Höhenangaben ermitteln. Über eine flächenhafte Interpolation bzw. eine Modellierung bivariate Polynome n-ten Grades könnten die Widersprüche flächenhaft modelliert und damit eine Überführung in amtliche Höhenangaben ermöglicht werden. In diesem Fall würden reale Messungen in das amtliche System „gepresst“, wodurch Informationen über Höhenänderungen verloren gehen würden.

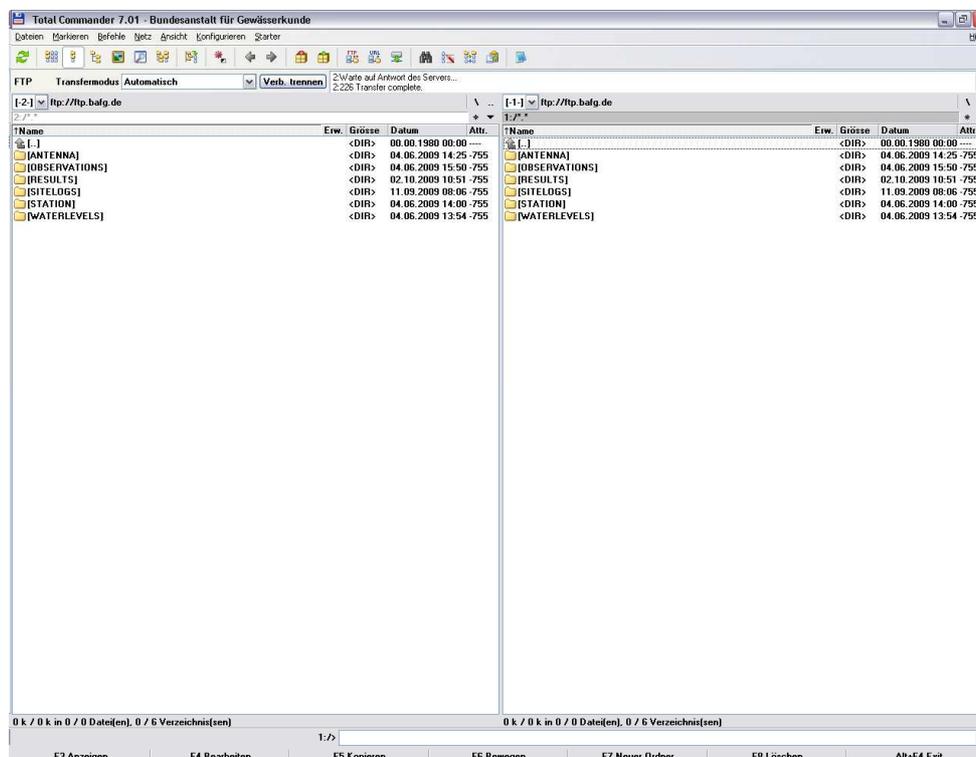
Eine Lösung für das Problem stellt die derzeit laufende Neumessung des Deutschen Haupthöhennetzes dar. Im Zuge dieser Kampagne wurden auf sogenannten geodätischen Grundnetzpunkten längere GNSS-Beobachtungen (mind. 3x 24h) durchgeführt. Darüber hinaus wurden diese Grundnetzpunkte zeitnah in die DHHN-Erneuerungskampagne eingebunden. Für diese Punkte ständen demnach nahezu zeitgleich bestimmte Koordinaten im IGS05, im ETRS89 und Höhenangaben in der sich aus der Neumessung ergebenden Realisierung des DHHN zur Verfügung. Es wäre damit möglich, über diese Punkte eine Restanpassungsfläche zu modellieren, die einen Übergang von IGS05/ETRS89/GCG05 Lösungen in die neue Realisierung des Deutschen Haupthöhennetzes ermöglicht.

**Tabelle 2-5:** Abweichungen der ETRS89/GCG05 Lösung zur amtlichen Höhe

GNSS-Station	amtl. Festpunkt	dH GNSS-Station - amtl. Festp. [m]	ETRS89/GCG05 Höhenlösung [m]	amtl. Höhen (Messepoche) [m]	Differenz [mm]
BORJ	2306/00103	-8,699	4,190	4,164 (1999)	26
HELG	1813/00302	-4,794	4,479	4,465 (2001)	14
HOE2	1215/00114	-19,821	2,751	2,754 (1991)	-3
TGCU	PFP 724/5	-5,924	3,519	3,519 (2008)	0
TGKN	2306/00341	0,000	12,930	12,915 (1999)	15
FLDW	PFP 1	-10,701	8,654	8,640 (2003)	14
LHAW	PFP 1	-19,839	8,908	8,902 (2003)	6
FINO-1	ARP-GNSS	-5,275	16,826		

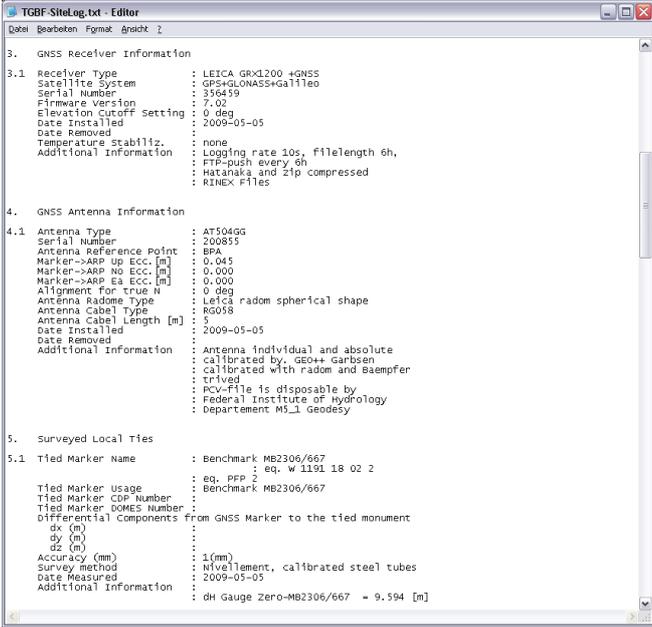
### 2.2.5 Publizierung der Ergebnisse im Internet

Die im Rahmen des Projektes PEGASUS gewonnenen Beobachtungen und Ergebnisse sind auf über den FTP-Server der Bundesanstalt für Gewässerkunde (<ftp://ftp.bafg.de>) für wissenschaftliche Anwendungen zugänglich. Die dafür nötigen Zugangsdaten liegen beim Refereat M5 Geodäsie vor.



**Abb. 2-57:** FTP-Bereich mit den Beobachtungsdaten und Ergebnissen

Die Verzeichnisstruktur orientiert sich der Dateiverwaltung des IGS bzw. von EUREF (Abb. 2-57) . Die aufbereiteten GNSS-Beobachtungsdaten der BfG GNSS-Pegelstationen sind komprimiert nach Jahr und Tag im Jahr sortiert auf dem FTP-Server hinterlegt. Je Tag und Station existiert eine gepackte Beobachtungsdatei (z.B. FLDW3650.09O.Z), die GNSS-Beobachtungen (\*.09O) und Navigationsinformationen von GPS und GLONASS (\*.09N bzw. \*.09G) enthält. Darüber hinaus ist je Station und Tag ein Zusammenfassung in Form einer einfachen ASCII-Textdatei hinterlegt (\*.09S).



```
3. GNSS Receiver Information
3.1 Receiver Type      : LEICA GRX1200 +GNSS
    Satellite System   : GPS+GLONASS+Galileo
    Serial Number      : 356459
    Firmware Version   : 7.02
    Elevation cutoff Setting : 0 deg
    Date Installed     : 2009-05-05
    Date Removed       :
    Temperature Stabiliz. : none
    Additional Information : Logging rate 10s, Filelength 6h,
                          : FTP-push every 6h
                          : Hatanaka and Zip compressed
                          : RINEX Files

4. GNSS Antenna Information
4.1 Antenna Type      : AT504GG
    Serial Number      : 200855
    Antenna Reference Point : BPA
    Marker->ARP Up Ecc. [m] : 0.045
    Marker->ARP No Ecc. [m] : 0.000
    Marker->ARP Ea Ecc. [m] : 0.000
    Alignment for true N : 0 deg
    Antenna Radome Type : Leica radom spherical shape
    Antenna Cable Type  : RG058
    Antenna Cable Length [m] : 5
    Date Installed     : 2009-05-05
    Date Removed       :
    Additional Information : Antenna individual and absolute
                          : calibrated by: GEO++ Garbsen
                          : calibrated with radom and baempfer
                          : trived
                          : PCV-File is disposable by
                          : Federal Institute of Hydrology
                          : Departement M5.1 Geodesy

5. Surveyed Local Ties
5.1 Tied Marker Name  : Benchmark MB2306/667
                          : eq. W 1191 18 02 2
    Tied Marker Usage  : Benchmark MB2306/667
    Tied Marker CDP Number :
    Tied Marker DOMES Number :
    Differential Components : from GNSS Marker to the tied monument
    dx (m)              :
    dy (m)              :
    dz (m)              :
    Accuracy (mm)      : 1(mm)
    Survey method       : Nivellement, calibrated steel tubes
    Date Measured       : 2009-05-05
    Additional Information : dh Gauge Zero-MB2306/667 = 9.594 [m]
```

Abb. 2-58: Ausschnitt aus dem SiteLog-File der GNSS-Pegelstation Borkum-Fischerbalje

Neben den Beobachtungsdateien sind für jede BfG GNSS-Pegelstation Logfiles (\SITELOGS) und Fotos (\STATION) hinterlegt. Diese Logfiles enthalten alle für die Prozessierung nötigen Informationen. Dies beinhaltet neben Ansprechpartner auch die komplette Historie der eingesetzten Empfänger und Antennen und Informationen zur geometrischen Beziehung zwischen den Antennenreferenzpunkten und den Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkten (Abb. 2-58). Die Ergebnisse (\RESULTS) sind ebenfalls nach Jahr und Tag sortiert und enthalten neben den Koordinatenfiles die SINEX-Files und andere Lösungsdateien der Bernese Software.

Die BfG GNSS-Pegelstationen werden auch weiterhin von der BfG betrieben bzw. das Netz wird kontinuierlich weiter ausgebaut. Alle nach Ablauf des Projektes erfassten und auch zukünftig zu erfassenden Beobachtungsdaten bzw. Berechnungsergebnisse werden analog auf den FTP-Server gestellt und damit anderen Nutzern zugänglich gemacht.



## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden sechs Pegelstationen innerhalb der Deutschen Bucht mit permanent arbeitenden GNSS-Stationen ausgerüstet. Es handelt sich dabei um GNSS-Systeme neuester Bauart, die GPS, GLONASS und sobald verfügbar auch Galileo Signale verarbeiten können. Die GNSS-Antennen sind alle einheitlich absolut kalibriert (Roboterkalibrierung bei Geo++) und darüber hinaus wurde bei der Installation versucht, alle derzeit bekannten höhenbeeinflussenden Faktoren weitestgehend zu minimieren. Dies betrifft insbesondere die Setupkalibrierung (Kalibrierung mit Radom, Dreifuß in der Aufbaukonfiguration) und die Montage der Antennen an Orten ohne Reflektoren in der unmittelbaren Umgebung der Antenne (Minimierung von Nahfeldeffekten). Die Fernadministration und Datenübertragung wurde via GPRS in Kooperation mit der IT-Abteilung der BfG und dem DWD realisiert, wobei die Stationen quasi wartungsfrei arbeiten. Alle Beobachtungsdaten wurden bzw. werden an einen zentralen FTP-Server in der BfG übertragen und dort aufbereitet. Die Aufbereitung beinhaltet einen Qualitätscheck, eine Ausdünnung der Beobachtungen auf eine Loggingrate von 30s, eine Zusammenfassung der 6h Blöcke zu einem Tagesblock und eine Bereitstellung der qualifizierten Beobachtungsdaten auf den FTP-Server. Neben den Rohdaten sind weitere Informationen (Beschreibungen, Bilder, Antennenmodelle usw.) an dieser Stelle hinterlegt. Die dort hinterlegten Daten sind wissenschaftlichen Nutzern frei zugänglich, wobei Nutzernamen und Kennwörter über die BfG bezogen werden können.

Die Prozessierung erfolgte in sehr enger Zusammenarbeit mit dem Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut in München (DFGI). Diese Einrichtung trägt wesentlich zu der Realisierung globaler Referenzsysteme bei. Darüber hinaus prozessiert das DFGI einen Teil des TIGA-Netzwerkes (TIGA = Tide GAuge Benchmark Monitoring Project), dessen Aufgabe darin besteht, die Vertikalbewegungen von weltweit verteilten Pegelstationen zu überwachen. Vom DFGI werden dabei über sechzig Stationen im Nord- und Südatlantik prozessiert.

Im Rahmen von PEGASUS erfolgte eine Prozessierung mit der Bernese Software 5.0 unter Nutzung von Produkten des IGS. Neben den Pegelstationen wurden auch verschiedene IGS und EPN Stationen mit eingebunden. Als Lösungsstrategie wurde eine Minimum constraint solution mit den IGS05 Reference Sites als Bezugsstationen gewählt.

Daraus resultierende Koordinatenlösungen der Pegelstationen sind für die Auswertung von Wasserstandszeitreihen nur bedingt geeignet. Für eine Überführung in ein physikalisches (amtliches) Höhensystem wird ein Schwerefeldmodell benötigt. Im Rahmen des Projektes wurde das GCG05 Modell des BKG genutzt. Dieses setzt Koordinaten im ETRS89 voraus. Unter Nutzung der wöchentlichen ETRS89- Koordinatenlösungen des BKG wurden die IGS05 Koordinaten der PEGASUS Stationen FINO-1, TGKN, FLDW, LHAW und TGPU in das ETRS89 System überführt. Mit der für die Koordinate angegebenen Höhenanomalie ergeben sich Höhenangaben im Höhenstatus HST160.

Aufgrund der kurzen Zeitreihe lassen sich im Rahmen von PEGASUS keine Aussagen zu Höhenänderungen treffen. Das Projekt wird im Rahmen des BMVBS-Forschungsvorhaben KLIWAS weiter verfolgt. Im Rahmen von KLIWAS werden weitere GNSS-Pegelstationen installiert und bisherige Auswertungen fortgesetzt.

Literaturverzeichnis:

Augath, W., Broßmann, M., Sudau A.: *Entwickeln einer universellen Methode zur Höhenüberwachung von Küstenpegeln (NN-Sat)*, Abschlussbericht, BMBF-Förderkennzeichen 03K/S005 und 03K/S006; 01.11.1998 – 30.10.2002, Dresden, 2003

Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, *GRAF Integriertes Geodätisches Referenznetz Deutschlands*, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Abteilung Geodäsie, Frankfurt, 2009

Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M., *Manual Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, 01.01.2007

Denker, H, *Deutsches kombiniertes Quasigeoidmodell GCG05*, Institut für Erdmessung (IfE) Leibnitz Universität Hannover, Hannover 2006

Habrigh, H., *Kontinental und global angebundene Referenzsysteme im Vergleich –ETRS versus ITRS*, Vortrag beim Workshop der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie, Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, 08.11.2004

Herring, T., *Detection of GPS station position errors due to instrumentals and environmental effects*, Earth, Atmospheric and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 06.04.08

*Homepage EUREF Permanent Network*, <http://www.epncb.oma.be/>

*Homepage International GNSS Service (IGS)* , <http://igsb.jpl.nasa.gov/>

*Homepage Bundesamt für Kartografie und Geodäsie*, <http://www.bkg.bund.de/>

*Homepage Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee FINO-1*, <http://www.fino-offshore.de>

LAWA und BMV (Hg.), *Stammtext und Anlage C der Pegelvorschrift* , Berlin und Bonn, 1997

Rocken C., Meertens C., Stephens B., Braun J., VanHove T., Perry S., Ruud O., McCallum M., Richardson J., *UNAVCO Academic Research Infrastructure (ARI) Receiver and Antenna Test Report*, 2002

Sudau, A., Weiß, R. *Elevation levels of gauge reference datums, recent vertical crustal movements and water level variations of long periodicity on the German North Sea Coast*, News of the German Coastal Engineering Research Council 8<sup>th</sup> year Edition, Hamburg, 2008

Wanninger L., *Antennenwechsel auf GNSS-Referenzstationen und dadurch bedingte, scheinbare Positionsveränderungen*, Fakultät Forst-, Geo-, Hydrowissenschaften, Fachrichtung Geowissenschaften, Geodätisches Institut TU-Dresden, 14.05.2008, Dresden, 2008

Wanninger, L., Jahn, C.H., Niemeyer, W., Sudau A.: *Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik*

(IKÜS), Abschlussbericht, BMBM-Förderkennzeichen 03KIS055, 03KIS056, 03KIS057, 03KIS058, 01.10.2005 – 30.09.2008, Dresden, 2008