

Satellitengestützte Überwachung der Pegelnullpunkthöhe in der Deutschen Bucht

Von ROBERT WEIß und ASTRID SUDAU

Z u s a m m e n f a s s u n g

Pegelbeobachtungen dienen einer Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen. Je nach Aufgabe werden verschiedene Anforderungen an die Pegel gestellt, wobei die Hauptaufgaben im Bereich der Sicherstellung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt und im Bereich des Küstenschutzes zu suchen sind. In zunehmendem Maße gewinnen die Wasserstandsbeobachtungen Bedeutung für die Klimaforschung (z.B. Meeresspiegelanstieg). Für Analysen langfristiger Wasserstandsänderungen sind neben hochwertigen Wasserstandsbeobachtungen auch geodätische Informationen, insbesondere aber die Höhenlagen der Pegelnullpunkte und deren Änderungen von großem Interesse. Tektonische und anthropogene Einflüsse verursachen Vertikalbewegungen und die Pegel führen diese Bewegung mit aus. Häufig überlagern sich reale Meeresspiegelvariationen und vertikale Landbewegungen, was Fehlinterpretationen zur Folge hat. Um eine Trennung vertikaler Landbewegungen und langfristiger Wasserstandsänderungen zu ermöglichen hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in 2008 damit begonnen, die wichtigsten Pegelstationen mit permanent arbeitenden satellitengestützten Messsystemen (GNSS-Systemen) auszustatten. Durch diese Stationen wird ein kontinuierliches Höhenmonitoring möglich. Damit verbunden sind Referenzierungen der Pegelnullpunkte in einem globalen Höhenreferenzsystem, was eine Voraussetzung für grenzüberschreitende Auswertungen und die Einbindung andere Satellitenbeobachtungen ist. Der folgende Aufsatz befasst sich mit den Grundlagen und der Installation der GNSS-Stationen. Darüber hinaus werden Prozessierung und erste Ergebnisse vorgestellt.

S c h l a g w ö r t e r

Pegel, Pegelnullpunkt, Pegelfestpunkte, GNSS, GNSS@tidegauge, Deutsche Bucht, Höhenmonitoring, Vertikalbewegungen, IGS, EUREF, KFKI, IKÜS, PEGASUS

S u m m a r y

Tide gauges are established and operated to measure the water level of the sea and its variations. These data serve a number of different applications and, depending on the task, the gauges have to meet different requirements. The primary task, however, is to ensure the safety and ease of navigation. During the last few years, the importance of knowledge of water levels for scientific applications has increased in the context of research on climate change (e.g. sea-level rise). Analyses of long-term water-level changes need in addition to reliable water-level observations also geodetic, especially the gauge zero-point and actual vertical land movements information. Tectonic and anthropogenic influences may cause vertical movements of the earth's surface, and the tide gauges that are fixed thereto follow these movements. Frequently, true variations of the water level and vertical land movements superimpose. In order to distinguish vertical land movements and long-term water-level changes, the BfG began in 2008 to equip the most important sea-level gauging stations with permanently working satellite-based measurement systems (GNSS) systems. These stations make continuous sea-level monitoring possible. This action is associated with the referencing of the absolute level-of-zero points in a global height-reference system. This is crucial for transboundary analyses, the integration of other satellite-based sea-level observations, and the monitoring of the sea-level rise. The following article comprises basics and the installation of GNSS sites. In addition, the processing and first results will be presented.

Keywords

Tide gauge, benchmark, gauge datum, GNSS, GNSS@tidegauge, German Bight, beight monitoring, vertical movements, IGS, EUREF, KFKI, IKUES, PEGASUS

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
Schlagwörter	1
Summary	1
Keywords	2
Inhalt.....	2
1. Einleitung.....	2
2. GNSS und Pegel.....	3
2.1 Pegelfest- und Pegelnullpunkt.....	3
2.2 Konzept „GNSS@tidegauge“	6
3. GNSS gestützte Höhenüberwachung der Pegelfestpunkte.....	6
3.1 Stationsaufbau	6
3.2 Geometrische Beziehung zwischen GNSS-System und Pegelnullpunkten.....	9
3.3 Qualität der Beobachtungsdaten	14
3.4 Grundlagen der Referenzsysteme und Koordinaten	16
3.5 Prozessierung der GNSS-Beobachtungen	18
3.6 Koordinatenergebnisse	22
4. Danksagung.....	31
5. Schriftenverzeichnis	31

1. Einleitung

Pegel dienen der Erfassung von Wasserstandsbeobachtungen und damit einer Vielzahl verschiedenster Anwendungen. Die Hauptaufgaben liegen im Bereich der Sicherstellung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt und im Bereich des Küstenschutzes. Aufgrund der in der jüngsten Vergangenheit aufkommenden Klimadiskussion gewinnen Wasserstandsbeobachtungen durch Pegel an Bedeutung, da deren lange Zeitreihen eine wichtige Datengrundlage für die Untersuchungen zum Klimawandel darstellen. Eine Analyse von langfristigen Wasserstandsänderungen setzt neben einer Beurteilung geodätischer Einflüsse auch eine Analyse weiterer, den Wasserstand beeinflussender Faktoren (z.B. hydrologische Änderungen aufgrund von Ausbaumaßnahmen etc.) voraus. Im vierten Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) wird eine Änderung des mittleren globalen Meeresspiegels zwischen 1961-2003 von 1.8 (1.3 - 2.3) mm/Jahr bzw. zwischen 1993 und 2003 ~3.1 (2.4 - 3.8) mm/Jahr angegeben (IPCC, 2007). Bisherige Untersuchungen haben ergeben, dass die vertikale Landbewegungen (WANNINGER et al., 2009) bzw. Variationen der Pegelnullpunkte (WEIB und SUDAU, 2012) Veränderungen der Höhenlage von Pegelnullpunkten in einer vergleichbaren Größenordnung zur Folge haben. Im Rahmen dieser Ausarbeitung werden

ausschließlich geodätische Fragestellungen bearbeitet. Eine Analyse aus Sicht der Hydrologie findet nicht statt. Eine geodätische Aufarbeitung beinhaltet eine Analyse der geometrischen Beziehungen zwischen den Pegelfest- und Pegelnullpunkten sowie Analysen vertikaler Landbewegungen, bzw. scheinbarer Höhenänderungen aufgrund von Systemänderungen amtlicher Höhenreferenzsysteme. Häufig überlagern sich Wasserstandsänderungen und Vertikalbewegungen (Größenordnung tlw. einige mm/Jahr). Nicht erkannte Vertikalbewegungen können als langfristige Wasserstandsänderungen interpretiert werden bzw. reale hydrologische Änderungen werden nicht erkannt (SUDAU und WEIß, 2008).

Um eine Trennung vertikaler Landbewegungen und langfristiger Wasserstandsänderungen zu ermöglichen hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in 2008 damit begonnen, die wichtigsten Pegelstationen mit permanent arbeitenden satellitengestützten Messsystemen (GNSS-Systemen) auszustatten. Durch diese Stationen wird eine kontinuierliche Höhenüberwachung möglich. Damit verbunden sind absolute Referenzierungen der Pegelnullpunkte sowohl im Höhenreferenzsystem der Landesvermessung als auch in globalen Referenzsystemen. Letztere sind Voraussetzungen für Auswertungen, die neben deutschen Pegelstationen auch ausländische Stationen enthalten. Aufgrund unterschiedlicher nationaler Höhenreferenzsysteme sind entsprechende Auswertungen mit den offiziellen Angaben nur bedingt möglich. Weiterhin werden entsprechende Informationen für die Einbindung anderer Satellitenbeobachtungen und für eine großräumige Überwachung des Meeresspiegels benötigt.

2. GNSS und Pegel

2.1 Pegelfest- und Pegelnullpunkt

Durch die Pegelvorschrift werden in Deutschland Regeln und Vorgehensweisen für die Pegel bereitgestellt. Innerhalb des Stammtextes der Pegelvorschrift wird ein Pegel als eine Einrichtung zur Erfassung oberirdischer Gewässer definiert. Er besteht aus einem Lattenpegel und mindestens drei Pegelfestpunkten (Abb. 2, Pegelvorschrift – Stammtext Abschnitt 1.1 (LAWA und BMV, 2007)). Die Pegellatte dient als Referenz für ergänzende Einrichtungen und somit auch für deren Kalibrierung. Der Pegelnullpunkt ist definiert als Nullpunkt des Lattenpegels (Pegelvorschrift – Anlage C Abschnitt 1.1). Die alle ein bis zwei Jahre stattfindende Prüfung der Höhenlage überwacht nur die Beziehung zwischen Pegelfest- und Pegelnullpunkt (WEIß und SUDAU, 2012).

Die Höhendifferenzen zwischen Pegelfest- und Pegelnullpunkt (Abb. 2, i. A. als Sollhöhenunterschied bezeichnet) werden im Vorfeld unter Nutzung der Höhen der Pegelfestpunkte definiert und im Rahmen der Prüfungen der Höhenlagen überwacht. Durch verschiedene äußere Einflüsse, wie etwa mechanische Beschädigungen oder auch durch Eisgang (Abb. 1) können Veränderungen der Pegellatte und damit auch des Pegelnullpunktes auftreten. Mithilfe der Prüfungen der Höhenlage werden entsprechende Änderungen erkannt, korrigiert und ggf. weitere Maßnahmen getroffen. Da somit nur die Beziehung zwischen den Pegelfest- und den Pegelnullpunkten überwacht wird, liefern die Prüfungen der Höhenlage folglich auch nur Aussagen über die innere Geometrie des Systems Pegel.

Für die Ableitung von Aussagen zu Höhenänderungen des kompletten Systems Pegel schreibt die Pegelvorschrift Anschlussmessungen an ein übergeordnetes Referenzsystem (amtliche System der Landesvermessung) mit einem Intervall von max. 15 Jahren vor. Mithilfe entsprechender Beobachtungen kann die Höhe der Pegelfestpunkte und unter Nutzung der Sollhöhenunterschiede auch die Höhe der Pegelnullpunkte relativ zu diesem Referenzsystem dargestellt werden (Pegelvorschrift – Anlage C, 1997).



Abb. 1: Pegel Terborg bei Eisgang



Abb. 2: Pegelfestpunkt, Lattenpegel, Wasserstandssensor und Anschlussmessung an einem Pegel

Tab 1: Sollhöhenunterschiede am Pegel Borkum-Fischerbalje (1.7.1999)

Pegelfestpunkt Nr.			Sollhöhenunterschied dH [m]
W1191 18	02	1	9.550
W1191 18	02	2	9.594
W1191 18	02	59	9.228
W1191 18	02	591	9.517
W1191 18	02	304	9.741
W1191 18	02	312	9.739
W1191 18	02	2001	9.206

Der Anschluss soll dabei an das übergeordnete Nivellementsnetz 3. Ordnung bzw. bei Pegeln mit überregionaler Bedeutung an das Nivellementsnetz 2. Ordnung erfolgen. Je nach Standort des Pegels können diese Anschlussmessungen mehr oder weniger aufwendig ausfallen. Insbesondere bei Pegeln auf Inseln oder der Küste vor gelagerten Pegeln (z.B. auf Leuchttürmen) sind extrem aufwendige Anschlussmessungen nötig. In der Vergangenheit wurden dabei neben geometrischen auch hydrostatische Nivellements ausgeführt (Abb 3). Bei jedem Nivellement erfolgten die Beobachtungen zu einem bestimmten Zeitpunkt und die erfassten Höhendifferenzen zu den Anschlusspunkten sind streng genommen auch nur für diesen Zeitpunkt gültig. Hinzu kommt, dass im Rahmen der Nivellements nur Höhendifferenzen zu Anschlusspunkten des Höhenreferenzsystems der Landesvermessung ermittelt werden. Die letztendlich bestimmte Höhe ist direkt abhängig von der Höhe der Anschlusspunkte und damit auch von deren Höhenreferenzsystemen und Realisierungen. Praktisch bedeutet dies, dass auch aktuell bestimmte Höhen von Pegelfestpunkten aufgrund veralteter Anschlusspunkthöhen nicht die reale Höhenlage repräsentieren. Je nach Höhenreferenzsystem und Realisierung des Höhenreferenzsystems der Anschlusspunkte geben die ermittelten Höhen auch bei sehr guten Beobachtungen die Realität nur bedingt wieder. Wird beispielsweise im Jahr 2009 ein Anschlussnivellement zu Anschlusspunkten der Landesvermessung durchgeführt, so ist das Ergebnis auf die aktuell gültige Realisierung des Höhenreferenzsystems der Anschlusspunkte (derzeit DHHN92) bezogen. Beim DHHN92 handelt es sich um ein Höhenreferenzsystem, welches auf Beobachtungsmaterial aus den 80'er Jahren des letzten Jahrhunderts basiert und damit etwa 25-30 Jahre alt ist. Auch scheinbar aktuelle Höhen geben dem-nach über absolute reale Höhen nur bedingt Auskunft. Bei einem Nivellement handelt es sich immer um ein relatives Beobachtungsverfahren, dessen originäre Ergebnisse Höhendifferenzen zum Zeitpunkt der Beobachtung sind. Für die Ableitung realer Höhen und Höhenänderungen sind damit sehr aufwendige großräumige Beobachtungskampagnen erforderlich, die aufgrund der damit entstehenden Kosten in der Vergangenheit nur sehr selten ausgeführt wurden. Ein permanentes Monitoring und damit verbundene Aussagen über saisonale Variationen und langfristige Änderungen ist mit dem Verfahren des Nivellements nicht möglich. Hinzu kommt die Tatsache, dass hydrostatische Nivellements aufgrund der heute nicht mehr existierenden Messausrüstungen nicht mehr möglich sind. Für eine permanente Höhenüberwachung und eine Höhenübertragung über große Wasserflächen sind somit andere Techniken erforderlich.



Abb. 3: Geometrisches und hydrostatisches Nivellement

2.2 Konzept „GNSS@tidegauge“

Durch die Einführung satellitengestützter Messmethoden ist es seit einiger Zeit möglich, kontinuierlich dreidimensionale Koordinaten mithilfe von GNSS-Systemen zu ermitteln. Werden diese mit Pegeln gekoppelt, kann die Höhenlage der Pegelnullpunkte gegenüber einem globalen, zeitlich und örtlich invarianten Referenzsystem überwacht werden. Praktisch bedeutet dies, dass über sehr große Entfernungen sehr präzise Höhenbestimmungen möglich sind. Dies hat auch zur Folge, dass unter Nutzung von GNSS-Systemen eine Vergleichbarkeit von weit auseinander liegenden Pegelstellen mit sehr hoher Genauigkeit ermöglicht wird. Aufgrund fallender Kosten und gleichzeitiger Verbesserungen der GNSS-Systeme wurde ein kontinuierliches Monitoring der Pegelstellen wirtschaftlich möglich. Mithilfe entsprechender Systeme können zukünftig sehr aufwendige Anschlussnivellements zu Pegeln ersetzt werden. Vor dem Hintergrund der Forschung zu langfristigen Meeresspiegelanstiegen hat sich die BfG dazu entschlossen, die wichtigsten Pegelanlagen an der deutschen Nordseeküste mit kontinuierlich arbeitenden GNSS-Systemen auszurüsten. Alle GNSS-Systeme sind dabei direkt auf den Pegeln montiert bzw. teilen mit mindestens einem Pegelfestpunkt die gleiche physische Struktur (SUDAU und WEIB, 2009). Die geometrische Beziehung zwischen Pegelfestpunkt und GNSS-System kann daher als langfristig konstant angesehen werden. Zwar ist dabei mit zyklischen Variationen zu rechnen (z.B. temperaturbedingt), jedoch sollten diese bei der Ableitung langweiliger Trends aus längeren Zeitreihen keine Rolle spielen. Weitere hochfrequente Variationen werden entweder im Rahmen der Prozessierung modelliert (z.B. Auflastzeiten oder Festerdezeiten) oder eliminieren sich bei der Ableitung langfristiger Mittelwerte.

3. GNSS gestützte Höhenüberwachung der Pegelfestpunkte

3.1 Stationsaufbau

Derzeit sind im Bereich der Deutschen Bucht 19 Pegelstationen mit kontinuierlich arbeitenden GNSS-Systemen ausgestattet. Neben den 19 GNSS-Pegelstationen der BfG existieren an den deutschen Küsten weitere sechs GREF-Stationen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG), die in unmittelbarer Nähe der Pegel montiert sind (Abb. 4). In diesen Fällen werden die Höhendifferenzen zwischen den Pegelfestpunkten und den jeweiligen GNSS-Systemen durch das jeweils zuständige Wassers- und Schifffahrtsamt bzw. der BfG überwacht. Im Bereich der Ems sind fünf Stationen mit Trimble GPS-Systemen ausgestattet, während alle übrigen Stationen mit Leica GRX1200 +GNSS Empfängern ausgestattet sind. Bei den eingesetzten Antennen handelt es sich um fünf Trimble Zephyr Antennen, 13 Leica AT504GG und eine Leica AR25.R3 Choke-Ring Antenne. Alle Antennen sind durch Schutzgehäuse (Radom) geschützt.

Frühere Untersuchungen weisen auf relativ große Höhenänderungen im Bereich der Ems hin. Aufgrund dieser Ergebnisse erfolgte eine Installation eines Sondernetzes in Form von fünf Trimble Stationen auf Pegel im tidebeeinflussten Bereich der Ems um spezielle Belange der WSV zu berücksichtigen. Diese Stationen sind für Untersuchungen zu langfristigen Meeresspiegeländerungen nicht geeignet und werden deswegen im Folgenden nicht näher beleuchtet.



Abb. 4: Pegelstationen mit kontinuierlich arbeitenden GNSS-Systemen (Stand 04/2012)

Die Administration der BfG-Stationen erfolgt durch die BfG in Koblenz. Für administrative Zwecke und für die Datenübertragung wurde ein GPRS-basierter Kommunikationsweg aufgebaut (Abb. 7 und 8). Alle Leica-Empfänger übertragen in regelmäßigen Abständen die Beobachtungsdaten nach Koblenz, wo diese aufbereitet und vorprozessiert werden. Im Rahmen der Datenaufbereitung werden die Rohdaten zu RINEX¹-Daten konvertiert, ein Resampling auf eine Beobachtungsintervall von 30s durchgeführt, die Daten zu COMPACT RINEX Daten umgewandelt, gepackt und auf dem FTP-Server der BfG bereitgestellt.

Tab. 2: Übersicht der GNSS-Pegelstationen im Bereich der Deutschen Bucht

Station	Kürzel	Inbetriebnahme	Abstand zum Pegel [m]	Betreiber	Gewässer
Borkum-Südstrand	BORJ	Jan 05	~400	BKG ²	Nordsee
Helgoland	HELG	Nov 99	~600	BKG	Nordsee
Hörnum/Sylt	HOE2	Jul 05	~200	BKG	Nordsee
Knock	TGKN	Mai 08	0	BfG	Außenems
Unterfeuer Dwarsgat	FLDW	Aug 08	0	BfG	Außenweser
Leuchtturm Alte Weser	LHAW	Dez 08	0	BfG	Außenweser
Cuxhaven - Steubenhöft	TGCU	Dez 08	0	BfG	Außenelbe
Borkum - Fischerbalje	TGBF	Mai 09	0	BfG	Nordsee
Büsum	TGBU	Mai 09	0	BfG	Nordsee
Dagebüll	TGDA	Mai 09	0	BfG	Nordsee
Mellumplate	TGME	Aug 09	0	BfG	Außenjade

¹ RINEX: Receiver Independent Exchange Format – Empfängerunabhängiges Datenformat zur Speicherung von GNSS-Beobachtungen

² BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

Emden - Neue Seeschleuse	TGEM	Okt 09	0	BfG	Außenems
Dukegat	TGDU	Okt 09	0	BfG	Außenems
Terborg	TGTE	Okt 09	0	BfG	Ems
Papenburg	TGPA	Okt 09	0	BfG	Ems
Leerort	TGLE	Okt 09	0	BfG	Ems
Weener	TGWE	Okt 09	0	BfG	Ems
Pogum	TGPO	Okt 09	0	BfG	Ems
FINO-3	TGF3	Feb 10	0	BfG	Nordsee
Wilhelmshaven – Neue Seeschleuse	TGWH	Mrz 10	0	BfG	Jade
Bremerhaven – Alter Leuchtturm	TGBH	Mrz 10	0	BfG	Unterweser
Wittdün	TGWD	Jun 11	0	BfG	Nordsee



Abb. 5: GNSS-Stationen Unterfeuer Dwarsgat, Borkum-Fischerbalje, Dukegat und Leuchtturm Alte Weser



Abb. 6: GNSS-Stationen Pogum, Cuxhaven-Steubenhöft, FINO-3, Knock und Mellumplate

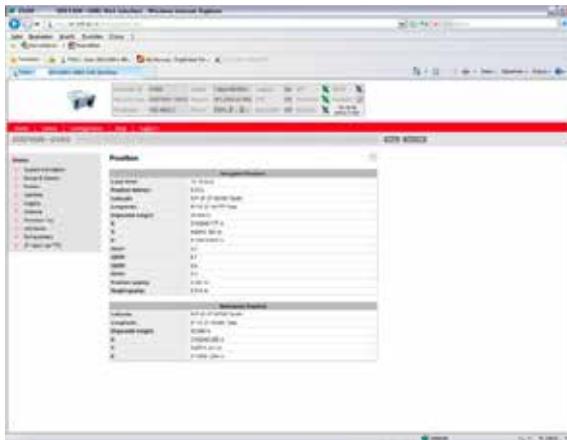


Abb. 7: Webinterface zur Fernadministration und Fernsteuerung der GNSS-Receiver

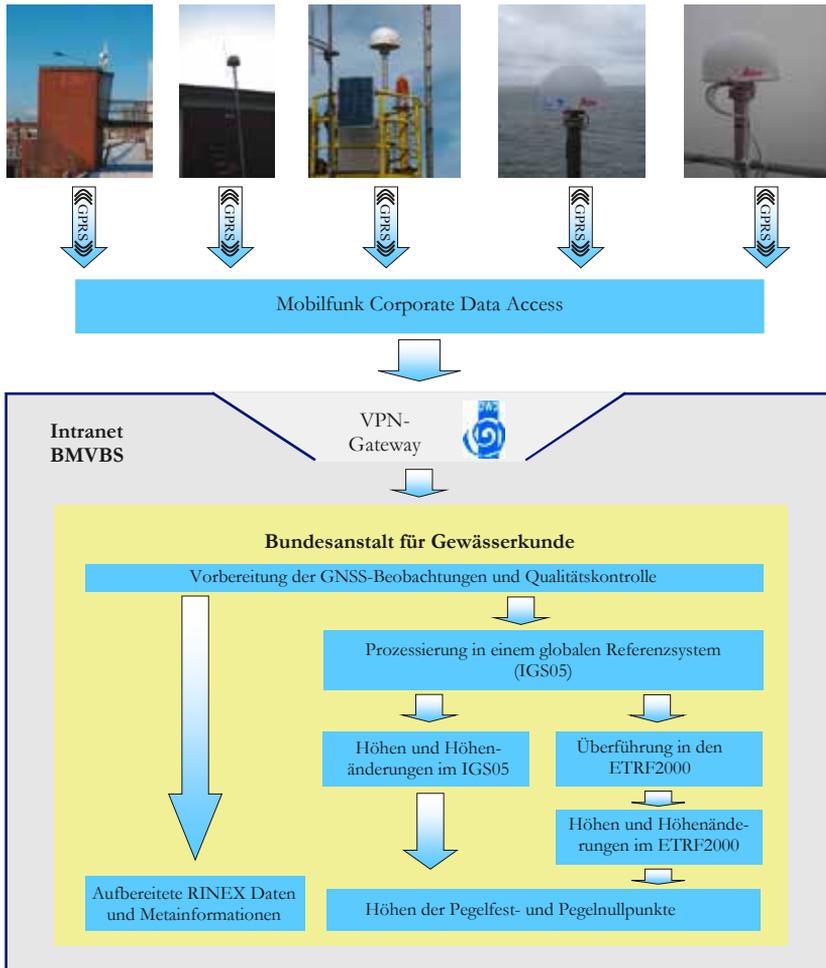
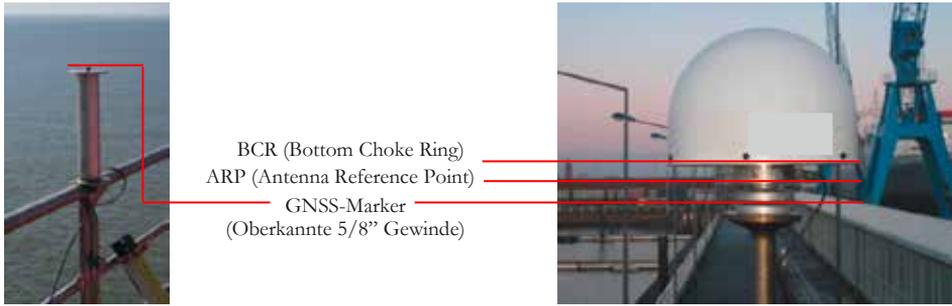


Abb. 8: Kommunikationsweg zur Fernadministration und Datenübertragung (SUDAU und WEIB 2009)

3.2 Geometrische Beziehung zwischen GNSS-System und Pegelnullpunkten

Mithilfe der GNSS-Sensoren werden ellipsoidische Höhen der Antennenreferenzpunkte (ARP) bzw. der GNSS-Marker ermittelt. Als Antennenreferenzpunkte sind die Mittelpunkte der Unterseite der GNSS-Antennen und als GNSS-Marker die Oberkanten der 5/8“ Gewinde der Antennenbefestigungen definiert. Die Höhendifferenzen zwischen Antennenreferenzpunkten und GNSS-Markern werden bei der BfG als Instrumentenhöhen (Δh_i) bezeichnet und als zeitlich konstant angesehen (Abb. 9).



BCR (Bottom Choke Ring)
 ARP (Antenna Reference Point)
 GNSS-Marker
 (Oberkannte 5/8" Gewinde)

Abb. 9: Bottom Choke Ring (BCR), ARP und GNSS-Marker

$$H_{GNSS_Marker} = H_{APR} - \Delta h_I \tag{1}$$

Für Rückschlüsse auf die Höhenlagen der Pegelnullpunkte sind neben den ellipsoidischen Höhen auch Höhendifferenzen zwischen den GNSS-Markern und den Pegelnullpunkten erforderlich. Diese Höhendifferenzen setzen sich aus Höhendifferenzen zwischen GNSS-Markern und den Pegelfestpunkten sowie den Sollhöhenunterschieden (Δh_{Soll}) zusammen (Abb. 10).

$$\Delta h_{GNSS \rightarrow PNP} = \Delta h_{GNSS \rightarrow Pegelfestpunkt} + \Delta h_{Soll} \tag{2}$$

$$H_{PNP} = H_{GNSS_Marker} - \Delta h_{GNSS \rightarrow PNP} \tag{3}$$

Die Sollhöhenunterschiede werden von Seiten des zuständigen Wasser- und Schifffahrtsamtes festgestellt und im Rahmen der Kontrollen der Höhenlagen regelmäßig überacht.

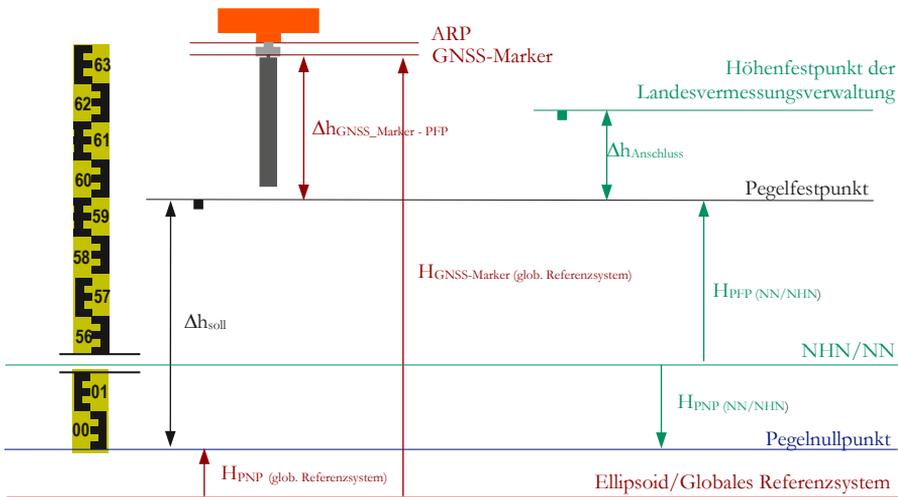


Abb. 10: Geometrische Zusammenhänge im System Pegel („innere und äußere Geometrie“)

Bei den BfG eigenen GNSS-Stationen werden die Höhendifferenzen zwischen den GNSS-Markern und den Pegelfestpunkten im Rahmen des Stationsaufbaus ermittelt. Bedingt durch das Beobachtungsprinzip müssen die GNSS-Antennen so montiert sein, dass möglichst in alle Richtung eine freie Sicht bzw. keine Abschattungen vorhanden sind. Dies hat zur Folge, dass die GNSS-Antennen in den oberen Bereichen der Pegelbauwerke montiert sind, während sich die Pegelfestpunkte im unteren Bereich befinden. Auf sehr kurzen horizontalen Distanzen sind daher große Höhenunterschiede zu erfassen. Von Seiten der BfG kommen dabei

- geometrische Nivellements
- kalibrierte Messbänder
- kalibrierte Messstäbe
- vertikal arbeitender Laserentfernungsmesser

zum Einsatz (Abb. 11). Geometrische Nivellements wurden zur Bestimmung relativ geringer Höhendifferenzen eingesetzt, was nur in wenigen Fällen möglich war. Sowohl für kalibrierte Messbänder als auch für Messstangen wurden Halterungen in der Art konstruiert, dass die Nullpunkte der Messbänder bzw. der Messstangen auf dem Niveau des ARP liegen. Im Bereich der Bodenpunkte erfolgten die Ablesungen an den Messbändern bzw. Messstangen unter Nutzung von Planplattennivellieren, wobei jeweils die vollen Zentimeterteilungen der Messbänder bzw. die kalibrierten Spitzen der Messstangen angezielt wurden. Mit beiden Verfahren werden sehr gute Übereinstimmungen erzielt (Tab. 3). Die Messstangen haben sich zwar als unhandlicher, aber auch als windunempfindlicher erwiesen. Unabhängig davon wurden als dritte Methode vertikal arbeitende Laserentfernungsmesser eingesetzt (Abb. 12). Exemplarisch sind die Ergebnisse in Tab. 4 für den Pegel Wilhelmshaven – Neuer Vorhafen dargestellt.

Tab. 3: Höhendifferenz zwischen ARP und Punkt 2306/667 am Pegel Borkum-Fischerbalje

Methode der Höhenübertragung	Δh [m]	Differenz zum Mittelwert [mm]
Nivellement	4.0346	-0.5
Stangenmessung:	4.0342	-0.1
Bandmessung:	4.0335	0.6
Mittelwert	4.0341	



Abb. 11: v.l.n.r. Messstangen am Pegel Dagebüll, Messbänder am Pegel Borkum-Fischerbalje und klassische Nivellements auf Mellumplate



Abb. 12: Messungen mit einem vertikal arbeitenden Laserentfernungsmesser (Pegel Mellumplate)

Tab. 4: Höhendifferenzen zwischen GNSS-Marker und PNP am Pegel Wilhelmshaven - Neuer Vorhafen

Pegelfestpunkt (PFP)	GNSS-Marker - PFP		Sollhöhenunterschied		dH GNSS-Marker - PNP Δh [m]
	Datum	Δh [m]	Datum	Δh [m]	
Bolzen-GNSS 2 1	18.03.2010	-4.027	06.07.1994	-10.373	-14.400
	18.03.2010	-5.333	06.07.1994	-9.067	-14.400
	18.03.2010	-5.321	06.07.1994	-9.078	-14.399
Bolzen-GNSS 2 1	14.06.2010	-5.333	06.07.1994	-9.067	-14.400
	14.06.2010	-4.027	06.07.1994	-10.373	-14.400
	14.06.2010	-5.321	06.07.1994	-9.078	-14.399

Sofern die Stationen nicht direkt auf den Pegeln montiert sind bzw. sich die GNSS-Stationen nur in der Nähe der Pegel befinden, ist durch regelmäßige Kontrollmessungen sicherzustellen, dass sich die Höhendifferenzen zwischen den GNSS-Markern bzw. den GNSS-Antennen und den Pegelfestpunkten nicht ändern bzw. diese bekannt sind. Dies betrifft insbesondere die Stationen Helgoland (HELG), Hörnum (HOE2) und Borkum-Südstrand (BORJ). Alle GNSS - Stationen verfügen über einen als „GNSS-benchmark“ oder „GNSS-Festpunkt“ bezeichneten Festpunkt, welcher an der Antennenhalterung und damit an der gleichen physischen Struktur wie die GNSS-Antenne montiert sind.

$$\Delta h_{GNSS_Marker \rightarrow PNP} = \Delta h_{GNSS_Marker \rightarrow GNSS_Festpunkt} + \Delta h_{GNSS_Festpunkt \rightarrow PFP} + \Delta h_{Soll} \quad (4)$$

Die Höhendifferenzen zwischen den GNSS-Markern und den GNSS-Festpunkten werden im Rahmen der Einrichtung von Seiten des BKG bestimmt und in regelmäßigen Abständen überprüft. Ausgehend von den GNSS-Festpunkten werden durch die zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter bzw. durch die BfG jährliche Nivellements zu den Pegelfestpunkten durchgeführt. In Kombination mit den Sollhöhenunterschieden ergeben sich Höhendifferenzen zwischen den GNSS-Markern und den Pegelnullpunkten (Tab. 5 für den Pegel Helgoland). Für entsprechende Arbeiten erfolgte der Abschluss eines Kooperationsvertrages zwischen den beteiligten Institutionen.

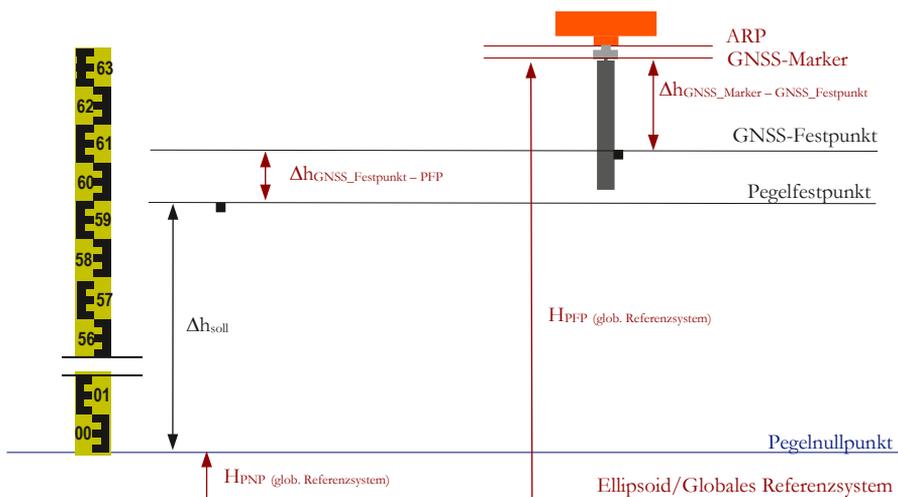


Abb. 13: Geometrischer Zusammenhang bei GNSS-Stationen in der Nähe eines Pegels

Tab. 5: Höhendifferenzen zwischen GNSS-Marker und Pegelnullpunkt am Pegel Helgoland (grün = Beobachtet durch BKG, weinrot = Beobachtet durch WSÄ/BfG)

GNSS-Marker - Festpunkt		Höhendifferenz GNSS-Festpunkt - PFP			Sollhöhendifferenz PFP - PNP			Höhendifferenz GNSS-Marker - PNP		
Datum	Δh [m]	PFP	Datum	Δh [m]	PFP	Datum	Δh [m]	PFP	Datum	Δh [m]
					21	16.04.2003	-9.449			
					20	16.04.2003	-9.057			
					22	16.04.2003	-9.056			
01.09.2005	-5.030	22	01.09.2005	-0.168				22	01.09.2005	-14.254
		20	01.09.2005	-0.167				20	01.09.2005	-14.254
		20	27.09.2006	-0.166				20	27.09.2006	-14.253
		21	27.09.2006	0.226				21	27.09.2006	-14.253
		22	27.09.2006	-0.167				22	27.09.2006	-14.253
		22	22.08.2007	-0.168				22	22.08.2007	-14.254
		20	22.08.2007	-0.167				20	22.08.2007	-14.254
		21	22.08.2007	0.225				21	22.08.2007	-14.254
		21	28.07.2008	0.225				21	28.07.2008	-14.254
		22	28.07.2008	-0.168				22	28.07.2008	-14.254
		20	28.07.2008	-0.167				20	28.07.2008	-14.254
		20	09.09.2009	-0.168				20	09.09.2009	-14.255
		21	09.09.2009	0.224				21	09.09.2009	-14.255
		22	09.09.2009	-0.169				22	09.09.2009	-14.255
		22	17.08.2010	-0.169				22	17.08.2010	-14.255
		20	17.08.2010	-0.167				20	17.08.2010	-14.254
		21	17.08.2010	0.224				21	17.08.2010	-14.254

3.3 Qualität der Beobachtungsdaten

Im Rahmen der Vorprozessierung erfolgt eine Qualitätskontrolle der GNSS-Beobachtungen. Mit Hilfe des Analyseprogramms TEQC³ werden statistische Kennzahlen abgeleitet, welche die Qualität der Beobachtungsdaten beschreiben. Von besonderem Interesse ist dabei die Anzahl der Beobachtungen und Informationen über Mehrwegeeffekte auf den einzelnen Stationen. In Abb. 14 sind die Ergebnisse einer TEQC-Qualitätskontrolle exemplarisch dargestellt. Aufgrund verschiedener Einflüsse (in der Regel Stromausfälle, Signalstörungen oder Ausfall der Kommunikationsverbindung über einen längeren Zeitabschnitt) liegen nicht für alle Tage Beobachtungsdaten vor. Der prozentuale Anteil der inaktiven Beobachtungstage seit dem Aufbau der jeweiligen Station ist in Abb. 15 dargestellt. In Abb. 16 und 17 ist die Anzahl der absoluten Beobachtungen verschiedener Stationen der BfG (Abb. 16) und des BKG (Abb. 17) dargestellt. Anhand dieser Abbildung wird ersichtlich, dass die Anzahl der Beobachtungen im Verlauf der Zeit stark gestiegen ist, was vor allem auf zusätzliche GLONASS Satelliten zurückzuführen ist. Die gegenüber den umliegenden Stationen geringere Anzahl von GNSS-Beobachtungen der Station LT Alte Weser (LHAW) ist damit zu begründen, dass aufgrund der Bauweise des Leuchtturmes starke Abschattungen vorhanden sind. Im Rahmen des Stationsaufbaus erfolgte die Installation an dem bestmöglichen Standpunkt, jedoch lassen sich Signalabschattungen aufgrund von Hindernissen nicht vermeiden. Da GNSS die derzeit einzig praktikable Methode für eine kontinuierliche Höhenüberwachung darstellt, wurden die Abschattungen in Kauf genommen. Auf der Station Mellumplate ist es im Frühling 2010 zu einer Beschädigung des Antennenkabels gekommen. Als Folge davon sind die erfassten Beobachtungen während des 2. – 4. Quartals 2010 von sehr schlechter Qualität und werden auch bei der späteren Prozessierung nicht weiter genutzt.



Abb. 14: Ergebnis eines TEQC Quality Checks

³ TEQC: Freies GNSS-Analyseprogramm von UNAVCO (Nicht gewinnorientiertes Konsortium von Einrichtung die der Forschung mithilfe der Geodäsie dienen)

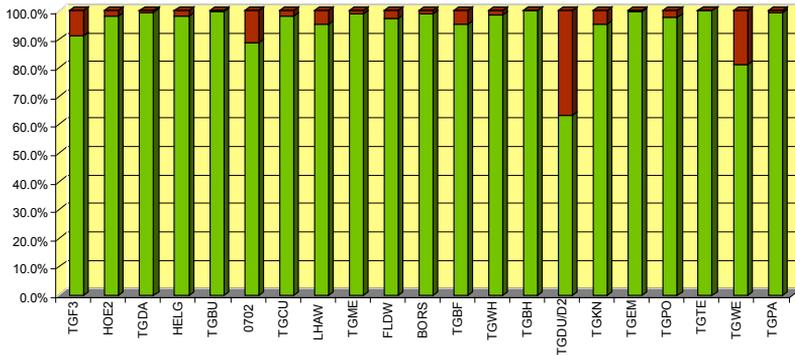


Abb. 15: Aktive und inaktive Beobachtungstage der GNSS-Stationen

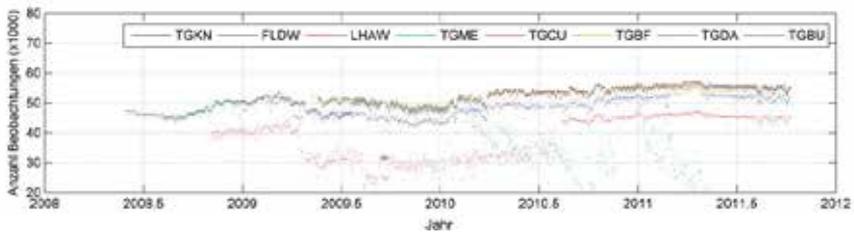


Abb. 16: Anzahl der GNSS-Beobachtungen ausgewählter BfG- Stationen

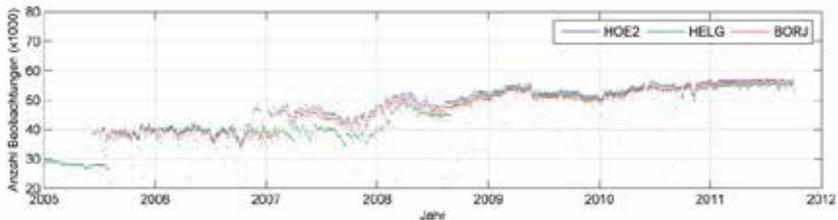


Abb. 17: Anzahl der GNSS-Beobachtungen ausgewählter BKG-Stationen

Neben der Anzahl der real erfassten Beobachtungen stellen auch die MP1 und MP2 zzgl. deren RMS-Werte eine wichtige Kenngröße zur Stationsbeschreibung dar. Die MP1 und MP2-Werte geben Aufschluss über die Mehrwegeeffekte und damit Störungen für beide Frequenzen im Umfeld der GNSS-Antenne. Entsprechende Störungen verursachen Verfälschungen der gemessenen Distanzen zu den GNSS-Satelliten, was letztendlich Abweichungen bei der Bestimmung von Koordinaten zur Folge hat. Wenn diese über einen längeren Zeitabschnitt konstant sind, kann der Einfluss der Mehrwegeeffekte statistisch minimiert werden. Aus diesem Grund sollten die MP1/MP2 Werte auch über die prozessierte Zeitspanne homogen sein bzw. nach Möglichkeit kleine Werte annehmen.

Die erhöhten Mehrwegeeffekte der Stationen Leuchtturm Alte Weser, Dukegat und FINO-3 sind auf eine Vielzahl Störungen im Umfeld der Antenne zurückzuführen. Vermutliche Ursache für

erhöhten Wert der Station Mellumplate ist die oben beschriebene Beschädigung des Antennenkabels (Abb. 18 bzw. Tab. 6).

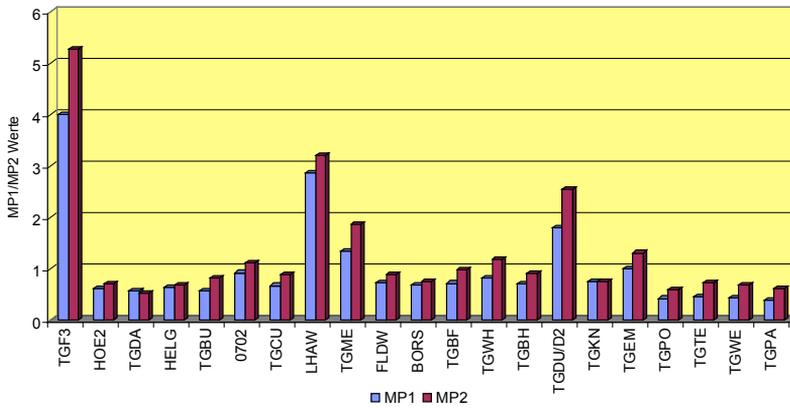


Abb. 18: Mittelwert MP1/MP2 über die Beobachtungsdauer

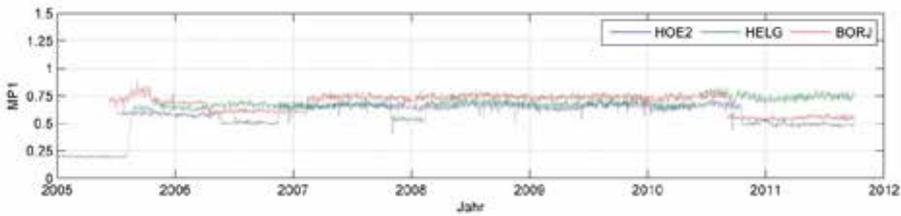


Abb. 19: – Tageswerte der von Stationen in der Nähe von Pegeln (BKG)

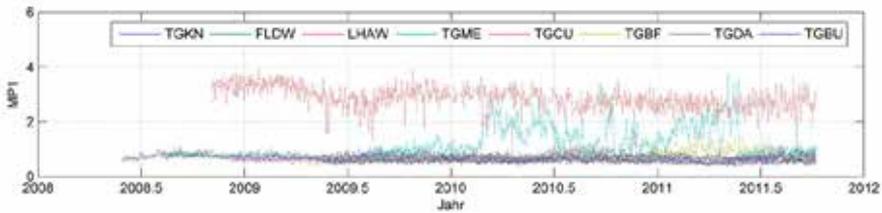


Abb. 20: MP1 – Tageswerte der von GNSS-Stationen auf Pegeln (BfG)

3.4 Grundlagen der Referenzsysteme und Koordinaten

In der Geodäsie wird streng zwischen einem Referenzsystem und dessen Realisierung unterschieden. Im Rahmen einer Systemdefinition wird die Art des Referenzsystems (z.B. globales Referenzsystem mit dem Ursprung im Massenmittelpunkt der Erde), die Ausrichtung der Koordinatenachsen, physikalische Konstanten wie etwa Lichtgeschwindigkeit, Abplattung der Erde,

Zeitsysteme usw. festgelegt. Die Systemdefinition beschreibt demnach ein Referenzsystem an sich, liefert selbst aber keine Koordinaten. Unter Nutzung der im Rahmen einer Systemdefinition definierten Parameter werden in regelmäßigen Abständen Koordinaten von Beobachtungsstationen bzw. vermarkten Punkten bestimmt. Diese Koordinatenlösungen werden als Realisierungen der Referenzsysteme bezeichnet (GÖRRES, 2010).

Von Seiten der IAG⁴ wurde Anfang der neunziger Jahre ein globales, einheitliches terrestrisches Referenzsystem (International Terrestrial Reference System ITRS) definiert, welches die Grundlage für alle weiteren Koordinatensysteme bildet. Für das ITRS werden in unregelmäßigen Abständen neue offizielle Koordinatenlösungen (Realisierungen) veröffentlicht. Diese beinhalten neben einem reinen GNSS-Anteil auch Informationen weiterer geodätischer Raumverfahren (VLBI⁵, SLR⁶ und DORIS⁷), auf die aber im Rahmen des Artikels nicht näher eingegangen wird. Letztendlich stellt das ITRS und die daraus abgeleiteten Realisierungen einen weltweit einheitlichen Koordinatenbezug dar (ANGERMANN et al., 2005). Die aktuelle Realisierung des ITRS wird als „International Terrestrial Reference Frame 2008 ITRF2008“ bezeichnet und ist seit April 2011 gültig. Zuvor wurde der ITRF2005 genutzt, welcher seit Anfang 2006 gültig war. Seit Einführung des ITRF2005 werden neben Koordinaten auch Koordinatenänderungen mit veröffentlicht. Praktisch bedeutet dies, dass die Bewegung der Punkte (z.B. aufgrund der Kontinentaldrift) mit geschätzt und somit die reale Erdoberfläche durch die ITRF Realisierungen besser approximiert wird. Die offiziellen Koordinatenlösungen für ausgewählte Lagerungsstationen sind in Tabelle 7 dargestellt, wobei die Koordinaten den Zustand am 01.01.2005 beschreiben. Für einen beliebigen Zeitpunkt vor oder nach dem 01.01.2005 müssen die Koordinatenänderungen mit berücksichtigt werden. Eine ITRF2005 Koordinate für eine bestimmte Epoche 20xx ergibt sich demnach wie folgt:

$$XIITRF2005, 20xx.x = XIITRF2005 + (20xx.x - 2005.0) \cdot dXIITRF2005 \quad (5)$$

Alle Stationen weisen eine Zunahme des Rechts- bzw. Hochwertes auf. Praktisch bedeutet dies, dass sich die Stationen sowohl in Richtung Osten, wie auch in Richtung Norden bewegen. Als Mittelwert für die in Tab. 7 dargestellten Stationen ergibt sich eine Bewegung von etwa 24mm/Jahr in Richtung Nord-Ost. Die Höhenkomponente weist ebenfalls eine Änderung auf. Aus der ITRF2005 Lösung ergeben sich für alle angegebenen Stationen eine leichte Hebungen.

⁴ IAG: International Association of Geodesy

⁵ VLBI: Very Large Base Interferometry

⁶ SLR: Satellite Laser Ranging

⁷ DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

Tab. 6: Stationskoordinaten und Koordinatenänderungen von einzelnen ITRF-Stationen im ITRF2005⁸

Station	ITRF2005, Epoche 2005.0 (X, Y, Z, dX, dY, dZ aus offiziellen ITRF - Veröffentlichung)								
	X (2005.0) [m]	Y (2005.0) [m]	Z (2005.0) [m]	dX [mm/a]	dY [mm/a]	dZ [mm/a]	dR [mm/a]	dN [mm/a]	dH [mm/a]
ONSA	3370658.620	711877.070	5349786.907	-13.5	14.4	10.9	16.2	15.2	3.7
BOR1	3738358.544	1148173.630	5021815.730	-16.7	15.6	9.5	19.4	15.4	0.5
BRUS	4027893.810	307045.740	4919475.067	-12.6	16	11.1	16.6	16.1	1.4
KOSG	3899225.200	396731.860	5015078.382	-13.7	16.3	11.4	17	17.1	1.7
WSRT	3828735.941	443304.878	5064884.664	-14.5	15.9	10.3	18	15.6	0.6
ZIMM	4331297.140	567555.787	4633133.882	-12.6	18.1	12.7	19.9	15.7	2.3
POTS	3800689.717	882077.308	5028791.272	-15.8	15.7	9.4	19.3	14.6	0.2
WTZR	4075580.633	931853.714	4801568.083	-15.1	17.3	11.4	20.7	15.1	1.5
PTBB	3844060.039	709661.235	5023129.507	-14.6	16.6	10.7	18.7	15.9	1.5

Da das ITRS und dessen Realisierungen auch die Kontinentaldrift beinhalten und sich deren Koordinaten damit laufend ändern, wurde von Seiten der Subkommission EUREF⁹ das Referenzsystem „European Terrestrial Reference System ETRS“ definiert, welches zu Beginn des Jahres 1989 mit dem globalen „International Terrestrial Reference System ITRS“ identisch war. Im Unterschied zum ITRS sind das ETRS und dessen Realisierungen so definiert bzw. realisiert, dass die Bewegungen der eurasischen Platte im Mittel null ergeben. Analog zu den verschiedenen ITRF Realisierungen existieren auch für das ETRS89 unterschiedliche Realisierungen, wie etwa der ETRF89 oder ETRF00.

Das aktuelle Referenzsystem der Landesvermessungsverwaltungen in Deutschland basiert auf einer Realisierung des ETRS89, dem ETRF89. Im Rahmen einer Messkampagne erfolgte 1991 die Bestimmung von etwas über 100 GNSS-Stationen in Deutschland. Die Kampagne und die daraus abgeleitete Realisierung wird als DREF91 bezeichnet. Im Jahr 2002 erfolgte eine Neubestimmung des zwischenzeitlich aufgebauten SAPOS-Referenznetzwerkes (Satellitenpositionierungsdienst SAPOS[®]) der Landesvermessungsverwaltungen. Für den Zeitraum einer Woche erfolgte die Prozessierung aller GNSS-Beobachtungen der Referenzstationen. Die resultierenden Koordinaten wurden auf der Realisierung DREF91 gelagert. Ergebnis der Neubestimmung waren z.T. geänderte Koordinaten der SAPOS Referenzstationen, welche von den zuständigen Landesvermessungsdienststellen nach 2002 eingeführt wurden (BECKERS et al., 2005). Die oft genutzte Koordinatenbezeichnung „ETRS89“ Koordinaten ist insofern nicht eindeutig, als dass diese zwar das Referenzsystem, nicht aber dessen Realisierung beschreibt. Die eindeutige Bezeichnung lautet daher „ETRS89/DREF91, Epoche 2002.79“.

3.5 Prozessierung der GNSS-Beobachtungen

GNSS ist wie nahezu jedes geodätische Verfahren ein relatives Verfahren. Primäre Beobachtungsgrößen sind so genannte Code- und Phasenmessungen von verschiedenen GNSS-Satelliten zu den GNSS-Stationen. Üblicherweise werden diese Beobachtungen im Intervall von 30

⁸ IERS: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/doc/ITRF2005_GPS.SSC.txt

⁹ EUREF: IAG Sub-commission for Europe

Sekunden registriert, wodurch alle 30s Code- und Phasenmessungen zu 7-15 Satelliten auf zwei Frequenzen erfasst werden.

Die eigentliche Prozessierung ermittelt so genannte Basislinien zwischen zeitgleich registrierenden GNSS-Stationen. Stark vereinfacht dargestellt, lassen sich aus den GNSS-Beobachtungen zweier Stationen in einem bestimmten Intervall (hier 30s) Strecken zwischen den GNSS-Stationen und den GNSS-Satelliten ableiten. Unter Nutzung dieser Streckendifferenz ist es letztendlich möglich, Koordinatendifferenzen in einem dreidimensionalen geozentrischen Referenzsystem abzuleiten (Abb. 21).

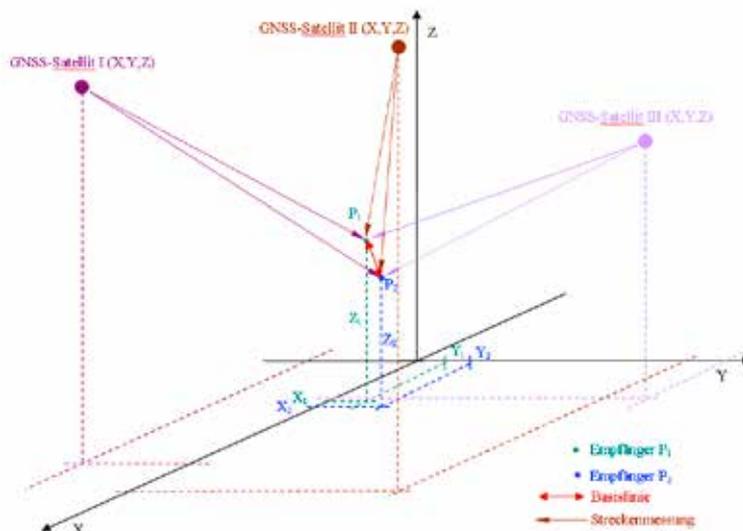


Abb. 21 Bestimmung von Basislinien mithilfe von GNSS-Systemen

Bei kleineren GNSS-Netzwerken erfolgen simultane Beobachtungen zu identischen Satelliten, da die diese vom Standpunkt des Empfängers aus gesehen die gleiche Position am Horizont aufweisen. Dieser Sachverhalt ist bei größeren Netzen (ab ca. 100km) nicht mehr gegeben. Vielmehr werden auch Beobachtungen zu unterschiedlichen GNSS-Satelliten erfasst. Für präzise Auswertungen langer Basislinien bzw. großer GNSS-Netzwerke sind daher präzise Bahndaten (im Genauigkeitsbereich weniger cm) erforderlich.

Die Basislinien beschreiben nur die Koordinatendifferenzen zwischen verschiedenen GNSS-Stationen. Für die Ableitung von Koordinaten einer bestimmten Realisierung ist es daher nötig, Koordinaten an einem Ende der Basislinie relativ zu einer bestimmten Realisierung zu kennen bzw. ein Netzwerk von Basislinien die Koordinaten bestimmter GNSS-Stationen mit in die Prozessierung einzuführen. Die Koordinaten der unbekanntenen GNSS-Stationen ergeben sich dann relativ zu den bekannten GNSS-Stationen bzw. diese werden in der Realisierung der bekannten Stationen ermittelt. Im Folgenden werden bekannte Stationen als „Lagerungsstationen“ oder „Referenzstationen“ bezeichnet. Neben den Lagerungsstationen werden einzelne Stationen als unbekanntene Stationen behandelt, wobei für diese aber bekannte Koordinaten vorliegen. Durch einen Vergleich der prozessierten Koordinaten mit den Sollkoordinaten lassen sich Rückschlüsse auf die Qualität der

Prozessierung ziehen. Die im Rahmen der BfG Prozessierung genutzten Lagerungs- und Kontrollstationen sind in Tab. 8 bzw. Abb. 22 dargestellt.

Tab 7: Prozessierte Kontroll- und Lagerungsstationen

Station	4ch	Domes Nr.	Breite	Länge	Höhe
Borowiec	BOR1	12205M002	52.2770	17.0735	124.37
Borkum	BORJ	14268M002	53.5789	6.6664	53.04
Brüssel	BRUS	13101M004	50.7978	4.3592	149.69
Kopenhagen	BUDP	10101M003	55.7390	12.5000	94.04
Delft	DELF	13502M004	51.9861	4.3876	74.38
Dentergem	DENT	13112M001	50.9337	3.3997	63.89
Delft	DLFT	13502M006	51.9860	4.3876	74.25
Graz	GRAZ	11001M002	47.0671	15.4935	538.29
Helgoland	HELG	14264M001	54.1745	7.8931	48.41
Herstmonceux	HERS	13212M007	50.8673	0.3363	76.48
Hohenbünsdorf	HOBU	14202M003	53.0506	10.4763	152.24
Hörnum	HOE2	14284M002	54.7588	8.2934	62.73
Inverness	INVR	13221M001	57.4863	-4.2193	66.23
Kootwijk	KOSG	13504M003	52.1784	5.8096	96.86
Onsala	ONSA	10402M004	57.3953	11.9255	45.60
Oslo	OSLS	10307M001	59.7366	10.3678	221.56
Potsdam	POTS	14106M003	52.3793	13.0661	144.43
Braunschweig	PTBB	14234M001	52.2962	10.4597	130.25
Redzikowo	REDZ	12227M001	54.4724	17.1175	108.27
Sassnitz	SASS	14281M001	54.5136	13.6433	68.23
Smidstrup	SMID	10114M001	55.6406	9.5593	122.84
Stavanger	STAS	10330M001	59.0177	5.5986	104.93
Suldrup	SULD	10113M001	56.8418	9.7422	120.74
Terschelling	TERS	13534M001	53.3627	5.2194	56.12
Trondheim	TRDS	10331M001	63.3714	10.3192	317.77
Tromsøe	TRO1	10302M006	69.6627	18.9396	138.11
Warnemünde	WARN	14277M002	54.1698	12.1014	50.75
Westerboork	WSRT	13506M005	52.9146	6.6045	82.29
Wetzell	WTZR	14201M010	49.1442	12.8789	666.03
Zimmerwald	ZIMM	14001M004	46.8771	7.4653	956.35

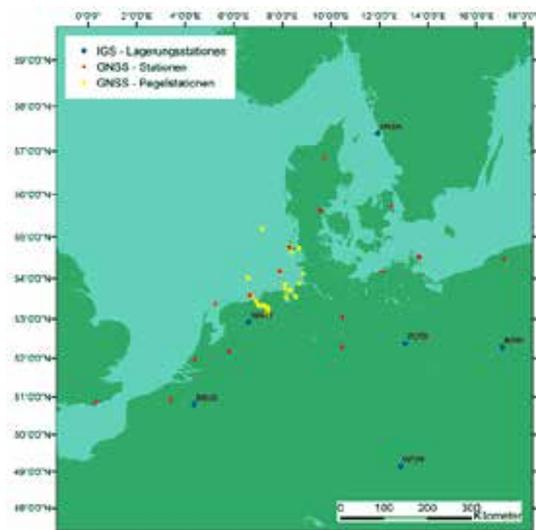


Abb. 22: Prozessiertes GNSS-Netzwerk

Aufgrund des räumlich ausgedehnten Netzwerkes sind für die Prozessierung weitere externe Daten nötig. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um:

- Präzise Bahndaten
- Erdorientierungsparameter
- Bahnstörungen der Satelliten
- Satellitenuhrenfehler
- Ionosphärenparameter
- Antennenmodelle.

Die entsprechenden Daten werden vom International GNSS-Service (IGS) bereitgestellt. Die präzisen Bahndaten beschreiben den exakten Orbit der GNSS-Satelliten mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern, während die Erdorientierungsparameter für die exakte Ausrichtung der Koordinatenachsen benötigt werden.

Beim IGS handelt es sich um einen Zusammenschluss verschiedenster administrativer und wissenschaftlicher Institutionen. Eines der Ziele des IGS ist die Bereitstellung weltweit homogener und präziser Ausgangsdaten für die Prozessierung großräumiger GNSS-Netzwerke. Die Mitglieder des IGS werten ein Netzwerk von über 100 global verteilten GNSS-Referenzstationen aus, wobei neben wöchentlichen Koordinatenlösungen und Erdorientierungsparametern auch tägliche Bahndaten, Satellitenuhrenfehler und Ionosphärenparameter geschätzt werden (IGS, 2012). Praktisch bedeutet die Homogenität der IGS-Produkte, dass die Koordinatenlösung einer Epoche zu den Bahndaten, den Ionosphärenparametern, Satellitenuhrenfehlern und Erdorientierungsparametern passen bzw. eine Einheit bilden. Eine GPS-Woche wird im Folgenden als eine Epoche bezeichnet.

Das GNSS-Netzwerk der BfG kann als eine regionale Verdichtung des IGS-Netzwerkes aufgefasst werden. Im Rahmen der Prozessierung werden IGS-Stationen als Lagerungs- und Kontrollstationen mit prozessiert und für die Prozessierung die Produkte des IGS mit Ausnahme der Antennenmodelle genutzt. Antennenmodelle beschreiben das Empfangsverhalten der Antenne und damit auch systematische Verfälschungen der GNSS-Beobachtungen innerhalb der Antenne. Von Seiten des IGS

werden nur Typmittelwerte zur Verfügung gestellt, welche die individuellen Empfangseigenschaften der Antennen nicht so genau beschreiben, wie dies bei individuell kalibrierten Antennen der Fall ist. Für alle mit einem Leica System ausgestatteten GNSS-Pegelstationen der BfG liegen individuell kalibrierte absolute Antennenparameter (Roboterkalibrierung der Firma Geo++) vor. Im Rahmen der Kalibrierung wurde das komplette GNSS-Antennensystem (Antenne, Radom und Dreifuß) kalibriert und in identischer Form später auf den Pegeln installiert. Für die fünf Trimble Stationen liegen keine individuellen Kalibrierwerte einer Roboterkalibrierung vor. Die Antennen wurden von der Technischen Universität Dresden mit einem anderen Verfahren kalibriert, wobei während der Kalibrierung keine Radome installiert waren. Die Installation auf den Pegeln erfolgte mit Radomen, welche die Empfangseigenschaften der Antenne signifikant ändern und die ursprünglich bestimmten Antennenmodelle nicht mehr genutzt werden können. Die Kalibrierung der TU-Dresden hat gezeigt, dass das Empfangsverhalten der Antennen kaum Variationen gegenüber einem Mittelwert aufweist. Im Rahmen der Prozessierung wurden daher Typmittelwerte (für diesen Antennentyp mit Radom) der Roboterkalibrierung genutzt.

Die eigentliche Prozessierung beinhaltet eine Vorprozessierung, in der die präzisen Bahndaten aufbereitet, die Satelliten- und Empfängeruhren auf Codebasis synchronisiert und die Beobachtungsdaten einem Datenscreening unterzogen werden. Eventuelle Phasensprünge und Ausreißer werden markiert bzw. eliminiert. Dem schließt sich die Lösung der so genannten Mehrdeutigkeiten (QIF¹⁰-Strategie) und eine abschließende Parameterschätzung an. Je Tag erfolgt eine Schätzung der Basislinien (=Koordinatendifferenzen) und weiterer Parameter. Für höchste Genauigkeitsansprüche werden von geodätischen GNSS-Empfängern nicht nur die so genannten Code- oder Laufzeitmessungen, sondern auch die Phasenreststücke des eigentlichen Signals erfasst. Jede beobachtete Strecke zwischen Satellit und GNSS-Empfänger besteht demnach aus n vollständigen Schwingungen (Wellenlänge etwa 0,25m) und einem ausgemessenen Phasenreststück. Die Ermittlung der Anzahl vollständiger Schwingungen wird als Lösung der Mehrdeutigkeit bezeichnet.

Ergebnis sind tägliche Normalgleichungen, die zu einzelnen Koordinatenlösungen kombiniert werden (DACH et al., 2007). Für so kombinierte Wochenlösungen erfolgt eine freie Netzausgleichung oder eine Lagerung auf Referenzstationen. Die freie Netzausgleichung dient in erster Linie Kontrollzwecken. Bei einer Lagerung auf Referenzstationen werden je nach Referenzstationen und deren Koordinaten relativ zu einem definierten Referenzsystem bzw. einer Realisierung Koordinaten für die GNSS-Pegelstationen relativ zur Realisierung der Referenzstationen ermittelt.

3.6 K o o r d i n a t e n e r g e b n i s s e

Wie an früherer Stelle erwähnt, stellt der IGS wöchentliche Koordinatenlösungen der IGS-Referenzstationen zur Verfügung. Die wöchentlichen Koordinatenlösungen stellen eine reine GNSS Lösung dar und werden als IGS05 bzw. IGS08 bezeichnet. Exemplarisch sind die offiziellen Koordinatenlösungen der IGS-Stationen Westerboork (WSRT), Potsdam (POTS) und Onsala (ONSA) in den Abb. 24 - 26 dargestellt (abgeleitet aus den wöchentlichen SINEX-Files des IGS). Die Höhenangaben beschreiben die absolute ellipsoidische Höhe unter Nutzung des GRS80 Ellipsoids. Für eine

¹⁰ QIF: Quasi Ionosphere Free Algorithmus

bessere Darstellung der Lageänderungen erfolgte eine Umrechnung der Länge- und Breiteangaben in UTM-Koordinaten mit anschließender Mittelwertzentrierung. Die dargestellten Lageänderungen werden in erster Linie durch die Kontinentaldrift verursacht.

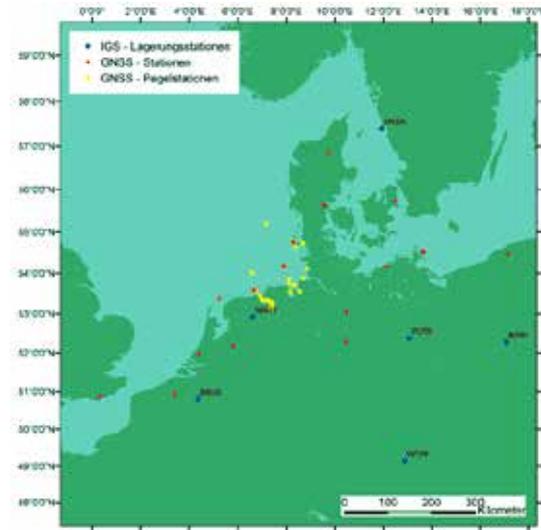


Abb. 23: Lagerungsstationen des IGS im Untersuchungsgebiet

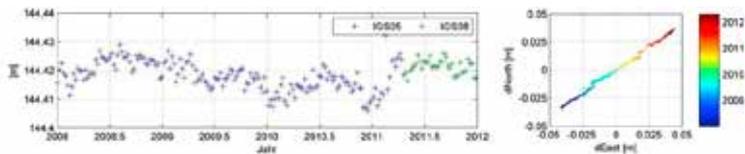


Abb. 24: IGS-Koordinatenlösung für die Station Potsdam (POTS)

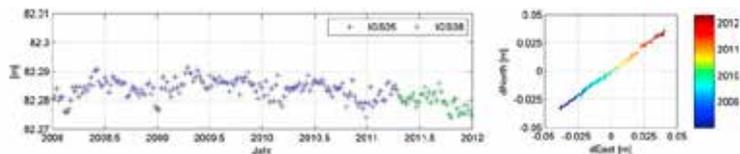


Abb. 25: IGS-Koordinatenlösung für die Station Westerbork (WSRT)

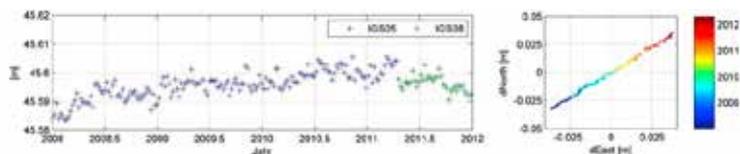


Abb. 26: IGS-Koordinatenlösung für die Station Onsala (ONSA)

Im Rahmen der BfG- Prozessierung dienen IGS - Referenzstationen und deren Koordinatenlösungen zur Lagerung des BfG-Netzes. Die IGS-Station der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB) dient nicht der Lagerung, sondern wird als Kontrollstation mitprozessiert. Es erfolgte eine Koordinatenberechnung im BfG-Netzwerk und ein anschließender Vergleich der Koordinatenlösung mit der offiziellen IGS-Lösung (Abb. 27). Aus dieser Abbildung geht hervor, dass die absolute Abweichung der Höhenkomponente in nahezu allen Fällen <5mm ist. Für die Lagekomponente ergeben sich in nahezu allen Fällen Abweichungen <2mm.

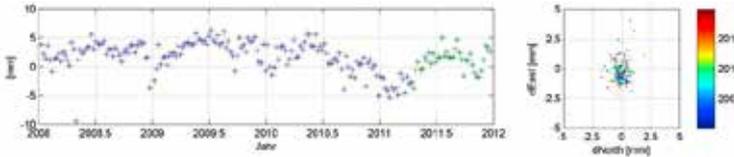


Abb. 27: IGS-Koordinatenlösung für die Station ONSA (ONSA)

Tab. 8: Mittlere Abweichung zwischen der BfG- und IGS-Koordinatenlösung der Station Braunschweig (PTBB)

	East		North		Höhe	
	Mittelwert [mm]	Standardabw. [mm]	Mittelwert [mm]	Standardabw. [mm]	Mittelwert [mm]	Standardabw. [mm]
2008	0.0	0.5	0.0	1.5	2.0	3.0
2009	0.1	0.7	0.0	1.7	3.3	1.8
2010	-0.2	0.5	-0.3	0.7	1.4	2.4
2011	0.0	0.5	-0.3	0.8	-0.1	2.7

Von Seiten der IAG-Subkommission EUREF bzw. durch deren Referenznetzwerk EPN wird ein verdichtetes Netzwerk von Referenzstationen und zugehörigen Koordinatenlösungen und damit ein für Europa verdichteter Raumbezug bereitgestellt. Die EUREF-Realisierung entspricht einer Verdichtung des IGS-Netzwerkes und liefert ebenfalls Koordinaten im IGS05 bzw. IGS08 (EUREF, 2012). Deutschland wird durch das BKG in EUREF vertreten und stellt als Rechenstelle auch Ergebnisse des EPN bereit. Die EPN Lösung ist mit der BfG- Lösung insofern vergleichbar, als dass beide Netzwerke als Verdichtungsnetzwerke des IGS angesehen werden können. Einzelne Referenz- und Kontrollstationen sind in beiden Netzen vorhanden. Aufgrund der abweichender Netzkonfiguration und Referenzstationen sind beide Lösungen nicht direkt miteinander vergleichbar. Für einen indirekten Vergleich wird epochenweise eine 7-Parameter Helmerttransformation zwischen beiden Lösungen ausgeführt. Eine Eigenschaft der 7-Parametertransformation besteht darin, dass die innere Geometrie der Netzlösung nicht verändert wird. Die Differenzen zwischen transformierten und originär bestimmten Koordinaten werden als Restklaffen bezeichnet und die mittleren Restklaffen der Referenz- und Kontrollstationen sind in Tab. 9 dargestellt. Exemplarisch für einzelne Stationen sind die Zeitreihen der Restklaffen in Abb. 28 dargestellt.

Tab. 9: Restklaffen zwischen der EUREF-Lösung und der BfG Koordinatenlösung

	East		North		Höhe		Bemerkung
	Mittelwert [mm]	St.Abw. [mm]	Mittelwert [mm]	St.Abw. [mm]	Mittelwert [mm]	St.Abw. [mm]	
BORI	0.1	0.7	0.2	0.5	0.9	1.0	Passpunkt
BRUS	-0.1	0.5	0.2	0.5	0.0	0.7	Passpunkt
ONSA	-0.4	0.4	-0.2	0.6	-0.4	0.9	Passpunkt
POTS	0.3	0.7	0.4	1.3	0.5	1.3	Passpunkt
WTZR	-0.9	0.9	-0.8	0.6	-1.7	1.7	Passpunkt
WSRT	0.5	0.4	0.3	0.5	0.0	0.9	Passpunkt
ZIMM	0.5	0.6	-0.1	0.5	0.6	1.2	
BORJ	0.7	0.5	-1.9	1.4	-4.1	2.6	
BUDP	-0.1	0.6	-0.2	0.9	0.3	1.4	
DELF	0.3	0.5	-0.3	0.5	2.0	1.5	
HERS	0.1	0.8	-0.4	0.8	-2.4	1.9	
HELG	1.6	1.6	-0.9	1.0	-2.0	2.2	
HOBU	1.6	1.1	-0.2	0.8	-0.4	2.5	
HOE2	0.5	1.3	-2.7	1.6	-5.2	2.1	
KOSG	1.5	0.6	0.9	0.8	2.2	1.8	
OSLS	0.2	0.6	-0.2	1.0	0.0	2.1	
PTBB	-0.4	1.3	-1.4	1.0	3.4	2.1	
SMID	0.3	0.7	0.2	1.2	-0.6	1.1	
STAS	-0.7	0.8	-0.6	0.9	-1.9	2.0	
SULD	0.1	0.5	0.0	0.6	-1.0	1.4	
TERS	0.3	0.5	-0.5	0.7	2.2	1.8	
TRDS	-0.1	1.0	-0.1	1.6	1.6	3.1	

Aus Tab. 9 wird ersichtlich, dass die Restklaffen der Kontrollpunkte im Mittel Beträge von bis zu max. 5.2 mm in der Höhenkomponente annehmen. Praktisch bedeutet dies, dass die inneren Koordinatendifferenzen zwischen der EUREF und der BfG-Lösung bis auf wenige Millimeter übereinstimmen.

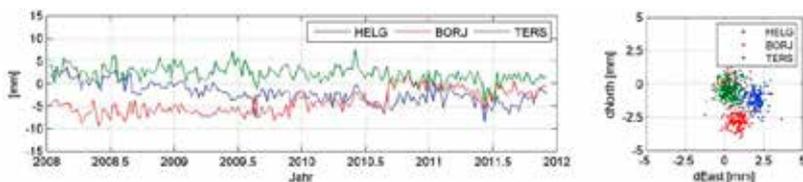


Abb. 28: Restklaffen ausgewählter EPN-Stationen

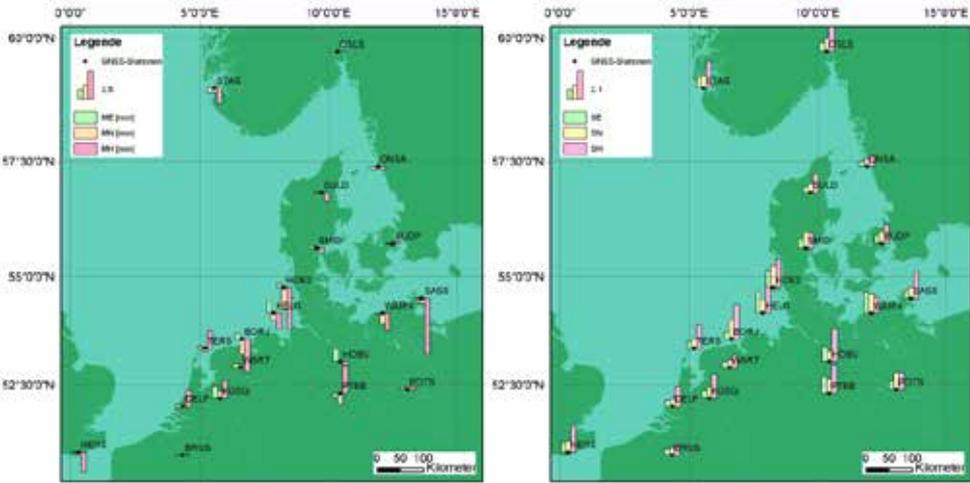


Abb. 29: Mittlere Restklaffen (links) und deren Standardabweichungen (rechts) der Lagerungs- und Kontrollpunkte

Für die Koordinatenlösungen der GNSS-Pegelstationen ergeben sich je nach Installationszeitpunkt mehr oder weniger lange Zeitreihen. Die Mehrzahl der Stationen wurde ab 2009 installiert, wodurch bis Ende 2011 nur etwa 3 Jahre Beobachtungsmaterial vorliegen. Weiterhin ist bei der Analyse der Daten zu beachten, dass im April 2011 mit dem ITRF2008 bzw. dem IGS08 eine neue Realisierung des ITRS eingeführt wurde und sich dadurch Höhensprünge im Bereich weniger Millimeter ergeben. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur die Ergebnisse im IGS05 (bis April 2011) näher betrachtet.

Exemplarisch sind die wöchentlichen Koordinatenzeitreihen der Stationen Unterfeuer Dwarsgat, LT Alte Weser und Hörnum in den Abb. 30-32 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Höhenlösungen z.T. starken zyklischen Schwankungen unterworfen sind. Besonders ausgeprägt sind entsprechende Effekte bei höheren (Stahl-) Bauwerken, wie etwa Leuchttürmen oder Leuchtfeuern. Bei den betroffenen Bauwerken handelt es sich jeweils um Stahl- bzw. Stahlbetonbauwerke, wobei aufgrund der Temperaturdifferenzen mit Ausdehnungseffekten zu rechnen ist. Zur Abschätzung der Auswirkung ist folgende Übersichtsrechnung nötig. Stahlbeton hat einen mittleren Ausdehnungskoeffizienten von 1×10^{-5} . Ein Bauteil mit einer Länge von 40m ändert sich bei einer Temperaturänderung von 1K um 40×10^{-5} m oder 0.4mm bzw. bei 10K im 4mm. Aufgrund der zyklischen Variationen wird deutlich, dass eine präzise Überwachung der Höhenlage nur unter Nutzung kontinuierlich arbeitender Sensoren möglich ist. Eine Ableitung von Änderungsraten aus einzelnen Kampagnenlösungen ist nur beschränkt möglich, da die Phasenlage der zyklischen Variationen nicht bekannt ist.

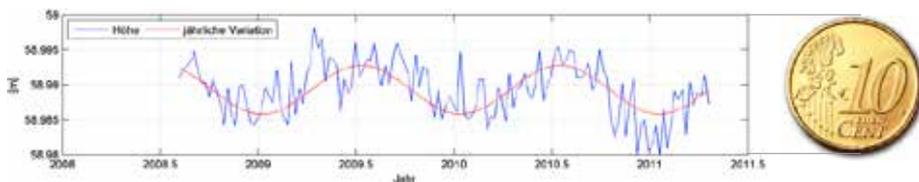


Abb. 30: Höhenkomponente und jährliche Variation der Koordinatenlösung der Station Unterfeuer Dwarsgat (FLDW)

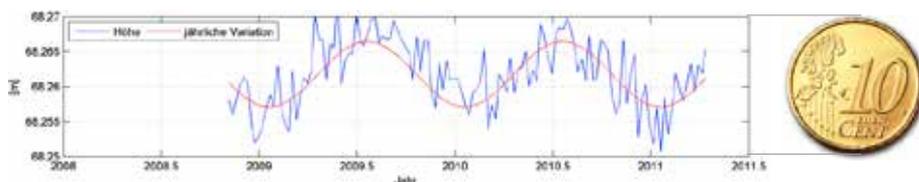


Abb. 31: Höhenkomponente und jährliche Variation der Koordinatenlösung der Station LT Alte Weser (LHAW)

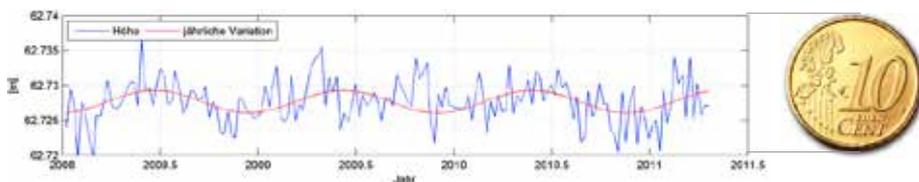


Abb. 32: Höhenkomponente und jährliche Variation der Koordinatenlösung der Station Hörnum (HOE2)

Hochfrequente Variationen aufgrund von Ebbe und Flut werden im Rahmen der Prozessierung durch die Modellierung von Auflast- und Festerdezeiten bereits berücksichtigt. Zusätzlich sind die verbleibenden saisonalen zyklischen Anteile zu eliminieren. Die Schätzung zyklischer Variationen kann durch unterschiedliche Methoden erfolgen. Im Rahmen dieser Ausarbeitungen erfolgt eine Schätzung auf Basis ausgleichender Sinus-Funktionen und Fourier-Analysen. Bei einer Fourieranalyse erfolgt eine Transformation der Höhen in den Spektralbereich bzw. die Darstellung der Zeitreihe als eine Überlagerung definierter Frequenzen. Die Darstellung der zu den jeweiligen Frequenzen gehörenden Amplituden wird als Amplitudenspektrum bezeichnet und ist exemplarisch in Abb. 33 für die Station Unterfeuer Dwarsgat dargestellt. Aus dem Amplitudenspektrum wird ersichtlich, dass eine ausgeprägte Amplitude für eine einjährige Frequenz vorhanden ist. Entsprechende Analysen sind nur bei längeren Zeitreihen möglich. Aus diesem Grund erfolgten entsprechende Analysen nur bei den Pegeln, deren GNSS-Systeme vor Mai 2009 installiert wurden.

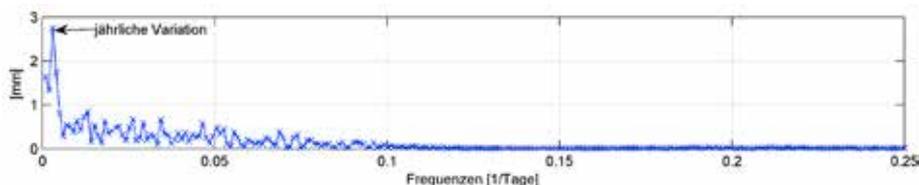


Abb. 33: Amplitudenspektrum der Höhenkomponente der Station Unterfeuer Dwarsgat (FLDW)

Unter Nutzung einer fourierbasierten Filterung ergeben sich die in Abb. 34-36 dargestellten Zeitreihen. Für Trendaussagen sind möglichst lange Zeitreihen nötig. Bei gleichbleibenden Variationen und Änderungssignal steigt die statistische Zuverlässigkeit der abgeleiteten Trends mit der Länge der Zeitreihe an. Dem entsprechend werden nur für Stationen Aussagen getroffen, die vor März 2009 installiert wurden. Die abgeleiteten Änderungsraten bzw. Höhenänderungen zwischen 2008 und 2010 sind für diesen Zeitabschnitt im Allgemeinen geringer als die Standardabweichung der Zeitreihe. Mit zunehmender Beobachtungslänge ist aber davon auszugehen, dass die Standardabweichungen sinken, während das Änderungssignal bzw. die Höhenänderung zunimmt. Eine Ableitung signifikanter Trends ist mit dem derzeit verfügbaren Beobachtungsmaterial noch nicht möglich. In naher Zukunft werden von Seiten des IGS dessen Produkte komplett im IGS08 reprozessiert. Dies hätte zur Folge, dass auch die BfG Lösung komplett im IGS08 berechnet werden könnten und somit längere Zeitreihen für eine Trendanalyse zur Verfügung stehen würden.

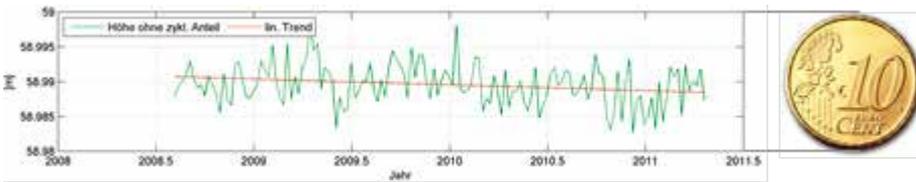


Abb. 34: Höhen und linearer Trend ohne zyklischen Anteil der Station FLDW

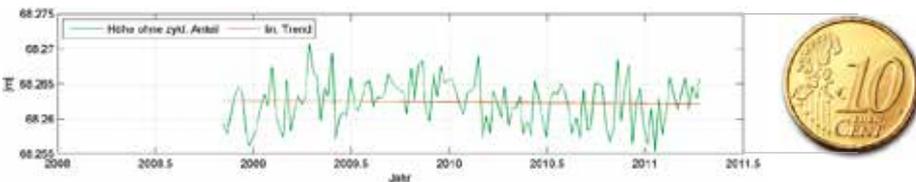


Abb. 35: Höhen und linearer Trend ohne zyklischen Anteil der Station LHAW

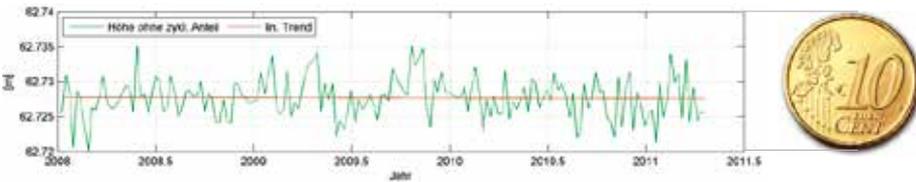


Abb. 36: Höhen und linearer Trend ohne zyklischen Anteil der Station HOE2

Tab. 10: Höhen, zyklische Schwankungen und lineare Trends von GNSS-Pegelstationen (bis April 2011)

Ergebnisse im IGS05						
Station	Epochen	Höhe 2008-2010		zyklische Schwankung (Fourier) [mm]	lin. Trend ohne zykl. Anteil [mm]/[Jahr]	Standardabw. ohne zykl., und lin. Anteil [mm]
		Mittelwert [mm]	Standard- abweichung [mm]			
HOE2	170	62.728	2.8	n.n.	-0.1	3.1
HELG	170	48.406	3.5	n.n.	0.2	3.7
BORJ	170	53.040	2.8	n.n.	0.8	2.9
TGKN	128	53.419	2.8	2.1	-1.4	3.0
FLDW	140	58.990	2.9	2.7	-0.7	3.3
LHAW	128	68.262	3.3	3.5	-0.4	4.0
TGCU	122	48.796	3.1	n.n.	0.7	3.3
TGBF	102	48.765	2.5	n.n.	-1.4	2.7
TGBU	100	51.209	2.5	2.6	-1.0	2.4
TGDA	100	50.321	3.0	2.5	0.2	3.1
TGME	80	73.289	2.3			
TGEM	80	51.073	2.5			
TGPA	80	47.872	2.9			
TGPO	78	48.317	3.1			
TGTE	72	52.648	2.8			
TGWE	78	49.746	2.3			
TGF3	60	70.207	4.5			
TGBH	58	50.852	3.0			
TGWH	58	49.303	2.5			

Tab. 11 Höhenlösungen der GNSS-Pegelstationen relativ zu IGS05 und abgeleitete Kenngrößen

Ergebnisse im IGS05					
Station	Epochen	Höhe 2008-2010		Höhendifferenz zum Pegel- nullpunkt [m]	Höhe Pegelnul im IGS05 [m]
		Mittelwert [m]	Standard- abweichung [mm]		
HOE2	170	62.728	2.8	-27.579	35.149
HELG	170	48.406	3.5	-14.254	34.152
BORJ	170	53.040	2.8	-17.860	35.18
TGKN	128	53.419	2.8	-17.970	35.449
FLDW	140	58.990	2.9	-24.312	34.678
LHAW	128	68.262	3.3	-33.700	34.562
TGCU	122	48.796	3.1	-14.445	34.351
TGBF	102	48.765	2.5	-13.585	35.18
TGBU	100	51.209	2.5	-15.446	35.763
TGDA	100	50.321	3	-15.304	35.017
TGME	80	73.289	2.3	-38.638	34.651
TGEM	80	51.073	2.5	-15.601	35.472
TGPA	80	47.872	2.9	-11.988	35.884
TGPO	78	48.317	3.1	-12.873	35.444
TGTE	72	52.648	2.8	-17.169	35.479
TGWE	78	49.746	2.3	-14.147	35.599

TGF3	60	70.207	4,5	-8.656	61.551
TGBH	58	50.852	3	-16.166	34.686
TGWH	58	49.303	2,5	-14.400	34.903

In Tab. 10 sind die resultierenden mittleren Höhen, die Standardabweichungen der Zeitreihen, die zyklischen Variationen, langfristigen Trends und Residuen der Zeitreihen dargestellt. Eine Eliminierung der saisonalen zyklischen Variationen erfolgt nur dann, wenn die geschätzte Amplitude größer 1.5mm ist. Eine entsprechende Amplitude entspricht einer Variation von jeweils 1.5mm nach oben und unten. Insgesamt ergeben sich somit 3mm, was in etwa den Standardabweichungen der Zeitreihen der Höhenlösungen entspricht. Die Zeitreihen, welche keine erkennbaren saisonalen zyklischen Variationen aufweisen sind in Tabelle 10 mit n.n. (nicht nachweisbar) gekennzeichnet. Eine Trendanalyse erfolgt nur bis zur Station TGDA (Dagebüll), da alle weiteren Stationen nach März 2009 installiert wurden. Folglich sind die Zeitreihen bis April 2011 (Wechsel von IGS05 auf IGS08 und einem damit verbundenen Bruch in der Zeitreihe) für die Ableitung jährlicher Trends und Variationen zu kurz (<2 Jahre).

In Tab. 11 sind die resultierenden Höhen der Pegelnullpunkte enthalten. Es handelt sich dabei um rein ellipsoidische Höhenangaben, bezogen auf das GRS-80 Ellipsoidmodell. Für eine Überführung in physikalische Höhen sind diese noch mit einem Schwerefeldmodell zu kombinieren (z.B: EGG2008). Eine Kombination der Ergebnisse aus Tab. 11 mit den an den Pegel erfassten Wasserständen erlaubt eine Ableitung derselbigen in Bezug auf die Realisierung IGS05. Dies erlaubt einerseits grenzüberschreitende hydrologische Auswertungen und andererseits die Kombination mit anderen satellitengestützten Beobachtungsverfahren, wie etwa der Satellitenaltimetrie.

Die in Tab. 10 dargestellten Trends sind statistisch als nicht signifikant einzustufen. Ursache hierfür sind die relativ kurzen Zeitreihen. Die Residuen der Zeitreihe von 2008 – 2010 sind größer als die abgeleiteten Änderungssignale. Bei einer Betrachtung der Trends bleibt festzustellen, dass diese die Ergebnisse frühere Arbeiten (z.B. KFKI - Projekt „Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik“ IKÜS) zu bestätigen scheinen. Für Borkum wird im IKÜS - Abschlussbericht eine Änderungsrate von $\sim -1.5\text{mm}/\text{Jahr}$ auf Basis der GNSS-Beobachtungen angegeben. Diese basiert im Wesentlichen auf der früheren Station BORK, welche in unmittelbarer Nähe des Pegels Borkum-Fischerbalje installiert war. Sowohl TGBF wie auch BORK befinden sich auf aufgespültem Land, dass sich hinsichtlich der Vertikalbewegungen eine vollkommen andere Bewegungscharakteristik gegenüber gewachsenem Land aufweist. Dies erklärt die Unterschiede zur Station BORJ (Borkum-Südstrand), die auf der ursprünglichen Insel installiert ist. Für den Bereich der Außenweser (Stationen FLDW und LHAW) scheinen sich die Ergebnisse aus IKÜS zu bestätigen. Werden im Abschlussbericht Änderungsraten von $\sim -0.5 - -1.0\text{mm}/\text{Jahr}$ genannt, so können diese durch die Ergebnisse der Prozessierung bestätigt werden. Eine Ausnahme ist die Station Cuxhaven-Steubenhöft, bei welcher sich die Ergebnisse aus IKÜS nicht bestätigen lassen. Ist im IKÜS- Abschlussbericht noch von einer Bewegung von ca. $-1.6\text{mm}/\text{Jahr}$ die Rede, ergeben die Prozessierungen zwischen 2008 und 2011 eine leichte Hebung. In diesem Fall ist zu beachten, dass die IKÜS Ergebnisse auf der SAPOS-Station Cuxhaven basieren, während die hier prozessierte Station direkt auf dem Pegel installiert ist.

Prinzipiell ist zu sagen, dass im Gegensatz zu IKÜS mit Ausnahme der Stationen HELG, HOE2 und BORJ die GNSS-Beobachtungen direkt auf den Pegel durchgeführt wurden. Folglich beschrei-

ben die Ergebnisse nur das Verhalten des Pegels und lassen keine weiteren Rückschlüsse auf das umliegende Gebiet zu, es sei denn das Pegelbauwerk kann als repräsentativ für die nähere Umgebung angesehen werden. Die GNSS-Ergebnisse aus IKÜS basieren auf den SAPOS-Stationen, welche im Allgemeinen auf Gebäuden installiert waren. Somit gelten die im IKÜS- Abschlussbericht genannten, aus GNSS-Beobachtungen abgeleiteten Vertikalbewegungen auch nur für die Gebäude. Inwieweit dies eine mögliche Ursache für das Verhalten der Station Cuxhaven ist, kann an dieser Stelle nicht näher beurteilt werden.

Die Ursachen für Vertikalbewegungen können ganz unterschiedlicher Natur sein. Häufig haben anthropogene Effekte, wie etwa Bodenschatz- oder Grundwasserentnahmen, Setzungen oder die unterirdische Speicherung von Rohstoffen (z.B. Erdgas oder Erdöl im Bereich der Ems bzw. im Bereich Wilhelmshaven) einen weitaus stärkeren Einfluss, als dies bei natürlichen tektonischen Einflüssen der Fall ist. Da diese Einflüsse lokal sehr begrenzt sind, können einerseits die Ergebnisse sehr stark variieren und andererseits ohne weitere Informationen (z.B. aus Nivellements) keine flächenhaften Informationen abgeleitet werden. Das originäre Ziel dieser Anstrengungen sind exakte Höheninformationen (Höhen + deren Änderungen) der Pegel. Das Verfahren „GNSS@tidegauge“ erlaubt die Ableitung entsprechender Informationen. Alle installierten Stationen werden von der BfG bzw. dem BKG weiterbetrieben. Folglich liegen auch derzeit bis 2012 GNSS-Beobachtungen vor. Zur Zeit werden von Seiten des IGS die nötigen IGS-Produkte im IGS08 neu prozessiert, so dass nach deren Veröffentlichung eine Ableitung von längeren Zeitreihen (vier und mehr Jahre) möglich ist. Die daraus abgeleiteten Trends werden im Gegensatz zu den jetzt vorliegenden Ergebnissen statistisch weitaus sicherer sein.

4. D a n k s a g u n g

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Ergebnissen des KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) Projektes PEGAUS – Fördernummer (03KIS077) und dem Projekt 2.02 „Rezente Krustenbewegungen und Validierung von Klimaprojektionen zu Wasserstandsänderungen an den Küsten“ aus dem vom BMVBS initiierten Ressortforschungsprogramm KLIWAS. Weiterhin sei den Wasser- und Schifffahrtsämtern Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven und Tönning für die Zusammenarbeit, Hinweise und die Unterstützung gedankt.

5. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- ANGERMANN, D.; DREWES, H.; GERSTL, M.; KELM, R.; KRÜGEL, M. and MEISEL, B.: ITRF Combination – Status and Recommendations for the Future, http://www.iag-aig.org/attach/89239e4fcab8a1098cedfc494a7eb67b/G01-Angermann_itrf.pdf, 2005.
- BECKERS, H.; BEHNKE, K.; DERENBACH, H.; FAULHABER, U.; IHDE, J.; IRSEN, W.; LOTZE, J. und STRERATH, M.: Diagnoseausgleichung SAPOS - Homogenisierung des Raumbezuges im System ETRS89 in Deutschland. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 4/2005, 2005.
- DACH, R.; HUGENTOBLER, U.; FRIDEZ, P. and MEINDL, M.: Bernese GPS-Software Version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern, 2007.
- EUREF PERMANENT NETWORK: http://www.epncb.oma.be/_organisation/relation_to_igs.php, 2012.

- GÖRRES, B.: Vom globalen Bezugssystem bis zur Umsetzung für die Praxis. DVW – Schriftenreihe Bd. 63 – Seite 39-57 – Wißner-Verlag Augsburg – 2010
- INTERNATIONAL GNSS SERVICE: Internet <http://www.igs.org/>
- IPCC: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor und H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT Wasser (LAWA) UND BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (BMV): Pegelvorschrift - Anlage C - Anweisung für das Festlegen und Erhalten der Pegel in ihrer Höhenlage. Kulturbuchverlag Berlin GmbH, 2007.
- SUDAU, A. and 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. KFKI Aktuell, 16-20, 2008.
- SUDAU, A. und WEIß, R.: Entwicklung eines operationellen automatisierten Höhenüberwachungssystems für Pegel im Bereich der Deutschen Bucht (PEGASUS – Deutsche Bucht). Abschlussbericht KFKI Projekt 03KIS077, 2009.
- WANNINGER, L. et al.: Bestimmung von Höhenveränderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken. Die Küste, 76, 2009.
- WANNINGER, L.; NIEMEYER, W.; JAHN, C. H. und SUDAU, A: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik IKÜS. Abschlussbericht KFKI Projekt 03KIS055-058.
- WEIß, R. und SUDAU, A: Geodätische Aspekte von Höhen und Höhenänderungen der Pegel und Pegelfestpunkte im Küstenbereich. Hydrologie und Wasserwirtschaft, 2012.