

Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken

Von LAMBERT WANNINGER, CHRISTIAN ROST, ASTRID SUDAU, ROBERT WEISS, WOLFGANG NIEMEIER, DIETER TENGEN, MICHAELA HEINERT, CORD-HINRICH JAHN, SEBASTIAN HORST und ALEXANDER SCHENK

Zusammenfassung

Für die Analyse von Wasserständen, die durch Küstenpegel beobachtet werden, sind Informationen über Höhenänderungen dieser Pegel aufgrund von vertikalen Bewegungen der Erdoberfläche unverzichtbar. Lokale, regionale und auch großräumige Bewegungen der Erdoberfläche werden durch geodätische Messtechniken bestimmt. Wiederholte Präzisionsnivellements werden dafür seit über 100 Jahren eingesetzt, satellitengestützte Positionsbestimmung und Absolutschweremessungen seit etwa 15 Jahren. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden die Messergebnisse geodätischer Messverfahren aus dem nordwestdeutschen Raum, die z. T. viele Jahrzehnte zurückreichen, neu aufbereitet und so kombiniert, dass ein gemeinsames Höhen-Geschwindigkeitsfeld für die deutsche Nordseeküste berechnet werden konnte.

Der flächenhafte Modellierungsansatz für das Höhen-Geschwindigkeitsfeld basiert auf radialen Basisfunktionen. Die Kombination dieses Höhen-Geschwindigkeitsfeldes mit den Wasserstandsregistrierungen der Küstenpegel ermöglicht es, genauere und zuverlässigere Wasserstandsänderungen zu ermitteln. Zusätzlich werden Probleme der präzisen Höhenbestimmung, die sich aus der Weiterentwicklung geodätischer Messtechniken ergeben, behandelt.

Schlagwörter

Nivellement, GNSS, Pegel, Schwere, Höhenänderungen

Summary

The analysis of sea-level changes observed by tide-gauge measurements requires information of height changes of these gauges caused by vertical land movements. Such local, regional, or large-scale vertical land movements are monitored by geodetic observation techniques. In Germany precise geometric levelling campaigns have been performed for more than 100 years, whereas satellite based positioning and absolute gravity observations are available for time spans of about 15 years. This paper provides results of the combination of the various geodetic observations of height changes being available for the north-west German region for a time span of several decades. The results include a combined height velocity field for the German North Sea coast line. The mathematical model of the height changes is based on radial basic functions. Correcting the tide-gauge measurements with this velocity field of vertical land movements allows a more precise and a more reliable determination of sea-level changes. The paper also discusses several future challenges in precise geodetic observations of height differences which are the result of the ongoing development of the observation techniques.

Keywords

Levelling, GNSS, gauge, gravity, height variations

I n h a l t

1. Einleitung	122
2. Nivellement	124
2.1 Analyse und Aufbereitung historischer und aktueller Nivellementdaten	125
2.2 Validierung zukünftiger Netzstrukturen	129
3. Global Navigation Satellite System (GNSS)	132
3.1 Auswertung der GNSS-Beobachtungen	132
3.2 Entwicklung einer mehrwegeresistenten Referenzstation	137
3.3 Erfassung von Mehrwegeänderungen infolge von Antennenwechseln	139
4. Pegel	142
4.1 Geodätische Arbeiten der Bundesanstalt für Gewässerkunde	142
4.2 Analyse und Aufbereitung der Wasserstandsregistrierungen	152
4.3 Zukünftiges Pegelmonitoring	153
5. Schwere	155
5.1 Schweremessungen zur Überführung nivellitische Höhenunterschiede in geopotentielle Koten	155
5.2 Höhenveränderungen aus Schweremessungen	155
6. Datenbank	157
6.1 Datenbankstruktur	158
6.2 Zugriffskonzept	161
7. Kombination der geodätischen Messtechniken	162
7.1 Grundgedanken	162
7.2 Entwicklung des kinematischen Modells	163
7.3 Realisierung	169
7.4 Ausgleichung	171
7.5 IKÜS-Software	172
7.6 Ergebnis	174
8. Gesamtergebnisse	176
8.1 Aufbereitete Messdaten	176
8.2 IKÜS-Datenbank	177
8.3 IKÜS-Software und Höhen-Geschwindigkeitsfeld	178
9. Danksagung	179
10. Schriftenverzeichnis	179

1. Einleitung

Wasserstände werden an den Küsten durch Pegel erfasst. Zur Erkennung von langfristigen Wasserstandsänderungen werden Pegelmesszeitreihen verwendet. Bei deren Analyse sind präzise Angaben zur Höhenlage der Pegel erforderlich. Die Höhen der Pegel sind vielfach nicht konstant, sondern unterliegen tektonischen und anthropogenen Einflüssen (z. B. durch Rohstoffentnahmen), die eine vertikale Bewegung der Erdoberfläche und damit auch der Pegel bewirken können. Diese vertikalen Bewegungen erreichen in Teilbereichen der deutschen Nordseeküste bis zu einigen Millimetern pro Jahr.

Häufig überlagern sich reale Wasserstandsänderungen und vertikale Bewegungen der Erdoberfläche (Abb. 1). Werden letztere nicht berücksichtigt, ergeben sich systematisch verfälschte Wasserstandsänderungen, die eine korrekte Interpretation der hydrologischen oder klimabedingten Ursachen der Wasserstandsänderungen nicht erlauben. Vertikale Bewegungen der Erdoberfläche wurden mit geodätischen Messtechniken bestimmt, wodurch die Geodäsie einen unverzichtbaren Beitrag zur Erfassung von Wasserstandsänderungen liefert (z. B. BAKER, 1993; TEFERLE et al. 2006).

Das Verbundprojekt IKÜS (2005–2008) – Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik – be-

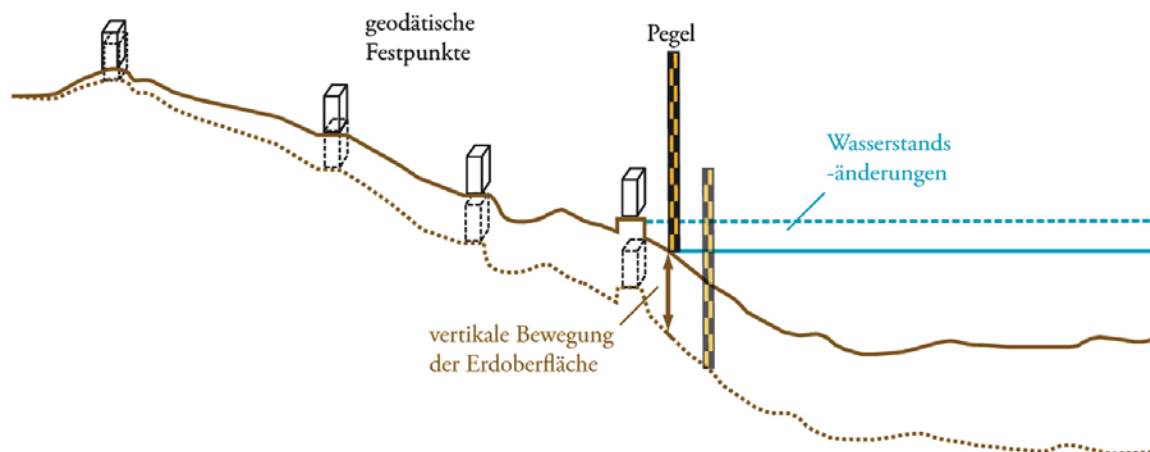


Abb. 1: Zusammenhang von Höhenänderungen, Meeresspiegeländerungen und Pegelinformationen

stand aus vier eng verwobenen Teilprojekten mit eigenen Arbeitsschwerpunkten IKÜS (2009).

Hauptaufgaben des Geodätischen Instituts der Technischen Universität Dresden (GI TU Dresden) waren die Gesamtprojektkoordination und die homogene Reprozessierung der Beobachtungsdaten aus der satellitengestützten Positionsbestimmung. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) befasste sich im Schwerpunkt mit der Aufarbeitung der Anschlussmessungen, der Höhenkontrollmessungen und der Wasserstandsregistrierungen ausgewählter Küstenpegel im Bereich der deutschen Nordseeküste. Hauptaufgaben der Landesvermessung und Geoinformation Niedersachsen (LGN) waren die Aufbereitung der Nivellementdaten, die Bereitstellung der Satellitendaten sowie die Entwicklung der IKÜS-Datenbank.

Das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Braunschweig (IGP TU BS) führte die Kombination der hybriden Messinformationen durch. Ziel des IKÜS-Projektes war die Kombination der höhenrelevanten geodätischen Messverfahren Nivellement, satellitengestützte Positionsbestimmung (*Global Navigation Satellite System* – GNSS) und Schweremessungen auf der Grundlage der z. T. viele Jahrzehnte zurückreichenden Messungen im deutschen Nordseeküstenbereich. Als Ergebnis sollten Informationen über Höhenänderungen (Höhen-Geschwindigkeitsfeld) mit verbesserter räumlicher und zeitlicher Auflösung, sowie höherer Zuverlässigkeit und Genauigkeit entstehen. Die Kombination dieser Informationen mit den Wasserständen bewirkt eine Qualitätsverbesserung der abgeleiteten Wasserstandstrends. Zusätzlich sollten Werkzeuge (IKÜS-Datenbank, IKÜS-Software) entwickelt werden, die es auch zukünftig erlauben werden, neue Ergebnisse der unterschiedlichen geodätischen Messverfahren einzubeziehen und verbesserte Gesamtlösungen zu berechnen.

In einem ersten Schritt wurden die vorhandenen höhenrelevanten Datenquellen, Nivellement (Kap. 2 und 4), *Global Navigation Satellite System* (GNSS) (Kap. 3) und Schweremessungen (Kap. 5) zusammengetragen und unter Beachtung ihrer sensorspezifischen Besonderheiten analysiert und für die Kombination aufbereitet. In einem weiteren Schritt erfolgten die Entwicklung und der Aufbau einer geeigneten Datenbankstruktur (Kap. 6). Die für die Integration und Kombination der hybriden Höheninformationen notwendigen Werkzeuge wurden konzeptionell entwickelt und programmtechnisch realisiert, erprobt und angewandt (Kap. 7).

Auch die Ergebnisse der Kombination – Höhenänderungen höchster Genauigkeit und Zuverlässigkeit – wurden in der IKÜS-Datenbank gespeichert, um sie ausgewählten Nutzern wie z. B. dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) zur Verfügung zu stellen. In Kombination mit den Zeitreihen der Wasserstandsregistrierungen (Kap. 4) im Küstenbereich wird es somit möglich, genauere und zuverlässigere Wasserstandsänderungen zu ermitteln.

Innerhalb des IKÜS-Projektes wurden die Zukunftsaspekte der Höhenbestimmung im Küstenbereich betrachtet. Es wurden Anforderungen definiert und validiert, die sicherstellen sollen, dass auch ausgedünnte Nivellement-Netzstrukturen ihrer Aufgabe bei der Höhenüberwachung der Küstenregionen gerecht werden (Abschnitt 2.2). Es wurden Untersuchungen hinsichtlich einer mehrwegeresistenten GNSS-Referenzstation durchgeführt. Ziel hierbei war die Steigerung der Höhengenaugkeit bei der höhenmäßigen Anbindung der Küstenpegel, aber auch beim Einsatz permanenter GNSS-Referenzstationen (Abschnitt 3.2). Der Übergang beim Pegelmonitoring vom Präzisionsnivellement bzw. Einsatz der Präzisions-schlauchwaage zur satellitengestützten Höhenbestimmung bedarf weiterer Entwicklung. Basierend auf den Erfahrungen, welche im Laufe des Projektes gewonnen werden konnten, wurde ein Konzept für das künftige GNSS-gestützte Höhenmonitoring von Küstenpegeln erarbeitet (Abschnitt 4.3).

Ein Hauptbestandteil des Projektes war die Erschließung und Erfassung der verschiedenen höhenrelevanten Messdaten (Nivellement, GNSS, Pegel und Schwere). Der Großteil der Messdaten stammt von der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Ein Teil der Mess- und Metadaten sind Datenbestand weiterer Behörden des Bundes und der Länder, insbesondere dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), dem Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein (Kiel), dem Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg, der Geo-Information Bremen, den Wasser- und Schifffahrtsdirektionen Nord und Nordwest, den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSA) Cuxhaven, Tönning, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Emden, dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN).

2. N i v e l l e m e n t

Beim Nivellement werden Höhendifferenzen zwischen vermarkten Punkten bestimmt. Die Angabe einer absoluten Höhe für diese Punkte gelingt nur in Bezug auf einen oder mehrere Referenzpunkte, denen eine Höhe, z. B. aus Anschlussmessungen zu einem Pegel, zugewiesen wurde. Die Ableitung von Höhenänderungen aus Wiederholungsmessungen ist möglich, sofern jeweils die gleichen Referenzpunkte gewählt wurden. Die festgestellten Höhenänderungen zeigen nur dann wirkliche Veränderungen der Höhenlage der Festpunkte, wenn der Referenzpunkt als stabil angenommen werden kann.

2.1 Analyse und Aufbereitung historischer und aktueller Nivellementdaten

Für die deutsche Nordseeküste im Bereich der Bundesländer Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein liegen insgesamt 10 Messeperioden vor. Die Perioden reichen bis zum Ende des 19. Jahrhunderts. Abb. 2 gibt einen Überblick über die vorhandenen Messkampagnen im Untersuchungsgebiet. Weitere Informationen sind IKÜS (2009) zu entnehmen.

Die ersten Nivellementmessungen wurden im Rahmen des Urnivellement durchgeführt. Aufgrund der schlechten Vermarkung der Festpunkte, die sich als nicht standsicher erwies, wurde im Zuge der preußischen Landesaufnahme ein neues Nivellementnetz geschaffen. Es wird als Reichshöhennetz (RHN) bzw. als Deutsches Haupthöhennetz 1912 (DHHN 12) bezeichnet.

Dem Reichsamt für Landesaufnahme (1932) ist zu entnehmen, dass es schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts Diskussionen über die Frage der Senkung der deutschen Nordseeküste gab, die zur Einrichtung eines Nivellement-Sondernetzes zu wissenschaftlichen Zwecken – dem Nordseeküstennivellement (NKN) – führten. Bei den durchgeführten Beobachtungen erfolgte gleichzeitig auch der Anschluss der Pegelfestpunkte an das DHHN 12, was die Voraussetzung für die Verknüpfung von Nivellement und Wasserstandsregistrierung ist. Das NKN wurde bisher zweimal wiederholt. Es stellt für die bisherigen Höhenuntersuchungen im Nordwestdeutschen Raum (z. B. LEONHARD 1987) die wichtigste Grundlage dar. Die Wiederholungen des NKN gingen gleichzeitig mit Erneuerungsarbeiten und Wiederholungsmessungen im DHHN einher. Die Abb. 3 zeigt Netzbilder des Nordseeküstennivellement und seiner ersten Wiederholungsmessung.

Die Nivellementnetze Niv-Netz 60 und DHHN 92 entsprangen den Bestrebungen, die bis dahin in Teilnetzen vorliegenden Höhenangaben zusammenzuführen. Für die Teilnetze vor 1960 wurde auf dem Gebiet der alten Bundesländer das Niv-Netz 60 eingerichtet. Der Horizont 74 (Hz 74) wurde nur in Niedersachsen eingeführt. Er entstand auf Grundlage neuer Messungen in Nordwestniedersachsen und zurückliegender Beobachtungen des Niv-Netzes 60. Nach der Wiedervereinigung 1990 wurde ein einheitliches Höhennetz – das DHHN 92 – für Gesamtdeutschland geschaffen. Da bei der Berechnung der Höhen nur Beobachtungsmaterial vorheriger Messkampagnen benutzt wurde, enthalten diese Höhenangaben keine neuen Informationen zu Höhenänderungen und werden daher im Projekt nicht berücksichtigt. Die erste einheitliche gesamtdeutsche Wiederholung des DHHN 12 wird gegenwärtig durch die Messkampagne DHHN 2006–2011 geschaffen (ADV 2008b).

Die im Projekt zur Verfügung stehenden Nivellementdaten wurden bezüglich des Datenformates in Höhen und Höhenunterschieden (= Beobachtungen) unterteilt (IKÜS, 2009). Höhen stellen einen absoluten Wert dar, der aus Beobachtungen (Höhenunterschieden) abgeleitet wird. Die Beobachtungen werden in der Regel korrigiert (z. B. Temperaturkorrektion) und reduziert wie in diesem Fall mittels der Normalorthometrische Reduktion (NOR) und Normalhöhen Reduktion (NHR). Die verbleibenden Schleifenwidersprüche werden bei einer Ausgleichung mit Bedingungsgleichungen auf die Beobachtungen entfernungsabhängig verteilt.

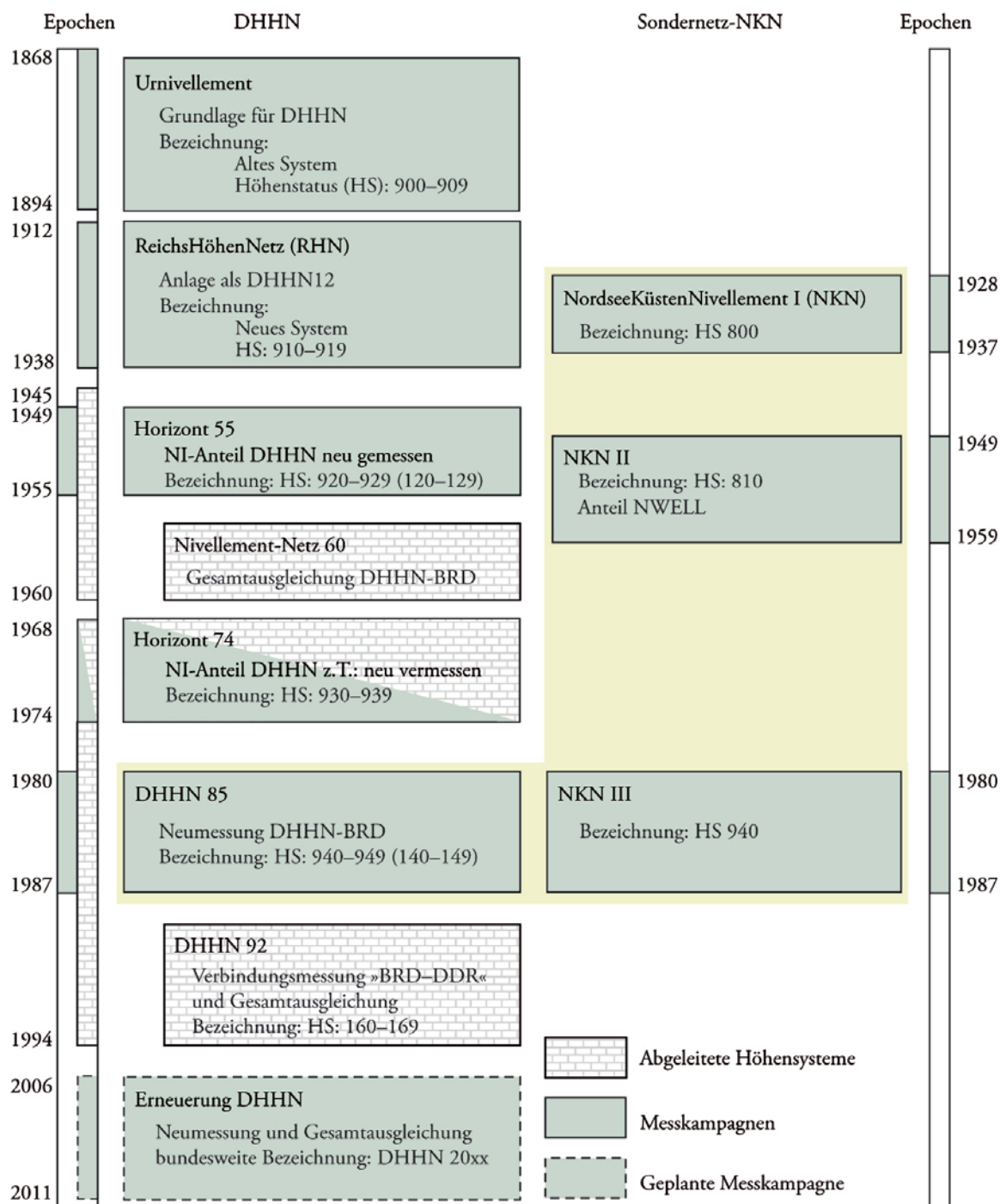


Abb. 2: Übersicht über die im Untersuchungsgebiet vorliegenden Höhennetze

Für die kombinierte Auswertung bestand grundsätzlich die Möglichkeit, Höhen oder Höhenunterschiede als Eingangsgrößen in einer Datenbank zu speichern. Der Höhenbezug der einzelnen Nivellementnetze wurde in den Jahren unterschiedlich realisiert (Tab. 1). Die Nivellementnetze unterscheiden sich hinsichtlich des gewählten Datumspunktes, des Höhenniveaus (Anschlusspegel), der Bezugsfläche und des Maßstabes. Weiterhin gibt es Unterschiede bezüglich der verwendeten Ausgleichsverfahren, der Netzanschlussbedingungen und der verwendeten Korrekturen.

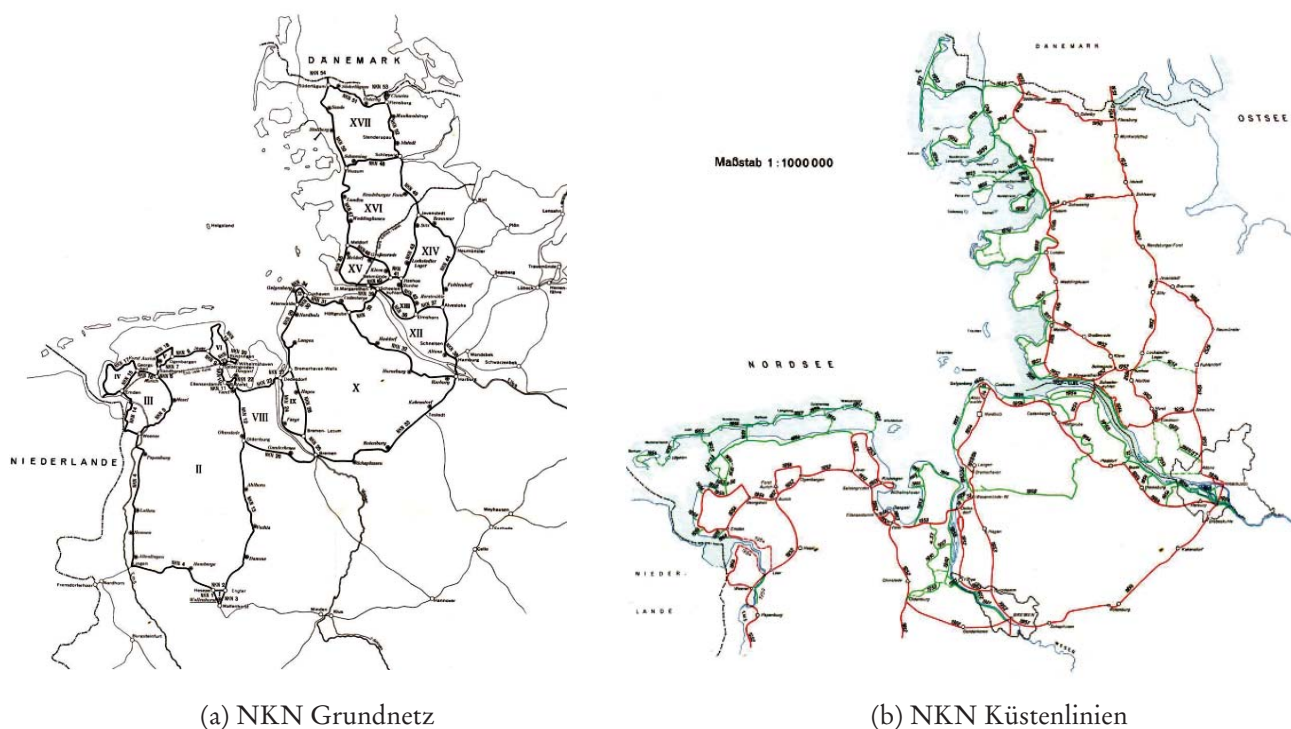


Abb. 3: Netzbilder des Nordseeküstennivellement I und II (ADV, 1960)

Werden Höhen verschiedener Epochen miteinander verglichen und ausgewertet, ergibt sich das Problem, dass sich Höhen bereits aufgrund verschiedener Berechnungsmethoden unterscheiden können. Dies hat zur Folge, dass bei der Ableitung von Höhenänderungen aus den Höhen der verschiedenen Nivellementnetze im Ergebnis Höhenänderungen berechnet werden, die jedoch auf systembedingte Unterschiede zurückzuführen sind. Eine Gegenüberstellung von Höhen verschiedener Messepochen würde als Höhenänderung fehlinterpretiert werden und zu falschen Aussagen führen. Um dies zu vermeiden und nicht die angebrachten Korrekturen, Reduktionen und Ausgleichungsverbesserungen zusätzlich in der Datenbank zu speichern, wurde im Projekt beim Nivellement auf die gemessenen Größen zurückgegriffen. Dies sind die relativen Höhenunterschiede, die als Rohbeobachtungen bezeichnet werden. Daten von abgeleiteten Höhenbezugssystemen konnten nicht für IKÜS-Untersuchungen verwendet werden, da sie Höhenangaben andersartig repräsentieren ohne zusätzliche Informationen bezüglich vertikaler Bewegungen im Untersuchungsgebiet zu liefern.

Entsprechend dieser Zielsetzung erfolgten die Aufbereitungsarbeiten der Nivellementdaten. Sofern die Nivellementdaten nur als abgeleitete Größen (Höhen) vorlagen, wurden diese mithilfe zusätzlicher Informationen, wie z. B. angebrachten Korrekturen und Verbesserungen, in relative Höhenunterschiede überführt. Relative Höhenunterschiede in digitaler Form lagen für Teile des DHHN 12, für das NKN I und II und für das NKN III als Anteil vom DHHN 85 vor. Jedoch waren auch für die aufbereiteten Beobachtungen des DHHN 12, des NKN I und II weitere Bearbeitungsschritte notwendig, um Rohbeobachtungen zu erzeugen. Neben Formatierungsarbeiten wurden hauptsächlich angebrachte Reduktionen berücksichtigt (siehe unten).

Tab. 1: Angaben zum Höhenbezug der Nivellementnetze

Bezeichnung	Datumspunkt	Anschlusspegel	Höhenbezugsfläche	Maßstab
Urnivellement	Berliner Sternwarte = NH 1879	Neufahrwasser u. Flutmesser HH; seit 1879 Amsterdam	keine Reduktion	Legales Meter (bis 1893)
RHN/DHHN12	Hoppegarten = NH 1912	Amsterdam	NN-Fläche/NOR	International
NKN 1, NKN II	Wallenhorst	Amsterdam	NN-Fläche/NOR	International
Hz 55	ausgewählte Anschlusspunkte	Amsterdam	NN-Fläche/NOR	International
Niv-Netz 60, Hz 74, NKN III/ DHHN 85	Wallenhorst	Amsterdam	NN-Fläche/NOR	International
DHHN 92	Wallenhorst	Amsterdam	Quasigeoid/NHR	International

Für die Nivellementnetze ohne vorliegende Rohbeobachtungen mussten diese zum Teil aus vorliegenden Höhen aufwendig erzeugt werden. Hierzu wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Bildung der Höhendifferenzen von benachbarten Nivellementpunkten,
2. Rückrechnung der angebrachten Ausgleichungsverbesserungen,
3. Rückrechnung der angebrachten Reduktionen,
4. Rückrechnung der angebrachten Korrekturen (außer instrumenteller und nivellierlattenabhängiger Korrekturen).

Lagen für Messepochen keine Rohbeobachtungen, sondern nur ausgeglichene Höhen vor, wurden nach der Erfassung aus den ausgeglichenen Höhen Höhenunterschiede gebildet. Konnte für diesen Schritt nicht auf vorhandene Linienverzeichnisse zurückgegriffen werden, so wurden diese nachträglich erzeugt. Anhand der Punktnumerierung und der Messdokumentationen in ADV (1960) und REICHSAMT FÜR LANDESAUFNAHME (1927) wurden die alten Linienverläufe rekonstruiert. Anschließend wurden entlang der Linie ausgeglichene, reduzierte und korrigierte Höhenunterschiede berechnet.

Im nächsten Schritt wurden die angebrachten Ausgleichungsverbesserungen zurückgerechnet. Dafür waren Angaben bezüglich der durchgeführten Ausgleichungsrechnung notwendig. In ADV (1960) wird beschrieben, wie in den aufzubereitenden Messepochen aus den einzelnen Linien, begrenzt durch jeweils zwei Knotenpunkte, Schleifen gebildet wurden. Für jede Schleife wurde eine Bedingungsgleichung aufgestellt. Als Ergebnis der Ausgleichung erhielten die Knotenpunkte ausgeglichene Höhenwerte, während Nivellementpunkte zwischen den Knotenpunkten eingerechnet wurden. Dazu wurde die Differenz zwischen dem aufsummierten Höhenunterschied der Beobachtungen einer Linie und dem Unterschied der benachbarten Knotenpunkte auf die einzelnen Beobachtungen verteilt. Diese Linienverbesserung konnte für die Aufbereitungsarbeiten des IKÜS-Projektes verschiedenen Veröffentlichungen entnommen werden. Durch die Verteilung nachgewiesener bzw. errechneter Ver-

besserungen auf die aufzubereitenden Beobachtungen, konnten reduzierte und korrigierte Höhenunterschiede gebildet werden. In der Veröffentlichung der ADV (1960) wird geschildert, dass Nebenlinien, wie z. B. Küstenlinien, an Punkte des Grundnetzes mit ausgeglichenen Höhenwerten unter Zwang angeschlossen wurden. Insofern diese angebrachten Linienverbesserungen der Literatur entnommen werden konnten, wurden die Ausgleichungsverbesserungen aus den Beobachtungen entsprechend dem Grundnetz „herausgerechnet“.

Zur Erzeugung von Rohdaten wurden abschließend die angebrachten Reduktionen bestimmt und berücksichtigt. Bei den im Untersuchungsgebiet aufzubereitenden Daten wurde bis auf das Urnivellement immer die normalorthometrische Reduktion (NOR) angebracht. Da diese angebrachte Reduktion zu einem Großteil nicht mehr für die aufzubereitenden Beobachtungen zur Verfügung stand, wurden sie mithilfe der verwendeten Formeln erneut berechnet. Hierzu wurde die Lage und Näherungshöhe der Nivellementpunkte benötigt.

Nach der Rückrechnung der NOR lagen korrigierte Höhenunterschiede vor. Beobachtungen bei denen Instrumenten- und Lattenkorrekturen berücksichtigt wurden, konnten nicht verwendet werden, da die Korrekturen nicht im erforderlichen Umfang dokumentiert wurden. Durch ihre Herleitung und erneute Berücksichtigung war kein Genauigkeitsgewinn zu erwarten. Weitere Korrekturen, die an den zur Verfügung stehenden Daten angebracht wurden, sind nicht bekannt.

Beim Aufbereitungsprozess sollte gewährleistet werden, dass Punktidentitäten der erfassten Daten über die Punktnummer erkennbar sind. Da sich die Nummerierung der Nivellementpunkte im Laufe der Jahre zwischen den verschiedenen Messkampagnen geändert hat, wurden zur Herstellung von Punktidentitäten ggf. vorhandene Lagekoordinaten oder Lagebeschreibungen genutzt. Bestanden unterschiedliche Punktnummern für ein und denselben Punkt, wurden Identitätslisten angelegt. Da in den Daten des Weiteren Widersprüche vermutet wurden, die auf früheren Erfassungsfehlern oder falschen Punktidentitäten beruhen bzw. bei der Eingabe der zu erfassenden Daten entstanden, wurden im gesamten Aufbereitungsprozess Plausibilitätskontrollen eingebaut. Abschließend wurden alle Punktkennzeichen in einer Identitätsliste erfasst und einer einheitlichen IKÜS-Punktnummer zugeordnet.

Ein Großteil der Aufbereitungsarbeiten nahm die Erfassung notwendiger Lageinformationen der Nivellementdaten in Anspruch, da für viele heute zerstörte Nivellementpunkte keine Koordinaten existierten. Mithilfe alter und nachträglich erstellter Linienverzeichnisse konnten sowohl die vorliegenden koordinierten Nivellementpunkte als auch die Nivellementpunkte ohne Lageinformation einer gemeinsamen Linie zugeordnet werden. Mittels Darstellung der bekannten Koordinaten in Kombination mit topografischen Kartenwerken in einem Geoinformationssystem war es möglich, anhand von Straßenverläufen und bekannten Punktabständen fehlende Koordinaten nachträglich zu konstruieren. Als weiteres Hilfsmittel der Digitalisierung dienten analoge Lagebeschreibungen.

2.2 Validierung zukünftiger Netzstrukturen

Im klassischen Sinn werden Nivellementnetze zur Realisierung eines festgelegten, definierten Höhenstatus genutzt. Das Nivellementnetz ermöglicht dazu durch geschlossene Linienbeobachtungen die Höhenübertragung auf alle Teile des Landes. Für hohe Genauigkeitsanforderungen, für die Möglichkeit weiterer Verdichtung sowie für eine langfristige Nutzung von Nivellementnetzen ist die Auswahl von Nivellementlinien mit möglichst geringen zeitlichen Höhenänderungen von grundlegender Bedeutung. Die Stabilität der Linien

stellt somit ein wichtiges Kriterium zur Auswahl der Nivellementlinien dar, die im Rahmen von Wiederholungsnivellements beobachtet werden sollen.

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (ADV) hat im April 2005 die Erneuerung des DHHN beschlossen. Erstmals werden neben modernen Präzisionsnivellements epochengleiche GNSS- und Absolutschweremessungen auf ausgewählten Punkten durchgeführt. In der Umsetzungsphase von 2006 bis 2011 werden ca. 21.000 km Nivellementlinien des Höhennetzes 1. Ordnung neu gemessen (Abb. 4). Im Jahr 2008 fand zudem eine bundesweite GNSS-Messkampagne mit 250 Bodenpunkten unter Einbeziehung der Referenzstationen verschiedener GNSS-Netze nämlich *International GNSS Service* (IGS), *EUREF Permanent GPS Network* (EPN), Geodätisches Referenznetz (GREF), Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) statt. Schließlich werden auf 100 der am Nivellementnetz orientierten Repräsentativpunkte Absolutschweremessungen durchgeführt. Die Kombination aller Messungen in einer Epoche ergibt somit für die Zukunft eine für Deutschland bislang einmalige Arbeitsgrundlage für eine mögliche integrative Zusammenführung der Festpunktfelder sowie interdisziplinärer Aufgabenstellungen im Bereich der Geowissenschaften.

Im Gegensatz zu der klassischen Anwendung können Nivellementnetze auch für die Untersuchung von Boden- bzw. Krustenbewegungen über lange Zeiträume herangezogen werden. Für diese speziellen Zielsetzungen werden die vermeintlich stabilen Netze mittels Linien niedriger Ordnung weiter verdichtet. Als Hauptanforderung für Verdichtungsnetze ist die Beobachtung möglichst vieler mit vorhergehenden Epochen identischer Punkte zu nennen. Weiterhin sollten die Nivellementlinien die vermuteten Bewegungsgebiete kreuzen. Vor diesem Hintergrund legt Niedersachsen aus Gründen der Daseinsvorsorge und des Küstenschutzes während der aktuellen Erneuerungskampagne des DHHN besonderen Wert auf die Beobachtung von möglichst vielen identischen Repräsentativpunkten des NKN.

Eine Betrachtung zukünftiger Nivellementnetzstrukturen und eine entsprechende Validierung im IKÜS-Projekt musste sowohl den Anforderungen eines Nivellementnetzes entsprechen, als auch die Gesichtspunkte der kombinierten IKÜS-Auswertung berücksichtigen. Dem im Kap. 7 geschilderten Konzept der Nivellementauswertung liegen keine Linien zu Grunde, sondern es basiert auf der Bildung von Doppeldifferenzen. Dazu werden wie beschrieben aus Nivellementmessungen eines Jahres einzelne Messepochen gebildet. Statt der Einführung der in den Nivellementmessungen bestimmten Δh werden doppelte Höhendifferenzen $\nabla \Delta h$ gebildet. Diese doppelten Differenzen entsprechen Höhendifferenzänderungen zwischen zwei Messepochen und können somit einfacher in das Modell integriert werden. Die doppelten Differenzen kommen dem Produkt aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Punkten und der Zeitspanne zwischen den Messepochen gleich.

Diese Auswertemethode wird durch die Tatsache charakterisiert, dass keine zusammenhängenden Netze pro Messepoche vorliegen müssen. Ausgehend von identischen Punkten zwischen zwei Messepochen werden in beiden Epochen Züge zwischen den identischen Punkten gebildet und passende Höhendifferenzen zu doppelten Differenzen zusammengefasst.

Eine auf IKÜS-Ergebnissen basierende Untersuchung verschiedener Netzcharakteristiken ist demnach nur bedingt sinnvoll, da die Güte der Auswertung direkt von der Informationsdichte, nicht aber vom Netzdesign abhängt. Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass für eine kinematische Analyse des Bewegungsverhaltens der Nordseeküste möglichst viele identische Punkte auch in zukünftigen Epochen vorhanden sein müssen. Nur

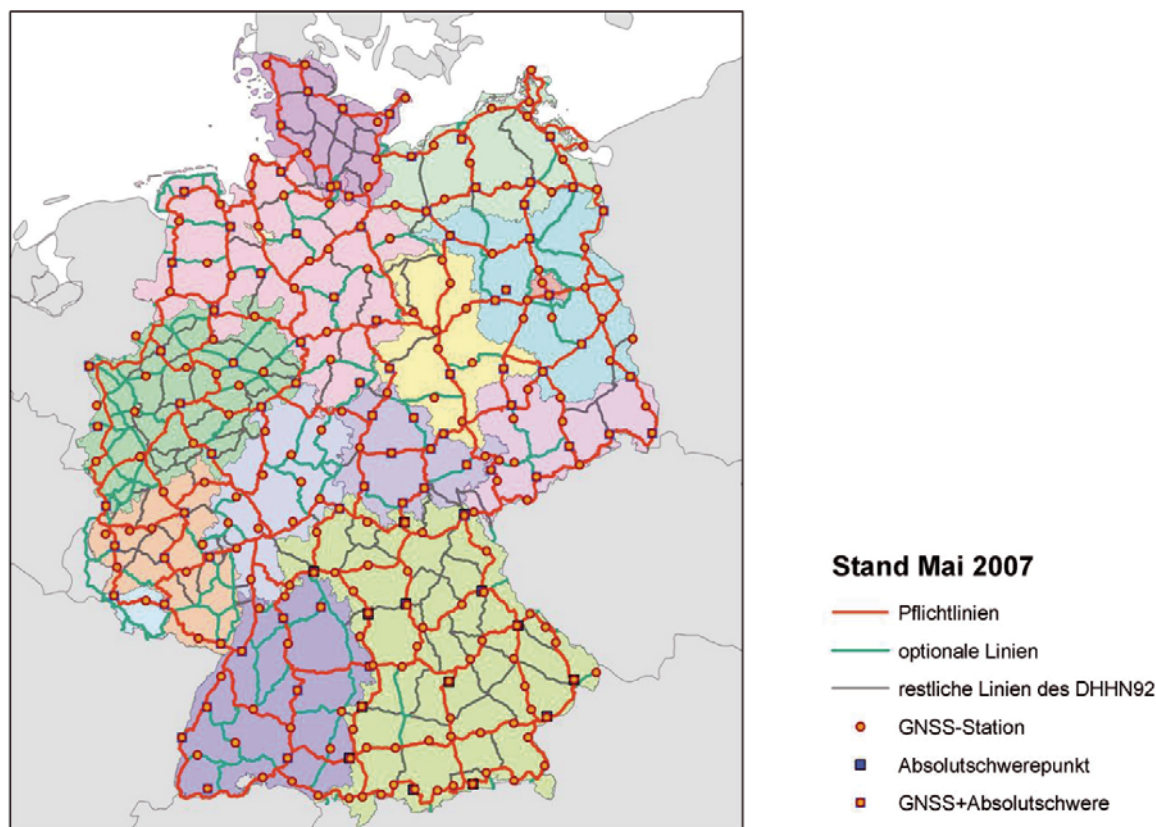


Abb. 4: Übersicht über die Erneuerungskampagne des DHHN 2006–2011

durch einen Vergleich von Messdaten mehrerer Epochen können relative Oberflächenbewegungen ermittelt werden. Die Aufbereitung der vorliegenden Daten hat gezeigt, dass gerade hier große Defizite vorliegen.

Durch zusätzliche Informationen über bekannte Bodenbewegungsgebiete und ihre Ausdehnung können in Zukunft gezielt Verdichtungsmessungen durchgeführt werden. Im Bezug auf das IKÜS-Auswertemodell bieten sich radiale Messrichtungen zum Zentrum des Bodenbewegungsgebietes an. Diese ermöglichen eine optimale Schätzung der Parameter der „Radialen Basisfunktion“.

Die bevorstehende Einführung des neuen Bezugssystems *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS, 89), die Veränderungen in der Netztopologie und in der Anwendung technischer Verfahren sowie die Nutzung des Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS führten dazu, dass starke Veränderungen innerhalb der Arbeitsprozesse des Raumbezugs stattfanden. Die Kernpunkte bilden die aus wirtschaftlichen Gründen geforderte Neustrukturierung des Festpunktfeldes, aber auch die gleichzeitig steigenden Genauigkeitsanforderungen bzw. die höhere Auflösung und Genauigkeit von Geobasisdaten, z. B. für den Hochwasser- und Küstenschutz.

Die rechtlich beabsichtigte und wirtschaftlich notwendige Verringerung der Anzahl der Vermessungspunkte des Raumbezugs von über 100 000 auf wenige Tausend Punkte erschwert die Möglichkeit, Bodenbewegungen zu erkennen und zu dokumentieren. Dies beeinträchtigt den gesetzlichen Auftrag zur Daseinsvorsorge, zur Eigentumssicherung durch das Liegenschaftskataster und erschwert die Bereitstellung des Landesbezugssystems, z. B. für Ingenieurbauprojekte (Jade-Weser-Port, Bahn-Trassen, Hochwasser- und Küstenschutz).

Um trotz der unklaren Zukunft des Festpunktfeldes ein Küstenmonitoring zu gewährleisten, müssen besonders in Bodenbewegungsgebieten vermarkte Vermessungspunkte in höherer Dichte erhalten bzw. neu angelegt werden. Das Einbeziehen von weiteren GNSS-Stationen in die SAPOS-Vernetzung ermöglicht die Ausweitung des bestehenden Monitoringsystem der Referenzstationen auf ein allgemeines Küstenmonitoring. Mittels grafischer und numerischer Darstellung von Informationen könnte ein Monitoringdienst permanent Angaben zum Bewegungsverhalten der Referenzstationen liefern.

Eine zusätzliche Ausweitung des SAPOS-Netzes in der Küstenregion würde zudem die Qualität des Küstenmonitorings beträchtlich steigern. Hierbei spielt die aktuelle Ausrüstung von mehreren Pegelstationen mit moderner GNSS-Technologie eine tragende Rolle (IKÜS 2009).

Die in den SAPOS-Daten weiterhin enthaltenen tageszeitlichen Variationen durch Bewegungen des Trägergebäudes werden im Forschungsprojekt „Qualitätssicherung für permanente GNSS-Stationen“ in enger Zusammenarbeit mit der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) untersucht (LINDENTHAL et al., 2009). Durch diese Analysen soll die Qualität der Referenzstationsdaten aufgezeigt werden, um eine weitere Steigerung der für die Genauigkeit der Höhenkomponente maßgebenden Parameter zu erreichen.

3. Global Navigation Satellite System (GNSS)

3.1 Auswertung der GNSS-Beobachtungen

Das Geodätische Institut der Technischen Universität Dresden war für die Auswertung der GNSS-Beobachtungen (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) verantwortlich. Schwerpunkt war die homogene (Neu-)Ausgleichung der zur Verfügung gestellten GNSS-Beobachtungen der letzten Jahre. Die homogene Reprozessierung sollte mit dem aktuellen Wissensstand bzgl. Ausgleichung regionaler GNSS-Netze durchgeführt werden.

Datengrundlage

Die von den Landesvermessungsämtern zur Verfügung gestellten GPS-Beobachtungen (GPS – *Global Positioning System*) von SAPOS-Stationen umfassten im Wesentlichen einen Zeitraum von 1998 bis 2006 (GPS-Woche 967–1408). Die Daten vor 1998 wurden nicht für die Auswertung verwendet, da die Datenqualität nach einer Analyse als nicht ausreichend eingestuft wurde. Zusätzlich wurden weitere Stationen nationaler und internationaler Netze für die Auswertung herangezogen. Das Datenmaterial wurde für eine automatisierte Berechnung entsprechend aufgearbeitet (z. B. Anpassung der Antennenbezeichnungen).

Auswertung

Die Auswertung erfolgte in drei Stufen. Der erste Schritt umfasste fünf SAPOS-Stationen mit der bis dato längsten „Laufzeit“. Anhand dieses minimalen Netzes wurde die automatisierte Prozessierung der Daten mit WaSoft/Netz Version 3.33 getestet. Dadurch sollten Probleme bei der Berechnung und der Bereitstellung zusätzlicher Informationen auf-

gedeckt werden. Im zweiten Schritt wurden 27 Stationen (westliches Niedersachsen) ausgewertet. Im letzten Schritt wurden 38 GPS-Stationen:

- 3 IGS-Stationen
- 4 EPN-Stationen
- 1 GREF-Station
- 30 SAPOS-Stationen

ausgewertet. Details zur Laufzeit, verwendeten Empfängern und Antennen der einzelnen Stationen sind in IKÜS (2009) zusammengefasst.

Die Prozessierung der GPS-Daten wurde unter Verwendung der Software WaSoft/Netz Version 3.33 durchgeführt. Zur Erzielung höchster Genauigkeiten wurden präzise Bahn- und Ephemeriden der Satelliten (Ephemeriden) und Antennenkorrekturen in die Auswertung einbezogen. Die Elevationsmaske wurde auf fünf Grad festgelegt.

Das Ergebnis sind Session- bzw. Tageslösungen in Form von Koordinaten mit vollständiger Kovarianzmatrix. Die Session- bzw. Tageslösungen wurden zu Wochenlösungen, unter Berücksichtigung aller Kovarianzinformationen, zusammengefasst. Im Rahmen des IKÜS-Projektes wurde sich darauf geeinigt, existierende Datenformate für den Austausch bzw. als Schnittstelle für die IKÜS-Datenbank zu verwenden. Im Bereich der GNSS-Auswertung wurde das bereits existierende SINEX-Format (SINEX – *Solution [Software/technique] Independent Exchange*, [SINEX WORKING GROUP, 1996]) für die Weitergabe der Wochenlösungen verwendet. Die Berechnung der Tages- und Wochenlösungen für das Gesamtnetz (38 Stationen) wurde auf einem handelsüblichen PC – Core 2 Duo mit 2 GHz und 2 GB RAM (*Random access memory*) – durchgeführt und benötigte ca. 180 Stunden (ca. 7,5 Tage). Es wurden 441 Wochenlösungen im SINEX-Format erzeugt und in der IKÜS-Datenbank (Kap. 6) für die Kombination der hybriden Messinformationen abgelegt.

A n a l y s e u n d I n t e r p r e t a t i o n

Im Zuge der Reprozessierung der GPS-Daten wurde auf eine strenge Datumsfestlegung verzichtet. Die absolute Lagerung des GPS-Netzes soll in der kombinierten Auswertung aller Messinformationen (GPS, Nivellement, Schwere) erfolgen. Um im Vorfeld Aussagen bezüglich der horizontalen und vertikalen Stabilität der verwendeten GPS-Stationen treffen zu können, erfolgte eine relative Lagerung des Netzes bezüglich einer einzelnen „stabilen“ Station – Wilhelmshaven (0648). Zu dieser Station wurden Residuen, getrennt für die Nord-, Ost- und Höhenkomponente (dN , dE , dH) gebildet. Zusätzlich wurden Veränderungen der GPS-Station durch Antennen- oder Empfängerwechsel sowie sonstige Veränderungen (Höhenänderung, Aktualisierung der Empfängersoftware usw.) berücksichtigt. Ein eventuell vorhandener Trend wird durch eine gegenüber der Horizontalen geneigten Linie in den graphischen Darstellungen gekennzeichnet.

Abb. 5 zeigt dies am Beispiel der SAPOS-Station 0647 (Emden). Die jahreszeitlichen Koordinatenveränderungen der Station können ggf. auf Temperatureffekte im Zusammenhang mit Gebäudebewegungen zurückgeführt werden. Eine mögliche Ursache für den negativen Trend der Höhenkomponente ist die Gasentnahme im Groninger Gasfeld. Zeitreihen weiterer GPS-Stationen sind in IKÜS (2009) dargestellt.

Die Trendberechnung wurde, falls das Datenmaterial für eine solche Schätzung ausreichend war, für alle beteiligten Stationen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt. Die Stationen im Bereich der Ems weisen einen negativen Trend in der Höhenkomponente auf. Dies kann auf die Gasentnahme im Groninger Gasfeld zurückgeführt werden.

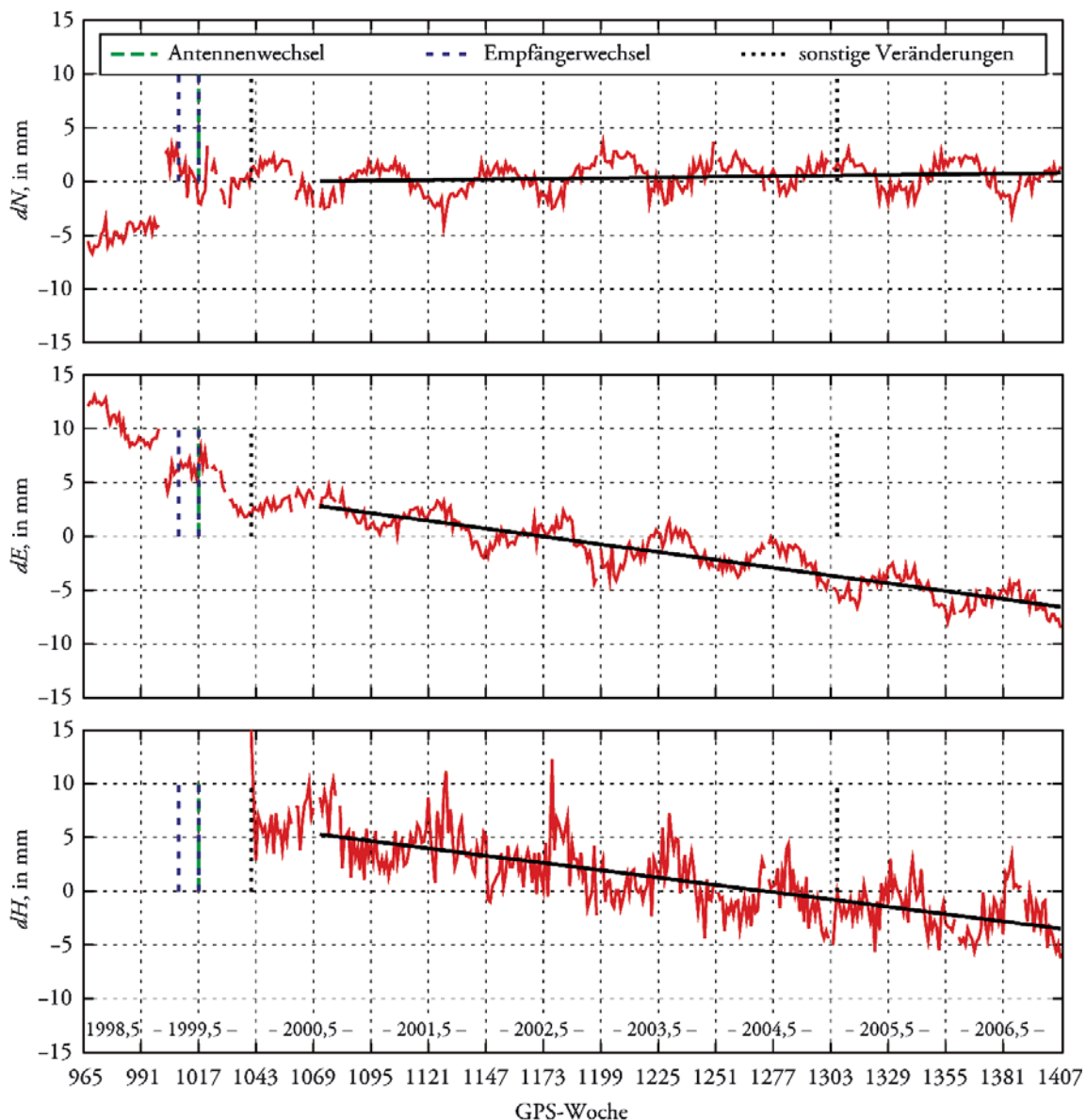


Abb. 5: Stationsresiduen der GPS-Station 0647 (Emden), relativ zur Station 0648 (Wilhelmshaven) nach der WaSoft/Netz-Ausgleichung getrennt für die Nordkomponente (oben), Ostkomponente (mitte) und Höhenkomponente (unten). Die vertikalen Striche repräsentieren Stationsveränderungen, wie zum Beispiel durch Antennen- oder Empfängerwechsel bzw. sonstiger Veränderungen (Höhenänderung, Aktualisierung der Empfängersoftware usw.)

Ursachen für die Höhenänderung (positiv/negativ) der anderen Stationen konnten nicht gefunden werden. Nur für die Station Emden (0647) konnte eine Lageänderung festgestellt werden.

Neben der Ableitung von Lage- und Höhentrends aus den relativen Residuen bzgl. der Station Wilhelmshaven (0648) wurden jahreszeitliche Effekte in den Residuen festgestellt – vgl. Abb. 5. Diese „jahreszeitlichen Schwankungen“ konnten beim überwiegenden Teil der Stationen, in der Höhenkomponente und bei einigen Stationen in der Lage erkannt werden (Abb. 7). Zum großen Teil sind diese Effekte auf Gebäudebewegungen infolge von jahreszeitlichen Temperaturänderungen zurückzuführen.



Abb. 6: Änderungen der GPS-Stationen (Trend in Lage und Höhe) auf der Grundlage der relativen Residuen (zur Station 0648). Durchgestrichene Stationsnamen kennzeichnen Stationen, für die eine Schätzung aufgrund der Datengrundlage nicht möglich war



Abb. 7: Jahreszeitliche Änderungen der GPS-Stationen auf der Grundlage der relativen Residuen (zur Station 0648). Durchgestrichene Stationsnamen kennzeichnen Stationen, für die eine Schätzung aufgrund der Datengrundlage nicht möglich war

Zwei Beispiele für jahreszeitliche Perioden in der Lagekomponente sind in Abb. 8 dargestellt. Die berechnete Änderung zwischen Sommer und Winter wurde mit der Gebäudeausrichtung verglichen. Es wird deutlich, dass es sich bei den jahreszeitlichen Schwankungen größtenteils um Effekte durch Temperaturänderungen zwischen Sommer und Winter handelt. Zwei weitere Beispiele sind in IKÜS (2009) dargestellt.

0652



0658



← 1 mm Lageänderung (Amplitude Sommer–Winter)

Abb. 8: Jahreszeitliche Schwankungen in der Lagekomponente für die SAPOS-Stationen 0652 (Alfeld) und 0658 (Nordhorn) aufgrund von Temperatureinwirkungen auf das Gebäude (Bildquelle: Luftbild-NAVIGATOR Niedersachsen)

3.2 Entwicklung einer mehrwegeresistenten Referenzstation

Gegenstand der Untersuchungen war die Entwicklung und Validierung einer mehrwegeresistenten Referenzstation. Mehrwegeausbreitung bedeutet, dass nicht nur das Satellitensignal direkt die Empfangsantenne erreicht, sondern auch in der Empfangsantennenumgebung reflektierte Signale, die sich dem direkten Signal überlagern.

Der Einfluss auf die L1- und L2-Phasenmessungen liegt im Bereich Millimeter bis wenige Zentimeter. Er verstärkt sich aber in der ionosphärenfreien Linearkombination L0 im statistischen Mittel um den Faktor drei. Aufgrund der sich mit der Satellitenbewegung ändernden Umweglängen haben die Mehrwegeeffekte einen stark periodischen Charakter. Für statische Empfänger ergeben sich typische Perioden von Stunden bei einem Abstand von Reflektor zu Antenne von weniger als einem Meter. Bei größerem Abstand ergeben sich kürzere Perioden (GEORGIADOU und KLEUSBERG, 1988).

Dementsprechend mitteln sich große Anteile der Mehrwegeeffekte aufgrund weit entfernter Reflektoren bei längerer Messdauer heraus. Restabweichungen auf Millimeterniveau sind aber trotzdem möglich (WANNINGER, 2003). Noch problematischer sind die sehr langperiodischen Mehrwegeeffekte aus dem direkten Nahfeld der Antenne (z. B. durch Pfeiler- oder Stativoberkante [WÜBBENA et al., 2003]). Sie lassen sich kaum durch verlängerte Messdauer minimieren und wirken direkt auf die Koordinaten. Die Höhenkomponente der Koordinaten ist davon besonders betroffen. Zur Verringerung des Mehrwegeeffektes wurde ein Antennenprototyp entwickelt, der sich aus drei Septentrio PolaNt-Antennen auf einer gemeinsamen Grundplatte zusammensetzt (Abb. 9). Es wird davon ausgegangen, dass die Antennen durch denselben Reflektor, aber aufgrund der Geometrie zeitlich versetzt, beeinflusst werden. Zudem wurde eine Software entwickelt, die es ermöglicht, die RINEX-



Abb. 9: Entwickelter Antennenprototyp zur Verringerung des Mehrwegeinflusses auf Referenzstationen

Beobachtungen (*Receiver Independent Exchange* [GURTNER, 2002]) der Einzelantennen im Nachgang zu einer einzelnen RINEX-Beobachtungsdatei zusammenzufassen.

Das Ziel der Zusammenfassung der einzelnen Beobachtungsdateien ist die Verringerung des Mehrwegeinflusses in der resultierenden Beobachtungsdatei. Für diesen Zweck wurde ein Gewichtungsansatz entwickelt, der auf den Messungen der (normierten) Signalqualität Signal-Rausch-Verhältnis (S/N_0) bzw. Träger-Rausch-Verhältnis (C/N_0) – beruht. Unter bestimmten Voraussetzungen (einzeln horizontaler Reflektor, erste Frequenz) ist es möglich, den Phasenmehrwegefehler anhand der gemessenen Signalqualität zu berechnen (ROST und WANNINGER, 2009). Abb. 10 zeigt den Vergleich berechneter Doppeldifferenzen einer kurzen Basislinie (26 m), die zum einen mit L1-Phasenbeobachtungen und zum anderen mit dem geschätzten Phasenmehrwegefehler (abgeleitet von der Signalqualität) berechnet wurden. Die Residuen der Doppeldifferenzen aus L1-Phasenbeobachtungen beinhalten im Wesentlichen den Phasenmehrwegefehler und können für einen Vergleich herangezogen werden.

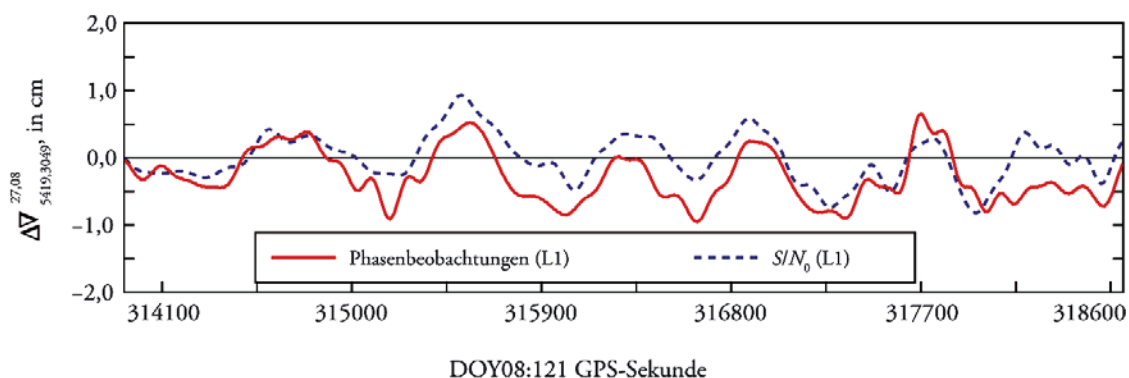


Abb. 10: Vergleich berechneter Doppeldifferenzen, die zum Einen aus L1-Phasenbeobachtungen und zum Anderen anhand des aus der Signalqualität geschätzten Phasenmehrwegefehlers

Durch das Zusammenfassen der drei Beobachtungsdateien mittels Gewichtung, basierend auf der Signalqualität, kann der Einfluss des Phasenmehrwegefehlers in der resultierenden Beobachtungsdatei verringert werden. Dadurch kommt es zu einer Verbesserung der Positionslösung, was anhand von Einzelepochenresiduen nachgewiesen werden konnte (Abb. 11).

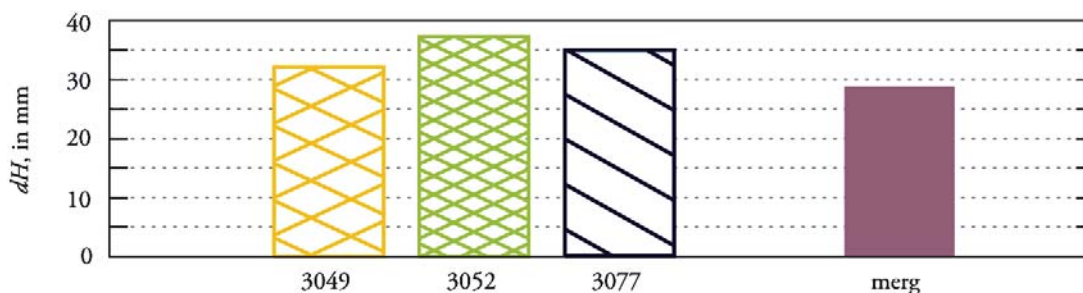


Abb. 11: Gegenüberstellung der Standardabweichung der Einzelepochenlösungen für die Höhenkomponente der „Einzelstationen“ (3049, 3052, 3077) und der zusammengefassten Station (merg)

Die Standardabweichung der Höhenkomponente der Einzelepochenlösung konnte für die zusammengefasste Station (merg) verringert werden. Allerdings ist die Verbesserung gegenüber der „besten“ Einzelstation vergleichsweise gering. Dies kann auf die Komplexität der Stationsmehrwege zurückgeführt werden. Wie zuvor beschrieben wird bei der Gewichtung von einem dominanten Mehrwegesignal ausgegangen. Dies ist aber in den seltensten Fällen zutreffend. Häufig findet eine Überlagerung mehrerer indirekter Signale, die an verschiedenen Reflektoren erzeugt wurden, mit dem direkten Signal statt. Diese Komplexität kann in dem entwickelten Ansatz nicht berücksichtigt werden.

3.3 Erfassung von Mehrwegeänderungen infolge von Antennenwechseln

Bei GNSS-Messungen treten systematische Messabweichungen durch Mehrwegeeffekte (und Restabweichungen der Antennenkalibrierungen) auf, die in ihrer Wirkung auf die Höhenkoordinate die Größenordnung 1 cm erreichen können. Sie werden insbesondere bei Antennenwechseln auf Referenzstationen offensichtlich. Solange keine Technik angewendet wird, mit der der Einfluss von Mehrwegeeffekten auf GNSS-Phasenmessungen von Referenzstationen deutlich vermindert werden kann, ist ein Verfahren zur Erfassung der Mehrwegeveränderungen bei einem Antennenwechsel sinnvoll. Bei den meisten Antennenwechseln auf GNSS-Referenzstationen verändern sich die Mehrwegeeffekte auf die Beobachtungsgrößen, da Antennen unterschiedlicher geometrischer Dimensionen (insbesondere unterschiedliche Durchmesser der Grundplatten, Antennen mit und ohne Choke Ringe) eingesetzt werden. Weiterhin ändern sich vielfach auch die Antennenhöhe und der Antennenunterbau. Hinzu kommt, dass Antennen aufgrund ihrer Signalempfangeigenschaften auch unterschiedlich mehrwegeempfindlich sein können.

Alle auf den ersten Blick auch noch so kleinen Veränderungen an der Antenne ziehen nach sich, dass die Mehrwegeeffekte unterschiedlich auf die Beobachtungsgrößen und damit auch auf die Koordinatenergebnisse wirken. Da Mehrwegeeffekte von der Signalfre-

quenz abhängig sind, müssen die Einflüsse getrennt nach Frequenzen betrachtet werden. Bei dem hier vorgeschlagenen Ansatz wird davon ausgegangen, dass alte und neue Antennen vertikal über derselben Vermarkung positioniert sind. Eine Veränderung der Position des Antennenphasenzentrums wird dann im Wesentlichen auf geometrische Veränderungen der unterschiedlichen Antennenkonstruktionen und ggf. auf eine Änderung der unterschiedlichen Antennenkonstruktionen und ggf. auf eine Änderung der Antennenhöhe (vertikale Strecke Vermarkung–Antennenreferenzpunkt) zurückzuführen sein und sich nur auf die vertikale Koordinatenkomponente beziehen. Es sind zusätzliche Messungen einer temporären Station notwendig, die für einige Tage vor und nach dem Antennenwechsel in geringer Entfernung (1–100 m) zur Referenzstation betrieben werden muss (Abb. 12).

Aus den Beobachtungsdaten der kurzen Basislinien von der temporären Station zur Referenzstation mit alter Antenne bzw. zur Referenzstation mit neuer Antenne können dann Beobachtungskorrekturen berechnet werden, die die Auswirkungen des Antennenwechsels exakt erfassen (WANNINGER, 2009).

Die Basislinienresiduen der Messsignale L1 und L2 der kurzen Basislinien vor und nach dem Antennenwechsel werden getrennt modelliert. Anschließend wird die Differenz der beiden Modelle bestimmt. Als mathematischer Ansatz dienen Kugelfunktionsentwicklungen von z. B. Grad 8 und Ordnung 5. Damit werden ganz bewusst nur großräumigere, d. h. langperiodische Anteile der Mehrwegeeinflüsse erfasst, also insbesondere die Anteile aus dem Antennennahfeld, die auf die langzeitige Koordinatenbestimmung wirken. Ein Beispiel zeigt Abb. 13, bei der die Mehrwegeveränderungen (und auch Differenzen der Antennenkorrektionsrestfehler) eines Antennenwechsels der Referenzstation DRES im Jahr 2003 dargestellt werden. Bei diesem Antennenwechsel lagen – eher zufällig – die zur Modellierung notwendigen zusätzlichen lokalen Messungen vor. Die Modellierung erfolgt in Abhängigkeit des Einfallswinkels der Satellitensignale getrennt nach L1 und L2.

Die Korrekturen aus Abb. 13 wurden auf die Beobachtungsdaten von vor dem Antennenwechsel angewendet. Ihre Wirkung ist in Abb. 14 dargestellt. Die scheinbare Veränderung der Stationshöhe aufgrund des Antennenwechsels von 3,7 cm konnte durch diesen Modellierungsansatz praktisch vollständig beseitigt werden.

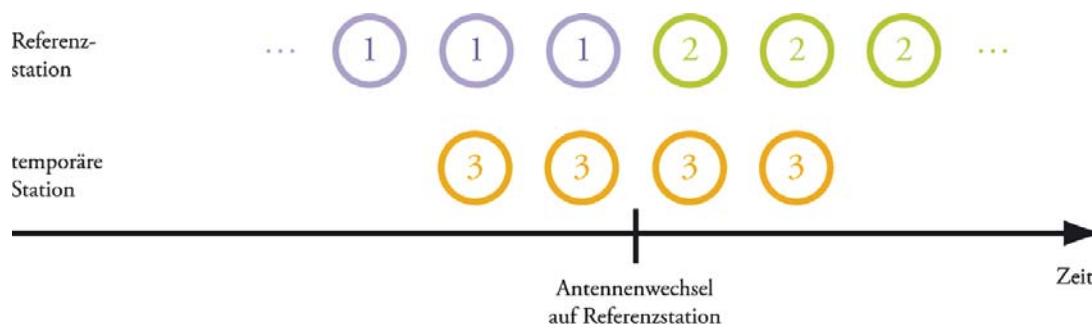


Abb. 12: Messaufbau zur Erfassung von scheinbaren Positionsänderungen bei einem GNSS-Antennenwechsel

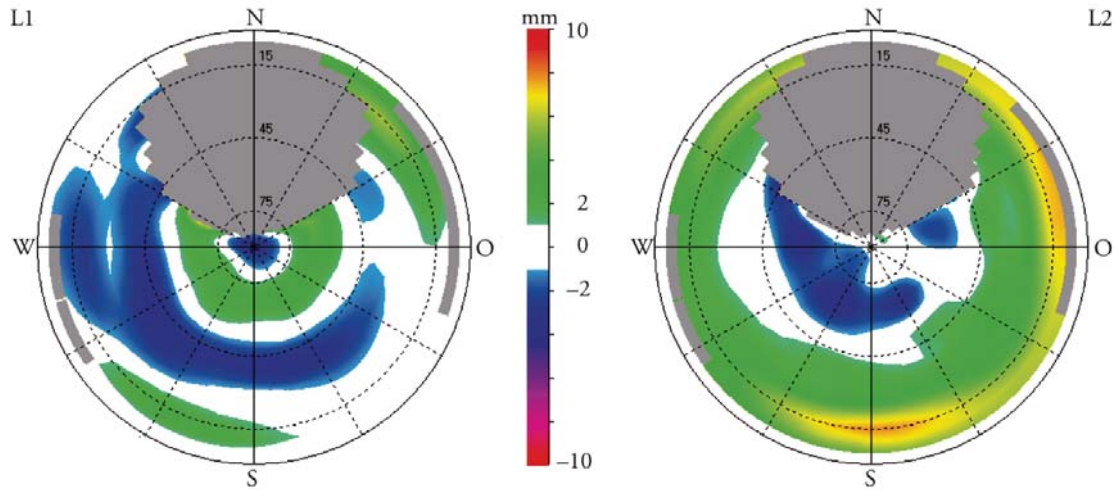


Abb. 13: Beobachtungskorrekturen für GPS-Signale L1 und L2 für die alte Antenne Dresden in Bezug auf die neue Antenne

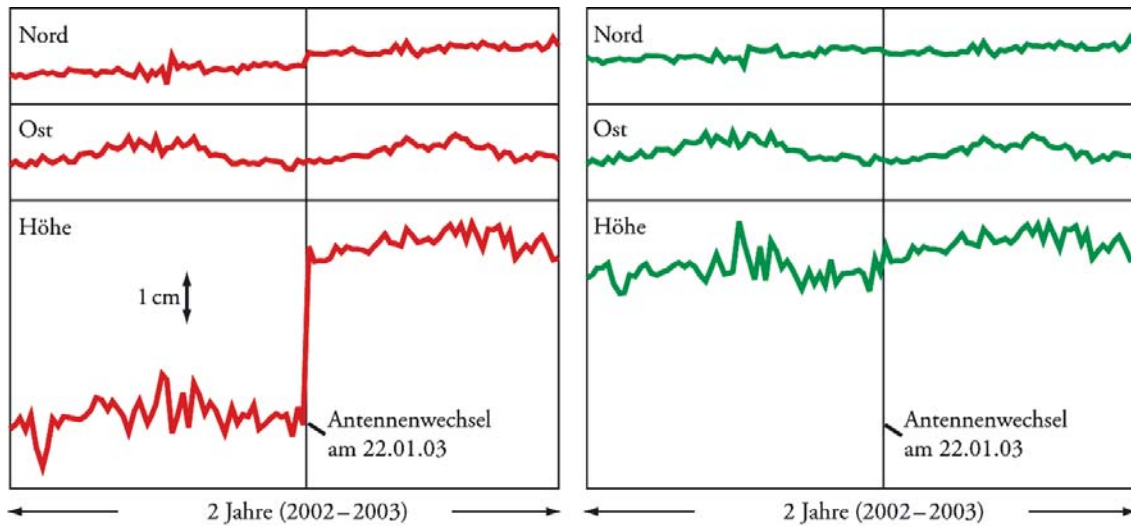


Abb. 14: Wochenpositionslösungen für Dresden im Netz umliegender Referenzstationen, ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung von Beobachtungskorrekturen

4. Pegel

4.1 Geodätische Arbeiten der Bundesanstalt für Gewässerkunde

Hauptnivelements der BfG und Punktidentitäten

Viele Arbeiten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), wie z. B. Neubau- und Unterhaltungsmaßnahmen, setzen einwandfreie Höhen- und Lagebestimmungen voraus.

Mit der Entwicklung verbesserter technischer Möglichkeiten im Wasserbau zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurden zur Schaffung gleichmäßiger Fahrwassertiefen für die Schifffahrt, zum Schutz der Niederungen gegen Hochwasser, zum ungehinderten Hochwasserabfluss und den damit verbundenen hydraulischen Berechnungen und der Vergleichbarkeit von Wasserständen verschiedener Pegel, Forderungen nach genauen Höhen in einem einheitlichen Referenzsystem gestellt.

Aus dieser Notwendigkeit heraus wurde 1891 das (Preußische) Büro für Hauptnivelements und Wasserstandsbeobachtungen gegründet, welches 1928 in der (Preußischen) Landesanstalt für Gewässerkunde und Hauptnivelements aufging und aus dem sich nach dem 2. Weltkrieg schließlich die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) entwickelt hat.

Eine Kernaufgabe des Referates Geodäsie der BfG besteht in der Durchführung von Hauptnivelements entlang der Bundeswasserstraßen und im Küstenbereich. Die Hauptnivelements werden in Form von Feinnivelements durchgeführt und unterscheiden sich in technischer Hinsicht nicht von denen der Landesvermessung. Prinzipiell werden die Hauptnivelements an die amtlichen Höhennetze der Landesvermessung angeschlossen. Aus diesem Grund wurden alle verfügbaren Nivellementkampagnen der BfG im Küstenbereich aufbereitet und in die IKÜS-Datenbank (IKÜS-DB) eingearbeitet. Je nach Zeitpunkt der Messepochen wurden dafür z. T. analoge Messblätter digitalisiert oder bereits digital verfügbare Daten mit Metadaten versehen.

Um eventuell auftretende Digitalisierungsfehler zu minimieren, wurden die originalen Feldbuchbezeichnungen übernommen. Je nach Kampagne, Zeitpunkt und beobachtender Behörde verfügen die bestimmten Punkte über verschiedene Feldbuchbezeichnungen. Weiterhin wurden die Pegelnull- und Pegelfestpunkte mit in die Datenbank aufgenommen. Aus diesem Grund wurden zehn unterschiedliche Bezeichnungsschlüssel festgelegt. Alle verschiedenen Punktbezeichnungen sind nach bestimmten Schemata zusammengestellt (IKÜS, 2009).

Das System Pegel und Kontrollen der Höhenlagen

Die von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und dem Bundesministerium für Verkehr (BMV) herausgegebene Pegelvorschrift (PV, [LAWA und BMV, 1997]) versteht unter dem Begriff Pegel eine Einrichtung zum Messen von Wasserständen. Die maßgebenden Teile eines Pegels sind laut PV ein Lattenpegel und mindestens drei zugehörige Pegelfestpunkte (PFP). Der Nullpunkt der Pegellatte wird als Pegelnullpunkt (PNP) bezeichnet.

Bauliche Einrichtungen und Geräte für die kontinuierliche Erfassung und Registrierung, Anzeige und Fernübertragung der Wasserstände sowie Einrichtungen zur Erfassung weiterer hydrologischer Größen gelten als ergänzende Einrichtungen der Pegel (LAWA und BMV, 1997).

Sollhöhenunterschiede dH_{Soll} sind definiert als Höhendifferenzen zwischen Pegelfest- und Pegelnullpunkten, die bei einer erstmaligen Einrichtung des Pegels festgelegt werden. Die Pegelfestpunkte sollen die Vertikalbewegungen der näheren Umgebung und damit auch des Pegels repräsentieren. In der Realität führen die PFP z. T. unterschiedliche Vertikalbewegungen aus. Aufgrund von Erfahrungen und lokalen Gegebenheiten ist in solchen Fällen mindestens ein PFP als repräsentativ festzulegen. In Abb. 15 ist der prinzipielle Aufbau einer Pegelanlage dargestellt.

Der Begriff „Prüfung der Höhenlage“ wird in der Pegelvorschrift (LAWA und BMV, 1997, Anlage C) definiert. Nach dieser Vorgabe sollen aller zwei Jahre, oder bei vermuteter Änderung wie etwa durch Beschädigung oder nach starker Vereisung auch umgehend die Höhenunterschiede zwischen mindestens zwei Pegelfestpunkten und den Pegelnullpunkten bestimmt und mit den Sollhöhenunterschieden dH_{Soll} verglichen werden. Mit einer Prüfung der Höhenlage wird demnach die innere Geometrie der Pegelfest- und Pegelnullpunkte überprüft. Überschreiten die Abweichungen zwischen real gemessenen Höhendifferenzen und festgelegten Sollhöhenunterschieden dH_{Soll} 10 mm, ist die Pegellatte zu korrigieren.

Im Küstenbereich beträgt die zulässige Abweichung in besonderen Fällen (exponierte Pegel) 20 mm (LAWA und BMV 1997). Im Rahmen von IKÜS wurden die Daten der in Abb. 16 dargestellten Pegelanlagen aufbereitet und die tatsächliche Höhenlage der Pegelnullpunkte in Bezug auf die Pegelfestpunkte zum jeweiligen Zeitpunkt erfasst. Hierzu wurden Messprotokolle, amtlichen Niederschriften bzw., sofern keine anderen Informationen vorhanden, die gebundenen Pegelstammbücher genutzt. In alten Stammbüchern sind lediglich die Widersprüche zwischen gemessenen Höhendifferenzen und den Sollhöhenunterschieden dH_{Soll} protokolliert. Existieren im gleichen Pegelstammbuch auch Informationen über die zu diesem Zeitpunkt gültigen Sollhöhenunterschiede dH_{Soll} , lassen sich gemessene Höhendifferenzen ableiten.

Aufzeichnungen über regelmäßige Kontrollen der Höhenlage existieren seit ca. 1935. Je nach Wichtigkeit des Pegels und dem verantwortlichen Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) wurden die Kontrollen in unterschiedlichen Zeitabständen durchgeführt. Wichtige Pegel (Pegelgruppe a) wurden jährlich kontrolliert, während bei Pegeln der Gruppe b ein zweijähriges Intervall die Regel war.

A n s c h l u s s m e s s u n g e n d e r P e g e l

Durch einen Anschluss an ein amtliches Höhenreferenzsystem wird ein Pegelnullpunkt georeferenziert, also dessen Höhenlage in Relation zu einem übergeordneten Höhenreferenzsystem bestimmt. Erst mit einer entsprechenden Georeferenzierung ist die Vergleichbarkeit verschiedener Pegel möglich. Eine Analyse langfristiger Wasserstandsänderungen (z. B. als ein Indikator für Klimaänderungen [JENSEN und MUDERSBACH, 2004]) setzt voraus, dass die Höhenlagen der Pegel und damit auch der Pegelnullpunkte während der gesamten Beobachtungsdauer konstant bzw. bekannt sind. Tektonische und anthropogene Einflüsse (z. B. Gasentnahmen) bewirken eine vertikale Bewegung der Erdoberfläche (rezente Krustenbewegungen), wodurch auch die auf der Erdoberfläche installierten Pegel diese Bewegung mit ausführen. Häufig überlagern sich reale Wasserstandsänderungen und rezente Krustenbewegungen, die in Teilbereichen der Nordseeküste eine Größenordnung von einigen Millimetern pro Jahr annehmen können. Die unerkannten oder nicht berücksichtigten Vertikalbewegungen der Pegel führen zu scheinbaren Wasserstandsänderungen und kausal hydrologisch bzw. klimabedingte Wasserstandsänderungen können nicht nachgewiesen werden. Die Pegelvor-

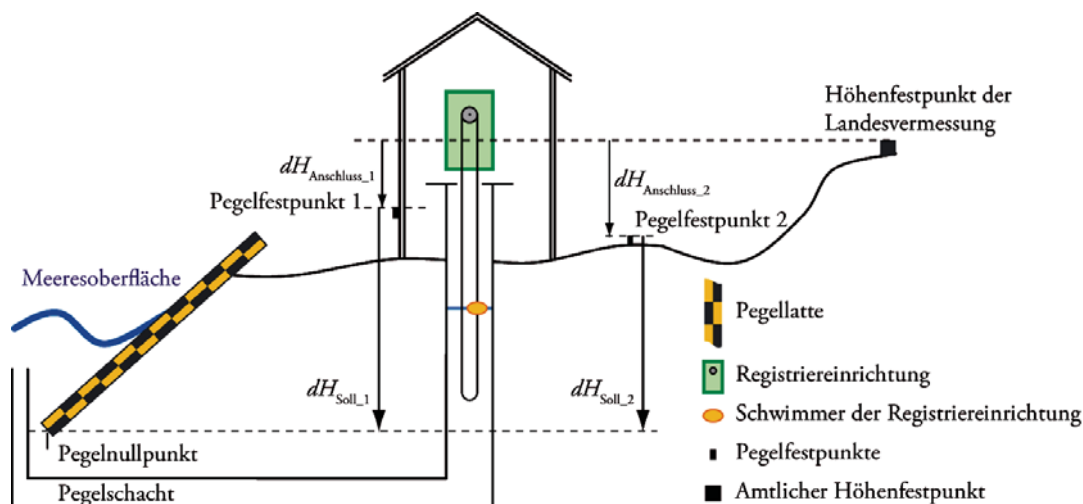


Abb. 15: Prinzipieller Aufbau einer Pegelanlage

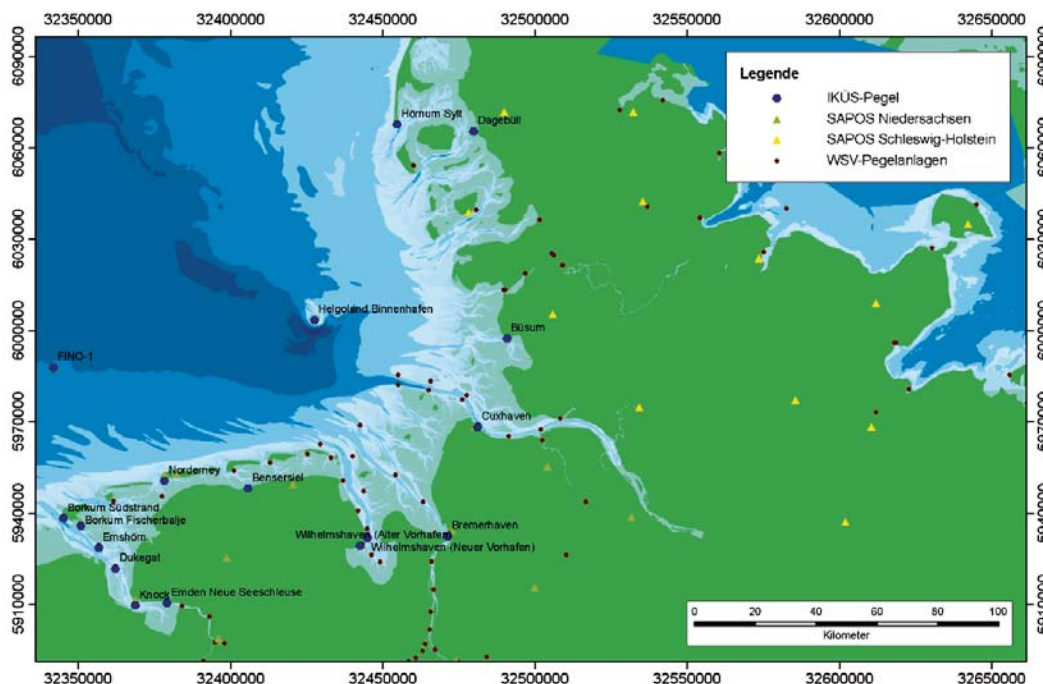


Abb. 16: Pegelanlagen, deren Daten im Rahmen von IKÜS aufbereitet wurden

schrift trägt diesem Sachverhalt mit der Forderung nach regelmäßigen Anschlussnivelements der Pegel an die übergeordneten Nivellementnetze der Landesvermessung Rechnung (LAWA und BMV, 1997).

Historisch bedingt existieren verschiedene Realisierungen entsprechender amtlicher Höhenreferenzsysteme, die sich in Größenordnungen einiger Zentimeter unterscheiden können und somit nicht direkt kombinierbar sind. Aufgrund der Anschlüsse an die jeweils gültigen Höhenreferenzsysteme liegen Höhenangaben der Pegel in verschiedenen Höhenreferenzsystemen bzw. Realisierungen vor.

Derzeit findet eine Erneuerungsmessung des Deutschen Haupthöhennetzes DHHN statt, die erstmals nach einheitlichen Kriterien für Gesamtdeutschland durchgeführt wird (ADV, 2007). Nach 2011 werden aktuelle Höhen der Anschlusspunkte und in Verbindung mit erneut ausgeführten Anschlussnivelements auch aktuelle Höhenangaben von Pegelfestpunkten verfügbar sein. Da Zeitreihenanalysen der Wasserstandsdaten nur in einem einheitlichen Höhensystem möglich sind, müssen die historischen und aktuellen Höhenangaben der Pegelfest- und damit auch der Pegelnullpunkte, in ein zeitlich und örtlich homogenes Höhenreferenzsystem überführt werden.

Die Auswirkungen eines Systemwechsels lassen sich am Pegel Helgoland verdeutlichen. Aufgrund seiner Hochseelage war es bis vor einigen Jahren nicht möglich, eine Höhenübertragung zwischen dem damals amtlichen Höhenreferenzsystem (Normalnull – NN) des Festlandes und der Insel Helgoland zu realisieren. Aus diesem Grund wurde ein als Helgoländer Null (HN) bezeichnetes Höhenreferenzsystem als Insellösung eingeführt und der PNP des Pegels Helgoland auf HN –5,000 m festgesetzt. Vor wenigen Jahren erfolgte eine satellitengestützte Höhenübertragung des amtlichen Höhenreferenzsystems Normalnull (NN) nach Helgoland, in deren Folge allen Landespunkten und Pegelfestpunkten neue Höhen, bezogen auf NN, zugewiesen wurden. Vom zuständigen Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) wurde 2001 die Höhenlage des PNP von HN –5,000 m auf NN –5,000 m geändert. Die Höhenangaben im System HN liegen 0,27 m über den Höhenangaben im System NN, was eine Absenkung der Pegellatte um 0,27 m zur Folge hatte. Die am Pegel erfassten Wasserstände weisen daher ab dem Verschiebedatum (16.9.2001) einen Sprung von 0,27 m auf. Die Auswirkung auf die erfassten Wasserstände ist in der Abb. 17 dargestellt. Im Fall des Pegels Helgoland ist die Verschiebung der Pegellatte aufgrund der Größenordnung der Verschiebung innerhalb der Wasserstandszeitreihen eindeutig. Die Mehrzahl der sich aus Änderungen der Höhenreferenzsysteme ergebenden Änderungen bewirken eine systematische Verschiebung der Pegelnullpunkte von einigen Zentimetern, die innerhalb der Wasserstandszeitreihen aufgrund der großen Streuung nicht sichtbar sind, aber dennoch berücksichtigt werden müssen. Neben der Vorgabe, dass im Küstenbereich bei der erstmaligen Festlegung der PNP eine Höhenlage von NN –5,000 m aufzuweisen hat, schreibt die Pegelvorschrift weiterhin vor, dass die Sollhöhenunterschiede dH_{Soll} und somit auch die geometrischen Beziehungen innerhalb der Pegel möglichst erhalten bleiben sollen. Bei Höhenänderungen der PNP führt dies zwangsläufig zu einem Widerspruch. In dessen Folge kam es zu unterschiedlichen Interpretationen der Pegelvorschrift bezüglich der Erhaltung der Höhenlage des PNP und dem Umgang mit wechselnden Höhenreferenzsystemen. Die bisherigen Vorgehensweisen bei festgestellten Höhenänderungen bestehen einerseits in einem mechanischen Verschieben der Pegellatte und damit verbundenen Änderungen der Sollhöhenunterschiede dH_{Soll} und andererseits in einer Änderung von Höhenangaben der PNP bei gleichzeitiger Beibehaltung der Sollhöhenunterschiede dH_{Soll} . Im Laufe der Zeit wurden am selben Pegel beide Verfahren praktiziert. Die Folge sind heterogene Datenbestände, die aus geodätischer Sicht, nicht für den Nachweis säkularer Wasserstandsänderungen geeignet sind.

Aufbereitung der geodätischen Pegelinformationen

Die Pegelfestpunkte sind laut Pegelvorschrift repräsentativ für die Vertikalbewegungen des Pegels. Wie bereits beschrieben, ist bei unterschiedlichen Vertikalbewegungen ein Pegelfestpunkt als repräsentativ festzulegen (im Allgemeinen handelt es sich dabei um einen tief gegründeten Rohrfestpunkt). Aufgrund von Fehlinterpretationen der Pegelvorschrift wur-

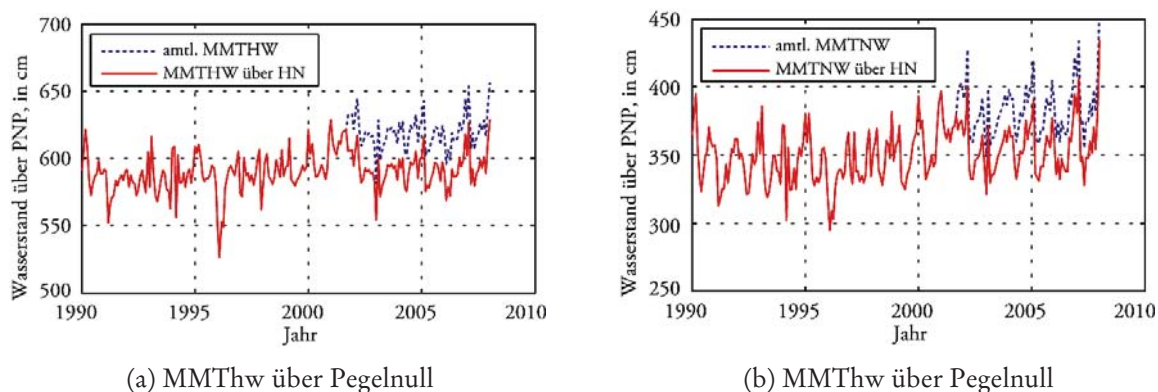


Abb. 17: Auswirkung des Systemsprungs von HN zu NN auf die ermittelten Wasserstände am Beispiel des Pegel Helgoland (MMThw = mittleres monatliches Tidehochwasser, MMTnw = mittleres monatliches Tideniedrigwasser)

den z. T. Pegelnullpunkthöhen trotz Höhenänderungen der Pegelfestpunkte (z. B. durch neue Messkampagnen) durch Verschieben der Pegellatte auf NN $-5,000$ m gehalten, wodurch sich die Sollhöhenunterschiede dH_{Soll} änderten. Hinzu kommt, dass auch bei Standortverlagerungen bzw. Umbauten an Pegeln die Pegelnullpunkte häufig wieder auf eine Höhenlage von NN $-5,000$ m eingestellt wurden.

Im Rahmen von IKÜS wurden die geodätischen Pegelinformationen soweit aufbereitet, dass die Forderung nach einer konstanten geometrischen Beziehung zwischen repräsentativen Pegelfest- und Pegelnullpunkten (konst. Sollhöhenunterschiede dH_{Soll}) erfüllt ist und gleichzeitig die realen Höhenlagen der Pegelnullpunkte abgebildet werden. Praktisch bedeutet dies Korrekturen von Lattenverschiebungen über Offsets, die zu den erfassten Wasserständen zu addieren sind. Für den Fall einer nach unten verschobenen Pegellatte bedeutet dies, dass die erfassten Wasserstände über dem Pegelnullpunkt nach der Lattenverschiebung zu groß sind und daher die Offsets negative Beträge aufweisen (Wasserstand wird verkleinert). Die Kombination der konstant gehaltenen Sollhöhenunterschiede und der Offsets bilden die reale Höhenlage der Pegelnullpunkte gegenüber den Pegelfestpunkten ab.

In Tab. 2 ist die Situation für den Pegel Norderney exemplarisch dargestellt, wobei die Höhenangaben des Pegelfestpunktes 1 in dieser Tabelle den amtlichen Höhen entsprechen.

Im Verlauf der Zeit wurden auf Norderney Pegel am Standort Hafen und Riffgat (Abb. 18) betrieben. Beim Aufbau des Pegels Norderney Riffgat wurde dessen Nullpunkt auf eine Höhenlage von NN $-5,000$ m festgelegt, obwohl zeitgleich die Höhenlage des Pegelnullpunktes Hafen eine Höhenlage von NN $-5,015$ m aufwies. Zwangsläufig müssen daher die am Pegel Riffgat erfassten Wasserstände um 15 mm von den am Pegel Hafen erfassten Wasserständen abweichen (dessen Pegelnullpunkt liegt mit NN $-5,015$ m tiefer). Für eine Auswertung der gesamten Zeitreihe des Pegels Norderney (Hafen und Riffgat) müssen die Pegelnullpunkte in Bezug auf den Pegelfestpunkt 1 auf dem gleichen Niveau liegen und damit die entsprechenden Sollhöhenunterschiede konstant bleiben. Werden die Sollhöhenunterschiede dH_{Soll} zwischen den Pegelnullpunkten am Standort Hafen bzw. Riffgat und dem Pegelfestpunkt 1 konstant gehalten, ergeben sich die in Tab. 2 dargestellten Pegelnullpunkte.

Über die alle zwei Jahre durchgeführten Kontrollen der Höhenlagen werden zusätzlich die Fehllagen der Pegellatten erfasst. Sofern die Fehllagen der Pegellatten und damit die Abweichungen real gemessener Höhenunterschiede gegenüber den amtlich festgelegten Soll-

Tab. 2: Höhen- und Sollhöhenunterschiede des Pegelfestpunktes 1 am Pegel Norderney

Datum	Standort Pegellatte	Höhe der Landesverm. in m	WSA		IKÜS		Offset in m
			dH_{Soll} in m	PNP in m	dH_{Soll} in m	PNP in m	
1935	Hafen	5,014	-10,014	-5,000	-10,014	-5,000	0,000
1957	Hafen	4,999	-10,014	-5,015	-10,014	-5,015	0,000
1957	Riffgat	4,999	-9,999	-5,000	-10,014	-5,015	0,015
1984	Riffgat	4,968	-9,968	-5,000	-10,014	-5,046	0,046
1994	Riffgat	4,981	-9,968	-4,987	-10,014	-5,033	0,046

höhenunterschieden dH_{Soll} einen Betrag von 20 mm nicht überschreiten, werden die Pegellatten nicht korrigiert (LAWA und BMV, 1997). Die im Rahmen der Prüfungen der Höhenlage festgestellten Fehllagen sind Bestandteil der an die erfassten Wasserstände anzubringenden Offsets. Sofern ein Pegel über mehrere Pegellatten (Hauptwasser- und Niedrigwasserpegel) verfügt, wurden entsprechende Offsets für jede einzelne Pegellatte erstellt. In der Tab. 3 sind die Ergebnisse für den Pegel Norderney exemplarisch dargestellt. Entsprechende Informationen wurden für alle in der Abb. 16 dargestellten Pegel erstellt.

Mit diesen Informationen wird die innere Geometrie des Systems Pegel in IKÜS abgebildet. Die entsprechend aufbereiteten Daten erlauben eine Zeitreihenanalyse von Wasserstandsregistrierungen einzelner Pegel. Für eine Vergleichbarkeit verschiedener Pegel wurden im Rahmen der Auswertung geodätischer Pegelinformationen die Anschlussnivelements zwischen Punkten der Landesvermessung, deren Höhen und Höhenänderungen IKÜS-Ergebnis sind, und den Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkten aufbereitet. Sofern der Pegelfestpunkt



Abb. 18: Lage der Pegel und Pegelfestpunkte auf Norderney
(Bildquelle: LuftbildNAVIGATOR Niedersachsen)

Tab. 3: Abweichungen von der Solllage bzw. den Sollhöhenunterschieden dH_{Soll} infolge von Kontrollen der Höhenlage (HWP = Hauptwasserpegel, NWP = Niedrigwasserpegel)

PFP	Staffel	Datum	dH_{Soll}		Fehllage in m	Offset		Mittel in m
			gem. in m	amtl. in m		lt. Tab. 2 in m	gesamt in m	
1	HWP	28.06.1973	-10,006	-9,999	-0,007	0,015	0,008	
55	HWP	28.06.1973	-8,604	-8,600	-0,004	0,015	0,011	0,010
1	NWP	28.06.1973	-10,008	-9,999	-0,009	0,015	0,006	
55	NWP	28.06.1973	-8,606	-8,600	-0,006	0,015	0,009	0,008
1	HWP	15.08.1974	-10,005	-9,999	-0,006	0,015	0,009	
57	HWP	15.08.1974	-8,501	-8,486	-0,015	0,015	0,000	0,005
1	NWP	15.08.1974	-10,000	-9,999	-0,001	0,015	0,014	
57	NWP	15.08.1974	-8,488	-8,486	-0,002	0,015	0,013	0,014

Tab. 4: Änderung der Höhe (hier 2,2 mm/a) des Pegelfestpunktes 1 (= Punktnr. 2209/9/601 = IKÜS-8348) basierend auf dem Höhen-Geschwindigkeitsfeld und deren Auswirkung auf den Pegelnullpunkt Norderney

Datum	Höhe in m	dH_{Soll} in m	Höhe PNP in m
16.12.1957	5,063	-10,014	-4,951
01.06.1958	5,062	-10,014	-4,952
⋮	⋮	⋮	⋮
01.06.1983	5,007	-10,014	-5,007
25.04.1984	5,005	-10,014	-5,009

zugleich ein Nivellementpunkt der Landesvermessung war, ist dieser direkt in die Kombinationslösung (Kap. 7) mit eingeflossen. Ein Beispiel hierfür ist der Pegel Norderney, für dessen repräsentativen Pegelfestpunkt 1 basierend auf dem Höhen-Geschwindigkeitsfeld Höhenänderungen abgeleitet wurden. Daraus resultierende Pegelnullpunkthöhen sind in der Tab. 4 dargestellt. Sofern die repräsentativen Pegelfestpunkte kein Teil der IKÜS-Kombinationslösung sind, wurden zusätzlich die Anschlussnivellements zwischen einem Anschlusspunkt der Kombinationslösung aufbereitet. Als Beispiel sind in Tab. 5 die Anschlussmessungen des Pegels Bremerhaven dargestellt. Der repräsentative Pegelfestpunkt 6622 wurde nach 2000

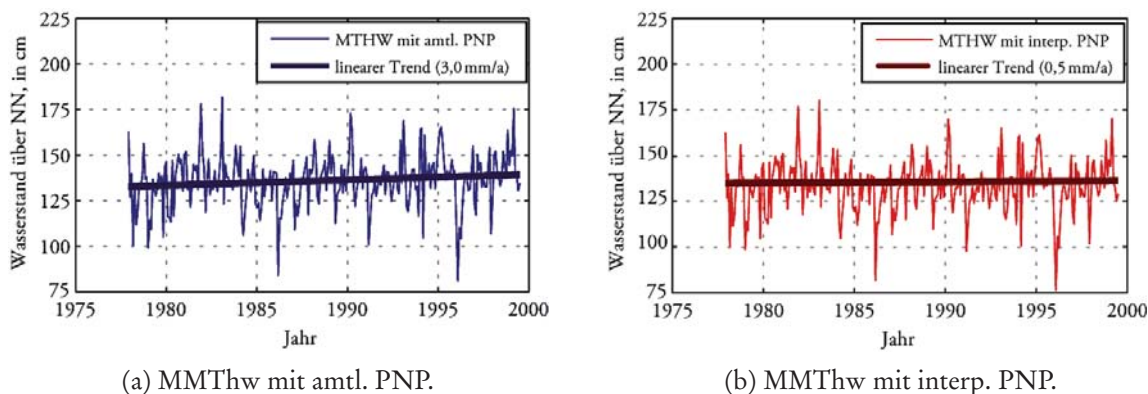


Abb. 19: Interpolierte und nicht-interpolierte Pegelnullpunkte am Pegel Knock und deren Auswirkungen auf den Trend des monatlich mittleren Tidehochwassers (MMThw)

Tab. 5: Höhenänderungen (0,9 mm/a) des Punktes 2419/9/26 (= IKÜS-12058) aus der ggf. auch den Anschlussnivellements ergeben sich Wasserstände, die in einem zeitlich und örtlich homogenen Referenzsystem vorliegen (siehe Anhang IKÜS, 2009)

Datum	Höhe in m	dH			Höhe PNP in m
		26 – PFP in m	PFP – PNP in m	26 – PNP in m	
13.09.1976	5,835	-1,346	-9,455	-10,801	-4,966
23.10.1989	5,824	-1,338	-9,455	-10,793	-4,969
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
07.11.2000	5,814	-1,333	-9,455	-10,778	-4,975
08.05.2006	5,809	-0,146	-10,637	-10,783	-4,974

zerstört, wodurch ein anderer Pegelfestpunkt (18) als repräsentativ angehalten werden musste. Alle ausgewerteten geodätischen Beobachtungen wurden zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgeführt und sind streng genommen auch nur für diesen Zeitraum gültig. Da z. T. zwischen den Anschlussnivellements viele Jahre liegen und die Ergebnisse zwischen zwei Messepochen aufgrund von vertikalen Krustenbewegungen (tektonisch oder anthropogen verursacht) sehr stark von einander abweichen, müssen dennoch Aussagen über die Höhenlage der Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkte zu verschiedenen Zeitpunkten getroffen werden.

Insbesondere bei Trendanalysen ist die Interpolation wichtig, da die sonst resultierenden Ungenauigkeiten das Ergebnis sehr stark verfälschen (Abb. 19). Im Projekt IKÜS wurde zwischen den Anschlussmessungen linear interpoliert und bekannte Brüche der Zeitreihe entsprechend berücksichtigt.

Ein Beispiel für anthropogen verursachte vertikale Krustenbewegungen ist der Bereich von Groningen (Niederlande). Die Ursachen sind die in der Zeit seit 1957 durchgeführten Erdgasförderungen. Die Auswirkungen erstrecken sich auch auf das Gebiet zwischen Bor-

kum und Emden, wobei die Senkungsraten z. T. mehr als 2 mm/a betragen. Davon betroffen sind auch Pegel in diesem Bereich (z. B. Pegel Knock). Für diesen Pegel liegen zwei Anschlussmessungen (1975 und 1999) vor, wobei zwischen beiden Messungen eine Senkung Kombination und damit verbundene Änderungen der Anschlussnivelements bzw. Pegelnullpunkthöhen des Pegels Bremerhaven. Der repräsentative Pegelfestpunkt 6622 wurde nach 2000 zerstört und stattdessen der PFP 18 als repräsentativ festgelegt.

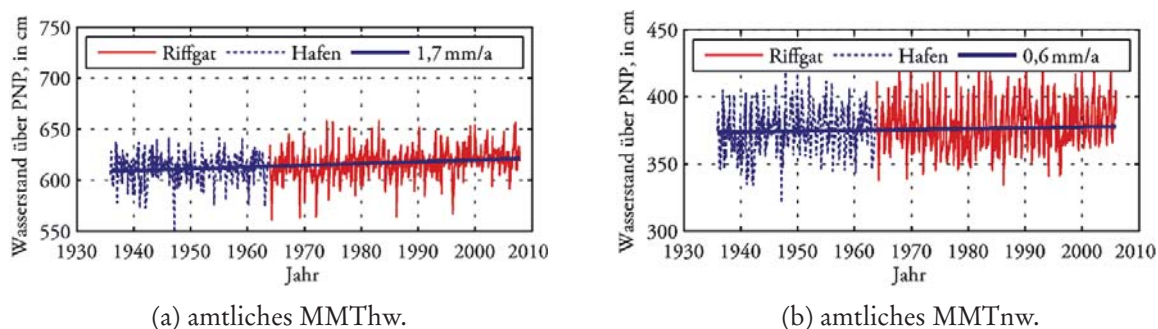


Abb. 20: Amtliche Angaben für monatlich gemittelte Tidehoch- und Tideniedrigwasser über PNP mit Lattenbewegungen

Aussagen über das zeitliche Verhalten von Höhenpunkten (und damit auch von Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkten) liefert das Höhen-Geschwindigkeitsfeld (Kap. 7). In Verbindung mit den oben genannten konstanten Sollhöhenunterschieden, den Offsets und des PNP um 5,3 cm festgestellt wurde. In Abb. 19 sind die linearen Trends des monatlichen mittleren Tidehochwassers (MMThw) unter Nutzung des vom WSA festgestellten Pegelnullpunktes und eines realen (Landsenkung durch Interpolation berücksichtigt) Pegelnullpunktes dargestellt. Der scheinbare Wasserspiegelanstieg korrespondiert erkennbar mit den aufgetretenen Senkungsraten. Diese Phänomene sind in Deutschland sowohl im Küsten- als auch im Binnenbereich mehrfach anzutreffen (z. B. Pegel Norderney aufgrund von Setzungen oder Pegel Mainz aufgrund von Grundwasserentnahme).

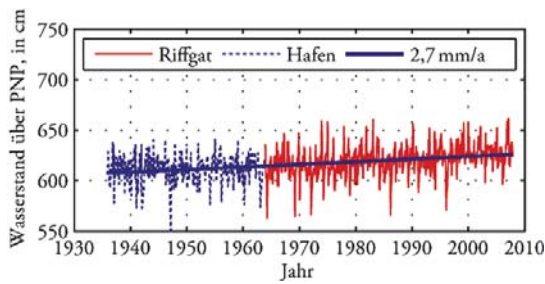
Abb. 20 zeigt die monatlichen Mittelwerte der vom WSA herausgegebenen Wasserstände über Pegelnull. Diese wurden in die IKÜS-DB eingearbeitet.

Die Abb. 21 stellt Wasserstände über Pegelnull dar, bei denen die Lattenverschiebungen über Offsets (in IKÜS-DB hinterlegt) kompensiert wurden. Diese entsprechen Wasserständen, die sich ergeben würden, wenn die Sollhöhenunterschiede zwischen dem Pegelfestpunkt 1 und den Pegelnullpunkten (Hafen und Riffgat) konstant gehalten werden.

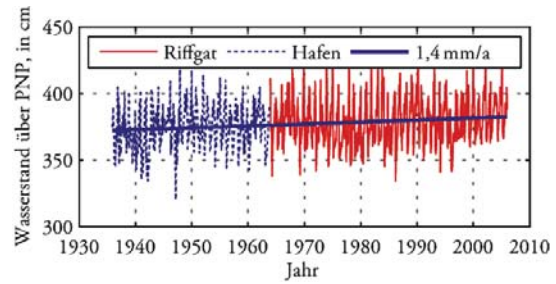
Werden sowohl aus den vom WSA herausgegebenen als auch aus den um die Lattenverschiebungen korrigierten Wasserstandsdaten Trends abgeleitet, ist festzustellen, dass der Trend der um die Lattenverschiebung korrigierten Wasserstandsdaten einen größeren Betrag annimmt. In diesem Fall wurde die Pegellatte mehrfach angehoben, wodurch die am Pegel erfassten Wasserstände geringer waren und daraus ein kleinerer Trend resultiert. Der Verschiebungsbetrag der Pegellatte ist abhängig von der Wahl des repräsentativen Pegelfestpunktes. Dieser Sachverhalt ist insbesondere bei Küstenschutzbauwerken von sehr großem Interesse, da für entsprechende Anwendungen die relativen Wasserstandsänderungen gegenüber der unmittelbaren Umgebung entscheidend sind.

Wird zusätzlich noch die Vertikalbewegung des Pegelfestpunktes 1 aus dem Höhen-Geschwindigkeitsfeld berücksichtigt (Abb. 22), ergibt sich gegenüber der NN-Bezugsfläche

ein wesentlich geringerer Anstieg des Meeresspiegels. Dies ist damit zu begründen, dass der Pegelfestpunkt 1 und damit auch der Pegel an sich absinken und sich diese Bewegung mit langwelligen Veränderungen des Meeresspiegels überlagert. In Abb. 23 erfolgte eine Glättung der MMThw bzw. MMTnw mithilfe eines dreißigjährigen gleitenden Mittels. Anhand dieser Grafik wird der Einfluss der Landsenkung auf den Wasserstand ersichtlich. Unter Nutzung des Höhen-Geschwindigkeitsfeldes für die Höhenangaben und den korrigierten Wasserständen ergibt sich ein für das MMThw ein Trend von 1,0 mm/a. Das MMTnw weist mit 0,0 mm/a keinen Trend auf.

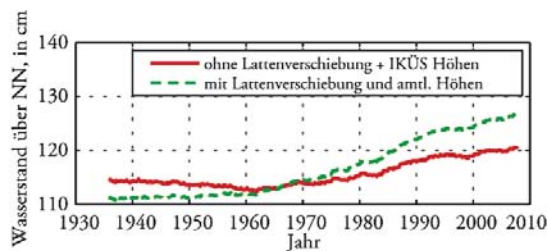


(a) amtliches MMThw.

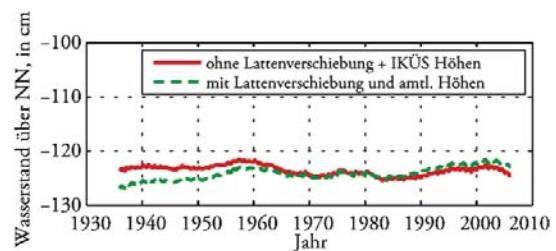


(b) amtliches MMTnw.

Abb. 21: Amtliche Angaben für monatlich gemittelte Tidehoch- und Tideniedrigwasser über PNP ohne Lattenbewegungen

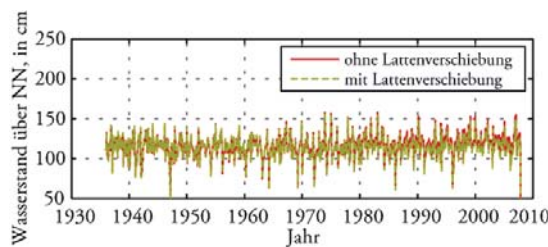


(a) MMThw.

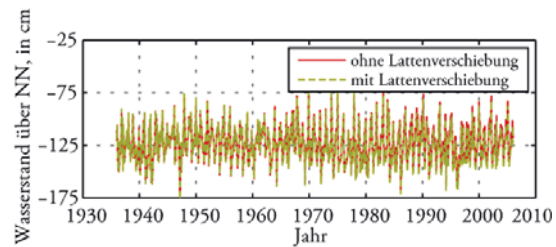


(b) MMTnw.

Abb. 22: Angaben für monatlich gemittelte Tidehoch- und Tideniedrigwasser ohne Lattenbewegungen über NN (Höhen-Geschwindigkeitsfeld berücksichtigt)



(a) MMThw.



(b) MMTnw.

Abb. 23: Dreißigjähriges gleitendes Mittel für Tidehoch- und Tideniedrigwasser über NN (amtliche Angaben und Höhen-Geschwindigkeitsfeld)

4.2 Analyse und Aufbereitung der Wasserstandsregistrierungen

Innerhalb des IKÜS-Projektes wurden die an den für das Projekt ausgewählten Pegeln erfassten Wasserstandsregistrierungen aufbereitet. Neben dem Zusammentragen aller Wasserstandsdaten war das Erfassen von Metainformationen sehr wichtig. Für die in Abb. 16 dargestellten IKÜS-Pegel wurden alle verfügbaren Scheitelwerte in die Datenbank eingepflegt. Weiterhin sind die Pegelstammdaten in der IKÜS-Datenbank hinterlegt, wobei diese Stammdaten aus den Pegelstammbüchern (ohne den vermessungstechnischen Teil) entsprechen bzw. diese nachrichtlich übernommen wurden.

Bei den erfassten Wasserständen handelt es sich um vom WSA festgelegte Scheitelwerte über den jeweiligen Pegelnullpunkten, wobei der Bezugspegelnullpunkt (z. B. Norderney Riffgat Hauptwasserpegel [HWP]) neben anderen Informationen ebenfalls bei dem jeweiligen Scheitelwert mit gespeichert wurde. Die Scheitelwerte sind im Allgemeinen ab dem Beginn einer kontinuierlichen Datenerfassung, d. h. ab 1935, vorhanden. Neben den Scheitelwerten, dem Eintrittszeitpunkt und dem Bezugspegelnullpunkt werden auch Angaben über die Art des erfassten Wasserstandes gespeichert. Dies beinhaltet in erster Linie die folgenden Angaben:

- Art des Wasserstandssensors (Druckpegel, Schwimmpegel, Radarpegel)
- Art der Wasserstandserfassung (analog oder digital)
- kontinuierliche Ablesung oder diskrete Lattenablesungen zum Zeitpunkt der Tidehoch- bzw. Tideniedrigwassers
- Herkunft der Wasserstände
- Tidehoch-, Tideniedrig- oder Tidemittelwasser
- Monatsmittelwert, maximaler oder minimaler Wert für Tideniedrig- oder Tidehochwasser.

Die Registriergeräte erfassen den Wasserstand über einen Wasserstandssensor und speichern die erfassten Wasserstände digital oder analog (in Form von Pegelbögen). Als Wasserstandssensoren werden innerhalb der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes in erster Linie Drucksensoren und Schwimmersysteme verwendet. Während früher häufig Drucksensoren Verwendung fanden, wurden diese zum Großteil durch Schwimmersysteme ersetzt. Beiden Systeme haben verschiedene Vor- und Nachteile, und es treten auch sensor-spezifische Fehlereinflüsse auf.

Frühere Registriereinrichtungen bestanden aus analogen Schreibgeräten (z. B. Trommelschreiber Abb. 24), die eine maßstäblich (im Allgemeinen 1:15) verkleinerte Tidekurve auf Papier zeichnen. Bei einer späteren Auswertung der Pegelbögen muss daher berücksichtigt werden, dass zum einen die Digitalisiergenauigkeit beschränkt ist und zum anderen die an den Schreibgeräten auftretenden systematischen Fehler maßstäblich vergrößert in den Daten enthalten sind. Seit Ende der neunziger Jahre werden die analogen Schreibgeräte durch digitale Datensammler ersetzt, wobei teilweise analoge Aufzeichnungen parallel weiter betrieben werden. Digitale Datensammler bilden den Wasserstand im Maßstab 1:1 ab und sind damit weniger Fehlereinflüssen unterworfen als analoge Schreibgeräte.

Die erfassten Scheitelwerte wurden früher aus den Pegelbögen manuell abgeleitet. Seit einigen Jahren können die Scheitelwerte innerhalb der WSV über ein semiautomatisches Verfahren (KUNZ und KÖVES, 1991) bestimmt werden. Bei diesem Verfahren wird ein Teil der Tidekurve als ausgleichendes Polynom variablen Grades dargestellt. Der Scheitel des Polynoms stellt dann den Scheitelwert der Tidekurve dar. Je nach Polynomgrad, der in die Berechnung einfließenden Zeitreihe (Fensterbreite) und der Form der Tidekurve variieren die

Ergebnisse des Verfahrens. Aus diesem Grund ist eine manuelle Nachbearbeitung nötig. Alternativ zu diesem Verfahren können die hochfrequenten Variationen der Wasserstandsdaten durch Filterungen im Orts- oder Frequenzbereich gedämpft und anschließend Scheitelwerte ermittelt werden. Weitere Informationen sind in IKÜS (2009) dargestellt.

Im Rahmen von IKÜS wurden Untersuchungen zur Einbeziehung von Beobachtungsdaten der FINO-1 (Forschungsplattform Nord- und Ostsee Nr. 1) hinsichtlich der Qualität der erfassten Wasserstände und der Georeferenzierung durchgeführt. Die auf FINO-1 erfassten Wasserstände sind für die Ableitung von langwelligen Trends zurzeit nicht geeignet. Nähere Ausführungen sind in IKÜS (2009) dargestellt.

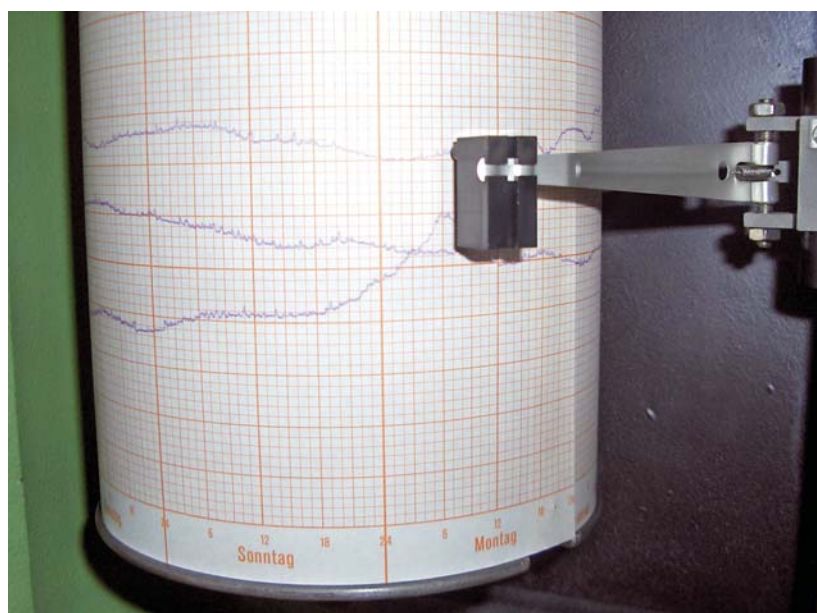


Abb. 24: Analoger Trommelschreiber

4.3 Zukünftiges Pegelmonitoring

Insbesondere bei Offshore-Pegeln sind die Pegelfestpunkte und die Pegellatten am selben Bauwerk befestigt. Bei diesen „gekoppelten“ Pegeln entsprechen Anschlussmessungen zugleich den Kontrollen der Höhenlagen. In der Vergangenheit wurden für die Anschlüsse an amtliche Höhensysteme hydrostatische bzw. geometrische Nivellements durchgeführt (BRUSSEL, 2000). Da die hydrostatische Messausrüstung des Niederländischen Rijkswaterstaates nicht mehr zur Verfügung steht, bleibt im Küstenvorfeld als einzige Möglichkeit eine satellitengestützte Höhenüberwachung der Pegel mit GNSS, wobei zur Zeit nur GPS und dessen russisches Pendant GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) zur Verfügung stehen.

Eine Kernaufgabe der BfG besteht in der Unterstützung der örtlichen Wasser- und Schifffahrtsämter bei den Anschlussmessungen zu exponierten Pegeln. In den letzten 10 Jahren ist dies durch GNSS-Kampagnen geschehen. Die Beobachtungsdauer lag zwischen ein und zwei Wochen. Aufgrund neuer Erkenntnisse bezüglich der Mehrwegeeffekte in der unmittelbaren Antennenumgebung, der Antennenempfangseigenschaften und daraus resultierenden Ungenauigkeiten bei großräumigen Netzen hat sich in den letzten Jahren die Er-

kenntnis durchgesetzt, dass für hochgenaue Höhenüberwachungen einzelne Messkampagnen nicht ausreichend sind. Aus diesem Grund sieht das im Rahmen von IKÜS entwickelte Konzept eine permanente GNSS-Überwachung der Pegelsysteme vor, wobei die Datenübertragung und die anschließende Datenauswertung weitestgehend automatisiert sein sollen. Eine permanente Überwachung bietet zudem den Vorteil, dass kontinuierlich Höhen beobachtet werden und Trends viel schneller und aufgrund der verfügbaren Beobachtungsdaten auch sicherer abgeleitet werden können.

Gegenüber Kampagnenmessungen ist das Anforderungsspektrum bei permanent betriebenen Systemen wesentlich erweitert. Die Anforderungen bestehen darin, dass die GNSS-Systeme

- über L1/L2 Code/Phasen-Empfänger (GPS/GLONASS) mit Choke-Ring-Antennen verfügen
- möglichst wartungsfrei sind und von einer zentralen Stelle aus administriert werden
- eine selbstständige Datenübertragung zur Zentrale realisieren
- immer über ausreichende Energie verfügen bzw. die Energieversorgung autark realisiert wird (Photovoltaikmodule und/oder Windräder).

Im Rahmen von IKÜS wurde in Verbindung mit der Informationstechnik-Abteilung der BfG und dem DWD (Deutscher Wetterdienst) ein System entwickelt, das allen Anforderungen gerecht wird. Die von der BfG beschafften GNSS-Empfänger des Typs Leica GRX1200GG PRO, wurden zusätzlich mit einem GPRS-Modul (*General Packet Radio Service*) des Typs Leica GFU24 ausgerüstet. Zusätzlich wurden GNSS-Antennen mit Choke-Ring-Elementen und passender Wetterschutzhaube (Radom) beschafft. Die Antennen wurden bei der Firma Geo++ in Garbsen mit Radom und Dreifuß und somit in dem Zustand kalibriert, in dem diese auf den Leuchttürmen installiert werden.

Die Datenkommunikation (Administrierung und Datenübertragung) erfolgt über den IKÜS (2009) beschriebenen Kommunikationsweg. Kernstück ist ein Dienst des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und eines Mobilfunkbetreibers, der eine Datenkommunikation zwischen dem Intranet der BfG und dem GNSS-Empfänger über Mobilfunk ermöglicht. Die Beobachtungsdaten werden von den GNSS-Empfängern automatisch in ein offenes Datenformat überführt und zur BfG übertragen.

Die Energieversorgung kann auf exponiert stehenden Pegelanlagen, die nicht über eine Netzstromversorgung verfügen, über Photovoltaikmodule und/oder Windräder realisiert werden. Im Rahmen von IKÜS wurden dazu keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, da entsprechende Lösungen im Rahmen anderer Projekte realisiert werden. Im Rahmen von IKÜS wurden drei Offshore-Stationen mit entsprechenden GNSS-Ausrüstungen ausgestattet. Es handelt sich dabei um die Pegelstationen Knock, das Unterfeuer Dwarsgat (Abb. 25) und den Leuchtturm Alte Weser.

Die Auswertestrategie der GNSS-Beobachtungen muss sowohl administrativen als auch wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht werden. Aus diesem Grund wird eine Auswertung im übergeordneten *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) mit einer anschließenden Überführung in das amtliche Referenzsystem DHHN92 angestrebt. Die Ergebnisse (Höhen und Höhenänderungen) und die aufbereiteten GNSS-Beobachtungen werden den administrativen und wissenschaftlichen Einrichtungen zur Verfügung gestellt.

5. Schwere

5.1 Schwermessungen zur Überführung nivellitischer Höhenunterschiede in geopotentielle Koten

Die relativen Schwerewerte wurden zur Umrechnung von Höhendifferenzen in Potentialdifferenzen verwendet. Hierbei werden die Schwerewerte als zeitlich invariant angesehen. Aus den unregelmäßig verteilten Schwermessungen im Auswertebereich wurde ein „Schwergitter“ berechnet. In diesem Schwergitter können für beliebige Stationen entsprechende Schwerewerte interpoliert werden.



(a) Unterfeuer Dwarsgat.



(b) GNSS-Station.

Abb. 25: Durch GNSS überwachte Pegelstation Dwarsgat

5.2 Höhenveränderungen aus Schwermessungen

Relativschwermessungen

Relativmessungen sind nur innerhalb kleiner Netze hochgenau möglich (KEYSERS, 2001). Küstenregionen sind ungeeignete Messgebiete auf Grund schwer modellierbarer Meereseffekte und fehlendem stabilen felsigen Untergrund. Grundwasserstandsmessungen an jedem Schwermesspunkt sind wegen einzurichtender Zusatzsensoren äußerst teuer, aber bei Genauigkeitsforderungen, wie sie zur Ableitung kleiner Vertikalbewegungen der Erdkruste notwendig sind, unabdingbar.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass für die vorhandenen historischen Schwermessungen bis ca. 1975 (entspricht dem Deutschen Schwerenet [DSN], 1962) keine meteorologischen und hydrologischen Daten vorliegen. Ab 1976 (entspricht den Daten des Deutschen Hauptschwerenetzes [DHSN], 1996) sind Luftdruck und Temperatur erfasst worden. Die Erfassung hydrologischer Daten ist im EDBS-Format (Einheitliche Datenbankschnittstelle) vorgesehen, jedoch wurden bei den Gravimetermessungen keine entsprechenden Werte erfasst. Somit muss davon ausgegangen werden, dass hier Standard-Reduktionsmodelle eingesetzt wurden, die nicht alle Störsignale erfassen können.

Die Genauigkeiten der vorliegenden relativen Schweremessungen sind somit nicht ausreichend, um Höhenveränderungen zu bestimmen.

Absolutschweremessungen

Für einige Punkte im Auswertebereich (Abb. 26) liegen Absolutschweremessungen vor, die dem IKÜS-Projekt vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Verfügung gestellt wurden. Basierend auf dem vertikalen Schweregradienten (dg/dz) können Schwereänderungen (Differenz zwischen zwei Absolutschweremessungen) als Höhenänderung interpretiert werden. Allerdings ist die Anzahl der Messepochen nicht auf allen Messpunkten groß genug, um eindeutige Aussagen im Bezug auf Höhenänderungen treffen zu können.

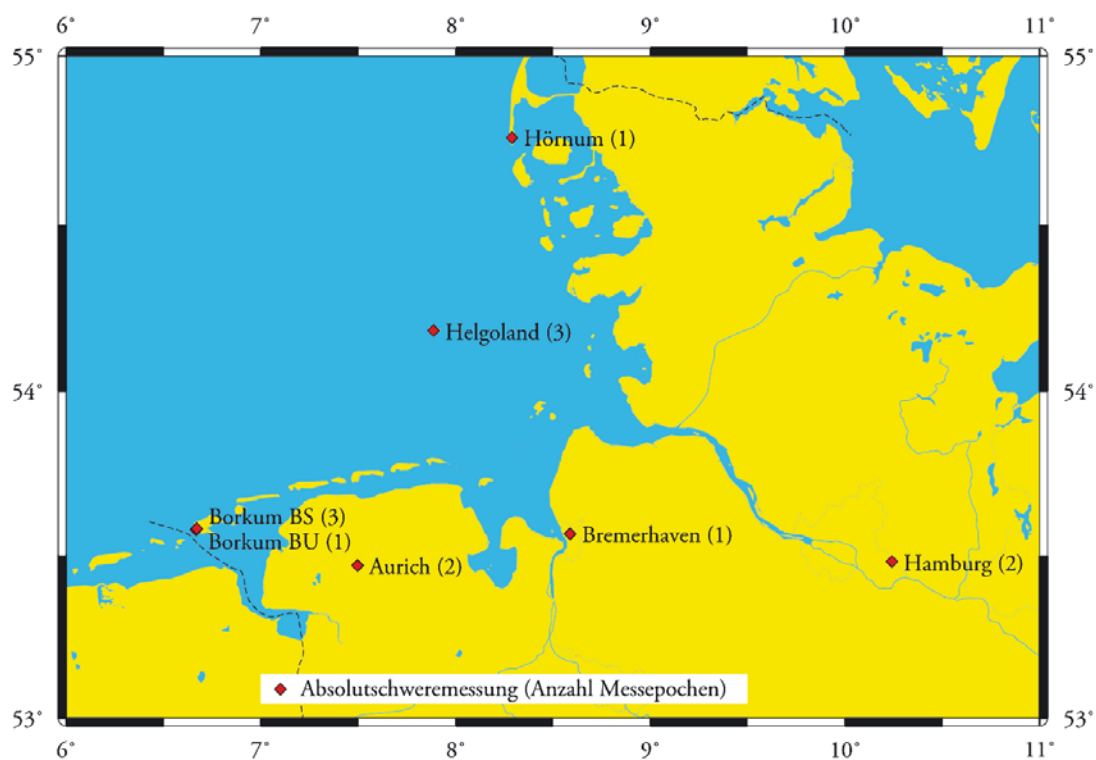


Abb. 26: Stationen für Absolutschweremessungen im Bereich der deutschen Nordseeküste. Die Anzahl der durchgeführten Messepochen ist den Klammern hinter dem Stationsnamen zu entnehmen

Abb. 27 zeigt die Höhenänderung abgeleitet aus Absolutschwereänderungen für Stationen mit mindestens zwei Messepochen. Zu diesem Zweck wurde die Differenz zwischen erster Messepoche (Nullepoche) und den folgenden Messepochen gebildet.

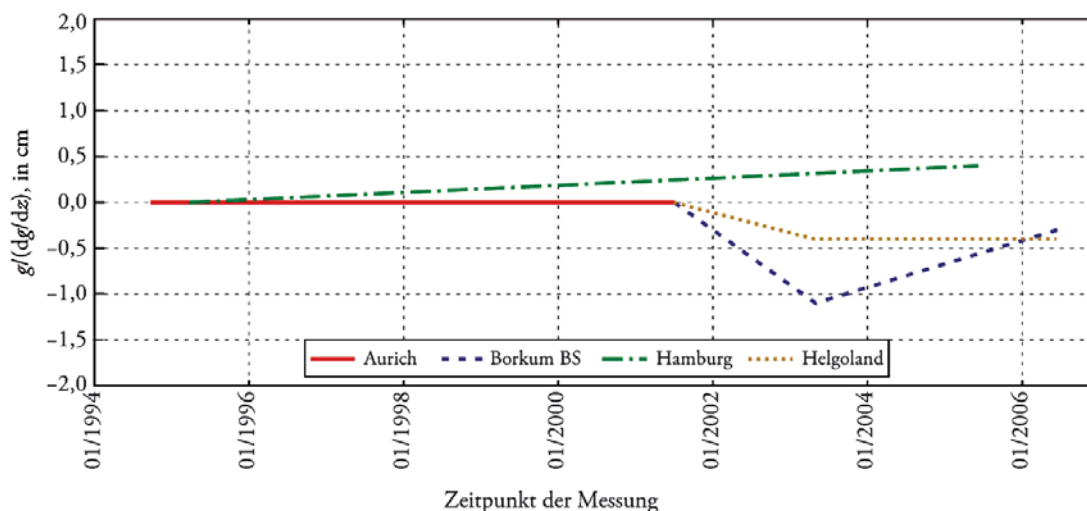


Abb. 27: Ableitung von Höhenänderungen ausgewählter Stationen aus Differenzen gemessener Absolutschwerewerte zur jeweiligen „Nullepoche“ (erste gemessene Epoche der Station)

F a z i t

Auf Grund dieser Rahmenbedingungen muss festgestellt werden, dass im IKÜS-Untersuchungsgebiet selbst mit absoluten gravimetrischen Verfahren unter optimalen Bedingungen vertikale Krustenbewegungen bestenfalls ab einer Größe von wenigen Zentimetern bestimmbar sind.

Vertikale Krustenbewegungen erreichen Beträge von ca. 1 bis 3 mm/a im IKÜS-Untersuchungsgebiet (siehe Abschnitt 7.4). Wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um nicht-periodische rezente Krustenbewegungen handelt, bei denen sich die Jahresbeträge aufsummieren, können Schwereänderungen frühestens nach ca. 20–40 Jahren signifikant nachgewiesen werden.

6. D a t e n b a n k

Die wesentliche Aufgabe einer Datenbank besteht in der widerspruchsfreien und dauerhaften Speicherung von Datenmengen. Benötigte Teilmengen der Daten können weiterhin in unterschiedlichen, bedarfsgerechten Darstellungsformen für Benutzer und Anwendungsprogramme bereitgestellt werden. Das Datenbanksystem bietet zudem den Vorteil, dass die darin enthaltenen Datensätze zentral gepflegt und aktualisiert werden können. In einer relationalen Datenbank werden die Datensätze in Relationen verwaltet, d. h. in zweidimensionalen Tabellen die durch so genannte Schlüssel (Identfelder) miteinander verknüpft sind.

Bei der Entwicklung einer zukunftsorientierten Datenbank ist die Datenunabhängigkeit ein zentrales Thema. Wenn bspw. in Zukunft unterschiedliche Anwendungen auf dieselbe Datenbank zugreifen, werden jeweils auch unterschiedliche Anforderungen an diese gestellt.

Neben den Softwareanforderungen existieren auch unterschiedliche Betrachtungsweisen der Anwender. Das Konzept der Datenunabhängigkeit soll eine Abkopplung der Datenbank von notwendigen Änderungen der Anwendung ermöglichen. Diese Datenunabhängig-

keit wird nach UNILOG INTEGRATA TRAINING AG (2006) durch ein Drei-Ebenen-Schema erreicht:

- Die konzeptionelle Ebene gibt den grundlegenden Aufbau der Datenstruktur wieder. Sie beschreibt eine von der Hardware oder Datenbank unabhängige Gesamtsicht auf den zu speichernden Datenbestand.
- Auf der internen Ebene wird mit Hilfe einer geeigneten physischen Datenstruktur festgehalten, wie die Daten zu speichern sind.
- Die externe Ebene beinhaltet im Allgemeinen nur einen Teilbereich der konzeptionellen Ebene. Nur der Teil, der für die jeweilige Anwendung bzw. Anforderung relevant ist, wird beschrieben. Es werden z. B. anwendungsspezifische Sichten auf die Datenbank festgelegt, über die ein Datenbankzugriff erfolgt.

Durch ihr relativ einfaches Datenmodell verbunden mit einer standardisierten Abfragesprache unterstützen relationale Datenbankmanagementsysteme (RDBMS) in hohem Maß das Konzept der Datenunabhängigkeit. Ihre Stabilität und die automatische Optimierung ermöglichen eine zentrale Verwaltung von Massendaten in klassischen Anwendungen. Aus diesem Grund basiert die Entwicklung der IKÜS-Datenbank auf einem relationellen Datenbankmodell.

6.1 Datenbankstruktur

Das relationale Datenbankmodell speichert Daten in Tabellen, die als Relationen bezeichnet werden. Dabei entspricht jedes Objekt und jede Beziehung zwischen Objekten einer zweidimensionalen Tabelle. Jede Spalte einer Tabelle steht für ein Attribut des Objekts oder der Beziehung. Eine Zeile enthält jeweils alle Attribute, die ein Objekt oder eine Beziehung charakterisieren. Dabei muss jede Zeile eindeutig identifizierbar sein, d. h. es darf nie zwei identische Zeilen in einer Tabelle geben.

Um die Daten wieder auszulesen, hat der Benutzer die Möglichkeit, mit Hilfe von Datenbanksprachen direkt auf die gewünschten Informationen zuzugreifen. Dabei hat sich mit der *Structured Query Language* (SQL) eine internationale, vom *American National Standards Institute* (ANSI) und der Internationalen Organisation für Normung (ISO), standardisierte Sprache für relationale Datenbanken etabliert. Ein weiterer Vorteil des relationalen Modells ist die einfache Umsetzbarkeit auf physikalische Speicherstrukturen. So lässt sich z. B. jede Tabelle als einzelne Datei speichern.

Mit diesen Vorteilen erreichte das relationale Modell eine marktbeherrschende Stellung. Typische RDBMS sind bspw. der Microsoft SQL Server, MySQL, Microsoft Access oder die im IKÜS-Projekt eingesetzte Datenbank der Firma Oracle.

Analog zum so genannten Phasenmodell der Software-Entwicklung wurde auch bei der Entwicklung der IKÜS-Datenbank (IKÜS-DB) zwischen einzelnen Projektphasen unterschieden.

Die wichtigsten Phasen lauten:

- Anforderungsanalyse
- Konzeptioneller Entwurf
- Logischer Entwurf
- Physischer Entwurf
- Implementierung.

Die Entwicklung der IKÜS-Datenbank begann, wie jede Softwareentwicklung, mit einer gründlichen Anforderungsanalyse. Dabei musste für eine optimale Nutzbarkeit der

Datenbank die Frage beantwortet werden, welche Daten mit welchen Zusammenhängen in der Datenbank verwaltet werden sollen.

Um grundsätzlich eine Einbindung der IKÜS-Datenbank in die Geodateninfrastruktur Niedersachsen (GDI-NI) zu ermöglichen, orientierte sich die Entwicklung der IKÜS-Datenbankstruktur am AAA-Basisschema. Das AAA-Basisschema umfasst das Amtliche Festpunktinformationssystem (AFIS), das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) sowie das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS). Dabei wurden vor allem die in ADV (2008a) definierten grundlegenden Strukturen bei der Verwaltung des Raumbezuges übernommen. Die weiteren Strukturen wurden dagegen von speziellen Anforderungen des IKÜS-Projektes vorgegeben und individuell modelliert.

Bei der Anforderungsanalyse wurde festgelegt, dass möglichst Rohdaten abgelegt werden sollten. Die Routinen zur Aufbereitung der Daten werden dabei ausschließlich im IKÜS-Programm bereitgestellt. Dies hat den Vorteil, dass bei einem späteren Import von Daten immer eine einheitliche Aufbereitung gewährleistet wird. Weiterhin ist es möglich die Rohdaten bei Bedarf erneut aufzubereiten, falls bessere Algorithmen zur Verfügung stehen.

Da die Bezeichnung identischer Punkte nicht einheitlich war und identische Punkte mit verschiedenen Punktnummern auftraten, gewährleistet der Datenbankentwurf die Speicherung der originalen Punktnummern. Gleichzeitig wurde eine Tabelle mit Zuordnungen der originären Punktnummer zu einer globalen, eindeutigen IKÜS-Punktnummer erstellt. Beim Auslesen der Rohdaten wird so die originäre Punktnummer durch die globale Punktnummer dynamisch ersetzt. Diese Art der Modellierung ermöglicht auch nachträgliche Änderungen der Identitätszuordnung.

Die Speicherung der Kovarianzinformationen für GPS-Epochen erfolgt durch die Verwendung von *Binary Large Objects* (BLOB), da ein direkter Zugriff auf einzelne Werte oder auch 3×3 Submatrizen pro Punkt als zu langsam eingestuft wurde. BLOBs sind große binäre und damit für die Datenbank nicht weiter strukturierte Objekte. Diese Datenpakete können wie andere Datensätze direkt in der Datenbanktabelle abgelegt werden (LONEY, 2005). Eine Speicherung der gesamten Kovarianzmatrix (Q_{xx}) als BLOB ermöglicht zwar nur einen Zugriff auf die gesamte Matrix, ist jedoch deutlich schneller als ein individueller Zugriff auf einzelne Koeffizienten.

Als globales IKÜS-Koordinatensystem wurde das ETRS 89 festgelegt. Die Verwendung von geografischen Koordinaten garantiert einen einheitlichen Raumbezug ohne Fehlinterpretationen. Um jederzeit die im Feld geführten Koordinaten zu rekonstruieren, wurden die verwendeten Transformationsparameter zusätzlich in der Datenbank abgelegt.

Im nächsten Schritt erfolgte die Umsetzung der gewonnenen Anforderungen in einem konzeptionellen Entwurf. Dazu wurde ein *Entity-Relationship-Modell* (ERM) erstellt, das die Objekte und Beziehungen als Entitäten (*Entities*) und Beziehungen (*Relationships*) abstrahiert. Das ERM ist das bekannteste und meist verwendete grafische Hilfsmittel für den Datenbankentwurf. Der Entwurf ist dabei vollkommen unabhängig von dem späteren Datenbanksystem. Für die Erarbeitung des ERM konnte spezielle Software eingesetzt werden. Mit der Definition von Attributen und Schlüsselementen wurde das erstellte ERM anschließend in ein relationales Datenbankmodell überführt. Dieser Schritt wird als logischer Entwurf bezeichnet.

Während des logischen Entwurfes wurde auch die so genannte Normalisierung der Datenbankstruktur durchgeführt. Ziel der Normalisierung ist, dass jeder Datensatz nur ein einziges mal vorkommt. Redundanzen sollen beseitigt werden und die Datenkonsistenz erhalten bleiben. Weiterhin ermöglicht die Normalisierung, dass Abhängigkeiten zwischen den

Spalten einer Tabelle beseitigt werden, um später eine einfache Erweiterung der Datenbank zu gewährleisten (LOCKMAN et al., 2002).

Grundsätzlich wurde eine Datenspeicherung ohne jegliche Redundanzen angestrebt.

Lediglich in abgegrenzten Teilbereichen wurden Redundanzen zugelassen und damit die Normalisierung aufgebrochen, um Einleseroutinen und die spätere Abfrage der Elemente zu beschleunigen. Zur Sicherung der Datenintegrität wurden die Haupttabellen mit Protokoll-Spalten versehen. Entsprechende Datenbankmodule (Trigger) tragen dabei automatisch in diese Spalten ein, wann und durch wen ein Datensatz eingetragen bzw. geändert wurde.

Auf Grund der Anforderungen durch die umfangreiche Datenbasis und die geforderte Möglichkeit zur Erweiterung und Internetanbindung wurde für den physischen Entwurf eine Oracle-Datenbank gewählt. Entsprechend dieser Entscheidung wurde aus dem relationalen Datenbankmodell die endgültige physische Struktur der IKÜS-Datenbank in Form von SQL-Befehlen abgeleitet. Auf einem hausinternen Oracle 10g Datenbankserver der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen LGN wurde die IKÜS-Datenbank eingerichtet und die vorgesehenen Tabellen und deren Attribute erstellt. Dabei festgelegte Schlüsselbedingungen und Beziehungen von Objekten werden durch entwickelte Trigger erfüllt. Des Weiteren wurden häufig genutzte Abfragen als so genannte Sichten (*View*) in der Datenbank abgelegt, um so die Zugriffsgeschwindigkeit zu steigern.

Auf eine detaillierte Darstellung der entwickelten Datenbankstruktur und der darin festgelegten Tabellen wird an dieser Stelle aus Platzgründen verzichtet und auf die Dokumentation verwiesen. Für die abschließende Datenbanknutzung wurde eine ausführliche Online-Dokumentation erstellt, die Inhaltsinformationen zu allen Datenbanktabellen enthält. Die Einheitendefinitionen der verschiedenen Tabellenfelder wurden ebenfalls in der Dokumentation festgehalten. Eine beigefügte grafische Übersicht der Datenbanktabellen ermöglicht zudem ein schnelles Auffinden gesuchter Informationen.

Um die im Projekt aufbereiteten Daten in der IKÜS-Datenbank abzulegen bzw. eine nachhaltige Fortführung der Datenbank zu ermöglichen, musste die Datenbank entsprechend festgelegter Austauschdatenformate strukturiert werden. Diese Austauschformate sollten zudem eine geeignete Schnittstelle zwischen den Projektpartnern schaffen. Für die einzelnen Daten der höhenrelevanten Sensoren wurden dazu standardisierte Austauschformate festgelegt, sofern diese für die IKÜS-relevanten Informationen existieren (z. B. SINEX für GNSS-Ergebnisse). Andernfalls wurden Datenformate um weitere Informationen ergänzt oder neu als IKÜS-Format definiert.

Im Rahmen der Erneuerungskampagne des DHHN 2006–2011 wird eine eigene Nivellementmessdaten-Datenbank (NIMEDA) aufgebaut. Als Schnittstelle zu dieser Messdatenbank wird das so genannte NIMEDA-Format eingeführt (ADV 2007). Die hohe Bedeutung der Kampagne impliziert, dass dieses Format die bisherige einheitliche Datenbankschnittstelle (EDBS) auch in Zukunft ablösen wird. Durch die Verwendung des NIMEDA-Formates als IKÜS-Austauschschnittstelle für Nivellementdaten wird eine langfristige Aktualisierung der Datengrundlage erheblich erleichtert.

Entsprechend der festgelegten Schnittstelle wurden sowohl die im EDBS-Format als auch die in freier tabellarischer Datenstruktur vorgehaltenen Nivellementdaten angepasst. Für die im EDBS-Format genutzten Kennzahlen wurde eine Schlüsseltabelle entwickelt, nach dessen Vorgabe die vorhandenen Beobachtungen in die Definitionen des NIMEDA-Formates überführt wurden.

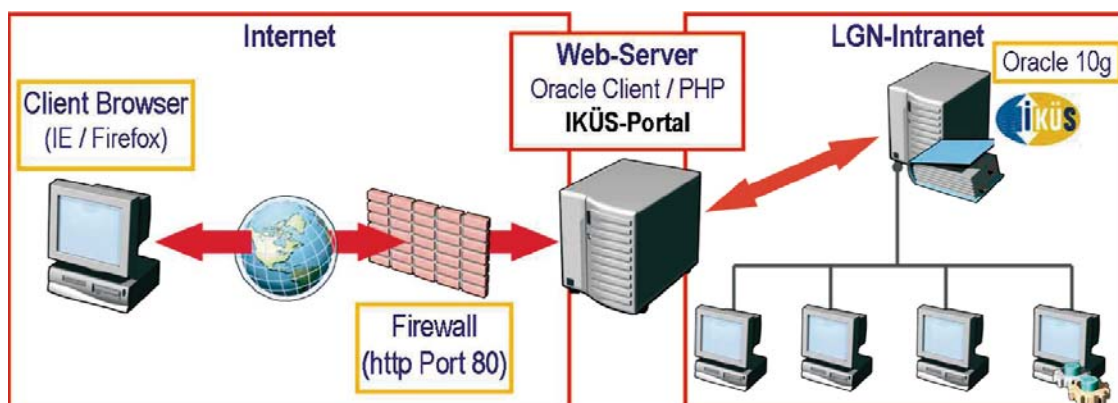


Abb. 28: Zugriffskonzept der IKÜS-Datenbank basierend auf einem Client-/Serversystem

6.2 Zugriffskonzept

Datenbankmanagementsysteme (DBMS) werden in Desktop- und Client-/Server-systeme unterschieden. Bei einem Desktopsystem befinden sich die Datenbank, das Datenbankmanagementsystem und die Datenbankanwendung auf dem Rechner des Anwenders. Bei Client-/Serversystemen läuft das Datenbanksystem auf einem eigenen Server, der exklusiven Zugriff auf die Datenbank besitzt. Die Anwendungsprogramme befinden sich auf den Clientrechnern und beziehen ihre Daten vom DBMS des Servers. Ein typisches Client-/Serversystem ist die auch im IKÜS-Projekt eingesetzte Oracle-Datenbank.

Die zentrale Datenbankeinrichtung auf einem Server der LGN bildet damit die Grundlage des Zugriffskonzeptes im IKÜS-Projekt (Abb. 28). Diese Regelung ermöglicht eine Nutzung bereits vorhandener Hard- und Softwarearchitektur und stellt damit die wirtschaftlichste Lösung dar. Weiterhin werden Aktualisierung und Pflege des Datenbestandes durch die zentrale Datenverwaltung erheblich erleichtert.

Da der Aufbau eines standardisierten Online-Angebots für IKÜS und die Einbindung in die Geodateninfrastruktur Niedersachsen (GDI-NI) sehr aufwendig ist, empfahl sich für das IKÜS-Projekt der Aufbau eines proprietären Internetangebotes. Für die Bereitstellung der Produkte und Daten des IKÜS-Projektes wurde eine Benutzerverwaltung mit Authentifikationsapplikation auf einem Webserver der LGN eingerichtet. Nach erfolgreicher Anmeldung des Nutzers gelangt dieser auf das „IKÜS-Portal“ (Abb. 29). Hier steht neben »Download-Links« zu aktuellen Produkten auch ein Echtzeit-Onlinezugriff auf den Datenbankserver zur Verfügung.



Abb. 29: Das „IKÜS-Portal“ (www.lgnapp.niedersachsen.de/ikues) zur Bereitstellung der Ergebnisse des Projektes

7. Kombination der geodätischen Messtechniken

7.1 Grundgedanken

Änderungen von Koordinaten sind immer nur „relativ“ zu einem Bezugsrahmen bestimmbar. Der Bezugsrahmen, innerhalb dessen die Analyse durchgeführt werden muss, wird durch Referenzpunkte realisiert, während das Objekt durch Objektpunkte diskretisiert wird. Im Idealfall sind die Referenzpunkte über den „gesamten“ Überwachungszeitraum stabil. Durch eine Transformation wird jede Messepoche in das System der Referenzpunkte eingefügt, so dass sich die Objektpunkte auf ein einheitliches geodätisches Datum beziehen und somit direkt vergleichbar sind.

Die Referenzpunkte werden so gewählt, dass geringe Änderungen in den Referenzpunkten nur einen begrenzten Einfluss auf die Objektpunkte ausüben. Optimal ist eine ringförmige Anordnung der Referenzpunkte um das Objekt, da somit fehleranfällige Extrapolationen vermieden werden.

Falls keine stabilen Referenzpunkte zur Verfügung stehen, können auch Punkte verwendet werden, deren Bewegungsverhalten als funktional approximierbare Bewegung schätzbar

ist. Die Bewegung der Referenzpunkte kann von einem übergeordneten Bezugsrahmen vorgegeben (VESTØL, 2006) oder in der Auswertung geschätzt werden.

Für die deutsche Nordseeküste ist eine ringförmige Anordnung der Referenzpunkte kaum möglich. Es werden fünf „Referenzstationen“ im Süden des Auswertgebietes gewählt. Diese Punkte liegen im Bereich des als stabil angenommenen Berglandes. Alle detektierten Bewegungen beziehen sich auf diese Referenzpunkte.

Grundlage ist ein lineares Geschwindigkeitsmodell für „jeden“ Objektpunkt. Die Koordinate eines Punktes x^t zum Zeitpunkt t ist eine lineare Funktion ausgehend von der Koordinate zum Referenzzeitpunkt $x^{t_{\text{ref}}}$ mit der Geschwindigkeit des Punktes \dot{x} und dem Zeitpunkt t .

$$x^t = x^{t_{\text{ref}}} + \dot{x} \cdot (t - t_{\text{ref}}) \quad (1)$$

Es wird jedoch nicht jeder Punkt einzeln betrachtet, sondern die Geschwindigkeit benachbarter Punkte wird als korreliert betrachtet (Prinzip der Nachbarschaft). Die Geschwindigkeiten werden durch ein Geschwindigkeitsfeld approximiert, das aus radialen Basisfunktionen gebildet wird. Ziel ist eine hybride Auswertung von Höhendifferenzen und GPS-Koordinatensätzen zur Bestimmung des Geschwindigkeitsmodells. Für aufwändigere Bewegungsmodelle, z. B. eine beschleunigte Bewegung, ist im vorliegenden Fall die Datendichte unzureichend (Nivellement) oder die Zeitbasis zu kurz (GPS-Daten).

Es sollen „keine“ Höhen in einem einheitlichen System bestimmt werden. Diese Restriktion ergibt sich, da keine direkten Messungen zwischen den GPS-Punkten und den Nivellementpunkten existieren.

7.2 Entwicklung des kinematischen Modells

Für die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes werden Höhendifferenzen und GPS-Koordinatensätze verwendet.

Nivellementdaten

Ausgehend von der Höhe $H_i^{t_{\text{ref}}}$ des Punktes P_i zum Zeitpunkt t_{ref} kann unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit \dot{H}_i die Höhe H_i^t des Punktes P_i zum Zeitpunkt t bestimmt werden. Die Differenz der Punkthöhen $H_j^t - H_i^t$ entspricht der gemessenen Höhendifferenz $\Delta H_{i,j}^t$:

$$\Delta H_{i,j}^t = \underbrace{\left(H_j^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_j \cdot (t - t_{\text{ref}}) \right)}_{H_j^t} - \underbrace{\left(H_i^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_i \cdot (t - t_{\text{ref}}) \right)}_{H_i^t} \quad (2)$$

Die Bestimmung der Höhe eines Punktes $H^{t_{\text{ref}}}$ zum Referenzzeitpunkt t_{ref} ist problematisch, da nicht alle Punkte gemeinsam ausgewertet werden können. Die Nivellementbeobachtungen zerfallen in Teilnetze. Diese müssen entsprechende Verknüpfungen aufweisen, um einen Konfigurationsdefekt zu vermeiden (LEONHARD, 1987). Das Problem kann vermieden werden, wenn Differenzen von Höhendifferenzen gebildet werden. Die Werte $H^{t_{\text{ref}}}$ werden somit eliminiert:

$$\Delta H_{i,j}^{t_\kappa, t_\nu} = \Delta H_{i,j}^{t_\kappa} - \Delta H_{i,j}^{t_\nu} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{i,j}^{t_\kappa, t_\nu} = & \left(\left(H_j^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_j \cdot (t_\kappa - t_{\text{ref}}) \right) - \left(H_i^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_i \cdot (t_\kappa - t_{\text{ref}}) \right) \right) \\ & - \left(\left(H_j^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_j \cdot (t_\nu - t_{\text{ref}}) \right) - \left(H_i^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_i \cdot (t_\nu - t_{\text{ref}}) \right) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{i,j}^{t_\kappa, t_\nu} = & H_j^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_j \cdot (t_\kappa - t_{\text{ref}}) - H_i^{t_{\text{ref}}} - \dot{H}_i \cdot (t_\kappa - t_{\text{ref}}) \\ & - H_j^{t_{\text{ref}}} - \dot{H}_j \cdot (t_\nu - t_{\text{ref}}) + H_i^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_i \cdot (t_\nu - t_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

$$\Delta H_{i,j}^{t_\kappa, t_\nu} = \dot{H}_j \cdot (t_\kappa - t_\nu) - \dot{H}_i \cdot (t_\kappa - t_\nu)$$

$$\Delta H_{i,j}^{t_\kappa, t_\nu} = (\dot{H}_j - \dot{H}_i) \cdot (t_\kappa - t_\nu) \quad (4)$$

Der Term $\dot{H}_j - \dot{H}_i$ entspricht der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Punkten P_j und P_i und ist der Quotient aus der doppelten Differenz und dem Zeitintervall zwischen den Messungen.

$$\dot{H}_j - \dot{H}_i = \frac{\Delta H_{i,j}^{t_\kappa, t_\nu}}{(t_\kappa - t_\nu)} \quad (5)$$

Die Verwendung von Geschwindigkeitsdifferenzen in Verbindung mit einem Geschwindigkeitsfeld ist in HOHDAHL (1975), GUBLER (1984) beschrieben.

Bei der Verwendung von Geschwindigkeitsdifferenzen kann das Schwerfeld unberücksichtigt bleiben, da bei der Differenzbildung der Einfluss der Schwere eliminiert wird (GUBLER, 1984).

In einem linearen Modell werden die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen zwei Punkten als konstant angenommen.

Wird eine Höhendifferenz in zwei Geschwindigkeitsdifferenzen referenziert, so sind die Beobachtungen korreliert, diese Korrelation wird z. Z. nicht berücksichtigt.

GPS - / GNSS - D a t e n

Eine wichtige Basis für die Auswertung sind die GPS-Koordinatensätze, da diese kontinuierlich bzw. als Wochenlösung vorliegen. GPS-Koordinatensätze liefern vollständige 3D-Koordinaten in einem globalen geozentrischen System mit vollständiger Kovarianzmatrix. Es ist deshalb sinnvoll, das Auswertesystem entsprechend als 3D-Modell auszulegen und die Höhenänderungen als Teilsystem zu definieren. Basis ist eine lineare Bewegung des Punktes im Horizontsystem:

$$x^t = x^{t_{\text{ref}}} + \dot{x} \cdot (t - t_{\text{ref}}) \quad (6)$$

Aufgrund von Antennenwechseln treten regelmäßig Sprünge in der Höhe auf, diese werden durch das Einführen von zeitabhängigen Offsets o^t zur Höhe modelliert. Offsets gelten ab Zeitpunkt der Einführung bis zur Definition eines neuen Offsets.

$$x^t = x^{t_{\text{ref}}} + \underbrace{\dot{x} \cdot (t - t_{\text{ref}})}_{\text{lineare Punktbevewegung}} + \underbrace{o^t}_{\text{Offset}} \quad (7)$$

GPS-Punkte sind häufig auf Gebäuden installiert, die jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. In Form von Sinusschwingungen können diese saisonalen Bewegungen modelliert werden. Die Parameter einer Sinusschwingung sind die Amplitude c , die Kreisfrequenz ω sowie die Phasenverschiebung ϕ

$$c \cdot \sin(\omega + \phi) = c \cdot (\sin \omega \cos \phi + \cos \omega \sin \phi) \quad (\text{Additionstheorem})$$

$$= \underbrace{c \cdot \cos \phi}_{a} \sin \omega + \underbrace{c \cdot \sin \phi}_{b} \cos \omega$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$c = \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

Für die Änderung der Koordinaten im lokalen kartesischen System folgt unter Verwendung der Koeffizienten a und b der Sinusschwingung:

$$\begin{aligned} x^t &= x^{t_{\text{ref}}} + \underbrace{\dot{x}(t - t_{\text{ref}})}_{\text{lineare Punktbevewegung}} + \underbrace{o^t}_{\text{Offset}} \\ &+ \underbrace{\sum_{k=1}^n \left(a_k \sin(2\pi f_k(t - t_{\text{ref}})) + b_k \cos(2\pi f_k(t - t_{\text{ref}})) \right)}_{\text{saisonale Punktbevewegung}} \\ &= x^{t_{\text{ref}}} + \Delta x^t \end{aligned} \quad (8)$$

Die Koordinaten der Punkte (Rechts-, Hochwert sowie die ellipsoidische Höhe) zum Referenzzeitpunkt t_{ref} werden vorausgesetzt. Die Punktbevewegungen sind in einem lokalen kartesischen System definiert, während die GPS-Koordinaten in einem globalen kartesischen System vorliegen. Die Änderungen im lokalen System werden in das globale System durch die Rotation:

$$\Delta X^t = A \cdot \Delta x^t \quad (9)$$

übertragen. Die Rotationsmatrix A ist eine Funktion der geographischen Länge Λ und Breite Φ des Punktes (SEEBER, 1989) und kann bei den geringen Änderungen als zeitinvariant be-

trachtet werden. Es werden nur geringe Positionsänderungen erwartet, so dass die physikalische Lotrichtung durch die Ellipsoidnormale ersetzt wird.

$$A = \begin{bmatrix} -\sin \Phi \cos \Lambda & -\sin \Lambda & \cos \Phi \cos \Lambda \\ -\sin \Phi \sin \Lambda & +\cos \Lambda & \cos \Phi \sin \Lambda \\ \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

Über längere Zeiträume kann das Bezugssystem des GPS variieren und zu systematischen Abweichungen in den Koordinaten zwischen zwei Epochen führen. Um diesen Effekt zu minimieren, wird eine Transformation in das Auswertemodell integriert: für jede GPS-Epoche werden sechs Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (je drei Translationen T^t und drei Rotationen R^t , der Maßstab wird nicht bestimmt) geschätzt. Es werden somit keine absoluten Datumsinformationen, d. h. absolute Koordinaten, sondern nur relative Informationen bzw. die innere Geometrie des Koordinatensatzes genutzt. Auch das Importieren neuer GPS-Koordinatensätze wird vereinfacht, da kein einheitliches Datum für alle Koordinatensätze vorausgesetzt wird.

Definition der Helmert-Transformation für den Übergang geozentrischer Koordinaten X^t in das System der GPS-Epoche \bar{X}^t :

$$\bar{X}^t = T^t + R^t \cdot X^t \quad 11$$

Die Rotationsmatrix hat folgenden Aufbau (SEEBER 1989):

$$R^t = \begin{bmatrix} +\cos \beta \cos \gamma & \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ -\cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

Wird die lineare Geschwindigkeitsänderung im lokalen kartesischen System berücksichtigt ergibt sich für die Transformation:

$$\begin{aligned} \bar{X}^t &= T^t + R^t \left(X^{t_{\text{ref}}} + A(\Delta x^t) \right) \\ \bar{X}^t &= T^t + R^t \left(\underbrace{X^{t_{\text{ref}}}}_{\text{globale Transformation}} \right. \\ &\quad + A \left(\underbrace{\dot{x}(t - t_{\text{ref}})}_{\text{lineare Punktbevewegung}} + \underbrace{o^t}_{\text{Offset}} \right. \\ &\quad \left. \left. + \underbrace{\sum_{k=1}^n \left(a_k \sin(2\pi f_k(t - t_{\text{ref}})) + b_k \cos(2\pi f_k(t - t_{\text{ref}})) \right)}_{\text{saisonale Punktbevewegung}} \right) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Da das Auswertebiet nur einen kleinen Teil der Erdoberfläche umfasst, sind lokale und globale Parameter hochgradig korreliert, für die Auswertung der GPS-Daten wird deshalb ein zweistufiges Vorgehen gewählt:

- Bestimmung der globalen Transformationsparameter T^t und R^t ,
- Bestimmung der lokalen Parameter \dot{x} , o^t , a und b unter Berücksichtigung der globalen Transformationsparameter.

R a d i a l e B a s i s f u n k t i o n (R B F)

Das Geschwindigkeitsfeld wird durch eine Linearkombination von radialen Basisfunktionen approximiert (BUHMANN, 2003; MARESCH, 2006). Vorteile gegenüber anderen Flächen-darstellungen, z. B. *Non-Uniform Rational B-Splines* (NURBS) oder Polynomflächen sind:

- einfach zu berechnen,
- kein Ausschwingen an den Rändern wie bei Polynomflächen,
- einfache Integration von Zusatzinformationen in Form von Layern.

Als Basisfunktion wird eine Gaußsche Glockenkurve verwendet:

$$f(x, y) = c \cdot e^{-((x-x_f)^2 + (y-y_f)^2)/\alpha^2} \quad (14)$$

Die Höhe c entspricht im Modell der Geschwindigkeit. Der Parameter α beschreibt den Wirkungsbereich der Funktion. Der Quotient $-((x-x_f)^2 + (y-y_f)^2)/\alpha^2$ kann als Quadrat des normierten Abstandes vom Zentrum der Funktion interpretiert werden. Die Parameter x_f und y_f definieren das Zentrum der radialen Basisfunktion. Der Wert der Funktion $f(x, y)$ ist nur abhängig vom Abstand des Punktes vom Zentrum der radialen Basisfunktion, die Funktion ist isotrop. Die Verwendung von Glockenkurven bei der Approximation ergibt eine glatte Oberfläche.

Die Abb. 30 zeigt eine räumliche radiale Basisfunktion mit den Parametern $c = 1$ und $\alpha = \sqrt{2}$. Die Position des Zentrums der radialen Basisfunktion ist durch $x_f = 0$ und $y_f = 0$ gegeben. Den Einfluss der Parameter c und α auf die Form einer ebenen radialen Basisfunk-

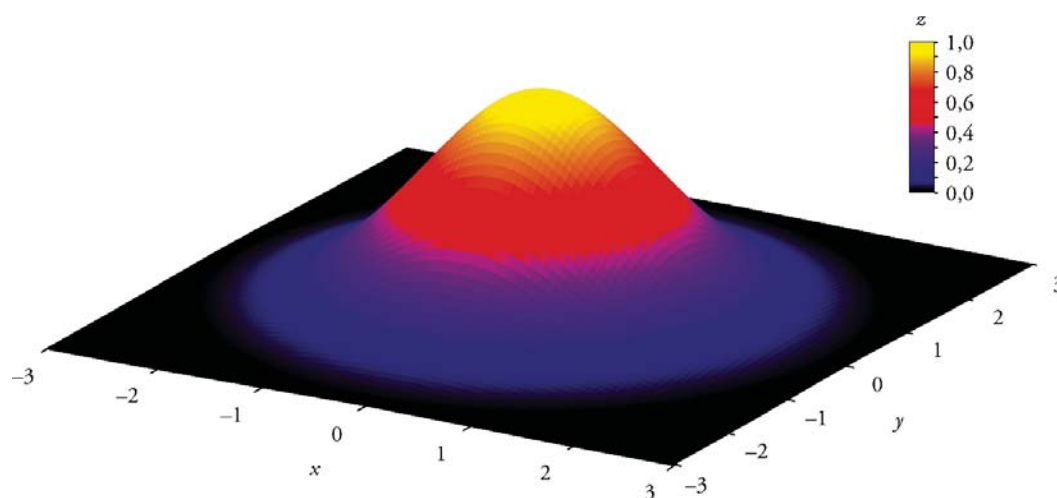


Abb. 30: Beispiel einer 3D-radialen Basisfunktion $1,0 \cdot e^{-(x^2 + y^2)/\alpha^2}$

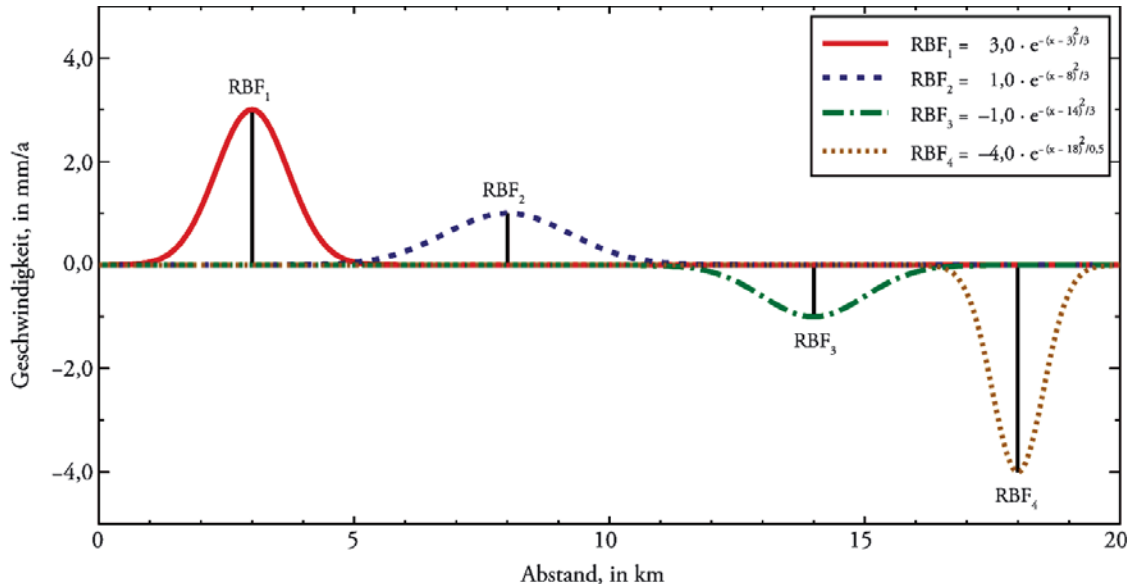


Abb. 31: Beispiele von 2D-radialen Basisfunktionen mit unterschiedlicher Höhe und Steilheit

tion wird in Abb. 31 gezeigt. Die Steilheit der Kurve ist umgekehrt proportional zum Parameter α . Die Geschwindigkeit ergibt sich aus der Summe der Anteile aller radialen Basisfunktionen, siehe Abb. 32. Die Summe weist einen harmonischen und glatten Verlauf auf.

Durch die Wahl der geeigneten Parameter c , α sowie xf und yf für jede Glockenkurve, können durch Punkte definierte Kurven approximiert werden.

Für die Ausgestaltung der Approximation mit mehreren radialen Basisfunktionen ist das Verhältnis zwischen dem Parameter α und dem Abstand der Zentren wichtig. In der Abb. 33 sind jeweils zwei radiale Basisfunktionen mit konstantem Abstand dargestellt. Der Parameter α wird variiert. Des Weiteren wird dieser auf 75 % des mittleren Punktabstandes festgelegt. Kriterium für die Wahl von α ist, dass die Kurve nur ein Maximum im Bereich einer Stützstelle aufweisen soll und der Verlauf monoton fallend ist. Ist α zu klein, ergeben sich mehrere Maxima und ist α zu groß, entfernt sich das Maximum von der Stützstelle.

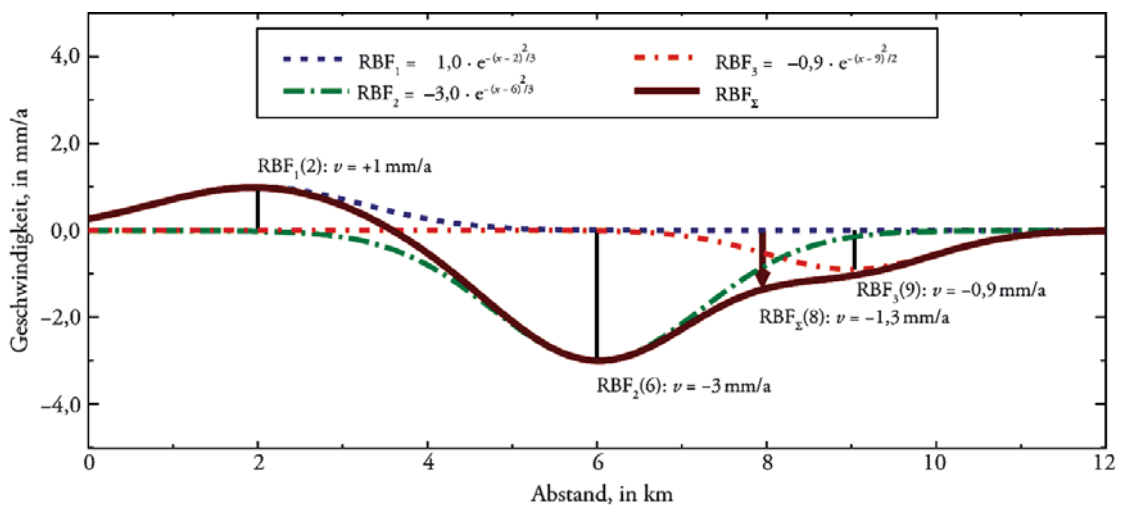
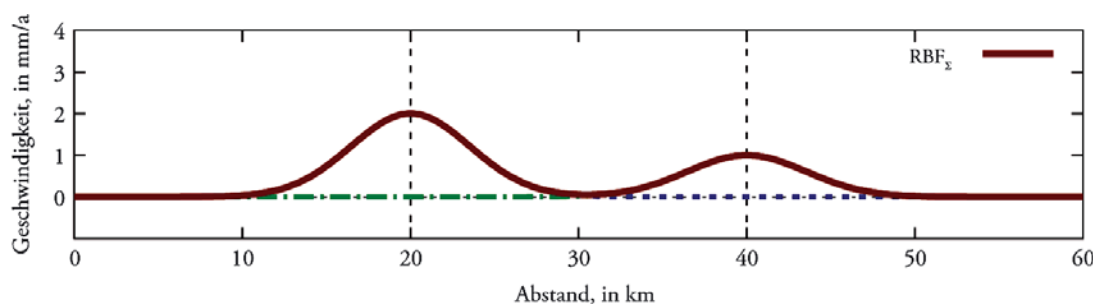
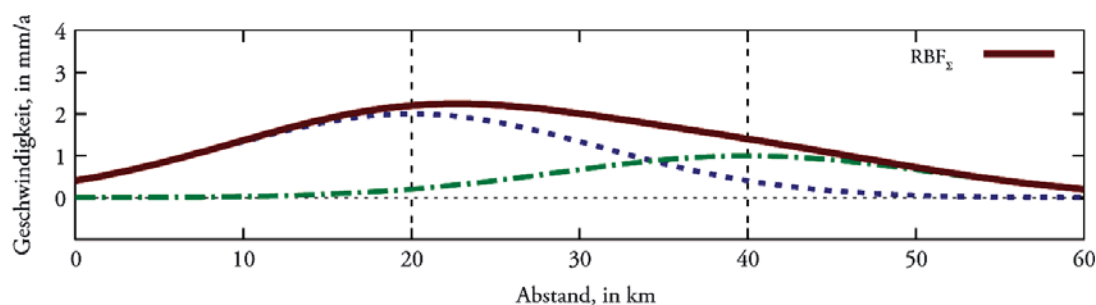


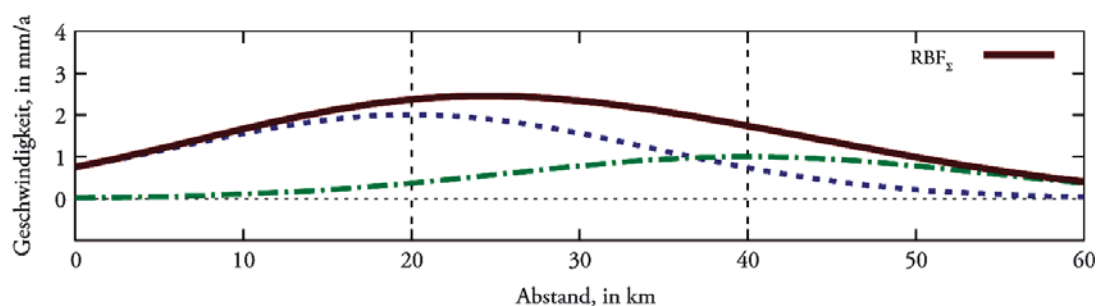
Abb. 32: Summation der Anteile zweier radialer Basisfunktionen



(a) Steilheit entspricht 25 % der Gitterweite (5 km).



(b) Steilheit entspricht 75 % der Gitterweite (15 km).



(c) Steilheit entspricht 100 % der Gitterweite (20 km).

Abb. 33: Beispiele von 2D-radialen Basisfunktionen mit unterschiedlicher Steilheit und konstantem Abstand

Das Geschwindigkeitsfeld wird jedoch nicht durch eine einzelne radiale Basisfunktion dargestellt, sondern durch mehrere Funktionen, deren Geschwindigkeiten zur Gesamtgeschwindigkeit aufsummiert werden. Die optimalen Parameter für die Geschwindigkeit, für und für die Position der radialen Basisfunktion können durch eine Ausgleichung bestimmt werden, sofern ausreichende Messpunkte zur Verfügung stehen.

7.3 Realisierung

Das Auswertebereich umfasst den Bereich von der niedersächsischen Nordseeküste im Norden bis in das Leinebergland/TeutoburgerWald im Süden. Es werden nur Bereiche betrachtet, in denen Nivellement und GPS-Daten vorliegen, so dass eine gegenseitige Kontrolle der Daten möglich ist.

N i v e l l e m e n t

Als Ausgangsdaten für die Berechnungen werden rohe Höhendifferenzen verwendet. Eventuell bereits angebrachte Korrekturen, z. B. normalorthometrische Korrekturen, sind entfernt. Alle instrumentellen und meteorologischen Korrekturen (z. B. Lattentemperatur) wurden, soweit die dafür notwendigen Informationen vorlagen, angebracht. Jeder Messung wird ein Datum zugeordnet (Mittel aus Anfang und Ende der Messung).

Die Nivellementbeobachtungen können folgenden Fehlereinflüssen unterliegen:

- unzureichende Zeiterfassung:
Für die frühen Jahrgänge ist das Jahr der Messung bekannt. Da in der Regel vom Frühjahr bis in den Herbst gemessen wird, beträgt der Fehler maximal ein viertel Jahr, da das Messdatum auf Jahresmitte gesetzt ist.
- ungenaue Lagekoordinaten:
Die Koordinaten der Nivellementpunkte sind teilweise ungenau, da diese aus Karten abgegriffen wurden.
- Punktverwechslungen, Punktidentitäten:
Es können Punktverwechslungen aufgetreten sein.

Für die Berechnung der doppelten Differenzen müssen jeweils zwei Nivellementstrecken mit identischem Anfangs- und Endpunkt zu unterschiedlichen Zeitpunkten vorliegen.

Die Aufbereitung der Höhendifferenzen umfasst folgende Schritte:

- Bildung homogener Messepochen:
Alle Messungen eines Jahres werden zu einer Messepoche zusammengefasst. Jeweils zwei benachbarte Epochen werden auf identische Strecken getestet. Der zeitliche Abstand der Epochen muss mindestens zehn Jahre betragen. Durch diese Zeitspanne wird ein eventueller Fehler in der Datumserfassung auf fünf Prozent reduziert.
- Erfassung identischer Punkte:
Es werden die identischen Punkte zwischen beiden Epochen bestimmt.
 - Besteht eine direkte Verbindung zwischen den Punkten, so wird diese gespeichert.
 - Besteht keine direkte Verbindung, so wird für jede Epoche ein Graph aufgebaut und der kürzeste Weg zwischen den Punkten gesucht. Dabei wird der Dijkstra-Algorithmus verwendet, als Gewichtung der Kanten im Graph dient die Nivellementweglänge.
- Zusammenfassung zusammenhängender Strecken:
Zusammenhängende Strecken werden zu längeren Einheiten zusammengefasst. Um Geschwindigkeitsdifferenzen von 1 mm/km pro zehn Jahre aufdecken zu können, sollten die doppelten Differenzen eine Länge von ca. 4,5 km aufweisen. Dieser Wert wird durch die Vorgabe einer Standardabweichung von $0,5 \text{ mm/km}^{-1/2}$ für eine Höhendifferenz und einem Signal-Rausch-Verhältnis von 3 bestimmt. Durch den Aufbau längerer Strecken verringert sich auch der relative Fehler aufgrund ungenauer Koordinaten.

Die Bildung von doppelten Differenzen mit einem Zeitabstand von zehn Jahren und einer Länge von 4,5 km wirkt als Tiefpassfilter. Lokale Störungen werden gefiltert, die Auflösung des Modells entsprechend verringert. Dies ist kein Nachteil, da nur großräumige Bewegungen detektiert werden sollen.

GPS / GNSS

Die GPS-Koordinatensätze sind Wochenlösungen, die vom Programm WaSoft/Netz erzeugt wurden. Für die Datumsfestlegung wurde ein „weiches“ Datum gewählt. Neben den Koordinaten steht auch die Kovarianzmatrix zur Verfügung.

Radiale Basisfunktionen

Der Parameter α und der Ort (x_f, y_f) sind individuell für jede RBF vorgegeben. α wird auf ca. 75 % des mittleren Punktabstandes zwischen den SAPOS-Stationen festgelegt, dies entspricht einem Abstand von ca. 20 km.

Für die Auswertung der GPS-Daten werden die Zentren der radialen Basisfunktionen auf die SAPOS-Stationen mit den GPS-Messungen positioniert. Beim Auswerten von Nivellamentdaten werden die Zentren in den Bereich der maximalen Geschwindigkeitsänderung platziert. Bei der Kombination aller Beobachtungen werden die Zentren der radialen Basisfunktionen aus beiden Auswertungen übernommen, bei zwei benachbarten Basisfunktionen wird die GPS-Station beibehalten. Die Geschwindigkeiten der radialen Basisfunktionen werden in der Ausgleichung geschätzt.

7.4 Ausgleichung

Es erfolgt eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (NIEMEIER, 2002; JÄGER et al., 2005) in zwei Stufen:

1. Bestimmung der Transformationsparameter aller GPS-Epochen in Bezug zu den Referenzpunkten.
2. Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes auf Basis der mit in Stufe 1 bestimmten Parametern transformierten Punkte.

Die Beobachtungen werden als Funktion der unbekannt Parameter definiert. Die Ausgleichung erfolgt iterativ, die Parameter werden schrittweise verbessert und grobe Beobachtungsfehler werden abgewichtet. Dabei wird auch die Gruppengenauigkeit angepasst. Jede GPS-Epoche und alle doppelten Differenzen bilden jeweils eine Gruppe.

Bestimmung der Transformationsparameter

Es liegen insgesamt 327 GPS-Epochen für den Zeitraum vom 26. 9. 2000 bis zum 3. 1. 2007 vor. Die Beobachtungen werden als unkorreliert betrachtet, die Genauigkeit wird mit 1 mm angenommen. Die sechs identischen Punkte für die Transformation sind:

- 0640 SAPOS, Dach der LGN, Podbielskistraße 331, 30659 Hannover
- 0642 SAPOS, Dach des Katasteramtes, Mercatorstraße 4 und 6, 49080 Osnabrück
- 0652 SAPOS, Dach des Katasteramtes, Neue Wiese 11, 31061 Alfeld
- 0658 SAPOS, Dach des Katasteramtes, Schilfstraße 6, 48529 Nordhorn
- 0668 SAPOS, Dach des Rathauses, Mühlenstraße 18, 49401 Damme
- PTBB IGS, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig.

Pro Epoche werden sechs Parameter (3 Translationen, 3 Rotationen) für jede GPS-Epoche geschätzt. Die Rotationen beziehen sich auf den Schwerpunkt des Netzes, somit sind

Translation und Rotation nicht korreliert. Für jeden Punkt können mehrere zeitabhängige Offsets geschätzt werden. Die Offsets basieren auf bekannten Antennenwechslern und erkennbaren Sprüngen in den Zeitreihen der Punktkoordinaten. Es wird jeweils auf die GPS-Koordinaten der Epoche t_{ref} transformiert. Die Epoche t_{ref} entspricht der ersten GPS-Epoche vom 26. 9. 2000.

Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes

Im Auswertegebiet liegen insgesamt 39.861 Nivellementbeobachtungen vor. Davon sind 1215 Mehrfachmessungen und 12.622 Hin- und Rückmessungen. Somit verbleiben noch 26.024 Nivellementbeobachtungen. Aus diesen Nivellementbeobachtungen werden 555 doppelte Differenzen mit einer Länge von minimal 4 km abgeleitet. Für den Übergang zwischen den Ostfriesischen Inseln wurden drei doppelte Differenzen manuell berechnet und eingetragen. Um doppelte Differenzen bilden zu können, wurden die Jahre 1954/1956 und 1957 zum Jahr 1956 und 1984 und 1985 zum Jahr 1984 zusammengefasst.

Für die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes werden die GPS-Epochen aus Kap. 7.4 verwendet. Aus Antennenwechslern und Sprüngen in den Zeitreihen der Punktkoordinaten werden Offsets abgeleitet. Für ausgewählte Punkte werden saisonale Bewegungen in Form von Sinusschwingungen im Jahresrhythmus zugelassen.

Abb. 34 zeigt das Bewegungsverhalten des Punktes 0647 (Emden). Auffällig sind die Senkung des Punktes sowie die ausgeprägte saisonale Bewegung in der y -Komponente und die etwas verrauschte Höhe.

7.5 IKÜS-Software

In der IKÜS-Software wird das im Kap. 7.2 beschriebene Modell realisiert. Für diesen Zweck wurden die Konsolenprogramme `nivbeo` und `ikus` entwickelt. Die Programmierung erfolgte in der Programmiersprache C++ in einer Microsoft Visual Studio 2005-Umgebung und baut auf dem bereits bestehenden Programmsystem Panda der Firma GEOTEC GmbH auf. Weiterhin wurden Funktionen des frei verfügbaren *GPS-Toolkits* (<http://www.gpstk.org>) und der quelloffenen *Boost Library* (<http://www.boost.org>) verwendet.

Das Programm `nivbeo` dient der Aufbereitung der zur Verfügung stehenden Nivellementbeobachtungen:

Aufbereiten der Höhendifferenzen:

- Lesen der Höhendifferenzen aus der IKÜS-Datenbank,
- Ersetzen der Punktbezeichnung durch die IKÜS-Punktnummer,
- alle Beobachtungen zwischen identischen Punkten werden in einem Vektor gespeichert,
- Sortieren der Beobachtungen zwischen zwei Punkten nach dem Beobachtungsdatum,
- Mitteln von Wiederholungsmessungen,
- Mitteln von Hin- und Rückmessungen,
- Kontrolle auf grobe Fehler.

Berechnen der doppelten Differenzen:

- Beobachtungen eines Jahres werden zu einer Epoche zusammengefasst

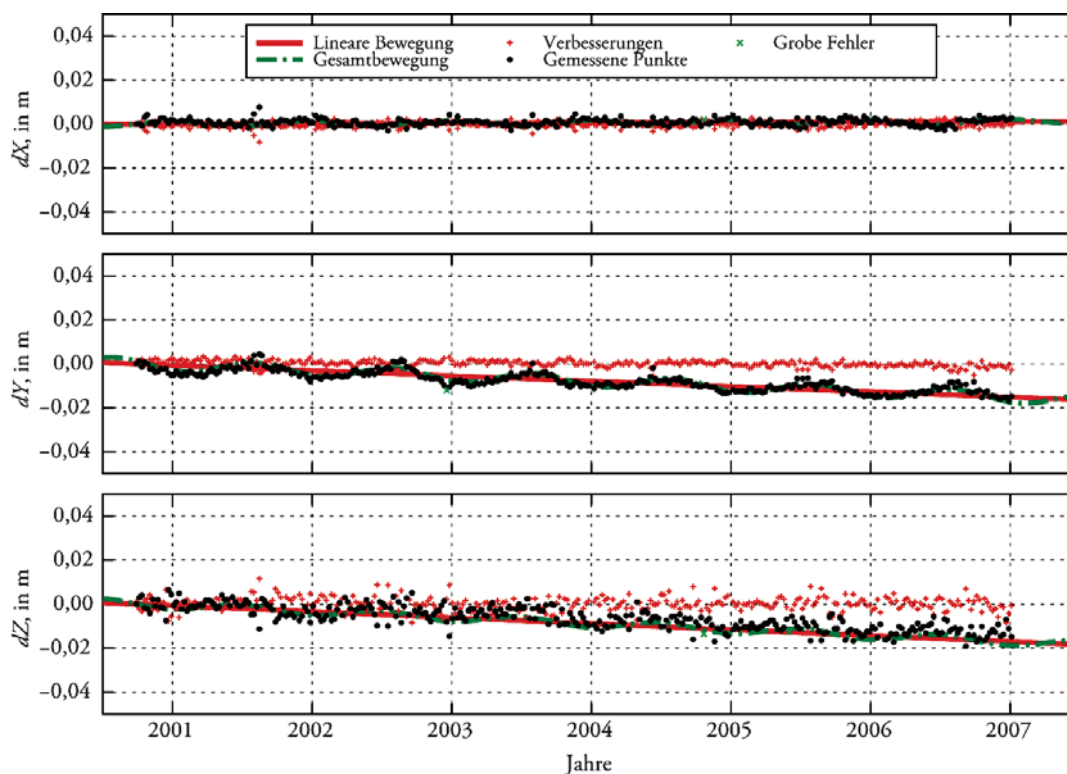


Abb. 34: Zeitreihe des Punktes 0647 (Emden)

- Vergleich von zwei Epochen, deren zeitlicher Abstand mindestens 10 Jahre beträgt:
 - Suchen identischer Punkte in den zu vergleichenden Epochen,
 - in jeder Epoche werden die kürzesten Verbindungen zwischen den identischen Punkten bestimmt,
 - Berechnen der doppelten Differenzen zwischen den identischen Punkten aus den Höhendifferenzen beider Epochen,
 - Bilden von Linien doppelter Differenzen mit Längen von mindestens 4 km,
 - Markieren der verwendeten Beobachtungen um eine Mehrfachnutzung zu vermeiden. Eine Beobachtung wird maximal in zwei Vergleichen verwendet.
- Speichern der berechneten doppelten Differenzen in der IKÜS-Datenbank.

Das Programm-Modul `iku es` berechnet das in Abschnitt 7.2 beschriebene Geschwindigkeitsmodell. Die Eingangsdaten (GPS-Epochen und doppelte Differenzen der Nivellementbeobachtungen) und die Zusatzinformationen (zu bestimmende Parameter der SAPOS-Stationen und die Positionen der Radialen Basisfunktionen) werden der IKÜS-Datenbank entnommen. Als Ergebnis wird ein Protokoll mit den berechneten Offsets, den saisonalen Bewegungen der SAPOS-Stationen und den Parametern der Radialen Basisfunktionen erzeugt. Für die Generierung der Graphik mit GMT (*Generic Mapping Tools*) wird eine Datei mit entsprechenden Gitterdaten erzeugt.

Die Lösung wird nach vermittelnden Beobachtungen unter Minimierung der Verbesserungsquadratsumme (L2-Norm) ermittelt. Das Programm verwendet eine Profilspeichertechnik und berechnet die inverse Normalgleichungsmatrix basierend auf dem Cholesky-Algorithmus. Um grobe Beobachtungsfehler zu eliminieren und die Genauigkeiten im Rahmen einer Varianzkomponentenschätzung zu korrigieren, wird eine iterative Ausgleichung mit Fehlersuche durchgeführt.

Folgende Schritte werden vom Programm `ikues` durchgeführt:

- (1) Berechnung der Transformationsparameter für die GPS-Epochen bezogen auf die Referenzpunkte:
 - Lesen der GPS-Epochen aus der IKÜS-Datenbank,
 - Bestimmen der Unbekannten (Transformationsparameter für jede GPS-Epoche und Offsets in den SAPOS-Stationen),
 - iterative Ausgleichung zur Bestimmung der Parameter,
 - Speichern der bestimmten Transformationsparameter in der IKÜS-Datenbank.
- (2) Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes:
 - Lesen der GPS-Epochen und der doppelten Differenzen aus der IKÜS-Datenbank,
 - Transformation der GPS-Koordinaten entsprechend der in Stufe 1 ermittelten Transformationsparameter
 - Bestimmen der Unbekannten (Parameter der Radialen Basisfunktionen, Offsets und saisonale Parameter der SAPOS-Stationen),
 - iterative Ausgleichung zur Bestimmung der Parameter,
 - Erzeugen der Graphiken mittels GMT,
 - Erstellen der Protokolldatei.

7.6 Ergebnis

Die Abb. 35 und 36 zeigen die Ergebnisse des Geschwindigkeitsfeldes, welche zum einen aus Nivellementdaten und zum anderen aus GPS-Daten abgeleitet wurden. Die Abb. 37 zeigt das Ergebnis des Geschwindigkeitsfeldes aus der Kombination der Nivellement- und GPS-Daten.

Im Bereich des Dollarts, im Westen des Jadebusens sowie an der Elbmündung in der Nähe von Cuxhaven ergibt sich übereinstimmend aus den Nivellement- und GPS-Daten eine Senkung des Gebietes mit einer vergleichbaren Geschwindigkeit. Im Bereich der Ostfriesischen Inseln liegen in der Regel nur GPS-Informationen vor. Die Senkung ist begründet durch die gleichartigen Bewegungen der Punkte 0670 und 0701. Im Bereich der Punkte 0671 und 0655 ist in den Nivellementdaten keine Senkung abzulesen.

Aus den linienhaften Informationen des Nivellements und den punktbezogenen Daten der SAPOS-Stationen wird ein flächenhaftes Geschwindigkeitsfeld abgeleitet. Das Ergebnis basiert somit auf einer Extrapolation, dies ist bei einer Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Es wird eine lineare Geschwindigkeit über den gesamten Bearbeitungszeitraum angenommen, für bestimmte Gebiete, z. B. im Bereich des Dollarts mit der Gasentnahme im Groninger Gasfeld, ist diese Annahme problematisch.

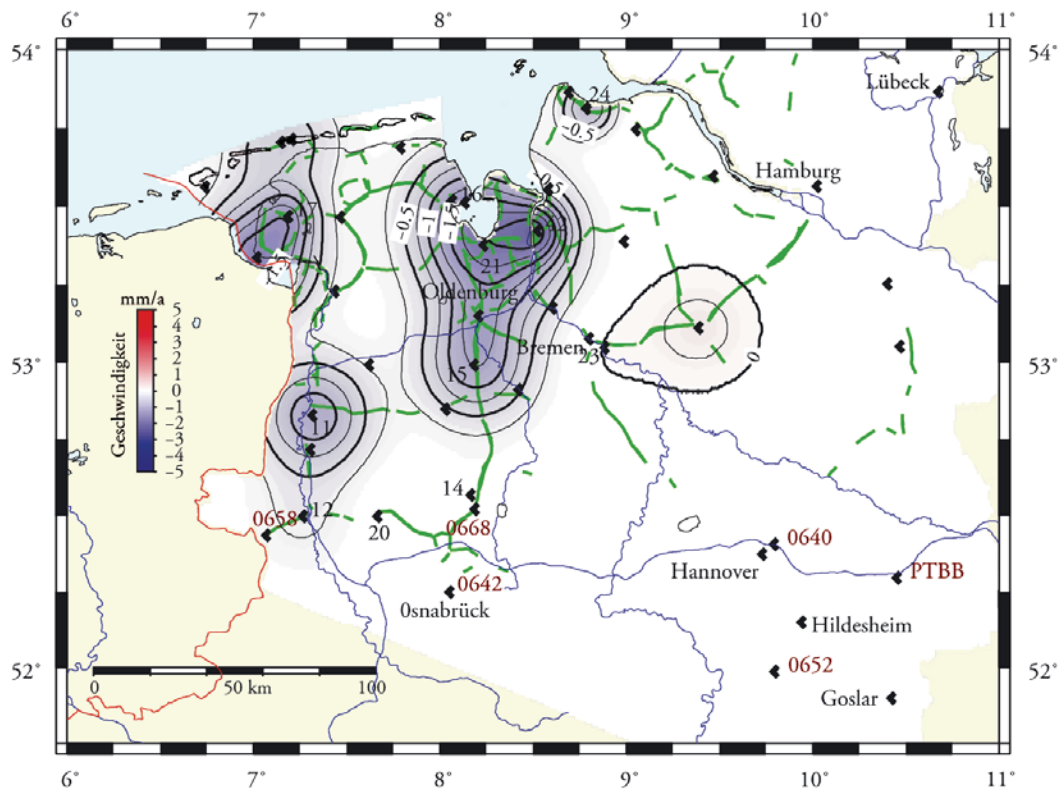


Abb. 35: Geschwindigkeitsfeld als Ergebnis der Auswertung der Nivellementdaten. Die Positionen der radialen Basisfunktionen sind durch einen Punkt gekennzeichnet

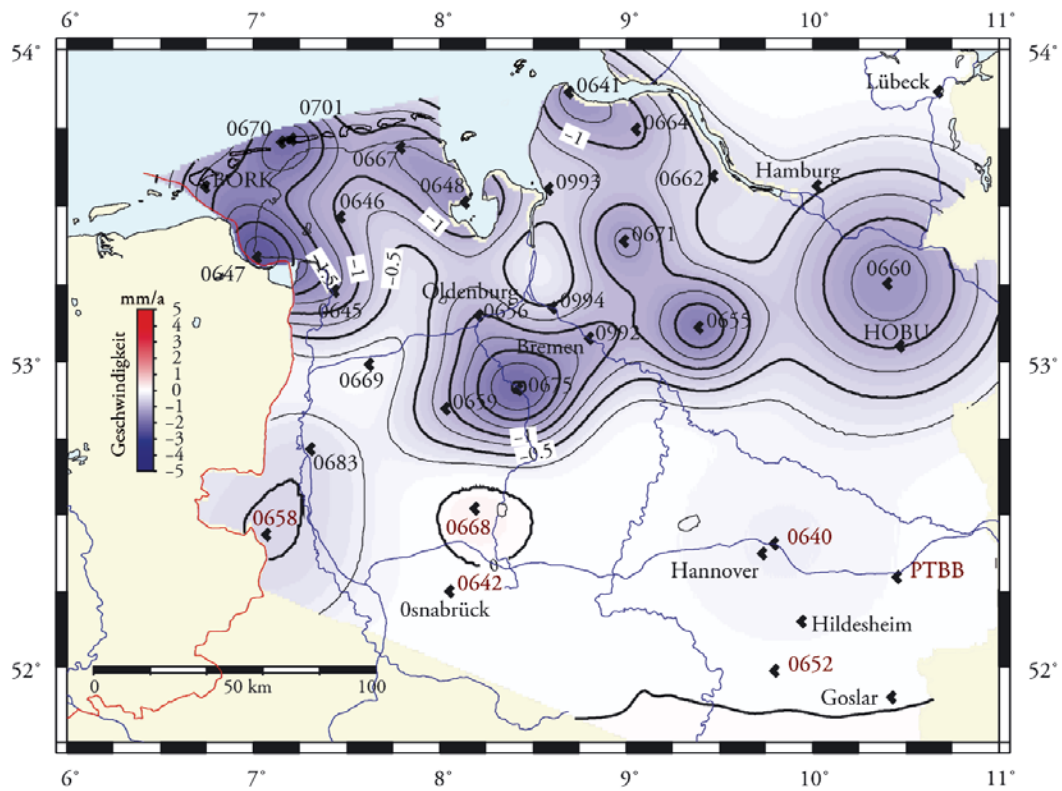


Abb. 36: Geschwindigkeitsfeld als Ergebnis der Auswertung der GPS-Daten. Die Positionen der radialen Basisfunktionen sind durch einen Punkt gekennzeichnet und entsprechen den SAPOS-Stationen. Rot sind jeweils die Referenzstationen für die Transformation der GPS-Epochen dargestellt

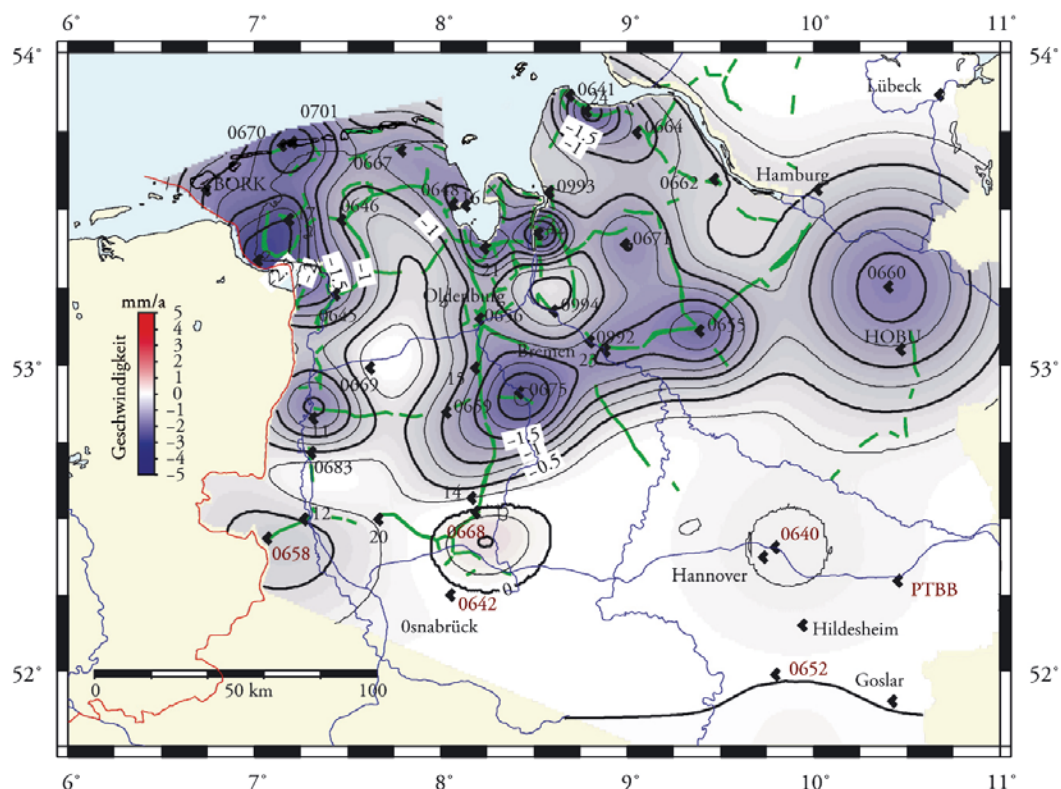


Abb. 37: Geschwindigkeitsfeld als Ergebnis der Kombination von Nivellement- und GPS-Daten. Die Positionen der radialen Basisfunktionen sind durch einen Punkt gekennzeichnet und entsprechen den SAPOS-Stationen. Rot sind jeweils die Referenzstationen für die Transformation der GPS-Epochen dargestellt

8. Gesamtergebnisse

8.1 Aufbereitete Messdaten

In Vorbereitung auf eine gemeinsame Auswertung der höhenrelevanten, geodätischen Messungen mussten diese analysiert und aufbereitet werden.

Es wurden sämtliche Nivellementsdaten der Landesvermessungsämter, die für Nordwestdeutschland vorliegen, für IKÜS bearbeitet. Dies sind insbesondere die Messkampagne zum DHHN 12, NKN I, NKN II, DHHN 85, NKN III und DHHN 92. Zielsetzung war es, Höhenunterschiede zwischen Nivellementpunkten zur Verfügung zu stellen. Lagen nur ausgeglichene Höhen vor, so wurden diese in „Rohbeobachtungen“ unter Berücksichtigung von Ausgleichungsverbesserungen, Reduktionen und Korrekturen zurückgerechnet.

Zusätzlich wurden alle verfügbaren Nivellements der BfG und WSV im Küstenbereich aufbereitet. Dabei wurden originale Feldbuchaufzeichnungen genutzt, um eventuell auftretende Digitalisierungsfehler zu minimieren. Da viele Nivellementpunkte über die Jahre mehr als eine Punktbezeichnung bekommen haben, wurden Punktidentitäten mit großem Aufwand identifiziert und diese Informationen mit den Messdaten in der IKÜS-Datenbank gespeichert.

Die GPS/GNSS-Beobachtungen aus dem nordwestdeutschen Bereich reichen bis etwa 1995 zurück. Die Beobachtungsdaten vor 1998 waren aber von vergleichsweise schlechter

Qualität, so dass sich die homogene Gesamtauswertung nur auf den Zeitraum von 1998 bis 2007 bezieht. Vertikale (und auch horizontale) Stationsbewegungen konnten auf der Basis von Wochenlösungen analysiert werden. Insgesamt wurden 441 GPS-Wochenlösungen in die IKÜS-Datenbank übernommen, wobei aufgrund von Verbesserungen in der GPS-Antennen- und -Empfängertechnik vielfach erst ab dem Jahr 2000 eine ausreichend hohe Ergebnisqualität erzielbar war.

Nur solche absolute Schwerewerte, die ab Mitte der 1990er Jahre gemessen wurden, weisen eine Qualität auf, die eine Bestimmung kleiner Höhenänderungen aus Schwereänderungen ermöglichen könnte. Die entsprechenden vom BKG zur Verfügung gestellten Absolutschweremessungen wurden in die IKÜS-Datenbank aufgenommen. Aufgrund der geringen Datengrundlage konnten sie aber keinen Beitrag zur Berechnung des Höhen-Geschwindigkeitsfeldes liefern.

Bei den Messungen an den Pegeln konzentrierte sich die Analyse und Aufbereitung insbesondere auf die geodätischen Pegelinformationen, also auf die nivellistischen Verbindungsmessungen zwischen Pegeln und Landeshöhennetz einerseits und den lokalen Nivellements zwischen Pegelfestpunkten und dem Pegelnullpunkt andererseits. Die Messungen wurden aufbereitet und in die IKÜS-Datenbank übernommen. Die zugehörigen Wasserstände wurden analysiert und mit zugehörigen Metainformationen in die Datenbank eingearbeitet.

8.2 I K Ü S - D a t e n b a n k

Um Daten, die aus verschiedenen Quellen stammen und unterschiedliche Eigenschaften haben, in einem mathematischen Modell zu kombinieren, ist ein einheitlicher Datenzugriff eine grundlegende Voraussetzung. Dafür wurde im Projekt eine Datenbank entwickelt und mit den Beobachtungen der verschiedenen Sensoren gefüllt. Als Ergebnis entstand eine einmalig konsistente Datenbasis von homogenen höhenrelevanten Zeitreihen für das Gebiet der Nordseeküste. Diese diente dem IKÜS-Projekt als Grundlage aller Untersuchungen und sie wird auch für zukünftige wissenschaftliche Analysen zur Verfügung stehen.

Bei der Entwicklung der IKÜS-Datenbank wurden für die einzelnen Datentypen der höhenrelevanten Sensoren standardisierte Austauschformate festgelegt, sofern diese für die IKÜS-relevanten Informationen existieren. Alternativ wurden Datenformate um weitere Informationen ergänzt oder neu als IKÜS-Format definiert. Auf diese Weise konnte eine offene Datenbank realisiert werden, die auch für zukünftige Messdaten offen ist. So wird es auch in Zukunft möglich sein, regelmäßig neue Höhenbestimmungen der unterschiedlichen Sensoren in die Datenbank einzufügen und so aktuelle und verbesserte Gesamtlösungen zu rechnen. Durch die Speicherung aller originalen Rohbeobachtungen in der Datenbank, wird zudem eine spätere, verbesserte Nachbearbeitung und Analyse der Daten ermöglicht.

Eine zugehörige Online-Dokumentation der Datenbank enthält Inhaltsbeschreibungen und Einheitenangaben aller Datenfelder und erleichtert damit die Navigation innerhalb der Datenbank. Die verwendeten Kommentarfelder in den Datenbanktabellen ermöglichen eine Interpretation der Datensätze ohne vorheriges Studium der Dokumentation.

Für den Aufbau der Datenbank wurden bestehende Hard- und Softwarestrukturen der LGN genutzt, die eine optimale Pflege der Datenbank gewährleisten sollen und gleichzeitig eine besonders wirtschaftliche Lösung bieten. Das im LGN-Netz integrierte „IKUES-Portal“ ermöglicht einen aktuellen Zugriff auf die Produkte des Projektes sowie dynamische Zugriffe auf definierte Datenbankinhalte (www.lgnapp.niedersachsen.de/ikues).

8.3 IKÜS-Software und Höhen-Geschwindigkeitsfeld

Mathematische Basis für die Erzeugung eines Höhen-Geschwindigkeitsfeld sind radiale Basisfunktionen in Gestalt von Gaußschen Glockenkurven. Dieser Modellansatz zur gemeinsamen Auswertung der höhenrelevanten Messungen wurde softwaretechnisch in der IKÜS-Software realisiert.

Die Anwendung der IKÜS-Software, also die eigentliche IKÜS-Auswertung, beschränkte sich dabei weitestgehend auf Gebiete, für die sowohl Nivellement- als auch GPS-Daten vorlagen, so dass eine gegenseitige Kontrolle möglich war. Die Höhenänderungen beziehen sich auf Referenzpunkte im südlichen Bergland von Niedersachsen, die als stabil angenommen werden. Es werden nicht Bewegungen einzelner Punkte geschätzt, sondern es wird ein lineares Höhen-Geschwindigkeitsfeld unter Berücksichtigung der Nachbarschaft generiert.

Aus nivellitischen Höhendifferenzen, die zwischen 1919 und 2001 gemessen wurden, wurden Geschwindigkeitsdifferenzen (doppelte Differenzen) abgeleitet und in das Modell integriert. Für die Berechnung von Geschwindigkeitsdifferenzen wurden Messungen zwischen identischen Punkten verwendet. Der Abstand zwischen den Punkten beträgt mindestens vier Kilometer, die Zeitdifferenz zwischen den Messungen mindestens zehn Jahre.

Aus den kontinuierlich vorliegenden Messungen der einzelnen GPS-Stationen wurden Wochenlösungen (GPS-Epochen) berechnet (siehe Abschnitt 3.1). Für jede GPS-Station können Zusatzparameter (Offsets oder saisonale Bewegungen) eingeführt werden. Da die aus GPS abgeleiteten Punktkoordinaten als 3D-Daten vorliegen, wird das Auswertesystem auch in 3D definiert. Die Geschwindigkeiten und eventuelle Zusatzparameter werden im Horizontsystem bestimmt. Da die GPS-Punkte im globalen kartesischen Koordinaten vorliegen, werden die Änderungen vom Horizontsystem in das global kartesische System gedreht und durch eine Transformation in das System der GPS-Wochenlösung transformiert. Durch die Transformation wird nur die innere Geometrie der GPS-Wochenlösungen verwendet.

Die Zentren und die Steilheit der radialen Basisfunktionen werden vorgegeben, die Höhe wird in der Ausgleichung bestimmt. Die Zentren wurden bei den bisherigen Auswertungen in den GPS-Punkten angesiedelt. In Gebieten, in denen nur Nivellementdaten vorlagen, wurden die radialen Basisfunktionen im Bereich großer Geschwindigkeitsänderungen positioniert. Ihre Steilheit wurde so gewählt, dass die radialen Basisfunktionen als Tiefpassfilter wirkten und somit nur großräumige Bewegungen detektiert wurden. Um den Bezug zu den Referenzpunkten herzustellen, wurden in einer Ausgleichung die Transformationsparameter der GPS-Epochen bezogen auf die Referenzpunkte bestimmt.

In einer anschließenden kombinierten Ausgleichung von Nivellementdaten und den transformierten GPS-Epochen wurden das Geschwindigkeitsfeld und die Zusatzparameter der GPS-Punkte bestimmt.

Im Bereich des Dollarts, im Westen des Jadebusens sowie an der Elbmündung in der Nähe von Cuxhaven ergab sich übereinstimmend aus den Nivellement- und GPS-Daten eine Senkung des Gebietes mit einer vergleichbaren Geschwindigkeit.

Aus den linienhaften Informationen des Nivellements und den punktbezogenen Daten der GPS-Stationen wird ein flächenhaftes Geschwindigkeitsfeld abgeleitet. Das Ergebnis basiert somit auf einer Extrapolation, dies ist bei einer Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Es wird eine lineare Geschwindigkeit über den gesamten Bearbeitungszeitraum angenommen, für bestimmte Gebiete, z. B. im Bereich des Dollarts mit der Gasentnahme im Groninger Gasfeld, ist diese Annahme problematisch.

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

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben IKÜS wurde als Verbund-Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03KIS055 – 03KIS058 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den 9. D a n k s a g u n g

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben IKÜS wurde als Verbund-Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03KIS055 – 03KIS058 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Autoren.

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

- ADV: Die Wiederholung des deutschen Nordseeküstennivellements in den Jahren 1949 bis 1955 (1959) und der Vergleich mit der ersten Messung in den Jahren 1928 bis 1931 (1937). Forschungsbericht, 1960.
- ADV: Feldanweisung für die Präzisionsnivellements zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006 bis 2011. Forschungsbericht, 2007.
- ADV: Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok). (6.0). Forschungsbericht, 2008.
- ADV: Webseite der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. URL <http://www.adv-online.de>, 2008.
- BAKER, T. F.: Absolute sea level measurements, climate change and vertical crustal movements. In: *Global and Planetary Change* 8, 149–159, 1993.
- BRUSSEL, G.: Endbericht des hydrostatischen Nivellements im Emsbereich/Rijkswaterstaat. Abschlussbericht, 2000.
- BUHMANN, M. D.: *Radial Basis Functions*. Cambridge University Press, 2003.
- GEORGIADOU, Y. and KLEUSBERG, A.: On Carrier Phase Multipath Effects in Relative GPS Positioning. In: *Manuscripta Geodaetica* 13, 172–179, 1988.
- GUBLER, E.: Die Bestimmung rezenter Krustenbewegungen mit Hilfe von Präzisionsnivellements – Ein Überblick. In: *Vermessungswesen und Raumordnung* 46, Nr. 2, 97–106, 1984.
- GURTNER, W.: RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. URL <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/rinex/>, 2002.
- HOHDAHL, S. R.: Models and Strategies for Computing Vertical Crustal Movement in the United States. International Symposium on Crustal Movements, Grenoble, 1975.
- IKÜS: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS)/Technische Universität Dresden, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Technische Universität Braunschweig, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen. Abschlussbericht des BMBF Förderprojektes 03KIS55–58, 2009.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: *Tagungsband Workshop: Klimaänderung und Küstenschutz*. Hamburg, S. 115–128, 2004.
- JÄGER, R.; MÜLLER, T.; SALER, H. und SCHWÄBLE, R.: *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005.
- KEYSERS, C. J.: Erfassung von Schwereänderungen in zwei lokalen Netzen in der Niederrheinischen Bucht von 1998 bis 2000. Shaker Verlag, Aachen, 2001.
- KUNZ; KÖVES: *ATSE Automatische Tidescheitelwerterkennung / Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven*. 1991. – Programmbeschreibung LAWA UND BMV (Hrsg.): *Pegelvorschrift*. Berlin und Bonn, 1997.

- LEONHARD, T.: Zur Berechnung von Höhenänderungen in Norddeutschland – Modelldiskussion, Lösbarkeitsanalyse und numerische Ergebnisse. Hannover, Universität Hannover, Fachrichtung Vermessungswesen, Dissertation, 1987.
- LINDENTHAL, N.; SCHÖN, S.; NEUNER, H.; KUTTERER, H. and JAHN, C.-H.: On the Monitoring Of GNSS References Stations With Independent Geodetic Techniques. 2nd International Colloquium – Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Padua, Italy, 14. 10.–16. 10. 2009.
- LOCKMAN, D.; DEBES, N.; CZARSKI, C. und MENGE, J.: Oracle 9i – Datenbankentwicklung. Markt+Technik Verlag, München, 2002.
- LONEY, K.: Oracle Database 10g – Die umfassende Referenz. Carl Hanser Verlag München Wien, 2005.
- MARESCH, T.: Mathematik-Verknüpfung von 2D- und 3D-Punktwolken. Gießen, Justus-Liebig-Universität Gießen, Dissertation, 2006.
- NIEMEIER, W.: Ausgleichsrechnung: Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. De Gruyter, Berlin, 2002.
- REICHSAMT FÜR LANDESAUFNAHME: Die Nivellements von hoher Genauigkeit, Höhen über N.N. im neuen System der Trigonometrischen Abteilung des Reichsamts für Landesaufnahme. Selbstverlag, 1927.
- REICHSAMT FÜR LANDESAUFNAHME: Die Feineinwägungen zur Beobachtung säkularer Bodenbewegungen im Gebiet der deutschen Nordseeküste, Nordseeküstennivellement 1928 bis 1931. Selbstverlag, 1932.
- ROST, C. and WANNINGER, L.: Carrier phase multipath mitigation based on GNSS signal quality measurements. In: Journal of Applied Geodesy 3(2009), Juni, Nr. 2, 81–87 – DOI 10.1515/JAG.2009.009.
- SEEBER, G.: Satellitengeodäsie. De Gruyter, Berlin, 1989.
- SINEX WORKING GROUP: SINEX – Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format (Version 1.00). 1996.
- TEFERLE, F.; BINGLEY, R.; WILLIAMS, S.; BAKER, T. and DODSON, A.: Using continuous GPS and absolute gravity to separate vertical land movements and changes in sea-level at tide-gauges in the UK. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 364 (2006), Nr. 1841, 917–930. – ISSN 1364-503X (Paper).
- UNILOG INTEGRATA TRAINING AG: Oracle Datenbankmodellierung und Datenbankdesign. Seminarunterlagen. 2006.
- VESTØL, O.: Determination of Postglacial Land Uplift in Fennoscandia from Leveling, Tide-gauges and Continuous GPS Stations using Least Squares Collocation. In: Journal of Geodesy 80, Nr. 5, 248–258, 2006.
- WANNINGER, L.: Detailanalyse der Mehrwegeverhältnisse auf dem Dach einer GPS-Referenzstation. In: 5. GPS-Antennenworkshop. Frankfurt/Main, 2003.
- WANNINGER, L.: Correction of apparent position shifts caused by GNSS antenna changes. In: GPS Solution, 2009. – DOI 10.1007/s10291-008-0106-z, 2009.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. und BOETTCHER, G.: Zum Einfluss des Antennennahfeldes. In: 5. GPS-Antennenworkshop. Frankfurt/Main, 2003.