

Robert Weiß und Astrid Sudau

Geodätische Aspekte von Höhen und Höhenänderungen der Pegel und Pegelfestpunkte im Küstenbereich

Geodetic aspects of water-level gauge elevations/elevation changes and gauge set-points in coastal waters

Einrichtung und Betrieb von Pegeln dienen der Erfassung von Wasserstandsbeobachtungen und damit einer Vielzahl verschiedenster Anwendungen. Je nach Aufgabe werden unterschiedliche Anforderungen an die Pegel gestellt, wobei die Hauptaufgaben im Bereich der Gewährleistung von Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt und im Bereich des Küstenschutzes zu suchen sind. In zunehmendem Maße gewinnen die Wasserstandsbeobachtungen Bedeutung für die Klimaforschung (z.B. Meeresspiegelanstieg).

Für Analysen langfristiger Wasserstandsänderungen sind neben zuverlässigen Wasserstandsbeobachtungen auch geodätische Informationen von entscheidender Bedeutung. Dies bedingt eine Analyse der geometrischen Beziehung zwischen Pegelfest- und Pegelnullpunkt und Analysen vertikaler Landbewegungen bzw. scheinbarer Höhenänderungen aufgrund von Systemänderungen amtlicher Höhenreferenzsysteme. Unterschiedliche Versionen der Pegelvorschrift hatten in der Vergangenheit zu verschiedenen Vorgehensweisen beim Umgang mit Höhenänderungen geführt. Infolgedessen weisen die Wasserstandsbeobachtungen nicht das Maß an Homogenität auf, welches für die Ableitung von langfristigen Trends nötig ist. Darüber hinaus führen tektonisch und anthropogen bedingte Vertikalbewegungen der Erdoberfläche zu vertikalen Pegelbewegungen. Häufig überlagern sich Wasserstandsänderungen und Vertikalbewegungen (Größenordnung teilweise einige mm/Jahr), und nicht erkannte Vertikalbewegungen können als langfristige Wasserstandsänderungen interpretiert werden bzw. reale hydrologische Änderungen werden nicht erkannt.

Um eine Trennung vertikaler Landbewegungen und langfristiger Wasserstandsänderungen zu ermöglichen, hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) 2008 begonnen, die wichtigsten Pegelstationen mit permanent arbeitenden satellitengestützten Messsystemen (GNSS¹-Systemen) auszustatten. Durch diese Stationen wird ein kontinuierliches Höhenmonitoring möglich. Damit verbunden sind Referenzierungen der Pegelnullpunkte sowohl im Höhenreferenzsystem der Landesvermessung als auch in einem globalen Höhenreferenzsystem. Letztere sind Voraussetzung für grenzüberschreitende Auswertungen, die Einbindung anderer Satellitenbeobachtungen und ein Monitoring des Meeresspiegelanstiegs.

Schlagwörter: Deutsche Bucht, GNSS, GNSS@tidegauge, Höhenmonitoring, Meeresspiegelanstieg, Pegel, Pegelfestpunkte, Pegelnullpunkt, Pegelvorschrift, Vertikalbewegungen

Tide gauges are established and operated to measure the water level of the sea and its variations. These data serve a number of different applications and, depending on the task, the gauges have to meet various requirements. The primary goals, however, are the safety and ease of navigation and coastal defence. During the last few years, the importance of knowledge of water levels for scientific applications has increased in the context of research on climate change (e.g. sea-level rise).

Analyses of long-term water-level changes need also geodetic information in addition to reliable water-level observations. This requires the examination of the geometric relationship between the levels of the fixture of the gauge on the ground, the gauge zero-point, and actual vertical land movements as well as apparent changes in height due to system changes in the official height-reference systems. Moreover, different versions of the instructions for the establishment and operation of gauges resulted in different approaches to the handling of changes in gauge elevations. As a consequence, the water-level observations do not have the degree of homogeneity that is needed to derive long-term trends. In addition, tectonic vertical movements of the earth's surface and those of anthropogenic origin cause vertical movements of the gauges. Often water-level changes and vertical earth-crust movements superimpose each other (sometimes in the order of magnitude of a few mm per year). Unnoticed vertical earth-crust movements may then be erroneously interpreted as long-term water-level changes, while real hydrological changes remain undetected.

In order to distinguish vertical land movements and long-term water-level changes, the Federal Institute of Hydrology (BfG) began in 2008 to equip the most important German sea-level gauging stations with permanently working satellite-based measuring systems (GNSS). These stations make continuous sea-level monitoring possible. This action is associated with the referencing of the absolute level-of-zero points of the gauges, both in the height-reference system of national land surveying and in a global height-reference system. The latter is crucial for transboundary analyses, the integration of other satellite-borne sea-level observations, and the monitoring of the sea-level rise.

Keywords: Benchmark, gauge datum, gauge manual, German Bight, GNSS, GNSS@tidegauge, height monitoring, sea level rise, tide gauge, vertical movements

1 Veranlassung

Der Bedarf an Pegeln bzw. Wasserstandsinformationen für die Gewässerkunde wurde in Deutschland schon vor über 200 Jahren erkannt. Vor dem Hintergrund, dass für verschiedene wasserbauliche Maßnahmen regelmäßig erfasste Wasserstands-

beobachtungen nötig waren, wurde 1810 mit der preußischen Pegelinstruktion eine Vorschrift erlassen, welche genaue Vorgaben zur Erfassung von Wasserständen und der Errichtung von Pegeln machte. In anderen Ländern existierten ebenfalls Anweisungen über die Erfassung von Wasserstandsbeobachtungen, deren Inhalte z.T. deutlich von der preußischen Vorschrift abwi-

¹ GNSS: Global Navigation Satellite System

chen. Durch die preußische Landesanstalt für Gewässerkunde und Hauptnivelements wurde Anfang der dreißiger Jahre des letzten Jahrhunderts eine einheitliche Pegelvorschrift ausgearbeitet, die durch einen gemeinsamen Erlass des Reichsverkehrsministers und des Ministers für Ernährung und Landwirtschaft für das ganze damalige Reichsgebiet am 14. September 1935 in Kraft getreten ist (LANDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE UND HAUPTNIVELLEMENTS 1935). Im Verlauf der Zeit wurde die Pegelvorschrift mehrfach modifiziert. Dies betraf auch Regelungen der Anlage C „Anweisung für das Festlegen und Erhalten der Pegel in ihrer Höhenlage“, die zusätzlich noch unterschiedlich interpretiert wurden.

Eine Hauptaufgabe der Pegel besteht darin, die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs zu unterstützen. In Verbindung mit den Modifikationen der Pegelvorschrift hat dies insbesondere bei der Höhenlage der Pegelnulldunkte zu unterschiedlichen Vorgehensweisen geführt. Aufgrund der sehr guten und nahezu lückenlosen Dokumentation ist es möglich, die vermessungstechnische Historie aufzuarbeiten und die Pegel für Forschungsaufgaben (z.B. Untersuchungen zu langfristigen Meeresspiegelvariationen) zu nutzen.

Die folgenden Ausführungen behandeln nur die geodätischen Aspekte des Pegelwesens. Insbesondere bei Zeitreihenanalysen von Wasserstandsbeobachtungen ist zu beachten, dass diese durch eine Vielzahl von Einflüssen verändert werden, wobei die geodätischen Einflüsse nur einen Anteil darstellen. Neben anthropogenen Veränderungen der Flüsse (z.B. Vertiefung der Fahrrinne) können auch Bewegungen des Küstenvorfeldes (Änderung von Sandbänken, Priele usw.) die Tidecharakteristik bzw. die Wasserstandsbeobachtungen und daraus abgeleitete Trends beeinflussen. Diese Effekte sind nicht Gegenstand geodätischer Analysen und werden im Folgenden nicht behandelt.

2 Allgemeines zu Wasserstandsbeobachtungen und dem Aufbau von Pegelanlagen

Im ersten Abschnitt des Stammtextes der aktuell gültigen Pegelvorschrift (LAWA 1997) wird die Aufgabe der Pegel wie folgt definiert:

Pegelvorschrift Stammtext Abschnitt 1.1:

„Pegel im Sinne dieser Vorschrift sind Einrichtungen zum Messen von Wasserständen oberirdischer Gewässer. An einem Pegel sind in der Regel auch Einrichtungen zur Ermittlung weiterer hydrologischer Größen vorhanden. Der maßgebende Teil des Pegels ist der Lattenpegel, der aus Pegellatte (fest installierte Meßlatte) und mindestens drei Pegelfestpunkten besteht. Bauliche Einrichtungen und Geräte für die Aufnahme, Registrierung, Anzeige und Fernübertragung des Wasserstandes sowie Einrichtungen zum Messen weiterer hydrologischer Größen sind Ergänzende Einrichtungen zum Pegel.“

Die meisten für wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Planungen und Maßnahmen sowie für gewässerkundliche Untersuchungen und Forschungen erforderlichen Grundwerte wie Geschwindigkeiten des Wassers, Abflüsse, Geschiebeführung usw. basieren auf an Pegeln beobachteten Wasserständen. Die Wasserstandsbeobachtungen sollen mithin die ursprünglichsten und damit wichtigsten Grundwerte für alle Angaben auf dem Gebiete des Wasserwesens liefern (LANGE 1960). Sie stellen damit eine wichtige Grundlage für die Entscheidungsfindung dar.

Pegelvorschrift Stammtext Abschnitt 1.4:

„Die Kenntnis der Wasserstände in den Gewässern ist Voraussetzung für nahezu jede hydrologische Arbeit und deren Umsetzung in die wasserwirtschaftliche Praxis. Die Wasserstände sind die Grundlage für die Durchflußermittlung. Nur die nach Pegelvorschrift betriebenen Pegel liefern vergleichbare Werte. Wasserstände und Durchflüsse dienen der Dokumentation des Istzustandes der Gewässer als Grundlage für fachübergreifende Betrachtungen von Ökosystemen.“

Aktuelle Wasserstände und Durchflüsse

- dienen der allgemeinen Information der Öffentlichkeit sowie der Schifffahrt zur Beschreibung der aktuellen Situation in den Gewässern,
- sind Grundlage für wasserwirtschaftliche Melde- und Warndienste (z.B. Hochwassernachrichtendienst),
- werden als Leitwerte bei wasserbaulichen Maßnahmen (z.B. Baggerungen in Schifffahrtsrinnen) benötigt,
- dienen der Steuerung wasserwirtschaftlicher Systeme im Rahmen von
 - Bewirtschaftungen
 - Verkehrswasserwirtschaft



Abbildung 1
Pegelvorschriften (von links nach rechts) 1935, 1951, 1978, 1997
Gauge manuals (from the left to the right) 1935, 1951, 1978, 1997

- Hochwasserschutz
- Entwässerung, Abwasserentsorgung
- werden zur Beweissicherung benötigt,
- sind Grundlage aktueller Betrachtungen der Gewässerbeschaffenheit

Wasserstände und Durchflüsse aus mehrjährigen Beobachtungsreihen bilden die Ausgangsdaten

- der hydrologischen Statistik und sind damit wesentliche Grundlage wasserwirtschaftlichen und wasserbaulichen Handelns.
- für statistische Auswertungen. Sie geben Auskunft über
 - das natürliche Abflußregime in räumlicher und zeitlicher Verteilung
 - Veränderungen von Wasserständen und Abflüssen infolge anthropogener und klimatischer Einflüsse
 - morphologische Veränderungen
- für Wasserhaushaltsuntersuchungen und wasserwirtschaftliche Planungen, wie z.B. Rahmen- und Bewirtschaftungsplanungen, wasserwirtschaftliche Bilanzierungen
- für hydrologische und hydraulische Untersuchungen einschließlich physikalischer und mathematischer Modelle, z.B. Vorhersagen
- für die Bemessung von Anlagen
 - für wasserwirtschaftliche Zwecke, z.B. Hochwasserschutz, Grundwasseranreicherung, Küstenschutz
 - zur Erreichung und Erhaltung der Schiffbarkeit von Gewässern
 - im Rahmen sonstiger Baumaßnahmen an Binnen- und Küstengewässern
- für wasserrechtliche Entscheidungen, z.B. Erteilung von Erlaubnissen, Festsetzung von Überschwemmungsgebieten
- für Untersuchungen der Austauschvorgänge zwischen Grundwasser und oberirdischen Gewässern
- für Untersuchungen der Gewässerbeschaffenheit und -ökologie
- für Feststoffbilanzen
- für Gezeitenberechnungen.

Eine verantwortungsbewußte Erfüllung der hydrologischen Arbeit setzt voraus, daß die an einem Pegel zu erfassenden Daten entsprechen

den in dieser Pegelvorschrift enthaltenen Regelungen mit großer Sorgfalt und Genauigkeit gewonnen werden.“

Nach der Pegelvorschrift sind Pegel Einrichtungen zur Erfassung von Wasserständen an oberirdischen Gewässern. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den Wasserstandsbeobachtungen um Ergebnisse einer Sensorkette handelt. Wasserstandsbeobachtungen setzen sich aus den Beobachtungen des eigentlichen Messensors (Wasserstandssensor) in Relation zu dessen Nullpunkt, dem Höhenbezug des Nullpunktes gegenüber der unmittelbaren Umgebung und dem Höhenbezug in Relation zu einem amtlichen Höhenreferenzsystem, zusammen. Alle Elemente der Sensorkette sind systematischen und zufälligen Abweichungen unterworfen (Abb. 2). Im Folgenden werden nacheinander alle Einzelaspekte beschrieben. Ausgehend von dem Sensornullpunkt erfolgt eine Herleitung von Höhenangaben für Pegelfest- und Pegelnullpunkte (Abb. 5) in verschiedenen Referenzsystemen.

Innerhalb der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) kommen verschiedene Wasserstandssensoren (z.B. Pneumatikpegel, Schwimmpegel, Radarpegel usw.) zum Einsatz, deren systematische und zufällige Abweichungen an dieser Stelle nicht näher erörtert werden sollen.

Nach der heute gültigen Pegelvorschrift sind die maßgebenden Bestandteile eines Pegels die Pegellatte und mindestens drei Pegelfestpunkte (LAWA 1997). Durch die geforderte Mindestanzahl von Pegelfestpunkten soll sichergestellt werden, dass im Falle von Zerstörungen, Veränderungen oder ähnlichen Ereignissen die innere Geometrie des Pegels erhalten bleibt bzw. die geometrische Beziehung zwischen der Pegellatte und der näheren Umgebung des Pegels rekonstruierbar bleibt.

Pegelvorschrift – Stammtext – Abschnitt 1.1:

„Der maßgebende Teil des Pegels ist der Lattenpegel, der aus Pegellatte (fest installierte Meßlatte) und mindestens drei Pegelfestpunkten besteht.“

Weiterhin gibt die Anlage C der Pegelvorschrift im Abschnitt 1.1 bzw. 1.2 (LAWA 1997) vor:

„Der Pegelnullpunkt (PNP) ist der Nullpunkt der Pegellatte (Stammtext 2.2.1.1. Abs. 2)“

Pegelvorschrift – Anlage C – Abschnitt 1.2:

„Die Pegelfestpunkte (PFP) dienen der höhenmäßigen Kontrolle der Pegellatte und der Meßmarke für die Lotvorrichtung (Stammtext 2.2.1.2). Bezogen auf die Vertikalbewegungen repräsentieren sie die nähere Umgebung des Pegels. Festpunkte des amtlichen Höhensystems sind möglichst mit einzubeziehen ...“

Bereits 1810 wurden in der preußischen Pegelinstruktion kontinuierliche Wasserstandsbeobachtungen an Lattenpe-

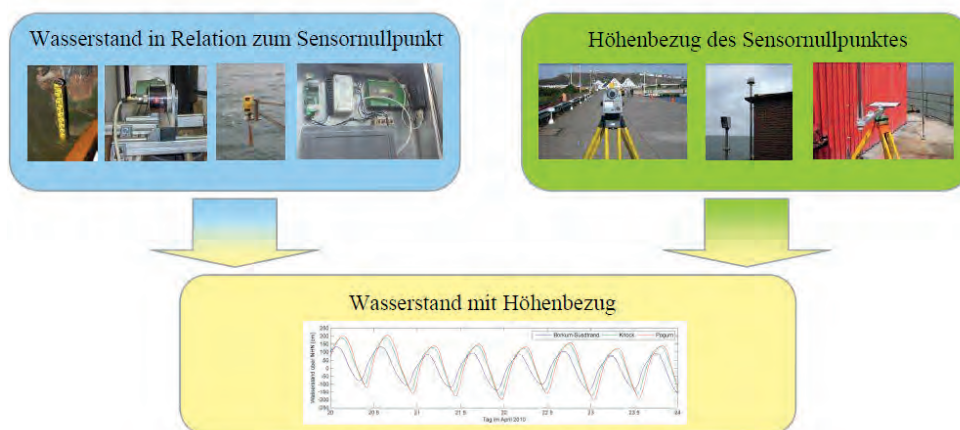


Abbildung 2

Sensorkette Pegel
Sensor chain of water-level gauging

geln und eine Absicherung der Lattenpegel gegenüber verschiedenen Pegelfestpunkten angeordnet.

Pegelinstruktion 1810:

„daß an mehreren Orten Pegel, Wassermarquers, Wassermarkepfähle errichtet und die Wasserstände ununterbrochen beobachtet werden. Täglich zu einer bestimmten Stunde ist der Wasserstand am Pegel abzulesen und nebst Datum in eine gedruckte Tabelle einzutragen. Außerdem ist die Richtung des Windes aufzuschreiben und zugleich anzugeben, ob Regen, Schnee, Eisgang oder Eisstand (zugefrorener Strom) an diesem Tage gewesen ist.

...

Wird ein Pegel durch irgend einen Umstand beschädigt oder vernichtet, so verlieren die vieljährigen Beobachtungen ihren Wert, wenn man nicht den verlorenen Nullpunkt desselben wieder auffinden kann. Es muß daher, sobald der Pegel gesetzt ist, durch ein Nivellement ausgemittelt werden, wie tief der Nullpunkt desselben unter irgend einem entfernten unverrückbar festem Punkt liege, etwa von einem bestimmten Punkt eines massiven Stadtttores, einer Kirche u. dgl. [dergleichen]“ (DEUTSCH 2010).

Alle weiteren Einrichtungen wie etwa kontinuierlich arbeitende Wasserstandssensoren werden als ergänzende Einrichtungen angesehen (Pegelvorschrift – Stammtext Abschnitt 1.1) und in regelmäßigen Abständen gegenüber den Lattenpegeln justiert. Dieser Vorgang wird als *Pegelkontrolle* bezeichnet. Damit wird sichergestellt, dass die an den ergänzenden Einrichtungen erfassten Wasserstandsbeobachtungen identisch mit den Beobachtungen der Lattenpegel und den maßgebenden Sensoren sind. Indirekt ist der Nullpunkt des Lattenpegels gleichzusetzen mit dem Nullpunkt des Pegels bzw. alle durch die ergänzenden Einrichtungen erfassten Wasserstandsbeobachtungen beziehen sich auf den Lattennullpunkt.

Bei den erfassten Wasserstandsbeobachtungen handelt es sich originär um Beobachtungen über dem Pegelnullpunkt. Der Pegelnullpunkt ist ein physisch nicht existierender virtueller Punkt, der über Höhendifferenzen zu den Pegelfestpunkten (*Sollhöhenunterschiede* Δh_{Soll}) definiert wird. Das erstmalige Festlegen der Sollhöhenunterschiede wird als *Festlegung des Pegels* bezeichnet (Pegelvorschrift Anlage C (Abschnitt 1)). Eine Änderung der Sollhöhenunterschiede (z.B. als Folge neuer Pegelfestpunkthöhen) wird hingegen als *Fortführung der Sollhöhenunterschiede* bezeichnet. Generell gilt, dass mithilfe der Sollhöhenunterschiede die Höhenlage des Pegelnullpunktes in Relation zu den Pegelfestpunkten und damit auch zur näheren Umgebung des Pegels hergestellt wird (Abb. 3). Der Pegelnullpunkt ist demnach nur über die Sollhöhen definiert bzw. die Höhe der Sollage ist nur in Relation zu den Pegelfestpunkten definiert. Eine Sollage gegenüber *Normalnull* (NN) bzw. *Normalhöhennull* (NHN) gibt es nicht, wohl aber eine Höhenangabe des Pegelnullpunktes bei Sollage gegenüber NN/NHN (LANGE 1952).

Indirekt ist es so möglich, Wasserstandsbeobachtungen über Pegelnull auf die Pegelfestpunkte und damit auf die nähere Umgebung des Pegels zu beziehen (Abb. 3). Für Untersuchungen von langfristigen Wasserstandsänderungen ist es zwingend nötig, die Höhenlage der Pegelnullpunkte zu berücksichtigen. Nur wenn Änderungen erfasst und korrigiert werden, lassen sich langfristige Änderungen der Wasserstandsbeobachtungen in Relation zu den Pegelfestpunkten und damit auch in Relation zu der unmittelbaren Umgebung des Pegels erfassen. Andernfalls

überlagern sich langfristige Änderungen des Wasserstands und der Höhenlage des Lattennullpunktes, was Fehlinterpretationen zur Folge haben kann.

Mögliche Ursachen der Änderungen sind natürliche Einflüsse (z.B. Eisgang), Beschädigungen (z.B. Schiffskollisionen) oder bewusste Verschiebungen der Latten und damit auch der Pegelnullpunkte. Für Zeitreihenanalysen ist es nötig, die Höhenlage der Pegel zu erhalten bzw. Verschiebungen so zu korrigieren, dass die Relationen zwischen Pegelnullpunkten und den repräsentativen Pegelfestpunkten konstant bleiben. Die Pegelvorschrift trägt diesem Gedanken Rechnung, indem sie eine regelmäßige Überprüfung der Höhendifferenz zwischen den einzelnen Pegelfestpunkten und den Pegelnullpunkten vorschreibt. Dieser Vorgang wird als *Prüfen der Höhenlage* bezeichnet und bei Küstenpegeln der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes alle ein bis zwei Jahre durchgeführt. Wird im Rahmen dieser Prüfungen eine Fehllage des Lattenpegels festgestellt, so ist diese bei Überschreitung eines Grenzwertes (im Binnenbereich ± 10 mm, im Küstenbereich ± 20 mm) zu korrigieren. Praktisch bedeutet dies nichts anderes,

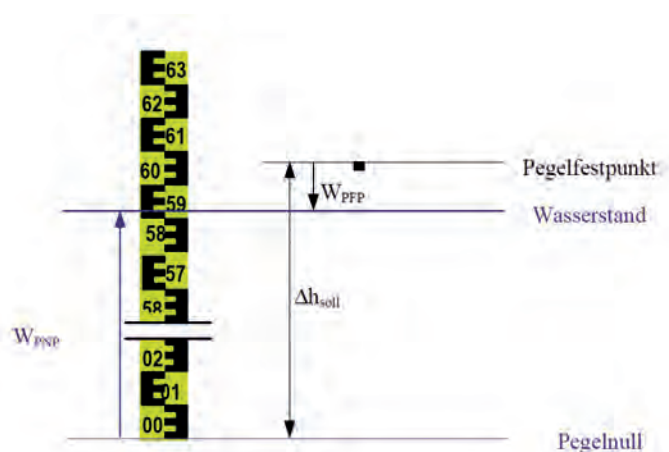


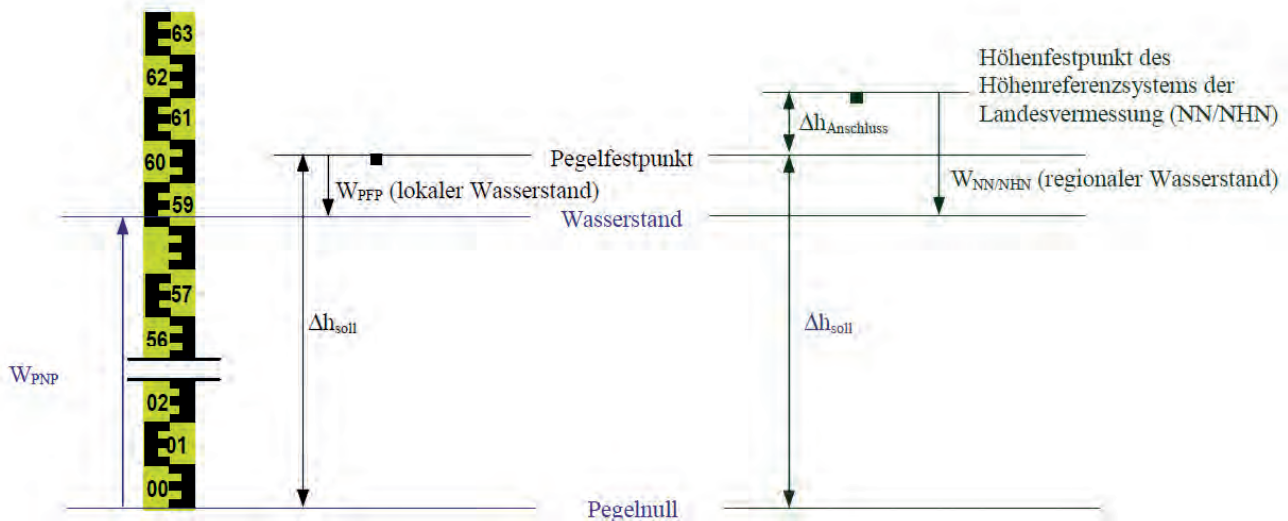
Abbildung 3

Sollhöhenunterschiede Δh_{Soll} , Wasserstand über Pegelnull W_{PNP} und Wasserstand in Relation zu dem Pegelfestpunkt W_{PFP}
Set-point difference Δh_{Soll} , water level above the gauge-zero point W_{PNP} and water level in relation to the gauge set-point W_{PFP}



Abbildung 4

Pegelfestpunkt am Pegel Papenburg
Gauge set-point at the gauge of Papenburg

**Abbildung 5**

Sollhöhenunterschiede Δh_{soll} , Anschluss an das amtliche Höhenreferenzsystem der Landesvermessung $\Delta h_{\text{Anschluss}}$, Wasserstand über Pegelnull W_{PNP} , in Relation zu dem Pegelfestpunkt W_{PFP} und über NN/NHN $W_{\text{NN/NHN}}$
 Set-point difference Δh_{soll} , reference to the regional or nation-wide ordnance datum (national survey administration) $\Delta h_{\text{Anschluss}}$, water level above the gauge-zero point W_{PNP} , in relation to the gauge set-point W_{PFP} and above the mean sea level marks NN/NHN ($W_{\text{NN/NHN}}$)

als dass die amtlich festgelegte Beziehung zwischen Pegelfest- und Pegelnullpunkt wieder hergestellt wird.

Die geometrische Beziehung zwischen Pegelfest- und Pegelnullpunkt beschreibt nur das lokale System (Pegelnull- und Pegelfestpunkte) des Pegels und hat ohne weitere Informationen keinen näheren Bezug zu übergeordneten Höhenreferenzsystemen. Um auch eine übergeordnete Vergleichbarkeit der Pegel herzustellen, müssen die Höhen der Pegelfestpunkte und damit indirekt auch die Höhen der Pegelnullpunkte durch Anschlussmessungen auf ein übergeordnetes Höhenreferenzsystem bezogen werden (Abb. 5, Pegelvorschrift Anlage C Abschnitt 3). Darüber hinaus ermöglichen diese Anschlussmessungen Aussagen über Vertikalbewegungen der Pegelfestpunkte.

Die Pegelvorschrift kommt dieser Forderung nach, indem regelmäßige Anschlussnivellements an das übergeordnete Höhenreferenzsystem der Landesvermessung vorgeschrieben werden. Mithilfe dieser Nivellements werden die Höhendifferenzen zwischen einzelnen Höhenpunkten der Landesvermessung und den Pegelfestpunkten erfasst und damit die Höhen der Pegelfestpunkte in Relation zu den Festpunkten der Landesvermessung bestimmt. Entsprechende Nivellements werden etwa alle 15 Jahre bzw. nach großen Nivellementskampagnen durchgeführt. Eine Kombination der Wasserstandsbeobachtungen über Pegelnull, der Sollhöhenunterschiede zu den Pegelfestpunkten und den Höhenangaben der Pegelfestpunkte in einem übergeordneten Höhenreferenzsystem

ermöglicht die Angabe von Wasserstandsbeobachtungen in eben diesem System. Erst die daraus resultierenden Wasserstandsbeobachtungen verschiedener Pegel sind örtlich vergleichbar.

Aufgrund der vorstehenden Ausführungen sollte zwischen unterschiedlichen Wasserstandsangaben unterschieden werden (Abb. 6). Im Einzelnen handelt es sich dabei um den Wasserstand über Pegelnull (Rohbeobachtungen), den lokalen Wasserstand (in Relation zur näheren Umgebung) und den regionalen Wasserstand (in Relation zum amtlichen Höhenreferenzsystem der Landesvermessungsverwaltungen). Im wissenschaftlichen Bereich werden darüber hinaus die Wasserstände in Relation zu globalen Referenzsystemen benötigt. Diese können durch eine Kombination mit satellitengestützten Messverfahren (GNSS) bzw. durch andere Messverfahren (Satellitenaltimetrie) direkt erfasst werden. Erst durch den Bezug auf ein globales Referenzsystem sind grenzüberschreitende Betrachtungen möglich (Abb. 6).

**Abbildung 6**

Wasserstände mit unterschiedlichen Bezügen
 Water levels in different relations

Die Aufgabe des 1891 gegründeten Büros für Hauptnivellements bestand darin, einen homogenen Höhenbezug für die Bundeswasserstraßen zu schaffen. Seit 1894 existierte ein solch homogener Raumbezug (NN – Altes System), jedoch unterschieden sich die numerischen Höhenangaben der Pegelnullpunkte weiterhin.

Mitte der dreißiger Jahre des letzten Jahrhunderts erfolgte mit dem Nordseeküstennivellement I eine einheitliche und großräumige Neumessung des Höhenreferenzsystems im Nordseebereich. Vor diesem Hintergrund haben die damals für das Pegelwesen zuständigen Minister, der Reichsverkehrsminister und der Reichsminister für Ernährung und Landwirtschaft, am 05.04.1935 mit einem Erlass angeordnet, dass die Pegelnullpunkte der Pegel im Tidegebiet auf eine einheitliche Höhe von NN –5,000 m zu legen sind. Die Sollhöhendifferenzen sind so zu wählen, dass die Pegelnullpunkthöhe NN –5,000 m beträgt. Praktisch bedeutete dies, dass alle Lattenpegel soweit verschoben wurden, bis deren Nullpunkte eine Höhenlage von NN –5,000 m in Relation zu den Ergebnissen des Nordseeküstennivellements I aufwiesen. Nach der Verschiebung war es möglich, die erfassten Rohwasserstände verschiedener Pegelstellen direkt untereinander zu vergleichen und zu analysieren (örtliche Vergleichbarkeit). Die Wasserstandsbeobachtungen vor und nach der Verschiebung der Lattenpegel sind hingegen nicht mehr direkt vergleichbar. Für Zeitreihenanalysen ist eine konstante geometrische Beziehung zwischen Pegelnullpunkt und den Pegelfestpunkten bzw. der unmittelbaren Umgebung des Pegels nötig (zeitliche Vergleichbarkeit). Ziel ist es, die Pegel in ihrer Höhenlage zu halten, damit die hydrologischen Eigenschaften (z.B. Beziehung Wasserstand und Abfluss) über die ganze Zeit der Einrichtung unverändert bleiben bzw. Veränderungen (z.B. durch Änderungen des Flussbettes bedingt) einer Ursache zugeordnet werden können. Nach einer Korrektur der Verschiebung ergeben sich Wasserstandszeitreihen, die diese Bedingung erfüllen (in Abb. 6 als lokaler Wasserstand bezeichnet).

3 Änderungen im Verlauf der Zeit

Bei der Bewertung der Änderungen sollte immer berücksichtigt werden, dass die Pegel eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen bzw. Wasserstandsbeobachtungen eine Grundlage für eine Vielzahl hydrologischer Anwendungen darstellen. Je nach Anwendung wird eine zeitliche (Zeitreihenanalysen) oder örtliche Vergleichbarkeit (Modellierung eines flächenhaften Wasserstandes) der Wasserstandsbeobachtungen gefordert.

Im Falle von Höhenänderungen der Pegelfestpunkte sind beide Forderungen zeitgleich nicht zu erfüllen. Da Höhenänderungen in der Vergangenheit aufgetreten sind und auch zukünftig immer wieder auftreten werden, müssen deren Auswirkungen näher beleuchtet werden. Ändert sich die Höhe der Pegelfestpunkte (z.B. tektonisch oder anthropogen bedingte Landhebungen oder Landsenkungen) bzw. die Höhe der unmittelbaren Umgebung des Pegels, kann entweder eine zeitliche Vergleichbarkeit oder eine örtliche Vergleichbarkeit der Wasserstandsbeobachtungen gewahrt bleiben.

Im Falle der zeitlichen Vergleichbarkeit wird die geometrische Beziehung zwischen Pegelfest- und Pegelnullpunkt konstant gehalten (konstante Sollhöhendifferenz Δh_{Soll}) und die Höhe des Pegelnullpunktes in Relation zum übergeordneten Höhenreferenzsystem geändert (Abb. 7). Werden in diesem Fall Trendanalysen der Wasserstandsbeobachtungen durchgeführt, beschreibt

der Trend die Änderungen in Relation zu den Pegelfestpunkten bzw. gegenüber der unmittelbaren Umgebung. Diese Änderungen sind beispielsweise für Anwendungen im Küstenschutz (z.B. Deichbemessung) von großem Interesse.

Sollen an verschiedenen Pegeln erfasste Wasserstandsbeobachtungen unmittelbar untereinander verglichen werden (örtliche Vergleichbarkeit), so ist dies nur möglich, wenn die Höhen der Pegelnullpunkte relativ zu einem übergeordneten Referenzsystem identisch sind. Soll eine örtliche Vergleichbarkeit erhalten bleiben, muss die Höhenlage des Pegelnullpunktes in Relation zum übergeordneten Referenzsystem beibehalten werden. Praktisch bedeutet dies eine Verschiebung der Pegellatte um den Änderungsbetrag und somit eine Änderung der geometrischen Beziehung zwischen Pegelfest- und Pegelnullpunkt (Abb. 8). In diesem Fall ergeben sich aus Trendanalysen Änderungen in Relation zu dem übergeordneten Höhenreferenzsystem, nicht aber in Relation zur unmittelbaren Umgebung des Pegels.

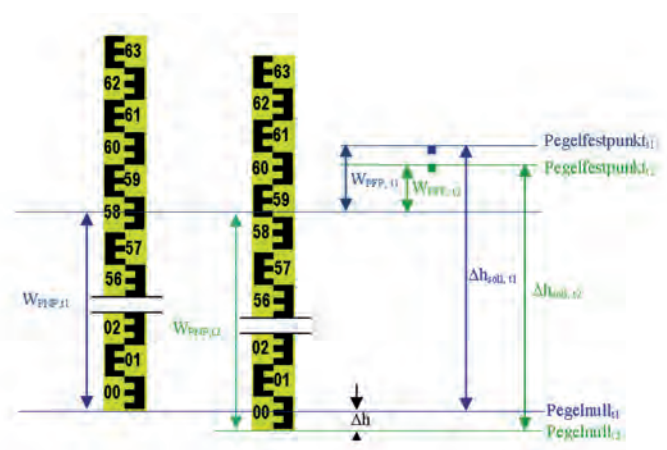


Abbildung 7
Konstante Sollhöhenunterschiede (Δh_{Soll}) und variierende Pegelnullpunkte ($W_{\text{PNP},11}$; $W_{\text{PNP},12}$)
Constant set-point difference (Δh_{Soll}) despite varying the gauge-zero points ($W_{\text{PNP},11}$; $W_{\text{PNP},12}$)

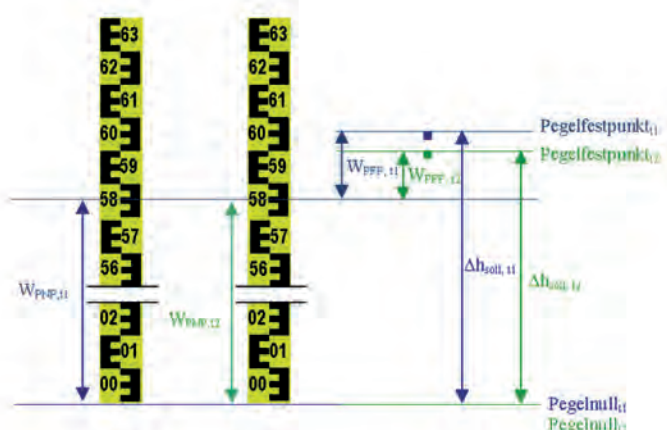


Abbildung 8
Variierende Sollhöhenunterschiede (Δh_{Soll}) bei gleichbleibenden Pegelnullpunkten ($W_{\text{PNP},11}$; $W_{\text{PNP},12}$)
Varying set-point difference (Δh_{Soll}) with constant gauge-zero points ($W_{\text{PNP},11}$; $W_{\text{PNP},12}$)

Bei dem Umgang mit Höhenänderungen von Pegelfestpunkten bzw. der Handhabung von Pegelnullpunkthöhen, Sollhöhendifferenzen und Pegelfestpunkthöhen lassen die einzelnen Versionen der Pegelvorschrift gewisse Spielräume zu.

In allen Pegelvorschriften wird die Vorgabe gemacht, dass bei einer erstmaligen Festlegung neuer Pegel im Küstenbereich der jeweilige Nullpunkt eine Höhenlage von NN –5,000 m aufzuweisen hat.

Hinsichtlich der Pegelfestpunkte und der Beurteilung der korrekten Höhenlage des Pegels sind die Pegelvorschriften von 1935 und 1952 sehr ähnlich. Sowohl im Stammtext als auch in der Anlage II werden diesbezügliche Angaben gemacht.

Pegelvorschrift 1935 (LANDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE UND HAUPTNIVELLEMENTS 1935):

„Die Höhenlage des Pegels ist gegen mindestens drei Festpunkte (Pegelfestpunkte) festzulegen. Für die Beurteilung der Höhenlage eines Pegels sind nur die Höhenunterschiede gegen diese Festpunkte (Sollhöhenunterschiede), aber nicht Beziehungen zu NN zu benutzen.“

Pegelvorschrift 1952 (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 1952):

„Die Höhenlage jedes Pegels ist gegen mindestens drei Festpunkte (Pegelfestpunkte) festzulegen, in besonderen Fällen kann davon abgewichen werden. Für die Beurteilung der Höhenlage eines Pegels sind nur die Höhenunterschiede gegen die Festpunkte, aber nicht Beziehungen zu Normal-Null (NN) zu benutzen.“

Explizit wird dabei ausgesagt, dass die Beziehung zu Normalnull (NN) für die Höhenlage keine Relevanz hat bzw. die Höhenlage gegenüber Pegelfestpunkten (mind. drei) abzusichern ist. Diese Vorgabe wird in den Pegelvorschriften von 1978 bzw. 1997 nicht mehr getroffen, wohl aber die Aussage, dass die Sollhöhenunterschiede durch ein Nivellement mit Millimetergenauigkeit zu ermitteln und diese für die Höhenlage des Pegels maßgebend sind.

Pegelvorschrift 1978 (LAWA 1978):

„Die Höhenunterschiede zwischen dem PNP und den Pegelfestpunkten werden durch ein Nivellement mit Millimetergenauigkeit ermittelt. Das geprüfte Ergebnis des Nivellements ist die Festlegung. Die danach festgelegten Höhenunterschiede werden als Sollhöhenunterschiede bezeichnet und sind für die Höhenlage des Pegels maßgebend.“

Pegelvorschrift 1997 (LAWA 1997):

„Die bei der Festlegung ermittelten Höhenunterschiede der Pegelfestpunkte gegenüber dem Pegelnullpunkt werden als Sollhöhenunterschiede (SH) bezeichnet. Diese sind für die Höhenlage des Pegels maßgebend und definieren in dem relativen System die Soll-Lage des Pegelnullpunktes.“

Grundlage für die Festlegung der Sollhöhenunterschiede sind Höhen der Pegelfestpunkte und damit Anschlussmessungen an das amtliche Höhenreferenzsystem der Landesvermessung (Landeshorizont). Alle Pegelvorschriften sehen daher entsprechende Anschlussmessungen vor. Die einzelnen Versionen unterscheiden sich in den Vorgaben, wie mit Höhenänderungen der Pegelfestpunkte umzugehen ist.

Pegelvorschrift 1935:

„Wird durch ein späteres Feinnivellement eine andere Höhe zu NN für den Pegelnullpunkt ermittelt, ohne daß der Pegel sich in seiner

Höhenlage zur Umgebung verändert hat (neues Höhensystem, Bewegung der Umgebung des Pegels in größerer Ausdehnung – regionale Bewegung – usw.), so ist die Höhenangabe zu NN für den Nullpunkt des Pegels entsprechend zu ändern.“

Pegelvorschrift 1952:

„Wird durch ein späteres Nivellement eine andere Höhe zu NN für den Pegelnullpunkt ermittelt, ohne daß der Pegel sich in seiner Höhenlage zur Umgebung verändert hat (neues Höhensystem, Bewegung der Umgebung des Pegels in größerer Ausdehnung – regionale Bewegung – usw.), so ist die Höhenangabe zu NN für den Nullpunkt des Pegels entsprechend zu ändern.

Hinter jeder Höhenangabe zu NN für den Pegelnullpunkt ist das Höhensystem anzugeben, zum Beispiel „n. S.“ (neues System) oder „a. S.“ (altes System).

Wird in einem Gebiet das vorhandene alte Höhensystem durch das neue Höhensystem (n. S.) ersetzt, der Pegel aber nicht gleichzeitig durch eine besondere Messung an das neue Höhensystem angeschlossen, so ist zunächst die Höhe des Pegels zu NN im neuen System durch Rechnung zu ermitteln. Über die Größe des Umrechnungsbetrages gibt die Bundesanstalt für Gewässerkunde Auskunft.“

Damit wird in beiden Vorschriften explizit ausgesagt, dass im Falle einer Höhenänderung der Pegelfestpunkthöhen die Sollhöhenunterschiede konstant zu bleiben haben und die Höhenangabe des Pegelnullpunktes zu ändern ist. Hier unterscheidet sich die Vorschrift von 1978. In dieser heißt es:

Pegelvorschrift 1978:

„Ändern sich die Höhenangaben der NivP, von denen beim Anschluß des Pegels ausgegangen wurde, durch ihren Bezug auf ein neues Höhensystem der Vermessung, so ist die Höhenangabe zu NN für den Nullpunkt des Pegels entsprechend zu ändern. Die Sollhöhenunterschiede bleiben dagegen unverändert.

Werden Änderungen der NivP-Höhenangaben bekannt, die nicht auf die Einführung eines neuen Höhensystems der Vermessung zurückgehen, so ist im Einzelfall zu entscheiden, welche Maßnahmen durchzuführen sind.“

Demnach führen Höhenänderungen nur dann zu neuen Nullpunktshöhen, wenn die Änderungen auf die Einführung eines neuen Höhensystems zurückzuführen sind. In allen anderen Fällen ist im Einzelfall zu entscheiden. Bei einer strengen Auslegung bedeutet der Wechsel eines Höhenreferenzsystems den Wechsel der Höhenart und/oder Datum. Ein Beispiel hierfür ist der Wechsel von normalorthometrischen Höhen (NN-Höhen, z.B. DHHN85) auf Normalhöhen (NHN, z.B. DHHN1992). Ein weiteres bekanntes Beispiel ist der Übergang vom HN76 (Staatliches Nivellementsnetz 76 der DDR) auf NN für Küstenpegel auf dem Gebiet der ehemaligen DDR. Die Differenz zwischen HN76 und NN beträgt im Küstenbereich 0,14 m (GEOBASISDATEN LANDESVERMESSUNG 2008). Die Höhenangabe der Pegelnullpunkte wurden von HN76 –5,000 m auf NN –5,140 m geändert.

Eine Neumessung des Höhennetzes (z.B. die Neumessung des Nordseeküstennivellements in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts) entspricht einer neuen Realisierung des Höhenreferenzsystems, hat aber keine neue Höhenart bzw. kein neues Höhenreferenzsystem zur Folge. Gemäß der Pegelvorschrift von 1978 ist in diesem Fall eine Einzelfallentscheidung herbeizuführen. Die Pegelvorschrift von 1997 macht diesbezüglich etwas strengere Vorgaben. In dieser heißt es:

„Bei vorgeschriebener Lage des Pegelnullpunktes im Höhensystem, z.B. NN –5,00m im Küstengebiet, ist der Anschluß der Pegelfestpunkte vor der Festlegung der Sollhöhenunterschiede vorzunehmen. Der Anschluß ist in zeitlicher Abhängigkeit von geologischen und sonstigen örtlichen Gegebenheiten zu wiederholen. Ein Wiederholungszyklus von 15 Jahren soll nicht überschritten werden. Ändern sich die Höhenangaben der beim Anschluß verwendeten Nivellementsunkte durch die Einführung eines neuen Höhensystems oder einer neuen Einwägung durch die Landesvermessung, so sind die Höhenangaben des Pegelnullpunktes und der PFP zu ändern. Die Sollhöhenunterschiede bleiben dagegen unverändert. Werden Änderungen der Höhenlage eines oder mehrerer Pegelfestpunkte gegenüber ihrer näheren Umgebung festgestellt, so sind die Sollhöhenunterschiede gemäß Abschn. 2. Abs. 12 bis 14 fortzuschreiben.“

Im Gegensatz zu der Vorschrift von 1978 wird 1997 explizit ausgesagt, dass sowohl bei der Einführung eines neuen Höhenreferenzsystems als auch bei der Neubestimmung von Höhen im gleichbleibenden Höhenreferenzsystem die Höhenangaben der Pegelnullpunkte zu ändern sind und die Sollhöhenunterschiede konstant bleiben sollen. Sollhöhenunterschiede werden lediglich dann geändert, wenn die Pegelfestpunkte Höhenänderungen gegenüber der näheren Umgebung aufweisen. Mit diesem Satz wird noch einmal unterstrichen, dass die nähere Umgebung für die Höhenlage des Pegels entscheidend ist.

Neben Vorgaben zu den Festlegungen und Fortschreibungen von Sollhöhendifferenzen machen alle Pegelvorschriften auch Vorgaben zur Prüfung der Höhenlage.

Die Pegelvorschrift von 1935 macht dabei die folgende Vorgabe: „Ein einmal festgesetzter Sollhöhenunterschied darf nur geändert werden, wenn aus besonderen Gründen die Sollage des Pegelnullpunktes geändert wird oder wenn festgestellt worden ist, daß der Festpunkt sich zu seiner Umgebung verschoben hat. Die Entscheidung über die Änderung von Sollhöhenunterschieden trifft der Minister“ ... „Hat die nivellistische Prüfung eines Pegels einwandfrei ergeben, daß er von seiner Sollage um ± 10 mm oder mehr abweicht, so ist der Pegel so schnell wie möglich um das Maß seiner Fehllage zu heben oder zu senken. Eine Genehmigung oder Anweisung der vorgesetzten Behörde ist nicht erst abzuwarten. Pegel im Tidegebiet brauchen in der Regel erst berichtet zu werden, wenn ihre Fehllage ± 20 mm erreicht hat.“

In der Pegelvorschrift von 1952 lautet der vergleichbare Text: „Ein einmal festgesetzter Sollhöhenunterschied darf nur geändert werden, wenn aus besonderen Gründen die Sollage des Pegelnullpunktes geändert wird oder wenn festgestellt worden ist, daß der Festpunkt sich zu seiner Umgebung verschoben hat.“

In beiden Fällen wird noch einmal unterstrichen, dass die Relation des Pegelnullpunktes zur unmittelbaren Umgebung für dessen Höhenlage entscheidend ist. Nur wenn sich ein Pegelfestpunkt anders als die nähere Umgebung verhält, darf ein Sollhöhenunterschied geändert werden. Eine Korrektur der Pegellatte und damit des realen Pegelnullpunktes muss und darf nur bei einer Fehllage gegenüber der näheren Umgebung ausgeführt werden.

Im Gegensatz zu den Vorgängervorschriften macht die Vorschrift aus 1978 weitere Vorgaben. Darin heißt es:

„Sollhöhenunterschiede dürfen nur geändert werden, wenn ein anderer Pegelnullpunkt gewählt werden muß oder wenn der zugehörige Festpunkt sich gegenüber seiner Umgebung höhenmäßig geändert hat.“ ...

„Weicht im Küstengebiet die Höhe des PNP mehr als 2 cm von NN –5,00 m ab, so ist zu prüfen, ob eine Änderung der Sollhöhenunterschiede und damit des PNP erforderlich ist.“

In Verbindung mit der Vorgabe, dass bei Änderungen von NivP-Höhenangaben, die nicht auf die Einführung eines neuen Höhenreferenzsystems der Landesvermessung zurückgehen, im Einzelfall zu entscheiden ist, welche Maßnahmen getroffen werden sollen, kann die Pegelvorschrift so interpretiert werden, dass der Pegelnullpunkt auf einem fixen Wert von NN –5,000 m zu halten ist. In der Pegelvorschrift wird eine Prüfung der weiteren Vorgehensweise gefordert, aber keine Vorgaben zu den Ergebnissen der Prüfung gemacht.

In der Pegelvorschrift von 1997 fehlt diese Formulierung. Die entsprechende Formulierung lautet:

„Sollhöhenunterschiede sollen nur geändert werden, wenn eine andere Höhenlage des Pegelnullpunktes gewählt werden muß oder wenn sich die Höhe des zugehörigen Festpunktes gegenüber seiner Umgebung geändert hat und der Änderungsbetrag 3 mm erreicht oder übersteigt.“

Je nach Aufgabenschwerpunkt und gültiger Pegelvorschrift wurden sowohl die Sollhöhenunterschiede und die Höhenangaben der Pegelnullpunkte an ein und demselben Pegel geändert. Resultat waren z.T. inhomogene Wasserstandsbeobachtungen, die vor weiteren Analysen aus geodätischer Sicht aufbereitet werden müssen.

4 Aufbereitung geodätischer Pegelinformationen

Die Pegelvorschrift gibt in allen Ausführungen vor, dass Änderungen, Kontrollen, Feststellungen, Fortführungen usw. dokumentiert werden müssen. In den Pegelakten bzw. in komprimierter Form auch in den Pegelstammbüchern sind die Ergebnisse vermessungstechnischer Arbeiten festgehalten. Dies beinhaltet Anschlussmessungen (Fortschreiben der amtlichen Höhe), Festlegungen bzw. die Fortschreibung der Sollhöhenunterschiede und die Prüfung der Höhenlage.



Abbildung 9
Pegelstammbücher verschiedener Epochen (links bis ca. 1980, rechts ab ca. 1980)
Gauge log-books (left: until 1980, right since 1980)

sind. Dies bedeutet, dass die geometrische Beziehung zwischen den Pegelnullpunkten und der näheren Umgebung der Pegel (repräsentiert durch die Pegelfestpunkte) über den Auswertzeitraum konstant ist bzw. die im Rahmen von Fortschreibungen der Sollhöhenunterschiede durchgeführten Verschiebungen der Latenpegel korrigiert werden müssen. Andernfalls werden resultierende scheinbare Änderungen der Wasserstandsbeobachtungen falsch interpretiert und hydrologisch bedingte Änderungen ggf. nicht erkannt. Im Folgenden werden am Beispiel von drei ausgewählten Pegeln die Auswirkungen exemplarisch dargestellt.

Pegel Norderney Hafen und Norderney Riffgat

Auf der Insel Norderney existieren Wasserstandsbeobachtungen von zwei unterschiedlichen Pegeln (Norderney Hafen und Norderney Riffgat). Im Verlauf der Zeit wurden verschiedene Pegelfestpunkte genutzt, deren Lage in Abbildung 14 dargestellt ist.

Vom Pegel Norderney Hafen liegen vermessungstechnische Unterlagen ab dem Jahr 1935 vor. Zu diesem Zeitpunkt erfolgte eine Festlegung der Sollhöhenunterschiede relativ zu den Ergebnissen des Nordseeküstennivellement I. Diese wurden in den folgenden Jahren kaum geändert bzw. die geometrische Beziehung zwischen dem Pegelfestpunkt 1 und dem Pegelnullpunkt wurde konstant gehalten. In Tabelle 1 sind die amtlichen Festlegungen dargestellt. Ende der fünfziger Jahre des letzten Jahrhunderts erfolgte die Einrichtung eines zweiten Pegels an einem aus hydrologischer Sicht anderen Standort.



Abbildung 14

Lage der Pegelfestpunkte und der Pegel auf Norderney
Location of the gauge set-points and gauges on the island of Norderney

Anhand der Tabelle 1 wird ersichtlich, dass die zu Pegelfestpunkt 1 gehörende Sollhöhendifferenz im Verlauf der Zeit nicht verändert wurde. Die Sollhöhendifferenzen des nachfolgenden Pegels Norderney Riffgat wurden zum Zeitpunkt der Einrichtung so festgelegt, dass der Pegelnullpunkt wieder auf einem Niveau von NN –5,000 m lag. Beiden Pegeln ist gemein, dass der Pegelfestpunkt 1 zum jeweiligen Pegel gehört und jeweils Sollhöhenunterschiede festgelegt wurden. Da zum Zeitpunkt der Einrichtung des Pegels Norderney Riffgat andere Höhen aktuell waren (1935: 5,014 m, 1957: 4,999 m) und der Pegelnullpunkt bei der erstmaligen Einrichtung auf einem Niveau von NN –5,000 m zu liegen hatte, wurde der Sollhöhenunterschied zwischen dem Pegelnullpunkt Norderney Riffgat und dem Pegelfestpunkt 1 bei der Einrichtung auf –9,999 m festgesetzt (Tab. 2). Der Pegelnullpunkt des Pegels Norderney Riffgat liegt demnach 15 mm höher als

der Pegelnullpunkt des Pegels Norderney Hafen, wodurch ein Versatz von 15 mm in beiden Wasserstandszeitreihen rein geometrisch zu erklären ist.

Tabelle 1

Amtliche Festlegungen und Pegelnullpunkthöhen des Pegels Norderney Hafen
Official set-point differences and elevations of the gauge-zero points of the gauge Norderney

Datum	Pegelfestpunkt	Höhe Pegelfestpunkt [m] Sp. I	Sollhöhen-differenz [m] Sp. II	Höhe Pegelnullpunkt [m] Sp. I + Sp. II
1935	1	5,014	–10,014	–5,000
1935	2	3,867	–8,867	–5,000
1935	3	3,164	–8,164	–5,000
1935	4	3,027	–8,027	–5,000
1935	5	2,972	–7,972	–5,000
1935	6	2,626	–7,626	–5,000
1957	1	4,999	–10,014	–5,015
1957	3	3,136	–8,151	–5,015
1957	4	2,989	–8,004	–5,015
1957	5	2,946	–7,961	–5,015
1957	6	2,603	–7,618	–5,015
1967	1	4,999	–10,014	–5,015
1967	3	3,126	–8,141	–5,015
1967	4	2,973	–7,988	–5,015
1973	1	4,999	–10,014	–5,015
1973	61	4,39	–9,405	–5,015
1973	62	4,703	–9,718	–5,015
1973	63	3,685	–8,700	–5,015
1973	64	3,527	–8,542	–5,015

= konstanter Sollhöhenunterschied

= konstante Pegelnullpunkthöhe

Aus dem Pegelstammbuch des Pegels Norderney Riffgat geht hervor, dass das Kranfundament am Rande des Riffgat vor Norderney als Träger der Pegelanlage Norderney Riffgat bei der Sturmflut im Herbst 1973 sehr stark beschädigt wurde und eine Wiederherstellung aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu vertreten und die Inbetriebhaltung des auf dem Kranfundament installierten Schwimmerpegels gefährdet war. Aus Gründen der Weiterführung langjähriger gewässerkundlicher Messreihen erfolgte eine Verlegung des Standortes um etwa 200 m Richtung Osten neben das ehemalige Kranfundament (Pegelstammbuch Norderney Riffgat). Weiterhin wurden in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts neue Höhen der Anschlusspunkte der Landesvermessung und damit verbunden neue Höhen der Pegelfestpunkte eingeführt. Diese wichen z.T. erheblich von den vorher gültigen Höhen der Pegelfestpunkte ab. Im Rahmen des Aufbaus des neuen Pegels erfolgte eine Fortschreibung der Sollhöhenunterschiede in der Art, dass sich eine Höhe des Pegelnullpunktes von NN –5,000 m ergab. Zwischen altem und neuem Standort liegt daher ein Versatz von 31 mm vor. 1994 erfolgte eine erneute Anschlussmessung der Pegelfestpunkte, in deren Folge die Höhen der Pegelfestpunkte geändert wurden. Im Gegensatz zur vorhergehenden Anschlussmessung erfolgte keine Änderung der geometrischen Beziehung zwischen dem Pegelfestpunkt 1 und dem Pegelnullpunkt bzw. der Sollhöhenunterschied zum Pegelfestpunkt 1 wurde nicht geändert. Die

Höhenänderungen führten zu einer Änderung der numerischen Pegelnullpunkthöhe.

Tabelle 2
Amtliche Festlegungen und Pegelnullpunkthöhen des Pegels Norderney Riffgat
Official set-point differences and elevations of the gauge-zero points of the gauge Norderney Riffgat

Datum	Pegelfestpunkt	Höhe Pegelfestpunkt [m] Sp. I	Sollhöhen-differenz [m] Sp. II	Höhe Pegelnullpunkt [m] Sp. I + Sp. II
16.12.1957	1	4,999	-9,999	-5,000
	55	3,630	-8,630	-5,000
	56	3,624	-8,624	-5,000
28.06.1973	1	4,999	-9,999	-5,000
	8	4,002	-9,002	-5,000
	11	1,471	-6,471	-5,000
	55	3,600	-8,600	-5,000
	56	3,594	-8,594	-5,000
	57	3,486	-8,486	-5,000
29.08.1978	1	4,999	-9,999	-5,000
	8	3,995	-8,995	-5,000
	55	3,594	-8,594	-5,000
	56	3,589	-8,589	-5,000
	62	4,693	-9,693	-5,000
	63	3,679	-8,679	-5,000
	64	3,521	-8,521	-5,000
	65	5,532	-10,532	-5,000
25.04.1984	1	4,968	-9,968	-5,000
	64	3,491	-8,491	-5,000
	63	3,644	-8,644	-5,000
	65	5,493	-10,493	-5,000
	55	3,561	-8,561	-5,000
	56	3,55	-8,550	-5,000
30.11.1994	1	4,981	-9,968	-4,987
	63	3,648	-8,635	-4,987
	64	3,499	-8,486	-4,987
	65	5,494	-10,481	-4,987
07.09.2000	1	4,981	-9,968	-4,987
	63	3,642	-8,629	-4,987
	64	3,494	-8,481	-4,987

 = konstanter Sollhöhenunterschied
 = konstante Pegelnullpunkthöhe

Die Anschlussmessungen aus den Jahren 1935 und 1957 basieren auf großräumigen Nivellements-kampagnen (Nordseeküstennivellement I und II bzw. Höhenstatuts² 110 und 120). Grundlage der Anschlussmessung von 1984 bildeten Höhen im Höhenstatus 130, welcher auf eine Neumessung von Nordwest- und Mittelniedersachsen zurückgeht. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Anschlussmessungen erfolgte die Anschlussmessung 1994 nicht im Rahmen einer großräumigen Messkampagne. Vielmehr lagen für einen Anschlusspunkt (2209/663) der Landesvermessung Höhen im Höhenstatus 140 vor. Dieser geht auf eine komplette Neumessung 1980–1985 in den alten Ländern der Bundesrepublik Deutschland zurück. Im Jahr 2000 erfolgte eine Festlegung im Höhenstatus 160 (DHHN92), wobei es sich dabei nur um eine Neuausgleichung des DHHN85 handelt und die systembedingten Höhenänderungen der Pegelfestpunkte zu vernachlässigen sind.

Die unterschiedlichen Höhenstatusangaben der Anschlusspunkte sind bei der Interpretation der Anschlussmessungen sehr wichtig. Ursachen der Höhenänderung von Anschlusspunkten können sowohl reale Höhenänderungen als auch scheinbare Höhenänderungen aufgrund von Systemwechseln sein.

Aufgrund variierender Höhen der Pegelfestpunkte wurden die Sollhöhenunterschiede und auch die Sollage der Lattenpegel mehrfach geändert. Eine Verschiebung der Pegellatte um einige Zentimeter bewirkt eine nicht zu vernachlässigende Verfälschung abgeleiteter Trends. Für eine Zeitreihenanalyse müssen daher die Sollhöhendifferenzen zu mindestens einem Pegelfestpunkt konstant sein. Im Fall des Pegels Norderney Riffgat würde dies bedeuten, dass beispielsweise die Sollhöhendifferenz zum Pegelfestpunkt 1 konstant bleiben sollte. Abweichungen gegenüber den amtlichen Festlegungen und damit des „Ist-Zustandes“ sollten in Form von Korrekturen (Offsets) für die Wasserstandsbeobachtungen kompensiert werden.

Werden die in Tabelle 4 angebrachten Offsets an die Wasserstände angebracht, ergibt sich eine homogene Wasserstandszeitreihe, welche den Wasserstand in Relation zum Pegelfestpunkt 1 beschreibt. Mithilfe einer einfachen Überschlagsrechnung lassen sich folgende, rein geometrisch bedingte Abweichungen ermitteln.

Beobachtungen 1957–2000
 (Norderney Riffgat): = 43 Jahre
 Offset aufgrund der Lattenverschiebungen
 (Sollhöhenunterschied zu Pegelfestpunkt 1
 wird als konstant angesehen) = 31 mm
 → geometrisch bedingter „Trend“ = + 0,7 mm/Jahr

Tabelle 3
Höhenstatus zum Zeitpunkt der Anschlussmessungen (am Pegel Norderney)
Overview of the elevation statuses at the time of the reference measurements (at gauge Norderney)

Datum	Pegelfestpunkt	Höhe Pegelfestpunkt [m] Sp. I	Sollhöhen-differenz [m] Sp. II	Höhe Pegelnullpunkt [m] Sp. I + Sp. II	Höhenstatus	Pegel Norderney
1935	1	5,014	-10,014	-5,000	110	Hafen
1957	1	4,999	-9,999	-5,000	120	Riffgat (I)
1973	1	4,999	-9,999	-5,000	120	Riffgat (I)
1978	1	4,999	-9,999	-5,000	120	Riffgat (I)
1984	1	4,968	-9,968	-5,000	130	Riffgat (II)
1994	1	4,981	-9,968	-4,987	140	Riffgat (II)
2000	1	4,981	-9,968	-4,987	160	Riffgat (II)

Da der Pegelfestpunkt 1 relativ weit vom Ufer entfernt liegt und es sich dabei um einen tief gegründeten Rohrfestpunkt handelt, können aus Zeitreihen nur bedingt Aussagen über die Veränderung des Wasserstandes gegenüber der direkten Küstenlinie getroffen werden. Aussagen hinsichtlich langfristiger Änderungen des Wasserstandes in Relation zur unmittelbaren Küste können nur dann ge-

² Höhenstatus: entspricht der Realisierung des amtlichen Höhenreferenzsystems zu einer bestimmten Epoche

Tabelle 4

Amtliche Festlegung und Festlegung mit konstanten Δh_{Soll} (in Relation zum Pegelfestpunkt 1) für den Pegel Norderney Riffgat

Official and constant set-point differences Δh_{Soll} (in relation to the gauge set-point 1) of the gauge Norderney Riffgat

Datum	PFP	Höhe PFP [m]	Δh_{Soll} [m]	Höhe PNP [m]	Δh_{Soll} [m]	H PNP [m]	Offset Wasserstand [cm]
			– amtliche Festlegung –		– Sollhöhendifferenz zu PFP 1 konstant –		
			Sp. I	Sp. II	Sp. I + Sp. II	Sp. IV	Sp. I + Sp. IV
			Sp. I	Sp. II	Sp. I + Sp. II	Sp. IV	Sp. V – Sp. III
16.12.1957	1	4,999	–9,999	–5,000	–9,999	–5,000	0,0
	55	3,63	–8,630	–5,000	–8,630	–5,000	0,0
	56	3,624	–8,624	–5,000	–8,624	–5,000	0,0
28.06.1973	1	4,999	–9,999	–5,000	–9,999	–5,000	0,0
	8	4,002	–9,002	–5,000	–9,002	–5,000	0,0
	11	1,471	–6,471	–5,000	–6,471	–5,000	0,0
	55	3,6	–8,600	–5,000	–8,600	–5,000	0,0
	56	3,594	–8,594	–5,000	–8,594	–5,000	0,0
	57	3,486	–8,486	–5,000	–8,486	–5,000	0,0
29.08.1978	1	4,999	–9,999	–5,000	–9,999	–5,000	0,0
	8	3,995	–8,995	–5,000	–8,995	–5,000	0,0
	55	3,594	–8,594	–5,000	–8,594	–5,000	0,0
	56	3,589	–8,589	–5,000	–8,589	–5,000	0,0
	62	4,693	–9,693	–5,000	–9,693	–5,000	0,0
	63	3,679	–8,679	–5,000	–8,679	–5,000	0,0
	64	3,521	–8,521	–5,000	–8,521	–5,000	0,0
	65	5,532	–10,532	–5,000	–10,532	–5,000	0,0
25.04.1984	1	4,968	–9,968	–5,000	–9,999	–5,031	3,1
	64	3,491	–8,491	–5,000	–8,522	–5,031	3,1
	63	3,644	–8,644	–5,000	–8,675	–5,031	3,1
	65	5,493	–10,493	–5,000	–10,524	–5,031	3,1
	55	3,561	–8,561	–5,000	–8,592	–5,031	3,1
	56	3,55	–8,55	–5,000	–8,581	–5,031	3,1
30.11.1994	1	4,981	–9,968	–4,987	–9,999	–5,018	3,1
	63	3,648	–8,635	–4,987	–8,666	–5,018	3,1
	64	3,499	–8,486	–4,987	–8,517	–5,018	3,1
	65	5,494	–10,481	–4,987	–10,512	–5,018	3,1
07.09.2000	1	4,981	–9,968	–4,987	–9,999	–5,018	3,1
	63	3,642	–8,629	–4,987	–8,660	–5,018	3,1
	64	3,494	–8,481	–4,987	–8,512	–5,018	3,1

= konstanter Sollhöhenunterschied

= konstante Pegelnullpunkthöhe

troffen werden, wenn die Bewegungen der Pegelfestpunkte an der Küste berücksichtigt werden bzw. die Sollhöhenunterschiede zu Pegelfestpunkten in unmittelbarer Küstennähe konstant gehalten werden. Für den Pegel Norderney Riffgat wären dies beispielsweise die Pegelfestpunkte 55 und 65 (Tab. 5). Werden die Sollhöhendifferenzen zwischen diesen Punkten und dem Pegelnullpunkt konstant gehalten, ergeben sich die in Tabelle 5 dargestellten Pegelnullpunkte bzw. an die Wasserstandsbeobachtungen anzubringenden Offsets.

Bei allen drei Pegelstandorten (Hafen bzw. Riffgat vor und nach der Umsetzung) erfolgte immer Staffelfverschiebung nach oben. Die Höhendifferenz zwischen den einzelnen Pegelfestpunkten und dem Pegelnullpunkt wurde immer geringer, wodurch ein Teil der Wasserstandsänderungen bereits kompensiert wurde. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die tatsächlichen Ände-

rungen der Wasserstandsbeobachtungen größer sind als bisher angenommen. Je nach der Wahl des repräsentativen Festpunktes ergeben sich noch weitaus größere Korrekturen (Tab. 5).

Pegel Papenburg

Vergleichbar mit den Pegeln auf Norderney basieren die Wasserstandsbeobachtungen des Pegels Papenburg auf zwei Pegelanlagen. Die Lage der Pegelanlagen und der Pegelfestpunkte ist in Abbildung 15 dargestellt. Bei Aufbau bzw. Einrichtung der zweiten Pegelanlage wurde der Pegelnullpunkt wieder auf NN –5,000 m gelegt und damit die geometrische Beziehung zur ersten Pegelanlage geändert. Da die Pegelfestpunkte ebenfalls komplett neu erstellt wurden und aus den Pegelakten kein direkter geometrischer Bezug zu den alten Pegelfestpunkten ersichtlich wird, kann mit den vorliegenden Informationen der Bezug nur über den Punkt 327 in Völlen hergestellt werden. Dieser ist von der Pegelanlage etwa 1,4 km entfernt und wurde sowohl beim alten als auch beim neuen Pegel für Anschlussmessungen genutzt. Werden die Sollhöhenunterschiede zu den Pegelfestpunkten 190n bzw. 1 und dem Punkt 327 konstant gehalten, ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten Abweichungen.

**Abbildung 15**

Lage der Pegel und Pegelfestpunkte am Pegel Papenburg
Locations of the gauges and gauge set-points of the gauge Papenburg (River Ems)

Tabelle 5

Amtliche Festlegung und konstante Δh_{Soll} (in Relation zu den Pegelfestpunkten 55/65) für den Pegel Norderney Riffgat

Official and constant set-point differences Δh_{Soll} (in relation to the gauge set-points 55/65) of the gauge Norderney Riffgat

Datum	PFP	Höhe PFP [m]	Δh_{Soll} [m]	Höhe PNP [m]	Δh_{Soll} [m]	H PNP [m]	Offset Wasserstand [cm]
			– amtliche Festlegung –		– Sollhöhendifferenz zu PFP 55/65 konstant –		
			Sp. I	Sp. II	Sp. IV	Sp. I + Sp. IV	Sp. V – Sp. III
16.12.1957	1	4,999	–9,999	–5,000	–9,999	–5,000	0,0
	55	3,630	–8,630	–5,000	–8,630	–5,000	0,0
	56	3,624	–8,624	–5,000	–8,624	–5,000	0,0
28.06.1973	1	4,999	–9,999	–5,000	–10,029	–5,030	3,0
	8	4,002	–9,002	–5,000	–9,032	–5,030	3,0
	11	1,471	–6,471	–5,000	–6,501	–5,030	3,0
	55	3,600	–8,600	–5,000	–8,630	–5,030	3,0
	56	3,594	–8,594	–5,000	–8,624	–5,030	3,0
	57	3,486	–8,486	–5,000	–8,516	–5,030	3,0
29.08.1978	1	4,999	–9,999	–5,000	–10,035	–5,036	3,6
	8	3,995	–8,995	–5,000	–9,031	–5,036	3,6
	55	3,594	–8,594	–5,000	–8,630	–5,036	3,6
	56	3,589	–8,589	–5,000	–8,625	–5,036	3,6
	62	4,693	–9,693	–5,000	–9,729	–5,036	3,6
	63	3,679	–8,679	–5,000	–8,715	–5,036	3,6
	64	3,521	–8,521	–5,000	–8,557	–5,036	3,6
	65	5,532	–10,532	–5,000	–10,568	–5,036	3,6
25.04.1984	1	4,968	–9,968	–5,000	–10,037	–5,069	6,9
	64	3,491	–8,491	–5,000	–8,560	–5,069	6,9
	63	3,644	–8,644	–5,000	–8,712	–5,068	6,8
	65	5,493	–10,493	–5,000	–10,562	–5,069	6,9
	55	3,561	–8,561	–5,000	–8,630	–5,069	6,9
	56	3,55	–8,55	–5,000	–8,619	–5,069	6,9
30.11.1994	1	4,981	–9,968	–4,987	–10,049	–5,068	8,1
	63	3,648	–8,635	–4,987	–8,716	–5,068	8,1
	64	3,499	–8,486	–4,987	–8,567	–5,068	8,1
	65	5,494	–10,481	–4,987	–10,562	–5,068	8,1
07.09.2000	1	4,981	–9,968	–4,987	–10,037	–5,056	6,9
	63	3,642	–8,629	–4,987	–8,698	–5,056	6,9
	64	3,494	–8,481	–4,987	–8,550	–5,056	6,9
	65	5,506	–10,493	–4,987	–10,562	–5,056	6,9

= konstanter Sollhöhenunterschied

= konstante Pegelnullpunkthöhe

Beobachtungen 1935–2010 = 75 Jahre
 Offset aufgrund der Lattenverschiebungen = + 7,3 cm
 → geometrisch bedingter „Trend“ = + 1,0 mm/Jahr

Analog zu den Pegeln auf Norderney wurde die Pegellatte mehrfach angehoben, wodurch ein Teil der Wasserstandsänderungen mechanisch kompensiert wurde bzw. abgeleitete Trends zu klein sind. In der Realität ist demnach jeder aus Wasserstandsbeobachtungen abgeleitete Trend gegenüber den Pegelfestpunkten 190n und 1 etwa 1 mm/Jahr größer.

Pegel Helgoland

Der Pegel Helgoland stellt insofern eine Besonderheit dar, als dass es sich dabei um einen Pegel auf der einzigen deutschen

Hochseeinsel handelt. Es war bis vor wenigen Jahren nicht möglich, eine geometrisch präzise Höhenübertragung vom amtlichen Höhenreferenzsystem der Landesvermessung nach Helgoland zu realisieren. Demnach waren sämtliche Höhen auf Helgoland bis 2001 auf ein lokales Inselhöhenystem (Helgoländer Null, HN) bezogen.

Der Pegel wurde dementsprechend auf eine Höhenlage von HN –5,000 m festgelegt. Erst eine in den späten neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts realisierte satellitengestützte Höhenübertragung hat einen Höhenbezug geschaffen, der direkt mit dem Höhenreferenzsystem der Landesvermessung vergleichbar ist. Zum Zeitpunkt der Neueinführung wurde der Pegelnullpunkt auf ein Niveau von NN –5,000 m verlegt. Da sich beide Höhenbezugssysteme um 27 cm unterscheiden, erfolgte eine schlagartige Verschiebung der Pegellatte um 27 cm. Sofern die Sollhöhenunterschiede konstant bleiben, ergeben sich die in Tabelle 7 dargestellten Höhenunterschiede.

Zusätzlich zur Analyse der Sollhöhenunterschiede bzw. der amtlichen Festlegungen

**Abbildung 16**

Lage der Pegelfestpunkte und des Pegelhäuschens des Pegels Helgoland Binnenhafen

Locations of the gauge set-points and of the gauging station Helgoland Binnenhafen

Tabelle 6

Sollhöhenunterschiede und Pegelnullpunkte am Pegel Papenburg

Set-point differences and gauge-zero points of the gauge Papenburg (River Ems)

Datum	PFP	Höhe PFP [m]	Δh_{Soll} [m]	Höhe PNP [m]	Δh_{Soll} [m]	Höhe PNP [m]	Offset Wasserstand [cm]
– amtliche Festlegung –				– Sollhöhendifferenz konstant –			
		Sp. I	Sp. II	Sp. I + Sp. II	Sp. IV	Sp. I + Sp. IV	Sp. V – Sp. III
01.07.1935	190g	2,080	–7,080	–5,000	–7,080	–5,000	0,0
	190i	3,528	–8,528	–5,000	–8,528	–5,000	0,0
	190m	2,987	–7,987	–5,000	–7,987	–5,000	0,0
	190l	2,512	–7,512	–5,000	–7,512	–5,000	0,0
	190n	4,573	–9,573	–5,000	–9,573	–5,000	0,0
	190o	2,647	–7,647	–5,000	–7,647	–5,000	0,0
	601	1,665	–6,665	–5,000	–6,665	–5,000	0,0
25.11.1946	190o	2,636	–7,636	–5,000	–7,659	–5,023	2,3
	XX2	2,615	–7,615	–5,000	–7,638	–5,023	2,3
	190l	2,500	–7,500	–5,000	–7,523	–5,023	2,3
	190n	4,550	–9,550	–5,000	–9,573	–5,023	2,3
	XX3	4,531	–9,531	–5,000	–9,554	–5,023	2,3
08.06.1948	190n	4,550	–9,550	–5,000	–9,573	–5,023	2,3
	190o	2,636	–7,636	–5,000	–7,659	–5,023	2,3
	190p	4,467	–9,467	–5,000	–9,490	–5,023	2,3
01.10.1954	190q	1,647	–6,646	–4,999	–6,689	–5,042	4,3
	993	4,465	–9,464	–4,999	–9,507	–5,042	4,3
	994	1,651	–6,650	–4,999	–6,693	–5,042	4,3
	995	4,526	–9,525	–4,999	–9,568	–5,042	4,3
	190n	4,531	–9,530	–4,999	–9,573	–5,042	4,3
01.09.1959	993	4,441	–9,455	–5,014	–9,513	–5,072	5,8
	994	1,625	–6,639	–5,014	–6,697	–5,072	5,8
	303	2,802	–7,816	–5,014	–7,874	–5,072	5,8
	995	4,477	–9,491	–5,014	–9,549	–5,072	5,8
	190n	4,501	–9,515	–5,014	–9,573	–5,072	5,8
	327	1,605	–6,619	–5,014	–6,677	–5,072	5,8
	192	5,165	–10,179	–5,014	–10,237	–5,072	5,8
	2810/311	1,322	–6,336	–5,014	–6,394	–5,072	5,8
22.05.1964	301a	4,594	–9,608	–5,014	–9,670	–5,076	6,2
	190n	4,497	–9,511	–5,014	–9,573	–5,076	6,2
	303	2,787	–7,801	–5,014	–7,863	–5,076	6,2
	986	2,930	–7,944	–5,014	–8,006	–5,076	6,2
	988	2,390	–7,404	–5,014	–7,466	–5,076	6,2
24.05.1966	301a	4,586	–9,600	–5,014	–9,661	–5,075	6,1
	302a	2,010	–7,024	–5,014	–7,085	–5,075	6,1
	303	2,794	–7,808	–5,014	–7,869	–5,075	6,1
	190n	4,498	–9,512	–5,014	–9,573	–5,075	6,1
15.04.1984	192	5,165	–10,165	–5,000	–10,237	–5,072	7,2
	327	1,605	–6,605	–5,000	–6,677	–5,072	7,2
	1	2,480	–7,480	–5,000	–7,553	–5,073	7,3
	2	2,118	–7,118	–5,000	–7,190	–5,072	7,2
31.07.1998	3	2,589	–7,589	–5,000	–7,661	–5,072	7,4
	1	2,457	–7,480	–5,023	–7,553	–5,096	7,3
	2	2,097	–7,120	–5,023	–7,193	–5,096	7,3
14.05.2009	3	2,568	–7,591	–5,023	–7,664	–5,096	7,3
	1	2,457	–7,480	–5,023	–7,553	–5,096	7,3
	2A	2,911	–7,934	–5,023	–8,007	–5,096	7,3
14.10.2009	3	2,568	–7,591	–5,023	–7,664	–5,096	7,3
	1	2,457	–7,480	–5,023	–7,553	–5,096	7,3
	2A	2,911	–7,934	–5,023	–8,007	–5,096	7,3
	3	2,572	–7,595	–5,023	–7,668	–5,096	7,3

= konstanter Sollhöhenunterschied

= konstante Pegelnullpunkthöhe

Tabelle 7 Sollhöhenunterschiede und Pegelnullpunkthöhen des Pegels Helgoland Binnenhafen ³ <i>Set-point differences and elevations of the gauge-zero points of the gauge Helgoland Binnenhafen</i>							
Datum	PFP	Höhe PFP [m]	Δh_{Soll} [m]	Höhe PNP [m]	Δh_{Soll} [m]	H PNP [m]	Offset Wasserstand [cm]
		Sp. I	– amtliche Festlegung –		– Sollhöhendifferenz konstant –		
			Sp. II	Sp. I + Sp. II	Sp. IV	Sp. I + Sp. IV	Sp. V – Sp. III
15.08.1962	1813/G	5,103	–10,103	–5,000	–10,103	–5,000	0,0
	1813/F	3,506	–8,506	–5,000	–8,506	–5,000	0,0
	1813/E	3,519	–8,519	–5,000	–8,519	–5,000	0,0
	1813/D	3,665	–8,665	–5,000	–8,665	–5,000	0,0
	1813/C	3,440	–8,440	–5,000	–8,440	–5,000	0,0
16.08.1972	1813/D	3,665	–8,665	–5,000	–8,665	–5,000	0,0
	1813/E	3,519	–8,519	–5,000	–8,519	–5,000	0,0
	1813/F	3,506	–8,506	–5,000	–8,506	–5,000	0,0
	1813/9/602	5,186	–10,186	–5,000	–10,186	–5,000	0,0
	1813/M	3,602	–8,602	–5,000	–8,602	–5,000	0,0
	1813/A	3,868	–8,868	–5,000	–8,868	–5,000	0,0
	1813/K	4,343	–9,343	–5,000	–9,343	–5,000	0,0
24.11.1992	1813/9/602	5,186	–10,186	–5,000	–10,186	–5,000	0,0
	120020	3,787	–8,787	–5,000	–8,787	–5,000	0,0
	120021	4,178	–9,178	–5,000	–9,178	–5,000	0,0
	120022	3,787	–8,787	–5,000	–8,787	–5,000	0,0
15.08.2001	120022	4,060	–9,056	–4,996	–8,785	–4,725	27,1
	120021	4,453	–9,449	–4,996	–9,178	–4,725	27,1
	120020	4,061	–9,057	–4,996	–8,786	–4,725	27,1
	121000	4,230	–9,226	–4,996	–8,955	–4,725	27,1
16.04.2003	120020	4,062	–9,057	–4,995	–8,786	–4,724	27,1
	120021	4,454	–9,449	–4,995	–9,178	–4,724	27,1
	120022	4,061	–9,056	–4,995	–8,785	–4,724	27,1

= konstanter Sollhöhenunterschied
 = konstante Pegelnullpunkthöhe

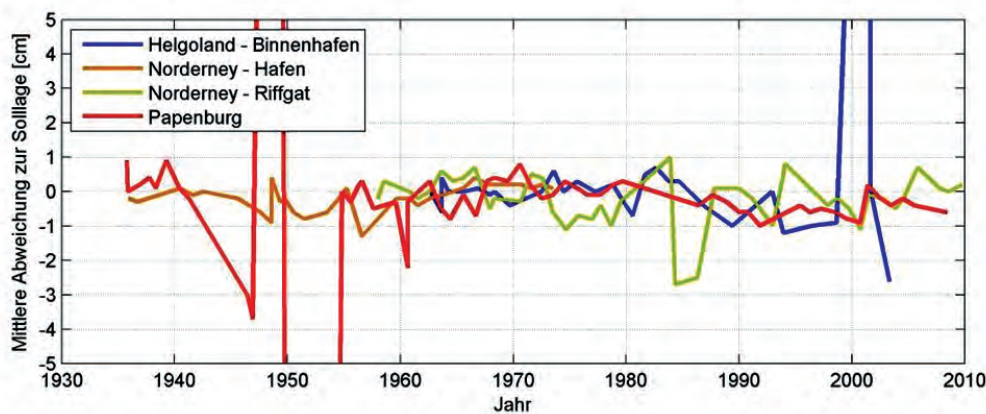


Abbildung 17

Mittlere Abweichungen Lattenpegel gegenüber der Sollage
 Mean deviations of staff gauges from the set-points

³ Der Punkt 1813/F wurde 1992 nicht mehr angemessen. Um eine Verbindung zwischen der 1992 gemessenen Punktgruppe und dem Punkt 1813/F herzustellen, wurden die Sollhöhenunterschiede zum Punkt 1813/9/602 angehalten.

⁴ KFKI: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

⁵ IKÜS: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik, Forschungsprojekt des BMBF (Fördernummer 03KIS055 – 03KIS058)

⁶ BMVBS: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

⁷ KLIWAS: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen

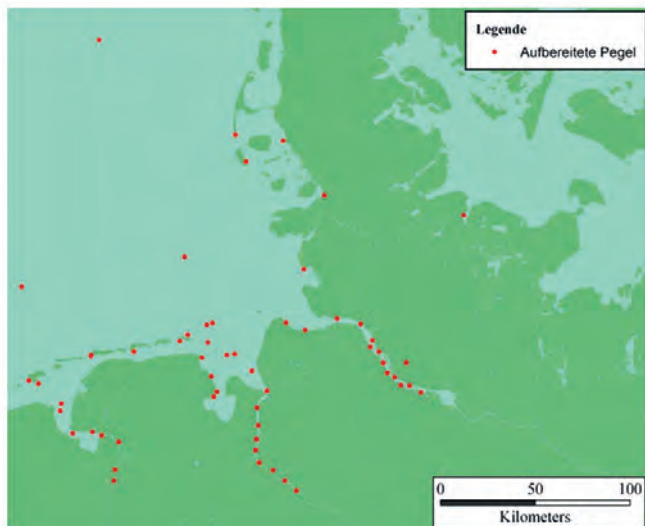
können die Ergebnisse der Prüfungen der Höhenlage mit einbezogen werden. Diese beschreiben die tatsächliche Ablage der Lattenpegel gegenüber der amtlich festgestellten Sollage.

Eine Kombination der Wasserstandsbeobachtungen mit den in den Tabellen 4–7 dargestellten Offsets ergeben homogene Wasserstandsbeobachtungen. Dies bedeutet, dass die geometrische Beziehung zu einem Pegelfestpunkt konstant gehalten wurde und aus den korrigierten Wasserstandsbeobachtungen abgeleitete Trends den Trend in Relation zu dem repräsentativen Pegelfestpunkt beschreiben. In Abbildung 6 werden diese Wasserstandsbeobachtungen als „lokale Wasserstände“ bezeichnet. Im Rahmen des KFKI⁴-Forschungsprojektes IKÜS⁵ und des vom BMVBS⁶ initiierten Ressortforschungsprogramms KLIWAS⁷ wurden geodätische Pegelinformationen verschiedener Küstenpegel und Pegel gezeitenbeeinflusster Gewässer (Ästuar) entsprechend aufbereitet und Korrekturwerte abgeleitet (Abb. 18). Für jeden Pegel sind Übersichten und entsprechende Korrekturtabellen im Geoportal der BfG verfügbar.

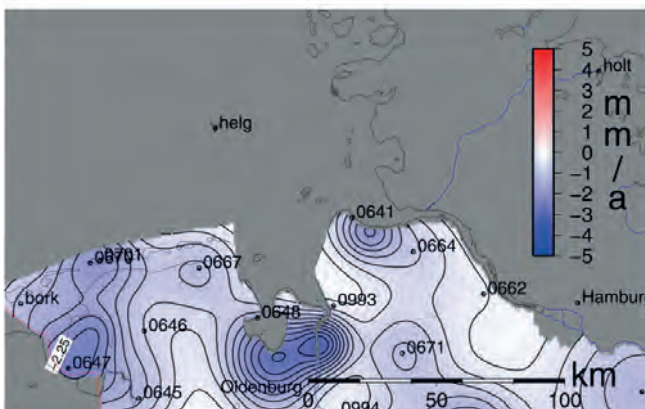
5 Absolute Georeferenzierung der Pegel

Werden die korrigierten Wasserstandsbeobachtungen mit absoluten Höheninformationen und Änderungsraten der Pegelfestpunkte (und damit der näheren Umgebung der Pegel) kombiniert, ergeben sich absolut georeferenzierte Wasserstandsbeobachtungen. Entscheidend für die Georeferenzierung sind die Pegelfestpunkte bzw. deren Angaben zur Höhe und zum Höhenreferenzsystem. Jeder Anschlussmessung liegen die zum Zeitpunkt der Messung gültigen Höhen/Höhenstatusangaben der Anschlusspunkte im jeweils gültigen Höhenreferenzsystem.

renzsystem der Landesvermessung zugrunde (Tab. 3), welche sich im Verlauf der Zeit mehrfach geändert haben. Dies hat zur Folge, dass die Höhenangaben der Pegelfestpunkte inhomogen und zur Ableitung von Höhenänderungen nur bedingt geeignet sind. Weiterhin ist bei der Nutzung amtlicher Höhenangaben zu beachten, dass aufgrund von Vertikalbewegungen die amtlichen Höhen nur eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Messung darstellen. Auch die derzeit aktuellen Höhen (Höhenstatus 160) basieren direkt oder indirekt auf großräumigen Nivellements der Landesvermessung aus den achtziger Jahren und sind damit etwa 30 Jahre alt. Von Seiten der Landesvermessung läuft derzeit eine Neumessung des Deutschen Haupthöhennetzes (Netzenerneuerung DHHN92), deren Ergebnisse aber noch nicht verfügbar sind. Die von Seiten der BfG durchgeführten Hauptnivellements entlang den Bundeswasserstraßen oder Anschlussmessungen der Pegel basieren indirekt auf großräumigen Nivellementskampagnen der Landesvermessung, da die Anschlusspunkte für entsprechende Messungen von der Landesvermessung bereitgestellt werden.


Abbildung 18

Im Rahmen von KLIWAS und IKÜS aufbereitete Pegel
Gauges analysed under the programmes KLIWAS and IKÜS


Abbildung 19

Ergebnis der kombinierten Lösung des Projektes IKÜS (TU Braunschweig). Quelle: Abschlussbericht KFKI-Projekt IKÜS
Result of the combined solution from the IKÜS project (TU Braunschweig);
source: final report of the KFKI project IKÜS

Im Rahmen des KFKI-Forschungsprojektes IKÜS erfolgte eine erneute Auswertung großräumiger Nivellementskampagnen, die in Verbindung mit langjährigen GNSS-Beobachtungen zu einem Höhenmodell kombiniert wurden. Das Ergebnis ist in Abbildung 19 dargestellt. Eine Kombination dieser Ergebnisse mit den Wasserstandsbeobachtungen relativ zur näheren Umgebung der Pegel bzw. mit Berücksichtigung der geodätischen Pegelinformationen erlaubt eine Ableitung von langfristigen Wasserstandsbeobachtungen in Relation zu einem zeitlich invarianten Höhenreferenzsystem, d.h. bei den Resultaten handelt es sich um absolute Änderungen der Wasserstandsbeobachtungen. Die folgende fiktive Beispielrechnung soll diesen Sachverhalt verdeutlichen:

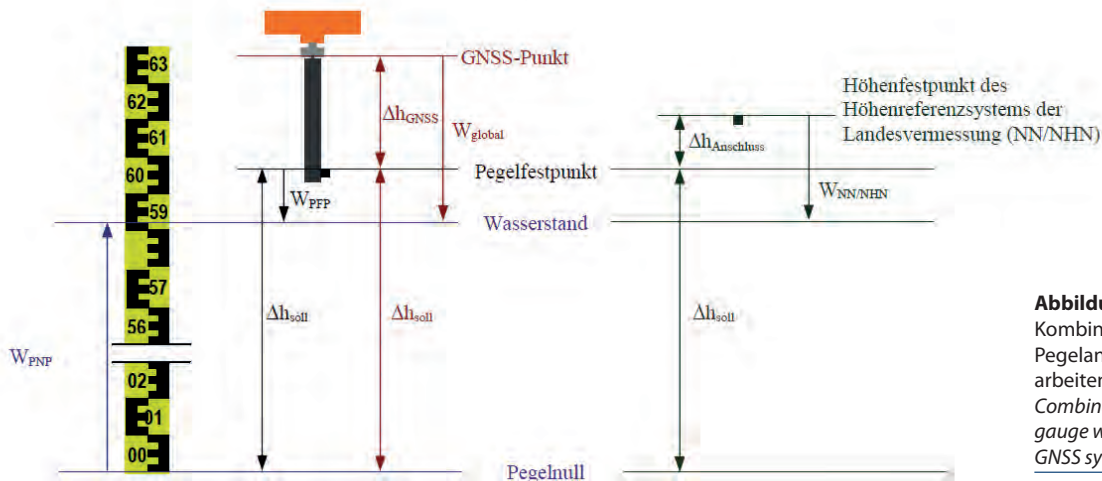
Trend im THW ⁸ (basierend auf amtlichen Wasserstandsdaten)	= + 2,0 mm/Jahr
→ Änderung zwischen 1935 und 2000 (65 Jahre) (inklusive der Absenkung der Pegellatte (1985) um 30 mm)	= 130 mm
→ Änderung zwischen 1935 und 2000 ohne Lattenverschiebung	= 160 mm
→ Trend im THW (in Relation zum repräsentativen Pegelfestpunkt)	= 2,5 mm/Jahr
Vertikalbewegung des rep. Pegelfestpunktes	= - 1,8 mm/Jahr
→ Änderung des THW in Relation zu einem zeitlich invarianten Höhenreferenzsystem	= 0,7 mm/Jahr

Praktisch bedeutet dies, dass in diesem Beispiel der Trend des THW gegenüber einem repräsentativen Pegelfestpunkt größer ist als bisher angenommen (analog Norderney oder Papenburg). Aufgrund der Vertikalbewegung dieses Pegelfestpunktes ist die Änderungsrate des THW gegenüber einem homogenen und zeitlich invarianten Höhenreferenzsystem aber geringer. Absolute Trends in den Wasserstandsbeobachtungen setzen sich demnach immer aus den relativen Trends gegenüber der unmittelbaren Umgebung des Pegels und Informationen über die Vertikalbewegung der unmittelbaren Umgebung gegenüber einem homogenen und zeitlich invarianten Höhenreferenzsystem zusammen.

Eine Möglichkeit zur Erfassung aktueller Höhen besteht in dem Einsatz satellitengestützter Messsysteme (GNSS-Systeme). Diese ermöglichen eine Bestimmung von Höhendifferenzen zu anderen GNSS-Stationen. Sofern diese auf den Pegel direkt montiert werden, können die Höhen der Pegelfestpunkte bzw. der Pegelanlagen in Relation zu Referenzstationen (deren Höhen im amtlichen System bekannt sind) bestimmt werden.

Im Gegensatz zur allgemeinen Auffassung ist die Erdkruste nicht starr, sondern reagiert elastisch auf Auflasten und andere Einflüsse. Praktisch hat dies zur Folge, dass die Höhen zyklischen und säkularen Änderungen unterworfen sind. Aus diesem und weiteren systemspezifischen Gründen können belastbare Aussagen nur mithilfe permanent arbeitender GNSS-Systeme auf oder in der Nähe von Pegelanlagen abgeleitet werden. Darüber hinaus bieten GNSS-Systeme die Möglichkeit, den Wasserstand in einem globalen und zeitlich invarianten Höhenreferenzsystem zu beschreiben. Sie sind insbesondere für grenzüberschreitende Auswertungen bzw. für Kombinationen mit anderen Messverfahren (Satellitenaltimetrie) zwingend erforderlich.

⁸ THW: Tidehochwasser

**Abbildung 20**

Kombination einer klassischen Pegelanlage mit kontinuierlich arbeitenden GNSS-Empfängern
 Combination of a conventional staff gauge with continuously operating GNSS systems

Aus diesem Grund hat die BfG damit begonnen, die wichtigsten Pegel bzw. Pegel in Gebieten mit verstärkten vertikalen Landbewegungen mit permanent arbeitenden GNSS-Stationen auszustatten. Zusätzlich zu den BfG-eigenen GNSS-Stationen werden GNSS-Stationen des GREF⁹-Netzwerkes genutzt. Da diese nicht unmittelbar auf Pegeln installiert sind, werden von Seiten der BfG und der WSV regelmäßig Höhendifferenzen der Pegelfestpunkte zu den permanent arbeitenden GNSS-Stationen gemessen. Derzeit werden 19 permanent arbeitende GNSS-Stationen der BfG und 6 GNSS-Stationen des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) an Nord- und Ostsee zur Überwachung oder Vertikalbewegung der Pegelfestpunkte eingesetzt.

Originäre Ergebnisse der GNSS-Höhenüberwachung sind ellipsoidische Höhen der GNSS-Antennen und unter Berücksichtigung der Höhendifferenzen zwischen GNSS-Antennen und Pegelnullpunkt auch ellipsoidische Pegelnullpunkthöhen. Im Gegensatz zu den physikalischen NHN bzw. NN-Höhen verfügen diese über keinen Schwerebezug und sind damit für hydrologische Fragestellungen weniger geeignet. Für eine Überführung zwischen beiden Höhenarten existieren Quasigeoidmodelle. Diese weisen

jeder Koordinate im Gültigkeitsbereich des Modells eine Höhenanomalie ζ zu, welche als Offset an die Höhen anzubringen ist. Von Seiten der Landesvermessung wird für die Überführung aus dem amtlichen Koordinatensystem ETRS89/DREF91 und dem Deutschen Haupthöhennetz DHHN92 das German Combined QuasiGeoid 2005 GCG05 bereitgestellt.

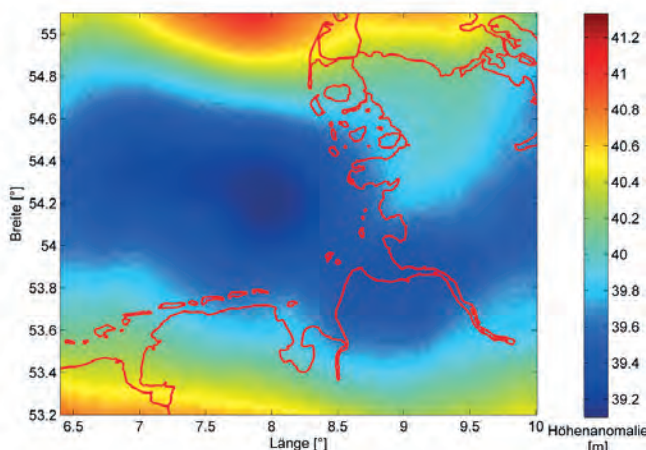
$$H_{PFP_NHN} = H_{PFP_ellip.} + \zeta$$

Ursache für die Differenz zwischen ellipsoidischen und physikalischen Höhen ist das Schwerfeld der Erde. Da diese in erster Näherung nur von der Massenverteilung innerhalb der Erde abhängig sind und diese über bestimmte Zeiträume als konstant angesehen werden kann, entspricht die Höhenanomalie einer örtlichen Konstante. Für den betrachteten Zeitraum weniger Jahre können ellipsoidische Höhenänderungen direkt auf physikalische Höhenänderungen übertragen werden.

6 Zusammenfassung

Je nach Aufgabenstellung müssen bei der Auswertung von Wasserstandsbeobachtungen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Neben hydrologischen Aspekten, auf die im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht näher eingegangen wird, sind geodätische Informationen nicht zu vernachlässigen.

Aufgrund diverser Vorgaben in verschiedenen Ausführungen der Pegelvorschrift und auch durch ihre unterschiedliche Interpretation kam es in der Vergangenheit zu Änderungen der Sollhöhenunterschiede und Verschiebungen der Lattenpegel. Zusätzlich sind die absoluten Höhenangaben der Pegelfestpunkte und damit auch der Pegelnullpunkte auf variierende Höhenreferenzsysteme bezogen. Im Endeffekt überlagern sich Änderungen der Sollhöhenunterschiede und damit verbundene Verschiebungen der Lattenpegel, variierende Höhenreferenzsysteme bzw. daraus resultierende scheinbare Höhenänderungen und absolute Höhenänderungen der Pegelfestpunkte. Dies alles führt dazu, dass die Wasserstandszeitreihen über Pegelnull (Rohwasserstand) ohne weitere Korrekturen für Zeitreihenanalysen nicht geeignet sind.

**Abbildung 21**

German Combined QuasiGeoid GCG05 mit Küstenerweiterung (Modell vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG))
 German Combined QuasiGeoid GCG05 with coastal extension (model of the Federal Agency for Cartography and Geodesy – BKG)

⁹ GREF: German Reference Frame – GNSS-Referenznetz des BKG

Je nach Aufgabenstellung der Zeitreihenanalyse müssen daher die geodätischen Pegelinformationen analysiert und entsprechende Korrekturen angebracht werden. Praktisch bedeutet dies eine Aufarbeitung der kompletten geodätischen Pegelhistorie für jeden Pegel, dessen Wasserstandsbeobachtungen einer Zeitreihenanalyse unterworfen werden sollen. Damit lassen sich „lokale“ oder „relative“ Wasserstände in Relation zu den Pegelfestpunkten und so zu der unmittelbaren Umgebung des Pegels ableiten. Durch eine Kombination mit den amtlichen Höhen der Pegelfestpunkte können die Wasserstandsbeobachtungen in das Höhenreferenzsystem der Landesvermessung überführt werden.

Die amtlichen Höhenangaben stellen jeweils nur eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Messung dar. Darüber hinaus sind diese Angaben z.T. auf unterschiedliche Referenzsysteme bezogen, wodurch sich scheinbare und reale Höhenänderungen überlagern. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, Pegel mit kontinuierlich arbeitenden GNSS-Empfängern auszustatten. Mit diesen ist es möglich, die Höhe der Pegelfestpunkte und damit auch der Pegelnullpunkte kontinuierlich zu überwachen und diese in einem homogenen, globalen und zeitlich invarianten Höhenreferenzsystem abzubilden. Die daraus abgeleiteten Wasserstände erlauben eine grenzüberschreitende Auswertung und bilden eine Grundlage für weitere wissenschaftliche Anwendungen wie etwa die Kombination mit anderen satellitengestützten Messverfahren (Satellitenaltimetrie).

Conclusions

Depending on the task to be solved, different aspects of water-level data have to be considered in the evaluation of the data. Besides hydrological aspects, which are not discussed in this paper, geodetic information should not be neglected.

Due to different requirements and several editions and interpretations of the German Gauge Manual (Pegelvorschrift) in the past, it happened that set-point differences were modified and staff gauges were shifted. In addition, the tide gauges are referenced to a local network of benchmarks. These benchmarks are connected to different realisations of the nation-wide ordnance datum of the German Federal States. Ultimately, changes in set-point differences, staff-gauge shifts, different realisations of the nation-wide ordnance datum together superimpose and may result in seemingly changed sea-level heights. From this follows that water-level time series (raw data series) cannot be used for analyses without correction.

Geodetic information has to be analyzed, and appropriate corrections must be applied. Practically, this means a complete reappraisal of the geodetic history of each tide-gauge installation. Subsequently, „local“ or „relative“ water-level data may be related to the benchmarks and to the immediate surroundings of the gauge. Through a combination with the official heights of the gauges, the water-level measurements can be related to the nation-wide ordnance-datum network.

The official heights are, in fact, only a snapshot at the time of the measurement. Moreover, these values are based on different reference frames, whereby vertical land movements and apparent height changes superimpose. To distinguish these apparent from the real movements, permanent GNSS based monitoring of the tide gauge is necessary that makes it possible to monitor the

heights of the benchmarks/tide gauges in a homogeneous, global, and time-invariant reference system. The results are water-level data related to a global reference frame, so that world-wide comparisons of water levels become possible. These data are also required for other scientific applications like the calibration of satellite altimetry or the monitoring of the sea-level rise.

Danksagung:

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Ergebnissen des KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) Projektes IKÜS – Fördernummer (03KIS056) und dem Projekt 2.02 „Rezente Krustenbewegungen und Validierung von Klimaprojektionen zu Wasserstandsänderungen an den Küsten“ aus dem vom BMVBS initiierten Ressortforschungsprogramm KLIWAS.

Den Wasser- und Schifffahrtsämtern Emden und Tönning sei für die Zusammenarbeit, Hinweise und die Unterstützung gedankt.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. R. Weiß
Dr.-Ing. A. Sudau
Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)
Referat M5 Geodäsie
Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
weiss@bafg.de

Literaturverzeichnis

- BRAUN, G., J.-P. ECKHOLD, SUDAU A. (1996): Zur Höhenlage des Pegelnullpunktes am Beispiel der Küstenpegel. – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilung 40 (6), 252–257
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (1952): Pegelvorschrift – Stammtext mit Anlagen I–IX. – Ernest Siegfried Mittler und Sohn, Buchdruckerei GmbH, Bielefeld
- DEUTSCH, M. (2010): Zur Geschichte des preußischen Pegelwesens im 19. Jahrhundert. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 54 (2), 65–73
- ECKHOLD, M. (1965): Johann Albert Eytelwein (1764-1848). – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 9 (1), 1–7
- GEOBASISDATEN LANDESVERMESSUNG (2008): Geoinformation, Landesvermessung und Katasterwesen Mecklenburg Vorpommern. – Faltblatt FB_L_S_H.pdf
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) und BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (BMV) (1978): Pegelvorschrift – Anlage C – Anweisung für das Festlegen und Erhalten der Pegel in ihrer Höhenlage. – Verlag Paul Parey
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) und BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (BMV) (1997): Pegelvorschrift – Anlage C – Anweisung für das Festlegen und Erhalten der Pegel in ihrer Höhenlage. – Kulturbuchverlag Berlin GmbH
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) und BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (BMV) (1978): Pegelvorschrift – Stammtext. – Verlag Paul Parey
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) und BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR (BMV) (1997): Pegelvorschrift – Stammtext. – Kulturbuchverlag Berlin GmbH

- LANDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE UND HAUPTNIVELLEMENTS (1935): Pegelvorschrift – Stammtext mit Anlagen I–VII. – Ernest Siegfried Mittler und Sohn, Buchdruckerei GmbH, Berlin
- LANGE, O. (1952): Erhaltung der Pegel in richtiger Höhenlage. – Die Wasserwirtschaft 2, 46–49
- LANGE, O. (1960): 150 Jahre Deutsches Pegelwesen. – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 4 (1), 1–3
- LOHRBERG, W. (1958): Sollhöhenunterschiede bei Pegeln im Küstengebiet. – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilung 2 (2), 39–45
- SUDAU, A. (2005): Fachtechnische Stellungnahme – Einführung des Höhenbezugssystems DHHN 92 in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung. – Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- SUDAU, A. & R. WEIß (2010): Der Einfluss vertikaler Landbewegungen auf langwellige Wasserstandsbeobachtungen. – Tagungsband IWASA 2010
- SUDAU, A. & R. WEIß (2008): Höhenlagen von Pegelnulppunkten, rezente vertikale Krustenbewegungen und langwellige Wasserstandsvariationen im Bereich der deutschen Nordseeküste – KFKI Aktuell 1, 16–20
- WANNINGER, L., C.H. JAHN, W. NIEMEYER & A. SUDAU (2008): Abschlussbericht: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS). – BMBF-Förderkennzeichen 03KIS055, 03KIS056, 03KIS057, 03KIS058