

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Richter, Andreas; Dietrich, Reinhard; Wendt, Jens

Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101555>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Richter, Andreas; Dietrich, Reinhard; Wendt, Jens (2006): Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee. In: Die Küste 71. Heide, Holstein: Boyens. S. 33-59.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee

Von ANDREAS RICHTER, REINHARD DIETRICH und JENS WENDT

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

Zur Bestimmung von Höhenänderungen und vertikalen Krustendeformationen stehen an der deutschen Ostseeküste Messdaten von insgesamt 11 Präzisionsnivellements zur Verfügung, die den Zeitraum von 1869 bis 1992 überspannen. Im vorliegenden Beitrag wird die erstmalige geschlossene Aufbereitung und Analyse aller zugänglichen Nivellementsdaten beschrieben. Eine Darstellung der geschichtlichen Entwicklung von Höhensystemen im Untersuchungsgebiet führt zu den spezifischen Besonderheiten der für die verschiedenen Messepochen vorliegenden Nivellementsdaten und zu methodischen Ansätzen zu ihrer Homogenisierung. Auf der Grundlage wiederholter Nivellements zwischen vermarkten Festpunkten werden zeitliche Änderungen ihrer relativen Höhenunterschiede bestimmt und profilweise entlang der deutschen Ostseeküste verglichen. Die Einflüsse von unterschiedlichen Definitionen von Höhensystemen und von Messfehlern werden bestmöglich reduziert, ihre residualen Effekte diskutiert und die räumliche Repräsentativität der für die Festpunkte ermittelten Höhenänderungen kritisch behandelt. Die erhaltenen relativen Höhenänderungsraten sind mit maximal 0,5 mm/a gering und in Anbetracht der Messgenauigkeit nicht signifikant. Die räumliche Struktur relativer Hebungs- und Senkungsvorgänge wird jedoch entlang der Nivellementslinien hoch aufgelöst wiedergegeben. Die postglaziale isostatische Krustendeformation wird in den Ergebnissen deutlich, und es ergeben sich Hinweise auf die rezente Aktivität tektonischer Störungen. Zur Interpretation hinsichtlich weiträumiger vertikaler Krustendeformationen sowie zur Beurteilung der erzielten Genauigkeiten werden geeignet aufbereitete Langzeitpegelreihen von der südlichen Ostseeküste hinzugezogen.

S u m m a r y

For a determination of height changes and recent vertical crustal deformations at the German Baltic coast, measurement data of 11 precise levelling operations covering the period 1869–1992 are available. In this contribution we present for the first time a homogeneous and consistent processing and analysis of the complete levelling data. Based on a description of the historical development of height systems in the region under investigation, particularities of the data sets representing the different measurement epochs as well as an approach to their homogenisation are outlined. Temporal changes in the relative height differences between bench marks are determined from repeated levellings, and are then compared along profiles at the German Baltic coast. The influences of diverse definitions of height systems and measurement uncertainties (errors) are extensively corrected, their residual effects are discussed and the spatial distribution of the height change rates obtained for the bench marks is examined. The resulting maximum rate of relative height changes amounts to only 0,5 mm/a and is not significant in consideration of the measurement accuracy. However, the spatial pattern of relative uplift and subsidence is displayed with a high resolution along the levelling lines. The results reveal the postglacial isostatic rebound, and there are indications for recent activity of tectonic faults. Sea-level records derived from long-term tide gauge observation in the southern Baltic Sea have been incorporated in the interpretation regarding large scale vertical crustal deformation and have been used for the estimation of the accuracy of the results obtained from the levelling data.

I n h a l t

1. Einleitung	34
2. Geschichtlicher Abriss zu den Präzisionsnivellements an der deutschen Ostseeküste . . .	35
3. Vorliegende Nivellementsdaten	41
4. Zur Auswertung der Messdaten	44
5. Relative Höhenänderungen entlang der Nivellementslinien	48
6. Säkulare Niveauverschiebungen an Küstenpegeln und ihr Vergleich mit Nivellements . .	53
7. Ausblick	56
8. Dank	57
9. Schriftenverzeichnis	58

1. Einleitung

Der küstennahe Raum zeichnet sich durch seine erhöhte Sensibilität gegenüber Vertikalbewegungen der festen Erdoberfläche und den damit verbundenen relativen Meeresspiegeländerungen aus. Die Ostsee ist in Hinblick auf die beteiligten Prozesse durch besondere Bedingungen gekennzeichnet. Das Gebiet ist von einer weiträumigen vertikalen Deformation der Erdkruste als Folge ihrer Entlastung nach dem Abschmelzen der letzten Inlandsvereisung Nordeuropas beeinflusst, die in ihrem Zentrum in Nordschweden Hebungen von 11 mm/a verursacht (JOHANSSON u.a., 2002). Überdies weist die Ostsee als Randmeer nur sehr geringe kurzperiodische Meeresspiegelvariationen wie Gezeiten auf, wodurch langfristigen Trends und Extremereignissen ein größeres Gewicht zukommt.

Andererseits zeichnet sich der Ostseeraum durch einen außergewöhnlichen Umfang an sowohl innovativen als auch in vergangene Jahrhunderte zurückreichenden geodätischen Messungen aus. Hierdurch wird die Ostsee zu einem einzigartigen natürlichen Labor zum Studium von Krustendeformationen und Meeresspiegeländerungen. In Fennoskandien, wo sich die Krustendeformationsprozesse mit maximaler Intensität auswirken, sind geodätische Nivellementsmessungen und Wasserstandsaufzeichnungen an Pegeln genutzt worden, um rezente Vertikalbewegungen der Erdoberfläche zu bestimmen (EKMAN, 1996). In jüngster Vergangenheit ist es im Rahmen des BIFROST-Projektes gelungen, unter Anwendung satellitengeodätischer Verfahren (Global Navigation Satellite System – GNSS) in einem globalen Bezugssystem die dreidimensionale Krustendeformation Fennoskandiens messtechnisch zu erfassen (SCHERNECK u.a., 2002).

An der deutschen Ostseeküste sind die Voraussetzungen für eine detaillierte und wissenschaftlich fundierte Detektion vertikaler Erdkrustendeformationen auf der Grundlage von GNSS derzeit noch nicht voll geschaffen. Für die Bestimmung der säkularen Entwicklung der Höhenverhältnisse und des relativen Meeresspiegels gewinnen daher früh begonnene, klassische geodätische Messungen und Pegelbeobachtungen umso mehr an Bedeutung.

Ein hervorragendes Potenzial zur Rekonstruktion relativer Vertikalbewegungen entlang der deutschen Ostseeküste stellen die seit 1869 mehrfach wiederholten Präzisionsnivellements dar. Für dieses Gebiet liegen die Messergebnisse von insgesamt 11 Nivellements, die acht Messepochen repräsentieren, vor. Das Nivellement liefert für vermarkte Festpunkte Höhen in Bezug auf eine Äquipotenzialfläche des Erdschwerefeldes. Aus einer Wiederholungsmessung kann die Änderung des Höhenunterschiedes zwischen den Festpunkten bestimmt werden. Höhenänderungen setzen sich dabei aus den gesuchten tatsächlichen Vertikalbewegungen der Festpunkte sowie den Auswirkungen von Messunsicherheiten und der Definition der zu Grunde liegenden Höhensysteme zusammen; für eine Interpretation hin-

sichtlich Krustendeformationen sind messtechnisch festgestellte Vertikalbewegungen darüber hinaus auf ihre räumliche Repräsentativität zu untersuchen.

Pegelregistrierungen liegen für die südliche Ostseeküste seit dem frühen 19. Jahrhundert vor. Eine sachgemäße Aufbereitung vorausgesetzt, können sie zur Bestimmung der säkularen relativen Meeresspiegeländerungen im Untersuchungsgebiet genutzt werden, deren räumliche Variation relative Vertikalbewegungen zwischen den Pegellokationen reflektiert (LIEBSCH, 1997; LIEBSCH et al., 2000; DIETRICH und LIEBSCH, 2000).

Schon früher wurde versucht, vertikale Krustenbewegungen im Küstenbereich der Ostsee durch wiederholte Nivellements nachzuweisen (TAL, 1897; LANG, 1965; SCHNEIDER, 1968; TURM, 1971; IHDE et al., 1987). Diese Untersuchungen waren jedoch vorrangig auf die jeweils jüngsten Nivellementsepochen fokussiert, eine einheitliche Bearbeitung, Analyse und Interpretation des gesamten vorliegenden Materials ist bisher nicht erfolgt.

Hier wird die geschlossene, homogene Auswertung aller für den Küstenbereich der Ostsee vorliegenden historischen und aktuellen Nivellementsdaten vorgestellt. Unter Einbeziehung sorgfältig aufbereiteter Langzeitpegelreihen erfolgt eine erschöpfende Untersuchung hinsichtlich rezenter relativer Vertikalbewegungen. Die dargestellten Methoden und Ergebnisse sind dabei auch vor dem Hintergrund eines für 2006–2011 geplanten erneuten Präzisionsnivellements zu sehen.

2. Geschichtlicher Abriss zu den Präzisionsnivellements an der deutschen Ostseeküste

Bis in die sechziger Jahre des 19. Jahrhunderts beruhten weiträumige geodätische Höhenbestimmungen in Deutschland im Wesentlichen auf dem Messverfahren des trigonometrischen Nivellements (PASCHEN, 1882). Die Einführung und Weiterentwicklung der Methode des geometrischen Nivellements ermöglichte eine erhebliche Steigerung der Genauigkeit der Höhenmessung. Daraufhin beschloss die Konferenz der Europäischen Gradmessung 1864, „... dass thunlichst alle bisher ausgeführten trigonometrischen Höhenbestimmungen durch geometrische Nivellements ersetzt werden möchten, damit so neben dem sich über alle Europäischen Staaten erstreckenden Dreiecksnetze auch ein den heutigen Anforderungen der Wissenschaft entsprechendes Höhennetz vorhanden sei ...“ (NAGEL, 1886).

Dieser Anregung folgend wurden 1869 auch im Bereich der deutschen Ostseeküste landesweite präzise geometrische Nivellements initiiert. Begründet durch die damaligen administrativen Gegebenheiten wurden entlang der Küste von unterschiedlichen Institutionen Höhenfestpunktnetze angelegt und beobachtet.

Zu den frühesten geometrischen Nivellements in der Region zählen die der Großherzoglich Mecklenburgischen Landesvermessung (GMLV), welche eine von 1869 bis 1873 vermessene Linie von Wismar nach Warnemünde einschließen (PASCHEN, 1882). Die resultierenden Festpunkthöhen wurden ursprünglich auf den Nullpunkt des Pegels Wismar bezogen, es wurden für sie jedoch auch Höhen über N.N. veröffentlicht.

Ebenfalls 1869 begannen die Nivellements der Trigonometrischen Abteilung der Landesaufnahme Preußens (TALP), in deren Zuge bis 1874 die küstenparallelen Linien von Flensburg bis Swinemünde (Swinoujscie) sowie 1888 und 1889 die Linien Stralsund–Arkona und Plön–Marienleuchte fertiggestellt wurden (TAL, 1875). Abb. 1 zeigt eine Karte des Nivellementsnetzes der Preußischen Landesaufnahme, das im Bereich der Ostseeküste hauptsächlich dem Verlauf von Landstraßen folgte. Die ermittelten Festpunkthöhen wurden zunächst in Bezug auf den Nullpunkt des Pegels Neufahrwasser angegeben, im Jahr 1879

wurde jedoch der Normalhöhenpunkt (N.H. 1879) an der Berliner Sternwarte als einheitlicher Datumspunkt für das deutsche Höhenetz angelegt und durch Nivellement mit 37,000 m über dem Nullpunkt des Pegels Amsterdam bestimmt (SCHREIBER, 1879). Die auf diesen Normalhöhenpunkt bezogenen Höhen werden als „Höhen über Normal-Null (N.N.) im alten System“ bezeichnet.



Abb. 1: Verlauf der Nivellementslinien der Trigonometrischen Abteilung der Landesaufnahme Preußens, die in den Jahren 1869–1889 beobachtet wurden (SCHREIBER, 1879)

Auch die Gradmessungsnivellements des Königlich Geodätischen Instituts Potsdam (GIP) begannen 1869 (SEIBT, 1883). An der Ostseeküste ist vor allem die 1883 bis 1884 beobachtete Linie Anklam–Cuxhaven von Bedeutung, die vorrangig Eisenbahnstrecken folgt. Als Bezugshorizont für die bestimmten Höhen diente der Nullpunkt des Pegels Swinemünde, sie wurden jedoch auch in N.N. im alten System überführt.

Im Auftrage des Geodätischen Instituts Potsdam führte die Trigonometrische Abteilung der Landesaufnahme Preußens in den Jahren 1896 bis 1898 ein spezielles Ostseeküstennivellement (OKN1) durch, das die vom Geodätischen Institut betreuten Pegel zwischen Marienleuchte und Stolpmünde (Ustka) miteinander verband und Hinweise auf Höhenänderungen der Festpunkte der Preußischen Landesaufnahme geben sollte (TAL, 1898). Der Schleifenschluss zum Normalhöhenpunkt in Berlin wurde bis zum Jahr 1901 vollzogen. Der

Das Küstennivellement.

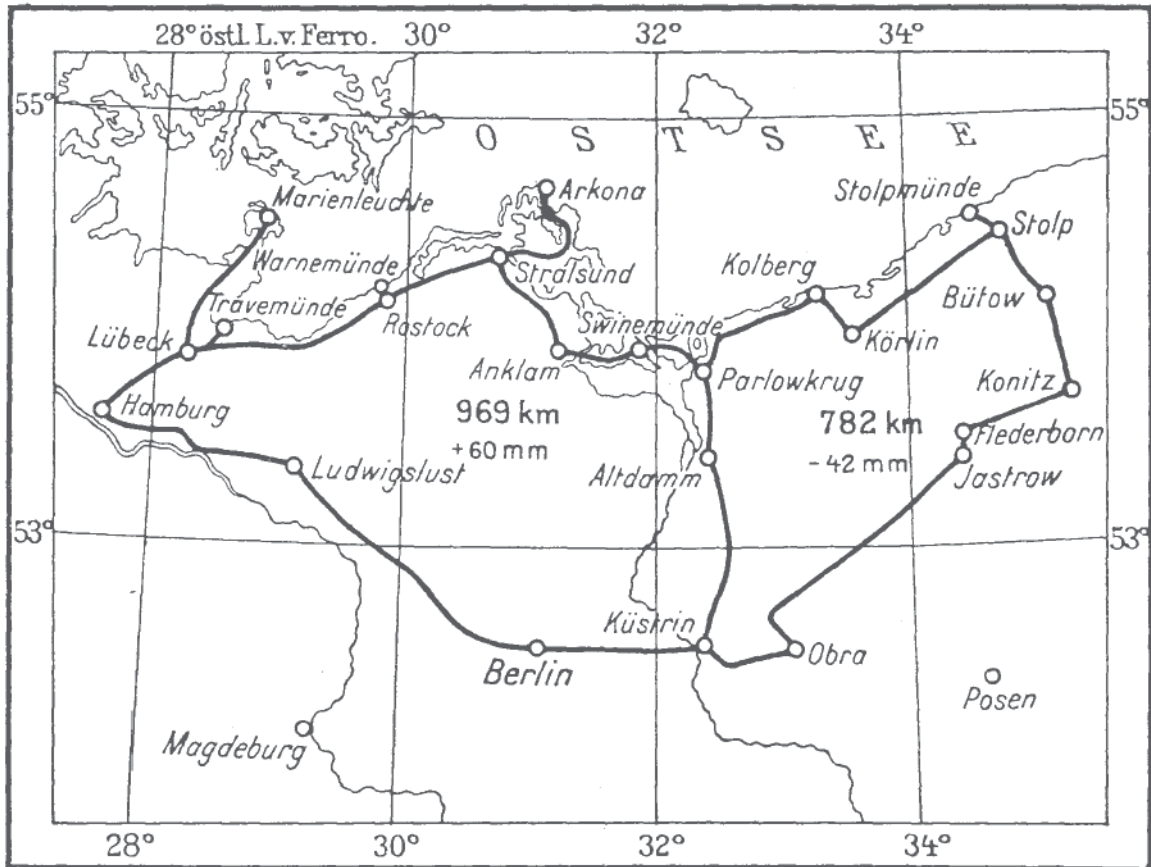


Abb. 2: Linienverlauf des Ostseeküstennivellements, das in den Jahren 1896–1901 im Auftrag des Geodätischen Instituts Potsdam durch die Trigonometrische Abteilung der Landesaufnahme Preußens ausgeführt wurde (TAL, 1898)

Linienverlauf dieses Nivellements ist in Abb. 2 wiedergegeben. Die gewonnenen normal-orthometrischen Höhen wurden über N.N. zunächst im System des vorläufigen Küstennivellements, später im System des Geodätischen Instituts Potsdam angegeben.

1906 führte das Büro für Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen geometrische Nivellements zwischen Stralsund und Dierhagen aus (BHW, 1906), deren Ergebnisse an die von der Preußischen Landesaufnahme bestimmten Höhen über N.N. im alten System von drei Anschlusspunkten eingerechnet wurden (BHW, 1906).

Zerstörung und Instabilitäten der von der Trigonometrischen Abteilung der Preußischen Landesaufnahme angelegten und offenbar ungeeignet vermarkten Höhenfestpunkte machten schon bald Wiederherstellungsarbeiten und schließlich eine vollständige Erneuerung des Nivellementsnetzes notwendig. Diese wurde 1913 von der trigonometrischen Abteilung des Reichsamtes für Landesaufnahme (RAfL) in Angriff genommen (RfL, 1932), allerdings bis zum zweiten Weltkrieg nicht abgeschlossen. Die letzten Messungen im Küstenbereich der Ostsee erfolgten 1944. Abb. 3 vermittelt einen Auszug aus dem bearbeiteten Nivellementsnetz. Vor dem Abriss der Berliner Sternwarte war 1912 ein neuer Fundamentalpunkt (N.H. 1912) in Berlin-Hoppegarten angelegt worden, der jedoch denselben Bezugshorizont wie der N.H. 1879 repräsentiert (MAJOR, 1996). Ausgehend von diesem unveränderten Höhendatum

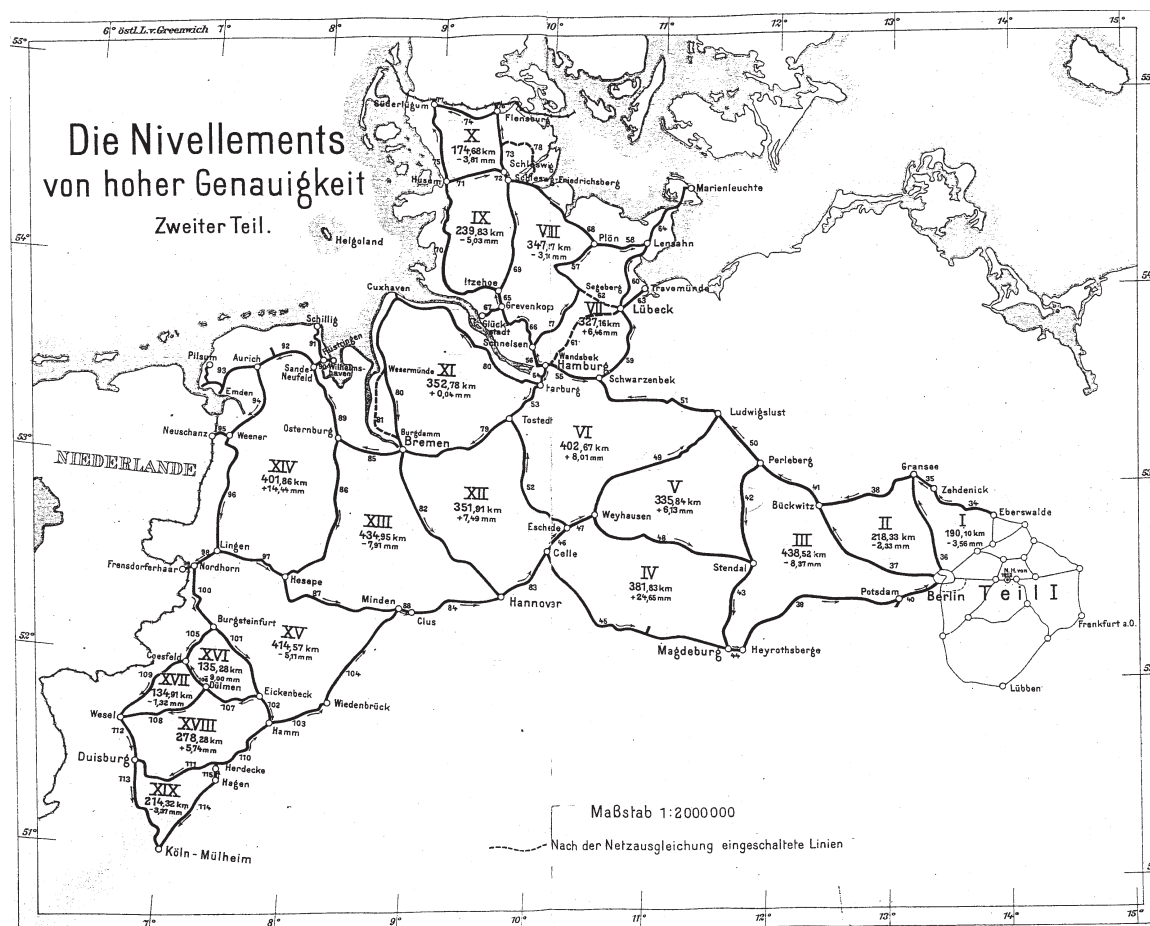


Abb. 3: Ausschnitt über den Verlauf von Nivellementslinien des Reichsamtes für Landesaufnahme in Norddeutschland, die in den Jahren 1910–1926 gemessen wurden (RfL, 1927)

wurden für die (erneut) nivellierten Festpunkte neue, normalorthometrische, als „N.N. im neuen System“ bezeichnete Höhen bestimmt.

Nivellements und Höhensysteme waren nach dem zweiten Weltkrieg von der Teilung Deutschlands beeinflusst. An der Ostseeküste Schleswig-Holsteins fanden zwischen 1950 und 1957 Messungen für das 1962 abgeschlossene Nivellementsnetz 1960 (DHHN60) der Bundesrepublik Deutschland statt (AdV, 1975). Die Linienführung wurde hier gegenüber den vorausgegangenen Nivellements über weite Strecken verändert. Im Ergebnis lagen normalorthometrische Höhen über N.N. im neuen System mit Anschluss an einen Fundamentalpunkt in Wallenhorst bei Osnabrück vor. Von 1980 bis 1985 durchgeführte Wiederholungsmessungen führten zum Deutschen Haupthöhennetz 1985 (DHHN85) (AdV, 1993).

Zwischen 1954 und 1959 erfolgten an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns die Messungen für das Staatliche Nivellementsnetz 1956 der Deutschen Demokratischen Republik (SNN56) 1. (1954–1956) und 2. Ordnung. Für die Festpunkte wurden Normalhöhen über dem Nullpunkt des Pegels Kronstadt bestimmt und als Höhen bezüglich Höhennull (H.N.) (vgl. HUPFER u. a., 2003) bezeichnet. Eine vollständige Wiederholungsmessung des SNN56 wurde 1974 bis 1982 (1. Ordnung 1974–1976) durchgeführt. Das daraus unter Anschluss an die 1956 ermittelte Normalhöhe des Haupthöhennpunktes Hoppegarten entstandene Staatliche Nivellementsnetz 1976 (SNN76) weist ebenfalls Normalhöhen bezüglich Pegel Kron-

stadt aus. Zuvor war 1966 und 1967 ein Ostseeküstennivellement (OKN2) entlang der küstennahen Linien des SNN56 erfolgt (SCHNEIDER, 1968).

Von 1990 bis 1992 fanden schließlich Verbindungsmessungen zwischen den Nivellementsnetzen der alten und neuen Bundesländer statt. Sie mündeten in das einheitliche Deutsche Haupthöhennetz 1992 (DHHN92), das im Ergebnis einer geschlossenen Ausgleichung der Nivellements für das SNN76 und das DHHN85 Normalhöhen bezüglich des Pegelnullpunktes in Amsterdam als „Höhen über Normalhöhennull“ (N.H.N.) ausweist (AdV, 1995; MAJOR, 1996).

Aus dem kurzen Abriss wird deutlich, dass einerseits Präzisionsnivellements insbesondere im küstennahen Raum Deutschlands auf eine lange Tradition zurückblicken und dass andererseits im Laufe ihrer wechselvollen Geschichte eine Reihe unterschiedlicher Höhensysteme zur Veröffentlichung und Anwendung kamen. Diese unterschieden sich nicht nur infolge der zu Grunde liegenden Messdaten, sondern auch hinsichtlich ihres Bezugshorizonts, der Höhendefinition und der Meterkonvention (legaler/internationaler Meter). Tab. 1 gibt einen Überblick über die an der deutschen Ostseeküste realisierten Höhensysteme.

Tab. 1: Höhensysteme an der Ostseeküste Deutschlands

	Messung	Bezeichnung	Datumspunkt	Pegel	Höhen	Meter
GMLV	1869–1873	ü. P. Wismar	P. Wismar	Wismar	– *	legal
TALP	1869–1889	N.N. a. S.	N.H. 1879	Amsterdam	– *	legal
GIP	1869–1884	N.N. a. S.	N.H. 1879	Amsterdam	– *	legal
OKN1	1896–1901	N.N. v. K.	N.H. 1879	Amsterdam	normalorth.	int.
RfLA	1913–1941	N.N. n. S.	N.H. 1912	Amsterdam	normalorth.	int.
SNN56	1954–1959	H.N. 56	N.H. 1912	Kronstadt	Normalh.	int.
DHHN60	1947–1962	N.N. n. S.	UF I Wallenh.	Amsterdam	normalorth.	int.
SNN76	1974–1982	H.N. 76	N.H. 1912	Kronstadt	Normalh.	int.
DHHN85	1980–1985	N.N. n. S.	UF I Wallenh.	Amsterdam	normalorth.	int.
DHHN92	(1990–1992)	N.H.N.	UF I Wallenh.	Amsterdam	Normalh.	int.

* keine Korrekturen wegen Konvergenz der Niveauflächen und wegen Schwereanomalien angebracht

In Folge dessen weisen identische Festpunkte in den verschiedenen Systemen unterschiedliche Höhen auf, die jedoch nicht notwendigerweise tatsächliche vertikale Bewegungen des Festpunktes zwischen den Nivellements widerspiegeln. Zur Illustration sind in Tab. 2 die Höhen ein und desselben Festpunktes an der Kirche in Warnemünde in verschiedenen Systemen angegeben.

Tab. 2: Höhe eines Nivellements festpunktes an der Kirche in Warnemünde in verschiedenen Höhensystemen

Nivellement	Quelle	Höhenangabe	Höhe [m]
GIP	SEIBT, 1888	N.N. a.S.	2,457
TALP	TAL, 1888	N.N. a.S.	2,389
OKN1	TAL, 1898	N.N. v. K.	2,347
RfLA	RfL, 1945	N.N. n. S.	2,404
SNN76	BKG, 2002	H.N. 76	2,253

Mit wachsender praktischer Erfahrung im geometrischen Präzisionsnivellement entwickelte sich die Methodik der Beobachtung und Auswertung, die Instrumententechnik und Festpunktvermarkung stetig weiter. Das äußert sich insbesondere in der zunehmenden Verbesserung der Messgenauigkeit, die vom mittleren Kilometerfehler aus streckenweisen Widersprüchen m_1 widerspiegelt wird. Dieser Genauigkeitsparameter sowie Details zur Beobachtungstechnologie sind in Tab. 3 für die Präzisionsnivellements an der Ostseeküste gegenübergestellt. Abb. 4 gibt einen generalisierten Überblick über die für den Küstenbereich der Ostsee relevanten Nivellements und veranschaulicht die Entwicklung der erreichten Messgenauigkeit.

Tab. 3: Präzisionsnivellements an der deutschen Ostseeküste, Genauigkeit und Messtechnologie

	Mittlerer Kilometerfehler m_1 [mm]	Beobachtungsreihenfolge	Zielweite [m]	Nivellierlatte
GMLV	2,59	R V	75 ... 112	Holz
TALP	1,33	$2 \times$ R V	< 50	Holz
GIP	0,56	$2 \times$ R V V R	15 ... 100	Holz
OKN1	0,58	R V V R	< 50	Holz
BHW	0,39	- *	- *	Holz
RAF L	0,34	R V V R	< 50	Holz
SNN56	0,28	R V V R	< 40 / 50	Invar
DHHN60	0,36	R V V R	< 40 / 50	Invar
OKN2	0,28	R V V R	< 50	Invar
SNN76	0,38	R V V R	< 40 / 50	Invar
DHHN85	0,33	R V V R	< 40	Invar

* nicht bekannt

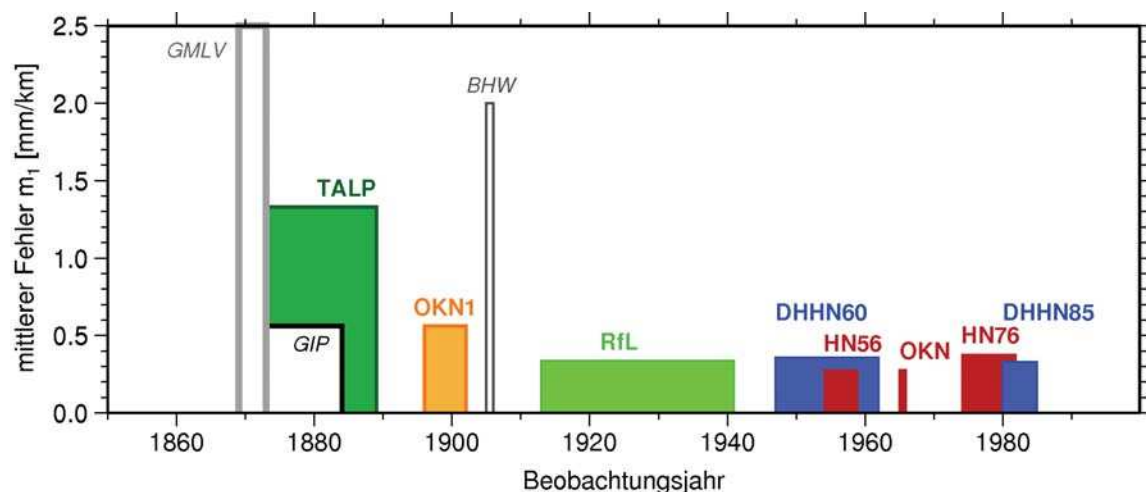


Abb. 4: Schematischer Überblick über zeitliche Verteilung, Dauer und Messgenauigkeit der Präzisionsnivellements an der deutschen Ostseeküste

Zur Vorhaltung eines Höhennetzes mit präzisen Festpunkthöhen ist jedoch nicht allein eine hohe Beobachtungsgenauigkeit, sondern ebenso eine dauerhaft stabile Vermarkung der Festpunkte von Nöten. Das wurde schon bald erkannt, und beim Aufbau der frühen Nivellementsnetze wurde der Vermarkung große Bedeutung beigemessen. Die beispielsweise aus dem Verlust der von der Preußischen Landesaufnahme unmittelbar neben den Chausseen

errichteten Nummernbolzen gewonnenen Erfahrungen fanden in den folgenden Punktvermarkungen Berücksichtigung. Als besonders zuverlässig haben sich zumeist an Kirchen eingebrachte Höhenmarken und Mauerbolzen erwiesen. Abb. 5 zeigt Beispiele für die Markierungen der im Zuge verschiedener Nivellements angelegten Festpunkte.



Abb. 5: Beispiele für erhaltene Vermarkungen von Nivellements Punkten früherer Höhennetze. Höhenmarke (oben links) und Mauerbolzen (oben Mitte und rechts) der Trigonometrischen Abteilung der Königlich Preußischen Landesaufnahme, Höhenmarken des Geodätischen Instituts Potsdam (unten links) und des Reichsamtes für Landesaufnahme (unten rechts)

3. Vorliegende Nivellementsdaten

An der deutschen Ostseeküste wurden insgesamt elf Präzisionsnivellements ausgeführt. Sie erstrecken sich über eine zeitliche Basis von 123 Jahren (1869–1992) und können genähert zu acht Messepochen zusammengefasst werden. Diese Beobachtungsgrundlage stellt eine weltweit nahezu einmalige Situation dar. Vergleiche zwischen den wiederholten Messungen enthalten ein hervorragendes Potenzial zur Ableitung von Höhenänderungen der Festpunkte, die wiederum hinsichtlich rezenter relativer vertikaler Krustendeformationen interpretiert werden können.

Grundlage für dahingehende Analysen ist eine umfassende, vollständige Datenbasis der Messungen und zusätzlicher Informationen. Neben den pro Epoche ermittelten Festpunkthöhen sollte man vorzugsweise auf möglichst originale Messwerte (Einzelmessungen streckenweiser Höhenunterschiede, Streckenlängen) zurückgreifen. Die notwendigen Zusatzinformationen schließen detaillierte Festpunktbeschreibungen, Angaben zu Zeitpunkt, Methodik, Instrumententechnik und Genauigkeit der Messungen, sowie Einzelheiten der den gewonnenen Festpunkthöhen zu Grunde liegenden Höhensysteme und Berechnungen ein.

Die Punktbeschreibungen dienen als Grundlage für die eindeutige Feststellung von Punktidentitäten zwischen den Messepochen. Auf Grund der angewandten Messanordnung kann auf systematische Effekte, und aus dem Berechnungsalgorithmus auf deren Einfluss auf die vorliegenden Ergebnisse geschlossen werden. Eine Quantifizierung der Messfehler ist schließlich wichtig, um Aussagen über die Signifikanz der ermittelten Höhenänderungen treffen zu können.

Die Ergebnisse der Nivellements sind zumeist in Form von Höhenverzeichnissen veröffentlicht worden. Sie enthalten linienweise Lagebeschreibungen, Entfernungen und die ausgeglichenen Höhenwerte der Nivellementsunkte. Oft sind ihnen Vorbemerkungen vorangestellt, denen wichtige Zusatzinformationen entnommen werden können. Für einige Messepochen sind in verschiedenen Archiven auch noch unveröffentlichte Aufzeichnungen und Linienverzeichnisse mit den originalen Messelementen, das heißt unausgeglichenen und unkorrigierten Höhenunterschieden, erhalten. Diese waren für die vorliegenden Untersuchungen von besonderem Wert. Für die Nachkriegsepochen lagen sie am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Leipzig bereits in digitaler Form vor. Wichtige Aufzeichnungen der historischen Nivellements sind jedoch, zum Teil durch Kriegswirkungen, verloren gegangen. An der Ostseeküste betrifft das vor allem die Linienverzeichnisse der Preußischen Landesaufnahme und des frühen Ostseeküstennivellements sowie einzelner Nivellementslinien des Reichsamtes für Landesaufnahme. In Folge dessen sind frühere Messungen heute nur unvollständig dokumentiert. Das Ostseeküstennivellement des Geodätischen Instituts Potsdam ist beispielsweise lediglich durch ein unveröffentlichtes, handschriftliches Verzeichnis nicht ausgeglichener Festpunkthöhen belegt. In Abb. 6 ist ein Auszug aus diesen Originalaufzeichnungen wiedergegeben.

Stk.	Festpkt.	Höhe	Bezeichnung und örtliche Lage	Höhenveränderung
<u>III. Linie Gvarrenfäsa - Koralgrund, Havn-Lag, Gafst II, Linie 22 und Gafst III, Linie 16) 187,1 km.</u> gemessen 1896.				
1.	Hl. L.	^m 2,879	Gvarrenfäsa, Gaffarab	^m 2,878
2.	2550.	11,317	Gaiffen Lükark-Äflösting, bei St. 6,0	11,317
3.	2551.	3,878	bei St. 8,0	3,892
4.	G. Hl.	18,815	Äflösting, Kivoffjörum	18,825
5.	Hl. L.	18,878	Äflösting, Künja, Pirkaita	18,888
6.	Hl. L.	14,748	Äflösting, Pjörula	14,761
7.	2552.	8,294	bei St. 9,4	8,290
8.	2553.	16,610	Gaiffen Palumbloof-Äflösting, am Aliv Koralgrundstein	16,629
9.	2554.	22,651	am Koralgrundstein	22,655
10.	Hl. L.	34,934	Palumbloof, Gafst 6,0	-

Abb. 6: Auszug aus dem Höhenverzeichnis des Ostseeküstennivellements, das in den Jahren 1896–1898 im Auftrag des Geodätischen Instituts Potsdam ausgeführt wurde (TAL, 1898, Brandenburgisches Landeshauptarchiv Potsdam). Diese unveröffentlichten Originalaufzeichnungen dienen als Grundlage für die vorgestellten Untersuchungen.

In Tab. 4 sind die in Erfahrung gebrachten und bearbeiteten Quellen zu Messdaten und Dokumentationen der Präzisionsnivellements zusammengetragen. Sie bilden die Grundlage für die Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee.

Tab. 4: Quellen zu den Präzisionsnivellements an der deutschen Ostseeküste. Abkürzungen: HU: gemessene Höhenunterschiede; H ü W, NN: Höhen über Pegel Wismar und NN altes System; H ü NF: Höhen über Pegel Neufahrwasser; ZI: Zusatzinformationen; aS: altes System; vK: System des vorläufigen Küstennivellements; nS: neues System

Nivellement	Quelle	Inhalt	Linien
GMLV	PASCHEN, 1882	HU, H ü W, NN	Wismar–Warnemünde
TALP	TAL, 1875	HU, H ü NF, ZI	Anklam–Stralsund–Lübeck
	TAL, 1886	NN aS	Lübeck–Anklam–Parlowkrug u.a.
	TAL, 1889	NN aS	Rügen
	TAL, 1890	NN aS	Rügen
	TAL, 1892	NN aS	Anklam–Lübeck
	TAL, 1896	NN aS	Lübeck–Anklam–Parlowkrug u.a.
	TAL, 1897	NN aS	Lübeck–Apenrade, Plön–Marienleuchte u.a.
	TAL, 1914	NN aS	Herrenfähre–Anklam, Rügen u.a.
GIP	SEIBT, 1888	HU, NN aS, ZI	Anklam–Cuxhaven
OKN1	TAL, 1898	NN vK	Lübeck–Anklam, Lübeck–Marienl., Rügen
BHW	BHW, 1906	NN aS	Stralsund–Ribnitz
RAfL	RfL, 1937	vorl. NN nS	Wismar–Doberan, Rostock–Rövershagen u.a.
	RfL, 1940	HU	Rügen
	RfL, 1941	NN nS	Rövershagen–Swinemünde, Rügen
	RfL, 1944	HU	Wismar–Stralsund
	RfL, 1945	HU	Bad Doberan–Rövershagen
		NN nS	Lübeck–Parlowkrug, Rügen, u.a.
SNN56	BKG, 2002	HU, HN, ZI	
DHHN60	BKG, 2002	HU, NN nS	
	AdV, 1975	NN aS, ZI	
OKN2	BKG, 2002	HU, ZI	
SNN76	BKG, 2002	HU, HN, ZI	
DHHN85	BKG, 2002	HU, NN nS	
	AdV, 1993	NN aS, ZI	
DHHN92	BKG, 2002	HU	
	AdV, 1995	ZI	

Die an der deutschen Ostseeküste durchgeführten Präzisionsnivellements unterscheiden sich untereinander in Ausdehnung, Dichte, Verlauf und Unterteilung der Nivellements-linien. Für die Untersuchung von Höhenänderungen waren nur wiederholt gemessene Lini-enabschnitte von Nutzen. Die Auswertung und Analyse beschränkte sich daher auf eine räumlich begrenzte Auswahl der insgesamt dokumentierten Messungen. Das zentrale Unter-suchungsobjekt stellte die ununterbrochene, im Wesentlichen küstenparallele Nivellements-linie von Flensburg nach Zirchow dar. Sie wurde ergänzt durch Nebenlinien, die von der Hauptlinie ausgehend nach Marienleuchte (Insel Fehmarn), Warnemünde, Arkona und Thiessow (Insel Rügen) sowie Zirchow (Insel Usedom) führen. Einen Überblick über den Verlauf der untersuchten Nivellements-linien vermittelt Abb. 7.

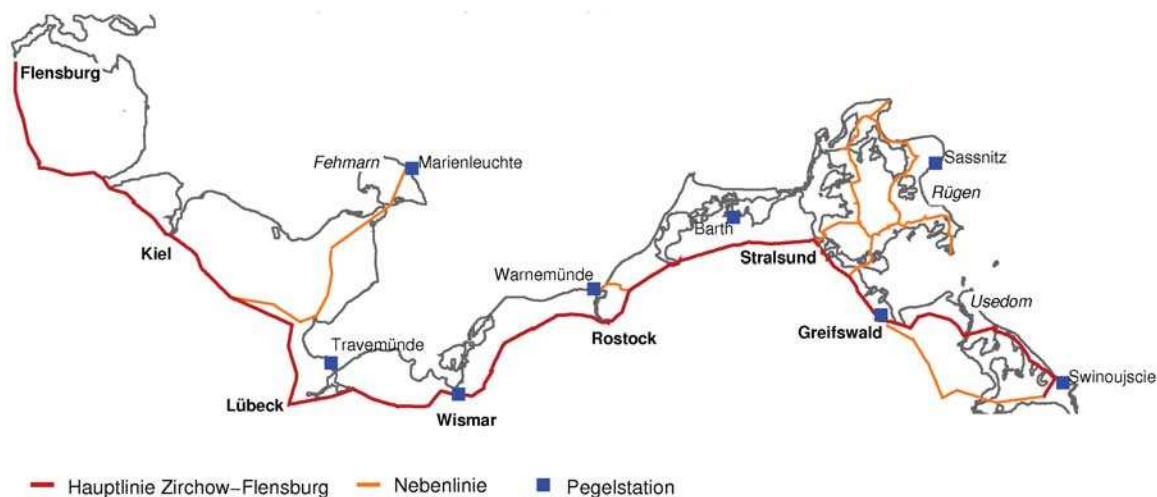


Abb. 7: Übersicht über die bearbeiteten Nivellementslinien. In die Untersuchungen einbezogene Küstenpegel sind ergänzt

4. Zur Auswertung der Messdaten

Die vorliegenden Nivellementsdaten gestatten die Ableitung von Profilen der relativen Höhenänderungsgeschwindigkeiten entlang der Nivellementslinien. Voraussetzung für die Bestimmung zeitlicher Änderungen von Höhenunterschieden ist das Vorliegen wiederholter Messungen zwischen identischen Punkten. Der zeitliche Verlauf der Höhenänderungen kann dabei umso detaillierter, beziehungsweise die Änderungsgeschwindigkeit umso zuverlässiger ermittelt werden, je mehr Wiederholungsmessungen verfügbar sind. Von den Festpunkten des Gradmessungsnivellements und des Büros für Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen sind in den folgenden Messepochen nur verschwindend wenige erneut nivelliert worden. Diese beiden Nivellements fanden deshalb bei der Auswertung hinsichtlich Höhenänderungen keine Berücksichtigung. Weiterhin wurde das Nivellement der Großherzoglich Mecklenburgischen Landesvermessung infolge seiner erheblich geringeren Genauigkeit (Tab. 3, Abb. 4) von den Untersuchungen ausgeschlossen.

Die räumliche Verteilung der wiederholt nivellierten Festpunkte und die Anzahl der letztendlich vorliegenden Messepochen ist in Abb. 8 illustriert. Hier werden Inhomogenitäten in der Datengrundlage entlang der Ostseeküste deutlich. Für lange Linienabschnitte (östlich von Greifswald, Insel Rügen, westlich von Wismar) liegen nur maximal drei oder vier Beobachtungen vor. Die auffallend geringere Dichte wiederholt eingemessener Punkte in Schleswig-Holstein ist auf die veränderte Linienführung der Nivellements nach dem Kriege zurückzuführen.

Die Ableitung von Höhenänderungen aus Nivellements kann prinzipiell auf der Grundlage von Messwerten (unkorrigierte Höhenunterschiede) oder Auswertergebnissen (Höhen) erfolgen (z.B. SCHNEIDER, 1968). Die für die untersuchten Nivellements vorliegenden Festpunkthöhen weisen für die Höhenänderungsbestimmung wesentliche Inhomogenitäten auf (Tab. 1). Diese umfassen Unterschiede in angebrachten Korrekturen (Korrekturen wegen Konvergenz der Niveauflächen, Schwereanomalien, Gezeitenkorrektur), im angewandten Ausgleichungsverfahren, in der Maßeinheit (Meterkonvention), Datumsfestlegung und Definition (Normal-/normalorthometrisch) der Höhen. Ihre betragsmäßigen Einflüsse auf die angegebenen Festpunkthöhen sind als systematische Artefakte tatsächlichen Vertikal-

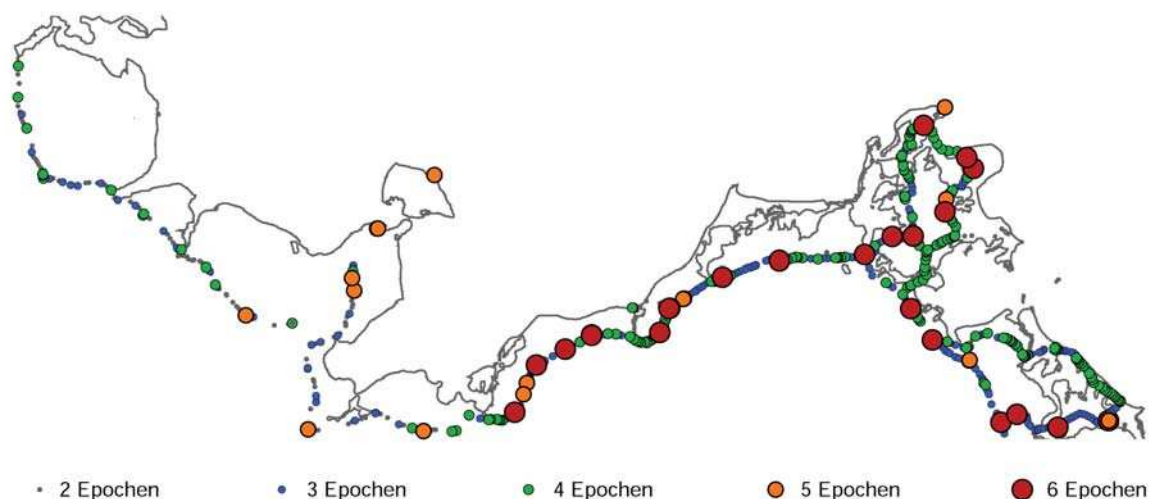


Abb. 8: Wiederholungsmessungen an Nivellements Punkten. Dargestellt ist die Anzahl der für die Festpunkte vorliegenden Messepochen

bewegungen überlagert, können auf der Grundlage der verfügbaren Dokumentationen jedoch im Einzelnen nicht nachvollzogen werden.

Ein bedeutender Teil dieser unerwünschten systematischen Effekte kann allerdings vermieden werden, wenn anstelle der Höhen auf die unkorrigierten Messwerte der Höhenunterschiede zwischen den Festpunkten zurückgegriffen wird. Aus diesem Grund erfolgte die hier vorgestellte Auswertung der Nivellementsdaten auf der Basis der zwischen den Nivellements Punkten gemessenen Höhenunterschiede. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass diese Höhenunterschiede nur in geringem Maße (höchstens wenige Millimeter) systematischen Einflüssen unterworfen sind. Dies bestätigt eine Abschätzung einiger verbleibender Einflüsse.

Für die historischen Nivellements vor 1945, für die lediglich Höhenverzeichnisse, nicht aber Linienverzeichnisse mit den originalen Messelementen vorliegen, mussten die Höhenunterschiede aus den Höhen aufeinanderfolgender Festpunkte gewonnen werden. Durch die Bildung der Höhendifferenzen wurde der Einfluss von Datumsübergängen eliminiert. Die Maßstabsänderung infolge der Nutzung des legalen Meters durch die Preußische Landesaufnahme wirkt sich infolge der geringen Höhenunterschiede in Küstennähe vernachlässigbar gering aus, für einen Höhenunterschied von 150 m erreicht ihr Einfluss 2 mm. Auch die Verfälschung der Höhenunterschiede durch angebrachte Korrekturen ist unbedeutend. An keine der historischen Nivellements wurden Schwereanomalien- und Gezeitenkorrekturen angebracht, lediglich die Messungen des Reichsamtes für Landesaufnahme und das frühe Ostseeküstennivellement wurden hinsichtlich der Niveauflächenkonvergenz korrigiert. Der Einfluss dieser breitenabhängigen Korrektur wurde beispielhaft entlang der Linie Arkona (Norden)–Zirchow (Süden) modelliert und überstieg dabei 2 mm nicht. Während die Festpunkthöhen der Preußischen Landesaufnahme (TALP) und des Reichsamtes für Landesaufnahme (RAfL) Ergebnisse einer Ausgleichung der Messfehler darstellen, sind die zu Grunde liegenden Höhenwerte für das frühe Küstennivellement frei von den Einflüssen einer Ausgleichung.

Die in den erschlossenen Dokumenten (Tab. 4) enthaltenen Nivellementsdaten wurden in einer einheitlichen Datenbank erfasst. Um eine homogene Analyse zu gewährleisten, mussten die Daten einheitlich strukturiert, verifiziert und auf Konsistenz geprüft werden. Die Identifizierung homologer Festpunkte in den Datensätzen der verschiedenen Nivellementsepochen

erfolgte auf der Grundlage der Punktbeschreibungen in den Originaldokumenten. Insbesondere für die zum Teil spärlich dokumentierten frühen Epochen waren zur eindeutigen Feststellung der Punktidentitäten Feldbegehungen von großem Wert. Die erstellte Datenbank umfasst 1940 Nivellementspunkte, die zu 5 Linien mit einer Gesamtlänge von ca. 1400 km zusammengefasst wurden, und Messdaten von sechs Epochen (acht Nivellements).

Der Höhenunterschied zwischen zwei beliebigen, durch eine ununterbrochene Nivellementlinie miteinander verbundenen Festpunkten wird durch Aufsummieren der in der Datenbank abgelegten streckenweisen Höhenunterschiede gewonnen. Liegen darüber hinaus Messungen zwischen beiden Punkten zu weiteren Epochen vor, so kann der zeitliche Verlauf der relativen Höhenänderung zwischen beiden Punkten aus dem Vergleich der aus den verschiedenen Epochen resultierenden Höhenunterschiede ermittelt und analysiert werden. Wenn der Nachweis rezenter vertikaler Erdkrustendeformationen im Mittelpunkt der Untersuchung steht, bietet sich eine Approximierung der zeitlichen Höhendifferenzänderungen zwischen den Epochen in Form eines linearen Trends an. Dieser Trend repräsentiert dann die mittlere vertikale Geschwindigkeit des einen relativ zum anderen Festpunkt. In Abb. 9 ist beispielhaft für vier Punktpaare die zeitliche Entwicklung der relativen Höhenunterschiede aus wiederholten Nivellements und der daraus geschätzte Höhenänderungstrend dargestellt.

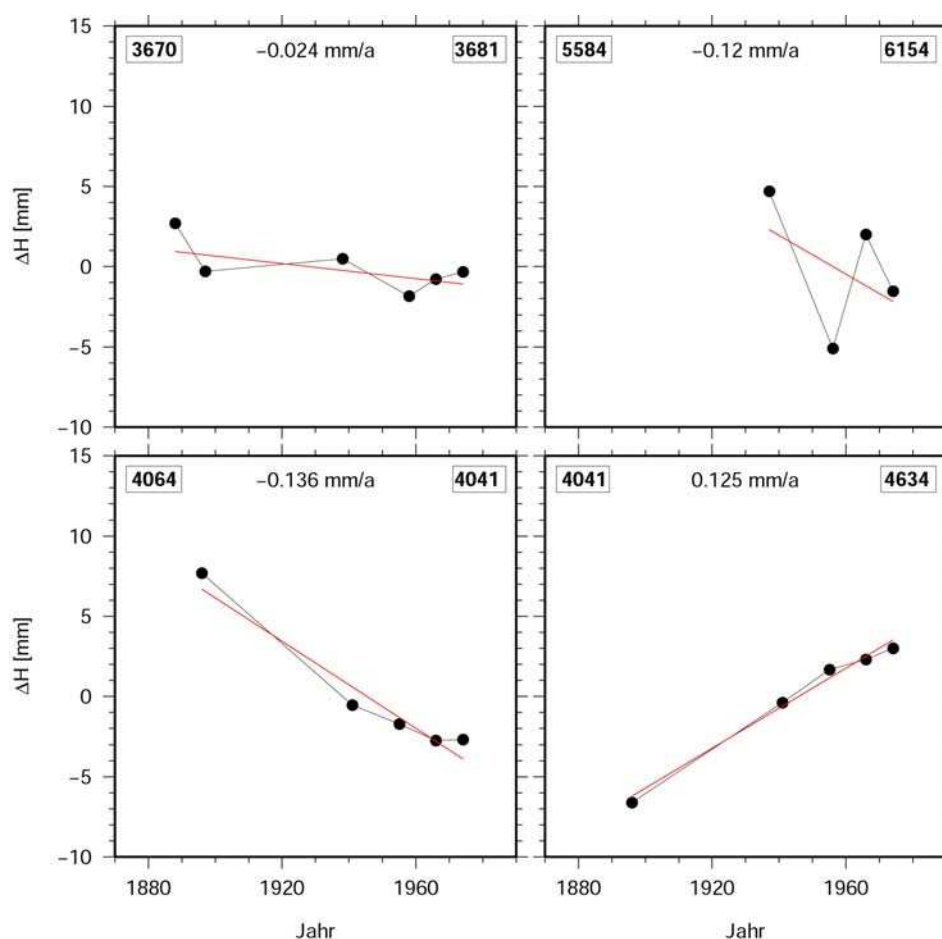


Abb. 9: Zeitliche Entwicklung von relativen Höhenunterschieden für vier Paare von Festpunkten aus Wiederholungsnivellements (schwarze Punkte, mittelwertreduziert) und daraus abgeleitete Höhenänderungsrate (rote Trendgerade). Oben links: Relative Hebung eines Punktes in Rambin (3670) gegenüber Samtens (3681); oben rechts: Murchin (5584) und Usedom (6154); unten: Gelbensande, Gasthaus (4041) relativ zu Gelbensande, Bahnhof (4634, rechts) und Damgarten, Kirche (4064, links)

Aus der sukzessiven Trendbestimmung für die Festpunkte einer Nivellementsline bezüglich eines gemeinsamen Referenzfestpunktes ergibt sich ein Profil der relativen Höhenänderungsraten entlang der Linie, das die räumliche Variation der Hebungs-/Senkungsgeschwindigkeit bezüglich des Referenzpunktes beschreibt. Bei der Auswahl der das Profil bildenden Nivellementspunkte ist dabei ein Kompromiss zwischen der räumlichen Auflösung des Profils und der Zuverlässigkeit der Trendbestimmung zu finden. Die maximal mögliche Auflösung entlang der Nivellementsline ergibt sich aus der Berücksichtigung aller mindestens zweimal nivellierten Festpunkte. Auf der Grundlage nur weniger Epochen bestimmte Höhenänderungstrends sind allerdings mit erhöhten Unsicherheiten behaftet. Die Beschränkung auf Festpunkte mit einer bestimmten Mindestepochenanzahl liefert zwar genauere Trends, vermindert jedoch ihre Zahl und räumliche Verteilung.

Diesem Dilemma wird dadurch begegnet, dass zunächst für die wenigen Festpunkte mit maximal möglicher Epochenanzahl zuverlässige relative Höhenänderungstrends ermittelt und anschließend durch schrittweises Verringern der Mindestepochenanzahl zunehmend verdichtet werden. Auf diese Weise können die detaillierten räumlichen Trendmuster aus wenigen Epochen in ihren Trendwerten an den Stützstellen verifiziert, beziehungsweise die räumlichen Gültigkeitsbereiche der zuverlässiger bestimmten Trendwerte präzisiert werden.

Das wird in Abb. 10 am Beispiel des Nivellementslinienabschnitts Flensburg–Elmschenhagen verdeutlicht. Die aus mindestens vier Nivellementsepochen bestimmten Höhenänderungstrends lassen weiträumige Muster des relativen Hebungs-/Senkungsverhaltens erkennen. Die Verdichtung des Ausschnitts zwischen den Festpunkten 2439 und 2965 durch Trends aus nur drei Messepochen macht deutlich, dass das relative Absinken des Punktes 2719 um ca. 3 cm in 100 Jahren lokal eng begrenzt ist.

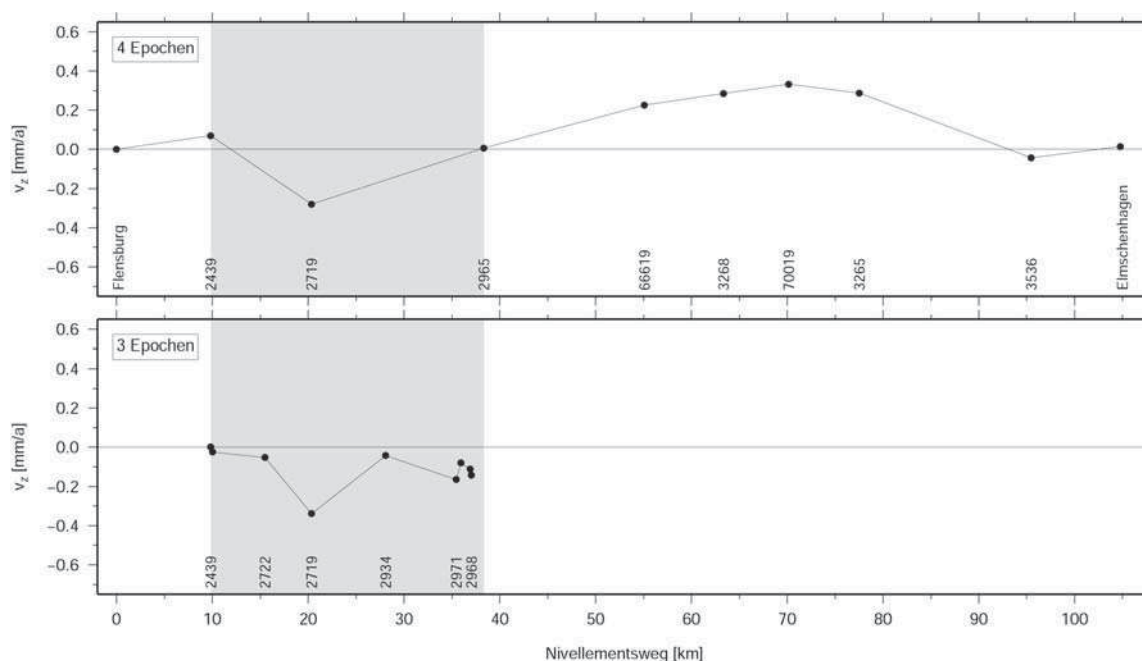


Abb. 10: Beispiel eines Profils der Höhenänderungsraten entlang des Linienabschnittes Flensburg–Elmschenhagen. Über die Nivellementsweglänge sind die aus mindestens vier Messepochen abgeleiteten Höhenänderungsraten relativ zum Festpunkt Flensburg, Nicolaikirche aufgetragen (oben). Die Hinzunahme von Festpunkten mit weniger Messepochen gestattet eine höhere räumliche Auflösung und belegt, dass das relative Absinken des Punktes 2719 lokal eng begrenzt ist (unten)

5. Relative Höhenänderungen entlang der Nivellementslinien

Nach dem beschriebenen Vorgehen wurden relative Höhenänderungstrendprofile für alle untersuchten und in Abb. 7 dargestellten Nivellementslinien bestimmt. Die erhaltenen Profile der relativen Höhenänderungsgeschwindigkeiten entlang der küstenparallelen Linie Flensburg–Zirchow sowie der beiden genähert nach Norden orientierten Linien Plön–Marienleuchte und Stralsund–Arkona sind in Abb. 11 wiedergegeben. Die Profile sind dazu bestimmt, ein möglichst zuverlässiges Bild der großräumigen Vertikalbewegungen im Küstengebiet der Ostsee zu vermitteln. Sie enthalten daher eine beschränkte Anzahl von Profilverpunkten, für die zu mindestens vier (Mecklenburg–Vorpommern) beziehungsweise drei (Schleswig–Holstein) Messepochen untereinander konsistente und plausible Höhenunterschiede vorliegen.

Für die küstenparallele Hauptlinie sind die Hebungs- und Senkungsgeschwindigkeiten relativ zum Nivellementsplatz Flensburg, Nicolaikirche angegeben. Insgesamt ergeben sich entlang der deutschen Ostseeküste nur geringe relative Höhenänderungstrends. Im Verlauf der Nivellementslinie variieren sie um maximal 0,5 mm/a. Das bedeutet, dass sich in 100 Jahren die Höhenunterschiede zwischen den Festpunkten um höchstens 5 cm ändern. Ungeachtet der geringen Beträge werden neben weiten Abschnitten homogenen Verhaltens Lokationen auffälliger Änderungen des Hebungs-/Senkungsregimes deutlich. Beim Vergleich verschiedener Profilverbereiche untereinander ist zu berücksichtigen, dass die variierende Profilverpunktdichte Unterschiede in der räumlichen Auflösbarkeit von Höhenänderungsmustern und somit in den bestimmbareren Maximalbeträgen relativer Höhenänderungen bedingt. Dies gilt insbesondere für die Abschnitte östlich von Damgarten. Des Weiteren ist zu beachten, dass den Profilverabschnitten unterschiedlich viele Messungen zugrundeliegen.

Die Profile Plön–Marienleuchte und Stralsund–Arkona in Abb. 11 belegen prinzipiell mit der Hauptlinie vergleichbare Höhenänderungsverhältnisse. Beide voneinander unabhängig bestimmten Profile lassen übereinstimmend eine Hebung der nördlichen relativ zu den südlichen Punkten erkennen. Für die Nivellementslinie nach Marienleuchte ergibt sich über eine Entfernung von 110 km eine relative Hebungsgeschwindigkeit von 0,2 mm/a, die relative Hebung von Arkona bezüglich Stralsund beträgt bei annähernd gleicher Linienlänge 0,3 mm/a. In beiden Profilver sind Abschnitte geringer Höhenänderungsvariabilität von Bereichen erhöhter Trendgradienten zu unterscheiden.

Die abgebildeten Trends spiegeln die Änderung des zwischen den Festpunkten gemessenen oder aus Höhenangaben abgeleiteten Höhenunterschieds wider, die sich aus den residualen Effekten von Messunsicherheiten und systematischen Einflüssen sowie tatsächlichen relativen Vertikalbewegungen zusammensetzt.

Der systematische Anteil von Messfehlern ist bereits in den frühen Präzisionsnivellements durch eine geeignete Messanordnung, Instrumententechnik und -kalibrierung weitgehend reduziert worden; dazu zählen die Effekte der Erdkrümmung, Refraktion, Ziellinienfehler sowie Maßstabsfehler und Einsinken der Nivellierlatten. Besondere Fehlereinflüsse sind für Stromübergangsnivellements in Betracht zu ziehen, wie sie auch zur Höhenübertragung vom Festland auf Inseln angewandt werden. Während sich der Nivellementsübergang zur Insel Rügen in einer im Rahmen der vorgestellten Arbeiten durchgeführten, gezielten Untersuchung als vergleichbar genau mit anderen Strecken erwiesen hat, könnte die in Abb. 9 (oben rechts) oben rechts ins Auge fallende Oszillation des Höhenunterschieds zwischen Murchin und Usedom Ausdruck für Unsicherheiten bei der Höhenübertragung über den Peenestrom sein. Für die aus Festpunkthöhen der Epochen TALP, OKN1 und RAfL gewon-

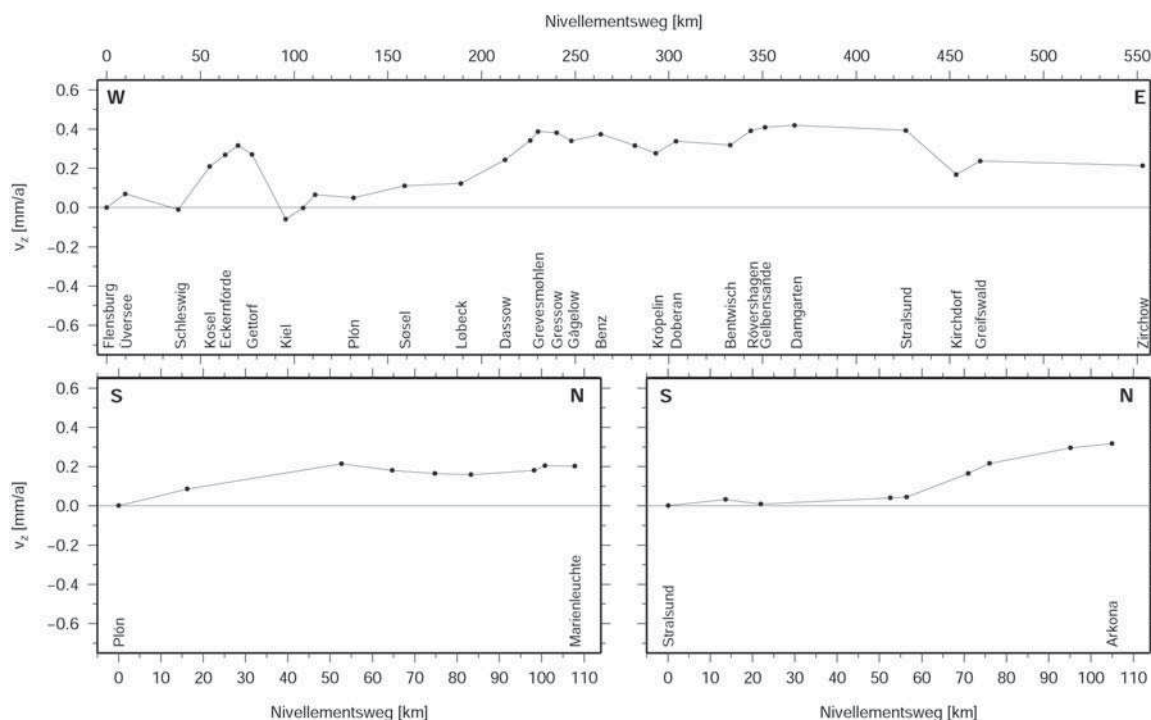


Abb. 11: Aus Wiederholungsnivellements gewonnene Profile relativer Höhenänderungsgeschwindigkeiten entlang der Nivellementslinien Flensburg–Zirchow (oben, Bezugspunkt Flensburg, Nicolaikirche), Plön–Marienleuchte (unten links, Bezugspunkt Plön, Nicolaikirche) und Stralsund–Arkona (unten rechts, Bezugspunkt Stralsund, Marienkirche)

nenen Höhenunterschiede sind zusätzlich systematische Auswirkungen von Ausgleichung sowie Maßstabsübergang (TALP) beziehungsweise Korrektur der Niveauflächenkonvergenz (OKN1, RAfL) zu berücksichtigen. Diese Einflüsse wirken vorrangig weiträumig, zwischen benachbarten Festpunkten dagegen nur gering.

Die Genauigkeit des geometrischen Nivellements ist stark entfernungsabhängig. Unter Zugrundelegung der für die einzelnen Nivellements angegebenen mittleren Kilometerfehler ergeben sich insbesondere für die langen Nivellementswege zwischen den wenigen zu allen Epochen beobachteten Festpunkten große formale Fehlermaße, die im Allgemeinen die Ausmaße der zeitlichen relativen Höhenänderungen übersteigen. Über kürzere Distanzen, zwischen Festpunkten mit wenigen gemeinsamen Messepochen, steigt hingegen die Unsicherheit der Trendbestimmung. Das veranschaulicht in Abb. 9 (oben links) ein Vergleich des aus sechs Beobachtungsepochen gewonnenen Trends mit den Ergebnissen der drei jüngsten Nivellements.

In Anbetracht all dessen sind die in Abb. 11 dargestellten Zahlenwerte der relativen Höhenänderungsgeschwindigkeiten mit Vorsicht zu betrachten. Zwischen benachbarten Profilpunkten festgestellte relative Höhenänderungen können hingegen als recht sicher eingeschätzt werden. Die geringe Ausprägung von Messfehlern und systematischen Effekten über kurze Distanzen erlaubt die Interpretation der ermittelten relativen Höhenänderungen zwischen nahe gelegenen Messpunkten als reale Vertikalbewegungen. Das geometrische Nivellement ist somit zwar nur bedingt dazu geeignet, über Entfernungen von mehreren hundert Kilometern vertikale Relativgeschwindigkeiten der im Untersuchungsgebiet auftretenden Größenordnung zu ermitteln. Es ist jedoch in der Lage, räumlich detailliert Variationen im Hebung-/Senkungsverhalten nachzuweisen.

Zwischen Nivellements Punkten festgestellte Vertikalbewegungen können vielfältige Ursachen haben. Hinsichtlich ihrer räumlichen Ausprägung lassen sie sich in punktuelle, lokale und regionale Effekte einteilen.

Punktuelle Vertikalbewegungen, wie sie infolge Instabilitäten der Vermarkung denkbar sind, erfassen lediglich einen individuellen Festpunkt. Häufiger erfolgt allerdings eine Verlagerung des Vermarkungsträgers, in der Regel massive Gebäude, infolge Setzungen. Das in Abb. 9 (unten) reflektierte Absinken des Festpunktes Gelbensande, Gasthaus gegenüber den nächstgelegenen Punkten Gelbensande, Bahnhof und Damgarten, Kirche dient hierfür als Beispiel und ist durch ein für Gebäudesetzungen typisches Abklingen der Senkungsraten gekennzeichnet.

Lokale Vertikaldeformationen äußern sich in gleichartigen Trends für kompakte, deutlich abgegrenzte Punktgruppen. Sie treten oft in urbanen Bereichen, beispielsweise infolge lokaler Bauwerksauflasten, Erdbauarbeiten, Grundwasseränderungen oder Ausspülungen auf. Die verstärkte Kompaktion in ehemaligen, heute verfüllten Flusstälern stellt eine weitere Ursache für lokale Senkungen dar.

Regionale vertikale Erdkrustendeformationen an der südlichen Ostseeküste können schließlich auf Neotektonik oder die postglaziale Landhebung zurückgeführt werden. Neotektonisch verursachte Hebungen, Senkungen und Kippungen erfassen große, durch begrenzte, homogene Profilabschnitte repräsentierte Blöcke. Die isostatische Ausgleichsreaktion der Erdkruste auf ihre Entlastung seit der letzten Vereisung Nordeuropas stellt hingegen eine bruchlose vertikale Deformation von überregionaler Ausdehnung und mit einem Hebungsmaximum im nördlichen Fennoskandien dar. In Abb. 12 ist ein Modell der rezenten vertikalen Erdkrustendeformation im Ostseeraum als Folge der visko-elastischen Reaktion auf die verschwundene Eisauflast entsprechend dem Modell ICE4G (PELTIER, 1998) dargestellt.

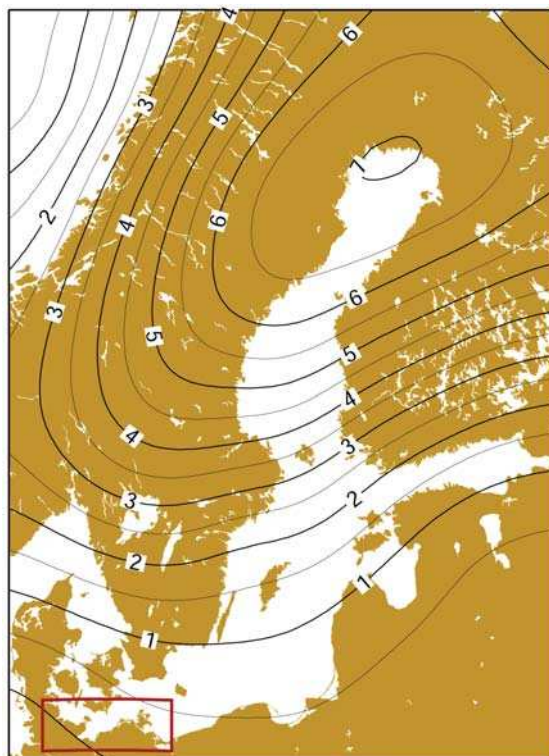


Abb. 12: Modellierte rezente vertikale Krustenbewegungen (in mm/a) infolge der postglazialen isostatischen Ausgleichsreaktion im Ostseeraum auf der Grundlage des Eisauflastmodells ICE4G (PELTIER, 1998)

Sollen die Nivellementsergebnisse hinsichtlich Deformationen der Erdkruste interpretiert werden, so sind die überlagerten punktuellen und lokalen Effekte sorgfältig zu separieren. Festpunkte, die von solchen engräumigen, infolge der Schwerkraft zumeist als Senkung ausgeprägten Bewegungen gekennzeichnet sind, werden hierzu von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Dieser Bedingung ist in Abb. 11 Rechnung getragen, indem Festpunkte mit Anzeichen auf punktuelle oder lokale Höhenänderungen hier nicht enthalten sind. Die gewonnenen Profile stehen nun für eine geologische Interpretation hinsichtlich rezenter vertikaler Krustendeformationen bereit.

Das küstenparallele Profil (Abb. 11, oben) weist für den langen Nivellementslinienabschnitt Grevesmühlen–Stralsund nur sehr geringe Variationen in der relativen Höhenänderungsgeschwindigkeit aus. Zwischen Kiel und Grevesmühlen zeigt sich die generelle Tendenz einer relativen Hebung der östlichen gegenüber den westlichen Festpunkten. Wenn auch das betragsmäßige Ausmaß dieser scharnierartigen Kippung von fast 0,5 mm/a in Anbetracht der über 130 km akkumulierten Messfehler und systematischen Effekte nicht als gesichert angesehen werden kann, so weist doch die über acht Einzelstrecken gleichartig fortgesetzte Änderung der Höhenunterschiede auf tatsächliche relative vertikale Krustendeformationen hin. Das Muster der beiden Profilabschnitte könnte durch zwei neotektonische Blöcke unterschiedlichen rezenten Vertikalbewegungsverhaltens erklärt werden. In einer Karte der geologisch-tektonischen Situation des Untersuchungsgebiets (DUPHORN, 1995, S. 9) koinzidiert die aus den Nivellementsergebnissen abgelesene Lage des Übergangs zwischen den beiden Einheiten mit dem Verlauf des Gifhorn-Lübecker Tiefenbruchs. Ein weiterer markanter Wechsel in den Höhenänderungsgeschwindigkeiten entlang der Nivellementsline Plön–Marienleuchte bei Neustadt scheint die rezente Aktivität dieser tektonischen Störung zu bestätigen.

Der Profilabschnitt zwischen Kiel und Schleswig ist von einer relativen, nach Eckernförde hin kuppelförmig zunehmenden Hebung gekennzeichnet. Über eine Distanz von 30 km deuten die Nivellementsergebnisse hier auf differenzielle Höhenänderungen von ca. 4 cm pro Jahrhundert hin. Für diesen Raum weist das geologische Schema Salzdiapire aus. Ein Quellen des salzhaltigen Untergrundes kann möglicherweise für die Wölbung der Erdoberfläche verantwortlich sein. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der starke Gradient in der Hebungintensität zwischen Schleswig und Kosel lediglich drei Messperioden entspringt.

Die für die beiden Nebenlinien Plön–Marienleuchte und Stralsund–Arkona gleichermaßen festgestellte Hebung der nördlichen Profilabschnitte gegenüber den südlichen ist schließlich konsistent mit dem Modell der postglazialen isostatischen Krustendeformation (Abb. 12).

In Abb. 13 sind die Lokationen auffälliger Wechsel im Höhenänderungsverhalten veranschaulicht. Der Vergleich dieser aus geodätischen Messungen gewonnenen Ergebnisse mit den geologisch-tektonischen Modellen (DUPHORN, 1995; MÖBUS, 1996) deckt weitere interessante Übereinstimmungen auf. So fallen markante Vertikalbewegungsänderungen auf der Insel Rügen, wo die hohe Nivellementsliniendichte auch Rückschlüsse auf die flächenhafte Ausprägung der Profilmuster erlaubt, mit dem Verlauf der Bergener Störung zusammen. Das relative Absinken der Halbinsel Zudar sowie der Südspitze Wittows scheint hingegen in Kompaktionseffekten begründet zu liegen.

Die Detektion weiträumiger vertikaler Krustendeformationen aus Wiederholungsnivellements wird durch lokale Senkungserscheinungen erschwert. Andererseits ist der Nachweis vertikaler Bewegungen einzelner Festpunkte von praktischer Bedeutung für ihre angewandte geodätische Nutzung und die Planung zukünftiger Nivellements. Die in Abb. 14 veranschau-

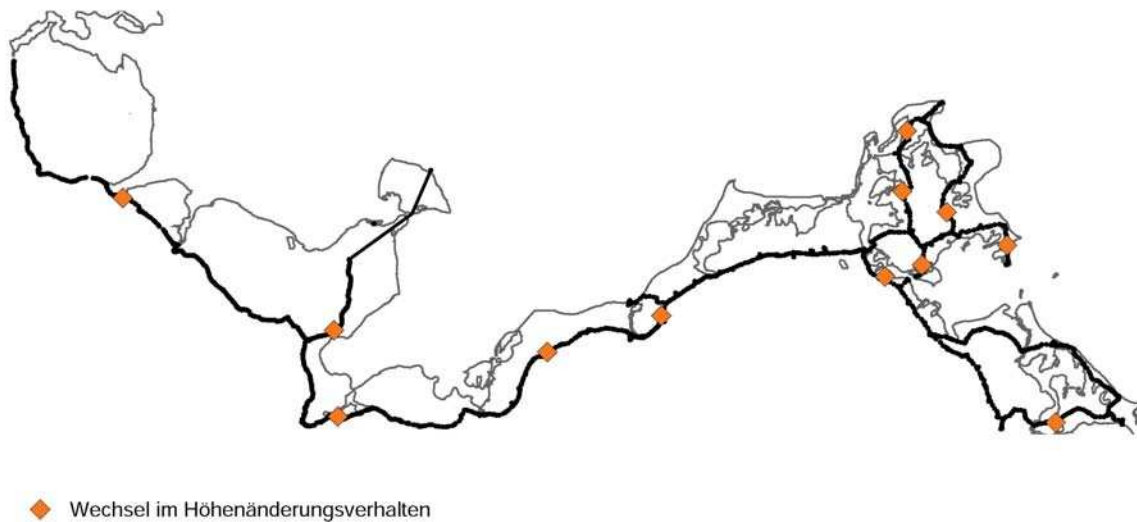


Abb. 13: Lokation von auffälligen Änderungen im relativen Hebungs- und Senkungsverhalten in den aus Wiederholungsnivellements gewonnenen Profilen

lichte Übersicht von Festpunkten, für die individuelle oder lokal beschränkte Senkungen festgestellt wurden, stellt in dieser Hinsicht ein weiteres Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen dar. Die in der Abbildung erkennbare Konzentration sinkender Nivellements- punkte im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes ist dabei auf die inhomogene Daten- grundlage zurückzuführen (Abb. 8). Für die Linien im westlichen Teil stehen generell weniger Messperioden sowie eine deutlich geringere Anzahl wiederholt eingemessener Fest- punkte zur Verfügung, was eine zweifelsfreie Eingrenzung der ermittelten Relativbewe- gungen erschwert.

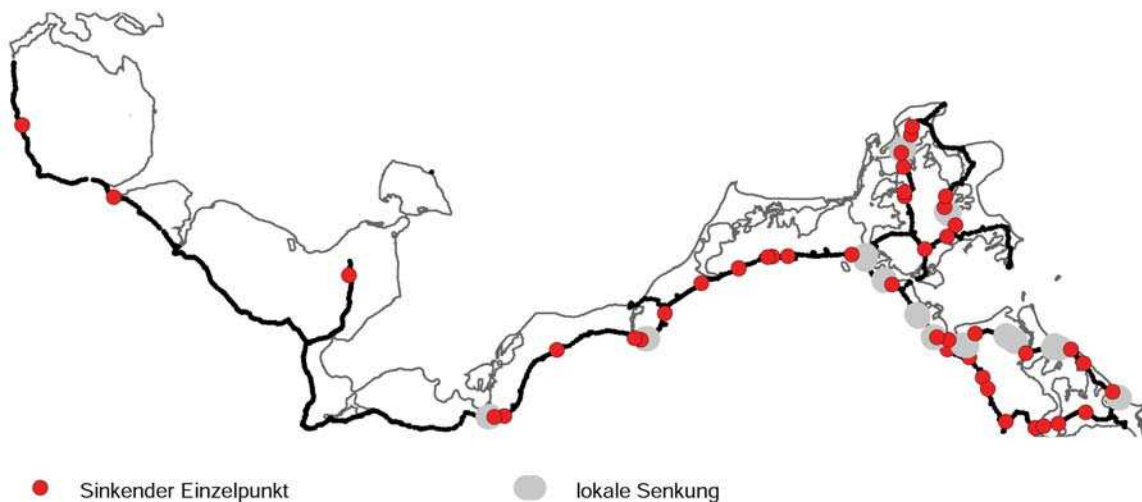


Abb. 14: Lage von Nivellements- punkten, für die individuelle beziehungsweise lokale Senkungen nach- gewiesen wurden

6. Säkulare Niveauverschiebungen an Küstenpegeln und ihr Vergleich mit Nivellements

Seit dem frühen 19. Jahrhundert erfolgen an der südlichen Ostsee regelmäßige Wasserstandsmessungen an Küstenpegeln (LIEBSCH et al., 2000). Sie geben Aufschluss über relative Niveauänderungen zwischen dem Pegel und dem mittleren Meeresspiegel und sind seit jeher eng mit geodätischen Höhenbestimmungen verknüpft. Im Untersuchungsgebiet liegen heute für eine Vielzahl von Pegelstationen langjährige Zeitreihen der Wasserstandsbeobachtungen vor.

Sie reflektieren zunächst mit hoher zeitlicher Auflösung die Änderung des Wasserstands bezüglich des Nullpunkts des Pegels. Wenn sich eine Messreihe über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg auf einen einheitlichen, höhenmäßig unveränderten Nullpunkt bezieht, so beschreibt sie die relativen Meeresspiegeländerungen an der Lokation des Pegels. Diese setzen sich aus Höhenvariationen des Meeresspiegels einerseits und landseitigen Vertikalbewegungen andererseits zusammen. Ausgehend von der Annahme, dass in einem begrenzten Küstenabschnitt langfristige absolute Meeresspiegeländerungen in gleicher Weise erfolgen, kann der Vergleich der an verschiedenen Pegellokationen beobachteten relativen Meeresspiegeländerungen Aufschluss über relative Vertikalbewegungen der Küstenabschnitte untereinander liefern, wie sie auch aus wiederholten Präzisionsnivellements gewonnen werden können.

Der einheitliche Höhenbezug der Wasserstandsmesswerte ist zunächst nicht gegeben. Ursachen für Höhenänderungen des Nullpunkts eines Pegels schließen Änderungen in der Definition des Nullpunkts, konstruktive Veränderungen der Pegelanlage sowie Höheninstabilitäten des Pegels und seiner nächsten Umgebung, in der Regel Hafenanlagen, ein. Bevor Pegelmessreihen zur Bestimmung relativer Meeresspiegeländerungen genutzt werden können, müssen demnach die originalen Messdaten hinsichtlich ihres Höhenbezugs homogenisiert werden.

Zum Nachweis der Höhenstabilität der Pegelnullpunkte, beziehungsweise zur Rekonstruktion von Nullpunktsänderungen, dienen in regelmäßigen Abständen durchgeführte Kontrollnivellements zwischen den Pegeln und mehreren nahe gelegenen, in Bezug auf das amtliche Höhennetz eingemessenen Höhenfestpunkten. Eine Vereinheitlichung des Pegelbezugs wurde für acht Pegel an der südlichen Ostseeküste realisiert, für vier Stationen in Mecklenburg-Vorpommern ist sie in LIEBSCH et al., 2000 vorgestellt. Die Lage der untersuchten Pegel Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Barth, Sassnitz, Greifswald, Swinoujcie sowie Travemünde (JENSEN und TÖPPE, 1986) ist in Abb. 7 verdeutlicht; weiterhin wurden die Wasserstandsaufzeichnungen des Pegels Kolobrzeg (Kolberg, Polen) bearbeitet. Im Ergebnis liegen für diese Stationen homogene Zeitreihen von Monatsmittelwerten des beobachteten Wasserstandes über 121 bis 186 Jahre Dauer vor. Abb. 15 zeigt exemplarisch die gewonnene Wasserstandsreihe für den Pegel Warnemünde. Dargestellt sind die monatlichen Mittelwasserstände sowie die Pegelreihe nach einer Tiefpassfilterung (Gauß-Filter, Filterbreite 5 Jahre). Neben den langzeitigen Variationen des Meeresspiegels wird dabei auch der säkulare Trend der Meeresspiegeländerung deutlich.

Aus dem linearen Trend der aufbereiteten Pegelreihen wurden für die Pegellokationen die säkularen relativen Meeresspiegeländerungen bestimmt. Die eustatische Komponente relativer Meeresspiegelvariationen hängt wesentlich von klimatischen Faktoren ab, die im Zeitraum der vorliegenden Pegelbeobachtungen variieren. Daraus ergibt sich eine Abhängigkeit der ermittelten säkularen relativen Meeresspiegeltrends vom zu Grunde liegenden Beobachtungsintervall. Dieses ist für die bearbeiteten Pegel nicht einheitlich aufgrund des un-

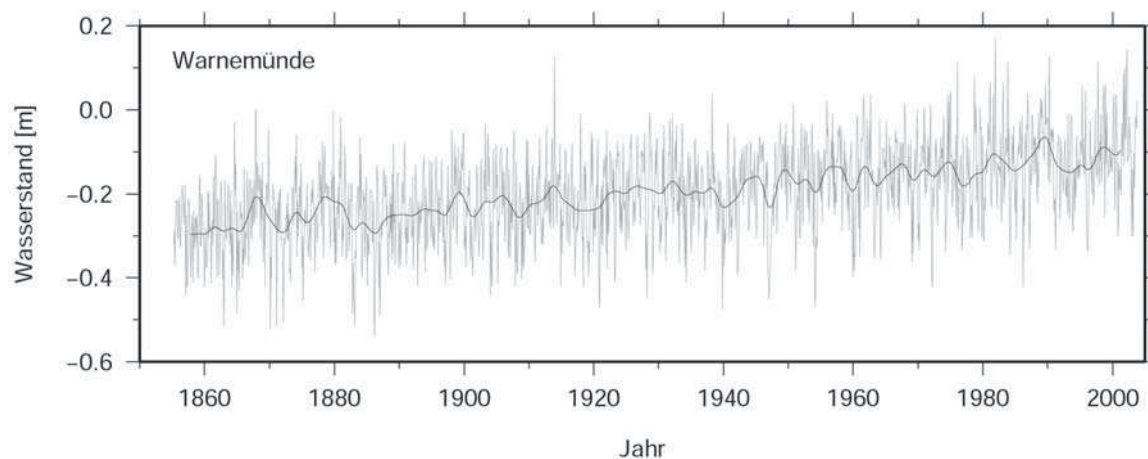


Abb. 15: Homogene Langzeitpegelreihe für den Küstenpegel Warnemünde

terschiedlichen Beobachtungsbeginns und mehrjähriger Unterbrechungen der Wasserstandsaufzeichnungen an einzelnen Stationen. Für die Vergleichbarkeit der Wasserstandstrends und ihre Nutzung zur Ableitung landseitiger Vertikalbewegungen ist dieser systematische Effekt zu berücksichtigen. Das erfolgte durch die Nutzung der sehr zuverlässigen Pegelreihe Warnemünde als Referenz, zu der für alle anderen Pegel die Differenzreihen gebildet und analysiert wurden. Da Wasserstandsvariationen an benachbarten Pegellokationen stark korrelieren, weisen die Differenzreihen ein erheblich reduziertes Rauschen auf, wodurch residuale systematische Effekte detektierbar und die relativen Trends genauer bestimmbar werden. Im Ergebnis liegen für die untersuchten Pegelreihen vergleichbare, auf ein einheitliches Beobachtungsintervall bezogene säkulare Trends der relativen Meeresspiegeländerungen vor. Sie sind in Tab. 5 gegenübergestellt.

Tab. 5: Säkulare relative Meeresspiegeländerungen an der südlichen Ostsee aus homogenen Langzeitpegelreihen (¹ aus JENSEN und TÖPPE, 1986)

Pegel	Beobachtungszeitraum	Säkulare relative Meeresspiegeländerung [mm/a]
Marienleuchte	1882–2003	1,04
Wismar	1848–2003	1,41
Warnemünde	1855–2003	1,16
Barth	1863–2003	0,71
Sassnitz	1882–2003	0,64
Greifswald	1873–2003	0,86
Swinoujscie	1811–1997	1,09
Kolobrzeg	1816–1999	1,13
Travemünde ¹	1826–1995	1,64

Im Gegensatz zu den geometrischen Nivellements weisen die Wasserstandsmessungen eine über den gesamten Beobachtungszeitraum homogene Qualität auf. Die Unsicherheit der ermittelten zeitlichen Niveaushifttrends wird wesentlich durch die Stabilität der Pegelnullpunkthöhe, zum Teil auch durch hydrodynamische Gegebenheiten in der Pegelumgebung beeinflusst und ist damit im Prinzip unabhängig von der Entfernung zwischen

den Pegeln. Es kann eingeschätzt werden, dass die aus den Pegelmessungen gewonnenen säkularen relativen Meeresspiegeländerungen auf 0,1 bis 0,2 mm/a genau sind.

An allen Pegeln an der südlichen Ostseeküste ist im Beobachtungszeitraum der Wasserstand gegenüber dem Festland angestiegen, die Anstiegsgeschwindigkeiten streuen um 1 mm/a. Zwischen den Pegelstationen variieren die Anstiegsgeschwindigkeiten, und ein ausgeprägter Nord-Süd-Gradient wird deutlich: Während die südlichen Pegel Travemünde und Wismar die stärksten Anstiege verzeichnen, weist die nördlichste Station Sassnitz die geringste Anstiegsrate auf. Diese Beobachtung ist im Einklang mit den aus Wiederholungsnivellements auf den Linien Plön–Marienleuchte und Stralsund–Arkona gewonnenen Ergebnissen (Abb. 11). Des Weiteren stimmt die räumliche Variation der relativen Meeresspiegeländerungen (DIETRICH und LIEBSCH, 2001) sehr gut mit dem modellierten Muster infolge postglazialer isostatischer Krustenreaktionen (Abb. 12) überein.

Die Systematik der räumlichen Variation des relativen Meeresspiegelanstiegs und ihre Übereinstimmung mit dem Modell gestatten die Schlussfolgerungen, dass sie in der Tat auf unterschiedlich intensive Vertikalbewegungen der Küstenabschnitte zurückgeführt werden kann und dass die Erdkruste im gesamten südlichen Ostseeraum weitflächigen postglazialen Ausgleichsbewegungen unterworfen ist.

Ein Vergleich der aus Wiederholungsnivellements einerseits und Langzeitpegelmessungen andererseits abgeleiteten relativen Vertikalbewegungen ist von größtem Interesse, ermöglicht er doch ihre unabhängige Verifizierung und eine Beurteilung ihrer Zuverlässigkeit. Voraussetzung dafür ist die zuverlässige Anbindung der Pegelfestpunkte, auf deren Grundlage die Homogenisierung der Pegelnullpunkthöhe erfolgte, an das ausgewertete Nivellementsnetz. Die vorliegenden Daten erlauben einen solchen Vergleich zwischen den Pegeln Greifswald und Sassnitz, Wismar und Warnemünde sowie Warnemünde und Greifswald. Die Ergebnisse der Nivellementsauswertung und der Analyse der Pegeldata sind für diese drei Beispiele in Tab. 6 gegenübergestellt.

Zwischen beiden Verfahren ergeben sich Widersprüche in den relativen Vertikalbewegungsraten von 0,0 (Greifswald–Sassnitz) bis 0,5 mm/a (Warnemünde–Greifswald). Diese Widersprüche setzen sich aus den Messunsicherheiten beider Verfahren zusammen. Für die aus zwei Pegelreihen abgeleiteten relativen Vertikalraten kann ein Fehler von 0,2 mm/a angenommen werden, und zwar unabhängig von ihrer gegenseitigen Entfernung. Für die weniger entfernten Pegelpaare Greifswald–Sassnitz und Wismar–Warnemünde resultieren Differenzen innerhalb des Fehlerbereichs der Pegeltrends. Die längste der drei Linien weist eine deutlich höhere Abweichung auf, was mit der entfernungsabhängigen Unsicherheit der Nivellementsergebnisse begründet werden kann und die begrenzte Eignung des Nivellements zum Nachweis von Vertikalbewegungen über sehr weite Entfernungen unterstreicht. Aus dieser Differenz und unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Pegelergbnisse kann geschlossen werden, dass die aus Wiederholungsnivellements gewonnenen Vertikalbewegungsraten über Entfernungen einiger hundert Kilometer auf 0,5 mm/a genau sind und dass die für den Küstenbereich der Ostsee ermittelten relativen Vertikalbewegungstrends somit nicht signifikant sind.

Die Messverfahren des geometrischen Nivellements und Wasserstandsbeobachtungen unterscheiden sich in vielfacher Hinsicht. Das Nivellement liefert Höhenunterschiede bezüglich einer Äquipotenzialfläche des Erdschwerfelds durch eine Vielzahl linienförmig zusammengesetzter Partialmessungen. Daraus resultieren einerseits eine hohe Messpunktdichte entlang der Nivellementslinie und andererseits die ausgeprägte Entfernungsabhängigkeit der Messgenauigkeit. Vertikalverschiebungen werden von den wenigen Nivellementsepochen zeitlich nur begrenzt aufgelöst.

Tab. 6: Vergleich von Vertikalbewegungsraten aus Wiederholungsnivellements und Pegelbeobachtungen (Angaben in mm/a)

Pegelstationen		Relative Vertikalbewegung aus: Pegel		Differenz Pegel – Nivellement
Wismar	Warnemünde	+ 0,25	+ 0,02	0,2
Warnemünde	Greifswald	+ 0,30	- 0,15	0,5
Greifswald	Sassnitz	+ 0,22	+ 0,24	0,0

Im Gegensatz dazu sind die kontinuierlichen Pegelmessungen dazu geeignet, den zeitlichen Verlauf der relativen Niveaushiftungen zwischen Meeresspiegel und Küste zuverlässig und zeitlich hochaufgelöst zu erfassen. Diese Verschiebungsraten liegen hingegen nur punktuell für die Pegellokationen vor.

Es wird deutlich, wie sich beide Methoden in ihrem räumlichen und zeitlichen Charakter in hervorragender Weise ergänzen. Unter der Annahme, dass eustatische Meeresspiegeländerungen den untersuchten Küstenabschnitt gleichermaßen erfassen, kann aus den Pegelmessungen das großräumige Bild der relativen vertikalen Krustendeformationen gewonnen werden. Die Wiederholungsnivellements ermöglichen darüber hinaus eine Spezifizierung des Gültigkeitsbereichs der verzeichneten Relativverschiebungen sowie eine feine Auflösung der räumlichen Struktur von Vertikalbewegungen zwischen den Pegeln.

7. Ausblick

Auf ihrer Frühjahrstagung im April 2005 hat die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) die „... Erneuerung des DHHN mithilfe des digitalen geometrischen Präzisionsnivellements, epochengleichen GNSS-Messungen sowie Absolutschweremessungen auf ausgewählten Repräsentativpunkten des DHHN ...“ in den Jahren 2006 bis 2011 beschlossen (AdV, 2005).

Auch für die Ostseeküste werden im Ergebnis dieser Erneuerung Nivellementsmessungen zu einer weiteren Beobachtungsepoche vorliegen. Für künftige Untersuchungen zu Höhenänderungen in diesem Küstenbereich kommt diesen neuen Messdaten größte Bedeutung zu. Die hier vorgestellten Analysen haben gezeigt, dass eine zuverlässige Bestimmung von relativen Höhenänderungsgeschwindigkeiten Messungen zu mindestens vier Epochen erfordern. Vorausgesetzt, dass die historischen Festpunkte in das neue Nivellement einbezogen werden, würde sich im Untersuchungsgebiet die Anzahl von Festpunkten, die dieser Bedingung genügen, mit einer Zunahme von 292 auf 616 mehr als verdoppeln. Damit einher gehen Steigerungen der Genauigkeit der in Abb. 11 dargestellten Höhenänderungsgeschwindigkeiten einerseits und der räumlichen Auflösung derartiger Profile andererseits. Insbesondere für das westliche Untersuchungsgebiet schränkt die geringe Anzahl von vorliegenden Wiederholungsmessungen die Ableitung von Vertikalbewegungen empfindlich ein.

Darüber hinaus ergibt sich inzwischen ein recht langes Zeitintervall zu den jüngsten, flächendeckenden Vergleichsmessungen (DHHN85 beziehungsweise SNN76). Die mit den Wiederholungsnivellements abgedeckte Zeitbasis wird somit auf ca. 140 Jahre ausgedehnt. Die bereits im Ergebnis des Ostseeküstennivellements 1966 gewonnene Feststellung, dass eine Zeitbasis von 10 Jahren nicht ausreicht, um vertikale Krustendeformationen an der Ost-

seeküste durch Präzisionsnivellements signifikant nachzuweisen (SCHNEIDER, 1968), wurde auch durch die hier durchgeführten Analysen bestätigt. Je länger jedoch der durch Messungen erfasste Zeitraum ist, desto größere Ausmaße nehmen kontinuierlich ablaufende Vertikalbewegungen an, sodass sich das Verhältnis zwischen den gesuchten Hebungs-/Senkungssignalen und Fehlereinflüssen verbessert.

Schließlich eröffnet die vorgesehene Kombination des Präzisionsnivellements mit den modernen Messverfahren der Satellitennavigation (GNSS) und der Absolutgravimetrie zukunftsweisende Perspektiven für die geodätische Bestimmung von vertikalen Krustendeformationen.

Die Untersuchung der Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee hat dabei gezeigt, dass ein optimiertes Monitoring von Vertikalbewegungen im küstennahen Raum wiederholte Präzisionsnivellements mit langzeitigen, kontinuierlichen Pegelmessungen kombiniert. Abgesehen von der offensichtlichen Notwendigkeit einer Fortführung der langjährigen Wasserstandsmessungen ist aus geodätischer Sicht insbesondere auf die entscheidende Bedeutung einer regelmäßigen Überwachung der Pegelnullpunktshöhen hinzuweisen.

Die hier zur Anwendung gelangten Messverfahren Nivellement und Pegelbeobachtung sind lediglich in der Lage, r e l a t i v e Vertikalverschiebungen zwischen den Küstenabschnitten zu detektieren. Moderne, satellitenbasierte Messverfahren (GNSS) eröffnen jedoch die Möglichkeit, Festpunktverlagerungen in einem globalen Bezugssystem zu bestimmen. Als wegweisendes Beispiel für die Anwendung von GNSS zum Nachweis dreidimensionaler Krustendeformationen im Ostseeraum kann das BIFROST-Projekt in Fennoskandien gelten (SCHERNECK et al., 2002; JOHANSSON et al., 2002). Die Nutzung von GNSS zur messtechnischen Erfassung der für die südliche Ostseeküste zu erwartenden geringen vertikalen Verschiebungsraten stellt dabei höchste Genauigkeitsansprüche. Diese können nur durch einen langjährigen Betrieb permanenter GNSS-Stationen realisiert werden. Der Auswahl der Stationslokationen und der Festpunktvermarkung für diese GNSS-Stationen nach den Kriterien der Stabilität und Repräsentativität für regionale Krustendeformationen kommt hierbei eine herausragende Bedeutung zu. Derzeit vom Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) betriebene Permanentstationen werden diesen Anforderungen nicht in vollem Umfang gerecht. Der wissenschaftliche Nutzen eines solchen GNSS-gestützten Monitorings von Krustendeformationen wäre indessen vielfältig. Der Bezug der Ergebnisse zu einem globalen geodätischen Bezugssystem gestattet ihren direkten Vergleich mit Daten aus globalen und umgebenden Netzen und damit eine Einbettung der beobachteten Phänomene in weiträumige Zusammenhänge. Darüber hinaus macht die Bestimmung absoluter Hebungs- und Senkungsraten der Erdkruste die Separierung der in den Pegelbeobachtungen überlagerten Beiträge von Krustendeformation und Meeresspiegeländerungen, und somit eine Bestimmung des eustatischen Signals möglich.

8. D a n k

Die vorgestellten Arbeiten wurden vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen unter dem Förderkennzeichen 03KIS022 finanziert.

Durch Zugang zu den Archiven und die Bereitstellung von Nivellementsdaten wurden die Arbeiten durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Außenstelle Leipzig (Frau M. Sacher, Dr. G. Liebsch) sowie die Landesvermessungsämter Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein in großzügiger Weise unterstützt. Die verwendeten Küstenpegeldata wurden durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Frau I. Perlet)

und die Wasser- und Schifffahrtsämter Stralsund (Frau M. Zimmermann) und Lübeck (Frau H. Heinzemann) bereitgestellt. Den Vertretern und beteiligten Mitarbeitern dieser Behörden sei herzlich gedankt.

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

- AdV: Nivellementsnetz 1960, Anhang III, München 1975.
- AdV: Die Wiederholungsmessungen 1980 bis 1985 im Deutschen Haupthöhennetz und das Haupthöhennetz 1985 der Bundesrepublik Deutschland. München, 1993.
- AdV: Deutsches Haupthöhennetz 1992 (DHHN 92). Bayer. Landesvermessungsamt München 1995.
- AdV: Zusammenfassung der Frühjahrssitzung 2005 der AdV: www.adv-online.de.
- BHW: Auszug aus dem noch nicht veröffentlichten Feinnivellement der Ostsee und der Bodden zwischen Stralsund und Ribnitz. Bureau für die Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen im Ministerium der öffentlichen Arbeiten. Unveröffentlichte, handschriftliche Aufzeichnungen. Archiv WSA Stralsund, Landesarchiv Greifswald, 1906.
- BKG: Digitale Höhenverzeichnisse, Messdateien und Punktinformationen, Leipzig, 2002.
- DIETRICH, R. u. LIEBSCH, G.: Zur Variabilität des Meeresspiegels an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern. Zeitschrift für geologische Wissenschaften 28(6), 615–623, 2000.
- DUPHORN, K.; KLIEWE, H.; NIEDERMEYER, R.-O.; JANKE, W. u. WERNER, F.: Die deutsche Ostseeküste. Sammlung Geologischer Führer 88, 1995.
- EKMAN, M.: A Consistant Map of Postglacial Uplift of Fennoscandia. Terra Nova, 8, 158–165, 1996.
- HUPFER, P.; HARFF, J.; STERR, H. u. STIGGE, H.-J.: Die Wasserstände an der Ostseeküste. Die Küste, Heft 66, 2003.
- IHDE, J.; STEINBERG, J.; ELLENBERG, J. u. BANKWITZ, E.: On Recent Vertical Crustal Movements Derived from Relevelings Within the Territory of the G.D.R.. Gerlands Beiträge zur Geophysik, 96(3/4), 206–217, 1987.
- JENSEN, J. u. TÖPPE, A.: Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 30(4), 99–107, 1986.
- JOHANSSON, J. M.; DAVIS, J. L.; SCHERNECK, H.-G.; MILNE, G. A.; VERMEER, M.; MITROVICA, J. X.; BENNETT, R. A.; JONSSON, B.; ELGERED, G.; ELOSEGUI, P.; KOIVULA, H.; POUTANEN, M.; RÖNNÄNG, B. O. u. SHAPIRO, I. I.: Continuous GPS Measurements of Postglacial Adjustment in Fennoscandia: 1. Geodetic Results. J. Geophys. Res. 107(B8), 2002.
- LANG, A.: Vorläufige Ergebnisse rezenter vertikaler Krustenbewegungen aus Vergleichen von Präzisionsnivellements in der DDR. Petermanns geographische Mitteilungen, 109, 139–143, 1965.
- LIEBSCH, G.: Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielsetzungen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C Heft 485, 1997.
- LIEBSCH, G.; DIETRICH, R.; BALLANI, L. u. LANGER, G.: Die Reduktion langjähriger Wasserstandsmessungen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns auf einen einheitlichen Höhenbezug. Die Küste, H. 62, 3–28.
- MAJOR, W.: Höhen im System des Deutschen Haupthöhennetzes 1992. Vermessung Brandenburg, 2/1996, 29–40, 1996.
- MÖBUS, O.: Tektonische Erbanlagen im Quartär des südlichen Ostseeraumes – eine Richtungsanalyse. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, 24(3/4), 325–334, 1996.
- NAGEL, A.: Astronomisch-Geodätische Arbeiten für die Europäische Gradmessung im Königreich Sachsen, IV. Abtheilung, Das Landesnivellement, Druck und Verlag von P. Stankiewicz, Berlin, 1886.
- PASCHEN, F.: Großherzoglich Mecklenburgische Landesvermessung, IV. Theil, Die Geometrischen Nivellements. Schwerin, 1882.
- PELTIER, W. R.: Postglacial Variations in the Level of the Sea: Implications for Climate Dynamics and Solid-Earth Geophysics. Reviews of Geophysics 4, 603–689, 1998.

- RfL: Die Nivellements von hoher Genauigkeit, Höhen über N.N. im neuen System der Trigonometrischen Abteilung des Reichsamts für Landesaufnahme, Zweiter Teil. Im Selbstverlag, Berlin, 1927.
- RfL: Ergebnisse der Feineinwägung, Heft IV: Schleswig-Holstein sowie die Freien und Hansestädte Hamburg und Lübeck und die Freistaaten Mecklenburg. Im Selbstverlag, Berlin, 1932.
- RfL: Ergebnisse der Feineinwägungen, Heft IVb, Land Mecklenburg, vorläufige Ausgabe. Trigonometrische Abteilung des Reichsamts für Landesaufnahme, im Selbstverlag, Berlin, 1937.
- RfL: Feldlinienverzeichnis Linie 6004, 1937/38. Unveröffentlichte, handschriftliche Aufzeichnungen. Archiv BKG Leipzig, 1938.
- RfL: Reichshöhennetz. Ergebnisse der Feineinwägungen, Heft IIIb, Regierungsbezirk Stettin. Trigonometrische Abteilung des Reichsamts für Landesaufnahme, im Selbstverlag, Berlin, 1940.
- RfL: Feldlinienverzeichnis Linie 603, 1941. Unveröffentlichte, handschriftliche Aufzeichnungen. Archiv BKG Leipzig.
- RfL: Feldlinienverzeichnis Linie 6001, 1944. Unveröffentlichte, handschriftliche Aufzeichnungen. Archiv BKG Leipzig.
- RfL: Reichshöhennetz. Ergebnisse der Feineinwägungen. Trigonometrische Abteilung des Reichsamts für Landesaufnahme, im Selbstverlag, Ausgabe Berlin, 1945.
- SCHERNECK, H.-G.; JOHANSSON, J. M.; ELGERED, G.; DAVIS, J. L.; JONSSON, B.; HEDLING, G.; KOIVULA, H.; OLLIKAINEN, M.; POUTANEN, M.; VERMEER, M.; MITROVICA, J. X. u. MILNE, G. A.: BIFROST: Observing the Three-Dimensional Deformation of Fennoscandia. Ice Sheets, Sea Level and the Dynamic Earth, Geodynamics Series 29, 29–93, 2002.
- SCHNEIDER, E.: Untersuchung des Ostseeküstennivellements zur Erforschung vertikaler Krustenbewegungen. Unveröffentlichter Abschlussbericht zur Forschungs- und Entwicklungsarbeit, Leipzig 1968, Archiv BKG Leipzig, 1968.
- SCHREIBER: Der Normal-Höhenpunkt für das Königreich Preußen an der königlichen Sternwarte zu Berlin, Trigonometrische Abtheilung der Landesaufnahme, Berlin, 1879.
- SEIBT, W.: Gradmessungs-Nivellement zwischen Swinemünde und Amsterdam. Publication des Königlich Preußischen Geodätischen Institutes, Berlin, 1883.
- SEIBT, W.: Gradmessungs-Nivellement zwischen Anclam und Cuxhaven. Veröffentlichung des Königl. Preuß. Geodätischen Institutes. Berlin, 1888.
- TAL: Nivellements und Höhenbestimmungen der Punkte erster und zweiter Ordnung, Dritter Band. Trigonometrische Abtheilung der Landes-Aufnahme, im Selbstverlag. Berlin, 1875.
- TAL: Auszug aus den Nivellements der Trigonometrischen Abtheilung der Landesaufnahme, IV. Heft: Provinzen Pommern, Brandenburg, Großherzogthümer Mecklenburg. Berlin, 1886. Nachträge 1887, 1888, 1889, 1890, 1892.
- TAL: Auszug aus den Nivellements der Trigonometrischen Abtheilung der Landesaufnahme, VI. Heft: Provinzen Ost- und Westpreußen, Insel Rügen. Berlin, 1889.
- TAL: Vierter Nachtrag zum IV. Heft des Auszuges aus den Nivellements der Trigonometrischen Abtheilung der Landesaufnahme, 1890.
- TAL: Fünfter Nachtrag zum IV. Heft des Auszuges aus den Nivellements der Trigonometrischen Abtheilung der Landesaufnahme, 1892.
- TAL: Die Nivellements-Ergebnisse der Trigonometrischen Abtheilung der Königl. Preußischen Landesaufnahme, Heft III: Provinz Pommern. Im Selbstverlag, Berlin, 1896. Nachtrag: 1914.
- TAL: Die Nivellements-Ergebnisse der Trigonometrischen Abtheilung der Königl. Preußischen Landesaufnahme, Heft IV: Provinz Schleswig-Holstein und Großherzogthümer Mecklenburg. Im Selbstverlag, Berlin, 1897.
- TAL: Das Küsten-Nivellement. Vorbemerkungen und Linien-Verzeichnisse. Unveröffentlichtes, handschriftliches Exemplar für das Königl. Geodätische Institut, Berlin, 1898, Brandenburgisches Landeshauptarchiv Potsdam.
- TAL: Die Nivellements-Ergebnisse der Trigonometrischen Abtheilung der Königl. Preußischen Landesaufnahme, Heft III: Provinz Pommern, Erster Nachtrag. Im Selbstverlag, Berlin, 1914.
- TURM, H.: Ableitung von Gradienten rezenter vertikaler Erdkrustenbewegungen für das Gebiet der DDR. Petermanns Geographische Mitteilungen, 115, 124–129, 1971.