
Abschlussbericht

Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee

Förderkennzeichen: 03KIS022

Berichtersteller: Prof. Dr.-Ing.habil. R. Dietrich
Institut für Planetare Geodäsie
Technische Universität Dresden
01062 Dresden

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Prof. R. Dietrich, Technische Universität Dresden

Förderkennzeichen: 03KIS022

Vorhabenbezeichnung: Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2001 bis 31.03.2004

Berichtszeitraum: 01.04.2001 bis 31.03.2004

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Bei der Erfassung und Vorhersage von Naturvorgängen im Küstenbereich stellt der Wasserstand in Bezug auf die Küste einen zentralen Parameter dar. Niveauverschiebungen zwischen der Wasseroberfläche und dem Festland können dabei durch Veränderungen der Meeresoberfläche (z. B. eustatischer Effekt) und/oder durch Höhenänderungen auf der Landseite (Isostasie, Tektonik) verursacht sein. Mit Pegelmessungen allein ist die Separierung beider Effekte nicht möglich, andererseits ist diese Separierung für die Präzisierung langfristiger Prognosemodelle unerlässlich.

Das Vorhaben widmete sich der Erfassung und Separierung derartiger Höhenänderungen sowie ihrer räumlichen und zeitlichen Variationen, ihrer gemeinsamen Interpretation mit Pegeldata sowie der Einbettung der Aussagen in größere örtliche und zeitliche Skalen. Es sollte damit einen wichtigen Beitrag für Verifizierung und gegebenenfalls zur Präzisierung der naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen für die Feststellung von Bemessungswasserständen liefern.

Die Forschungsarbeiten nutzten die auch international nahezu unikale Situation, dass an der deutschen Ostseeküste seit 1869 insgesamt 11 Präzisionsnivelements durchgeführt wurden. Eine einheitliche Aufarbeitung, Analyse und Interpretation des Gesamtmaterials – die bisher nicht erfolgte – sollte fundierte Aussagen über örtliche und zeitliche Höhenänderungen liefern. Im Rahmen des Vorhabens sollten damit wichtige Basisinformationen für das Küstenzonenmanagement bereitgestellt werden.

1.2 Voraussetzung zur Durchführung des Vorhabens

Bei der Durchführung der im Vorhaben vorgesehenen Aufgaben konnte auf einen reichen Erfahrungsschatz, der aus Arbeiten früherer Forschungsprojekte am Institut für Planetare Geodäsie resultiert, zurückgegriffen werden. Von nutzbringenden Erfahrungen und vorhandenen Geräten, Software und Auswertalgorithmen konnten neben den durchgeführten Analysen auch praktische Feldarbeiten profitieren.

Eine wesentliche Voraussetzung zur erfolgreichen Bearbeitung des Vorhabens stellten die langjährigen und umfangreichen Vorarbeiten des Institutes zu säkularen Änderungen des Meeresspiegels an der

Ostseeküste dar. Wertvolle Grundlagen hinsichtlich der Problematik von Höhenbestimmungen und Höhensystemen konnten in den weiterführenden Untersuchungen genutzt werden. Die für die Aufbereitung der homogenen Langzeitpegelreihen notwendigen Nivellementsdaten der Pegelfestpunkte lagen teilweise bereits vor beziehungsweise wurden bereits recherchiert. Daraus resultierte auch ein umfangreiches Vorwissen über Geschichte und Entwicklung der Nivellementsnetze in Deutschland, über die vorliegenden Nivellementsepochen sowie zur Erschließung der Messdaten der Nivellements in Mecklenburg-Vorpommern. Die im Ergebnis früherer Projekte des Instituts vorliegenden aufbereiteten Pegelreihen konnten schließlich direkt in die Bestimmung säkularer Niveauverschiebungen an den Pegelstationen und in die Interpretation der ermittelten Höhenänderungen einfließen.

Entscheidend für das Gelingen des Vorhabens war der Zugang zu den historischen und jüngeren Nivellementsdaten sowie zu den Pegelaufzeichnungen. Die benötigten Unterlagen und Informationen lagen vorrangig in den für Vermessung und Pegelbeobachtungen zuständigen Behörden der Bundesländer und des Bundes vor. Die Erschließung dieser Daten für das Vorhaben setzte eine enge Kooperation mit diesen Stellen, insbesondere mit dem Bundesamt für Geodäsie und Kartographie, Außenstelle Leipzig, den Landesvermessungsämtern Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns, dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Rostock sowie den Wasser- und Schifffahrtsämtern in Stralsund und Lübeck voraus. Kontakte zu diesen Stellen und Arbeitsbesuche bei einigen der Behörden erwiesen sich vor allem für die Bereitstellung der für die Analysen notwendigen Zusatz- und Hintergrundinformationen zu den Messdaten als außerordentlich gewinnbringend. Wichtig für die erfolgreiche Interpretation der Ergebnisse war die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Partnern benachbarter Fachbereiche, insbesondere mit der Universität Greifswald.

Diese Voraussetzungen ermöglichten eine effiziente und erfolgreiche Bearbeitung der im Rahmen des Vorhabens notwendigen Arbeiten zur Bestimmung von Höhenänderungen aus Nivellements- und Pegelmessungen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten wurden dem Zeitplan gemäß durchgeführt. Der Ablaufplan des Vorhabens wurde aufgrund der verspäteten Bewilligung des Vorhabens bezüglich des tatsächlichen Vorhabenbeginns im Vergleich zum Antrag entsprechend zeitlich verschoben.

Die Organisation und Planung der Arbeiten wurde durch den Projektleiter Prof. R. Dietrich und durch den Projektmitarbeiter Dr.-Ing. J. Wendt (ab Juni 2001, BAT IIa-O) wahrgenommen. Durch die verspätete Bewilligung des Vorhabens konnte die Stelle des Projektmitarbeiters erst am 01.06.2001 durch Dr.-Ing. J. Wendt besetzt werden. Die dadurch ab Projektbeginn am 01.04.2001 noch freien Personalmittel wurden dazu genutzt, zeitweise einen zweiten Wissenschaftler (Dipl.-Ing. A. Richter) in Teilzeit zu beschäftigen, wodurch der im Zeitplan vorgesehene Arbeitsfortschritt erzielt werden konnte.

An der Durchführung der Feld- und Erfassungsarbeiten waren darüber hinaus studentische Hilfskräfte beteiligt.

Die im Rahmen des Vorhabens bewilligten Investitionen erfolgte zu Beginn der Projektlaufzeit 2001. Dies betraf die Beschaffung eines PCs und einer X-Station.

Die im Vorhaben gestellten Arbeitsaufgaben erforderten ein schrittweises Vorgehen bei der Behandlung der einzelnen Arbeitsinhalte. Der allgemeine Arbeitsablauf umfasste folgende Schritte:

1. Recherche der Datenquellen
2. Beschaffung der Originaldaten
3. Übertragung der Daten in eine rechentechnisch verwertbare Form
4. Aufbereitung und Analyse der Daten
5. Bewertung und Interpretation der Ergebnisse.

Dabei lag zu Vorhabensbeginn der Schwerpunkt auf der Bearbeitung der Nivellements in Mecklenburg-Vorpommern, da infolge früherer Vorarbeiten des Instituts zu Beginn der Bearbeitung bereits ein Teil der Daten für dieses Arbeitsgebiet vorlag. Anhand dieses Datenauszugs konnten vorzeitig geeignete Methoden und Verfahren entwickelt und für die später erschlossenen Daten genutzt werden. Durch diese Voruntersuchungen konnten zudem die Anforderungen an das zu erhebende Datenmaterial präzisiert werden. Es erfolgten weiterhin methodische Vorüberlegungen zur Auswertung der Nivellementsdaten. Die endgültige Struktur der zu erstellenden Datenbank wurde entworfen. Im Rahmen von Feldarbeiten wurden Festpunkte historischer Nivellements erkundet und durch Punktbeschreibungen dokumentiert.

Im zweiten Projektjahr konzentrierten sich die Arbeiten auf die Vervollständigung und Aufbereitung der Nivellementsdaten Schleswig-Holsteins, die Recherche wichtiger Hintergrundinformationen zu den Nivellementsmessungen, die Weiterentwicklung der Auswertemethodik, der rechentechnischen Implementierung der Auswerteverfahren und die Erarbeitung der homogenen Pegelreihen.

Die Erstellung der vollständigen digitalen Datenbank der Nivellementsdaten war Anfang 2003 abgeschlossen. Im Laufe des Jahres lag der Arbeitsschwerpunkt auf der Fertigstellung der Auswertesoftware für die Nivellementsenauswertung sowie auf der geschlossenen Auswertung der Wiederholungsnivellements. Bei Feldarbeiten wurden in der jüngsten Epoche nicht mehr bestimmte, historische Nivellementspunkte eingemessen. Desweiteren wurden auf der Grundlage der aufbereiteten Pegelreihen relative Niveauverschiebungen an den Pegelstationen der südlichen Ostsee abgeleitet. Die Ergebnisse der Nivellements- und Pegelauswertungen wurden Plausibilitäts- und Zuverlässigkeitstests sowie Genauigkeitsabschätzungen unterzogen. Den Abschluss des Vorhabens stellte die gemeinsame Interpretation der erarbeiteten Ergebnisse dar.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangsstand

Die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die menschliche Gesellschaft, insbesondere hinsichtlich klimasensibler Geobereiche, sind aktueller Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Forschungen. Zu den klimasensiblen Bereichen zählen die Küsten, an denen Klimaänderungen beispielsweise durch Meeresspiegelanstieg und erhöhte Sturmfluthäufigkeiten wirksam werden können. Gegenwärtige Forschungen unter zunehmender Einbeziehung von satellitengestützten Verfahren haben die präzise globale Erfassung der Eingangsgrößen für Meeresspiegeländerungen (polare Eisschilde, Gletscher, thermische Ausdehnung, Grundwasser) zum Ziel. Daraus ergibt sich zum Einen eine wachsende Bedeutung der Erfassung regionaler und lokaler Einflüsse auf Meeresspiegeländerungen, zu denen Erdkrustenbewegungen zählen. Andererseits gewinnen historische und Langzeitdatenreihen außerordentlich an Wert, da sie die aktuellen und satellitengestützt gewonnenen Daten in Prozessmodelle einordnen lassen.

Die Ostsee stellt dabei nicht nur eine von möglichen Klimaänderungen potentiell bedrohte Region dar, sondern auch ein wissenschaftliches Untersuchungsobjekt, für das ein weltweit nahezu einmaliger Datenschatz vorliegt. Zu diesem Datenmaterial zählen vor allem die Langzeitreihen der Küstenpegel sowie die seit dem 19. Jahrhundert mehrfach wiederholten Küstennivellements. Die ältesten Pegelmessungen an der südlichen Ostsee sind vom Pegel Swinemünde (heute Swinoujscie, Polen) bekannt. Die Beobachtungen an diesem Pegel wurden seit 1811 durchgeführt. Weitere Pegel folgten in Travemünde (1826), Wismar (1848), Warnemünde (1855) und anderen Standorten. Die Originalbeobachtungen dieser Pegel sind noch heute in verschiedenen Archiven enthalten, Hauptzahlen der Pegel wurden in einigen Veröffentlichungen publiziert. Die vom Geodätischen Institut Potsdam betreuten Pegel wurden bereits im 19. Jahrhundert für umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen verwendet ([Seibt, 1881];[Seibt, 1890];[Westphal, 1900];[Kühnen, 1916];[Montag, 1964];[Montag, 1967]). Ein Teil der Pegelreihen ist in den letzten Jahren für die Untersuchung langfristiger Veränderungen aufbereitet worden ([Liebsch, 1997]; [Jensen und Töppe, 1986]).

Arbeiten zur Untersuchung vertikaler Erdkrustenbewegungen in den Küstenbereichen Deutschlands konzentrieren sich im wesentlichen auf die Nordseeküste. Auswertungen des Nordseeküstennivellements erfolgten im Rahmen des 1985 abgeschlossenen Sonderforschungsbereichs 149 „Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren“ und wurden später fortgeführt ([Augath, 1993]).

Im Bereich der deutschen Ostseeküste wurden seit 1869 mehrfach Nivellements durchgeführt, die der Errichtung beziehungsweise Erneuerung der Grundlagen für die Höhensysteme in den Küstenländern dienten. Erste Hinweise auf landseitig stattfindende Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee ergaben sich bereits im 19. Jahrhundert ([TAL, 1897]). Weitere Untersuchungen wurden im Rahmen der Arbeiten zur Bestimmung rezenter Erdkrustenbewegungen in der DDR durchgeführt. In diese Untersuchungen wurden vor allem die jeweils neuesten Nivellements einbezogen

([Ihde, 1987];[Turm, 1971];[Lang, 1965]). Mögliche Ursachen der festgestellten Höhenänderungen wurden u.a. in ([Bankwitz, 1985]; [Kolp, 1979]) diskutiert. Eine zusammenfassende Betrachtung und Auswertung aller Nivellements gab es bisher nicht.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Ein wesentlicher Schwerpunkt des Vorhabens lag in der Erschließung und Erfassung der Messdaten historischer und aktueller Nivellements. Diese Daten und relevante Informationen lagen größtenteils bei den Vermessungsbehörden des Bundes und der Länder vor, insbesondere:

- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Außenstelle Leipzig (Frau Sacher)
- Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein, Kiel
- Landesvermessungsamt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.

Im Rahmen der Erstellung und Vervollständigung der Datenbasis wurde mit diesen Ämtern eng zusammengearbeitet.

Die zur Erstellung und Ergänzung der Pegelreihen benötigten Wasserstandsdaten wurden von folgenden Institutionen bezogen:

- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Rostock (Herr Stigge, Frau Perlet)
- Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund (Herr Kraft, Frau Zimmermann)
- Wasser- und Schifffahrtsamt Lübeck (Herr Nöthel, Frau Heinzemann).

Weitere Pegeldaten wurden der Datenbank des Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) entnommen.

Bei der Interpretation der erarbeiteten Ergebnisse wurde eng mit Partnern aus wissenschaftlichen Nachbardisziplinen zusammengearbeitet, insbesondere mit der Universität Greifswald (Prof. Lampe) und dem Institut für Ostseeforschung, Warnemünde (Prof. Harff).

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.1 Bestimmung von Höhenveränderungen der Erdkruste auf der Grundlage von Wiederholungsnivellements

2.1.1 Ergänzung der Datengrundlage

Einen zentralen Bestandteil des abgeschlossenen Vorhabens stellte die Auswertung von Wiederholungsnivellements zur Ableitung vertikaler Krustenbewegungen dar. Im Bereich der deutschen Ostseeküste wurden seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts 11 Präzisionsnivellements durchgeführt:

- Großherzoglich Mecklenburgische Landesvermessung (GMLV), 1869–1873
- Landesnivellement der Trigonometrischen Abteilung der Landesaufnahme Preußens (TALP), 1869–1889
- Gradmessungsnivellements des Geodätischen Instituts Potsdam (GIP), 1869–1884
- Ostseeküstennivellement der Trigonometrischen Abteilung der Landesaufnahme Preußens (OKN 1), 1896-1901
- Nivellements des Büros für Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen (BHW), 1906
- Landesnivellement der Trigonometrische Abteilung des Reichsamtes für Landesaufnahme (RfL), 1913–1941
- Staatliches Nivellementsnetz der DDR, 1. und 2. Ordnung (SNN56), 1954–1959
- Nivellementnetz 60 (DHHN60), 1947–1962
- Ostseeküstennivellement (OKN 2), 1966
- Staatliches Nivellementsnetz der DDR, 1. und 2. Ordnung (SNN76), 1974–1982
- Deutsches Haupthöhennetz 85 (DHHN85), 1980–1985.

Desweiteren fanden 1992 Verbindungsmessungen zwischen den Netzen des DHHN85 (alte Bundesländer) und SNN76 (neue Bundesländer) statt.

Dem Vorhaben entsprechend wurde zunächst die am Institut bereits bestehende Datenbasis ergänzt. Umfangreiche Recherchen waren notwendig, um historische und zum Teil unveröffentlichten Quellen zu erschließen und das Datenmaterial für die jüngeren Epochen zu vervollständigen. Dabei wurde intensiv und erfolgreich mit den Vermessungsbehörden von Bund und Ländern zusammengearbeitet, insbesondere mit dem

- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Außenstelle Leipzig (BKG)
- Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein, Kiel (LVA-SH)

- Landesvermessungsamt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin (LVA-MV).

Im Laufe des Vorhabens konnten folgende Datensätze neu erschlossen und in die Datenbasis aufgenommen werden:

- Messdaten und Zusatzinformationen zum OKN 2 (BKG)
- Messdaten, Höhenverzeichnisse und Zusatzinformationen zu den Nivellements in Schleswig-Holstein (LVA-SH)
- vollständige Linienverzeichnisse von originären Messdaten und Punktinformationen für die Nachkriegsepochen in digitaler Form (BKG)
- Originalunterlagen (Messprotokolle und Linienverzeichnisse) des RfL (BKG)
- Linienverzeichnisse des RfL (LVA-MV)
- Zusatzinformationen (Beobachtungs- und Auswertemethodik, Messgenauigkeiten, Grundlagen der Nivellementsnetze und Höhensysteme) zu den einzelnen Epochen.

Vorstudien, die im Laufe des ersten Projektjahres beispielhaft für den Küstenabschnitt Mecklenburg-Vorpommerns durchgeführt wurden, hatten gezeigt, dass einerseits zur Ableitung detaillierter räumlicher Muster von Vertikalbewegungsvariationen eine deutlich höhere Zahl von Festpunkten einzubeziehen ist, und dass andererseits durch Unterschiede in den Nivellementsauswertungen hervorgerufene systematische Effekte durch die Verwendung roher, d.h. unkorrigierter Höhenunterschiedsmessdaten reduziert werden können. Demzufolge stellte der Zugang zu den vollständigen Linienverzeichnissen der Epochen nach 1945 eine wichtige Voraussetzung für die Erarbeitung der vorliegenden Ergebnisse dar.

Für die Entwicklung einer erfolgreichen Auswertemethodik waren neben den eigentlichen Messdaten eingehende Kenntnisse zu den verschiedenen Messepochen und den dazu vorliegenden Beobachtungsdaten erforderlich. Zu diesem Zweck wurden für alle berücksichtigten Nivellements eine Reihe von Zusatzinformationen recherchiert, darunter:

- Beobachtungsverfahren
 - Instrumententechnik (Nivellierinstrumente, -latten)
 - Berücksichtigung systematischer Fehlereinflüsse durch das Beobachtungsverfahren
 - Genauigkeit der Nivellements
- Festpunkte
 - Vermarkungsarten und Standorte (Abbildung 5)
 - Punktbeschreibungen und -koordinaten

- Beobachtungszeitpunkte
- Auswertemethodik der Messdaten
 - Berücksichtigung von Korrekturen
 - Ausgleichungsverfahren
 - Maßeinheit (Meterkonvention)
- Grundlagen der Nivellementsnetze und Höhensysteme
 - Höhensystem (orthometrische Höhen, normalorthometrische Höhen, Normalhöhen)
 - Datumsfestlegung
 - Netzgeometrie (Schleifengröße, Linienverläufe).

Alle neu erschlossenen Daten wurden erfasst, gesichtet und gemeinsam mit dem schon vorhandenen Material systematisiert.

Weitere Daten wurden im Rahmen von Feldarbeiten selbst erhoben (Abschnitt 2.1.2). So wurde auf der Grundlage von Erkundungen eine aktuelle Dokumentation von historischen Festpunkten entlang der Ostseeküste erstellt und historische Festpunkte durch Präzisionsnivellements eingemessen.

2.1.2 Feldarbeiten

Im Rahmen von Feldbegehungen wurden historische Nivellements festpunkte erkundet. Zunächst geschah dies für die Linien Zirchow-Stralsund, Stralsund-Arkona und Stralsund-Dassow in Mecklenburg-Vorpommern, 2002 und 2003 dann auch für Schleswig-Holstein (Lübeck-Flensburg).

Auf der Grundlage von Punktbeschreibungen der frühen Nivellements wurden Festpunkte (im wesentlichen aus dem 19. Jahrhundert) aufgesucht und:

- auf Identität mit aktuellen Netzpunkten überprüft
- fotografisch dokumentiert
- in ihren Lagebeschreibungen aktualisiert und präzisiert
- hinsichtlich Zustand und Nutzbarkeit für künftige Einmessungen beurteilt:
 - Anfahrtsbedingungen und Zugang
 - Art und Stabilität der Vermarkung
 - Zustand und Stabilität des Vermarkungsträgers und der nächsten Umgebung
 - nahegelegene amtliche Höhenfestpunkte als Anschluss.

Im Ergebnis dieser Erkundungen ist eine umfangreiche, systematische Festpunktdokumentation entstanden (siehe Abbildung 6). Entlang der Nivellementslinien in Mecklenburg-Vorpommern wurden 142 historische Messpunkte erkundet, wovon in der Örtlichkeit noch 98 aufgefunden wurden. Desweiteren wurden die Pegelanlagen der bearbeiteten Küstenpegel aufgesucht, um die Stabilität von Pegelfestpunkten und ihre Verwendbarkeit zur Verbindung von Nivellements und Pegelmessungen zu überprüfen.

Weitere Feldarbeiten im September 2003 dienten der Einmessung von 23 historischen Festpunkten, die im jüngsten amtlichen Nivellement nicht mehr bestimmt wurden. Diese Punkte wurden durch Präzisionsnivellements an nahegelegene aktuelle Netzpunkte angeschlossen. Dabei kam ein Digitalnivellier Zeiss DiNi12 und Präzisionsinvarbandlatten zum Einsatz, die angewandte Beobachtungsanordnung entsprach der amtlicher Präzisionsnivellements.

Ziel der Feldmessungen war es, mehr homologe Punkte zwischen der aktuellen und den frühen Nivellementsepochen für die Analyse nutzbar zu machen. Unter der Annahme, dass die relative Höhenlage der historischen zu den lokalen aktuellen Festpunkten seit der letzten amtlichen Einmessung unverändert geblieben ist, können somit für im 19. Jahrhundert bereits eingemessenen Punkte Höhen für die Epoche SNN76 angegeben und somit über lange Zeiträume zuverlässig bestimmte Höhenänderungen verdichtet werden.

2.1.3 Aufbau der Datenbank

An die Sichtung und Systematisierung des verfügbaren Datenschatzes schloss sich die Auswahl des in die weitere Bearbeitung einzubeziehenden Materials an.

Räumlich wurde die Gesamtheit der oft für weite Teile Deutschlands vorliegenden Messdaten (Abbildungen 2, 3, 4) auf die entscheidenden Nivellementslinien beschränkt (Abbildung 8). Dem Ziel des Vorhabens entsprechend stellte die küstennahe Nivellementslinie von Zirchow nach Flensburg das zentrale Untersuchungsobjekt dar. Aus der Zielstellung, die Nivellementmessungen mit Pegeln zu verbinden, sowie um die durch die küstenparallele Nivellementslinie ungenügend bestimmte Nord-Süd-Komponente von Höhenänderungen zuverlässiger ermitteln zu können, ergab sich die Notwendigkeit, weitere Nebenlinien in die Untersuchungen einzubeziehen.

Die operative Datenbank stellt auch eine zeitliche Auswahl des gesamten Datenfundus dar. Von den verfügbaren 11 Nivellements wurden drei Epochen – GMLV, GIP und BHW – in der weiteren Bearbeitung nicht einbezogen. Das entscheidende Kriterium hierfür war, neben der auffällig schlechteren Messgenauigkeit von GMLV und BHW (siehe Abbildung 1), dass nur verschwindend wenige Messpunkte dieser Nivellements in späteren Epochen wieder eingemessen wurden und somit keine Wiederholungsmessungen zur Ableitung von Höhenänderungen zur Verfügung stehen.

Die erstellte Datenbank umfasst somit alle Messdaten auf den in Abbildung 8 dargestellten Nivellementslinien aus den Epochen

- TALP
- OKN 1
- RfL
- SNN56 / DHHN60
- OKN 2
- SNN76 / DHHN85.

Die in der Regel als Kopie von Büchern oder losen Blattsammlungen vorliegenden Ausgangsdatenquellen wurden digital erfasst und in eine rechentechnisch nutzbare Form überführt. Zu diesem zeitintensiven Arbeitsschritt wurden studentische Hilfskräfte herangezogen. Für die Korrektheit der später berechneten Höhenänderungen war entscheidend, dass die erstellten Messdateien fehlerfrei waren. Deshalb wurden geeignete Werkzeuge entwickelt, um die Plausibilität der erfassten Daten zu kontrollieren. Neben unausschließbaren Fehlern bei der Abschrift der mitunter schwer lesbaren Daten konnten so auch vereinzelte Fehler in den Originalunterlagen aufgedeckt werden.

Im Anschluss an die originalgetreue Digitalisierung der Linienverzeichnisse waren die Beobachtungsdaten in ein geeignetes einheitliches Datenformat zu überführen. Zunächst mussten dazu die Daten unterschiedlicher Epochen einheitlich strukturiert werden (Zuordnung zu Nivellementslinien, Fusion und Homogenisierung von Nivellements 1. und 2. Ordnung).

Einen wichtigen Arbeitsschritt stellte die Identifizierung und Referenzierung homologer Punkte in den verschiedenen Epochen dar. Die Identität der wiederholt bestimmten Punkte erfolgte auf der Grundlage der Punktbeschreibungen in den Originaldokumenten; für die teilweise spärlich dokumentierten historischen Epochen erwies sich dies mitunter als schwierig. Eine große Hilfe stellte dabei die Felderkundung und erstellte Punktdokumentation (Abschnitt 2.1.2) dar. Die Referenzierung identischer Punkte in den Epochen wurde durch die Zuweisung einer eindeutigen Punktnummer als Punktattribut realisiert.

Für die Nivellements vor 1945 liegen zum großen Teil nur linienweise Punkthöhen vor (Abbildung 9). Da die Bestimmung von Höhenänderungen auf der Basis von (gemessenen) Höhenunterschieden zwischen jeweils zwei Festpunkten erfolgen sollte, waren die Höhen der historischen Epochen in Höhenunterschiede umzuformen. Rechentechnisch bedeutet dies einen Übergang von Dateien von Punktattributen (u.a. Höhe) zu einer relationalen Datenstruktur (Höhenunterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Punkten). Aus geodätischer Sicht ist dabei zu beachten, in welcher Weise sich Unterschiede in den Nivellementsauswertungen (Anbringen von Korrekturen, Ausgleichungsverfahren) als systematische Effekte auf die gegebenen Höhen auswirken.

Da die Messdaten der staatlichen Nivellementsnetze der DDR (SNN56, OKN2, SNN76) bereits in Form von unkorrigierten Höhenunterschieden und als digitale Dateien zur Verfügung standen,

mussten diese lediglich einer Konvertierung in das Dateiformat der Datenbank unterzogen werden.

Der Ablauf der notwendigen Arbeitsschritte zur Erstellung der Datenbank ist als Flussdiagramm in Abbildung 7 veranschaulicht. Im Ergebnis liegen für jede Nivellementslinie Dateien von

- epochenweisen Messelementen (Höhenunterschiede, weitestgehend homogenisiert)
- Punktinformationen

vor.

Jeder zeilenweise Datensatz einer Messelemente-Datei (dhi-Datei, siehe Abbildung 11) enthält die Punktnummern von Anfangs- und Endpunkt einer Nivellementsstrecke, den unkorrigierten gemessenen (beziehungsweise unter bestmöglicher Berücksichtigung auswertungsbedingter Einflüsse aus Höhen abgeleiteten) Höhenunterschied zwischen beiden Punkten, die nivellierte Streckenlänge, die Nivellementsepoche, das genaue Beobachtungsjahr sowie Informationen über Anzahl und Mittelung von Mehrfachmessungen und Anzahl von Lattenaufstellungen.

Der Datensatz einer Punktinformationsdatei (pkt-Datei, siehe Abbildung 12) setzt sich zusammen aus einer Punktnummer (Datenbank-ID), der aktuellen amtlichen Punktnummer, den geographischen Koordinaten, Art und Jahr der Vermarkung, einer kurzen Lagebeschreibung, der Anzahl und den Epochen der Höhenbestimmungen des Festpunktes, der zugehörigen Liniennummer, sowie dem Punktstatus.

Die operative, d.h. bei Programmablauf abgerufene Datenbank umfasst

- dhi-Dateien
- pkt-Dateien
- zusätzliche Dateien mit Sekundärinformationen für den Programmablauf (allgemeine Epochenbeziehungsweise Linieninformationen),

weiterhin werden die digitalen Originalabschriften der Quellen zu Dokumentationszwecken gespeichert. Alle Dateien werden als formatierte ASCII-Tabellen geführt, um einen flexiblen, einfachen und Software-unabhängigen Zugriff zu ermöglichen.

Die für die Bestimmung von Höhenänderungen nutzbare Datengrundlage ist in Abbildung 13 veranschaulicht. Voraussetzung für den Nachweis zeitlicher Änderungen von Höhenunterschieden ist das Vorliegen wiederholter Messungen zwischen identischen Punkten. Dabei kann der zeitliche Verlauf der Höhenänderungen um so detaillierter, beziehungsweise die Änderungsgeschwindigkeit um so zuverlässiger bestimmt werden, je mehr Wiederholungsmessungen verfügbar sind. Abbildung 13 lässt jedoch eine inhomogene Überdeckung des Untersuchungsgebietes mit Wiederholungsmessungen erkennen. Insbesondere die Linienabschnitte westlich von Wismar sind durch das Vorliegen deutlich weniger Messepochen, und darüber hinaus durch eine geringere Dichte von wiederholt eingemessenen Punkten gekennzeichnet, woraus wiederum eine geringere räumliche Auflösung der zu detektierenden Variationen des Höhenänderungsverhaltens resultiert.

2.1.4 Entwicklung geeigneter Auswerteverfahren und Auswertung

Höhen oder Höhenunterschiede?

Das für die untersuchten Nivellements ursprünglich vorliegende Datenmaterial weist markante Inhomogenitäten auf. Für die Bestimmung von Höhenänderungen wesentliche Unterschiede betreffen:

- Angabe von Messwerten (Höhenunterschiede) oder Auswertergebnissen (Höhen)
- Berücksichtigung von Korrekturen
- zugrundeliegende Maßeinheit (Meterkonvention)
- Ausgleichungsverfahren
- Höhensystem (orthometrische, normalorthometrische, Normalhöhen)
- Datumsfestlegung.

Während die Angabe einer Höhe für einen Festpunkt direkt vom zugrundegelegten geodätischen Datum und Höhensystem abhängt, sind die Höhenunterschiede zwischen (hinreichend nahegelegenen) Messpunkten von den Festlegungen von Nullniveau und Höhendefinition der Nivellementsnetze unabhängig. Änderungen im Höhenbezug und -system, wie sie zwischen den untersuchten Nivellements wiederholt aufgetreten sind, verursachen Unterschiede in Festpunkthöhen, die nicht auf reale Höhenänderungen der Punkte zurückzuführen sind (sog. Systemdifferenzen). Desweiteren stellen die in Höhenverzeichnissen veröffentlichten Festpunkthöhen in aller Regel das Ergebnis einer Ausgleichung dar, wobei Einzelheiten des Ausgleichungsverfahrens und die angebrachten Verbesserungen oftmals nicht veröffentlicht worden beziehungsweise verlorengegangen sind. Eine solche Ausgleichung dient dazu, infolge Messfehler auftretende Widersprüche in den Messergebnissen zu tilgen, indem der resultierende Gesamtfehler entfernungsproportional auf die Einzelmessungen verteilt wird. Obwohl dies zu globaler Konsistenz unter den zusammengefassten Messergebnissen (Linien, Schleifen, Netze) führt, können die in der Ausgleichung berechneten Verbesserungen fehlerfrei gemessene Einzelmessungen (Strecken) verfälschen. Zu ähnlichen Artefakten, d.h. Differenzen in Punkthöhen, die nicht einer realen Vertikalverschiebung entsprechen, führt die unterschiedliche Berücksichtigung von Korrekturen.

Daraus folgt, dass ausgeglichene Punkthöhen nur bedingt dazu geeignet sind, tatsächliche Vertikalbewegungen von Festpunkten zu bestimmen, da diese von systematischen Änderungen des Höhenwertes infolge unterschiedlicher Festlegungen von Datum und Höhensystem sowie Effekten von Korrekturen und Fehlerausgleichung überlagert werden. Aus diesem Grunde fußt die vorliegende Untersuchung prinzipiell auf der Grundlage der zwischen aufeinanderfolgenden Messpunkten gemessenen Höhenunterschiede. Die Höhenunterschiede sollten

- nicht ausgeglichen
- für alle Epochen einheitlich korrigiert

- oder: die Korrekturen und Verbesserungen dokumentiert und nachvollziehbar

sein.

Diese Forderungen werden von den Messdaten nach 1945 und von einem Teil der Daten des RfL erfüllt. Für die übrigen Epochen – TALP, OKN1 und teilweise RfL – musste auf linienweise Höhenverzeichnisse zurückgegriffen werden, da Originalunterlagen wie Messprotokolle (zum Teil infolge Kriegswirkungen) nicht mehr existieren.

Die in den Verzeichnissen angegebenen Punkthöhen wurden in Höhenunterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Punkten überführt. Auf diese Weise wurden Störeinflüsse von Datums- und Höhensystemänderungen ausgeschlossen. Der durch die Verwendung des alten Meternormals („legaler“ anstatt internationaler Meter) in der Epoche TALP hervorgerufene Maßstabsfehler erwies sich unter Berücksichtigung der geringen auftretenden Höhenunterschiede und der Messgenauigkeit dieser Epoche als vernachlässigbar gering (2 mm für einen Höhenunterschied von 150 m). Darüber hinaus sind die zugrundeliegenden Höhenwerte für das OKN1 frei von durch Ausgleichungen verursachten Verfälschungen. Keine der historischen Epochen wurde einer Gezeiten- oder Schwereanomalienkorrektur unterzogen, lediglich die aus Höhenverzeichnissen gewonnenen Daten des RfL wurden wegen Niveauflächenkonvergenz (K1) korrigiert. Der Einfluss dieser breitenabhängigen Korrektur wurde beispielhaft entlang der Linie Arkona (N) – Zirchow (S) modelliert und überstieg dabei 2 mm nicht.

Es kann zusammengefasst werden, dass der vollzogene Übergang von Punkthöhen zu rohen Höhenunterschieden sowie die Erschließung entsprechender Datenquellen die Messdaten der verschiedenen Nivellementsepochen weitestgehend vergleichbar macht. Störende systematische Einflüsse auf die abgeleiteten streckenweisen Höhenunterschiede sind lediglich infolge Effekte nicht mehr rekonstruierbarer Ausgleichungen der Messdaten der Epochen TALP und teilweise RfL zu erwarten.

Von Höhenunterschieden zu Trendprofilen

Als Ausgangspunkt für die Berechnung von relativen Höhenänderungen zwischen Nivellements-festpunkten liegen in der beschriebenen Datenbank für jede Linie und Epoche streckenweise Höhenunterschiede vor (dhi-Dateien). Wenn die Nivellementslinie nicht unterbrochen, d.h. wenn jeder Endpunkt einer Strecke Anfangspunkt der folgenden Strecke ist, kann für zwei beliebige in der Linie enthaltene Festpunkte für die entsprechende Epoche die nivellierte Höhendifferenz durch Aufsummieren der streckenweisen Höhenunterschiede ermittelt werden. Liegen darüber hinaus auch Messungen zwischen beiden Punkten zu einer zweiten oder mehr Epochen vor, so können für diese Epochen ebenfalls die entsprechenden Höhendifferenzen berechnet, miteinander verglichen und der zeitliche Verlauf der relativen Höhenänderung zwischen beiden Punkten analysiert werden. Zum Nachweis rezenter Höhenänderungen der Erdkruste bietet sich eine Approximierung der zeitlichen Höhendifferenzänderungen zwischen den Epochen in Form eines linearen Trends an, wobei dieser Trend dann die mittlere vertikale Geschwindigkeit des einen relativ zu dem anderen Festpunkt repräsentiert. Wird in derselben Weise für eine Vielzahl von Punkten einer Nivellementslinie verfahren, wobei jeder Punkt mit demselben Anfangspunkt verglichen wird, so können räumliche

Variationen der Hebungs-/Senkungsraten der Festpunkte entlang der Linie und in Bezug auf den Anfangspunkt dargestellt und auffällige Muster detektiert und interpretiert werden.

Auf diesem Ansatz basiert das im Rahmen des abgeschlossenen Vorhabens entwickelte Auswerteverfahren zur Ableitung von Höhenveränderungen aus Wiederholungsnivellements. Der komplexe Algorithmus wurde in einem modularen Programm rechenstechnisch implementiert, das auf die Struktur der erstellten Datenbank abgestimmt ist und direkt auf sie zugreift. Das Prinzip des Programmablaufs ist in Abbildung 15 dargestellt.

Zunächst werden dem Programm die Eingangsgrößen

- Punktnummer Anfangspunkt des zu berechnenden Trendprofils
- Punktnummer Endpunkt des zu berechnenden Trendprofils
- Liniennummern entsprechend dem Verlauf des Trendprofils
- Mindestanzahl verfügbarer Messepochen, und
- Liste der zu berücksichtigenden Epochen

übergeben. Gemäß dieser Vorgaben wird aus den linienweisen pkt-Dateien eine Liste aller gültiger Punkte und der jeweils verfügbaren Messepochen extrahiert. Auf dieser Grundlage wird nun für jeden Punkt in der Liste

- epochenweise die Höhendifferenz zum Anfangspunkt ermittelt
- die Höhendifferenzen mit dem Beobachtungsjahr (u.a. Informationen) in einer temporären Datei (trd-Datei) abgelegt
- aus der trd-Datei der zeitlich lineare Trend der Höhendifferenzen (sowie ein formales Fehlermaß) berechnet
- die Änderungen der Höhendifferenzen und der berechnete Trend in einem $dh - T$ -Diagramm grafisch visualisiert.

In einer prf-Datei werden die ermittelten Trends aller gültigen Punkte sowie ihre Koordinaten und nivellierten Entfernungen zum Anfangspunkt mitgeführt. Die Trends aller Profilpunkte werden in einem $v_z - s$ -Diagramm über der Nivellementsentsfernung grafisch aufgetragen.

Auswertung und Ergebnisse

Der entwickelte Algorithmus wurde auf alle in der Abbildung 8 dargestellte Nivellementslinien angewandt.

Eine wichtige Frage, die bei der Auswertung zu klären war, betraf die anzugebende Mindestepochenanzahl für die Berechnung der Trendprofile. Einerseits ermöglicht eine große Anzahl von Epochen

eine zuverlässigere Bestimmung von Relativtrends (beziehungsweise die Ableitung eines detaillierten zeitlichen Verlaufs der Relativbewegung). Andererseits ist die Anzahl und räumliche Verteilung der Punkte mit maximaler verfügbarer Epochenanzahl begrenzt; für zahlreiche Linienabschnitte liegen grundsätzlich weniger als sechs Epochen vor. Das bedeutet, dass eine Erhöhung der zeitlichen Auflösung/Zuverlässigkeit eine Verringerung der räumlichen Auflösung der zu bestimmenden Muster der Trendvariationen mit sich bringt.

Gelöst wurde dieses Problem, indem zunächst für die maximal mögliche Epochenanzahl relativ zuverlässige Trends für die wenigen gültigen Festpunkte berechnet wurden. Durch schrittweises Verringern der Epochenanzahl für einzelne Linienabschnitte wurde die Punktzahl und -dichte erhöht. Auf diese Weise wurden die detaillierten räumlichen Trendmuster aus wenigen Epochen in ihren Trendwerten an den Stützstellen verifiziert, beziehungsweise die räumlichen Gültigkeitsbereiche der zuverlässiger bestimmten Trendwerte präzisiert.

In Abbildung 19 ist die räumliche Verdichtung des Trendprofils zwischen Flensburg und Elmschhagen durch nur dreifach eingemessene Punkte demonstriert. Im allgemeinen ergeben sich durch die Berücksichtigung weniger Epochen und der damit verbundenen ungenaueren Bestimmung der Relativtrends überhöhte Trendamplituden. Im dargestellten Beispiel wird deutlich, dass das Absinken des Punktes 2719 gegenüber seiner Umgebung (Punkte 2439 und 2965) mit ca. 3 mm/a nicht repräsentativ für das Intervall zwischen 2439 und 2965, sondern lokal auf den Abschnitt 2722-2934, möglicherweise sogar nur unmittelbar auf den Vermarktungsträger des Punktes 2719 beschränkt ist. Eine Vielzahl der Nivellementsprofile sind als Mauerbolzen an Gebäuden vermarktet, und vollziehen somit eventuelle Setzungen dieser Bauwerke mit. Das erklärt das nicht seltene markante Absinken einzelner Punkte gegenüber den umgebenden Punkten. Da diese Höhenänderungen allein für den Punkt, und nicht für seine Umgebung repräsentativ ist, werden sie als Eigenbewegungen bezeichnet. Auf diese Ursache kann sicher auch das in Abbildung 18, unten veranschaulichte Sinken des Mauerbolzens 4041 am Gasthof Gelbensande gegenüber Gelbensande, Bahnhof und Damgarten, Kirche zurückgeführt werden. Es ist dabei ein Abklingen der Relativbewegungsraten zu erkennen, das typisch für Bauwerkssetzungen ist.

Durch die Analyse der zeitlichen Änderungen der paarweisen Punkthöhenunterschiede ($dh - T$ -Diagramme) und des Trendverhaltens entlang der Nivellementsprofile ($v_z - s$ -Diagramme) konnten Punkte mit Anzeichen für Eigenbewegungen detektiert werden. Mitunter wiesen auch kleine, konzentrierte Punktgruppen ein einheitliches relatives Absinken gegenüber allen umliegenden Punkten auf. Dies kann, vor allem in städtischen Gebieten, durch sehr lokale Senkungserscheinungen des Untergrundes (infolge Erdbauarbeiten, Bauwerksauflasten, Grundwasseränderungen, Ausspülungen) hervorgerufen werden. Da das Ziel der Untersuchungen in der Bestimmung weiträumiger Höhenveränderungen lag, wurden diese Punkte von den weiteren Analysen ausgeschlossen. Punkte und Punktgruppen, für die im Zuge der Auswertung Eigenbewegungen beziehungsweise lokale Senkungen festgestellt wurden, sind in der Abbildung 20 dargestellt. Die auffallende Konzen-

tration sinkender Punkte in den östlichen Nivellementslinien ist dabei auf Inhomogenitäten der Datengrundlage zurückzuführen. Für die westlichen Linien stehen generell weniger Messepochen und, infolge wiederholt veränderter Linienführungen, eine deutlich geringere Dichte wiederholt eingemessener Punkte zur Verfügung, wodurch eine zweifelsfreie lokale Begrenzung der ermittelten Relativbewegungen erschwert wird.

Das Ergebnis der Auswertungen liegt in Form linienweiser Relativtrendprofile vor. In Abbildung 21 ist im oberen $v_z - s$ -Diagramm die Variation der relativen Höhenänderungstrends entlang der küstenparallelen Nivellementslinie Zirchow–Flensburg in Bezug auf den Festpunkt 2444 in Flensburg dargestellt. Generell ist zu erkennen, dass die Höhenänderungen entlang der deutschen Ostseeküste 0,4 mm/a, das entspricht einer relativen Hebung/Senkung von 4 cm pro Jahrhundert, nicht überschreiten. Relativ geringe Variationen der Höhenveränderungen ergeben sich für den langen Linienabschnitt zwischen Stralsund und Grevesmühlen. Von Grevesmühlen bis Kiel zeigt das Profil ein scharnierartiges relatives Absinken des westlichen Linienteils um ca. 0,4 mm/a auf 130 km Nivellementsweg. Zwischen Kiel und Schleswig ergeben sich auf verhältnismäßig engem Raum starke Gradienten in den Höhenänderungsraten, die durch eine kuppelförmige Anhebung einer Punktgruppe um Eckernförde gekennzeichnet sind. Östlich von Stralsund weisen die Nivellementsdaten auf eine rasche Abnahme der Höhenänderungen bezüglich Flensburg hin, zwischen Kirchdorf und Zirchow sind keine deutlichen Variationen in den Höhenänderungsraten zu erkennen.

Beim Vergleich verschiedener Profilabschnitte untereinander ist zu berücksichtigen, dass die variierende Profildichte Unterschiede in der räumlichen Auflösbarkeit von Höhenänderungsmustern, und somit in den bestimmaren Maximalbeträgen relativer Höhenänderungen bedingt. Dies gilt insbesondere für die Abschnitte östlich von Damgarten. Desweiteren ist zu beachten, dass der Berechnung der Profilabschnitte unterschiedlich viele Messungen zugrunde liegen. Während zwischen Greifswald und Benz fünf bis sechs Epochen einfließen konnten, waren für die anderen Abschnitte überwiegend nur vier Messepochen nutzbar. Das erarbeitete Ergebnis ist jedoch hinsichtlich der Größenordnung und der räumlichen Variation der ermittelten Höhenänderungsgeschwindigkeiten plausibel und wird dem Ziel, weiträumige relative Höhenveränderungen entlang der Küste aus Wiederholungsnivellements abzuleiten, gerecht.

Die beiden unteren Diagramme in Abbildung 21 zeigen die entsprechenden Ergebnisse der Höhenänderungsbestimmung für die Nebenlinien Plön–Marienleuchte und Stralsund–Arkona. Beide Profile zeichnen sich durch ihre Orientierung in Nord-Süd-Richtung aus und ergänzen auf diese Weise sehr gut die Resultate der Küstenlinie. Die zwei voneinander unabhängig bestimmten Profile lassen übereinstimmend eine Hebung der nördlichen relativ zu den südlichen Punkten erkennen. Für die Nivellementslinien nach Marienleuchte/Fehmarn ergibt sich auf einer Linienlänge von ca. 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 Profilen sind Abschnitte geringer Höhenänderungsvariabilität deutlich von Intervallen mit erhöhten Trendgradienten zu

unterscheiden. Die Ergebnisse dieser, wie auch der anderen Nebenlinien sind als plausibel zu betrachten, stützen sich gegenseitig und erweitern die aus der Analyse der küstenparallelen Linie gewonnenen Erkenntnisse entscheidend.

2.2 Bestimmung säkularer Niveauverschiebungen an den Pegelstationen

Seit dem frühen 19. Jahrhundert werden an der südlichen Ostseeküste regelmäßige Pegelmessungen durchgeführt. In Swinoujscie (Swinemünde) begannen die Wasserstandsbeobachtungen 1811, es folgten Travemünde (1826), Wismar (1848), Warnemünde (1855) und weitere Küstenpegelstationen.

Derartig lange, kontinuierliche Pegelreihen sind geeignet, säkulare Wasserstandsänderungen nachzuweisen. Die am Pegel registrierte relative Meeresspiegeländerung gegenüber der Küste setzt sich dabei aus Änderungen des Wasserstandes einerseits und Vertikalbewegungen des Festlandes andererseits zusammen. Die unmittelbar am Pegel gemessenen Wasserstände beziehen sich zunächst auf einen willkürlich gewählten Pegelnullpunkt, und die Festlegung dieses Nullpunktes wurde im Laufe der Beobachtungen an vielen Pegeln mehrfach verändert. Regelmäßig durchgeführte Pegelkontrollnivelements dienen dazu, die Höhenlage des Pegelnullpunktes gegenüber seiner Umgebung, in der Regel repräsentiert durch eine Gruppe von Pegelfestpunkten, zu überprüfen und zu dokumentieren. Wenn für die Pegelfestpunkte Höhen in einem Höhensystem vorliegen, so können die Pegelstände bezüglich dieses Höhensystems angegeben werden. Zur Untersuchung langzeitiger Phänomene wie säkulare Meeresspiegeländerungen ist es notwendig, dass sich die Wasserstandswerte einer Pegelreihe auf eine einheitliche Höhenreferenz beziehen. Die ursprünglichen Wasserstände müssen demzufolge um die jeweilige Höhenlage des Pegelnullpunktes korrigiert werden, damit eine Pegelreihe für die Bestimmung säkularer relativer Höhenänderungen zwischen Festland und Meeresspiegel nutzbar wird.

Am Institut für Planetare Geodäsie sind solche homogene Pegelreihen für die Stationen Warnemünde, Wismar, Saßnitz, Barth, Swinoujscie und Greifswald erstellt und aufbereitet worden. Die originär vorliegenden Pegelaufzeichnungen mussten dazu digitalisiert, zu Monatsmitteln zusammengefasst und von vereinzelt auftretenden Messfehlern bereinigt werden. Aus der Analyse aller verfügbarer Pegelkontrollnivelements und unter Berücksichtigung der den Pegelfestpunkthöhen zugrundeliegenden Höhensysteme wurden die Korrekturen der Pegelnullpunktslagen und entsprechend korrigierte Wasserstandsreihen berechnet.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die bereits bestehenden Pegelreihen einer eingehenden Überprüfung unterzogen und gegebenenfalls ergänzt. Einen entscheidenden Impuls stellte dabei die Erschließung neuer Nivellementsunterlagen – insbesondere Einmessungen von Pegelfestpunkten in den historischen Nivellementsepochen – im Zuge der Ergänzung der Nivellementsdatenbasis (Abschnitt 2.1.1) dar.

Desweiteren wurden neue Pegelreihen für das monatliche Mittelwasser in Cuxhaven, Kolobzeg und Esbjerg aufbereitet und integriert. Diese Stationen dienen dazu, das für die südliche Ostseeküste erstellte Bild der relativen Meeresspiegeländerungen in den westlichen (Nordsee) und östlichen Küstenabschnitten zu stützen, und die ermittelten Variationen in den Zusammenhang mit dem weiträumigen Verhalten der Ostsee zu stellen.

Eine weitere Pegelreihe sollte für Nordwest-Rügen aus den Wasserstandsdaten der Pegel Wittower Posthaus (1854-1927) und Wittower Fähre (1910-2002) erstellt und zur Bestimmung säkularer Höhenänderungen zwischen Küste und Meeresspiegel herangezogen werden. Für beide Pegelstationen liegen aufbereitete, homogene Pegelreihen vor. Im Laufe der Bearbeitung hat sich jedoch gezeigt, dass die Nullpunkte der beiden Pegel sowohl untereinander als auch gegenüber der Küste Rügens absinken. Die Untersuchungen führten zu dem Schluss, dass die Messreihen der beiden Pegel aufgrund ihrer relativen Vertikalbewegung nicht zu einer gemeinsamen Pegelreihe verbunden und nicht dazu genutzt werden können, für die Küste Nordwest-Rügens repräsentative Werte für die relativen Höhenänderungen abzuleiten.

Aus den aufbereiteten Pegelreihen kann das Ausmaß säkularer relativer Niveauverschiebungen zwischen Küste und Meeresspiegel an den Pegelstationen aus dem linearen Trend der Zeitreihen ermittelt werden. Dies wurde für die bearbeiteten Pegel durchgeführt. Darüber hinaus wurden auch Wasserstandsreihen anderer Autoren, so die Pegelreihe von Travemünde aus [Jensen und Töppe, 1986] und Pegelreihen aus der Datenbank des Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) herangezogen. Die für die Pegel der südlichen Ostseeküste berechneten Kenngrößen sind in der Tabelle 7 im Anhang zusammengestellt.

Es ist zu erkennen, dass im Beobachtungszeitraum an allen Stationen der deutschen Ostseeküste der Wasserstand gegenüber dem Festland angestiegen ist. Die Anstiegsbeträge sind vergleichbar und streuen um ca. 1 mm/a. Es fällt jedoch auf, dass die Anstiegsraten zwischen den Pegelstationen variieren. Die Darstellung der räumlichen Variation der relativen Meeresspiegeländerungen in einer Karte (Abbildung 24) macht einen ausgeprägten Nord-Süd-Gradienten in den relativen Meeresspiegeländerungen deutlich: die stärksten Anstiege sind an den südlich gelegenen Stationen Travemünde (1,6 mm/a) und Wismar (1,4 mm/a) zu verzeichnen, für die nördlichste deutsche Station Saßnitz ergibt sich die geringste Anstiegsrate (0,6 mm/a).

Die an nahegelegenen Pegelstationen auftretenden Wasserstandsschwankungen sind stark miteinander korreliert. Zur Abschätzung der Genauigkeit der Pegelmessungen können daher die Differenzen zwischen den an den Pegeln registrierten Wasserstandsvariationen herangezogen werden. Die Standardabweichung von Differenzreihen benachbarter Pegel liegt typischerweise bei 3 bis 5 cm. Das gilt gleichermaßen für die frühesten Messungen und spricht für die bereits im 19. Jahrhundert erreichte hohe Messgenauigkeit und die Homogenität der Zeitreihen.

Die Genauigkeit der aus den aufbereiteten Pegelreihen abgeleiteten relativen Niveauverschiebungsraten kann mit 0,1 bis 0,2 mm/a angegeben werden.

2.3 Interpretation und Bewertung der Höhenänderungen im Küstenbereich

Vor einer Interpretation der aus Nivellements- und Pegelmessungen abgeleiteten Höhenänderungen sollen zunächst beide Messverfahren einander gegenübergestellt werden.

Beide Methoden stellen relative Messverfahren dar. Durch das geometrische Nivellement werden Änderungen von Höhenunterschieden bezüglich einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes bestimmt; während Pegelmessungen relative Höhenänderungen zwischen Festland und Meer widerspiegeln.

Charakteristisch für das geometrische Nivellement ist die Bestimmung von Höhenunterschieden durch eine Vielzahl von linienförmig zusammengesetzten Partialmessungen. Daraus resultiert sowohl eine hohe Messpunktdichte entlang der Nivellementslinie, als auch eine Abhängigkeit der Messgenauigkeit von der nivellierten Streckenlänge. Großräumige Präzisionsnivellements liegen jedoch nur für einige wenige Epochen vor, aus Wiederholungsnivellements abgeleitete Höhenänderungen weisen daher eine sehr begrenzte zeitliche Auflösung auf.

Im Gegensatz dazu ist die Pegelmessung als kontinuierliche Messmethode dazu geeignet, den zeitlichen Verlauf relativer Änderungen zuverlässig und zeitlich hochaufgelöst zu erfassen. Die Verschiebungsraten können jedoch nur punktuell für die Pegellokation bestimmt werden. Die Genauigkeit der aus Pegelmessungen bestimmten Höhenänderungen wird wesentlich durch die Sorgfalt bei den Pegelnullpunktskontrollen, zu einem Teil auch durch die hydrodynamischen Gegebenheiten der Pegelumgebung beeinflusst.

Die aus den aufbereiteten Pegelreihen ermittelten relativen Höhenänderungen haben zwei prinzipielle Ursachen: Wasserstandsänderungen und Vertikalbewegungen des Festlandes. Für einen begrenzten Küstenabschnitt wie die südliche Ostsee ist es sinnvoll anzunehmen, dass die säkularen Wasserstandsänderungen einheitlich verlaufen. Daraus folgt, dass die in Abbildung 24 erkennbaren Variationen der relativen Meeresspiegelanstiegsraten auf unterschiedlich intensive Vertikalbewegungen der Erdkruste zurückgeführt werden können.

Das erarbeitete Bild des relativen Meeresspiegelanstiegs (Abbildung 24) zeigt ein auffälliges Muster: Für den Bereich der südlichen Ostseeküste ergibt sich ein markanter Gradient in den relativen Höhenänderungsraten von Nord nach Süd. Diese zwischen den Pegelstationen interpolierten (und geglätteten) Isolinien weisen eine gute Übereinstimmung mit dem Muster der postglazialen Landhebung auf, wie es durch theoretische Krustenhebungsmodelle wie das Modell ICE4G nach [Peltier, 1998] (Abbildung 25) prädiziert und durch Messergebnisse, zum Beispiel des BIFROST-Projektes bestätigt wird. Dies lässt den Schluss zu, dass die Erdkruste im gesamten südlichen Ostseeraum von weitflächigen postglazialen Ausgleichsbewegungen beeinflusst wird. Darüber hinaus sind die aus langen, homogenen Pegelreihen ermittelten Trendunterschiede geeignet, die räumliche Variation der Landhebung zu bestimmen, da dieses Messverfahren prinzipiell entfernungsunabhängig ist.

Neben der postglazialen Landhebung sind weitere, engräumigere Ursachen für Vertikalbewegungen der Erdoberfläche zu untersuchen. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die im Küstenbereich der Ostsee in Betracht kommenden Phänomene. Zur Detektion kleinskaliger Höhenänderungen bietet sich die Nutzung von Wiederholungsnivellements an. Dabei sind außer den tatsächlichen Vertikalbewegungen der Erdoberfläche noch weitere Gründe für Änderungen von Höhen beziehungsweise Höhenunterschieden von Messpunkten zu berücksichtigen (siehe Tabelle 9).

Zur unabhängigen Beurteilung der Messgenauigkeit von Höhenänderungen aus Pegelreihen und Wiederholungsnivellements sowie zur Verifizierung der daraus abgeleiteten Ergebnisse kann der Vergleich beider Verfahren zwischen den Pegelstationen herangezogen werden. Voraussetzung dafür ist die zuverlässige Anbindung der Pegelfestpunkte, auf die die Pegelreihen reduziert wurden, an das ausgewertete Nivellementsnetz. Solche Vergleiche sind zwischen den Pegeln Greifswald-Saßnitz, Wismar-Warnemünde und Warnemünde-Greifswald möglich und in Tabelle 8 zusammengefasst. Die sich ergebenden Widersprüche setzen sich aus den Messunsicherheiten beider Verfahren zusammen. Aus dem vorigen Abschnitt 2.2 folgt ein anzunehmender Fehler der aus zwei Pegelreihen abgeleiteten relativen Höhenänderung von 0,2 mm/a, und zwar unabhängig von der Entfernung zwischen beiden Pegeln. Über die Genauigkeit des geometrischen Nivellements ist hingegen bekannt, dass sie unmittelbar von der Messentfernung abhängt. Die Vergleiche in Tabelle 8 erlauben somit Aussagen über die Zuverlässigkeit der aus Nivellements abgeleiteten Ergebnisse.

Für die drei Fälle ergeben sich Widersprüche in den relativen Höhenänderungsraten zwischen 0,0 (GREI-SASS) und 0,5 mm/a (WARN-GREI). Während die Differenzen zwischen den weniger entfernten Pegelstationen im Fehlerbereich von Pegeltrends liegen, zeigt die längste der Linien eine deutlich höhere Abweichung. Dies unterstreicht die begrenzte Eignung des Nivellements zum Nachweis von Vertikalbewegungen über sehr weite Entfernungen. Bei der Bewertung des Vergleichs WISM-WARN ist zu berücksichtigen, dass der Pegelbezugspunkt von Wismar nur über die jüngsten vier Epochen und somit verhältnismäßig unsicher an die anderen Pegel angeschlossen werden kann. Die gute Übereinstimmung in der relativen Hebung von Saßnitz relativ zu Greifswald erlaubt die Schlussfolgerung, dass der Nivellementsanschluss der Insel Rügen an die Küstenlinie durch Stromübergangsnivellements keine zusätzliche Fehlerquelle darstellt. Aus Tabelle 8 kann der Schluss gezogen werden, dass Höhenänderungen aus Nivellements und Pegelreihen innerhalb 0,5 mm/a konsistent sind. Unter Zugrundelegung einer Genauigkeit der Pegelergebnisse von 0,2 mm/a ergibt sich daraus eine Genauigkeit der aus Wiederholungsnivellements abgeleiteten Höhenänderungsraten von 0,5 mm/a über Entfernungen im Bereich einiger Hundert Kilometer.

Ausgehend von diesem Fehlermaß sind die für die gesamte Küstenlinie ermittelten weiträumigen Höhenänderungen (Beträge $< 0,4$ mm/a) als nicht signifikant zu betrachten. Infolge der starken Entfernungsabhängigkeit der Nivellementsgenauigkeit ist jedoch davon auszugehen, dass die zwischen nahegelegenen Festpunkten bestimmten relativen Höhenänderungen deutlich geringere Fehler aufweisen. Daraus folgt, dass die in den Profilen aufgedeckten Strukturen wie Trendwechsel und lokale Senkungen durchaus sicher bestimmt sind. Ein präzises Fehlermaß für die aus Nivellements ermittelten Höhenänderungen hängt außer der Messentfernung noch maßgeblich von den zugrunde-

liegenden Messepochen ab, die selbst innerhalb der Linien variieren. Für eine Distanz bis ca. 50 km und fünf nutzbare Messepochen erscheint eine Trendgenauigkeit von 0,1 mm/a realistisch.

Ausgehend von den vorangegangenen Überlegungen soll sich die Interpretation der Nivellementsergebnisse auf eine mögliche Erklärung der in den Trendprofilen detektierten Muster konzentrieren. Abbildung 26 (oben) zeigt die aus Wiederholungsnivellements ermittelten relativen Höhenveränderungen entlang der deutschen Ostseeküste (vgl. Abbildung 21). Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der dargestellten Änderungsraten sind im oberen Teil des Diagramms die Anzahl der für die zugehörigen Teilstrecken genutzten Messepochen angegeben. Auffällige Änderungen im Hebungs-/Senkungsverhalten sind markiert und, ergänzt um entsprechende Ergebnisse für die Nebenlinien, in der Übersichtskarte (unten) lokalisiert. Der Vergleich mit der geologischen Karte (Abbildung 27) zeigt, dass mehrere der detektierten Trendwechsel mit dem Verlauf tektonischer Strukturen in Zusammenhang gebracht werden können.

Als anschauliches Beispiel hierfür dienen die starken Höhenänderungsgradienten bei Lübeck/Dassow (Küstenlinie) und Neustadt (Nebenlinie nach Fehmarn, vgl. Abbildung 21). Für beide, unabhängige Linienabschnitte ergeben sich starke Senkungen der westlich gelegenen Punkte relativ zu den östlichen von 0,2 bis 0,3 mm/a. Die Lage der Trendwechsel koinzidiert auffällig mit dem Verlauf des Gifhorn-Lübecker-Tiefenbruchs in Abbildung 27. Die Nivellementsdaten könnten demzufolge darauf hindeuten, dass diese tektonische Störung rezent aktiv ist und eine relative Senkung des westlichen Teils Schleswig-Holsteins gegenüber der Erdkruste östlich des Tiefenbruchs bewirkt.

Ähnlich deutliche Anzeichen auf rezente Aktivität ergeben die Wiederholungsnivellements von drei unabhängigen Linien für die Bergener Störung auf der Insel Rügen. Weitere Trendwechsel in den Nivellementsprofilen können auf Aktivität der Güstrow-Müritzer Störung, des Rostock-Gramzower-Tiefenbruchs sowie der Wieker Störung auf Rügen hinweisen. Die kuppelartige Hebung des Linienabschnittes zwischen Schleswig und Kiel fällt in ein Gebiet, das durch Salzdiapire und Salzantiklinalen gekennzeichnet ist. Ein Quellen des salzhaltigen Untergrundes kann möglicherweise für die Wölbung der Erdoberfläche verantwortlich sein. Es muss jedoch darauf verwiesen werden, dass der starke Gradient in der Hebungsintensität zwischen Schleswig und Kosel lediglich drei Messepochen entspringt.

Der starke Gradient zwischen Stralsund und Kirchdorf kann durch die geologische Situation nicht erklärt werden. Obwohl diese Höhenunterschiedsänderung durch fünf Epochen relativ sicher bestimmt ist, können Einflüsse von Messfehlern nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Die in den beiden nord-süd-gerichteten Nebenlinien nach Marienleuchte und Arkona erkannte Hebung der nördlichen relativ zu den südlichen Nivellementspunkten befindet sich schließlich im Einklang mit dem aus den Pegelmessungen abgeleiteten Nord-Süd-Gradienten und kann, zumindest teilweise durch die postglaziale Landhebung verursacht sein.

Neben Erkenntnissen über ganzheitliche und großräumige Höhenveränderungen entlang der Ostseeküste erbrachten die Untersuchungen auch Aufschlüsse über engräumigere Vertikalbewegungen, die für Belange des Küstenschutzes von besonderer Relevanz sind. Hierzu zählt das auf der

Grundlage von Pegelmessungen quantifizierbare relative Absinken der Südspitze Wittows gegenüber dem Inselkern Nordrügens um ca. 0,3 mm/a. Für die Südspitze der Halbinsel Bug sind sogar Senkungsbeträge von bis zu 1 mm/a nicht auszuschließen. Die Ursache dafür ist wahrscheinlich in der Instabilität des lokalen Untergrundes der Pegelstandorte (Schwemmsand, begrabener Torf) zu suchen.

Die Auswertung der Nivellementsline zwischen Reinberg und Garz (Rügen) belegen ein scharnierartiges Absinken der Halbinsel Zudar gegenüber dem Inselkern Rügens um nahezu 0,3 mm/a an ihrer Südspitze.

2.4 Zusammenfassung

Im abgeschlossenen Vorhaben wurden Messdaten von sechs Nivellementsepochen im Küstenbereich der Ostsee in eine rechentechnisch nutzbare Datenbank aufgenommen, wobei erstmals aktuelle mit historischen Messungen aus dem 19. Jahrhundert zusammengeführt wurden. Es wurden Auswerteverfahren zur Ableitung relativer Höhenänderungen auf der Grundlage dieser Nivellementsdaten implementiert. Darüber hinaus liegen homogene Langzeitpegelreihen von der südlichen Ostseeküste vor, die zur Ableitung relativer Höhenänderungen herangezogen werden können.

Durch die vorliegenden Untersuchungen und Arbeiten wurde das Potential der für die Ostseeküste verfügbaren Präzisionsnivellements- und Pegelbeobachtungen ausgeschöpft. Im Ergebnis liegt ein umfassendes und detailliertes Bild des relativen Meeresspiegelanstiegs und relativer Vertikalbewegungen der Erdkruste entlang der deutschen Ostseeküste vor. Es wurde gezeigt, dass beide Verfahren zur Bestimmung relativer Höhenänderungen geeignet sind und sich gegenseitig ergänzen. Für die Ostseeküste Deutschlands ergeben sich für die letzten 150 Jahre sehr geringe relative Höhenänderungsbeträge, die im Rahmen der mit Nivellements über mehrere Hundert Kilometer erreichbaren Messgenauigkeit nicht signifikant sind.

Beide Messverfahren – geometrisches Nivellement und Pegelmessungen – erlauben lediglich die Detektion relativer Höhenänderungen. Eine wichtige und aktuelle Frage ist jedoch die Bestimmung absoluter, das heißt auf ein globales Referenzsystem bezogener Höhenänderungen von Erdkruste und Meeresspiegel. Moderne geodätische Satellitenmessverfahren, insbesondere das Global Positioning System (GPS) stellen ein geeignetes und leistungsstarkes Mittel zur Bestimmung absoluter Krustenbewegungen dar. Diese Technologie wird bereits von anderen Forschungseinrichtungen, beispielsweise vom BIFROST-Projekt in Skandinavien und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Deutschland erfolgreich zur Ableitung absoluter Vertikalbewegungsgeschwindigkeiten eingesetzt. Die Einbeziehung von GPS-Messungen mit dem Ziel, die ermittelten relativen Höhenänderungen in einem geozentrischen Bezugssystem angeben zu können, war ursprünglich auch zentraler Bestandteil dieses Vorhabens. Die Bestimmung absoluter Krustenhebungen erlaubt auch die Quantifizierung des absoluten Meeresspiegelanstiegs und somit die Separierung der in den Pegelmessungen sich überlagernden Effekte, wodurch Vorhersagen im Bereich des Küstenschutzes entscheidend präzisiert werden könnten.

Veröffentlichungen und Vorträge, die im Bezug zum durchgeführten Forschungsvorhaben stehen

Veröffentlichungen

Ein Beitrag in der Zeitschrift „Die Küste“ mit Bezug auf das abgeschlossene Vorhaben ist derzeit in Arbeit und wird bis spätestens Ende 2004 eingereicht.

Vorträge

Ergebnisse des Vorhabens wurden in Fachvorträgen auf folgenden Tagungen vorgestellt:

- KFKI-Seminar März 2002, Flintbek
- KFKI-Seminar Oktober 2003, Bremerhaven
- II. Klimaschutzkongress Mecklenburg-Vorpommern November 2003, Güstrow
- KFKI-Seminar November 2004, Bremerhaven (geplant).

Literatur

- [Augath, 1993] Augath, W. (1986). *Stand und Weiterentwicklung der Höhenüberwachung der niedersächsischen Nordeeküste*. Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, 43(1993)2, S. 78-92.
- [Bankwitz, 1985] Bankwitz, E. and Bankwitz, P. (1985). *Bewertung von Signalfolgen rezenter vertikaler Erdkrustenbewegungen*. Geodätisch Geophysikalische Veröffentlichungen Reihe III, 52, S. 50–63.
- [Duphorn, 1995] Duphorn, K., Kliewe, H., Niedermeyer, R.-O., Janke, W, und Werner, F. (1995). *Die deutsche Ostseeküste*. Sammlg. Geol. Führ., 88, 281 S., Berlin.
- [Ihde, 1987] Ihde, J. and Steinberg, J. and Ellenberg, J. and Bankwitz, E. (1987). *On recent vertical crustal movements derived from relevellings within the territory of the G.D.R.*. Gerlands Beiträge zur Geophysik, 96(1987), 3/4, S. 206–217.
- [Jensen und Töppe, 1986] Jensen, J. und Töppe, A. (1986). *Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826*. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, S. 99–107.
- [Kolp, 1979] Kolp, O. (1979). *Eustatische und isostatische Veränderungen des südlichen Ostseeraums im Holozän*. Petermanns Geographische Mitteilungen, 123, S. 177–187.
- [Kühhnen, 1916] Kühhnen, F. (1916). *Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde Marienleuchte Wismar Warnemünde Arkona Swinemünde Pillau Memel und das Mittelwasser der Nordsee bei Bremerhaven in den Jahren 1898-1910*. Veröffentlichung des Königl. Preuszischen Geodätischen Institutes, Neue Folge Nr. 70.
- [Lang, 1965] Lang, A. (1965). *Vorläufige Ergebnisse rezenter vertikaler Krustenbewegungen aus Vergleichen von Präzisionsnivellements in der DDR*. Petermanns geographische Mitteilungen, 109, S. 139–143.
- [Liebsch, 1997] Liebsch, G. (1997). *Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielstellungen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 485, 108 Seiten.
- [Montag, 1964] Montag, H. (1964). *Die Wasserstände an den ehemaligen Pegelstationen des Geodätischen Instituts Potsdam bis 1944*. Arbeiten aus dem Geodätischen Institut Potsdam, Nr. 5.
- [Montag, 1967] Montag, H. (1967). *Bestimmung rezenter Niveauverschiebungen aus langjährigen Wasserstandsbeobachtungen der südlichen Ostsee*. Arbeiten aus dem Geodätischen Institut Potsdam, Nr. 15.
- [Paschen, 1882] Paschen, F. (1882). *Grossherzoglich Mecklenburgische Landesvermessung, IV. Theil, Die Geometrischen Nivellements*. Schwerin. Schwerin.

- [Peltier, 1998] Peltier, W. (1998). *Postglacial variations in the level of the sea: Implications for climate dynamics and solid-earth geophysics*. *Review of Geophysics*, 36(4).
- [Seibt, 1881] Seibt, W. (1881). *Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde*. Publikation des Königlich Preussischen Geodätischen Institutes.
- [Seibt, 1890] Seibt, W. (1890). *Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde, zweite Mitteilung*. Veröffentlichung des Königlich Preussischen Geodätischen Institutes.
- [TAL, 1897] TAL (1897). *Nivellementsergebnisse der Trigonometrischen Abtheilung der Königl. Preuss. Landesaufnahme, Heft IV: Provinzen Schleswig-Holstein und Großherzogthümer Mecklenburg*. Trigonometrische Abtheilung der Königlich Preussischen Landesaufnahme, Berlin.
- [Turm, 1971] Turm, H. (1971). *Ableitung von Gradienten rezenter vertikaler Erdkrustenbewegungen für das Gebiet der DDR*. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 115, S. 124–129.
- [Westphal, 1900] Westphal, A. (1900). *Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona und Swinemünde in den Jahren 1882/1897*. Veröffentlichung des Königl. Preussischen Geodätischen Institutes, Neue Folge Nr. 2.

Tabellen

Tabelle 1: Übersicht über Präzisionsnivellements im Bereich der deutschen Ostseeküste

1.	Großherzoglich Mecklenburgische Landesvermessung (GMLV)	1869–1873
2.	Trigonometrische Abteilung der Landesaufnahme Preußens, N.N. „altes System“ (TALP)	1869–1889
3.	Gradmessungsnivellements des Geodätischen Instituts Potsdam (GIP)	1869–1884
4.	Trigonometrische Abteilung der Landesaufnahme Preußens „Ostseeküstennivellement“ (OKN 1)	1896-1901
5.	Büro für Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen (BHW)	1906
6.	Trigonometrische Abteilung des Reichsamtes für Landesaufnahme, N.N. „neues System“ (RfLA)	1913–1941
7.	Staatliches Nivellementsnetz der DDR, 1. und 2. Ordnung (HN56)	1954–1959
8.	Nivellementnetz 60 (DHHN 60)	1947–1962
9.	Ostseeküstennivellement (OKN 2)	1966
10.	Staatliches Nivellementsnetz der DDR, 1. und 2. Ordnung (HN76)	1974–1982
11.	Deutsches Haupthöhennetz 85 (DHHN 85)	1980–1985

Tabelle 2: Vergleich der Präzisionsnivellements I – Instrumententechnik, Beobachtungsverfahren und Genauigkeit

	Nivellierlatte	Zielweite	Beobachtungsreihenfolge	Genauigkeit (m_1)
GMLV	Holz	75-112m	R V	2.59mm
TALP	Holz	< 50m (nach 1879)	2x R V	1.33mm
GIP	Holz	15-100m	2x R V V R	0.56mm
OKN 1	Holz	< 50m	R V V R	0.58mm
RfLA	Holz	< 50m	R V V R	0.34mm
HN56	Invar	< 40/50m	R V V R	0.28mm
DHHN60	Invar	< 50m	R V V R	0.36mm
HN76	Invar	< 40/50m	R V V R	0.38mm
DHHN85	Invar	< 40m	R V V R	0.33mm

Tabelle 3: Vergleich der Präzisionsnivelements II – Berücksichtigung von Fehlereinflüssen, Korrekturen

	Erdkrümmung Refraktion Ziellinienfehler Instrumenten-/ Lattenprüfung	Einsinken der Nivellierlatte	Korrektion wegen Konvergenz der Niveauflächen	Korrektion wegen Schwere- anomalie	Gezeiten- korrektur
GMLV	ja	teilweise	nein	nein	nein
TALP	ja	teilweise	nein	nein	nein
GIP	ja	ja	nein	nein	nein
OKN 1	ja	ja	ja	nein	nein
RfLA	ja	ja	ja	nein	nein
HN56	ja	ja	ja	ja	nein
DHHN60	ja	ja	ja	ja	nein
HN76	ja	ja	ja	ja	ja (1. Ordnung)
DHHN85	ja	ja	ja	ja	nein

Tabelle 4: Vergleich der Präzisionsnivellements III – Meterkonvention, Höhensystem und Datumsfestlegung

	Meter	Höhensystem	Pegel	Datumspunkt	Bemerkung
GMLV	legaler	–	Wismar, Amsterdam	Pegelnulldpunkt Wismar	PN von Wismar, N.N. altes System
TALP	legaler	–	Amsterdam, Neufahrwasser	N.H. 1879	N.N. altes System
GIP	legaler	–	Amsterdam	N.H. 1879	N.N. altes System, N.N. GIP (1)
OKN 1	internationaler	normalorthometrisch	Amsterdam	N.H. 1879	N.N. vorläufiges Küstennivellement, N.N. GIP (2)
RfLA	internationaler	normalorthometrisch	Amsterdam	N.H. 1912	N.N. neues System
HN56	internationaler	Normalhöhen	Kronstadt	N.H. 1912	
DHHN60	internationaler	normalorthometrisch	Amsterdam	UF I Wallenhorst	N.N. neues System
HN76	internationaler	Normalhöhen	Kronstadt	N.H. 1912	
DHHN85	internationaler	normalorthometrisch	Amsterdam	UF I Wallenhorst	N.N. neues System

Tabelle 5: Statistische Kenngrößen der operativen Datenbank der Nivellementsdaten

Anzahl Punkte:	1940
Anzahl Epochen:	6
Messzeitraum:	1869 – 1992
Anzahl Linien:	5
Linienlänge [km]:	1383
Punktattribute:	12
Parameter dhi-Datei:	10

Tabelle 6: Anzahl verwendbarer homologer Punkte in Abhängigkeit von der Anzahl der Wiederholungsmessungen

Anzahl Epochen	Punkte (kumulativ)	Prozent	Punkte (absolut)
1	1582	100	793
2	789	50	173
3	616	39	324
4	292	18	235
5	57	4	29
6	28	2	28

Tabelle 7: Homogene Langzeitpegelreihen zur Ableitung säkularer Niveaushiftungen an der südlichen Ostseeküste

Pegelstation	Beobachtungszeitraum	säkulare relative Meeresspiegeländerung [mm/a]
Travemünde ¹	1826 – 1995	1,64
Marienleuchte	1882 – 1943	1,04
Wismar	1848 – 1998	1,41
Warnemünde	1855 – 1998	1,16
Barth	1863 – 1990	0,71
Saßnitz	1882 – 1998	0,64
Greifswald	1873 – 1998	0,86
Swinoujscie	1811 – 1997	1,09
Kolobzeg	1816 – 1999	1,13

Tabelle 8: Vergleich der aus Wiederholungsnivellements und Pegelmessungen ermittelten relativen Höhenänderungen (in mm/a) zwischen Pegelstationen

Pegelstationen		relative Höhenänderung aus:		Differenz
		Pegel	Nivellement	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

¹auf der Grundlage von: [Jensen und Töppe, 1986]

Tabelle 9: Mögliche Ursachen für Höhenänderungen von Nivellementsunkten im Breeich der südlichen Ostsee

Ursache	räumliches Erscheinungsbild
reale Vertikalbewegungen:	
Postglaziale Landhebung	Zentrum in Skandinavien, weiträumig
Tektonik	blockartig strukturiert, großräumig
lokale Senkungen	zeichnet kompakte Punktgruppe gegenüber Umgebung aus, engräumig und Halbinseln
Eigenbewegungen	zeichnet einzelnen Punkt (Vermarkung, Gebäude) gegenüber Umgebung aus
durch Messung und Auswertung bedingt:	
Festlegung des Nullniveaus	einheitlich für gesamtes Netz
Festlegung des Höhensystems	variiert zwischen Netzpunkten
Berücksichtigung von Korrekturen	variiert zwischen Netzpunkten
Messunsicherheiten	variiert zwischen Netzpunkten

Abbildungen

A Bestimmung von Höhenänderungen der Erdkruste auf der Grundlage von Wiederholungsnivellements

A.1 Datengrundlage

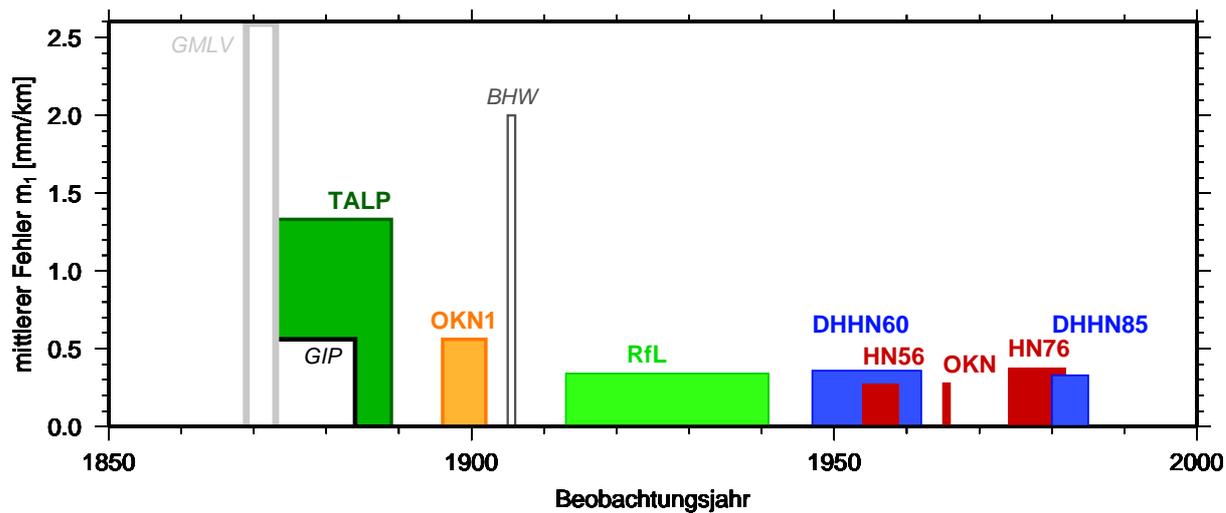


Abbildung 1: Nivellements an der deutschen Ostseeküste

Die Übersicht zeigt die verfügbaren Messungsepochen, ihre zeitliche Verteilung und Dauer, sowie die Entwicklung der Messgenauigkeit. Gefüllt dargestellte Epochen sind in die weiteren Untersuchungen eingeflossen.

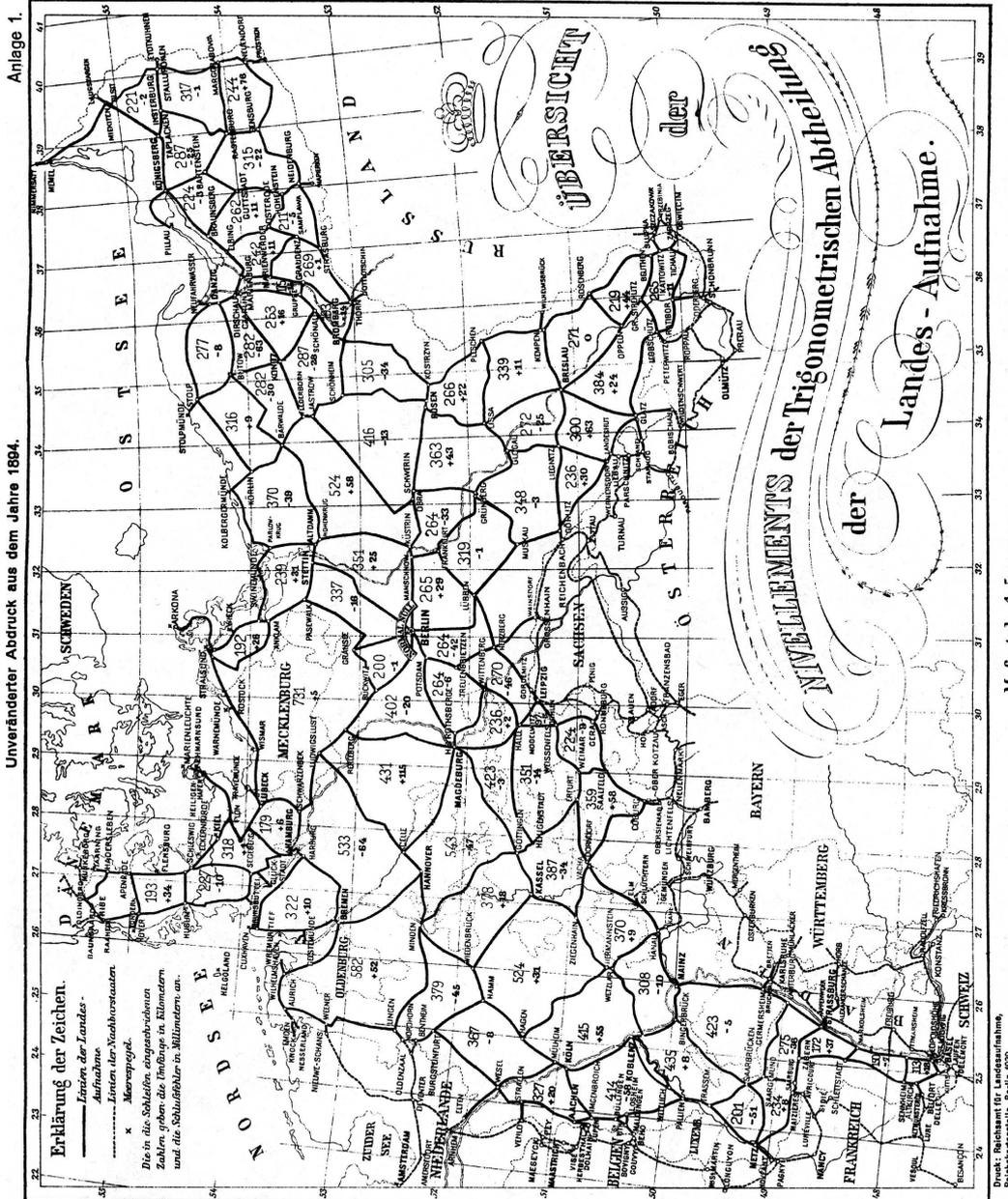


Abbildung 2: Nivellements der Königlich Preussischen Landesaufnahme (1869-1889)

Das Küstennivellement.

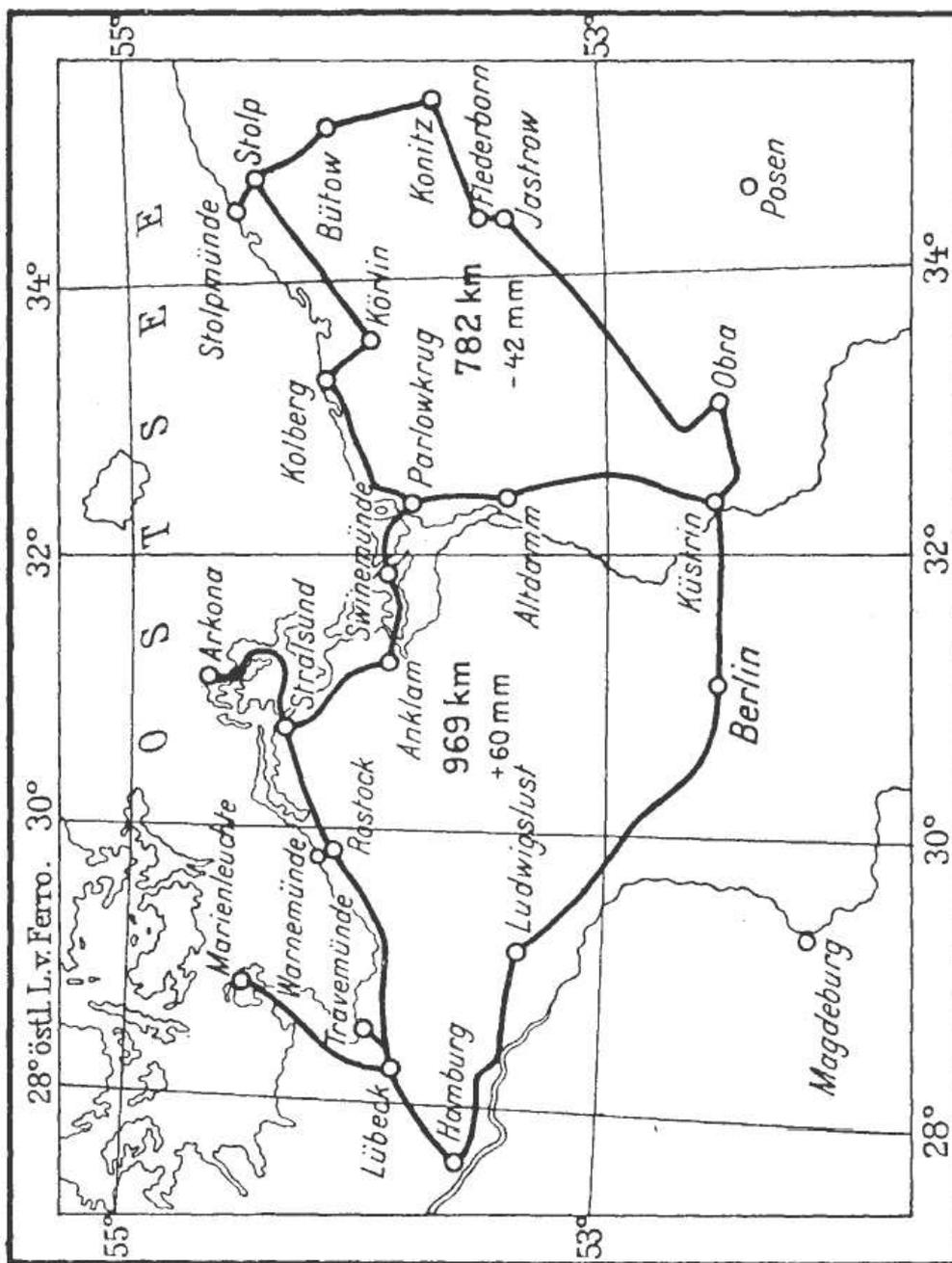


Abbildung 3: Ostseeküstennivellement (1896-1902)

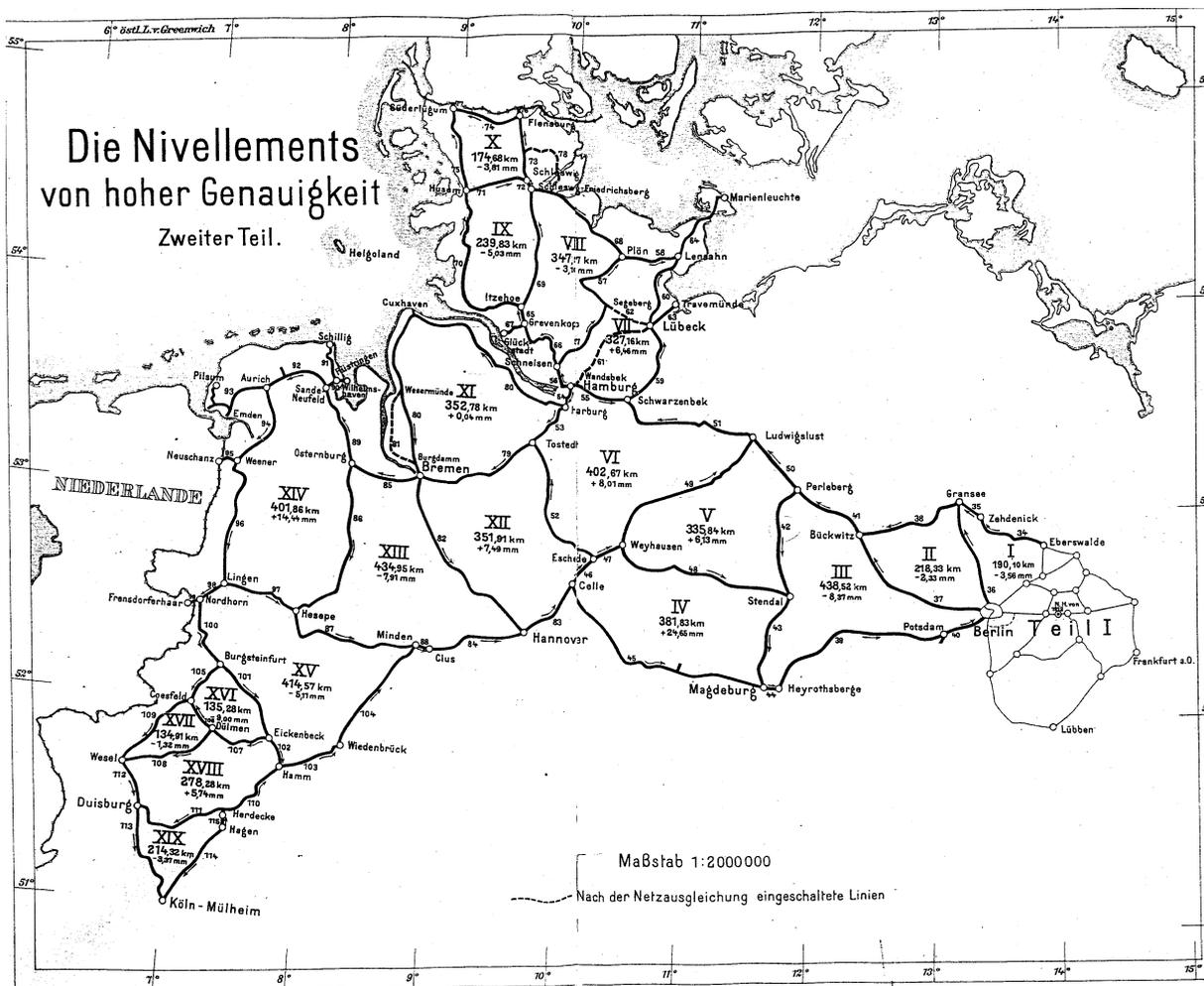


Abbildung 4: Nivellements des Reichsamtes für Landesaufnahme (1913-1941)

Verlauf der Nivellementslinien der Trigonometrischen Abteilung des Reichsamtes für Landesaufnahme entlang der Ostseeküste Schleswig-Holsteins und andere Netzteile.



Abbildung 5: Vermarkung der Festpunkte

Vermarkungen der Trigonometrischen Abteilung der Königlich Preußischen Landesaufnahme (oben): Höhenmarke (links) und Mauerbolzen (Mitte, rechts), Höhenmarken des Geodätischen Institutes Potsdam (unten links) und des Reichsamtes für Landesaufnahme (unten rechts).

A.2 Feldarbeiten

Nr.: 70 Ort: KIRCHDORF

Pktnr. HN76: 4063231190

Vermarkung: H.M.

Jahr der Erstbestimmung: 1890/91

Punktbeschreibung: Kapelle; Westseite des Turmes; 0,38m südlich der NW-Kante;
0,98m über dem Boden

nahegelegene Höhenfestlegungen: Nr. 71

Foto: Kirche Westseite mit H.M. und Südseite mit M.B. am Pfeiler

Bemerkungen:

- Kirche und Punkt gut erhalten
- Unterlagen HN76: 0,57m über Sockel
- von der B96 gen Süden Richtung Kirchdorf / Horst fahren; Kirche östlich der Dorfstraße



Abbildung 6: Beispiel Punktbeschreibung Kirchdorf

Auf den Linien Zirchow – Stralsund, Dassow – Stralsund und Stralsund – Arkona wurden anhand von Festpunktbeschreibungen historische Festpunkte aus dem 19. Jahrhundert erkundet. Von 142 recherchierten Festpunkten wurden 98 Punkte aufgefunden, Zustand und Lage der Punkte wurden dokumentiert.

A.3 Aufbau der Datenbank

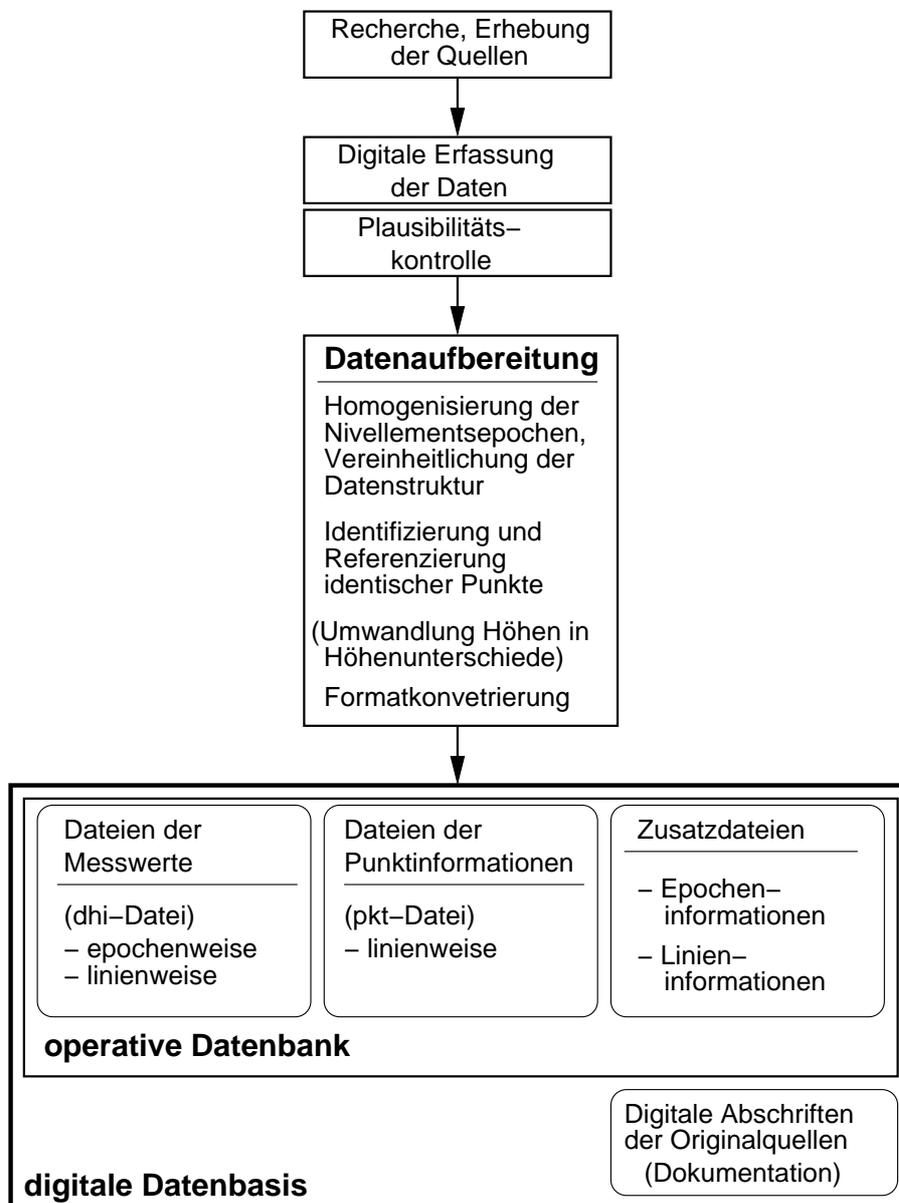


Abbildung 7: Arbeitsablauf zum Aufbau der Datenbank

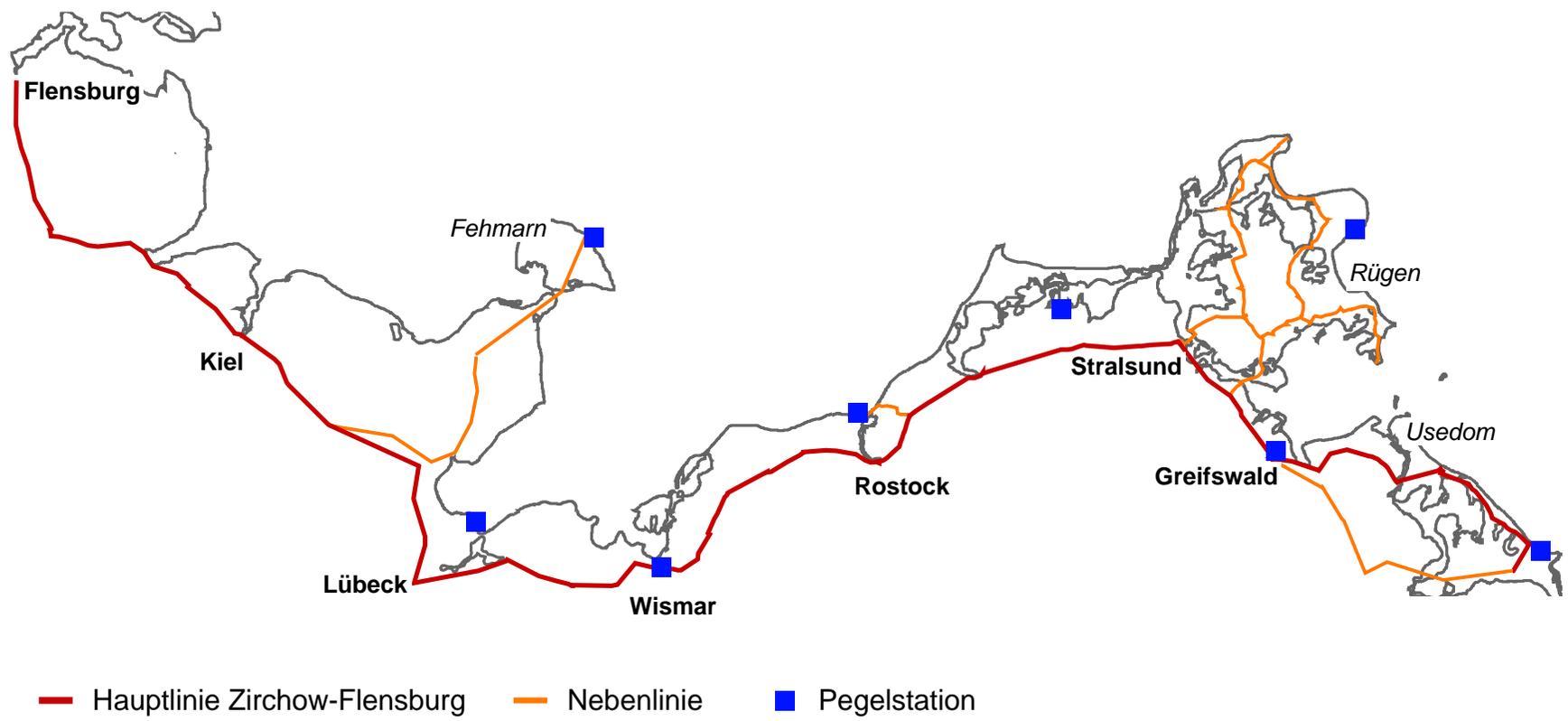


Abbildung 8: Übersicht der in die Datenbank aufgenommenen Nivellementslinien

Nr.	Styckkt.	Höja	Benämning, med örtlofs Laga	Sammanhängande (i den Höjden)
<u>III. Liniärvannmått - Kustlinjen, (Kust-linje, Kust II, Liniärvannmått III, Liniärvannmått IV) 187,1 km.</u>				
genomförd 1896.				
1	M. L.	2,879	Liniärvannmått, Gaffarid	2,878
2	2550	11,314	Liniärvannmått-Liniärvannmått, bei St. 6,0	11,317
3	2551	3,878	bei St. 8,0	3,895
4	L. M.	18,815	Liniärvannmått, Kivijärven	18,825
5	M. L.	18,878	Liniärvannmått, Kivijärven, Rindhåita	18,888
6	M. L.	14,748	Liniärvannmått, Rindhåita	14,761
7	2552	8,274	bei St. 9,4	8,290
8	2553	16,610	Liniärvannmått-Rindhåita-Liniärvannmått, am Meer Liniärvannmått	16,629
9	2554	22,651	am Meer-Liniärvannmått	22,655
10	M. L.	34,934	Rindhåita, Liniärvannmått 6,0	-

1896	23001	-9999	2.879	0.00
1896	2550	-9999	11.314	0.00
1896	2551	-9999	3.878	0.00
1896	23004	-9999	18.815	0.00
1896	23005	-9999	18.878	0.00
1896	23006	-9999	14.748	0.00
1896	2552	-9999	8.274	0.00
1896	2553	-9999	16.610	0.00
1896	2554	-9999	22.651	0.00
1896	23010	-9999	34.934	0.00
1896	2555	-9999	32.739	0.00

Abbildung 9: Historisches Nivellementslinienverzeichnis

Auszug aus einem unveröffentlichten Liniverzeichnis des Ostseeküstennivellements OKN1 (oben). Die Daten wurden zunächst originalgetreu in digitale Form überführt (unten).

1896	15131	-9999	-9999999999	-99	-9	2.879	0.00
1896	14550	-9999	-9999999999	-99	-9	11.314	0.00
1896	14551	-9999	-9999999999	-99	-9	3.878	0.00
1896	15134	-9999	-9999999999	-99	-9	18.815	0.00
1896	15135	-9999	-9999999999	-99	-9	18.878	0.00
1896	15136	-9999	-9999999999	-99	-9	14.748	0.00
1896	14552	-9999	-9999999999	-99	-9	8.274	0.00
1896	14553	-9999	-9999999999	-99	-9	16.610	0.00
1896	14554	-9999	-9999999999	-99	-9	22.651	0.00
1896	15140	-9999	-9999999999	-99	-9	34.934	0.00
1896	14555	-9999	-9999999999	-99	-9	32.739	0.00
1896	14556	-9999	-9999999999	-99	-9	24.351	0.00
1896	14557	-9999	-9999999999	-99	-9	12.823	0.00
1896	14558	-9999	-9999999999	-99	-9	3.043	0.00
1896	15145	-9999	-9999999999	-99	-9	3.255	0.00
1896	15146	-9999	-9999999999	-99	-9	19.212	0.00
1896	15147	-9999	-9999999999	-99	-9	20.934	0.00
1896	15148	64917	3082241050	-99	-9	18.440	0.00
1896	14559	-9999	-9999999999	-99	-9	18.202	0.00
1896	14560	-9999	-9999999999	-99	-9	9.885	0.00
1896	14561	-9999	-9999999999	-99	-9	29.933	0.00
1896	14562	-9999	-9999999999	-99	-9	33.191	0.00
1896	15153	-9999	-9999999999	-99	-9	33.700	0.00
1896	14563	-9999	-9999999999	-99	-9	35.444	0.00
1896	14564	-9999	-9999999999	-99	-9	31.702	0.00
1896	15156	64950	3083141020	-99	-9	29.187	0.00
1896	14565	-9999	-9999999999	-99	-9	31.297	0.00
1896	14566	-9999	-9999999999	-99	-9	38.261	0.00
1896	15159	64957	3083141090	-99	-9	39.722	0.00
1896	15160	64956	3083141080	-99	-9	38.923	0.00
1896	15161	-9999	-9999999999	-99	-9	38.804	0.00

Abbildung 10: Aufbereitung der historischen Nivellementsdaten I

Arbeitsschritte bei der Datenaufbereitung: Die digitalen Abschriften der Originalquellen (Abbildung 9) wurden zunächst in ein für alle Epochen einheitliches Format überführt. Die in jüngeren Epochen erneut eingemessenen Punkte wurden anschließend identifiziert und markiert (in diesem Auszug die vier Punkte mit gültigen Werten in Spalten 3 und 4).

#A-P.	E-P.	niv. dHi	Weg	Nl	Jahr	Niv.	M	O	NB
15131	14550	8.43500	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14550	14551	-7.43600	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14551	15134	14.93700	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
15134	15135	0.06300	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
15135	15136	-4.13000	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
15136	14552	-6.47400	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14552	14553	8.33600	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14553	14554	6.04100	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14554	15140	12.28300	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
15140	14555	-2.19500	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14555	14556	-8.38800	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14556	14557	-11.52800	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14557	14558	-9.78000	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14558	15145	0.21200	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
15145	15146	15.95700	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
15146	15147	1.72200	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
15147	64917	-2.49400	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
64917	14559	-0.23800	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14559	14560	-8.31700	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14560	14561	20.04800	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14561	14562	3.25800	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14562	15153	0.50900	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
15153	14563	1.74400	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14563	14564	-3.74200	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14564	64950	-2.51500	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
64950	14565	2.11000	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14565	14566	6.96400	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
14566	64957	1.46100	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
64957	64956	-0.79900	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0
64956	15161	-0.11900	0.00	0	1896	OKN1897	0	0	0

Abbildung 11: Aufbereitung der historischen Nivellementsdaten II

Die dem Linienverzeichnis entstammenden Höhen waren in partielle Höhenunterschiede zu überführen und in das endgültige datenbankinterne Format umzuwandeln. Das Beispiel zeigt die der Abbildung 9 entsprechende dhi-Datei.

3630	4063111080	54.303483	13.091833	0	1	10	1	SNN1976	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.K.-MARX-STR.30WH..NW-SEITE.5.08M
3631	4063111070	54.306467	13.089917	0	1	10	1	SNN1976	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.STOERTEBECKER-UFER22.WH..W-SEITE
3632	4063111060	54.309400	13.087383	0	1	10	3	SNN1976 OKN1966 SNN1956	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.MARIENSTR.9.WH..
3645	4063111000	54.309883	13.087483	0	3	10	6	SNN1976 OKN1966 SNN1956 RfL1938 OKN1897 LAP1874	Hoehenmarke	STRALSUND
3644	4063111330	54.309883	13.076667	0	1	10	3	SNN1976 OKN1966 SNN1956	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.W.-HEINZE-STR.NR
3643	4063111340	54.307850	13.072850	0	1	10	4	SNN1976 OKN1966 SNN1956 RfL1938	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.TRIBSEER
3642	4063111350	54.306367	13.066617	0	1	10	3	SNN1976 OKN1966 SNN1956	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.RICHTENBERGERCHA
3641	4063111360	54.306167	13.066000	0	1	10	4	SNN1976 OKN1966 SNN1956 RfL1938	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.RICHTENB
3640	4063111370	54.305517	13.058783	0	1	10	3	SNN1976 OKN1966 SNN1956	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.ROSTOCKER-CHAUSS
3639	4063111380	54.304983	13.053550	0	1	10	3	SNN1976 OKN1966 SNN1956	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.ROSTOCKER-CHAUSS
3638	4063111390	54.303367	13.043667	0	1	10	3	SNN1976 OKN1966 SNN1956	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.KRANKENHAUSWEST.
3637	4063111400	54.302833	13.034833	0	1	10	3	SNN1976 OKN1966 SNN1956	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.ROSTOCKER-CHAUSS
3636	4063111410	54.303833	13.025667	0	1	10	3	SNN1976 OKN1966 SNN1956	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.ROSTOCKER-CHAUSS
3635	4063111420	54.304883	13.013350	0	1	10	1	SNN1976	Mauerbolzen	STRALSUND.STADT.LPG-STUETZPKT.FREIENLANDE.BUERO.
3634	4063111430	54.303917	13.013450	0	1	10	1	SNN1976	unterirdischeSaeule	STRALSUND.STADT.F105.KM5.9-3.3WESTL.VOMW
3633	4063111450	54.303067	13.002283	0	1	10	4	SNN1976 OKN1966 SNN1956 RfL1938	Pfeilerbolzen	LUESSOW.F105.KM6.6+30.
3621	4062221160	54.302533	12.983217	0	1	10	4	SNN1976 OKN1966 SNN1956 RfL1938	Mauerbolzen	PANTELITZ.WH.AMBAHNUEBER
3620	4062221150	54.301800	12.971783	0	1	10	4	SNN1976 OKN1966 SNN1956 RfL1938	Mauerbolzen	PANTELITZ.OBERSCHULE.WES
3619	4062221140	54.301750	12.967850	0	1	10	4	SNN1976 OKN1966 SNN1956 RfL1938	Mauerbolzen	PANTELITZ.WH.B.KM8.9.STR
3618	4062221130	54.301033	12.960700	0	1	10	4	SNN1976 OKN1966 SNN1956 RfL1938	Mauerbolzen	PANTELITZ.WH.B.KM9.4-40M
3617	4062221120	54.299933	12.945333	0	1	10	1	SNN1976	Pfeilerbolzen	PANTELITZ.F105.KM10.4-24.5M.5.6MSUEDL.PRELLSTE
3616	4062221110	54.303150	12.935833	0	1	10	1	SNN1976	unterirdischeSaeule	NIEPARS.MARTENSDORF.172MNORD-OESTL.V.WH.

Abbildung 12: Auszug aus einer Punktinformationsdatei

In linienweisen pkt-Dateien werden in der erstellten Datenbank notwendige Informationen zu jedem Nivellements-punkt abgelegt. Die Spalten enthalten: Punkt-ID, amtliche Punktnummer, geographische Koordinaten (Breite und Länge), programminterner Punktstatus, Anzahl zugehöriger Nivellements-linien, Liniennummer, Anzahl der Messepochen, Vermarkungsart, Lagebeschreibung, Vermarkungsjahr (nicht abgebildet).

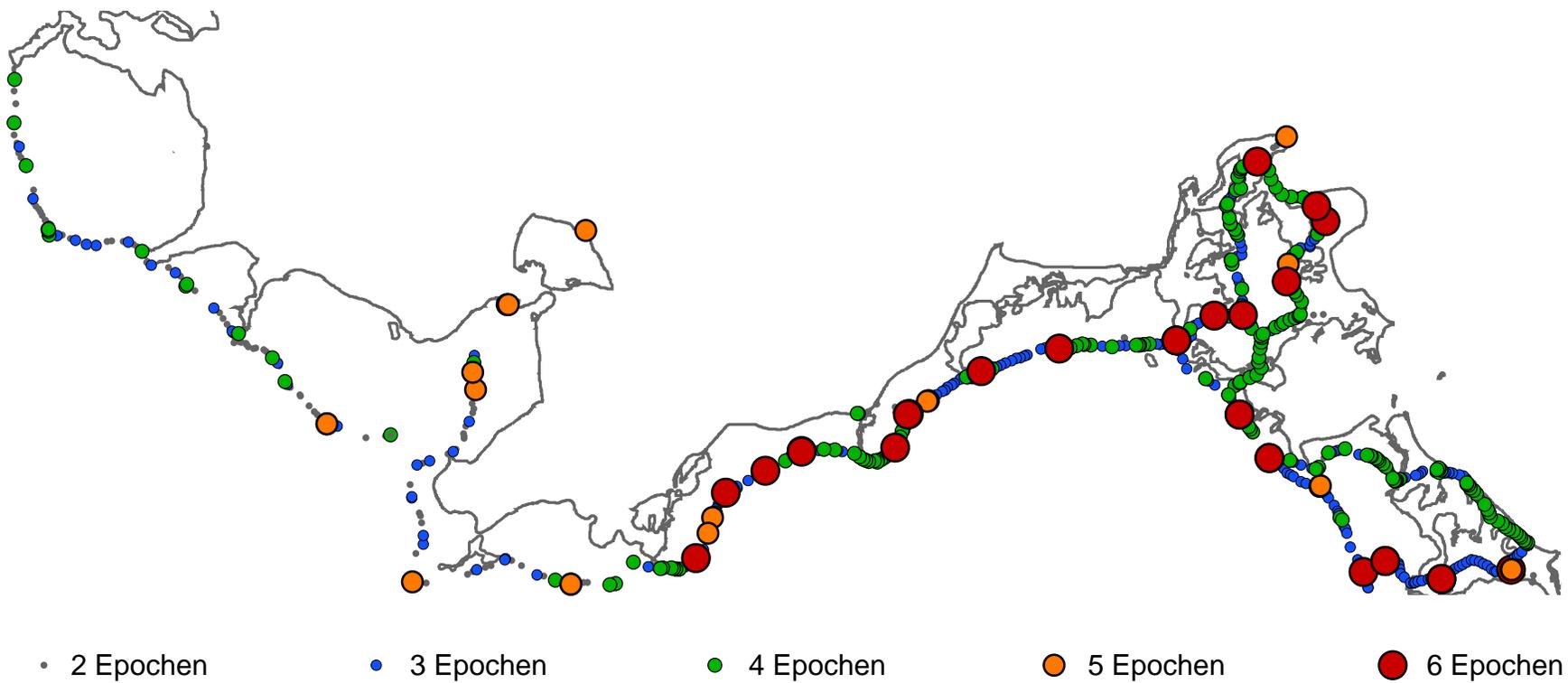


Abbildung 13: Wiederholungsmessungen an Nivellementsunkten

Die Anzahl der für die Festpunkte vorliegenden Messepochen sind dargestellt. Inhomogenitäten in der Datengrundlage werden deutlich: Für lange Linienabschnitte (östlich von Greifswald, Rügen, westlich von Wismar) sind maximal nur 3 bis 4 Messungen verfügbar. Die auffallend geringe Dichte wiederholt eingemessener Punkte in Schleswig-Holstein ist zudem auf veränderte Linienführungen der Nivellements zurückzuführen.

A.4 Entwicklung von Auswerteverfahren, Auswertung

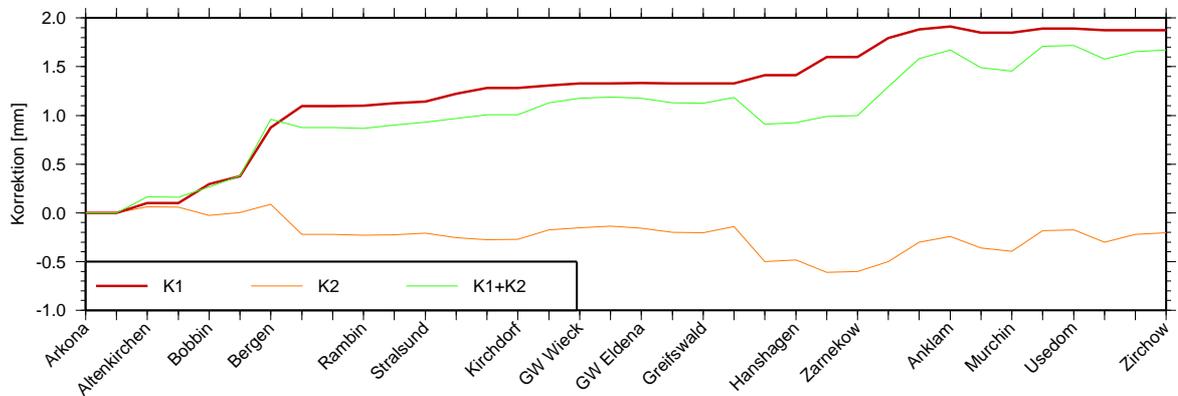


Abbildung 14: Einfluss der Korrekturen K1 und K2

Am Beispiel der Nivellementsline von Arkona (N) nach Zirchow (S) ist die Auswirkung der unterschiedlichen Berücksichtigung der breitenabhängigen Korrektur wegen Niveauflächenkonvergenz (K1), sowie der Korrektur wegen Schwereanomalien (K2) auf die verwendeten Nivellementsdaten dargestellt. Auf dieser Linie überschreitet der Einfluss von K1 2 mm nicht.

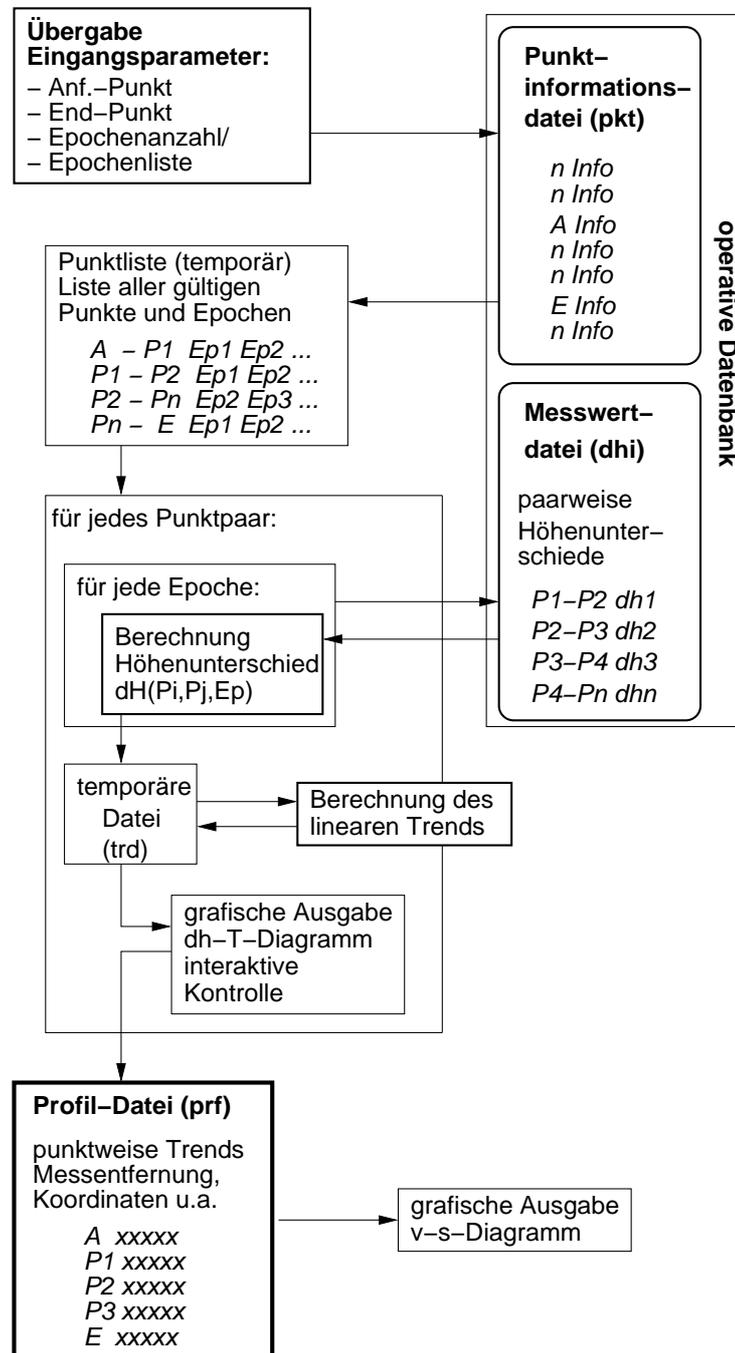


Abbildung 15: Prinzip der Berechnung von Höhenveränderungen

Dem Schema folgend wurde ein Rechenprogramm zur Bestimmung von Höhenveränderungen aus Wiederholungsnivellements implementiert.

```

1974.0 0.617 5.1566
1966.0 2.767 3.8248
1958.0 -0.213 3.8472
1938.0 -0.223 4.3724
1897.0 -0.473 7.4588
1888.0 -2.473 29.4329
Tr= 6 0.0323202 0.006873 1974 1.33581 1888 -1.44373

```

Abbildung 16: Beispiel einer trd-Datei

Für jedes Punktpaar werden für alle verfügbaren Epochen (Spalte 1) die resultierenden Höhenunterschiede (Spalte 2) und formale Fehlermaße (Spalte 3) berechnet und in einer temporären trd-Datei abgelegt. Aus diesen Werten wird der lineare Trend (letzte Zeile, Spalte 3) und ein Maß für seine Genauigkeit (Spalte 4) bestimmt.

```

6173 0.000 0.000 0.00 0 53.889983 14.139517
5105 0.022 0.008 86.70 5 54.095467 13.378267
4661 -0.086 0.022 99.40 6 54.174583 13.284783
4662 -0.046 0.084 99.42 6 54.174633 13.284717
3645 0.131 0.077 126.31 6 54.309883 13.087483
4092 0.016 0.072 164.43 6 54.295500 12.718833
4064 0.061 0.075 185.70 6 54.254283 12.472800
4628 0.136 0.074 208.54 6 54.175617 12.247217
4625 0.093 0.074 209.16 6 54.174217 12.241867
4612 -0.034 0.080 220.08 6 54.114083 12.203767
4577 0.035 0.081 249.05 6 54.107600 11.909483
4576 0.071 0.085 249.13 6 54.107217 11.909367
4983 0.009 0.088 259.72 6 54.071650 11.794983
4967 0.048 0.091 270.95 6 54.031817 11.670233
5494 0.107 0.094 289.24 6 53.911500 11.577150

```

Abbildung 17: Beispiel einer Ergebnis-Datei (prf)

Die Ergebnisse der Trendberechnungen für einen vorgegebenen Nivellementslinienabschnitt werden in der dargestellten Form abgelegt. Für jeden Punkt sind der ermittelte Trend (Spalte 2, = 0 für den Anfangspunkt 6173), die nivellierte Entfernung (Spalte 4), die Anzahl der eingeflossenen Epochen (Spalte 5) sowie die Punktkoordinaten angegeben.

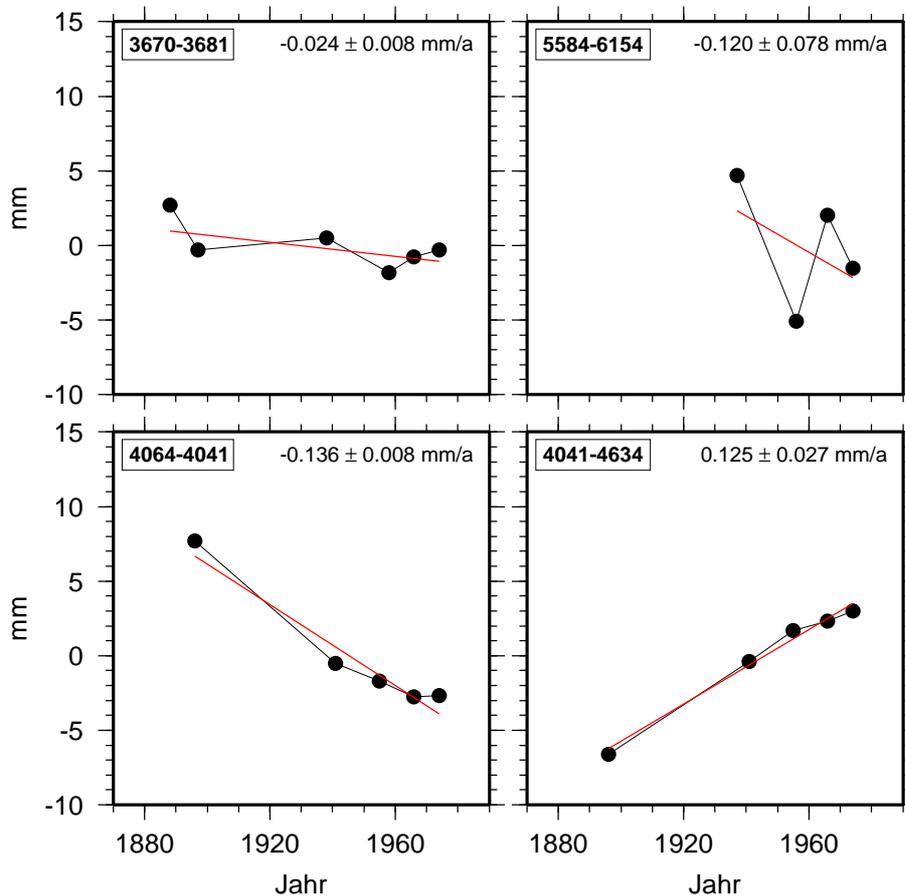


Abbildung 18: Beispiele für $dh - T$ -Diagramme

Derartige Diagramme werden bei der Auswertung automatisch generiert. Sie geben die zeitliche Entwicklung des Höhenunterschiedes zwischen zwei Nivellementspunkten aus Wiederholungsmessungen wider. Im Beispiel links oben zeigt sich eine leichte, stete Hebung des Punktes Nr. 3670 in Ramin relativ zu Samtens (3681). Das Beispiel rechts oben verdeutlicht Unsicherheiten in der Relativtrendbestimmung zwischen Murchin (5584) und Usedom (6154), wenn nur wenige Wiederholungsmessungen über einen kurzen Zeitraum vorliegen. Ursache für das starke Schwanken des Höhenunterschiedes können Instabilitäten eines der Festpunkte oder Messfehler sein. Die unteren Diagramme illustrieren das individuelle Absinken (Eigenbewegung) des Punktes Gelbensande, Gasthaus (4041) gegenüber den nächstgelegenen Punkten Gelbensande, Bahnhof (4634) und Damgarten (4064). Das Abklingen der Relativverschiebungsraten ist typisch für Gebäudesetzungen.

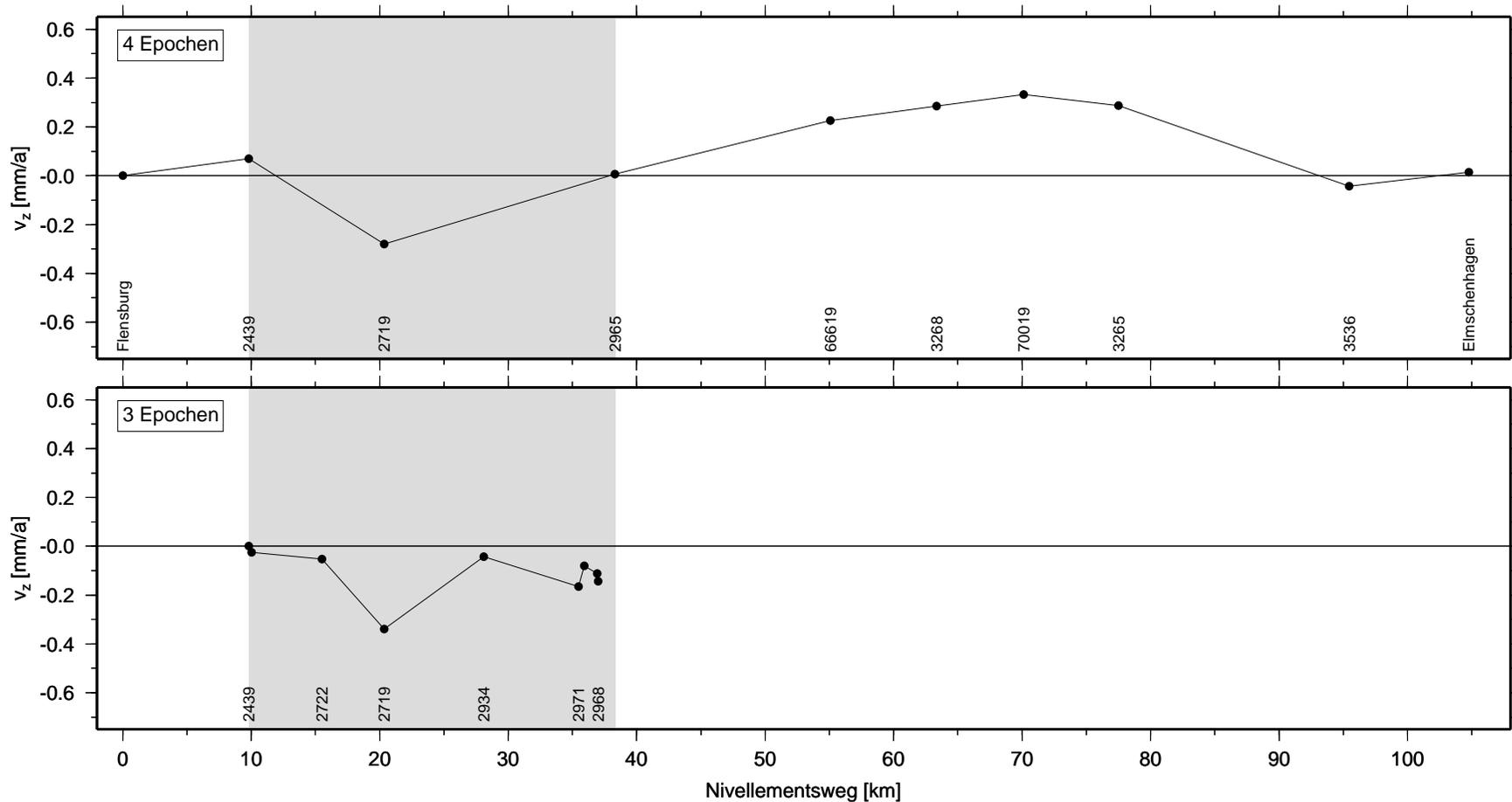


Abbildung 19: Beispiel eines $v_z - s$ -Diagramms

Entlang des Nivellementslinienabschnittes Flensburg–Elmschhagen sind die berechneten Vertikalbewegungsraten relativ zum Festpunkt in Flensburg aufgetragen. Räumliche Muster des Hebungs-/Senkungsverhaltens werden sichtbar. Das untere Diagramm demonstriert die Verbesserung der räumlichen Auflösung durch Hinzunahme von Punkten mit weniger Beobachtungsepochen. Das Beispiel zeigt, dass das relative Sinken des Punktes 2719 lokal eng begrenzt ist.

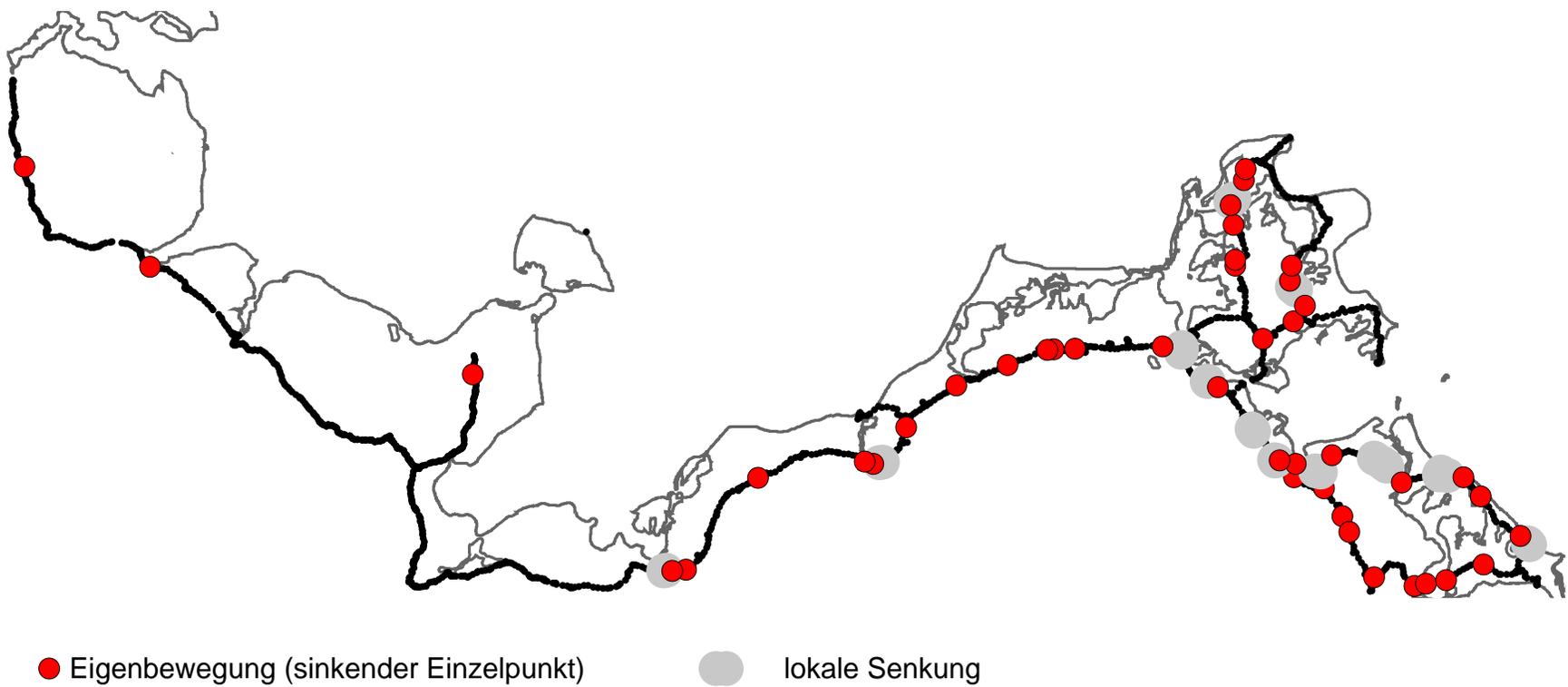


Abbildung 20: Karte von Eigenbewegungen und lokalen Senkungen

Die deutlich höhere Konzentration engräumiger Vertikalbewegungen im Osten ist darauf zurückzuführen, dass für die westlicheren Nivellementslinien weniger Messepochen und eine geringere Dichte wiederholt eingemessener Punkte vorliegen.

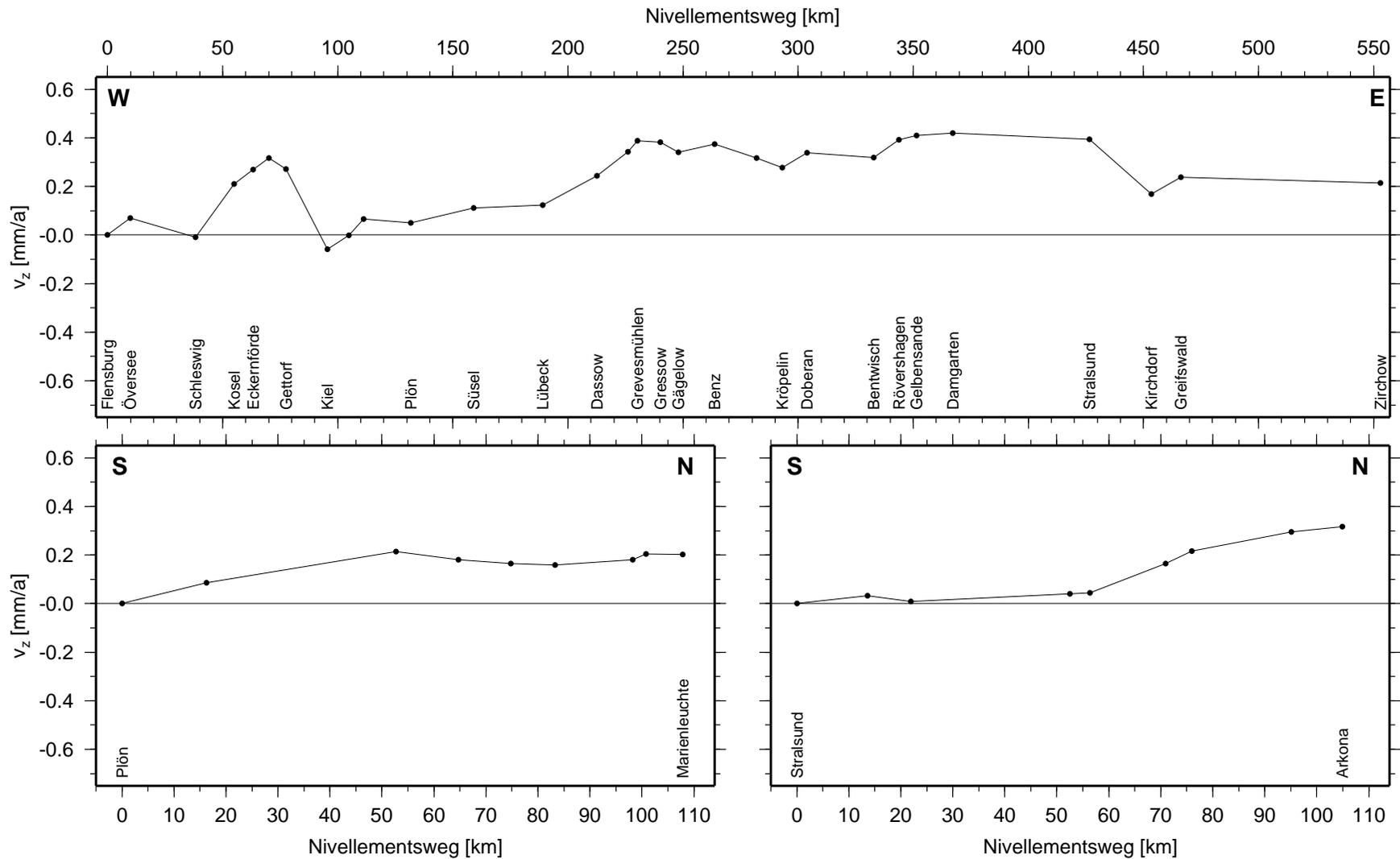


Abbildung 21: Profile relativer Höhenveränderungen

Das obere Diagramm zeigt die Variation der aus Wiederholungsnivellements abgeleiteten Höhenänderungsraten entlang der küstennahen Nivellementsline Flensburg–Zirchow relativ zu dem Festpunkt in Flensburg. In den beiden unteren Diagrammen sind die Ergebnisse für die zwei Nebenlinien Plön–Marienleuchte (links) und Stralsund–Arkona (rechts) dargestellt.

B Bestimmung säkularer Niveauverschiebungen an den Pegelstationen

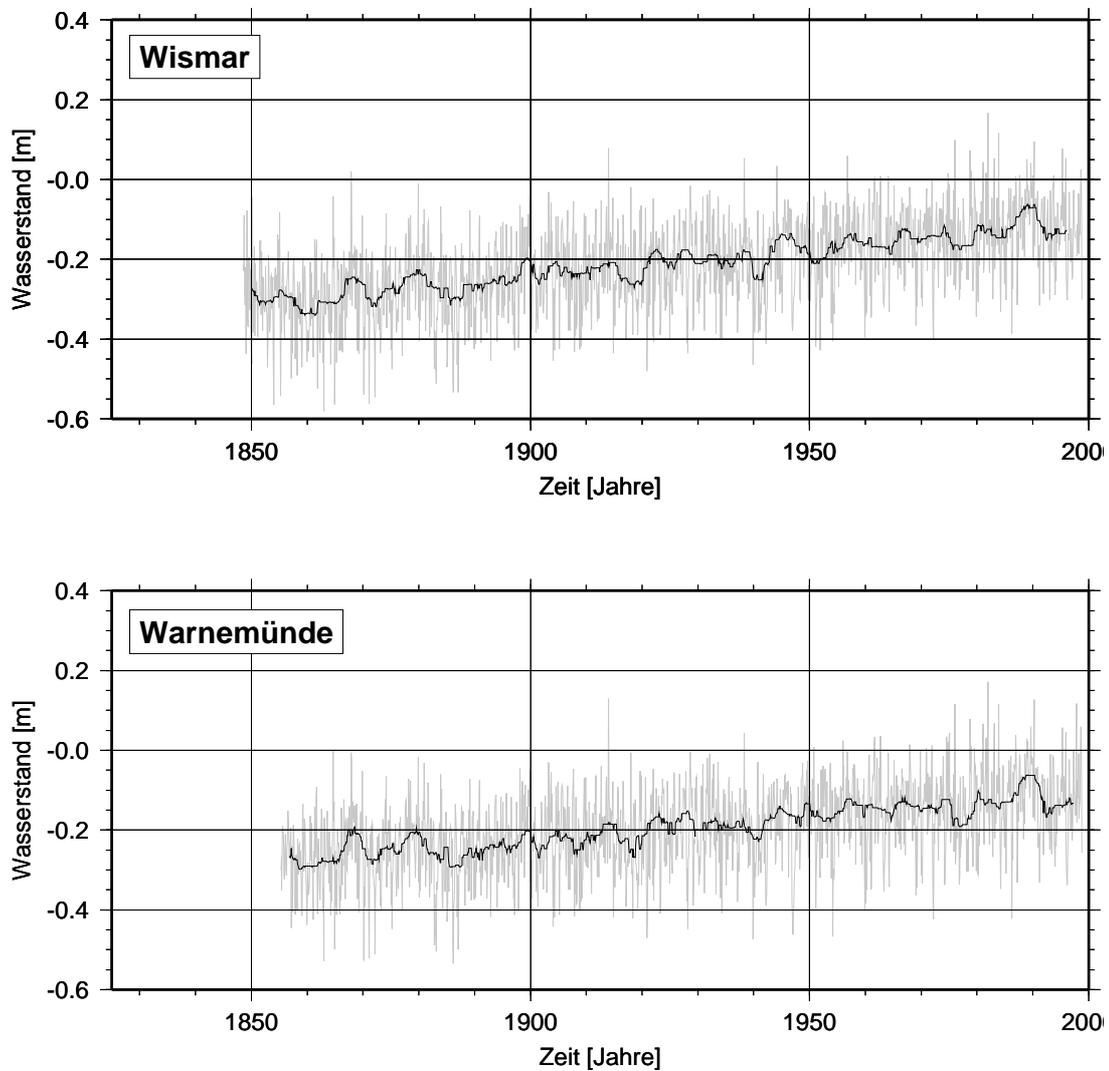


Abbildung 22: Beispiele für Pegelreihen der südlichen Ostsee
Aufbereitete Langzeitpegelreihen von Wismar und Warnemünde.

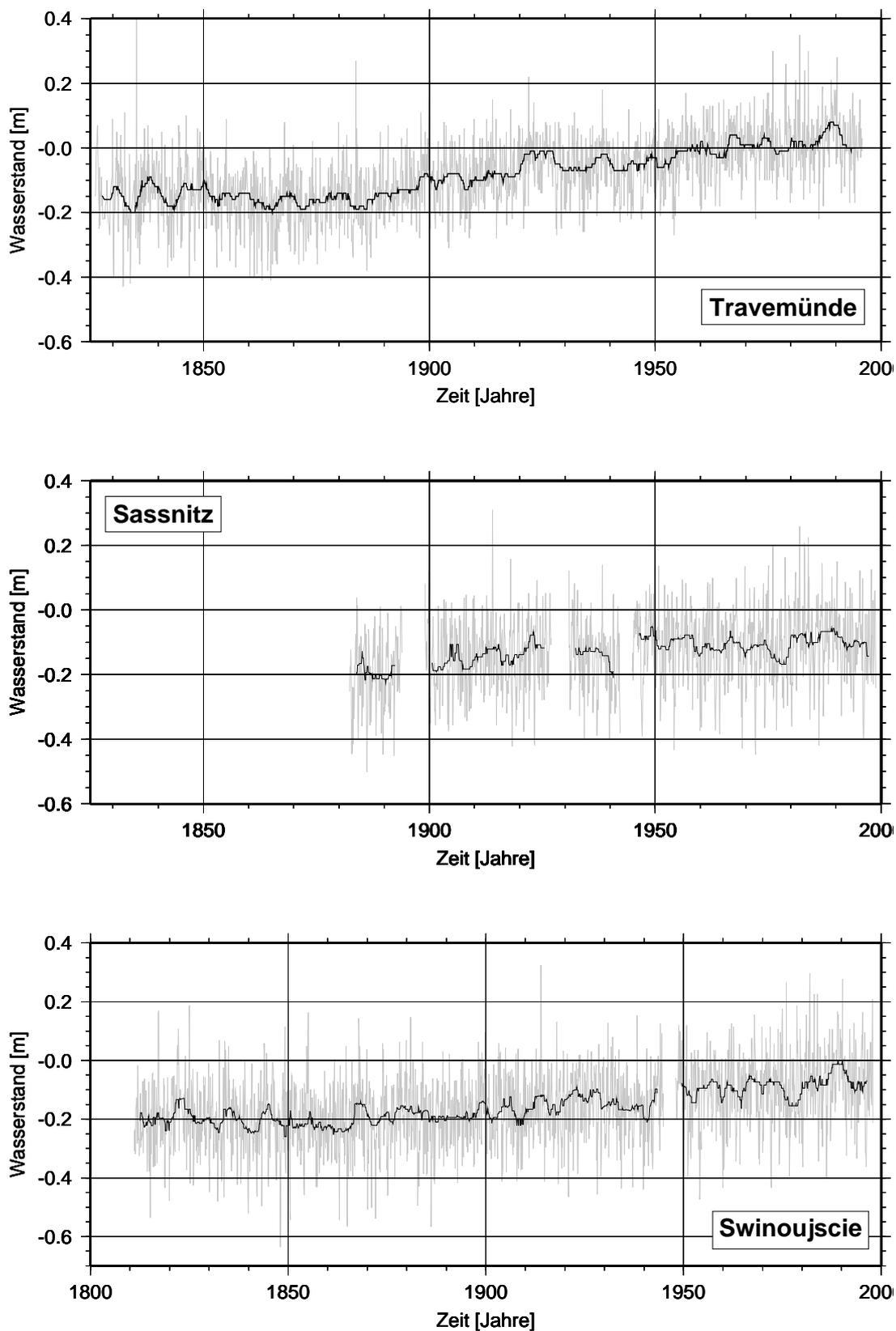


Abbildung 23: Fortsetzung Pegelreihen: Travemünde, Saßnitz und Swinoujscie.

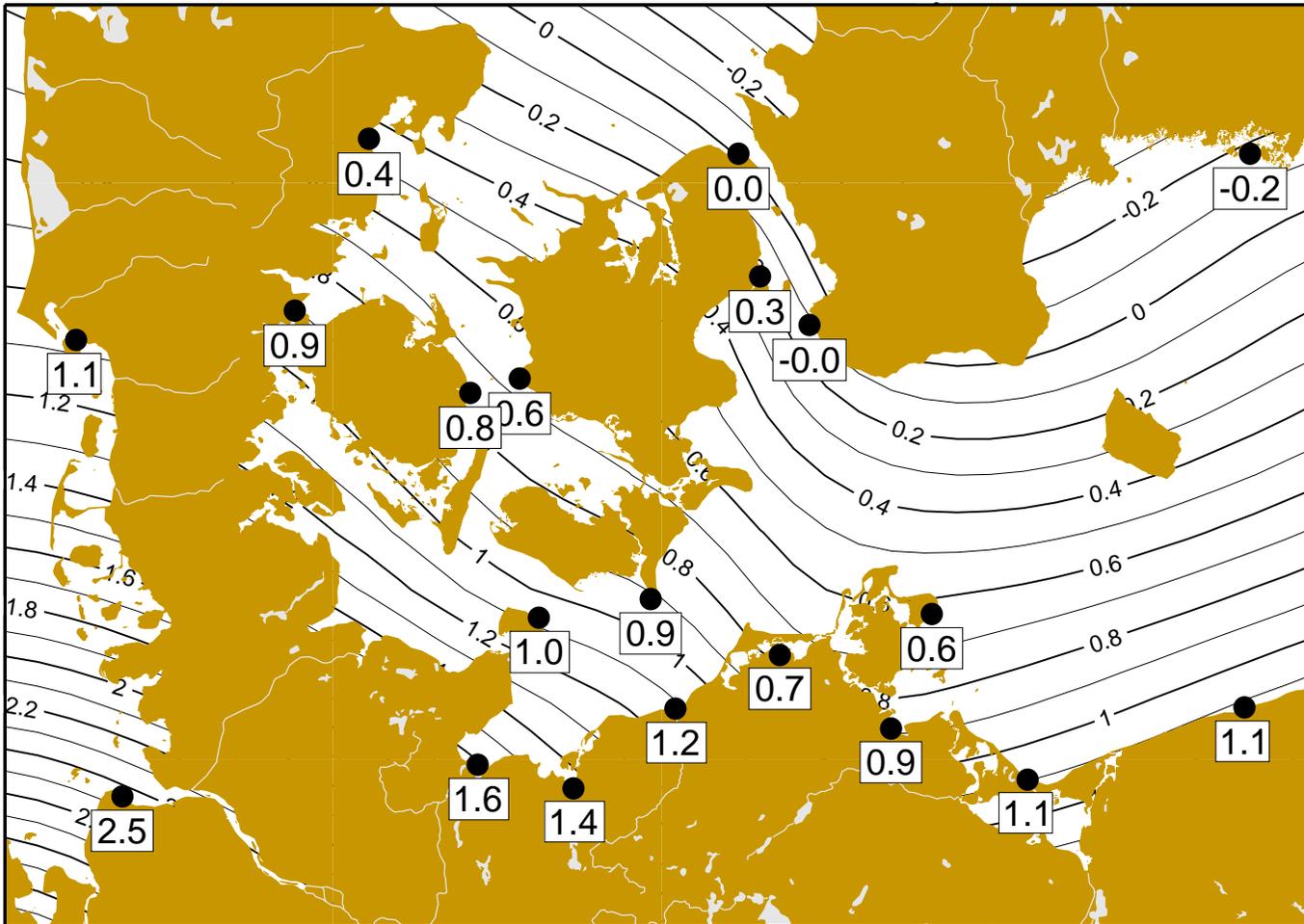


Abbildung 24: Relativer Meeresspiegelanstieg in der südlichen Ostsee

Aus homogenen Pegelreihen wurden säkulare relative Höhenänderungen des Meeresspiegels im Bezug zur Küste als linearer Trend bestimmt und räumlich interpoliert. Einheit: mm/a.

C Interpretation und Bewertung der Höhenänderungen im Küstenbereich

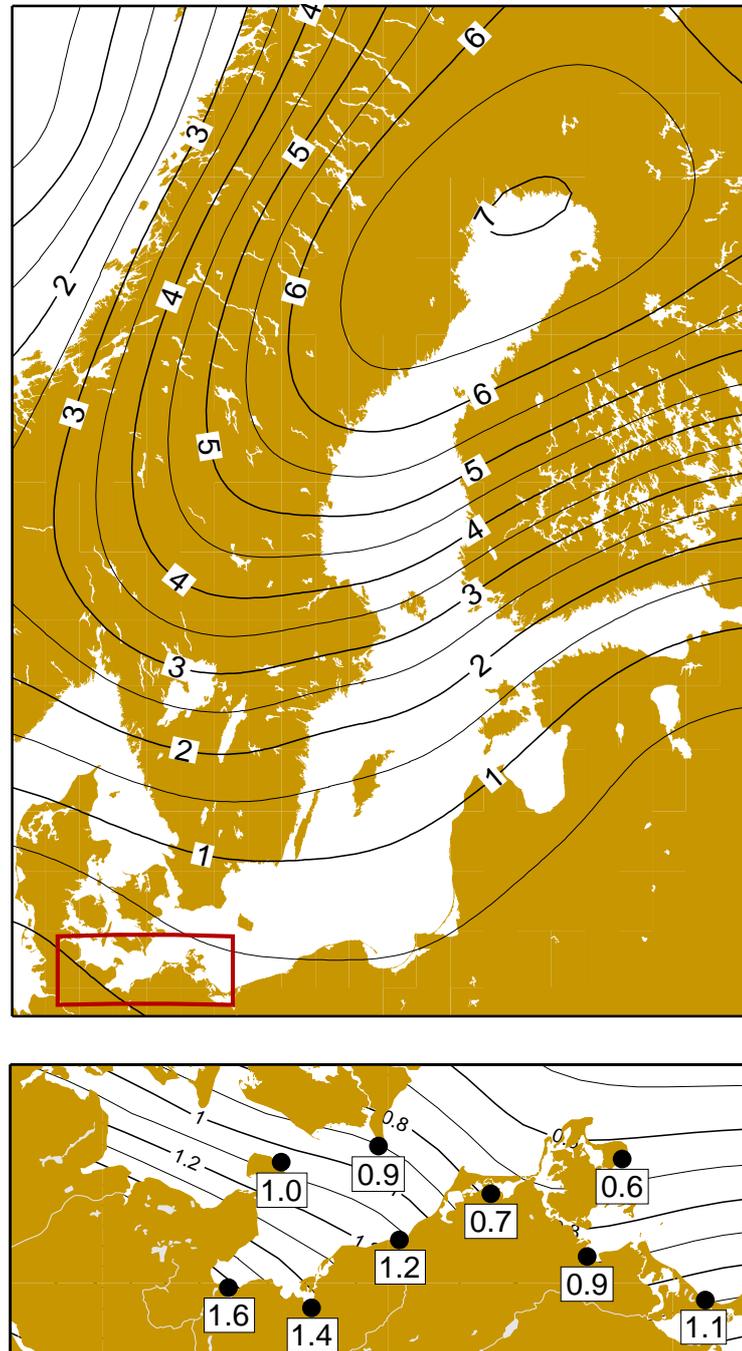
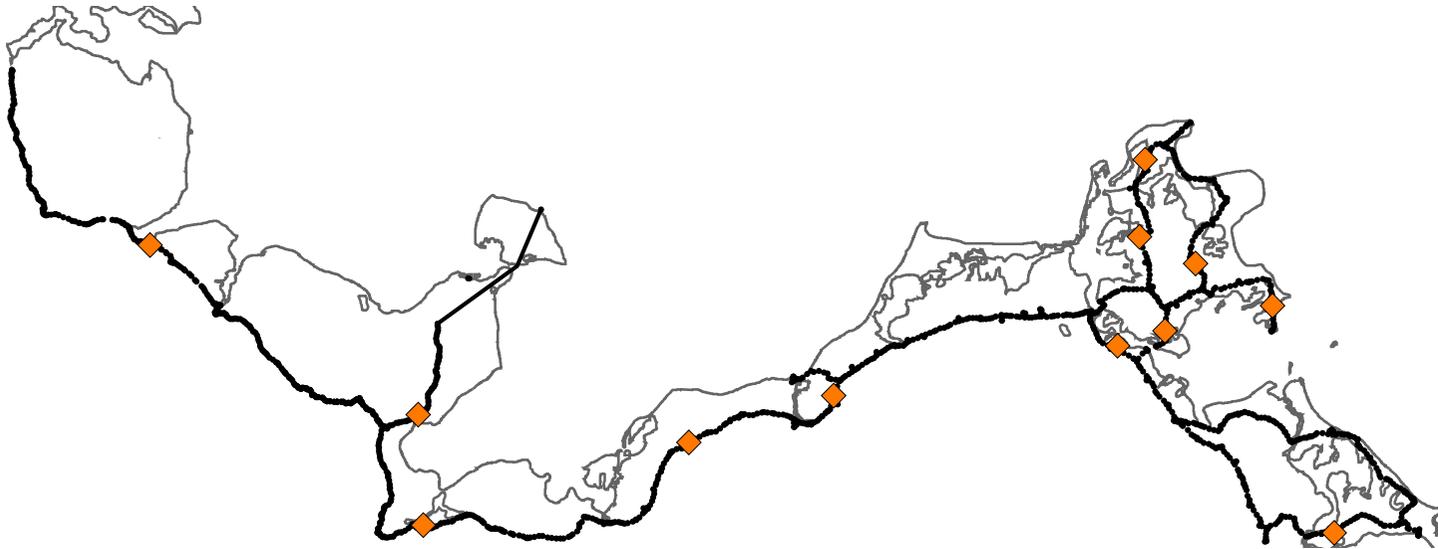
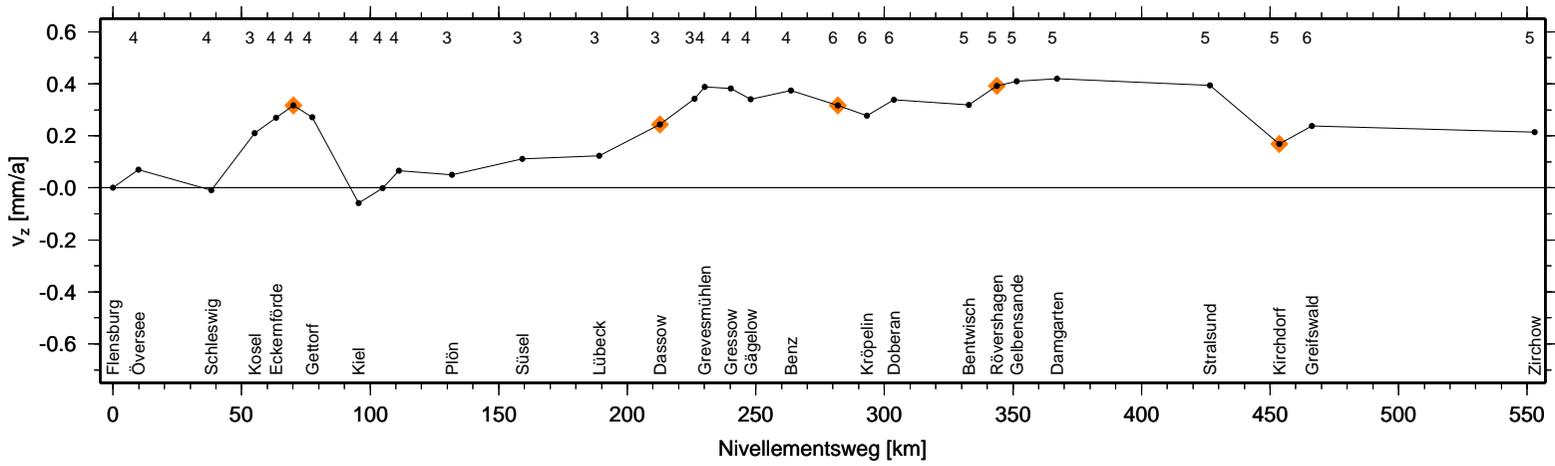


Abbildung 25: Postglaziale Landhebung und relativer Meeresspiegelanstieg

In der oberen Karte sind vertikale Hebungsraten infolge der postglazialen Landhebung in Fennoskandien dargestellt, wie sie vom Modell ICE4G ([Peltier, 1998]) prädiziert werden. Das aus Pegelreihen abgeleitete Muster des relativen Meeresspiegelanstiegs an der südwestlichen Ostseeküste (unten, Ausschnitt aus Abbildung 24) zeigt eine auffällige Übereinstimmung mit den Isolinien der modellierten Landhebung.



◆ Wechsel im Höhenänderungsverhalten

Abbildung 26: Räumliche Variation der Höhenveränderungen

Das Diagramm (oben) zeigt die aus Wiederholungsnivellements ermittelten relativen Höhenveränderungen entlang der deutschen Ostseeküste (vgl. Abbildung 21). Auffällige Wechsel im Höhenänderungsverhalten sind markiert und, ergänzt um entsprechende Ergebnisse für die Nebenlinien, in der Übersichtskarte (unten) lokalisiert.

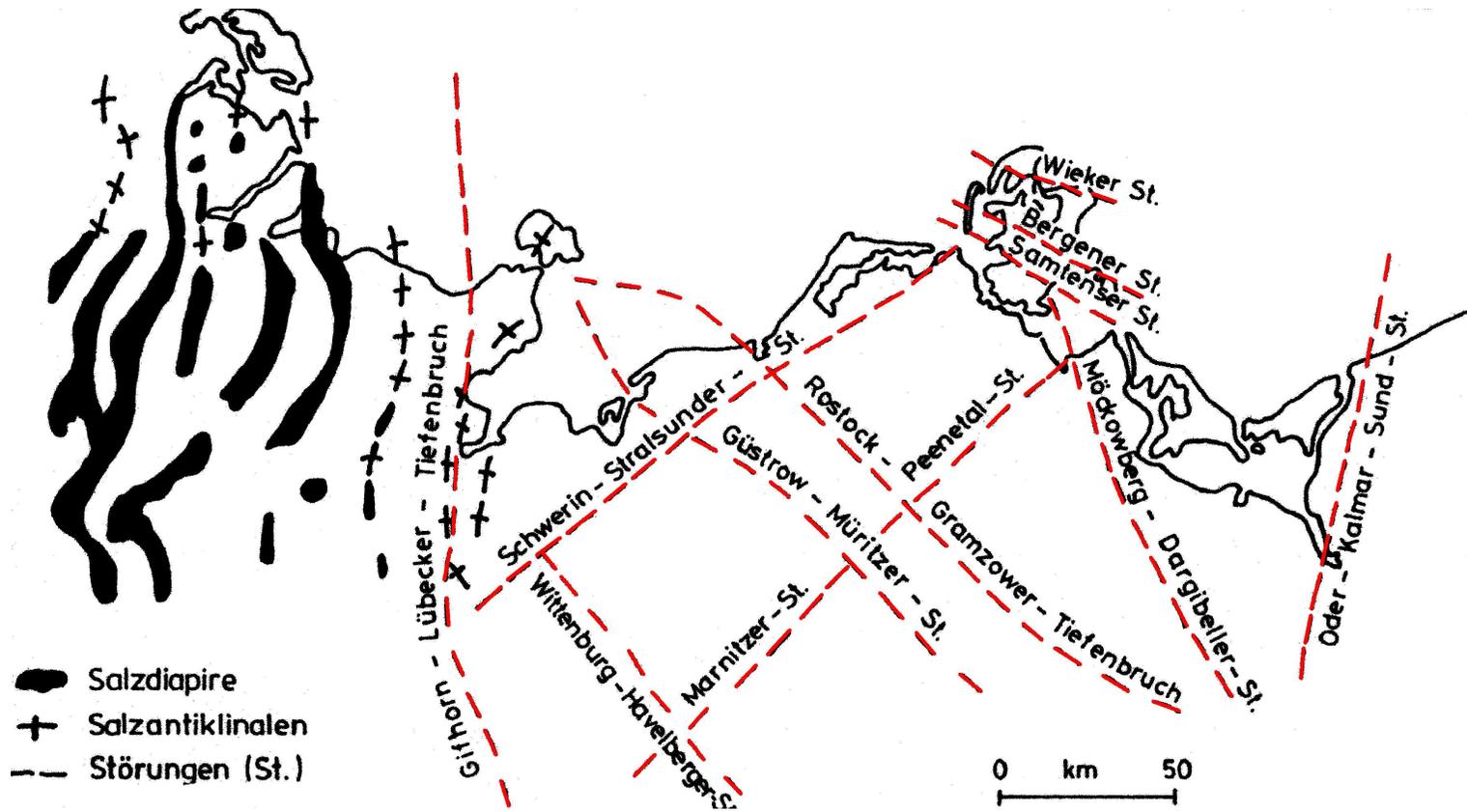


Abbildung 27: Höhenveränderungen und tektonische Situation

Die Karte zeigt die geologisch-tektonische Situation im Küstenbereich der Ostsee (nach [Duphorn, 1995]). Einige der durch Wiederholungsnivellements detektierten Trendwechsel (Abbildung 26) können mit dem Verlauf tektonischer Strukturen in Zusammenhang gebracht werden.