



Erdrotation – ein Sprungbrett zur Studie von Ozeangezeiten

Earth Rotation – a springboard to the study of ocean tides

Michael Schindelegger, Wien

Kurzfassung

Die zentrale Rolle der Ozeanmodellierung für Problemstellungen der Erdrotation wird anhand von Gezeiteneffekten in der Nutation illustriert. Im Blickpunkt steht eine bis vor kurzem unerklärte Nutationsanomalie jährlicher Periodizität, deren vollständige Erschließung neben sorgfältig validierten atmosphärischen Anregungsgrößen einer globalen numerischen Modellierung sonnensynchroner Gezeitenströmungen und Meereshöhen bedarf. Geeignete Diskretisierung, der Ansatz korrekter Dissipationsmechanismen sowie die explizite Berücksichtigung von Auflast und Selbstanziehung bewegter Wassermassen tragen zur Genauigkeit der Gezeitenlösung bei. Die Methodik der Vorwärtsmodellierung wird in weiterer Folge dafür genutzt, einen Blick über geodätische Anwendungen hinaus zu wagen und Langzeitveränderungen der primären Gezeitenwelle M_2 in Zusammenhang mit relativen Meeresspiegelschwankungen zu untersuchen. Vergleiche mit Wasserstandsreihen im Nordwestatlantik zeigen, dass Veränderungen der Ozeantiefe in Bezug zur Kruste typischerweise 20–40 % beobachteter Säkularvariationen der M_2 -Amplitude erklären. Künftige Arbeiten auf dem Gebiet sind dementsprechend dazu angehalten, weitere Einflussfaktoren, wie die Erwärmung von Oberflächenwasser, in die Diskussion von Langzeitschwankungen der Gezeiten einzubinden.

Schlüsselwörter: Erdrotation, Nutation, Ozeanmodellierung, Gezeiten

Abstract

The importance of ocean modeling for Earth rotation studies is elucidated based on tidal effects in nutation. Emphasis is given to a prograde annual nutation anomaly related to Sun-synchronous atmospheric and oceanic mass redistributions in the terrestrial system. A full explanation of the anomaly critically relies on forward integration of the shallow water equations with appropriate adjustments for deep-ocean dissipation and the effects of self-attraction and loading. Simulations are subsequently refined to serve a wider range of applications and address long-term changes of the principal M_2 ocean tide in response to relative sea level rise. Comparisons with tide gauge records in the Northwest Atlantic indicate that water column depth changes in an expanding ocean typically account for 20 – 40 % of the observed M_2 amplitude trends. Future studies of the subject area are encouraged to explore the role of stratification changes and warming surface waters in modulating ocean tides.

Keywords: Earth Rotation, Nutation, Ocean Modeling, Tides

1. Einleitung

Schwankungen der Erdrotation sind die Manifestation dynamischer Prozesse im Erdraum. Sonne und Mond ändern im täglichen Gang ihre Position auf der Himmelskugel und rufen über Drehmomente eine Kreiselbewegung des Erdkörpers hervor. Im terrestrischen System selbst sind es Massenverlagerungen in Atmosphäre, Hydrosphäre, Kern und Eisschilden, deren Beitrag zum Gesamtdrehimpuls des Systems durch eine spiegelbildliche Rotationsantwort der festen Erde kompensiert wird [39]. Konventionen [27] definieren den praktischen Umgang mit diesen Rotationssignalen und sehen eine Trennung in fünf Winkelgrößen – sogenannten Erdorientierungsparametern – vor. Neben Auslenkungen der Bezugsachse relativ zum Erdkörper (Polbewegung, zwei Parameter) und variablen Drehgeschwindigkeiten (Tageslängenschwankung, ein Parameter)

hat insbesondere die Nutation (Orientierungsänderung der Bezugsachse im Raum, zwei Parameter) eine Vielzahl theoretischer Arbeiten stimuliert (z. B. [45], [23], [17]). Leitgedanke dieser Anstrengungen ist es, Nutationen in Abhängigkeit lunisolärer Drehmomente als Reihenentwicklung für exakte a priori Prädiktionen zu formulieren. Ansätze auf Basis eines Starrkörpermodells erreichen beachtliche Genauigkeiten (~ 30 mas, milliarcseconds, bzw. 1 m an der Erdoberfläche); um den Anforderungen moderner Weltraum- und Positionierungsverfahren zu genügen, müssen in Nutationsmodellen jedoch auch Effekte wie Deformationen, dynamische Abplattungen, Kerndynamik und nicht zuletzt atmosphärische und ozeanische Massenverlagerungen berücksichtigt werden [6].

Die Verflechtung der Nutation mit dynamischen Prozessen in Atmosphäre und Ozean liefert den Anstoß für den vorliegenden Artikel. Im Besonderen wird vom Standpunkt der geophysikalischen Modellierung aus auf ein bis vor kurzem ungeklärtes Nutationssignal jährlicher Periodizität eingegangen. Die rigorose Untersuchung dieser Anomalie führt u. a. auf die konkrete Aufgabe, Ozeangezeiten in ihrer globalen Ausprägung mittels Integration von Strömungsgleichungen numerisch abzuschätzen. Diese Schlüsselkompetenz wird im zweiten Teil des Beitrages aufgegriffen, um Langzeitvariationen von Ozeangezeiten zu bestimmen und Simulationsergebnisse mit den Beobachtungen regionaler Pegelnetze zu vergleichen. Der Artikel vereint demnach zwei auf den ersten Blick nur lose verbundene Thematiken, zeigt aber als solcher auf, dass Methoden und multidisziplinäres Arbeiten auf dem Gebiet der Erdrotation die Möglichkeit eröffnen, auch Fragestellungen außerhalb klassischer geodätischer Arbeitsfelder anzusprechen.

2. Das S_1 -Signal in der Nutation

2.1 Problemstellung

In geodätischen und astronomischen Anwendungen werden Nutationswellen aktuell auf Basis des Modells von Mathews, Herring und Buffet (kurz MHB, [21]) berücksichtigt. Kern des MHB-Ansatzes ist ein iterativer Ausgleich analytischer Bewegungsgleichungen und Erdparameter nach beobachteten Nutationen der VLBI (Very Long Baseline Interferometry), wodurch eine a priori Beschreibung der Erdorientierung mit Genauigkeiten von weniger als $15 \mu\text{s}$ im Spektralbereich gelingt. Der Einfluss täglicher Massenverlagerungen im Erdsystem wurde hierzu anhand von Drehimpulsschätzungen für die primären Ozeangezeiten K_1 , P_1 , O_1 bzw. Q_1 eingearbeitet, im Zuge der Anpassung an VLBI-Beobachtungen zeigten sich jedoch im Modellansatz unberücksichtigte Restsignale. Die Situation ist in Abbildung 1 nachgebildet. Neben irregulären und resonanzverstärkten Anomalien im Bereich der Free Core Nutation [19] offenbarten die VLBI-Daten der MHB-Analyse ein Residuum von ca. $130 \mu\text{s}$ an der terrestrischen S_1 -Frequenz, welche im Inertialsystem als prograde jährliche Nutationsbewegung wahrgenommen werden kann. Oszillationen dieser Frequenz korrespondieren zu keiner signifikanten Komponente des lunisolaren Drehmoments und müssen ihren Ursprung in exakt sonnensynchronen (24-stündigen) Massenverlagerungen im Erdsystem

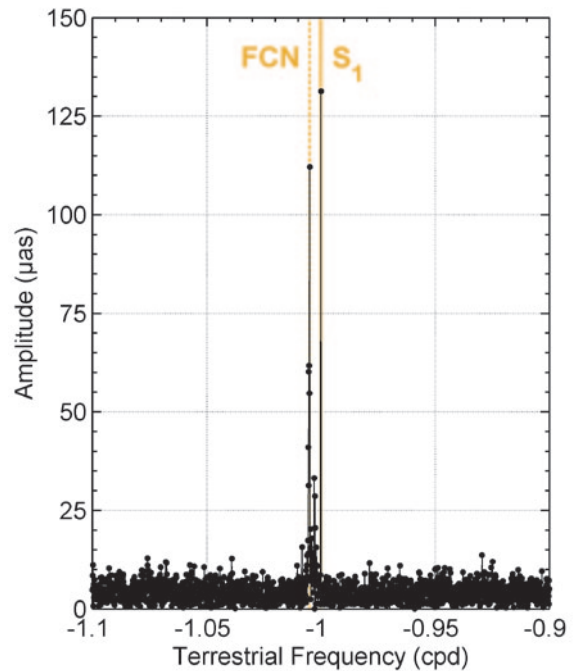


Abb. 1: Amplitudenspektrum der Nutationsresiduen (Zeitraum 1990–2014) in Bezug auf das MHB-Modell vor Abzug der S_1 -Anomalie. Die Darstellung erfolgt über terrestrische Frequenzen in cpd (cycles per day).

haben. Frühe modellmäßige Abschätzungen des S_1 -Effekts im Erdsystem [1] wurden von MHB allerdings als unzuverlässig eingestuft und anstelle dessen das tatsächlich beobachtete Restsignal (Abb. 1) dem Nutationsmodell als empirische S_1 -Korrektur angegliedert. Dieser Ansatz erweist sich mit Blick auf die Modellperformance als zweckmäßig [36], widerspricht aber dem eigentlichen Konzept einer Nutationstheorie, in der von empirischen Anpassungen an Beobachtungen abgesehen werden soll [9]. Eine unabhängige Handhabung des S_1 -Signals gründet stattdessen auf den Ergebnissen numerischer Fluidmodelle. Im Folgenden wird ein Überblick über jüngste Arbeiten zu dieser Thematik [36] gegeben, wobei speziell Verbesserungen gegenüber früheren Studien [2] Beachtung finden.

2.2 Atmosphärische Komponente

Untersuchungen der prograden jährlichen Nutation erfordern ein exaktes Bild sonnensynchroner terrestrischer Massenverlagerungen. Die im S_1 -Band maßgeblichen physikalischen Abläufe nehmen ihren Ausgang in troposphärischen Strahlungsprozessen und werden dementspre-

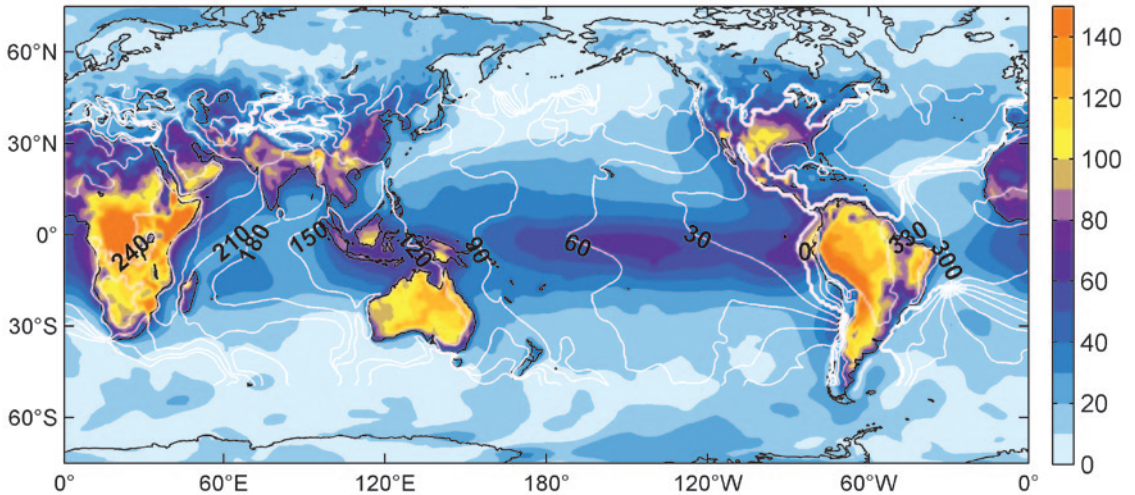


Abb. 2: Atmosphärische S_1 -Gezeit im Oberflächendruck als Langzeitmittel (2004–2013) aus MERRA. Amplituden (Pa) sind farblich unterlegt, weiße Isolinien deuten den Phasenversatz (deg) zu 12 UTC an.

chend als atmosphärische oder „meteorologische“ Gezeiten bezeichnet [5]. Im Einzelnen absorbiert Wasserdampf unter Wärmeabgabe in Höhen von bis zu 12 km solares Infrarot, wodurch Oszillationen in Temperatur, Windgeschwindigkeiten und Luftdruck mit einer Periode von 24 h angeregt werden. Wellenausbreitung in vertikaler Richtung führt auf ein näherungsweise zonales Drucksignal an der unteren Grenzschicht, welches in Abbildung 2 speziell über äquatornahen Meeresflächen mit Amplituden von 40–70 Pa ersichtlich ist. Der sonnengebundene Charakter dieser Primärwelle wird insbesondere durch linear ansteigende Phasenwerte in westlicher Richtung verdeutlicht. Über Landmassen zeigt sich ein weitaus komplexeres Bild der S_1 -Gezeit, das u. a. durch latente Wärmeabgabe in Konvektionswolken [12] und kleinskalige Windsysteme (z. B. Berg-Talwinde) bestimmt ist.

Sowohl Variationen im Oberflächendruck p_S (Massenterm) als auch windgetriebene Partikelbewegungen in höheren Schichten (Bewegungsterm) induzieren Veränderungen des atmosphärischen Drehimpulses, was unmittelbar durch Rotationsschwankungen der festen Erde kompensiert wird. Zur Abschätzung des Nutationseffekts geophysikalischer Fluide fasst man den Drehimpuls zweckmäßig in dimensionslose Funktionen χ_1 und χ_2 , deren Berechnung für Beiträge des Massenterms nachstehend kurz illustriert ist. Unter Verwendung sphärischer Koordinaten (ϕ, λ) und komplexer Notation gilt; vgl. [35]

$$\begin{aligned} \tilde{\chi} &= \chi_1 + i\chi_2 = \\ &= \frac{-1.10a^4}{(C-A)g} \iint p_S(\phi, \lambda) \sin\phi \cos^2\phi e^{i\lambda} d\phi d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

worin a den mittleren Erdradius, g die nominelle Gravitationsbeschleunigung, und C bzw. A Hauptträgheitsmomente bezeichnen. Wesentliches Merkmal von Gleichung (1) ist eine räumliche Gewichtung des Druckfeldes mit Kugelfunktionen zweiten Grades, wodurch nach Flächenintegration lediglich die langwellige Struktur der S_1 -Tide in Abbildung 2 erhalten bleibt. Weitere Berechnungsschritte umfassen die Transformation der terrestrischen Größe $\tilde{\chi}$ ins raumfeste Bezugssystem sowie die Abbildung auf tatsächliche Nutationswerte durch Faltung mit Transferfunktionen eines realistischen Erdmodells; siehe [1].

[2] und [18] zeigen, dass die so errechnete atmosphärische Anregung etwa 40–50 % der beobachteten Nutationsanomalie im S_1 -Band erklärt. Diese Studien stützen sich größtenteils auf Druck- und Windfelder einer frühen meteorologischen Reanalyse [15], die unter heutigen Gesichtspunkten als veraltet anzusehen ist. [36] gründen ihre Untersuchungen hingegen auf weitaus aktuellere Langzeitanalysen (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application, kurz MERRA und Climate Forecast System Reanalysis, kurz CFSR) sowie auf Daten des vom ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) betriebenen operationellen Wettermodells. Ob die jeweiligen Druckfelder für Betrachtungen im täglichen Band geeignet sind, kann

u. a. anhand eines Vergleichs der modellseitigen Gezeitensignale mit in situ Daten global verteilter Barometerstationen geklärt werden [36]. Zuverlässige Reanalysen zeichnen sich überdies durch eine geringe Streuung der in jährlichen Abständen geschätzten Nutationsbeiträge aus. Beide Formen der Validierung befürworten insbesondere die Nutzung von MERRA und operationellen ECMWF-Feldern unter der Voraussetzung, dass Langzeitmittel (2004–2013) angesetzt und Daten vor 2004 vermieden werden. Nutationsschätzungen auf Basis von CFSR weisen demgegenüber zweifelhafte Magnituden und Langzeitveränderungen auf, die vermutlich auf Assimilationsartefakte bzw. intrinsische Modellvariabilität [41] in Breiten von 40–60°S zurückzuführen sind. Im vorliegenden Artikel werden Signalanteile der CFSR-Drucktide südlich von 40°S mittels Wellenzahlfilter künstlich an das Niveau der anderen Modelle angeglichen und so die Plausibilität des Massenterms in der finalen Synthese von Anregungsgrößen (Abschnitt 2.4) erhöht.

2.3 Ozeanische Komponente

Die S_1 -Gezeit der Ozeane ist vorrangig die hydrodynamische Antwort auf tägliche atmosphärische Druckschwankungen und somit ein Sekundäreffekt meteorologischer Gezeiten. Gravitative, thermische und windgebundene Anregungsprozesse sind von vergleichsweise geringer Bedeutung [32] und können für globale Betrachtungen wie die der Erdrotation außer Acht gelassen werden. Entsprechende Gezeitenhöhen im offenen Ozean belaufen sich auf rund 1 cm, was die direkte Messbarkeit der Tide mit Methoden der Satellitenaltimetrie erschwert. Schlüsselaufgabe ist es somit, die ozeanische S_1 -Komponente unter Verwendung der jeweiligen atmosphärischen Tidenlösung (MERRA, CFSR, ECMWF) anhand einer reinen Vorwärtsintegration von Strömungsgleichungen numerisch zu modellieren. [2] ziehen zu diesem Zweck ein barotropes (2D) Modell konstanter Dichte heran, welches neben einer offenkundig groben Auflösung (1° Grad in Länge und Breite) nicht notwendigerweise die Anforderungen echter Gezeitenmodelle (z. B. [7]) erfüllt. Als physikalisch fragwürdig ist insbesondere die Handhabung der Dissipationsmechanismen einzustufen. [2] steuern die Modellenergie und damit die Magnituden der Oberflächenhöhen mittels exzessiver Werte der Bodenreibung, sodass neben Strömungen am Kontinentalsockel auch Tidenbewegungen in Tiefengewässern abgeschwächt werden. Vom ozeanographischen Standpunkt aus ist dieser Ansatz

nicht gerechtfertigt [14]; physikalisch korrektere Modelle führen stattdessen für Tiefen ab 100 m einen internen Wellenwiderstand ein, welcher der Umwandlung barotroper Gezeitenströmungen in interne barokline (3D) Wellen an topographischen Hindernissen Rechnung trägt. Während eine explizite Beschreibung interner Wellen nur in vollen 3D-Modellen möglich ist, kann der Effekt in klassischen barotropen Gezeitenmodellen sehr effizient parametrisiert (d. h. statistisch angenähert) werden; vgl. [10].

Neben korrekter Dissipationsmechanismen bleiben in [2] auch Effekte der Auflast und Selbstanziehung (engl. self-attraction and loading, SAL, siehe [13]) unberücksichtigt. Diese erfassen die mit der Gezeitendynamik verbundene Krusten-deformation und Veränderung im Eigenpotential der Ozeane, was als gravitative Rückkopplung auf bewegte Wassermassen angesehen werden kann. Bezeichnet ζ die Oberflächenauslenkung relativ zur Kruste, ρ die Wasserdichte und ψ den sphärischen Abstand des Gitterpunktes (ϕ, λ) von der Auflast (ϕ', λ'), folgt der SAL-Term aus dem Faltungsintegral

$$\zeta_{SAL}(\phi, \lambda) = \rho a^2 \iint \zeta(\phi', \lambda') G(\psi) \sin \phi' d\phi' d\lambda' \quad (2)$$

worin $G(\psi)$ die maßgebende Greensche Funktion des SAL-Effekts darstellt [40]. Auswertung voller Oberflächenintegrale innerhalb der numerischen Lösung von Strömungsgleichungen erhöht den Rechenaufwand typischerweise um eine Größenordnung, weshalb in gängigen Gezeitenmodellen (z. B. [7]) der SAL-Effekt iterativ in mehreren aufeinanderfolgenden Vorwärtssimulationen eingearbeitet wird. Die Resultate eines Modelllaufs werden hierzu harmonisch in die Höhen einzelner Partialtiden aufgliedert, unter Anwendung von Gl. (2) gefaltet und abschließend als SAL-Antrieb dem nächsten Modelllauf angeschlossen. Konvergenz und damit stimmige Darstellungen der SAL-Größe stellen sich im globalen Mittel üblicherweise nach zwei bis vier Iterationen der Vorwärtssimulation ein.

Zur exakten Modellierung von S_1 unter den erarbeiteten Aspekten (interne Gezeiten, SAL) adaptieren [36] bestehende Software [8] als barotropes Modell der gravitativen Partialtiden M_2, O_1 mit atmosphärischem Druckantrieb täglicher Frequenz (Abb. 2). Der Wellenwiderstand wird zweckmäßig nach Gl. (20) in [10] in Abhängigkeit von Bathymetriegradien formuliert. Mit Blick auf den Drehimpuls als Zielgröße kann ohne Genauigkeitsverlust ein mittlere Auflösung (1/3°)

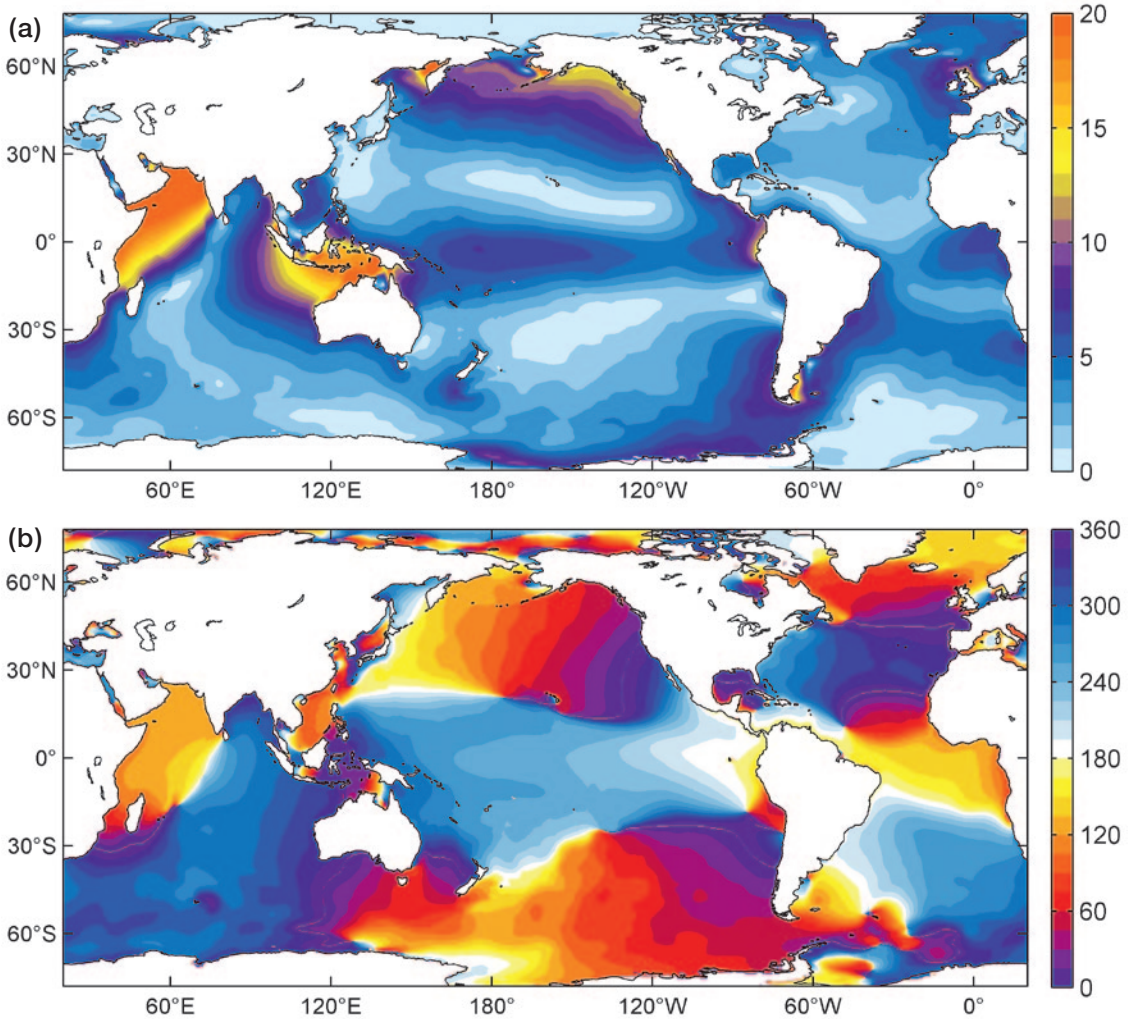


Abb. 3: Numerisch modellierte Oberflächenhöhen der ozeanischen S_1 -Gezeit unter Verwendung des in Abbildung 2 gezeigten Druckantriebs. Amplituden (a) in mm, Phasen (b) in deg relativ zu 12 UTC.

unter Ausschluss polarer Bereiche (ab 78° Breite) gewählt werden. Die Modellintegration selbst (40 Tage) setzt ein Einschwingen über 12 Tage und zwei Iterationen der SAL-Komponente voraus.

Stündliche Momentaufnahmen des Modellzustandes (Höhen und Geschwindigkeiten) liefern nach harmonischer Analyse ein quasi-globales Bild der Gezeitenwelle S_1 , die in Abbildung 3 exemplarisch für den Druckantrieb aus MERRA illustriert ist. Auslenkungen der Wassersäule beschränken sich großflächig auf 1 cm, spitzen sich jedoch in bestimmten Regionen (Arabisches Meer, Östlicher Indischer Ozean, Golf von Alaska) auf 1.5–2.5 cm zu. Das Phasenverhalten ist mit Ausnahme eines monotonen Anstiegs im Äqua-

toralpazifik äußerst komplex und nicht notwendigerweise an den zeitlichen Gang des Luftdrucks (Abb. 2) gebunden. Amplituden als auch Phasen zeichnen somit das Bild einer dynamischen Antwort auf äquatoriale Druckauflasten, welches als Summensignal ozeanischer Normalmoden interpretiert werden kann [32]. Modellläufe mit abgeändertem Druckantrieb (CFSR, ECMWF) sowie Validierungen anhand global verteilter Gezeitenpegel bestätigen die in Abbildung 3 gezeigten Simulationsergebnisse. Analog zu Gl. (1) lässt sich schlussendlich das Höhenfeld auf den ozeanischen Massenterm im S_1 -Band ummünzen, während für den Bewegungsterm das modellierte Strömungsfeld maßgeblich ist.

2.4 Synthese

Modellauswahl (Abschnitt 2.2) und Modellierungsanstrengungen (Abschnitt 2.3) legen den Grundstein für eine zuverlässige Abschätzung des prograden jährlichen Nutationsbeitrages geophysikalischer Fluide. Atmosphärischer und ozeanischer Drehimpuls werden hierzu als Anregungsgrößen (Gleichung 1) ausgedrückt und anschließend auf Cosinus-Anteile (in-phase, ip) und Sinus-Anteile (out-of-phase, op) der S_1 -Nutationswelle umgerechnet. Tabelle 1 offenbart eine ausgesprochen enge Übereinstimmung der drei Datensätze (MERRA, CFSR, ECMWF) in Bezug auf ozeanische Nutationsbeiträge, was bei invarianter numerischer Modellkonfiguration auf Gemeinsamkeiten im Druckantrieb zurückzuführen ist. Ähnlich zu Reanalysen früherer Generation [18] müssen für atmosphärische Beiträge größere Modelldifferenzen ($\sim 30 \mu\text{as}$) akzeptiert werden, die aller Wahrscheinlichkeit nach der genannten intrinsischen Variabilität in Breiten von $40\text{--}60^\circ\text{S}$ geschuldet sind. Zentrales Ergebnis in Tabelle 1 ist eine vollständige Erklärung der prograden jährlichen MHB-Anomalie durch kombinierte atmosphärische und ozeanische Anregungen im S_1 -Band. Die Übereinstimmung fällt insbesondere für MERRA und ECMWF-Daten außerordentlich gut aus, wohingegen die auf CFSR basierenden Nutationswerte knapp außerhalb des dreifachen formalen Fehlers der VLBI-Beobachtung liegen. Frühere Modellschätzungen [2] bieten demgegenüber nur eine näherungsweise Erklärung der S_1 -Anomalie mit Fehlbeträgen von $30\text{--}40 \mu\text{as}$ in beiden Komponenten der Oszillation. Wie Testrechnungen in [36] zeigen, können Abweichungen dieser Größe vor allem durch die Einbindungen von SAL-Effekten und die Verwendung hinreichend feiner Modellauflösungen vermieden werden. Im

breiteren Kontext bestätigen die erzielten Ergebnisse die praktische Handhabung des S_1 -Signals in [21], legen gleichzeitig aber auch nahe, dass in zukünftigen Nutationsmodellen (z. B. [46]) eine von Beobachtungen unabhängige Berücksichtigung mittels geophysikalischer Anregungsgrößen möglich ist. Dieser Ansatz ist nicht nur konzeptionell zu bevorzugen, er erlaubt es auch, den mittleren S_1 -Einfluss in der Nutation von Sekundäreffekten wie Kern-Mantel-Kopplungen oder zeitvariablen Fluidsignalen (Abschnitt 5) zu trennen.

3. Ein erweiterter Blickwinkel

Die exakte Modellierung ozeanischer Gezeiten ist nicht nur von unmittelbarer Relevanz in der Erdrotation. Quasi jede geodätische Analyse zeitvariabler Prozesse im Erdsystem setzt einen rigorosen Umgang mit dem „Puls der Meere“ voraus. Schwerefeldlösungen aus Bahndaten des Gravity Recovery and Climate Experiment [42] sind beispielsweise auf Gezeitenmodelle zur Reduktion kurzperiodischer Massenvariationen innerhalb der nominellen Inversionsintervalle von 1 Monat bzw. 1 Tag [20] angewiesen. Die rapide Umverteilung von Wassermassen verursacht gleichzeitig Krustendeformationen von wenigen cm, die in der Auswertung terrestrischer Gravimetrie, vor allem aber in der Analyse geodätischer Weltraumverfahren wie VLBI, GNSS (Global Navigation Satellite Systems) und SLR (Satellite Laser Ranging) Berücksichtigung finden. Erst eine strenge Korrektur dieser dominanten Gezeitenauflast erlaubt es, Stationszeitreihen hinsichtlich langfristiger lithosphärischer Prozesse zu interpretieren und in die Ableitung globaler Referenzrahmen einfließen zu lassen. Die dabei erforderlichen Genauigkeiten von knapp 1 cm für großräumige Tidenübe werden heutzutage

	MERRA		CFSR		ECMWF	
	ip (μas)	op (μas)	ip (μas)	op (μas)	ip (μas)	op (μas)
Atmos. (a)	-21.9	45.8	-29.9	74.2	-22.4	67.5
Ozean (o)	13.9	60.2	4.2	61.4	13.0	54.3
Summe (a + o)	-8.0	106.0	-25.7	135.6	-9.4	121.8
Summe [2]	-60.6	83.9				
VLBI [21]	-6.2 ± 7	113.4 ± 7				

Tab 1: Prograde jährliche Nutationsanomalie (in-phase, out-of-phase) aus geophysikalischer Modellierung und VLBI-Beobachtungen (letzte Zeile). Atmosphärische und ozeanische Beiträge der drei Modelle (MERRA, CFSR, ECMWF) sind Mittelwerte für 2004–2013. Schätzwerte früherer Studien [2] sind zu Vergleichszwecken beigefügt.

durch eine Synthese hydrodynamischer Modelle mit Altimetermessungen sichergestellt [38]. Reine Vorwärtsintegrationen der Strömungsgleichungen wie im vorangegangenen Abschnitt erreichen beachtliche aber dennoch geringere Genauigkeiten (ca. 5 cm im globalen Mittel) und kommen daher vorwiegend für quantitative Studien der Energiezerstreuung [14] und zur Abschätzung vergangener Gezeitenregime (z. B. [7]) zum Einsatz. Ein verhältnismäßig junges Anwendungsbiet numerischer Vorwärtsmodelle an der Schnittstelle zwischen Ozeanographie und Geokinematik – und damit im weiteren Sinne in der Geodäsie – ist die Untersuchung aktueller Säkularvariationen von Ozeangezeiten, wie sie in Wasserstandsreihen regionaler und globaler Pegelnetzwerke ([31], [43], [25]) zutage treten. Während derartige Variationen vereinzelt als Folge lokaler Effekte, zum Beispiel Landgewinnung und Flusssedimentation, interpretiert werden können, sind die Ursachen von offenkundig großräumigen Gezeitenveränderungen noch unzureichend erforscht. [24] spekuliert anhand theoretischer Betrachtungen, dass variable Tidensignale von 1–2 % relativ zur mittleren Amplitude das Resultat von Erwärmung in oberflächennahen Mischungsschichten sein könnten. Ein entsprechender numerischer Nachweis von thermischen Einflüssen auf die Wellenausbreitung im Flachwasser ist jedoch noch ausständig. Als zweiter Aspekt rezenter Klimaentwicklungen muss der Meeresspiegelanstieg an sich in Betracht gezogen werden. Abänderungen der Gezeitendynamik aufgrund von Schwankungen des Meeresspiegels und damit der Wassertiefe wurden im globalen Rahmen von [25] und [28] diskutiert, wobei beide Studien nur geringfügige Übereinstimmung mit beobachteten Trends an Pegelstationen erzielen konnten. Die Thematik wird im Folgenden unter Verwendung des vorgestellten Ozeanmodells neuerlich aufgegriffen. Insbesondere soll gezeigt werden, dass die Verfeinerung gängiger Modellierungsmethoden zur Beseitigung bestehender Diskrepanzen zwischen Pegelbeobachtungen und numerischen Simulationen beitragen kann.

4. Gezeiten und Meeresspiegelanstieg

4.1 Modelladaptionen

Der Drehimpuls als entscheidende Modellierungsgröße im Abschnitt 2.3 ist ausschließlich durch langwellige Strukturen der Gezeiten bestimmt und damit in Simulationen mittlerer Auflösung gut erfasst. Untersuchungen komplexer Gezeitenmuster am Kontinentalsockel erfordern demgegenüber

ein weitaus feinmaschigeres Gitter. [37] setzen entsprechende Simulationen der primären Gezeitenwellen M_2 und K_1 auf einem $1/12^\circ$ -Gitter an, was Punktabständen von ca. 6 km in mittleren Breiten entspricht und vorherrschende Diskretisierungen ($1/8^\circ$, siehe [28]) merklich verbessert. Mehrfache Modellläufe zur Iteration des SAL-Terms sind unter derart hohen Auflösungen rechentechnisch kaum zumutbar, weshalb auf vereinfachende Parametrisierungen (β -Approximation, [3]) oder im Idealfall auf eine explizite Berechnung des SAL-Spektrums in jedem Zeitschritt zurückgegriffen werden muss. Letzteres galt bislang als unausführbar (z. B. [7]). Unter Verwendung effizienter Routinen für Kugelfunktionsentwicklung bis Grad und Ordnung >1000 [34] zeigen [37] jedoch, dass eine vollständige Umsetzung des SAL-Formalismus' [30] auch in hochauflösenden Vorwärtssimulationen mittlerweile machbar ist. Speziell Flachwassergebiete, welche typische Gezeitenhöhen von 1–2 m aufweisen, profitieren von dieser Modellierungsmethodik. So kann für Tidenhübe der M_2 -Welle in Tiefen bis 1000 m ein mittlerer Simulationsfehler von 14.6 cm erzielt werden, was als signifikante Verbesserung gegenüber den Genauigkeiten etablierter Ozeanmodelle (19–28 cm, siehe [38]) anzusehen ist. Der entwickelte Modellcode eignet sich somit ideal zur Studie küstennaher Gezeitenprozesse.

4.2 Simulationsszenarien und Validierung

Veränderungen der Ozeantiefe werden von Schwankungen der geozentrischen Meeresoberfläche h in Bezug auf die Position der Erdkruste c bestimmt. Messungen der Satellitenaltimetrie vermitteln seit 1993 ein quasi-globales Bild geozentrischer Meeresspiegelvariationen $\dot{h}(t)$, welche in hinreichender räumlicher Auflösung ($1/4^\circ$) u. a. vom französischen AVISO-Portal als fusioniertes Produkt mehrerer Altimetermissionen bezogen werden können. Punktweise Trendkomponenten aus derartigen Langzeitdaten (Abbildung 4a) münden global in einem mittleren Meeresspiegelanstieg von 2.94 mm yr^{-1} (1993–2016), können aber regional durch eine Reihe von Einflussfaktoren, wie beispielsweise Windantrieb, natürliche Klimaschwankungen oder Masseneinträge von Eisschilden signifikant variieren. Höhenbeobachtungen dieser Form geben Aufschluss über Veränderungen der Wassersäule $\Delta s(t) = h(t) - c(t)$ nach entsprechender Korrektur um Krustenbewegungen $c(t)$, welche wiederum auf tektonische Vorgänge, anthropogene Grundwasserentnahme und isostatische Ausgleichsbewegungen zu-

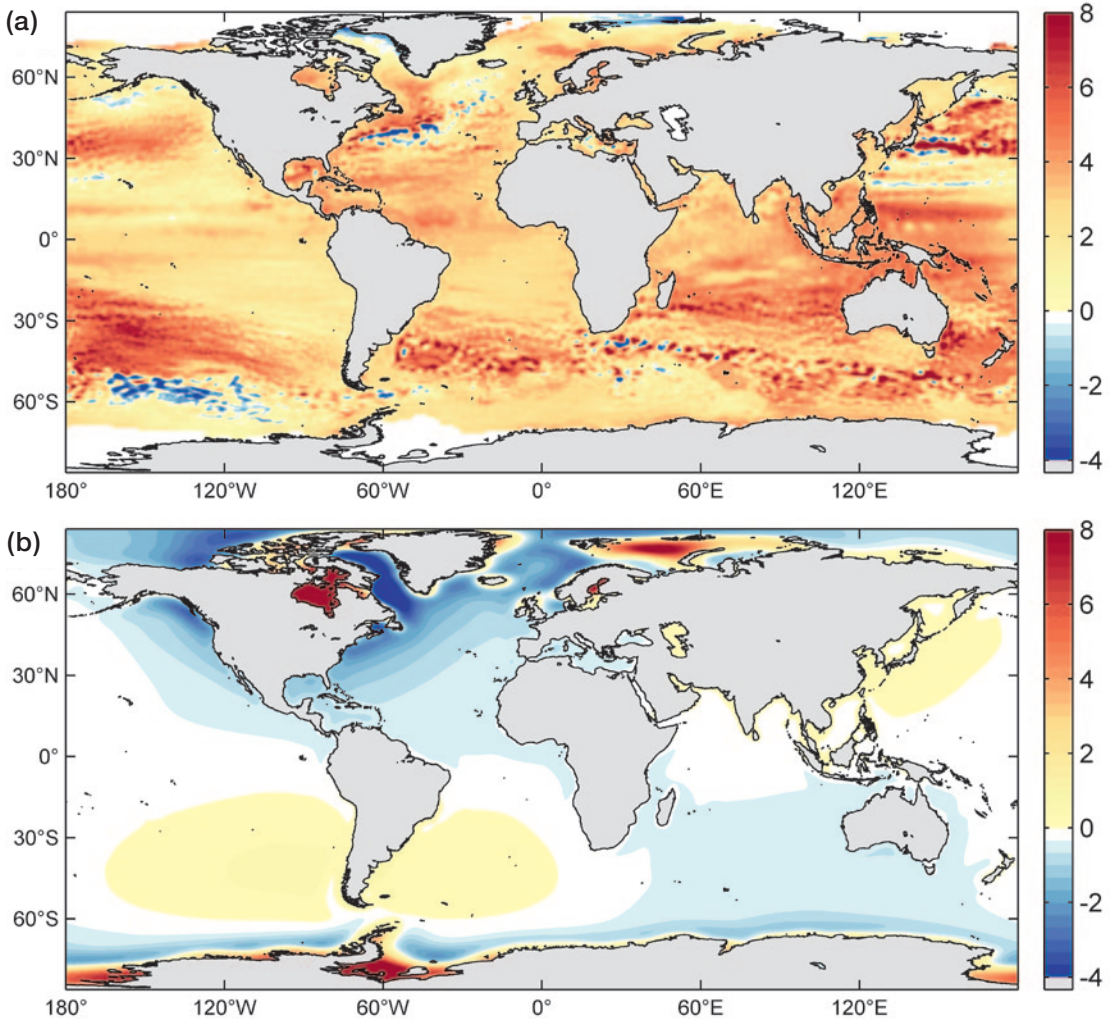


Abb. 4: Lineare Trends (mm yr^{-1}) des (a) geozentrischen Meeresspiegels (1993–2016) und (b) der ozeanischen Krustenposition in Zusammenhang mit GIA

rückzuführen sind. Als integrales Signal ist $c(t)$ nicht direkt erschlossen, jedoch können einzelne Bewegungskomponenten der Erdkruste mittels geophysikalischer Modelle approximiert werden. In der vorliegenden Studie wird $c(t)$ explizit als Resultat der postglazialen Landhebung (Glacial Isostatic Adjustment, GIA) auf Basis von Deformationsraten des Modells ICE-6G_C [26] angesetzt, siehe Abbildung 4b. Rückfluss von Mantelmaterial an die Stelle pleistozäner Eisbedeckung bedingt positive Vertikalgeschwindigkeiten u.a. im Bereich von Kanada und Fennoskandia, während ozeanische Krustenteile Senkungen mit einer mittleren Magnitude von 0.22 mm yr^{-1} unterliegen. Der mittlere Meeresspiegelanstieg als relatives

Maß zur Erdkruste beträgt somit 3.16 mm yr^{-1} , was zur Zeitstempelung extrapolierter Ozeantiefen herangezogen werden kann.

Kernstück des Gezeitenexperiments ist es nun Vorwärtslösungen der Partialtide M_2 für heutige und zukünftige Bathymetrieverhältnisse gegenüberzustellen. Trendmuster der Wassertiefen aus Abbildung 4 wurden dazu auf unterschiedliche Werte des mittleren Meeresspiegelanstiegs ($\Delta s = 0.25 \text{ m}$, 0.5 m , 1 m bzw. Zeitspannen von 79 yr, 158 yr, und 316 yr) extrapoliert, wobei die Position der Küstenlinien unverändert blieb. Die Gezeitenantwort auf die einzelnen Anstiegsszenarien erscheint im Wesentlichen proportional zu Δs (vgl. [4]), weshalb im Folgenden ausschließlich

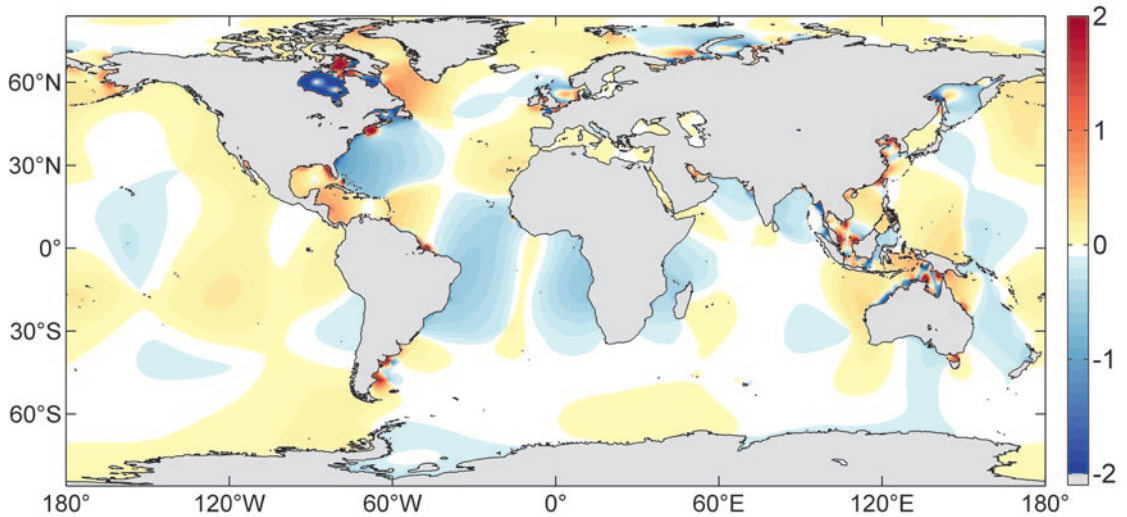


Abb. 5: Numerisch modellierte Amplitudenveränderungen (cm) der M_2 -Gezeit für einen mittleren Meeresspiegelanstieg von 0.5 m

auf Ergebnisse des 0.5 m-Laufes eingegangen wird. Entsprechende Amplitudenänderungen der M_2 -Welle in Abbildung 5 umfassen sowohl Zu- und Abnahmen der Tidenstärke, welche vor allem im Nordatlantik durch die Kombination von GIA und absolutem Meeresspiegelanstieg verstärkt ausfallen. In Übereinstimmung mit analytischen Berechnungen [25] zeigt sich, dass Gezeiten am Kontinentalsockel eine weitaus höhere Sensitivität auf Schwankungen der Wassersäule aufweisen, als dies im offenen Ozean für vorherrschende Tiefen von ~ 4000 m der Fall ist. Konkret entwickeln Flachwassergebiete durch Modulationen der Eigenfrequenz Perturbationssignale von mehreren cm, die in Abbildung 6 für mittlere Breiten der nordamerikanischen Atlantikküste verdeutlicht sind. Neben klassischen Ästuarien (Delaware Bay, Albermale Sound) reagieren insbesondere der Golf von Maine sowie der Golf von Mexiko auf gestiegene Wasserhöhen mit einer Zunahme der Intensität von Tiden, was als zusätzlicher Faktor in der Prädiktionen von Wasserständen an Küsten berücksichtigt werden muss. Im abschließenden Teil des Artikels wird aktuellen Untersuchungen anomaler Springtiden entlang der US-Ostküste ([33], [16]) Rechnung getragen und versucht, die modellierten Gezeitenvariationen aus Abbildung 6 anhand tatsächlicher Pegelbeobachtungen zu verifizieren.

Stündliche Wasserstandsreihen nordamerikanischer Stationen wurden hierzu aus der Datenbank GESLA-2 (Global Extreme Sea Level Analysis Version 2, [44]) extrahiert und einer Prüfung auf

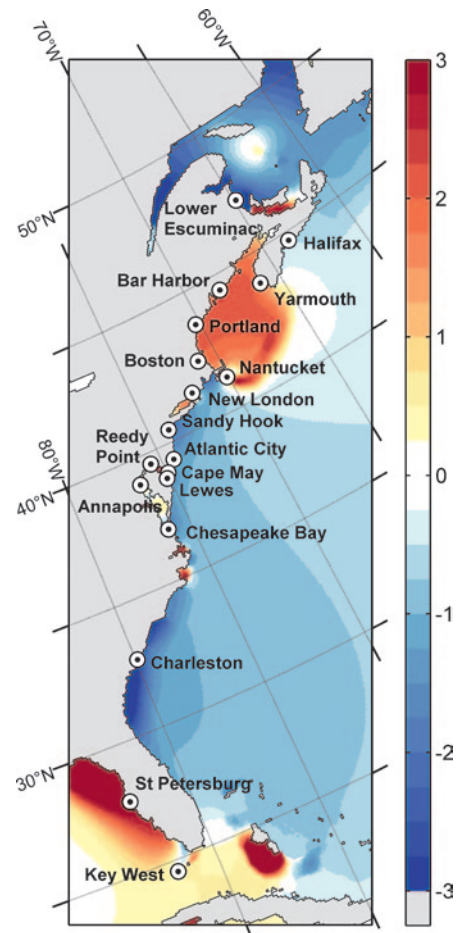


Abb. 6: Detailansicht der in Abbildung 5 illustrierten Gezeitenvariationen für den Nordwestatlantik und Position der 18 untersuchten Gezeitenpegel

grundsätzliche Kriterien (Datenlänge und Vollständigkeit) unterzogen; für Einzelheiten siehe [37]. Die Trennung kurzperiodischer Gezeiteneffekte von längerfristigen Schwankungen des Meeresspiegels am jeweiligen Pegel erfolgte anhand gleitender Mittelung mit Gaußschen Gewichten und einer Grenzperiode von 2 Tagen. Die so erhaltenen Gezeitenresiduen wurden daraufhin mittels Ausgleich nach kleinsten Quadraten auf die Amplituden H und Phasen G der 67 wichtigsten Gezeitenwellen in jährlichen Abständen aufgegliedert (vgl. [43]), wobei lediglich die Beiträge im M_2 -Band herausgegriffen wurden. Der abschließende Analyseschritt bestand in der Approximation der jährlich gesampelten Datenreihen (M_2 -Amplitude, M_2 -Phase, mittlerer Meeresspiegel) durch lineare Trendfunktionen. Nach Ausschluss von Stationen mit nur geringfügig signifikanten Amplitudentrends (95 % Konfidenzintervall) und zur Altimetrie widersprüchlichen Meeresspiegelschwankungen blieben die Ergebnisse 18 zuverlässiger Gezeitenpegel, deren Position in Abbildung 6 veranschaulicht ist.

Der Vergleich zwischen Daten und Modellrechnungen erfolgt auf Basis von „Regressionskoeffizienten“ r_H bzw. r_G , die im Rahmen dieser Studie als Verhältnis der Gezeitenänderung (in Amplitude und Phase) zum Meeresspiegelanstieg definiert werden. Auf Seite der Pegelbeobachtungen ist dies der Quotient der geschätzten in situ Trends, zur Skalierung der Simulationsergebnisse wird auf lokal interpolierte Werte Δs der Altimetrie/GIA-Felder zurückgegriffen. Eine numerische Gegenüberstellung (Tabelle 2) zeigt, dass – anders als in Vorgängerstudien [25] – die beobachtete Amplitudenvariation in ihrem Vorzeichen und zum Teil auch in ihrer Magnitude durch Modellrechnungen erfasst werden kann. Für einzelne Stationen (Lower Escuminac, Nantucket, St. Petersburg) gelingt eine beinahe vollständige Erklärung der gemessenen M_2 -Perturbationen, was nicht zuletzt der Modellauflösung und dem rigorosen Umgang mit SAL-Effekten geschuldet ist. Dennoch muss notiert werden, dass Unstimmigkeiten zwischen Modell und Daten vor allem in Hinblick auf das Phasenverhalten bestehen und die großen absoluten Amplitudenzunahmen im Golf von Maine

Station	Zeitspanne	\bar{H} (cm)	r_H (cm m^{-1})		r_G ($^\circ m^{-1}$)	
			Pegel	Modell	Pegel	Modell
Lower Escuminac	1986–2014	25	–4.0	–3.4	–2.4	–0.5
Halifax	1935–2012	63	–5.6	–0.6	5.7	–0.8
Yarmouth	1985–2014	165	10.7	2.2	–6.4	–3.6
Bar Harbour	1979–2013	156	23.1	3.1	–10.1	–4.5
Portland	1937–2014	136	33.1	3.7	1.9	–5.6
Boston	1935–2014	137	9.2	2.2	–3.4	–3.9
Nantucket	1969–2014	43	7.8	4.0	–11.1	–3.7
New London	1939–2014	36	2.7	0.6	6.0	–1.3
Sandy Hook	1975–2014	68	2.5	–2.5	–9.7	–0.1
Atlantic City	1975–2012	58	–2.3	–1.6	–1.1	0.0
Cape May	1966–2014	71	–3.2	–1.9	–1.6	1.3
Lewes	1957–2014	60	–6.1	–2.1	6.7	1.1
Reedy Point	1982–2014	76	15.8	11.8	10.4	–17.0
Chesapeake Bay	1976–2014	38	–1.3	–1.8	–0.8	–3.2
Annapolis	1950–2014	13	6.8	2.1	–3.4	–8.5
Charleston	1935–2014	77	7.2	–2.9	–9.2	–1.3
St. Petersburg	1950–2014	16	5.4	9.1	–25.8	–15.1
Key West	1950–2014	18	1.6	1.0	–3.9	–1.9

Tab 2: Regressionskoeffizienten $r_{H,G}$ der M_2 -Gezeit aus Pegelbeobachtungen und Modellrechnungen. Absolute Amplituden- und Phasenveränderungen sind relativ zu einem Meeresspiegelanstieg von 1 m angegeben (Einheiten $cm m^{-1}$ bzw. $^\circ m^{-1}$). Die dritte Spalte zeigt die mittlere M_2 -Amplitude am jeweiligen Pegel.

nur zu einem geringen Teil (10–20 %) wiedergegeben werden. [37] bestätigen dieses Fazit anhand erweiterter Validierungen am europäischen Kontinentalsockel und an australischen Küsten. Mögliche Modellverbesserungen und zusätzliche Simulationsansätze zur weiteren Ergründung der Säkularvariationen von Gezeiten sind nachstehend erörtert.

5. Ausblick

Dieser Artikel bot einen Brückenschlag zwischen zwei ausgesprochen speziellen Thematiken der geodätischen Erdsystemforschung mit numerischen Methoden. Sowohl Nutation als auch der Aspekt der reinen Gezeitenmodellierung besitzen Facetten, die in zukünftigen Studien noch näher zu untersuchen sind. In Abschnitt 2 wurde anhand einer vollständigen Erklärung des S_1 -Signals in der Erdorientierung das Rahmenwerk geschaffen, mögliche Modulationen der prograden jährlichen Nutationswelle in Zusammenhang mit zeitlich variablen Fluidsignalen abzuschätzen. Wie vorbereitende Studien [22] zeigen, ist die atmosphärische Drucktide keineswegs ein idealisiertes harmonisches Phänomen (Abb. 2), sondern zeigt Langzeitvariationen (10–20 %), die insbesondere durch großflächige Umschichtungen von Wasserdampf im Zuge von El Niño-Ereignissen gesteuert sind. Bei Beschränkung der Druckmodulationen auf äquatornahe Bereiche ist der entscheidende Nutationseinfluss abermals im ozeanischen Drehimpuls zu suchen, zumal die dynamische Antwort des Ozeans auf Auflasten in den Tropen etwaige El Niño-Signale auch in mittlere Breiten überträgt. [22] folgt dieser Argumentation und gelangt mithilfe numerischer Simulationen unter El Niño-Bedingungen zu irregulären Variationen der prograden jährlichen Nutation mit Magnituden von 15–20 μ s. Nicht präzisierbare Einflüsse dieser Form begrenzen die Genauigkeit von harmonischen a priori Modellen und sind dementsprechend für in Arbeit befindliche Nutationsmodelle [46] von maßgeblicher Bedeutung.

Beobachtete lineare Veränderungen der M_2 -Gezeit konnten im zweiten Teil des Artikels stichhaltig mit Effekten der vertikalen Ausdehnung von Wassersäulen in Verbindung gebracht werden. Trotz Fortschritte in der globalen Modellierung sind die abgeleiteten Regressionskoeffizienten jedoch noch nicht als endgültige quantitative Schätzwerte des GIA- und Meeresspiegeleinflusses anzusehen. Innerhalb des gewählten barotropen Ansatzes ist zur exakteren Erfassung der Tidendynamik eine

Einarbeitung trockenfallender Gezeitenzonen und eine weitere Steigerung der Auflösung – beispielsweise im Rahmen regionaler Simulationen [4] – anzustreben. Die Darstellung kritischer Elemente wie Meerengen, Schwellen und Ästuarrien kann vorzugsweise unter Verwendung unstrukturierter Gitter (z. B. [11]) verbessert werden. Fortschritte in der Diskussion von Gezeitenvariationen sind zudem von baroklinen Modellierungsanstrengungen, einer Einbettung von Tiden in realistische Schichtungsverhältnisse [29] und Langzeitsimulationen mit vollständigem atmosphärischen Antrieb zu erwarten.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind innerhalb der FWF-Projekte ASPIRE (I1479) und SCORE (P30097) entstanden. Teile der Studie profitierten speziell von Dienstreisen, die im Rahmen des Sub auspiciis Exzellenzstipendiums des Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft absolviert wurden.

Referenzen

- [1] Bizouard, C., Brzeziński, A., Petrov, S. (1998). Diurnal atmospheric forcing and temporal variations of the nutation amplitudes. *J. Geod.*, 72, 561–577.
- [2] Brzeziński, A., Ponte, R., Ali, A. (2004). Nontidal oceanic excitation of nutation and diurnal/semidiurnal polar motion revisited. *J. Geophys. Res.*, 109, B11407, doi: 10.1029/2004JB003054.
- [3] Buijsman, M. C., Arbic, B.K., Green, J.A.M., Helber, R.W., Richman, J.G., Shriver, J.F., Timko, P.G., Wallcraft, A.J. (2015). Optimizing internal wave drag in a forward barotropic model with semidiurnal tides. *Ocean Model.*, 85, 42–55.
- [4] Carless, S.J., Green, J.A.M., Pelling, H.E., Wilmes, S.-B. (2016). Effects of future sea-level rise on tidal processes on the Patagonian Shelf. *J. Marine Syst.*, 163, 113–124.
- [5] Chapman, S., Lindzen, R.S. (1970). *Atmospheric tides*. D. Reidel, Dordrecht, Netherlands.
- [6] Dehant, V., Mathews, P.M. (2015). *Precession, Nutation and Wobble of the Earth*. Cambridge University Press.
- [7] Egbert, G.D., Ray, R.D., Bills, B.G. (2004). Numerical modeling of the global semidiurnal tide in the present day and in the last glacial maximum. *J. Geophys. Res.*, 109, C03003, doi: 10.1029/2003JC001973.
- [8] Einšpigel, D., Martinec, Z. (2015). A new derivation of the shallow water equations in the geographical coordinates and their application to the global barotropic ocean model (the DEBOT model). *Ocean Model.*, 92, 84–100.
- [9] Fedorov, E.P., Smith, M.L., Bender, P.L. (1980). Nutation and the Earth's rotation. In: *Proceedings of the IAU Symposium no. 78*, D. Reidel, Dordrecht, Netherlands.
- [10] Green, J.A.M., Nycander, J. (2013). A comparison of tidal conversion parameterizations for tidal models. *J. Phys. Oceanogr.*, 43, 104–119.
- [11] Greenberg, D.A., Blanchard, W., Smith, B., Barrow, E. (2012). Climate change, mean sea level and high tides in the Bay of Fundy. *Atmos.-Ocean*, 50, 261–276.

- [12] Hagan, M.E., Forbes, J.M. (2002). Migrating and non-migrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release. *J. Geophys. Res.*, 107(D24), 4754.
- [13] Hendershott, M. (1972). The effects of solid earth deformation on global ocean tides. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 29, 389–402.
- [14] Jayne, S.R., St. Laurent, L.C. (2001). Parameterizing tidal dissipation over rough topography. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 811–814.
- [15] Kalnay, E., et al. (1996). The NMC/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437–471.
- [16] Karegar, M.A., Dixon, T.H., Malservisi, R., Kusche, J., Engelhart, S.E. (2017). Nuisance flooding and relative sea-level rise: The importance of present-day land motion. *Sci. Rep.*, 7, 1.
- [17] Kinoshita, H. (1977). Theory of the rotation of the rigid Earth. *Celestial Mech.*, 15, 277–326.
- [18] Koot, L., de Viron, O. (2011). Atmospheric contributions to nutation and implications for the estimation of deep Earth's properties from nutation observations. *Geophys. J. Int.*, 185, 1255–1265.
- [19] Krásna, H., Böhm, J., Schuh, H. (2013). Free core nutation observed by VLBI. *Astron. Astrophys.*, 555, A29.
- [20] Kurtenbach, E., Eicker, A., Mayer-Gürr, T., Holschneider, M., Hayn, M., Fuhrmann, M., Kusche, J. (2012). Improved daily GRACE gravity field solutions using a Kalman smoother. *J. Geodyn.*, 59–60, 39–48.
- [21] Mathews, P.M., Herring, T.A., Buffett, B.A. (2002). Modeling of nutation and precession: new nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior. *J. Geophys. Res.*, 107(B4), 2068.
- [22] Mayerhofer, C. (2016). El Niño-Modulationen der ozeanischen S_1 -Gezeit und ihre Auswirkungen auf die Nutation. Diplomarbeit, Department für Geodäsie und Geoinformation, TU Wien, 74 pp.
- [23] Molodensky, M.S. (1961). The theory of nutation and diurnal earth tides. *Comm. Obs. Roy. Belgique*, 188, 25–56.
- [24] Müller, M. (2012). The influence of changing stratification conditions on barotropic tidal transport and its implications for seasonal and secular changes of tides. *Cont. Shelf. Res.*, 47, 107–118.
- [25] Müller, M., Arbic, B., Mitrovica, J. (2011). Secular trends in ocean tides: Observations and model results. *J. Geophys. Res.*, 116, C05013, doi: 10.1029/2010JC006387.
- [26] Peltier, W.R., Argus, D.F., Drummond, R. (2015). Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 450–487.
- [27] Petit, G., Luzum, B. (2010). IERS Conventions (2010). IERS Technical Note No. 36, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, 179 pp.
- [28] Pickering, M.D., Horsburgh, K.J., Blundell, J.R., Hirschi, J.J.-M., Nicholls, R.J., Verlaan, M., Wells, N.C. (2017). The impact of future sea-level rise on the global tides. *Cont. Shelf. Res.*, 142, 50–68.
- [29] Ponte, R.M., Chaudhuri, A.H. (2015). Long-period tides in an atmospherically driven, stratified ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 45, 1917–1928.
- [30] Ray, R.D. (1998). Ocean self-attraction and loading in numerical tidal models. *Mar. Geod.*, 21, 181–192.
- [31] Ray, R.D. (2009). Secular changes in the solar semidiurnal tide of the western North Atlantic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19601, doi: 10.1029/2009GL040217.
- [32] Ray, R.D., Egbert, G.D. (2004). The global S_1 tide. *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 1922–1935.
- [33] Ray, R.D., Foster, G. (2016). Future nuisance flooding at Boston caused by astronomical tides alone. *Earth's Future*, 4, 578–587.
- [34] Schaeffer, N. (2013). Efficient spherical harmonic transforms aimed at pseudospectral numerical simulations. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 751–758.
- [35] Schindelegger, M., Böhm, S., Böhm, J., Schuh, H. (2013). Atmospheric effects on Earth rotation. In: Böhm, J., Schuh, H. (eds.), *Atmospheric Effects in Space Geodesy*, Springer, pp. 181–231.
- [36] Schindelegger, M., Einšpigel, D., Salstein, D., Böhm, J. (2016). The global S_1 tide in Earth's nutation. *Surv. Geophys.*, 37, 643–680.
- [37] Schindelegger, M., Green, J.A.M., Wilmes, S.-B., Haigh, I.D. (2018). Can we model the effect of observed sea level rise on tides? Submitted to *J. Geophys. Res.*
- [38] Stammer, D., et al. (2014). Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models. *Rev. Geophys.*, 52, 243–282.
- [39] Starr, V. (1948). An essay on the general circulation of the Earth's atmosphere. *J. Meteor.*, 5, 39–43.
- [40] Stepanov, V.N., Hughes, C.W. (2004). Parameterization of ocean self-attraction and loading in numerical models of the ocean circulation. *J. Geophys. Res.*, 109, C03037, doi: 10.1029/2003JC002034.
- [41] Sterl, A. (2004). On the (in)homogeneity of reanalysis products. *J. Climate*, 17, 3866–3873.
- [42] Tapley, B.D., Bettadpur, M., Watkins, M., Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, doi: 10.1029/2004GL019920.
- [43] Woodworth, P.L. (2010). A survey of recent changes in the main components of the ocean tide. *Cont. Shelf Res.*, 30, 1680–1691.
- [44] Woodworth, P.L., Hunter, J.R., Marcos, M., Caldwell, P., Menendez, M., Haigh, I. (2017). Towards a global higher-frequency sea level data set. *Geosci. Data J.*, 3, 50–59.
- [45] Woolard, E.W. (1953). Theory of the rotation of the Earth around its center of mass. *Astron. Papers for Amer. Ephemeris and Nautical Almanac XV, Part I*, US Government Printing Office, Washington D.C., 1–165.
- [46] Zhu, P., Rivoldini, A., Koot, L., Dehant, V. (2017). Basic Earth's parameters as estimated from VLBI observations. *Geod. Geophys.*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.04.007>, 8, 427–432.

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Schindelegger, TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Gußhausstraße 27–29, 1040 Wien.

E-Mail: michael.schindelegger@tuwien.ac.at