

Über den Meeresspiegel, seine Schwankungen und Messungen (Betrachtungen eines meereskundlichen Dilettanten)

*



von Dipl.-Berging.-Geol. Dr. rer. nat. Bernd Hartmann

Halle (Saale), im September 2015

Adresse des Verfassers:

Große Brauhausstraße 19,

06108 Halle(S.)

E-Mail: b.h.hartmann@googlemail.com

Tel.: 0345/279 51 904 Mobil: 0163/4554 627

*Titelbild: Gemälde(Öl) von AIWASOWSKI, I. K.(1889)-„Волна“ (Die Welle), (6,10 m x 3,44 m) ; Staatl. Russisches Museum St. Petersburg

Inhalt:	Seite
1. Vorbemerkung	3
2. Die Gestalt der Erdoberfläche	3
3. Der Aufbau der Erde	6
4. Einflussfaktoren auf die Topographie der Erde	7
5. Die Hydrosphäre	11
6. Die Herkunft der Wässer der Erde	12
7. Der Begriff Meeresspiegel, Meeresspiegelschwankungen	12
8. Koordinaten- und Höhensysteme, Messung der Meeresspiegelhöhe	14
9. Über die Untersuchung vergangener Zustände der Erdgeschichte	15
10. Über die Satellitenaltimetrie	17
11. Fehler und Störgrößen der Satellitenaltimetrie	19
12. Résumé	28
13. Literaturverzeichnis/Quellen	29

Abbildungsverzeichnis

Abb.1a: Die äußere Form der Erde	3
Abb.1b: Was sind eigentlich Höhen?	4
Abb.1c: Der Zusammenhang Geoid, Landoberfläche und Meeresspiegel	4
Abb.1d: Das Verhältnis des Geoids zum Idealkörper	5
Abb.1e: Die zeitliche Veränderlichkeit der Oberflächenform des Geoids	6
Abb. 2: Der Schalenaufbau der Erde	7
Abb.3a: Grundlagen der Plattentektonik	8
Abb.3b: Die Lithosphärenplatten der Erde und das Alter des Meeresbodens	8
Abb. 4: Die Anomalien des Schwerfeldes der Erde	9
Abb. 5: Die Anomalien des Meeresspiegels	10
Abb. 6: Die Verteilung von Land und Meer auf der Erde	11
Abb. 7: Die Änderungen des globalen Meeresspiegels nach drei Datensätzen aus Projekten der Nasa/CNS – Satellitenmission	13
Abb. 8: Ozeanische Tiefenzonen	15
Abb. 9: Die Zyklizität der känozoischen Ablagerungen im Mitteldeutschen Raum	16
Abb.10: Das Prinzip satellitenaltimetrischer Messungen	18

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Übersicht über Satelliten mit altimetrischen Aufgaben	19
Tab. 2: Übersicht über Fehlerarten, Fehlerquellen und Störfaktoren bei altimetrischen Satellitenmessungen	22
Tab. 3: Gesamtübersicht über Messfehler der Satellitenaltimetrie aus Sicht der ESA	27

1. Vorbemerkung

Seit langer Zeit treiben den Verfasser Fragen zum hier behandelten Thema um. Rein beruflich war er, wenn auch indirekt, bspw. mit der Geschichte der Verteilung von Land und Meer auf der Erde ständig konfrontiert. So beschäftigten ihn Fragestellungen z. B. solcher Art wie große Transgressions- und Regressionsergebnisse („Große Quartärtransgression“) im Zusammenhang mit mehrfachen Vergletscherungen (Kaltzeiten) besonders hinsichtlich der nördlichen Hemisphäre und wie sie miteinander in Einklang zu bringen gehen (Was in Wahrheit gar nicht so einfach ist!). Die Hauptmotivation zum Verfassen vorliegender Abhandlung bestand jedoch darin, dass man im Zusammenhang mit quantitativen Angaben auf Satellitenmessungen basierten Daten über Meeresspiegelschwankungen bspw. in den Massenmedien mit schier unglaublicher mm-Genauigkeit hantiert. Diese Sachlage provozierte schon seit langem die natürliche Skepsis des Verfassers. Dieser Sache sollte also irgendwann einmal auf den Grund gegangen werden. Hinzu kommt bspw., dass besonders häufig in den genannten Medien über einen permanent verlaufenden Meeresspiegelanstieg vorrangig als Folge des Abschmelzens der Polkappen berichtet wird. In diesen Medien werden Meeresspiegelschwankungen (offensichtlich der einfachen Logik halber) fast immer mit dem Schmelzen vom Eis der Gletscher bzw. dem Gefrieren von Wasser in Zusammenhang gebracht. Auch aus der Sicht eines Geologen, dem schon von Hause aus noch ganz andere nicht weniger wichtige Einflussfaktoren auf das Niveau des Meeresspiegels bekannt sind, bestand deshalb die Motivation, vorliegende Abhandlung niederzuschreiben. Auch wenn es schwerfiel, war der Verfasser ständig bemüht, bei der Niederschrift des Textes auf jegliche Polemik zu verzichten. Außerdem ist es beabsichtigt, hier weitgehend von Darstellung subjektiv geprägter Sachverhalte Abstand zu nehmen. Geschieht es dennoch, wird die entsprechende Textpassage besonders gekennzeichnet (Kursivschrift). Für ein besseres Verständnis des Wesens von Meeresspiegelschwankungen ist es nach Meinung des Verfassers notwendig, etwas weiter „auszuholen“. Insofern mag die vorliegende Abhandlung auch als Auffrischkursus hinsichtlich des erdkundlichen Allgemeinwissens dienen. In diesem Zusammenhang bittet der Verfasser im Voraus um die Nachsicht des Lesers, falls der Inhalt vorliegender Abhandlung stellenweise allzu banal erscheinen mag.

2. Die Gestalt der Erdoberfläche

Die Form des Planeten Erde entspricht bei weitem nicht der Form einer Kugel und wird deshalb in den Erdwissenschaften (*Geographie, Geodäsie, Geologie, Geophysik u.a.*) als Geoid definiert. Mit dieser Bezeichnung wird die Einzigartigkeit des Planetenkörpers optimal gekennzeichnet. Geometrisch ist der Erdkörper der Form eines Rotationsellipsoids sehr nahe. Rein äußerlich kommt die Form der Erde eher der einer rohen Kartoffel gleich. In Abb. 1a ist der Planet Erde als Zeichnung zur Verdeutlichung dieser Aussage dargestellt.

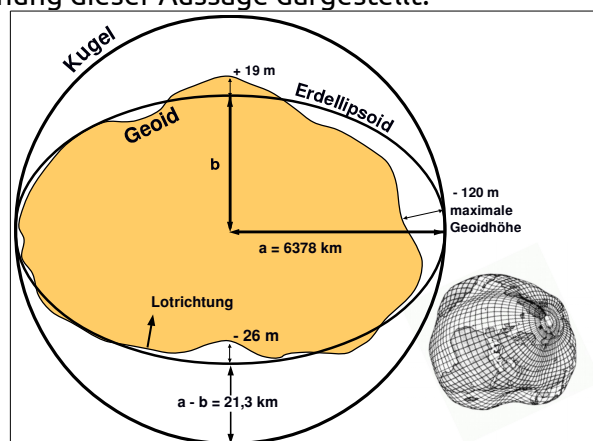


Abb. 1a: Die äußere Form der Erde [24]

In Abb. 1a sind zum Vergleich die geometrischen Idealformen einer Kugel sowie die eines Rotationsellipsoids dargestellt. Etwas genauer ausgedrückt, wird durch die Oberfläche des Geoids eine Fläche gleicher Schwerepotentiale beschrieben. Jedoch ist auch die Geoidoberfläche keinesfalls deckungsgleich mit der tatsächlichen Oberflächenform der Erde. Im Bereich der Ozeane kommt die Form der Wasseroberfläche der des Geoids sehr nahe (vgl. Abb.1d/s. auch Kap. 4).

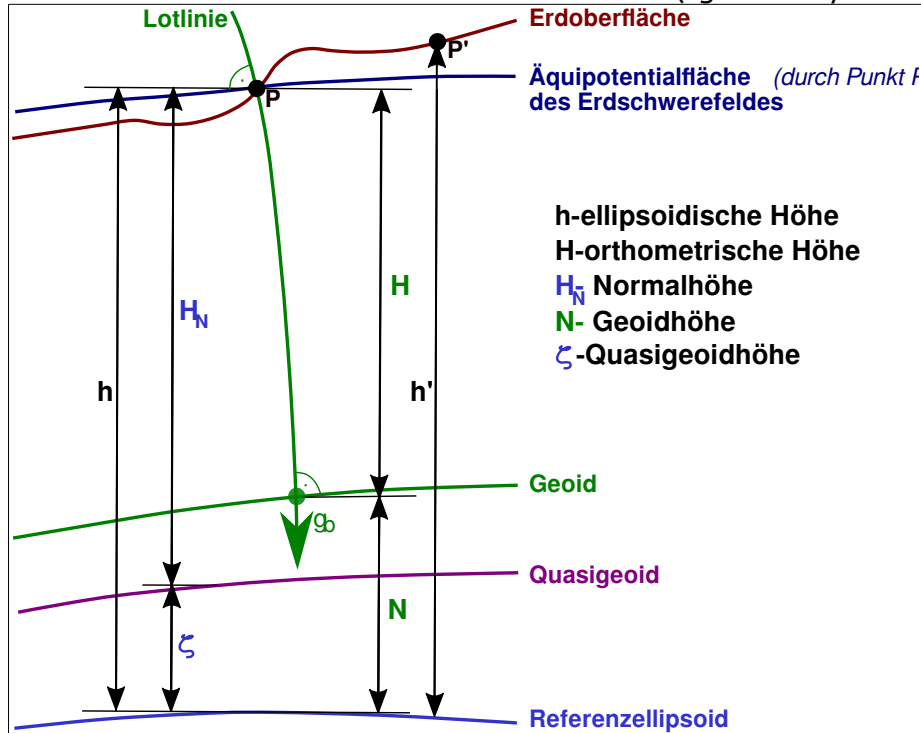


Abb. 1b: Was sind eigentlich Höhen?[25]

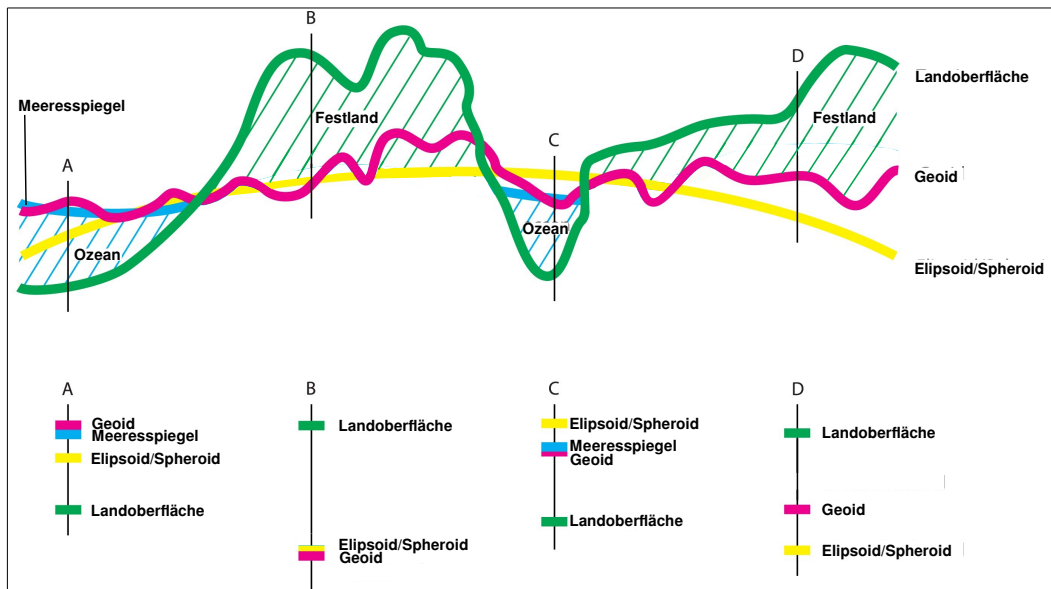


Abb. 1c: Der Zusammenhang Geoid, Landoberfläche und Meeresspiegel [24]

Letzteres hängt damit zusammen, dass das Schwerepotential* an jedem Ort auf der Oberfläche des Geoids gleich ist. Die natürliche Lotrichtung und die Geoidoberfläche (vgl. Abb. 1b) stehen in jedem Punkt seiner Oberfläche senkrecht zueinander (Sie ist also die sogenannte Normale einer Potentialfläche). Daher kann die Form des Geoids durch Messung der lokalen Erdbeschleunigungen bestimmt werden. Zwei beliebige Punkte auf der Geoidoberfläche haben somit das gleiche Schwerepotential und deshalb die gleiche sogenannte dynamische (orthometrische) Höhe.

Der Thematik „Form der Erde“ sind hier insgesamt 5 Abbildungen gewidmet. Damit soll verdeutlicht werden, dass zu quantitativen Aussagen über Änderungen der äußeren Erdgestalt (Schwankungen des Meeresspiegels, Veränderung der Höhen der Landoberfläche), im Grunde genommen, immer auch Angaben zur dementsprechenden Bezugsfläche erforderlich sind. (Z. B. was ist bzw. wo liegt das Nullniveau?)

Die aufmerksame Betrachtung der Abbildungen 1a bis 1e verdeutlichen, wie wichtig es ist, bspw. im Zusammenhang mit Meeresspiegelschwankungen über fundierte Kenntnisse bezüglich der morphologischen Besonderheiten der Erde zu verfügen. (*Dementsprechend wichtig und verantwortungsvoll ist es so auch im Falle entsprechender Informationen über die Massenmedien, eine korrekte Ausdrucksweise zu praktizieren.*) In nachfolgender Abbildung ist die Abweichung des Geoids von der Idealform eines Referenzkörpers dargestellt.

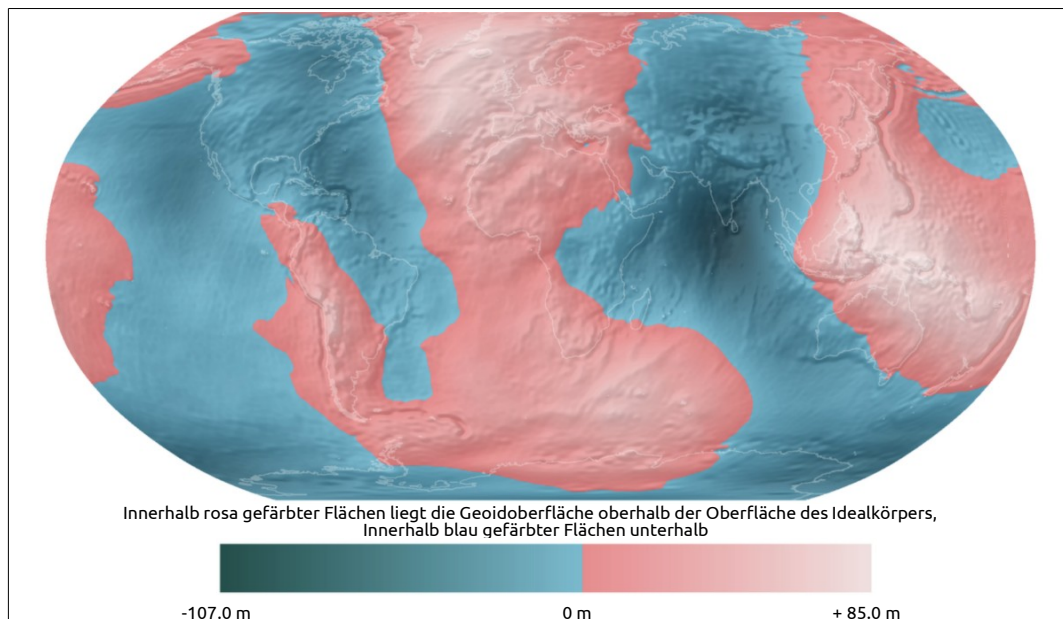


Abb. 1d: Das Verhältnis des Geoids zum Idealkörper [25]

* Warum ist das Schwerefeld der Erde so ausschlaggebend?: Z. B. vor jeder geodätischen Messung auf einem Festlandsstandort werden die Horizontalkreise der Geräte (Nivelliergeräte / Theodoliten) in die Horizontale justiert, was einer Parallelisierung der Vertikalachsen zu den Horizontalkreisen der Geräte mit der Lotlinie bzw. einer entsprechenden Ausrichtung zur Geoidoberfläche oder Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes gleichkommt.

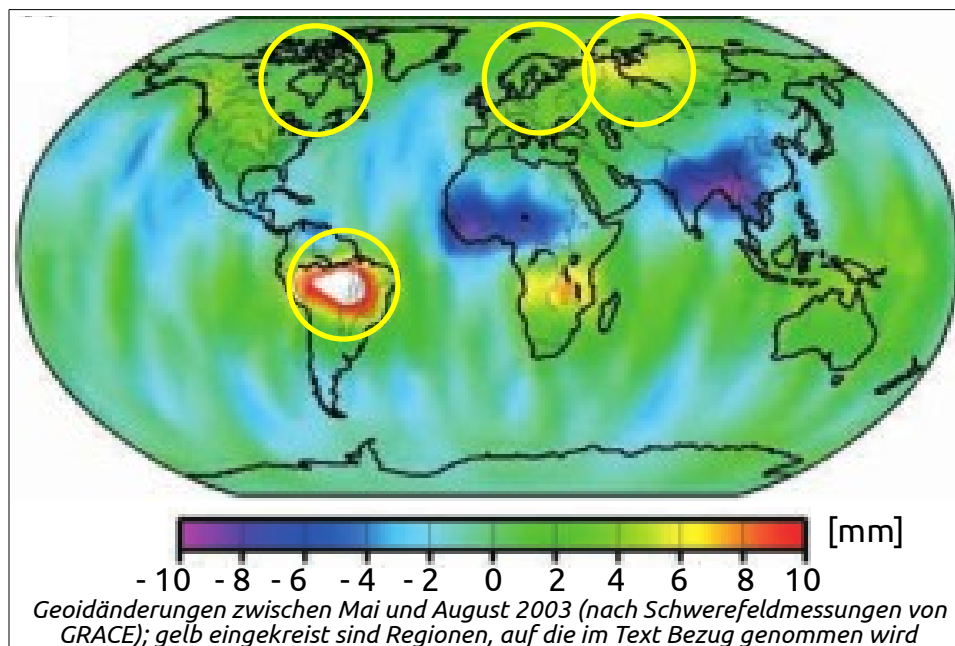


Abb. 1e: Die zeitliche Veränderlichkeit der Oberflächenform des Geoids [26]

Wie anhand von Abb. 1e erkennbar, ist der Erdkörper seiner Form nach bei weitem kein räumlich unveränderliches Objekt [9]. Die Zeitspannen, in denen Veränderungen von statten gehen, sind *erstaunlich* gering.

3. Der Aufbau der Erde

Der innere Aufbau der Erde ist in Abb. 2 dargestellt. Das Wissen über den Schalenaufbau der Erde beruht auf der Kenntnis der wesentlichen physikalischen Eigenschaften (Material, Aggregatzustand, Dichte) der ausgegliederten Sphären aus Ergebnissen geophysikalischer Messungen (vor allem seismischer). Außer den dargestellten Fakten hinsichtlich der oberen Erdsphären (Atmosphäre, Hydrosphäre, Erdkruste, Lithosphäre) sind Aussagen über den inneren Aufbau, das Material und des Aggregatzustandes mehr oder weniger hypothetischer Natur. Es handelt sich lediglich um Schlussfolgerungen, wenn z. B. über das Material des Erdkerns Angaben gemacht werden. Sie basieren hauptsächlich auf Kenntnissen der Physik (*Elektrizitätslehre - die Erde besitzt als rotierender Körper ein eigenes Magnetfeld. Daher werden auch als logische Schlussfolgerung über die Materialeigenschaften des Erdkerns entsprechende Aussagen getroffen, dass er aus Eisen oder/und Nickel bestünde, obwohl er theoretisch bspw. auch aus Wasserstoff mit metallischen Eigenschaften allein aufgrund der Wirkung extremer Drücke und Temperaturen bestehen könnte!*)

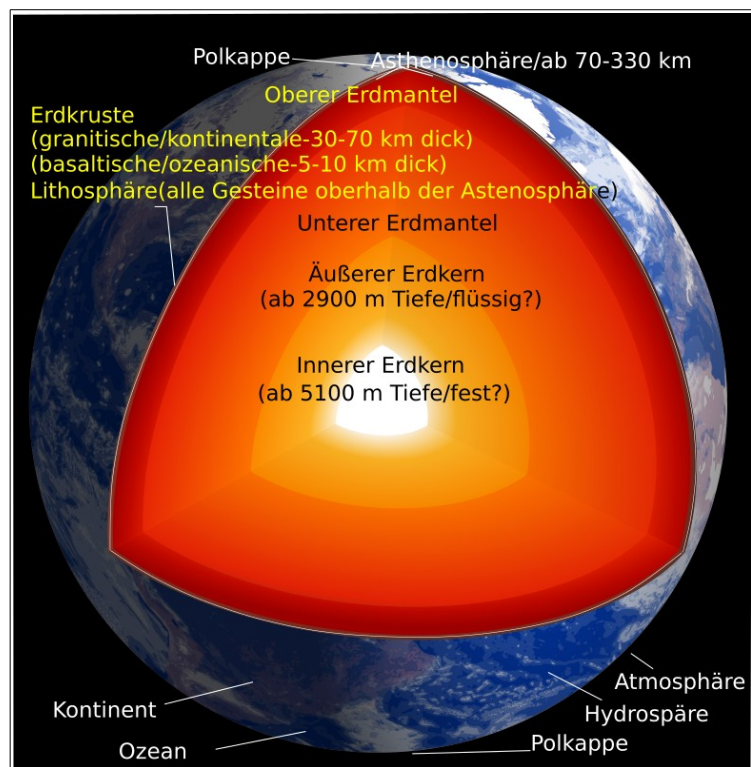


Abb. 2: Der Schalenaufbau der Erde* [27]

Aus Abb. 2 (s. auch Kap. 5) ist ersichtlich, dass eine der äußeren Hüllen der Erde die Hydrosphäre ist.

4. Einflussfaktoren auf die Topographie der Erde

Zur Erdtopographie gehören nicht nur die Oberflächenformen des Festlandes sondern auch die der Oberflächen der Meere und des Meeresbodens.

Der großen Mehrheit der Leser sind ganz sicher die Faktoren bekannt, welche die Gestalt der Festlandsoberfläche beeinflussen. Das betrifft die Wirkung sog. exogener Prozesse wie vor allem die Tätigkeit fließender bzw. bewegter Gewässer, des Windes, gravitativ bedingter Vorgänge, tägliche und saisonbedingte Temperaturschwankungen u.a. sowie endogene Prozesse. Letztere sind vor allem tektonisch bedingte Prozesse (sog. epirogenetische langfristig anhaltende Auf- und Abwärtsbewegungen der Erdkruste, orogenetische Prozesse (gebirgsbildende), Kontinentaldrift, Vulkanismus u.a.). Alle genannten Prozesse veränderten auf die eine und andere Weise das Fassungsvermögen der Meeresbecken. In den Abbildungen 3a und 3b ist das Prinzip bzw. sind die Auswirkungen der Kontinentaldrift dargestellt.

* Die Fragezeichen bezüglich der Aggregatzustände des Materials in den Sphären wurden vom Verfasser hinzugefügt.

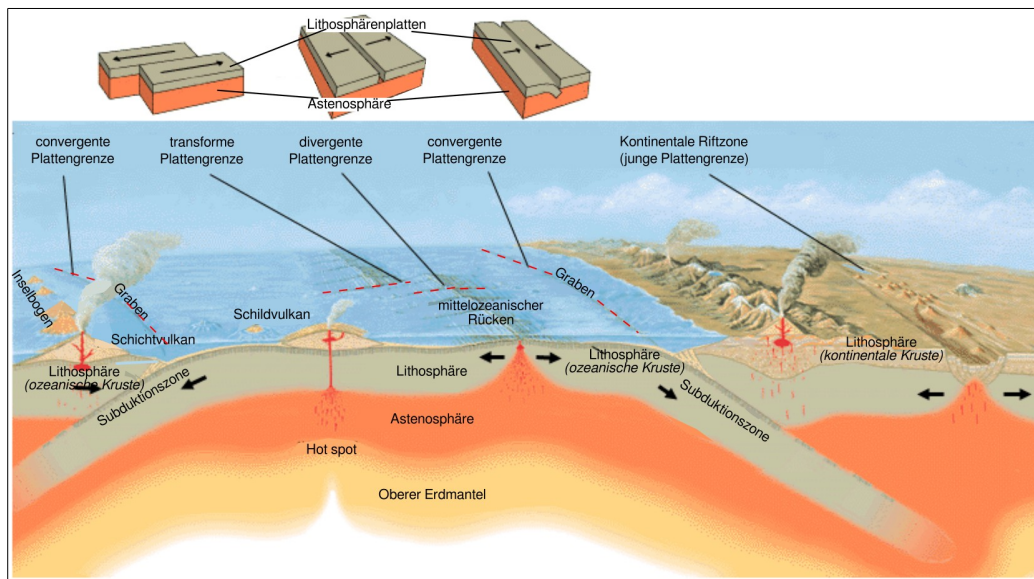


Abb. 3a: Grundlagen der Plattentektonik [28]

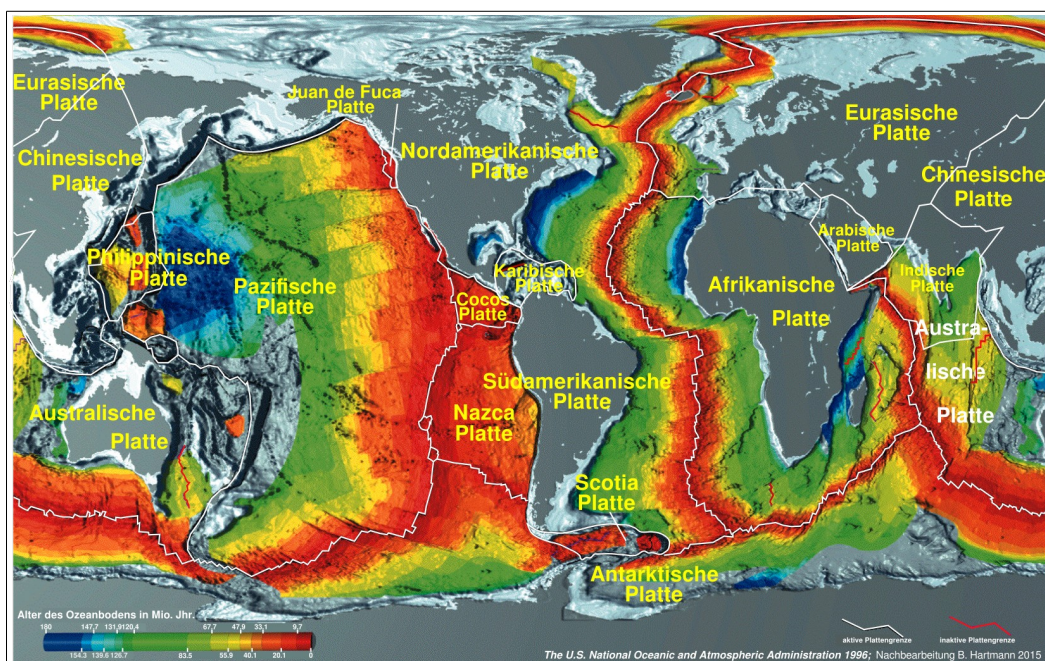


Abb. 3b: Die Lithosphärenplatten der Erde und das Alter des Meeresbodens [29]

Abb. 3b zeugt u.a. davon, dass die Fläche der Meeresböden keine konstante Größe ist. So würde gemäß einer einfachen Berechnung des Verfassers über die geologisch relativ kurze Dauer der Kontinentaldrift von ca. 4,5 Mio. Jahren allein im Bereich des Mittelatlantischen Rückens eine Volumenvergrößerung* des Atlantikbeckens erfolgen, die das gesamte Volumen eines abgeschmolzenen Grönländischen Eisschildes kompensierte, ohne dabei den geringsten Meeresspiegelanstieg zu verursachen. Bei der angestellten Berechnung wurde eine vertikale Bewegungskomponente nicht berücksichtigt. Lt. Abb. 1e sind jedoch im Bereich der Meeresbecken vertikale Bewegungen eher mit negativen Vorzeichen zu registrieren. Man könnte also zu dem allzu aben-

* Die Rechnung berücksichtigt nicht, dass Meeresboden vor allem im pazifischen Bereich der Südamerikanischen Lithosphärenplatte „verschwindet“.

teuerlich erscheinenden Schluss gelangen, dass das Abschmelzen von Eisschilden sich kaum auf den globalen Meeresspiegel auswirken würde.

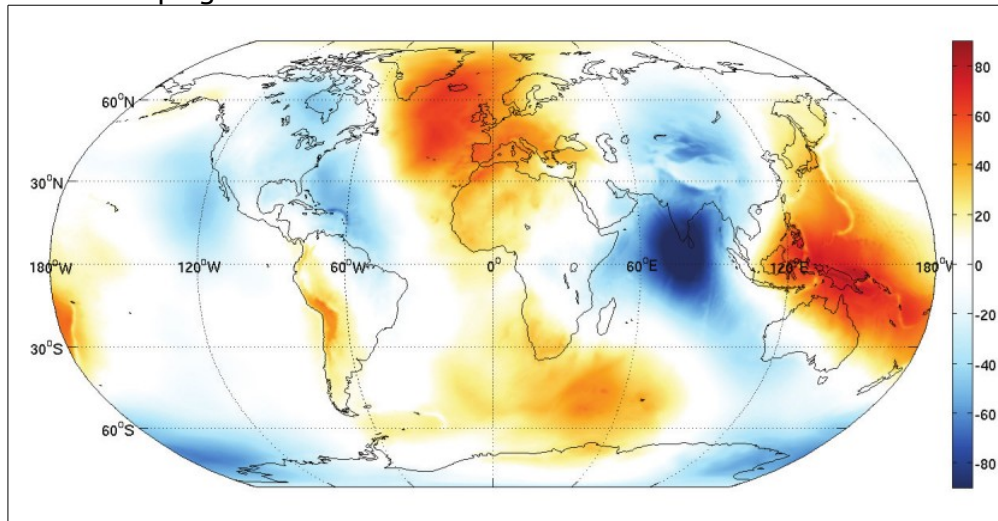


Abb. 4: Die Anomalien des Schwerefeldes der Erde [mGal'] [30]

Auffällige große negative Anomalien des Erdschwerefeldes sind im Indischen Ozean südlich von Indien, etwas weniger ausgeprägt im Norden Kanadas, innerhalb des Atlantischen Ozeans auf der Höhe östlich von Mittelamerika (Karibik), innerhalb des Arktischen Ozeans an seiner Grenze zum Pazifik sowie auf dem Territorium Asiens nördlich des Alpidischen Gebirgsgürtels* vorzufinden. Größere positive Anomalien lassen sich nicht erwartungsgemäß in den Gebieten der aktuellen alpidischen Gebirgsbildung Eurasiens lokalisieren. Dies trifft jedoch für den westlichen Raum Südamerikas zu (Anden-Gebiet, wo sich die Pazifische Platte unter die Südamerikanische schiebt (Subduktionszone)) (vgl. Abb. 4 und 3b).

In nachfolgender Abbildung sind die Anomalien der Höhen des Meeresspiegels in einer Weltkarte dargestellt. Erwartungsgemäß decken sich die Anomalien in der Karte (Abb. 5) in etwa mit den Anomalien des Erdschwerefeldes (Abb. 4). Praktisch bedeutet dies, dass die Meeresoberfläche im Zusammenhang mit den Schwereanomalien reliefiert ist. Entsprechend etwas aktuellen Satellitenmessungen der ESA ((GOCE)/ Projekt GRACE [7, 16]; z.T. durch das GFZ Potsdam projiziert und ausgewertet) gelangt man zu qualitativ gleichen Aussagen.

Die Inhomogenitäten des Erdschwerefeldes wirken sich direkt auf die reale Form der Erdoberfläche so auch auf die des faktischen Meeresspiegels aus (vgl. Kap. 2). Bestimmte Extrema bspw. auf der Landoberfläche im Norden Kanadas wurden von Geowissenschaftlern des GFZ Potsdam über Isostasieeffekte aufgrund der Degradation einstiger Gletscher (Entfallen der Eisauflast) interpretiert. Ganz ähnliche Extrema existieren auch z.B. in Südsibirien, wo nie Inlandeisdecken existierten². Dagegen wurden in Skandinavien weder mit den Missionen von TOPEX/POSEIDON/JASON noch mit GOCE auffällige Anomalien des Gravitationsfeldes sowie auch keinerlei auffällige Höhenänderungen nachgewiesen (vgl. Abb. 1e), obwohl gerade hier theoriegemäß ein bedeutendes pleistozänes Vereisungszentrum gelegen haben müsste. Dies könnte auch ein Zeichen dafür sein, dass die Interpretation gravimetrischer Messungen sehr wohl fehl schlagen kann, weil die Ergebnisse letzterer auf der Landoberfläche besonders fehlerbehaftet sind (vgl. Kap. 10) und dadurch die Vorstellung z.B. vom hypothetischen (*tatsächlich „hypothetischen“ keinesfalls bewiesenen!*) isostatischen Druck durch Eisauflast und seines Gegenwirkens nach Abtauen des Eises an sich zu revidieren ist!

¹ 1 Gal = 1 cm/s² = 0,01 m/s², ca. ein Promille der durchschnittlichen Erdbeschleunigung von ca. 9,81 m/s²; 1 mGal = 0,01 mm/s²

* Umfasst das Gebiet innerhalb des Raumes der Gebirge der Pyrenäen, der Alpen, des Kaukasus bis zum Himalaya

² Die so *hartnäckig* bestehende Vorstellung darüber, dass die Auflast von Gletschern derartig gravierende Auswirkungen auf die Höhenlage des Festlandes hätte, ist nach wie vor durch nichts bewiesen!

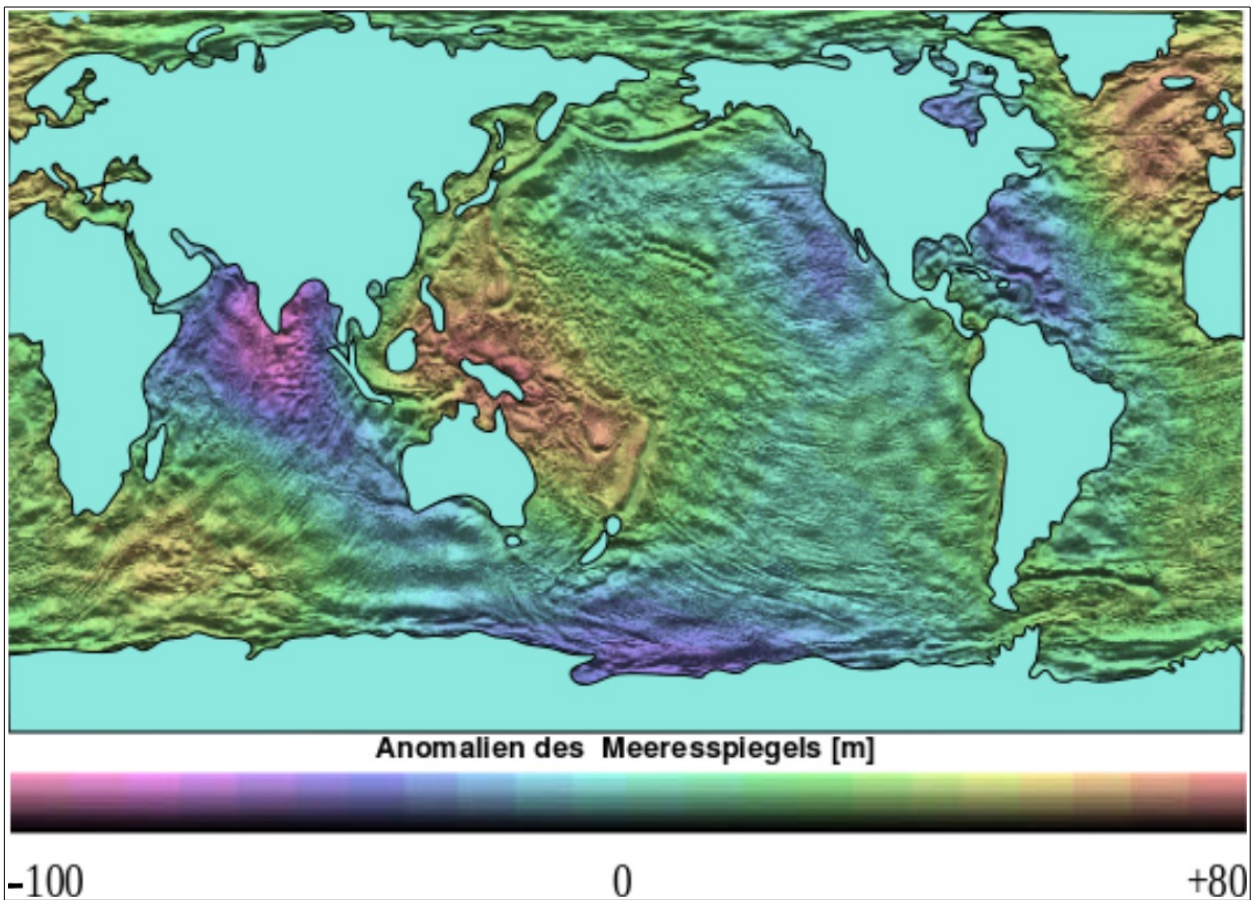


Abb. 5: Die Anomalien des Meeresspiegels* [m] [31]

In Abb. 5 wird gezeigt, dass selbst bei Windstille der Meeresspiegel nicht eben wäre. Wie aus Abb. 5 ersichtlich, liegt er an einigen Stellen bis über 80 Meter höher als „Normal Null“ und dass er an anderen Stellen dagegen auch tiefer als 100 Meter liegt.

Neben dem Schwerfeld der Erde haben noch andere Sachverhalte Einfluss auf den Meeresspiegel. Der Antarktische sowie der Grönländische Eisschild beinhalten zusammen ein Eisvolumen von ca. 30 Mio. km³. Würde das gesamte Eis dieser Eisschilde abschmelzen, hätte dies einen allgemeinen Anstieg des Meeresspiegels um ca. 68m zur Folge [11]. Der Einfluss des Abschmelzens der Berggletscher hätte dagegen einen vernachlässigbar geringen bzw. einen kaum bemerkbaren Einfluss auf die Änderung des Meeresspiegels.

Durch die Meeresgezeiten schwankt im Verlaufe des Tages an den meisten Orten der Erde der Meeresspiegel. Die Gezeiten haben eine Periode von durchschnittlich 12½ Stunden, hängen hauptsächlich vom Stand des Mondes ab. Der Gezeitenhub (Tidenhub) beträgt im Bereich des freien Meeres höchstens etwa 0,5 Meter. In Küstennähe ist er aufgrund von Stauwirkungen oft größer. So beträgt der Tidenhub bspw. in der westlichen Ostsee nur ca. 30 cm, dagegen an der deutschen Nordseeküste um 2 bis 3 Meter [20].

Wind erzeugt über größere Distanzen durch kontinuierliche Adhäsion an der Wasseroberfläche am fernen Ende einer Wasserfläche eine Hebung des Wasserspiegels. Dabei bewegt sich das an der Oberfläche befindliche Wasser langsam in Windrichtung. Am nähergelegenen Ende entsteht dadurch eine Absenkung des Wasserspiegels. An Engstellen, beispielsweise zwischen Inseln, erhöhen sich sowohl die Wasserstandsunterschiede als auch die Strömungsstärke [22].

Im Falle einer Klimaerwärmung und einer damit verbundenen Erhöhung der Temperatur

* Abb. 5 heißt im Original „Mean Sea Level“, was regelrecht falsch ist (s. Maßskala) und aus rein (geo)wissenschaftlicher Sicht stark verwundert!

der ozeanischen Wässer wird durch die sogenannte thermische Ausdehnung ein Teil des Meeresspiegelanstiegs (sog. „sterischer Anstieg“) bedingt. Dem sterischer Anstieg des Meeresspiegels steht der sog. „eustatische“³ Meeresspiegelanstieg, verursacht durch die Zufuhr von bspw. Schmelzwasser, gegenüber. Nach dem IPCC-Bericht von 2013 [22] kommt für den Zeitraum 1993-2010 dem eustatischen Anstieg des Meeresspiegels eindeutig ein deutliches Übergewicht gegenüber dem sterischen Anstieg zu. Die thermale Expansion des Meerwassers, also der thermos- terische Beitrag des Anstiegs, beträgt hiernach 1,1 mm/Jahr Meeresspiegelanstieg. Der Beitrag der Eisschmelze beläuft sich insgesamt auf 1,46 mm/Jahr. Mit 0,38 mm/Jahr kommt mit einer ge- steigerten Wasserzufuhr durch Abflüsse vom Land noch eine weitere Komponente des eustati- schen Anstiegs hinzu. Der eustatische Anteil beträgt damit 1,84 mm/Jahr“ (zitiert nach einem Ar- tikel von Dieter Kasang aus dem Hamburger Bildungsserver 2015).

5. Die Hydrosphäre

Um zum eigentlichen Thema der vorliegenden Abhandlung, den Meeren und Ozeanen, ih- ren Besonderheiten usw. zurückzukehren, hier nun über die Hydrosphäre, die Wasserhülle der Erde: Die Hydrosphäre beinhaltet sämtliche an der Erdoberfläche befindlichen Wässer flüssigen und festen Aggregatzustandes. Unter dem Begriff Hydrosphäre sind alle Arten von Wässern ver- eint - Meereswässer, Wässer der Flüsse und Seen, Grundwässer, Thermalwässer, wie erwähnt, auch alle Wässer in gefrorener Form (Eisschilde, Berggletscher, gefrorene Wässer im Perma- frostboden, im Meer aufschwimmendes Eis (Meereis), Eisberge, Eisschollen in Flüssen und Seen, Schneedecken).

Betrachtet man auf einer Darstellung der Erde (s. Abb. 6) die Verteilung von Land und Meer, so fällt sofort auf, dass die Gesamtoberfläche der Ozeane weitaus größer als die des Fest- landes ist. Und tatsächlich sind von 510 Millionen km² der gesamten Erdoberfläche 362 Millionen km² (ca. 71 %) von Meeren belegt. Das Volumen der oberhalb des Meeresspiegels liegenden Landmasse beläuft sich bei ca. 130 Mio. km³ [11] und ist somit um etwas mehr als das Zehnfache geringer als das gesamte Meerwasservolumen. Das Volumen aller Wässer der Erde beläuft sich bei ca. 1.533.000.00 km³ (davon Meerwässer 1,34 Mrd. km³ (96,4 V %); gefrorene Wässer der Gletscher-1,86 V %, Grundwässer-1,68 V %, Wässer in den Oberflächengewässern des Festlan- des-0,02 % [11]. Das Gesamtgewicht der Hydrosphäre beträgt dabei etwa $1,46 \cdot 10^{21}$ kg und macht damit 1/400 der Erdmasse aus, hat eine 275 mal größere Masse als die der Atmosphäre. Die mittlere Tiefe der Meere beträgt 3688 m [11]. Die maximal anzutreffende Meerestiefe wird mit 11.022 m im Marianengraben des Stillen Ozeans angegeben. Die Ozeane sowie auch ihre Randmeere sind miteinander verbunden. Ausnahmen bilden dabei große Binnengewässer wie bspw. das Kaspische Meer, der Aralsee, der Baikalsee, das Tote Meer, der Victoriasee, Tanganika- see, die Großen Nordamerikanischen Seen sowie noch einige andere.



Abb. 6: Die Verteilung von Land und Meer auf der Erde [34]

³ Der Begriff „eustatisch“ ist der Geologie entlehnt. Dort steht er für langfristig wirkende tektonisch (epirogenetisch) bedingte Schwankungen der Höhe der festen Erdoberfläche.

6. Die Herkunft der Wässer der Erde

Die Frage nach der Herkunft der irdischen Wässer insgesamt ist noch klärungswürdig. Unstrittig ist jedoch ihre prinzipielle Herkunft. Ein bedeutender Teil der irdischen Wässer ist demnach kosmischen Ursprungs (wohl eher aus Asteroiden als aus Kometen). Ein anderer Teil der Wässer entstammt dem Erdinneren infolge von Ausgasungen an die Erdoberfläche (auch auf dem Meeresgrund) getretenen Magmas. Auch aktuell wird den Ozeanen über aktiven untermeerischen Vulkanismus ständig Wasser hinzugefügt. Informationen konnte der Verfasser weder über die Mengen noch über die Größenordnung oder entsprechende Schätzungen zu „hinzugekommenen“ Wässern dieser Art nicht habhaft werden. So können hier auch keinerlei Aussagen über die Bedeutung dieser Neubildungsrate getroffen werden.

7. Der Begriff Meeresspiegel, Meeresspiegelschwankungen

Als Meeresspiegel wird die Höhenlage der Oberfläche des Meeres bezüglich einer Referenzhöhe bei Windfreiheit bezeichnet. Er ist weitgehend identisch mit einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes. Der mittlere Meeresspiegel ist deutlich vom momentanen zu unterscheiden, der seinerseits dem Einfluss der planetarischen Gravitation (Gezeiten), sonstigen Strömungen, Wind u. a. unterliegt. Wie die Höhe des Meeresspiegels ermittelt wird, ist in Kap. 8 beschrieben.

Bei Betrachtungen der Höhe des Meeresspiegels wird immer von der Konstanz des Volumens der insgesamt auf der Erde vorhandenen Wässer in flüssiger sowie in fester Form ausgegangen. Genauer betrachtet, ist diese Herangehensweise nicht ganz korrekt. Es ist davon auszugehen, das zumindest in den Bereichen aktiver untermeerischer vulkanischer Tätigkeit eine Neubildung von Wasser vonstatten geht (vgl. Kap. 6). Jedoch existieren keinerlei zuverlässige Angaben hinsichtlich der hinzugekommenen Volumina.

Anhand des bisher Geschilderten wird ganz deutlich, dass die Bestimmung eines „globalen Meeresspiegels“ ein hinreichend kompliziertes Unterfangen darstellt. Der eigentliche Sinn dieser Größe lässt sich angesichts dessen schwer erschließen, dass er an jedem Messpunkt seine eigene multikausale Spezifik aufweist. Ist man bestrebt den globalen Meeresspiegel und seine zeitliche Veränderlichkeit vollkommen widerspruchlos zu ermitteln, käme man nicht umhin, 1. das Gesamtvolumen der Meerwässer und 2. das Fassungsvermögen (welches schon allein durch die Kontinentaldrift zeitlich veränderlich ist) der Meeresbecken und 3. die zeitlichen Veränderungen des Fassungsvermögens so genau wie möglich zu bestimmen. Bspw. der „Füllungsgrad“ der Meeresbecken wäre dann ein ganz klares Kriterium für die zeitliche Entwicklung des Meeresspiegels, was im Sinne derer, die Meeresspiegelschwankungen hauptsächlich mit Schwankungen des Volumens flüssigen Wassers in Verbindung bringen, einer Veränderung des Gesamtwasservolumens in den Meeren gleichkäme. Zur Erhöhung der Glaubwürdigkeit von Aussagen über globale Meeresspiegelschwankungen müsste, kurz gesagt, das Gesamtvolumen der Meereswässer so exakt wie möglich in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt und dargestellt werden.

Der Begriff „Meeresspiegel“ kann in Abhängigkeit vom Kontext sehr verschiedene konkrete Bedeutungen haben. bspw. in der Satellitenaltimetrie werden Höhenangaben auf geometrische Referenzkörper bezogen, die in Beziehung zum Erdzentrum gesetzt sind.

Der zwischen 1870 und 2015 ermittelte Anstieg des mittleren Meeresspiegels beträgt insgesamt nach verschiedenen Angaben bis zu rund 50 cm* [19, 21].

* Gemäß der in Abb. 7 gezeigten Grafik beträgt der „globale Meeresspiegelanstieg“ allein im Zeitraum von 1993 bis 2015 schon über 70 cm(s.u.)

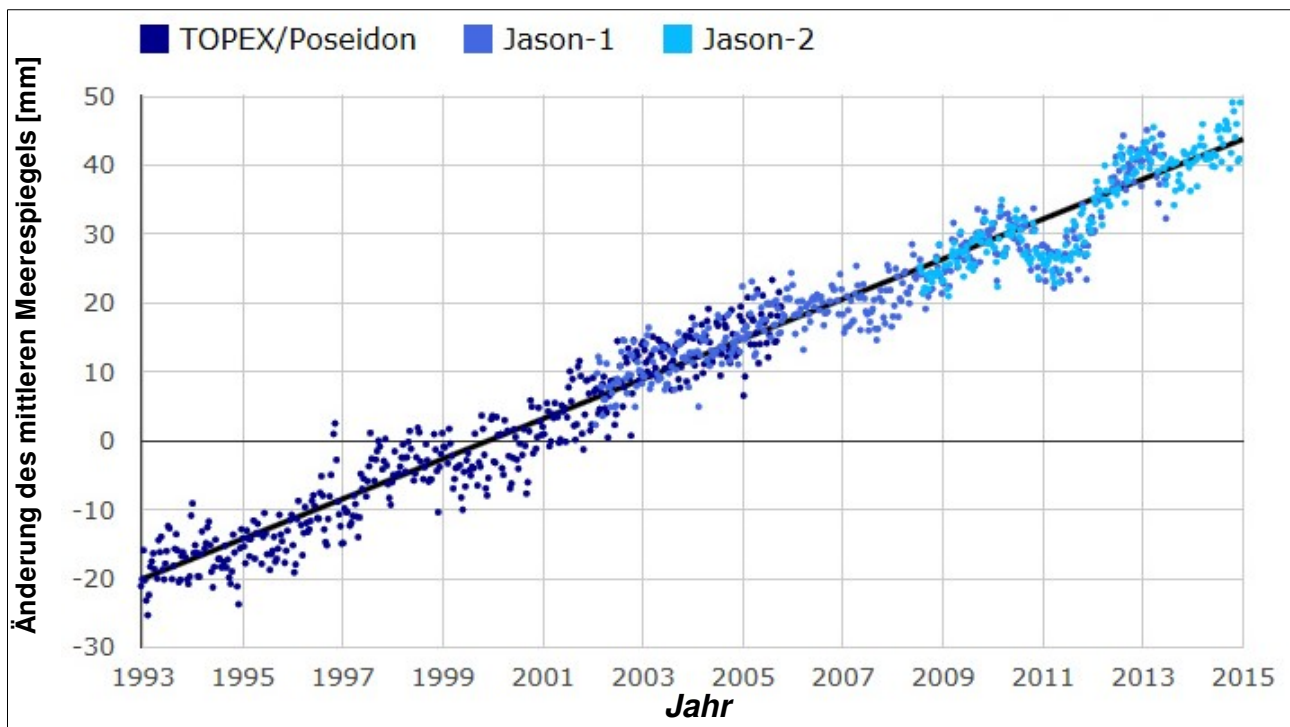


Abb. 7: Die Änderungen des globalen Meeresspiegels nach drei Datensätzen aus Projekten der Nasa/CNS - Satellitenmission [35]

Abb. 7 illustriert den Anstieg des globalen Meeresspiegels über den Zeitraum von 1993 bis 2015. Nach verschiedenen Szenarien des 4. Sachstandberichtes des IPCC [22] könnte sich der globale Meeresspiegel bis zum Ende des 21. Jh. von 0,18 bis 0,59 m anheben. Mit dem 5. Sachstandbericht (2013) [22] des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (*IPCC-vollkommen inkorrekt sehr oft ins Deutsche als „Weltklimarat“ übersetzt*) wurde diese Prognose auf 0,55 bis 1,20 m [19, 20] korrigiert.

Als Ursache für den registrierten Meeresspiegelanstieg wird das Abschmelzen von Eismassen vor allem im Gebiet der Pole als Folge des Klimawandels⁴ angesehen. In der Geologie werden dagegen, warum auch immer, bis zum Quartär (jüngstes Erdzeitalter, begann vor ca. $2,5 \cdot 10^6$ Jahren, Zeitalter der Menschwerdung und des mehrfachen Wechsels von Warm- und Kaltzeiten) Meeresspiegelschwankungen fast ausschließlich mit Prozessen tektonischer Natur in Zusammenhang gebracht. So bezeichnen einige mitunter auch sehr namhafte Geowissenschaftler das Pleistozän (Eiszeitalter) als zeitliche Etappe „der aufstrebenden tektonischen Entwicklung des Nordens von Eurasien, vor deren Hintergrund Schwankungsbewegungen geringerer Zeitdauer ablaufen, was u.a. zum Wechsel von Epochen transgressiver und regressiver Entwicklungen führt und sich besonders in meeresnahen Niederungsterritorien und angrenzenden Schelfbereichen auswirkt. Im Früh- und Mittelpleistozän hatte sich weiträumig auf den Ebenen des eurasischen Nordens ein marines Regime der Sedimentation entwickelt“ [11]. Dies bedeutet so viel wie eine großmaßstäbige Anhebung der Landoberfläche (z. B. durch die Alpidische Gebirgsbildung) und eine damit verbundene allgemeinen Absenkung des Meeresspiegels. Der vor allem für die nördliche Hemisphäre postulierte Meeresspiegelanstieg um bis mitunter 150 m nach der Eiszeit basiert auf Berechnungen des durch Abschmelzen theoretischer Inlandeismassen frei gewordenen Wassers aus einst km-mächtigen Gletschern, welche z. T. weit bis bspw. in den Süden Europas gereicht haben sollen (vgl. Kap. Résumé). Und so erweist sich, dass vor allem die seit fast 150 Jahren im abendländisch geprägten Bildungswesen und den Geowissenschaften etablierte In-

⁴ Der ständige Wandel von Klimata ist innerhalb der Erdgeschichte ein charakteristisches Phänomen.

landeisttheorie die Grundlage für Auffassungen über Meeresspiegelschwankungen und auch für damit im Zusammenhang stehenden Ängsten ist. Bei der Inlandeisttheorie handelt es sich schließlich um eine beinahe 150 Jahre alte **Theorie**. Unabhängig davon, dass es sich um eine Theorie handelt, gilt sie andererseits als unumstößliche Wahrheit bei der Mehrheit der Geographen, Geophysiker und Geologen. Es müssten jedoch ernsthafte Fragen aufkommen hinsichtlich bspw. physikalischer Eigenschaften km-mächtiger Eismassen und den damit im engen Zusammenhang stehenden ihnen *unqualifiziert* nachgesagten *sagenhaften* Fähigkeiten (Schrammen, Schleifen, Hobeln, Zermalmen, Ausräumen, Transportieren, schnelles Fließen, Bergaufließen u.v.a.). Als vollkommen unkritisch ist der allgemeine Umgang mit dieser Theorie anzusehen. Im Falle in der Natur vorgefundener ganz offensichtlich zur Theorie konträr stehender Fakten wird von vielen damit beschäftigten Geowissenschaftlern häufig versucht, diese Fakten mit aller Macht in das traditionsreiche Schema der Inlandeisttheorie zu pressen, gar gänzlich zu ignorieren *oder alles abtuend, hilflos mit den Schultern zu zucken*. Ebenso *unhaltbar* erscheinen in diesem Zusammenhang die Vorstellungen über die Isostasie, wonach sich die Erdkruste durch die Auflast km-mächtiger Gletscher in Richtung des oberen Erdmantels bewege und beim Entfallen dieser Auflast (*endlich*) wieder infolge der Entlastung aufsteigen könne. Mit dieser Auffassung im Hinterkopf muss man bspw. beim Vergleich der Abbildungen 5 und 1e vollends durcheinander kommen.

8. Koordinaten-und Höhensysteme, Messung der Meeresspiegelhöhe

Ein Koordinatensystem dient u.a. zur eindeutigen Charakterisierung von Objekten im Raum. Seine Inhalte werden demnach von Wertegruppen vertreten, die mindestens jeweils 3 Daten enthalten müssen – Höhe, Länge, Breite (z, x, y). In der Geographie ist es üblich, die Flächenkoordinaten (x, y) als Winkelmaß (in Grad oder z.B. Gon) der Oberfläche eines Sphäroids und die Höhenkoordinate als Längenmaß („z“ – z.B. in [m] oder [ft]) auszudrücken. In der Geodäsie bzw. im Vermessungswesen werden bspw. Flächenkoordinaten in Form von sog. Hoch (y)-, und Rechtswerten (x) (x und y als Längenmaß in SI-Einheit) einer winkeltreuen rechtwinkligen Zylinderprojektion eines elliptischen Körpers (Referenzellipsoide früher nach Bessel/Krassowski-heute präzierte Modelle wie WGS84 o. GRS80[2]) dargestellt.

Das „Universal Transverse Mercator System“ (UTM) [2,12] beinhaltet eine anerkannte, weit verbreitete Methode zur konformen Abbildung des Erdellipsoids in der Ebene. Es beruht darauf, dass die Erdkrümmung zwischen 80° Süd und 84° Nord aufgrund der geringen Ost-West-Ausdehnung vernachlässigt wird. Dieser Bereich wird in 60 vertikale Streifen von jeweils 6 Längengraden (maximal 800 km Breite) aufgeteilt, um diese jeweils einzeln mittels Zylinderprojektion zu verebnen und auf kartesische Koordinaten abzubilden. Um Verzerrungen zu verringern, wird an den Streifenrändern ein Maßstabsfaktor von 0,9996 angewendet. Die Länge eines Meridians wird also um 40 cm je km zu kurz dargestellt. Für die Polregionen wird eine eigene Projektion (Azimutalabbildung) verwendet. Analog zu UTM-Koordinaten sind die bisher im hoheitlichen Vermessungswesen sog. Gauß-Krüger-Koordinaten definiert. Hier bilden 120 Zonenstreifen mit jeweils 3° Breite sowie ein anderer Referenzellipsoid die Grundlage.

Die traditionelle Landvermessung beruht auf dem Verfahren der Triangulation bezüglich eines festgelegten Punktes - dem sog. Fundamentalpunkt. Da dieser zentrale Vermessungspunkt jedoch von Staat zu Staat jeweils ein anderer ist, können sich beispielsweise die Koordinaten an der Grenze zweier Länder je nach Fundamentalpunkt um mehrere hundert Meter unterscheiden [2]. Für Deutschland ist dieser Punkt der Rauenberg bei Potsdam. Fundamentalpunkt und Referenzellipsoid sind zusammen genommen das so genannte geodätische Datum, welches als Referenz auf Karten immer angegeben sein müsste. In Deutschland wird derzeit das bisher gebräuchliche Potsdam-Datum (s.o./Bessel-Ellipsoid) mit Gauß-Krüger-Koordinaten abgelöst vom geodätischen Referenzsystem ETRS89 (Ellipsoid GRS80) und dem Abbildungsprinzip nach UTM [12].

Ähnlich wie bei den Koordinatensystemen existiert eine ganze Reihe von Höhensystemen, welche auf der Mittelung vielfacher Messungen der Pegelstände des jeweiligen Meeres am je-

weiligen Ort als Null-Niveau bezogen sind. In Deutschland wird offiziell das Höhensystem des „Amsterdamer Pegels“ (NN-Normal Null) genutzt. In vielen osteuropäischen Ländern wird das staatliche Höhensystem nach dem „Kronstädter Pegel“ in der östlichen Ostsee (nach Kronstadt bei St. Petersburg) ausgerichtet. Bspw. Österreich oder die Länder des einstigen Jugoslawien richten ihre staatlichen Höhensysteme nach dem Pegel von Genua bzw. nach dem „Triester Pegel“ (an der Adria) oder Frankreich nach dem Pegel von Marseille aus.

Die traditionelle Bestimmung des Null-Niveaus des Meeresspiegels basiert auf der vielfachen Messung von Pegelständen in Küstennähe an immer den selben Orten. Z. z. werden international etwa 290* solcher Beobachtungspunkte genutzt. Sie sind unter dem internationalen Projekt GLOSS (Global Sea Level Observing System) bei der UNESCO vereint.

9. Über die Untersuchung vergangener Zustände der Erdgeschichte

Einige geowissenschaftliche Zweige beschäftigen sich mit Betrachtungen einstiger Zustände unseres Planeten. So ist bspw. Gegenstand der Paläogeographie das einstige Antlitz, der Paläoklimatologie einstige Klimata, der Paläontologie die ausgestorbene Lebewelt der Erde oder z. B. der historischen Geologie der gesamte Komplex der Geschichte, der Umstände usw. der Entstehung der Gesteine, Gesteinsschichten, Oberflächenformen usw./o.ä. Letztgenannter Zweig bedient sich zur Klärung genetischer Fragen besonders hinsichtlich der Sedimentgesteine des Instrumentariums der Faziesanalyse** [23]. Mit Hilfe dieser Methode kann mit einiger Sicherheit die Zugehörigkeit bspw. eines Sedimentgesteins dem Raum seiner Entstehung (Fazies) zugeordnet werden. In nachfolgender Abb. sind bspw. die Räume des marinen Bereichs (Fazies) dargestellt.

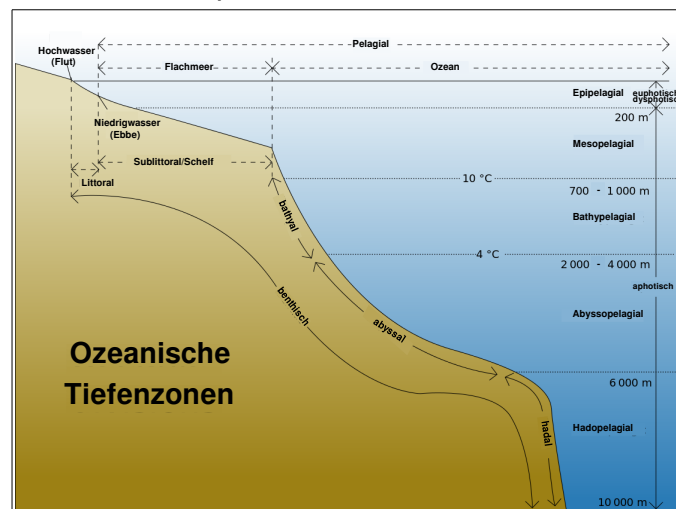


Abb. 8: Ozeanische Tiefenzonen [36]

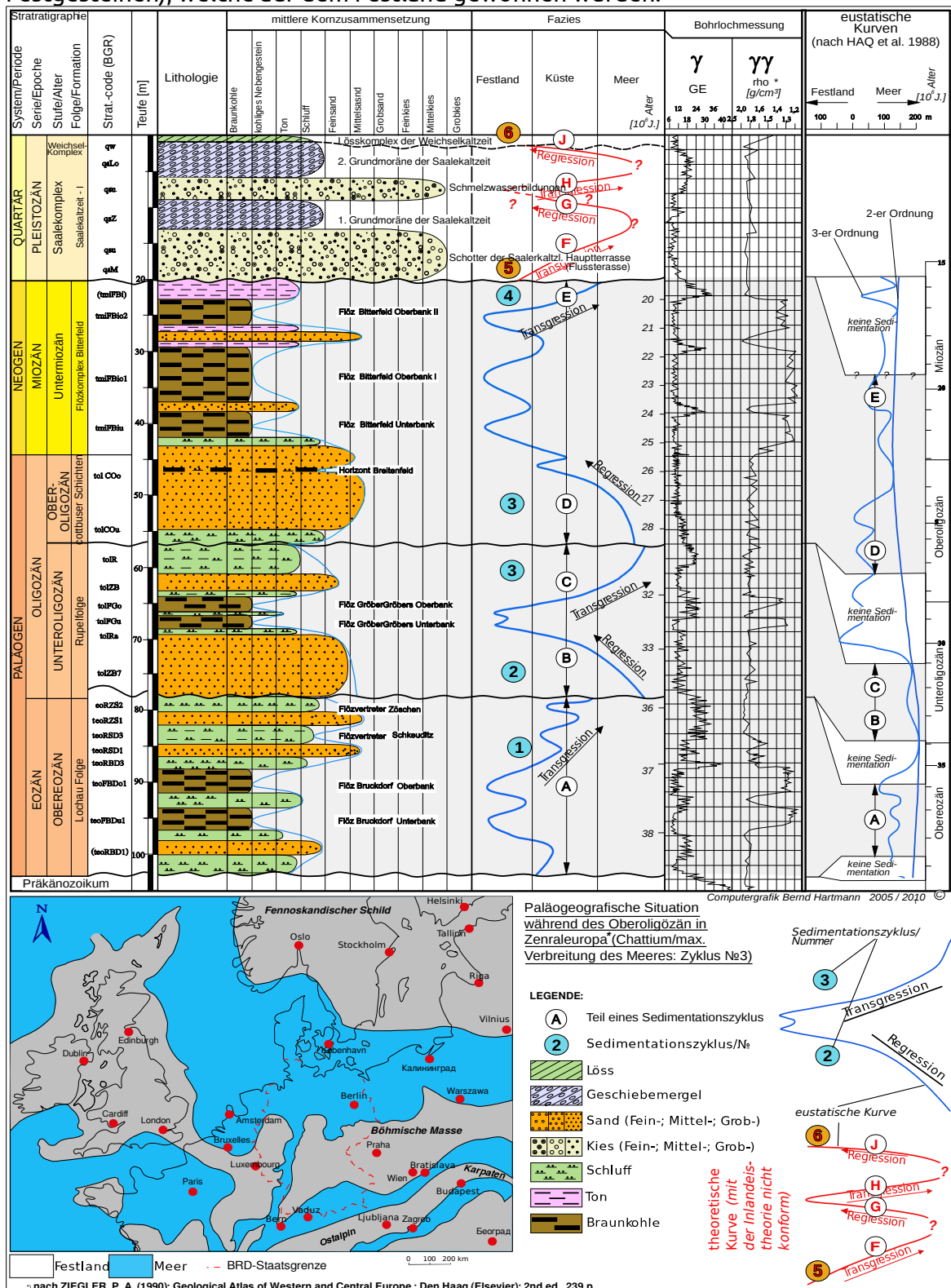
Häufig tauchen in der Fachliteratur und der populärwissenschaftlichen Literatur Darstellungen z.B. über die Paläogeographie sowie auch vergangene Klimata auf. Oft wird bei der Präsentation derartiger Darstellungen nicht darauf verwiesen, inwieweit ihr Charakter hypothetisch ist. In der Fachwelt mag dies, generell gesehen, mehr oder weniger bekannt sein. Bspw. ist die Darstellung der Verteilung von Land und Meer in paläogeographischen Karten innerhalb der rezenten Festlandsgrenzen als qualitativ durchaus glaubwürdig anzusehen. Jedoch ist es sehr schwierig, die einstige Lage der Festlandsmassen zu rekonstruieren. Die Aussagesicherheit dieser Rekonstruktionen im Vergleich zur Rekonstruktionen einstiger Verteilungssituationen von Land und Meer auf rezentem Festland ist weitaus geringer.

Das Treffen glaubwürdiger Aussagen über globale Paläoklimata ist noch problematischer

* nach anderen Angaben max. 1700

** In modernen Lehrprogrammen deutscher Hochschulen mit geowissenschaftlichen Fachbereichen/Fakultäten inzwischen fast ausgestorbener bzw. verkümmerter Zweig der Lehre

bzw. die Sicherheit solcher Aussagen ist am allergeringsten. Die große Mehrheit der Daten, die Schlussfolgerungen über Paläoklimate erlauben, stammen aus Sedimentgesteinsproben (Locker- und Festgesteinen), welche auf dem Festland gewonnen wurden.



quenzstratigraphie als besonderer Zweig der Sedimentologie. Die Arbeitsergebnisse dieses Zweiges sind jedoch bestenfalls halbquantitativer Art, auch wenn die Detailliertheit der eustatischen Kurven (s. rechte Seite der Grafik in Abb. 9) etwas anderes suggerieren mag. Die Ermittlung von Kurven verschiedener Ordnungen ist auch im Zusammenhang mit den vielen rein subjektiv zu begründenden Arbeitsschritten ein *zweifelhaftes Unterfangen*. Viele Anhänger dieser Richtung sind der Auffassung, dass einmal aufgefundene Sequenzen (Abfolge von Sedimentschichten, welche bspw. den Wechsel von Trans- und Regressionen* widerspiegeln) weltweit wiederzufinden seien. Außerdem wird von den Anhängern dieser Richtung „uraltetes“ Wissen [23] entweder aus purer Ignoranz oder Unkenntnis nicht angewendet. Deshalb kommt der Verfasser zur Auffassung, dass die genannte Denkrichtung eine „Sackgasse“ ist. Derartige Sequenzen sind oft auch das Resultat ganz lokal wirkender Vorgänge.

Um im Trend moderner Betrachtungsweisen zu bleiben, kann man auch die Abfolge von Sedimentschichten, ungeachtet dessen welche Mächtigkeit sie haben, als Klimaarchiv bezeichnen. Je geringmächtiger, je saisonbedingter ihre Ablagerung u. a. sind, um so detaillierter können Aussagen hinsichtlich der Klimate vergangener Zeiten getroffen werden (bspw. rhythmisch geschichtete Seesedimente, Meeressedimente flacher oder/und ruhiger Ablagerungsbedingungen).

10. Über die Satellitenaltimetrie [5,10,13,14,15]

Eine heute nicht mehr wegdenkbare Methode der Vermessung der Erdoberfläche ist die Satellitenaltimetrie. Es handelt sich hierbei um die Messung der Entfernung eines Satelliten von der Erdoberfläche im Zusammenhang mit der Zeitmessung zwischen den Zeitpunkten der Signal-sendung und des Empfangs des entsprechend reflektierten Radio- oder Lasersignals. Die ersten dementsprechenden Satellitenexperimente wurden von der NASA in den 1970-er Jahren (GEOS, SEASAT) durchgeführt. Ein wichtiges zur Zeit noch laufendes Projekt der Satellitenaltimetrie ist die 1992 begonnene Französisch-US-Amerikanische Mission Topex/Poseidon (CNS/NASA). Das Projekt wird mit der Positionierung in der Erdumlaufbahn der Satelliten Jason 1 (2001), Jason 2 (2008) und Jason 3 (01/2016 geplant) weitergeführt. Etwas aktuellere ähnlich gelagerte Projekte unter der Ägide der ESA sind die Missionen des Doppelsatelliten „Gravity Recovery And Climate Experiment“ (GRACE)-ein Projekt zur genaueren Bestimmung des Erdschwerefeldes sowie die Mission des „Gravity field and steady-state ocean circulation explorer“ (GOCE/1995-2013). In Abbildung 10 ist das Prinzip der Messungen der Satellitenaltimetrie dargestellt. Das technische Prinzip altimetrischer Satellitenmessungen basiert auf der Ausstrahlung von Radiowellen, Laserstrahlen und dem Empfang der entsprechend reflektierten Wellen. Aktuell führte die Spezifik der Aufgabenstellungen zur Teilung der Auswahlstrategie zwischen Messdaten geodätischer und ozeanographischer Natur.

* Vorstoß und Rückzug von Meeresküsten

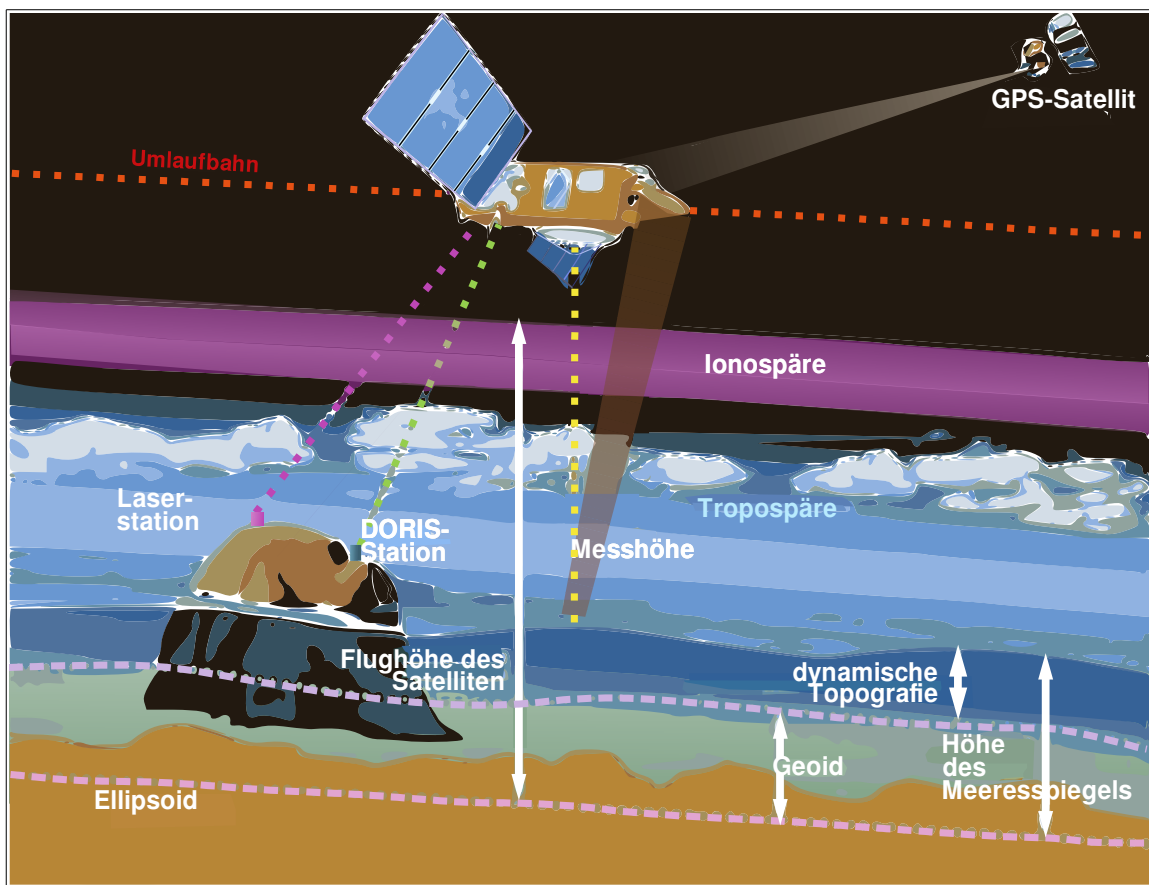


Abb. 10: Das Prinzip satellitenaltimetrischer Messungen [38]

Der aktuelle methodische und technische Stand der Satellitenaltimetrie gestattet es, ihre Resultate in Gebieten verschiedenster geodätischen Aufgabenstellungen zu verwenden. Dazu gehören hauptsächlich [14]:

- die Vervollkommenung des geozentrischen Koordinatensystems
- Bestimmung detaillierter Charakteristika des Erdschwerefeldes im Gebiet der Meere in Form digitaler Höhenmodelle des Geoids
- Abweichungen der Lotlinien (zwischen Geoid und Referenzellipsoid/s. Abb. 1b)
- Darstellung der allgemeinen Anomalien des Erdschwerefeldes
- Herstellung und Pflege eines allgemeinen Höhenmodells der Erde

(Übrigens, mit Hilfe der Satellitenaltimetrie sind bspw. U-Boote zur autonomen Navigation in der Lage.)

Altimetrische Satellitenmesssysteme sind methodisch hinsichtlich ihrer Eignung zur Untersuchung des Erdschwerefeldes auf Landflächen wesentlich beschränkt [10]. Deshalb ist für eine allumfassende Darstellung des Erdschwerefeldes eine Kombination der altimetrischen Satellitendaten mit Daten entsprechender Messungen von Land und Schiffen aus zielführend. Ebenso sind altimetrische Satellitenmessungen für geodätische Ziele über vereisten Flächen (Meereis, Eisschilde) wenig informativ. Die Satellitenaltimetrie ist ungeeignet für die Untersuchung des Erdschwerefeldes in hohen Breiten ($>80^\circ$). „Eine Analyse der Grundlagen und Erfahrungen der Nutzung der Satellitenaltimetrie zur Untersuchung des Erdschwerefeldes, der Form der Erde sowie insbesondere zu Zwecken der gravimetrischen Prospektion zeigt, dass der Hauptvorteil altimetrischer Satellitenmessungen gegenüber gravimetrischen An-Land-Messmethoden ihrem Potential nach, künftig hohe Genauigkeiten zu erreichen und der hohen Effektivität der Messung selbst liegt“ [10].

Tab.1: Übersicht über Satelliten mit altimetrischen Aufgaben [10]

Name des Satelliten	Land	Betriebszeit		Umlaufbahnparameter				
		Beginn	Ende	Flughöhe [km]	Bahnneigung [°]	Arbeitsfrequenz d. Altimeters [Hz]	Instrumentenfehler [m]	Bestimmungsfehler des Radiusvektors [m]
GEOS-3	USA	1975	1978	840	115	13,9	0,5	0,5
SEASAT	USA	1978	1978	790	108	13,9	0,1	0,3
GEOSAT	USA	1985	1989	780	108	13,5	0,07	0,2-0,3
ERS-1	EU (ESA)	1991	1999	785	98,5	13,5	0,06	0,1-0,2
TOPEX/POSEIDON	USA/Fr (CNS)	1992	-	1300	66	13,5;5,3	0,02	0,03
ERS-2	EU (ESA)	1995	2004	780	98,5	13,5	0,03	0,1-0,2
GFO	USNavy	1998	2004	780	108	13,5	0,035	0,05
JASON-1	USA/Fr (CNS)	2000	-	1300	66	13,5;5,3	0,015	keine Angaben
ENVISAT	EU (ESA)	2002	-	785	98,5	13,5;5,3	0,02	keine Angaben
JASON-2	USA/Fr (CNS)	2008	-	1300	66		0,01	keine Angaben
ГЕО-ИК-2	RF	2011	2013	1000	94		< 0,1	keine Angaben

11. Fehler und Störgrößen der Satellitenaltimetrie

Im Sinne der Bezeichnung vorliegenden Kapitels verfuhr der Verfasser nach dem bekannten Motto: "... vertraue nie einer Statistik, die du nicht selbst...usw."⁵ Für den Verfasser erwies es sich auch als sehr schwierig über das Internet (d.h. ohne die Nutzung wissenschaftlicher Bibliotheken) tiefgründige und aussagekräftige Aussagen zum Thema „Fehler satellitengestützter altimetrischer Messungen“ zu finden. Besonders hinsichtlich eines quantitativen Ausweises von Fehlern gibt es kaum befriedigende Informationen, derer man schnell und unkompliziert über entsprechende Recherchen habhaft werden kann. Vielmehr ist häufig nachzu-lesen, wie hervorragend genau (quantitativ) die Satellitenaltimetrie aktuell denn sei. Dennoch war etwas über die Größe und Art der Fehler in der Satellitenaltimetrie zu finden (wenn auch im „fremdsprachigen“ Internet). Für die geschilderte Situation bezüglich der Erlangung von Informationen bestehen m. E. mehrere folgende Gründe:

⁵ Dem Verfasser ist sehr wohl bewusst, wovon die Rede ist! War er doch fast über ein Jahrzehnt an seiner ersten Arbeitsstelle (einer Art staatsmonopolistischen DDR-Firma auf dem Gebiet der geol. Rohstofferkundung) für die Bestimmung und den Ausweis zufälliger und systematischer Laborfehler (eine in unserem Land bspw. auch im Laborwesen derzeit vollkommen abhanden gekommene Kultur des Umgangs mit ganz natürlichen Fehlern) im externen Berichtswesen verantwortlich. (Mir schießt immer noch die Röte ins Gesicht, wenn ich dabei an ein ganz bestimmtes Vorhaben nur denke!)

- 1. Die raumfahrtbetreibenden Einrichtungen selbst sind wenig daran interessiert, in der Öffentlichkeit kritische Äußerungen bzw. Informationen bezüglich ihrer eigenen Arbeit zu verbreiten wie z.B. Berichte über Fehler o.ä., wodurch „geschäftsschädigende“ Auswirkungen zu erwarten sein könnten (hier wird auch der innere Widerspruch in wissenschaftsintensiven Industrien hinsichtlich konkurrenzbegingter Informationszurückhaltung deutlich);
- 2. Man geht offensichtlich davon aus, dass nähere Erläuterungen in der Bevölkerung nicht richtig verstanden werden könnten (u.a. auch aus allgemeinem Mangel an fähigen Wissenschaftsjournalisten);
- 3. Aus Gründen einer „politisch korrekten“ Selbstzensur dieser letztendlich auch für Prognosen künftiger Zustände der Umwelt geeigneten Daten wird in den Massenmedien sowie auch in der Welt namhafter Wissenschaftsverlage leider allzu oft auf eine kritische bzw. offene Publikationsarbeit verzichtet;
- 4. Subjektive Gründe, welche mit der eigenen Unfähigkeit bzw. dem Unwissen des Verfassers in dem Sinne zusammenhängen, wo und wie man am besten gewünschter Information habhaft wird.

Das Wort „Fehler“ ist im Deutschen, rein sprachlich betrachtet, negativ belegt. Die Begriffe „Genauigkeit“ und „Fehler“ nehmen in unserem Alltagsleben so ziemlich zentrale Positionen ein. Genauigkeit ist dabei der Grad der Übereinstimmung einer vor allem quantitativen Aussage mit der Realität. Z. B. die Größe eines Messfehlers ist ein Kriterium für die Genauigkeit einer Messung. Der mit dem Terminus „Fehler“ eng zusammenhängende Begriff „Aussagesicherheit“ gewinnt dabei immer mehr an Bedeutung.

Spricht man von Fehlern, so wird gemäß des allgemeinen Sprachgebrauchs davon ausgegangen, dass etwas falsch gelaufen sei, eine Erwartung nicht erfüllt wurde, ein Prozess nicht normgerecht verlief usw. Fehler sind besonders im naturwissenschaftlichen Sinn eine ganz normale Sache. Jegliche Messung ist mit Fehlern behaftet. So sind wir im Alltagsleben ständig mit fehlerbehafteten quantitativen Aussagen konfrontiert: Zeitangaben sind immer ungenau, ob Sie vom mechanischen Wecker oder von der Funkuhr (welche die Zeit unglaublich genau angibt) abgelesen wurden; auch z.B. beim Kuchenbacken benutzen wir bedenkenlos Urgroßmutter's Küchenwaage (welche ein Gewicht für unsere Zwecke hinreichend genau anzeigt); auf einer Packung von Lebensmitteln lesen wir ein Gewicht mit der Angabe von Gewichtstoleranzen (eigentlich die vorbildliche Angabe des absoluten Fehlers der Wägung, was uns wirklich niemals aufregt, weil evtl. Gewichtsabweichungen für uns einfach nur indiskutabel sind) usw...Also wäre es in keiner Weise eine Schande, bei Angaben von Ergebnissen bspw. altimetrischer Messungen auch ein Fehlerintervall bzw. etwas Dementsprechendes anzugeben. Deshalb wäre zumindest innerhalb der Naturwissenschaften in der Öffentlichkeit eine Versachlichung des Begriffs „Fehler“ nur recht und billig.

Im Vorfeld bzw. schon bei der Planung einer Messung bestimmter Größen, muss man sich über das Wesen der Messgröße weitgehend im Klaren sein: D.h., man sollte den Möglichkeiten entsprechend genau wissen, was und wozu man etwas misst; mit welcher Apparatur soll gemessen werden; in welcher Umgebung; unter welchen Bedingungen; welche Störfaktoren existieren zum Zeitpunkt der Messung etc. Ein unabdingbarer Bestandteil des Messwesens ist die Fehlerrechnung. Sie ist ein Zweig der mathematischen Statistik und nutzt bspw. das Instrumentarium der Differentialrechnung. Die Fehlerrechnung ist enorm wichtig in Wissenschaft, Technik und auch in der Volkswirtschaft. Bspw. ein modernes Qualitätsmanagement in produzierenden Industriebetrieben ist ohne Fehlerrechnung praktisch undenkbar.

In der Hierarchie der Klassifizierung von Fehlern nehmen die Begriffe „**absoluter**“ und „**relativer Fehler**“ eine obere Position ein. Ein absoluter Fehler wird als diskrete Zahl mit dem Vorzeichen $\pm$ angegeben, wogegen Fehler als Zahl zwischen 0 und 1 oder auch in % ausgedrückt, als relativer Fehler bezeichnet werden. Diese Fehler charakterisieren die mögliche Abweichung einer gemessenen Größe nach oben oder unten bzw. sind ein Maß für die Genauigkeit einer Messung. Für viele Zwecke ist die Fehlerangabe als „nackte“ Zahl vollkommen ausreichend. Zur näheren Charakterisierung des inneren Wesens eines Fehlers ist eine derartige Zahlenangabe jedoch

vollkommen unzulänglich. Fehlerangaben haben in der Maßeinheit der Messgröße zu erfolgen.

In Abhängigkeit von den **Charakteristika** einer Messgröße werden zur Bestimmung des Messfehlers verschiedene Methoden angewendet:

- Die Methode nach KORNFIELD besteht in der Auswahl eines Vertrauensintervalls innerhalb der Grenzen des minimalen bis zum maximalen Messwert, wobei die Differenz der Extremmesswerte durch zwei geteilt als Vertrauensintervall gilt:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$$

- Der mittlere quadratische Fehler (Standardabweichung): $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$
- Der mittlere quadratische Fehler des Mittelwertes: $S_x = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}}$

Nach dem **Charakter** ihrer Entstehung werden **zufällige** und **systematische Fehler** unterschieden. Ein ganz simples Beispiel für einen zufälligen Fehler ist, wenn bspw. sich jemand beim Apfelzählen in verschiedenen Körben einfach nur verzählt. Ein systematischer Fehler liegt jedoch vor, wenn jemand beim Apfelzählen in verschiedenen Körben grundsätzlich bspw. die Zahl 4 überspringt. U.a. mit Hilfe entsprechender Kontrolluntersuchungen unter Anwendung relativ einfacher mathematisch-statistischer Berechnungsverfahren kann man zufällige und systematische Fehler eindeutig voneinander unterscheiden und auch quantitativ ausweisen. Zu bemerken ist, dass eine Unterscheidung zwischen zufälligen und systematischen Fehlern nicht immer eindeutig ist. So ist es unter bestimmten Bedingungen vollkommen unklar, ob bspw. ein Rundungsfehler systematischer oder zufälliger Natur ist. Eine weitere Fehlerart vorliegender Rubrik ist der so genannte **progredierende Fehler** — ein unvorhersagbarer Fehler, welcher sich in der Zeit langsam ändert. Es handelt sich hier um einen nichtstationären zufällig verlaufenden Prozess. Ein **grober Fehler** liegt in dem Fall vor, hat bspw. ein Experimentator infolge einer individuellen Unachtsamkeit bei der Planung und Durchführung einer Messung gewisse Zusammenhänge nicht beachtet oder liegt z. B. ein Gerätedefekt vor.

Gemäß den **Ursachen** ihrer Entstehung lassen sich folgende Fehler unterscheiden:

- **Instrumentelle/Gerätefehler** — Fehler, welche über den Fehler der angewendeten Messmittel bestimmt werden und mit der technischen Unvollkommenheit der Messapparatur gemäß des jeweils aktuellen Standes der Technik zusammen hängen;
- **Methodische Fehler** — Fehler, welche mit der Unvollkommenheit der angewendeten Methodik zusammenhängen (bspw. mit bewusst zugelassenen Vereinfachungen u.a.);
- **Subjektive Fehler** — Fehler, welche mit individuellen Eigenschaften des Bearbeiters usw. zusammenhängen.

Mit den hier aufgeführten Aussagen ist die Thematik der „Betrachtungen über Fehler“ bei Weitem nicht ausgeschöpft!

Mit Hilfe nachfolgender Übersicht, deren Inhalte hauptsächlich aus PR-Material der NASA und der Universität Texas entstammen, sollen allgemeine Vorstellungen über Fehler bzw. Fehlerquellen altimetrischer Satellitenmessungen vermittelt werden.

Tab.2: Übersicht über Fehlerarten, Fehlerquellen und Störfaktoren bei altimetrischen Satellitenmessungen [17,18]

Fehlerart	Nähere Bezeichnung/Störfaktor/Störquelle	Beschreibung	Bemerkung*
Instrumentenfehler	Datensensorfehler	besteht im Zusammenhang mit der Kalibrierung an Einzelwerten durch reflektierte Wellen und dem Bordsystemalgorithmus zur Flughöhenkorrektur des Satelliten.	zufällig/systematisch?
Instrumentenfehler	Empfänger-Höhencontroller-Kalibrierungsfehler	hängt von der Größe der überflogenen Fläche und Amplitude des Empfangssignals ab, ein autom. Höhencontroller wird für die Dämpfung des Signals genutzt. Spontane Änderungen der Signalstärke lenken die Laufbahn ab, wobei ein Kalibrierungsfehler entsteht.	zufällig/systematisch?
	Fehler der Positionsbestimmung des Flugkörpers	Steht im Zusammenhang mit verzerrtem reflektierten Radarecho, tritt beim Überflug in Horizontnähe auf.	zufällig/systematisch?
	Antennen-Höhenkorrekturfehler	wie zuvor	zufällig/systematisch?
	Unbestimmtheit des gemittelten Impulses und der Zeiterfassungsfehler	Fehler wegen Unbestimmtheit reflektierten Impulses in Verbindung mit dem zufälligen Charakter seiner Variabilität. Impulse finden Eingang in die Ermittlung der Mittelung des Echos. Die Residuen werden bei der Mittelung berücksichtigt und haben deshalb als Rauschen Messeinfluss. Zeitmessfehler können Einfluss auf die Höhenbestimmung haben.	zufällig/systematisch?
Fehler im Zusammenhang mit den Medien in denen sich Signale ausbreiten	Erdatmosphäre	Schätzfehler d. Bordsystemalgorithmus z. Meeresspiegelmessg. i. Zusammenhang m. d. Fluggeschwindigkeit und der Änderung der Berechnung d. Altimetersignale innerhalb d. Erdatmosphäre.	zufällig/systematisch?

* Der Verfasser gedachte ursprünglich, an dieser Stelle konkrete Fehlergrößen anzugeben. Angaben darüber konnte er jedoch nicht habhaft werden. Allgemeine („offizielle“) Angaben über Fehlergrößen sind aus der nachfolgenden Tabelle (Tab. 3) zu entnehmen.

Fortsetzung 1 Tab. 2

Fehlerart	Nähere Bezeichnung/Störfaktor/Störquelle	Beschreibung	Bemerkung
Fehler im Zusammenhang mit den Medien in denen sich Signale ausbreiten	Elektromagn. Störungen/Fehler im Zusammenhang m. d. Schiefe d. Häufigkeitsverteilung v. Messgrößen	Diskrepanz zwischen Meeresspiegelmessung und Schätzfehler des Bordsystemalgorithmus: Verzerrung reflektierter Wellen und der Einfluss der Schiefe in der Häufigkeitsverteilung von Messgrößen.	zufällig/systematisch?
	Elektromagnetische Störfaktoren	Grund: Höhendiff. zwischen mittl. Meeresspiegel und einer gemessenen Fläche mit Streufehlern und Fehlern durch unterschiedliche Messwertqualitäten in Wellentälern und -bergen. Größere Bedeutung haben kleinere Wellen, Einfluss besonders groß auf Wellenbergen, dadurch höhere Rauheit der Messoberfläche, dadurch Streuung des Empfangssignals des Altimeters. Energie des gestreuten Empfangssignals des Altimers aus Wellentälern ist größer als jene aus Wellenbergen. Bekannte Korrelation zwischen Wellenhöhe und Höhe des Meeresspiegels ermöglicht eine Korrektur der Finaldaten.	zufällig/systematisch?
Fehler im Zusammenhang mit der Geoidmodellierung	Fehler im Zusammenhang mit der Geoidmodellierung	Höhe des Geoids weicht vom Referenzellipsoid um – 100 m bis +64 m (oder 80 m?) ab. Von Satellitenmessungen abgeleitete Angaben zum Gravitationsfeld beinhalten Elemente von sog. Kugelflächenfunktionen niederen Grades und Ordnung. Diskrepanzen innerhalb der Kugelfunktionskoeffizienten und Kürzung der Kugelfunktionsentwicklung führen zu Fehlern in den Modellen, beruhen auf fehlerhaften globalen Informationen.	zufällig/systematisch?

Fortsetzung 2 Tab. 2

Fehlerart	Nähere Bezeichnung/Störfaktor/Störquelle	Beschreibung	Bemerkung*
Fehler im Zusammenhang mit der zeitlichen Veränderlichkeit der Oberfläche der Ozeane	Fehler im Zusammenhang mit der zeitlichen Veränderlichkeit der Oberfläche der Ozeane	Schwereeeinfluss des Mondes und der Sonne auf die Erde kontrolliert die Meeres- und Erdgezeiten. Der Komplex Meeresbodenoberfläche, Effekte der Erdrotation birgt in sich viele Quellen unsicherster Vorhersagen im Zusammenhang mit täglichen Gezeitenereignissen (z. B. allein die Parametrisierung der Reibung bei der Modellierung solcher Vorgänge). In anspruchsvollen Modellen muss die zeitlich abhängige Bewegung des Erdkörpers als abhängige Größe der Deformationsrate des Erdkörpers und die Portion des Einflusses der Gezeitenbewegung der Wassermassen auf den Erdkörper weitgehend berücksichtigt sein. Zu weiteren Korrekturen führt der Sachverhalt des indirekten Zusammenhangs des atmosphärischen Luftdrucks mit der Höhe des Meeresspiegels. Als Absolutwert lässt sich das Verhältnis mit 10 mm/mbar ausweisen.	zufällig/systematisch?
Fehler in der Positionsbestimmung des Flugkörpers/ der Umlaufbahn des Flugkörpers		Folgende Einflüsse auf die Satellitenumlaufbahn werden nach ihrer Relevanz aufgeführt: • Gravitation • Strahlungsdruck • Luftdruck • Qualität des Geoidmodells • Erd- und Meeresgezeiten	zufällig/systematisch?
	Gravitation	Weil die Erde kein perfekter geometrischer Körper ist, wird eine Asymmetrie des Erdschwerefeldes verursacht. Dieser Sachverhalt erfordert ein dementsprechend hohes Niveau der Geoidmodellierung (s. Kugelflächenfunktionen).	zufällig/systematisch?
	Strahlungsdruck/vom Flugkörper ausgehende Strahlung	Solarstrahlung, Albedo und Infrarotstrahlung, Hauptarten der Emissionen, wirken sich auf Flugkörper intern und extern aus.	zufällig/systematisch?

* Der Verfasser gedachte ursprünglich, an dieser Stelle konkrete Fehlergrößen anzugeben. Angaben darüber konnte er jedoch nicht habhaft werden. Allgemeine („offizielle“) Angaben über Fehlergrößen sind aus der nachfolgenden Tabelle (Tab. 3) zu entnehmen.

Fortsetzung 3 Tab. 2

Fehlerart	Nähere Bezeichnung/Störfaktor/Störquelle	Beschreibung	Bemerkung
Fehler in der Positionsbestimmung des Flugkörpers/ der Umlaufbahn des Flugkörpers	Atmosphärischer Widerstand	Der Atmosphäreneinfluss, abhängig von der Höhe der Satellitenumlaufbahn, wird mit Hilfe des Verhältnisses zwischen Luftdichte, der Form und Ausrichtung des Satelliten ermittelt.	
	Geoidmodell	Aktuelle Geoidmodelle sind hinsichtlich ihrer Freiheitsgrade hinsichtlich der Bestimmtheit der Kugelflächenfunktion relativ niederen Grades und Ordnung. Die ermittelten Parameter sind deshalb weit entfernt von denen der realen Satellitenumlaufbahn.	zufällig/systematisch?
	Erd- und Meeresgezeiten	Der Gezeiten effekt beeinflusst das Gravitationspotential. Sein Einfluss wird unter Anwendung von Kugelflächenfunktionen* ermittelt. Bedeutend dabei ist, dass nicht die größten Gezeitenamplituden maßgebend für Anomalien der Satellitenumlaufbahn sind. Welche Rolle dieser Faktor auch immer hinsichtlich der Gezeitenhäufigkeit und der Altimeteraufzeichnungen spielen mag, ist eine Datenaufzeichnung von höchster Zuverlässigkeit erforderlich. Deshalb sind folgende Modellierungsstrategien wichtig: 1. die Situation des Datenbestandes über Langzeitmessdaten zu verbessern, welche mittels erdnaheer Satelliten aufzuzeichnen sind, deshalb deutlicher einen größeren und längerfristigen Einfluss auf die Umlaufbahn kennzeichnen können; 2. so viel wie möglich reale Gezeitenkoeffizienten zu ermitteln, welche möglichst viele Gezeitenereignisse umfassen, um sie als kurzzeitige Störereignisse als neue Kategorie in Modelle einbeziehen zu können.	zufällig/systematisch?

* Der Verfasser hat keineswegs vor, den Leser mit hochkomplizierten Sachverhalten der höheren Mathematik zu belasten. Er möchte damit lediglich auf die Kompliziertheit der gesamten Materie hinweisen.

Fortsetzung 4 Tab. 2

Fehlerart	Nähere Bezeichnung/Störfaktor/Störquelle	Beschreibung	Bemerkung
Fehler in der Positionsbestimmung des Flugkörpers/ der Umlaufbahn des Flugkörpers	Troposphäre	Durch den Gehalt an Wasserdampf+andere Gase bedingte Signalausfälle, müssen bei Signalstörungen berücksichtigt werden. Bei Satellitenmessungen verwendete Lasertechnik arbeitet im Spektralbereich des sichtbaren Lichts, weshalb hier nicht die Anfälligkeit wie im Fall von Radiowellen besteht.	zufällig/systematisch?
	Positionsbestimmung	Die sichere Lagebestimmung eines Satelliten, bezüglich seines Aufenthaltsortes zum Erdzentrum ist das Hauptproblem der Satellitennavigation. Die Anwendung von Lasertechnik in der Satellitenaltimetrie erlaubt außergewöhnlich präzise Messungen. Die einzige Ausnahme besteht im Fall extremer Wetterbedingungen, was zum Ausfall der Datengewinnung und auch zur Unbrauchbarkeit gewonnener Daten führen kann. Die ungleichm. Verteilung der Satelliten ist eine Fehlerquelle. Meist befinden sie sich im Bereich der nördlichen Hemisphäre und auch oberhalb des Festlands, anstelle gleichmäßig über den Globus verteilt zu sein. Mit der Installierung des Systems DORIS als Aufzeichnungssystem gehört dieses Problem somit der Vergangenheit an. Ein weniger wichtiger Grund für „Diskrepanzen“ besteht in der Qualität des bisher genutzten Koordinatensystems zur Positionsbestimmung von Satelliten. Das genutzte Koordinatensystem ist nicht präzise genug definiert. Ein Grund dafür ist die darin nicht genügend berücksichtigte Poldrift und die Veränderlichkeit der Tageslänge.	zufällig/systematisch? zufällig/systematisch?

Jedoch echter quantitativer Aussagen über altimetrische Messfehler konnte der Verfasser nicht habhaft werden. Um dem Wunsch in irgend einer Form entgegenzukommen, wurde eine dafür optimal erscheinende Unterlage der ESA [1] für die Zusammenstellung von Tab. 2 genutzt. Außerdem kann man der Tabelle entnehmen, dass der Hauptanteil des allgemeinen altimetrischen Messfehlers auf Fehlern im Zusammenhang mit solchen der Bestimmung der Flugparameter (Position und Umlaufbahn) der Satelliten beruht.

Tab.3: Gesamtübersicht über Messfehler der Satellitenaltimetrie aus Sicht der ESA^[1]

Messge- genstand	Einfluss- faktor/ Fehlerquelle	Zeitskala	Fehlergröße	Gesamtfehler		
				Zeit- skala	Fehler	Nutzer- anforde- rungen
Globaler Meeres- spiegel (u. Regio- naler Meeres- spiegel)	Umlaufbahn- bestimmung	langfristig	< 0,1mm/a(2)	langfri- stig	< 0,5mm (< 3mm)	0,3mm/a (1mm/a)
		mehrere Jahre	0,1mm/a(-)			
		Kurzzeitig (1 Jahr)	< 0,5mm/a(5)			
	feuchte Troposphäre	langfristig	≤ 0,3mm/a(2)	meh- rere Jahre	< 2 mm (n.b.)	0,5mm/a (N.D.)
		mehrere Jahre	≤ 2 mm/a(-)			
		kurzzeitig (60d)	≤ 3 mm/a(-)			
	„Altimeterpa- rameterfehler“	langfristig	< 0,1mm/a(1)	kurz- zeitig (1 Jahr)	< 1/5 mm (< 1/5mm)	NICHT DEFINIERT
		mehrere Jahre	≤ 2 mm/a(-)			
		kurzzeitig (60d)	< 4 mm/a(10)			

Auffällig an Tab. 3 ist, mit welcher schier *märchenhaften* Genauigkeit satellitenaltimetrische Daten zur Bestimmung des Meeresspiegelniveaus angegeben werden. Da der Verfasser keinesfalls in der Lage ist, die Qualität der in Tab. 3 getroffenen Aussagen selbst kompetent beurteilen zu können, werden nachfolgend dazu einige Bemerkungen aus „berufenem Munde“ aufgeführt:

„...in diesem Zusammenhang gebührt der Frage nach realen Möglichkeiten der Satellitenaltimetrie hinsichtlich der Verbesserung der Genauigkeit und Auflösung besonders unter Berücksichtigung der Korrelation satellitenaltimetrisch gewonnener Daten untereinander besondere Aufmerksamkeit. Zusätzlich wurde hinsichtlich der Genauigkeit ein reges Interesse gegenüber satellitenaltimetrisch gewonnener Aussagen innerhalb der letzten vergangenen Jahre im Zusammenhang mit der Entwicklung globaler Modelle des Erdschwerefeldes im Resultat der Satellitenmissionen CHAMP und GRACE geweckt“ [16].

„Gemäß theoretischen Bewertungen spektraler Signaldichten und des Rauschens befindet sich die Auflösung von wellenlängenabhängigen Systemen der Satellitenaltimetrie auf dem Niveau von 30 km. Die Genauigkeit (d.h. der mittlere quadratische Fehler) der Bestimmung von Schwereanomalien liegt derzeit bei 8 mGal. Entsprechend dieser Angabe liegt somit die Genauigkeit um das 8 bis 10-fache niedriger als bei modernen Methoden der gravimetrischen Prospektion.“ [10]

„In den letzten Jahren wurde eine große Anzahl von Geopotentialmodellen auf der Grundlage des ESA-Projekts GOCE vorgestellt. In entsprechenden Artikeln wurde von führenden Managern des Projektes vermeldet, dass die ESA-Modelle des Erdschwerefeldes die vergleichsweise genauere-

ten sind und hier 1-2*cm beträgt“ [19].

„Der Höhenbestimmungsfehler des Satelliten GEOS-3 (1975) betrug ± 20 cm, bei SEASAT (1978) betrug er nur einige Zentimeter. Jedoch ist der Fehler der Bestimmung der Geoidhöhen bedeutend größer. In erster Linie hängt der reale Höhenbestimmungsfehler von der Berechnung der Lagekoordinaten des Satelliten und jener des auf dem Ellipsoiden unterhalb des Satelliten befindlichen Punktes ab, was heißt: Abhängigkeit von der Genauigkeit des geodätisch-gravimetrischen Erdmodells und der Genauigkeit der Bestimmung der Umlaufparameter des Satelliten.“ [10]

„...der Gesamtfehler der Höhenbestimmung liegt nicht unter 5 cm. Jedoch gewährleiste moderne auf Radiowellen und Lasertechnik basierte Höhenmessapparaturen in Satelliten (TOPEX/Poseidon, Jason, ERS-1, ERS-2, LITE, SLA, GLAS u.a.) bestenfalls eine Genauigkeit von 10 bis 12 cm. Probleme bei der Genauigkeitserhöhung der Bestimmung der Flughöhe von Satelliten liegen am Fehlen einer strengen Definierung der Messgröße selbst, einer unzulänglichen Anwendung entsprechenden aktuellen apriorischen Wissens sowie an Unzulänglichkeiten in der konsequenten Einführung optimaler Algorithmen des Erhalts von Soforteinschätzungen der Flughöhe und der Datenglättung. Zur Lösung genannter Probleme wird im Rahmen der Projektierung und der Schaffung von Satellitenaltimetern der neuen Generation 1. vorgeschlagen, zur Flughöhenbestimmung eine mathematisch-statistische Herangehensweise zu wählen; 2. ein kohärentes „gechirptes“ Sondiersignal (energiereiche kurze Laserpulse zeitlich veränderlicher Frequenz – Anm. d. Verf.) anzuwenden und 3. unter Anwendung des Kalman-Filters eine Glättung der Ausgabedaten zu vollziehen. Somit würde eine Altimetriegegenauigkeit von 3 bis 5 cm erreicht werden können.“ [3]

„Im Rahmen neuer ausländischer Projekte auf dem Gebiet der Satellitenaltimetrie wurden die Genauigkeit und Detailliertheit der Bestimmung des Erdschwerefeldes erhöht. Im Resultat wurde für große Bereiche der Ozeane eine Genauigkeit der Bestimmung der Abweichungen der Lotlinien (vgl. Abb.1b) von 0,5“ bis 1,0“ (Bogensekunden (mittlerer quadratischer Fehler)) erreicht, womit eine der Hauptaufgabenstellungen des US-Verteidigungsministeriums hinsichtlich der Schaffung eines digitalen globalen Modells der Lotlinienabweichungen mit einem mittleren quadratischen Fehler von 0,5“ für militärische Navigationszwecke erfüllt wurde.“ [10]

Aus den Zitaten entnommene Fehlergrößenordnungen widersprechen in der Regel deutlich den Angaben aus Tab. 3. Es erscheint in diesem Zusammenhang* bzw. unter diesen Aspekten als sehr wohl möglich und wahrscheinlich, dass die verantwortlichen Bearbeiter, z. B. um die Öffentlichkeit nicht zu verwirren, es bewusst vermieden, zwischen „Aussagesicherheit“ und „Fehler“ (Messfehler) deutlich zu unterscheiden.

12. Résumé

Die Satellitenaltimetrie als ein inzwischen sehr wichtiges Instrument des Monitorings des globalen ökologischen Zustandes unseres Planeten birgt in sich einen enormen Erfahrungsschatz, welcher innerhalb der letzten 40 Jahre angehäuft wurde. So blieb es nicht aus, dass die Sicherheit und die Möglichkeiten zu treffender Aussagen sich über die Raumfahrttechnik in ungeahntem Maß immens weiterentwickelt haben.

Im Laufe der Rechercharbeiten im Internet erwies es sich als sehr angenehm, dass die westlichen Raumfahrtorganisationen NASA und ESA im krassen Gegensatz zu russischen Einrichtungen entsprechender Art sehr viele Daten der Öffentlichkeit zugänglich machen. Ebenfalls zeigte sich, dass das englisch- und russischsprachige Internet relativ reichhaltig an wissenschaftlicher Literatur zum gegebenen Thema sind. Wieder einmal glänzte das deutschsprachige Internet durch wenig Inhalte. Vor bspw. 10 Jahren, wäre es nicht möglich gewesen, ausschließlich mit

* Frage: Was beträgt 1-2 cm?

* Dieser Zusammenhang umfasst auch sicherheitspolitische, militärische Gesichtspunkte!

Hilfe des Internets einen Artikel zum Thema auf mehr oder weniger befriedigende Art und Weise zu gestalten.

Der Verfasser hat im Zuge der Bearbeitung vorliegenden Artikels auf intensive Weise erfahren, dass es sich im Fall der Thematik „Meeresspiegel, seine Schwankungen und Messungen“ um eine hochkomplexe Materie handelt, die s. E. erst recht von Laien nicht vollständig überschaubar sein kann. Im Verlauf der Erarbeitung vorliegenden Textes durchlief der Verfasser einen gewissen Lernprozess. So wurde ihm auch klar, dass häufig vermittelte Informationen, welche bspw. bezüglich Ergebnissen der Erdbeobachtung aus dem All mit schier unglaublicher Genauigkeit erfolgen und somit noch weitere Möglichkeiten (z. B. Erkennung von Gesichtern*, Autnummern sogar Briefmarken u. a.) suggerieren, ganz offensichtlich dem Reich der Mythen und Verklärung entstammen. Der Verfasser wünscht sich, dass der Leser bemerken konnte, wie widersprüchlich der Umgang bspw. in den Medien mit aus kosmischen Beobachtungen gewonnenen Umweltdaten hinsichtlich ihrer Genauigkeit, die Art und Weise der Information und ihrer Vermittlung in Wirklichkeit ist. Es ist davon auszugehen, dass aus welchen Gründen auch immer, der Öffentlichkeit so Einiges vorenthalten, bewusst verschleiert wird. Für den Verfasser erwies es sich auch im genannten Zusammenhang als vollkommene Illusion, bei ihm aufgekommene Zweifel an der Genauigkeit von Angaben satellitenaltimetrisch basierter Meeresspiegelmessungen, auf zufriedenstellende Art und Weise weder definitiv ausgeräumt noch bestätigt zu finden. Ungeachtet dessen, kann sich der Verfasser jedoch des Gefühls immer noch nicht erwehren, dass mit den von Einrichtungen wie der NASA oder ESA stammenden Angaben äusserst hoher Genauigkeiten u.a. auch in Verbindung mit Meeresspiegelmessungen „irgend etwas nicht stimme“.

Angesichts der im vorstehenden Text aufgeführten Fakten erscheint es sehr fragwürdig, von einem „globalen Meeresspiegel“ zu sprechen geschweige denn, seine Variabilität mit höchster aktuell bekannter Genauigkeit auszuweisen.

Der Verfasser wäre dem Leser für jede Kritik und entsprechend konstruktive Hinweise äußerst dankbar.

13. Literaturverzeichnis/Quellen

- [1] ABLAIN, M.&ZAWADZKI, L. (2013, 2014): Error Characterization Report: Altimetry Measurements Errors at Climate Scales; ESA Sea Level CCI, 27/25 p. (SLCCI-Error Report)
- [2] BERGER, I. (2009): Geodätische Koordinatensysteme; Fachhochschule RheinMain Wiesbaden (Labor für verteilte Medien), (PDF-Datei 20 S.)
- [3] BONDUR, W.G.; JEGOROV, W.W.; BASKAKOV, A.I. (2006): Die Satellitenaltimetrie: Probleme und Perspektiven/4-te Offene Allrussische Konferenz zum Thema „Aktuelle Probleme der Erdfernerkundung“, Moskau (Russisches Akademieinstitut für Kosmosforschung der RAdW, 13.-17. Nov. 2006, (Sammelband d. Thesen der Konferenz) (russ.)
Бондур В.Г.; Егоров В.В.; Баскаков А.И (2006): Спутниковая альтиметрия: проблемы и перспективы/Четвёртая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г. (Сборник тезисов конференции)
- [4] CHARTSCHENKO, B.A. (2014): Die Analyse der Schwereanomalien aus gravimetrische Anlandmessungen und aktueller Modelle des globalen Erdschwerefeldes; Sibirische Filiale der Staatlichen Geodätischen Akademie, Novosibirsk, Zeitschr. Interexpo Geo-Sibir; Nr.1/Bd1/2014; UDK528.34:629.783 7 S., (russ.)
Харченко, Б. А. (2014): Анализ значений аномалий силы тяжести с использованием данных, полученных из наземных измерений, и современных моделей глобального грави-

*Ganz sicher kann niemand von sich behaupten, dass er jemals Satellitenbilder mit z.B. erkennbaren Gesichtern zu sehen bekam.

- тационного поля земли; Сибирская Государственная Геодезическая Академия, г. Новосибирск; Интерэкспо Гео-Сибирь; № 1/ том 1/2014; 7с., УДК: 528.34:629.783 (Analysis of the significance of Gravity Anomalies using data obtained from Ground Measurements and Contemporary Global Models Earth's Gravitational Field)
- [5] CIPOLLINI, P. & SNAITH, H. (2013): - A short Course on Altimetry - Data Processing (from Satellite Height to Sea Surface Height) (DORIS-3-rd ESA Training on Ocean Remote Sensing, Sept. 2013, Cork, Ireland) (PDF-Datei 27 S.)
- [6] FECHER, T. (2008): Methodische Grundlagen von kombinierten Schwerfeldmodellen, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie - Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie d. TU München
- [7] FLECHTNER, F.; SCHMIDT, R.; ROTHACHER, M.; WICKERT, J.; LÜHR, H. (2005): CHAMP und GRACE – erfolgreiche Schwerfeld- und Klimamissionen; Zweijahresbericht (PDF-Datei/10 S.) GFZ Potsdam
- [8] GRUSCHINSKI, N. P. (1989): Ist die Erde rund?; Verl. „Znanije“, 64 S., Moskau (russ.)
Н. П. Грушинский, Круглая ли земля?; Издательство «Знание» 64 с., Москва 1989
- [9] JEGOROW, W. W. (2011): Kosmische Radioaltimetrie, ihr derzeitiger Zustand, aktuelle Probleme und Wege ihrer Lösung (Institut für Kosmosforschung der RAdW, 10 S., UDK 53.082, Moskau) (russ.)
Егоров, В. В. (2011): Космическая радиовысотометрия. современное состояние, актуальные проблемы и пути их решения (Институт космических исследований РАН) (УДК 53.082), 10 с.
- [10] KANUSCHIN, W. F. & GANAGINA, I. G. (2012): Aktuelle Probleme der physischen Geodäsie, Lehrmaterial d. „Staatlichen Sibirischen Geodätischen Akademie“, Novosibirsk SSGA, UDK: 551.2, 22 S.
В. Ф. Канушин И.; Г. Ганагина Современные проблемы физической геодезии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Сибирская Государственная Геодезическая Академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА») учебное пособие для студентов, Новосибирск СГГА, 2012, УДК 528.2:551.2, 22 с.
- [11] Kliege, R. K.; Danilow, I. D. & Konischtschew, W. N. (1998): „The History of Hydrosphere“ Scientific World, Moscow 368 p. (russ.)
Клиге, Р. К.; Данилов, И. Д. & Конищев, В. Н. (1998): „История гидросферы“, Научный мир, Москва 368 с
- [12] Korth, W. (2009): Vorlesung Geodynamik & Erdmessung (Manuskript als PDF-Datei, 35 S.); Technische Fachhochschule Berlin
- [13] Korth, W. (2009): Vorlesung Satellitengeodäsie (Manuskript als PDF-Datei, 41 S.); Technische Fachhochschule Berlin
- [14] LEBEDJEV, S. A. (2013): Die Satellitenaltimetrie in den Geowissenschaften, Geophysikalisches Zentrum der Russischen Akademie der Wissenschaften (RAdW)/Institut für Kosmosforschung der RAdW, Moskau, Z. f. Aktuelle Probleme der kosmischen Fernerkundung, Bd. 10/ Nr. 3, S. 33-49 (russ.)
ЛЕБЕДЕВ, С. А. Спутниковая альтиметрия в науках о Земле; Геофизический центр РАН, Москва/Институт космических исследований РАН, Современные проблемы дистан-

ционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. No 3. С. 33–49

- [15] LE TRAON, P.-Y. (2007): Satellite altimetry, IFREMER, Brest; 4 Vorlesungen im Rahmen d. Intern. Projekts ESA-Most Dragon Programme, Advanced Training Course in Ocean Remote Sensing, Hangzhou (2007, P.R. China), 85 S.
- [16] НЕПОКЛОНОВ, В. Б. (2009): Über die Nutzung neuer Modelle des Erdschwerefeldes innerhalb automatisierter Technologien zur Untersuchung des Erdschwerefeldes und die Projektierung/Die Systeme CHAMP und GRACE, Fakultät für staatliche Führung der Staatl. Moskauer Universität „29-stes Forschungsinstitut des Russischen Verteidigungsministeriums“, Moskau, 7 S. (russ.)
Непоклонов, В.Б. (2009): Об использовании новых моделей гравитационного поля земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования/системы CHAMP и GRACE, ФГУ «29 НИИ Минобороны России», г. Москва]
- [17] Topex/Poseidon, Educational Outreach, <http://www.tsgc.utexas.edu/topex>
- [18] WEEDON, GRAHAM P.; BEST, MARTIN; CLARK, DOUGLAS B. (2011): Changes in land surface model outputs due to uncertainty in the watch forcing data; ESA Technical Report No. 36; Water and Global Change, 18 p.
- [19] WU HONG KUONG (2013): Die Entwicklung einer Methodik zum Aufbau eines Quasigeoids mittels satellitengestützter Messungen über dem Territorium Vietnams, Dissertation, Moskauer Staatliche Universität für Geodäsie und Kartographie am Lehrstuhl für Astronomie und Kosmogeodäsie, 116 S. (russ.)
Ву Хонг Куонг (2013): Разработка методики построения квазигеоида по спутниковым измерениям на территории Вьетнама; Москва (Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии на кафедре Астрономии и космической геодезии), 116 с.
- [20] Wikipediaartikel zum Thema „Tidenhub“
- [21] Wikipediaartikel zum Thema „Meerspiegelanstieg“
- [22] ZWISCHENSTAATLICHER AUSSCHUSS FÜR KLIMAÄNDERUNGEN (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC), Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger (Sachstandsberichte Nr. 1-5/1990, 1995, 2001, 2007, 2013-2014)
- [23] NALIVKIN, D.V. (1956): Study of facies – Publisher: Academy of Science of the USSR

Herkunftsnachweis der Abbildungen

(alle „Fremdabbildungen“ wurden vom Verfasser geringfügig nachbearbeitet)

- [24] Abb. 1a www.gug.bgu.tum.de homepage TU München; Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie; SatGeo - Zentrale für Unterrichtsmedien im Internet
- [25] Abb. 1b www.spbtgik.ru/book/2112.htm; Homepage des St.Petersburger Technikums für Geodäsie u. Kartographie
- [26] Abb. 1c http://www.icsm.gov.au/mapping/web_images/cross_section.jpg, homepage: The Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping's (ICSM)

- [27] Abb. 1d <http://www.wikiwand.com/de/Geoid> Wikipedia
- [28] Abb. 1e ROMANYUK, T. (2011): Vergleich von Zeitreihen aus GRACE-Schwerefeldlösungen im Hinblick auf Eismassenänderungen in Grönland; Bachelorarbeit, 53 S.; TU München, Fak. f. Bauingenieur- und Vermessungswesen; Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
- [29] Abb. 2 http://www.planeterde.de/Members/egoernert/Blender3D_EarthQuarterCut.jpg/
homepage: Geowissenschaften Planet Erde
- [30] Abb. 3a <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/Plattengrenzen.png>
Wikipedia
- [31] Abb. 3b https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f5/Earth_seafloor_crust_age Wikipedia
- [32] Abb. 4 FLECHTNER, F.; SCHMIDT, R.; ROTHACHER, M.; WICKERT, J.; LÜHR, H. (2005): CHAMP und GRACE – erfolgreiche Schwerfeld und Klimamissionen; Zweijahresbericht GFZ Potsdam
- [33] Abb. 5 <http://www.jpl.nasa.gov/>; the NASA website for the Jet Propulsion Laboratory (JPL): The CSR9 8(Univ. Texas) mean sea surface model
- [34] Abb. 6 verarbeitet und zusammengestellt aus Google Earth-Luftbildaufnahmen
- [35] Abb. 7 <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/> homepage: NOAA/National Centers for Environmental Information
- [36] Abb. 8 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b0/Oceanic_divisions.svg/400px-Oceanic_divisions.svg-Wikipedia
- [37] Abb. 9 nicht publiziertes Zwischenmaterial aus HARTMANN, B. (2005): Die Genese des stofflichen Inventars des oberoligozänen Braunkohlenflözes Bruckdorf im Raum zwischen Halle und Bitterfeld (Sachsen-Anhalt), Dissertation, 130 S., MLU Halle-Wittenberg
- [38] Abb. 10 aus LE TRAON, P.-Y. (2007): Satellitenaltimetrie, IFREMER, Brest; 4 Vorlesungen im Rahmen d. Intern. Projekts ESA-Most Dragon Programme, 2. Advanced Training Course in Ocean Remote Sensing, Hangzhou (2007, P.R. China)
- Titelbild von AIWASOWSKI I. K.: Ölgemälde „Волна“ - „Die Welle“ v. 1889, (6,10 m x 3,44 m); Staatliches Russisches Museum Sankt Petersburg