Meeresspiegel: Steigen und fallen – Teil 2: Tidenmessungen

Wenn wir über SLR reden, müssen wir zunächst festlegen, was ‚Meeresspiegel' überhaupt ist.

Was ist das, ‚Meeresspiegel'?

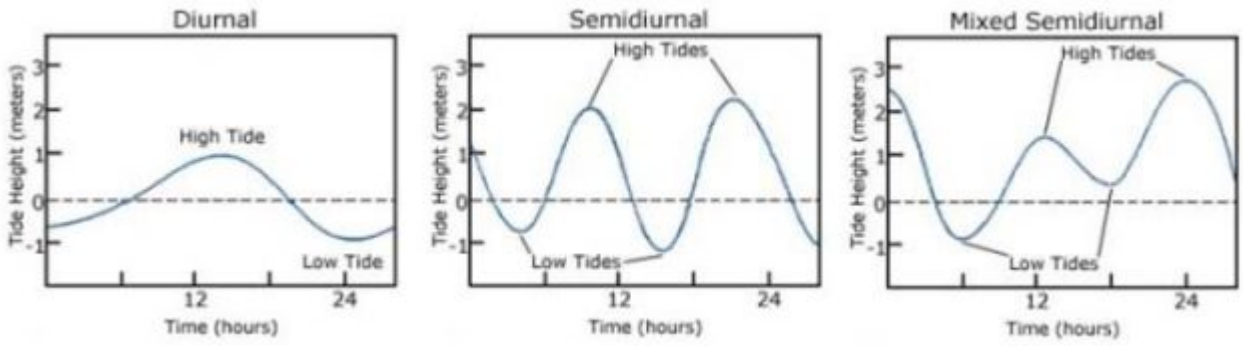
Wenn ich in diesem Beitrag den Begriff **Meeresspiegel** verwende, meine ich den lokalen, relativen Meeresspiegel – also das Niveau des Meeres dort, wo es an das Festland stößt, und zwar an jedem gegebenen Punkt. Falls wir von Meeresspiegel in New York City sprechen, meinen wir das Niveau der Meeresoberfläche, wo sie die Landmasse von Manhattan oder Long Island berührt, die Küsten von Brooklyn oder Queens. Dies ist der *einzige* Meeresspiegel von *irgendeiner Bedeutung* für irgendeine Stelle.

Es gibt ein zweites Konzept, ebenfalls *Meeresspiegel* genannt. Hierbei handelt es sich um einen globalen Standard, der zur Grundlage für Höhen des Festlandes genommen wird. Dies ist ein konzeptioneller Gedanke – ein standardisierter geodätischer Bezugspunkt – und hat nichts, aber auch gar nichts zu tun mit dem tatsächlichen Niveau des Wassers irgendwo in den Ozeanen der Erde. (Man mache sich nicht die Mühe, auf der Wiki-Seite für Meeresspiegel nachzusehen – dabei handelt es sich um ein Mischmasch von Missverständnissen. Es gibt dort auch einen 90 Minuten langen Film, in welchem die Komplexität der Höhenbestimmung aus modernen GPS-Daten erklärt wird – Informationen, die im nächsten Abschnitt dieses Beitrages eine Rolle spielen).

Und dann gibt es noch ein drittes Konzept mit der Bezeichnung absoluter oder globaler Meeresspiegel. Damit ist ein generalisierter Gedanke der mittleren Entfernung der Meeresoberfläche vom Erdmittelpunkt gemeint. Hierzu mehr in einem weiteren Beitrag dieser Reihe.

Da sich der Meeresspiegel in jedem Moment verändert infolge Tidenhub, Wellen und Wind gibt es in der Realität keinen einzelnen experimentellen Meeresspiegel, den wir den lokalen Meeresspiegel nennen können. Um diesem Wechsel Rechnung zu tragen, gibt es verschiedene Bezeichnungen wie Ebbe, Flut und in der Mitte den Mittleren Meeresspiegel. Es gibt weitere Termini für den Zustand der Meeresoberfläche, darunter Wellenhöhe und -frequenz sowie die Beaufort-Skala, welche sowohl die Windstärke als auch die zugehörigen Umstände der Wasseroberfläche beschreibt.

Das sieht so aus:

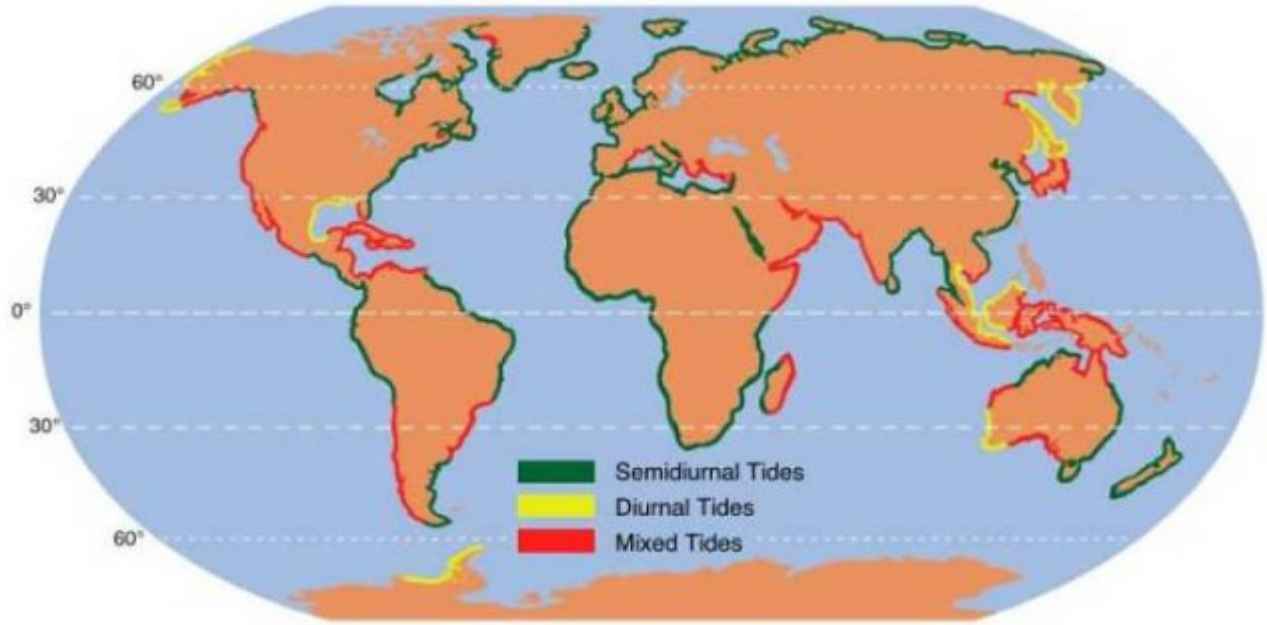


Eintägiger Gezeitenzyklus (links): Ein Gebiet erlebt einen eintägigen Gezeitenzyklus, falls es ein Hoch- und ein Tiefwasserstand an jedem Mondtag gibt (24 Stunden und 50 Minuten). An vielen Stellen im Golf von Mexiko ist diese Art Tidenwechsel zu erleben.

Halbtägiger Gezeitenzyklus (Mitte): Dieser liegt vor, wenn an einer Stelle im Laufe eines Mondtages zwei Hoch- und zwei Tiefwasserstände in etwa vergleichbarer Größenordnung auftreten. Diese Art Gezeitenzyklus tritt in vielen Gebieten an der Ostküste von Nordamerika auf.

Gemischter Gezeitenzyklus (rechts): Dieser tritt auf, wenn je zwei Hoch- und Niedrigwasserstände unterschiedlicher Größenordnung pro Mondtag auftreten. Diese Art Gezeitenzyklus tritt in vielen Gebieten an der Westküste von Nordamerika auf.

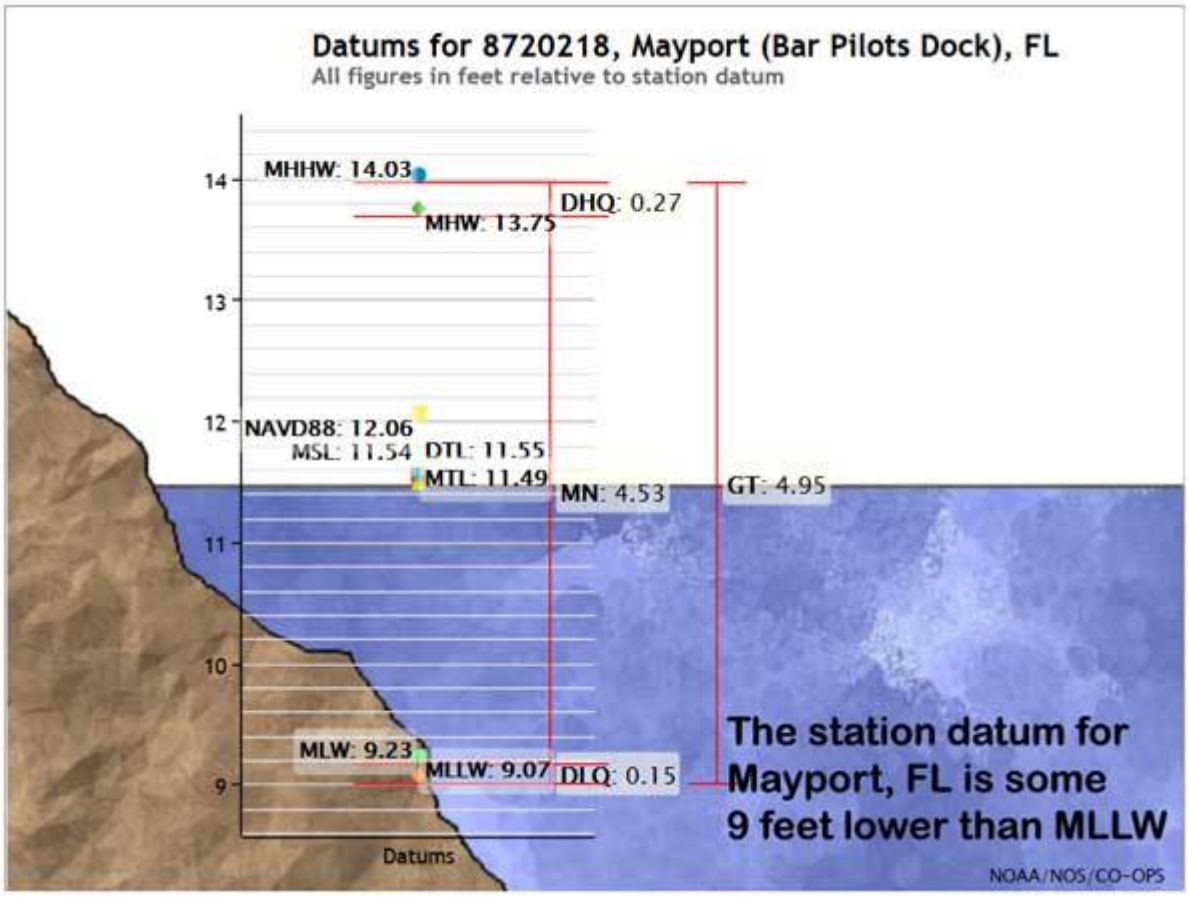
Das folgende Bild zeigt die Verteilung dieser unterschiedlichen Gezeitenzyklen:



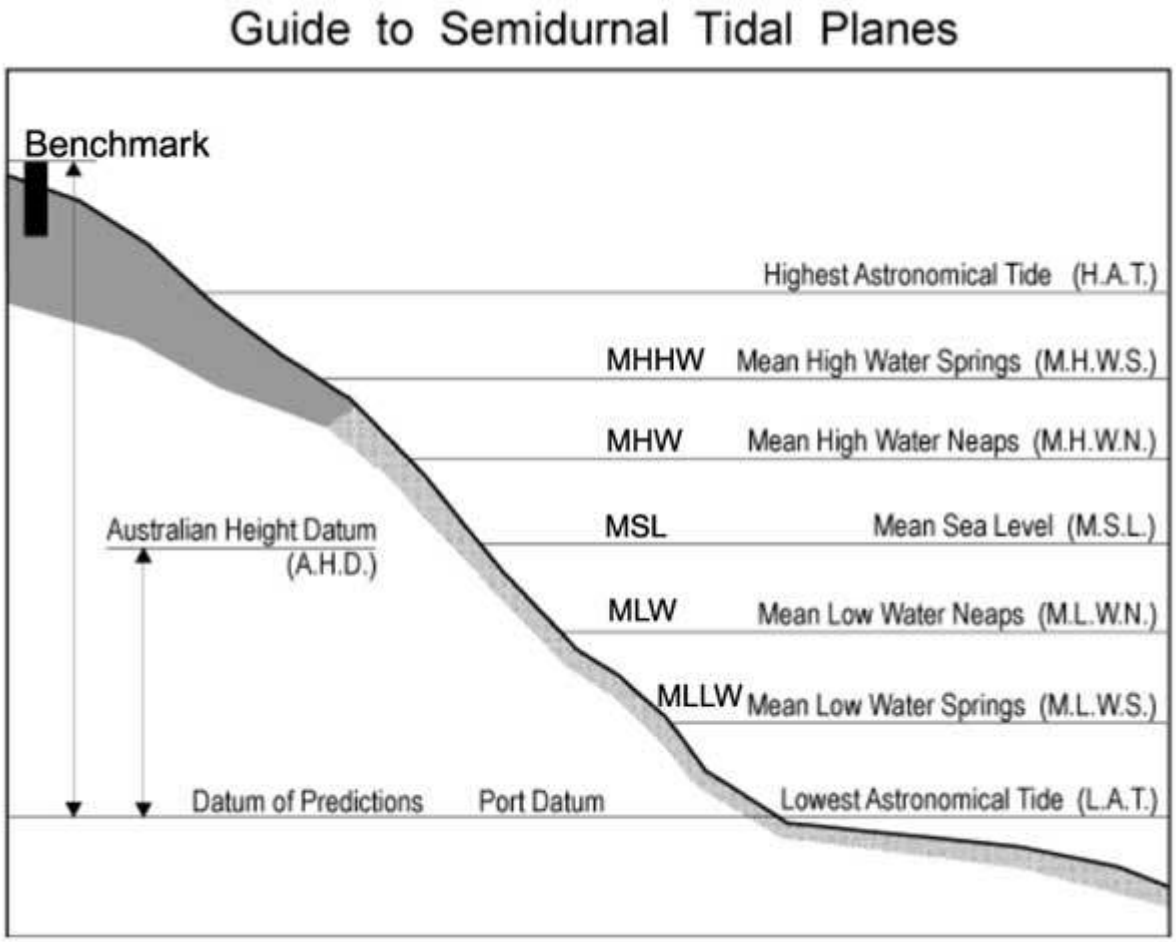
Gezeiten werden hervorgerufen durch die Gravitationskräfte von Mond und Sonne auf die Ozeanoberfläche. Hierzu gibt es online viele gute, mehr oder weniger ausführliche Erklärungen, z. B. hier und hier.

Es gibt mehrere offiziell etablierte Zustände der Tide (welche einfach die

numerischen mittleren relativen Wasserstände für jeden Zustand sind). Diese nennt man *tidal datums* und sind in Relation gesetzt zu einem Punkt auf dem Festland, normalerweise markiert durch ein in Fels oder Beton eingebettetes Schild, eine „*bench mark*". Alle Gezeitenwerte für einen speziellen Tidenmesspunkt werden in Fuß über oder unter diesem Punkt gemessen. Hier folgt eine *bench mark* am Battery Park in New York, und ein Beispiel-Gezeitenwert für Mayport in Florida (repräsentativ für die Stadt Jacksonville, welche jüngst durch den Hurrikan Irma überflutet worden ist):



In Australien hat man etwas andere Bezeichnungen, wie die folgende Graphik zeigt (die US-Abkürzungen sind hinzugefügt):



Anmerkung zur Grammatik dieser Bezeichnungen: [*Hier wird der Unterschied erklärt zwischen den englischen Begriffen ,*datums*, und ,*data*,. Das lässt sich in deutscher Übersetzung aber nicht darstellen. Der Abschnitt lautet im Original:* „They are collectively correctly referred to as "tidal datum**s**" and not "tidal data". Data is the plural form and datum is the singular form, as in "Computer Definition. The singular form of data; for example, one **datum**. It is rarely used, and data, its **plural** form, is commonly used for both singular and **plural**." However, in the nomenclature of surveying (and tides), we say "A tidal datum is a standard elevation defined by a certain phase of the tide." and call the collective set of these elevations at a particular place "tidal datums".]

Die wesentlichen Punkt für die meisten Menschen sind die Hauptdaten [major datums] von oben nach unten:

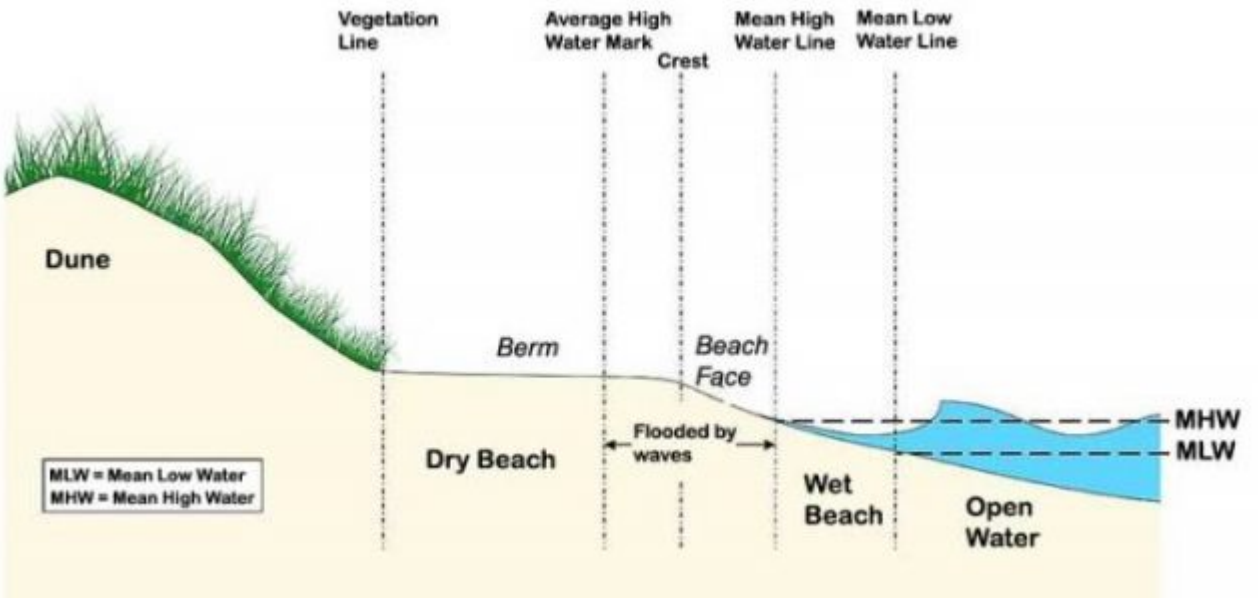
MHHW [Mean High High Water] – mittlere Höhe des Hochwassers, also das Mittel des höheren der zwei Hochwasser pro Tag. An den meisten Stellen unterscheidet sich das kaum vom mittleren Hochwasser. Im Beispiel Mayport beträgt der Unterschied 8,5 cm. In einigen Fällen, wo gemischte Gezeitenzyklen auftreten, können die Unterschiede deutlich größer sein.

MSL [Mean Sea Level] – mittlerer Meeresspiegel, das Mittel von Hoch- und Niedrigwasser. Falls überhaupt keine Gezeiten auftreten, wäre dies einfach der lokale Meeresspiegel.

MLLW [Mean Low Low Water] – mittleres niedriges Niedrigwasser, das Mittel des

niedrigeren der beiden täglichen Niedrigwasserstände. Im Beispiel Mayport beträgt der Unterschied 1,5 cm. Auch hier treten bei gemischten Gezeitenzyklen größere Unterschiede auf.

An einem Strand sieht das so aus:



An einem Strand wäre der Mittlere Meeresspiegel der vertikale Mittelpunkt zwischen MHW und MLW.

Die Hochwassermarke ist eindeutig erkennbar an diesen Pfosten eines Piers, wo nämlich das Wachstum von Muscheln und Seepocken aufhört:

Und *Meeresspiegel*? Im Moment ist der lokale relative Meeresspiegel offensichtlich – es ist die Wasseroberfläche. Es gibt nichts weiter Komplizierteres, wenn man jederzeit das Meer sehen und fühlen kann. Falls man die Hochwassermarke erkennt und das Wasser am niedrigsten Stand während des 12 Stunden und 25 Minuten langen Gezeitenzyklus‘ beobachtet, ist der Mittlere Meeresspiegel der Mittelpunkt zwischen beiden. Einfach!

(Unglücklicherweise ist *Meeresspiegel* in jeder anderen Hinsicht als Konzept erstaunlich komplizierter und komplexer). Im Moment wollen wir beim lokalen Relativen Mittleren Meeresspiegel bleiben (dem Niveau des Meeres, wo es das Festland berührt).

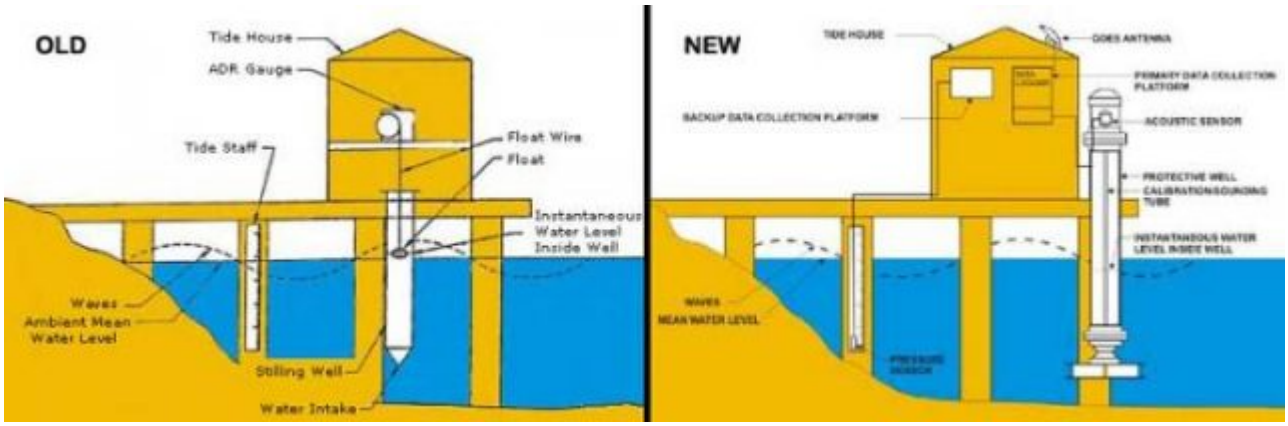
Wie wird der Mittlere Meeresspiegel an jeder Stelle gemessen oder bestimmt? Die Antwort lautet:

Tiden-Messgeräte.

Tide Board or Tide Staff

Tidenmessung war früher ziemlich einfach – eine Skala, sehr ähnlich einem aus dem Wasser ragenden Lineal, an dem man die Wasserstände einfach ablesen konnte. Damit sollte vorüber fahrenden Schiffen gezeigt werden, wie viel Wasser sie noch unter dem Kiel haben in einer Bucht oder einem Hafen.

Aber Tidenmessgeräte sind inzwischen weiterentwickelt und anspruchsvoller geworden:



Das Bild oben zeigt schematisiert alte und neue Messverfahren. Die in den USA derzeit gebräuchlichen Verfahren hat die NOAA in einem PDF hier zusammengestellt. Bei den neuesten Geräten ergibt sich eine Unsicherheit von plus/minus **2 Zentimetern** bei individuellen Messungen und plus/minus **5 Millimeter** für monatliche Mittelwerte.

Um es so freundlich wie möglich auszudrücken, möchte ich darauf hinweisen, dass die Genauigkeit eines *Monatsmittels* ein mathematisches Phantasiegebilde ist. Falls jede Messung lediglich auf ± 2 cm genau ist, dann kann das monatliche Mittel nicht NOCH genauer sein – es muss die gleiche Fehler-/Unsicherheits-Bandbreite aufweisen wie die Originalmessungen, aus denen das Mittel gebildet wird. **Eine Mittelung erhöht nicht Genauigkeit oder Präzision**.

(Es gibt eine Ausnahme: Falls man 1000 Messungen des Wassersiegels durchführt *an der gleichen Stelle zur immer gleichen Zeit*, dann würde die Mittelung die Genauigkeit zunehmen lassen für jenen Zeitpunkt an jener Stelle, werden doch

dann Zufallsfehler zwischen den Messungen reduziert, jedoch keine systematischen Fehler).

In praktischer Hinsicht erhalten wir also Messungen des Lokalen Mittleren Meeresspiegels mit den neuesten Messgeräten, die auf ± 2 cm genau sind. Dies ist weit genauer als notwendig für die ursprüngliche Absicht der Anwendungen von Tidenmessgeräten – mit welchen das Niveau der Wasseroberfläche zu verschiedenen Zeitpunkten der Tide bestimmt werden sollte. Dies sollte die Sicherheit für Schiffe und andere Wasserfahrzeuge erhöhen in Häfen und Flüssen mit Tidenhub. Die zusätzliche Genauigkeit ist nützlich für wissenschaftliche Bemühungen, Gezeiten und deren Bewegungen, Timing, Größenordnung und so weiter besser zu verstehen.

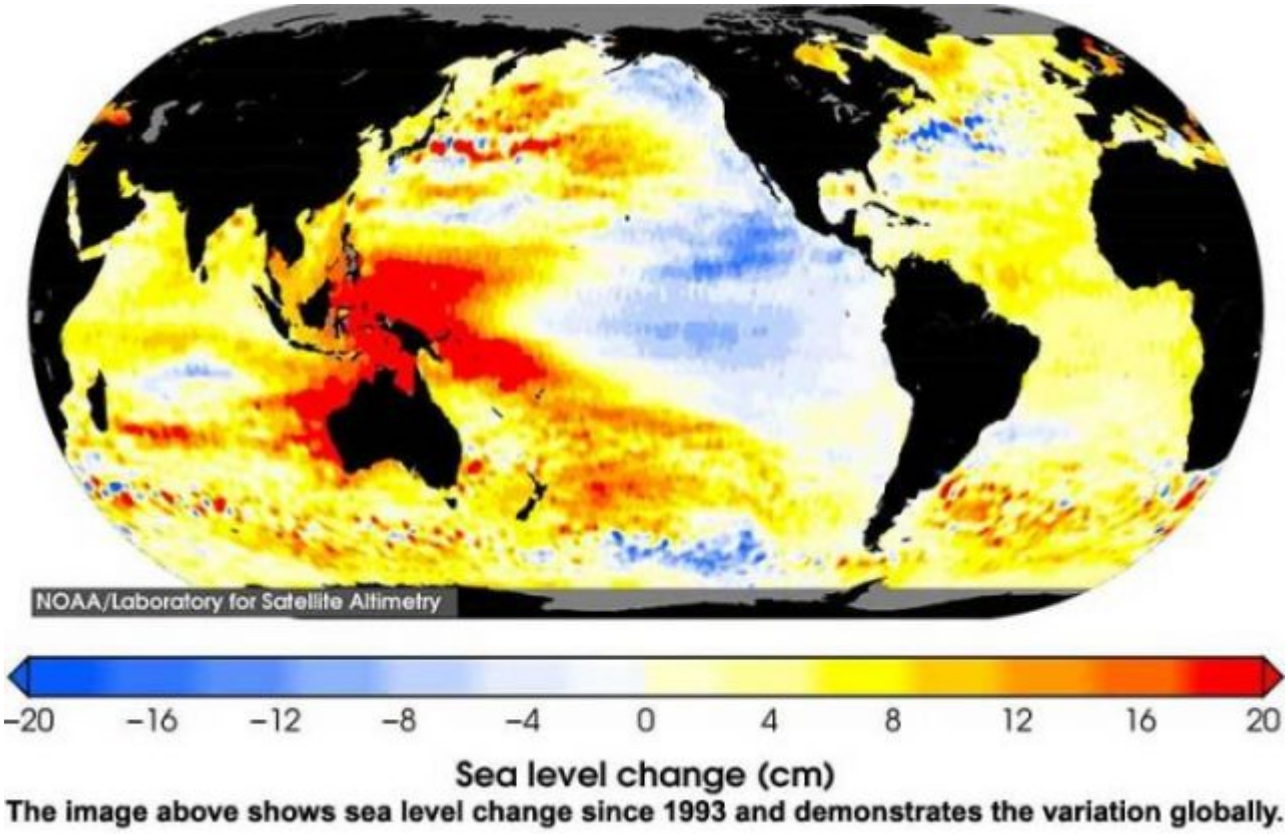
Ich möchte aber noch einmal betonen, dass dies später bedeutsam werden wird oder wenn wir Betrachtungen über die Verwendung dieser Daten anstellen, um den Globalen Mittleren Meeresspiegel zu ermitteln aus **Daten von Tidenmessgeräten,** obwohl *behauptet* wird, dass Zahlen über den Lokalen Monatlichen Mittleren Meeresspiegel auf ± 5 Millimeter genau sind. In Wirklichkeit sind sie **begrenzt auf die Genauigkeit von ± 2 cm der Original-Messungen.**

Wovon ist die Änderung des Lokalen Relativen Meeresspiegels abhängig?

Die von der Tidenmessstation am Battery Park gemessenen Änderungen des Lokalen Relativen Mittleren Meeresspiegels könnten auch eine Folge der Bewegung des Festlandes und nicht der steigende Meeresspiegel sein. In Wirklichkeit ist am Battery Park beides der Fall: das Land sinkt etwas ab, das Meer steigt ein wenig. Beide Bewegungen addieren sich zu einem wahrgenommenen Anstieg des lokalen Meeresspiegels. Ich ziehe das Beispiel Battery Park heran, wie ich es schon vielfach in Beiträgen bei WUWT beschrieben habe. Insgesamt sinkt die Landmasse mit Battery Park mit etwa 1,3 mm pro Jahr, also etwa 6 cm während der letzten 50 Jahre. Im gleichen Zeitraum ist der Meeresspiegel tatsächlich gestiegen, und zwar um ca. 8 cm – was sich addiert zu einem vermeintlichen Anstieg des lokalen mittleren Meeresspiegels am Battery Park um ca. 15 cm von 1963 bis 2015. In einem Bericht aus dem Jahr 2010 steht Näheres dazu.

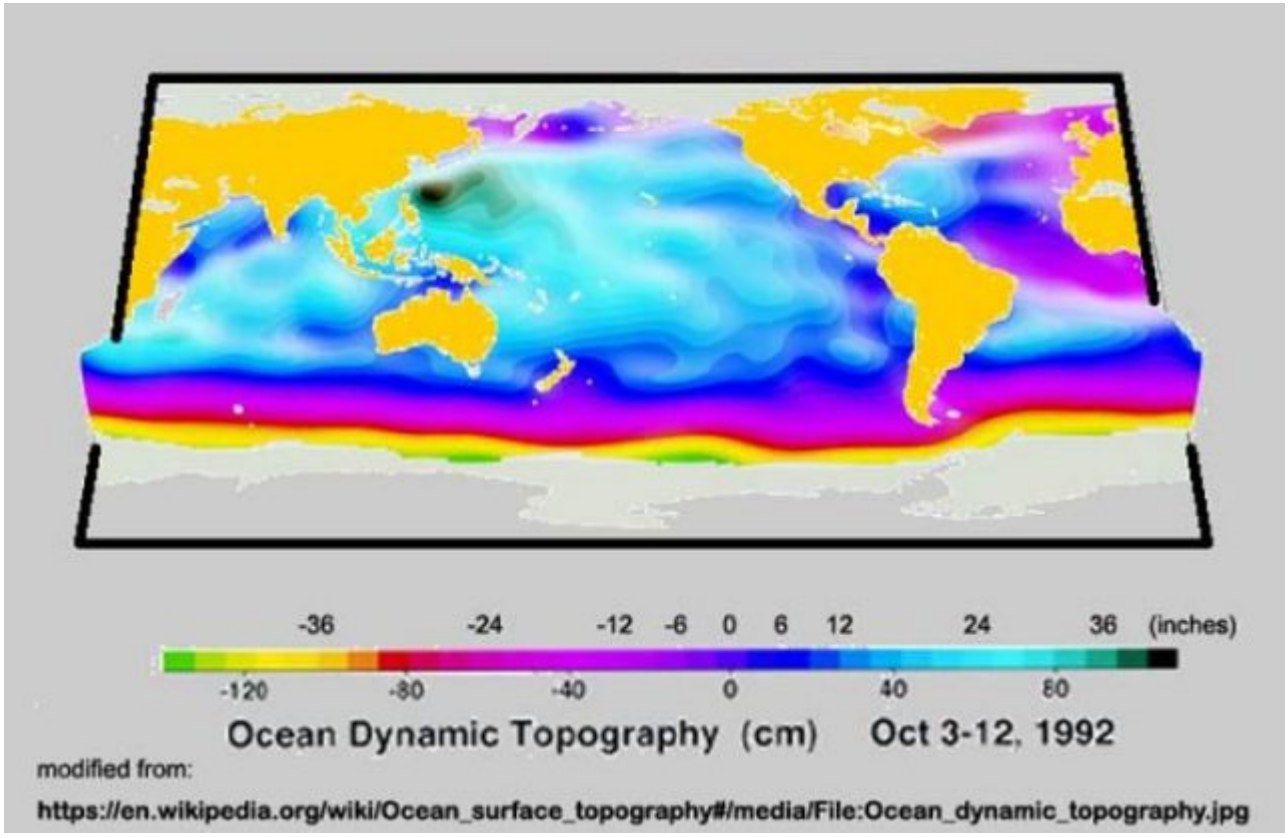
Dies gilt für alle Tidenmesspunkte in der Welt, welche direkt auf einer Landmasse stehen (aber nicht für die ARGO-Bojen zum Beispiel). Die offenbare Änderung des lokalen relativen MSL ist die arithmetische Kombination der Änderung des tatsächlichen Meeresspiegels plus der Änderung durch die vertikale Bewegung der Landmasse.

Wir wissen durch die sorgfältige Arbeit der NOAA, dass der Meeresspiegel nicht überall gleichmäßig steigt:



(Anmerkung: Das Bild zeigt aus Satellitendaten abgeleitete Raten der Änderung des Meeresspiegels)

…und dass die Meeresoberfläche nicht überall glatt ist:



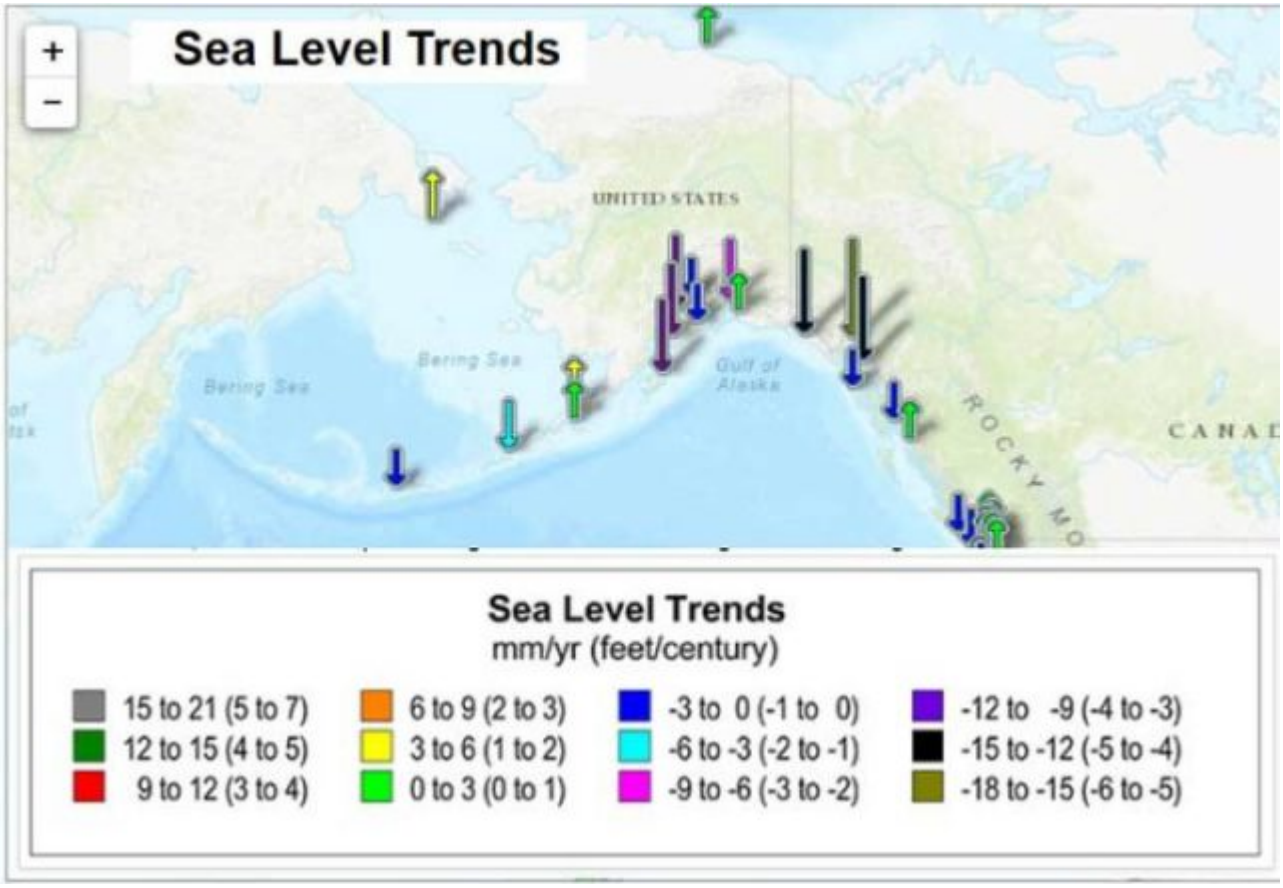
Dieses Bild zeigt eine maximale Differenz der Meeresoberfläche um über 2 Meter – sie liegt sehr hoch bei Japan und sehr niedrig nahe der Antarktis mit

einer ziemlichen Zerstückelung im Atlantik.

Das NGS CORS-Projekt ist ein Netzwerk von **C**ontinuously **O**perating **R**eference **S**tations (CORS), die sich allesamt auf dem Festland befinden und die Daten des Global Navigation Satellite System (GNSS) liefern als Unterstützung einer dreidimensionalen Positionierung. Es repräsentiert den goldenen Standard einer geodätischen Positionierung einschließlich der *vertikalen Bewegung von Landmassen an jedem Messpunkt*.

Um die Daten der Tidenmesspunkte für die Bestimmung des absoluten SLR (nicht den relativen lokalen SLR) nutzbar zu machen – also das tatsächliche Steigen des Meeresspiegels relativ zum Erdmittelpunkt – **müssen die Daten mit zuverlässigen Daten der Vertikalbewegungen des Festlandes an der gleichen Stelle gekoppelt werden**.

Wie wir am Beispiel Battery Park in New York gesehen haben, die mit einer CORS-Station gekoppelt ist, ist die vertikale Bewegung des Landes von gleicher Größenordnung wie die tatsächliche Änderung der Höhe der Meeresoberfläche. An einigen Stellen einer deutlichen Landabsenkung wie etwa der Chesapeake Bay in den USA übertrifft das Absinken den steigenden Meeresspiegel (mehr hier und hier). An einigen Stellen der Küste von Alaska scheint der Meeresspiegel zu sinken, weil sich das Land nach 6000 Jahren Eisschmelze **stärker hebt** als der Meeresspiegel steigt.



Wer verfolgt den globalen Meeresspiegel mit Tiden-Messgeräten?

Der Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) ist für die Zusammenstellung, Veröffentlichung, Analyse und Interpretation der

Meeresspiegel-Daten verantwortlich, und zwar seit dem Jahre 1933 vom globalen Netzwerk von Tiden-Messgeräten. Im Jahre 1985 wurde das Global Sea Level Observing System (GLOSS) ins Leben gerufen, ein gut aufgemachtes, den Meeresspiegel *in situ* vermessendes Beobachtungs-Netzwerk hoher Qualität, um eine breite Plattform für Forscher und Nutzer zu bieten. Nahezu jede Studie zum Thema globaler Meeresspiegel bediente sich der Tidendaten des PSMSL. Man beachte, dass diese Daten aus der Ära vor Satelliten stammen – die Messungen der PSMSL-Datenbasis sind *in situ*-Messungen direkt an der Stelle des Messpunktes. Sie sind nicht aus Produkten der Satelliten-Altimetrie abgeleitet.

Diese Darstellung der PSMSL-Daten hat positive und negative Implikationen. Auf der Haben-Seite steht, dass die Daten direkt gemessen wurden und nicht anfällig sind für irgendwelche Verschiebungen und Fehler wegen Alterung der Instrumente. Gemessen werden sehr zuverlässige und genaue Daten (bis ± 2 cm) des Relativen Meeresspiegels – welches die einzigen Daten von Relevanz sind für die damit befassten Behörden vor Ort.

Auf der Soll-Seite steht, dass die Tiden-Messpunkte auf Landmassen stehen, von denen man weiß, dass sie sich heben und senken (oder sich auch horizontal verschieben). Diese Bewegungen sind konstant, wenn auch langsam. Gründe für diese Bewegungen sind u. A. isostatischer Ausgleich nach einer Vereisung, Absinken durch Abpumpen von Grundwasser, Gas- und Ölförderung sowie die natürlichen Prozesse der Ansammlung und des Setzens von Erde in Flussdeltas. Auch die Plattentektonik spielt eine Rolle.

Damit die PSMSL-Daten überhaupt brauchbar sind für die Bestimmung des absoluten SLR, müssen sie ganz offensichtlich um die vertikalen Landbewegungen korrigiert werden. Allerdings war es mir nicht möglich, auf der Website der PSMSL festzustellen, ob diese Korrekturen wirklich angebracht worden sind. Also sandte ich an PSMSL eine direkte E-Mail mit dieser einfachen Frage: *Sind die PSMSL-Daten explizit korrigiert, um vertikalen Landbewegungen Rechnung zu tragen?*

Die Antwort:

Die PSMSL-Daten werden zugeliefert bzw. heruntergeladen aus vielen Datenquellen. Darum lautet ***die kurze Antwort auf Ihre Frage: Nein****. Allerdings fordern wir wo immer möglich, die PSMSL-Daten mit relevanten Abgleichungs-Informationen zu liefern, so dass wir die Stabilität des Messgerätes überwachen können".*

Man beachte: „Leveling" bezieht sich nicht auf vertikale Landbewegungen, sondern auf den Versuch sicherzustellen, dass das Messgerät vertikal konstant bleibt hinsichtlich des assoziierten geodätischen Eckpunktes.

Falls die PSMSL-Daten **korrigiert werden würden**, um vertikalen Landbewegungen an dieser Stelle Rechnung zu tragen, **dann** könnten wir Änderungen der tatsächlichen oder absoluten Meeresoberfläche bestimmen, um damit dann etwas zu bestimmen, was man als wissenschaftliche Wiedergabe der Änderung des Globalen Meeresspiegels betrachten könnte. Ein derartiger Prozess würde sich komplizieren durch die Realität der geographisch unebenen Wasseroberfläche,

geographischen Gebieten mit Änderungen mit entgegen gesetztem Vorzeichen und ungleichen Raten der Änderung. **Unglücklicherweise kommen die PSMSL-Daten derzeit unkorrigiert daher**, und nur sehr wenige (kaum mehr als eine Handvoll) Messpunkte sind assoziiert mit ununterbrochen operierenden GPS-Stationen.

Was all das bedeutet

Zusammengefasst lassen sich die in diesem Beitrag behandelten Punkte auf einige einfache Fakten bringen:

1. Die Daten von Tiden-Messgeräten sind unschätzbar für örtliche Gegebenheiten für die Bestimmung des Zustandes, der Meeresoberfläche relativ zum Festland und der Rate der Änderungen der Meeresoberfläche. Es sind die einzigen Daten zum Meeresspiegel, die für die lokale Bevölkerung von Belang sind. Allerdings sind diese Daten nur auf ±2 cm genau, das gilt sogar für die besten Stationsdaten des GLOSS-Netzwerkes. Alle aus diesen Daten abgeleiteten Mittelwerte, darunter tägliche, monatliche und jährliche Mittelwerte sind ebenfalls nur auf ±2 cm genau. Behauptungen einer Millimeter-Genauigkeit von Mittelwerten sind unwissenschaftlich und nicht zu unterstützen.

2. Die Daten von Tiden-Messgeräten sind wertlos zur Bestimmung des Globalen Meeresspiegels und/oder dessen Änderung, solange sie nicht explizit korrigiert worden sind hinsichtlich vertikaler Bewegungen des Festlandes, wie es bei den wenigen GPS-Referenzstationen der Fall ist. Da der gegenwärtige Standard der Daten von Tiden-Messgeräten, also PSMSL GLOSS, in dieser Hinsicht nicht korrigiert ist, beruhen die Ergebnisse aller Studien auf der Grundlage dieser unkorrigierten PSML-Daten zum Thema globaler SLR – Größenordnung oder Änderungsrate – auf nicht für diesen Zweck geeigneten Daten und können uns nicht zuverlässig Aufschluss geben über den Globalen Meeresspiegel und dessen Änderung.

Link:
https://wattsupwiththat.com/2017/10/07/sea-level-rise-and-fall-part-2-tide-gauges/

Übersetzt von Chris Frey EIKE