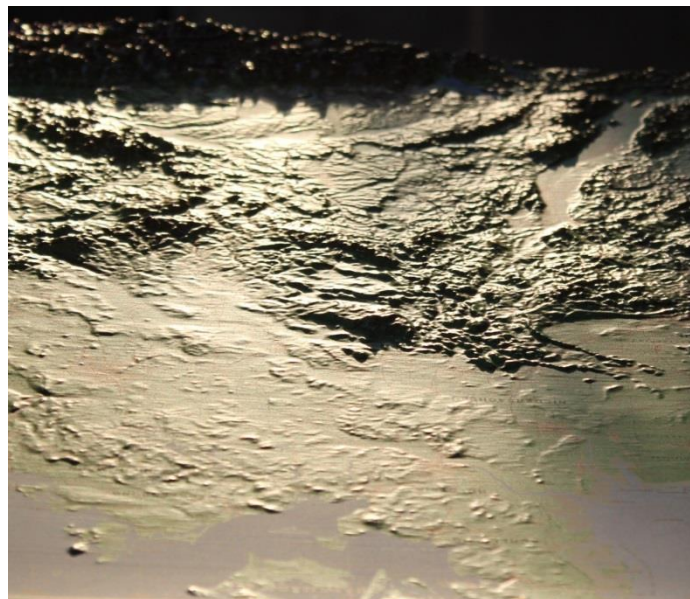
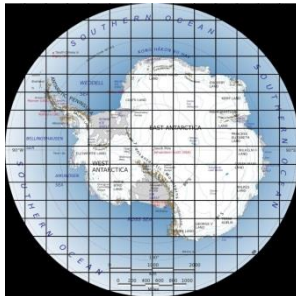


Landeshauptstadt Hannover



 Schulbiologiezentrum



19.73

Wenn die Gletscher schmelzen...

Antarktis, Grönland und der Meeresspiegel

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Schulbiologiezentrum Hannover

Titel: Wenn die Gletscher schmelzen...
Antarktis, Grönland und der Meeresspiegel

Titelbild: Ingo Mennerich

Arbeitshilfe 19.73

Verfasser: Ingo Mennerich

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info

Inhalt

Einige Sätze vorweg: "Klimawandel" mit dem Taschenrechner?	4
Was heißt eigentlich "Meeresspiegelanstieg"?	5
"Brainstorming" und Hypothesenbildung: Was könnte einen "Meeresspiegelanstieg" auslösen?	5
Wie hoch könnte der Meeresspiegel steigen, wenn das antarktische und grönländische Inlandeis vollständig abschmelzen würde?	7
Forschungsbasiertes Lernen: IBSE oder "INQUIRE"	7
Ungenau, aber INQUIRE-betont: Die "pi-mal-Daumen"- Methode (1. Teil)	8
Wie viel Eis wird dem Meer zugeführt?	8
Volumen (Fläche mal Tiefe) der großen Eisschilde	8
Abschätzen der Flächen	9
Abschätzen der Tiefen (Eismächtigkeiten)	9
Mögliche Visualisierung der Eisvolumina	9
Wie groß ist die Oberfläche der Erde?	10
Wie groß ist sind die Ozeane dieser Erde?	11
"Offizielle" Zahlen zur Größe der Ozeane und Meere	14
Vorläufige Lösung: So stark könnte das Meer ansteigen...	14
Einwand 1: "Eis nimmt einen größeren Raum ein als Wasser. Der Meeresspiegel wird daher nicht so stark steigen."	15
Einwand 2: "Bei steigendem Meeresspiegel wächst die Meeresoberfläche weil das Meer dann auf das Land übergreift. Damit fällt der Anstieg geringer aus."	16
Einwand 3: "Die Erde ist keine Scheibe sondern eine Kugel: Mit steigender Höhe hat das Meer immer mehr Platz sich auszubreiten"	18
Ungenau, aber INQUIRE-betont: Die "pi-mal-Daumen"- Methode (2. Teil)	22
Meeresspiegelanstieg unter verschiedenen Bedingungen mit EXCEL berechnen	24
Fazit: Wie hoch würde das Wasser bei uns steigen?	27
Kann man die Überflutung Deutschlands mit einer Reliefkarte simulieren?	28
Zukunftsvision "Südfriesische Inseln"?	29
Schulbiologiezentrum Hannover, Arbeitshilfe 19.73 "Wenn die Gletscher schmelzen..."	3

Einige Sätze vorweg:

"Klimawandel" mit dem Taschenrechner?

An der Nordseeküste spottet man gerne, den "Meeresspiegelanstieg" gäbe es zweimal innerhalb eines Tages. Und dann ginge das Meer auch wieder zurück. So gelassen sich viele geben: Die "Eingeborenen" erfahren im den "Blanken Hans" im Wechselspiel zwischen Ebbe und Flut, Windstille und schweren Stürmen viel eindringlicher als mancher Umweltpessimist tief im Binnenland. Nord- und Ostfriesen, Dithmarschern und Butjadingern ist der "Meeresspiegelanstieg" seit vielen Generationen vertraut. War es in der Nacheiszeit noch möglich, die Nordsee zu Fuß zu überqueren, stieg der Meeresspiegel mit der so genannten "flandrischen Transgression" in geologisch relativ kurzer Zeit massiv an. Große Teile der Weltmeere waren während der letzten Eiszeit in Form mächtiger, große Teile Skandinaviens und Nordamerikas bedeckender Festlandgletscher gebunden. Im nachfolgenden "Klimawandel" des z.T. ausgesprochen warmen Postglazials wurde dieses Wasser wieder frei und füllte das geologisch uralte Nordseebecken. Das der "Klimawandel" ein steter Begleiter dieser Erde ist wird gerne, wissentlich oder durch Unkenntnis, ignoriert. Das so genannte "Quartär" war (nach dem meist tropisch warmen Tertiär) eine Achterbahnfahrt, was das Auf- und Ab der Temperaturen und des Meeresspiegels angeht. Und nun steht die Menschheit auf einmal vor dem "Klimawandel". Im Unterschied zu früheren "Klimawandeln" die sich vor allem auf Wollnashörner und Mammuts auswirkten sind diesmal möglicherweise zivilisierte und industrielle menschliche Gesellschaften davon betroffen. Und: Vielleicht ist dieser "Klimawandel" ganz oder zu einem großen Teil menschengemacht. Er könnte aber auch ganz andere Ursachen haben.

Menschen haben durch Deiche, Lahnungen und Sandvorspülungen dem weiteren Anstieg der Nordsee vorläufige Grenzen gesetzt. Das allerdings führt zur Erosion bislang flacher Vorländer und Watten. Genau genommen ist die Eiszeit noch nicht zu Ende: Auf dem antarktischen Kontinent und auf Grönland liegen mächtige Eispanzer. Sollten sie, aus welchem Grund auch immer, abschmelzen würde der Meeresspiegel über die Deichkronen hinaus steigen. Wie weit?

Unter dem Gipfelkreuz des 118 m hohen Kronsbergs entstand die Vision der "Südfriesischen Inseln", mit Blick auf den Deister und dem Hildesheimer Wald, die in ferner Zukunft vielleicht als "Deistrum" und "Hildesheimum" vor der Küste eines südlich gelegenen "Südfrieslands" liegen könnten.

Nichts liegt uns ferner, als Alarmisten aufzutreten. Der "Meeresspiegelanstieg" ist ein viel zu kontroverses und komplexes Thema um es auf Bedrohungsszenarien zu reduzieren. Es gibt schon genug düstere Prognosen für die (nähere) Zukunft.

Wir halten auch nichts davon, schon Grundschulern beizubringen, dass morgen die Welt untergeht, wenn sie sich nicht nachhaltig verhalten. Fegefeuer, Hölle und Ablasshändel hat es lange genug gegeben. Das ist aber kein Grund, der ganzen Geschichte mit dem "Meeresspiegelanstieg" nicht einmal ganz nüchtern auf den Grund zu gehen und das Ausmaß auf der Basis von gesicherten Fakten einmal durchzurechnen.

Am Ende unseres Versuchs könnte es Hannover, heute über 50 m über dem Meer gelegen, irgendwann nicht mehr geben. Zwischen den "Hoogs" der umliegenden Inseln würden sich Watten, tiefe Priele und Gatts ausbreiten. Wir werden das, wenn es überhaupt mal so kommen sollte, wahrscheinlich nicht mehr erleben. Aber unsere Ur-, Urur- und Ururenkel? Wir können sie dazu nicht befragen.

Aber kann man einem so kontroversen, komplexen und möglicherweise sehr zukünftigen Problem wie dem "Meeresspiegelanstieg" in der Schule nachspüren? Kann man im Unterricht das Ausmaß mit Hilfe einiger

Zahlen, dem Atlas und eines Taschenrechners erfassen? Sollte man das nicht wissenschaftlichen Instituten überlassen?

Erstaunlich ist, dass man mit wenigen Daten (Eisvolumen, Oberfläche der Ozeane) und den vier Grundrechenarten zu den gleichen Ergebnissen gelangt wie z.B. den Forschern des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Unsere mit dem Taschenrechner errechneten Ergebnisse stimmen mit den von Klimatologen und Computern ermittelten recht gut überein.

Wir erweitern vorläufige Rechnungen um drei von Schülern oft geäußerte Einwände:

- 1) Das Eisvolumen sei größer als das Schmelzwasservolumen,
- 2) Der Meeresspiegel falle bei großflächiger Überflutung von Land weniger stark aus und
- 3) bei unseren Rechnungen sei die Kugelgestalt der Erde nicht ausreichend berücksichtigt.

Wir werden zu - modifizierten - aber für uns dennoch erschreckenden Ergebnissen gelangen.

Ob das alles so eintrifft wie vorhergesagt wissen wir nicht. Vielleicht befinden wir uns in einer (warmen) Zwischeneiszeit und halten nur die nächste Vereisung in Schach.

In diesem Rahmen beschäftigen wir uns jedoch nicht mit dem "ob", sondern nur mit dem "wenn"...

Was heißt eigentlich "Meeresspiegelanstieg"?

"Meeresspiegelanstieg" bezieht sich auf ein Mittelmaß, also das vermeintlich "Normale". Kaum etwas ist so schwankend und schwer definierbar wie das Niveau eines selten ruhigen und durch Gezeiten auf- und abschwellenden Meeres. Nachrichten, wie das "Ansteigen des globalen Meeresspiegels um 0,1 mm im vergangenen Jahr" kann man nur mit tiefer Skepsis begegnen. Darüber hinaus steigt der (mittlere) Spiegel in einer Region und fällt zugleich in anderen (z.B. an der Ostküste der USA).

Durch geologische Bewegungen sinkendes Land führt zu einem (isostatischen) Meeresspiegelanstieg, was die Wahrnehmung am Ufer aber kaum berührt.

Bevor man sich der Veränderung oder dem Anstieg als neues, bislang nicht gekanntes Phänomen widmet, sollte man erst einmal versuchen, das "Normale", also den vermeintlich "ursprünglichen" Meeresspiegel zu begreifen.

Die im System Erde, Mond und Sonne wirkenden Gravitations- und Fliehkräfte führen zu rhythmisch wiederkehrenden Gezeiten. Der zeitliche Abstand zwischen Ebbe und Flut und der Tidenhub sind von lokalen Bedingungen abhängig. Während die Gezeiten in der Ostsee kaum merkbar sind schwankt der Meeresspiegel in einigen Küstenabschnitten der Bretagne oder Nova Scotias um 11 bzw. 21 m innerhalb eines halben Tages.

Den Mechanismus der Gezeiten haben wir bereits vor Jahren in Form von "Gezeitenuhren" zum Unterrichtsthema gemacht ("Wie kann man in Hannover erkennen, ob auf Sylt gerade Ebbe ist?")

Bei Stürmen kann der Meeresspiegel, im Falle ablandiger Winde tagelang im "Ebbe"-Modus verharren, oder bei auflandigem Wind zu gewaltigen Fluten anschwellen.

"Brainstorming" und Hypothesenbildung:

Was könnte einen "Meeresspiegelanstieg" auslösen?

Forschungsbasiertes Lernen beginnt mit einem möglichst alle motivierenden Problem, gefolgt von Hypothesen die nach Wahrscheinlichkeit und Gewicht hierarchisiert werden.

Erst dann kann man Pläne zur Überprüfung dieser Hypothesen entwerfen und diese in Experimenten entweder bestätigen (verifizieren) oder verwerfen (falsifizieren).

In einem "Brainstorming" werden Schüler eine Reihe von Vermutungen zu den Ursachen eines angenommenen "Meeresspiegelanstiegs" äußern. Hier eine Auswahl:

- Abschmelzen der dem Festland aufliegenden Eiskappen (z.B. Antarktis, Grönland)
- Kalben von Gletschern
- Schmelzen des auf dem Wasser schwimmenden Packeises
- Schnellere Erwärmung "schmutzigen" Eises
- Ausdehnung des Wassers durch Erwärmung
- Heftigere Stürme
- Stärkerer Niederschlag
- Stärkere Gezeiten
- Schäden an Deichen
- Absinken von Landflächen

In dieser Arbeitshilfe beschränken wir uns auf das durch Eisschmelze den Meeren zusätzlich zugeführte Wasser und konzentrieren uns auf die Grönländischen und Antarktischen Eisschilde. Ihrem Abschmelzen wird der größte Effekt auf den Meeresspiegel zugesprochen.

Bereits im Wasser schwimmendes Eis trägt, da weniger dicht als Wasser, nicht zum Anstieg bei.

Anregungen dazu finden Sie in unserer Arbeitshilfe "Dunkle Arktis: Wenn der Nordpol schmilzt". Dort geht es besonders um die Effekte einer geringeren Albedo durch schrumpfende weiße Flächen und um die die das Klima stabilisierende Rolle der Schmelzwärme, die der Umgebung tauenden Eises Wärme entzieht.

In der Arbeitshilfe "Wenn sich die Ozeane ausdehnen" finden Sie Experimente zur thermischen Ausdehnung des Wassers.

Innerhalb eines Wahlpflichtkurses könnte man sich allen drei Themenfeldern annehmen und ihre Auswirkungen auf den Meeresspiegel gewichten.

Wie hoch könnte der Meeresspiegel steigen, wenn das antarktische und grönländische Inlandeis vollständig abschmelzen würde?

Was muss ich wissen, um mit dieser Fragestellung forschen zu können?

Im Prinzip heute nur, wie man die "richtigen" Seiten im Internet findet. Fertige Zahlen zum "Meeresspiegelanstieg" findet man z.B. bei Wikipedia.

Wenn man mit "Fertigprodukten" zufrieden ist und ihnen vertraut kann man jede weitere Suche einstellen.

Was aber, wenn die Zahlen divergieren? Welche ist dann die glaubhafteste?

Sind es zum Beispiel die Zahlen des IPCCs oder sind es die Zahlen, die man in den Blogs der so genannten "Klimaskeptiker" findet?

Kann man die Lösung durch eigenes Forschen finden?

Um welchen Betrag der "Meeresspiegel" in meiner Badewanne steigt, wenn ich ins Wasser eintauche, kann ich selbst herausfinden. Aus dem gewonnenen Wert kann ich sogar das Volumen und die Dichte meines Körpers bestimmen. Alles was ich zum Experimentieren brauche ist ein zur Fragestellung passender Plan, einen Stift, ein Messgerät (Lineal) und etwas Kopfrechnen.

Aber gelingt das auch im globalen Maßstab?

Es gibt viele Gründe die dagegen sprechen:

- Ich kann das in Frage stehende Eis nicht einfach den Ozeanen hinzufügen und schauen was passiert.
- Ich weiß nicht, wie groß die Meere sind und wie viel Wasser sich darin befindet.
- Und anders als in der Badewanne ist der Meeresspiegel eine mit jeder Welle, Ebbe und Flut unterschiedlichen Winden schwankende Angelegenheit.
- Schließlich weiß ich nicht, wie viel schmelzendes Eis das Meer verkräften müsste.

Aber es gibt auch Gründe, die dafür sprechen, es dennoch einmal zu versuchen.

Der gewichtigste ist, dass man mit einigen wenigen Zahlen zu den gleichen Ergebnissen kommt wie die wissenschaftlichen Prognosen z.B. des IPCC.

Das Rechnen ist nicht kompliziert: Mit den vier Grundrechenarten, Kopf und Bleistift oder einem Taschenrechner kommt man ans Ziel.

Noch wichtiger erscheint mir, dass man durch kluge Fragestellungen, Nachdenken über die Methoden und genaues Experimentieren erfährt wie Wissenschaft funktioniert.

Forschungsbasiertes Lernen: IBSE oder "Inquire"

Wir haben uns mit dem "globalen Meeresspiegelanstieg" im Rahmen von "IBSE" beschäftigt. "IBSE" oder "Inquiry based scientific education", kurz auch "Inquire" genannt, ist eine propädeutische, auf das Erlernen wissenschaftlicher Methoden zielende Unterrichtsform. Das Schulbiologiezentrum Hannover hat in einem europaweiten Programm zwischen 2010 und 2014 mehrere Module zum Thema "Biodiversität und Klimawandel" entwickelt und in mehreren Lehrerfortbildungskursen umgesetzt. Sowohl im Schulbiologiezentrum als auch im Schul-LAB der IGS Mühlenberg ist das Angebot "Meeresspiegelanstieg" ein häufig angefragtes Unterrichtsprojekt.

Bei "Inquire" wird viel experimentiert, d.h. die Schülerinnen und Schüler begreifen die relevanten Zusammenhänge durch eigenes Tun. Experimentiert wird aber nicht nach "Kochrezepten" sondern ausgehend von der oder den Fragestellung(en) die nach kurzem Einstieg nach Möglichkeit von den Schülern selber entwickelt werden. Diese Methode ist material- und zeitaufwändig und birgt die Gefahr von "Sackgassen". Es wird stets dem Lehrer innerhalb der konkreten Rahmenbedingungen überlassen bleiben, wie konsequent er die Schüler "machen lässt" oder wie weit er sie an die Hand nimmt. "Inquire" ist im Ansatz das genaue Gegenteil von Demonstrations- oder angeleiteten Experimenten. Dass das im Schulalltag oft ein hochgestecktes Ideal bleibt ist uns bewusst.

Wir kennen aber Kolleginnen und Kollegen die dieses Prinzip z.B. in von den Zwängen des Curriculums freieren Wahlpflichtkursen in den Vordergrund stellen und Schüler damit begeistern können.

In einer Welt, in der der gesammelte Wissen zu groß ist um noch "Universalgenies" hervorzubringen macht es über weite Strecken Sinn, Inhalte abzuspicken und statt Fakten Methoden zu lehren.

Was müssen Forscher wissen, um unsere Frage beantworten zu können?

- Wie groß sind die "Eispakete" die auf der Antarktis bzw. auf Grönland liegen?
- Wie groß sind die Meere die diese "Eispakete" aufnehmen müssten?

Ungenau, aber INQUIRE-betont: Die "pi-mal-Daumen"- Methode (1. Teil)

Gesetzt den Fall, ein paar kluge Schiffbrüchige landen auf einer Insel und meinen, dort in Sicherheit zu sein. Dann finden sie einen Zettel auf dem steht:

"In der Antarktis und in Grönland liegen fast zweitausend tausend Meter dicke Eiskappen.
Schmilzt das Eis werdet ihr vielleicht - vielleicht auch nicht - untergehen"
"Umfang = π x Durchmesser"
"Fläche = π x Durchmesser hoch zwei"

Daneben stehen ein Globus und ein Taschenrechner...

Aus diesen wenigen Angaben lässt sich ein grobes Bild der tatsächlichen Bedrohung zeichnen. Dazu mehr weiter unten im zweiten Teil der der "pi-mal-Daumen"-Methode.

Im Folgenden zunächst der Versuch, mit genauen Grunddaten zu möglichst "wissenschaftsnahen" Ergebnissen zu kommen:

Wie viel Eis wird dem Meer zugeführt?

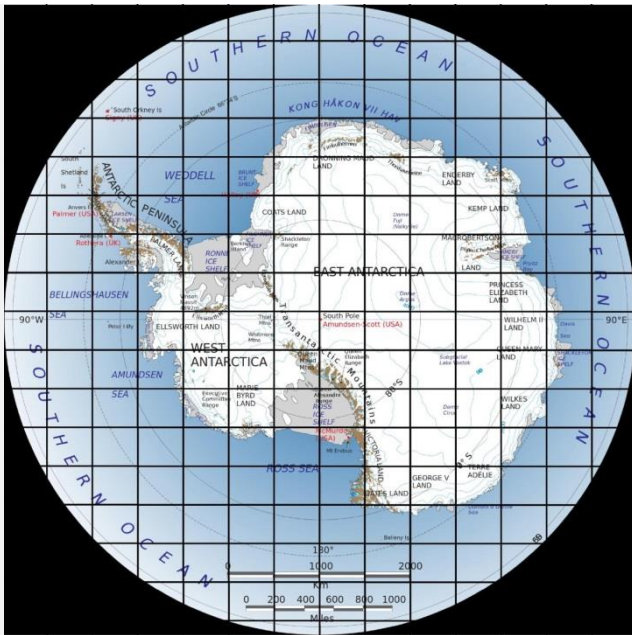
Abschätzen des Volumen (Fläche mal Tiefe) der großen Eisschilde

Das Volumen des Festlandeises setzt sich aus seiner Oberfläche und seiner Tiefe ("Mächtigkeit") zusammen. Die Oberfläche lässt sich, wie das Volumen natürlich auch, "ergoogeln" oder mit Hilfe von Satellitenfotos oder Kartenmaterial bestimmen. Mit der Mächtigkeit ist viel problematischer. Zum einen sehen wir nicht, wie dick der Eispanzer ist und dann wird die Mächtigkeit von Ort zu Ort variieren. Wie findet man einen akzeptablen Durchschnittswert? Die einfachste Lösung steht auch hier im Internet. Das Internet ist eine, im Rahmen von "Inquire" durchaus "legale" Informationsquelle. Die Schülerinnen und Schüler sollten aber lernen, kritisch zu hinterfragen, wie diese Daten ermittelt sein könnten und sich auch bewusst sein, wie leicht es ist, falsche (und möglicherweise interessengesteuerte) Daten ins Netz zu stellen (Stichwort: "Medienkompetenz").

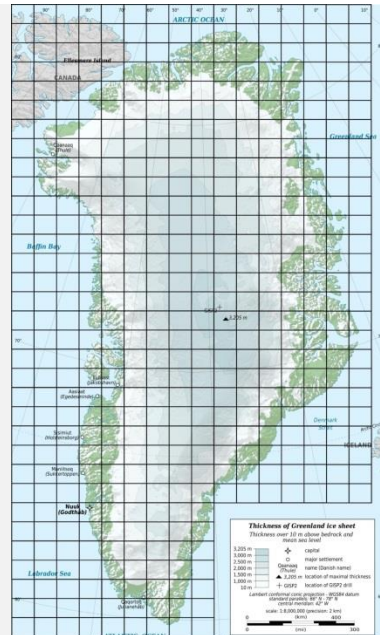
Wir halten (offline) zwei Informationsquellen bereit:

Abschätzen der Flächen:

Einmal zwei (flächentreue) Karten (Antarktis und Grönland) mit Gitterrastern, die es möglich machen, die jeweilige Gesamtfläche durch Auszählen und Addieren der Teilflächen zu ermitteln.



Antarktis
in Teilflächen von 500 km x 500 km gerastert.



Grönland
in Teilflächen von 100 km x 100 km gerastert.

Nicht jede Teilfläche ist vollständig von Eis bedeckt. "Sauberes" Arbeiten bedeutet, halbe, Viertel- oder gar Achteelflächen einzeln zu notieren und zu addieren. Im Falle der Antarktis kommt hinzu, dass Teile der Eisflächen nicht aus Gletscher- (also auf dem Festland liegenden) sondern Meereis bestehen. Das schwimmende Meereis, das sich - wie in einfachen Experimenten nachvollziehbar - in Bezug auf den Meeresspiegel ganz anders verhält, ist grau dargestellt.

Quadrate von 500 km Länge und 500 km Breite (bzw. 100 x 100 km) überspannen Flächen von 250000 bzw. 10000 km².

Die "offiziellen" Flächeninhalte für die Antarktis und für Grönland sind 13856000 km² bzw. 1710000 km².

Abschätzen der Tiefen (Eismächtigkeit):

Als zweite Quelle bieten wir ihnen mehrere - aus fiktiven Bohrungen abgeleiteten - Eismächtigkeiten an. Aus diesen Werten kann man einen Durchschnitt - die "Eisdicke" - berechnen (die mit den "offiziellen" Zahlen übereinstimmt).

Antarktis:

4,776	3,215	0,110	1,145	0,256	2,260	0,711	2,155	4,270	0,316
1,525	0,378	1,235	2,285	0,446	1,378	2,590	1,168	1,440	0,265
2,515	3,21	2,245	3,151	2,278	4,170				

Ø 1,903 km

Grönland:

0,557	2,676	0,125	1,473	0,336	1,855	0,757	2,122	1,57	0,884
1,805	0,62	1,311	2,443	0,446	1,318	2,791	1,855	1,64	0,265
2,916	2,308	2,745	2,455	2,833	3,205				

Ø 1,666 km

Durch Multiplikation der Flächen und durchschnittlichen Eismächtigkeiten erhalten wir die Volumina der beiden Eisschilde:

Antarktis:	$13856000 \text{ km}^2 \times 1,903 \text{ km} = 26367900 \text{ km}^3$
Grönland:	$1710000 \text{ km}^2 \times 1,666 \text{ km} = 2850000 \text{ km}^3$
Summe	$= 29217900 \text{ km}^3$

Mögliche Visualisierung der Eisvolumina

Die riesigen Flächen und Volumina sind sehr unanschauliche Größen.

Bei Größenvergleichen im Atlas ist Vorsicht geboten. Viele Karten verzerren die Umrisse und Flächen so dass z.B. Grönland im Vergleich zu Afrika viel zu groß erscheint.

Aus den oben genannten (oder selbst ermittelten) Flächen lassen sich durch Wurzelziehen vergleichbare Quadrate errechnen und zeichnen:

Antarktis:

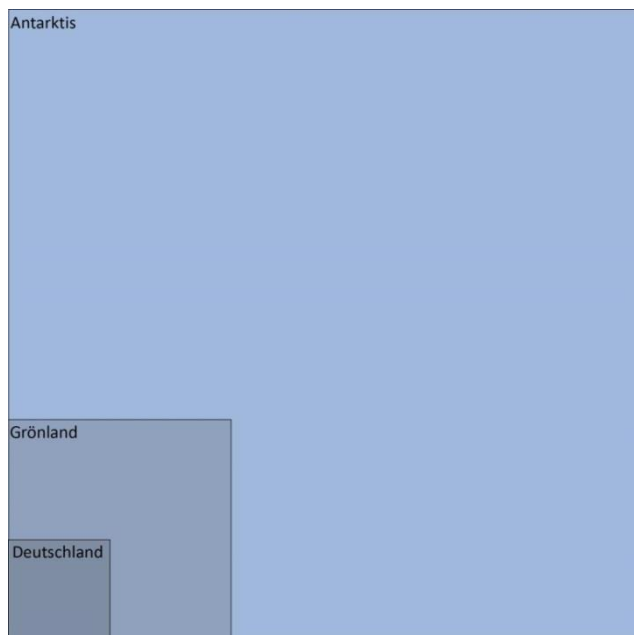
$$13856000 \text{ km}^2 \qquad \sqrt[2]{13856000} \qquad = 3722,4 \text{ km}$$

Grönland:

$$1710000 \text{ km}^2 \qquad \sqrt[2]{1710000} \qquad = 1307,7 \text{ km}$$

Deutschland:

$$357168 \text{ km}^2 \qquad \sqrt[2]{357168} \qquad = 597,6 \text{ km}$$



Wie hoch wäre Deutschland mit Eis bedeckt?

Fläche Deutschland: 357168 km^2 (Wikipedia, gerundet)

$$29217900 \text{ km}^3 : 357168 \text{ km}^2 = 81,8 \text{ km}$$

Wie hoch wäre die Erde mit Eis bedeckt?

Fläche Erde: 510000000 km^2 (Wikipedia)

$$29217900 \text{ km}^3 : 510000000 \text{ km}^2 = 0,0573 \text{ km}$$

Wie groß ist die Oberfläche der Erde?

Wer die Oberfläche der Erde selbst errechnen möchte kann dieses in Kenntnis des Erddurchmessers (oder -radius) tun: Den kann man natürlich nachschlagen.

Man kann den Schülern aber auch einen Globus hinstellen und sie bitten, den Durchmesser des Globus und der realen Erde selbst zu bestimmen.

Diese Aufgabe könnte (arbeitsteilig) eine Gruppe von "Spezialisten" bewältigen.

Der Globus ist ein nahezu maßstabsgetreues dreidimensionales Abbild unserer Erde.

Aber wie groß ist die Erde wirklich? Und wie hat man das einmal herausgefunden?

Lösungsstrategien könnten sein:

- Den Abstand zwischen zwei auf dem Globus verzeichneten Städten auszumessen
- z.B. Hamburg - Genua (etwa 1000 km)
- Im Internet die Entfernung abzufragen (z.B. luftlinie.org)
- Die Werte auf den Umfang der Erde umzurechnen
- Aus dem Umfang den Radius oder den Durchmesser zu bestimmen

Man kann den Umfang, Durchmesser oder Radius aber auch vorgeben:

Der Erdumfang (die Strecke, die man ablaufen und schwimmen müsste, um die Erde zu umrunden) beträgt etwa 40000 km (genau: 40.075,017 km).

Daraus kann man den Durchmesser errechnen:

$$U = 2\pi r \rightarrow r = \frac{U}{2\pi} \text{ oder } U = d\pi \rightarrow \frac{U}{\pi} \rightarrow d = 12756,3 \text{ km}$$

Die Erde ist keine ideale Kugel sondern ein zu den Polen abgeplattetes "Rotationsellipsoid"

Der Äquatordurchmesser ist mit 12.756,32 etwas größer als der Poldurchmesser 12.713,55 km (Wikipedia).

Würde man (sehr vereinfachend) den Durchschnitt bilden so ergibt sich ein Wert von 12734,9 km.

Die Oberfläche der idealisierten Kugel wäre dann $A = 4\pi r^2 = \pi d^2 \rightarrow$

$$\pi \times 12756,3^2 = 511209977 \text{ km}^2,$$

$$\pi \times 12734,9^2 = 509499402 \text{ km}^2,$$

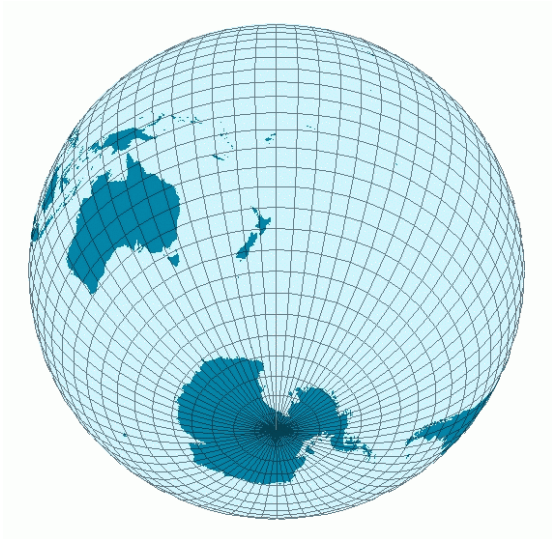
was praktisch dem oben genannten, bei Wikipedia nachgeschlagenen Wert entspricht.

Wie groß sind die Ozeane dieser Erde?

Ein Ansatz wäre, den prozentualen Anteil der "blauen" Flächen des Globus abzuschätzen.

Mit Hilfe einer flächentreuen Darstellung der Erde, z.B. der Peters-Projektion und einem darüber gelegten Gitterraster gelingt dieses um einiges besser.

Schon auf den ersten Blick erkennt man, dass die "Erde" in erster Linie ein vom Wasser bedeckter Planet ist.



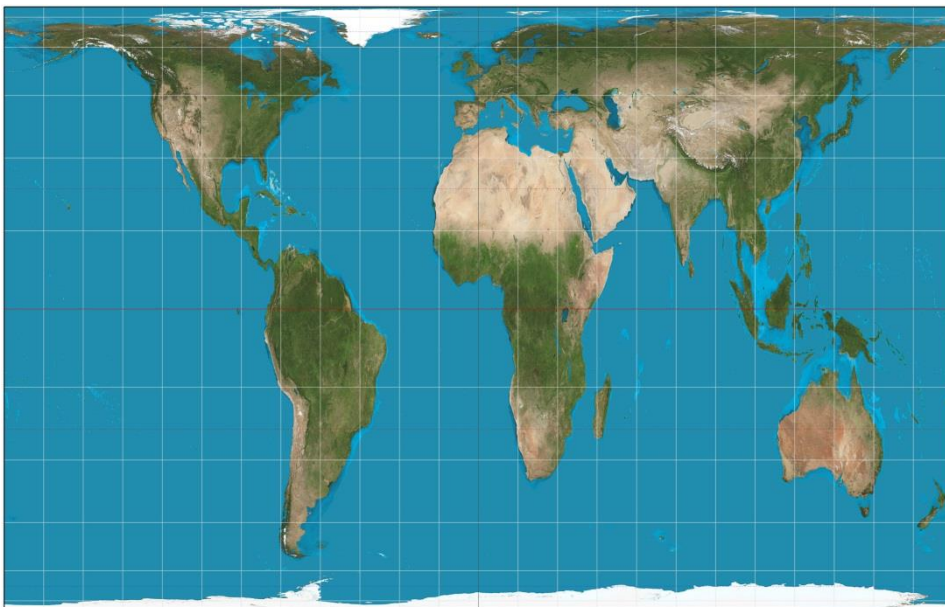
Wasserhalbkugel vom Südpol aus (89% Wasser; 11% Land)



Landhalbkugel vom Nordpol aus (53% Wasser; 47% Land)

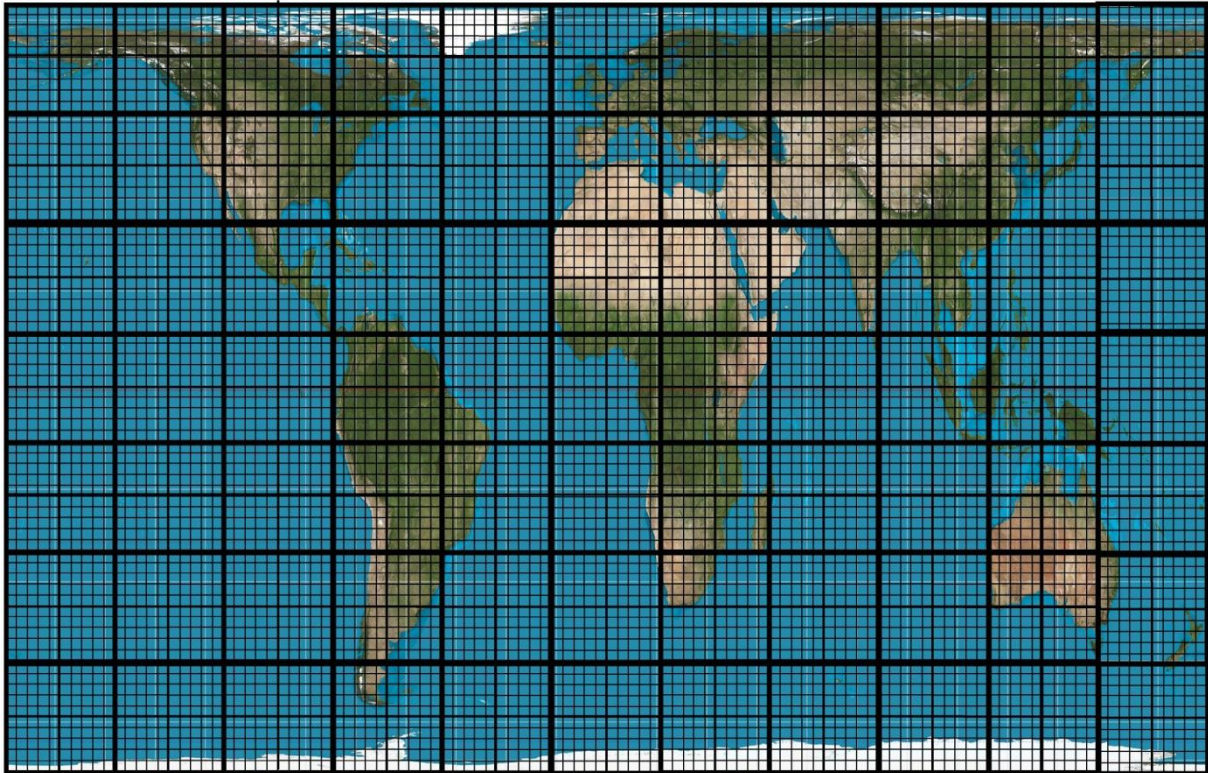
Die vielleicht naheliegendste Methode wäre, die vom Meer bzw. Land bedeckten Felder der beiden Halbkugeln oder des Globus getrennt auszuzählen. In der hier abgebildeten Projektion und auf dem Globus verjüngen sich die durch Längengrade begrenzten Felder zu den Polen hin, die Flächen zwischen den "Maschen" werden - bei gleichem Abstand der Breitenkreise - also immer kleiner.

Das Auszählen gelingt nur mit einer flächentreuen (Zylinder-)Projektion, z.B. nach der Methode von Gall und Peters:



Flächentreue Gall-Peters Projektion der Erde
(Strebe, http://en.wikipedia.org/wiki/Gall-Peters_projection)

Zum Auszählen haben wir der Karte ein Gitterraster hinzugefügt:



Die Wahl einer flächentreuen Projektion besagt, dass jedes Feld die gleiche Fläche überspannt. Die Größe der Felder orientiert sich am Format der Karte sagt nichts über die Größe der (gleichen) Flächen. Das über die Karte gelegte Raster hat 7 x 11 Felder, jedes Feld hat 100 Kästchen. Jedes Feld ist in 4 Unterfelder à 25 Kästchen aufgeteilt.

Wie viele der insgesamt 7700 Kästchen sind "blau", also von Meer bedeckt?

Oder wie viele Felder - vielleicht ist das weniger aufwändig - sind vom Land bedeckt?

Welches ist die beste Methode, die Kästchen auszuzählen?

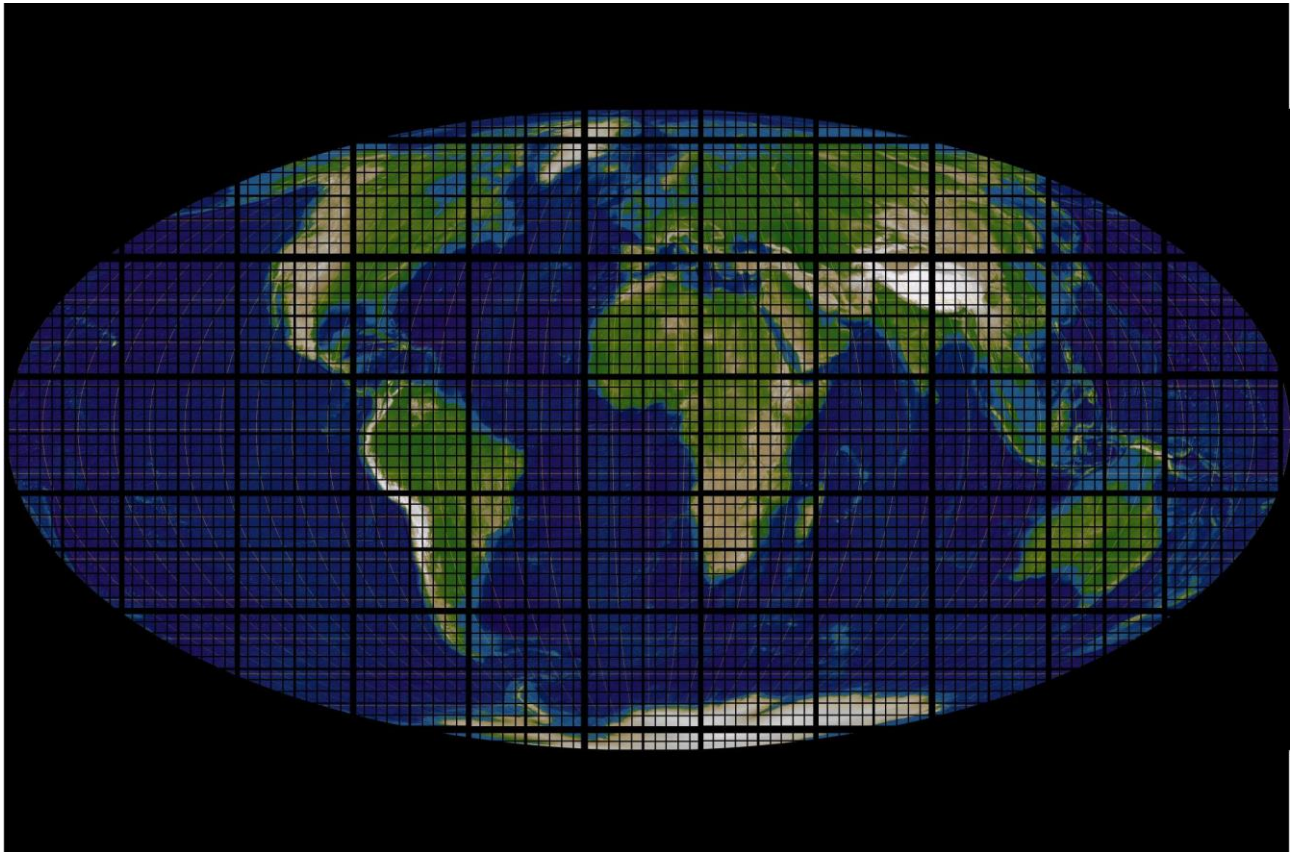
- Es bietet sich an, die Karte in Streifen oder Blöcke zu schneiden und arbeitsteilig vorzugehen.
- Die Abschnitte sollten aufgeklebt werden und das Ergebnis der Zählungen daneben notiert werden.
- Es ist von der Anzahl der Felder her günstiger, die vom Land bedeckten Kästchen zu zählen und ihre Anzahl von der Gesamtzahl abzuziehen.
- Es gibt viele Felder (10 x 10 Kästchen) die vollständig vom Meer bzw. vom Land bedeckt sind. Sie können als Block abgestrichen werden.
- Bei vielen Unterfeldern (5 x 5 Kästchen) ist es ebenso.
- Bei gemischten Feldern muss man die nicht relevanten Kästchen subtrahieren.
- Die ausgezählten Kästchen werden abschließend ins Verhältnis zur Gesamtzahl der Kästchen gesetzt.

$$\frac{\text{Ausgezählte Kästchen (Meer oder Land)}}{\text{Gesamtzahl der Kästchen}} = \frac{\text{Oberfläche der Meere oder des Landes}}{\text{Gesamtoberfläche der Erde}}$$

Das Ergebnis wird natürlich umso genauer ausfallen, je präziser gerade die gemischten Felder ausgezählt werden.

Den Schülern sollte dabei bewusst werden, dass das kleinteilige Raster zu besseren Ergebnissen führt als die relativ grobe Feldaufteilung der Karten von Antarktis und Grönland.

Die Gall-Peters-Projektion hat den Nachteil, dass die Arktis und Antarktis nur teilweise abbildet. Als Alternative käme die ebenfalls flächentreue Mollweide-Projektion in Frage:



"Offizielle" Zahlen zur Größe der Ozeane und Meere

Volumes of the World's Oceans from ETOPO1

	Area ⁺ (km ²)	% Ocean Area	Volume (km ³)	% Ocean Volume	Avg. Depth (m)	Max Depth (m)
Arctic Ocean	15,558,000	4.3	18,750,000	1.4	1205	5567
Atlantic Ocean	85,133,000	23.5	310,410,900	23.3	3646	8486
<i>Baltic Sea</i>	<i>406,000</i>	<i>0.1</i>	<i>20,900</i>	<i>0.0</i>	<i>51</i>	<i>392</i>
<i>Mediterranean</i>	<i>2,967,000</i>	<i>0.8</i>	<i>4,390,000</i>	<i>0.3</i>	<i>1480</i>	<i>5139</i>
<i>North Atlantic</i>	<i>41,490,000</i>	<i>11.5</i>	<i>146,000,000</i>	<i>10.9</i>	<i>3519</i>	<i>8486</i>
<i>South Atlantic</i>	<i>40,270,000</i>	<i>11.1</i>	<i>160,000,000</i>	<i>12.0</i>	<i>3973</i>	<i>8240</i>

	Area ⁺ (km ²)	% Ocean Area	Volume (km ³)	% Ocean Volume	Avg. Depth (m)	Max Depth (m)
Indian Ocean	70,560,000	19.5	264,000,000	19.8	3741	7906
Pacific Ocean	161,760,000	44.7	660,000,000	49.4	4080	10,803
<i>North Pacific</i>	<i>77,010,000</i>	<i>21.3</i>	<i>331,000,000</i>	<i>24.8</i>	<i>4298</i>	<i>10,803[#]</i>
<i>South Pacific</i>	<i>84,750,000</i>	<i>23.4</i>	<i>329,000,000</i>	<i>24.6</i>	<i>3882</i>	<i>10,753</i>
South China Sea	6,963,000	1.9	9,880,000	0.7	1419	7352
Southern Ocean*	21,960,000	6.1	71,800,000	5.4	3270	7075
Total:	361,900,000[#]	100.0	1,335,000,000	100.0	3688	10,803

Die Gesamtfläche aller Ozeane und Meere beträgt danach 361900000 km².

Danach sind rund 71 % der Gesamtoberfläche der Erde von 510000000 km² (Wikipedia) von Meeren bedeckt.

Vorläufige Lösung: So stark könnte das Meer ansteigen...

Wenn den Weltmeeren mit der Oberfläche 361900000 km² ein Volumen 29217900 km³ zugefügt wird erhöht sich ihr Wasserspiegel um

$$\frac{29217900 \text{ km}^3}{361900000 \text{ km}^2} = 0,0807 \text{ km, also um fast 81 m.}$$

Gegen diese Rechnung und diese Zahl könnten sich Einwände erheben.

Wir heben im Folgenden drei davon heraus:

Einwand 1:

"Eis nimmt einen größeren Raum ein als Wasser.

Der Meeresspiegel wird daher nicht so stark steigen."

Eine im Gefrierfach geplatze Mineralwasserflasche kann als Einstieg dienen.

Eis nimmt mehr Platz ein als Wasser. Aber wie viel?

Wie viel Wasser entsteht aus Eis?

Die Schülerinnen und Schüler werden nicht wissen, um welchen Betrag sich Wasser beim Gefrieren ausdehnt.

Welches Experiment wäre geeignet herauszufinden, um welchen Betrag sich Wasser beim Gefrieren ausdehnt?

Das kann man mit nach oben offenen Metallbechern, die nicht platzen können, selbst ausprobieren.

Einzigste Vorgabe: So viel Wasser in den Becher geben, das der Becher nachher bis zum Rand mit Eis gefüllt ist. Füllt man ihn zu einem Fünftel, zur Hälfte oder vielleicht zu einem Dreiviertel mit Wasser? Leider dauert es einige Zeit bis man sehen kann, wer sich am wenigsten verschätzt hat. Bei Zeitmangel auch den umgekehrten Weg nehmen und vorbereitete, mehr oder weniger mit Eis gefüllte Becher aus dem Gefrierfach holen.

Der Eis-Zylinder im Metallbecher wird im warmen Wasserbad aufgetaut.

Während das Eis schmilzt sinkt der Wasserspiegel. Das nährt die Vermutung, dass Wasser "weniger" ist als Eis. Wer den Metallbecher mit dem gefrorenen Eisblock auf die Waage gestellt hat wird feststellen, dass sich die Masse des Eises und später die Masse des Wassers nicht unterscheiden.

Nur das Volumen ist geringer geworden.



Hier wurde die Wassermenge richtig eingeschätzt: Der Metallbecher ist randvoll mit Eis gefüllt. Das Eis bildet einen Zylinder mit 7 cm Durchmesser und 7 cm Höhe. Die Masse ("Gewicht") des Eises beträgt 267,8 g.



Beim Schmelzen sinkt der Wasserspiegel um etwa 6,5 mm. Die Masse bleibt nahezu gleich.

Der Unterschied in der Masse entsteht durch das sich am äußeren Becherrand durch Ausfrieren der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit ("Raureif"). Dieses Wasser ist zum Zeitpunkt des zweiten Bildes verdunstet.

Bei einem Metallbecher mit den Maßen $D = 7 \text{ cm}$ und $H = 7 \text{ cm}$ fällt der Eis- bzw. Wasserspiegel von 7 cm auf etwa 6,5 mm.

Das stimmt mit dem Ausdehnungskoeffizienten beim Gefrieren von Wasser gut überein:

Die Dichte von Eis beträgt $0,9168 \text{ g/cm}^3$, die des Wassers 1 g/cm^3 .

Damit dehnt sich Wasser um den Faktor 0,917 aus. Oder andersherum formuliert:

Wasser nimmt einen um 0,917 geringeren Raum ein als Eis.

$$7 \text{ cm} \times 0,917 = 6,419 \text{ cm}$$

Daraus folgern wir:

$$1 \text{ m}^3 \text{ Eis} = 0,917 \text{ m}^3 \text{ Wasser}$$

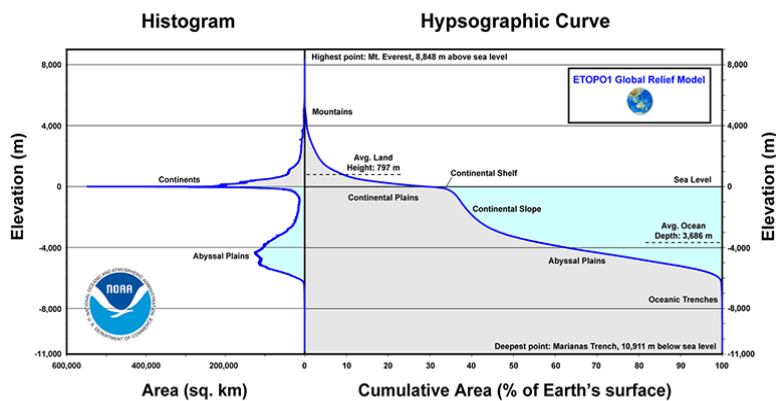
Und:

Das antarktische und grönländische Eisvolumen von **29217900 km³** verwandelt sich in **26792814 km³** Schmelzwasser.

Einwand 2:

"Bei steigendem Meeresspiegel wächst die Meeresoberfläche, weil das Meer dann auf das Land übergreift. Damit fällt der Anstieg geringer aus."

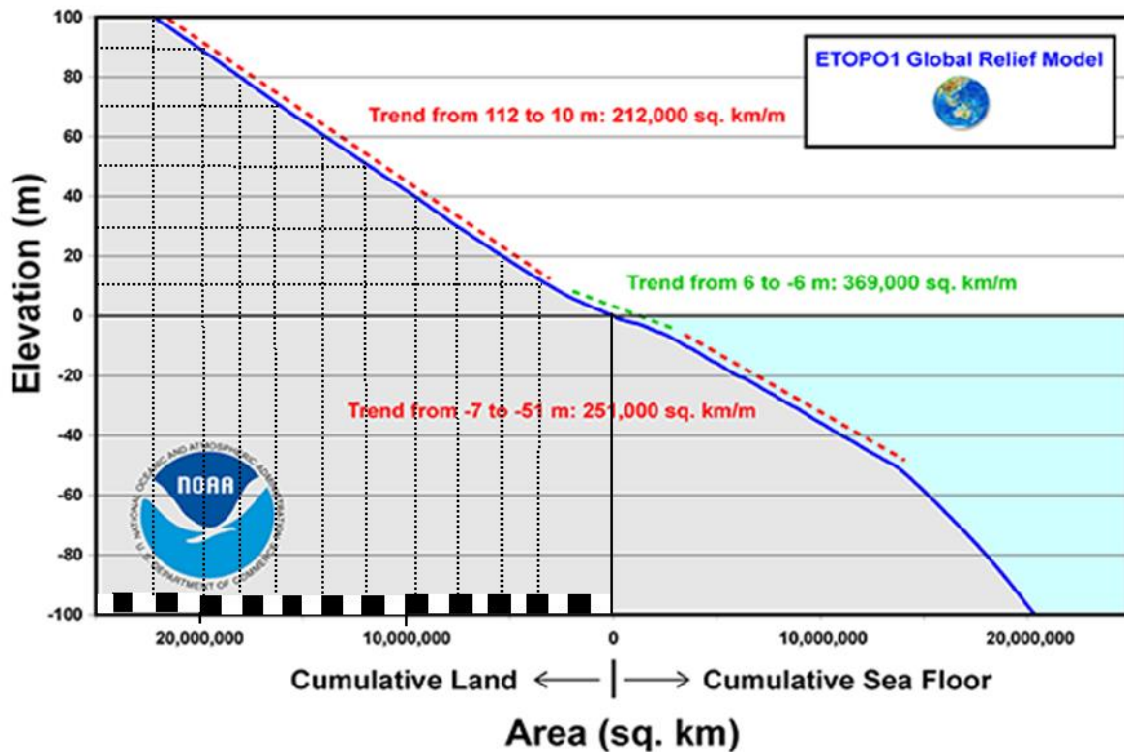
Die prozentuale und flächenmäßige Verteilung der Höhen und Tiefen auf der Erde lässt sich durch die so genannte hypsographische Kurve darstellen. Die im Folgenden wiedergegebenen Grafiken und Daten stammen vom "ETOPO1 Global Relief Model" des National Geophysical Data Centers (NGDC) der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Sie können unter www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html abgerufen werden.



Man erkennt, dass sich ein hoher Prozentsatz der Land-oberfläche auf bzw. geringfügig über dem Meeresniveau befindet. Das Histogramm links zeigt dies besonders deutlich.

Für die vorwiegend küstennahen Flächen zwischen -100 und 100 m Seehöhe stellt das NGDC eine höher auflösende Kurve zur Verfügung. Wir haben sie der leichteren Ablesbarkeit halber mit einem Maßstab und zusätzlichen Linien versehen.

Area within 100 meters of sea level



Wie ist die "Hypsographische Kurve" zu interpretieren?

Welche Schlüsse sind daraus für den "Meeresspiegelanstieg" zu ziehen?

Wenn der Meeresspiegel steigt, stößt er - anders als in Schwimmbecken - in den wenigsten Fällen auf senkrechte Wände. Zwar wird die Flächenausdehnung des Meeres durch natürliche (z.B. Kliffs) oder künstliche Barrieren (z.B. Deiche) beschränkt. Letztlich befinden sich aber doch große Areale der Erdoberfläche nur geringfügig über dem Meeresspiegel, zum Teil liegen sie sogar darunter.

Eine möglicherweise von Schülern geäußerte Vermutung könnte darauf hinauslaufen, dass sich das ansteigende Meer in diese flachen Areale ergießen könnte und dass dadurch der Anstieg geringer ausfallen könnte.

Diese Vermutung lässt sich mit den Daten der NGDC überprüfen und quantifizieren.

- Mehr als 20000000 km² der Landoberfläche liegen laut Kurve weniger als 100 Meter über dem aktuellen Meeresspiegel.
- Die Gesamtfläche aller Ozeane und Meere beträgt (aktuell) 361900000 km² (s.o.)
- Die Gesamtoberfläche des Festlands beträgt (aktuell) 148100000 km² (s.o.)
- Die Gesamtoberfläche der Erde liegt bei 510000000 km² (Wikipedia)

Im Bereich von - 6 bis + 6 m Meereshöhe ("Trend") würde das Meer mit jedem Meter Anstieg eine zusätzliche Fläche von 369000 km² bedecken. Damit verlöre das Land pro Meter Anstieg etwa 0,25% seiner Fläche.

Im Bereich von +10 bis +112 m wären es 212000 km² pro Meter Anstieg. Der Verlust betrüge etwa 0,14%/m.

Würde der Meeresspiegel um 74 m (s.o.) steigen breitet sich die Meeresoberfläche um 17000000 km² aus, d.h. um etwa 4,7%.

Die "neue" Oberfläche betrüge dann 361900000 km² + 17000000 km² = 378900000 km².

Das den Ozeanen hinzugefügte Schmelzwasservolumen von 26792814 km³ verteilt sich auf eine erweiterte Oberfläche:

Erinnern wir uns:

- 1 m³ Eis = 0,917 m³ Wasser
- Das antarktische und grönländische Eisvolumen von 29217900 km³ verwandelt sich in 26792814 km³ Schmelzwasser.

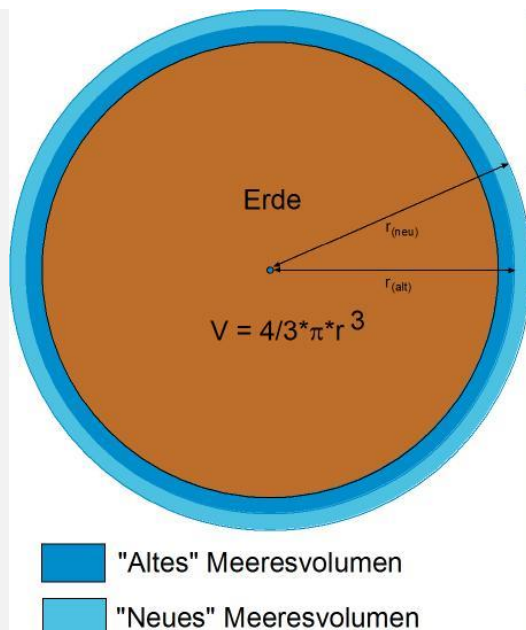
Der Anstieg würde dann statt bei unveränderter Oberfläche $\frac{26792814 \text{ km}^3}{361900000 \text{ km}^2} = 0,07403 \text{ km} \approx 74,0 \text{ m}$

"nur" noch $\frac{26792814 \text{ km}^3}{378900000 \text{ km}^2} = 0,07071 \text{ km} \approx 70,7 \text{ m}$ betragen.

Einwand 3:

"Die Erde ist keine Scheibe sondern eine Kugel:

Mit steigender Höhe hat das Meer immer mehr Platz sich auszubreiten"



Möglicherweise fragen sich die Schüler, ob die Geometrie der "Kugel" Erde nicht Einfluss auf die tatsächliche Höhe des Meeresspiegelanstiegs haben könnte.

Die Grafik links könnte sie als Impuls auf diese Gedanken bringen:

- Das Volumen des dunkelblauen Rings scheint kleiner zu sein als die des hellblauen.
- Je größer der Radius, desto größer der Umfang und möglicherweise auch das Volumen der Kugelschichten.

Kann es sein, dass der Anstieg des Meeresspiegels mit steigendem Abstand vom Zentrum der Erde immer kleiner ausfällt weil sich das zugefügte Schmelzwasser auf ein immer größeres Volumen verteilt?

Mit einigen Formeln zur Kugelgeometrie, etwas Algebra und einem Taschenrechner lässt sich das durchrechnen. Der Einfachheit gehen wir zunächst von einer vollständig von einem ruhigen Meer bedeckten Erdkugel aus.

Das Volumen einer Kugel ist $V = \frac{4}{3} \pi r^3$

Der Erdradius sei 6371 km (mittlerer Erdradius, gerundet, Wikipedia)

Volumen der Kugel mit dem Radius r_E :

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot 6371^3 = 1,08321 \cdot 10^{11} \text{ km}^3$$

Das hinzugefügte durch Schmelzwasser- Volumen beträgt 26792814 km^3 .

Volumen (alt), (braune Kugel + dunkelblaue Kugelschale):

$$\rightarrow 1,08321 \cdot 10^{11} \text{ km}^3$$

Volumen (neu), (braune Kugel + dunkelblaue Kugelschale + hellblaue Kugelschale):

$$\rightarrow 1,08321 \cdot 10^{11} \text{ km}^3 + 26792814 \text{ km}^3 = 1,08323 \cdot 10^{11} \text{ km}^3$$

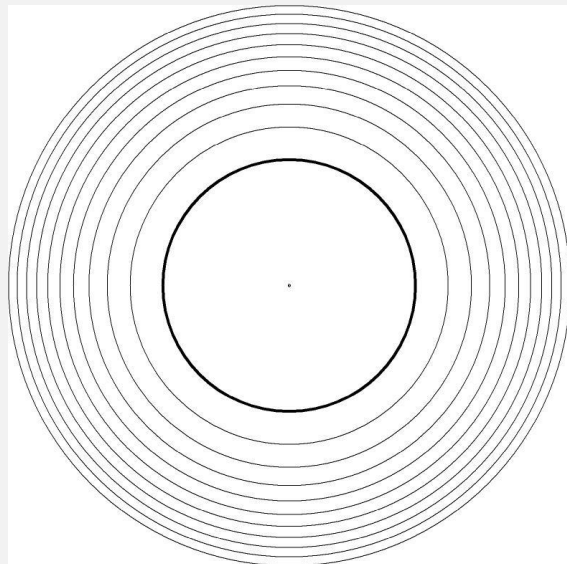
Der Meeresspiegelanstieg ist die Differenz der "neuen" und der "alten" Meeresspiegelhöhe, also "neuer" Radius minus "alten" Radius.

Um den durch das zugefügte Schmelzwasservolumen hervorgerufenen "neuen" Radius berechnen zu können muss ich Formel nach r umstellen:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}$$

Daraus folgt ganz allgemein:

Kugelschalen mit gleichem Volumen werden immer "dünner"...



Der links abgebildete Schnitt durch eine Kugel wird von 10 konzentrischen Schalen umgeben. Jede dieser Kugelschalen hat das gleiche Volumen wie die Kugel im Zentrum. Das Volumen bzw. das Mehrfache des Volumens sei 1,2,3...

Vergleiche

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1V}{4\pi}}, r_2 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 2V}{4\pi}}, r_3 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 3V}{4\pi}} \dots$$

und berechne

$$r_2 - r_1, r_3 - r_2, r_4 - r_3 \dots$$

Wenn wir die bereits errechneten Zahlen (V_{Erde} , $V_{\text{Schmelzwasser}}$) einsetzen erhalten wir:

$$r_{(\text{neu})} = \sqrt[3]{\frac{3(V_{\text{Erde}} + V_{\text{Schmelzwasser}})}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3(1,08321 \cdot 10^{11} \text{ km}^3 + 26792814 \text{ km}^3)}{4\pi}} =$$

$$r_{(\text{neu})} = \sqrt[3]{\frac{3(1,08323 \cdot 10^{11} \text{ km}^3)}{4\pi}} = 6371,045 \text{ km}$$

Daraus folgt für den "Meeresspiegelanstieg" einer vollständig von Wasser bedeckten Erde:

$$r_{(\text{neu})} - r_{(\text{alt})} = 6371,045 \text{ km} - 6371,000 = 0,045 \text{ km} = 45 \text{ m}$$

Die Erde ist aber nur zu 71% mit Wasser bedeckt.

Das Schmelzwasser verteilt sich also auf eine kleinere Fläche!

$$45 \text{ m} / 0,71 = 63,4 \text{ m}$$

Die Vermutung hat sich also bestätigt:

Der Meeresspiegelanstieg fällt aufgrund der Kugelgeometrie der Erde geringer aus als oben berechnet.

Damit verringert sich auch die zusätzlich vom Meer bedeckte Landfläche (siehe "Einwand 1") was wiederum einen noch etwas geringeren Anstieg zur Folge hätte.

Dies sind selbstverständlich nur "Rechenspiele" die das Problem in keiner Weise herunterspielen sollen.

Schmilzt das antarktische und grönländische Eis, steht nicht nur Norddeutschland vollständig unter Wasser.

Ungenau, aber INQUIRE-betont: Die "pi-mal-Daumen"- Methode (2. Teil)

Kann man mit dem Hinweis auf die Dicke des Eises, einem Globus, zwei Formeln und einem Taschenrechner zu ähnlichen Ergebnissen gelangen? Machen wir den Versuch...

Unser Globus hat einen aufgedruckten Maßstab, z.B. 1:42500000. Das bedeutet, ein Zentimeter auf dem Globus entspricht einer Strecke von 42500000 cm oder 425 km.

Erste Frage: Wie groß sind die Eisflächen?

Ein Quadratzentimeter entspricht einer Fläche von 425 km x 425 km = 180625 km².

Wenn wir eine dünne Folie auf Grönland bzw. die Antarktis legen, die Umrisse abpausen und das Ergebnis auf Millimeterpapier legen erhalten wir ganz grob (!) diese Ergebnisse:

	Oberfläche Globus	Geschätzte Oberfläche	Tatsächliche Oberfläche
Grönland	etwa 9 cm ²	1625625 km ²	1710000 km ²
Antarktis	etwa 75 cm ²	13546875 km ²	13856000 km ²
Zusammen		15172500 km ²	15566000 km ²

Besser geeignet als ein Globus ist übrigens eine aufblasbare Weltkugel: Ihr fehlt die beim Übertragen des Umrisses der Antarktis störende Erdachse.

Die geschätzten und tatsächlichen Werte weichen hier nicht allzu stark voneinander ab. Je nachdem, wie viel oder wenig Mühe man sich damit macht, die Umrisse nachzuzeichnen und die Zahl der Kästchen genau zu erfassen, werden wir zu genaueren oder ungenaueren Ergebnissen kommen.

Zweite Frage: Wie viel schmelzendes Eis wird ins Meer fließen?

Das Eis Grönlands und der Antarktis soll "fast zweitausend Meter dick" sein. Belassen wir es der Einfachheit halber bei durchschnittlich 2 km Eismächtigkeit. Dann haben wir es mit einem Eisvolumen von

$$15172500 \text{ km}^2 \times 2 \text{ km} = 30345000 \text{ km}^3 \text{ zu tun.}$$

(Tatsächlich sind es "nur" 29217900 km^3 , aber das Eis ist ja auch nur "fast zweitausend Meter" dick.)

Dritte Frage: Wie groß ist das Meer?

Die blauen Flächen auf dem Globus mit der Millimeterpapier zu erfassen wäre zu aufwändig.

Viel einfacher ist es, sich das Verhältnis von Wasser- und Landflächen auf der Erde anzusehen und dieses später in die noch zu berechnende Gesamtoberfläche der Erde eingehen zu lassen.

Wenn jeder "Forscher" ein Votum abgibt wird der Durchschnitt zwischen 6 : 4 und 8 : 2 liegen.

(Tatsächlich sind es 7,1 : 2,9)

Das Verhältnis sagt uns aber noch nicht, welche Fläche die Meere einnehmen. Dazu müssen wir erst einmal die Oberfläche der ganzen Erde ermitteln.

Vierte Frage: Wie groß ist die Erde?

Ein Faden, wie ein Gürtel entlang des Äquators um unseren Globus gelegt ist 94,1 cm lang.

Der Erdumfang beträgt also $94,1 \times 425 \text{ km} = 40000 \text{ km}$.

Jetzt kommt die erste Formel ins Spiel: "Umfang = $\pi \times$ Durchmesser". Durch Umstellen erhalten wir

$$\text{Als Erddurchmesser: } U/\pi = 40000 \text{ km}/3,14... = 12732,4 \text{ km}$$

Mit der zweiten Formel "Fläche = $\pi \times$ Durchmesser hoch zwei" und Einsetzen des Durchmessers erhalten wir die Erdoberfläche: $3,14... \times 12732,4^2 = 509295817,9 \text{ km}^2$.

Das ist übrigens auch der tatsächliche Wert den man erreicht, wenn man den Äquatorumfang des Globus genau ausmisst.

Fünfte Frage: Wie groß ist das Meer?

Je nachdem für welches Verhältnis von Wasser- zu Landflächen wir uns entschieden haben erhalten wir kleinere oder größere Flächen:

Verhältnis Wasserflächen/Landflächen		Meeresoberfläche
6:4	$509295817,9 \text{ km}^2 \times 0,6 =$	$305577490,7 \text{ km}^2$
7:3	$509295817,9 \text{ km}^2 \times 0,7 =$	$356507072,5 \text{ km}^2$
8:2	$509295817,9 \text{ km}^2 \times 0,8 =$	$407436654,3 \text{ km}^2$

Sechste Frage: Wie hoch steigt der Meeresspiegel?

Wenn man der Einfachheit darüber hinwegsieht, dass aus dem Eis hervorgehende Schmelzwasser ein geringeres Volumen hat als das oben berechnete Eisvolumen ist der Rest der Rechnung ganz einfach:

Je nachdem, welche Meeresoberfläche man errechnet hat folgt daraus:

Verhältnis Wasserflächen/Landflächen			Meeresoberfläche
6:4	30345000 km ³ /	305577490,7 km ² =	0,0993 km = 99,3 m
7:3	30345000 km ³ /	356507072,5 km ² =	0,0851 km = 85,1 m
8:2	30345000 km ³ /	407436654,3 km ² =	0,0745 km = 74,5 m

Die Spanne der Ergebnisse ist groß, aber es ist eben auch nur die "Pi-mal-Daumen"-Methode auf die Ihre Schülerinnen und Schüler mit Globus und Taschenrechner vielleicht sogar selbst kommen werden. Hierbei steht nicht die Genauigkeit des Ergebnisses, sondern die Methode im Vordergrund. Und Größenordnungsmäßig kann sich auch das Ergebnis sehen lassen.

Meeresspiegelanstieg unter verschiedenen Bedingungen mit EXCEL berechnen

Ein Excel-Programm auf unserer Webseite www.schulbiologiezentrum.info ermöglicht ihnen, den Meeresspiegelanstieg unter Annahme folgender, im Programm jeweils gelb unterlegten Variablen zu ermitteln:

- Erdumfang
- Fläche Inlandeis
- Dicke Inlandeis
- Verhältnis Wasser-/Landoberfläche
- Abschmelzgrad %

Die Verwendung dieses Programms z.B. in einer Lernstation ermöglicht es, dass sich die Schüler nur auf das Ausmessen des Äquators und der Gletscherflächen beschränken können. Zusätzlich müssen sie die Dicke der Eiskappen (z.B. "fast zweitausend Meter" bei der "Pi-mal-Daumen"-Methode) und den Abschmelzgrad (Eisverlust in %) eingeben. Das zeitraubende Durchrechnen mit dem Taschenrechner entfällt dann.

EXCEL ermittelt dann die Erdoberfläche, die Eis- und Schmelzwasservolumina und den Meeresspiegelanstieg in Abhängigkeit vom Verhältnis der globalen Wasser- und Landoberfläche.

Ganz unten im Excel-Blatt zeigt eine Kurvenschar den Zusammenhang zwischen Wasser-/Land-Ratio und dem Eisverlust.

Die Eingabefelder sind im Gegensatz zu allen anderen Feldern nicht geschützt.

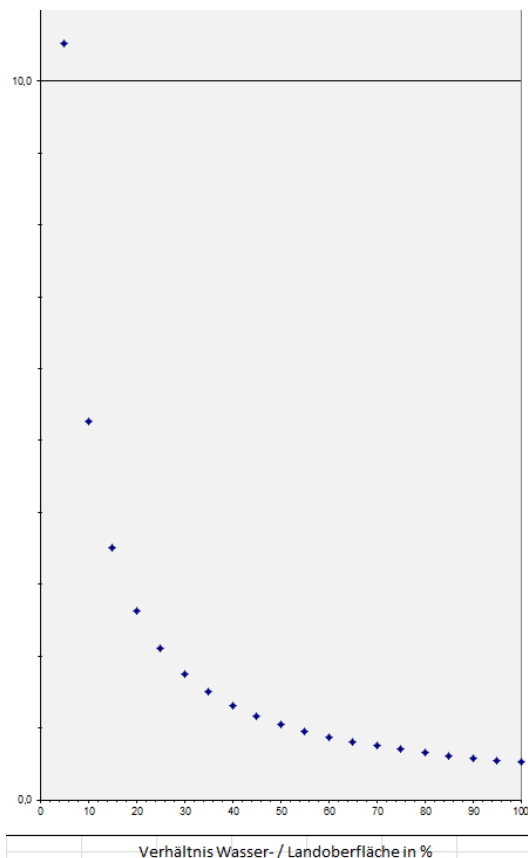
Die folgenden Ergebnisse und Kurven entstanden unter Verwendung der "offiziellen" Werte für Flächen und Eismächtigkeit.

Haben wir bisher nur betrachtet, was geschehen würde wenn das Inlandeis Grönlands und der Antarktis vollständig abschmilzt so kann man sich hier auch einmal ansehen, welche Folgen ein teilweises Verschwinden hätte.

Dieses wird in den folgenden drei Abbildungen für einen Eisverlust von 1% exemplarisch dargestellt.

	A	B	C	D
34	Umfang (Erde) $\rightarrow U_{Erde}$		40000	km
35				
36	Durchmesser (Erde) $\rightarrow d_{Erde} = U_{Erde}/\pi$		12732	km
37				
38	Radius (Erde) $\rightarrow r_{Erde}/2$		6366	km
39				
40	Oberfläche (Erde) $\rightarrow A_{Erde} = \pi \cdot d^2$		509295818	km ²
41				
42				
43	Grönland (Eis)			
44				
45	Fläche A_{Eis}		1710000	km ²
46				
47	durchschnittliche Dicke h_{Eis}		1,666	km
48				
49	Volumen $\rightarrow V_{Eis} = A_{Eis} \cdot h_{Eis}$		2848860	km ³
50				
51	Grad des Abschmelzens X		1	%
52				
53	Volumen schmelzendes Eis $\rightarrow V_{Schmelze} = V_{Eis} \cdot (X/100)$		28489	km ³
54				
55	Volumen Wasser (Eis*0,917) $\rightarrow V_{Wasser} = V_{Schmelze} \cdot 0,917$		26124	km ³
56				
57	Antarktis (Eis)			
58				
59	Fläche A_{Eis}		13856000	km ²
60				
61	Dicke h_{Eis}		1,903	km
62				
63	Volumen $\rightarrow V_{Eis} = A_{Eis} \cdot h_{Eis}$		26367968	km ³
64				
65	Grad des Abschmelzens X		1	%
66				
67	Volumen schmelzendes Eis $\rightarrow V_{Schmelze} = V_{Eis} \cdot (X/100)$		263680	km ³
68				
69	Volumen Wasser (Eis*0,917) $\rightarrow V_{Wasser} = V_{Schmelze} \cdot 0,917$		241794	km ³
70				
71				
72	Gesamtes Schmelzwasservolumen		267918	km ³

%	Meeresspiegelanstieg
5	10,5 m
10	5,3 m
15	3,5 m
20	2,6 m
25	2,1 m
30	1,8 m
35	1,5 m
40	1,3 m
45	1,2 m
50	1,1 m
55	1,0 m
60	0,9 m
65	0,8 m
70	0,8 m
75	0,7 m
80	0,7 m
85	0,6 m
90	0,6 m
95	0,6 m
100	0,5 m



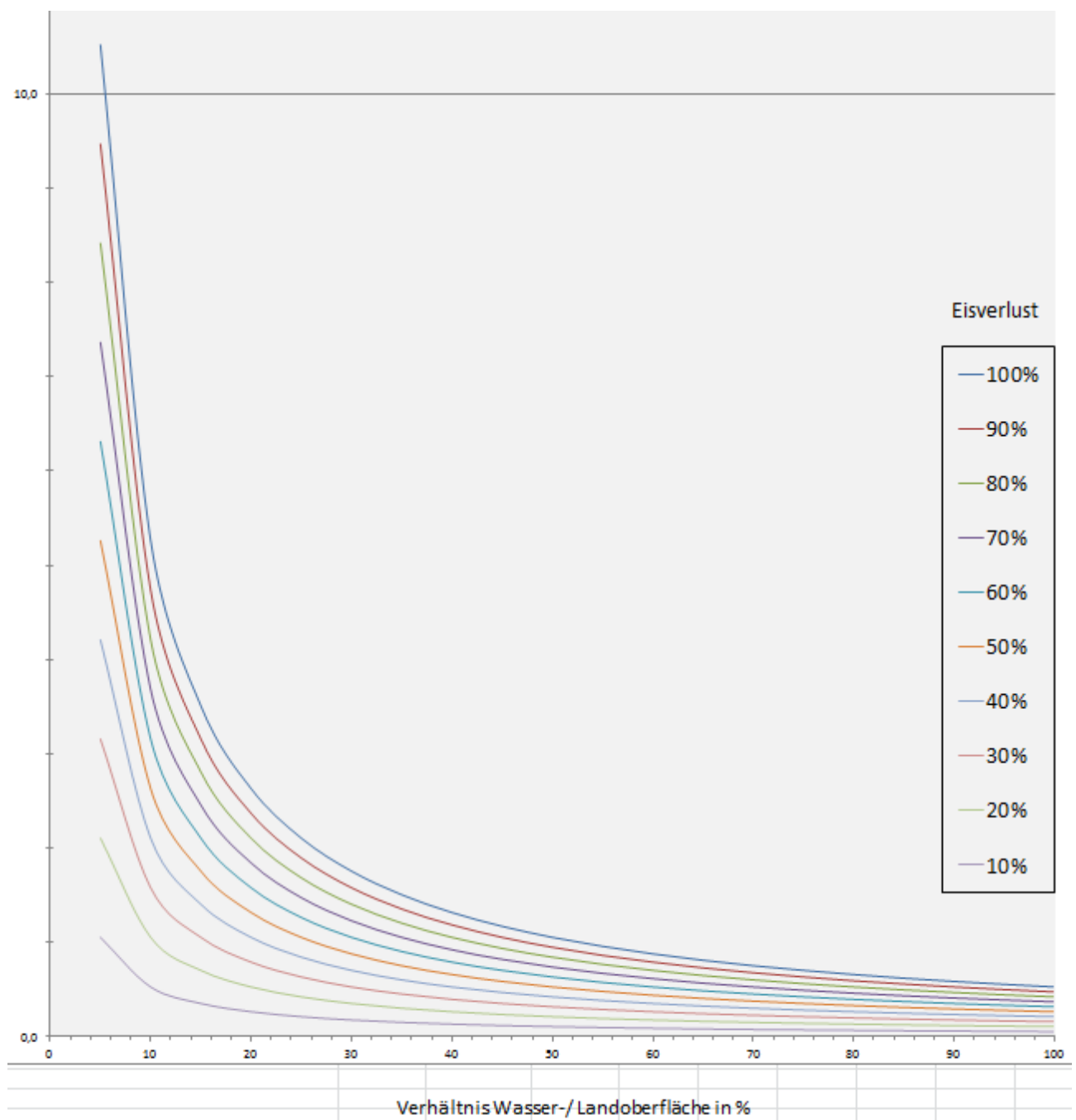
Ein 1%iger Eisverlust hat unter der Annahme eines 70%igen Flächenanteils der Meere einen Anstieg von etwa 0,8m zur Folge.

Die folgenden als Kurvenschar dargestellten Ergebnisse zeigen den Meeresspiegelanstieg in Abhängigkeit vom geschätzten Wasser-/Land-Flächenverhältnis und des Eisverlustes (%).

Abzulesen ist beispielsweise, dass schon ein 10%iger Eisverlust bei einem Wasser-/Land Flächenverhältnis von 7:3 einen Anstieg von fast 10m zur Folge hätte.

Die Grafik zeigt aber auch, dass auch um das tatsächliche Verhältnis (71% : 29%) streuende Schätzwerte der "Pi-mal-Daumen"-Methode größenordnungsmäßig nicht so stark ins Gewicht fallen. Das gilt besonders für relativ geringe Eisverluste (flacher Kurvenverlauf).

Annäherungsweise lässt sich auch der bei größerer Ausdehnung der Wasserfläche gemilderte Anstieg erkennen. Dieser Zusammenhang wird tabellarisch als auch in Form einer Kurve dargestellt.



Fazit: Wie hoch würde das Wasser bei uns steigen?

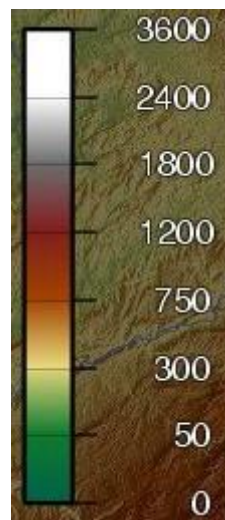
Wie hoch liegt Hannover eigentlich über dem Meer?

Sind wir auf der "sicheren" Seite oder gehen wir unter wie das legendäre Rungholt?

Bei "Wikipedia" liegt Hannover 55 m über NHN (Normalhöhennull). Der Lindener Berg erhebt sich mit 89 m über NHN etwa 34 m über das durchschnittliche Niveau der Stadt. Der Kronsberg ist 118 m "hoch".

Große Areale Norddeutschlands liegen tiefer. Herausragende Inseln werden die geologisch jungen Moränen der letzten Eiszeit im Osten Schleswig-Holsteins und im Norden Mecklenburg-Vorpommerns sein. Aber auch die Überbleibsel der vorletzten (Saale-)Eiszeit mit z.B. dem Wilseder Berg. Der Segeberger "Kalkberg", ein Gipshut aus der Zechsteinzeit und bekannt durch die Karl-May-Festspiele ist 91 m hoch. Vielleicht wird er das "Weiße Kliff" heißen. Der Lüneburger Kalkberg (auch er besteht nicht aus Kalk, sondern aus Gips) ist nur 56 m hoch. Auf Seekarten wird vor dieser Untiefe gewarnt werden. Es ist spannend, die verstreuten Höhen Norddeutschlands im Atlas aufzusuchen und sich im Kopf eine Karte der zukünftigen Inseln zurechtzulegen.

Wenn die Deiche an der schleswig-holsteinischen Westküste überspült und die letzten Geestkerne der Nordfriesischen Inseln zu Sandbänken geworden sind wird das Meer von Westen nach Osten vorstoßend die ostholsteinischen Moränen in eine lange Kliff- und Ausgleichsküste verwandeln. Der heute 167 m hohe Bungsberg wird vielleicht der Kern einer langen, an Sylt erinnernden Insel sein, mit einem steilen Kliff und langen Stränden aus ihm herausgewaschenem Sand.



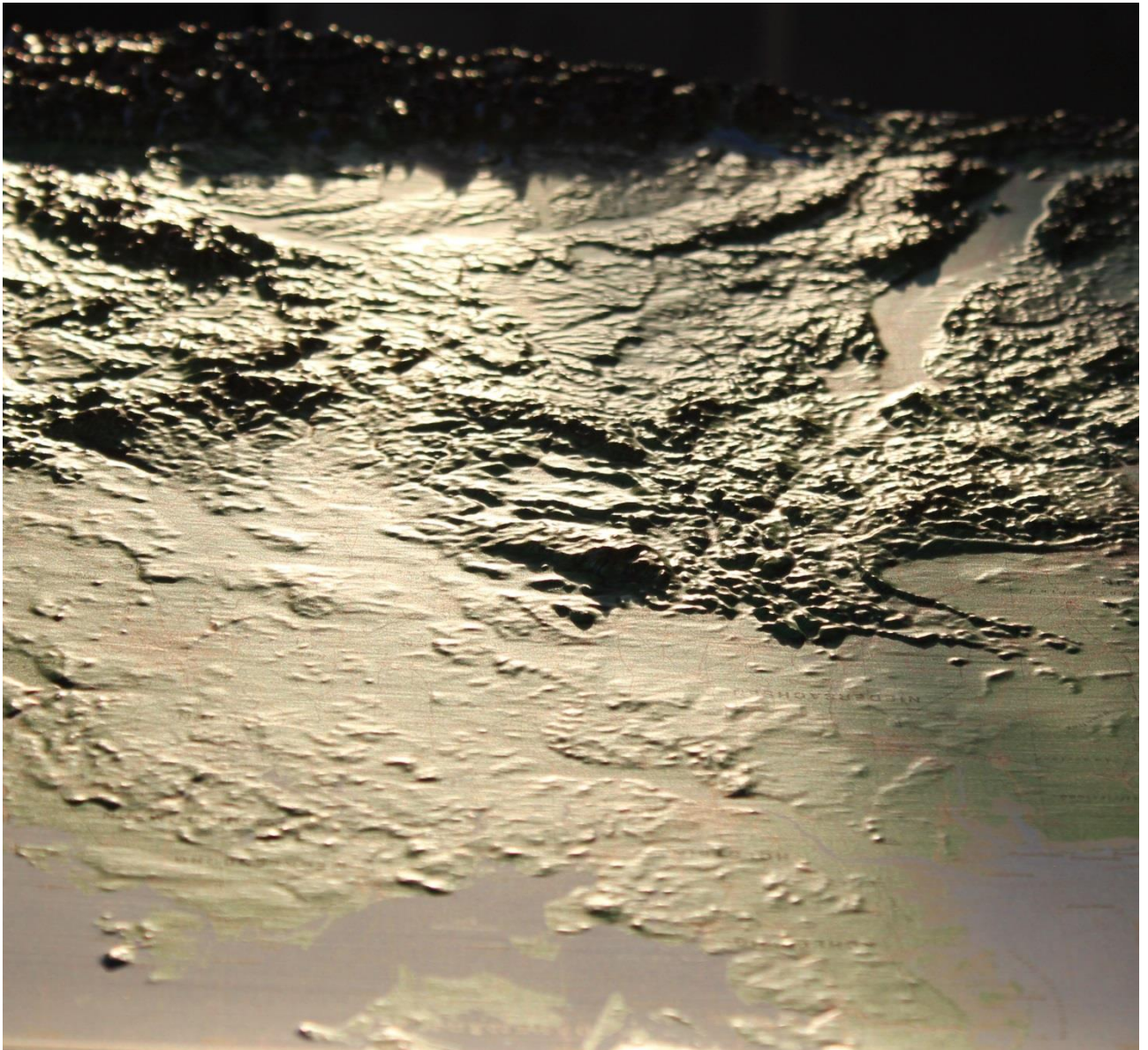
<http://www.mygeo.info/>

Kann man die Überflutung Deutschlands mit einer Reliefkarte simulieren?

Eine von "GEORELIEF" herausgegebene dreidimensionale Karte Deutschlands lässt sich, exakt waagrecht liegend "planmäßig" überfluten. Die 3D-Karte hat einen Maßstab 1:2400000 und eine Überhöhung von 10. 1 cm auf der Karte entspricht einer horizontalen Strecke von 240000 cm in der Natur, also 24 km (1 mm = 2400 m). In der Vertikalen gilt der überhöhte Maßstab von 1 mm = 240 m. Würde der Meeresspiegel um 80 m ansteigen, wären das auf der GEORELIEF- Karte 1/3 mm. Bei der großen GEORELIEF- Variante mit dem Maßstab 1:1200000 und dem Überhöhungsfaktor 7 entspricht 1 mm = 1200 m in der Horizontalen oder 171 m in der Vertikalen.



Schon auf dem Titelbild:



Die Reliefkarte Deutschlands in schräger Aufsicht gegen die Abendsonne fotografiert: Hier wird die Dreidimensionalität des Raumes besonders deutlich.

Im Vordergrund die heutige Ostsee (links) und Teile der Deutschen Bucht.

Links oben die Alpen, rechts oben der Oberrheingraben mit Schwarzwald (links) und Vogesen (rechts)

Gut erkennbar ist in dieser Perspektive und durch die reflektierende Kartenoberfläche, dass große Teile Norddeutschlands flach sind.

Sie würden bei einem Meeresspiegelanstieg von rund 70 m überspült.

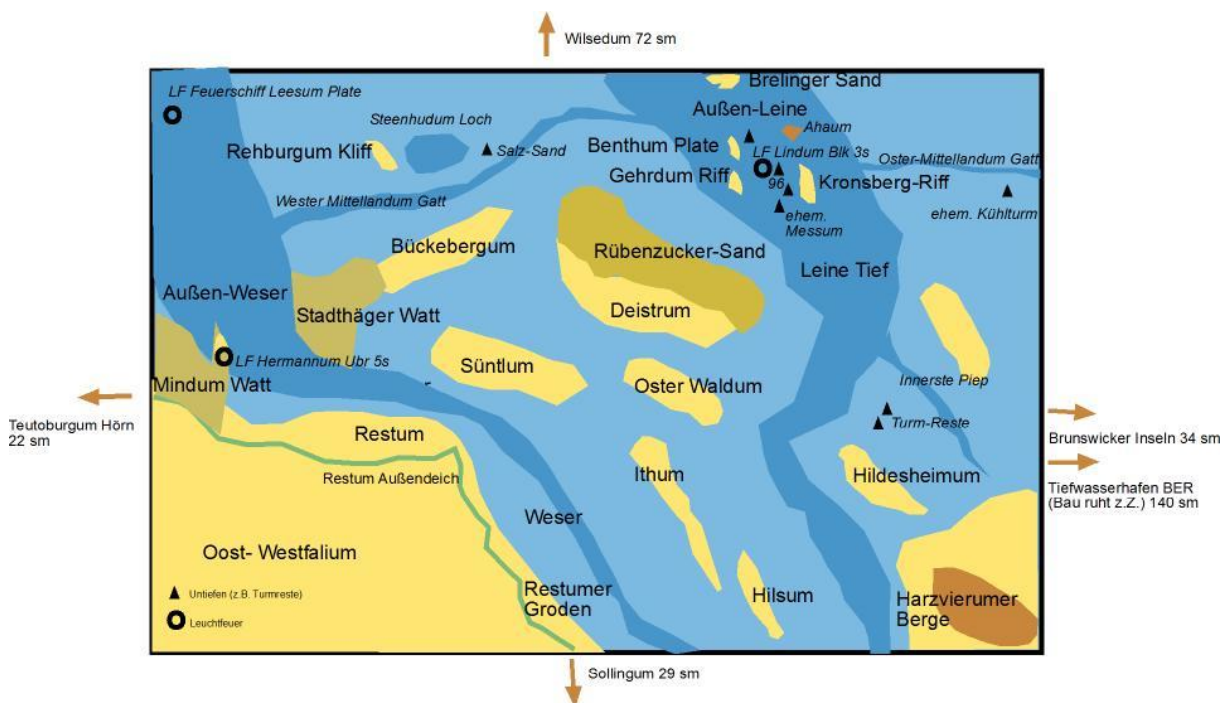
Die Nordsee würde an die heutigen Mittelgebirge grenzen: In der Bildmitte von links das Erzgebirge, Fichtelberg, Thüringer Wald, Harz, Wesergebirge, Wiehengebirge und die Münsteraner Bucht mit dem südlich anschließenden Rothaargebirge.

Zukunftsvision "Südfriesische Inseln"?

Eine als Impuls zum Weiterforschen gedachte "Karte" der dann vielleicht am Nordrand des verbleibenden Deutschlands liegenden "Südfriesischen Inseln" ist eine gewagte Prognose und in der konkreten Form natürlich nur Karikatur. Wer aber mal mit einer Karte in der Hand am Gipfelkreuz des 118 m hohen Kronsbergs auf Hannover herabgesehen hat weiß:

Irgendwann könnte man hier vielleicht auf einer Insel stehen und am Strand unterhalb eines aus Kreidesedimenten aufgebauten "Weißen Kliffs" entlangwandern können während die Reste der versunkenen Stadt für die Schifffahrt gefährliche Untiefen darstellen.

Die Nord-, West- und Ostfriesischen Inseln wären wie auch große Teile hinter den Deichen von der Nordsee verschluckt. Nördlich der aus den Resten der Mittelgebirge entstandenen, von steilen Kliffs gesäumten "Südfriesischen Inseln" lägen einige verbliebene Moränenrümpfe der Eiszeiten auf denen vielleicht, wie heute auf den Orkney- oder Shetland-Inseln, halbwilde Schafe grasen und an die alten Heidschnuckenherden erinnern....



Ingo Mennerich,
Schulbiologiezentrum Hannover und Schul-
LAB/IGS Mühlenberg,
November 2014