

System Erde-Mensch Zusammenfassung

Inhalt

Einführung in die Erdsystemforschung.....	6
Erdsystemforschung.....	6
Warum Erdsystemforschung?	7
Erdsystemforschung und planetares Denken.....	7
Nationale Verantwortlichkeiten für den Klimawandel: Kartogramme	8
Vier Dimensionen der Nachhaltigkeit	8
Sekundäre Dimensionen der Nachhaltigkeit.....	9
Was braucht Erdsystemforschung?	9
Beispiel für Erdsystemforschung: Anstieg Meeresspiegel	10
Water GAP – Das globale Süßwassermodell	10
Globale Entwässerungsrichtungskarte DDM30	11
Grundlagen der Erdsystemmodellierung.....	11
Was ist ein Erdsystem-Modell (ESM)?	11
Grundprinzipien:.....	12
Ziel eines ESM:	12
Komplexität eines ESM:	12
Aufbau eines Erdsystem-Modells	12
1. Atmosphärisches Modell	13
2. Ozean-Modell	13
3. Land-Oberflächenmodell.....	13
4. Kryosphären-Modell	13
5. Kopplungskonzepte zwischen den Modellen	13
Warum braucht man Erdsystem-Modelle?.....	14
Anthropogene Einflüsse (Forcing) in Erdsystem-Modellen	14
1. Strahlungsantriebe ("Forcing").....	14
2. Ozonloch und Atmosphärenchemie	14
3. Aerosole und ihr Einfluss auf das Klima.....	14
4. Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem.....	15
5. Meereis und Albedo-Effekte	15
Vertrauenswürdigkeit von Klimamodellen.....	15
Zusammenfassung.....	15
Auswirkung von Klimaveränderungen auf unsere Wassersysteme.....	15
Urmia See.....	16

Gründe für den Rückgang	16
Modellierung	16
Fallbeispiel Rafsanjan	17
Modellierung	17
Landwirtschaftliche Wassernutzung in Südasien	17
Bangladesch – Herausforderungen der Wassernutzung	18
Hessisches Ried	18
Modellierung & Forschung:	18
Künstliche Grundwasseranreicherung	19
Untersuchung der natürlichen Schadstoffreinigung	19
Tankversuche	20
Naturkatastrophen im Anthropozän	20
„Vulkan: Vesuv von Wörlitz“	20
Naturkatastrophen – Zwischen Faszination und Bedrohung	20
Historische Perspektive auf Naturkatastrophen und Naturschutz	21
Zunahme extremer Wetterereignisse	21
Staatliche Kontrolle über Katastrophenschutz seit 1800	21
Naturgefahren in Deutschland	21
Aberglaube und Schutzmechanismen gegen Naturkatastrophen	22
Wetterläuten (nicht Sturmläuten!)	22
Hagel- und Wetterschießen	22
Moderne Hagelabwehr in Rosenheim	22
Hagelversicherung	22
Technische Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren	22
Blitzableiter (Benjamin Franklin)	22
Deichbau und Uferschutz	22
Lawinenverbauung	23
Flussbau und Flussbegradigung	23
Katastrophentourismus und Kommerzialisierung von Katastrophen	23
System Boden als wichtiger Akteur in der Erdsystemforschung	24
Was ist Boden?	25
Kohlenstoffkreislauf – Die Rolle des Bodens	25
Bodenhorizonte – Aufbau eines Bodens	26
Faktoren der Bodenbildung – Dokutschajew-Formel (1883)	27
Definitionen von Boden	27
Welche Funktionen hat der Boden für uns und das Erdsystem?	27

Boden als Ökosystem, Kohlenstoffspeicher und Umweltfaktor	28
Boden als Kohlenstoffspeicher	29
Boden als Schadstofffilter	29
Archivfunktion des Bodens	30
Ökologische und ökonomische Bodenfunktionen.....	30
Bedrohungen für den Boden	30
1. Bodenversiegelung.....	30
2. Bodenverdichtung	30
3. Bodenerosion	31
4. Chemische Belastung	31
Ackerzahl	31
Forschung für eine Erde im Wandel – von Erdbeben, schwarzen Schwänen und planetarer Bewohnbarkeit	31
Erster Block	31
Erdbeben und Plattentektonik.....	31
Erdbeben und Mechanik der Plattenbewegung.....	32
Geologische Spuren der Plattentektonik	33
Zusammenhang zwischen Plattentektonik und Leben.....	33
Langfristige Klimaregulierung durch den Kohlenstoffkreislauf.....	33
Zweiter Block - Erdsystemwissenschaft	35
Das Erdsystem als komplexes System	35
Dritter Block – Naturkatastrophen und gesellschaftliche Resilienz	37
Wahrscheinlichkeit und Schäden von Extremereignissen	37
Das Erdsystem als komplexes System	37
Wichtige Herausforderungen	38
Fazit	38
Wechselwirkung von Biodiversität, Technik und Mensch	38
Klimawandel – Bedrohung und Szenarien	38
Künftige Klimaentwicklung hängt von Emissionen ab	38
Vergleich mit historischen Klimaveränderungen	38
Kippunkte im Klimasystem	38
Biodiversitätskrise – Das 6. Massenaussterben	39
Wälder und Klimawandel	39
Das „neue Waldsterben“	39
Zukünftige Waldszenarien	39
Waldbrände.....	39

Kohlenstoffkreislauf & natürliche Senken	40
Moorlandschaften	40
Bedrohung durch Entwaldung	40
Kritische Betrachtung von Geoengineering & CO ₂ -Entnahme	40
Bioenergie mit CO ₂ -Speicherung (BECCS)	41
Baumpflanzungen.....	41
Fazit: Handlungsmöglichkeiten & Ausblick	41
Positive Entwicklungen.....	41
Schlussfolgerungen	42
Geoarchive – Umweltdaten aus der Vergangenheit	42
Was sind Geoarchive?.....	42
Erschließung von Geoarchiven	42
Anforderungen an ein Archiv	42
Vier mögliche Archivtypen:	43
Lesen eines Geoarchivs	43
Prähistorischer CO ₂ -Gehalt	43
Was sind gute Wachstumsbedingungen?.....	43
Altersbestimmung von Geoarchiven.....	44
Geoarchive und wichtige Erkenntnisse zur Dynamik des Erdsystems.....	44
Marine Paläoklimakurve	45
Geoarchiv-Forschung an der TU Darmstadt.....	45
Fazit	46
Aerosole im Erdsystem und die Klimaauswirkungen	46
Wo kommen Aerosole her und was sind sie?	47
Wo geht das Aerosol hin und wie lange bleibt es in der Atmosphäre?	48
Wie viel Aerosol gibt es und was sind die Hauptquellen?	48
Wo befindet sich Aerosol in der Atmosphäre?.....	49
Was bewirkt Aerosol für das Klima?	49
Aerosol-Wolken-Interaktion: Wie verändern sich Wolken?	50
Was bewirken Aerosole im Ökosystem?	51
Bodélé-Depression – stärkste Einzelstaubquelle der Erde	51
Zeitskalen der Aerosolwirkungen	51
Fazit – Aerosol im Erdsystem	51
Biodiversität im Erdsystem – Eine Fernerkundungsperspektive	52
Faktoren der Biodiversität	52
Warum ist Biodiversität wichtig?.....	53

Warum wollen wir Änderungen in Ökosystemen beobachten?	53
Ergebnisse des Millennium Ecosystem Assessment (2005).....	54
Was ist Fernerkundung / Erdbeobachtung?	54
Fernerkundungssensorik.....	54
Satelliten.....	55
Spektrale Indizes und Biodiversitätsmessung.....	56
Erfassen der Biosphäre mittels Erdbeobachtung.....	56
Einschränkungen	56
Experimente von Doktorandin Antonia Ludwig.....	57
Auswirkung von langjährigen Trockenperioden	57
Fazit	58
Zukunft der Fernerkundung	59
Geodäsie	59
Teilbereiche der Geodäsie.....	59
Gravitation.....	59
Wichtige physikalische Konzepte	59
Form der Erde.....	60
Gravimetrie.....	60
Satellitengravimetrie	60
Gradiometrie	61
Statisches Erdschwerefeld (GOCE).....	61
Dynamisches Erdschwerefeld (GRACE).....	61
Zusammenfassung.....	61
Eisschilde im Erdsystem.....	62
Gletscherveränderungen beobachten.....	62
Eisschilde und Gletscherbewegung	62
Topografie des Eisschildes	63
Wechselwirkungen im Erdsystem	63
Veränderung von Gletschern	63
Atmosphäre und Wärmehaushalt	64
Wasser an der Oberfläche.....	64
Subglaziale Hydrologie	65
Modellierung von Gletschern	65
Glossar	65

Einführung in die Erdsystemforschung

System Erde-Mensch

Seit den 1980er wurde der Mensch extern vom Erdsystem betrachtet. Seit den 2010er Jahren wird der Mensch als interner Teil des Erdsystems betrachtet.

Betrachtung der Erde als ein System mit vielen Subsystemen, in denen unterschiedliche Menschen, nicht-menschliche Lebewesen und abiotische Komponenten interagieren.

Hydrosphäre und Atmosphäre interagieren über die Biosphäre durch die Verdunstung von Wasser durch Pflanzen

Erdsystemforschung

- Wie funktioniert die Erde als Gesamtsystem und als gekoppelte Subsysteme?
- Seit 4,5 Mrd. Jahren, jetzt und in der Zukunft
- Welche Rückkopplungseffekte gibt es?
- Wie interagieren Menschen mit dem Rest des Erdsystems?
- Fokus auf Interaktionen zwischen den Systemkomponenten
- Eine junge, integrative und interdisziplinäre Wissenschaftsrichtung
- „Teil eines breiteren intellektuellen Trends des 21. Jahrhunderts, zu versuchen, komplexe Systeme zu verstehen und ihr Verhalten vorherzusagen“ (Lenton 2016)

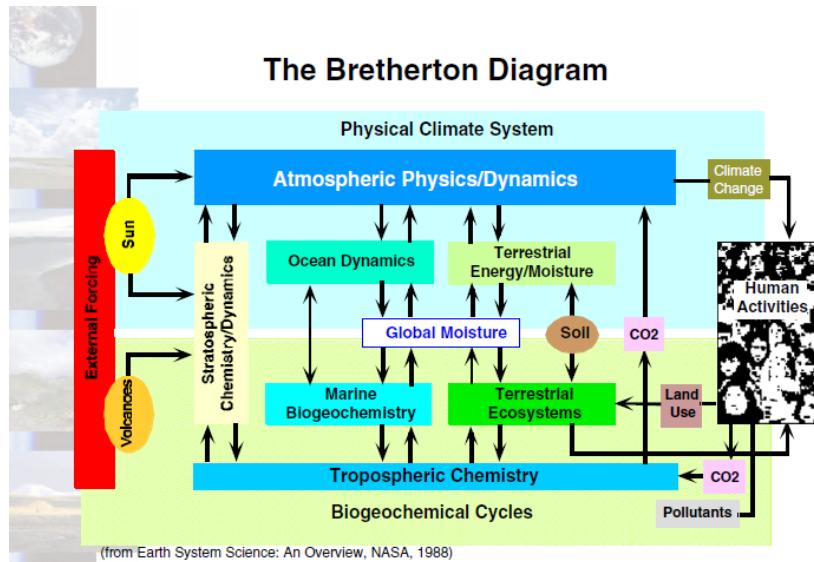
Definition:

“to obtain a scientific understanding of the entire Earth system on a global scale by describing how its component parts and their interactions have evolved, how they function, and how they may be expected to continue to evolve on all timescales” (National Research Council 1986, *Ergebnis einer zweijährigen Studie des US-amerikanischen Earth System Sciences Committee*)

„Thematisch geht es bei der Erdsystemforschung hauptsächlich um Energie- und Stoffflüsse im Erdsystem in und zwischen allen Kompartimenten, einschließlich deren Wechselwirkungen mit dem Menschen und anderen Biota. Die vielfältige erdwissenschaftliche Forschung (einschließlich Klima- und Atmosphärenforschung) beinhaltet ein breites Spektrum zeitlicher und räumlicher Skalen; letztere reichen von der molekularen über die mikroskopische/mikrophysikalische bis zur regionalen und globalen Skala.“ (Aus dem Antrag zur Einrichtung einer DFG-Senatskommission für Erdsystemforschung 2016)

„Das System Erde zeichnet sich durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Komponenten aus und verändert sich durch verschiedene Prozesse – beispielsweise Erosion, Vulkanismus oder Erdbeben. Hinzu kommt, **dass der Mensch in umfassender und komplexer Weise seine natürliche Umwelt beeinflusst**, mit weitreichenden Folgen für die **Erdsystemdienstleistungen** und für das Klima und damit für die zukünftige Entwicklung der Erde und der Menschheit.

Um eine nachhaltige Entwicklung zu befördern, ist ein besseres Verständnis des Erdsystems unumgänglich. Nur durch **interdisziplinäre Kooperation** in der Forschung können die großen Probleme der Menschheit (Grand Challenges) wie Klimawandel, Energie- und Ressourcensicherung und Sicherheit untersucht und letztendlich gelöst werden.“ (Aus dem Antrag zur Einrichtung einer DFG-Senatskommission für Erdsystemforschung 2016)



Warum Erdsystemforschung?

- Für ein besseres Verständnis der Prozesse auf unserem Planeten und deren Veränderungen
 - Beispiel: **Meeresspiegelanstieg**: hängt ab vom **Klimawandel** (Entwicklung der Meerestemperatur, der Eismassen der arktischen und antarktischen Eisschilde und der Gebirgsgeleischer) und von **anderen anthropogenen Triebkräften** wie Grundwasserzehrung, Wasserrückhalt in Stauseen und Landbedeckungsänderungen.
- Zur Unterstützung der nachhaltigen Entwicklung unserer Gesellschaft und ihrer Umwelt / des Erdsystems
 - Beispiel: Abschätzung der Effektivität, Effizienz, Gerechtigkeit und Umsetzbarkeit von Maßnahmen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen (z.B. Finanzierung von Aufforstung REDD+)

REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries, ist ein seit 2005 auf den Verhandlungen der internationalen Klimarahmenkonvention (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) diskutiertes Konzept, mit dem der Schutz von Wäldern als Kohlenstoffspeicher finanziell attraktiv gemacht werden soll.

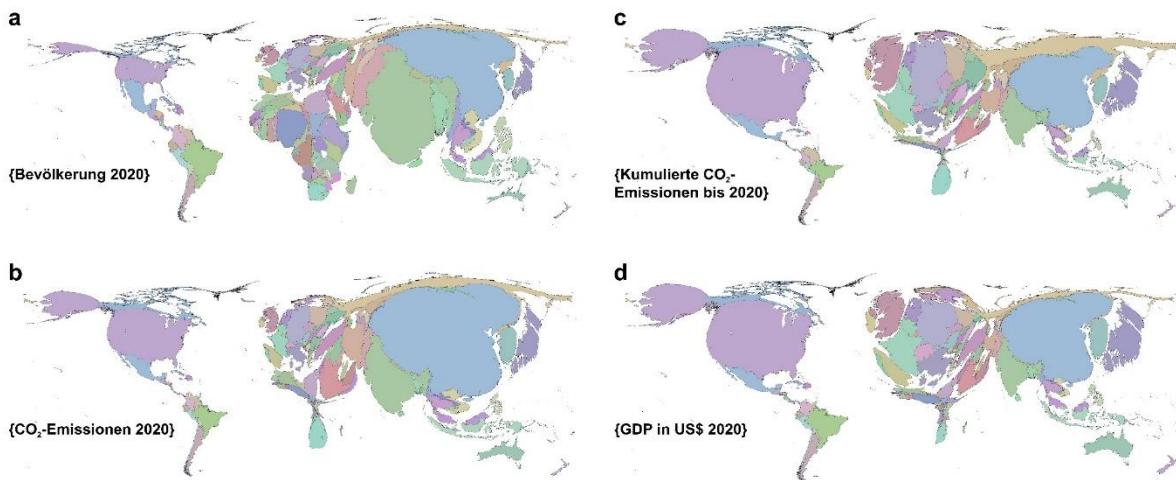
Nachhaltigkeitsdreieck greift zu kurz!

Erdsystemforschung und planetares Denken

1. **Der gesamte Erdball wird als eine räumliche Einheit mit vielfältigen Verbindungen zwischen Orten und Subsystemen betrachtet.**
Wo z.B. lokale Konsumententscheidungen Auswirkungen auf weit entfernte Orte haben, durch internationalen Handel oder den Ausstoß von Treibhausgasen

2. **Der Mensch wird als integraler Bestandteil des Erdsystems verstanden, aber unterschiedliche Menschen interagieren sehr unterschiedlich mit dem Rest des Erdsystems,**
z. B. verursachen wohlhabende Menschen im Allgemeinen einen höheren Treibhausgasausstoß als arme Menschen.
3. **Gerechtigkeit ist artenübergreifend: Menschen, alle anderen Lebewesen sowie die unbelebten Komponenten haben alle einen Eigenwert,**
d.h. alle nicht-menschlichen Lebewesen und die unbelebte Natur sind nicht nur aufgrund ihres Nutzens für den Menschen wertvoll.

Nationale Verantwortlichkeiten für den Klimawandel: Kartogramme



Vier Dimensionen der Nachhaltigkeit

(Holden et al. 2014, basierend auf „Our Common Future“)

Begrifflich unterscheiden wir “Nachhaltigkeit” und “Nachhaltige Entwicklung” nicht.

1. **Langfristige ökologische Nachhaltigkeit sichern**, d.h. Bedingungen sichern, die es dem Ökosystem ermöglichen, über lange Zeit erhalten zu bleiben (safeguarding long-term ecological sustainability):
 - a. Kreisläufe bewahren = Störungen zurücknehmen, insbesondere Wasserkreislauf, Kohlenstoffkreislauf (Holzeinschlag, fossile Brennstoffe) und andere Stoffkreisläufe (z.B. Stickstoff). Problematisch: neue chemische Stoffe
 - b. Biodiversität bewahren
2. **Menschliche Grundbedürfnisse befriedigen** (satisfying basic human needs) (Nahrung, Wasserversorgung und Fäkalienentsorgung, Energie, Wohnen, Arbeit)
3. **Intragenerationelle Gerechtigkeit** (intragenerational equity) (*20% der Weltbevölkerung verbrauchen 80% der Ressourcen*)
4. **Intergenerationelle Gerechtigkeit** (intergenerational equity)
“We act as we do because we can get away with it: future generations do not vote; they have no political or financial power; they cannot challenge our decisions”
(WCED, 1987, p. 8).

Sekundäre Dimensionen der Nachhaltigkeit

Die **sekundären Dimensionen** umfassen den Erhalt des **intrinsischen Werts der Natur**, die **Förderung des Umweltschutzes**, die **Stärkung der öffentlichen Partizipation** und die **Erfüllung von Bestrebungen nach einem verbesserten Lebensstandard (oder einer höheren Lebensqualität)**.

Diese **sekundären Dimensionen sind den primären Dimensionen untergeordnet**. Daher muss der **Erhalt des intrinsischen Werts der Natur** (eine sekundäre Dimension) zurücktreten, wenn **grundlegende menschliche Bedürfnisse** (eine primäre Dimension) bedroht sind. Ebenso sollte das **Streben nach einem besseren Leben** (eine sekundäre Dimension) nachrangig gegenüber der **langfristigen ökologischen Nachhaltigkeit** (eine primäre Dimension) sein.

Nach dieser Logik argumentieren wir, dass **wirtschaftliches Wachstum keine der primären Dimensionen nachhaltiger Entwicklung ist**.

Diese Argumentation widerspricht dem weit verbreiteten „**Triple-Bottom-Line**“-Modell, das einen Ausgleich zwischen **ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Aspekten** betont (Elkington, 1997, 2004; siehe auch Holden, 2007:11). Dieses Modell dominiert derzeit sowohl die politische als auch – in gewissem Maße – die wissenschaftliche Debatte über nachhaltige Entwicklung (UN, 2012; Rogers et al., 2008).

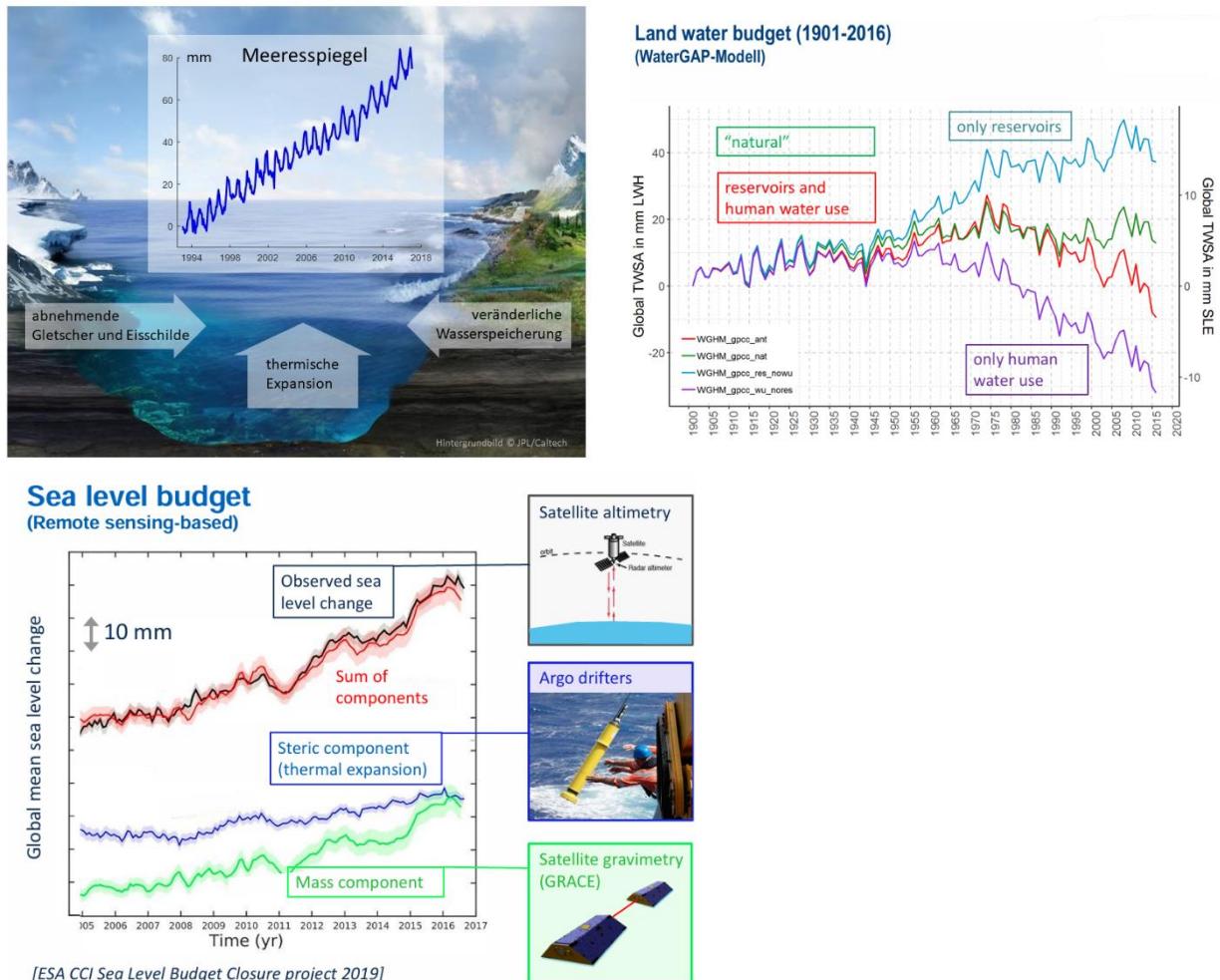
Was braucht Erdsystemforschung?

- Erdbeobachtungssysteme (Fernerkundung) mit Instrumentenentwicklung für kontinuierliche Langzeitbeobachtungen (plus In-situ-Beobachtungen)
- Informationssysteme zur Prozessierung und Verteilung der Erdbeobachtungsdaten
- Konzeptuelle und numerische Modelle der Erdsysteminteraktionen, um das System zu verstehen und “Vorhersagen” machen zu können.

Plus, zur Identifizierung nachhaltiger Entwicklungsoptionen:

- Systemwissen, Zielwissen und Transformationswissen
- Partizipative Prozesse/ Transdisziplinäre Forschung

Beispiel für Erdsystemforschung: Anstieg Meeresspiegel



Massenkomponente setzt sich aus Gletscherschmelze, Grönland Eisschmelze, Antarktis Eisschmelze und dem Landwasser zusammen.

Das Modell zum Ocean Mass Budget wird benötigt, um Einzelkomponenten der kontinentalen Wasserspeicherung abzuschätzen: Klimagetrieben, Rückhalt von Wasser in neuen Stauseen, Grundwasserzehrung

Water GAP – Das globale Süßwassermodell

Zur Unterstützung einer **nachhaltigen Entwicklung der weltweiten Wasserressourcen** berechnet das globale Süßwassermodell **WaterGAP** Wasserflüsse und -speicher sowie Wasserentnahmen und den konsumtiven Wasserverbrauch auf allen Kontinenten.

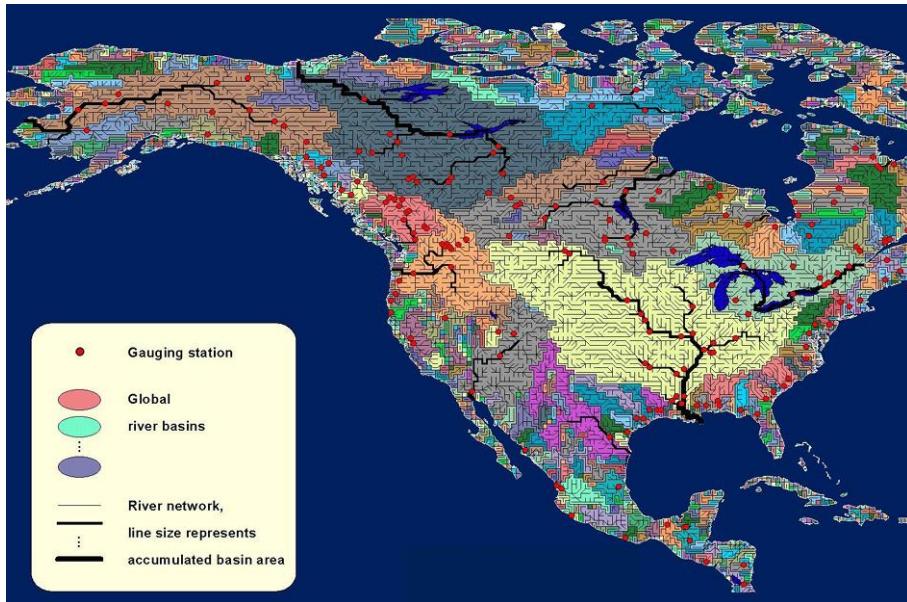
Es wird angewendet, um das Wechselspiel zwischen Mensch und Süßwassersystem unter dem Einfluss des **globalen Wandels** zu analysieren.

Grundlagen des Modells:

- **Basierend auf globalen Datensätzen** wie der **Drainage Direction Map (DDM30)** (Döll & Lehner, 2002) oder der **Global Map of Irrigation Areas (GMIA)** (Siebert et al., 2005).
- **Angetrieben durch:**
 - **Beobachtungskalibrierte tägliche Klimadaten** für den Zeitraum **1901–2016**

- **Bias-korrigierte Ergebnisse globaler Klimamodelle**

Globale Entwässerungsrichtungskarte DDM30



Grundlagen der Erdsystemmodellierung

Wie entwickelt sich das Klima weiter im Kontext der Technologien (Versuch einer Vorhersage).

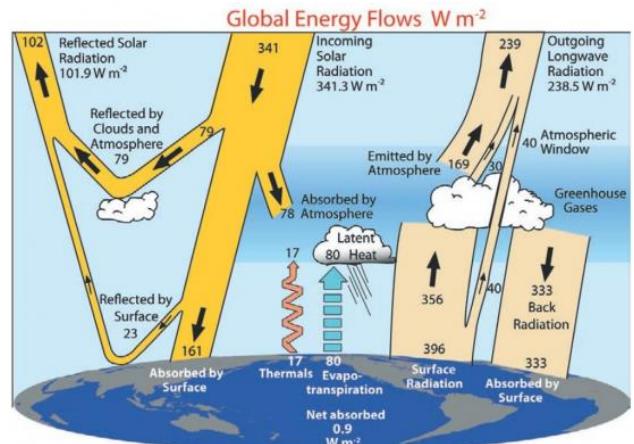
- **CO₂ als zentrales Treibhausgas (Keiling Kurve):**
 - Kontinuierlicher Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre.
 - Führt zu einer globalen Erwärmung durch die Absorption von Infrarotstrahlung.
 - Notwendig, um Quellen, Senken und Transportmechanismen in Modellen zu erfassen.
- **CO₂-Senken und Wechselwirkungen:**
 - Ozeane nehmen CO₂ auf, beeinflusst durch chemische und physikalische Prozesse.
 - Wechselwirkungen mit der Biosphäre, insbesondere Landnutzungsänderungen, haben großen Einfluss auf die CO₂-Aufnahme.

Was ist ein Erdsystem-Modell (ESM)?

Ein **Erdsystem-Modell** ist eine numerische Simulation, die verschiedene physikalische, chemische und biologische Prozesse in der Atmosphäre, den Ozeanen, dem Land und der Kryosphäre abbildet. Das Ziel ist die Prozesse und statistischen Zusammenhänge zu verstehen.

Grundprinzipien:

- Massenerhaltung:** Die Gesamtmasse bleibt konstant. Beispiel, beim verbrennen von Kohle in einem geschlossenen Glas, bleibt die Masse gleich.
- Energieerhaltung:** Entspricht dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik.
- Impulserhaltung:** Beschrieben durch die **Navier-Stokes-Gleichungen** (Grundlage für Strömungsmechanik, gibt keine starke analytische Lösung aber kann numerisch modelliert werden).



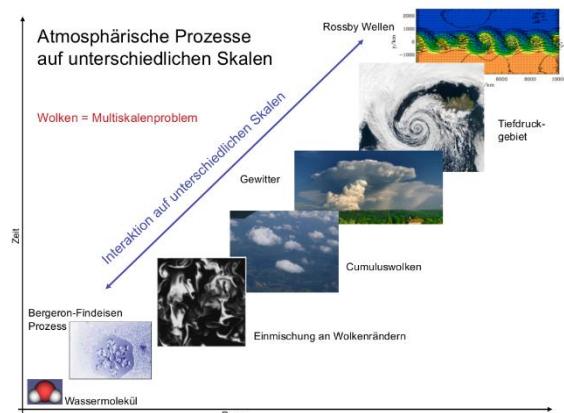
Das wichtigste natürliche Treibhausgas ist Wasser. Wenn weniger Energie ins Weltall gestrahlten wird als reinkommt, erwärmt sich die Erde (Energieerhaltungsgesetz)

Ziel eines ESM:

- Erstellung eines **virtuellen Labors**, in dem Experimente mit realitätsnahen Bedingungen durchgeführt werden können.
- Testen von Wechselwirkungen zwischen Klima- und Erdsystemprozessen unter verschiedenen Annahmen.
- Identifikation wichtiger **Prozesse und Reservoir** im Klimasystem
- Verständnis und Quantifizierung der **natürlichen Variabilität** des Klimasystems
- Verständnis und Quantifizierung **anthropogener Einflüsse** im Klimasystem
- Schaffung von Modellen**, um das aktuelle Verständnisniveau zu überprüfen
- Anwendung evaluiert Modelle, um **das zukünftige Klima** vorherzusagen

Komplexität eines ESM:

- Klimamodelle integrieren verschiedene Disziplinen:
 - Physik, Meteorologie, Chemie, Biologie, Mathematik, Informatik, Geowissenschaften.**
- Erdsystemmodelle sollen anthropogene und natürliche Einflüsse abbilden und das aktuelle Verständnis des Klimasystems testen.



Aufbau eines Erdsystem-Modells

Ein **ESM besteht aus mehreren Modulen**, die unterschiedliche Bereiche des Klimasystems simulieren. Dabei werden Prozesse in zwei Repräsentationen abgebildet:

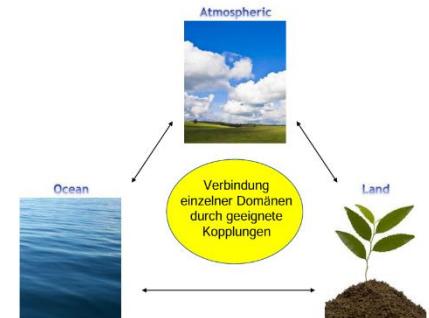
- „Aufgelöste“ Prozesse:** „Größe“ eines Prozesses bzw. Phänomens ist groß genug, um durch mehr als eine Gitterzelle des gewählten Modells dargestellt zu werden
 - z. B.: Atmosphärische Rossby-Wellen, Große Wolkendecks, Meridional Overturning Circulation (= Thermohaline Zirkulation), Golfstrom

Skalen von 10-9 bis 10.000 km. Globale Klimamodelle sind auf einer Skala von 200km und deutsche Klimamodelle auf einer Skala von 2km. Wassermoleküle eignen sich nicht als gute Skala, da sie zu klein sind.

- **Parametrisierung:** "Größe" eines Phänomens ist kleiner als eine Gitterzelle. Verknüpft Prozesse mit dem mittleren Zustand einer Gitterzelle und nutzt physikalische Konzepte, um subgrid-skalige Prozesse darzustellen
z. B.: Konvektive Wolken, Tropfen- und Niederschlagsbildung, Turbulenz, Pflanzenwachstum und -sterben

1. Atmosphärisches Modell

- Darstellung von Luftmassenbewegungen, Strahlungsprozessen, Wolkenbildung und atmosphärischer Chemie in verschiedenen Höhenbereichen.
- Inklusive **Feedback-Mechanismen** zur Simulation von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessen.
- Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen für Strömungsprozesse in der Atmosphäre.
- Höhe festlegen, Physik anwenden, Gleichungen zusammensetzen und dann Feedback



2. Ozean-Modell

- Simulation physikalischer Prozesse wie **Meeresströmungen, Eisbildung und Salzgehalt** bei Betrachtung verschiedener Ozean-„Arten“ (Tiefsee, Flaches Ozeanbecken, Küstennahe Gewässer etc.)
- Inklusive **Feedback-Mechanismen** zur Simulation von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessen.
- Ähnliche Annahmen und Gleichungen wie in der Atmosphäre.
- Integration biogeochemischer Prozesse (Plankton, Spurenelemente, CO₂-Speicherung).

3. Land-Oberflächenmodell

- Simulation von **Energie- und Stoffflüssen** zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre.
- Modellierung von **Pflanzenwachstum, Bodenprozessen** (Schnee-/ Eisbedeckung und Gefrieren und Schmelzen des Bodens) und **Landnutzungsänderungen**.
- Inklusive **Feedback-Mechanismen** zur Simulation von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessen.
- Parametrisierungen verschiedener Prozesse, thermodynamische Berechnungen für Schnee und Eis, Reservoir- und Stoffkreislauf-Konzepte sowie dynamische Populationsmodelle (z. B. für Vegetation)

4. Kryosphären-Modell

- Berechnung der **Bildung und des Schmelzens von Eis** (Meereis, Gletscher).
- Integration von Strahlungsprozessen und Wechselwirkungen mit der Atmosphäre.

5. Kopplungskonzepte zwischen den Modellen

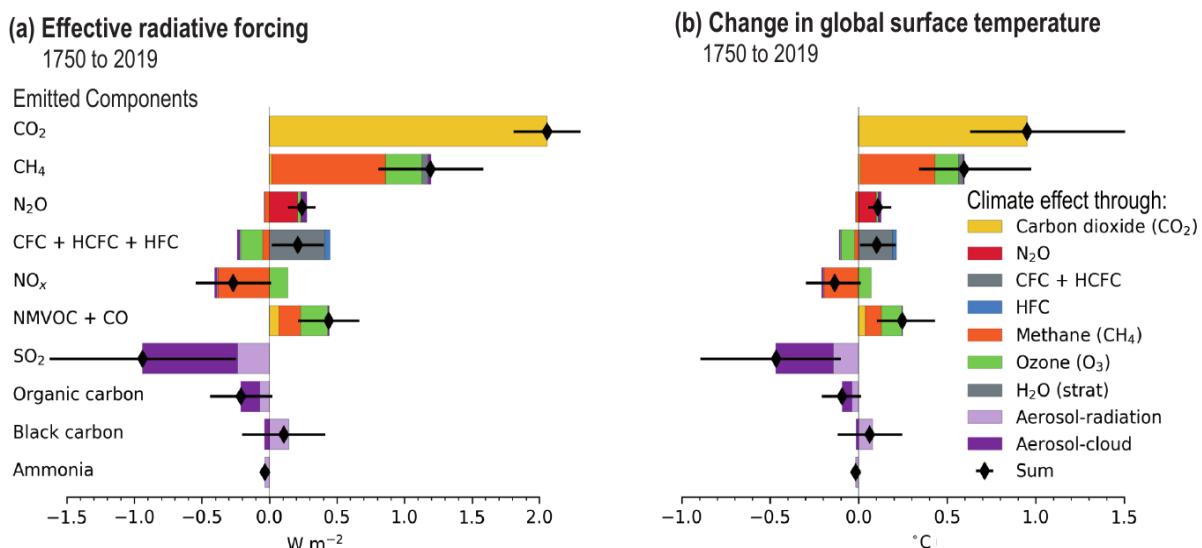
- **Notwendig zur Integration der einzelnen Komponenten des Erdsystems.**

- Austausch von Daten zwischen den Modellen zur **Simulation der gesamten Klimadynamik** (Datenaustausch, Gittertransformationen). Parallelisierung steigert die Recheneffizienz.

Warum braucht man Erdsystem-Modelle?

- Viele Prozesse sind **interdependent** und müssen kombiniert betrachtet werden.
- Unterschiedliche Skalen (räumlich und zeitlich) machen eine ganzheitliche Modellierung notwendig.
- Erdsystemmodelle ermöglichen es, **Ursache-Wirkungs-Beziehungen** im Klimasystem zu untersuchen.

Anthropogene Einflüsse (Forcing) in Erdsystem-Modellen



1. Strahlungsantriebe ("Forcing")

- Berücksichtigung externer Einflüsse wie Treibhausgase, Aerosole und Sonneneinstrahlung.
- Berechnung der Strahlungsabsorption und -streuung durch Gase, Partikel und Wolken.
- Individuelle Betrachtung/ Auflösung der Wellenlängen, dann Strahlungstransport-Rechnungen für individuelle Wellenlängen (-Bänder).

2. Ozonloch und Atmosphärenchemie

- Modellierung der Wechselwirkungen zwischen FCKWs und Ozon.
- Einfluss von Ozonzerstörung auf die Stratosphäre und den Strahlungshaushalt.
- Gesamt-Ozon bleibt annähernd konstant
- Das Ozonloch vertieft sich nicht weiter, aber kaum "Erholung" und große Variabilität

3. Aerosole und ihr Einfluss auf das Klima

- Berechnung der **Zusammensetzung, Mikrophysik und Strahlungseffekte** von Aerosolen.
- Mischung von Partikeln durch Koagulation

- **Direkte Effekte:** Absorption und Reflexion von Sonnenstrahlung.
- **Indirekte Effekte:** Veränderung der Wolkeneigenschaften.

4. Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem

- **Positive Rückkopplung:** Verstärkung eines Effekts (z. B. Eis-Albedo-Rückkopplung).
- **Negative Rückkopplung:** Dämpfung eines Effekts (z. B. Wolkenbildung).

5. Meereis und Albedo-Effekte

- Schmelzendes Eis verringert die Reflexion von Sonnenlicht, was zu weiterer Erwärmung führt.
- Langfristige Auswirkungen auf die globale Temperaturentwicklung.

Vertrauenswürdigkeit von Klimamodellen

- **Validierung durch historische Daten:**
 - Modelle werden anhand vergangener Klimadaten getestet.
 - Übereinstimmung mit realen Messungen als Qualitätsnachweis.
- **Vergleich unabhängiger Modelle:**
 - Konsistente Vorhersagen aus verschiedenen Modellen stärken das Vertrauen.
- **Grenzen der Modelle:**
 - Unsicherheiten bestehen, insbesondere bei der Simulation von Wolken und Aerosolen.
 - Trotzdem zeigen alle Modelle eine deutliche Erwärmungstrend.

Zusammenfassung

- Erdsystemmodelle sind **hochkomplexe Computermodelle**, die Supercomputer nutzen, um das Klima zu simulieren.
- ESMs berücksichtigen eine Vielzahl von physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen, um anthropogene Effekte zu analysieren.
- Klimamodelle sind evaluiert und können historische Klimaveränderungen realistisch wiedergeben.
- Trotz Unsicherheiten sind die allgemeinen **Erwärmungstrends klar und wissenschaftlich fundiert**.

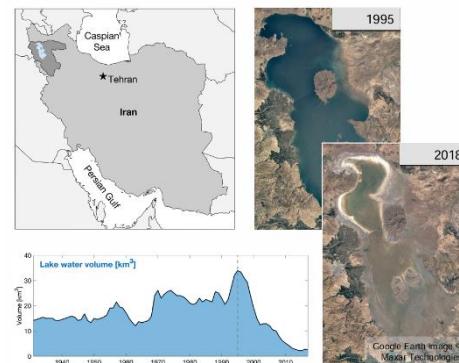
Auswirkung von Klimaveränderungen auf unsere Wassersysteme

70% des geförderten Wassers werden in der Landwirtschaft genutzt, in ariden Gebieten sind es sogar über 90%. In Deutschland liegt der Anteil der Bewässerung für Landwirtschaft gemessen am Gesamtwasserverbrauch nur bei 2% aber die Tendenz steigt.

Urmia See

Irans Wasserkriese am Beispiel des Urmia Sees, dieser war einer der größten Seen der Welt. Mitte der 90er Jahre hatte der See eine Fläche von ca 5000 km².

Ab Mitte der 90er Jahre dann starker Rückgang des Wasserstandes. Heute ist der See nur noch eine Salzwüste, vergleichbar zum Aralsee. Früher haben hier häufig Zugvögel halt gemacht. Auch diese leiden unter dem Rückgang des Wasserstandes.



Gründe für den Rückgang

- **Anthropogene Faktoren:** Menschengemachte Probleme
- **Klimatische Veränderungen:** Besonders starke Auswirkungen in Zentral- und Westasien mit einer drastischen Zunahme meteorologischer Trockenperioden

Seit Mitte der 1990er Jahre ging der jährliche Niederschlag von ca. 270 mm auf etwa 50 mm zurück, während die Temperaturen weiter steigen. Seit 1995 herrscht somit eine meteorologische Dürre.

Wie wird der Zufluss des Sees durch das Klima beeinflusst?

- Berechnung mittels **dimensionsloser Indizes** zur Bestimmung von Wettertreibern und Wasserzufluss (SPEI, SDI).
- Die Indizes korrelieren stark miteinander, was zeigt, dass das Wetter ein entscheidender Treiber für den Wasserzufluss ist.
- Keine überproportionale Veränderung zwischen diesen beiden Faktoren, d. h. der **Mensch hat lokal wenig Einfluss auf den Zufluss, aber der Klimawandel spielt eine entscheidende Rolle.**

Zusätzlich wird dem Wasserzufluss Wasser entnommen, da der See salzig ist. Die Menge des dem See zufließenden Wassers wurde somit durch diese Entnahme drastisch reduziert.

Modellierung

Ein einfaches Modell für den Wasserhaushalt im See ist ein endorheisches Becken (kein natürlicher Abfluss):

$$\Delta S = \text{Zufluss} + \text{Niederschlag} - \text{Verdunstung}$$

Die Verdunstung ist schwer zu berechnen, da sie sowohl auf offener Wasserfläche aber auch auf dem ausgetrocknetem Seeboden stattfindet.

Forschung:

- Verdunstungsexperimente durch Bodenproben aus dem Seebett
- Höhenmodell des Seebodens + Wasserspiegel zur Simulation des gesamten Sees
- Seefläche ist hochdynamisch, was die Forschung erschwert
- Regionalisierung mittels Satelliten, um ein Höhenmodell des Sees und des Wasserspiegels zu erhalten

Szenario-Analyse:

- **Worst-Case-Szenario:** Trockenes Wetter mit aktueller Wasserentnahme → Der See schrumpft weiter.
- **Reduzierte Wasserentnahme:** Der See kann erhalten bleiben.

Fallbeispiel Rafsanjan

- Größte Pistazienproduktion weltweit nach Kalifornien
- Extremer Wasserverbrauch: Grundwasser als primäre Quelle
- Region: 4236 km^2 mit nur 100 mm Niederschlag jährlich
- Folgen:
 - Massive Bodensenkung – in manchen Regionen bis zu 10 m
 - Irreversibler Verlust der Grundwasserspeicherkapazität
 - Schäden an Infrastruktur

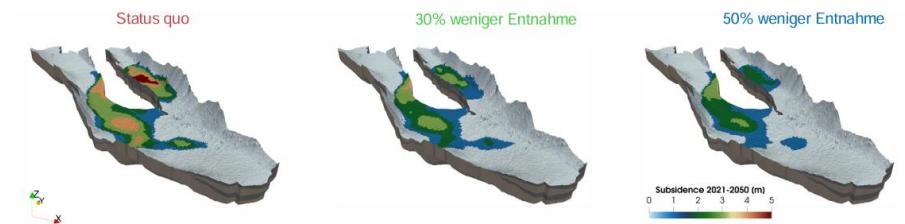
Dieses Problem tritt auch im Central Valley in Kalifornien auf.

Modellierung

- Kein einfaches Bilanzmodell, sondern ein komplexes Strömungsmodell mit vielen Daten und Einflussfaktoren
- **Modflow-Sub (Weiterentwicklung für Grundwasserströmungen)**
- Modell wird kalibriert auf Basis der Grundwasserstände und Absenkungen (InSAR)
- Die größte **Landabsenkung** tritt nicht an der Stelle mit der stärksten **Wasserentnahme** auf.

Bereits heute sind $8,8 \text{ km}^3$ der Speicherkapazität des Grundwasserleiters unwiederbringlich verloren (Vergleich: Frankfurt verbraucht $0,15 \text{ km}^3$ pro Jahr).

Die Analyse der Auswirkungen von Management-Veränderungen für die nächsten 30 Jahre (keine Veränderung, 30% weniger Entnahme und 50% weniger Entnahme) zeigt, dass die Absenkungen deutlich geringer werden mit einer geringeren Grundwasserentnahme.



Landwirtschaftliche Wassernutzung in Südasien

- Die Schwemmlandebenen der großen Flusssysteme in Südasien werden sehr intensiv für die Landwirtschaft genutzt.
- Landwirtschaft am Indus-Flusssystem (Pakistan) ist vor allem Textilproduktion mit hohem virtuellem Wasserverbrauch ($365 \text{ Mio. m}^3/\text{Jahr}$).

Wasserfußabdruck:

- **Grün:** Regenwasser
- **Blau:** Oberflächenwasser, Grundwasser, industrielle Nutzung
- **Grau:** Wasser zur Verdünnung von Schadstoffen (z. B. Stickstoffdünger)

Der Wasserfußabdruck wird mithilfe von Feldinstallationen gemessen. Dabei werden der Strahlungshaushalt (d. h., wie viel Energie ein- und ausgeht, also die Verdunstung) sowie der

Bodenwassergehalt untersucht. Zusätzlich wird gemessen, wie viel Wasser das System nach unten verliert und in Flüsse abgegeben wird.

Zur Analyse größerer Flächen und zur Simulation der Reaktion von Pflanzen auf den Klimawandel werden zwei Modelle verwendet: **SWAT** und **APSIM**.

Obwohl der Niederschlag nicht abnimmt, steigen die Temperaturen, wodurch mehr Wasser benötigt wird, um die zunehmende Hitze auszugleichen.

Es wurden zwei Klimaszenarien betrachtet:

- **RCP 4.5** (moderates Szenario) und
- **RCP 8.5** (Extremszenario).

Im **Extremszenario RCP 8.5** steigt der Wasserbedarf für Pflanzen zunächst an, da höhere Temperaturen eine verstärkte Verdunstung verursachen. Allerdings führt das Absterben von Pflanzen und ein starker Rückgang der Erntemengen dazu, dass insgesamt weniger Wasser benötigt wird.

In der Baumwollproduktion bedeutet dies, dass mehr Wasser aufgewendet werden muss, um geringere Erträge zu erzielen. Dadurch steigt der **blaue Wasserfußabdruck** (Nutzung von Oberflächen- und Grundwasserquellen) erheblich.

Bangladesch – Herausforderungen der Wassernutzung

- **Am dichtesten besiedeltes Land der Welt** mit hohem Bevölkerungswachstum
- **Landwirtschaftliche Flächen bereits vollständig genutzt**
- **Ernährungssicherung notwendig** → Landgewinnung aus Mangrovenwäldern geplant
- **Flachland:** 50 % der Fläche weniger als 5 m über dem Meeresspiegel
- **Probleme:**
 - **Zunehmende Überschwemmungen & Landverlust**
 - **Meerwasserintrusion durch Grundwasserentnahme** → Versalzung

Aktuell wird hierfür ein Modell entwickelt, welches das Grundwasser in drei Pilotregionen modelliert und beobachtet (Urban, Küste und Dürregefährdung).

Hessisches Ried

Wir haben auch hier in Hessen Grundwasserprobleme, wobei es sich um andere Probleme handelt. Das hessische Ried wird viel für die Landwirtschaft genutzt und stark bewässert, allerdings ist das hessische Ried auch ein Trinkwasserversorgungsbrunnen.

- Wassernutzungskonflikt: Bewässerungslandwirtschaft vs. Trinkwasserversorgung
- Darmstadt: 100 % Trinkwasserversorgung aus dem Hessischen Ried
- Hoher Pestizid- und Nitratgehalt im Grundwasser durch intensive Landwirtschaft
- Rhein-Main-Gebiet: 50 % des Trinkwassers aus dem Hessischen Ried

Modellierung & Forschung:

- Entwicklung eines **Wassersystemmodells Rhein-Main (WaRM)**
- 4 Bodenmonitoring-Stationen mit bis zu 3,5 m tiefen Bodenproben. Diese Stationen sind aufwändig zu installieren und sehr teuer.
- Untersuchung des **Nitratabbaus und Schadstoffverhaltens im Boden**
- Erhöhter Nitratwert (200 mg/l), der Grenzwert liegt bei 50 mg/l

- **Autotropher und heterotropher Abbau:** 50 % der Schadstoffe können nachhaltig abgebaut werden, die anderen 50 % jedoch nicht, da der verantwortliche Stoff (Chlorid) irgendwann aufgebraucht ist.

Im Hessischen Ried bestehen **80 % des Grundwassers aus geklärtem Abwasser**, das teilweise noch **Rückstände von Pestiziden** enthält. Zudem gibt es kaum natürliche Flüsse in der Region.

Fragestellung:

- **Welche Schadstoffe können an Flüssen durch den Boden abgebaut werden?**
- **Welche Potenziale hat der Boden für den Schadstoffabbau?**

Zusätzlich wurden **Labortests mittels Sedimententnahmen** durchgeführt. Viele Schadstoffe werden durch **organisches Material absorbiert**. Dabei stellt sich die Frage:

- **Welche Schadstoffe werden absorbiert?**
- **Wann ist die Kapazität des Bodens erreicht, sodass keine weiteren Schadstoffe mehr aufgenommen werden können?**

Das Unternehmen **Merck hatte vor einigen Jahren noch keine vierte Reinigungsstufe** in seiner Kläranlage. Dadurch sind noch **Alt-Schadstoffe im Wassersystem vorhanden**, die durch **Desorption** weiterhin das Grundwasser beeinflussen können.

Künstliche Grundwasseranreicherung

- **Entnahme aus dem Rhein**, Aufbereitung auf Trinkwasserniveau und Rückführung ins Grundwasser (38 Mio. m³/Jahr, etwa die Hälfte der entnommenen Menge)
- **Weitere internationale Beispiele:**
 - **Israel (Shafdan):** Gereinigtes (infiltriertes) Abwasser von Tel Aviv wird für die Landwirtschaft genutzt (100 Mio. m³/Jahr).
 - **Portugal (Rio Seco):** Flussbett mit Sand gefüllt, um Wasser zu speichern.
 - **Saudi-Arabien:** Speicherung von Hochwasser durch Recharge-Release-Dämme.
 - **Bangladesch:** Regenwasserinfiltration von Dachabfluss.

Probleme:

- **Gereinigtes Abwasser enthält weiterhin Pestizide und Medikamentenrückstände**
- **Natürliche Schadstoffreinigung wird untersucht**

Untersuchung der natürlichen Schadstoffreinigung

Es wurde erforscht, wie **pharmazeutische Schadstoffe in Infiltrationsbecken abgebaut werden**.

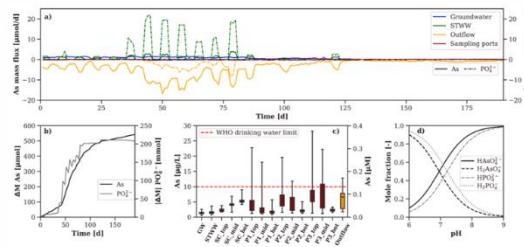
- **Säulenexperimente** wurden durchgeführt, um das Verhalten von **Spurenstoffen** zu untersuchen.
- **Keine Absorption bei NaN₃-Kontamination** oder **ohne organischen Kohlenstoff (Corg)**.
- **Sorptionsverhalten an organischem Material** analysiert.

Tankversuche

- **Arsen löst sich aus dem Sand**, der aus einem Grundwasserspeicher entnommen wurde.
- **Gereinigtes Abwasser** wurde in den Tank gegeben, um eine **Grundwasserströmungssimulation** durchzuführen.
- **Phosphat löste Arsen aus dem Sand**, wodurch eine **kontaminierte Infiltration** entstand.

Ergebnis:

- Die **Infiltration sollte nicht gedankenlos umgesetzt werden**, da bestimmte Stoffe aus dem Boden gelöst und ins Wasser überführt werden können.



Nahrungsmittelproduktion und Wasserverfügbarkeit sind eng aneinandergekoppelt.

Es gibt sowohl quantitative als auch qualitative Herausforderungen schon heute und noch mehr in der Zukunft.

Naturkatastrophen im Anthropozän

„Vulkan: Vesuv von Wörlitz“

- Restaurierte Vulkanattrappe aus dem 18. Jahrhundert.
- Franz Leopold III. Friedrich Franz ließ den Vulkan errichten.
- 1766 bestieg er den Vesuv und wollte eine Nachbildung für sich haben.

Sir William Hamilton (Vulkanologe, „Vulcanolover“) und sein Begleiter bestiegen den Vesuv und brachten die „Vulkanologie“ auf den Weg.

- Seit dem 17. Jahrhundert war der Vesuv ein Bestandteil der Grand Tour (Abenteuerreise junger Adeliger durch Europa).
- Die Gefahr eines regelmäßigen Ausbruchs machte den Vesuv zu einer Attraktion des „Katastrophentourismus“.
- Vulkane wurden in Bildern, als Spielzeug und in anderen Darstellungen populär – ein Zeichen für ein regelrechtes „Vulkanfieber“.
- Im Dessauer Garten steht der „Vesuv von Wörlitz“ als Zentrum eines Mikrokosmos.

Leid und Faszination, Zerstörung und Begeisterung schließen sich nicht zwangsläufig aus – möglicherweise hängen sie sogar voneinander ab.

Naturkatastrophen – Zwischen Faszination und Bedrohung

- Naturkatastrophen ziehen Menschen an und stoßen sie gleichzeitig ab.
- Sie verbreiten Angst und Tod, sind aber auch ein Motiv für **Kunst und Kommerz**.

- **Schutz der Natur** (Geschichte des Naturschutzes) und **Schutz vor der Natur** (Schutz vor Naturkatastrophen) spielten historisch eine untergeordnete Rolle.

Historische Perspektive auf Naturkatastrophen und Naturschutz

- In der Geschichte war es dem Menschen wichtiger, sich **selbst vor der Natur zu schützen** als die Natur selbst zu bewahren.
- Naturschutz gewann erst ab dem **20. Jahrhundert** an Relevanz.
- Beide Bereiche sind jedoch eng miteinander verbunden – bereits um **1900 wurden Zusammenhänge zwischen Natur und Katastrophen diskutiert**:
 - **Entwaldung und Überschwemmungen**
 - **Rodungen in Gebirgen und die Folgen für Lawinen und Erdrutsche**

Zunahme extremer Wetterereignisse

- Extreme Wetterereignisse nehmen zu, allerdings gibt es vor **1980** nur wenige und oft unzureichende Daten.
- Der Zusammenhang zwischen Naturgefahrenen und menschlichen Einflüssen ist **keine neue Erkenntnis** – siehe die Diskussionen aus früheren Jahrhunderten.
- **Historisch gesehen begann der Mensch, sich gezielt auf Naturkatastrophen vorzubereiten** und die Zukunft aktiv zu beeinflussen.
- Seit dem frühen **19. Jahrhundert** hoffte man, die Natur berechnen, vorhersagen und sich sogar **gegen sie versichern zu können**.

Staatliche Kontrolle über Katastrophenschutz seit 1800

- Ab etwa **1800** kümmerte sich der Mensch zunehmend weniger selbst um seinen Schutz vor der Natur.
- Diese Verantwortung wurde zunehmend auf **staatliche Behörden, wissenschaftliche Institutionen und privatwirtschaftliche Unternehmen** übertragen.
- Infolgedessen gingen viele **individuelle Fertigkeiten und Alltagswissen** verloren.

Folgen:

- **Moderne Regierungen nutzen Katastrophenschutz als Mittel zur Selbstlegitimation.**
- Argument: „Wir brauchen einen starken Staat, dem wir viel Geld geben, weil er Bauprojekte zum Schutz der Menschen durchführt.“
- **Schutzmaßnahmen kommen oft nur den Reichen zugute.**

Naturgefahren in Deutschland

Häufige Naturgefahren: Stürme, Gewitter, Überschwemmungen, Hagel, Lawinen, Bergstürze, Dürren

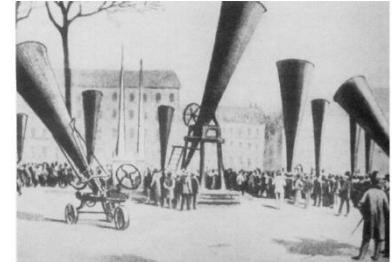
Diese Gefahren waren stets Teil des Alltags – sowohl für Einzelpersonen als auch für die Landwirtschaft.

Menschen entwickelten Abwehrtechniken, die zwischen **Alltagswissen (Aberglauben), technischen Strategien und frühen Versicherungen** wechselten.

Aberglaube und Schutzmechanismen gegen Naturkatastrophen

Wetterläuten (nicht Sturmläuten!)

- Kein Warnsignal, sondern eine **apotropäische Handlung** (Heilzauber, abergläubische Praxis).
- Durch das Läuten von Kirchenglocken sollten **Sturmgeister vertrieben** werden.
- **Geweihte Glocken sollten Unwetter fernhalten.**
- **Bischöfe verboten dies teilweise**, da es als **abergläubisch** galt und Stürme angeblich von einem Dorf ins nächste „verschoben“ wurden.



Hagel- und Wetterschießen

- Mischung aus **Aberglaube und physikalisch-technischer Überlegung**.
- Verschiedene Theorien:
 - **Wolken sollten durch Schüsse „zerteilt“ werden.**
 - **Blitze sollten aus den Wolken entladen werden.**
- **Silberbesteck wurde als Munition genutzt, um Blitze zu entladen.**
- **Meteorologisch lässt sich keine Wirkung nachweisen.**

Moderne Hagelabwehr in Rosenheim

- Ein **Silberiodid-Generator** wird am Boden getestet und vom Freistaat gefördert.
- Silberiodid soll in Hagelwolken abgelagert werden, um diese frühzeitig zum Abregnen zu bringen.
- **Bis heute gibt es keinen wissenschaftlichen Nachweis für die Wirksamkeit.**

Hagelversicherung

- Hagel ist **statistisch gut erfassbar**, daher gab es bereits früh **Hagelversicherungen**.
- Erste Maßnahmen waren **Wetterkassen** als Frühform von Versicherungen.

Technische Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren

Blitzableiter (Benjamin Franklin)

- Franklin erfand den Blitzableiter.
- Die Kirche lehnte diese Erfindung zunächst ab.
- Die Diskussion über den Blitzableiter war politisch aufgeladen.

Deichbau und Uferschutz

- **Erster Seedeich an der Nordsee im 11. Jahrhundert.**
- Häufung von Überschwemmungen während der „Kleinen Eiszeit“ (15.–19. Jahrhundert).
- Entwicklung eines **Deichsystems mit Ämtern und festen Verantwortlichkeiten**.
- Organisation in **Verbandsstrukturen mit staatlicher Unterstützung**.

- **Je stärker das gesellschaftliche Bewusstsein für den Deichbau, desto besser funktionierte das System.**

Lawinenverbauung

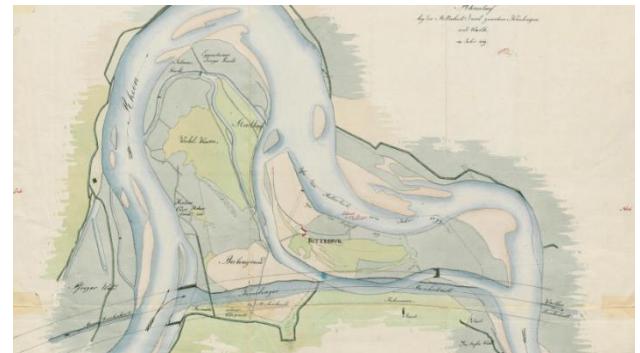
- Bau von Schutzmauern vor oder direkt am Berg
- Künstliches Auslösen von Lawinen durch Böllerschüsse

Flussbau und Flussbegradigung

Wasserbauer und Politiker sprachen von Begriffen, die von einem schlechten, fehlerhaften Naturzustand ausgehen, der einer Bearbeitung durch den Menschen bedarf.

- „Rektifikation“ (lat. Berichtigung)
- „Korrektion“ (lat. geraderichten, berichtigen)
- „Regulierung“ (in eine Regel bringen)
- „Melioration“ (lat. melior > besser)

Kleinere Flusskorrekturen gab es bereits im **Mittelalter. Massive Umgestaltung der Flüsse, insbesondere Begradigungen (z. B. Rheinbegradigung).**



Flussbegradigung wurde als **Schutzmaßnahme gegen Malaria und Überschwemmungen** gerechtfertigt.

Flussbegradigung war erfolgreich:

- **Weniger tägliche Überschwemmungen.**
- **Weniger Seuchen.**
- **Erhöhte landwirtschaftliche Nutzung.**

Aber:

- Menschen bauten und bewirtschafteten Flächen **direkt am Fluss**, was zu **größeren Schäden bei seltenen Überschwemmungen** führte.
- **Flussbegradigung war umstritten**, da **negative Folgen befürchtet wurden**.
- **Sabotage von Messinstrumenten** durch besorgte Anwohner.

Zeitreise-Effekt:

- Ein Zeitreisender aus dem Jahr **1600 hätte die Landschaft um 1920 nicht mehr wiedererkannt.**

KatastrophenTourismus und Kommerzialisierung von Katastrophen

Der Vesuv war ein **Hotspot der Reichen** – wohlhabende Besucher ließen sich von Einheimischen auf den Vulkan tragen.

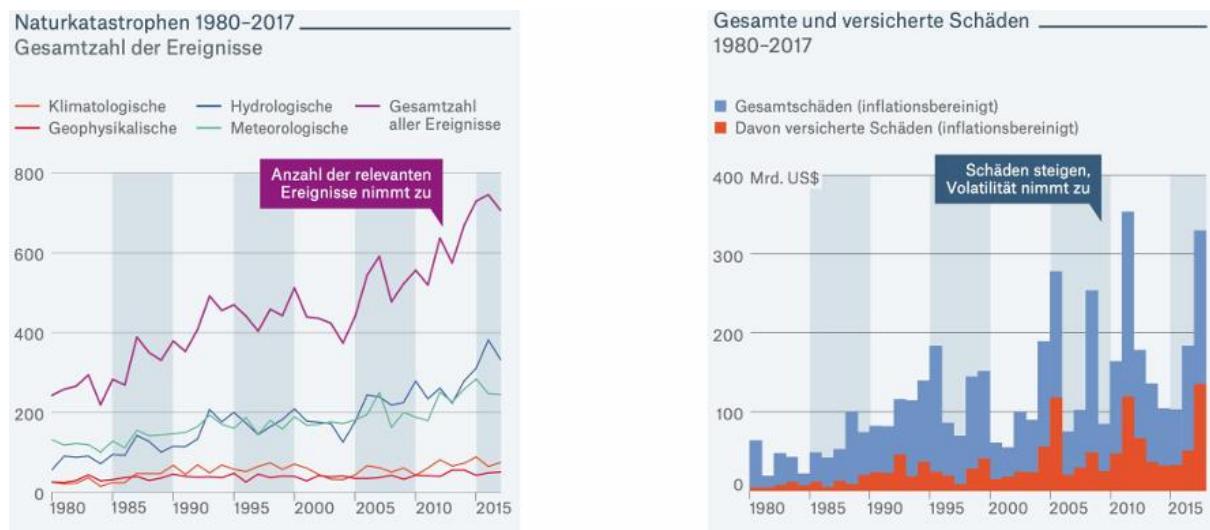
Jährlich (um 1900) wurden fast 1 Milliarde Postkarten verschickt, viele davon **Katastrophenpostkarten**. Die Postkarte war das wichtigste Medium, um Bilder und beliebte

Motive zu verbreiten. Zu den beliebtesten Motiven gehörten Erdbeben, Vulkanausbrüche und Überschwemmungen.

Katastrophen-Inszenierung im Vergnügungspark Coney Island (USA). In diesem wurden große Fluten und Vulkanausbrüche nachgestellt.

Soziologische Perspektive

- „Naturkatastrophen“ sind nur Katastrophen, weil **Menschen betroffen sind**.
- „**Kulturkatastrophen**“ – der Mensch produziert seine eigenen Katastrophen.
- Steigende Katastrophenschäden laut Rückversicherung „München Re“.



Die Anzahl der relevanten Naturkatastrophen und Katastrophenschäden nimmt zu.

Die Rückversicherung München Re haben starkes Expertenwissen und statistisches Wissen gesammelt, weil das ihr Geschäft ist, sie wissen wer, wo, wie viel Schäden hatte durch welches Naturereignis. Diese Informationen sind kommerzielles Wissen. Teilweise wird das Wissen geteilt, auch in der Wissenschaft werden diese kommerziellen Daten verwendet.

Katastrophenfilme: Katastrophen als zentrales Thema im Filmgeschäft.

System Boden als wichtiger Akteur in der Erdsystemforschung

Von außen betrachtet ist klar, wo sich überall der Boden befindet. Der Boden ist die Komponente, auf der das terrestrische Leben stattfindet.

Dort, wo kein Wasser ist, gibt es Land – und dort, wo Land ist, befindet sich Boden.

Geröllfelder, Schwemmmflächen und Lavaströme sind jedoch kein Boden.

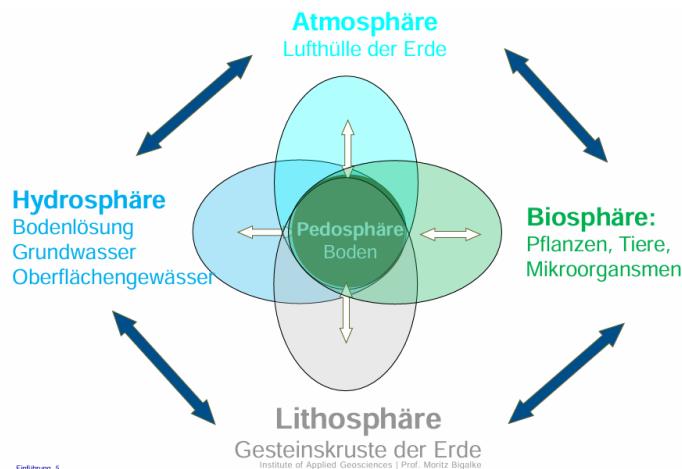
Boden existiert nur in Verbindung mit Leben.

Was ist Boden?

- **Blumenerde?** Nein.
- **Garten?** Kein direkter Zugang zum Boden.
- **Boden ist der tiefere Bereich**, in dem **chemische Bodenprozesse** sichtbar sind.

Boden bildet sich etwa **einen Meter unter der Erdoberfläche** aus verwittertem Gestein und in Wechselwirkung mit Pflanzen.

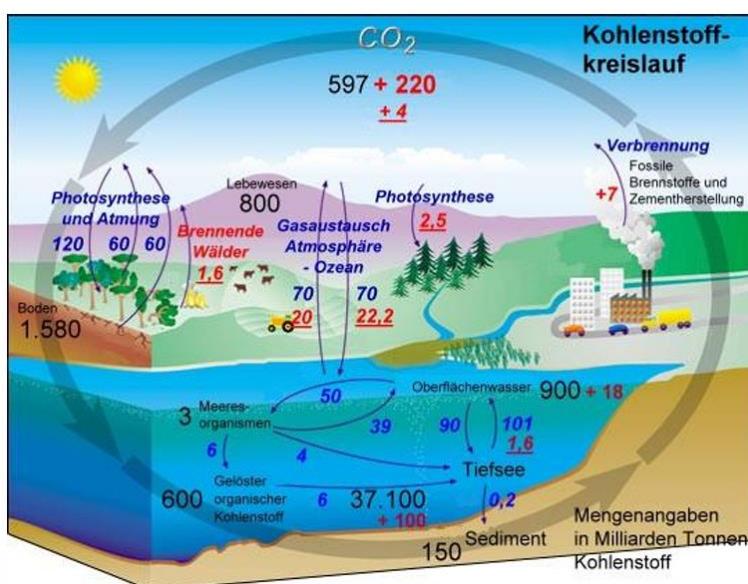
Die **Pedosphäre** ist die Oberfläche der **Lithosphäre** und die **Schnittstelle zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre** (Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen).



Alle Voraussetzungen für die Biosphäre ergeben sich aus:

- der **Steinkruste** (Lithosphäre),
- verwittertem Gestein,
- **Humus** (zersetzte organische Substanz),
- Wasser aus der **Hydrosphäre**,
- Gasen und Sonnenlicht aus der **Atmosphäre**.

Kohlenstoffkreislauf – Die Rolle des Bodens



Der Boden ist eine **zentrale Schnittstelle** und damit ein **Schlüsselakteur** im Kohlenstoffkreislauf.

Boden besteht zur **Hälfte aus festen Stoffen**, der Rest setzt sich aus **Wasser und Luft** zusammen.

- **Hohlräume im Boden** sind essenziell für Wasser- und Luftzirkulation.
- **Pflanzenwurzeln benötigen diese Hohlräume**, ebenso Bakterien und andere Bodenlebewesen.
- Auch größere Organismen leben in diesen Hohlräumen.

Boden war ursprünglich massives Gestein. Über **tausende bis zehntausende Jahre der Verwitterung** hat er sich gebildet.

- Unterschiedliche Bodenfarben zeigen Unterschiede in der **Mineralzusammensetzung**.

Bodenhorizonte – Aufbau eines Bodens

- **Boden besteht aus verschiedenen Schichten („Horizonten“)**
- **Gesamtheit der Horizonte = Solum**, im **Schnittbild als Bodenprofil erkennbar**.
- Horizonte entstehen durch **bodenbildende Prozesse** aus dem geologischen Ausgangsmaterial (Substrat).

Fünf bodenbildende Prozesse:

1. **Verwitterung**
2. **Mineralbildung** (Neubildung von Mineralien – notwendig, damit Boden als Boden gilt)
3. **Streuzersetzung und Humusbildung**
4. **Gefügebildung**
5. **Stoffumlagerungen**

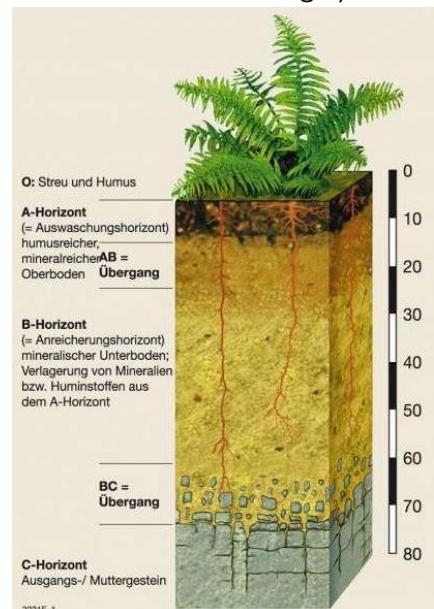
Unterschied zwischen Sediment und Boden:

- **Sediment** = Ablagerung.
- **Boden** = Ein Material, das sich über Zeit verändert hat.

Horizonte im Boden:

- **O-Horizont**: Streu/Humus
- **A-Horizont**: Oberboden
- **B-Horizont**: Verwitterungszone
- **C-Horizont**: Ausgangsmaterial

In Europa ist der Boden oft nur etwa 1 Meter tief, da er sich erst nach der letzten **Eiszeit (vor 10.000–15.000 Jahren)** gebildet hat.



- **Gletscher haben den Boden weggeschoben**.
- In den **Tropen** kann der Boden **10–20 Meter tief** sein, da es dort keine Eiszeiten gab.

Faktoren der Bodenbildung – Dokutschajew-Formel (1883)

Bodenbildung ist eine Funktion folgender Faktoren:

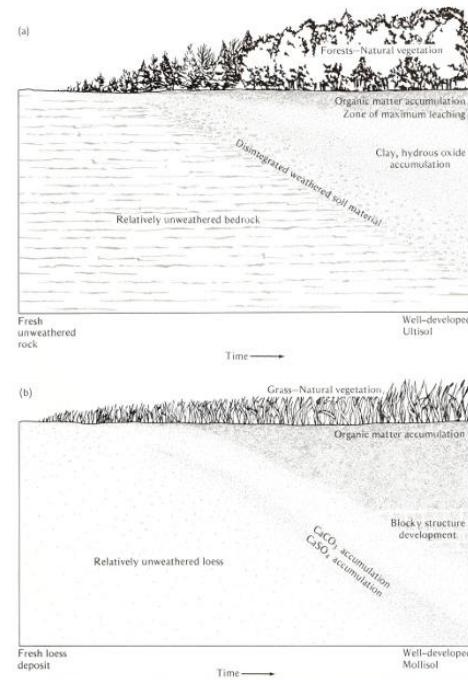
$$B = f(G, K, O, R, M) * Z$$

- **G** = Gestein (fest (Granit) oder lockeres (Gestein) Ausgangsmaterial)
- **K** = Klima
- **O** = Organismen
- **R** = Relief
- **M** = Menschlicher Einfluss
- **Z** = Zeit

Bodenentwicklungen sind **langsame Prozesse**, die mindestens über **Jahrzehnte, Jahrhunderte oder Jahrtausende** ablaufen.

Ein Beispiel für Ausgangsmaterial ist **Löss**:

- **Während der Eiszeit weit verbreitet.**
- **Feinkörnig (mehlartig)** und vom Wind transportiert.
- Enthält etwas Kalk.



Unterschiedliche Böden haben unterschiedliche Nutzungen.

Beispiel:

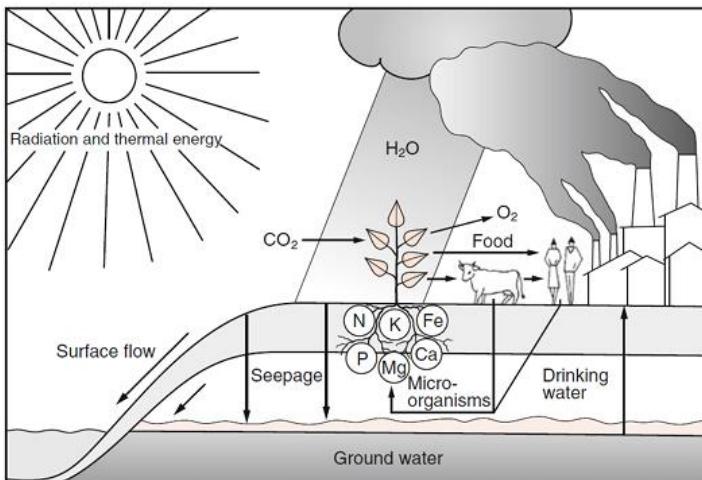
- **Seeboden mit Moorschicht:** Durch menschliche Eingriffe aufgebrochen, da der Boden **zu feucht war** und das Wasser nicht ablaufen konnte.

Definitionen von Boden

- **BGS-Definition:**
„Boden ist die äußerste Schicht der Erdkruste, die durch Lebewesen geprägt wird. Im Boden findet ein reger Austausch von Stoffen und Energie zwischen Luft, Wasser und Gestein statt. Als Teil des Ökosystems nimmt der Boden eine Schlüsselstellung in lokalen und globalen Stoffkreisläufen ein.“
- **Lexikon der Biologie:**
„Boden (Pedosphäre) ist die belebte, oberste Verwitterungsschicht der Erdkruste ...“
- **Wikipedia-Definition:**
Der Boden (von ahd. *bodam*), umgangssprachlich auch Erde oder Erdreich genannt, ist der oberste, im Regelfall belebte Teil der **Erdkruste** wird der Boden von **festem oder lockerem Gestein** durch eine **Vegetationsdecke**. Nach unten begrenzt, nach oben meist sowie die **Erdatmosphäre**.

Welche Funktionen hat der Boden für uns und das Erdsystem?

FAO-Diagramm zu Bodenfunktionen:



- **Schlechte Böden → Forstwirtschaftliche Nutzung**
- **Mittlere Böden → Weidewirtschaft**
- **Beste Böden → Landwirtschaftliche Nutzung**

Nährstoffkreislauf im Boden:

- Boden stellt **Mineralstoffe für Pflanzen bereit**.
- **Stickstoff wird von Mikroorganismen gebunden**.
- Bodenorganismen zersetzen Blätter und setzen dadurch Nährstoffe frei.
- **Gute Böden haben einen neutralen bis leicht alkalischen pH-Wert**.

Boden als Wasserspeicher:

- Speichert Wasser nicht nur zwischen einzelnen Körnern, sondern auch in **größeren Aggregaten**.
- In diesen Räumen kann Luft zirkulieren.

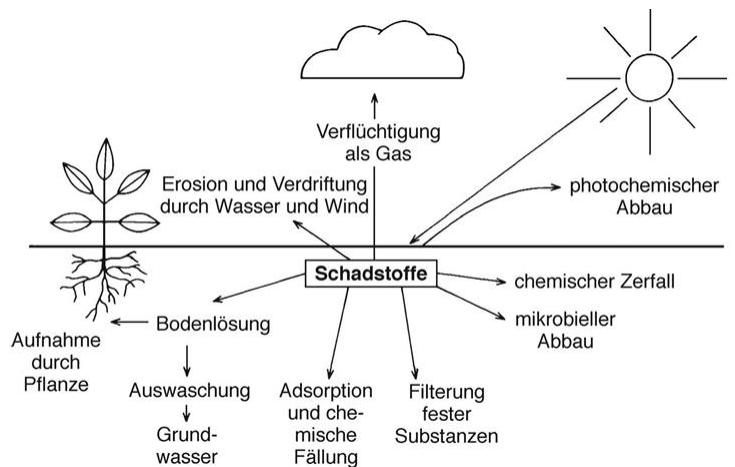
Boden als Ökosystem, Kohlenstoffspeicher und Umweltfaktor



Die Net Food Production Value Map aus 2006 zeigt den Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher Kraft und Nahrungsmittelproduktion,

Die meisten Organismen befinden sich im Boden, da viele Nährstoffe im Boden sind. Eine Hand voll Boden hat mehr Organismen als es Menschen auf der Erde gibt. Die unterirdische Biomasse ist ungefähr so groß wie die oberirdische.

Der Boden kann Schadstoffe speichern. Die Schadstoffe werden meistens gebunden. Organische Schadstoffe können abgebaut werden. Es sollte auf jeden Fall vermieden werden, dass sich die Schadstoffe ins Wasser lösen.



Boden als Kohlenstoffspeicher

- Pflanzen nehmen CO₂ aus der Atmosphäre auf.
- Ein Teil wird durch abgestorbene Pflanzenteile im Boden gespeichert, ein anderer Teil wird wieder freigesetzt.
- Permafrostboden speichert besonders viel Kohlenstoff.
- Erwärmung des Permafrosts kann große Mengen CO₂ freisetzen.
- Experiment: Kohle als Bodenverbesserer einmischen → Kohlenstoffbindung und Bodenqualität erhöhen.

Fakt:

Im Boden und im Meer ist viel mehr CO₂ gespeichert als in der Atmosphäre.

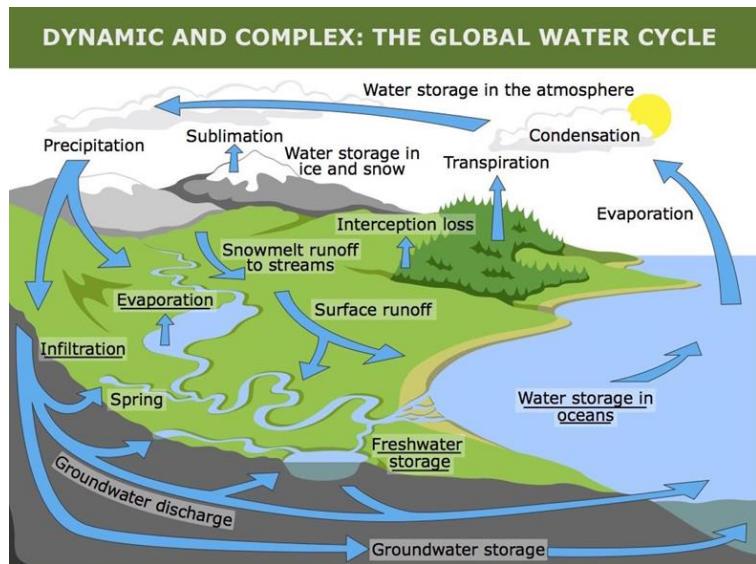
- Zusätzliche Speicherung wäre möglich, aber nicht einfach umzusetzen.

Boden als Schadstofffilter

- Boden kann **Schadstoffe binden**.
- **Organische Schadstoffe können abgebaut werden**.
- Ziel ist es zu verhindern, dass Schadstoffe ins **Grundwasser** gelangen.

Boden und Wasserkreislauf:

- Wasser versickert im Boden und wird gefiltert.
- **Sauberer Grundwasser hängt von der Bodenqualität ab**.
- **Boden spielt eine Rolle bei der Hochwasserprävention**.



Archivfunktion des Bodens

Alte Böden können auf Pflanzen, Tiere und chemische Stoffe überprüft werden.

Der Begriff menschengemachter Boden bezeichnet Boden, der wo anders abgetragen und mit Gülle gemischt und dann auf Gestein aufgetragen wurde.

Ökologische und ökonomische Bodenfunktionen

ökologischen und ökonomischen Bodenfunktionen nur erfüllbar wenn....

- Der Boden zugänglich ist (nicht versiegelt)
- Der Boden erhalten bleibt
- Die Bodenstruktur intakt ist
- Nährstoffe und Bodenorganismen im Gleichgewicht
- Schadstoffgehalt für Pflanzen und Lebewesen im erträglichen Maß ist

Bei allen Bodenaktivitäten des Menschen gilt zu beachten:

- Boden nicht vermehrbar (sehr langsame Neubildung)
- trüges Medium
- Senke für Schadstoffe
- nur intakte Struktur gewährleistet Funktionieren der Bodenfunktionen

Bedrohungen für den Boden

1. Bodenversiegelung

- **Boden wird durch Straßen und Städte versiegelt.**
- **Von 1992 bis 2012 nahm die Bodenversiegelung stark zu.**
- **Stadtstaaten haben über 30 % versiegelte Fläche.**

2. Bodenverdichtung

- Landwirtschaftliche Flächen sind oft von **Verdichtung bedroht**.
- Verdichtung führt zu:
 - **Geringerer Luft- und Wasserdurchlässigkeit.**

- **Mineralienarmut.**
- **Verringerung des Lebensraums für Bodenorganismen.**

3. Bodenerosion

- **Fruchtbare Böden werden durch Wind und Wasser abgeschwemmt.**
- **Bodenbildung: 4–8 Tonnen pro Jahr.**
- **Erosion kann den Bodenverlust jedoch übersteigen**, was landwirtschaftliche Flächen gefährdet.

4. Chemische Belastung

- **Düngemittel, Pestizide, Schwermetalle und Säureeinträge** beeinflussen die Bodenqualität.

Ackerzahl

- Qualität des Ackerbodens wird anhand der „Ackerzahl“ bewertet.
- 100 ist die beste Ackerzahl in Deutschland.
- Bewertungskriterien:
 - Nährstoffverfügbarkeit
 - pH-Wert
 - Ertragspotenzial

Forschung für eine Erde im Wandel – von Erdbeben, schwarzen Schwänen und planetarer Bewohnbarkeit

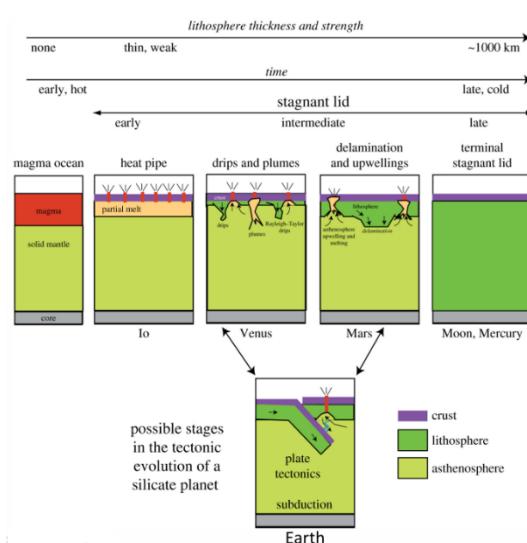
Erster Block

Venus, Erde und Mars sind Silikatplaneten in der habitablen Zone der Sonne – also in einer Entfernung zur Sonne, in der theoretisch Leben möglich wäre.

Erdbeben und Plattentektonik

- Die Erde ist seismisch sehr aktiv, aber Anfang des 20. Jahrhunderts gab es noch wenige Seismografen.
- Am **pazifischen Feuerring** können Erdbeben genutzt werden, um die Plattengrenzen zu identifizieren.
- **Venus und Mars zeigen keine Plattentektonik**, sie haben eine sogenannte „Stagnant-lid“-Tektonik.

Die Aktivität der Kontinentalplatten nahm über die Erdgeschichte hinweg zu. Der Antrieb für diese Bewegung kommt zu **80 % aus dem radioaktiven**

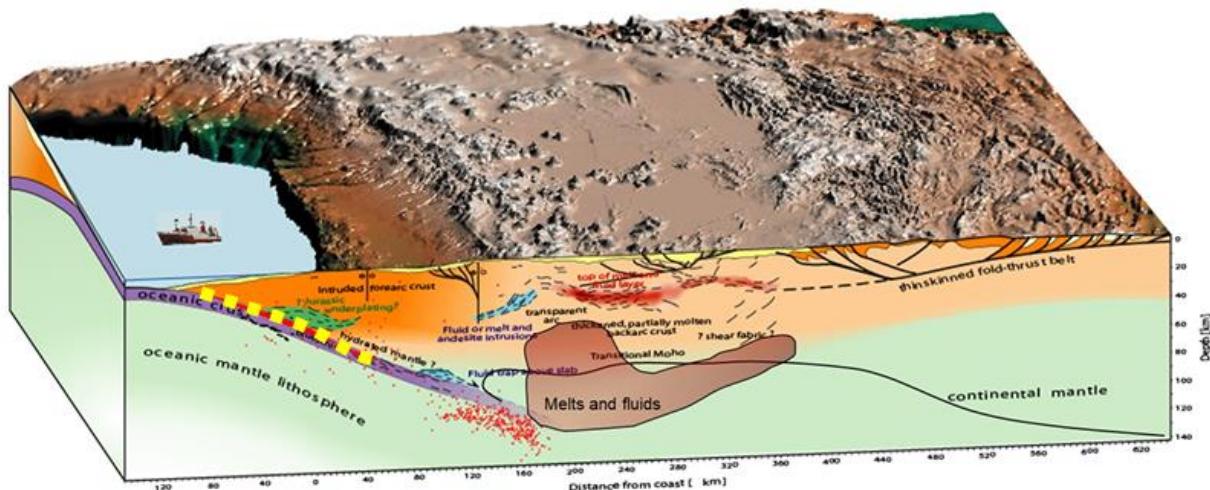


Zerfall im Erdinneren – die Erde ist also eine Art **natürlicher Kernreaktor**.
Weitere Energiequellen sind:

- **Restenergie aus der frühen Erdakkretion,**
- **Kristallisation des Erdkerns,**
- **Reibung im Erdinneren.**

Seit der Entwicklung der Erde kühlte sich der Erdkörper – insbesondere der Erdmantel – langsam ab, wodurch sich die Dynamik des Planeten verringert („Boring Billion“). Aktuell befinden wir uns jedoch in einer **Phase verstärkter Subduktion** („True Subduction Stage 5“)

Erdbeben und Mechanik der Plattenbewegung



- Kalte ozeanische Krustenplatten tauchen in den Erdmantel ab.
- Im tieferen Erdmantel wird es jedoch heißer, sodass die Gesteine sich plastisch verhalten („wie Pudding“).
- An den Grenzbereichen zwischen kalten und warmen Zonen entstehen Erdbeben.

Gebirgsbildung und Reibungskräfte

- Gebirge entstehen durch die Kollision von Kontinentalplatten.
- Theoretisch möchten Gebirge sich durch ihr Gewicht „auseinanderziehen“, was durch seitliche Kräfte verhindert wird.
- Der globale Reibungskoeffizient liegt bei **0,057** – ein nahezu konstanter Wert für die gesamte Erde.
- Die Erde folgt Newtons Gleichgewichtsgesetz.

Reibung an Plattengrenzen

- Der **effektive Reibungskoeffizient** an Plattengrenzen beträgt **0,057**.
- Das Gesetz von Byerlee dient der Abschätzung von mechanischen Spannungen im Gebirge bzw. im Fels, unter der Voraussetzung, dass Bruchzonen im Gestein vorhanden sind. Es basiert auf einer großen Anzahl an Scherversuchen.
- Der generelle Reibungskoeffizient von Gesteinen beträgt **0,6** (vergleichbar mit trockenen Wanderwegen).
- Eine **Bananenschale** hat einen Reibungskoeffizienten von **0,07**, während **Aquaplaning** zwischen **0,1** und **0,001** liegt.

- **Aquaplaning spielt eine Schlüsselrolle in Hochgebirgen**, da der Wasserdruck über die mechanischen Kräfte entscheidet.
- **Ohne Wasser („Schmierung“) würde Plattentektonik nicht funktionieren.**

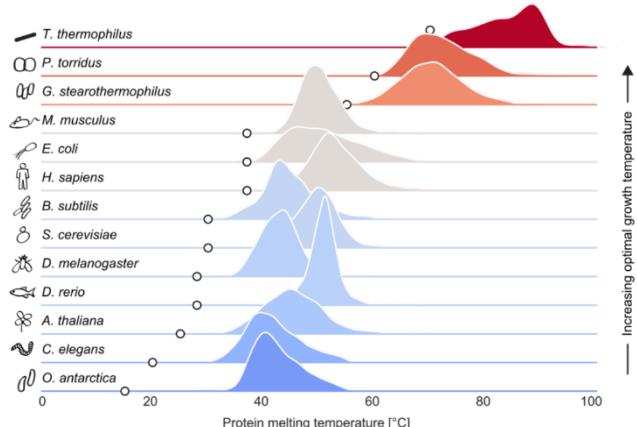
Geologische Spuren der Plattentektonik

- In den Alpen finden sich **fossile Plattengrenzzonen** – Relikte ehemaliger Plattengrenzen zwischen Europa und Afrika.
- **Pseudotachylite** sind glasähnliche Gesteine, die durch **Reibungsschmelzen** entstehen – die Reibungshitze lässt das Gestein kurzzeitig schmelzen, bevor es wieder erstarrt.
- **Hydraulische Sprengung** entsteht, wenn **zu hoher Wasserdruck** Gestein aus dem Boden reißt.
- Die Erdoberfläche gleitet auf einer dünnen Wasserschicht – ähnlich wie bei Aquaplaning.

Plattentektonik funktioniert nur bei flüssigem Wasser. Eis oder Wasserdampf können diesen Prozess nicht antreiben.

Zusammenhang zwischen Plattentektonik und Leben

- Alles Leben auf der Erde basiert auf **Proteinen (Eiweißen)**.
- Die **ideale Temperatur für proteinbasiertes Leben** liegt zwischen **15 °C (Antarktische Organismen) und 70 °C (thermophile Organismen)**.
- **Proteinbasierte Lebensformen können nur in flüssigem Wasser existieren**, was die Bedeutung der habitablen Zone verstärkt.



Der Chicxulub-Krater ist ein 66 Millionen Jahre alter Einschlagkrater mit ca. 180 km Durchmesser im Norden der Halbinsel Yucatán in Mexiko. Da er unter mächtigen Sedimentgesteinen begraben und nicht erodiert ist, zählt er zu den besterhaltenen großen Einschlagkratern der Erde. Im Zusammenhang mit der Kreide-Paläogen-Grenze wird er mit dem Aussterben der meisten Dinosaurier und eines großen Teils der mesozoischen Tier- und Pflanzenwelt während des Übergangs zum Känozoikum in Verbindung gebracht.

Langfristige Klimaregulierung durch den Kohlenstoffkreislauf

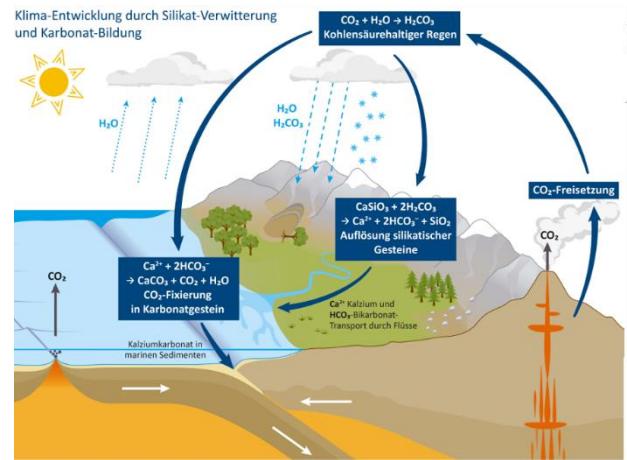
- Seit der Entstehung der Erde hat sich der **verfügbare Energiehaushalt verändert**:
 - Die verfügbare Energie der Erde beträgt nur noch **20 % des ursprünglichen Wertes**.
 - Gleichzeitig ist die **Leuchtkraft der Sonne von 70 % auf 100 % gestiegen**.
 - Die beiden Energiequellen, die Leben möglich machen sind gegenläufig. Die verfügbare Energie auf der Erdoberfläche nimmt zu und im Erdkern ab.
- Vor **2,5 Milliarden Jahren** stieg der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre stark an – eine Folge der Photosynthese. Viele frühe Organismen starben, da sie den Sauerstoff nicht tolerierten („Sauerstoffkatastrophe“).
- Die **Sonneneinstrahlung hatte jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Ozeantemperaturen**.

Kurzfristiger Kohlenstoffkreislauf:

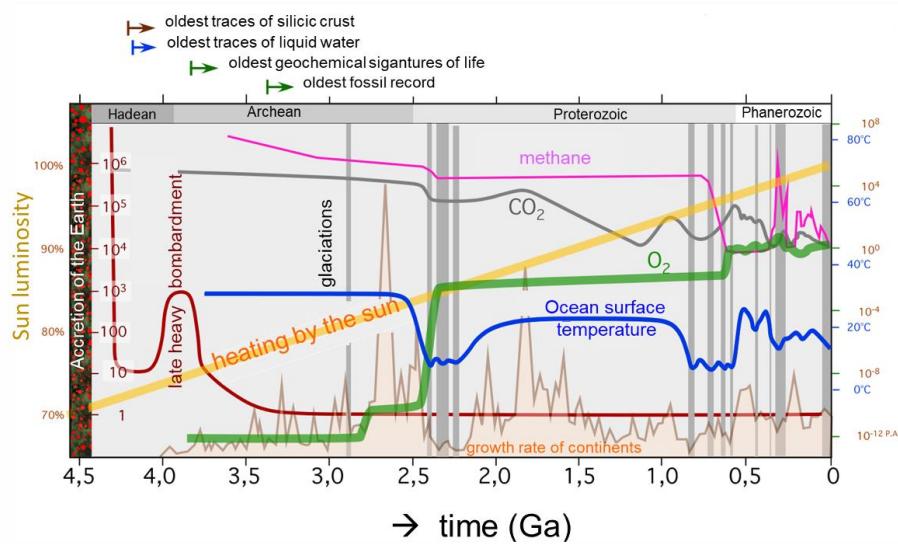
- **99,9 % des Kohlenstoffs ist in Gesteinen gebunden** – entweder in Kalkstein oder fossilem Material.
- **Siehe Kohlenstoffkreislauf – Die Rolle des Bodens**

Langfristiger Kohlenstoffkreislauf:

- Silikatverwitterung und Karbonatbildung regulieren langfristig das Klima.
- **Organismen im Wasser binden CO₂ als Calciumkarbonat** in ihren Schalen – dieser Prozess wirkt wie ein **natürliches Thermostat**.
- Die **Verwitterung von Silikaten stabilisiert die globale Temperatur**:
 - Jede Erhöhung um 10 °C verdoppelt die Reaktionsrate der Verwitterung.
 - Der Zyklus dauert **500.000 bis 1 Million Jahre** und ist langfristig von großer Bedeutung.
- **Ozeanische Kalksedimente** bestehen aus massenhaften Überresten von Lebewesen in wässriger Umgebung.
- Die **Alpen und das Matterhorn** zeigen eindrucksvolle Spuren dieses geologischen Prozesses.



Langfristige Temperaturentwicklung:



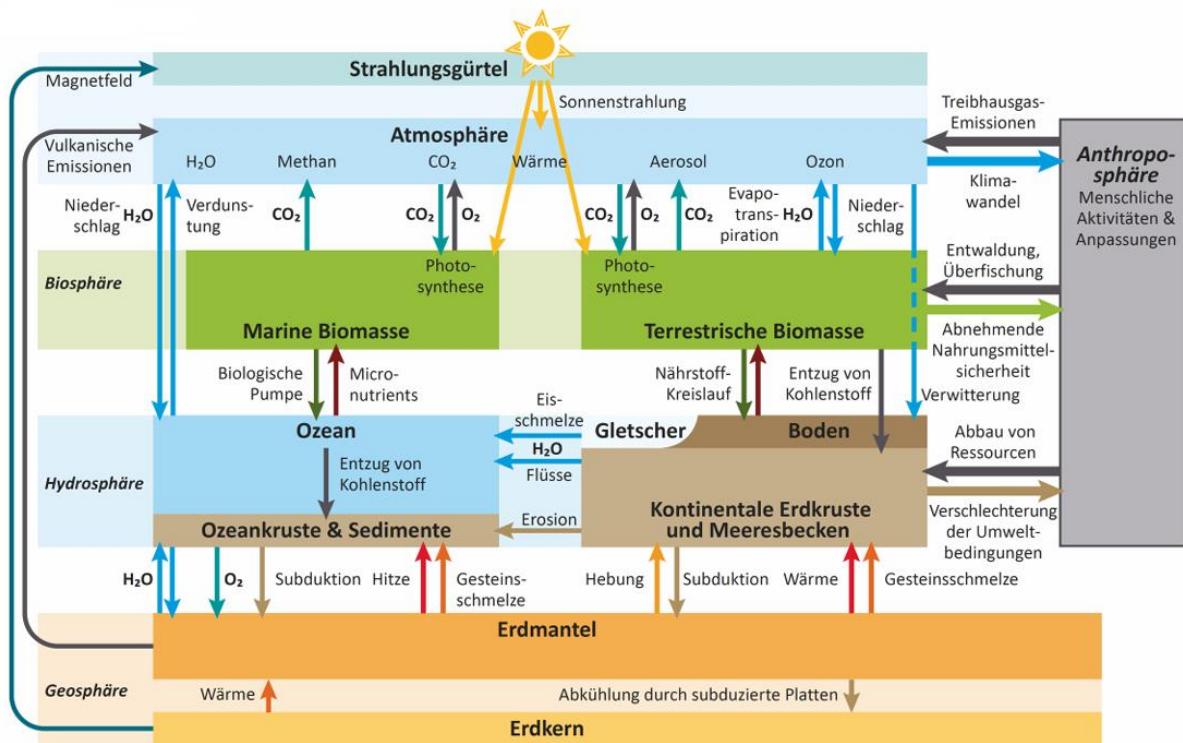
- **CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre und die Erdoberflächentemperatur** sind in den letzten **50 Millionen Jahren stetig gesunken**.
- Seit dieser Zeit wachsen viele Gebirge – durch **Verwitterung, Erosion und CO₂-Auswaschung** nimmt die Temperatur langfristig ab.
- **Kurzfristig spielt dieser Effekt jedoch kaum eine Rolle**.

Fazit:

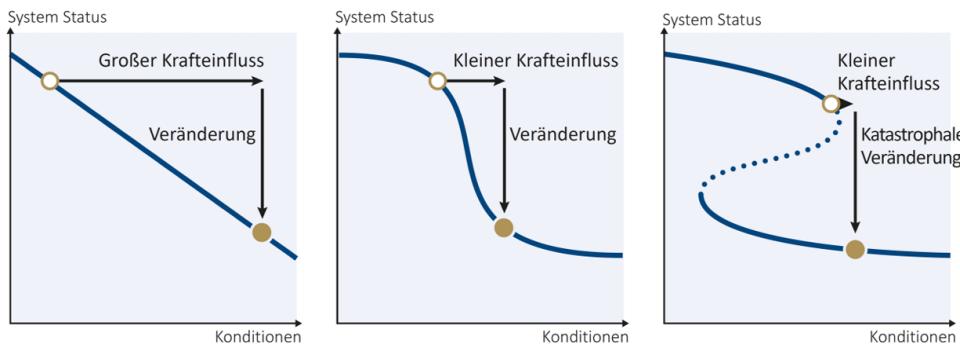
- **Plattentektonik und Biosphäre steuern gemeinsam über den Verwitterungsthermostat die Bedingungen für das Leben.**
- Die Evolution der Atmosphäre, Gebirgsbildung und Plattentektonik sind **eng miteinander gekoppelt**.

Zweiter Block - Erdsystemwissenschaft

Das Erdsystem als komplexes System



- **Erdsystem-Grafik:**
 - Die Erde besteht aus **Geosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, Atmosphäre und Anthroposphäre**.
 - Diese Systeme sind **gekoppelt** und tauschen ständig **Energie und Stoffe** aus.
- **Komplexes System:** offene Menge von geordneten Elementen die durch Relationen miteinander verknüpft sind
- Bottom-Up Ansatz scheitert, 3 regeln, wie bei Vögeln, Absatztrend zum nächsten Nachbarn konstant, Richtung und Tempo wie bei Nachbarn, zum Zentrum bewegen, diese Regeln können nicht gefunden werden beim betrachten des einzelnen Vogels.
- **Komplexe Systeme sind algorithmisch und folgen bestimmten Prinzipien:**
 - **Emergenz** (Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile)
 - **Nichtlinearität**
 - **Rückkopplungseffekte**
 - **Adaptation**
 - **Selbstorganisation**



- **Das Erdsystem zeigt Merkmale eines komplexen Systems:**
 - Lineare Systeme: **Gleichmäßige Ursache-Wirkung-Beziehungen.**
 - Nichtlineare Systeme: **Kleine Änderungen können große Auswirkungen haben (Bifurkation).**
 - **Selbstorganisierte Prozesse sind nicht exakt vorhersagbar**, aber Wahrscheinlichkeiten lassen sich angeben.
 - 3 Regeln, wie bei einem Vogelschwarm, Abstand zum nächsten Nachbarn konstant, Richtung und Tempo wie bei Nachbarn, zum Zentrum bewegen, diese Regeln können nicht gefunden werden beim Betrachten des einzelnen Vogels.

Atmosphärisches CO₂ und die Temperatur der Erdoberfläche in den letzten 800.000 Jahren

- Die Veränderungen von **CO₂-Konzentrationen und Temperaturen** über diesen Zeitraum sind zyklisch.
- Diese Zyklen werden durch die **Rotation der Erde** beeinflusst, wobei die **Rotationsachse nicht stabil ist**.
- Dadurch entstehen **Perioden von 20.000 bis 40.000 Jahren**.
- Der Einfluss des Menschen auf diesen Zeitskalen ist deutlich sichtbar.
- **Große Amplituden alle 100.000 Jahre** lassen sich durch den **Lorenz-Attraktor** erklären.
- Diese Perioden entstehen durch die **interne Dynamik eines komplexen Systems** – ohne externen Einfluss.
- **Selbstorganisierte Prozesse** sind dissipativ, nichtlinear, besitzen Schwellenwerte, sind skaleninvariant und werden von einem **kritischen Attraktor** kontrolliert.
- Diese Systeme sind **nicht exakt vorhersagbar** – lediglich Wahrscheinlichkeiten können berechnet werden, aber keine genauen Prognosen.

Bak's Sandhaufen-Modell („Sandpile Dynamical System“) und das **Gutenberg-Richter-Gesetz** zeigen: Es gibt **wenige große Erdbeben**, aber **viele kleine Erdbeben**.

World Stress Map 2016:

- **Reibungskoeffizienten aus Experimenten und Bohrungen** stimmen mit dem **Byerlee-Graphen** überein.
- Die **Erdkruste ist global nahe am Versagensgleichgewicht**.
- **Erdbeben durch externe Einflüsse:**
 - Regenfälle,
 - **Gotthard-Basistunnel**,
 - Talsperren,
 - **Geothermale Experimente**.
- **Natürliche und anthropogene Faktoren:**

- **Der Mensch greift in ein selbtkritisches System ein** und macht sich dadurch Teil des Systems.

Dritter Block – Naturkatastrophen und gesellschaftliche Resilienz

Zusammenhang zwischen Weltbevölkerung und wirtschaftlichen Schäden durch Naturkatastrophen:

- **Die Weltbevölkerung wächst linear, aber die wirtschaftlichen Schäden exponentiell.**
- Extremereignisse werden häufiger und intensiver.
- Wirtschaftliche Folgen von Naturkatastrophen wachsen weltweit deutlich schneller als die Weltwirtschaft. Das bedeutet, in Zukunft könnte es sein, dass die gesamte Wirtschaft nur dafür da ist, sich von Katastrophen zu erholen.
- Die geophysikalischen Ereignisse sind relativ konstant. Die Meteorologischen und andere Ereignisse nehmen alle zu, das liegt aber auch daran, dass mehr Beobachter da sind.

Urbanisierung, Bevölkerungswachstum und Naturkatastrophen

- **Fast konstanter Prozentsatz an Toten** bei Erdbeben und anderen Naturereignissen.
- **Korrelation zwischen Korruptionsindex und Opferzahlen:** Schlechte Infrastruktur erhöht das Risiko.
- **Hochwasserkatastrophen und Sterblichkeitsrate vor und nach "Schwarzen Schwänen"** (seltene Extremereignisse):
- Beispiel: **Hochwasser in Indonesien** – die Sterberate sinkt nach extremen Ereignissen.
- **Anpassung an Katastrophen:**
- **Japan als Vorbild:**
 - **Holzbauten statt Steinbauten** für bessere Erdbebenresistenz.
- Wenn Katastrophen **mehrfach pro Generation auftreten**, passt sich die Gesellschaft an und wird resilenter.
- Sind Katastrophen **seltener als eine Generation**, fehlt diese Anpassung.

Wahrscheinlichkeit und Schäden von Extremereignissen

- Je **seltener ein Ereignis**, desto größer seine **Magnitude**.
- Menschen **unterschätzen seltene Ereignisse** und fokussieren sich nur auf kleinere, häufigere Katastrophen.
- **Verbindung von Statistik und Risikobewertung mit Wissenslücken:**
 - **Schwer lösbar für den Homo sapiens.**
- **Verhaltensökonomie und Risikowahrnehmung:**
 - Der Mensch denkt **kurzfristig statt langfristig**, was durch das **limbische System im Gehirn** beeinflusst wird.

Das Erdsystem als komplexes System

- Es zeigt **positive und negative Rückkopplungen**, die Systeme **stabilisieren oder destabilisieren**.
- Es besitzt Merkmale von **Selbstorganisation, Kritikalität und algorithmischen Mustern**.

- Die **Natur als System** zeigt eine **interne Dynamik und emergentes Verhalten**, was die **Zuordnung einfacher kausaler Zusammenhänge erschwert**.

Wichtige Herausforderungen

- Entwicklung ‚systemorientierter‘ Forschungsstrategien, die disziplinäre Grenzen überwinden, um Lösungen zu entwickeln
- Entwicklung eines Denkens, dass Komplexität in nicht-linearen, vielfach rückgekoppelten Systemen an Stelle einfacher, linearer Kausalitäten setzt
- Entwicklung von Resilienz gegenüber ‚schwarzen Schwänen‘ und den Folgen der inneren Dynamik komplexer Systeme für den Menschen

Fazit

- Komplexe Systeme zeigen nichtlineares Verhalten und sind schwer vorhersagbar.
- Systemorientierte Forschung ist notwendig, um Resilienz gegenüber extremen Ereignissen zu entwickeln.

Wechselwirkung von Biodiversität, Technik und Mensch

Klimawandel – Bedrohung und Szenarien

Künftige Klimaentwicklung hängt von Emissionen ab

- Die zukünftige Entwicklung des Klimas ist stark von unseren Emissionen abhängig.
- **Zwei Szenarien:**
 - **RCP 2.6:** Begrenzte Erwärmung mit der Chance, das **2-Grad-Ziel** zu erreichen.
 - **RCP 8.5:** Worst-Case-Szenario mit ungebremstem Emissionsanstieg und möglicher **Erwärmung von 5 °C** oder mehr bis zum Jahr 2100.
- Diese Szenarien sind **theoretische Projektionen** und keine festen Vorhersagen.
- Eine Erwärmung um **5 °C entspricht dem Temperaturunterschied zwischen einer Eiszeit und einer Warmzeit**, was dramatische Veränderungen mit sich bringen würde.

Vergleich mit historischen Klimaveränderungen

- Die letzten **60 Millionen Jahre** zeigen erhebliche Schwankungen im Erdklima.
- Im **Eozän** gab es z. B. in Nordkanada tropische Bedingungen.
- Eine Erwärmung um **4–5 °C** würde das Klima in eine völlig neue Epoche führen und eine **Zeitreise von 15 Millionen Jahren rückwärts** bedeuten.
- **Die gute Nachricht:** Aufgrund steigender Investitionen in erneuerbare Energien ist das schlimmste Szenario (RCP 8.5) **unwahrscheinlicher geworden**.

Kipppunkte im Klimasystem

- Kipppunkte sind **schwer vorhersehbare Schwellenwerte**, deren Überschreiten dramatische und irreversible Folgen haben kann.
- Wichtige Kipppunkte:
 - **Amazonas-Regenwald:** Abholzung + Klimawandel könnten zu einer Schwelle führen, an der er **sich nicht mehr regenerieren kann**.
 - **Permafrost:** Auftauen setzt große Mengen **CO₂ und Methan** frei.

- **Boreale Wälder:** Erhöhtes Absterben durch Brände und Dürre.
- **Grönlandeisschild:** Schmelzen könnte unumkehrbar sein, was zu **mehreren Metern Meeresspiegelanstieg** führt.
- **Golfstrom (Atlantische Umwälzzirkulation, AMOC):** Neuere Studien deuten darauf hin, dass diese **wesentliche Meeresströmung in wenigen Jahrzehnten kollabieren könnte.**

Biodiversitätskrise – Das 6. Massenaussterben

- **Bis zu 1 Million Arten** sind weltweit vom Aussterben bedroht.
- In **Europa** sind **19 %** der Arten gefährdet, in Deutschland sind **ein Drittel der Arten bestandsgefährdet**.
- **Vergleich mit der Kreidezeit:** Die aktuellen Aussterberaten sind vergleichbar mit dem **Asteroideneinschlag, der die Dinosaurier auslöschte**.
- Besonders betroffen:
 - **Offenland- und Agrarökosysteme** (z. B. Wiesen, Felder).
 - **Wälder zeigen regional Verbesserungen**, aber viele Monokulturen sind anfällig.

Wälder und Klimawandel

Das „neue Waldsterben“

- Seit der **Dürre 2018** ist die Baumsterblichkeit stark angestiegen.
- Besonders betroffen sind **Fichtenmonokulturen**, da sie anfällig für **Trockenheit und Borkenkäferbefall** sind.
- **Der deutsche Wald ist aktuell keine CO₂-Senke mehr**, da durch Baumsterben mehr CO₂ freigesetzt als gespeichert wird.

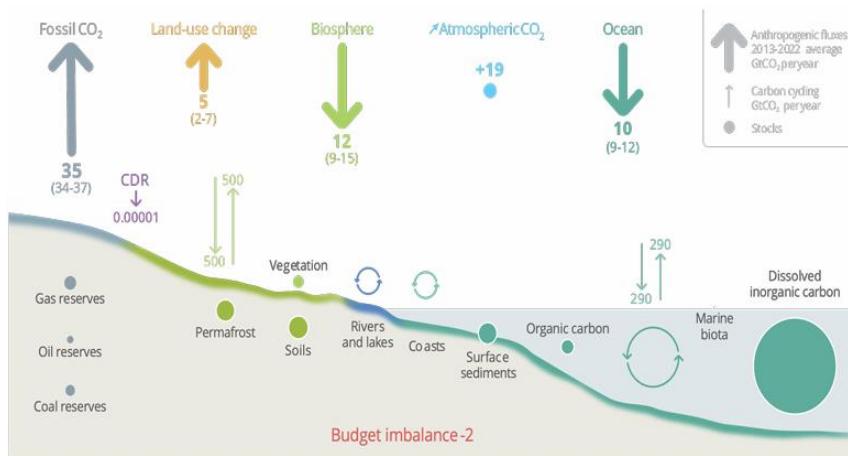
Zukünftige Waldszenarien

- **Sommerniederschläge werden abnehmen**, während **Winterniederschläge zunehmen**.
- Dies könnte zu einem **submediterranen Klima in Teilen Deutschlands** führen.
- **Lösung: Mehr Baumarten- und genetische Vielfalt im Wald.**
- **Naturverjüngung** ist vorteilhaft, da sie genetische Vielfalt erhält.

Waldbrände

- **Steigende Brandgefahr in Mitteleuropa** durch:
 - **Trockenheit & Hitze.**
 - **Borkenkäfergeschädigte Fichtenwälder** als Brandbeschleuniger.
- In Zukunft könnte das **Feuerwetter in Deutschland dem in Südeuropa ähneln**.
- **Beispiel:** Die Waldbrände in Kanada 2023 setzten **doppelt so viel CO₂ frei wie Deutschlands gesamte Emissionen**.

Kohlenstoffkreislauf & natürliche Senken



- **29 % der CO₂-Emissionen** werden von **Landökosystemen (Wäldern, Mooren)** aufgenommen.
- **26 % werden von den Ozeanen gespeichert.**
- **Problem:** Die Landsenke ist **nicht stabil** und kann je nach Umweltbedingungen schwanken.

Moorlandschaften

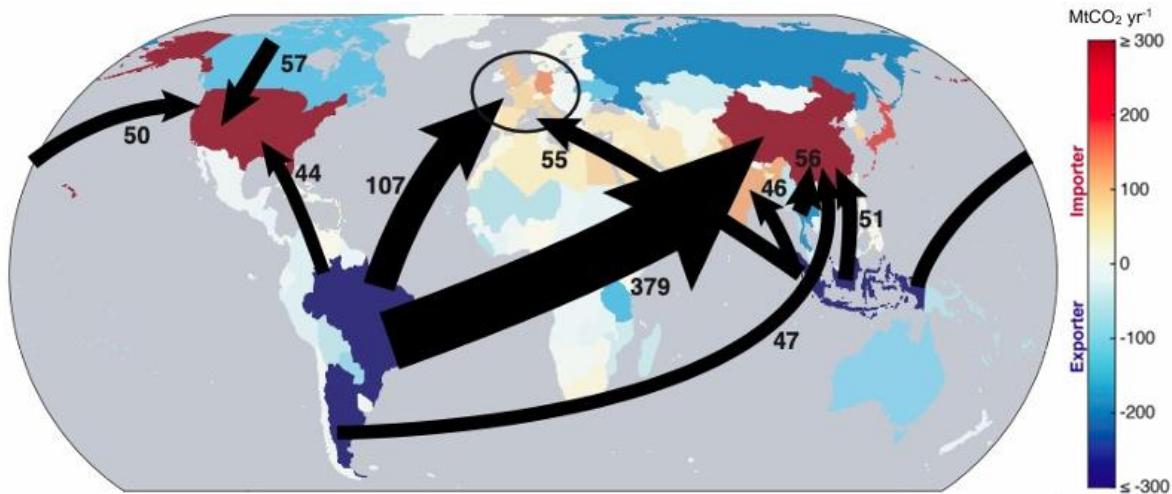
- Moore speichern große Mengen **Kohlenstoff**.
- **Entwässerung setzt CO₂ frei** – Wiedervernässung könnte die Emissionen senken.
- **Moorschutz = Hochwasserschutz**, da Moore als Schwämme funktionieren.

Bedrohung durch Entwaldung

- Brasilien und Indonesien haben durch Abholzung **mehr CO₂ emittiert als einige Industrienationen**.
- **Haupttreiber:** Fleischproduktion und Palmölplantagen.
- **Lösung:** Sofortiger **Stopp der Regenwaldabholzung**, wie in der Klimakonferenz 2021 beschlossen.

Kritische Betrachtung von Geoengineering & CO₂-Entnahme

CO₂ Belastung durch Handel. Pfeile zeigen CO₂ Produktion zu Konsumenten.



Bioenergie mit CO₂-Speicherung (BECCS)

- **Idee:** Pflanzen anbauen, verbrennen, CO₂ abscheiden und unterirdisch speichern.
- **Problem:** Würde riesige Flächen (~1 Mrd. Hektar) beanspruchen → Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion.
- **Fazit:** Unpraktikabel und ökologisch schädlich.

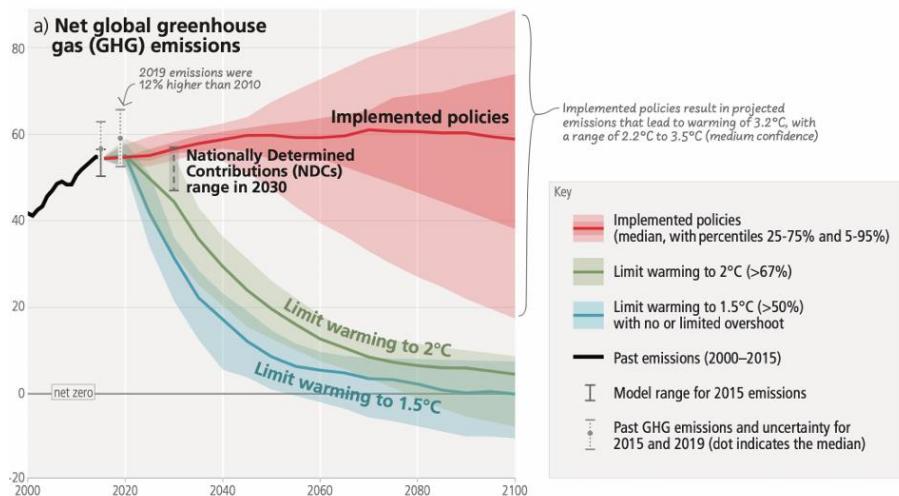
Baumpflanzungen

- **Problem:** Globale Baumpflanz-Initiativen zerstören natürliche Savannen und Grasländer.
- **Bäume in falschen Gebieten pflanzen** → Verlust von biologischer Vielfalt.
- Viele Aufforstungsprojekte sind nicht realistisch oder ökologisch sinnvoll.

Fazit: Handlungsmöglichkeiten & Ausblick

Positive Entwicklungen

- Der Klimawandel kann abgeschwächt werden, wenn erneuerbare Energien weiter ausgebaut werden.
- Politische Trends zeigen, dass das Worst-Case-Szenario (RCP 8.5) unwahrscheinlich wird.
- Investitionen in Windkraft & Solarenergie steigen.



Schlussfolgerungen

- Klimaschutz und Biodiversitätsschutz müssen gemeinsam betrachtet werden.
- Ein diverser Wald ist resilenter gegen Klimawandel und Brände.
- Die Reduzierung von Abholzung und nachhaltige Landnutzung sind entscheidend.
- Technische CO₂-Entnahmen sind keine Wundermittel, sondern intakte Ökosysteme sind der Schlüssel zur CO₂-Speicherung.

Geoarchive – Umweltdaten aus der Vergangenheit

Was sind Geoarchive?

Die **Temperaturentwicklung der Erde** über lange Zeiträume ist für frühere Perioden, insbesondere vor 500 Millionen Jahren, nur relativ unsicher rekonstruierbar. Solche Daten werden aus Geoarchiven erschlossen.

Daten werden durch **Rekonstruktion (Proxy-Methoden)** gewonnen. Dabei werden indirekte Messungen durchgeführt, die mithilfe einer Transferfunktion in Temperaturwerte umgerechnet und auf heutige Situationen normiert werden.

Auch **historische Klimaforschung** nutzt schriftliche Archive. Diese enthalten **qualitative Angaben** zu Wetterereignissen mit Bezug auf Landwirtschaft, Ernteerträge, Flutkatastrophen, Preise und andere historische Aufzeichnungen.

Diese **stellvertretenden Informationen** werden **Proxies** genannt.

Erschließung von Geoarchiven

Anforderungen an ein Archiv

- **Schriftarchive** → Serielle Informationen, möglichst lückenlos, ständige Einlagerung und Konservierung, mit Datums- oder Jahresangaben versehen, lesbar, übersetzbare und mit anderen Archiven vergleichbar. (Digitale Bibliotheken)
- **Geoarchive** → Hohe zeitliche Auflösung, möglichst lückenlos, Platz für Wachstum oder Einlagerung, keine nachträglichen Veränderungen, Datierung notwendig, analytische

Methoden, Transformationsmodelle, Vergleich mit anderen Archiven, internationale Datenbanken.

Ein **Geoarchiv** ist ein **natürliches System**, das möglichst kontinuierlich Stofftransfer und Energieänderungen zwischen verschiedenen Kompartimenten aufzeichnet. Es wächst über die Zeit hinweg und konserviert ältere Schichten.

Vier mögliche Archivtypen:

1. **Biologisches Wachstum** (zeitlich beschränkt): Baumringe, Schalen und Korallenlagen.
2. **Eiswachstum**: Gletscher und Schilde.
3. **Kristallwachstum**: Tropfsteine (Speleotheme)
4. **Sedimentäres Wachstum**: sofern „Auffangbehälter“ für Partikel vorhanden. Diese können von Kleinstrukturen bis Tausende km große Sedimentbecken reichen. Damit unterschiedliche Skalen von Prozessen erfassbar. Oft langfristig er haltbar.

Lesen eines Geoarchivs

Nur wenige Umwelt- und Klimadaten sind direkt aus den Archiven messbar. Dazu gehören **persistente Stoffe**, die ihrer Quelle direkt zugeordnet werden können:

- **Mineralkörper** als Indikatoren für Staubeinträge durch Strömungen oder Hochwasserereignisse
- **Schwermetalle** als Indikatoren für Vulkanismus und anthropogene Schadstoffeinträge
- **Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs)** als Indikatoren für Verbrennungsprozesse
- Organische Moleküle und DNA als Anzeiger für spezifische Organismen („Biomarker“)
- Gaseinschlüsse in Eis
- Wassereinschlüsse in Gestein/Mineralen

Prähistorischer CO₂-Gehalt

- **Lufteinschlüsse im Eis** ermöglichen die Bestimmung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre über tausende Jahre hinweg.
- **Baumringe** geben durch Farbe und Ringstruktur Aufschluss über unterschiedliche Holzdichten, die durch Wachstumsperioden gesteuert werden.
- **Daten aus Baumringarchiven** liefern Informationen zu Ringdicke, Holzstruktur und Isotopenzusammensetzung.
- **Baumwachstum** findet nur im Frühjahr und Sommer statt.

Was sind gute Wachstumsbedingungen?

- **Proxies**: Indirekte Umwelt- oder Klimadaten werden meist über empirische Modelle statistisch abgeleitet.
- Beispiele:
 - Dicke von Schichten
 - Mineral- und Sedimentzusammensetzung
 - Organismen, die an bestimmte Umweltbedingungen angepasst sind
 - Umweltisotope, die beim Stoffaustausch zwischen Kompartimenten fraktionieren
 - Organische Moleküle, die temperaturabhängig sind

- Redoxsensitive Metalle

Altersbestimmung von Geoarchiven

Jedes Geoarchiv muss datiert werden. Die Wahl der Methode hängt ab von:

- Dem **Material**
- Der **Schichtung** (z. B. Jahresschichtung)
- Dem **zu bestimmenden Alter**

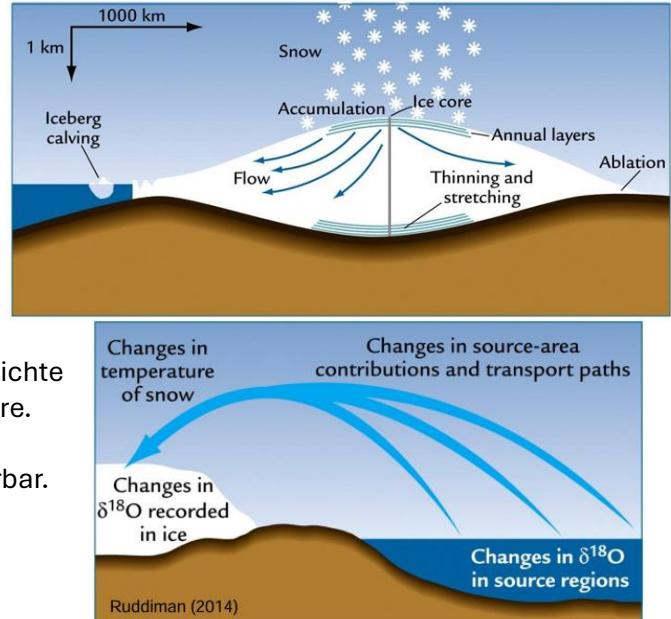
Grundlegende Verfahren:

- Abzählung von Jahresschichten
- Relative Altersbestimmung
- Ereignisse als Ankerpunkte
- Zyklizität mit bekannter Steuerung und Frequenz
- Radiometrische Verfahren

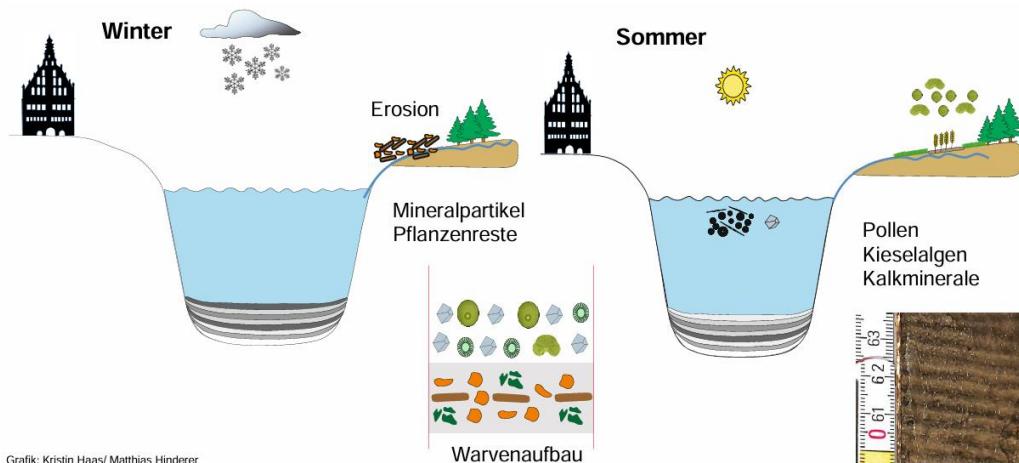
Die meisten **Sedimentarchive** können nicht einfach abgezählt werden, sodass eine Kombination aus verschiedenen Methoden nötig ist. Dadurch entsteht ein **Altersmodell mit gewisser Ungenauigkeit**.

Geoarchive und wichtige Erkenntnisse zur Dynamik des Erdsystems

- **Baumringarchive:**
 - Längere Zeitreihen können durch Überbrückungsverfahren rekonstruiert werden.
 - Schwankungen der Baumringdicke werden zur Datierung verwendet.
 - **Rekonstruktion der Sommertemperaturen aus Baumringen möglich.**
- **Schalen-Archiv:**
 - Bohrungen in Muschelschalen geben Aufschluss über das Alter durch Sommer- und Wintersignale.
- **Korallen-Archiv:**
 - Rekonstruktion der Meeresoberflächentemperatur über Zeiträume von mehr als 300 Jahren.
- **Eisarchive aus den Alpen:**
 - Schnee akkumuliert saisonal und wird über Zeit zu Eis kompaktiert.
 - **Schwefel- und Bleieinträge** zeigen die Verschmutzungsgeschichte Mitteleuropas der letzten 300 Jahre.
- **Eisarchive aus Grönland:**
 - Bis zu **200.000 Jahre** rekonstruierbar.
 - Mittels Tiefenbohrungen werden Eisschichten analysiert.
- **Isotopenanalyse:**
 - In kalten Zeiten ist mehr leichter Sauerstoff ^{16}O in den Eisschichten gebunden, da er leichter verdunstet.
 - **Vergleich mit marinen Daten** → Meere werden mit schwereren Isotopen angereichert, wenn im Eis mehr leichte sind.



- **Staubgehalt im Eiskern** gibt zusätzliche Hinweise auf Klimaveränderungen.
- **Speleotheme (Tropfsteine):**
 - Zeichnen **Änderungen des Sickerwassers** auf → Rückschlüsse auf Vegetation, Böden und Niederschläge möglich.
 - **Antarktis ist kein Modell für Europa.**
- **Flusssedimente (z. B. Mosbacher Sande, ca. 700.000 Jahre alt):**
 - Wichtige Fossilienlagerstätte, jedoch zeitlich nicht kontinuierlich.
 - **Seen eignen sich besser für langfristige Aussagen**, da sie eine höhere Kontinuität bieten.
- **Jahresschichtungen in Seen:**
 - Im **Winter** Erosion (Mineralpartikel, Pflanzenreste), geringe Produktivität im See.
 - Im **Frühling/Sommer** Pollen, hohe Algenproduktion → Bildung heller Sommerlagen.



Grafik: Kristin Haas/ Matthias Hinderer

- **Ulmer Maar (vulkanisch, 11.000 Jahre):**
 - Hochauflösende Sedimente zeigen Umweltänderungen.
- **Grube Messel (48 Mio. Jahre, Ölschiefer):**
 - Zyklische Ablagerungen zeigen Korrelationen mit **Orbitalbewegungen** und **ozeanischen Zirkulationssystemen**.
- **Dolomiten:**
 - Zeigen Zyklen auf verschiedenen Zeitskalen
- **Internationale Bohrkernprojekte (IODP, maritimes Programm):**
 - Weltweit gibt es 3 Bohrkernlager
 - Bohrkerne aus dem Nordatlantik werden in Bremen gelagert.
 - Datenzugriff erst nach einer gewissen Sperrfrist frei.

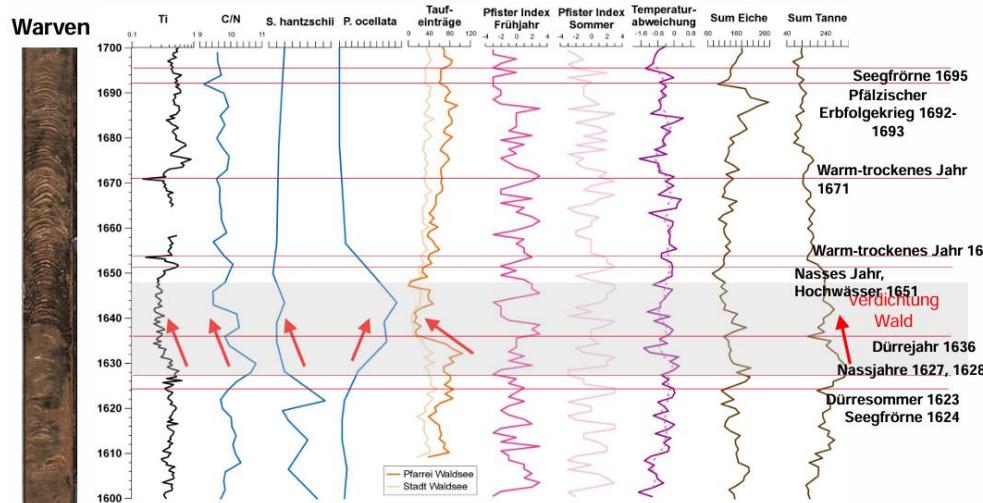
Marine Paläoklimakurve

Benthische Foraminiferen leben am Meeresgrund und zeichnen die Isotopie des Tiefenwassers auf. Shakleton nutzte 1967 erstmals deren Gehäuse für Temperaturabschätzungen

Geoarchiv-Forschung an der TU Darmstadt

- **Sedimente aus Namibia (70 Mio. Jahre):**
 - Archiv für den gesamten Kontinent.
 - **CO₂-Gehaltsbestimmung** zeigt starke Korrelation mit der Oberflächentemperatur.
- **DFG-Projekt Bad Waldsee:**
 - Mittelalter anthropogen beeinflusst.
 - **Nährstoffgehalt des Sees nahm durch Abwasser stark zu.**

- **Erkennung historischer Stadtbrände** durch PAKs in Sedimenten.
- **Schwermetallbelastung** sank durch den Dreißigjährigen Krieg stark.
- **Titan-Proxies** zur Bestimmung von Feucht- und Warmjahren.



Fazit

- Aus Geoarchiven kann die Umweltgeschichte des Systems Erde(-Mensch) für lange Zeiträume abgeleitet werden
- Im Idealfall kann für Geoarchive eine Jahresauflösung erreicht werden
- Geoarchive werden heute bevorzugt quantitativ ausgewertet. Dazu werden meist empirische Modelle verwendet
- Grundlage bilden verschiedene indirekten, umweltsensitiven Parameter (Proxis), selten direkte
- Verschiedene Steuerungsfaktoren überlagern sich. Nicht immer ist z.B. Klima von dem Einfluss des Menschen klar unterscheidbar
- Verknüpfung verschiedener Geoarchive führt zu wichtigen Referenzkurven für die Klima- und Umweltgeschichte der Erde

Aerosole im Erdsystem und die Klimaauswirkungen

Aerosol ist eine disperse Phase in einem gasförmigen Dispersionsmittel

- ein Aerosol schließt das Dispersionsmittel ein; es besteht nicht nur aus den Partikeln
- atmosphärisches Aerosol ist dispergiert in Luft
- atmosphärische Aerosolpartikel bestehen überwiegend nicht aus Wasser (ansonsten: Hydrometeore)
- Wenn Aerosol überwiegend aus Wasser besteht, nennt man es Wasser-Aerosol. Aerosol ist persistent, während eine Wolke flüchtig ist.
- im Allgemeinen überwiegt nach Volumen und Masse bei atmosphärischem Aerosol das Dispersionsmittel Beispiel: typ. 10 – 100 µg Partikel / kg Luft (Spurenstoff)
- bei atmosphärischem Aerosol unterscheiden sich Partikel in den meisten relevanten 1-3 Größen vom Dispersionsmittel, z. B. Dichte, Emission/Absorption, Brechungsindex

Die kleinste Aerosolgröße liegt im molekularen Bereich, die größten Partikel befinden sich im Millimeterbereich.

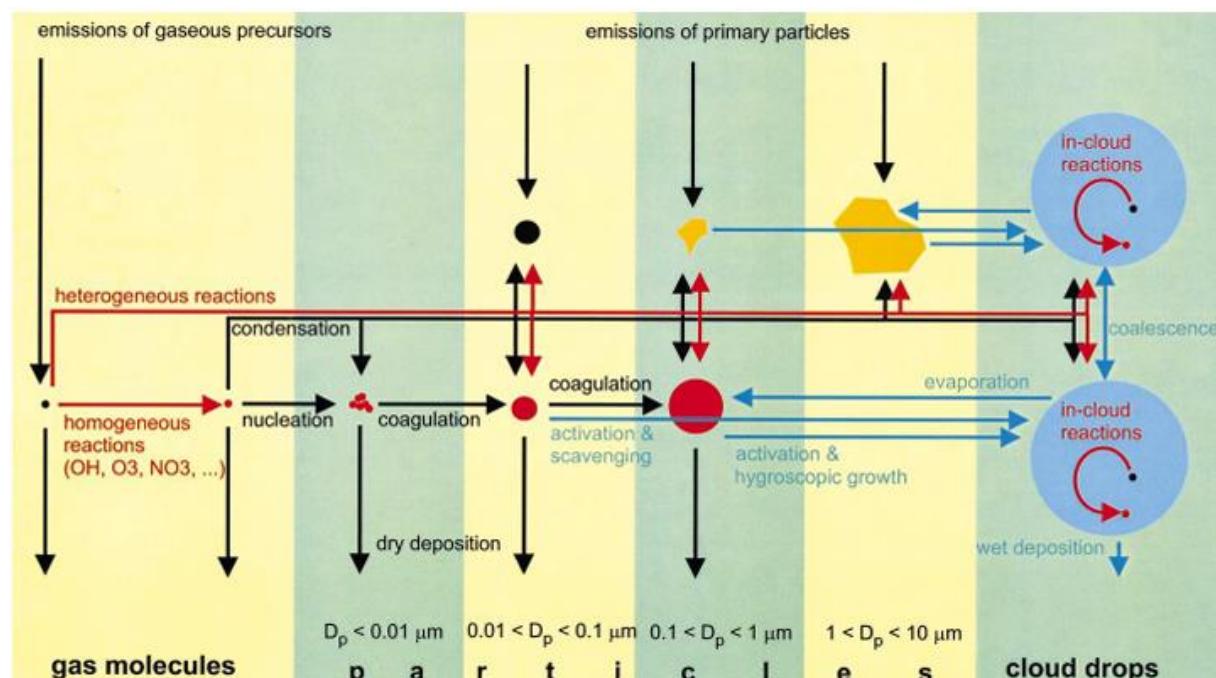
Die meisten Aerosole sind klein, die Oberfläche dominiert im mittleren Bereich, und die größte Masse tragen die größten Partikel bei. Die Partikelgröße bestimmt die wirksamen Kräfte und Prozesse und beeinflusst somit die Auswirkungen.

Unterschiedliche physikalische Effekte wirken sich auf unterschiedliche Aerosolgrößen aus. Kleine Aerosole verhalten sich ähnlich wie Moleküle, während größere Aerosole in Sandkorngröße sich wie Sandkörner verhalten.

Wo kommen Aerosole her und was sind sie?

Kleine Partikel entstehen aus Gasen, die in die Atmosphäre abgegeben werden. Dort reagieren sie mit anderen Gasen.

Prozesse wie Kondensation, Nukleation und Koagulation führen dazu, dass sich kleinere Partikel zu größeren verbinden.



Größere Partikel werden direkt in die Atmosphäre abgegeben. In Wolken können chemische Reaktionen zu starken Veränderungen der Partikel führen.

Beispiele:

- **Kleine Partikel:** Ruß, Säuren, organische Kondensate
- **Mittlere Partikel:** Marine Sulfate, Rauch, Aggregate

- **Große Partikel:** Bodenstaub, Seesalz, Pollen, Sporen, Bakterien, Flugasche

Wo geht das Aerosol hin und wie lange bleibt es in der Atmosphäre?

Aerosole verschwinden im Laufe der Zeit. Doch wie lange bleiben sie in der Atmosphäre und wohin gehen sie?

- **Kleine Partikel** verschwinden schnell durch Diffusion und Koagulation (werden größer), da sie einen hohen Diffusionskoeffizienten haben. Lebensdauer: **Stunden**
- **Mittlere Partikel** bleiben länger in der Atmosphäre. Lebensdauer: **Tage**
- **Große Partikel** fallen einfach zu Boden (Sedimentation) oder bleiben durch Impaktion und Interzeption haften.

Im mittleren Bereich haben Aerosole die längste Lebensdauer. Sie werden durch Wet Deposition entfernt, also durch Wolken und Regen. Dies geschieht jedoch nur in der Troposphäre – in der Stratosphäre können Aerosole sogar Jahrzehnte verbleiben.

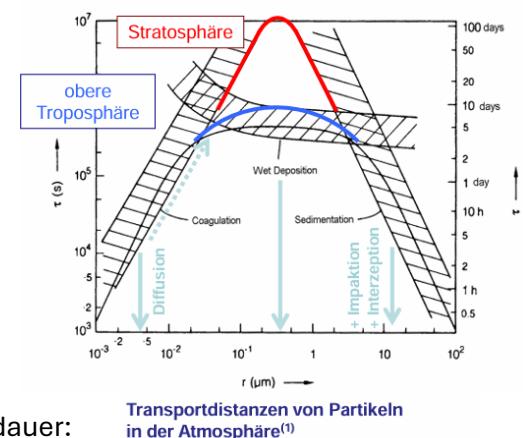
Im mittleren Bereich können Aerosole sogar interkontinental transportiert werden. Kleine und große Partikel schaffen nur wenige Kilometer, in der Höhe verhält es sich ähnlich:

- **Kleine und große Partikel:** bis zu **100 m Höhe** (bodennaher Bereich)
- **Planetare Grenzschicht:** 1–5 km
- **Troposphäre**

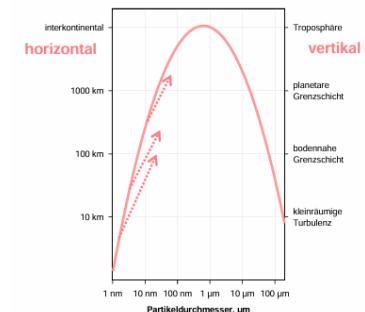
Wie viel Aerosol gibt es und was sind die Hauptquellen?

Die Mengenangaben sind unsicher. Grafik rechts ist teilweise um den Faktor 2 falsch, da es kaum zuverlässige Quellen gibt.

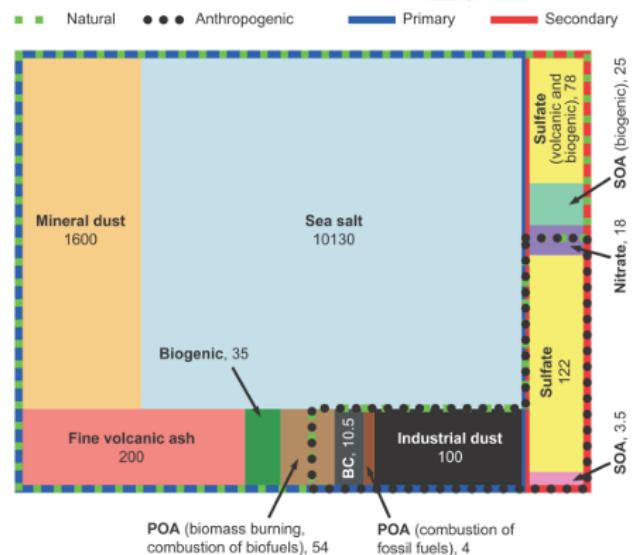
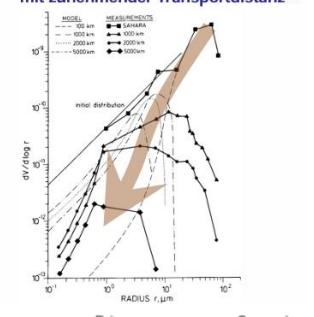
- **Mineralstaub (Wüstenstaub)** ist ungefähr doppelt so hoch wie in der Grafik dargestellt.
- **Anthropogene Faktoren** sind ebenfalls etwas höher (Daten von 2010), mit einem Rückgang der Sulfate und einer Zunahme der Niträte.
- **Anthropogene Partikel** machen nach Anzahl den größten Teil aus.



Transportdistanzen von Partikeln in der Atmosphäre⁽¹⁾



Änderung der Partikel-Größenverteilungen mit zunehmender Transportdistanz⁽²⁾



Gesundheitsaspekte skalieren mit der **Anzahl** und nicht mit der Masse der Partikel. Deshalb beschäftigt man sich intensiv mit den Auswirkungen von Aerosolen auf die Gesundheit.

Die **Entstehung von Mineralstaub** ist komplex. Partikel entstehen durch Bodenmaterial, direkte Aufwirbelung, Saltation und Aggregatzerkleinerung. Die direkte Aufwirbelung ist vernachlässigbar – außer in der Arktis, da dort der Zusammenhalt der Partikel geringer ist.

In der **Wüste** ist die Emission begrenzt durch:

- Verfügbarkeit von Material
- Zugänglichkeit des Materials
- Windbedingungen (entscheidender Faktor)

Die **Entstehung reaktiver Stickstoffverbindungen** ist ebenfalls kompliziert. Die Spaltung dieser Verbindungen erfordert viel Energie.

- Menschen wandeln **gebundenen Stickstoff** in **reaktiven Stickstoff** um, der zu Aerosolen wird.
- Die Rückumwandlung in gebundenen Stickstoff ist jedoch schwierig.
- **Anthropogene Quellen dominieren** – natürliche Quellen sind z. B. Blitze, da sie viel Energie in die Atmosphäre bringen.

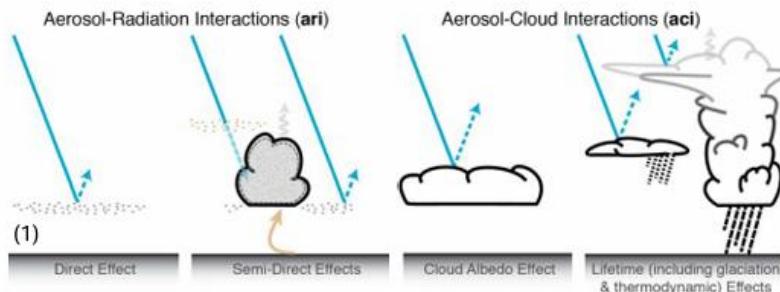
Wo befindet sich Aerosol in der Atmosphäre?

https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/aerosol/modeling/nr1_movie/

Was bewirkt Aerosol für das Klima?

Die Strahlungsbilanz der Atmosphäre und Erdoberfläche (bereits in einer anderen Vorlesung behandelt).

- **Strahlung kann nur durch das atmosphärische Fenster abgegeben werden.**
- Manche Aerosole absorbieren genau in diesem Bereich.
- **Mehr Partikel → stärkere Reflexion** vor dem Eintritt der Energie.

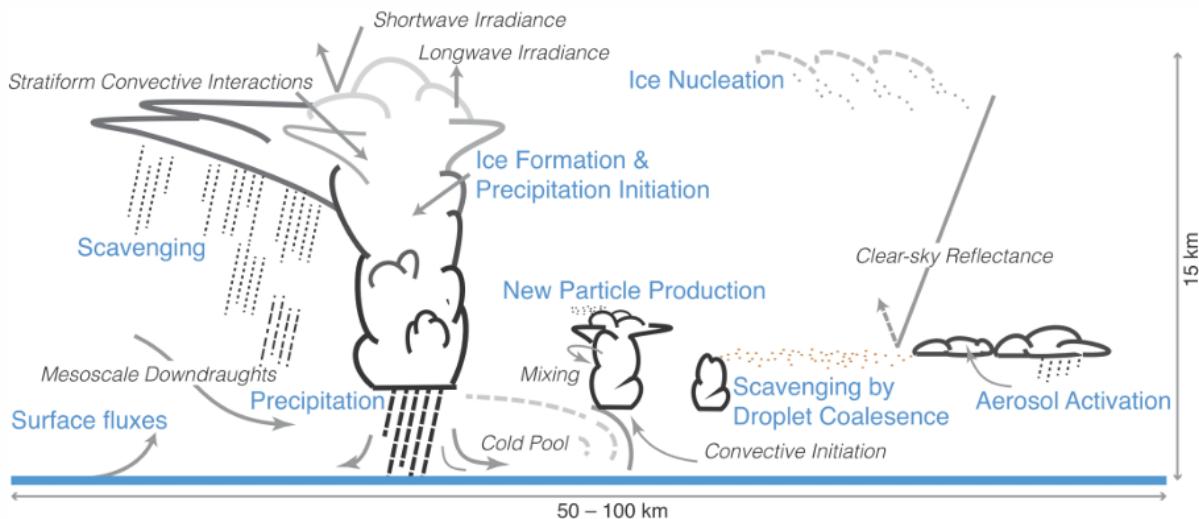


Tendenz schwer vorherzusagen:

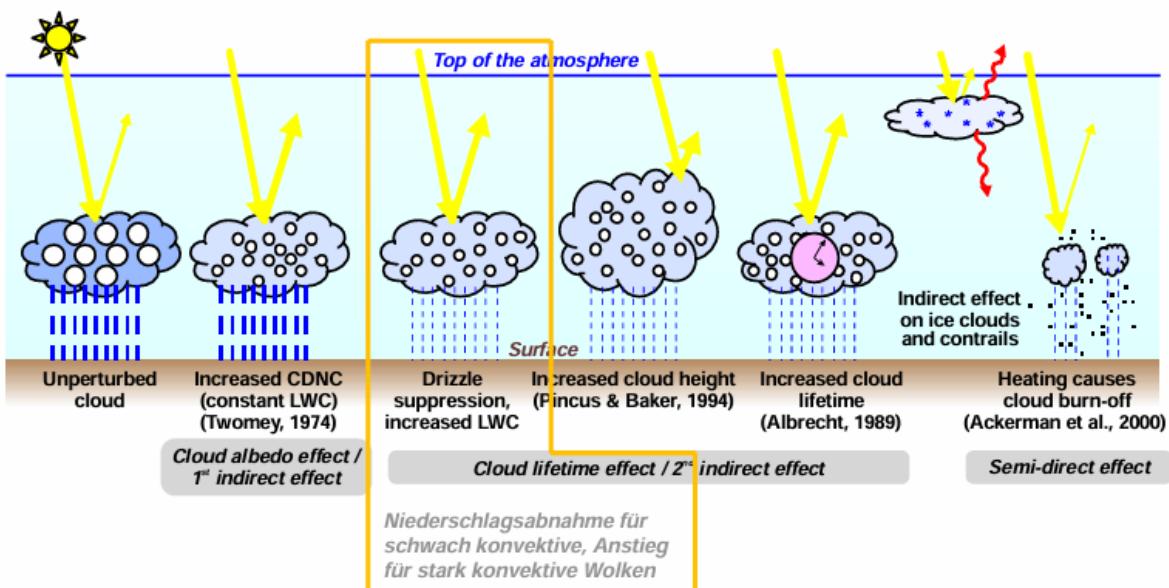
- **Helle Aerosole kühlen** die Atmosphäre.
- **Dunkle Aerosole (z. B. Ruß) erwärmen** die Atmosphäre.

Aerosol-Wolken-Interaktion: Wie verändern sich Wolken?

Es ist schwer zu sagen, welche Stoffe genau welche Wirkung haben – ob sie erwärmen oder kühlen.



Aerosole dienen als **Kondensationskerne** und verändern die Eigenschaften der Wolken. Aber auch die Wolken beeinflussen die Aerosole – sie können neue Partikel erzeugen. Das gesamte System ist hochkomplex und schwer vorherzusagen.



Aerosole tragen jedoch zu **extremeren Niederschlägen** bei.

Nach aktuellem Wissensstand haben Aerosole eine eher **kühlende Wirkung**.

Beispiel: Entschwefelung von Rauchgasen

- Heute wird nur noch CO₂ emittiert, aber kein Schwefel mehr.
- **Gut für die Umwelt, schlecht fürs Klima** → Zielkonflikt zwischen Klimaschutz und Umweltschutz.

Was bewirken Aerosole im Ökosystem?

- **Algenblüten** durch punktuell eingetragene Nährstoffe (natürlich & anthropogen).
- Deutlich stärkerer Brennnesselwuchs durch mehr Schwefel in der Luft
- **Erhöhtes Stickstoffangebot** beeinflusst terrestrische Biodiversität. Die kritische Grenze für die terrestrische Biodiversität ist in vielen stark besiedelten Ländern bereits erreicht.
- In **China** gibt es Gebiete, in denen **keine Düngung nötig** ist, da genug Stickstoff aus der Luft kommt.

Geoengineering: Eisenzugabe ins Meer

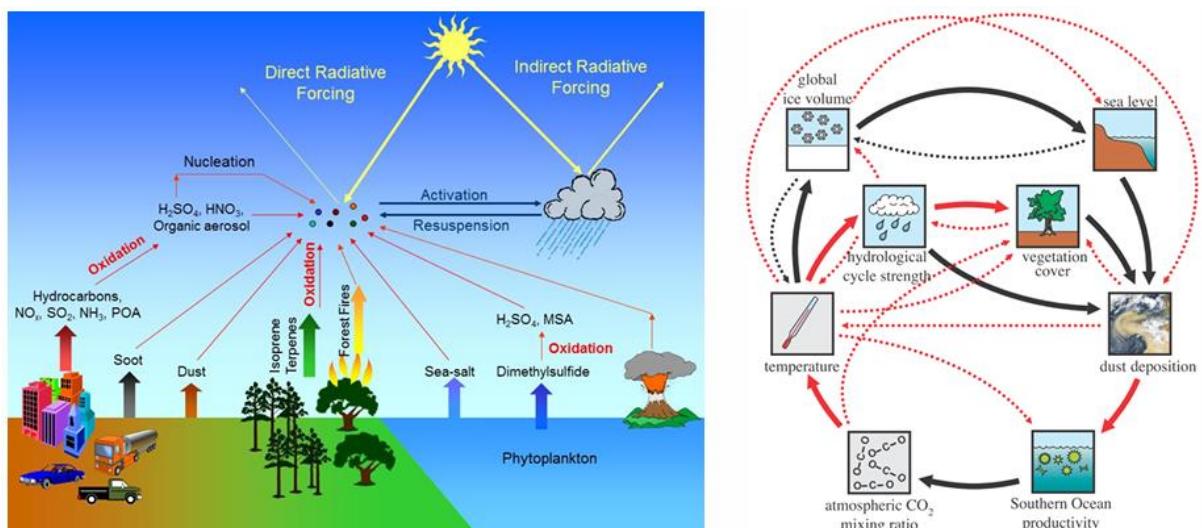
- Führt zu **höherer Bioaktivität** und mehr CO₂-Aufnahme.
- Aber: Verschiebung der Bioproduktivität, Verringerung des Sauerstoffgehalts im Wasser und zusätzliche Stickstoffproduktion.

Bodélé-Depression – stärkste Einzelstaubquelle der Erde

- Ausgetrockneter See → besondere Bedeutung für den Amazonas.
- Bodélé produziert **ca. 10 % des weltweiten Mineralstaubs** (evtl. übertrieben).
- **40 % des Staubs, der im Amazonas ankommt, stammt aus Bodélé.**
- Staub aus Afrika ist eine **wichtige Nährstoffquelle** für den Amazonas.
- Staubfluss hat seit **1800 durch verstärkten Anbau stark zugenommen**.

Zeitskalen der Aerosolwirkungen

- **Direkte Strahlung**, Wolken-Aerosol-Wechselwirkungen, atmosphärische Chemie: Stunden bis Monate
- **Snow-Albedo-Effekt**: Monate
- **Land- und ozeanische Biogeochemie**: Jahrhunderte bis Millionen Jahre



Fazit – Aerosol im Erdsystem

- Komplexe Quellsituation und Wechselwirkungen
- Weit transportierbar

- Fernwirkungen
- Speicherbar auf witterungsskaligen Zeiträumen
- Spurenbestandteil mit erheblicher Wirksamkeit
 - Strahlungsmodifikation und Änderung der atmosphärischen Stabilität
 - Änderung des Wasserhaushaltes durch Wolkenbeeinflussung (Wasser, Eis)
 - Änderung der Bioaktivität in Ozeanen und terrestrischen Ökosystemen
 - Eintrag von Schadstoffen
- Vielfältige weitere Auswirkungen
 - Gesundheit
 - Technik

Biodiversität im Erdsystem – Eine Fernerkundungsperspektive

Fernerkundung ist die Auswertung von Satellitendaten, also aus Distanz von oben

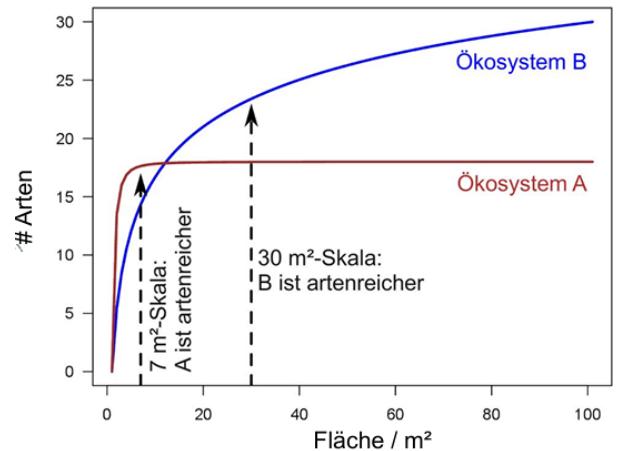
Biodiversität: Was ist das und warum ist sie wichtig?

Biodiversität wird häufig mit Artenvielfalt in Verbindung gebracht, und das aus gutem Grund. Sie ist ein wichtiger Teil der Artenvielfalt, aber es lohnt sich, genauer hinzuschauen.

Ob ein Ökosystem artenreich ist, hängt davon ab, wie man es definiert. Ein Bild zeigt eine lange landwirtschaftliche Nutzung, die ein artenreiches Ökosystem darstellt, da eine besondere Bodenmischung vorhanden ist: 12 Arten auf 0,004 m².

Tropen werden oft als artenreichste Ökosysteme bezeichnet, aber das ist nicht immer der Fall.

- **Grünland:** 12 Arten auf 0,004 m²
- **Regenwald:** 942 Arten auf 10.000 m²

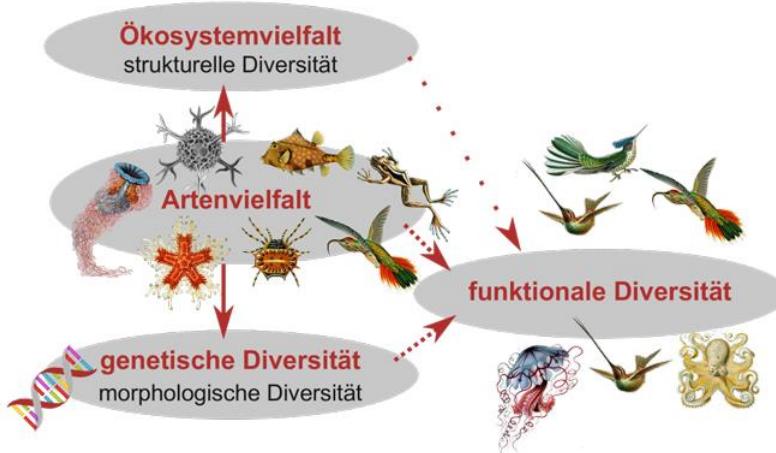


Artenreichtum ist abhängig von der betrachteten Fläche. Es kann sein, dass einige Systeme in ihrer Artenvielfalt stagnieren und nicht weiterwachsen.

Die Fläche ist wichtig, da Satellitenbilder auch immer nur eine bestimmte Fläche erfassen.

Faktoren der Biodiversität

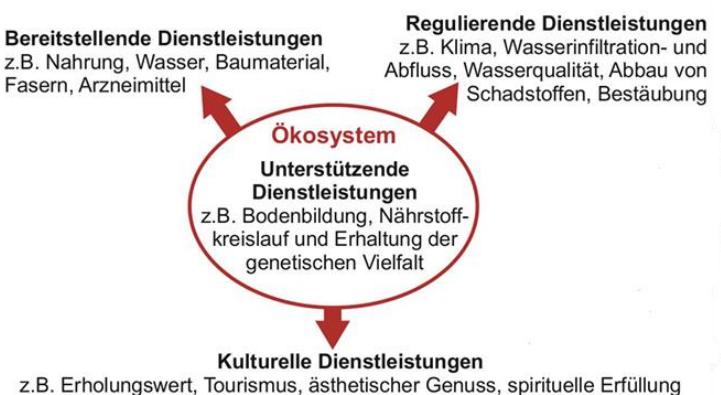
1. **Genetische Diversität (morphologische Diversität):** Je mehr Variation im genetischen Faktor, desto größer die Biodiversität.
2. **Ökosystemvielfalt (strukturelle Diversität):** Betrachtet man nur Wald oder verschiedene Systeme? Welche Ebenen werden analysiert (z. B. 3D-Strukturen)?
3. **Funktionale Diversität:** Die Zusammenfassung der vorherigen Komponenten



Warum ist Biodiversität wichtig?

Unsere gesamte Lebensgrundlage stammt aus Ökosystemen. Diese lassen sich in vier Kategorien unterteilen:

- **Bereitstellende Dienstleistungen** (direkt entnehmbare Ressourcen)
- **Regulierende Dienstleistungen** (sorgt dafür, dass Lebensgrundlagen erhalten bleiben)
- **Kulturelle Dienstleistungen** (geistige und kulturelle Bedürfnisse)
- **Unterstützende Dienstleistungen** (Bodenbildung, Erhalt der genetischen Vielfalt, eher indirekt regulierend durch das Ökosystem selbst)

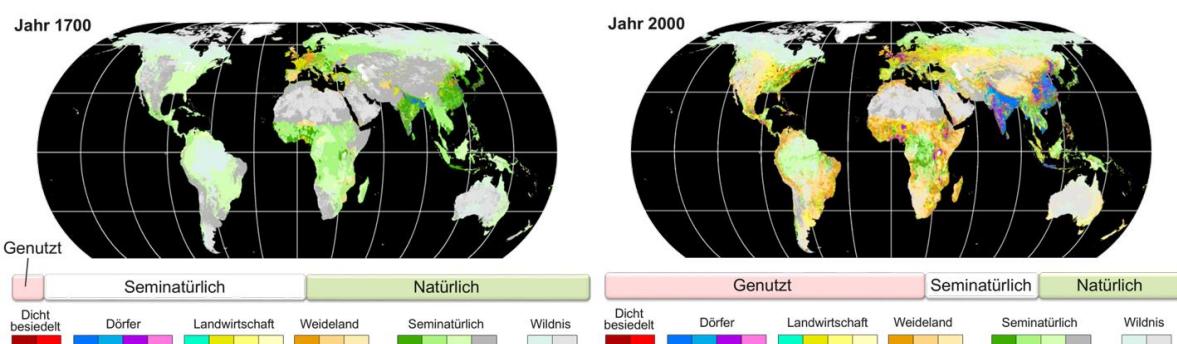


All das wird direkt von der Biodiversität gesteuert.

Warum wollen wir Änderungen in Ökosystemen beobachten?

Rezenter Wandel der Biosphäre:

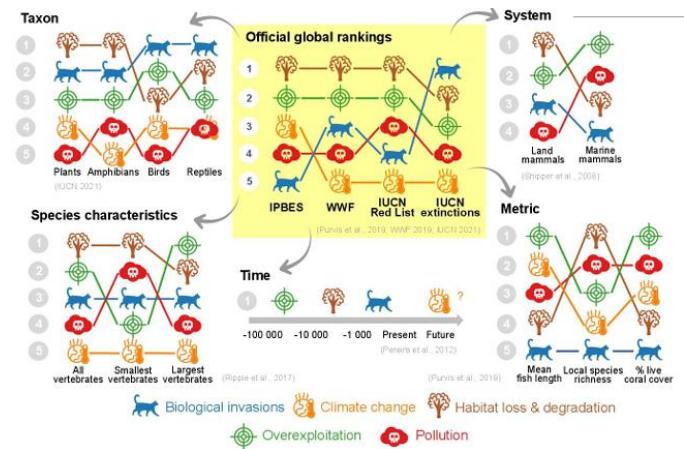
- **1700:** ca. 50 % natürlich, 45 % semi-natürlich (wenig besiedelt, landwirtschaftlich genutzt), 5 % genutzt (stark besiedelt)
- **1900:** Alle drei Kategorien etwa zu je einem Drittel verteilt
- **2000:** Mehr als 50 % genutzt



Damit entstehen Gefahren für die Biodiversität. Es gibt fünf große Bedrohungen, die alle miteinander zusammenhängen. Eine eindeutige Rangfolge, welche am schlimmsten ist, gibt es nicht:

1. **Biological Invasion**
2. **Climate Change**
3. **Habitat Loss & Degradation**
4. **Overexploitation**
5. **Pollution**

Je nach Fokus (Pflanzen, Tiere, bestimmte Arten) ist eine dieser Bedrohungen relevanter als die anderen. Auch die Zeitskala beeinflusst die Auswirkungen.



Ergebnisse des Millennium Ecosystem Assessment (2005)

- Degradation stärker als je zuvor
- Dienstleistungen ernsthaft beschädigt
- Abschaffung von Hunger und Seuchen nicht erreichbar
- Lösungen bekannt, aber institutionell und finanziell schwer umsetzbar

Was ist Fernerkundung / Erdbeobachtung?

Satellitenbilder liefern **multiskalare, raumzeitlich kontinuierliche Daten** durch Erdbeobachtung.

Fernerkundung ist eine Gruppe von Messmethoden, die eine Weiterentwicklung direkter Messungen darstellen:

- Direkte Messung
- Fernmessung
- Fernerkundung (Distanz von wenigen Metern bis zu tausenden Kilometern)

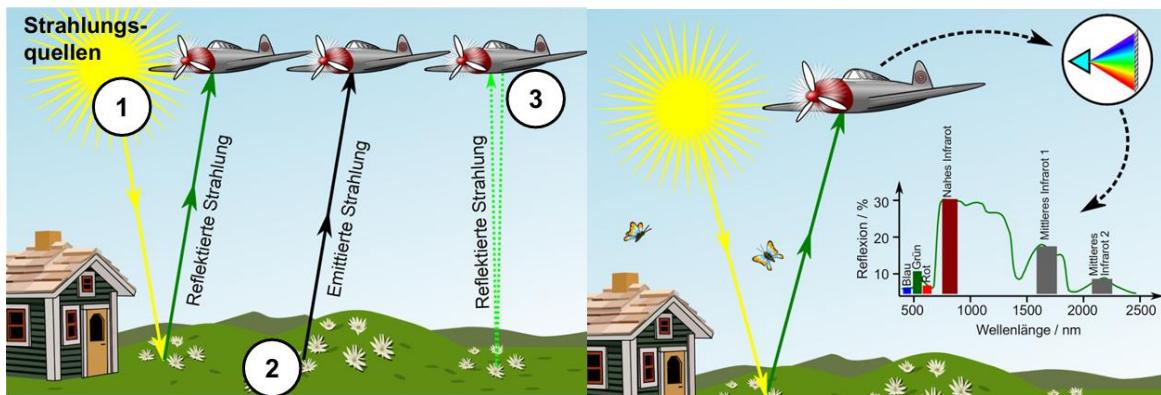
Hierbei wird hauptsächlich die elektromagnetische Strahlung der Sonne genutzt, weshalb Messungen nur bei Tageslicht durchgeführt werden können.

Fernerkundungssensortechnik

1. Sonnenstrahlung fällt auf die Erdoberfläche und wird teilweise reflektiert.
2. Oberflächen / Messobjekte emittieren Strahlung.
3. Künstliche Strahlungsquellen.

Neben den Sensoren benötigen wir Plattformen zur Bewegung dieser:

- Drohnen (UAS)
- Flugzeuge
- Satelliten



- Oberflächeneigenschaften bestimmen, wie viel Strahlung in verschiedenen Wellenlängen reflektiert wird.
- Das Reflexionsverhalten ist eine charakteristische Eigenschaft der Oberfläche.
- Die Aufteilung in Wellenlängenbereiche erfolgt durch Filter oder ein Prisma im Sensor. Dabei wird gemessen, wie viel Licht in den einzelnen Wellenlängen reflektiert wird.
- Die meisten verwendeten Sensoren können Wellenlängen bis zu 2500 nm erfassen. Dabei wird zwischen sichtbarem Licht, nahem Infrarot und mittlerem Infrarot (SWIR) unterschieden.
- Viele Einzelmessungen werden zu einem Rasterbild zusammengesetzt.
- Es gibt Unterschiede in der spektralen Auflösung, der räumlichen Auflösung, der räumlichen Abdeckung, der zeitlichen Abdeckung und den Kosten.

Satelliten

Landsat und nachfolgende Sensoren gibt es erst seit 1972, als der erste digitale Zeilenscanner entwickelt wurde. Dieser wurde von Virginia Norwood für die NASA entworfen. Da es kaum Testmöglichkeiten gab, wurde er zunächst von einem LKW aus getestet. Genau dieses Design wurde schließlich ins Weltall geschossen, während das konkurrierende Modell bereits nach wenigen Tagen ausfiel. Der Landsat-Satellit hielt hingegen knapp fünf Jahre.

Im Rahmen des ESA-Copernicus-Programms sind inzwischen viele Sensoren im Einsatz.

Sensorbilder werden für die verschiedenen Wellenlängen stets in Schwarz-Weiß aufgenommen. Durch das Einfärben der Wellenlängen lassen sich verschiedene Aspekte visualisieren. Da das menschliche Auge nur drei Farben wahrnehmen kann, werden immer nur drei Spektralkanäle kombiniert.

Dürren lassen sich anhand von Echtfarbenbildern schnell erkennen.

Die räumliche Auflösung hängt direkt von der Anzahl der spektralen Bilder ab: Je mehr spektrale Bilder vorhanden sind, desto geringer ist die räumliche Auflösung.

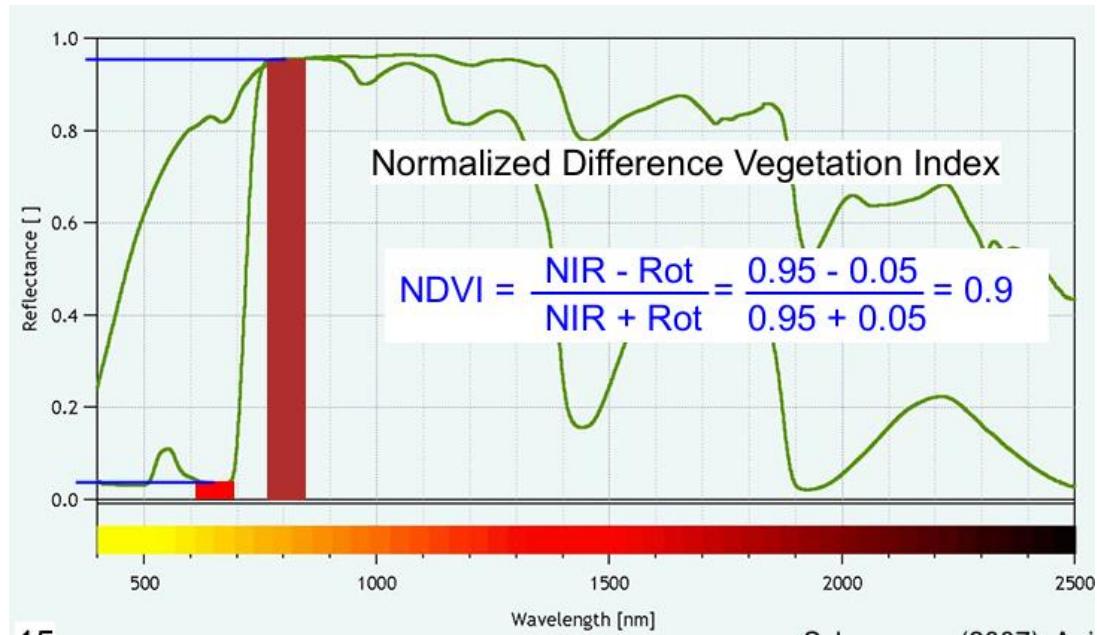
Pflanzenmerkmale und Strahlungsabsorption:

- **Sichtbares Licht:** Chlorophyllabsorption (Photosynthese)
- **Mittleres Infrarot:** Wasserabsorption (Peak bei ca. 2000 nm) und Trockenmasseabsorption

Weitere Unterschiede bestehen in Bezug auf Blattfläche, Pigmentgehalt, Wassergehalt, Blattwinkel, Trockenmasse und Bodenfarbe.

Spektrale Informationen: Die zeitliche Skala zeigt die Messung von Pflanzenstress.

Zur Analyse wählt man zwei spektrale Bereiche aus: ein Band mit hoher Absorption und eines mit geringer Absorption. Diese werden miteinander verrechnet und ergeben den sogenannten **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)**. Liegt der NDVI nahe bei 1, ist die Pflanze gesund. Werte nahe 0 oder sogar -1 deuten auf eine schlechte Pflanzengesundheit hin.



Spektrale Indizes und Biodiversitätsmessung

- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**: Gibt an, ob es Pflanzen gut oder schlecht geht (Werte nahe 1 = gesund, nahe 0 oder -1 = schlecht).
- **NDMI (Normalized Difference Moisture Index)**: Feuchtigkeitsindex.
- **NDWI (Normalized Difference Water Index)**: Wasserindex.

Jeder Index basiert auf spezifischen Wellenlängen.

Mit QGIS (kostenlose Software) können diese Daten ausgewertet werden.

Wenn man das mit einer ganzen Stadt macht, kann man die Vegetation gut beurteilen.

Erfassen der Biosphäre mittels Erdbeobachtung

Die **Spectral Variation Hypothesis** besagt, dass Pixel-zu-Pixel-Variationen Habitatvariationen und Vegetationsunterschiede widerspiegeln, die mit Artenvielfalt korrelieren. Studien zeigen gemischte Ergebnisse zur Verwendbarkeit dieses Indikators.

- Spektrale Variation hängt von der Auflösung ab.
- Saisonale Unterschiede beeinflussen die Ergebnisse.
- Korrelationen sind abhängig von funktionellen Merkmalen der Arten.

Einschränkungen

- Nur oberirdische Merkmale messbar.
- Saisonale Variabilität wird oft ignoriert.
- Pixelwerte sind Mittelwerte mehrerer Pflanzen.
- Streuung wird unterschätzt.

Die Kombination mehrerer Karten verbessert jedoch die Aussagekraft.

Fast alle Pflanzen sind grün, was auf eine ähnliche biochemische Zusammensetzung hinweist. Saisonale Variabilität beeinflusst das äußere Erscheinungsbild und die spektrale Signatur. Stress und Landnutzung verändern diese Signatur, wodurch die Methode nur in bestimmten Gebieten in Kombination mit weiteren Daten funktioniert.

Experimente von Doktorandin Antonia Ludwig

Antonia Ludwig hat Artenmerkmale gemessen und analysiert, in welchen Kombinationen diese auftreten. Anschließend hat sie diese simuliert und die simulierten Wiesen in Pixel unterschiedlicher Größe unterteilt. Strahlungstransfermodelle wandelten die Merkmalskombinationen in Reflektanzsignale um. Danach wurden Zusammenhänge zwischen spektraler Diversität und Artenvielfalt hinsichtlich Jahreszeit, Grünlandtyp und Auflösung untersucht.

Ergebnisse: Die spektrale Variation hängt von der Auflösung ab, aber auch die Jahreszeiten (Frühjahr, Sommer, Herbst) haben einen Einfluss.

Der Zusammenhang ändert sich saisonal und zwischen den verschiedenen Grünlandtypen.

Die Korrelation hängt von den Unterschieden in den funktionellen Merkmalen zwischen den Arten ab:

1. Arten decken einen weiten Bereich an Merkmalen ab.
2. Jede Art besitzt eine einzigartige Merkmalskombination.
3. Viele Arten haben ähnliche Merkmale.

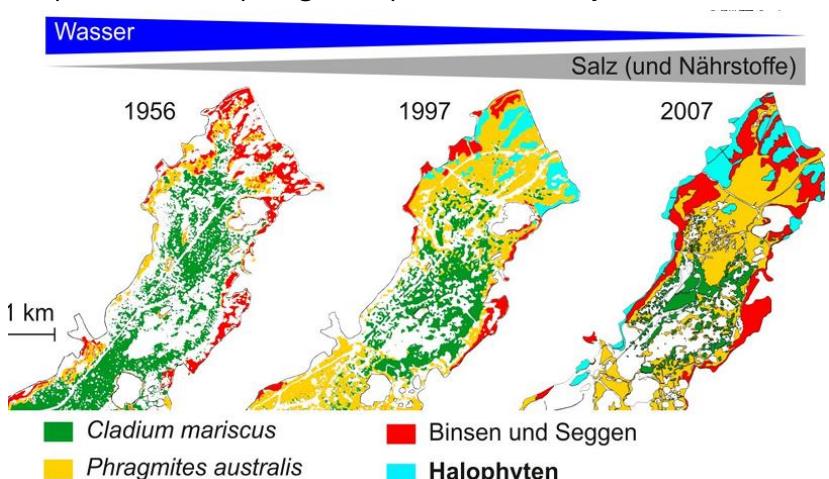
Daher ist dieser spektrale Faktor kein zuverlässiger Indikator.

Allerdings besteht ein starker Zusammenhang zwischen Merkmalen und Strahlungsabsorption.

Auswirkung von langjährigen Trockenperioden

Beispiel Nationalpark Tablas de Daimiel, Spanien, ein ursprünglich aquatisches Ökosystem.

Mit der Zeit wurde die Landwirtschaft intensiviert. Seit den 1950er-Jahren gab es starke Veränderungen: *Cladium mariscus* verträgt erhöhte Nährstoffkonzentrationen und geringere Wassermengen schlecht. Neue Vegetation wie Halophyten breitete sich aus, begleitet von starker Austrocknung und erhöhtem Salzgehalt.



Dürrephasen (2003-2009):

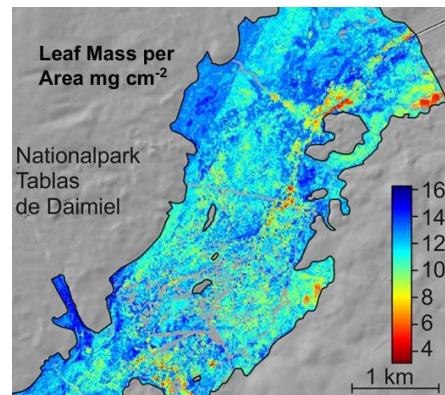
Während dieser Zeit zeigte der NDVI-Index erhebliche Unterschiede. 2009 war es so trocken, dass man mit dem Auto durchfahren konnte.

Leaf Mass per Area (LMA): Bei Wassermangel verändern sich die Blätter, um ihre Stabilität trotz Wassermangels zu bewahren.

Beispiel LMA: In blauen Bereichen haben die Pflanzen bereits auf die Dürre reagiert, während rote Bereiche zeigen, dass die Vegetation erhalten blieb.

Zwischen 2009 und 2016 regenerierte sich die Vegetation gut, doch 2023 war es erneut deutlich trockener, sodass der Zustand der Vegetation wieder schlechter wurde.

Durch die Kombination mehrerer Karten, z. B. CAR (Carotenoide), LWC (Blattwassergehalt) und CHL (Chlorophyll), lassen sich genauere Analysen durchführen.



Arbeitsschritte einer solchen Analyse:

1. Erfassen und Kartieren von Pflanzenmerkmalen
2. Auswahl der Skala / Pixelnachbarschaft (z.B. 3 x 3 Pixel, 11 x 11 Pixel, ...)
3. Messen der Streuung der Pixelwerte im multivariaten Pflanzenmerkmalsraum
 - Eine starke Streuung wird als hohe funktionelle Diversität gewertet

Einschränkungen: Nur oberirdische Merkmale werden erfasst. Saisonale Variabilität wird oft ignoriert, und Erfassungsfehler pflanzen sich fort. Pixel repräsentieren den Mittelwert mehrerer Pflanzen, wodurch die Streuung unterschätzt wird. Dennoch stellt die Kombination mehrerer Karten einen guten Diversitätsindikator dar.

Hyperspektrale Fernerkundung und EnMAP: Daten werden mit einem globalen, KI-basierten Erfassungsmodell verarbeitet, wodurch 20 Merkmale identifiziert wurden. Insgesamt lässt sich die Diversität gut bestimmen.

Saisonaler Wandel funktioneller Diversität: Wie stark schwanken die Pflanzenmerkmale saisonal? Wie stark hängen ökologische Dienstleistungen von der Saisonalität ab? Diese Fragen können durch diese Methode untersucht werden.

Fazit

- Es gibt fünf große Bedrohungen, die mit Fernerkundung erfasst werden sollen.
- Habitatfragmentierung und Übernutzung lassen sich gut mit einfachen Indizes erkennen, jedoch nur in terrestrischen Ökosystemen.
- Invasive Arten sind schwer darstellbar: Während es für Pflanzenarten möglich ist, müssen deren Merkmalskombinationen eindeutig bestimmbar sein. Bei Tieren funktioniert dies nicht. Frühzeitige Erkennung ist schwierig, da Veränderungen erst sichtbar werden, wenn sie bereits stark ausgeprägt sind.
- Klimawandel und Verschmutzung sind direkt mit Pflanzenstress verbunden. Stress kann gut erfasst werden, aber die genaue Ursache (Stressor) lässt sich nicht eindeutig bestimmen.
- Genetische Diversität kann nicht per Fernerkundung erfasst werden. Artenvielfalt ist nur für Arten mit spektralen Unterschieden darstellbar, daher ist diese Methode begrenzt.
- Ökosystemvielfalt und funktionale Diversität lassen sich gut untersuchen, allerdings gibt es Verzerrungen, da nur die oberste Vegetationsschicht erfasst wird (die Sicht unter Baumkronen ist nicht möglich).

Zukunft der Fernerkundung

- **Hyper- und Multispektral-Techniken**
- **Kopplung mit Klimadaten**
- **KI-basierte Erfassungsmodelle**
- **Langzeitbeobachtung von Biodiversitätsänderungen**

Mithilfe der Kombination der verschiedenen Faktoren, lässt sich eine gute ganzheitliche Erfassung erstellen.

EnMAP-Daten sind kostenlos, aber die Nutzung erfordert eine Registrierung und das Portal ist nicht besonders nutzerfreundlich.

Geodäsie

Definition laut Wikipedia: Die Geodäsie ist die „Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche“. Dies umfasst die Bestimmung der geometrischen Figur der Erde, ihres Schwerefeldes und der Orientierung der Erde im Weltraum.

Der Begriff "Geodäsie" ist relativ neu (19. Jahrhundert), die Wissenschaft selbst jedoch deutlich älter.

Teilbereiche der Geodäsie

- Landesvermessung, Kataster, Landmanagement
- GIS, Kartografie
- Ingenieurgeodäsie
- Fernerkundung
- Satellitengeodäsie:
 - Bildaufnahmen
 - GNSS
 - Satellitenaltimetrie
 - Satellitengravimetrie
- Physikalische und astronomische Geodäsie
 - Hauptaufgabe: Verständnis von Form und Rotation der Erde (inkl. Geschwindigkeit und Neigung) und Erforschung des Schwerefeldes

Gravitation

Die bekannte Apfel-Story, aber die Gravitation ist nicht überall gleich. Beispiel Mexiko: $9,78 \text{ m/s}^2$ statt $9,81 \text{ m/s}^2$. Die Gravimetrie dient der genauen Messung solcher Unterschiede

Wichtige physikalische Konzepte

- Die Erdbeschleunigung (m/s^2) ist unabhängig von der Masse eines Objekts
- Die Gewichtskraft (N/kg) ist abhängig von der Masse (z.B. 1 kg)
- Online-Schwereberechnungen zeigen: Ohne Erdrotation ca. $9,83 \text{ m/s}^2$, mit Rotation ca. $9,81 \text{ m/s}^2$
- *Schwere = Gravitation + Zentrifugalbeschleunigung*, mit Vektorsumme
- Die mittlere Erdrotationsrate wird als annähernd konstant angenommen (obwohl dies nicht exakt zutrifft)

- Gravitationskonstante (G): 6,674 mit Unsicherheiten, die jedoch stetig kleiner werden
- $G \cdot M_{Erde}$ kann genauer bestimmt werden als die beiden Einzelgrößen

Form der Erde

- Keine perfekte Kugel, sondern abgeplattet (Geodäsie-Modell mit 99,9 % Genauigkeit)
- Geoid (auch bekannt als "Potsdam-Kartoffel") als globales Referenzmodell. Das Geoid ist eine globale Äquipotentialfläche des Erdschwerepotentials, das die (strömungsfreien) Meeresoberflächen beschreibt.
- Höhe über Normalnull (NN) bezieht sich immer auf das Geoid

Gravimetrie

- **Messmethoden:**
 - Freier Fall: Messung von Fallhöhe und Zeit (Absolutgravimetrie)
 - Federgravimeter: Mechanische Messgeräte aus den 1960er Jahren
- **Schwereanomalien:** Differenz zwischen erwarteten und gemessenen Werten
- **Kinematische Gravimetrie:** Anwendungen des Einsteinschen Äquivalenzprinzips
 - Spezifische Kraft: $f = \ddot{r} - g$
 - Bewegung: $\ddot{r} = f + g$
 - Schwere: $g = \ddot{r} - f$
- **Gravimetrie mit Smartphones** (Messung in drei Dimensionen)
- **Fluggravimetrie:** Früher große Flugzeuge, heute Drohnen
- **ISS:** Gravimeter misst dort praktisch null aufgrund der ausgeglichenen Kräfte

Satellitengravimetrie

Satellitenbahnen sind abhängig von Unregelmäßigkeiten im Schwerkraftfeld ("Kartoffelmodell")

Beispiele für Missionen:

- GFZ-1: Passiver Satellit mit Laserreflektoren
- GOCE: Aktiver Satellit (einzelne) zur Schwerkraftmessung
 - Auflösung ca 100 – 150km
 - Flughöhe 250km
 - Positionsbestimmung ± 1 mm
 - Schwerkraftmessung $\pm 0,000000005 \frac{m}{s^2} = 0,05 \mu Gal$
- GRACE-FO: Misst Abstandsveränderungen zwischen 2 Satelliten im Mikrometerbereich
 - Auflösung ca 200 – 400km
 - Flughöhe 500km
 - Positionsbestimmung ± 1 mm
 - Schwerkraftmessung $\pm 0,000000005 \frac{m}{s^2} = 0,05 \mu Gal$ plus ± 1 cm Grundwasser auf 400 km^2
 - Messrate: Eine globale Kartierung pro Monat

Höhere Auflösung bei niedrigeren Umlaufbahnen, aber kürzere Lebensdauer

	Genaugigkeit	Auflösung	Abdeckung Land/Wasser	Zeitreihe?
Terrestrisch (klassisch)	●●●●○	●●●●●	●○○○○ ○○○○○	Begrenzt (Genaugigkeit)
Terrestrisch (Supraleitend)	●●●●●	●●●●●	○○○○○ ○○○○○	Ja
Flugzeug oder Schiff	●○○○○	●●●○○	●●●○○ ●●●○○	Nein (Genaugigkeit)
Satellit	●●●●●	○○○○○	●●●●● ●●●●●	Ja!

Gradiometrie

- Messung von Schweregradienten (Veränderung des Schwerkraftfeldes an verschiedenen Punkten)
- Besonders präzise in der Schwerelosigkeit
- Anwendungsbeispiele: Hydrologie, Glaziologie, Ozeanografie

Statisches Erdschwerefeld (GOCE)

- Geoidbestimmung mit einer Genaugkeit von ca. 1 cm
- Ozeantopografie: Distanz zwischen Satellit und Wasseroberfläche relativ zum Geoid

Inversionsmethoden:

- Berechnung von Materialdichten im Untergrund durch Kombination verschiedener Messmethoden
- Modellierung tektonischer Strukturen auch im regionalen Maßstab (z.B. in Darmstadt)

Dynamisches Erdschwerefeld (GRACE)

Messung von Massenverlagerungen auf monatlicher Basis

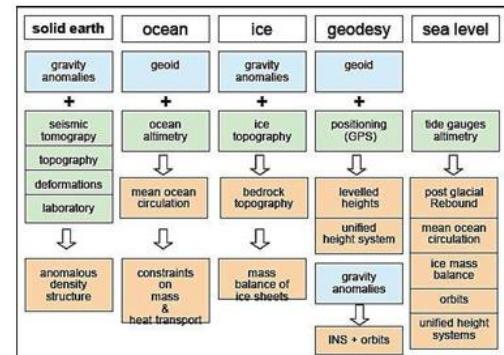
Beispiele: Gezeiten der festen Erde, hydrologische Veränderungen, Gletscherschmelze

- [Hydrologie Animation](#): Alle Starkwetterereignisse, wie stark hat sich im Monat Überschuss oder Abstinenz von Wasser gebildet, Auflösung hier nur 150km.
- [Glaziologie Animation](#) Gletscherschmelze Fließrichtung des Schmelzwassers kann man auch erkennen.
- [Ozeanographie Animation](#) Modellierte Strömung

Zusammenfassung

Grafik: Blau ist die Basis, Grün was hinzu kommt und Orange was man daraus berechnen kann.

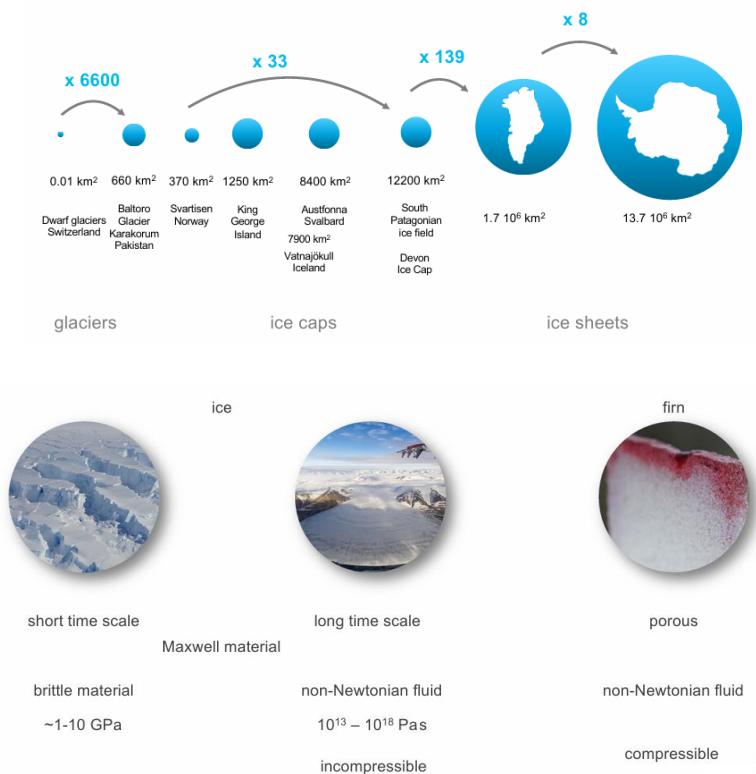
- Beitrag der Satellitengravimetrie zur Erdsystemforschung in verschiedenen Disziplinen
- Abweichung zwischen Ellipsoid- und Geoidmodellen: ca. ± 100 m
- GPS liefert Ellipsoidhöhen, das Geoidmodell die entsprechenden Geoid-Höhen



Eisschilde im Erdsystem

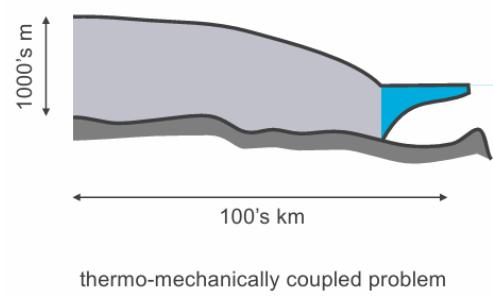
Gletscherveränderungen beobachten

- Gletschergrößen: Glaciers, Ice Caps, Ice Sheets
- Von kleinen Gletschern bis zur Antarktis
- Die Antarktis besitzt das größte Eisschild mit einer Dicke von bis zu 4000 m
- Die Bildung von Gletschern erfolgt durch Schneefall – wenn mehr Schnee fällt, als abschmilzt
- Der Schnee des Vorjahres wird Firn genannt: Seine Körner sind größer, und Winde spielen eine Rolle bei der weiteren Verdichtung
- Schnee ist ein granuläres Medium
- Durch Sintern wird aus Schnee bzw. Firn Eis: Der Porenraum reduziert sich, bis keine Luft mehr eingeschlossen ist
- Ein Gletscher gilt als „heiß“, wenn er sich nahe am Schmelzpunkt befindet
- Sommer- und Winterlagen im Gletscher: Sommerlagen sind dichter als Winterlagen
- Firnkörper haben eine Größe von bis zu 2 mm
- Eiskörper können mehrere Zentimeter groß werden
- Durch hohen Druck fließt der Gletscher den Hang hinab – er verhält sich wie ein Fluid
- Gletscherspalten (Risse) sind hingegen eine Eigenschaft fester Körper
- Ein Gletscher ist also beides: Eis ist auf kurzer Zeitskala fest, auf langer Zeitskala jedoch fluid



Eisschilde und Gletscherbewegung

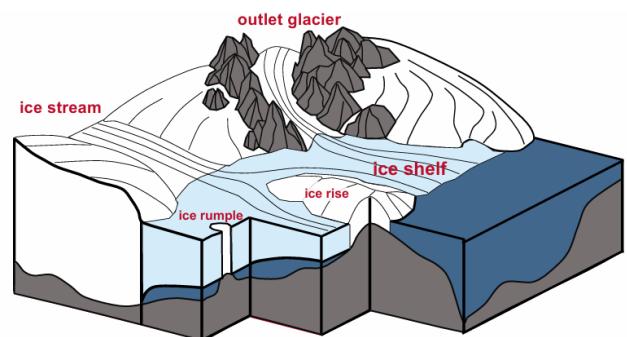
- Ein Eisschild ist mit dem Boden verbunden; an den Rändern ragt es über das Wasser hinaus, wodurch schwimmende Gletscherzonen entstehen



- Diese bewegen sich mit den Gezeiten, und in den Grenzonen gibt es viele Spalten (Schelfeis)
- Drainagegebiete beeinflussen das Geschwindigkeitsfeld
- In der Antarktis beträgt die Fließgeschwindigkeit einige hundert Meter pro Jahr – je näher am Rand, desto schneller
- Etwa 11 % der Eismassen tauchen aus dem Meer auf
- Meereis ist nur etwa 5 m dick und ragt kaum aus dem Wasser heraus
- In Grönland gibt es schwimmende Gletscherzonen und Tidewater-Gletscher, die regelmäßig Eisberge abbrechen lassen
- Das Abbrechen von Eisbergen (Kalbung) ist ein natürlicher Prozess
- Eisberge können sich durch wärmeres Meerwasser von unten oder erhöhte Temperaturen von oben auflösen – das führt zum Rückgang der Eisschilde

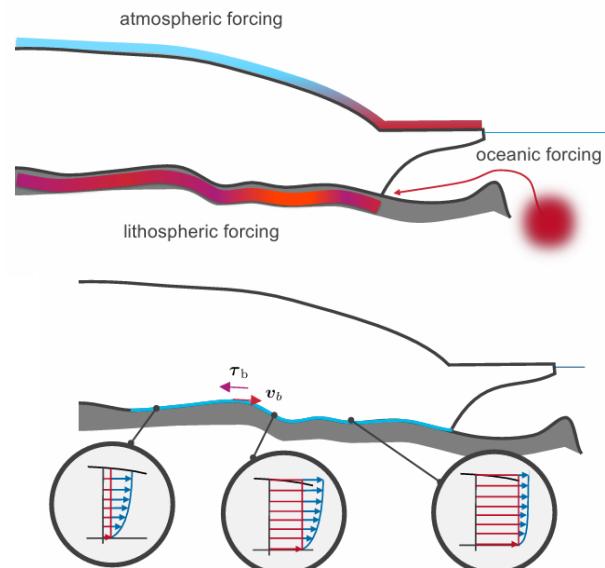
Topografie des Eisschildes

- Eiskappen entstehen dort, wo der Boden nicht tief genug ist, um schwimmendes Eis zuzulassen
- Die **Bedrock-Topologie** von Grönland ähnelt einer Schüssel, da die enorme Eismasse die Lithosphäre nach unten drückt



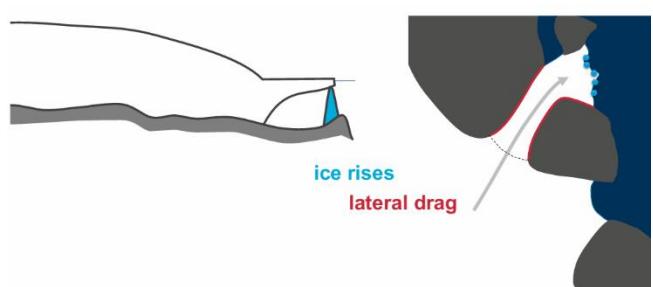
Wechselwirkungen im Erdsystem

- Atmosphäre, Lithosphäre und Ozean beeinflussen das Eisschild
- Die Lithosphäre ist relativ warm, wodurch ein geothermaler Wärmestrom ins Eis gelangt
- An der Grenzfläche zwischen Lithosphäre und Eisschild kann sich Wasser bilden, das das Eis gleiten lässt
- Wenn das Eis zu rutschen beginnt, entsteht Reibungswärme
- In Gebieten mit hoher Eisbewegung gibt es wahrscheinlich viel Wasser, doch die genaue Dicke der Wasserschicht (zwischen 1 mm und 1 m) ist schwer zu messen
- Die Rauigkeit des Untergrunds beeinflusst die Gletscherbewegung – sie wird auf einer Skala von wenigen Zentimetern betrachtet
- Dieser wasserbedingte Gleitmechanismus hat eine große Fläche unter Gletschern



Veränderung von Gletschern

- Wenn Schelfeis aufsetzt, erzeugt es Spannung auf das Inlandeis – auf Inseln gibt es Rückhaltegebiete
- Die Rückhaltekraft wirkt an den Seiten der Gletscherzungue
- Wird das Schelfeis dünner, bewegt sich das Eis schneller



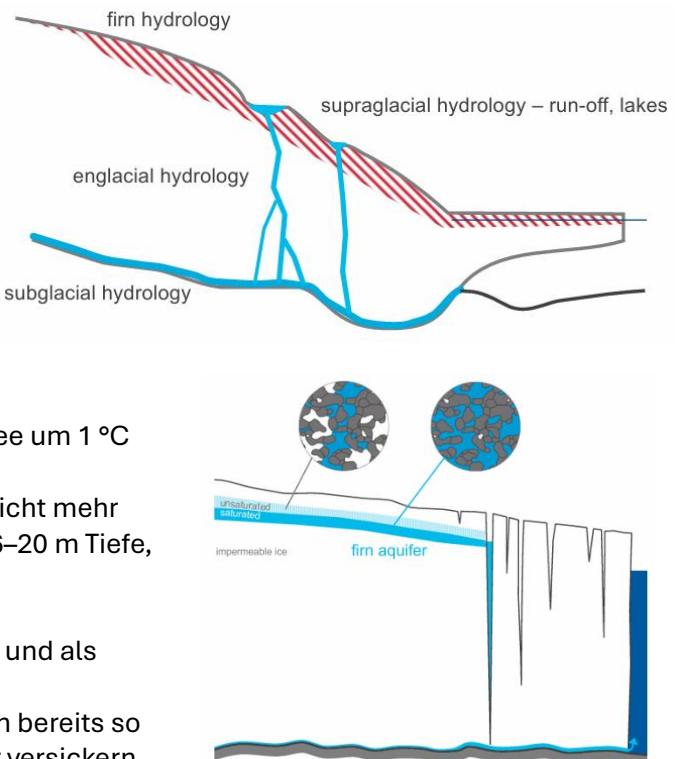
- Frischwasser strömt unter dem Schelfeis heraus und zieht neues warmes Wasser nach – eine Pumpwirkung entsteht
- Durch menschlichen Einfluss gelangen vermehrt warme Wassermassen in diese Systeme
- **Basales Schmelzen** ist schwer zu messen – sowohl per Fernerkundung als auch durch In-situ-Messungen
- Die Schmelzrate in Grönland ist enorm

Atmosphäre und Wärmehaushalt

- Die Energiebilanz wurde bereits mehrfach grafisch dargestellt
- Schnee reflektiert Energie sehr gut – doch alter, verschmutzter oder nasser Schnee, Firn oder Eis besitzen eine deutlich geringere Albedo
- Je mehr Gletscherschmelze, desto größer oder geringer der Firnanteil, wodurch weniger Sonnenstrahlung reflektiert wird und sich das Eis stärker erwärmt
- Dieser Effekt ist in Grönland besonders stark ausgeprägt, in der Antarktis weniger
- **Polarverstärkung:** Wenn die globale Temperatur um 2 °C steigt, erwärmt sich Grönland bereits um 4 °C

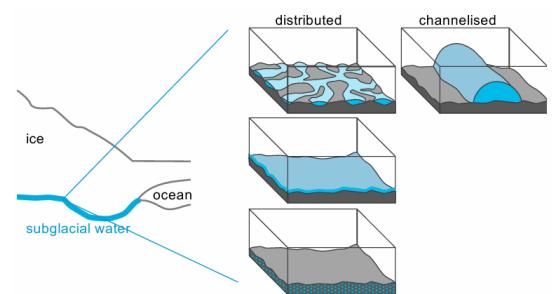
Wasser an der Oberfläche

- **Slush:** Schnee, dessen Poren vollständig mit Wasser gefüllt sind
- **Refrozen Meltwater:** Gefrorenes Schmelzwasser bildet Eisschichten
- 2012 kam es in Grönland zu einer großflächigen Schmelzsicht – das Wasser sickerte nach unten und gefror erneut
- 1 g Wasser kann beim Gefrieren 160 g Schnee um 1 °C erwärmen
- Wasser unter der oberen Firnschicht kann nicht mehr gefrieren – es bildet einen **Firn-Aquifer** in 16–20 m Tiefe, der ganzjährig wassergefüllt bleibt
- Mehr Neuschnee führt zu mehr Aquifern
- Das Wasser kann weiter nach unten sickern und als Gleitmittel am Gletscherboden wirken
- Flüsse und Seen im Eis entstehen, wenn Firn bereits so stark verdichtet ist, dass Wasser nicht mehr versickern kann
- Solche Seen können sich innerhalb von 24 Stunden entleeren – das Wasser fließt durch Risse im Eis an die Basis des Gletschers und hebt ihn an, wodurch sich seine Geschwindigkeit erhöht
- Eine hohe Schmelzrate allein ist nicht problematisch – problematisch wird es, wenn zu wenig Eis nachkommt, um den Verlust auszugleichen
- Seenbildung kann zur Aushöhlung der Gletscher von unten führen



- Die Entleerung dieser Seen tritt immer häufiger auf und ist auf die steigenden Oberflächentemperaturen zurückzuführen

Subglaziale Hydrologie



- Unter Gletschern gibt es sowohl verteiltes Wasser als auch Kanäle
- Wenn Wasser schnell ausströmt, beschleunigt dies die Kalbung – die Gletscherfront schmilzt schneller ab
- **Fluss-Simulationen** für Grönland ermöglichen Vorhersagen über den zukünftigen Massenverlust
- In der Antarktis gibt es subglaziale Seen unter dem Eis

Modellierung von Gletschern

- Atmosphäre, Lithosphäre und Ozeankräfte beeinflussen das Eisschild
- Es gibt komplexe Wechselwirkungen zwischen diesen Systemen
- Zur Modellierung werden folgende Schritte durchlaufen:
 1. **Phänomenologie** (Beobachtung von Prozessen)
 2. **Mathematische Modellbildung**
 3. **Diskretisierung** (numerische Annäherung)
 4. **Lösung per Code**
- Grundlage ist die **Kontinuumsmechanik** (klassische Feldtheorie) – unter Berücksichtigung von Geschwindigkeit, Temperatur und Eisdicke
- Effektive Materialeigenschaften sind essenziell für eine genaue Modellierung
- Ziel ist es häufig, den Anstieg des Meeresspiegels zu prognostizieren

Glossar

Aride Gebiete: Trockengebiete mit sehr geringer Niederschlagsmenge, in denen Verdunstung den Niederschlag übersteigt.

Anthropogen: Vom Menschen verursacht oder beeinflusst, insbesondere im Zusammenhang mit Umweltveränderungen.

Albedo-Effekt: Fähigkeit einer Oberfläche, Sonnenstrahlung zu reflektieren; beeinflusst die globale Erwärmung.

Meerwasserintrusion: Eindringen von Salzwasser in Süßwasserquellen, oft durch Übernutzung von Grundwasser in Küstenregionen verursacht.

RCP (Representative Concentration Pathways): Szenarien zur zukünftigen Strahlungsantriebsänderung durch Treibhausgase, die in Klimamodellen verwendet werden.

- **RCP 2.6:** Stark reduzierte Emissionen → geringe Erwärmung.
- **RCP 4.5:** Mittleres Emissionsszenario.
- **RCP 8.5:** Weiterhin hohe Emissionen → starke Erwärmung.

Basales Schmelzen: Schmelzen des Eises an der Unterseite eines Gletschers oder Eisschildes, oft durch geothermale Wärme oder warmes

Biodiversität: Vielfalt des Lebens auf verschiedenen Ebenen (Genetik, Arten, Ökosysteme) und ihre Bedeutung für das Erdsystem.

Aerosole: Schwebende feste oder flüssige Partikel in der Atmosphäre, die das Klima und die Luftqualität beeinflussen.

CO₂-Senken: Natürliche Systeme (z. B. Wälder, Ozeane, Böden), die CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen und speichern.

Atmosphäre: Gasförmige Hülle der Erde, bestehend aus mehreren Schichten (Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre, Exosphäre). Enthält Sauerstoff für das Leben und reguliert das Klima durch den Treibhauseffekt.

Hydrosphäre: Umfasst alle Wasserreservoirs der Erde (Ozeane, Seen, Flüsse, Grundwasser, Gletscher, Wasserdampf in der Atmosphäre). Spielt eine zentrale Rolle im Wasserkreislauf und der globalen Temperaturregulation.

Lithosphäre: Feste Gesteinsschicht der Erde, einschließlich der Erdkruste und des oberen Erdmantels. Beeinflusst die Landschaftsformung durch Plattentektonik, Vulkanismus und Erosion.

Biosphäre: Gesamtheit aller lebenden Organismen und deren Ökosysteme. Umfasst sowohl terrestrische als auch aquatische Lebensräume und ist eng mit den anderen Sphären verknüpft.

Pedosphäre: Bodenhülle der Erde, in der biologische, chemische und physikalische Prozesse den Boden formen. Spielt eine Schlüsselrolle im Kohlenstoffkreislauf und in der Nährstoffversorgung für Pflanzen.

Kryosphäre: Alle gefrorenen Wasserbestandteile der Erde (Eisschilde, Gletscher, Permafrost, Meereis). Hat einen starken Einfluss auf das Klima durch den **Albedo**-Effekt (Reflexion der Sonnenstrahlung).

Antroposphäre: Der vom Menschen geprägte Bereich des Erdsystems, einschließlich Siedlungen, Industrie und Landwirtschaft. Verändert die anderen Sphären durch Urbanisierung, Umweltverschmutzung und Klimawandel.

Firn: Zwischenstufe zwischen **Schnee** und **Gletschereis**, die durch mehrjährige Verdichtung entsteht. Firn ist grobkörnig und noch nicht vollständig zu Eis gepresst.

Slush: Eine Mischung aus Schnee und Wasser mit einer matschigen Konsistenz, oft an Gletschern oder auf winterlichen Straßen.

Terrestrisch: Bedeutet "erdgebunden" oder auf das **Land** bezogen (im Gegensatz zu aquatisch oder atmosphärisch).

Gradiometrie: Messung der **Gravitationsfeldänderungen** über kurze Distanzen zur Untersuchung geologischer Strukturen oder Massenverlagerungen.

Schwere: Die auf der Erde wirkende **Gravitationskraft + Zentrifugalkraft** durch Erdrotation.

Gravitation: Universelle Anziehungskraft zwischen Massen (Newton'sches Gravitationsgesetz).

Gravimetrie: Messung der Schwerkraftvariationen auf der Erde zur Untersuchung von Massenverlagerungen, z. B. durch Gletscherabschmelzung.

Geodäsie: Wissenschaft der **Vermessung und Kartierung der Erde**, einschließlich Erdform, Schwerefeld und Rotation.

Ökosystemvielfalt: Verschiedene Lebensräume wie Regenwälder, Wüsten, Meere.

Artenvielfalt: Anzahl unterschiedlicher Arten in einem Ökosystem.

Genetische Diversität: Variabilität innerhalb einer Art.

Funktionale Diversität: Unterschiedliche ökologische Rollen von Arten im System.

Paläontologie: Wissenschaft der **Fossilien** und ihrer Bedeutung für die Erdgeschichte, Evolution und Klimaveränderungen.

Paläoklimakurve: Grafische Darstellung der **Temperatur- und Klimaveränderungen** der Erdgeschichte über Millionen Jahre. Ermittelt durch **Eisbohrkerne, Sedimentschichten, Baumringe**.

Komplexes System (Erdsystem): Das Erdsystem ist **nicht linear** und besteht aus vielen vernetzten Subsystemen. **Eigenschaften komplexer Systeme:** Rückkopplungen, Selbstorganisation, Kipppunkte.

Silikatplanet: Ein Planet, dessen Kruste und Mantel hauptsächlich aus **silikatischen Mineralien** bestehen.

Ackerzahl: Bewertung der Bodenqualität für die Landwirtschaft auf einer Skala von 0 bis 100. Abhängig von **Bodenstruktur, Wasserhaltevermögen, Nährstoffverfügbarkeit, pH-Wert**.

Autotroph: Organismen (z. B. Pflanzen, Algen), die ihre Energie durch **Fotosynthese oder Chemosynthese** selbst gewinnen.

Heterotroph: Organismen (z. B. Tiere, Pilze), die **organische Substanzen aufnehmen** müssen, um Energie zu gewinnen.

Endorheisches Becken: Ein geschlossenes Wassereinzugsgebiet ohne natürlichen Abfluss zum Meer. Wasser verdunstet oder versickert.

Kurzfristiger Kohlenstoffkreislauf: Aufnahme und Freisetzung von CO₂ zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Ozeanen über **Jahrzehnte bis Jahrhunderte**.

Langfristiger Kohlenstoffkreislauf: Speicherung von Kohlenstoff in Sedimenten und Gesteinen durch Silikatverwitterung über **Millionen von Jahren**.

Globaler Wasserzyklus: Der ständige Kreislauf von Wasser durch Verdunstung, Kondensation, Niederschlag und Abfluss zwischen Atmosphäre, Ozeanen und Land. Wichtige Prozesse:

Evapotranspiration (Verdunstung aus Böden & Pflanzen), **Niederschlag** (Regen, Schnee), Grundwasserbewegung & Oberflächenabfluss.

Rückkopplungen im Erdsystem: Rückkopplungsmechanismen verstärken (positive Rückkopplung) oder dämpfen (negative Rückkopplung) Klimaveränderungen.

Forcing (Strahlungsantriebe): Forcing beschreibt **externe Einflüsse**, die das Klima beeinflussen, indem sie das Gleichgewicht zwischen einfallender und ausgehender Strahlung der Erde verändern. **Natürliche Forcings:** Vulkanausbrüche, Sonnenaktivität. **Anthropogene Forcings:** Treibhausgase, Aerosole, Landnutzungsänderungen.

Tektonik: Die **Tektonik** beschreibt die Bewegung und Wechselwirkung der festen äußeren Erdschicht (Lithosphäre), die in große Platten unterteilt ist.

Silikat: Silikate sind die häufigsten Minerale der Erdkruste und bestehen aus Silizium (Si) und Sauerstoff (O), meist in Verbindung mit anderen Elementen.

Interdisziplinarität: Die Erdsystemforschung ist **stark interdisziplinär**, da sie verschiedene wissenschaftliche Disziplinen verbindet, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Sphären der Erde zu verstehen.

Troposphäre (0-12 km): **Unterste Schicht der Atmosphäre**, in der sich fast das gesamte **Wettergeschehen** abspielt. Obergrenze wird Tropopause genannt.

Stratosphäre (12-50 km): Enthält die **Ozonschicht**, die UV-Strahlung absorbiert und die Erde schützt. Obergrenze wird Stratopause genannt.

Mesosphäre (50-85 km): **Kälteste Schicht** der Atmosphäre (**bis zu -90°C**). Obergrenze wird Mesopause genannt.

Thermosphäre (85-500 km): Temperatur steigt wieder **stark an** (**bis zu 2.000°C!**), da wenige Moleküle viel Sonnenenergie absorbieren. Enthält die **Ionosphäre**, in der **Polarlichter** entstehen. Reflexion von Radiowellen.

Exosphäre (ab 500km): Übergangsbereich zwischen Atmosphäre und **Weltraum**. Luftmoleküle sind dünn verteilt, viele verlassen die Erde ins All.