6. KAPITEL: DAS KLIMA IM WANDEL

Themen

1 LEBEN AUF DER ERDE: KLIMA IM WANDEL 196
1.1 Faktoren für den Klimawandel 196

2 EINFLÜSSE DER BIOSPHÄRE: MENSCH UND KLIMA 198
2.1 Ein Kreislauf mit Unwucht: Wie der Mensch den Klimawandel beeinflusst 198
2.2 Nutzung fossiler Brennstoffe 200
2.3 Kohlenstoffkreisläufe in unserem Ökosystem 201
2.4 Photosynthese: Die wichtigste Reaktion für das Leben in unserem Ökosystem 202
2.5 Bildung von Kohlenstoffsenken – fossile Energieträger im Kohlenstoffkreislauf 203
2.6 CO_2-neutraler Kreislauf versus fossile Einbahnstraße 205

3 EINFLÜSSE DER GEOSPHÄRE AUF DEN KLIMAWANDEL 206
3.1 Verwitterung: Der Silikat-Karbonat-Kreislauf 206
3.2 Plattentektonik 207
3.3 Gebirgsbildung 208
3.4 Die Kontinentaldrift 209
3.5 Vulkanismus 209
3.6 Wechselspiel mit der Hydrosphäre 211

4 DER MENSCHGEMACHTE KLIMAWANDEL 212
4.1 Die Auswirkungen des Klimawandels 212
4.2 Mathematische Klimamodelle als Grundlage der Projektion 214
4.3 Folgen der Klimaerwärmung bis 2100 215
4.4 Klimaänderungen im Laufe der Erdgeschichte 217

5 QUELLENANGABEN UND LITERATURVERZEICHNIS 223

Lernziele

- Vermittlung von Faktenwissen über die Entstehung des Erdenklimas, wie wir es heute kennen
- Rekonstruktion der Bedeutung des Klimas und dessen komplexer Einflüsse auf das Leben auf unserem Planeten
- Faktoren, die für den Klimawandel seit Anbeginn der Zeit verantwortlich sind
- Das komplexe Zusammenspiel der Einflussfaktoren erkennen lernen, im Speziellen den Einflussfaktor Mensch
- Entstehung fossiler Energieträger und deren Bedeutung für den Klimawandel

Geförderte Kompetenzen

- Entwicklung einer mehrdimensionalen Perspektive auf den Klimawandel
- Erkennen des Zusammenhangs zwischen den Mechanismen der Erdgeschichte und dem damit verbundenen ständigen Klimawandel
- Verstehen der für den Klimawandel ausschlaggebenden physikalischen Prozesse
- Argumentationen mithilfe von selbst erarbeitetem Hintergrundwissen untermauern
- Diskussionsbereitschaft

? *In welchem Zusammenhang steht das Klima mit der Entwicklung des Lebens? Dieser Abschnitt geht auf die wechselseitige Auseinandersetzung zwischen dem Klima im Wandel und dem Leben auf der Erde ein. Der Frage nach dem Einfluss der Menschheit auf das Ökosystem Erde wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Das Kapitel „Die Klimamaschine Erde" widmet sich den Bedingungen, die für das Zustandekommen des Klimas verantwortlich sind.*

MIT UNTERSTÜTZUNG VON BUND UND EUROPÄISCHER UNION

1 LEBEN AUF DER ERDE: KLIMA IM WANDEL

! *Dieses Kapitel behandelt die Phänomene und Wechselwirkungen der Biosphäre (des Lebens auf der Erde) auf die Mechanismen des Systems Erde und das globale Klima. Diese Mechanismen unterliegen einer gewissen Trägheit, was die Sensibilität des Systems verdeckt, dennoch befinden sie sich weit innerhalb des menschlichen Handlungsspielraums und Zeithorizonts. Phänomene, die weiter außerhalb des menschlichen Horizontes liegen, werden im Kapitel „Die Klimamaschine Erde" behandelt. Der Fokus liegt dort auf der unbelebten Materie und ihren Mechanismen in Verbindung mit der Konstellation unseres Sonnensystems und der Beschaffenheit des Planeten Erde.*

1.1 Faktoren für den Klimawandel

Das Globalklima der Erde ist ein hoch komplexes System mit zahlreichen Wechselwirkungen. Es wird dabei durch unterschiedliche Klimafaktoren bestimmt: durch systemische Faktoren (die Konstellation unseres Sonnensystems), durch globale Faktoren (die Beschaffenheit des Planeten Erde) und durch biologische Faktoren (der Einfluss der Lebewesen auf unserem Planeten).

Zu den systemischen Einflüssen der Heliosphäre (interplanetarer Bereich um die Sonne) zählen Faktoren wie die Schwankungen der Erdumlaufbahn oder Störungen in der Neigung der Erdachse. Sie beeinflussen die Rezeption der Sonnenstrahlung durch das System Erde und die damit verbundenen Mechanismen der atmosphärischen und hydrosphärischen Zirkulation.

ABBILDUNG 355: Die Erde in unserem Sonnensystem - BILD: NASA

Auch globale Faktoren beeinflussen die Zirkulationssysteme: Dazu zählen unter anderem die Bewegungen der Erdkruste, die für die Verteilung von Land und Wasser verantwortlich ist. Der Grad der tektonischen Aktivität der Erdkruste beeinflusst das Klima ebenso wie die Aktivität im Erdinneren. So hält der Dynamoeffekt des Erdkerns die Magnetosphäre (Bereich um einen Himmelskörper, der von seinem Magnetfeld dominiert wird) aufrecht und schützt damit die Erdatmosphäre. Diese wird in ihrer Zusammensetzung unter anderem durch die Aktivität des Erdmantels in Form von Vulkanismus geprägt.

ABBILDUNG 357: Ausbruch des Vulkans Sarychev, Russland 2009 - BILD: NASA

Zuletzt kommt noch der biologische Faktor - die Biosphäre - zum Tragen, der durch eine Reihe von Wechselwirkungen aller anderen Faktoren erst begründet wird und sich je nach den Bedingungen in unterschiedlicher Weise ausdifferenziert. Der Faktor Leben hat einen enormen Einfluss auf die Zusammensetzung der Erdatmosphäre. Seit der frühen Erdgeschichte bis heute prägt die Vegetation in großem Ausmaß die biologischen Einflüsse auf den Klimawandel. In den vergangenen Jahrtausenden wuchs der Einfluss der Menschen ständig – in den letzten beiden Jahrhunderten in beängstigendem Maße.

ABBILDUNG 356: Eiswand in der Antarktis - BILD: NSF

Weiter mit: „2.5.2 Das Innere der Erde und die Rolle der Magnetosphäre" K: 7, S: 233
Weiter mit: „2.5 Die Beschaffenheit der Erde" K: 7, S: 231
Weiter mit: „3 Funktionsbedingungen der Klimamaschine Erde" K: 7, S: 235

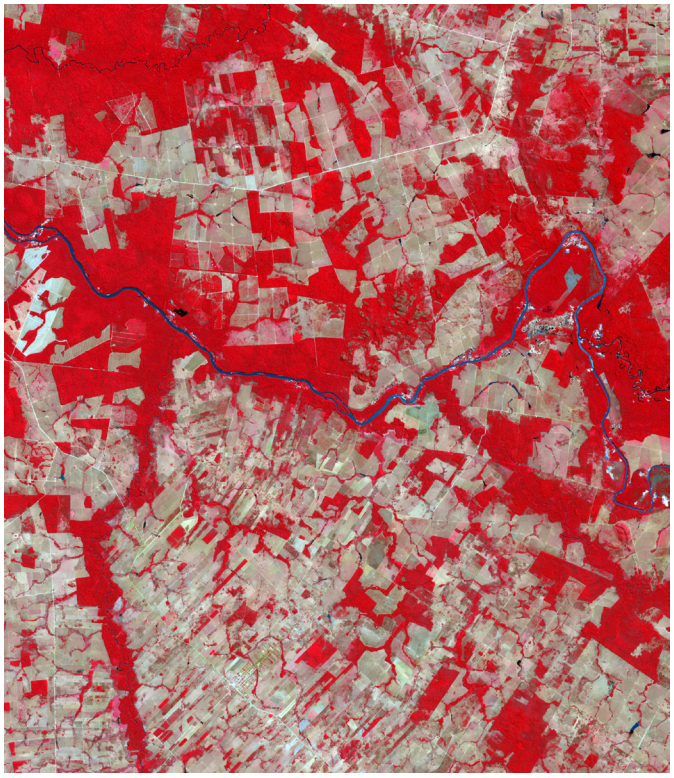


ABBILDUNG 358: Entwaldung in Brasilien, rote Flächen sind Waldreste
BILD: NASA

ABBILDUNG 359: Ölbohrplattform vor der Küste von Brasilien
BILD: Agência Brasil

> ! *Alle Systeme und Klimafaktoren sind dynamisch miteinander verbunden. Eine kleine Änderung in einem Untersystem kann große Auswirkungen auf ein anderes oder das Gesamtsystem haben, wie auch ein Blick zurück in die Klimageschichte zeigt.*

PRÄSENTATION 21: Faktoren des Klimawandels (16 Folien)

.ppt 21

1.1.1 Klimawandel: Ein Wechselspiel der Sphären

Ohne die Auswirkungen der Atmosphäre und Hydrosphäre hätte sich kein Leben auf der Erde bilden können, es gäbe also keine Biosphäre. Im Verlauf der Erdgeschichte hat die Biosphäre immer wieder die Atmosphäre (Lufthülle der Erde) und Hydrosphäre (Gesamtheit des Wassers der Erde) geprägt und dabei noch mehr Raum für Leben geschaffen. Ein sehr bedeutender Faktor für das Klima ist die Zusammensetzung der Atmosphäre und die damit verbundene Intensität des Treibhauseffektes. Deshalb spielt der globale Kohlenstoffkreislauf eine so bedeutende Rolle. Geprägt wird dieser Kreislauf durch die Bindung von Kohlenstoff durch Lebewesen, die Verwitterung der Erdkruste und durch die geosphärische Aktivität, Tektonik und Vulkanismus.

1.1.2 Die Rolle der Atmosphäre

Die Atmosphäre ist das Erste, auf das die Sonnenstrahlen treffen. Ihre Beschaffenheit bestimmt den Grad ihres Abstrahleffektes (Albedoeffekt = Maß für das Rückstrahlvermögen) und ihres Dämpfungseffektes. Sie ist einer der Hauptfaktoren dafür, dass auf diesem Planeten Leben entstehen konnte. Die Erdatmosphäre erscheint aus dem Weltraum betrachtet wie ein schmaler blauer Streifen.

EXPERIMENT 1: Experiment Atmosphäre: Spiel der Farben

ABBILDUNG 360: Atmosphäre - BILD: NASA

1

2 EINFLÜSSE DER BIOSPHÄRE: MENSCH UND KLIMA

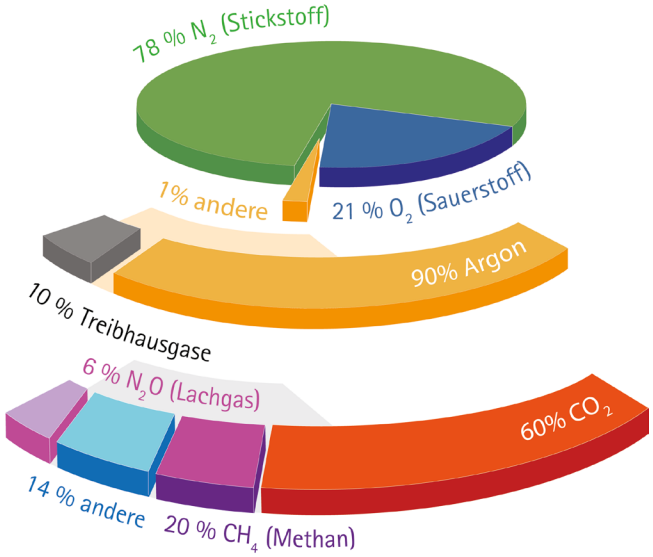
2.1 Ein Kreislauf mit Unwucht: Wie der Mensch den Klimawandel beeinflusst

Im Lauf der Erdgeschichte hat sich die Zusammensetzung der Erdatmosphäre immer wieder verändert. Heute enthält sie etwa 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 1 % Argon sowie zahlreiche Spurengase. Obwohl die Spurengase in sehr geringen Mengen vorkommen, haben sie großen Einfluss auf das Klima. Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Ozon (O_3) haben eine ähnliche Wirkung wie eine Glasscheibe in einem Gewächshaus. Daher werden sie auch als Treibhausgase bezeichnet. Diese Gase lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung passieren, halten aber die langwellige Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche zurück, was zu einer Erwärmung des Glashauses bzw. der Erdatmosphäre führt. Generell werden etwa 30 % der Sonneneinstrahlung durch die Erdatmosphäre reflektiert. Da jedes der Gase andere Wellenlängen absorbiert, addieren sich ihre Wirkungen. Der winzigen Menge an Spurengasen verdanken wir es, dass die mittlere Temperatur auf der Erde rund 15 °C und nicht lebensfeindliche 2° C beträgt. Würde man noch den Wasserdampf aus der Atmosphäre nehmen, würde die Temperatur sogar auf –18 °C sinken. Es wäre um durchschnittlich 33 °C kälter. Aerosole sind kleine, in der Luft schwebende Staubpartikel. Sie wirken im Wesentlichen abkühlend, da sie die Sonnenstrahlen reflektieren.Dieser Effekt ist durch den Vulkanismus gut erklärbar.

Weiter mit: „3.5 Vulkanismus" K: 6, S: 209

6/209

Seit 1750 zeigt sich eine deutliche Zunahme der Konzentration klimawirksamer Gase. Der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre ist um über 35 % gestiegen und damit so hoch wie seit mindestens 650.000 Jahren nicht mehr. Die Methankonzentration ist seither um 150 %, die Lachgaskonzentration um etwa 20 % gestiegen. Weitere Treibhausgase, wie beispielsweise die als FCKW bekannten Fluorchlorkohlenwasserstoffe, sind bis zu 15.000-fach stärker klimawirksam als CO_2 und kommen in der Natur nicht vor. Für ihr Vorhandensein in der Atmosphäre ist allein der Menschen verantwortlich. Lachgas und die FCKW gelten als bedeutendste Quelle ozonschädlicher Emissionen. Der Löwenanteil des Treibhauseffektes geht jedoch auf das CO_2 zurück.



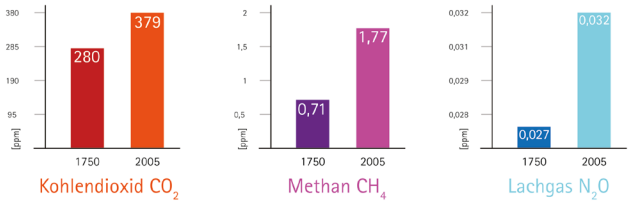


ABBILDUNG 362: Bestandteile der Atmosphäre und Konzentration klimawirksamer Gase - QUELLE: IPCC

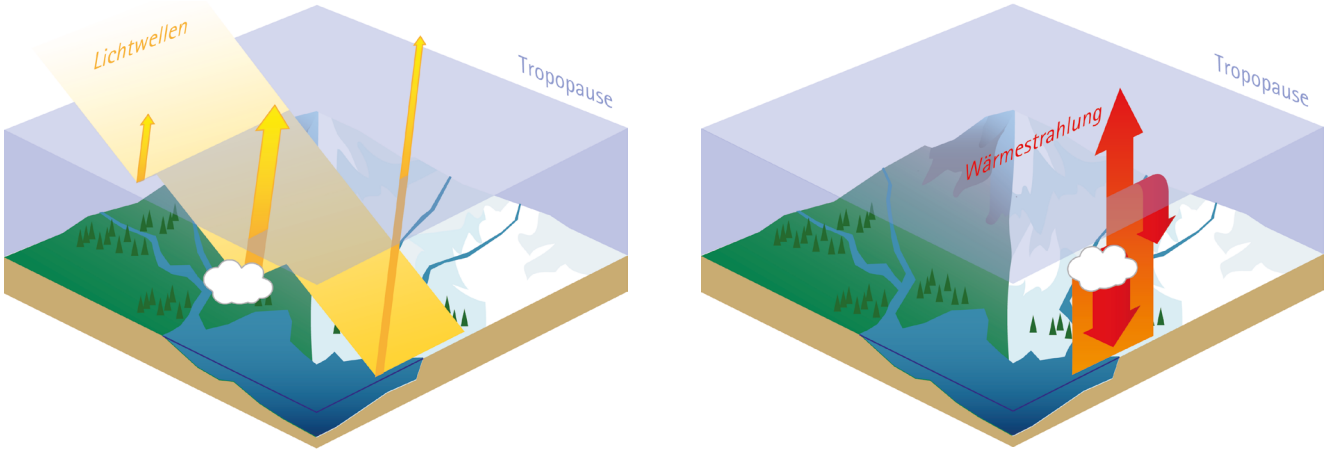


ABBILDUNG 361: Natürlicher Treibhauseffekt und Anteile der Gase am Treibhauseffekt - QUELLE: IPCC

.ppt
22

PRÄSENTATION 22: Der Treibhauseffekt (43 Folien)

Der Anteil der Treibhausgase in der Erdatmosphäre wirkt sich auf die Strahlungsbilanz des Systems Erde und damit auch auf die globale Jahresmitteltemperatur aus. Wasserdampf wird zu 60 % für den Treibhauseffekt verantwortlich gemacht, seine Konzentration wirkt aber eher als verstärkender Effekt. Je mehr die Temperaturen ansteigen, umso mehr Wasser verdunstet, was zu einer weiteren Verstärkung des Treibhauseffektes und somit wieder zu Temperaturanstiegen führt. Es kommt zu einem Rückkoppelungseffekt. Das Reflexionsverhalten von Eisflächen, also ihre Albedo (Rückstrahlvermögen), ist ein weiterer klimarelevanter Rückkoppelungseffekt. Je mehr Eis durch die globale Erwärmung schmilzt, desto weniger Sonnenenergie wird reflektiert, was eine weitere Erwärmung und einen weiteren Verlust von Eisflächen zur Folge hat. Nur ein Rückgang der globalen Temperatur könnte diese Rückkoppelungseffekte eindämmen. Kohlendioxid ist das mengenmäßig bedeutendste Treibhausgas, das durch Menschen emittiert wird. Der Energiebedarf und die Nutzung fossiler Energieträger nehmen seit dem Beginn der Industrialisierung kontinuierlich zu. Damit steigt auch der durch Menschen verursachte Ausstoß treibhauswirksamer Gase, der sich wiederum auf die Zusammensetzung der Atmosphäre auswirkt.

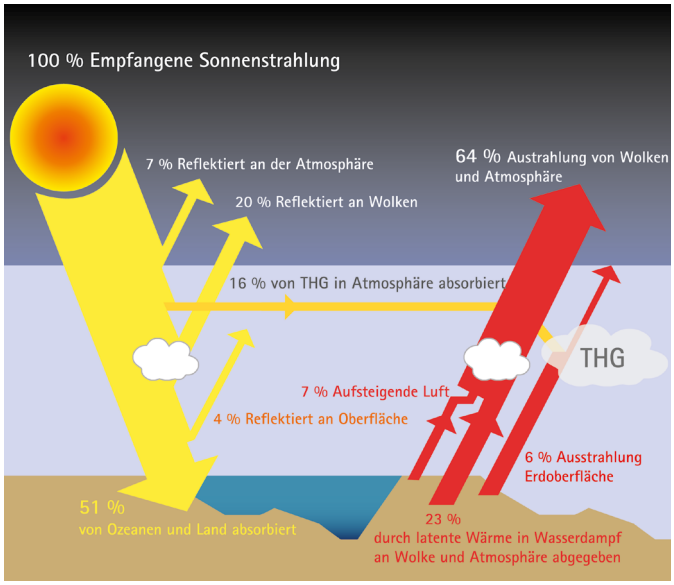


ABBILDUNG 363: Strahlungsenergiebilanz des Planeten Erde - QUELLE: IPCC

2.1.1 Klimawirksamkeit: Das CO_2-Äquivalent

Die Klimawirksamkeit (Global Warming Potenzial, GWP), auch CO_2-Äquivalent ($CO2_e$) genannt, ist eingeführt worden, um verschiedene Treibhausgase untereinander vergleichen zu können. Diese verfügen über unterschiedliche Klimawirksamkeit, sie unterscheiden sich aber auch in ihrer Verweildauer in der Atmosphäre. Die Klimawirksamkeit eines Treibhausgases beschreibt die Störung des Gleichgewichts zwischen einstrahlender Solarenergie und der an den Weltraum abgegebenen langwelligen Strahlung, die durch dieses Treibhausgas verursacht wird. Die Auswirkungen werden auf einen gewissen Zeitraum hochgerechnet; in den Berichten des IPCC (Weltklimarat der UN) beträgt dieser Zeitraum 100 Jahre. Als Vergleichswert dient die Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid (CO_2). Dieses Treibhauspotenzial ist aber nicht mit dem tatsächlichen Anteil an der globalen Erwärmung gleichzusetzen, da sich die Emissionsmengen der verschiedenen Gase stark unterscheiden. Mit diesem Konzept können jedoch bei bekannten Emissionsmengen die unterschiedlichen Beiträge einzelner Treibhausgase verglichen werden.

Treibhausgas	Summenformel	GWP nach IPCC (bezogen auf 20 Jahre)	GWP nach IPCC (bezogen auf 100 Jahre)	Verweildauer [Jahre]
Kohlenstoffdioxid	CO_2	1	1	30-95
Methan	CH_4	72	25	12
Lachgas	N_2O	289	289	114
Tetrafluorethan	$CH_2FC_2F_3$	3.830	1.430	14
FCKW Fluorchlorkohlenwasserstoffe	z.B. $CCIF_3$	10.800	14.400	640
FKW/HFKW Fluorkohlenwasserstoffe	z.B. CHF_3	12.000	14.000	270
Stickstofftrifuorid	NF_3	17.200	17.200	270
Schwefelhexafuorid	SF_6	22.800	22.800	3.200

ABBILDUNG 364: CO_2-Äquivalent, Klimawirksamkeit von Treibhausgasen
QUELLE: IPCC

Der Effekt eines Treibhausgases beruht auf seiner Fähigkeit, die von der Erdoberfläche reflektierte Wärmestrahlung im Infrarotbereich zu absorbieren und so die Atmosphäre durch die Verstärkung des Treibhauseffekts zu erwärmen. Kohlenstoffdioxid (CO_2) entsteht bei der Verbrennung fossiler Energieträger sowie auch bei der Verbrennung von Biomasse. Die Nutzung fossiler Energieträger und die Rodung von Waldflächen gehen mit einer unwiederbringlichen Vernichtung von Kohlenstoffsenken einher. Nachhaltig erzeugte Biomasse ist CO_2-neutral, weil bei ihrer Verbrennung die gleiche Menge an Kohlendioxid freigesetzt wird, wie zuvor beim Wachstum aufgenommen wurde. Größere Mengen CO_2 fallen auch bei der Zementproduktion an. Methan (CH_4) entsteht beim Reisanbau und der Viehzucht sowie in Kläranlagen und Mülldeponien. Auch im Steinkohlebergbau fällt Methan in Form von Grubengas an. Ebenso kann beim Abbau von Erdgas und Erdöl Methan in die Atmosphäre gelangen. Es wird vermutet, dass große Mengen von Methan in den Eisschilden unseres Planeten gebunden sind. Durch die globale Erwärmung schmelzen diese Eisschilde und das Methan gelangt in die Atmosphäre. Distickstoffoxid (N_2O), auch Lachgas genannt, entsteht durch die Nutzung von Stickstoffdünger in der Landwirtschaft sowie bei der Verbrennung oder Verrottung von Biomasse. Tetrafluorethan ($C_2H_2S_4$) kommt als Kältemittel in Kühlanlagen sowie als Treibgas in Sprühdosen, als Narkosemittel oder als Füllgas in Schaumstoffen zum Einsatz. Im Laufe der 1970er-Jahre stellte sich heraus, dass die Freisetzung von Fluorchlor-Kohlenwasserstoffen in erheblichem Maße für den Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre und die Entstehung des Ozonlochs verantwortlich ist. Der Einsatz von FCKW ist heute in

vielen Anwendungsbereichen verboten; die Ozonschicht konnte sich in den vergangenen Jahrzehnten nachweislich regenerieren. Ersatzstoffe wie Fluorkohlenwasserstoff (FKW) oder Halogenfluorkohlenwasserstoff (HFKW) wirken sich aber fast ebenso klimawirksam aus. Stickstofftrifluorid (NF_3) ist in ebenfalls in erhöhtem Maße klimawirksam und wird durch die Herstellung von Halbleitern, Solarzellen und Flüssigkristall-Bildschirmen freigesetzt. Schwefelhexafluorid (SF_6) ist nicht nur in höchstem Maße klimawirksam, sondern kann sich auch mehrere tausend Jahre lang in der Atmosphäre aufhalten. Es dient als Schutzgas bei der technischen Erzeugung von Magnesium und kommt zum Beispiel als Isoliergas in Hochspannungs-Schaltanlagen zum Einsatz.

2.2 Nutzung fossiler Brennstoffe

Ein wichtiger Faktor, der die natürlichen Prozesse der Biosphäre beeinflusst, ist der Mensch. Durch unser Verhalten können wir dafür sorgen, dass mehr CO_2 gebunden wird, z. B. durch nachhaltige Forstwirtschaft oder Aufforstungen. Unser Verhalten kann den CO_2-Kreislauf auch negativ beeinflussen, wie bei der Verbrennung fossiler Energieträger oder beim Raubbau an der Natur, etwa in Form von Brandrodungen. Wahrscheinlich hat der Mensch das Klima schon in früheren Zeiten beeinflusst. Ein Beispiel ist die Abholzung ganzer Landstriche des Mittelmeerraumes durch Griechen, Phönizier und Römer. Der Einfluss auf das Klima blieb aber regional begrenzt, globale Auswirkungen lassen sich daraus nicht ableiten. Im Zuge der industriellen Revolution wurden durch die Nutzung fossiler Energieträger völlig neue Möglichkeiten eröffnet. Seit Beginn des 19. Jahrhunderts ist der Energiebedarf stetig angestiegen. Zunächst war Kohle der wichtigste Energieträger, später folgten Erdöl und Erdgas.

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts haben die technische und wirtschaftliche Entwicklung sowie die zunehmende Bevölkerung den weltweiten Energieverbrauch immer stärker ansteigen lassen. Dieser Energieverbrauch wird bis heute zu einem Großteil aus fossilen Energieträgern gedeckt. Dadurch gelangt Kohlenstoff, der einst der Atmosphäre durch Pflanzen entzogen und in der Lithosphäre (Erdkruste, feste Gesteinshülle) gespeichert wurde, in die Atmosphäre zurück und führt zum entscheidenden Faktor für den Klimawandel, dem anthropogenen Treibhauseffekt.

Weiter mit: „1.3 Das Industriezeitalter: Der Einsatz fossiler Brennstoffe wächst ins Unermessliche" K: 2, S: 21
Weiter mit: „2.6 CO_2-neutraler Kreislauf versus fossile Einbahnstraße" K: 6, S: 205

2/21
6/205

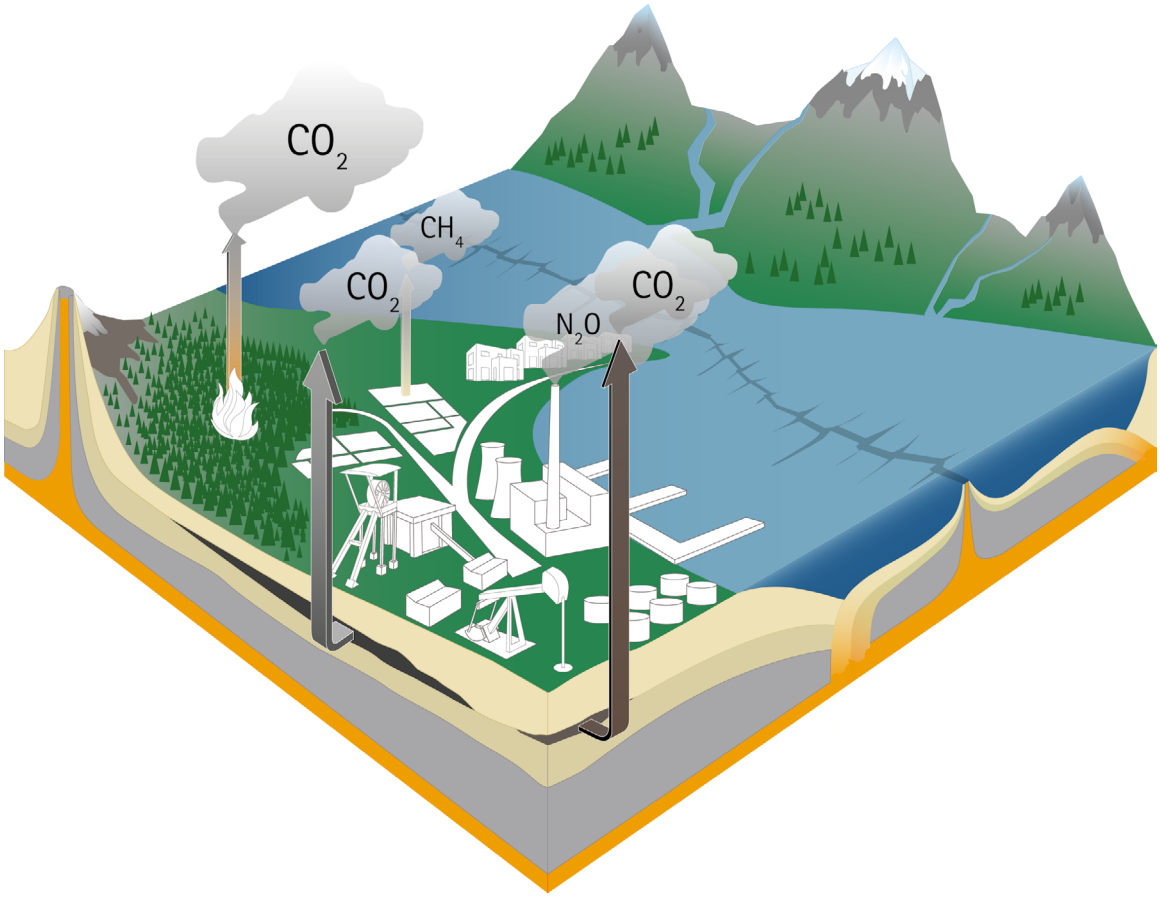


ABBILDUNG 365: CO_2-Kreislauf, Kreislauf der Biosphäre Mensch - QUELLE: IPCC

.ppt
23

PRÄSENTATION 23: Anthropogener Treibhauseffekt (19 Folien)

2.3 Kohlenstoffkreisläufe in unserem Ökosystem

Pflanzen binden durch Photosynthese CO_2 aus der Luft in Form von Biomasse. Nach ihrem Absterben werden sie unter dem Einfluss von Luftsauerstoff von anderen Organismen wie Pilzen und Bakterien abgebaut. Sie dienen diesen als Nahrung und das zuvor gebundene CO_2 wird beim Abbauprozess wieder freigesetzt. Innerhalb der Biosphäre ist dieser CO_2-Kreislauf geschlossen, weshalb er auch als kurzfristiger CO_2-Kreislauf bezeichnet wird. Gerät Biomasse nach ihrem Absterben durch geologische Aktivitäten unter Luftabschluss, so wird das Verrotten unterbunden, was zu einer langfristigen Speicherung von CO_2 aus der Atmosphäre führt. Durch chemische Prozesse entstehen Öl, Kohle und Erdgas. Vereinfacht kann gesagt werden: Biomasse besteht aus Sonnenenergie und Kohlenstoff. Pflanzen und Tiere nutzen die gespeicherte Energie durch Abbau der Produkte.

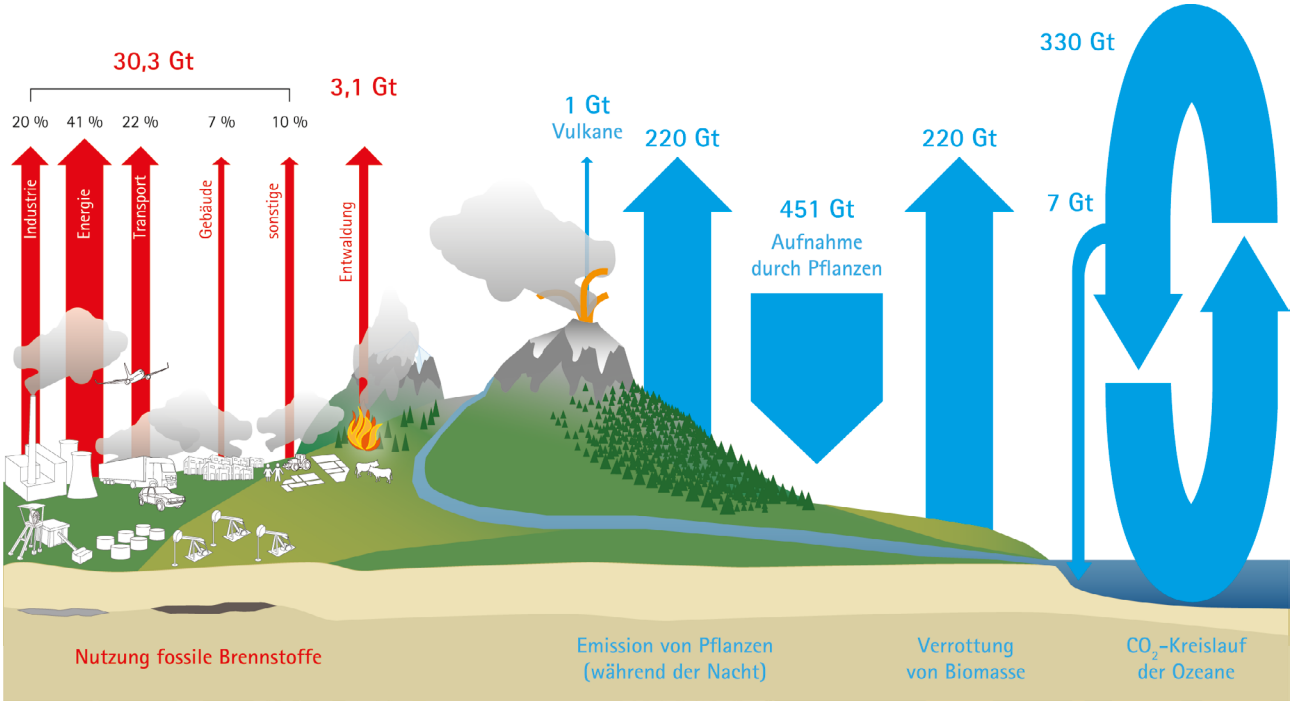


ABBILDUNG 366: CO_2-Kreislauf des Ökosystems Erde - QUELLE: Terra Mater

Überall auf der Erde, wo es Wasser, Nährstoffe und eine Energiequelle gibt, kann Leben existieren. Mikroben, Bakterien und Archaeen (Urbakterien) kommen fast überall vor, wo diese Bedingungen bestehen. Bleiben die klimatischen Bedingungen konstant, erweitert sich das Leben um Einzeller und wirbellose Tiere, die sich von den Mikroben und ihren eigenen Artgenossen ernähren. Werden die klimatischen Bedingungen milder, steigt die Intensität der Sonneneinstrahlung und steht genügend Platz zur Verfügung, so entwickeln sich immer größere Tiere und die Artenvielfalt steigt. Die größte Vielfalt, fast 90 % der bekannten Arten, findet sich in den Tropen, denn dort herrschen die wirtlichsten Bedingungen.

EXKURS 2: Grenzen der Biosphäre

Der Einfluss der Biosphäre erstreckt sich auf alle Bereiche zwischen Erdkruste und Atmosphäre. Sie steht in ständiger Wechselwirkung mit Atmosphäre und Hydrosphäre und formt diese in demselben Maß, wie sie von ihnen geformt wird.

PRÄSENTATION 24: Die Grenzen der Biosphäre (8 Folien)

Am Anfang jeder Nahrungskette stehen Organismen wie Bakterien, Algen und Pflanzen. Durch ihre Fähigkeit, aus den vorhandenen Stoffen und der in ihnen enthaltenen Energie Nahrung herzustellen, bilden sie die Grundlage des höheren Lebens. In der Geschichte des Lebens waren es Mikroorganismen wie Bakterien, Viren und Archaeen, die für die Grundlage des höheren Lebens und dessen Evolution verantwortlich waren.

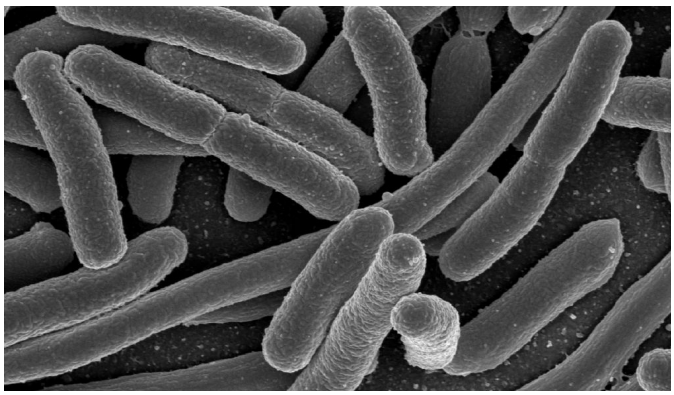


ABBILDUNG 367: Bakterium Escherichia Coli - BILD: NIAID

2

.ppt
24

2.4 Photosynthese: Die wichtigste Reaktion für das Leben in unserem Ökosystem

Die ersten 1,5 Milliarden Jahre nach der Entstehung des Lebens auf der Erde gab es nur Bakterien, Viren und Archaeen. Diese sollten das Leben noch mehr als eine weitere Milliarde Jahre dominieren. Nach der Evolutionstheorie entwickelte sich aus den ersten Mikroorganismen, Bakterien und Viren, das höhere Leben, für das diese Organismen die Bedingungen mitkreiert haben. Die ersten Bakterien gewannen Energie aus organischen Stoffen oder einfachen chemischen Verbindungen. Heute steckt hinter dem Leben auf der Erde vor allem die Energie des Sonnenlichts.

!

Nach Schätzungen machen Bakterien und Mikroorganismen mehr als die Hälfte aller Biomasse auf der Erde aus und sind für die Erzeugung von etwa der Hälfte des Luftsauerstoffes verantwortlich. Auch in vielen Lebensvorgängen von Pflanzen, Tieren und Menschen spielen sie eine zentrale Rolle. Die Photosynthese ist die Reaktion, die nicht nur vollständig die Energieversorgung des höheren Lebens auf der Erde sicherstellt, sie hat auch die Erde zu dem blau-grünen Planeten gemacht, den wir heute kennen. Ohne sie wäre das Leben auf einfache Einzeller, die von geochemischer Energie leben, beschränkt geblieben. Auch die fossilen Brennstoffe, deren Nutzung der Beginn der modernen Industriegesellschaft darstellt, wären nicht ohne die Photosynthese entstanden.

Durch die Photosynthese erfolgt die Umwandlung des Sonnenlichts in nutzbare chemische Energie und zugleich die Umwandlung anorganischen Kohlendioxids in organische Kohlenstoffverbindungen. Aus Wasser und dem Gas Kohlendioxid entstehen bei diesem Vorgang Energie, Zucker und Sauerstoff. Sie bilden die Ausgangsstoffe für alle weiteren Reaktionen des Lebens. Das benötigte Kohlendioxid ist in der Luft und im Meerwasser enthalten. Wasserstoff muss erst aus Wasser hergestellt werden. Er kann auch aus chemischen Verbindungen wie Schwefelwasserstoff oder Methan gewonnen werden. Organismen in Schwefelquellen oder an schwarzen Rauchern (hydrothermale Quellen am Grund der Tiefsee) machen sich diese chemischen Reaktionen an den Grenzen der Biosphäre zunutze. Viele Bakterien wie die Cyanobakterien, Landpflanzen und die meisten Algen verwenden aber die Energie des Sonnenlichts, um Wassermoleküle zu spalten. Das ist der Kern der primären Reaktion der Photosynthese; er findet bei Landpflanzen in den Chloroplasten statt, die ihre grüne Färbung dem Chlorophyll (Blattgrün) verdanken.

Photosynthese läuft in zwei Reaktionen ab, der Lichtreaktion und der Dunkelreaktion. In der Lichtreaktion (Primärreaktion) wird durch die Energie des Sonnenlichtes Wasser in seine Bestandteile aufgespalten. Dadurch werden Sauerstoff (O_2), Wasserstoff (H) und Elektronen frei. Die Bindeenergie der Wassermoleküle wird als freier Elektronenfluss genutzt. Durch den Elektronenfluss wird Energie chemisch gespeichert, indem Enzyme energetisch aufgewertet werden.

Die gespeicherte Energie und der freie Wasserstoff werden in der Dunkelreaktion (Sekundärreaktion) verwendet, um das CO_2 und den Wasserstoff aneinander zu binden; so entsteht Zucker. Der Sauerstoff der Primärreaktion wird als Abfallprodukt ausgeschieden. Der gewonnene Zucker wird von der Pflanze zum Zellaufbau verwendet und dient in dieser Form als Nahrungsmittel für höheres Leben.

ABBILDUNG 368: Laubblatt - BILD: Jon Sullivan

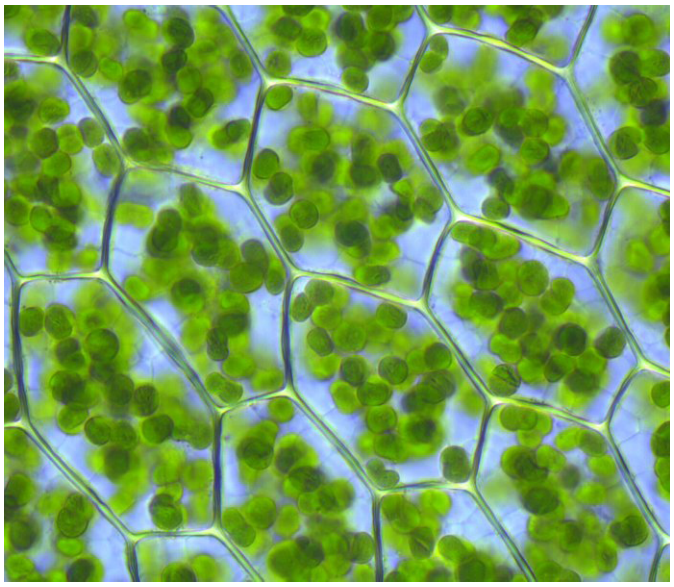


ABBILDUNG 369: Chloroplasten - BILD: Kristian Peters

EXKURS 4: Die Photosynthese: Die wichtigste Reaktion der Welt

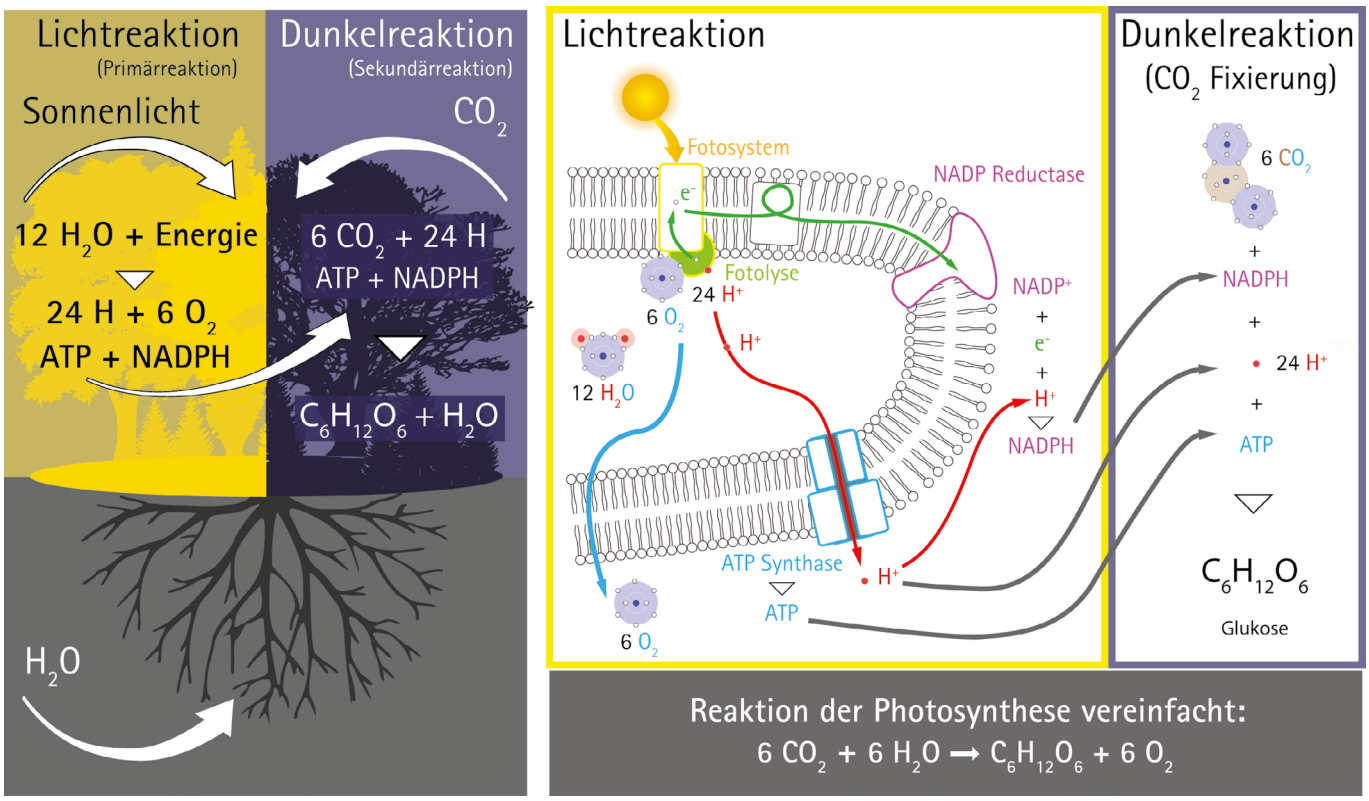


ABBILDUNG 370: Reaktionen der Photosynthese - QUELLE: Ökosystem Erde

PRÄSENTATION 25: Die Photosynthese (26 Folien)
EXPERIMENT 4: Nachweis der Photosynthese-Reaktion

2.5 Bildung von Kohlenstoffsenken – fossile Energieträger im Kohlenstoffkreislauf

2.5.1 Entstehung von Kohle

Vor etwa 400 Millionen Jahren markierte das Erdzeitalter Devon den Beginn der weltweiten Eroberung des Festlandes durch Pflanzen. Die ersten großen Wälder breiteten sich aus, pflanzenfressende Lebewesen gab es noch nicht. Gegen Ende des Devon traten die ersten amphibischen Lebewesen auf, die sich zeitweise auch an Land aufhielten. Der Gehalt des Luftsauerstoffes stieg durch die Verbreitung der Landpflanzen und ihre Photosynthese-Aktivität an. Im Karbon erreichte die Konzentration des Luftsauerstoffes etwa 100 Millionen Jahre später mit 35 % ihren Höhepunkt. Der hohe Anteil des Luftsauerstoffes ermöglichte das Wachstum riesenhafter Insekten und Gliedertiere. Es wurden Fossilien von Riesenlibellen mit einer Flügelspannweite von über 70 cm gefunden.

ABBILDUNG 371: Fossil der Riesenlibelle Meganeuradae - BILD: Hcrepin

ABBILDUNG 372: Diorama einer Karbonlandschaft - BILD: Sculptorscoop

.ppt 25

4

Das warme und feuchte Klima begünstigte den üppigen Pflanzenwuchs, ausgedehnte Sumpflandschaften bedeckten die Erde. Absterbende Pflanzen versanken im Sumpf und gelangten dadurch unter Luftabschluss. Durch das Fehlen von Sauerstoff wurde die natürliche Verrottung unterbunden und es entstand Torf. Infolge tektonischer Prozesse wurden die Sümpfe im Laufe der Zeit von Gesteinssedimenten bedeckt. Unter wachsendem Druck und mit steigender Temperatur begann der Prozess der Inkohlung. Wasser und flüchtige Bestandteile wurden durch die Einwirkung des hohen Drucks aus dem Torf gepresst und es entstand Braunkohle. Aufgrund weiterer Ablagerungen von Gestein erhöhten sich der Druck und die Temperatur. Der Prozess der Inkohlung setzte sich unter Abgabe von Kohlendioxid und Methan immer weiter fort, bis die Kohle zu Steinkohle oder in seltenen Fällen zu Grafit wurde. Der Anteil an Kohlenstoff nimmt mit steigendem Grad der Inkohlung immer weiter zu. Mit zunehmender Tiefe und zunehmendem Alter der Lagerstätte steigt die Qualität der Kohle. Der Entstehung der mächtigen Steinkohlelager verdankt dieses Zeitalter seinen Namen Karbon, der sich aus dem lateinischen Wort carbo für Kohle herleitet.

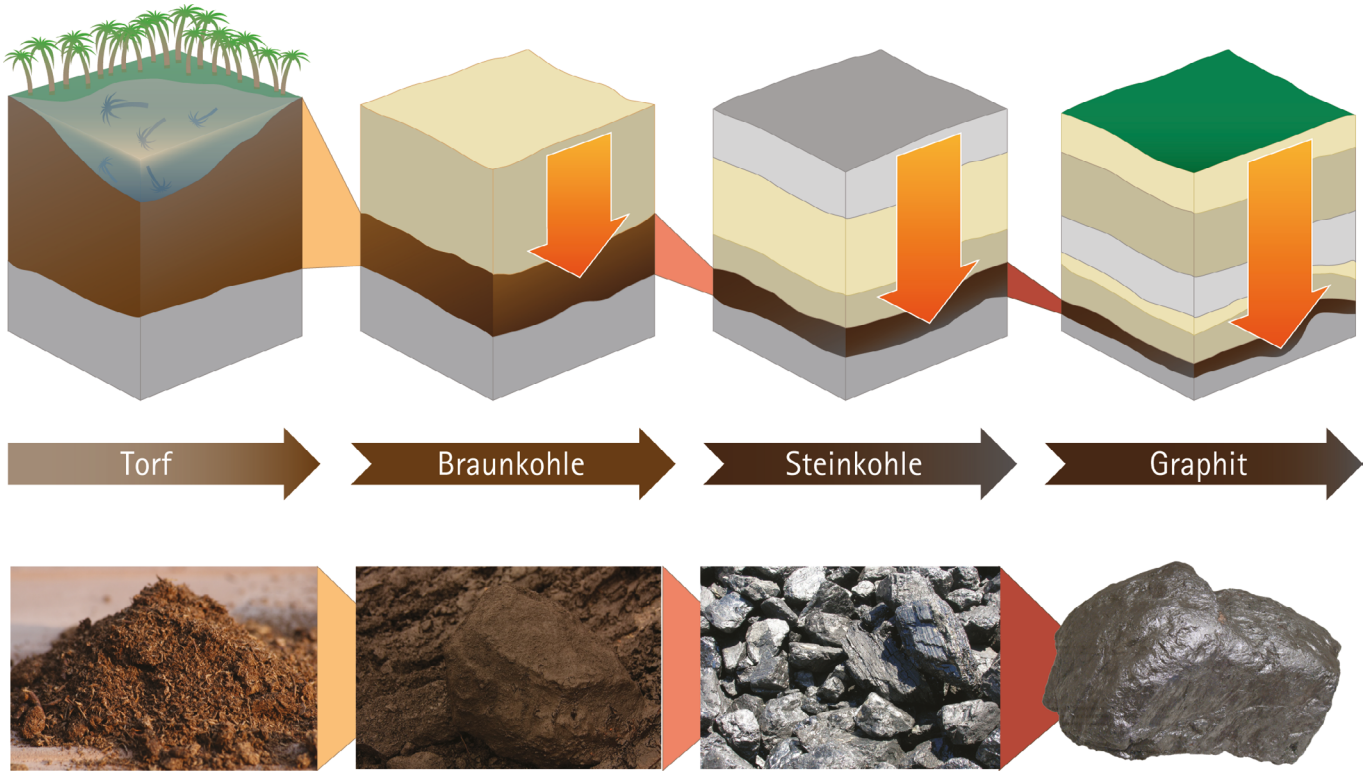


ABBILDUNG 373: Entstehung von Kohle - QUELLE: Murck

.ppt 26

PRÄSENTATION 26: Inkohlung: Entstehung von Kohle (18 Folien)
Weiter mit: „3.2 Kohle" K: 3, S: 62

3/62

2.5.2 Entstehung von Erdöl und Erdgas

Erdöl und Erdgas sind aus abgestorbenen Meeresorganismen entstanden, die sich vor mehreren Hunderttausend bis mehreren Millionen Jahren auf dem Grund der Meere abgelagert haben. Ab einer Meerestiefe von 200 Metern gelangte nur noch wenig Sauerstoff an die tote Biomasse und es bildete sich Faulschlamm. Dieser Faulschlamm vermischte sich mit Sedimenten wie Sand und Ton: es entstand das Erdölmuttergestein. Im Laufe der Zeit wurde dieses immer wieder von neuen Gesteinsschichten überdeckt. In Tiefen zwischen 2.000 und 4.000 Metern konnten sich als Folge der hohen Temperatur und des hohen Drucks gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffketten aufspalten. In der Industrie ist dieser Prozess der Aufspaltung als „Cracken" bekannt. Für die Bildung einer Lagerstätte müssen aber zusätzliche geologische Bedingungen erfüllt werden. Zur Loslösung aus dem Erdölmuttergestein muss eine poröse Gesteinsschicht über diesem liegen. Bei einer undurchlässigen Gesteinsschicht über dem Muttergestein können Erdöl und Erdgas nicht austreten. Die Wanderung aus dem Muttergestein wird Migration genannt.

Eine weitere Bedingung für die Entstehung von Erdöl und Erdgas ist das Vorhandensein einer „Falle", einer undurchlässigen geologischen Struktur, unter der sich das aufsteigende Erdöl und Erdgas sammeln kann. Oberflächennahe, erdölhaltige Sedimente werden als Ölsande bezeichnet. Mit der Entwicklung der Vegetation steigt und fällt die Menge an gespeichertem CO_2. Auch andere Lebensformen speichern CO_2 in ihren Skeletten, Knochen und Schalen und sorgen so dafür, dass ein Teil des Kohlenstoffes in Bewegung bleibt.

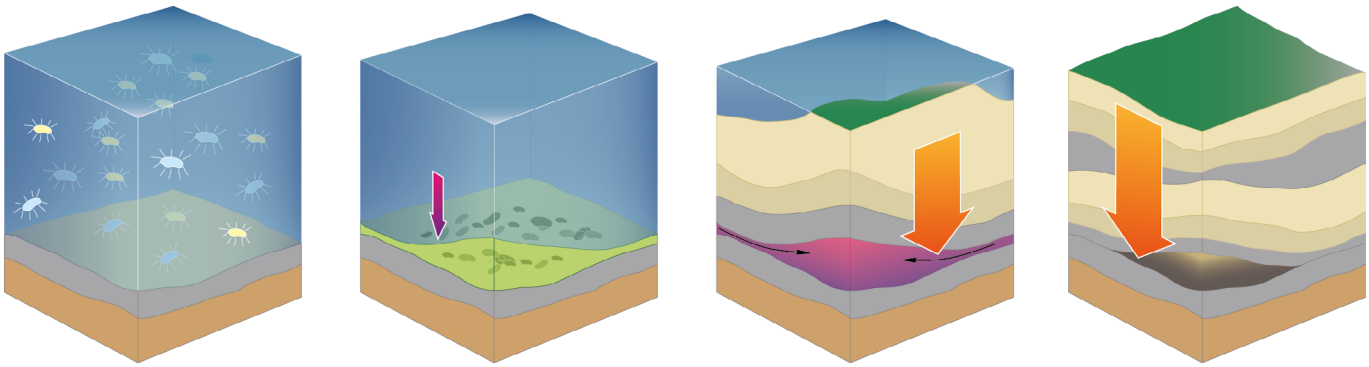


ABBILDUNG 374: Entstehung von Erdöl - QUELLE: Murck

PRÄSENTATION 27: Entstehung von Erdöl und Erdgas (10 Folien)
Weiter mit: „3.1 Erdöl" K: 3, S: 59 oder Weiter mit: „3.3 Erdgas" K: 3, S: 64

2.6 CO_2-neutraler Kreislauf versus fossile Einbahnstraße

Holz braucht zum Wachsen Sonnenenergie und CO_2. Die Energie und der Kohlenstoff werden im Holz gespeichert. Bei der Verbrennung wird die Sonnenenergie in Form von Wärme wieder frei. Der gebundene Kohlenstoff wird ebenfalls wieder in die Atmosphäre abgegeben. Wird das Holz nicht verbrannt, sondern verrottet es, wird der Kohlenstoff ebenfalls wieder in CO_2 umgewandelt. Die gespeicherte Energie bleibt aber ungenutzt.

Gelingt es, großflächig Wälder aufzuforsten und diese nachhaltig zu bewirtschaften, können große Mengen an Kohlenstoff in der Pflanzenmasse und im Boden gespeichert werden. Kohlenstoff, der durch die Nutzung fossiler Ressourcen in die Atmosphäre gelangt, kann nicht mehr (oder nur unter sehr hohem technischen Aufwand) wieder in die Erdkruste verfrachtet werden und bleibt somit für Jahrtausende im oberirdischen Kreislauf.

Mehr als 90 % der globalen CO_2-Emissionen des Jahres 2010 stammen aus der Nutzung fossiler Rohstoffe; für etwa 10 % sind Landnutzungsänderungen, wie Rodungen von Wäldern oder der Umbau von Grün- in Ackerland, verantwortlich. Weltweit gesehen beträgt der anthropogen bedingte Anstieg des Kohlenstoffvorrates in der Atmosphäre geschätzte 3,2 Milliarden Tonnen CO_2 pro Jahr. Die Wälder der Erde binden jährlich etwa 0,9 Milliarden Tonnen CO_2. Ohne Biomassewachstum wäre die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre um etwa 30 % höher als gegenwärtig.

Weiter mit: „2.2 Der Wald: Quelle für nachhaltigen Rohstoff und Energie" K: 4, S: 90

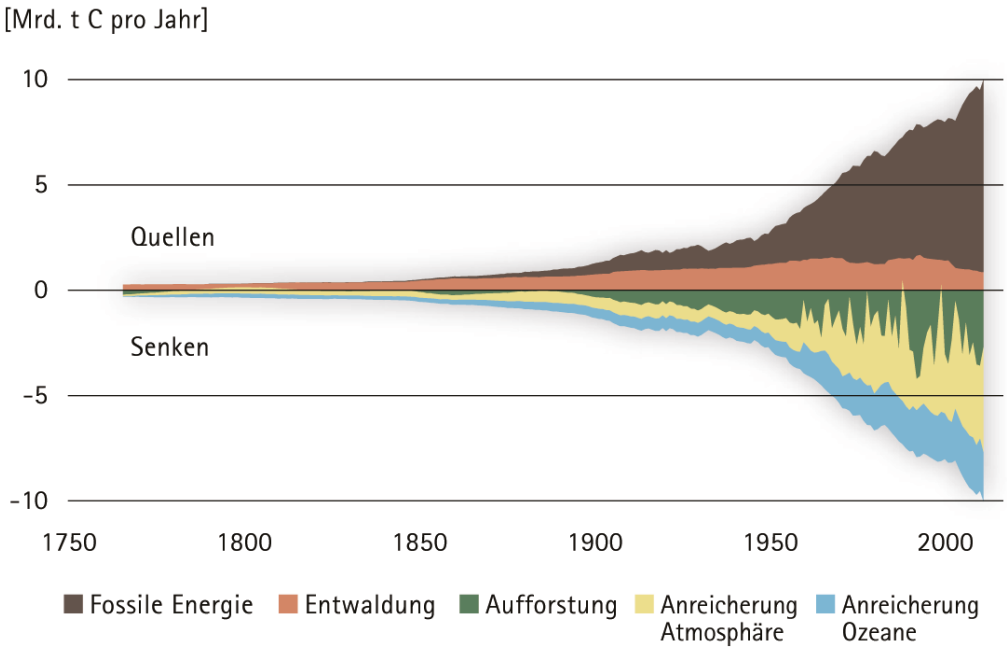


ABBILDUNG 375: Das globale CO_2-Budget 1750 bis 2010 - QUELLE: Global Carbon Project 2011

.ppt 28
3
5/170

3 EINFLÜSSE DER GEOSPHÄRE AUF DEN KLIMAWANDEL

3.1 Verwitterung: Der Silikat-Karbonat-Kreislauf

Kalk- und Silikatgestein verwittert unter dem Einfluss des Wasserkreislaufes. Das Wasser löst in einer mehrstufigen chemischen Reaktion Kalk und Silizium aus dem Gestein. Bei diesem Vorgang wird der Atmosphäre CO_2 entzogen. Das aus dieser Reaktion entstehende Hydrogenkarbonat gelangt über Grundwasser und Flüsse in das Meer, wo es bis zu einem gewissen Grad gespeichert werden kann. Kaltes Wasser kann mehr CO_2 speichern, weshalb auch die globale Zirkulation in den Meeren einen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf hat. Die absinkenden Wassermassen vor der Küste von Grönland nehmen CO_2 aus der Atmosphäre für viele Jahre mit in die Tiefe. Je höher die Wassertemperatur ist, desto mehr CO_2 gelangt direkt aus dem Meer wieder in die Atmosphäre.

Durch die Biosphäre der Ozeane kann CO_2 in Form von Kalkschalen und Skeletten noch länger gespeichert werden. Meeresorganismen verwenden dieses Hydrogenkarbonat zur Bildung von Kalkschalen und Skeletten, die nach dem Absterben der Organismen auf den Meeresgrund sinken, wo sie sich in Form von Gesteinsschichten ablagern. Durch die Prozesse der Plattentektonik gelangen diese Gesteinsschichten nach langer Zeit wieder unter die Erdkruste. Bei großer Hitze wird das CO_2 aus dem Gestein gelöst und durch den Schlot eines Vulkans wieder in die Atmosphäre geblasen, wodurch sich der Kreislauf schließt.

PRÄSENTATION 28: Verwitterung (9 Folien)

EXKURS 3: Verwitterung: Der Silikat-Karbonat-Kreislauf

Weiter mit: „3 Quellen der Treibhausgase: Wo muss angesetzt werden?" K: 5, S: 170

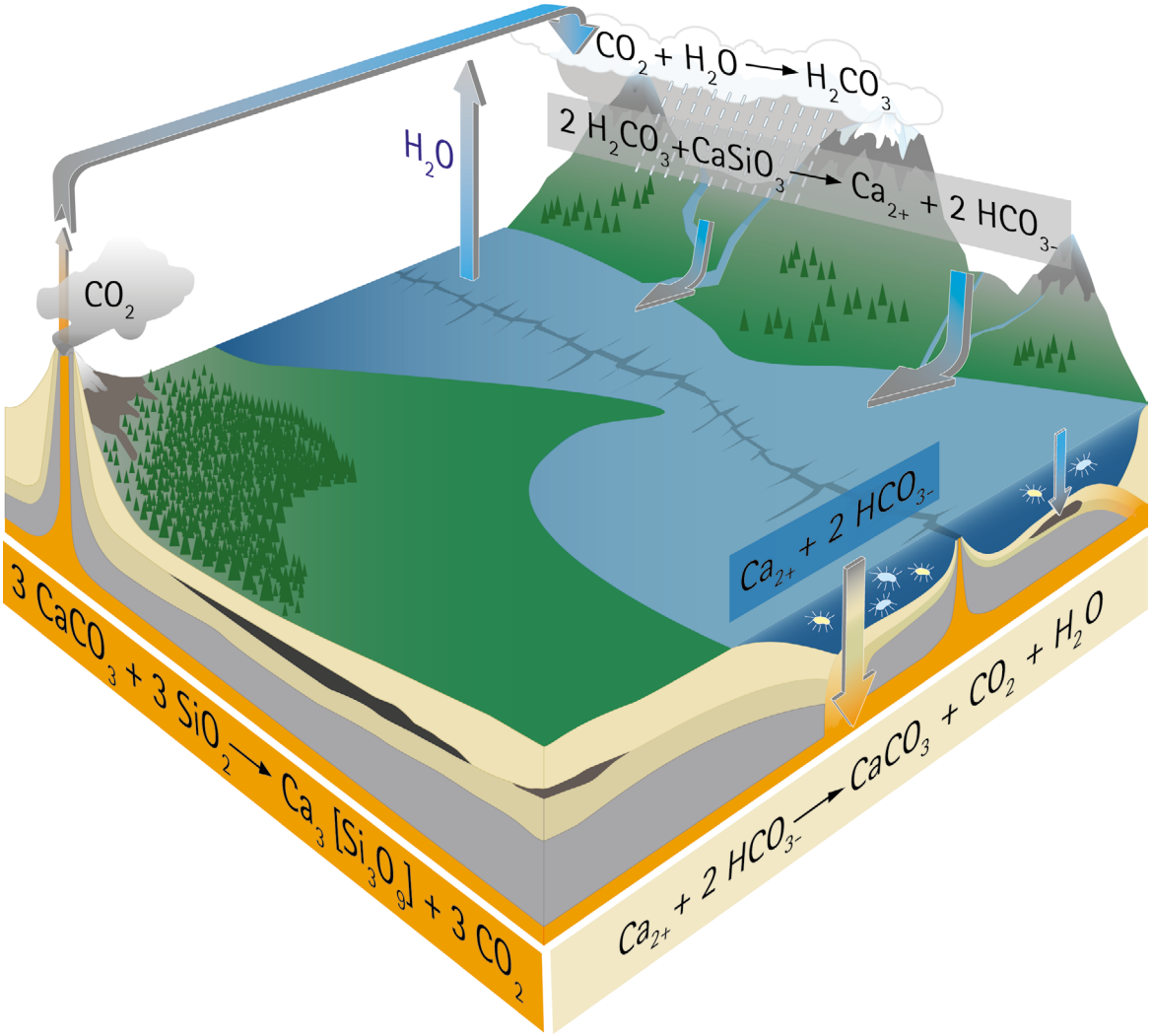


ABBILDUNG 376: CO_2-Kreislauf, Silikat-Karbonat-Kreislauf, Verwitterung - QUELLE: IPCC

3.2 Plattentektonik

Der Erdkern besteht aus einer Eisen-Nickelverbindung, die sich nur wegen des hohen Druckes im Kern bei über 5.000 °C noch im festen Zustand befindet. Er wird umgeben von einer flüssigen Schicht, die ebenfalls metallisch ist. Im darüber liegenden Erdmantel werden thermische Zirkulationsströme ausgelöst. Der letzte Abschnitt des Erdmantels wird Asthenosphäre genannt. Diese Schicht verhält sich wie eine zähe Masse. Die Erdkruste und der oberste Teil des Erdmantels bis zu einer Tiefe von 100 Kilometern bilden zusammen die Lithosphäre. Diese gliedert sich in verschieden große Einheiten, die tektonischen Platten.

Vom heißen Erdkern nach außen besteht eine thermische Zirkulation, die ziemlich stabil ist; sie bewegt nur einige Zentimeter pro Jahr. Ähnlich wie bei der atmosphärischen Zirkulation warme Luft zirkuliert, steigt bei der geosphärischen Zirkulation heißes Magma (Gesteinsschmelze) aus den unteren Mantelzonen auf, kühlt sich dabei ab und sinkt an einer anderen Stelle wieder Richtung Erdkern ab. Dort, wo die heißen Strömungen auf die Erdkruste stoßen, treten Dehnungsspannungen auf, die zu Rissen in der Erdkruste führen. Diese Zonen werden Grabenrücken genannt. Durch das aufsteigende Magma wird neue Erdkruste erzeugt, die die ozeanischen Platten auseinanderdrückt. Diese Zonen werden mittelozeanische Rücken oder Riftzonen genannt. Die an Rücken und Riftzonen grenzenden Platten bewegen sich dadurch von diesen Zonen weg. Hier spricht man von divergenten oder auseinanderstrebenden Plattengrenzen.

Weiter mit: „2.5 Die Beschaffenheit der Erde" K: 7, S: 231

PRÄSENTATION 29: Die Rolle der Geosphäre (40 Folien)

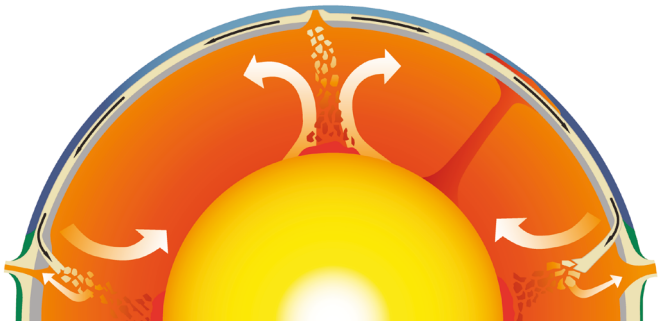


ABBILDUNG 377: Geosphärische Zirkulation - QUELLE: USGS

Das spezifische Gewicht der ozeanischen Platten ist höher als jenes der kontinentalen. Dort, wo sie aufeinandertreffen, schiebt sich deshalb die schwerere ozeanische Platte unter die leichtere kontinentale Platte. An diesen Plattengrenzen wird Erdkruste zerstört; die ozeanischen Platten werden in die Tiefe abgeleitet, wo sie im Erdmantel wieder „recycelt" werden. Diese Zonen werden konvergente oder zusammenlaufende Plattengrenzen bzw. Subduktionszonen genannt. Es gibt auch Plattengrenzen, an denen Erdkruste weder aufgebaut noch vernichtet wird. An den sogenannten Transformstörungen bewegen sich die tektonischen Platten nicht aufeinander zu oder voneinander weg, sondern gleiten aneinander vorbei. Ein Beispiel ist die San-Andreas-Verwerfung, die Grenze zwischen pazifischer und nordamerikanischer Platte.

7/231
.ppt
29

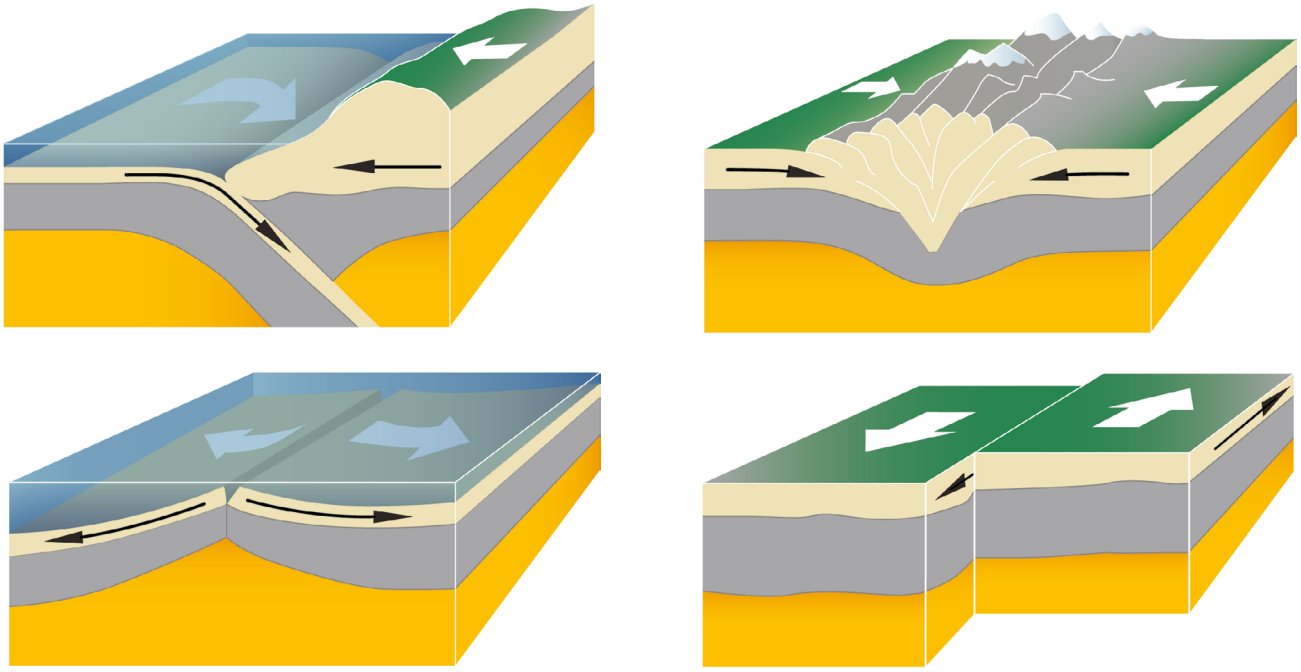


ABBILDUNG 378: Verschiedene Plattengrenzen - QUELLE: USGS

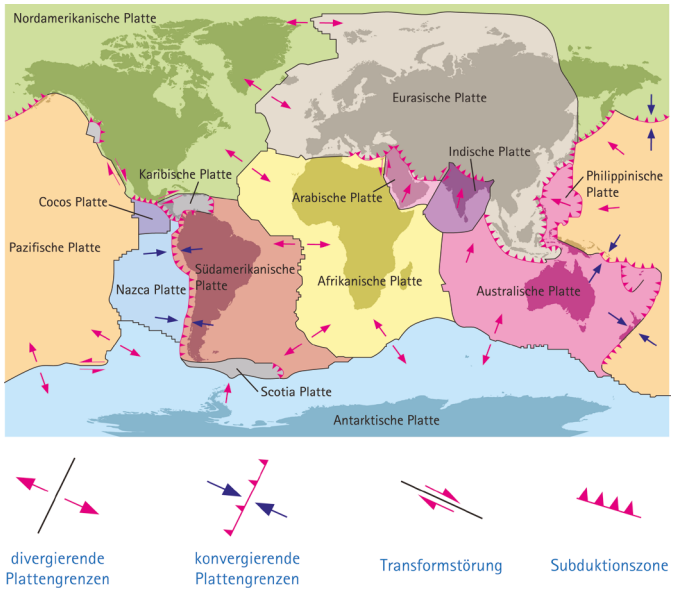


ABBILDUNG 379: Tektonische Platten mit Plattengrenzen und Bewegungen
QUELLE: USGS

3.3 Gebirgsbildung

Die Lithosphärenplatten werden durch plattentektonische Vorgänge pro Jahr einige Zentimeter gegeneinander verschoben. Treffen ozeanische auf kontinentale Platten, so tauchen sie in einem Winkel, der bis zu 90° betragen kann, in den Erdmantel ab. Es entsteht an dieser Stelle eine Tiefseerinne. Die Ozeanböden werden aber nicht vollständig subduziert, Teile des Gesteins werden „abgeschabt" und zusammen mit dem Gestein an den Grenzen der Kontinentalplatte zu Gebirgen aufgefaltet. Die Anden sind eine Folge des Aufeinandertreffens der Nazca-Platte mit der südamerikanischen Platte. Treffen zwei kontinentale Platten aufeinander, wird das Gestein der Erdkruste aufgestapelt und aufgefaltet. Der Himalaya entstand so durch das Auftreffen der indischen Platte auf die asiatische Platte. Die Alpen haben sich durch die Kollision der eurasischen mit der afrikanischen Platte erhoben.

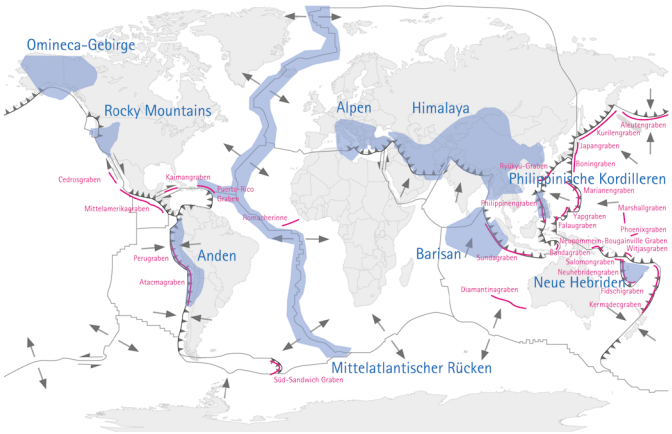


ABBILDUNG 380: Tiefseegräben und aufgeworfene Gebirge - QUELLE: Diercke

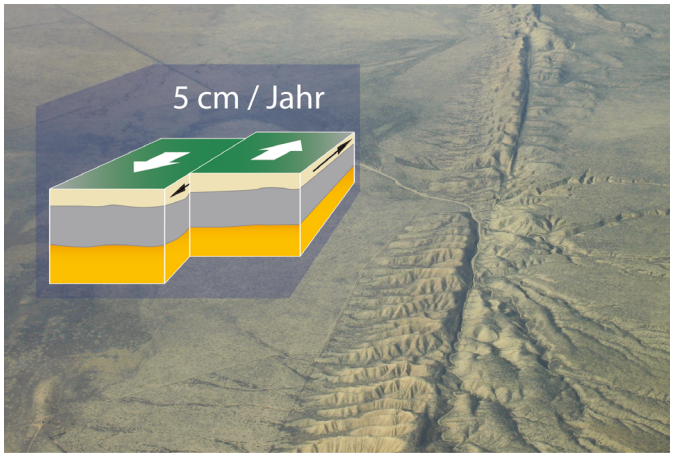


ABBILDUNG 381: San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien - BILD: Ikluft

ABBILDUNG 382: Vasquez Rocks - BILD: Geographer

(Weiter mit: 3.3.4 Gebirgsklima K.01/S.22)

Seit dem Eozän vor etwa 55 Millionen Jahren bewegt sich Afrika direkt nach Norden und schiebt sich dabei in das südliche Ende von Europa hinein. Dadurch wurden die Alpen zum höchsten Gebirge Europas aufgefaltet. Der höchste Berg der Alpen ist der Mont Blanc mit etwa 4.800 Metern Seehöhe. Die höchste Erhebung in Österreich ist der Großglockner mit etwa 3.800 Metern. Die Kontinentalplatten bewegen sich heute noch circa 5 cm pro Jahr aufeinander zu; dadurch werden die Alpen noch immer in die Höhe geschoben. Die Erosion – d. h. die Abtragung der Oberfläche durch Wasser und Wind – kompensiert aber diese Erhebung weitgehend. Die Seehöhe eines Standortes hat maßgebliche Auswirkungen auf die dort herrschenden klimatischen Bedingungen. Die Bildung von Gletschern führte zu einer starken Bindung von Wasser aus dem Wasserkreislauf, was eine Senkung der Meeresspiegel bewirkt hat: Somit haben die Gebirge auch auf die Entwicklung des Gesamtklimas einen nicht zu unterschätzenden Einfluss.

PRÄSENTATION 30: Gebirge und Tiefseegräben (23 Folien)

3.4 Die Kontinentaldrift

Die Gestalt der Erdoberfläche hat sich im Laufe der Erdgeschichte ständig verändert. Nach der Theorie der Kontinentaldrift befanden sich Teile der heutigen Kontinente in bestimmten Phasen der Erdgeschichte in Polnähe oder am Äquator mit entsprechenden klimatischen Bedingungen. Auch die Verteilung von Land und Wasser veränderte sich dadurch immer wieder. Vor circa 300 bis 250 Millionen Jahren gab es auf der Erde nur eine einzige große Landmasse: den Megakontinent Pangaea. Die dadurch stark vereinfachten Meeres- und Luftströmungen führten zusammen mit der großen Landfläche zu einem sehr warmen und feuchten Klima.

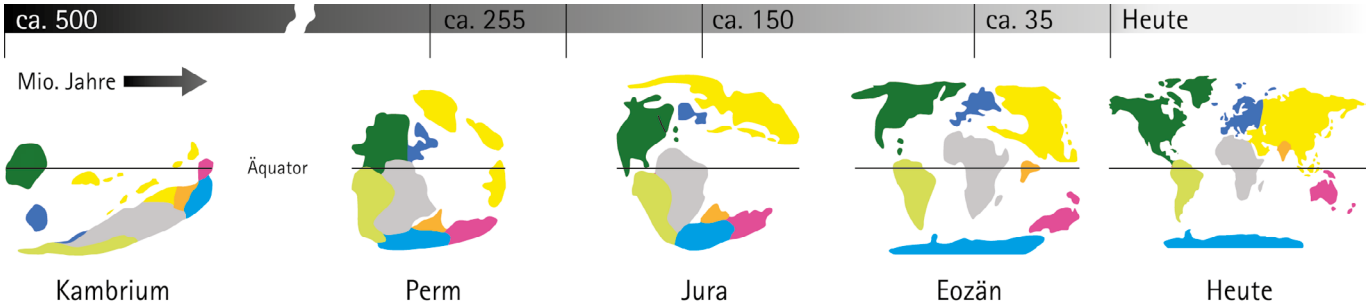


ABBILDUNG 383: Kontinentaldrift - QUELLE: Allianz Umweltstiftung

PRÄSENTATION 31: Die Kontinentaldrift (34 Folien)

.ppt 31

3.5 Vulkanismus

In den Zonen der Plattengrenzen herrscht viel Vulkanismus, der sich je nach geologischen Bedingungen grundlegend unterscheidet. Als Vulkanismus werden alle Begleiterscheinungen zusammengefasst, die mit dem Aufstieg und Austritt von Magma, glutflüssigem Gestein aus dem Inneren der Erde, zusammenhängen. Tritt das Magma an die Erdoberfläche, wird es Lava genannt. Weltweit ereignen sich jedes Jahr etwa 70 Vulkanausbrüche an der Erdoberfläche. Auf dem Meeresgrund gibt es hunderte Vulkane, die ständig aktiv sind. Man findet sie vor allem an den Grenzen von tektonischen Platten; dort treten sie in Vulkangürteln rund um den Globus auf. Neben hoher vulkanischer Aktivität sind die tektonischen Grenzen auch durch starke seismische Aktivitäten (Erdbeben) geprägt. Vulkane an den sogenannten Hotspots sind hingegen nicht an Plattenränder gebunden. Sie werden aus Mantel-Plumes gespeist, einem Aufstrom heißen Gesteinsmaterials aus dem tieferen Erdmantel. Mantel-Plumes weisen in der Tiefe eine schlanke, schlauchartige Form auf und verbreitern sich bei Erreichen der starren Lithosphäre helmbuschartig bzw. pilzförmig. Bei Orten, an denen sich das aufsteigende Gesteinsmaterial einen Weg an die Oberfläche bahnen kann, führt dies zu einer besonderen Form des Vulkanismus.

Etwa 45 Gebiete werden als „Hotspots" definiert. Neben dem Yellowstone-Nationalpark sind die hawaiianischen Inseln (alle vulkanischen Ursprungs) der bekannteste Vertreter des Hotspot-Vulkanismus. Aufgrund der Lage der einzelnen hawaiianischen Inseln lässt sich die Bewegung der Lithosphäreplatte rekonstruieren, denn das aufsteigende Material hielt den Prozess der Aufschichtung so lange in Gang, wie die einzelnen Inseln oberhalb der Plumes lagen.

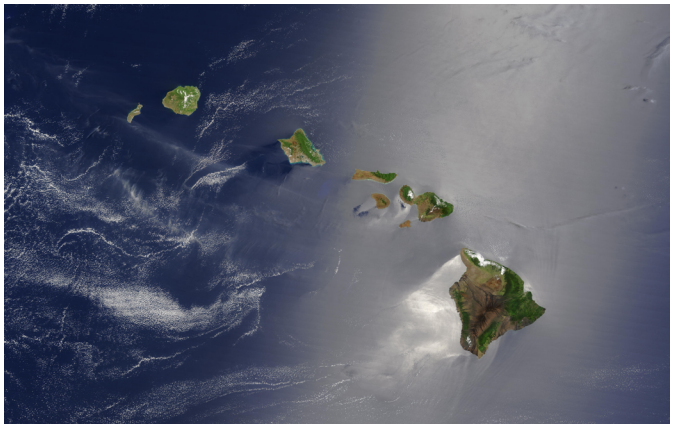


ABBILDUNG 384: Hawaiianische Inseln - BILD: NASA

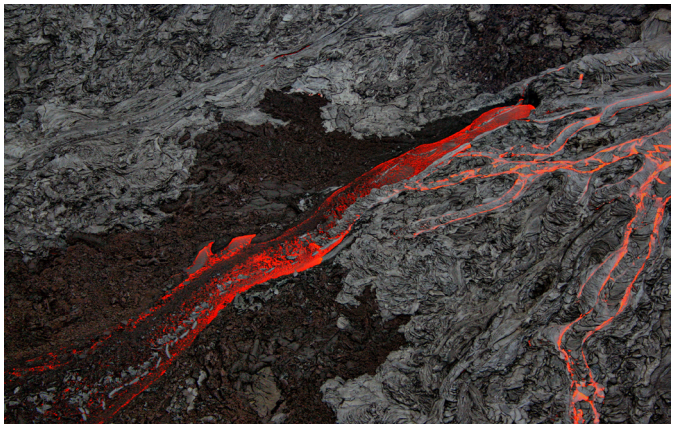


ABBILDUNG 385: Lavastrom auf Hawaii - BILD: Brocken Inaglory

! *Die tektonischen Platten sind stets in Bewegung: An ihren Grenzen drücken sie aufeinander, ziehen oder reiben aneinander. Verhaken sich Teile der Lithosphäre bei diesen Bewegungen, so treten Spannungen auf, die sich plötzlich ruckartig lösen können. Dann kommt es zu schweren Erdbeben, die verheerende Schäden anrichten.*

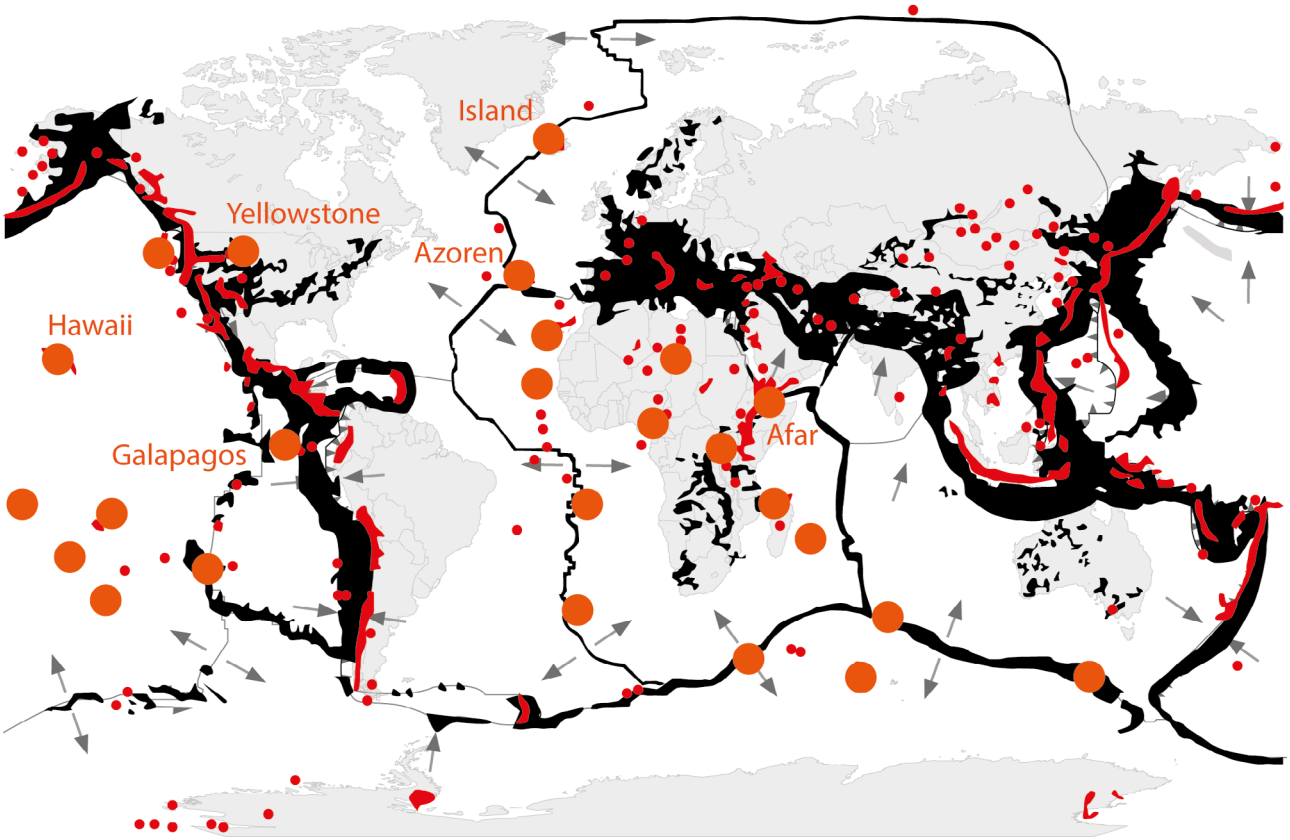


ABBILDUNG 386: Plattengrenzen, vulkanische Aktivität, seismische Aktivität - QUELLE: NASA DTAM, Smithsonian Institute

Dort, wo die ozeanische Kruste in das Erdinnere abgeleitet wird, schmelzen die Gesteine der Kruste zu zähflüssigem Magma, das sich über aufsteigende Tröpfchen in Magmaherden sammelt. Wird der Druck zu groß, steigt das Magma durch Vulkanschlote an die Oberfläche. Je nach geografischer Lage und Beschaffenheit des Vulkans ergeben sich unterschiedliche Formen des Ausbruches. Es gibt explosive Ausbrüche, bei denen schlagartig riesige Gesteinsmassen in die Luft geschleudert werden. Glut und Aschewolken können sich dabei wie Lawinen talwärts bewegen und alles mitreißen. Solche Vulkane sind typisch für Plattengrenzen, an denen Subduktion (Abtauchen einer Platte) stattfindet. Es gibt aber auch Vulkane, deren Ausbrüche viele Jahre andauern. Heiße Lava sammelt sich dabei in Lavaseen und gelangt in Lavaströmen talwärts, wo sie langsam erstarrt: Dies nennt man effusive Eruptionen.

.ppt 32

PRÄSENTATION 32: Vulkanismus (38 Folien)

ABBILDUNG 387: Explosiver Ausbruch des Pinatubo 1991 - BILD: Richard P. Hoblitt

ABBILDUNG 388: Effusiver Ausbruch des Nyiragongo
BILD: Cai Tjeenk Willink

ABBILDUNG 389: Ausbruch submariner Vulkan
BILD: NOAA

Durch Vulkanausbrüche gelangen CO_2, Methan und Wasserdampf in die Atmosphäre, was zu einer Intensivierung des Treibhauseffektes und der Klimaerwärmung führt. Durch explosive Ausbrüche kommt es zu einer Freisetzung von Asche und Gasen wie Schwefeldioxid. Geraten diese Aerosole in gewisse Höhen, wirken sie kurzfristig abkühlend auf das Klima.

Beim Ausbruch des Pinatubo 1991 auf den Philippinen wurden Asche und Gase bis in eine Höhe von 24 Kilometern geschleudert. Durch diesen Vulkanausbruch sank für etwa zwei Jahre die globale Durchschnittstemperatur um 0,5 °C.

3.6 Wechselspiel mit der Hydrosphäre

Änderungen der Meeresströmungen haben oft massive Auswirkungen auf das Klimageschehen, wie etwa die Abschwächung des Nordatlantikstroms nach der letzten Eiszeit. Ein weiteres Beispiel, wie sich die verschiedenen Effekte in der komplexen Klimamaschine Erde gegenseitig bedingen und verstärken, ist die Entstehung des antarktischen Zirkumpolarstromes. Durch die Ablösung von Australien und Südamerika war die Antarktis vermutlich vor etwa 30 Millionen Jahren vollständig vom Südpolarmeer umschlossen. Angetrieben von den vorherrschenden Westwinden, entstand darin der Zirkumpolarstrom, der die Antarktis seitdem im Uhrzeigersinn umströmt und den Austausch mit wärmeren Gebieten unterbindet, was auch das große marine Förderband beeinflusst. Die thermische Isolation der Antarktis führte zunächst zur Vereisung des gesamten Kontinents. Die großen Schnee- und Eisflächen reflektierten in der Folge das einfallende Sonnenlicht fast vollständig. Dadurch sank die von der Erde insgesamt aufgenommene Strahlungsenergie, was eine weltweite Abkühlung zur Folge hatte. Diese wiederum zog in Kombination mit dem wachsenden Eispanzer eine Temperaturabnahme im Südpolarmeer nach sich. Da kaltes Wasser aber mehr CO_2 aufnehmen kann als warmes, reduzierte sich der CO_2-Gehalt der Atmosphäre, wodurch die Abkühlung ebenfalls unterstützt wurde.

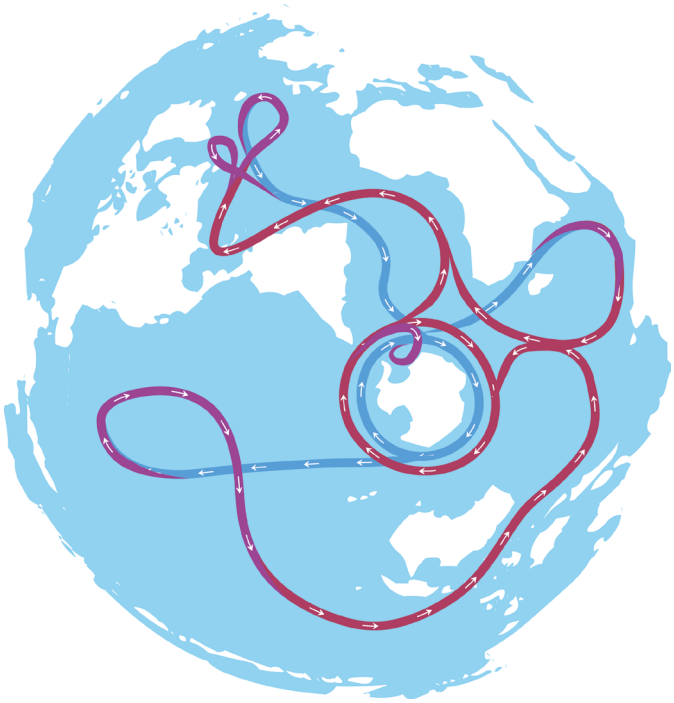


ABBILDUNG 390: Großes marines Förderband mit Fokus auf dem Zirkumpolarstrom - BILD: Avsa

VIDEO 4: Globale Meeresströmungen (8 min)

4 DER MENSCHGEMACHTE KLIMAWANDEL

Um herauszufinden, welchen Einfluss der Mensch auf die Zusammensetzung der Atmosphäre hat, wird in der Messstation Mauna Loa auf dem gleichnamigen Vulkan auf Hawaii seit 1958 der Gehalt des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid in der Luft gemessen. Die Lage der Messstation ist besonders geeignet, da die Luft in der Umgebung kaum durch lokale Einflüsse der Vegetation oder Menschen beeinträchtigt wird. Die Messungen dokumentieren den steigenden CO_2-Gehalt in der Atmosphäre aufgrund der Verbrennung fossiler Kohlenwasserstoffe. Die Messreihe, die nach dem maßgeblich beteiligten Forscher Charles David Keeling benannte Keeling-Kurve, ist die längste kontinuierliche Aufzeichnung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre. Die typischen jahreszeitlichen Schwankungen der Kurve sind auf die großen Waldgürtel der Nordhalbkugel zurückzuführen, die in der Vegetationsperiode viel CO_2 aus der Luft binden. Parallel zum Anstieg der Konzentration treibhauswirksamer Gase ist eine deutliche Erhöhung der globalen Jahresmitteltemperatur zu verzeichnen. Laut Goddard Institute for Space Studies (GISS), einem Institut der NASA, fallen neun der zehn wärmsten Jahre seit Beginn der flächendeckenden Temperaturaufzeichnungen ins 21. Jahrhundert. Seit 1880 ist die globale Jahresmitteltemperatur um 0,85 °C angestiegen. In Österreich hat sich die Jahresmitteltemperatur laut Österreichischen Sachstandsbericht zum Klimawandel 2014 (APCC) bereits um fast 2 °C erhöht; die Hälfte dieser Erwärmung ist seit 1980 eingetreten. Die Veränderungen gehen gemäß APCC überwiegend auf menschliche Aktivitäten, welche die Strahlungsbilanz der Erde beeinflussen, zurück.

VIDEO 6: Klimawandel bis heute (engl. 4 min)
PRÄSENTATION 33: Die globale Mitteltemperatur (11 Folien)

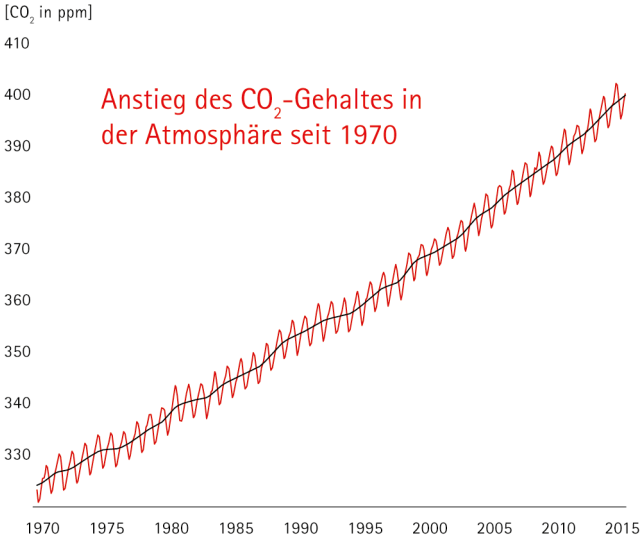


ABBILDUNG 393: Die Keeling-Kurve zeigt auf Basis der Messungen am Mauna Loa den Anstieg des atmosphärischen CO_2-Gehaltes - QUELLE: MLO

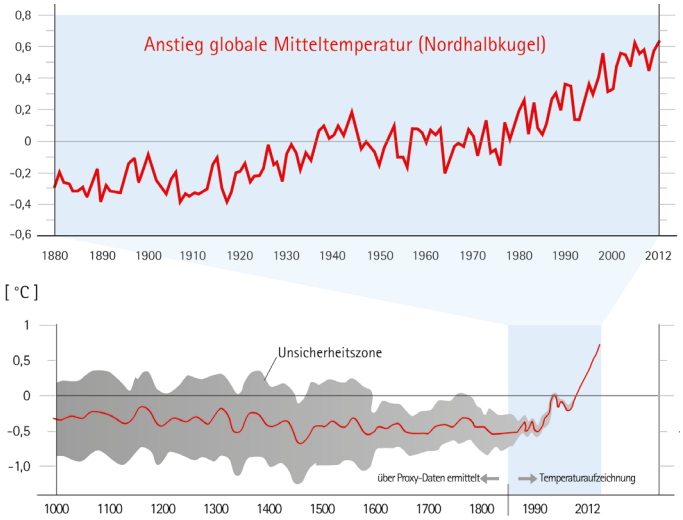


ABBILDUNG 391: Temperaturanstieg relativ zur Mitteltemperatur 1980 bis 1999 (Nullwert) - QUELLE: GISS NASA

4.1 Die Auswirkungen des Klimawandels

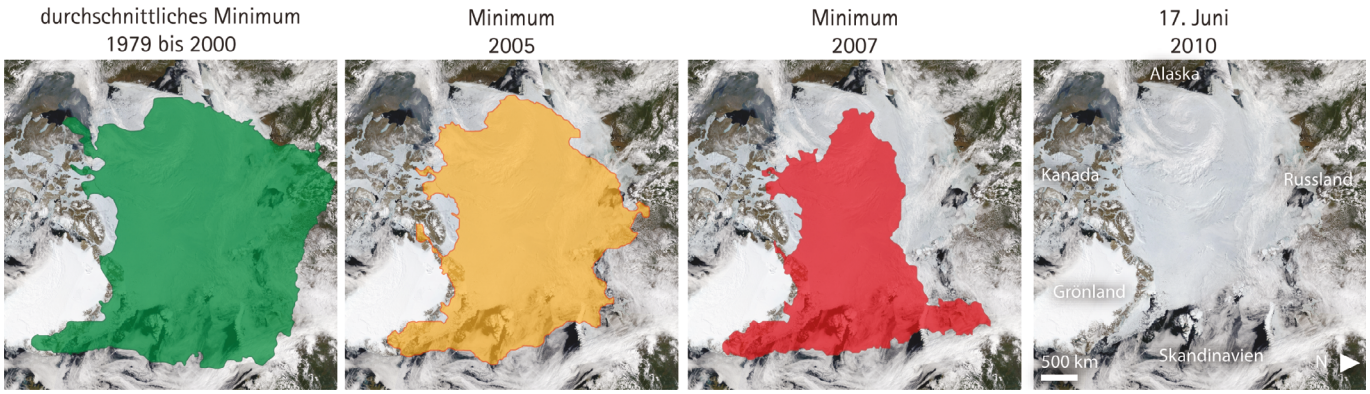


ABBILDUNG 392: Rückgang des arktischen Eises - QUELLE und BILD: NASA

PRÄSENTATION 34: Globale Eisrückgänge (21 Folien)

ABBILDUNG 394: Rückzug der Pasterze, im Sommer 1968 - BILD: Nikater

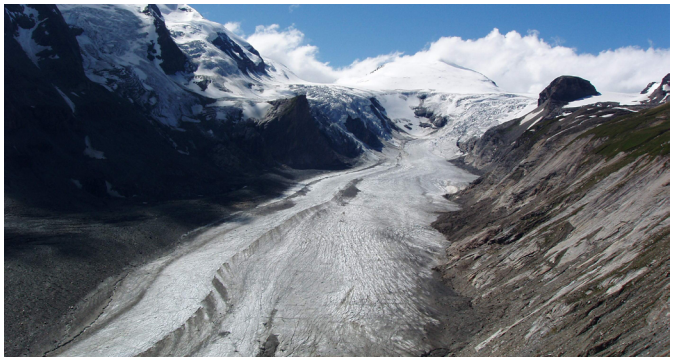


ABBILDUNG 395: Rückzug der Pasterze, im Sommer 2005 - BILD: Otberg

ABBILDUNG 396: Rückzug der Pasterze, im Sommer 2012 - BILD: Manuel Wutte

Seit 1961 zeichnet sich eine deutliche Temperaturzunahme der Ozeane bis in eine Tiefe von 3.000 Metern ab. Es wird vermutet, dass die Ozeane 80 % der zusätzlichen Wärmemenge absorbiert haben. In der arktischen Region ist der Temperaturanstieg besonders stark. Seit 1980 verzeichnet die Arktis einen Rückgang der Eisschilde von fast 10 %, in den Sommermonaten liegt der Rückgang sogar bei über 20 %. Der Meeresspiegel hat sich im 20. Jahrhundert um 17 cm erhöht, Tendenz steigend. Etwa die Hälfte des Anstieges ist auf die thermische Ausdehnung des Meerwassers zurückzuführen, ein Viertel geht auf abschmelzende Gebirgsgletscher zurück, etwa 15 % entfallen auf das Schmelzen der Eisschilde und Polkappen. Die restlichen 10 % wurden durch den Rückgang der Permafrostböden verursacht. In den vergangenen 150 Jahren hat sich das Eis der Alpen halbiert. Durch die globale Erwärmung sind seit 1850 bereits 100 Gletscher verschwunden. Die Pasterze ist mit etwa neun Kilometern

ABBILDUNG 397: Überflutungen in New Orleans 2005 - BILD: US NAVY

Länge der größte Gletscher Österreichs. Seit 1860 hat sie sich um etwa 50 % verkleinert. Der Rückgang von Permafrostböden z. B. in Grönland oder Alaska führt zum vermehrten Abfluss von Wasser: Dadurch sinkt der Grundwasserspiegel, weshalb sowohl arktische als auch sibirische Seen langsam verschwinden. Als Folge werden die hochsensiblen Ökosysteme der subpolaren Seen zerstört. Durch das Abtauen der Permafrostböden werden auch große Mengen von im Boden gebundenem CO_2 und Methan freigesetzt, was den Treibhauseffekt verstärkt.

Durch die Temperaturzunahme kommt es zu einer stärkeren Verdunstung von Wasser und so zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufes und der atmosphärischen Zirkulation. Das führt zur Häufung von Wetterextremen wie tropischen Wirbelstürmen, Starkregen mit Überflutungen und Murenabgängen oder langen Trockenzeiten. Das Jahr 2005 wurde in der Karibik zu einem Rekordjahr für Wirbelstürme, darunter fiel auch der Hurrikan Katrina, der zu den verheerendsten Naturkatastrophen in der Geschichte der USA gezählt wird.

Bei einer Fortsetzung der bisherigen Politik und des „Business as usual" wird die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre weiter steigen und somit die Klimaerwärmung weiter fortschreiten. Aufgrund der Trägheit des Klimasystems würde die Erhöhung der globalen Jahresmitteltemperatur auch bei einer konstant bleibenden oder sogar sinkenden CO_2-Konzentration weiter voranschreiten. Bis sich die Temperatur wieder stabilisiert hätte, würden Jahrhunderte vergehen. Beim Rückgang der Eisschilde und dem damit verbundenen Anstieg des Meeresspiegels zeigt sich diese Trägheit noch intensiver, da sich durch Rückkoppelungen die Albedo von Eisflächen weiter verringert. Es wird erwartet, dass sich der Effekt des Abschmelzens sogar erst nach einigen Jahrtausenden wieder stabilisieren könnte. Deshalb geht man davon aus, dass sich die Folgen der Klimaerwärmung weitaus drastischer abzeichnen werden als bisher geschehen.

Die Menge der zukünftigen CO_2-Emissionen und die Temperaturzunahme hängen von verschiedenen Faktoren ab: von der Entwicklung der Weltbevölkerung, des Lebensstandards und der Weltwirtschaft, von den Auswirkungen auf den Energiebedarf der Menschheit und davon, wie der Energiebedarf gedeckt werden wird. Ein weiterer Faktor ist der technologische Fortschritt und dessen Einfluss auf die anderen genannten Faktoren.

Weiter mit: „2.5.3 Die Erdoberfläche und ihre Auswirkungen" K: 7, S: 233

4.2 Mathematische Klimamodelle als Grundlage der Projektion

Um den Klimawandel zu erforschen, wurde von den Vereinten Nationen der UN-Weltklimarat Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ins Leben gerufen. Er hat sich zur Aufgabe gemacht, alle wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema Klimawandel zu sammeln und zu bewerten. In regelmäßigen Abständen werden die Ergebnisse im UN-Klimareport veröffentlicht, der die maßgebliche Grundlage der UN-Klimakonventionen bildet. Der 5. und bislang letzte Weltklimabericht des IPCC stammt aus den Jahren 2013/14.

5/159 **Weiter mit: „2.1 Die Vereinten Nationen: Agenten des Klimaschutzes" K: 5, S: 159**

Kern der Arbeit des IPCC ist es, Forschungsergebnisse zum Klimawandel zu sammeln, um den Einfluss der menschlichen Einwirkungen darauf abzuschätzen zu können. Von Klimaforschern werden Klimamodelle entwickelt, aufgrund derer eine Projektion erstellt werden kann. Diese Rechenmodelle versuchen, alle relevanten Wechselwirkungen und Rückkoppelungen möglichst genau abzubilden. Dafür werden mathematische Modelle aller relevanten Sphären miteinander verbunden. Die Modelle und deren Richtigkeit werden getestet, indem Daten aus der Vergangenheit eingegeben werden, deren Ergebnisse dann mit den Auswirkungen des Klimawandels übereinstimmen müssen. Die Genauigkeit der Modelle steigt mit der Detailliertheit der Eingabe und ist damit abhängig von der Rechenleistung der beauftragten Computersysteme. Um unterschiedliche Entwicklungsmöglichkeiten zu beschreiben, wurden vom IPCC verschiedene Szenarien entwickelt. Sie werden nach dem 2. UN-Klimareport „Special Report of Emissions Scenarios" oder SRES-Szenarien genannt. Anhand dieser Szenarien wurden die zu erwartenden Treibhausgasemissionen berechnet, die wiederum als Grundlage für die Klima- und Projektionsmodelle herangezogen wurden. Bis 2030 bleiben die Projektionen der unterschiedlichen Szenarien annähernd gleich, erst danach zeichnen sich in den Prognosen die Wirkungen der unterschiedlich verlaufenden Entwicklungen auf die Zusammensetzung der Atmosphäre ab.

23 **TEXT 23: Die Zeit: „Die Klimakrieger" (3 Seiten)**

ABBILDUNG 398: Street-Art in London - BILD: Paul Nine-0

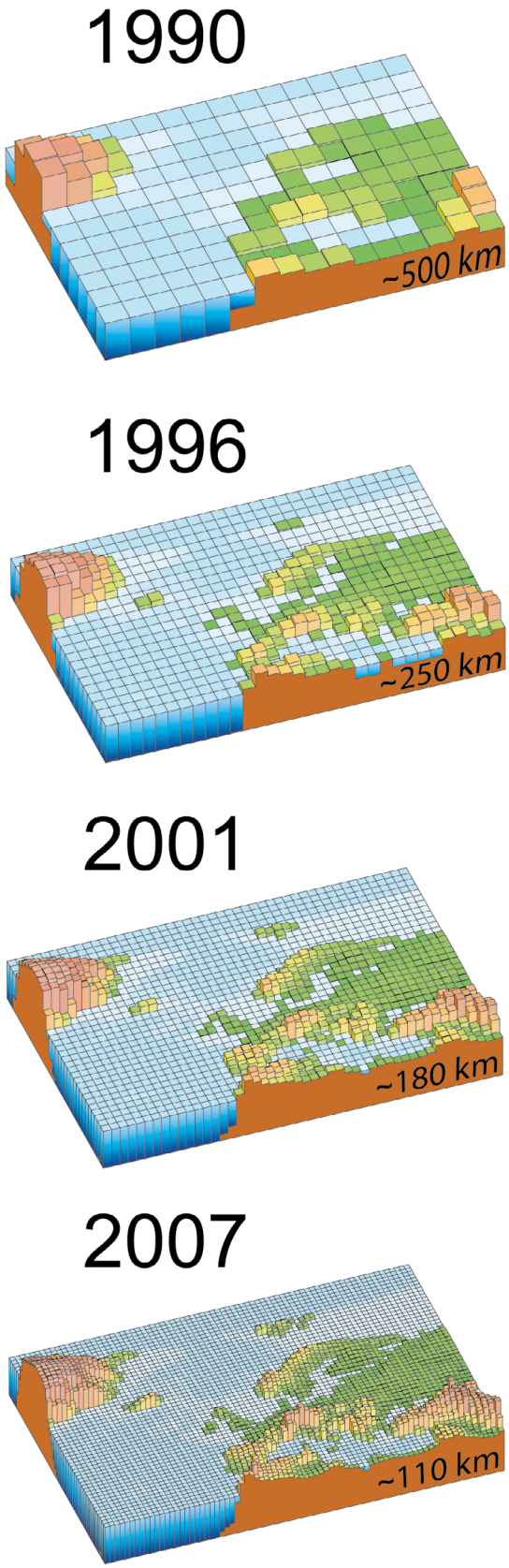


ABBILDUNG 399: Die Raster von Klimamodellen werden immer enger - BILD: IPCC

Die SRES-Szenarien

A1-Szenarien beschreiben eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und einer Weltbevölkerung, die 2050 ihr Maximum erreicht haben wird. Die schnelle Einführung neuer und effizienter Technologien und der Ausgleich der regionalen Unterschiede zwischen Arm und Reich spielen ebenfalls eine Rolle. Die A1-Gruppe wird durch unterschiedliche Energieschwerpunkte differenziert:
A1FI legt den Schwerpunkt auf fossile Energieträger.
A1T legt den Schwerpunkt auf die Nutzung erneuerbarer Energieträger.
A1B beschreibt einen Mix aus A1T und A1FI.
A2 betrachtet die Welt sehr heterogen und betont regionale Unterschiede. Die Weltbevölkerung nimmt dabei kontinuierlich zu, der technische Wandel erfolgt nur langsam.
B1 berechnet die Weltbevölkerung wie bei A1. Der technische Wandel ist noch viel mehr auf saubere und effizientere Technologien ausgelegt, mit nachhaltigen Lösungen im ökonomischen, sozialen und ökologischen Bereich.
Bei B2 wird die Weltbevölkerung wie bei A2 berechnet, auf lokaler Ebene werden Lösungen für ökonomische, soziale und ökologische Probleme gefunden.

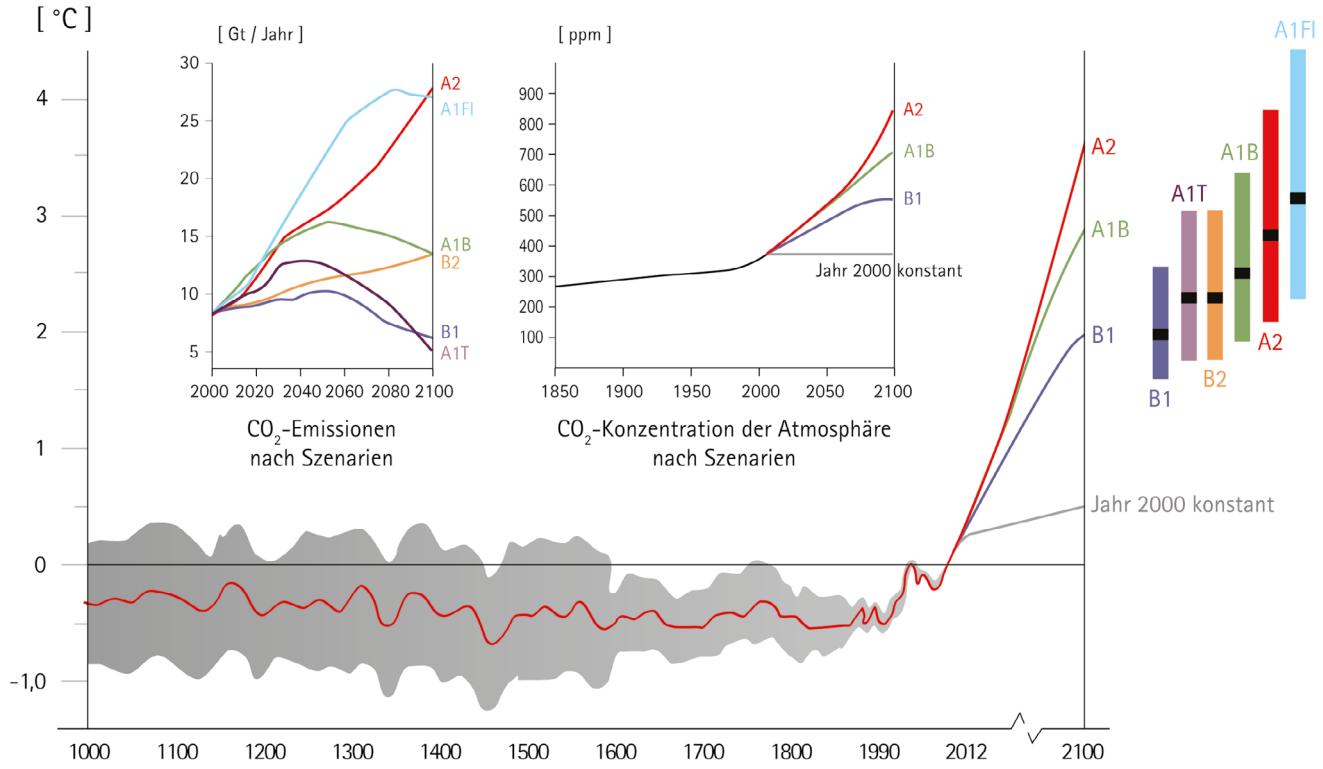


ABBILDUNG 400: Anstieg der Treibhausgaskonzentration und Durchschnittstemperatur relativ zur Mitteltemperatur 1980 bis 1999 (Nullwert)
QUELLE: IPCC, Allianz Umweltstiftung

4.3 Folgen der Klimaerwärmung bis 2100

Künftig ist weltweit ein weiterer Temperaturanstieg zu erwarten. Bis 2100 soll die Temperaturerhöhung bezogen auf den Mittelwert zwischen 1980 und 1999 im globalen Mittel je nach Szenario 1,8 bis 4 °C betragen. Die Wissenschafter sehen in ihren Szenarien keine Möglichkeit, die Erderwärmung auf 1,8 °C zu begrenzen. Um die 1,8-°C-Grenze dennoch einzuhalten, wären fundamentale Änderungen unseres Lebensstils und unserer Energieversorgung notwendig. Führende Klimawissenschaftler des IPCC rechnen mit schwerwiegenden Auswirkungen auf das Ökosystem Erde durch den Klimawandel. Aufgrund der Temperaturzunahme wird mit einer Intensivierung des Wasserkreislaufes gerechnet. Auswirken könnte sich diese Intensivierung durch vermehrte Niederschläge in höheren Breiten und eine Abnahme der Niederschläge in den Tropen und Subtropen. Auch die Dauer und Intensität der Niederschläge könnte stärkeren Schwankungen unterliegen. Daraus könnte folgen, dass Hitzewellen mit Trockenperioden sich mit Starkregen und Überschwemmungen abwechseln. Die weltweite Wasserverteilung würde sich bei 4 °C

PRÄSENTATION 35: Die SRES-Szenarien (11 Folien)

.ppt 35

Erderwärmung drastisch verschieben. Ohnehin trockene Regionen würden noch trockener; besonders dürregefährdet sind das südliche Afrika, der Südwesten der USA und die Mittelmeer-Region. Infolge Trockenheit und starker Niederschläge würden sich in einigen Gebieten Ernteausfälle einstellen, in anderen Gegenden könnte es zu Rekordernten kommen. Die Ackerbaugrenze würde sich weiter in die Richtung der Pole ausbreiten. Bei einer starken Erderwärmung überwiegen die negativen Folgen des Klimawandels für die Landwirtschaft etwaige positive Folgen bei Weitem. Der Anteil der weltweiten Ackerflächen, die hierdurch stark von Dürren bedroht wären, würde von heute 15 % auf etwa 44 % im Jahr 2100 steigen – Hungersnöte drohen drastisch zuzunehmen.

Österreichs Volkswirtschaft wird bis 2050 aufgrund des Klimawandels jährlich Schäden in Höhe von bis zu 8,8 Milliarden Euro zu verkraften haben, besagt eine 2015 präsentierte Studie im Auftrag des Umweltministeriums. Dabei wurden die Szenarien unter der Annahme berechnet, dass die globale Erwärmung bis 2050 die 2 °C-Grenze nicht überschreitet.

Die Erwärmung der Ozeane führt zu einer Vergrößerung des Gebietes, in dem Wirbelstürme entstehen können. Stürme können außerdem in ihrer Intensität und Stärke zunehmen. Im Oktober 2012 überschwemmte Hurrikan Sandy New York und verursachte Schäden von 50 Mrd. US-$. Die Wucht, mit der Sandy zuschlug, wird auf die ungewöhnlich warme Temperatur des Atlantiks zurückgeführt. Haiyan, der stärkste Taifun, der je auf Land traf, hat im November 2013 auf den Philippinen mindestens 5.700 Menschenleben gefordert. Vier Millionen Menschen verloren ihre Bleibe. Auch Haiyan hatte durch warme Meerestemperaturen ideale Bedingungen, um sich zu einem „Super-Taifun" zu entwickeln.

> **!** *Die holländische Hafenstadt Rotterdam liegt im Mittel 2 Meter unter dem Meeresspiegel; sie ist durch Deiche geschützt. Der tiefste Punkt der Stadt liegt dabei fast 7 Meter unter Meeresniveau. Sie wird beständig durch Pumpen entwässert, da der natürliche Grundwasserspiegel sonst oberhalb des Straßenniveaus liegen würde.*

Mit einem weiteren Rückgang der polaren Eiskappen und Gletscher muss gerechnet werden. Nach den SRES ist im ungünstigsten Fall – im Szenario A1FI – ein Anstieg des Meeresspiegels um 26 cm bis 59 cm zu erwarten. Im 5. Weltklimabericht 2013 hat der IPCC seine Warnungen verschärft und geht im schlimmsten Fall sogar von einer Erhöhung des Meeresspiegels um 82 cm bis zum Jahr 2100 aus. Selbst bei einer Stabilisierung der Treibhausgase in der Atmosphäre wird aufgrund der Trägheit des Klimasystems und der Rückkoppelung durch den Albedo-Effekt ein weiteres Abschmelzen des globalen Eises erwartet. Dieser Prozess ist ab einem gewissen Schwellenwert nicht mehr aufzuhalten und unumkehrbar. Alleine das Abschmelzen des Grönlandeises würde einen Anstieg der Meeresspiegel um sieben Meter bewirken; sollten alle Gletscher der Erde schmelzen, würde sich der Meeresspiegel um ganze 70 Meter erhöhen. Für viele küstennahe Regionen der Erde hätte dies katastrophale Folgen.

Der Klimawandel hat auch Auswirkungen auf die großräumigen Umwälzströmungen im Atlantik, zu denen der Golfstrom gehört, der Nordeuropa mit Wärme versorgt. In den vergangenen Jahren ist der Golfstrom aufgrund der höheren Wassertemperatur bereits um ein Drittel schwächer geworden. Der Klimawandel erhöht indirekt das Risiko gewaltsamer Konflikte, weil er deren Auslöser (z. B. Armut, Ressourcenknappheit, ungleiche Verteilung) verstärkt, stellt der IPCC fest. In einer um 4 °C wärmeren Welt würde es zudem mehr Klimaflüchtlinge geben – vor allem aber hätten zahlreiche Menschen nicht mehr (wie beispielsweise noch bei zwei Grad Erwärmung) die Wahl zwischen Anpassung an das veränderte Klima oder einer Flucht aus den nicht mehr bewohnbaren Gebieten.

Bei einer Erwärmung um vier 4 °C ist das Risiko hoch, etliche weltweit einmalige Ökosysteme zu verlieren. Damit würden auch die Dienstleistungen verschwinden, die solche Ökosyste-

ABBILDUNG 401: Rotterdam: mittlere Seehöhe 2 m - BILD: Massimo Catarinella

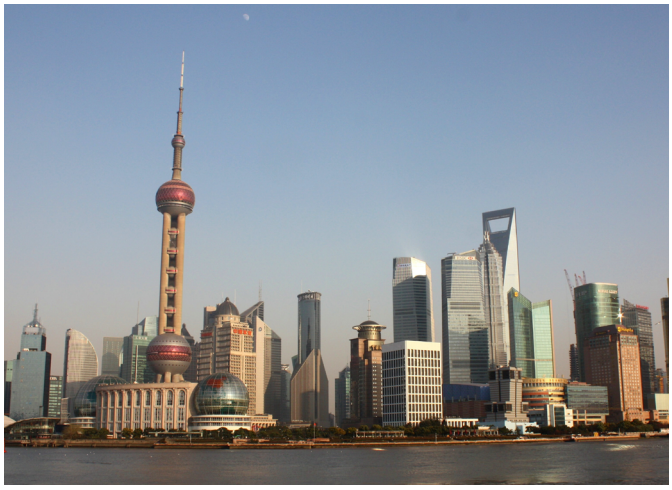


ABBILDUNG 402: Shanghai: mittlere Seehöhe 4 m - BILD: Patrick Fischer

ABBILDUNG 403: Vom Klimawandel betroffen: der Blauwal - BILD: Ansgar Walk

ABBILDUNG 404: Der Lebensraum des Eisbären ist bedroht. - BILD: Pacific Enviroment

me erbringen, z. B. die Bereitstellung von Nahrungsmitteln, von sauberem Wasser und sauberer Luft, aber auch die Nutzbarkeit für den Tourismus. Klimaexperten nehmen an, dass durch den Klimawandel bis zu einem Viertel aller Arten aussterben könnten. Entscheidend dafür ist, in welcher Geschwindigkeit der Klimawandel ablaufen wird, denn die Tiere können sich womöglich nicht rasch genug an die veränderten Bedingungen anpassen. Schäden an einzelnen Gliedern der Nahrungskette können fatale Folgen für das ganze Ökosystem haben. Durch den Klimawandel kommt es zu einer Versauerung der oberflächennahen Wasserschichten der Ozeane, in denen ein Großteil des Planktons lebt. Eine Schädigung dieses Gliedes in der Nahrungskette hätte weitreichende Auswirkungen auf das gesamte Leben im Meer.

Höhere Temperaturen begünstigen die Ausbreitung von Krankheitserregern. Damit wird auch in Europa die Ausbreitung von Krankheiten, wie zum Beispiel Malaria, erwartet, die bislang nur in südlichen Ländern oder tropischen Regionen vorkamen.

PRÄSENTATION 36: Blaualgen und Plankton (6 Folien)

.ppt 36

4.4 Klimaänderungen im Laufe der Erdgeschichte

Genaue und zuverlässige Datenaufzeichnungen zur Klimaveränderung gibt es nur aus den letzten 150 Jahren. Die Zuverlässigkeit sinkt allerdings mit dem Alter der Messergebnisse. Heute sammeln moderne Messgeräte Daten in weltweiten Netzwerken; diese werden durch Computersysteme ausgewertet. Zur Rekonstruktion von Klimaverhältnissen aus der Zeit vor den Aufzeichnungen der Menschen werden natürliche Klimaarchive analysiert und ausgewertet. Klimaarchive können unter anderem Sedimentgesteine oder Fossilienfunde sein. Sie können durch Kernbohrungen an die Oberfläche befördert werden; auch Eisbohrkerne liefern wertvolle Informationen. Die Klimawissenschaften sind ein interdisziplinäres Feld.

Vor mehr als 4 Milliarden Jahren, in der frühen Geschichte der Erde, haben Prozesse der Geosphäre den Aufbau des Planeten geformt. Im Laufe der Zeit verdichteten sich die schweren Elemente im Kern. Um diesen herum sammelten sich die mittelschweren Elemente und bildeten Erdmantel und Erdkruste.

Die leichten und flüchtigen Elemente formierten sich auf der Erdoberfläche, geschützt vom Magnetfeld, einem Phänomen der Geosphäre. Zunächst gab es weder freies Wasser noch Sauerstoff in der Atmosphäre. Erst als der Planet nach und nach abkühlte, konnte das Wasser kondensieren und schied sich aus der Atmosphäre ab. Es fiel als Regen auf die Erde und sammelte sich in Becken. Die frühe Atmosphäre bestand vor allem aus CO_2, Methan und Ammoniak. Durch diese Bedingungen herrschte vermutlich ein Supertreibhausklima mit Temperaturen über 50 °C. Vor etwa 3,8 Milliarden Jahren begann sich erstes Leben auf der Erde zu entwickeln.

! *Die ältesten fossilen Funde, die von Leben zeugen, sind Fossile von Blaualgenbakterien, die 2,7 Milliarden Jahre alten Cyanobakterien. Außerdem wurden Ausscheidungen primitiver Einzeller gefunden, die denen von Blaualgenbakterien ähnlich sind. Diese liegen in Form von mehrschichtigem Sedimentgestein vor und werden Stromatolithen genannt. In Felsen wurden Spuren entdeckt, die auf biologische Prozesse wie Photosynthese hindeuten: Ihr Alter liegt bei 3,9 Milliarden Jahren.*

PRÄSENTATION 37: 4 Milliarden Jahre Klimageschichte (34 Folien)

.ppt 37

4.4.1 Erdaltertum: Die Bildung unserer jetzigen Atmosphäre

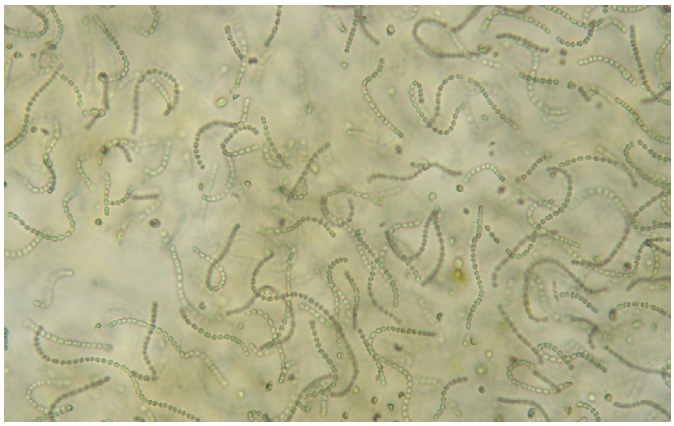


ABBILDUNG 405: Nostoc-Cyanobakterien - BILD: Svickova

ABBILDUNG 406: Tintenstriche fossilierte Blaualgen in den Alpen - BILD: Svickova

Blaualgen sind zur oxygenen Photosynthese fähig; vermutlich haben riesige Blaualgen-Kolonien durch die Einstrahlung der Sonne enorme Mengen an Kohlendioxid aus der Atmosphäre in Form von Biomasse gebunden, die sich in Schichten auf dem Meeresgrund abgelagert hat. Durch diese Prozesse in der Biosphäre kam es zu einer Anreicherung der Atmosphäre mit Sauerstoff, was den Treibhauseffekt eingedämmt und zu einer Abkühlung in der Atmosphäre geführt hat. Vieles deutet darauf hin, dass die Abkühlung auch durch die Bindung von CO_2 durch Verwitterung begünstigt worden sein könnte. Die frühe Hydrosphäre reagierte mit den Gasen aus der Atmosphäre und formte Säuren, durch die es zu starken Verwitterungsprozessen kam. Die Temperaturen sanken so weit, bis sich in vielen Regionen Eis bildete.

Vor etwa 2,5 Milliarden Jahren war das Klima auf der Erde zum ersten Mal kälter als heute. Infolge der Vereisung des Planeten kamen die Effekte der Biosphäre zum Erliegen. Durch den Vulkanismus gelangte fortlaufend CO_2 zurück in die Atmosphäre – die Erde taute wieder auf. Wahrscheinlich gab es vor 2,3 bis 2,5 Milliarden Jahren sowie zwischen 900 und 600 Millionen Jahren zwei weitere große Vereisungsphasen. Durch den Vulkanismus und den damit verbundenen Klimawandel stiegen die Temperaturen jedoch immer wieder, und die Gletscher tauten wieder auf. Der Mensch hat das „normale" Klima unserer Erde nie kennengelernt. Während des größten Teils seiner über 4 Milliarden andauernden Existenz war unser Planet unwirtlich heiß, trocken und völlig eisfrei. Nur sieben Mal brachten Eiszeitalter, die durchschnittlich 50 Millionen Jahre dauerten, niedrigere Temperaturen mit sich. Das Aufkommen der Menschheit fiel in das jüngste dieser Eiszeitalter.

4.4.2 Erdmittelalter: Überwiegend warm

Vor etwa 500 Millionen Jahren, im Erdzeitalter des Kambrium, war es bei einem hohen CO_2-Gehalt in der Atmosphäre deutlich wärmer als heute. Durch die Wechselwirkungen zwischen Kontinentaldrift, Atmosphäre und Hydrosphäre herrschte ein ständig wechselndes Klima. Vor etwa 450 Millionen Jahren kam es dann zu einer Vereisung, die womöglich mit dem Aufkommen der ersten Landpflanzen zu tun hatte.

Die Photosynthese reduzierte den CO_2-Gehalt der Atmosphäre, was zu einem Temperaturrückgang und der Bildung einer dicken Polareisdecke führte. Durch das im Eis gebundene Wasser sank der Meeresspiegel um bis zu 100 Meter.

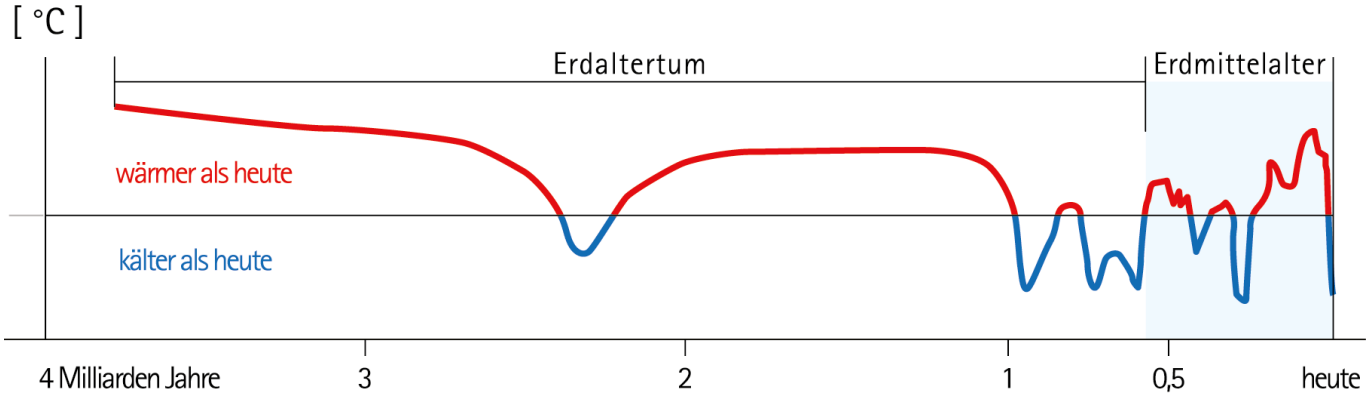


ABBILDUNG 407: Klimawandel in 4 Milliarden Jahren - QUELLE: Allianz Umweltstiftung

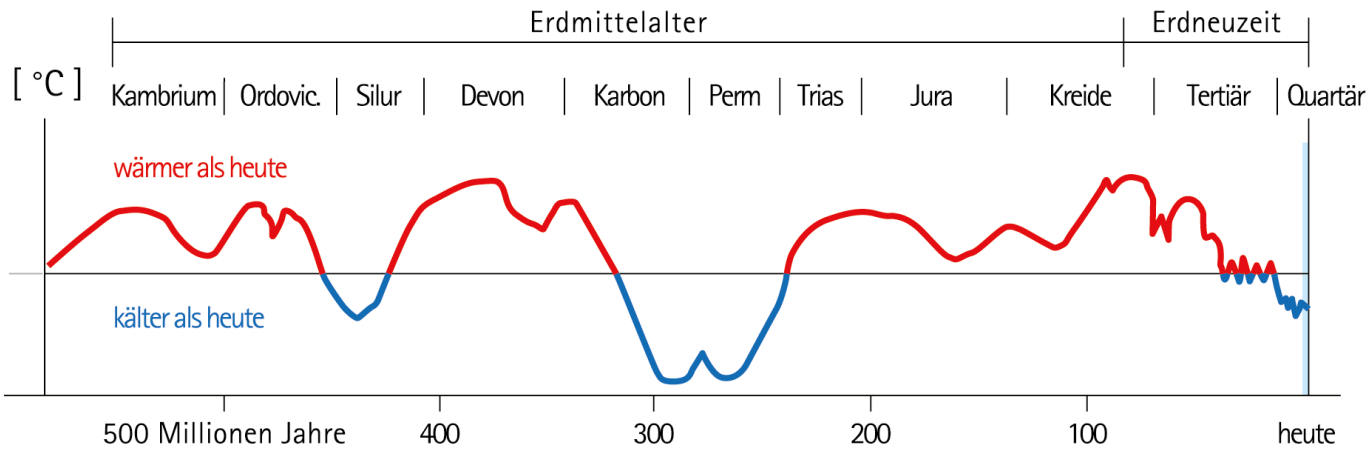


ABBILDUNG 408: Klimawandel in 500 Millionen Jahren; Erdmittelalter - QUELLE: Allianz Umweltstiftung

Durch Vulkanismus erhöhte sich anschließend wieder der CO_2-Gehalt und mit ihm die Temperaturen auf der Erde, bis vor etwa 330 Millionen Jahren, im Karbon, große Landflächen von tropischen Wäldern bedeckt waren. Der Kohlenstoff, den diese Vegetation der Atmosphäre während ihres Wachstums kontinuierlich entzog, wurde nach deren Absterben in großen Steinkohlelagern gebunden. Der CO_2-Gehalt der Atmosphäre sank daraufhin nachhaltig. Diese Phase mit geringem Vulkanismus führte dazu, dass eine länger anhaltende Kältephase von etwa 80 Millionen Jahren eintrat.

Im Verlauf von mehreren Millionen Jahren verschmolzen dann sämtliche Kontinente zu einer einzigen Landmasse, dem Megakontinent Pangaea. Vor etwa 250 Millionen Jahren, im Perm, führte dies zur Ausprägung eines extremen Kontinentalklimas. Der Meeresspiegel stieg und erreichte ein Niveau, das um etwa 80 Meter höher war als heute. Im Schnitt war es damals um 6 bis 8 °C wärmer. Ausgedehnte tropische Wälder, in denen die Dinosaurier herrschten, bedeckten den Riesenkontinent.

Vor 200 Millionen Jahren, im Jura, begann der Urkontinent Pangaea auseinanderzubrechen. Der Atlantik entstand und Meeresströmungen sowie die atmosphärische Zirkulation änderten sich grundlegend. Das extreme Kontinentalklima wurde von einem warmfeuchten, tropischen Klima abgelöst, wobei die Wärmeperiode in der Kreidezeit vor etwa 100 Millionen Jahren ihren Höhepunkt erreichte.

Vor rund 65 Mio. Jahren, in der Kreidezeit, kam es zu einem plötzlichen Klimawandel mit einer deutlichen Abkühlung von Atmosphäre und Ozeanen sowie einem Absinken des Meeresspiegels. Diesem Einschnitt fielen über 70 % aller damaligen Arten, vor allem aber die Dinosaurier, zum Opfer. Über die Ursache dieser Klimakatastrophe sind sich Wissenschaftler uneins. Die gängigsten Erklärungen gehen heute vom Einschlag eines riesigen Meteoriten aus. Durch seinen Aufprall sollen große Mengen Ruß, Asche und Gase in die Atmosphäre gelangt sein, welche die Erde monate- oder sogar jahrelang verdunkelten. Mit diesem Ereignis endete das Erdmittelalter (Mesozoikum).

ABBILDUNG 409: Tyrannosaurus Rex - BILD: David Monniaux

PRÄSENTATION 38: Das Ende der Dinosaurier? (5 Folien)

4.4.3 Die Erdneuzeit: Tendenz abkühlend

Die Erdneuzeit, von 65 Millionen Jahren vor unserer Zeit bis heute, ist nach einer erneuten wärmeren Phase durch einen langfristigen Abkühlungstrend gekennzeichnet. Daher sind die einst eisfreien Pole heute mit Eiskappen bedeckt. Das Eis reichte zwischenzeitlich insbesondere auf der Nordhalbkugel weit nach Süden. Für diese Entwicklung werden verschiedene Faktoren verantwortlich gemacht: vom niedrigeren CO_2-Gehalt der Atmosphäre über Plattentektonik und Vulkanismus bis hin zu Schwankungen der Erdumlaufbahn.

Vor etwa 55 Millionen Jahren, im Tertiär, ereignete sich erneut ein abrupter Klimawechsel. Innerhalb relativ kurzer Zeit kam es zu einer Temperaturerhöhung um 5 bis 6 °C. Als Auslöser werden heute unter anderem die Freisetzung von Methan aus dem Meeresgrund sowie eine erhöhte vulkanische Aktivität diskutiert. Die Hitzewelle hielt nur erdgeschichtlich relativ kurze 200.000 Jahre an. In dieser Zeit herrschten allerdings bis in hohe Breitengrade tropische Temperaturen. In der kanadischen Arktis lebten Alliga-

toren, auf der Halbinsel Kamtschatka wuchsen Palmen und die Wassertemperatur am Nordpol betrug etwa 20 °C.

Eine hohe tektonische Aktivität führte anschließend zu verstärktem Vulkanismus und so herrschte auch danach noch ein relativ warmes Klima. Folge dieser tektonischen Unruhe war allerdings auch die Loslösung und Isolierung der Antarktis vor etwa 35 Millionen Jahren. Der daraufhin einsetzende antarktische Zirkumpolarstrom führte zur Vereisung des Südpols und zu einem weltweiten Temperatursturz.

Vor etwa 25 Millionen Jahren stieg die Temperatur in einer Phase mit sehr starker Tektonik und starkem Vulkanismus noch einmal kurzfristig an. Für die Fortsetzung des Abkühlungstrends in der Zeit danach ist vor allem die langfristig wirkende Silikatverwitterung ausschlaggebend. Die größten Vergletscherungen fanden vermutlich vor 480.000 bis 385.000 Jahren statt. Während ihres Verlaufes waren Nordamerika, Asien und Europa großflächig von bis zu drei Kilometer mächtigen Gletschern bedeckt.

Vor ungefähr 100.000 Jahren begann eine weitere Kaltzeit, die vor etwa 10.000 Jahren wieder endete. Große Teile Europas und Nordamerikas waren damals vergletschert. Da gewaltige Wassermengen im Gletschereis gebunden waren, lag der Meeresspiegel etwa 130 Meter tiefer als heute. Gebiete wie der Ärmelkanal und die Beringstraße waren trockenes Land. Das Klima der vergangenen 100.000 Jahre war regional zum Teil durch sehr schnelle Temperaturwechsel gekennzeichnet. Analysen von Eisbohrkernen in Grönland dokumentieren zahlreiche Temperatursprünge von mehreren Grad Celsius innerhalb von wenigen Jahrzehnte oder sogar von wenigen Jahren. Es wird vermutet, dass dafür in erster Linie Änderungen der Meeresströmungen verantwortlich waren.

Bis vor etwa 2 Millionen Jahren hatten die Kontinente, Gebirge und Ozeane im Wesentlichen ihre heutige Gestalt angenommen, das große marine Förderband war entstanden. Seitdem ist das Klima von zyklisch wiederkehrenden Eiszeiten geprägt. Der rekonstruierte Temperaturverlauf der letzten 400.000 Jahre zeigt einen Wechsel von ausgeprägten Kaltzeiten mit starker Vereisung und wärmeren Phasen.

Augenblicklich befinden wir uns in einer Warmzeit, die nach neueren Berechnungen wahrscheinlich in 30.000 bis 50.000 Jahren wieder in einer Eiszeit enden wird.

4.4.4 Die aktuelle Warmzeit: Das Holozän

Die mittlere Temperatur der Erde beträgt heute etwa 15° C. Vor rund 18.000 Jahren hatte die mittlere Temperatur der Erde mit circa 11 °C einen sehr niedrigen Wert erreicht. Danach begann allmählich der Übergang in die jetzige Warmzeit, das Holozän.

Dieser Übergang wurde vor 12.700 bis 10.500 Jahren abrupt durch einen Kälteeinbruch unterbrochen. Auslöser war, der gängigen Hypothese zufolge, ein Aussetzen oder eine erhebliche Schwächung des Nordatlantikstromes, der Warmwasserheizung Europas. Verursacht wurde diese Unterbrechung vermutlich durch das Abschmelzen der nordamerikanischen Eismassen. Der Zufluss von Süßwasser verringerte dabei Salzgehalt und Dichte des Oberflächenwassers im Nordatlantik und stoppte oder schwächte dadurch den Nordatlantikstrom. Erst nach dem kompletten Abschmelzen des nordamerikanischen Eisschildes setzte diese Zirkulation wieder ein. Auch heute warnen Wissenschaftler vor einem Versiegen des Golfstroms infolge der vom Menschen verursachten Klimaerwärmung aufgrund des Abschmelzens des Arktiseises und des Grönland-Eisschildes.

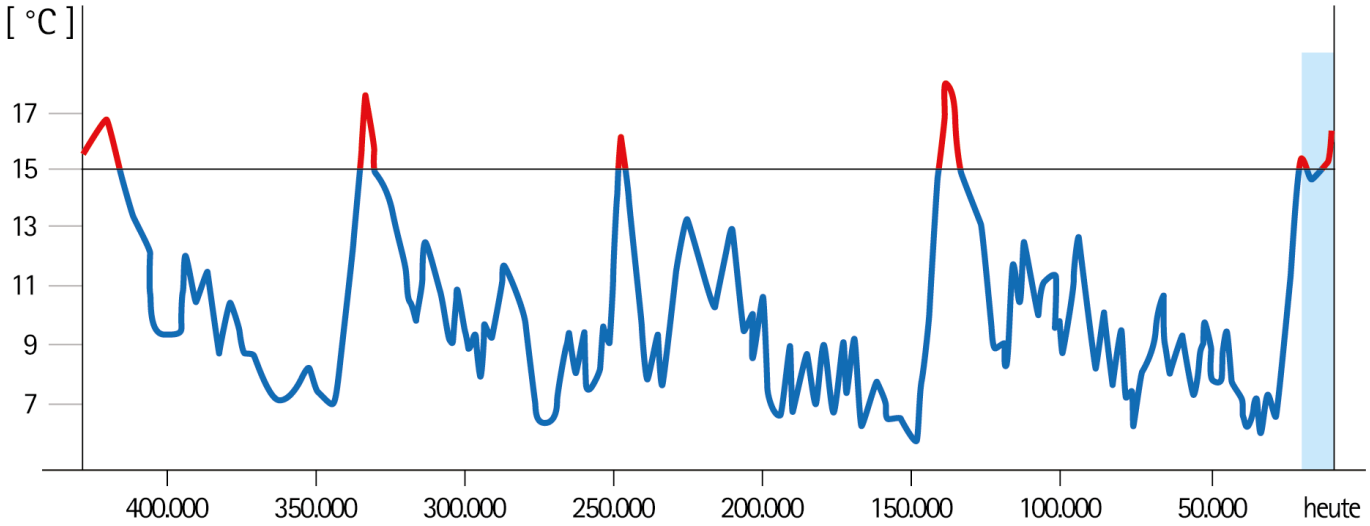


ABBILDUNG 410: Verlauf der mittleren Temperaturen auf der Erde von vor 400.000 Jahren bis heute - QUELLE: Allianz Umweltstiftung

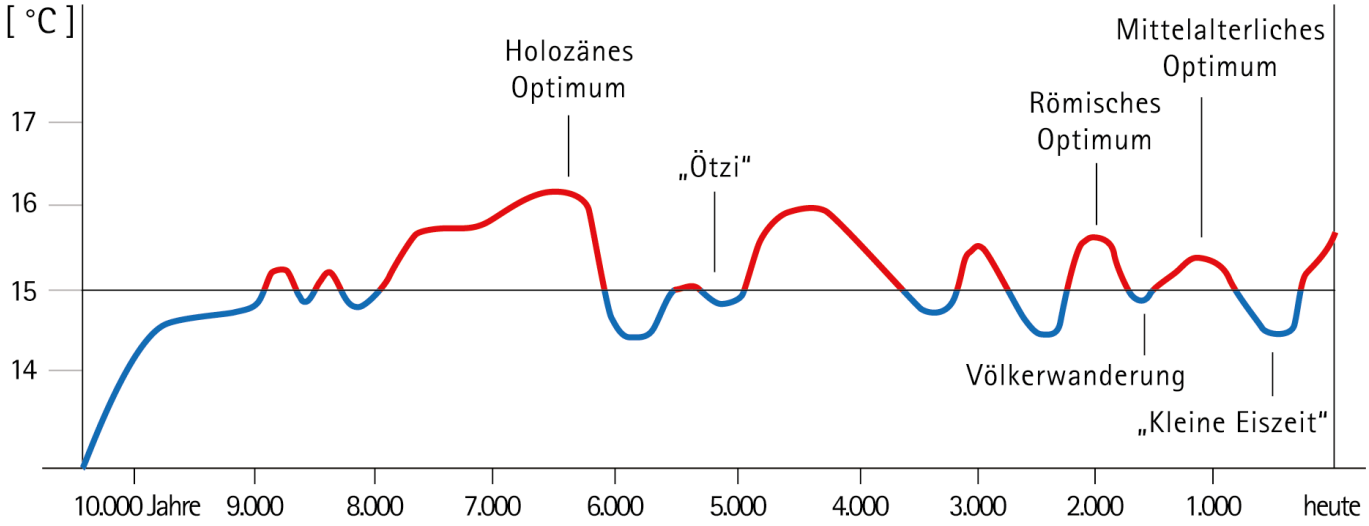


ABBILDUNG 411: Klima- bzw. Temperaturentwicklung vom Ende der letzten Eiszeit bis heute - QUELLE: Allianz Umweltstiftung

4.4.5 Das holozäne Optimum

Mit dem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf Werte, die 2 bis 3 °C über den heutigen lagen, erreichte unsere jetzige Warmzeit vor etwa 8000 bis 6000 Jahren ihren Höhepunkt. Diese bisher wärmste Klimaperiode seit der jüngsten Eiszeit, das holozäne Optimum, brachte weitreichende Verschiebungen der Klima- und Vegetationszonen mit sich. So ließ das feuchtere Klima die Wüstengebiete in Afrika, auf der Arabischen Halbinsel und in Asien schrumpfen. Teile der Sahara wurden zur Savanne. Die Waldgrenze verschob sich um bis zu 400 Kilometer nach Norden. Die Alpen waren nahezu gletscherfrei. Das Abschmelzen von Gletschern der Polarregionen ließ den Meeresspiegel ansteigen, bis er sich mehr als einen Meter über dem heutigen Stand befand. Die ersten Hochkulturen in Mesopotamien und Ägypten sind vermutlich in der Zeit des holozänen Optimums entstanden.

ABBILDUNG 412: Pyramiden von Gizeh - BILD: Ricardo Liberato

ABBILDUNG 413: Sphinx von Gizeh - BILD: Ricardo Liberato

ABBILDUNG 414: Eismumie Ötzi - BILD: Südtiroler Archäologiemuseum

Vor etwa 5500 Jahren setzte zwischenzeitlich eine deutliche Abkühlung ein. Zeugnis für diese Klimaveränderung ist der Gletschermann Ötzi, der 1991 in den Ötztaler Alpen gefunden wurde und zwischen 3350 und 3100 vor unserer Zeitrechnung gelebt haben muss. Der Körper des vermutlich an den Folgen eines Pfeilschusses gestorbenen Mannes blieb nur deshalb vor der Verwesung bewahrt, weil er schon bald nach seinem Tod von Schnee und Eis bedeckt wurde.

PRÄSENTATION 39: Die Tattoos der Eismumie Ötzi (14 Folien)

.ppt 39

Seit dem Ende des holozänen Optimums vor rund 5.000 Jahren lassen sich in Europa und im Raum des Nordatlantiks verschiedene Phasen erkennen, in denen es wärmer oder kälter war als heute. Diese Klimaphasen hatten auch Auswirkungen auf die Geschichte von Völkern und Kulturen. Ende des Jahres 218 v. Chr. zog Hannibal mit 37 afrikanischen Kriegselefanten über die Alpen. Dies war nur möglich, weil die Alpenpässe während des römischen Optimums auch im Winter passierbar blieben.

Durch lang anhaltende Dürre oder Regenperioden verursachte Missernten und der Verlust von Weideflächen brachten wiederholt Wanderungsbewegungen ganzer Völker in Gang. Ein Beispiel ist die Austrocknung der mongolischen Steppe, die Anfang des 4. Jahrhunderts einsetzte und Auslöser für die Eroberungszüge nomadischer Völker war. Der Sturm der Schwarzen Hunnen durch Südrussland in die Donauebene und weiter über Ungarn bis nach Frankreich drängte die germanischen Völker, deren Wanderungen bereits im frühen 2. Jahrhundert eingesetzt hatten, nach Südwesten. Dies führte schließlich zum Untergang des weströmischen Reiches.

Bereits um 875, in der Anfangsphase des mittelalterlichen Optimums, erreichten die Wikinger Grönland, wo sie zwischen 982 und 1500 siedelten. Der Name Grönland bedeutet Grünland. Aus der Zeit des mittelalterlichen Optimums stammen auch viele deutsche und englische Ortsnamen, die auf Weinbau hinweisen, der dort heute längst nicht mehr betrieben wird. In der Kleinen Eiszeit im 16. und 17. Jahrhundert kam es zu einer Abkühlung mit feuchten, kühlen Sommern und langen, schneereichen Wintern. Gemälde holländischer Maler aus dieser Zeit zeigen Eislandschaften mit Schlittschuhläufern. In den Alpen breiteten sich die Gletscher wieder aus. In Mitteleuropa und England gab es wiederholt Missernten und Hungersnöte, was zu Auswanderungswellen in die Neue Welt führte. Während der kleinen Eiszeit war es im Mittel zwischen 1 und 3 °C kälter als heute, während die globale Durchschnittstemperatur in jüngeren Kaltzeiten um 4 bis 6 °C tiefer lag. In Warmzeiten wie dem holozänen Optimum war es im Mittel um etwa 2 bis 3 °C wärmer als heute. Temperaturunterschiede von 3 bis 6 °C im Jahresmittel beeinflussen die Ausprägung des Klimas sehr stark. Damit haben sie enorme Auswirkungen auf Ökosysteme und auf die Entwicklung der Menschheit.

ABBILDUNG 415: Kolosseum Rom - BILD: Diliff

ABBILDUNG 416: Die Kleine Eiszeit in der niederländischen Malerei
BILD: Pieter Bruegel

.ppt 40 **PRÄSENTATION 40: Pieter Bruegel d. Ältere (7 Folien)**

LINK: Typische Argumente der Klimaskeptiker und ihre Wiederlegung mit Fakten http://www.klimafakten.de/

5 QUELLENANGABEN UND LITERATURVERZEICHNIS

Allianz Umweltstiftung, Informationen zum Thema Klimaschutz und Informationen zum Thema Klima.
https://umweltstiftung.allianz.de/downloads/lehrmaterialien/index.html

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009): Ozonschicht und Ozonloch.
http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_48_ozonschicht_ozonloch.pdf

IPCC Fourth Assessment Report (2007): Climate Change.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml

Jürgen Paeger Consulting, Nachhaltigkeit Managementsysteme.
http://www.oekosystem-erde.de/

Murck, B. (2005): Enviromental Science, A Self Teaching Guide. New York: Wiley Verlag.

Ponting, C. (2007): A New Green History of the World - The Environment and the Collapse of Great Civilizations. Überarbeitete Neuauflage des Klassikers von 1991: Eine Umweltgeschichte der Erde. Vintage Books.

Smil, V. (2006): Energy. A Beginner's Guide. Oxford: Oneworld Publications.

USGS, U.S Geological Survey.
http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/baseball.html

Interaktives Lehrmittezentrum

LFI
LÄNDLICHES FORTBILDUNGSINSTITUT

www.biomasseverband.at/BIOEE