

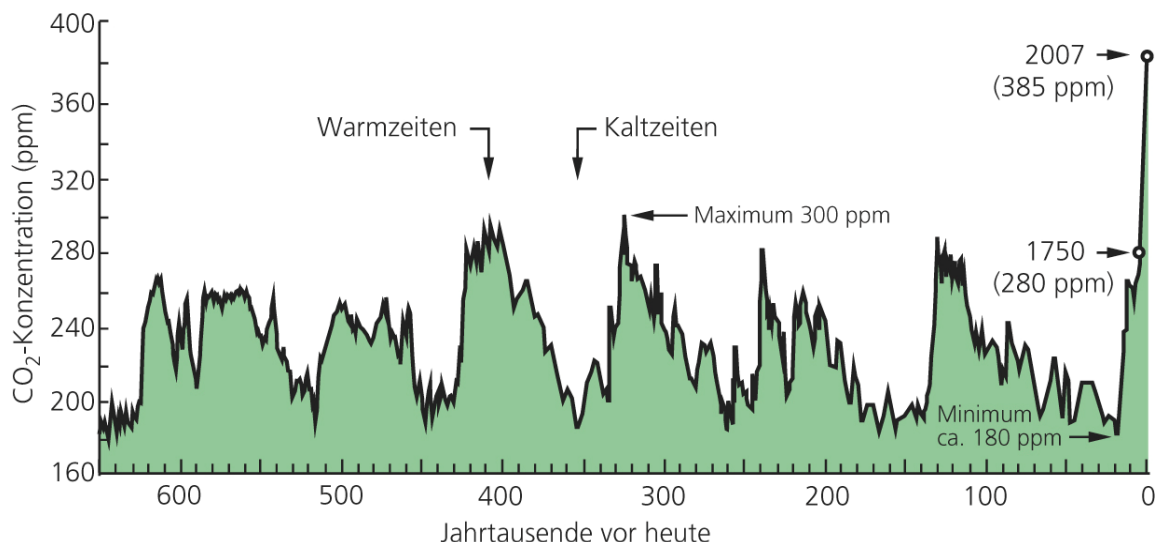
Kurzinformation zur Klimaerwärmung

Erkenntnisse aus dem UN-Klimareport (IPCC 2007) und anderen aktuellen Publikationen

1. Allgemeines

Zusammenhang zwischen Global Change und Klimaerwärmung

- In den letzten 150 Jahren, insbesondere in den letzten Jahrzehnten ist eine deutliche globale **Klimaänderung** festzustellen. Diese ist mitbedingt durch den rasanten Anstieg der Weltbevölkerung (1804: 1 Mrd., 2007: fast 6,8 Mrd.). Global Change steht mit anthropogenen Luftverunreinigungen in Zusammenhang. Problemkreise sind der Abbau des stratosphärischen Ozons („Ozonloch“), die Zunahme des troposphärischen Ozons, die Eutrophierung N-limitierter Ökosysteme, die Versauerung der Atmosphäre sowie die Klimaerwärmung.
- Klimaänderungen sind an sich nichts Besonderes. In den letzten 150 Jahren, insbesondere aber in den letzten Jahrzehnten, ist jedoch eine besonders rasche globale Klimaänderung festzustellen.
- Zwischen 1990 und 2004 stiegen die **Treibhausgas-Emissionen** weltweit um 24 % auf 40 Gt CO₂-Äquivalente an. Für fast 80 % der Treibhausgase sind die Industrieländer verantwortlich (Verbrennung fossiler Brennstoffe, Zementindustrie, Landnutzungsänderungen). Die USA sind vor China die Hauptverursacher der CO₂-Emissionen und damit der Klimaerwärmung.
- Von der Natur wird – durch Atmung der Ozeane, der Vegetation und des Bodens – etwa das 35-fache der anthropogenen CO₂-Emissionen gebildet.
- Die **CO₂-Konzentration** stieg von 280 ppm (1750) auf 379 ppm (2005; +35 %). Sie überstieg in den vorangegangenen 650.000 Jahren und bis etwa 1900 niemals die 300 ppm-Grenze. Würde sich der gesamte Kohlenstoff als CO₂ in der Luft befinden, wäre die Konzentration etwa 10x höher als heute.



Aus: Strasburger, *Lehrbuch der Botanik*, 36. Aufl.
© Spektrum Akademischer Verlag GmbH 2008

Entwicklung der CO₂-Konzentrationen

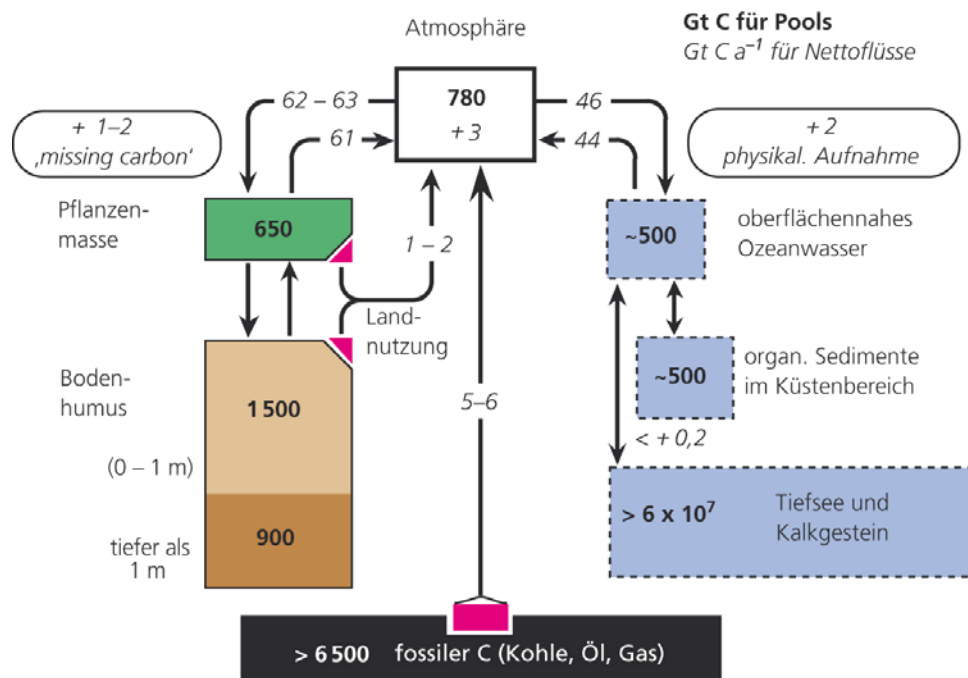
- Die **mittlere globale Temperatur** nahm von 1906 bis 2005 um 0,74 °C zu. Die Arktis erwärmt sich doppelt so schnell wie die Erde insgesamt. In Europa war die letzte Dekade die wärmste seit 500 Jahren.
- Die Dauer der **Schneebedeckung** nimmt ab.
- Der **Meeresspiegel** stieg im 20. Jahrhundert im globalen Mittel um etwa 17 cm und steigt ca. 2 mm pro Jahr. Die Hälfte geht dabei auf thermische Ausdehnung zurück, 25 % entfallen auf das Abschmelzen von Berggletschern und ca. 20% auf den Rückgang der Eisschilde. Während der letzten Eiszeit – vor rund 10.000 Jahren - lag der Meeresspiegel 120 m tiefer.
- Der in den letzten Jahren/Jahrzehnten beobachtete Klimawandel geht mit großer Wahrscheinlichkeit (über 90 %) auf anthropogene Aktivitäten - CO₂-Ausstoß bzw. anthropogen bedingte Treibhausgasemissionen und Landnutzungsänderungen - zurück.

Global Change und Waldökosysteme

- Durch die **Brandrodung** tropischer Regenwälder werden jährlich 15 - 20 Mio. Hektar zerstört (das entspricht fast der doppelten Fläche Österreichs oder fünf Fußballfeldern pro Minute). Man rechnet mit einer Freisetzung von 1,6 ± 1 Gt C pro Jahr. 20 - 25 % der global durch den Menschen verursachten CO₂-Emissionen gehen auf die Rodung und die Nutzholzverbrennung zurück.
- Der Verlust an Waldfläche im Zeitraum 1990-1995 war am höchsten in Brasilien (128.000 km²), gefolgt von Indonesien (54.000 km²), Zaire (37.000 km²), Bolivien (29.000 km²), Venezuela (26.000 km²) und Mexiko (25.000 km²).
- Die Holzeinschläge werden in borealen Wäldern auf ca. 2 - 5 Mio. Hektar p.a. durchgeführt. Durch Blitzeinschlag in den borealen Wäldern brennen jährlich viele 100.000 Hektar ab. Waldbrände In Europa sind in weniger als 10 % auf natürliche Ursachen zurückzuführen.

So haben sich in den letzten 20 Jahren die Waldbrände in den borealen Wäldern des westlichen Nordamerika - parallel zu der beobachteten Erwärmung - in der Region verdoppelt. In den letzten Jahrzehnten brannten in borealen Gebieten rund um die Polargebiete jährlich 5-10 Mio. ha Wald.

- **„Missing sink“ („missing carbon“):** Klimaforscher wussten bis vor einiger Zeit nicht genau, was mit den 7,1 Gt Kohlenstoff geschieht, die der Mensch in Form von CO₂ emittiert. Von den jährlich durch den Menschen emittierten Kohlenstoffmengen (rund 5 - 6 Gt durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, 1 - 2 Gt durch Landnutzung) bleiben etwa 3 Gt in der Atmosphäre und 2 Gt werden von den Ozeanen aufgenommen. Der Verbleib der restlichen Kohlenstoffmengen (in der Größenordnung von 30 % der emittierten Mengen) konnte noch nicht zugeordnet werden. Es wird nun angenommen, dass dieser „missing carbon“ durch den Wald in Europa (N-bedingter Mehrzuwachs) bzw. in Amerika (natürliche Aufforstungen) aufgenommen wird (Anmerkung: Die 7,1 Gt C entsprechen nicht der Angabe in Abbildung auf Seite 3; dort ist von 5 - 6 Gt C durch fossile Brennstoffe die Rede).



Aus: Strasburger, *Lehrbuch der Botanik*, 36. Aufl.
© Spektrum Akademischer Verlag GmbH 2008

Globale Kohlenstoffflüsse (Gt = Milliarden Tonnen)

Treibhausgase und Treibhauseffekt

- Die von der Sonne auf die Erde gelangende kurzwellige Strahlung wärmt die Erde auf und wird von der Erde als längerwellige Wärmestrahlung reflektiert. Diese wird in der Atmosphäre von Treibhausgasen absorbiert, was zu weiterer Erwärmung der Atmosphäre führt. Diese Wärme wird zu einem Teil zur Erde zurück reflektiert.
- Neben der Sonne beeinflussen Vulkane das Klima. Zunehmender Einfluss wird seit dem Beginn der Industrialisierung dem Menschen zugeschrieben.
- Die natürlichen Treibhausgase der Atmosphäre - v.a. Wasserdampf und Kohlendioxid - haben das Leben auf der Erde erst möglich gemacht. Ohne sie läge die mittlere Temperatur bei -18 °C und nicht bei $+15\text{ °C}$.
- Das wichtigste Treibhausgas ist der **Wasserdampf**. Zu den Treibhausgasen zählen ferner **Kohlendioxid** (CO_2), **Methan** (CH_4), **Lachgas** (N_2O), **troposphärisches Ozon** (O_3), **Fluorchlorkohlenwasserstoffe** (FCKW), Schwefelhexafluorid (SF_6) und schließlich Stickstofftrifluorid (NF_3) (direkte Treibhausgase). Indirekte Treibhausgase sind Kohlenmonoxid, Nichtmethankohlenwasserstoffe und NO_x , weil sie zur Bildung des Treibhausgases Ozon beitragen. Ozon zerstörende Gase (FCKW) sind ebenfalls Treibhausgase.
- Meere nehmen einen großen Teil des vom Menschen produzierten CO_2 auf. Eine **Versauerung der Ozeane** durch CO_2 ist bereits signifikant. Diese Versauerung könnte weit reichende Folgen haben (behinderte Kalkbildung von Meeresbewohnern, Gefährdung der Korallenriffe, negative Auswirkungen auf die Nahrungskette).
- Durch die Erwärmung wird die Evaporation gefördert. Durch den Wasserdampf wird die Atmosphäre aufgewärmt, da er ein Treibhausgas ist. Andererseits senkt die - durch Temperaturerhöhung geförderte - Wolkenbildung durch erhöhte Rückstrahlung die Temperatur. Der kühlende Effekt der durch CO_2 gebildeten Wolken dürfte gegenüber dem wärmenden Effekt überwiegen.

Jährliche globale Emissionen und Hauptquellen, angegeben als Gt CO₂-Äquivalente und Hauptquellen.

CO ₂	216 *)	Atmung, Verbrennung fossiler Brennstoffe, Biomasseverbrennung
Methan	3,8	Fossile Brennstoffe, Reisfelder, Wiederkäuer / Tierhaltung, Biomasseverbrennung, Deponien
Lachgas	2,1	Kultivierte Böden, Industrie, Biomasseverbrennung, Meere
Kyoto-F-Gase **)	0,1	Ausschließlich anthropogen

*) Atmung Ozeane 90, Atmung Pflanzen und Boden je 60, Verbrennung 6 Gt p.a.

***) Halogenierte und perfluorierte Kohlenwasserstoffe sowie Schwefelhexafluorid

Richtwerte für anthropogen bedingte Emissionsquellen für Treibhausgase:

- Verbrennung fossiler Energieträger: 50 %
- Chemische Industrie: 20 %
- Abholzung und Brandrodung: 15 %
- Landwirtschaft und andere Bereiche: 15 % (Rinderhaltung, Reisanbau, Mülldeponien, Düngung)
- Die Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid nehmen seit der Industrialisierung exponentiell zu. Die Entwicklung der Temperatur konnte anhand von Eisbohrkernen 650.000 Jahre zurückverfolgt werden: Die in den Luftbläschen der Eisschichten gemessenen Gehalte an CO₂, Methan und Lachgas lassen auf die jeweiligen globalen Temperaturen rückschließen.
- Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration ist auf anthropogene Quellen zurückzuführen. Die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre liegt heute um etwa ein Drittel höher als in den letzten 400.000 Jahren.

Österreich

- In Österreich stieg die Temperatur im 20. Jahrhundert um 1,8 °C. Ein drastischer Anstieg wird v.a. in Westösterreich vorausgesagt. In Ostösterreich könnte die Trockenheit zunehmen.
- Der Alpenraum erwärmt sich derzeit schneller als Europa oder die Welt.

2. (Mögliche) Folgen einer Klimaerwärmung

Globale Folgen

- Die **mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche** für den Zeitraum 2090-2099 gegenüber 1980-1999 wird je nach Szenario zwischen 1,1 und 6,4 °C (anderen Angaben zufolge 1,4 – 5,8 °C) liegen. Eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration wird zu einer Erhöhung um 1,5 °C führen.
Die Tage und Nächte werden wärmer und kalte Tage seltener; heiße Tage und Nächte werden noch wärmer und häufiger. Hitzewellen nehmen zu (2003 war der wärmste Sommer in den letzten 500 Jahre mit +1,4 °C).
- **Schmelzen des Meereises**, der Himalaya-Gletscher (3 Mio. Hektar; → langfristig Gefährdung der Versorgung von mehreren 100 Mio. Menschen) und Abnahme der Albedo (Rückstrahlung) in der Arktis.
Schmelzen des Grönländischen Eisschildes → Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels. Als positiver Effekt könnte eine bessere Zugänglichkeit zu Ressourcen (Öl, Diamanten, Mineralien) angesehen werden.

- Der **Meeresspiegel** wird 2090 – 2099 gegenüber dem Zeitraum 1980 - 1999 je nach Szenario im globalen Mittel 18 cm bis 59 cm (anderen Angaben zufolge um 50 cm - 120 cm) ansteigen, bei einem langfristig zu befürchteten Abschmelzen des Grönlandeises sogar bis 7 m. Würde das gesamte Eis der Erde schmelzen, würde der Meeresspiegel um 80 m steigen.
- **Störung der ozeanischen Zirkulation** im Nordatlantik, Verstärkung des El Niño-Phänomens, Störung des indischen Monsunregimes., Zunahme von Flutkatastrophen.
- **Austrocknung und Kollaps des Amazonas-Regenwaldes** (15 Mio. km² = mehr als 1/3 der globalen Waldfläche), Kollaps der borealen Wälder. Erhöhte Anfälligkeit gegenüber Krankheiten und Parasiten bei verstärkter Trockenheit.
- **Auftauen von Permafrostböden** und damit Freisetzung von Methan aus Meeresböden und Freisetzung von Methan und Kohlendioxid.
- Der **Forstsektor** produzierte 2004 global 17 % der Treibhausgase. Zwischen 1855 und 1920 waren *alle* Wälder der Erde eine Netto-Kohlenstoffquelle. Das tropische Amerika und Südasien sind bis heute besonders starke Kohlenstoffquellen: Im Zuge der Entwaldung entstehen jährlich 6 Gt CO₂-Äquivalente, 3,3 Gt werden durch Aufforstung gebunden. 2000 – 2005 wurde eine Fläche, die jener von Irland entspricht, entwaldet. Die Wälder der USA und Europas waren jedoch in jüngerer Zeit Kohlenstoffsinken.

Rückkopplungseffekte: Die positive Rückkopplung überwiegt

Positive Rückkopplungseffekte (Anheizen)	Negative Rückkopplungseffekte (Abkühlung)
Erhöhung der Aktivität der Mikroorganismen → Zunahme der CO ₂ -Bildung.	Erhöhte CO ₂ -Gehalte der Luft können für die Vegetation förderlich sein.
Erwärmung der Ozeane → verringerte Absorptionsfähigkeit der Ozeane. Eine Verlangsamung der Ozeanzirkulation verringert die biologische Produktivität, da Nährstoffe in geringerem Maße an die Oberfläche transportiert werden → Verringerung der CO ₂ -Absorption.	Die Ansäuerung der Ozean-Oberflächen durch CO ₂ führt zu einer Verringerung der Kalkproduktion z.B. durch Korallen. Beim Wachstum derselben wird Kalk aus Hydrogencarbonat und Ca gebildet und das dabei entstandene CO ₂ an das Meerwasser abgegeben; die Verkalkung reduziert sodann die Aufnahmekapazität der Ozeane für CO ₂ . Ein Rückgang der Korallenpopulation und mit ihr der Kalkeinlagerung würde die CO ₂ -Aufnahmekapazität der Ozeane geringfügig steigern.
CO ₂ kann als Kalk in tiefere Meeresschichten transportiert werden, das an abgestorbene Meerestiere angelagert wird. Dieser „Pumpeneffekt“ für CO ₂ macht eine höhere CO ₂ -Absorption an der Oberfläche möglich. Eine Versauerung der Meeresoberfläche hemmt diesen Prozess.	Die Gesteinsverwitterung wird durch höhere Temperaturen und verstärkten Niederschlag gefördert. Das CO ₂ der Luft bildet Kohlensäure und unterstützt den Verwitterungsprozess. Gesteigerte Verwitterung unterstützt somit die Entfernung von CO ₂ aus der Atmosphäre.

Weitere Folgen sind ein Rückgang der Nahrungsmittelproduktion, Aussterben von Pflanzenarten, eine Zunahme von Sturmkatastrophen, eine Verknappung von Süßwasserreserven und umweltbedingte Migration, Verteilungskonflikte. Die Hauptbetroffenen werden nicht die Hauptverursacher sein.

Folgen für Europa

- **Temperatur:** Regional und jahreszeitlich unterschiedliche Auswirkungen sind die Abnahme der Anzahl von Frosttagen, die Zunahme der heißen Tage und der Tropennächte (Temperatur über 20 °C), längere Vegetationsperioden, längere Trockenperioden sowie geringere Niederschläge im Sommer. Ferner sind Zunahmen von Wetterextremen (häufigere Starkniederschläge und Stürme) zu erwarten. Standorte mit geringer Wasserverfügbarkeit sind besonders gefährdet.
- **Niederschläge:** Stärkere Regenfälle sind für Nordeuropa wahrscheinlich (zusätzliche Regenfälle im Winter), häufigere Trockenperioden im Mittelmeerraum.
- **Wald:** Höhere Ertragspotenziale sind durch längere Vegetationsperioden, höhere Risiken resultieren aus Wasserknappheit, Schädlingsbefall, Brandgefahr und Windwurf.

Relative Treibhauspotenziale (bezogen auf CO₂ = 1), Beiträge zur globalen Erwärmung und jährliche Anstiege der globalen Konzentrationen (nach Möller 2003 und IPCC 2007).

Gas	Mittlere Verweilzeit (Jahre)	Relatives Treibhauspotenzial *)	Beitrag zur globalen Erwärmung			
			Erhöhung der Temperatur (°C)	1850-1990	Möller (2003)	Anstieg pro Jahr 1998 (IPCC 2007)
Wasserdampf			20,6	-	66 %	
CO ₂	50 - 200	1	7,2	56 %	20 %	1,5 ppm
CH ₄	10 - 12	10 – 32	0,8	12 %	2,5 %	7 ppb
FCKW12 (CF ₂ Cl ₂)	130	3.700 – 18.000	0,6	19 %		-
FCKW 11 (CFCI ₃)	65	1.300 – 8.600				-1,4 ppt-
Troposphär. Ozon	0,1	2.000	2,4	10 %	7 %	
N ₂ O	130 - 150	180 – 240 / 310	1,6	3 %	0,8 %	0,8ppb
H ₂ O (stratosphärisch)						
Schwefelhexafluorid (SF ₆)		23.900				
andere				-	2 - 7 %	

*) Das Treibhauspotenzial eines Treibhausgases wird in Relation zum CO₂ angegeben (CO₂ = 1).

3. Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf Pflanzen

- Ein erhöhtes CO₂-Angebot führt temporär zu einer **Erhöhung der Photosyntheserate** („Akklimatisation“). Im Durchschnitt beträgt die Steigerung der Produktivität in der Landwirtschaft bei einer Verdopplung des CO₂-Angebotes 34 %. Dabei sinkt allerdings die Qualität der Produkte. Erhöht sich der CO₂-Partialdruck außerhalb des Blattes, kann entweder bei gleicher Spaltöffnungsweite mehr CO₂ in das Innere transportiert werden oder die Spaltöffnungsweite kann verringert und Wasserdampfverlust reduziert werden.

Die physiologischen Reaktionen treten vor allem bei einer plötzlichen Erhöhung des CO₂-Gehaltes der Luft auf. Ein allmählicher Anstieg kann in den meisten Fällen zu einer Anpassung führen. Die Nettoprimärproduktion (= Photosyntheseleistung abzüglich der pflanzeneigenen Atmung) wird bei einer schnellen Erhöhung der CO₂-Konzentration nur kurzfristig erhöht. Eine erhöhte Produktivität einer bestimmten Pflanzenart ist nicht gleichbedeutend mit einer erhöhten Produktivität des Gesamtökosystems, da andere Organismen (konkurrierende Pflanzen, Schädlinge) gleichfalls ihre Produktivität erhöhen und so in negativer Weise auf die primär betrachtete Pflanze einwirken können.

- Bei einer Verdoppelung des CO₂-Angebotes werden lediglich die Umsätze von Kohlenstoff steigen, nicht jedoch die Festlegung von Kohlenstoff in Biomasse.
- Eine Erhöhung der CO₂-Konzentration bedeutet für die Vegetation zunächst eine Verbesserung der Versorgung mit dem Nährelement Kohlenstoff. Es genügen dann eine geringere Enzym-Ausstattung, geringere Bodenfeuchte und weniger Licht, um die gleiche Photosyntheseleistung zu erreichen. Weiters wird die Wassernutzungskapazität (= das Verhältnis der Menge fixierten Kohlenstoffs pro Menge transpirierten Wasserdampfs), die Wuchseistung, der Ertrag bzw. die Biomasseproduktion verbessert. Auch die Stickstoffnutzungseffizienz (= produzierte Biomasse pro Menge aufgenommenen Stickstoffs) wird bei C₃-Pflanzen erhöht. Der Blattbedarf an Phosphor steigt unter erhöhtem CO₂ an. Eine Wachstumsstimulierung durch CO₂ ist nur möglich, wenn **Nährstoffe** - vor allem Stickstoff und Phosphor - in entsprechendem Ausmaß zur Verfügung stehen.
- Das Pflanzenwachstum unter einem erhöhten CO₂-Level hängt von einer Reihe von internen Faktoren (CO₂-Fixierungstyp) und externen Faktoren (Umgebungsbedingungen) sowie von der Pflanzenart ab. Die bisher veröffentlichten über 3000 wissenschaftlichen Arbeiten kommen daher zu sehr unterschiedlichen Aussagen.
- Global gesehen ist in der **Holzproduktion bei einer Klimaänderung** kurz- und mittelfristig ein mäßiger Anstieg der wirtschaftlichen Ertragsfähigkeit – mit großen regionalen Schwankungen bezüglich des globalen Trends – zu verzeichnen.

4. Anmerkungen zu Gegenmaßnahmen

- Das Klimasystem ist extrem komplex. Es reagiert nur sehr langsam auf Emissionsminderungen von Treibhausgasen. Eine erste Minderung einer Temperaturerhöhung ist frühestens 20 Jahre nach einschneidenden Maßnahmen zu erwarten.
- Ökosysteme und die menschliche Gesellschaft sind mit der Anpassung an die Wirkungen einer möglichen Temperaturerhöhung vielfach überfordert.
- Drastische Klimaänderungen könnten verhindert werden, wenn es gelingt, den Temperaturanstieg um 2 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen (das entspräche einem weiteren Anstieg von 1,2 °C). Dazu müsste die CO₂-Äquivalentkonzentration auf 400 ppm stabilisiert werden. Das bedeutet, dass die aktuellen Treibhausgas-Emissionen global um 60 % reduziert werden müssen.
- Die im **Kyoto-Protokoll** für die erste Vertragsperiode vereinbarten Reduktionen sind zu gering, um einen spürbaren Einfluss auf den Klimawandel zu haben.
- Trotz der bestehenden Unsicherheiten müssen jetzt Maßnahmen zum Schutz des Klimas getroffen werden. Durch Emissionsminderungen kann das Tempo des Klimawandels gebremst und die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von abrupten Änderungen gemindert werden. Weiters sind Anpassungsmaßnahmen notwendig.
- Ein hohes CO₂-Reduktionspotenzial wird in der Erhaltung und in der Aufforstung der Wälder und in naturnaher Landwirtschaft gesehen.
- Peak Oil, das Ende des billigen Öls, löst das Klimaproblem nicht.

Österreich

- Gemäß Kyoto-Protokoll muss Österreich seine Treibhausgasemissionen 2008 - 2012 um mindestens 13 % gegenüber 1990 reduzieren, demnach 79 Mio. Tonnen (1990) minus 13 %. Jede überschüssige Tonne CO₂ bzw. CO₂-Äquivalent kostet 100 € Strafe; derzeit (2006) ist Österreich 22,3 Mio. Tonnen von seinem Ziel entfernt, was einer Strafzahlung von 2,23 Mrd. € entspricht (rund 300 € pro Österreicher).
- Kohlendioxid hat einen Anteil von 84,4 % an den gesamten Treibhausgasemissionen.
- 1990 – 2004 stiegen die CO₂-Emissionen um 24,5 % v.a. durch den Einsatz fossiler Brennstoffe.
- Zwischen 1990 und 2004 wurden die Emissionen von Methan um 19,2 %, von Lachgas um 15,4 % und von den F-Gasen um 4 % gesenkt.

(Mögliche) Konsequenzen für die Vegetation in Österreich

- Verschiebung der Vegetationszonen und Vordringen von Baumarten in größere Seehöhen.
- Rückgang der Fichte in sekundären Fichtengebieten (außerhalb der natürlichen Verbreitung).
- Erhöhung des Stresses durch Schädlingsbefall (Zunahme der Generationszyklen etwa der Borkenkäfer).

Konsequenzen für die Technologien

- Effizienzsteigerungen bei der Energienutzung und –versorgung.
- Brennstoffwechsel: Einsatz erneuerbarer Energien (bedingt) und Erdgas statt Kohle und Öl.

5. Die Rolle des Waldes beim Klimaschutz

Globale Aspekte

- 99,8 % der **Biomasse** stehen auf dem Festland, 90 % davon entfallen auf Wälder, der Rest auf Gras- und Strauchvegetation und nur 0,8 % auf die landwirtschaftlichen Kulturen. In den Ozeanen befinden sich nur 0,2 % der globalen Biomasse.
- Der **Wald ist der größte C-Speicher**, wobei der Waldboden mehr als die oberirdische Biomasse speichert. In den gemäßigten Zonen wird etwa zweimal soviel, in borealen Wäldern bis über fünfmal soviel wie in der pflanzlichen Biomasse gespeichert.
- **Senken** sind die Atmosphäre ($3,2 \pm 0,1$ Gt C p.a.), Ozeane ($1,7 \pm 0,5$ Gt C p.a.), die tropische Vegetation ($1,9 \pm 1,2$ Gt C p.a.) und die Vegetation der gemäßigten und borealen Zone, vor allem Wälder ($1,3 \pm 0,9$ Gt C p.a.).
- Der Wald kann sich nur langsam an Klimaänderungen anpassen.
- Der Wald kann das Klima nicht regulieren (die mitteleuropäische Forstwirtschaft spielt eine Nebenrolle) und Lebewesen können die CO₂-Produktion fossiler Brennstoffe nicht ausgleichen.
- Der Wald ist generell eine Senke für Treibhausgase (CO₂-Fixierung, mikrobielle Methanoxidation), wenn die CO₂-Aufnahme größer ist als die bei der Atmung produzierten CO₂- und VOC-Menge. Tagsüber und im Sommer sind Waldbestände

grundsätzlich eine Senke, nachts und im Winter eine Quelle für CO₂. Temperatur und Stickstoffeinträge haben einen großen Einfluss auf die Senkenfunktion des Waldes in Europa.

- In einem Fichtenbestand werden 30 % des assimilierten C durch die Nadeln veratmet, 20 % werden vom Stamm veratmet. Die Bodenatmung beträgt rund 50 % des C-Gewinnes, davon 50 % Wurzelatmung und 50 % mikrobielle Atmung.
- Ab 2050 wird der Wald eine C-Quelle sein.
- Die Primärproduktivität nimmt mit der Diversität der Pflanzenspezies zu. Ein Verlust von 50 % Pflanzenspezies entspricht einem Produktivitätsverlust von 20 %.

Reaktionsketten im Rahmen des Global Change

CO₂-Anstieg

- Erhöhung der Nettoprimärproduktion (NPP) → erhöhter Stickstoffbedarf → verringerte Stickstoffverfügbarkeit → verringerte NPP
- Verstärkte Allokation von Kohlenstoff in den Wurzeln und Mykorrhizen → verstärkte Bodenatmung
- Erhöhung der Photosyntheserate auf der Blattebene; Verminderung der Photosyntheserate auf der Bestandesebene aufgrund verstärkter Respiration durch den höheren Blattflächenindex

Anstieg des Stickstoffeintrages

- Erhöhte NPP

Anstieg der Temperatur

- Erhöhung der NPP → erhöhter Stickstoffbedarf → verringerte Stickstoffverfügbarkeit → verringerte NPP
- Verstärkte Bodenatmung → verringerter Bodenkohlenstoff → verringerte Bodenatmung
- Verstärkte Stickstoffmineralisierung → Erhöhung der NPP → erhöhter Stickstoffbedarf → verringerte Stickstoffverfügbarkeit → verringerte NPP

Rückkoppelungseffekte

Positive Rückkopplungseffekte (Anheizen)	Negative Rückkopplungseffekte (Abkühlung)
Zuwachseinbußen durch Wetterextreme und ihre Folgen (Trockenschäden, Windwurf, Waldbrände, Veratmung von Bodenkohlenstoff im Zuge einer Bodenerwärmung sowie Lachgasemissionen und eine verminderte Methansenkenstärke aufgrund hoher Stickstoffeinträge.	Mögliche Waldzuwächse an der Baumgrenze, wachstumssteigernde Effekte durch „CO ₂ -Düngung“ und vermehrte Stickstoffeinträge
Änderungen der Waldfläche (sie haben eine geringe Rückstrahlung, → Anheizen)	
Änderungen der Eisfläche (hohe Rückstrahlung → Abkühlung) wirken sich auf die Temperaturverhältnisse und den Wasserkreislauf aus.	

Die Rolle des österreichischen Waldes

- Zur Kompensation der in Österreich frei werdenden CO₂-Mengen müssten jährlich 1600 km² (ca. 1/3 der Fläche von Vorarlberg) mit reifem Wald besetzt werden. Insgesamt dürften jedoch nur 5000 ha zur Verfügung stehen.
- Einem Nutzholzeinschlag von 12 Mio. fm (2,3 Mio. Tonnen C; 1 fm = 1 Festmeter = 1 Kubikmeter) entsprechen 1/7 des jährlichen Energiebedarfes (Stand 1992). Der Nutzholzeinschlag nimmt zu, 2006 betrug er 19,130.000 fm.
- Der österreichische Wald war 1961 - 1996 eine Netto-C-Senke (er nahm im Zuge der Photosynthese mehr CO₂-C auf als er bei der Atmung abgab; die mittlere jährliche Netto-C-Bindung betrug 2,527 Mio. Tonnen C (9,267 Mio. Tonnen CO₂). In diesem Zeitraum entspricht die Netto-C-Bindung etwa 14 % der gesamten österreichischen Brutto-CO₂-Äquivalentemissionen der Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O.
- Die standörtlichen Rahmenbedingungen bei der Baumartenwahl sind angesichts des Klimawandels - insbesondere auf ökologisch sensiblen Standorten - verstärkt zu beachten, um das Betriebsrisiko zu senken. Zum Beispiel ist die Fichte besonders an der unteren Waldgrenze – im sommerwarmen Osten – durch eine Klimaerwärmung gefährdet.

Literatur

Bresinsky A., Körner C., Kadereit J.W., Neuhaus G., Sonnewald U. 2008: Strasburger Lehrbuch der Botanik. 36. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change = Zwischenstaatlicher Ausschuss zum Klimawandel) Climate Change. Fourth Assessment Report. Genf 2007. <http://www.forestry.gov.uk/climatechange>

Hyvönen et al. 2007: The likely impact of elevated CO₂, N deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. New Phytologist 173, 463ff.

Kromp-Kolb H., Formayer H. 2005: Schwarzbuch Klimawandel. Ecowin Salzburg.

Mann M.E., Kump L.R. 2008: Dire predictions. Understanding global warming. The illustrated guide to the findings of the IPCC. DK London, N.Y.

Möller D. 2003: Luft. De Gruyter Berlin, New York.

Müller M., Fuentes U., Kohl H. (Hrsg.) 2007: Der UN-Weltklimareport. Bericht über eine aufhaltsame Katastrophe. Kiepenheuer und Witsch Köln.

Schulze E.D. 2006: Biological of the terrestrial carbon sink. Biogeosciences 3, 147-166.

Zusammenstellung: Stefan Smidt, BFW Wien. stefan.smidt@bfw.gv.at

Masseeinheiten	
Gt =	Gigatonnen = Milliarden Tonnen
Konzentrationseinheiten	
ppb	parts per billion (Teile auf eine Milliarde Teile)
ppm	parts per million (Teile auf eine Million Teile)