

## 10 Überblick und Ausblick

### Überblick:

In der vorliegenden Arbeit habe ich Resultate des globalen Klimasystem-Modells CLIMBER-2.1 für das Holozän analysiert und in verschiedener Hinsicht auf ihre Belastbarkeit hin überprüft.

Die Darstellung der Resultate gliedert sich in vier Teile: Diskussion der Simulationsergebnisse (siehe Kap. 5 / 6) und Überprüfung ihrer Belastbarkeit bei Änderungen der Versuchsdurchführung (siehe Kap. 7), Analyse der Prozesse an der Landoberfläche (siehe Kap. 8) und Untersuchung ihrer Belastbarkeit im Hinblick auf Änderungen der Parameterisierung dieser Prozesse (siehe Kap. 9). Jeweils am Ende dieses Kapitels habe ich eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse gegeben.

Der Aufbau des globalen Klimasystem-Modells CLIMBER gestattete erstmalig eine konsistente Abschätzung des Einflusses von einzelnen Klima-Untersystemen und von Synergieeffekten bei Klimaänderungen, in dem es Simulationen unterschiedlicher Modellkonfiguration ermöglicht (Atmosphäre, Ozean, Vegetation; letztere beide entweder veränderlich oder auf einen vorgegebenen Zustand festgesetzt). Zur übersichtlicheren Darstellung der jeweiligen Einflüsse habe ich Verstärkungsfaktoren eingeführt.

Soweit entsprechende andere Modelle vorhanden sind, zeigen die mit CLIMBER erzielten Resultate der verschiedenen Gleichgewichts-Simulationen für 6000 J.v.h. trotz gewisser Differenzen eine gute Übereinstimmung mit ihnen im Hinblick auf die markantesten Unterschiede: wärmeres und feuchteres Klima im Sommer auf der Nordhalbkugel (insbesondere über Land, verbunden mit einer Abnahme des Luftdrucks); verstärkter Sommermonsun auf der Nord-, abgeschwächter auf der Südhalbkugel; Rückgang des arktischen Meereises; nordwärtige Ausdehnung borealer Wälder; Vegetationsausbreitung in der Sahara.

Den Änderungen des Meereises und der Vegetationsbedeckung liegen starke positive Wechselwirkungen zwischen Klima und Oberfläche zu Grunde, welche sich im voll gekoppelten Modell (insbesondere in borealen Breiten) wechselseitig verstärken. Die Vernachlässigung dieser Synergie in vorher üblichen Modellen, in denen Vegetations- und/oder Ozeanbedingungen konstant gehalten wurden, bringt also eine zum Teil deutliche Unterschätzung bestimmter Effekte mit sich. Auch kommt es nur durch die Synergie in CLIMBER zu einer Schwächung des nordwärtigen Wärmetransportes im Atlantik und einer daraus resultierenden Erwärmung des antarktischen Raumes.

Ein Vergleich mit entsprechenden Analysen anderer Modelle ist nicht möglich. Ein Vergleich mit geologischen Befunden ergibt trotz einiger später zu diskutierender Abweichungen eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

Ähnliches gilt für die transienten Simulationen über die vergangenen 9000 Jahre. Dort ändert sich das Klima stetig, entsprechend den sich ändernden Einstrahlungsbedingungen. Mit dem allmählichen Rückgang der Sommertemperaturen in der Nordhemisphäre ziehen sich auch die borealen Wälder langsam zurück. In Nordafrika jedoch kommt es - einzig im voll gekoppelten Modell - zu einem einzigartigen, abrupten Rück-

zug der Vegetation um 5500 J.v.h. Ursache ist die starke Sensibilität der Vegetation gegenüber einer Veränderung der (Monsoon-)Niederschläge in diesem Bereich.

Auch hier ist ein Modellvergleich mangels entsprechender anderer Modelle nicht möglich, wohl aber spiegelt sich dieses Phänomen in einigen geologischen Befunden wider.

Insgesamt verdeutlichen die Modellresultate also vor allem die große Bedeutung von bislang oft unberücksichtigten Synergieeffekten. Diese haben in manchen Bereichen deutliche Auswirkungen auf die Ergebnisse selbst und vermögen Erklärungen für geologische Befunde zu schaffen, die andernfalls nicht erklärbar scheinen.

Wie belastbar die diskutierten Ergebnisse sind, habe ich durch eine Reihe von Empfindlichkeitsstudien im Hinblick auf die Versuchsdurchführung und die Darstellung der Landoberfläche untersucht. Auch wenn derartige Analysen kaum präsentiert werden, ist nur so eine Einschätzung der Belastbarkeit der getroffenen Aussagen möglich.

Qualitativ sind die präsentierten Ergebnisse für das Holozän stabil gegenüber Unterschieden der Versuchsdurchführung und der Parameterisierung der Landoberfläche. Einzige Ausnahme in ersterem Fall ist die holozäne Simulation des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modells, in der sich vor allem das Meereis als sensibel beispielsweise gegenüber veränderten Anfangs- oder Randbedingungen erweist und sich im Vergleich zum heutigen Klima sogar qualitative Verhaltensdifferenzen ergeben können. Der Zeitpunkt von Umbrüchen im System schwankt bei veränderter Versuchsdurchführung im Bereich von wenigen Dekaden.

Die Resultate für die Vegetation sind qualitativ im Allgemeinen stabil, können sich jedoch quantitativ etwa durch die Wahl extremer Anfangsbedingungen, veränderter Rauigkeitslängen oder veränderter Parameterisierungen (vor allem von Schneeralbedo und Effizienz der Niederschlagsnutzung) deutlich ändern. Insbesondere in der Sahara können sich auf diese Weise Vegetationsunterschiede von mehreren zehn Prozent ergeben. Die angegebenen Verstärkungsfaktoren und somit der Einfluss der verschiedenen Klima-Untersysteme und der Synergie können also in einem gewissen Bereich schwanken, die Sensibilität des gekoppelten Modells ist beeinflussbar.

Insgesamt liefern die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse für das Holozän also ein für unser Modell relativ robustes Abbild der damaligen Klimaverhältnisse. Einzig die Resultate des Meereises, insbesondere in der Südhemisphäre, sollten mit einiger Vorsicht betrachtet werden. Die simulierten Vegetationsänderungen sind zwar qualitativ stabil, bei der Betrachtung von Flächenänderungen sollte jedoch insbesondere in der Sahara eine gewisse Unsicherheit bedacht werden.

Im Hinblick auf Differenzen gegenüber anderen Modellen beziehungsweise den geologischen Befunden ist nach den Analysen Folgendes zu sagen:

Das Biomparadoxon der geologischen Daten erklärt sich aus dem Synergieeffekt. Die in den Daten gefundenen abrupten Vegetationsänderungen in Nordafrika finden ihre Ursache in einer starken positiven Wechselwirkung von Niederschlägen und Vegetation. Beispielsweise ein geringerer CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre oder die Berücksichtigung

von Beweidung können eine Verschiebung des Zeitpunktes dieses Umbruches in der Größenordnung von hundert Jahren bewirken.

Die im Vergleich mit anderen Modellen und geologischen Daten möglicherweise im Modell überschätzte Ausdehnung borealer Wälder im mittleren Holozän in Ostsibirien und Nordamerika kann durch die Reduzierung klimatischer Unterschiede zwischen Gras und Bäumen vermindert werden. Insbesondere weniger starke Unterschiede der Rauigkeitslängen und eine minder unterschiedliche Parameterisierung des Schneeanteils bei Bäumen sind hier wirkungsvoll. Auch durch veränderte Versuchsdurchführung kann der Baumanteil in borealen Breiten im mittleren Holozän um wenige Prozent vermindert werden. Eine generelle Änderung einzelner Parameterisierungen der Landoberfläche kann vor allem die Sensibilität des gekoppelten Modells verändern.

Ähnliches gilt auch für die Vegetationsbedeckung in Nordafrika (insbesondere in der Sahara) die im Vergleich zu anderen Modellen und geologischen Daten ebenfalls möglicherweise überschätzt wurde. Im Hinblick auf die Parameter hat vor allem die Wahl der Werte der Rauigkeitslänge und der Hintergrundalbedo von Wüste hier großen Einfluss bei entgegengesetzter Wirkungsrichtung. Für Sahara und Sahel sind oftmals auch die sorgfältige Darstellung der jeweils benachbarten Gitterbox entscheidend. Setzt man beispielsweise die Vegetations-Charakteristika nur im Sahel fest auf ihre heutigen Werte, so ist auch die Vegetationsausbreitung in der Sahara um etwa 15% geringer. In GCM-Simulationen wurde eine geringere Ausbreitung der Vegetation in der Sahara gefunden. Dort waren die LAI für die einzelnen Oberflächentypen zwar unterschiedlich, jedoch fest vorgegeben. Setzt man auch in CLIMBER die LAI fest auf ihre heutigen Werte und erlaubt nur den Vegetationsanteilen sich zu ändern, so ist die Ausbreitung der Vegetation auch hier um etwa 15% geringer.

Die in vielen Atmosphären-Modellen, nicht aber in der CLIMBER-Simulation des reinen Atmosphären-Modells gefundene sommerliche Abkühlung des Sahel im mittleren Holozän kann mit keiner der hier dargestellten Empfindlichkeitsstudien erreicht werden. Möglicherweise ist dieser Effekt von kleinerer als der in CLIMBER-2 auflösbaren räumlichen Dimension.

Bei einem Vergleich mit geologischen Befunden sollte beachtet werden, dass die geologischen Daten ihrerseits ebenfalls noch mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet sind. Die wesentlichsten Beschränkungen liegen in der Datierung der Befunde, ihrer Länge und ihrer räumlichen Verteilung. Beispielsweise können Pollendaten oder Seesedimente nur aus feuchten und somit nicht immer repräsentativen Regionen gewonnen werden. Auch sind diese Befunde zeitlich auf Feuchtphasen beschränkt, oft fehlen kontinuierliche Profile über viele Jahrtausende mit zwischenzeitlichen Trockenphasen. Ferner kann die Abtragung von Sedimenten, etwa durch Wind, häufig eine genaue Angabe zum Aussetzen einer Feuchtphase erschweren. Eine höhere räumliche und zeitliche Datendichte wird weiter durch die hohen Datierungskosten limitiert.

Die Datierung von Seesedimenten zum Beispiel wird auch durch Hartwassereffekte oder mangelnde Durchmischung in den Seen kompliziert, die die  $C^{14}$ -Alter der Proben verfälschen können. Die Kalibrierung der  $C^{14}$ -Daten, die genaue Übertragung auf Kalenderjahre, stellt ein kaum zu lösendes Problem dar (Philipp Hoelzmann, persönliche Mitteilung). Weitere Unsicherheiten treten auf, versucht man beispielsweise Änderungen der Pollenvorkommen in ein Klimasignal umzurechnen, da die zu Grunde liegenden Modelle wie jedes Modell mit einigen Unzulänglichkeiten behaftet sind.

Dennoch lässt sich insgesamt sagen, dass anhand der hier präsentierten Untersuchungen einige Phänomene in den geologischen Daten belegt und erklärt werden können. Die Übereinstimmung mit den Befunden ist aber noch nicht optimal und könnte mit verschiedenen der hier gezeigten Maßnahmen erhöht werden.

**Ausblick:**

Ein in dieser Arbeit nicht näher diskutiertes Thema ist die Variabilität des Klimas. Es stellt sich die Frage, wie stark sich beispielsweise bei veränderten Einstrahlungsbedingungen die Niederschläge nicht nur in ihrer Stärke ändern können, sondern auch die Häufigkeit von Extremniederschlägen. Im Hinblick etwa auf landwirtschaftliche Erträge oder den Küstenschutz ist dies bei der Diskussion der zukünftigen Klimaentwicklung von entscheidender Bedeutung [Grassl, 2000].

Die interne Variabilität von CLIMBER-2.1 kann jedoch nicht der des natürlichen Klimasystems entsprechen, zum einen durch die Tatsache, dass einzelne synoptische Prozesse nicht explizit aufgelöst werden, zum anderen aber auch dadurch, dass Ereignisse wie etwa die so genannte El Niño Southern Oscillation, *ENSO* [Otto-Bliesner, 1999] in einem zonal gemittelten Ozeanmodell nicht dargestellt werden können. Die in einer zukünftigen Version 3 des Modells erhöhte Auflösung wird hier eine gewisse Verbesserung, gerade im Hinblick auf die Darstellung räumlicher Variabilitäten, bringen; für eine realistische Wiedergabe der gesamten räumlichen und zeitlichen Schwankungen ist das Modell jedoch nicht konzipiert worden. Es könnten aber beispielsweise Auswirkung und Bedeutung einiger dieser Prozesse durch die Einführung künstlicher Variabilitäten analysiert werden. Ein weiteres Beispiel hierfür wären Schwankungen der Sonnenaktivität, wie sie mit CLIMBER-2.2 bereits untersucht wurden [Brovkin et al., 1999], oder Vulkanausbrüche.

Natürlich gibt es eine Reihe von Dingen, die es zu verbessern oder erweitern gilt. Neben der momentanen Auflösung des Modells, die die Darstellung einiger Vorgänge von vornherein nicht zulässt, könnten einige Prozesse, auch im Hinblick auf die Landoberfläche hinzugenommen werden.

Für Paläoklima-Simulationen ist die Dynamik von Gletschern von entscheidender Bedeutung. Die Ausdehnung von Inlandeismassen verändert sich im Verlauf von Glazialen und Interglazialen. In der hier verwendeten Modellversion wurde das Inlandeis stets in seiner heutigen Ausdehnung fest vorgegeben, was bereits für die hier diskutierten Zeiträume, insbesondere für den Beginn der transienten Simulationen eine nicht ganz zulässige Annahme darstellt (siehe Abschnitt 4.2). Möchte man jedoch beispielsweise Kaltzeiten simulieren oder transiente Simulationen über verschiedene Warm- und Kaltzeiten durchführen, so sollte zu einer konsistenten Darstellung des Klimasystems auch die Eisausdehnung innerhalb des Modells berechnet werden. Dies ist in einer neueren Version 2.3 des Modells bereits möglich.

Ein wichtiges Treibhausgas und somit eine relevante Größe in den Simulationen zukünftiger, aber auch vergangener Klimate ist der Kohlenstoff. Über Flüsse dieser Komponente stehen verschiedene Teile des Klimasystems, wie Atmosphäre, Ozean und Vegetation, miteinander in Verbindung. In dieser Modellversion ist die atmosphärische Kohlendioxid-Konzentration fest vorgegeben. In Vegetation und Ozean spielt sie keine

Rolle. Tatsächlich verbraucht jedoch Vegetation bei der Photosynthese Kohlendioxid und setzt umgekehrt gewisse Mengen davon bei der Atmung frei. Auch der Ozean kann als Kohlenstoff-Quelle oder -Senke wirken. Änderungen dieser Bilanzen, wie sie auch im Verlauf des Holozäns zu beobachten waren (siehe Abschnitt 6.4.2), verändern auch den atmosphärischen Kohlendioxid-Gehalt. In eine neuere Version 3.2 des Modells wurde daher ein geschlossener Kohlenstoff-Kreislauf implementiert. Auch die Darstellung von Methan, Staub oder verschiedenen Isotopen wäre hier wünschenswert. Diese sind zum einen klimawirksam (zum Beispiel war der Aerosolgehalt der Atmosphäre während Kaltzeiten durch die vermehrten (Halb-)Wüsten deutlich erhöht, siehe Abb. 6), zum anderen würde ihre Simulation einen direkten Vergleich mit vorhandenen geologischen Befunden ermöglichen (siehe Abschnitt 2.1).

Permafrostgebiete nehmen unter heutigem Klima etwa 25% der Landoberfläche ein [Anisimov and Nelson, 1996], Feuchtgebiete etwa 4% bis 6% und Seen und Flüsse etwa 2% [WBGU, 1997]. Im Hinblick auf das globale oder regionale Klima besitzen sie vielerlei Bedeutung, so zum Beispiel als Wasser- oder Methanspeicher, oder auch bei der Simulation von Vegetationsverschiebungen. In den vergangenen Jahrtausenden war die Ausdehnung dieser Gebiete vielfachen Veränderungen unterworfen, die mit dem Klima in Wechselwirkung standen [Coe and Bonan, 1997, Brostroem et al., 1998]; so wird abgeschätzt, dass die Ausdehnung von Seen und Feuchtgebieten in Nordafrika und auf der Arabischen Halbinsel in den vergangenen 6000 Jahren von etwa 7,35% der Landoberfläche auf weniger als ein Zehntel zurückgegangen ist [Hoelzmann et al., 1998]. Durch eine Darstellung dieser Zusammenhänge in einer zukünftigen Modellversion von CLIMBER könnte dies erfasst werden.

In CLIMBER-2 besitzen sämtliche Böden weltweit die gleiche Konsistenz. Einzige Ausnahme bildet der Wüstenboden in der Sahara, für den ein höheres Reflexionsvermögen und eine höhere Wasserleitfähigkeit angenommen wird. Tatsächlich sind Böden jedoch völlig unterschiedlich in verschiedenen geologischen oder klimatischen Regionen [Lerch, 1991], ihre Beschaffenheit hängt beispielsweise auch von der Vegetation ab [Dickinson et al., 1986]. Etwa über unterschiedliche Werte von Albedo, Wasserspeichervermögen oder Temperaturleitfähigkeit sind diese Differenzen durchaus klimawirksam und sollten daher in einem Modell berücksichtigt werden. Hier stößt man bei der Auflösung von CLIMBER-2 allerdings schnell an die Grenzen der Darstellbarkeit.

Die Vegetation wird in der hier verwendeten CLIMBER-Version als reine Funktion der Niederschläge und der Temperaturen beziehungsweise Temperatursummen dargestellt. In einer neueren Version spielt außerdem das Kohlendioxid eine Rolle. Tatsächlich ist das Vorhandensein von Vegetation jedoch von weitaus mehr Faktoren bestimmt, von denen einige - wie etwa der Aufbau des Bodens - in einem Modell dieser Auflösung nur schlecht zu beschreiben sind. Eine größere Konsistenz mit dem übrigen Modell wäre jedoch schon bei Berücksichtigung auch des Energie- und vor allem Feuchtehaushaltes des Bodens bei der Bestimmung der Vegetation gewährleistet [Foley et al., 1996].

Auch die jahreszeitlichen Veränderungen der Vegetation haben Einfluss auf das Klima [Sellers et al., 1996b, Foley et al., 1996]. Dies ist in CLIMBER-2 durch eine Modifikation des LAI gemäß der Temperaturänderungen dargestellt. Diese Modifikation wird aber nur bei der Berechnung von Transpiration und Interzeption verwendet. In allen

anderen Darstellungen fehlt sie, wie etwa bei der Bestimmung der Albedo; eine gewisse Sensibilität des Energiehaushaltes gegenüber einem veränderten LAI und dessen Einfluss auf die Albedo, bisweilen vergleichbar dem auf die Transpiration, wurde jedoch etwa in Abschnitt 9.2.3 demonstriert. Wenn schon nicht die Simulation eines Jahresganges im Vegetations-Modell, so wäre doch wenigstens eine konsistentere Darstellung dieser Erscheinung innerhalb des Oberflächenmodells wünschenswert.

Bei sich ausbreitender Vegetation, wie sie etwa nach der letzten Kaltzeit und vor dem früheren Holozän in Nordafrika stattgefunden haben muss, ist es notwendig, dass sich zunächst ein Wurzelsystem ausbildet. Es entstehen im Laufe der Jahrhunderte Böden mit Feldkapazitäten, deren verändertes Speichervermögen in positiver Rückkopplung mit der sich ausbreitenden Vegetation stehen kann, und die somit auf das Klima wirken [Lapenis and Shabalova, 1994]. Auch in verschiedenen Regionen, wie etwa dem Amazonasgebiet, vorhandene besonders tief reichende Wurzeln sichern der Vegetation ein Überleben auch in trockenen Perioden [Kleidon and Heimann, 1998]. Ein solcher Einfluss der Wurzeln kann in diesem Modell nicht erfasst werden.

So sind viele Ergänzungen und Erweiterungen des gegenwärtigen Modells denkbar. Die obigen würden aus den genannten Gründen eine Verbesserung des Modells bedeuten, gerade im Hinblick auf geplante längere transiente Experimente. Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit darüber hinaus eine weitere, noch detailgetreuere Darstellung verschiedener Prozesse in einem Modell wie CLIMBER-2 angebracht wäre. Zur Gewährleistung von Konsistenz wurde bislang stets ein ähnlicher Detaillierungsgrad in allen Teilen des Modells angestrebt. Die Darstellung der Transpiration ist beispielsweise in dieser Hinsicht bereits sehr genau. Eine größere Genauigkeit der Darstellung muss jedoch nicht unbedingt eine höhere Güte der Simulationsergebnisse bedeuten, ähnlich wie eine höhere Modellauflösung nicht zwangsweise realistischere Resultate mit sich bringt.

Die entscheidende Frage ist, was man mit dem Modell darstellen möchte. Ist man zum Beispiel an der Abbildung des Tagesganges des Energie- und Wasserhaushaltes einer Pflanze interessiert, so ist es unerlässlich, etwa die einzelnen Prozesse bei der Photosynthese im Detail zu formulieren. Wird wie in CLIMBER das Verhalten der Pflanze nur im Mittel über einen gesamten Tag betrachtet und können sich Vegetationsverschiebungen allenfalls von einem Jahr zum nächsten ergeben, so macht eine derart detaillierte Darstellung wenig Sinn. Zum einen kann das Atmosphären-Modell nicht direkt die nötigen Eingangsgrößen liefern. Wären hingegen alle Teile eines globalen Modells derart genau dargestellt, wäre es mit den gegenwärtigen Computern wegen zu langer Rechenzeiten nicht mehr zu benutzen. Darüber hinaus besteht die Gefahr, das System überzuparameterisieren, das heißt, zum Erzielen der nötigen Ergebnisse derart viele Modellparameterisierungen zu benutzen, dass die Reaktion des Modells hierdurch gewissermaßen vorbestimmt ist und sich nicht mehr frei entwickeln kann.

All diese und weitere Überlegungen werden bei der bereits begonnenen Entwicklung eines neuen Modells, CLIMBER-3, in Betracht gezogen.