

Klimaänderungsszenarien

Hans von Storch

1 Einführung: Szenarien in der Klimaforschung

Szenarien – das sind Beschreibungen möglicher Zukünfte, Beschreibungen verschiedener denkbarer Zukünfte (siehe auch Schwartz, 1991). Es sind keine Vorhersagen, sondern „storyboards“, verschiedene Entwürfe von Zukunft, die alle denkbar und plausibel, in sich konsistent aber nicht notwendig wahrscheinlich sind. Die Idee mit Szenarien ist, Verantwortungsträger mit möglichen zukünftigen Situationen zu konfrontieren, damit sie sich rechtzeitig überlegen können, wie sie sich verhalten können, wenn eine bestimmte Zukunft eintritt. Oder um heute Beschlüsse zu ermöglichen, um Zukünfte zu vermeiden, die mit sehr unerwünschten Folgen einhergehen. Oder auch, um die Wahrscheinlichkeit für die Entwicklung hin zu wünschenswerten Zukünften zu erhöhen.

Im täglichen Leben operieren wir laufend mit Szenarien. Wenn wir im Frühjahr einen sommerlichen Kindergeburtstag planen, dann überlegen wir uns, wie wir den Tag gestalten könnten, falls es schönes Sonnenwetter ist, oder falls es kalt und regnerisch ist; auf Schneefall bereiten wir uns nicht vor, weil dies für den Sommer ein nicht-plausibles Ereignis ist. Wenn wir über die Pflege unseres Autos nachdenken, dann wägen wir die Szenarien ab, dass das Auto (nicht) zusammenbricht wegen mangelnder Wartung, oder dass wir weniger Ausgaben haben, wenn wir die nächste Inspektion überspringen.

In der Klimaforschung werden Szenarien seit dem Beginn des IPCC Prozesses Ende der 1980er Jahre (Houghton et al., 1990, 1992, 1995, 2001) intensiv genutzt. Dabei gibt es Szenarien für die Emission von klimatisch wirksamen Substanzen in die Atmosphäre, vor allem Kohlendioxid aber auch Methan oder industrieller Aerosole. Dies sind die *Emissionsszenarien*. Diese hängen von diversen Entwicklungen ab, von der Bevölkerungsentwicklung, von der Effizienz der Energienutzung, von der technologischen Entwicklung und vielem anderen. Im nächsten Schritt wird mit komplexen globalen Klimamodellen¹ abgeschätzt, welche klimatischen Folgen diese möglichen zukünftigen Emissionen

¹ Klimamodelle – es gibt eine Reihe davon, die sich vor allem in ihrer Komplexität von einander unterscheiden. Die einfachsten Modelle, etwa Energiebilanzmodelle, dienen vor allem zur Konzeptualisierung der Klimadynamik. Die kompliziertesten Modelle, die bisweilen als quasi-realistische Modelle bezeichnet werden, und um die es hier ausschließlich geht, beschreiben das Klimasystem durch eine Reihe von räumlich hochauflösenden Variablen, deren zeitliche Entwicklung in Form einer Differentialgleichung durch viele explizit beschriebene Prozesse determiniert wird (vgl. von Storch et al., 1999). Solche Klimamodelle beschreiben explizit die diversen Komponenten des Klimasystems, also Atmosphäre, Ozean, Meereis und ggfs. Weitere – vgl. von Storch et al. (1999), Cubasch

haben können. Dies sind die *globalen Klimaänderungsszenarien*. Sie geben Auskunft über die erwarteten global-skaligen² Veränderungen, die mit möglichen Emissionsentwicklungen plausiblerweise einhergehen; regionale Details etwa für die Niederschlags- und Windverhältnisse in mitteleuropäischen Ländern liefern sie nicht. Um diese zu erhalten, wird die Methode des „dynamischen Downscaling“ verwendet – dabei werden regionale Klimamodelle³ mit horizontalen Gittern von 10 bis 50 km von

und Kasang (1991) bzw. den entsprechenden Abschnitt in diesem Buch. Klimamodelle simulieren die Abfolge von Wetter, aus dem dann die Statistik des Wetters (also das Klima) abgeleitet werden kann. Klimamodelle berechnen also nicht direkt das Klima, sondern sie erzeugen Simulationsdaten, aus denen das Klima (etwa langfristige Mittelwerte, Schwankungsbreiten, Spektren, räumliche Korrelationen) einfach abgeleitet werden kann.

Sie operieren mit Differentialgleichungen, die die raum-zeitliche Entwicklung dynamisch relevanter Zustandsgrößen (wie Temperatur, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und –richtung) beschreiben; diese Differentialgleichungen werden auf geeigneten horizontalen und vertikalen Gittern diskretisiert. Phänomene, deren Zustand an zumindest einigen wenigen Gitterpunkten beschrieben wird, gelten als „aufgelöst“ oder „dargestellt“.

² „Skala“ ist ein zentrales Konzept in der Klimaforschung. Damit ist die typische räumliche Abmessung bzw. typische Andauer eines Phänomens oder eines Prozesses gemeint. Diese Definition ist unscharf und erlaubt nur die Angabe von Größenordnungen. In erster Näherung wird das Klima als eine Folge von Interaktionen größerskaligen dynamischen Zustände mit kleinere skaligen physiographischen Details verstanden. So ergeben sich die meridionale Zellenstruktur und die zonalen mittleren Strömungsmuster (Passate, Strahlströme) aus dem polar-äquatorialem Gegensatz der Einstrahlung und der Erdrotation; die „langen Wellen“ werden verstanden als Resultat von Zellen und Zonalströmungen auf der einen Seite und zonalen Asymmetrien in Topographie und Land-See-Verteilung auf der anderen Seite; die synoptischen Störungen als Resultat von langen Wellen und regionalen Details etc. Die größeren Skalen bestimmen also die kleinen, die wiederum in ihrer Vielfachheit, als Summe, aber nicht im Detail auf die größeren Skalen zurückwirken (vgl. von Storch, 1999).

Klima wird in diesem Konzept also nicht verstanden als Summe der Regionalklimate, wie die klassischen Karten etwa von Vladimir Köppen seit Ende des 19ten Jahrhunderts suggerieren. Ideengeschichtlich hat sich die physikalische Sichtweise eines George Hadley durchgesetzt. Der traditionelle geographische Zugang, wonach es zunächst um die regionale Beschreibung geht, kommt erst jetzt wieder zum Zuge, wenn es darum geht, regionale Details des Klimas zu bewerten.

Die globale Skala bezieht sich auf mehrere tausend Kilometer; die Kontinental-Skala auf wenige tausend Kilometer, die Regionalskala auf hundert bis tausend Kilometer in diesem Zusammenhang.

³ Regionale Klimamodelle sind im Prinzip identisch zu globalen Klimamodellen, abgesehen davon, dass sie nur in einem beschränkten Gebiet integriert werden, wobei an den Rändern dynamische Bedingungen vorgegeben werden. Dies ist eine mathematisch nicht wohldefinierte Aufgabe, d.h. es gibt nicht zu jedem Satz von Randbedingungen genau eine Lösung im Inneren. Man hat aber einen Kniff erfunden, um die Modelle dennoch integrieren zu können – man erzwingt einen stetigen Übergang zwischen der Lösung im Inneren und den vorgegebenen Bedingungen am Rand durch eine Übergangszone, in der die Lösung im Inneren zwangsweise stetig an die Randbedingungen herangeführt werden.

den gross-skaligen (mehrere hundert Kilometer) Verhältnissen angetrieben, die vorher in globalen Klimamodellen simuliert wurden. So ergeben sich *regionale Klimaänderungsszenarien*, die beschreiben, wie das regionale Klima sich auf Skalen von wenigen zehn bis ein-, zweihundert Kilometern entwickeln könnte. Hierin enthalten ist auch das Auftreten seltener und kurzzeitig auftretender Ereignisse⁴, wie Starkniederschläge oder extreme Windstürme.

Methodisch werden diese Szenarien erzeugt als *bedingte Vorhersagen*. Man überlegt sich einige Schlüsselentwicklungen, die – eben: möglich, plausible, konsistent aber nicht notwendigerweise wahrscheinlich sind, und verarbeitet diese mit Vorhersageinstrumenten. Diese Schlüsselentwicklungen beziehen sich auf die wirtschaftlich-soziale Prozesse, die zu Emissionen führen. Für jede Gruppe von Annahmen der Schlüsselentwicklungen ergeben sich andere zukünftige Entwicklungen der klimatischen Folgen. Dabei stellt sich aber heraus, dass in all diesen möglichen zukünftigen Entwicklungen nicht nur die Lufttemperaturen sondern auch die Wasserstände steigen. Im Falle dieser beiden klimatischen Größen ergibt sich also in allen bedingten Vorhersagen die gleiche Aussage – nämlich ein genereller Anstieg – so dass diese Eigenschaft unabhängig von den angenommenen Voraussetzungen wird und daher eine echte *unbedingte Vorhersage*, sofern denn die sozio-ökonomischen Szenarien alle Möglichkeiten abdecken.

2 Emissionsszenarien

Eine Reihe von Emissionsszenarien ist im „IPCC Special Report on Emissions Scenarios“ (SRES; <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission>) veröffentlicht worden. Neben Veränderungen in den Emissionen beschreiben sie auch Szenarien für zukünftige Landnutzung. Vier Gruppen von Szenarien werden ausgeführt, die wie folgt charakterisiert werden:

- A1** Eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und der schnellen Einführung von neuer Technologie mit gesteigerter Energieeffizienz,
- A2** Eine sehr heterogene Welt, in der Familienwerte und lokale Traditionen große Bedeutung haben.
- B1** Eine „dematerialisierte“ Welt, in der saubere Technologien eingeführt werden.

Der Vorteil der regionalen Modelle ist, dass sie im Vergleich mit einem globalen Modell bei gleichem Rechenaufwand mit deutlich feinerem Gitter arbeiten können und somit besser geeignet sind, regionale Details darzustellen. Erst sie ermöglichen das Detail, das in vielen Impaktstudien benötigt wird.

⁴ Wie schon vorher dargestellt, simulieren die Modelle nicht unmittelbar die Häufigkeit und Stärke von Extremereignissen, sondern eine Folge von möglichen plausiblen, in sich konsistenten Wetterabläufen, in denen selten besondere Ereignisse enthalten sind. Aus der statistischen Analyse des Wetterablaufs leiten sich Aussagen über die Schwere und Häufigkeit dieser seltenen Ereignisse ab. Diese Aussagen unterliegen Stichprobenschwankungen, ganz genauso wie Aussagen, die aus Beobachtungen über längere Zeit abgeleitet werden.

- B2** Eine Welt, in der lokale Lösungen für den nachhaltigen Umgang mit Wirtschaftl und Umwelt im Vordergrund stehen.

Diesen Szenarien liegen detaillierte Storyboards zugrunde, wie z.B. in A1 Erwartungen, dass markt-basierte Lösungen verfolgt werden, und dass private Haushalte auf hohe Sparleistungen und gute Ausbildung abzielen. Ein anderes Beispiel in B2 beschreibt einen geringen Fleischkonsum in Ländern mit hoher Bevölkerungsdichte. Aus diesen Überlegungen leiten sich dann erwartete Emissionen von strahlungsrelevanten Substanzen in die Atmosphäre ab. Abbildung 1 zeigt die erwarteten SRES Szenarien für die Emission von Kohlendioxid (in Gigatonnen Kohlenstoff) als wesentlichem Repräsentanten von Treibhausgasen und von Schwefeldioxid (in Megatonnen Schwefel) als Repräsentanten für anthropogene Aerosole.

Die SRES Szenarien treffen allerdings auf einige Vorbehalte, wie etwa dokumentiert durch eine Anhörung des Select Committee of Economic Affairs des House of Lords in London (2005). Ein wesentlicher Vorbehalt ist, dass die Erwartungen für wirtschaftlichen Wandel für die verschiedenen Wirtschaftsbereiche berechnet werden nach Marktwechselkurs („market exchange ranges“; MER) statt nach Kaufkraftparität („purchasing power parity“; PPP). Ein anderer Punkt ist, dass implizit in den SRES Szenarien die Erwartung enthalten ist, dass die Schere im Pro-Kopf Einkommen zwischen der entwickelten und der sich entwickelnden Welt sich weitgehend schließen wird zum Ende des 21. Jahrhunderts (Tol, 2005). Ohne diese Annahmen würden die Emissionen bei gleichen wirtschaftlichen Annahmen vermutlich als kleiner abgeschätzt werden.

3 Globale Klimaänderungsszenarien

Die eben skizzierten Emissionsszenarien werden umgerechnet in erwartete atmosphärische Konzentrationen. Danach berechnen globale Klimamodelle ohne weitere Bereitstellung von Beobachtungsdaten eine oft hundertjährige Folge von z.B. stündlichem Wetter, mit einer großen Anzahl von relevanten Variablen sowohl in der Stratosphäre und der Troposphäre, aber auch in Bodennähe bzw. an der Grenzfläche Ozean/Meereis/Atmosphäre – etwa Lufttemperatur, Bodentemperatur, Meeresoberflächentemperatur, Niederschlag, Salzgehalt im Ozean, Meereisbedeckung, Windgeschwindigkeit usw.

Leider reproduzieren die globalen Klimamodelle das gegenwärtige Klima nicht akkurat; vielmehr gibt es systematische Fehler, so dass man die erwarteten Klimaänderungen nicht einfach dadurch bestimmen kann, dass man eine Simulation mit sich erhöhenden Treibhausgaskonzentrationen rechnet. Da aber die erwarteten Klimaänderungen im geophysikalischen Sinne – nicht im sozialen oder ökologischen Sinne – „klein“ sind, erwartet man, dass die Änderungen aufgrund veränderter atmosphärischer Komposition „richtig“ dargestellt wird trotz (relativ kleiner) systematischer Fehler bei der Darstellung des gegenwärtigen Klimas. Daher wird die Veränderung des Klimas abgeleitet aus dem Unterschied eines „Kontrolllaufs“ (mit unveränderter Komposition) mit einem „Szenariolauf“ (in der die Komposition zeitlich veränderlich vorgegeben wird).

Als ein Beispiel zeigt Abbildung 2 die erwartete Änderungen der Lufttemperatur in einer Simulation mit dem Szenario A2 und mit dem Szenario B2 für die letzten 30 Jahre des 21. Jahrhunderts im Vergleich zu einem „Kontrolllauf“ des Referenzzeitraum 1960-1990. Offensicht steigen die Lufttemperaturen fast überall; in Szenario A2 ist der Anstieg stärker als in B2. Der Anstieg ist langsamer über See wegen der höheren thermischen Trägheit des Ozeans; in arktischen Bereichen fällt die Erwärmung besonders stark aus, nachdem dort teilweise Permafrost und Meereis geschmolzen ist.

4 Regionale Klimaänderungsszenarien – Beispiel Zentraleuropa

Mit regionalen Klimamodellen sind diverse globale Klimaänderungssimulationen regionalisiert („ge-downscaled“) worden für Europa. Dabei stellte sich heraus, dass bei gleichem globalem Antriebsmodell die verschiedenen Regionalmodelle meist recht ähnliche Resultate hervorbringen – so dass die Wahl eines spezifischen regionalen Klimamodells weniger signifikant erscheint. Wenn aber verschiedene globale Modellantrieb verwendet werden, liefert das gleiche Regionalmodell aber durchaus merkbare Unterschiede in den regionalen Szenarien (z.B. Woth, 2005). Auch die Erwartung, wonach stärkere Emissionsszenarien regional deutlichere Veränderungen hervorbringen würden, gilt nur eingeschränkt. Dies liegt daran, dass die Wetterdynamik auf der regionalen Skala variabler ist als im Falle großräumig gemittelten Größen – das „Signal-to-noise“ Verhältnis „Änderung/Wettervariabilität“ wird immer ungünstiger, je kleiner die betrachteten Gebiete werden.

Aber allen Simulationen ist gemein, dass es deutlich wärmer wird; es zeichnet sich auch ab, dass die statistischen Verteilungen, etwa von winterlichen Starkwindgeschwindigkeiten über der Nordsee oder sommerlichen Starkniederschlägen in Zentraleuropa breiter werden. Abbildung 3 zeigt beispielhaft erwartete Veränderungen im Szenario A2 wiederum für den Zeitraum 2070-2100 im Vergleich zu 1960-1990 für Starkniederschlag in Europa (Christensen und Christensen, 2003) und Starkwind im Bereich der Nordsee (Woth et al., 2005).

5 Impaktszenarien – Beispiel: Sturmfluten an der Deutschen Nordseeküste

Wir beschließen diesen kurzen Abriss über die Konstruktion von Klimaänderungsszenarien mit der Demonstration, wie die regionalen Klimaänderungsszenarien konkret in ein Klimaimpaktszenario umgesetzt werden. In diesem Falle geht es um die dominante geophysikalische Bedrohung in Norddeutschland, nämlich Sturmfluten längs der Nordseeküste (e.g., Gönner et al., 2001). Dazu wird die 6-stündige Abfolge der Winde und der Luftdruckfelder in einer Reihe von regionalen Szenarien für den Zeitraum 2070-2100 und von Kontrollläufen (repräsentativ für 1960-1990) genommen, um ein hydrodynamisches Modell der Nordsee über jeweils 30 Jahre anzutreiben (Woth et al., 2005). Mit so einem

Modell kann man realitätsnah das Auftreten von Sturmfluten längs der Nordseeküste simulieren. Abbildung 4 zeigt beispielhaft, wie sich die hohen jährlichen Perzentile der Wasserstände in der Nordsee in einer A2-Simulation sich zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Ende des 20ten Jahrhunderts verändern. Längs der Deutschen Bucht kommt es zu deutlichen Erhöhungen im Bereich weniger Dezimeter. Qua Konstruktion der Simulationen kann dies nur an der Veränderung der Wetterverhältnisse liegen, nicht aber an Landsenkung oder dem globalen Anstieg des Wasserstandes. Für die Planung des Küstenschutzes sind diese Effekte noch hinzuzurechnen.

Für die Orte Cuxhaven und St. Pauli, in Hamburg, ist dies Szenario noch für die erste Hälfte (2030) und das Ende des 21. Jahrhunderts (2085) konkretisiert worden (Grossmann et al., 2005). Zur zeitlichen Interpolation und zur Extrapolation aus dem Bereich der Nordsee hinein in den gegliederten Bereich des Ästuars wurden empirische Ansätze verwendet – methodisch handelt es sich also um einen Fall von „statistischem Downscaling“. Demnach ist ein Anstieg von bis zu 10 bis 20 cm für Cuxhaven und St. Pauli für 2030 im Rahmen des A2-Szenarios plausibel; für 2085 ergeben sich wesentlich höhere Zahlen, nämlich 50 bis 70 cm. Diese Zahlen beinhalten sowohl den Anteil aufgrund veränderter Sturrtätigkeit und des Anstiegs des mittleren Wasserstandes. Sie sind verbunden mit einer merklichen Unsicherheit, die in 2030 bis ± 20 cm und in 2085 ± 50 cm ausmachen kann. Legt man B2-Szenarien zugrunde, so ergeben sich etwas geringere Anstiege – man muss also unabhängig von der Emissionsentwicklung mit einem merkbaren Anstieg der mittleren und sturmbedingten Wasserstände in der Zukunft rechnen. Für die nähere Zukunft ist es sicher ausreichend, die Entwicklung genau zu beobachten. Die Verantwortungsträger sind aber schon jetzt gefordert, sich mit diesen Szenarien auseinanderzusetzen und geeignete Gegenmaßnahmen und Anpassungsstrategien perspektivisch zu entwickeln.

6 Klimaänderungsszenarien im World Data Center Climate des International Council for Science⁵

Die Ergebnisse der globalen und regionalen Klimamodellläufe werden in der CERA-Datenbank des World Data Center Climate (WDCC⁶) archiviert. Der Zugang zur Datenbank ist web-basiert, der Datenzugriff selbst ist Kennwort geschützt. Die Datenbank des WDCC enthält Zeitreihen und Tages- sowie Monatsmittel verschiedenster meteorologischer Parameter (Temperatur, Wind, Niederschlag). Weitere Informationen sind unter <http://www.wdc-climate.de/> zu finden.

⁵ Dieser Abschnitt wurde freundlicherweise von Frau Dr. Keup-Thiel und Herrn Dr. Michael Lautenschlager, Gruppe Modelle und Daten am Max-Planck-Institut für Meteorologie, bereitgestellt.

⁶ Das WDCC wird von der Gruppe Modelle und Daten am Max-Planck-Institut für Meteorologie zusammen mit dem Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg betrieben.

Erste Modellrechnungen für den vierten Statusbericht des „Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimawandel der Vereinten Nationen“ (Intergovernmental Panel on Climate Change - kurz IPCC) wurden im Frühjahr 2005 fertiggestellt. Die Simulationen, die mit einem neu entwickelten Klimamodell des Max-Planck-Institutes für Meteorologie realisiert wurden, können folgendermaßen charakterisiert werden:

1. Rekonstruktion eines ‚ungestörten‘ vorindustriellen Klimazustands
2. Klimaentwicklung seit Mitte des 19. Jahrhunderts unter Vorgabe beobachteter atmosphärischer Spurenstoffkonzentrationen (Treibhausgase und Aerosole)
3. Szenarienexperimente zum Klimawandel basierend auf unterschiedlichen Annahmen über die zukünftigen Konzentrationen atmosphärischer Spurenstoffe
4. Sensitivitätsexperimente, in denen eine jährliche Zuwachsrate der CO₂-Konzentration von 1% angenommen wird

Alle Rechnungen wurden auf dem HLRE – dem „Höchstleistungsrechnersystem für die Erdsystemforschung“ des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Zusammenarbeit mit der Gruppe „Modelle und Daten“ durchgeführt. Die Modellergebnisse wurden in einer relationalen Datenbank gespeichert und stehen Forschern zur weiteren Auswertung zur Verfügung. Die Daten werden vom World Data Center Climate (WDCC) bereitgestellt. Die im WDCC verfügbaren, globalen Szenariendaten zusammen mit ihrem Internet-Datenzugriff befinden sich unter <http://ipcc.wdc-climate.de/>. Erste Ergebnisse der Simulationen können als Filme im DKRZ eingesehen werden. Sie zeigen die simulierte Änderung der bodennahen Lufttemperatur sowie die zeitliche Entwicklung der Meereis- und Schneebedeckung. Nach den neuen Berechnungen liegt die globale Erwärmung gegen Ende dieses Jahrhunderts (relativ zum Mittelwert der Jahre 1961-1990) zwischen 2.5°C und 4.1°C - je nachdem, wie viele Treibhausgase bis dahin in die Atmosphäre abgegeben werden. Die Abnahme der Eisbedeckung liegt zwischen 30% und 50%. Als Folge der globalen Erwärmung könnte die Arktis gegen Ende dieses Jahrhunderts im Spätsommer eisfrei sein.

7 Literatur

Christensen, J.H. and O.B. Christensen, 2003: Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, Vol. 421, p. 805-806

Gönnert, G., S.K. Dube, T. M and W. Siefert, 2001: *Global Storm Surges*, Die Küste - Archie for Research and technology on the North Sea and Baltic Sea cost. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Volume 63, ISBN 3-8042-1054-6, 623 pp.

Grossmann, I., K. Woth, H. von Storch and G. Gönnert, 2005: Localization of global climate change: Storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2085. (in preparation)

Houghton, J.T., B.A. Callander and S.K. Varney (eds), 1992: *Climate Change 1992*. Cambridge University Press, 200 pp.

Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 881 pp.

Houghton, J.L., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds), 1990: *Climate Change. The IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press, 365 pp.

Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds), 1996: *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge University Press ISBN 0 521 56436-0, 572 pp.

House of Lords, Select Committee on Economic Affairs, 2005: *The Economics of Climate Change*. Volume I: Report, 2nd Report of Session 2005-06, Authority of the House of Lords, London, UK; The Stationery Office Limited, HL Paper 12-I

(<http://www.publications.parliament.uk/pa/ld/ldeconaf.htm#evid>)

Schwartz, P., 1991: *The art of the long view*. John Wiley & Sons, 272 pp

Tol, R.S.J., 2005: Exchange rates and climate change: An application of FUND. *Climatic Change* (in press)

von Storch, H., S. Güss und M. Heimann, 1999: *Das Klimasystem und seine Modellierung. Eine Einführung*. Springer Verlag ISBN 3-540-65830-0, 255 pp

von Storch, H., 1999: The global and regional climate system. In: H. von Storch and G. Flöser: *Anthropogenic Climate Change*, Springer Verlag, ISBN 3-540-65033-4, 3-36

von Storch, H., 2005: Veränderliches Küstenklima - die vergangenen und zukünftigen 100 Jahre, in M. Fansa (ed): *Kulturlandschaft Marsch: Natur, Geschichte und Gegenwart*, Isensee-Verlag, Oldenburg, 229-245

Woth, K., R. Weisse and H. von Storch, 2005: Climate change and North Sea storm surge extremes: An ensemble study of storm surge extremes in a changed climate projected by four different Regional Climate models. *Ocean Dyn.* (im Druck)

Woth, K., 2005: Projections of North Sea storm surge extremes in a warmer climate: How important are the RCM driving GCM and the chosen scenario? Submitted to GRL

Danksagung: Ian Castles, Richard Tol, Katja Woth, Michael Lautenschlager

Abbildung 1: Szenarien für Emissionen von Kohlendioxid (als Beispiel für Treibhausgase, in Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr) sowie von Schwefeldioxid (repräsentativ für industrielle Aerosole; in Megatonnen Schwefel pro Jahr). A1, A2, B1 und B2 sind SRES Szenarien. IS92a ist ein früheres IPCC Szenario.

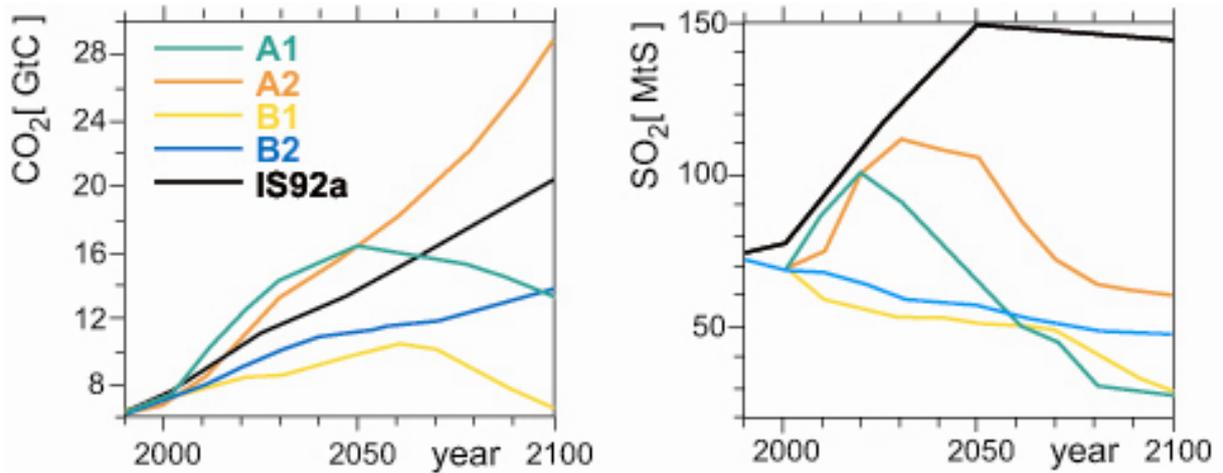


Abbildung 2: Erwartete Änderung der mittleren Lufttemperatur von 1961-1990 bis 2070-2100. Szenario A2 (oben) und B2 (unten). Danmarks Meteorologiske Institut.

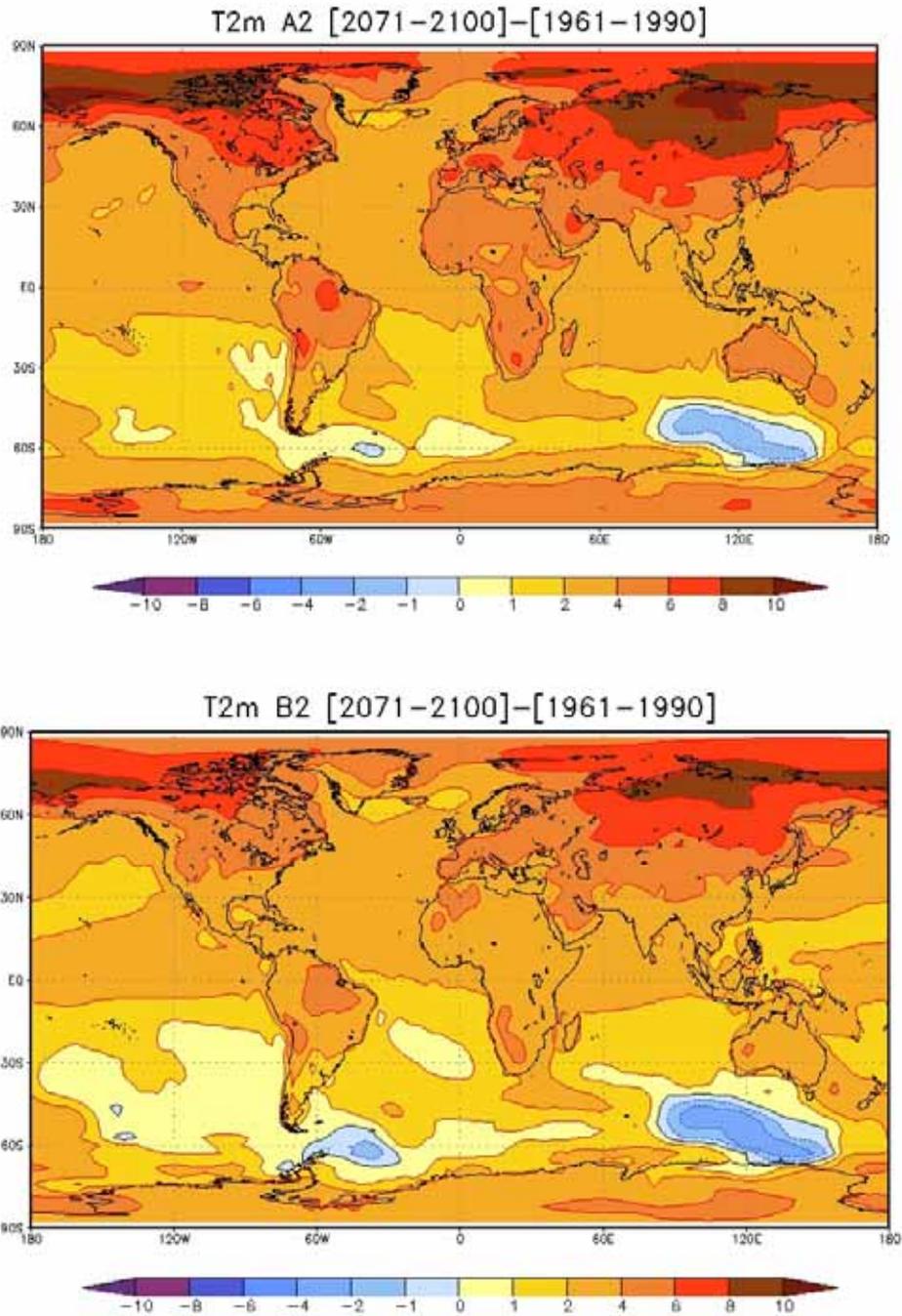


Abbildung 3: Änderung von Starkniederschlag und Starkwindereignissen im Szenario A2 zum Ende des 21ten Jahrhunderts (Änderung von 2070-210 gegenüber 1960-1990).
Oben: Intensität der 99%ile der 5-tägigen sommerlichen Niederschlagssummen in % (Christensen und Christensen, 2003)
Unten: 99%ile der Windstärke im Winter in m/sec (Woth, persönliche Mitteilung)

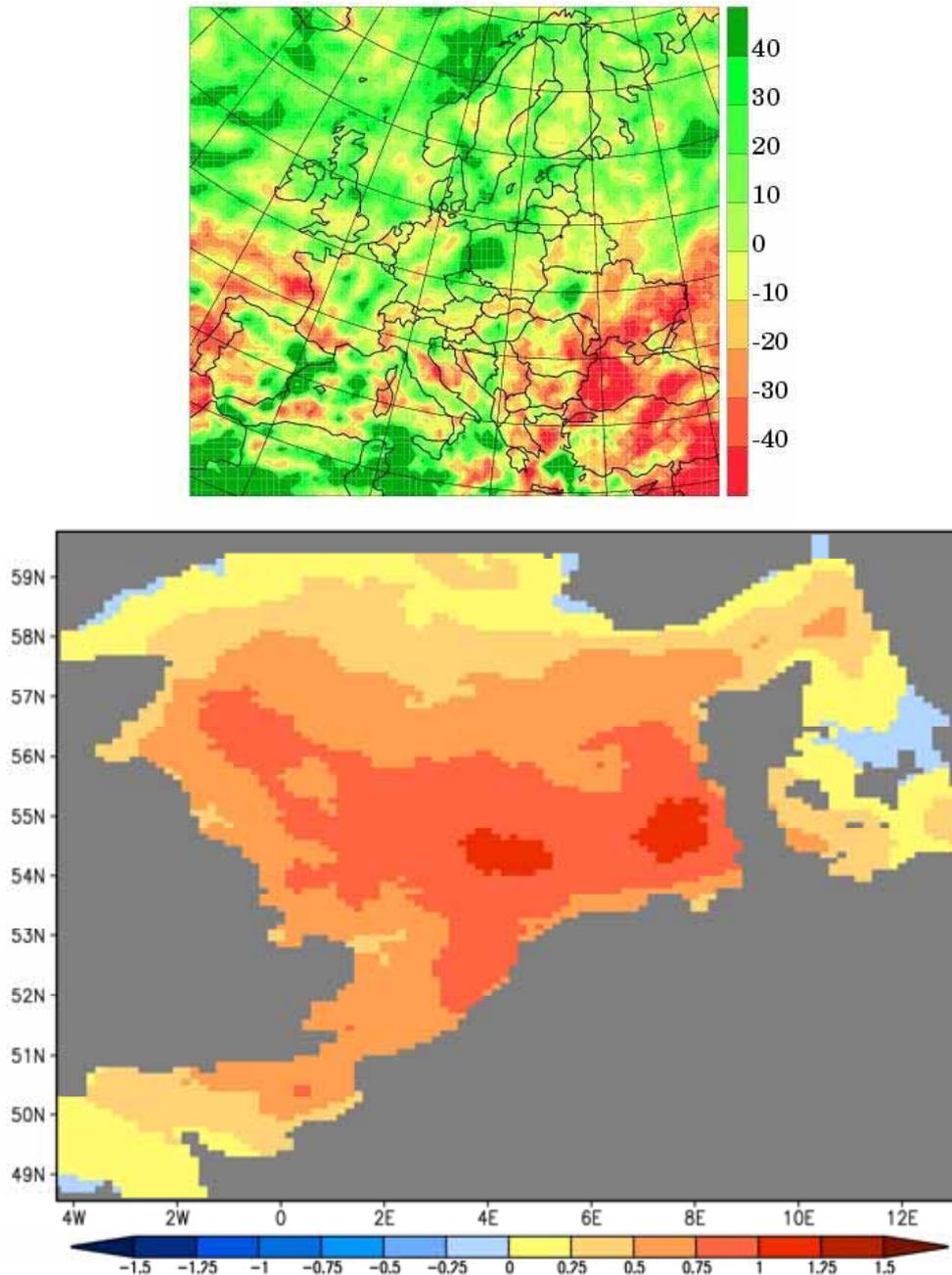


Abbildung 4: Erwartete Unterschiede in den jährlichen 99%ilen des Windstaus in der Nordsee. Dies Szenario wurde konstruiert mit den A2-Emissionen, dem globalen Modell HadAM3 und dem regionalen Modell RCAO. In Metern.

