

Klima im Wandel: Mögliche Zukünfte des Norddeutschen Küstenklimas

Katja Woth¹ und Hans von Storch¹²

1.) Institut für Küstenforschung, GKSS Forschungszentrum, Geesthacht

2.) Meteorologisches Institut, Universität Hamburg

1 Einführung

Das Phänomen des Klimawandels ist in aller Munde und spätestens seit der Veröffentlichung des 4. Sachstandsbericht des Intergovernmental on Climate Change (IPCC) im April 2007 wird dem Themenkomplex des Klimawandels und den Fragen des Klimaschutzes ein breiter Raum, neben der gewohnten medialen Präsentation auch in der politischen Debatte, eingeräumt. Der Klimawandel ist als umfassendes Motiv aus dem ausschließlich wissenschaftlichen Raum herausgetreten und in den „postnormalen Raum“ der Wissenschaft eingetreten. Postnormalen Wissenschaften sind solche Wissenschaftsbereiche, in denen sich wissenschaftliche Erkenntnisse mit Meinungen und Ansichten vermischen.¹ Voraussetzung dazu ist ein breites Interesse der Öffentlichkeit an einem zunächst in der Wissenschaft beheimateten Themenkomplex. Dieses Interesse entsteht oft in Bereichen, in denen sich ein bisher als stabil wahrgenommener Zustand verändert, und sich über die möglichen (negativen) Auswirkungen dieser Veränderungen ein breiter Spekulationsspielraum eröffnet. Eine ähnlich emotional geführte öffentliche Diskussion ist z.B. im Bereich der Genforschung zu beobachten. In der öffentlichen Debatte können jedoch komplexe wissenschaftliche Erkenntnisse nur lückenhaft Berücksichtigung finden; die Belange und Bedürfnisse der Gesellschaft können in der Wissenschaft lediglich zeitversetzt Eingang und Berücksichtigung finden und so erst im Laufe der öffentlichen Debatte zur Verfügung stehen. Beide Bereiche haben also mit einer Form von fehlender Information umzugehen. Da die Öffentlichkeit kaum Zugriff auf Fachliteratur hat und diese auch nicht für den interessierten Laien auf Anhieb verständlich ist, wollen wir hier zumindest einen Überblick über den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum regionalen Klimawandel in Norddeutschland anbieten. Dabei stehen nicht ausschließlich die Zahlen und Statistiken im Mittelpunkt, sondern nach einer kurzen Einführung des Gegenstands „Klima“ zunächst der Inhalt und die Bedeutung von

Emissionsszenarien sowie eine Darstellung der „Unsicherheiten“, die methodisch den Klimasimulationen der Zukunft zueigen sind. Kommen wir dann zu den Ergebnissen, werden, etwas ausführlicher, mögliche Veränderungen von Sturmflutereignissen zum Ende dieses Jahrhunderts gezeigt, gefolgt von einer kurzen Übersicht erster Abschätzungen über mögliche Veränderungen in den Temperatur- und Windverteilungen sowie in den Niederschlagssummen. Hierbei wird sowohl der entfernte Zeithorizont zum Ende des Jahrhunderts berücksichtigt, als auch ein näher gelegener, um 2035.

2. Wechselhaftes Klima

Wenn wir von Klima² sprechen, dann meinen wir die Statistik der Zustände in der Atmosphäre, im Ozean und in anderen Komponenten des Klimasystems, wie etwa Meereis oder dem hydrologischen System in Flusseinzugsgebieten. Wir denken also etwa an die relativen Häufigkeiten von Temperaturen oder Windgeschwindigkeiten in der Atmosphäre, an Häufigkeiten von Strömungen und Wasserständen in Küstenmeeren oder Überschwemmungen in einem Flusseinzugsgebiet. Man bestimmt die Häufigkeiten aus den Daten einer Reihe von Jahren, in der bisherigen Praxis meist 30 Jahre, aber man kann natürlich auch kürzere oder längere Zeitintervalle wählen. Macht man dies für gleitende mehrjährige Intervalle, so erscheint das Klima langsam zeitveränderlich.

„Klima“ ist also keine statische Größe sondern eine variable Größe, die sich von Jahrzehnt zu Jahrzehnt, von Jahrhundert zu Jahrhundert usw. verändert. Dies geschieht aufgrund interner Dynamik im Klimasystem, d.h. spontan ohne einen spezifischen Grund, aber auch aufgrund von Veränderungen in der Sonnenleistung, in der Präsenz von vulkanischen Aerosolen in der Atmosphäre oder veränderten geologischen Bedingungen. Neuerdings tritt ein weiterer Faktor hinzu, nämlich der Einfluss des Menschen durch die Freisetzung von strahlungsaktiven Substanzen in die Atmosphäre, vor allem Treibhausgasen wie Kohlendioxid.

Tatsächlich hat sich das globale Klima seit der Mitte des 19. Jahrhunderts um ca. 0.7 Grad erwärmt, mit den stärksten Erwärmungen in den vergangenen 3 Jahrzehnten. Die „global gemittelte Temperatur“, abgeleitet aus Thermometermessungen, liegt seit 126 Jahren vor; in

¹ Vgl. Bray, D. and H. von Storch, 1999: Climate Science. An empirical example of postnormal science. Bull. Amer. Met. Soc. 80: 439-456

den letzten 16 Jahren lagen dabei die 12 wärmsten Jahre. Die Wahrscheinlichkeit für ein solches Ereignis ist, wenn keine systematische Erwärmung vorliegt, kleiner als ein Promille. Es ist also äußerst unwahrscheinlich, dass die jüngste Erwärmung Ausdruck normaler Klimawaschwankungen ist. Der 3. bzw. 4. Sachstandsbericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) findet einen breiten Konsensus in der Klimawissenschaft, dass ca. 2/3 der Erwärmung seit der vorindustriellen Zeit bis heute vom Menschen verursacht sei und nur 1/3 natürlichen Ursprungs .

Es ist plausibel, dass auch die meisten regionalen Temperaturänderungen so zu erklären sind, wie etwa der Anstieg der Jahresmitteltemperatur in Dänemark von ca. 7 Grad auf fast 8.5 Grad innerhalb der vergangenen 140 Jahre.

Es ist aber keinesfalls so, dass deshalb auch Änderungen in allen anderen Größen ebenfalls zu 2/3 menschengemacht seien. Insbesondere im Falle unserer „heimischen“ Stürme ist bisher keine Änderung auszumachen, die über die historischen belegten Schwankungen, die nichts mit menschlicher Aktivität zu tun haben, hinausgehen. Dies belegen Zeitserien von täglichen Barometermessungen, die teilweise bis zu Napoleons Zeiten zurückgehen.³ Leider behaupten Medien und interessengeleitete Gruppen immer wieder Gegenteiliges, was in der Öffentlichkeit gut ankommt, da es von der kulturell bedingten Wahrnehmung eines sich stets verschlechternden Klimas gestützt wird.

3. Über Modelle, Szenarien und die Unsicherheit der Zukunft

3.1 Modelle und Emissionsszenarien in den Klimawissenschaften

Unsere Klimamodelle⁴ können das gegenwärtige Klima, die historischen Klimaschwankungen und die geologische Vergangenheit einigermaßen gut darstellen, sofern man die „externen“ Randbedingungen vorgibt, also die Sonnenleistung, die atmosphärische

² Eine ausführlichere Darstellung der Aspekte des Klimas, der Klimavariabilität und der Klimamodellierung bietet das Lehrbuch 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

³ Barring, L. and H. von Storch, 2004: Northern European Storminess since about 1800. *Geophys. Res. Letters* 31, L20202, doi:10.1029/2004GL020441, 1-4

⁴ Klimamodelle sind keine statistischen Modelle, in denen eine Reihe von (Regressions-) Parametern so eingestellt werden, dass gewissen Beobachtungen reproduziert werden. Dies wird auch von naturwissenschaftlich sehr gebildeten Laien oft missverstanden. Vielmehr handelt es sich um dynamische Modelle, in denen die Änderung von Zustandsgleichungen über physikalisch motivierte Differentialgleichungen beschrieben werden. Dabei gibt es tatsächlich eine Reihe von Parametern, die in gewissen plausiblen Grenzen

Konzentration von Treibhausgasen etc. Diese Simulationen beschreiben das Klima, also die Statistik des Wetters in Atmosphäre, Ozean etc, mit zumeist befriedigender Zuverlässigkeit, die aber mit kleiner werdenden räumlichen Abmessungen geringer wird. Eine Aussage über die global gemittelte Temperatur zu erzielen in so einem Modell ist wesentlich einfacher als eine Aussage über den Niederschlag in z.B. Schleswig-Holstein. Der Erfolg nimmt weiter ab, wenn es nicht mehr um Mittelwerte geht sondern über Variabilität oder gar seltene Ereignisse, etwa Starkniederschlag oder heftige Windstürme. Die Situation hat sich aber in den vergangenen Jahren deutlich verbessert, seit dem so genannte Regionalmodelle besser mit räumlichen Details umgehen können.

Aufgrund dieser Möglichkeit einer einigermaßen realistischen Beschreibung der Gegenwart und Vergangenheit glaubt die Klimawissenschaft, dass solche Modelle auch qualifizierte Aussagen über mögliche Zukünfte machen können, sofern es denn gelingt, robuste Abschätzungen über die antreibenden Faktoren zu konstruieren, also vor allem zukünftige atmosphärische Konzentrationen von Treibhausgasen.

Ein wesentliches Problem ist die Abschätzung zukünftiger Freisetzungen von strahlungsaktiven Substanzen – denn diese Freisetzung hängt von sozio-ökonomischen Faktoren ab, die nicht alle wirklich vorhersagbar sind. Daher werden diese Entwicklungen in der Form von Szenarien antizipiert. Dies sind mögliche, plausible, in sich konsistente aber nicht immer sehr wahrscheinliche Entwicklungen. So erhält man eine Reihe alternativer Entwicklungen. Dieses Vorgehen erlaubt es abzuschätzen, welche Bandbreite an Folgen möglich und plausibel erscheinen, um abzuleiten, wie stark das Gegensteuern sein sollte und welcher Anpassungsdruck sich ergeben kann.

Solche Szenarien werden von wirtschaftswissenschaftlichen Gruppen angeboten. Dabei werden Aspekte wie Bevölkerungsentwicklung, Globalisierung und Innovationsgrad variiert – aber alle gehen von einem Anwachsen der klimarelevanten Gase in der Atmosphäre aus. Eine Reihe von Emissionsszenarien sind im „IPCC Special Report on Emissions Scenarios“ (SRES) veröffentlicht worden (Abbildung 1). Neben Veränderungen in den Emissionen beschreiben sie auch mögliche Entwicklungen 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,

frei sind. Dies sind aber verhältnismäßig wenige Parameter, so dass der Erfolg der Klimamodelle komplexe

A2 Eine sehr heterogene Welt, in der Familienwerte und lokale Traditionen große Bedeutung haben.

B1 Eine „dematerialisierte“ Welt, in der saubere Technologien eingeführt 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 marktbasierende Lösungen verfolgt werden, und dass private Haushalte auf hohe Sparleistungen und gute Ausbildung abzielen. Ein anderes Beispiel aus der B2-Gruppe 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 SRES Szenarien für die Emission von Kohlendioxid (in Gigatonnen Kohlenstoff) als wesentlichem Repräsentanten der Treibhausgase und von Schwefeldioxid (in Megatonnen Schwefel) als Repräsentanten für anthropogene Aerosole.

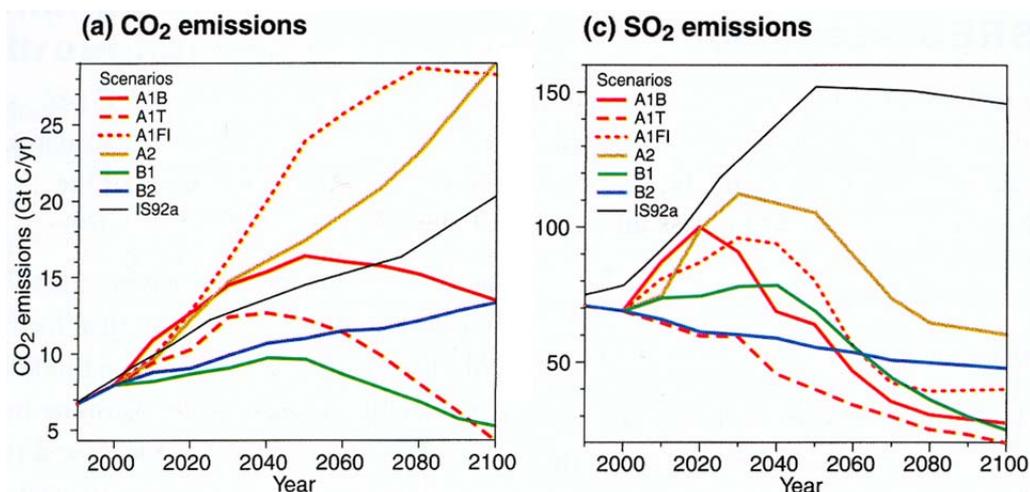


Abbildung 1: Szenarien für Emissionen von Kohlendioxid (als Beispiel für Treibhausgase, in Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr) sowie von Schwefeldioxid (repräsentativ für industrielle Aerosole; in Megatonnen Schwefel pro Jahr). A1, A2, B1 und B2 sind SRES Szenarien. IS92a ist ein früheres IPCC Szenario. Aus dem dritten Sachstandsbericht des IPCC (2001).

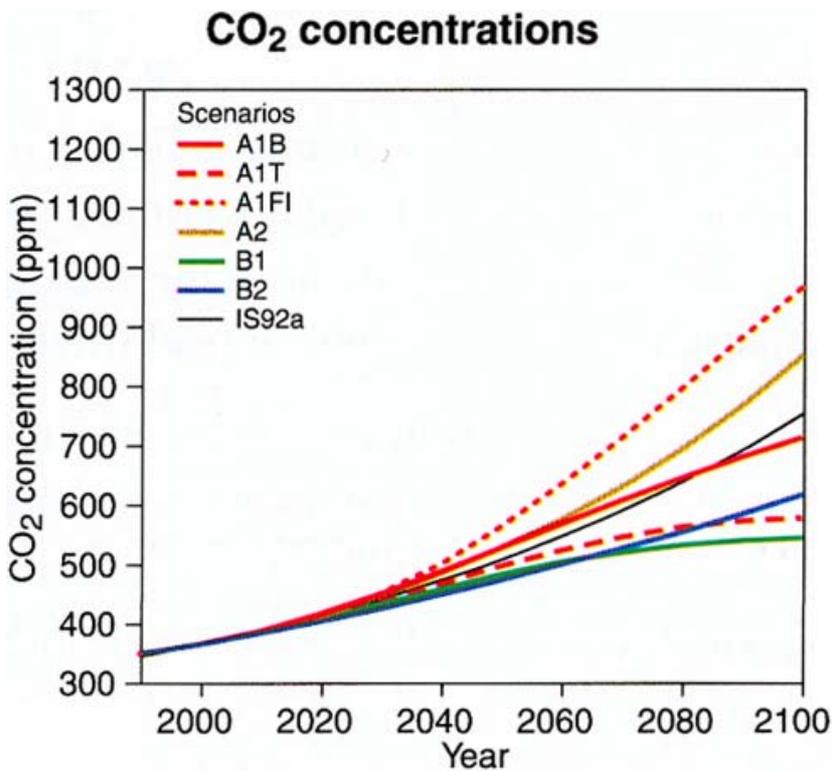


Abbildung 2: Atmosphärische CO₂-Konzentrationen, die sich aus den in Abbildung 1 vorgegebenen Emissionsszenarien ergeben. Aus dem Dritten Sachstandsbericht des IPCC (2001)

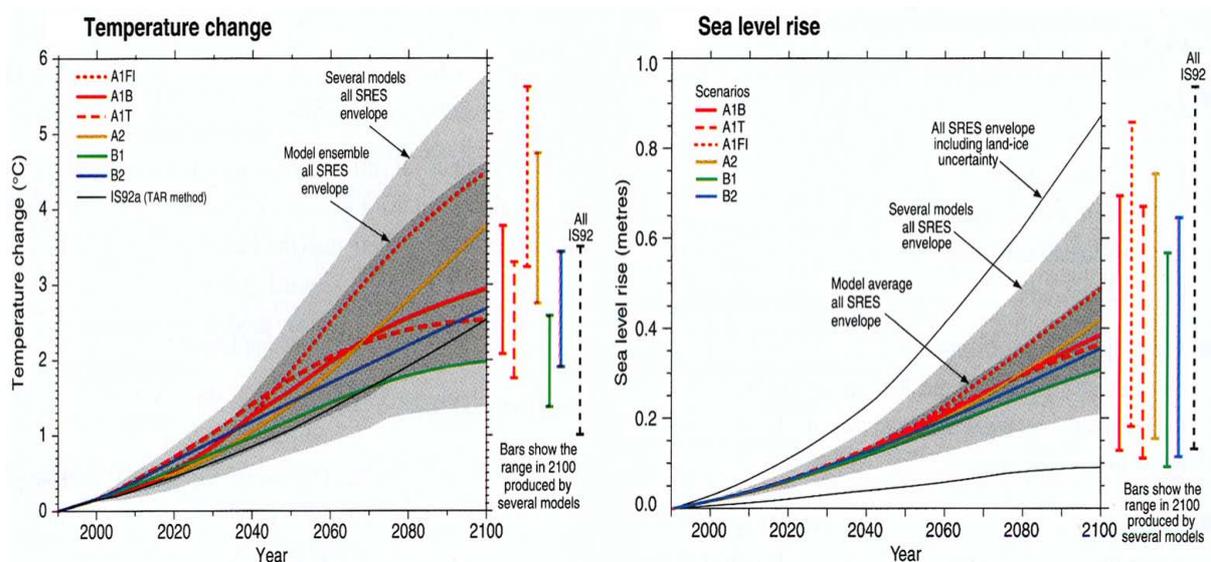


Abbildung 3: Modellberechnete Änderungen der global gemittelten Temperatur und des global gemittelten Wasserstandes, wenn die Konzentrationen aus Abbildung 2 zugrunde gelegt werden. Aus dem Dritten Sachstandsbericht des IPCC (2001)

Die eben skizzierten Emissionsszenarien werden umgerechnet in erwartete atmosphärische Konzentrationen (Abbildung 2). Die pessimistischen, aber durchaus plausiblen Szenario A1F1 und A2 beschreiben einen Zuwachs auf etwa das Dreifache der vorindustriellen Konzentration von Treibhausgasen zum Ende des 21. Jahrhunderts, während das optimistischere aber ebenso plausible Szenario B1 eine Erhöhung auf fast das Doppelte beschreibt (siehe Abbildung 1).

Mit diesen Konzentrationen als Vorgaben rechnen 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, Meeresoberflächentemperatur, Windgeschwindigkeit Bodentemperatur, Niederschlag, Salzgehalt im Ozean, Meereisbedeckung, usw.

Diesen Szenarien stetig erhöhter Treibhauskonzentrationen ist gemein, dass alle Klimamodelle aus ihnen eine generelle Erhöhung der Temperatur und der Wasserstände ableiten (Abbildung 3). Da diese Aussagen – Erhöhung der Temperatur und Wasserstand – unabhängig vom verwendeten Emissionsszenario sind, werden sie zur Vorhersage, während die Intensität dieser Erhöhung Szenarien, also plausible alternative Möglichkeiten, bleiben.

3.2. Unsicherheiten in den Projektionen

Die Durchführung von Klimasimulationen unter angenommenen zukünftigen Treibhausgas-Konzentrationen kann nicht zu einem eindeutigen Ergebnis führen: Es gibt unterschiedliche Quellen von Unsicherheiten, die bei der Interpretation zu berücksichtigen sind. Diese quantitativen Unsicherheiten in den Ergebnissen führen zu einer Bandbreite möglicher und plausibler Ergebnisse.

Die Klimamodelle: Die Modelle werden fortlaufend weiterentwickelt und verbessert. Einige Klimavariablen können dabei erfolgreicher berechnet werden (z.B. Temperatur) als andere, wie z.B. Windgeschwindigkeiten über Land oder Niederschlag über stark gegliedertem Gelände. Auch die Anwendung von Klimamodellen unterschiedlicher ‚Bauart‘ führt zu einer quantitativen Bandbreite in der Abschätzung des möglichen Klimawandels.

Die Emissionsszenarien: Der Anteil klimawirksamer Gase, wie z.B. CO₂ oder Methan, in der Atmosphäre wird unter anderem aus der zukünftigen Entwicklung von Bevölkerungszahlen, der wirtschaftlichen und technologischen Entwicklung auf regionaler und globaler Ebene abgeleitet. Werden unterschiedliche Annahmen (Szenarien) zugrunde gelegt, ergibt sich ebenfalls eine Spannbreite. Dabei sind die Annahmen in sich plausibel,

aber mit sehr großen Unsicherheiten bezüglich ihres Eintretens behaftet. Über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens kann heute keine quantitative Aussage getroffen werden.

Klimavariabilität: Die dritte wichtige Quelle von Unsicherheit in den Modellsimulationen bezieht sich auf die natürlichen Schwankungen des Klimas. Werden Klimagrößen mit z.B. dekadischer Variabilität betrachtet, ist diese Schwankung selbst in längeren „Zeitscheibenexperimenten“, wie bisher üblich von z.B. 30 Jahren, nicht vollständig berücksichtigt. Um diese Unsicherheit zu vermindern, werden (rechenintensive) Modellläufe über 100 oder mehr Jahre erstellt. Es werden derzeit diesbezügliche Anstrengungen unternommen, etwa am Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg (DKRZ).

Es ist nicht möglich, die durch die Unsicherheiten bedingten Bandbreite sicher zu ermitteln, da manche Quellen der Unsicherheiten nicht ausreichend bekannt sind oder gar sein können. Auf Grund dieser in den Projektionen der Zukunft liegenden Unschärfe, ist es erforderlich, für eine aussagekräftige Abschätzung möglicher Reaktionen des Klimas auf den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen möglichst unterschiedliche ‚Antworten‘, zu berücksichtigen. Durch Kombination von unterschiedlichen Emissionsszenarien und Klimamodellen, erhält man eine Bandbreite, in der sich die Änderungen physikalisch plausibel befinden können.

4. Regionaler Klimawandel Norddeutschland

Im Folgenden beschreiben wir, welche Konsequenzen für Norddeutschland sich aus den beiden Emissionsszenarien A1 und B2 (Abbildung 1) „plausibel“ ergeben, also in Szenariorechnungen mit einer Kaskade von globalen und regionalen Klimamodellen und in Sturmflutmodellen für die Nordsee herauskommen. Dazu wird auf ein kleines Simulationsensemble aus vier unterschiedlichen Klimaprojektionen zurückgegriffen.⁵ Die regionalen Klimadaten wurden vom schwedischen Rossby Center innerhalb des EU Projektes „PRUDENCE“ erstellt⁶. Dabei wurden je zwei unterschiedliche Emissionsszenarien (SRES A2 und SRES B2; siehe Abbildung 1) berücksichtigt. Die für die Regionalmodellierung methodisch benötigten globalen ‚Randwerte‘, über die die Information über die groß-skalige

⁵ 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? *Geophys Res Lett*: 32, L22708, doi: 10.1029/2005GL023762

⁶ Christensen, J.H., T. Carter, F. Giorgi, 2002: PRUDENCE employs new methods to assess european climate change, *EOS*, Vol. 83, p. 147.

atmosphärische Zirkulation weitergegeben wird, stammen von zwei unterschiedlichen globalen Klimamodellen (Hadley Center Modell, HadAM3H sowie das des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie, ECHAM4/OPYC3). Für die Analysen stehen zwei 30 Jahre umfassende Zeiträume zur Verfügung. Der erste Zeitraum (sog. Kontrolllauf) umfasst den Zeitraum 1961 bis 1990 und ist repräsentativ für das heutige Klima. Der zweite Zeitraum umfasst die Jahre 2071 - 2100 und repräsentiert die möglichen Zukünfte. Die Änderungen werden jeweils relativ zu dem Kontrolllauf berechnet.

Auf diese Weise werden Wetterabfolgen erzeugt, wie sie charakteristisch sein können für das von erhöhten Treibhausgaskonzentrationen beeinflusste Klima zum Ende des 21ten Jahrhunderts. Die dabei stündlich vorliegende Winde und Luftdrücke werden auf einem Gitter mit einer Kantenlänge von ca. 50 km an ein hydrodynamisches Modell der Nordsee „weitergereicht“, das daraus Strömungen und Wasserstände, also auch Sturmwaterstände berechnet.

Dies hydrodynamische Modell reagiert nur auf die veränderten atmosphärischen Zustände; der im Mittel erhöhte Meeresspiegel wurde in diesen Rechnungen nicht an das hydrodynamische Modell hindurchgereicht, weil man glaubt, dass der Effekt der veränderten Meteorologie und der erhöhten Füllung der Nordsee sich addieren.⁷

4.1 Mögliche Veränderung von Sturmflutereignissen

An der Nordseeküste tritt infolge der astronomischen Tide in etwa alle 12 Stunden und 25 Minuten eine Erhöhung des mittleren Wasserspiegels ein: die Flut. Um von einer Sturmflut zu sprechen, müssen zusätzlich spezielle meteorologische Bedingungen eintreten. Bei Wetterlagen mit über einige Stunden andauernden hohen Windgeschwindigkeiten aus westlichen Richtungen werden infolge des Windstresses zusätzliche Wassermassen an die Küste getrieben und führen, als sog. Windstau, zu einer Wasserstandserhöhung. Der Windstau verhält sich umgekehrt proportional zur Wassertiefe, damit laufen insbesondere an flachen Küstenabschnitten die Wassermassen hoch auf. Die eigentliche Sturmfluthöhe ergibt sich aus dem Zusammentreffen (der Addition) von Windstau und der Tidephase. So sind hohe Sturmfluten dann zu erwarten, wenn hoher Windstau über einige Stunden anhält und damit auch zum Zeitpunkt des eintretenden astronomischen Tidehochwassers bestand hat.

⁷ Kauker, F., 1998: Regionalization of climate model results for the North Sea. PhD thesis University of Hamburg, 109 pp., GKSS 99/E/6

Der Wasserstand an einem bestimmten Ort hängt also von folgenden Komponenten ab: dem mittleren Meeresspiegel, der das Volumen des Wassers der weltweiten Meeresbecken widerspiegelt, von den regionalen Windverhältnissen, die die Windstauereignisse hervorrufen, den astronomischen Gezeiten sowie der regionalen Küstenmorphologie. Damit hängt die Entwicklung zukünftiger Sturmfluten im Wesentlichen von dem Ausmaß des Anstiegs des mittleren Meeresspiegels sowie der Charakteristik möglicher Änderungen der lokalen Windstatistik ab.

Daneben spielen an der Küste und den Ästuaren⁸ auch Änderungen in den morphologischen Begebenheiten eine Rolle, z.B. infolge des Ausbaggerns von Fahrrinnen für die Schifffahrt.⁹ Aktuell wird gerade geprüft in wie weit der umgekehrte Vorgang, nämlich der einer künstlichen Ablagerung von Sediment im Mündungsbereich der Elbe, das Sturmflutrisiko flussaufwärts bis Hamburg senken könnte, also rückführbar macht.¹⁰ All diese Eingriffe in die Küstenmorphologie haben daneben aber auch den Effekt, dass an den meisten Küsten- und Flusspegeln nicht ausschließlich die natürlichen Schwankungen im Wasserstandes abzulesen sind, sondern eine Überlagerung des Signals durch diese technischen Eingriffe erfolgt. So gibt es kaum noch „homogene“, also ungestörte Pegelaufzeichnungen, was eine Interpretation speziell im Kontext des erwarteten Anstiegs des Wasserspiegels erschwert und leicht zu falschen Schlüssen führen kann.

Tektonische Hebungen bzw. Senkungen von Landmassen sind weitere Prozesse, die unabhängig vom anthropogenen Klimawandel die Höhe des (relativen) Meeresspiegels beeinflussen können. Im Bereich der Deutschen Bucht sinken die Landmassen - verbunden mit einem relativen Anstieg des Meeresspiegels - seit dem Ende der letzten Eiszeit in einer Größenordnung von ca. 10 -15 cm/100 Jahre.

Erhöht sich also der mittlere Meeresspiegel durch die thermische Ausdehnung und das Abschmelzen von Inlandeis wird von einer Erhöhung des Scheitels zukünftiger Sturmflutwasserstände in etwa um die gleiche Größenordnung gerechnet. Heutige

⁸ Tidebeeinflusste Mündungsbereiche der Flüsse, etwa die Elbe von Geesthacht bis Cuxhaven.

⁹ Wyrski, K., 1993: Global sea level rise. Proc. *Circum-Pacific Int. Symp. Earth Environment*, National Fisheries Univ. Pusan, Pusan. D. Kim und Y. Kim, Hrsg., 215-226.

¹⁰ Siehe den „Diskussionsbeitrag“ der Hamburg Port Authority und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes „Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg“ (http://www.tideelbe.de/pdf/Strategiepapier_Tideelbe_deu.pdf). Dazu auch: von Storch, H. and K. Woth, 2008: Storm surges, perspectives and options. *Sustainability Science* Vol.3 No.1

Schätzungen¹¹ gehen von einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels um ca. 50 cm (A2 Szenario) bzw. 45 cm (B2-Szenario) bis zum Ende dieses Jahrhunderts aus. Regional kann diese Zahl variieren. Randmeere, wie die Nordsee, können infolge Änderungen der Dichte sowie Änderungen in der Zirkulation einen überproportionalen, d.h. im Vergleich zum globalen Mittel, höheren Anstieg zeigen. Für die Nordsee ist ein zusätzlicher Anstieg von 10 bis 15 cm berechnet wurden.¹² Für diese Simulation wurde ein Emissionsszenario verwendet, das in seiner Intensität etwa zwischen denen von B2 (Verdopplung der vorindustriellen atmosphärischen CO₂ Konzentration) und A2 (Verdreifachung) liegt.

Das Abschmelzen von Teilen des Grönländisches Eisschildes ist, was die Abschätzungen des Anstiegs des mittleren globalen Wasserstands betrifft, die größte Quelle von Unsicherheit. Bei einem vollständigen Abschmelzen des Eisschildes ist mit einem zusätzlichen Betrag von bis zu 6-7 m zu rechnen. Diese Größenordnung ist aber nicht auf der Zeitskala von einigen Dekaden sondern auf der einiger Jahrhunderte zu erwarten und setzt voraus, dass es keine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen geben wird.

Für mögliche Änderungen des Windstaus, sind hauptsächlich die bodennahen Windcharakteristika entscheidend. Die Klimaprojektionen zukünftiger Emissionsszenarien weisen auf einen Anstieg in den hohen Windgeschwindigkeiten regional über dem Gebiet der Nordsee hin. Abb. 4 zeigt die prozentuale Veränderung der bodennahen Windmaxima für Wintermonate aus einer globalen Modellsimulation des Hadley Centers für den Nordatlantik, den europäischen Raum sowie Nordafrika. Für die Nordsee und weite Teile Europas werden die bodennahen Starkwinde nach dieser Simulation zum Ende des Jahrhunderts um zwischen 5% und 10% zunehmen. In m/s ausgedrückt entspricht dies einer Zunahme von bis zu 2 m/s, verglichen zu heute.

Nimmt man einen linearen Anstieg dieser Größe über die Zeit an, was zu einer anfänglichen Überschätzung des Effekts führt, dann haben wir einen Anstieg von knapp 1% der Geschwindigkeiten von Starkwinden pro Jahrzehnt, also ein derzeit sehr schwaches Signal, das unterhalb der Nachweisgrenze liegt. Demnach ist es stimmig, wenn wir derzeit

¹¹ Siehe IPCC Bericht 2007 - Solomon, S., D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M.M.B. Tignor, H. Le Roy Milller Jr. And Z. Chen (eds), 2007: *Climate change 2007. The physical basis*. Cambridge University Press, 996 pp.

¹² Landerer, F.W.; J. H. Jungclaus and J. Marotzke, 2007: Regional dynamic and steric sea level change in response to the IPCC-A1B scenario, *J. Phys. Oceano.* 37, 296-312

kein nachweisbares, dem anthropogenen Klimawandel zuzuordnenden Signal im Wind finden können.¹³

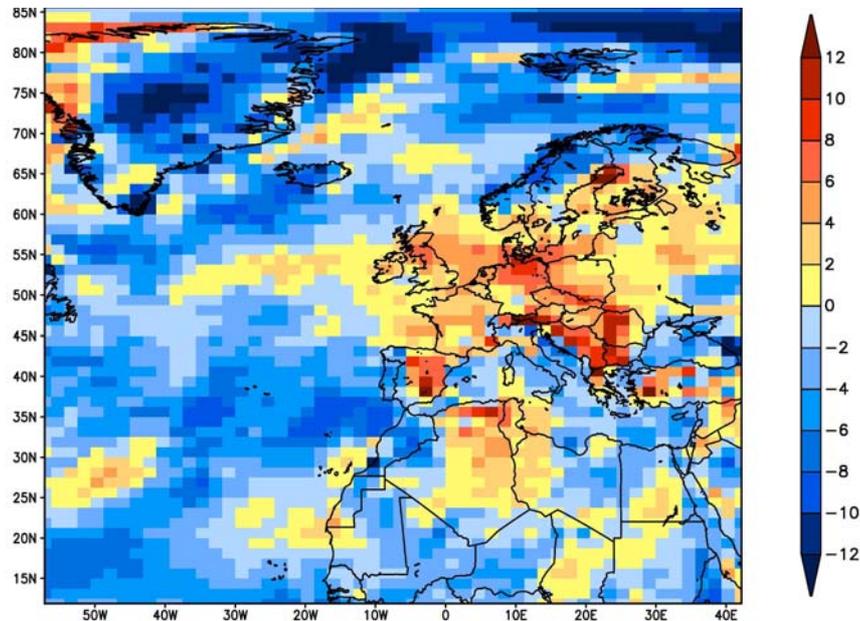


Abb. 4: Änderung der Starkwindereignisse in Prozent für Wintermaxima im Szenario A2 zum Ende des 21ten Jahrhunderts (Änderungen von 2071 – 2100 gegenüber 1961 – 1990).

Daten: Hadley Center.

Wie wirkt sich nun Anstieg in den hohen Windgeschwindigkeiten auf die Windstauhöhen aus? Abb. 5 stellt die simulierten Änderungen der (langjährlich gemittelten) jährlichen maximalen Windstauhöhen (Farbskala) im Vergleich zum heutigen Sturmflutklima (Isolinien) dar. Es zeigt sich, dass alle vier Simulationen ein sehr ähnliches Muster aufweisen: speziell an den kontinentalen Küsten ist ein deutlicher Anstieg von bis zu 30 cm in den jährlichen Maxima zu erwarten. Dies entspräche einem Anstieg um ca. 30% bezogen auf die heutigen

¹³ Für Laien ist die Behauptung überraschend, dass es bisher keine anthropogen bedingte Veränderungen des Sturmklimas in unseren Breiten geben soll – wird dies doch in den Medien und in der Politik immer wieder behauptet. Die Wissenschaftliche Literatur ist in dieser Hinsicht jedoch eindeutig; wenn man einen genügend langen Zeithorizont von 100 und mehr Jahren berücksichtigt, erscheinen die Änderungen der letzten Jahrzehnte nicht auffällig. Für einen Überblick, siehe: von Storch, H., and R. Weisse, 2008: Regional storm climate and related marine hazards in the Northeast Atlantic, In Diaz, H.F. and Murnane, R.J. (eds.), *Climate Extremes and Society*, Cambridge: Cambridge University Press (in press); eine aktuelle Arbeit zu dem Thema ist Matulla, C., W. Schöner, H. Alexandersson, H. von Storch, and X.L. Wang, 2007: European Storminess: Late 19th Century to Present, *Climate Dynamics* DOI 10.1007/s00382-007-0333-y. Tatsächlich hat es einen deutlichen Anstiege der Temperaturen in unserer Region gegeben, das Sturmklima

Werte. Die vier Projektionen erlauben statistisch keine Unterscheidung der Emissionsszenarien¹⁴. Das heißt, für die Entwicklung der Sturmfluthöhen macht es keinen (statistisch) messbaren Unterschied, ob nun die Treibhausgaskonzentration ‚nur‘ bis auf ein B2 Level steigt, oder gar das A2 Niveau erreichen würde.

Was bedeutet das konkret: Die maximale Windstau bei einem Sturmflutereignisses in Cuxhaven (in einem durchschnittlichen Jahr), beträgt heute ca. 2m (Wasserstand ohne Tideanteil). Für das Ende diesen Jahrhunderts wird mit einer Erhöhung um 30 cm gerechnet. Zuzüglich eines Anstiegs im mittleren Meeresspiegel um ca. 40 cm, würden sich deutlich höhere Sturmflutwasserstände ergeben.

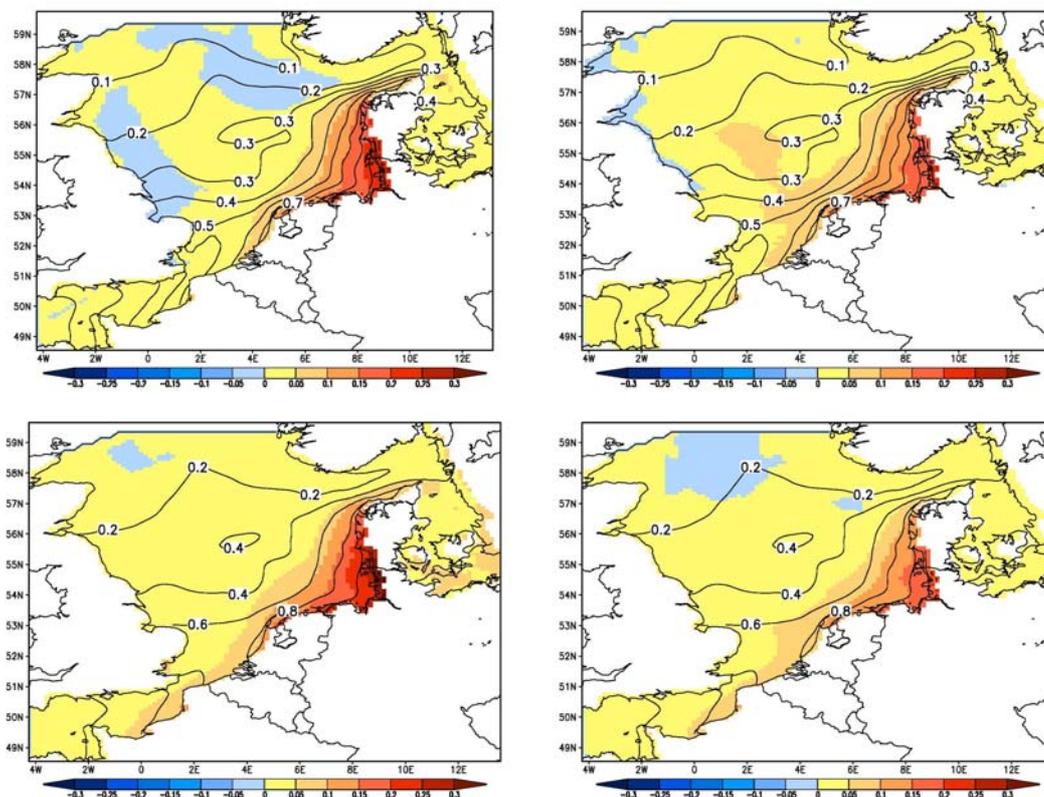


Abb.5: Erwarteter Effekt veränderter Sturmtätigkeit über der Nordsee auf die Windstauhöhen. Atmosphärischer Antrieb: Zwei unterschiedliche SRES Emissionsszenarien: Spalten: B2- (links Spalte) und A2- (rechte Spalte). Zwei globale Klimamodelle (Zeilen). Regionalisiert wurde die globale Atmosphäre mit dem regionalen Atmosphärenmodell des SMHI (Schwedisches Institut für Hydrologie und Meteorologie). Das Sturmflutmodell der

dagegen zeigt keine nennenswerten Veränderungen (vgl. auch The BACC author team, 2008: *Assessment of Climate Change in the Baltic Sea Basin.*, Springer Verlag Berlin - Heidelberg - New York)

¹⁴ Woth 2005, a.a.O

GKSS berechnet aus der regionalisierten Atmosphäre schließlich die Wasserstände. Dargestellt ist die Änderung im langjährigen Maximum (Farbskala) im Vergleich zum heutigen Sturmflutklima (Isolinien). Einheit: Meter.

Neben einem Anstieg der absoluten Höhen ist zum Ende dieses Jahrhunderts aber auch mit einer Erhöhung der Andauer der Sturmfluten im Bereich der Deutschen Bucht zu rechnen.¹⁵ Hoher Windstau würde dann in der Deutschen Bucht und der Dithmarschener Küste nicht wie bisher im Mittel 7 bis 8 Stunden am Deich stehen, sondern 2 bis 3 Stunden länger. Dies erhöht zum einen die Chance des Zusammentreffens eines hohen Windstauereignisses mit dem Gezeitenmaximum, und somit einer tatsächlichen Sturmflut. Zum anderen erhöht sich die Belastungsdauer der Deiche.

4.2 Projektionen auf die Temperaturen Wind und Niederschlag für das norddeutsche Tiefland

Die Modellsimulationen erlauben auch Aussagen über mögliche und plausible Zukünfte in Bezug auf andere meteorologische Größen; wir zeigen hier Ergebnisse für die Temperatur, saisonale Niederschlagsmengen und Starkwinde – jeweils für Winter und Sommer.¹⁶

Abbildung 6 zeigt jeweils die höchsten, die niedrigsten sowie die aus den vier Projektionen resultierenden mittleren Änderungen gegenüber den heutigen Verhältnissen. Der Wert repräsentiert als räumliches Mittel das norddeutsche Tiefland dar und somit Teile Schleswig-Holsteins, Niedersachsens, sowie Bremen und Hamburg. Eine feinere Auflösung, in der etwa zwischen Kiel und Bremen unterschieden werden könnte, ist unter dem Aspekt der Interpretationsfähigkeit derzeit nicht sinnvoll.¹⁷ Um Änderungen auch für eine etwas nähere Zukunft (2035) zu quantifizieren, wird eine Interpolation in Anlehnung an den global erwarteten Temperaturanstieg vorgenommen. Dies entspricht einer Quote von etwa 30% der bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwarteten Klimaänderung.

Die Änderung der Temperatur wird unterschieden nach mittlerer Tages-Temperatur, Minimum-Tages-Temperatur und Maximum-Tages-Temperatur. Die Modellsimulationen

¹⁵ Woth, K., R. Weisse and H. von Storch, 2005: Dynamical modelling of North Sea storm surge extremes under climate change conditions - an ensemble study. Ocean Dyn. DOI 10.1007/s10236-005-0024-3

¹⁶ Winter wird hier verstanden als die Zeit Dezember bis März, Sommer als Juni – August.

¹⁷ Dazu müssten die verwendeten atmosphärischen Modelle ein feineres Gitternetz verwenden; tatsächlich werden am Deutschen Klimarechenzentrum DKRZ in Hamburg neue Szenarienrechnungen durchgeführt, die eine höhere räumliche Auflösung erlauben; in Anbetracht der unvermeidlichen Unsicherheiten (siehe Abschnitt 3.2) sind aber der Beschreibung räumlichen Details auf absehbare Zeit doch Grenzen gesetzt.

zeigen für diese Größen eine einheitliche Tendenz, nach der auch lokal mit einer deutlichen Temperaturzunahme zu rechnen ist. Sowohl im Sommer (rechts) als auch im Winter (links) liegt der erwartete Anstieg bei um +1 °C (2025/35). Bis zum Ende des Jahrhunderts werden Änderungen von im Mittel +3 °C erwartet, mit Änderungen der maximalen Temperatur um bis zu über +5 °C im Sommer und Änderungen bis zu +4 °C im Winter.

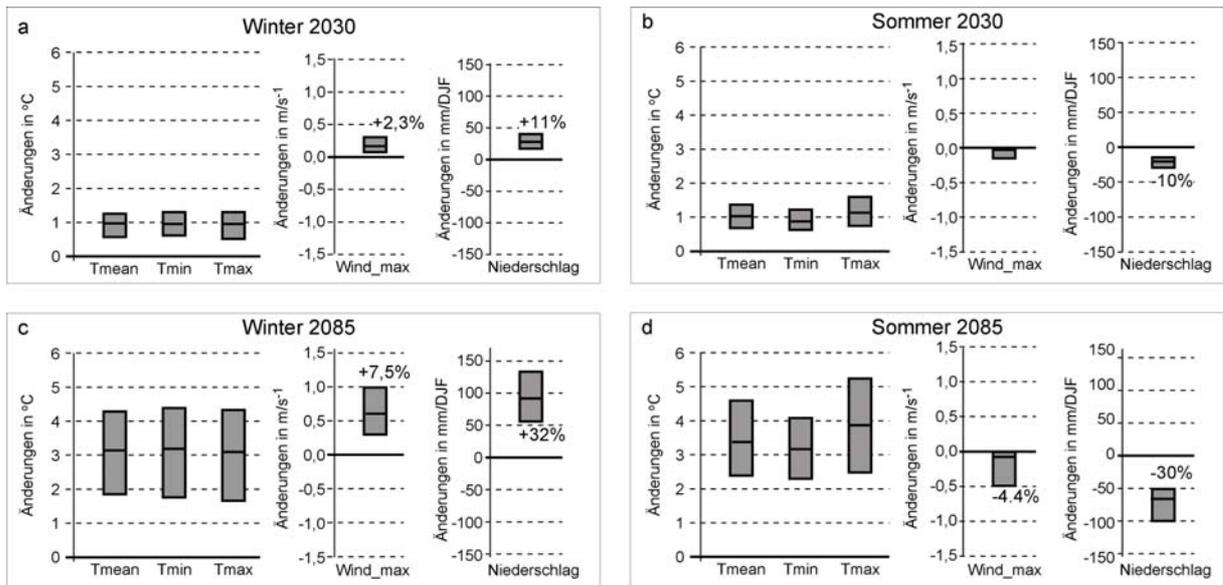


Abbildung 6: Szenarien von Änderungen der Temperatur (Monatsmittel, Minimum und Maximum), maximaler Windgeschwindigkeit sowie der monatlichen Summe der Niederschläge und basierend auf Monatsmitteln. Angegeben ist jeweils der kleinste, der größte und der mittlere Wert, abgeleitet aus den vier unterschiedlichen Klimamodellsimulationen. Mittelwerte der Region Schleswig-Holstein, Hamburg und Niedersachsen

Die simulierten Änderungen der hohen, bodennahen Windgeschwindigkeiten zeigen ein entgegengesetztes Bild für Sommer- und Wintermonate. Änderungen der hohen Windgeschwindigkeiten werden generell erst zum Ende dieses Jahrhunderts deutlich. Im Sommer wird mit einer schwächeren Abnahme um ca. -4 bis -5% (rechts) gerechnet, im Winter (links) mit einer moderaten Zunahme um im Mittel +7,5% (bis +10%).

Die Niederschlagstätigkeit könnte in zwei bis drei Dekaden im Sommer um 10% fallen und im Winter um die gleiche Menge (im Mittel) steigen. Für das Ende des 21ten Jahrhunderts steigen diese Schätzungen auf je 30% Ab- bzw. Zunahme. Letzteres bedeutet in absoluten Zahlen ausgedrückt, dass in den drei Sommermonaten zusammen zwischen 55 mm

und 135 mm weniger Niederschlag und in den drei Wintermonaten im Mittel 50 mm bis 100 mm mehr Niederschlag erwartet wird. Über das gesamte Jahr wird in den Modellsimulationen mit einer Zunahme des Niederschlags gerechnet, je nach globalem Antrieb im Frühling oder in den Herbstmonaten deutlicher. Hier zeigen die Modelle in unterschiedliche Richtungen.

5. Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Mit regionalen Klimamodellen sind diverse globale Klimaänderungssimulationen für Europa regionalisiert worden. Dabei stellte sich heraus, dass bei gleichem globalem Antriebsmodell die verschiedenen Regionalmodelle viele Aspekte einer zukünftigen Entwicklung ähnlich beschreiben.¹⁸ 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.

Die Mehrzahl der heute verfügbaren Klimamodelle lassen zum Ende diesen Jahrhunderts eine Verschiebung von einem gemäßigten Küstenklima hin zu einem mehr südeuropäischen Klimatyp erwarten. Dies gründet auf einer Erwärmung zu allen Jahreszeiten und abnehmenden Niederschlägen im Sommer sowie zunehmenden Niederschlägen in den übrigen Jahreszeiten. Außerdem ist mit einer Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs gerechnet, etwas höhere Windgeschwindigkeiten gelten auch als wahrscheinlich.

Die Szenarien sind mit einer gehörigen Portion Vorbehalt zu verwenden – es handelt sich eben um Szenarien, also mögliche, plausible Zukünfte und nicht um Vorhersagen. Dieser grundsätzliche Vorbehalt geht oft bei der öffentlichen Kommunikation von Resultaten der Klimaforschung verloren. Wir geben auch Unschärfen an, die die Bandbreite darstellen, die durch die Verwendung verschiedener sozio-ökonomischer Szenarien (also: Freisetzung von Treibhausgasen) und die Verwendung verschiedener Klimamodelle entsteht.

Die Szenarien sind für Praktiker in Landwirtschaft und Küstenschutz, Tourismus und Stadtplanung sicher nützlich – in der Form von Randbedingungen für Planungen gerade von Anpassungsmaßnahmen in der Zukunft. Aber man sollte diese Szenarien nicht naiv interpretieren, das es sichere Zukünfte seien oder dass man die Folgen eines derart geänderten

¹⁸ Déqué, M., D.P. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J. H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro, and B. van den Hurk, 2006: An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections, *Climate Change*, 10.1007/s10584-006-9228-x

Klimas einfach bestimmen könnte, in dem man heutige Verhältnisse zugrunde legt. Vielmehr kann man mit Sicherheit davon ausgehen, dass parallel zu den sich verändernden Klimas auch alle anderen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Bedingungen und auch die Umweltbedingungen sich ändern werden – so dass jedes Überlegen über Wirkungen und Anpassungen auch diese anderen Veränderungen mit berücksichtigen muss. Dies übersteigt klar die Kompetenzen der Klimaforschung. Daher entsteht eine inter- und sogar transdisziplinäre Klimaforschung, in der gerade auch Küsteningenieurwesen ebenso wie Agrarexperten gefragt sind.

Die Nützlichkeit der Szenarien besteht im wesentlichen darin, schon jetzt die Fragen von morgen zu formulieren – dies werden im wesentlichen Fragen der Anpassung an jenen Klimawandel sein, der nicht mehr vermeidbar ist, ungeachtet aller Klimaschutzmaßnahmen.¹⁹ Insbesondere geht es darum, die der Gesellschaft verfügbaren Optionen auszuloten.²⁰ Dies muss im Zusammenspiel von Praktikern in Behörden, Politik und Wirtschaft und von Klimaforschern geschehen. Das Institut für Küstenforschung bei der GKSS hat zu diesem Zwecke das „Norddeutsche Klimabüro“ eingerichtet.²¹ Dies Büro schlägt die Brücke zwischen den beiden Gruppen, in dem es Informationen in beide Richtungen ermöglicht. Die Wissenschaft muss wissen, welche Fragen gestellt werden, welche Sorgen herrschen, während die Praktiker verstehen müssen, welche Szenarien es gibt, wie belastbar diese sind.

Rockel, B., and K. Woth, 2007: Future changes in near surface wind extremes over Europe from an ensemble of RCM simulations. *Climate Change*, 10.1007/s10584-006-9227-y <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9227-y>

¹⁹ von Storch, H., und N. Stehr, 2007: Anpassung an den Klimawandel. Aus *Politik und Zeitgeschichte* 47/2007, 19.11.2007; <http://coast.gkss.de/staff/storch/pdf/APuZ47-2007.pdf>

²⁰ Für den Fall des Küstenschutzes gab es dazu unlängst eine nützliche Diskussion „Land aufgeben zum Schutz der Küste?“ mit Beiträgen von Karsten Reise, Johannes Oelerich und Hans von Storch in „Nordfriesland“ Nr. 159, S. 23-25 und Nr. 160, 31-32

²¹ <http://coast.gkss.de/service/regionalbuero/>
Meinke, I., and H. von Storch, 2007 The North German Climate Office – an interface between science and practice, Proc. 8. Forum DKKV/CEDIM: Disaster Reduction in Climate Change 15./16.10.2007, Karlsruhe University