

Klimaänderung und Klimafolgen in Hamburg

Fachlicher Orientierungsrahmen

PD Dr. Achim Daschkeit

Dipl.-Geogr. Anna Luisa Renken

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 2.1 Klimaschutz
KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau
Postfach 1406, 06813 Dessau

Tel.: 0340 2103-2993
achim.daschkeit@uba.de

Tel.: 0340 2103-2229
anna-luisa.renken@uba.de

Dessau, November 2009

im Auftrag der
Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
der Freien und Hansestadt Hamburg

Inhalt

Zusammenfassung	4
1 Problemstellung und Zielsetzung	5
2 Klimaänderung	6
2.1 Beobachtete Klimaänderung	6
2.1.1 Temperatur	6
2.1.2 Niederschlag	7
2.1.3 Wind	8
2.2 Regionale Klimamodellierung	8
2.2.1 Statistische Modelle	9
2.2.2 Dynamische Modelle	9
2.3 Zukünftige Klimaänderung	10
2.3.1 Temperatur	11
2.3.2 Niederschlag	12
2.3.3 Wind	14
2.4 Tideelbe und Klimawandel	15
2.5 Umgang mit Unsicherheiten	17
3 Klimafolgen für Hamburg	19
3.1 Klimafolgen für die einzelnen Handlungsfelder	19
3.1.1 Küsten- und Hochwasserschutz	19
3.1.2 Wasserwirtschaft	21
3.1.3 Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz	22
3.1.4 Menschliche Gesundheit	26
3.1.5 (Hafen-) Wirtschaft, Energie und Tourismus	26
3.1.6 Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen und Infrastruktur	26
3.1.7 Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst	27
3.2 Schlussfolgerungen	27
4 Projekte und Gutachten zu Klimafolgen und Anpassung	29
4.1 Abgeschlossene Projekte/Gutachten	29
4.2 Geplante laufende Projekte/Gutachten	30
5 Literatur	31
6 Anhang	35
Basisdaten zur Temperaturänderung	35
Basisdaten zur Niederschlagsänderung	36
Kenntage	37

Zusammenfassung

Der „Fachliche Orientierungsrahmen“ beschreibt auf der Basis vorliegender wissenschaftlicher Erkenntnisse den zu erwartenden Klimawandel sowie die Folgen, die sich aus veränderten Klimabedingungen für die Region Hamburg ergeben. Der Orientierungsrahmen dient als eine Grundlage für die Hamburger Anpassungsstrategie und soll Einzelplanungen von Hamburger Behörden und öffentlichen Unternehmen koordinieren. Dabei werden zwei Planungsszenarien ausgearbeitet, die die zu erwartenden Klimaänderungen für Hamburg beschreiben. Für die Hamburger Anpassungsstrategie empfehlen wir aus Gründen der Vorsorge die Betrachtung eines „mittleren“ und eines „ungünstigen“ Szenarios, denn: Die beobachteten CO₂-Emissionen der vergangenen knapp 20 Jahre liegen an der oberen Grenze der Emissions-Szenarien des Weltklimarates (IPCC), so dass für die Zukunft mit einer eher stärkeren Klimaänderung zu rechnen ist. Für relevante klimatische Parameter (Temperatur, Niederschlag, Wind, etc. sowie Kenntage) wird eine Spannbreite an Werten genannt, die den Behörden und öffentlichen Unternehmen das Spektrum aufzeigt, in dem Klimaänderungen und Klimafolgen zu erwarten sind. Die Wertespanne künftiger Klimaänderungen ergibt sich u. a. aus der Tatsache, dass Ergebnisse verschiedener regionaler Klimamodelle (REMO, COSMO-CLM, RCAO, WettReg und STAR) in die Auswertung einfließen. Die Unvorhersehbarkeit der künftigen Emissionsentwicklung sowie die Tatsache, dass für die Beschreibung von Klimaänderungen in der Region Hamburg mehrere Klimamodelle zu Rate gezogen werden können, sind zwei wesentliche Gründe für die Angabe von Wertespannen – trotz dieser Unsicherheit ist die Basis für die Ableitung von Strategien und Maßnahmen zur Klimaanpassung hinreichend.

Ausgehend vom mittleren Szenario muss die Metropolregion Hamburg bis 2050 vermutlich mit einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur von 1,0 - 1,4 °C, verglichen mit 1961-1990, rechnen. Das ungünstige Szenario geht von einem Temperaturanstieg von bis zu 1,8 °C bis 2050 aus. Ohne weitere Maßnahmen zur globalen Treibhausgasmindeung wird in Hamburg bis 2100 die Jahresmitteltemperatur voraussichtlich um 2,8 - 3,8 °C (mittleres Szenario) bzw. um 3,9 - 4,7 °C (ungünstiges Szenario) im Vergleich zu 1961-1990 ansteigen, wobei die Temperaturzunahme im Sommer (geringfügig) höher ausfällt als im Winter. Bis zum Ende des Jahrhunderts können Tagesmaxima der Lufttemperatur von mehr als 40 °C auftreten. Während Frost- und Eistage voraussichtlich abnehmen, werden Sommertage sowie heiße Tage und tropische Nächte bis zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich zunehmen. Aber schon bis 2050 sind ein Anstieg an Sommertagen und heißen Tagen sowie ein starker Rückgang an Frost- und Eistagen zu erwarten.

Hamburg muss sich künftig auf eine saisonale Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in die Wintermonate einstellen. Beim ungünstigen Szenario ist bis 2050 im Winter mit einer Niederschlagszunahme von voraussichtlich 13 % bis 20 % zu rechnen, während die Niederschläge im Sommer um -15 % bis -25 % abnehmen können. Bis 2100 kann sich diese saisonal ungleiche Verteilung auf eine winterliche Niederschlagszunahme von 28 % bis 53 % und eine sommerliche Niederschlagsabnahme von -30 bis -40% beim ungünstigen Szenario verschärfen. Aller Voraussicht nach wird die Zunahme der Jahresniederschlagssumme bis zum Ende des 21. Jahrhunderts jedoch nicht mehr als zehn Prozent betragen. Regentage könnten künftig abnehmen, niederschlagsfreie Tage nehmen hingegen v. a. in den Sommermonaten zu. Dies bedeutet jedoch, dass wenn es regnet, der Niederschlag vermutlich mit höherer Intensität fallen wird.

Von den Folgen des Klimawandels sind in Hamburg besonders der Hochwasserschutz, die Wasserwirtschaft und die Landwirtschaft betroffen. So können die Sturmflutwasserstände am Pegel St. Pauli bis 2030 gegenüber 1961-1990 im Mittel um 18 cm und maximal um 23 cm ansteigen, wobei ein Unsicherheitszuschlag von ± 20 cm zu berücksichtigen ist (von Storch et al. 2007). Bis 2085 wird eine Erhöhung der Sturmflutwasserstände um 63 cm bzw. 82 cm berechnet, wobei die Unsicherheit hier ± 50 cm ausmachen kann. Hiernach ist der derzeitige Küstenschutz bis 2030 genauso wirksam wie heute, bis zum Ende des Jahrhunderts könnte jedoch Handlungsbedarf entstehen. Während Durchschnittswerte wie Jahresmitteltemperatur oder monatliche Niederschlagssummen relativ gut zu modellieren bzw. zu bestimmen sind, sind Aussagen zu Extremereignissen wie Hagelschlag, Starkniederschlag und Hitzewellen mit größeren Unsicherheiten behaftet. Die Wasserwirtschaft in Hamburg wird sich in Zukunft auf zwei verschiedene Extreme einstellen müssen. Zum einen auf die Zunahme von hohen Niederschlägen und Starkregenereignissen, zum anderen auf das häufigere Eintreten von Hitze- und Trockenperioden. Vermehrte Überlaufereignisse der Siele, steigende Grundwasserspiegel und flächenhafte Vernässung auf der einen Seite – Niedrigwasserperioden, Verschlechterung der Gewässerqualität sowie Einschränkung der Kühlwassereinleitung auf der anderen Seite können die Folge sein. Für die Landwirtschaft können sich durch Hagelschlag und Staunässe Schäden am Bestand sowie Ertragseinbußen durch die Zunahme von Schadorganismen und Wassermangel ergeben.

Vor allem die veränderte Niederschlagsverteilung und die Zunahme an Starkniederschlägen wird Hamburg vor neue Herausforderungen stellen. Durch einen hohen Anteil an Grün- und Wasserflächen kann Hamburg die Auswirkungen steigender Temperaturen auf Gesundheit und Lebensqualität mindern. Der Meeresspiegelanstieg und damit die Zunahme der Sturmfluthöhe werden die Hochwasserschutzanlagen häufiger belasten.

1 Problemstellung und Zielsetzung

In der Fortschreibungsdrucksache zum Klimaschutzkonzept¹ hat der Hamburger Senat im Dezember 2008 beschlossen, bis Ende 2010 eine hamburgische Gesamtstrategie zur Anpassung an den Klimawandel zu erarbeiten. Das Kompetenzzentrum für Klimafolgen und Anpassung (KomPass) des Umweltbundesamtes (UBA) wurde als externer Auftragnehmer durch die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) beauftragt, einen Orientierungsrahmen als eine Grundlage für die Hamburger Anpassungsstrategie zu erarbeiten, der dem Senat und den Hamburger Behörden sowie öffentlichen Unternehmen zur fachlichen Orientierung dienen und deren Einzelplanungen koordinieren soll. Dieser „Fachliche Orientierungsrahmen“ beschreibt auf der Basis vorliegender wissenschaftlicher Erkenntnisse den zu erwartenden Klimawandel sowie die Klimafolgen, die sich aus den veränderten Klimabedingungen für Hamburg ergeben.

Dementsprechend erfolgt in Kapitel 2.1 ein Überblick zu den bereits beobachteten Klimaänderungen und in Kapitel 2.2 eine kurze Darstellung regionaler Klimamodelle; auf dieser Basis werden in Kapitel 2.3 deren Ergebnisse (künftige Änderungen zentraler Klimaparameter) beschrieben. In Kapitel 3 sind die wesentlichen Klimafolgen für die Region Hamburg dargestellt. Im Anschluss (Kapitel 4) sind die abgeschlossenen bzw. laufenden /

¹ Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft / Drucksache 19/1752: „Fortschreibung des Hamburger Klimaschutzkonzepts 2007 – 2012“ (<http://www.klima.hamburg.de/contentblob/1143770/data/haushaltsplan-2009-2010.pdf>)

geplanten Untersuchungen Hamburger Behörden und öffentlichen Unternehmen aufgeführt, die Aussagen zu Klimaänderungen bzw. Klimafolgen beinhalten. Abgeschlossen wird der Bericht von einer Übersicht zur verwendeten Literatur sowie Anhängen.

Aussagen zu Klimaänderungen und Klimafolgen sind prinzipiell mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Unter anderem liegt das daran, dass die künftigen (globalen) Emissionen klimawirksamer Gase nicht exakt vorhergesagt werden können, so dass hierüber verschiedene Annahmen getroffen werden müssen (Szenarien-Ansatz); zudem ist es grundsätzlich nicht möglich, alle Prozesse des Klimasystems in Klimamodellen zu erfassen. Um die Unsicherheiten der Klimaprojektionen zu berücksichtigen, werden als Ergebnis in Kapitel 2.3 Wertesspannen der Klimaänderungen angegeben, die sich aus den Ergebnissen verschiedener Klimamodelle und unterschiedlicher SRES²-Emissionsszenarien (*A1B*, *A2*, *B1*, *B2*) ergeben (die Basisdaten zu künftigen Klimaänderungen sind im Anhang aufgeführt, s. Tabelle A-1 bis Tabelle A-9 sowie Abbildung A- 1). Es handelt sich um die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle *REMO*, *COSMO-CLM*, *STAR*, *WettReg* und *RCAO*, die in Kapitel 2.2 näher erläutert werden. In den letzten Jahren hat sich der so genannte „Ensemble“-Ansatz durchgesetzt: Aussagen zu Klimaänderungen aus verschiedenen (regionalen) Klimamodellen sind gleichermaßen plausibel, so dass die Ergebnisse verschiedener Klimamodelle und verschiedener verwendeter Szenarien vergleichend betrachtet werden (das beinhaltet aber keinerlei bewertende Aussagen zur Güte der regionalen Klima- oder Klimafolgenmodelle; siehe hierzu auch Kapitel 2.5).

2 Klimaänderung

Bevor die Klimaänderungen für Hamburg bis 2050 und bis 2100 dargestellt werden, wird zunächst rückblickend auf die Entwicklung der Klimaänderung der vergangenen 100 Jahre eingegangen. Der Betrachtungsraum ist die Region Hamburg; für die Zwecke dieses Gutachtens ist diese – wenn auch unscharfe – Abgrenzung ausreichend: zum einen ist es nicht sinnvoll, allein auf die Stadt Hamburg im administrativen Sinne zu schauen, zum anderen ist eine Ausdehnung auf die Metropolregion Hamburg (in seiner formalen Abgrenzung) ebenfalls nicht nötig (siehe dazu den Klimabericht für die Metropolregion Hamburg, der Ende November 2009 veröffentlicht wird). Einige Aussagen beziehen sich auf bestimmte Klimastationen, die dann stellvertretend für die Region Hamburg anzusehen sind.

2.1 Beobachtete Klimaänderung

2.1.1 Temperatur

Die Jahresmitteltemperatur an der Station Hamburg-Fuhlsbüttel ist zwischen 1891 und 2007 um 0,8 °C angestiegen, das entspricht einer Anstiegsrate von 0,07 °C/Dekade (Schlünzen et al. 2009). Betrachtet man kürzere und jüngere Zeitabschnitte, wird deutlich, dass der Trend der Temperaturzunahme in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen hat. So ist die Jahresmitteltemperatur in den letzten 60 Jahren (1948-2007) um 0,19 °C/Dekade und in den vergangenen 30 Jahren (1978-2007) sogar um 0,6 °C/Dekade angestiegen, wobei die stärkste Temperaturzunahme mit 0,9 °C/Dekade in die Wintermonate (DJF) fällt (Schlünzen

² Der Weltklimarat (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) hat insgesamt 40 Zukunftsszenarien für den Zeitraum 2001-2100 entwickelt, die auf unterschiedlichen Emissionen von Treibhausgasen basieren. Diese Szenarien werden nach dem *Special Report on Emissions Scenarios* als SRES-Szenarien bezeichnet (Nakicenovic et al. 2000).

et al. 2009). Hinsichtlich der Temperaturkenntage³ ist, insbesondere bei den Sommertagen, in Abbildung 1 ein deutlich positiver Trend erkennbar, während die Frost- und Eistage einen abnehmenden Trend aufweisen (Riecke & Rosenhagen 2009⁴). Die Temperaturminima und -maxima haben sich zudem in der Vergangenheit (1891-2007) verstärkt. Während die Temperaturmaxima um 0,18 °C/Dekade angestiegen sind, verzeichnen die Temperaturminima eine Abnahme um -1,1 °C/Dekade, was auf eine Verschärfung der Extremtemperaturen hindeutet (Schlünzen et al. 2009).

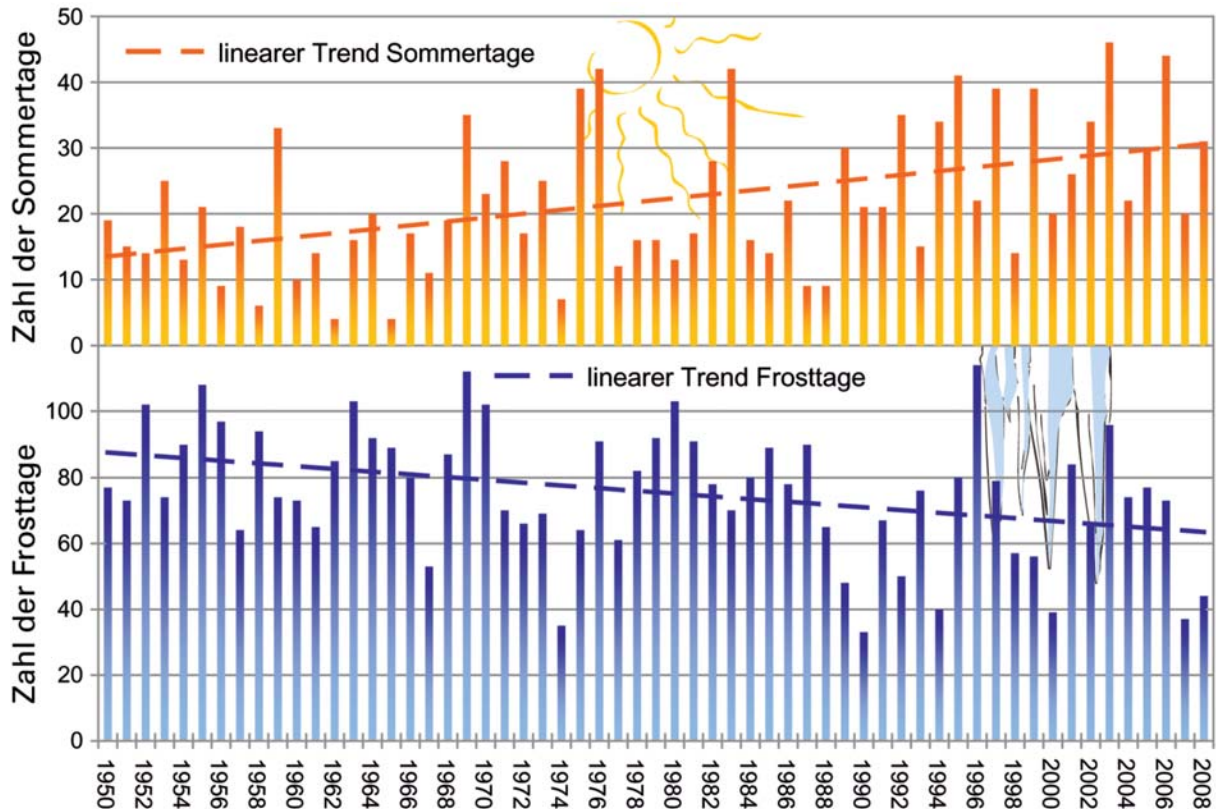


Abbildung 1: Jährliche Anzahl der Sommertage und der Frosttage in Hamburg für den Zeitraum 1950 bis 2008; Quelle: DWD (2009 b, *bedarf Genehmigung*)

2.1.2 Niederschlag

Der Niederschlag zeigt zwischen 1891 und 2007 einen positiven und statistisch signifikanten Trend der Jahressumme auf, wobei die Niederschlagszunahme pro Jahrzehnt ein Prozent (entspricht 8 mm/Dekade) der heutigen Jahresniederschlagssumme ausmacht (Schlünzen et al. 2009). Während für den Zeitraum 1901 bis 2000 die Zunahme der Niederschläge im Herbst und Winter 20% beträgt, weisen die Sommermonate eine leichte Abnahme der Niederschläge um einige Prozent auf (Schönwiese & Janoschitz 2005). Zu begründen ist dies mit einer Zunahme der Hochdruckwetterlagen im Sommer zwischen 1951 und 2003, wohingegen in den Wintermonaten die Tiefdruckwetterlagen zugenommen haben (Werner et al. 2008). Weiterhin hat die Anzahl an so genannten „nassen Tagen“ mit Niederschlägen ≥ 20 mm/d zwischen 1891 und 2007 leicht zugenommen (Riecke & Rosenhagen 2009). Nach Schlünzen et al. (2009) haben Starkniederschläge von mehr als 10 mm pro Tag in der Periode 1978-2007 um 20 % gegenüber 1948-1977 zugenommen. Der steigende Trend von Niederschlägen >10 mm/Tag wird auch in der Abbildung 2 deutlich.

³ Sommertage: $T_{\max} \geq 25$ °C, heiße Tage: $T_{\max} \geq 30$ °C, Frosttage: $T_{\min} \leq 0$ °C, Eistage: $T_{\max} \leq 0$ °C

⁴ Riecke und Rosenhagen 2009 beziehen sich auf die Station Hamburg-Fuhlsbüttel

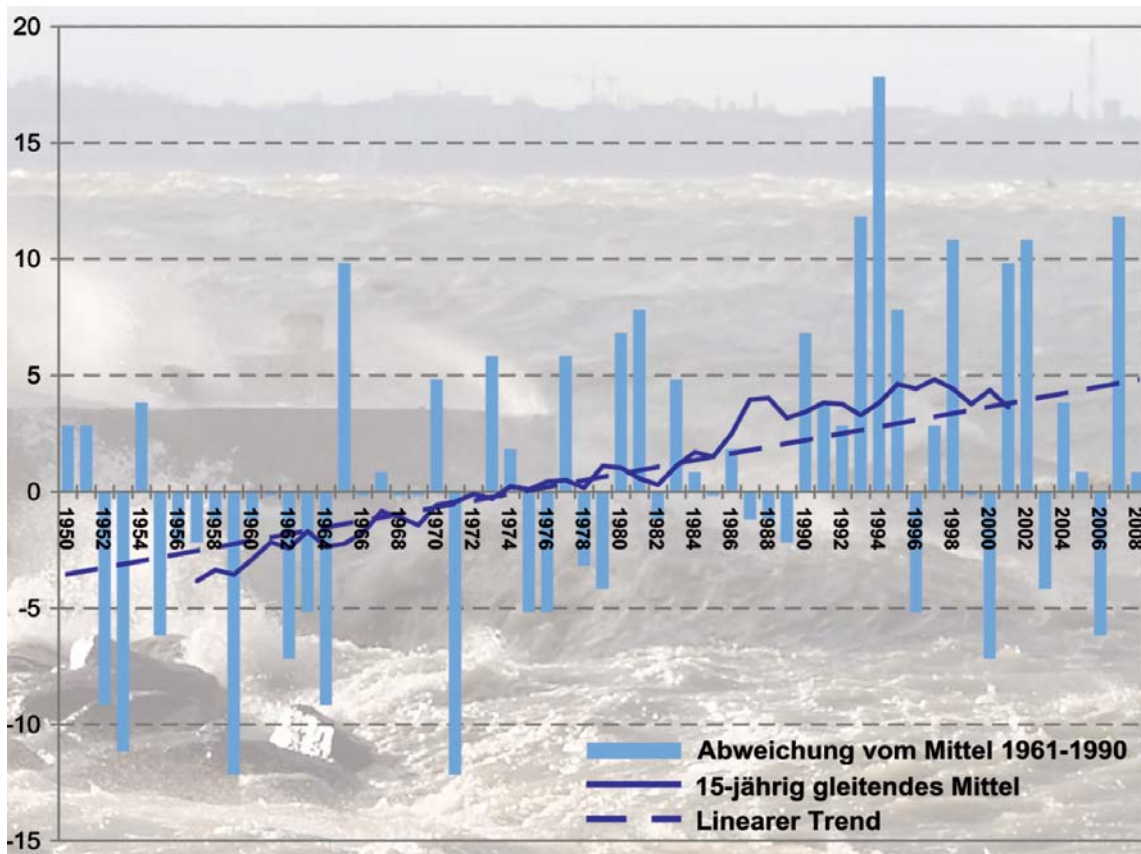


Abbildung 2: Abweichungen der Anzahl der Niederschlagstage mit mehr als 10 mm/Tag vom Mittelwert 1961-1990; Quelle: DWD (2009b, *bedarf Genehmigung*)

2.1.3 Wind

Die Entwicklung der mittleren Windgeschwindigkeiten weist in den vergangenen 100 Jahren keinen signifikanten Trend auf. Die maximalen Windgeschwindigkeiten außertropischer Stürme verzeichnen bezüglich Häufigkeit und Stärke eher eine leichte Abnahme (Rosenhagen 2008).

2.2 Regionale Klimamodellierung

Im Folgenden werden die regionalen Klimamodelle vorgestellt, auf denen Aussagen zu Klimaänderungen basieren. Hierbei wird zwischen dynamischen und statistischen Modellen bzw. Regionalisierungsverfahren unterschieden. Bei der statistischen Regionalisierung des globalen Klimas wird davon ausgegangen, dass regionale und lokale Klimaausprägungen vom globalen Zustand der Atmosphäre bestimmt werden, deshalb wird die vom globalen Klimamodell simulierte Vergangenheit mit gemessenen lokalen Klimagrößen in Beziehung gesetzt (Zorita & von Storch 1999). Anhand dieser statistischen Zusammenhänge wird von den globalen Zukunftsszenarien auf das künftige regionale Klima geschlossen. Die dynamische Regionalisierung hingegen basiert auf einem eigenständigen regionalen Klimamodell (RCM, *regional climate model*), das in ein globales Zirkulationsmodell eingebettet ist. Durch diese „Nesting“-Methode lässt sich die Region wie mit einer Lupe detailliert betrachten (Jacob et al. 2008, Hagemann & Jacob 2006). Das regionale Klimamodell wird an den Rändern mit Ergebnissen des globalen Klimamodells angetrieben; dabei wird der Zustand der Atmosphäre auf regionaler Skala neu berechnet. Somit können atmosphärische Prozesse, die in den globalen Klimamodellen nur grob dargestellt sind, im regionalen Modell ausführlich formuliert werden (Gobiet & Truhetz 2008).

2.2.1 Statistische Modelle

STAR – STATistisches Regionalmodell

Das statistisch basierte, regionale Klimamodell STAR wurde am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung entwickelt. Es verwendet verallgemeinerte Trendinformationen aus globalen Klimamodellen als Ausgangsgröße für die Berechnung regionaler Klimasimulationen bis 2055 (vgl. PIK 2004, S. 31, Walkenhorst & Stock 2009). Hinsichtlich der räumlichen Auflösung beziehen sich die Simulationsergebnisse auf einzelne (insgesamt mehr als 2000) Wetterstationen in Deutschland (Walkenhorst & Stock 2009). STAR benötigt im Vergleich zu anderen regionalen Klimamodellen relativ wenig Rechenaufwand (vgl. CEC-Potsdam 2007a). Die Klimasimulationen basieren auf dem Emissionsszenario SRES A1B.

WettReg – Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode

WettReg zählt ebenfalls zu den statistischen Regionalisierungsverfahren und basiert auf einer Typisierung von Wetterlagen. Das statistische Modell wurde in Zusammenarbeit mit der FU Berlin von der Firma Climate & Environment Consulting (CEC) entwickelt. Basierend auf den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 wurden für Deutschland regionale Klimaszenarien für den Zeitraum 1950-2100 erstellt (Spekat et al. 2007). Die globalen Randbedingungen lieferte das Klimamodell ECHAM5/MPI-OM. Für den vorliegenden Bericht wurden nur die Simulationsergebnisse des A1B-Szenarios verwendet.

2.2.2 Dynamische Modelle

REMO – REgional MOdel

REMO ist ein dreidimensionales, hydrostatisches, atmosphärisches Regionalmodell, welches am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg in Zusammenarbeit mit dem GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) entwickelt wurde. Es basiert auf dem Europamodell (EM) des Deutschen Wetterdienstes, welches vom DWD bis zum Jahre 2003 als operationelles Vorhersagemodell genutzt wurde. Es ist möglich, REMO sowohl im Klima- als auch im Wettervorhersagemodus zu betreiben (Jacob et al. 2008). Die räumliche Auflösung kann 50 x 50 km und 10 x 10 km betragen (Jacob et al. 2008). Der Antrieb erfolgte mit dem globalen Zirkulationsmodell ECHAM5/MPI-OM des Hamburger Max-Planck-Instituts basierend auf den Emissionsszenarien SRES A1B, A2 und B1. Die Klimarechnungen liegen für den Zeitraum 1950 bis 2100 vor (Norddeutsches Klimabüro 2009).

COSMO-CLM – Consortium for Small-scale Modeling-Climate model

COSMO-CLM ist ein dynamisches, nichthydrostatisches regionales Klimamodell, welches von der CLM-Community auf Basis des Lokalmodells (LM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entwickelt wurde (vgl. CEC-Potsdam 2007b). Seit 2005 wird es als Gemeinschaftsmodell von zahlreichen Instituten und Wetterdiensten, die im Consortium for Small-scale Modelling (COSMO) organisiert sind, genutzt (vgl. CLM-Community 2008). Die räumliche horizontale Auflösung liegt zwischen 50 x 50 und 7 x 7 km. Dieses regionale Modell ist ebenfalls in ein Globalmodell (ECHAM5) eingebettet. Für Deutschland wurden Simulationen bis zum Jahre 2100 durchgeführt. Als Emissionsszenarien wurden für COSMO-CLM die IPCC-Szenarien A1B und B1 verwendet.

RCAO - Rossby Centre regional Atmosphere-Ocean model

Das gekoppelte, regionale Zirkulationsmodell RCAO des schwedischen Wetterdienstes SMHI setzt sich aus einem Atmosphären- (RCA) und einem Ozeanmodell (RCO) zusammen und wurde für die Klimamodellierung von Nordeuropa erstellt. Für den globalen Antrieb

wurden das Globalmodell HadAM3H des Hadley Centers (HC) sowie das ECHAM4/OPYC3-Modell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) verwendet. Den Simulationen – mit einer räumlichen Auflösung von 50 x 50 km – liegen die Emissionsszenarien SRES A2 und SRES B2 zu Grunde. (Norddeutsches Klimabüro 2009), sie auch: <http://www.smhi.se/sgn0106/if/rc/rcao.htm>)

2.3 Zukünftige Klimaänderung

Auf Basis der Ergebnisse der beschriebenen regionalen Klimamodelle werden im Folgenden die Klimaänderungen für Hamburg dargestellt. Dabei wird zwischen einem *mittleren Szenario* und einem *ungünstigen Szenario* unterschieden, die jeweils eine Spannweite der möglichen Klimaänderungen aufzeigen. Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen beruhen auf den globalen SRES-Szenarien des IPCC; somit sind in den folgenden Angaben zu künftigen Klimaänderungen keine Maßnahmen zur Treibhausgasminderung berücksichtigt. Zur Auswertung wurde u. a. das *ZWEK-Vorhaben* (Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangsdagensätzen für die Klimafolgenabschätzung) des DWD (Deutscher Wetterdienst) herangezogen, das die Ergebnisse der verschiedenen regionalen Klimamodelle vergleichend betrachtet. Weitere verwendete Quellen sind der Norddeutsche Klimaatlas (Norddeutsches Klimabüro 2009), Daschkeit (2009; basierend u. a. auf dem ZWEK-Vorhaben des DWD von 2007), Jacob et al. (2008), von Storch et al. (2007), Göttel & Jacob (2009) sowie Gerstner et al. (2009). Mit Ausnahme des ZWEK-Vorhabens (Referenzzeitraum: 1971-2000) ist der Referenzzeitraum von Aussagen zu Klimaänderungen die Klimanormalperiode 1961-1990.

Aus den o. g. Quellen wurde zunächst für die Klimaparameter *Temperatur, Niederschlag und Wind* sowie für bestimmte *Kenntage* die gesamte Spannweite möglicher Änderungen aufgezeigt und anschließend in drei gleich große Klassen unterteilt, um ein „günstiges“, „mittleres“ und ein „ungünstiges“ Szenario der künftigen klimatischen Entwicklung zu erhalten. Auf Grund der Tatsache, dass die beobachteten CO₂-Emissionen seit 1990 und insbesondere in den letzten Jahren zumeist an der oberen Grenze der SRES-Szenarien des IPCC liegen bzw. diese sogar überschreiten (vgl. Abbildung 3) und zudem das A1FI-Szenario, welches als „Worst-Case-Szenario“ gilt, in den erstellten Spannweiten der regionalen Klimaänderungen nicht enthalten ist, wird die Betrachtung des „mittleren“ und des „ungünstigen“ Szenarios empfohlen.

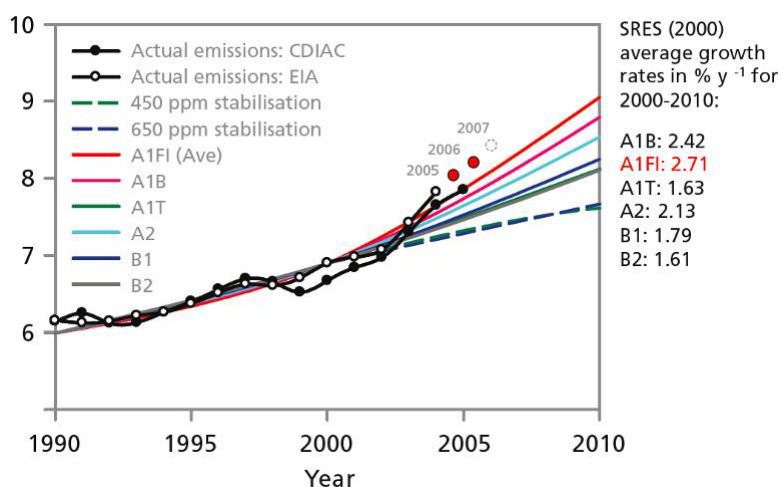


Abbildung 3: Beobachtete Entwicklung der anthropogenen CO₂-Emissionen zwischen 1990 und 2007 sowie die verschiedenen IPCC-Szenarien zum Vergleich; Quelle: University of Copenhagen (2009).

2.3.1 Temperatur

Ausgehend vom *mittleren Szenario* muss die Metropolregion Hamburg bis 2050 mit einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur von 1,0 - 1,4 °C, verglichen mit 1961-1990, rechnen. Das *ungünstige Szenario* geht von einem Temperaturanstieg von bis zu 1,8 °C bis 2050 aus. In Tabelle 1 wird deutlich, dass sich die Temperaturzunahme saisonal kaum unterscheidet, so ist der Anstieg im Winter genauso hoch wie im Sommer. Ohne weitere Maßnahmen zur (globalen) Treibhausgasminde rung wird in Hamburg bis 2100 die Jahresmitteltemperatur um 2,8 - 3,8 °C (*mittleres Szenario*) bzw. um 3,9 - 4,7 °C (*ungünstiges Szenario*) im Vergleich zu 1961-1990 ansteigen, wobei die Temperaturzunahme im Sommer geringfügig höher ausfällt als im Winter (vgl. Tabelle 2).

Auch die sommerlichen Tagesmaxima der Lufttemperatur werden bis 2100 aller Voraussicht nach zunehmen, beim *mittleren Szenario* beträgt die Erhöhung zwischen 4,0 °C und 6,7 °C. Beim *ungünstigen Szenario* muss sogar mit einem Anstieg der Maximaltemperatur um 6,8 - 9,4 °C gerechnet werden, was bedeutet, dass zum Ende des 21. Jahrhunderts Temperaturen von 44,2 °C auftreten können. Allerdings zeigen die Szenarien, dass bis 2100 99% der Tagesmaxima (99%-Perzentil) den Wert 40,3 °C nicht überschreiten (Gerstner et al. 2009).

Tabelle 1: Temperaturänderung bis 2050; Quelle: eigene Darstellung, nach: Norddeutsches Klimabüro 2009, Daschkeit (2009), Jacob et al. (2008) und von Storch et al. (2007); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCAO, STAR und WettReg für die Szenarien A1B, A2, B1, B2.

	Jahresmittel	Sommer	Winter
mittleres Szenario	+1,0 – +1,4 °C	+1,0 – +1,5 °C	+1,1 – +1,5 °C
ungünstiges Szenario	+1,5 – +1,8 °C	+1,6 – +2,0 °C	+1,6 – +2,0 °C

Tabelle 2: Temperaturänderung bis 2100; Quelle: eigene Darstellung, nach: Norddeutsches Klimabüro 2009, Daschkeit (2009), Jacob et al. (2008) und von Storch et al. (2007); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCAO, STAR und WettReg für die Szenarien A1B, A2, B1, B2.

	Jahresmittel	Sommer	Winter	T _{max}
mittleres Szenario	+2,8 – +3,8 °C	+3,0 – +4,1 °C	+2,8 – +3,9 °C	+4,0 – +6,7 °C
ungünstiges Szenario	+3,9 – +4,7 °C	+4,2 – +5,3 °C	+4,0 – +5,0 °C	+6,8 – +9,4 °C

Mit der Temperaturänderung gehen auch saisonale Veränderungen der Kenntage einher, so kann der erste kühle Herbsttag ($T_{\min} < 5 \text{ °C}$) im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 14 bis 24 Tage später auftreten, während zwischen September und Oktober drei zusätzliche Sommertage ($T_{\max} \geq 20 \text{ °C}$) möglich sind (GKSS 2008).

Insgesamt werden die Sommertage und heißen Tage über das Jahr deutlich zunehmen, so können bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts beim *ungünstigen Szenario* die Sommertage gegenüber 1961-1990 um 9 bis 24 Tage/Jahr ansteigen. Zum Vergleich: das Jahrzehnt 1981-1990 weist 22 Sommertage pro Jahr auf. Auch die Anzahl tropischer Nächte, die bisher im Durchschnitt weniger als einen Tag im Jahr ausmachen, kann sich um 1,8 Tage/Jahr bis 2050 erhöhen. Für 2100 fallen die Änderungen deutlich stärker aus, selbst beim *mittleren Szenario* muss mit einer Zunahme der Sommertage zwischen 18,6 und 30,2 Tagen pro Jahr gerechnet werden. Tabelle 4 zeigt, dass die Anzahl an heißen Tagen und tropischen Nächten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich ansteigen wird. Im Gegensatz dazu ist

ein starker Rückgang der Frosttage, an denen die Minimaltemperatur weniger als 0 °C beträgt, zu verzeichnen, je nach Szenario von bis zu -37 bzw. -48 Tagen pro Jahr. Die Anzahl der Eistage ($T_{\max} \leq 0 \text{ °C}$) nimmt ebenfalls stark ab. Eine deutliche Reduzierung der Frost- und Eistage gilt auch für den Zeithorizont 2050 (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Änderung der Temperaturkenntage⁵ bis 2050. Achtung: Der angegebene Beobachtungszeitraum 1981-1990 stellt nur ein Jahrzehnt des Referenzzeitraumes (1961-1990) dar, auf den sich die künftigen Veränderungen beziehen. Für den gesamten Referenzzeitraum waren leider keine Daten verfügbar. Bei den Frost- und Eistagen konnte auf die Ergebnisse des Norddeutschen Klimaatlas (Norddeutsches Klimabüro 2009) zurückgegriffen werden, der die Veränderungen bis 2040 und nicht bis 2050 darstellt. Quelle: eigene Darstellung, nach: Norddeutsches Klimabüro (2009), Daschkeit (2009); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCAO, STAR und WettReg für die Szenarien A1B, A2, B1, B2.

Tage/Jahr	1981-1990	mittleres Szenario	ungünstiges Szenario
Sommertage	22,2 d/a	+4,5 – 9,0 Tage	+9,1 – 13,0 Tage
Heiße Tage	3,6 d/a	+3,0 – 6,0 Tage	+6,1 – 9,0 Tage
Trop. Nächte	0,4 d/a	+0,6 – 1,2 Tage	+1,3 – 1,8 Tage
<i>Bis 2040</i>			
Frosttage	75,4 d/a	-12,1 – -16,8 Tage	-16,9 – -21,5 Tage
Eistage	15,0 d/a	-5,2 – -8,7 Tage	-8,8 – -12,2 Tage

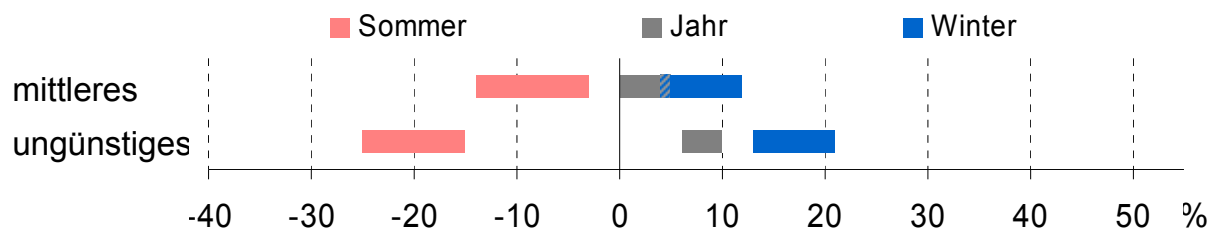
Tabelle 4: Änderung der Temperaturkenntage bis 2100. Achtung: Der angegebene Beobachtungszeitraum 1981-1990 stellt nur ein Jahrzehnt des Referenzzeitraumes (1961-1990) dar, auf den sich die künftigen Veränderungen beziehen. Für den gesamten Referenzzeitraum waren leider keine Daten verfügbar. Quelle: eigene Darstellung, nach: Norddeutsches Klimabüro (2009), Daschkeit (2009); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCAO, STAR und WettReg für die Szenarien A1B, A2, B1, B2.

Tage/Jahr	1981-1990	mittleres Szenario	ungünstiges Szenario
Sommertage	22,2 d/a	+18,6 – +30,2 Tage	+30,3 – +41,7 Tage
Heiße Tage	3,6 d/a	+ 6,2 – +10,5 Tage	+10,6 – +14,9 Tage
Tropische Nächte	0,4 d/a	+6,9 – +12,7 Tage	+12,8 – +18,4 Tage
Frosttage	75,4 d/a	-26,4 – -37,0 Tage	-37,1 – -47,6 Tage
Eistage	15,0 d/a	-11,8 – -17,0 Tage	-17,1 – -22,1 Tage

2.3.2 Niederschlag

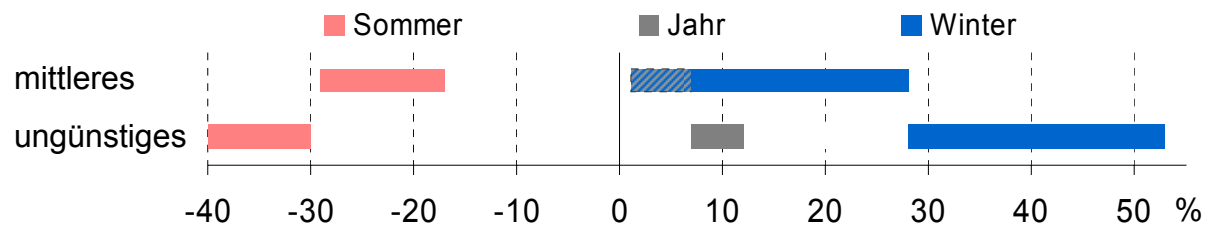
Hamburg muss sich künftig auf eine saisonale Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in die Wintermonate einstellen. Beim *ungünstigen Szenario* ist bis 2050 im Winter mit einer Niederschlagszunahme von 13 - 20% zu rechnen, während die Niederschläge im Sommer um 15 - 25% abnehmen können (vgl. Abbildung 4). Bis 2100 kann sich diese saisonal ungleiche Verteilung auf eine winterliche Niederschlagszunahme von 28 – 53 % und eine sommerliche Niederschlagsabnahme von -30 bis -40% beim *ungünstigen Szenario* verschärfen (vgl. Abbildung 5). Die Zunahme der Jahresniederschlagssumme wird jedoch bis zum Ende des 21. Jh. nicht mehr als zehn Prozent betragen.

⁵ Sommertage: $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$, heiße Tage: $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$, Frosttage: $T_{\min} \leq 0 \text{ °C}$, Eistage: $T_{\max} \leq 0 \text{ °C}$



	Jahressumme	Sommer	Winter
mittleres Szenario	0 – +5 %	-3 – -14 %	+4 – +12 %
ungünstiges Szenario	+6 – +10 %	-15 – -25 %	+13 – +21 %

Abbildung 4: Niederschlagsänderung bis 2050; Quelle: eigene Darstellung, nach: Norddeutsches Klimabüro (2009), Daschkeit (2009), Jacob et al. (2008) und von Storch et al. (2007); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCAO, STAR und WettReg für die Szenarien A1B, A2, B1, B2.



	Jahressumme	Sommer	Winter
mittleres Szenario	+1 – +6 %	-17 – -29 %	+1 – +27 %
ungünstiges Szenario	+7 – +12 %	-30 – -40 %	+28 – +53 %

Abbildung 5: Niederschlagsänderung bis 2100; Quelle: eigene Darstellung, nach: Norddeutsches Klimabüro (2009), Daschkeit (2009), Jacob et al. (2008) und von Storch et al. (2007); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCAO, STAR und WettReg für die Szenarien A1B, A2, B1, B2.

Die Analyse der Simulationsergebnisse des globalen Klimamodells (ECHAM) für den Zeitraum 2051 bis 2100 im Vergleich zu 1951/2000 deutet darauf hin, dass sich die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete auf Grund der Ausweitung des Azorenhoch-Einflusses leicht nach Norden verschieben könnten (Bengtsson et al. 2006). Damit nimmt die Wahrscheinlichkeit von Regentagen – jene Tage, an denen der gefallene Niederschlag ≥ 1 mm beträgt – ab, während die Anzahl an Niederschlagsfreien Tagen ($NS < 0,1$ mm) v. a. im Sommer zunimmt (Göttel & Jacob 2009). Dieses bedeutet jedoch, dass wenn es regnet, die Niederschlagsintensität vermutlich deutlich höher ist.

Als Indiz für Starkniederschläge werden so genannte „nasse Tage“ herangezogen, zu denen jene Tage mit einem Niederschlag von mehr als 10 mm/d zählen. Diese sind häufig mit Hochwässern verknüpft und können daher zur Abschätzung der veränderten Hochwasserrisiken durch den Klimawandel herangezogen werden (Göttel & Jacob 2009). Verglichen mit 1951/2000 ist die Zunahme nasser Tage besonders in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts stark (Göttel & Jacob 2009). Während für das SRES-Szenario A1B die

nassen Tage im Sommerhalbjahr i. d. R. eine Abnahme verzeichnen, nehmen diese im Winterhalbjahr zu (vgl. Tabelle 5). Auch die *sehr nassen Tage* mit Niederschlägen von 20 mm und mehr am Tag nehmen im Jahr um 1,44 d/a zu, wobei auch hier die Zunahme im Winterhalbjahr (+1,17 d/a) höher ist als im Sommerhalbjahr (+0,26 d/a) (Göttel & Jacob 2009).

Tabelle 5: Häufigkeitsänderung der nassen Tage verglichen mit 1951/2000 für das A1B-Szenario; Quelle: Göttel & Jacob (2009).

Änderung nasser Tage (REMO A1B)		2001/2050	2051/2100
Jahr	> 10 mm/d	+2,03	+2,47
	> 20 mm/d	+0,43	+1,44
Sommer	> 10 mm/d	+0,12	-0,67
	> 20 mm/d	+0,06	+0,26
Winter	> 10 mm/d	+1,91	+3,14
	> 20 mm/d	+0,36	+1,17

2.3.3 Wind

Hinsichtlich der Windverhältnisse ist mit einer moderaten Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten bis 2100 von maximal 4 % zu rechnen. Saisonal betrachtet werden größere Veränderungen der mittleren Windgeschwindigkeiten deutlich, so können beim *ungünstigen Szenario* die mittleren Windgeschwindigkeiten im Winter um bis zu 15 % bis 2100 zunehmen, während in den Sommermonaten die Windgeschwindigkeiten abnehmen werden (vgl. Abbildung 6). Auch die Sturmintensitäten (= maximaler Betrag des Windvektors) werden zum Ende des 21. Jahrhunderts im Sommer um bis zu -8 % abnehmen und im Winter um bis zu 12 % zunehmen (Norddeutsches Klimabüro 2009). Tage, an denen eine maximale Windgeschwindigkeit von 62 km/h überschritten wird, werden als Sturmtage bezeichnet. Solche Sturmtage könnten sowohl im Winter (je nach Szenario um +1,4 – +2,1 bzw. +2,2 – +2,8 Tagen) als auch im Sommer minimal (um -0,3 – +0,1 bzw. +0,2 – +0,4 Tagen) zunehmen (vgl. Tabelle 6).

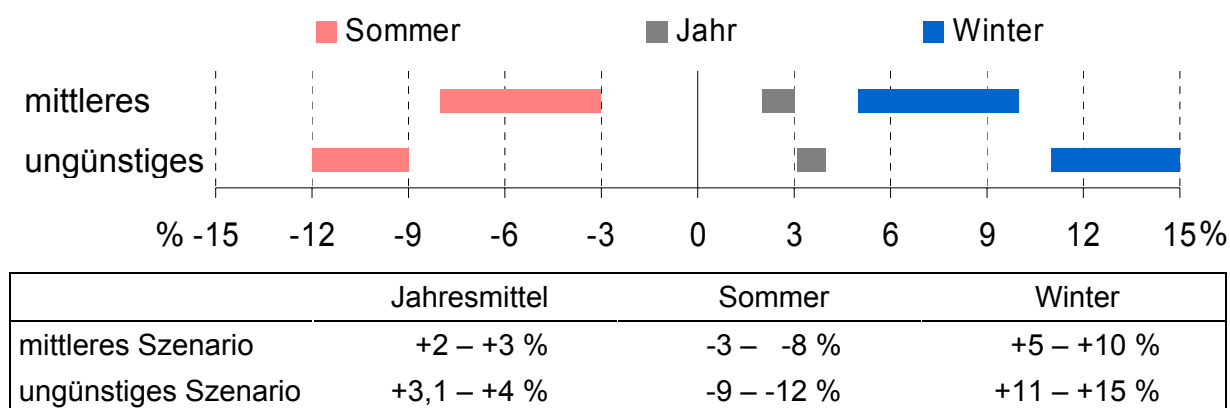


Abbildung 6: Änderung der mittleren Windgeschwindigkeiten bis 2100 (Jahresmittel Referenzperiode: 3,9 m/s); Quelle: eigene Darstellung, nach: Norddeutsches Klimabüro (2009) und von Storch et al. (2007), basierend u. a. auf REMO, COSMO-CLM und RCAO für A1B, A2, B1, B2.

Tabelle 6: Änderung der Sturmtage verglichen mit 1961/1990; Quelle: eigene Darstellung nach: Norddeutsches Klimabüro (2009), basierend auf *REMO*, *COSMO-CLM* und *RCAO* für *A1B*, *A2*, *B1*, *B2*.

	Jahresmittel	Sommer	Winter
mittleres Szenario	+2,3 – 3,0 Tage	-0,3 – +0,1 Tage	+1,4 – +2,1 Tage
ungünstiges Szenario	+3,1 – 3,7 Tage	+0,2 – +0,4 Tage	+2,2 – +2,8 Tage

2.4 Tideelbe und Klimawandel

Als Lebensader der Metropolregion Hamburg mit ihren unterschiedlichen Nutzungsansprüchen von Fischerei, Landwirtschaft, Naturschutz, Tourismus, Schifffahrt und Wirtschaft, kommt der Tideelbe auch in Bezug auf den Klimawandel eine bedeutende Rolle zu (Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg 2007, Heyer & Plüß 2009, Freitag et al. 2007). Durch die Verbindung zur Nordsee und den Gezeiteneinfluss werden sowohl der Meeresspiegelanstieg als auch das erhöhte Sturmflutrisiko die Wasserstände in Hamburg beeinflussen. Binnenseitiges Hochwasser v. a. im Winter, Niedrigwasserperioden sowie die Abnahme des Oberwasserzuflusses im Sommer und damit die Verlagerung der Brackwassergrenze stromaufwärts, verbunden mit einer verstärkten Salzwasserintrusion in die ufernahen Aquifere und einer Verschlickung bzw. Versandung des Hamburger Hafens und der Nebenflüsse der Elbe sind Folgen des Klimawandels, die vermutlich auf die Metropolregion zukommen werden. Der Klimawandel wird somit Einfluss auf die Dynamik der Küsten- und Ästuarsysteme haben, das heißt: die Lebens- und Wirtschaftsräume müssen sich nicht nur an höhere Sturmfluten, sondern auch an deutliche Veränderungen der mittleren hydrologischen und sedimentologischen Verhältnisse anpassen. Im Wesentlichen anthropogene Maßnahmen⁶ haben in den vergangenen Jahrzehnten dazu geführt, dass die Flut mit zunehmender Energie in das Elbeästuar vordringt (HPA & WSV 2006). Dies könnte die o. g. Folgen des Klimawandels, v. a. den Stromauftransport von Sedimenten („tidal pumping“), zusätzlich verstärken. Durch die vielfältige Struktur des sich ständig verändernden Strombettes besitzen naturnahe Ästuar die Fähigkeit, die Energie abzapfen, diese hat im Elbeästuar stark abgenommen (HPA & WSV 2006). Im Folgenden wird die hydromorphologische Entwicklung der Tideelbe in der Vergangenheit und Zukunft aufgezeigt.

Das Tideregime hat sich in den vergangenen 100 Jahren deutlich verändert, so ist das mittlere Tidehochwasser (MThw) um 50 cm gestiegen (Fickert und Strotmann 2007), während sich das mittlere Tideniedrigwasser (MTnw) um 110 cm verringert hat (vgl. Abbildung 7). Damit hat sich gegenüber 1900 der mittlere Tidenhub am Pegel St. Pauli um 160 cm auf heute 360 cm erhöht. Als Ursache gelten die Reflexion der Tidewelle am Wehr Geesthacht und die verstärkte Reflexion der Tidewelle an der durch wiederholte Vertiefungen der Fahrrinne erhöhten Sohlschwelle im Hamburger Hafen (Fickert & Strotmann 2009), die eine Verformung der Tidekurve hin zu einem steil ansteigenden Flutast und einem flach abfallenden Ebbeast bewirken. Zudem hat sich die Dauer der Tidephasen verschoben. Während heute die mittlere Flutphase 13 Minuten länger andauert als vor 100 Jahren, hat sich die Ebbephase um 13 Minuten verkürzt (Fickert & Strotmann 2007).

⁶ Küstenschutz (z.B. Deiche, Sperrwerke), Abgrenzung der Nebenelben, Fahrinnenvertiefung, Entwässerung der Marsch, ...

Sturmfluten laufen heute etwa 70 cm höher auf als zu Beginn des 20. Jahrhunderts, wobei lediglich 20 cm dem steigenden Meeresspiegel zuzuschreiben sind, die übrigen 50 cm sind auf die oben genannten Folgen anthropogener Maßnahmen zurückzuführen (von Storch et al. 2009, Fickert & Strotmann 2007).

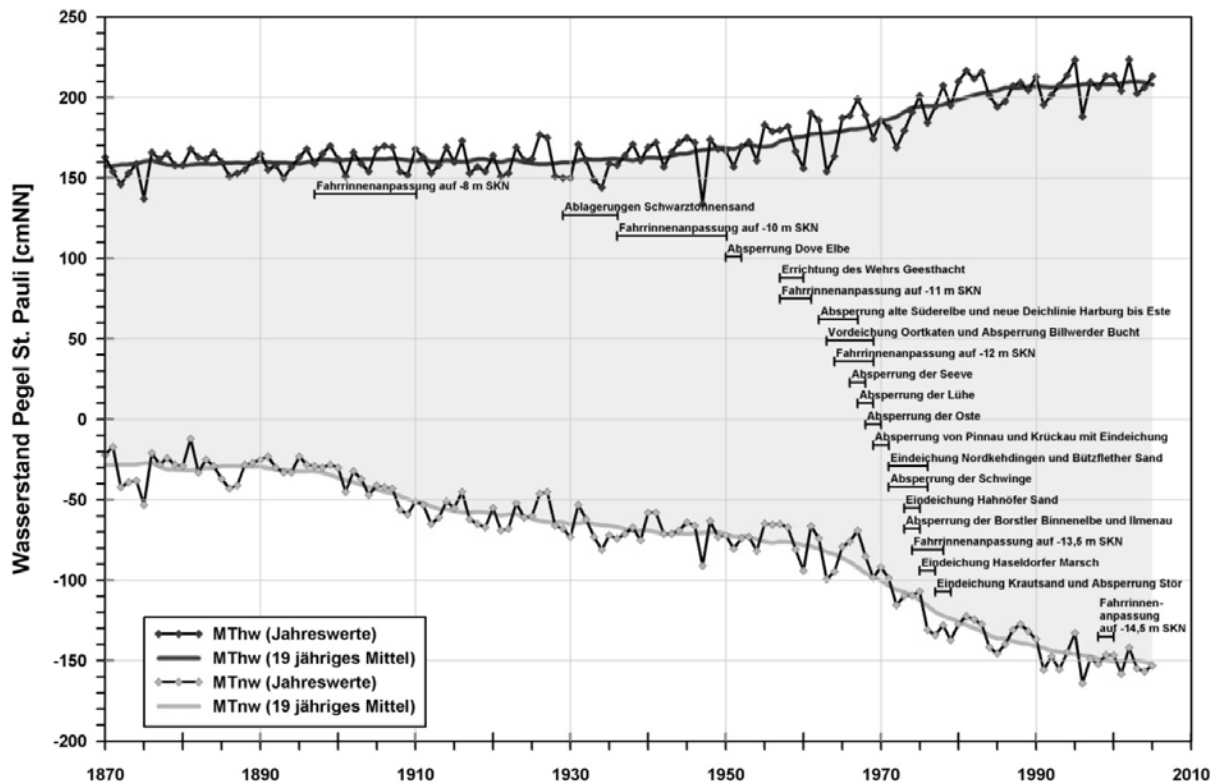


Abbildung 7: Entwicklung des mittleren Tidehoch- und Tideniedrigwassers am Pegel St. Pauli seit 1870 sowie anthropogene Maßnahmen im zeitlichen Zusammenhang; Quelle: Fickert & Strotmann (2007)

Die Aussagen zum künftigen globalen Meeresspiegelanstieg sind noch mit großen Unsicherheiten verbunden, da v. a. der Abschmelztrend der Eisschilde (Antarktis, Grönland) bisher schwer vorhersagbar ist. Der Weltklimarat (IPCC) geht in seinem vierten Sachstandbericht von einem Anstieg des globalen Meeresspiegels zwischen 18 und 59 cm aus und veranschlagt zusätzlich 10-20 cm, sollte sich der aktuelle Abschmelztrend des grönländischen Eisschildes verstärken (IPCC 2007, Gönnert et al 2009). Auf Grund der jüngsten Beobachtungen rechnet Dahl-Jensen (2009) mit einem globalen Meeresspiegelanstieg von 100 cm (± 50 cm) bis zum Ende dieses Jahrhunderts (University of Copenhagen 2009).

Hinsichtlich des regionalen Meeresspiegelanstiegs geht Hans von Storch (GKSS), unter Berücksichtigung veränderter Sturmaktivitäten, von einem Meeresspiegelanstieg an der Nordseeküste um 30 – 110 cm bis 2100 aus, Jochem Marotzke (MPI-M) rechnet mit einem Anstieg zwischen 20 und 96 cm, während Anders Levermann (PIK - Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) einen regionalen Meeresspiegelanstieg von 20 – 80 cm, evtl. aber auch in der Größenordnung von 2 Metern bis zum Ende des 21. Jahrhundert schätzt (Rauner 2009). Die Erhöhung des Ausgangsniveaus von Sturmfluten durch einen steigenden Meeresspiegel ist gekoppelt mit einer Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und –stärke vor allem in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts, diese kann durch Änderungen der

vorherrschenden Windrichtung und Änderungen in den Windgeschwindigkeiten noch verstärkt werden. Zusätzlich könnten diese Veränderungen im Windklima den Seegang in der Deutschen Bucht während einer Sturmflut um 20 – 50 cm erhöhen, eine sich daraus ergebende Änderung des Wellenaufbaus ist bisher nicht bekannt (von Storch et al. 2009). Der regionale Meeresspiegelanstieg kann zudem das Drehtidezentrum (Amphidromie) in der Nordsee, um das die Tidewelle kreist, verschieben. Dieses hätte wiederum Auswirkungen auf die Wasserstände an der Küste und im Elbeästuar. Die Abbildung A- 2 im Anhang gibt einen Überblick über die Folgen des Klimawandels auf das Elbeästuar.

2.5 Umgang mit Unsicherheiten

Aussagen zu künftigen Klimaänderungen und Klimafolgen sind „Aussagen unter Unsicherheit“ – diese Feststellung, die man in der Klimadebatte sehr oft hört, lässt sich in (mindestens) zwei Richtungen interpretieren: Auf der einen Seite dient diese Aussage als Rechtfertigung für Argumente der so genannten Klimaskeptiker – solange das Wissen über Klimaänderungen und Klimafolgen unsicher ist, ist es verfrüht, Strategien und Maßnahmen gegen den Klimawandel (Vermeidung, Anpassung) zu rechtfertigen. Auf der anderen Seite: Wissen über künftige Entwicklungen weist prinzipiell eine mehr oder weniger große Unsicherheit auf, so dass es darum geht, die Unsicherheiten zu verringern bzw. einen angemessenen Umgang mit Unsicherheit zu entwickeln.

Es gibt verschiedene Gründe, warum Aussagen zu künftigen Klimaänderungen und Klimafolgen unsicher sind:

- Aussagen über die künftige klimatische Entwicklung können nur durch den Einsatz von Computermodellen erstellt werden – Modelle, egal zu welchem Sachverhalt, sind aber nie „1-zu-1“-Abbildungen der Realität, sondern immer Vereinfachungen. Das Verständnis des Klimasystems wächst aber zusehends, so dass sich Klimamodelle immer mehr der realen Verhältnissen nähern.
- Das Klima ist ein hochgradig komplexes und nichtlineares System, das eine natürliche Schwankungsbreite (Variabilität) besitzt. Die Kenntnisse über diese klimatische Variabilität werden zwar immer besser, dennoch ist es bislang noch sehr schwer, die natürliche Variabilität in Klimamodellen abzubilden.
- Klimamodelle (globale, regionale) benötigen als Eingangsinformation die Konzentrationen von klimawirksamen Gasen wie CO₂, CH₄ usw. Um diese Konzentrationen zu ermitteln, muss bekannt sein, wie hoch die Emissionen klimawirksamer Gase sind bzw. sein werden – anthropogene Emissionen resultieren u. a. aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und Landnutzungsänderungen. Emissionen klimawirksamer Gase lassen sich nicht exakt prognostizieren, sondern müssen abgeschätzt werden. Eine exakte Prognose würde voraussetzen, dass die gesellschaftliche Entwicklung (Wirtschaftswachstum, demographische Entwicklung, Einsatz verschiedener Energieträger etc.) vorhergesagt werden könnte – es ist unmittelbar einleuchtend, dass eine solche Prognose prinzipiell unmöglich ist. Das heißt, Klimamodelle sind auf Annahmen über die künftige Entwicklung von Emissionen und Konzentrationen klimawirksamer Gase angewiesen. Diese Annahmen werden in Form von Szenarien konkretisiert und gebündelt – beispielsweise in den IPCC-Szenarien A1B, B2 usw. Ein Klimamodell kann nun mit verschiedenen Szenarien gerechnet werden – als Ergebnis resultiert eine Bandbreite möglicher künftiger Klimaänderungen. Die

Ergebnisse, also zum Beispiel die globale Niederschlagsentwicklung für die Szenarien A1B und B2, sind gleichermaßen plausibel.

Die beschriebenen Gründe machen deutlich: *Unsicherheit ist nicht gleich Unsicherheit*. Beispielsweise wird es nie gelingen, die gesamte Komplexität des Klimasystems in einem Computermodell abzubilden; es wird immer ein Bereich des Nicht-Wissens verbleiben. Andere Sachverhalte können als „temporäres“ Nicht-Wissen bezeichnet werden – so ist absehbar, dass wir in einigen Jahren sehr viel mehr bspw. über die Kopplung von Atmosphäre und Biosphäre wissen werden – das wiederum wird unsere Aussagemöglichkeiten über künftige Klimaänderungen verbessern.

Aussagen zu Klimaänderungen und Klimafolgen werden somit in einem gewissen Umfang immer unsicher bleiben – auch wenn die Klima(folgen)forschung Verfahren entwickelt, diese Unsicherheiten zu reduzieren (Projekt ENSEMBLES).

In der gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Diskussion über den Klimawandel nimmt der Aspekt Unsicherheit einen erstaunlich breiten Raum ein – obwohl wir im Alltag durchaus gewohnt sind, mit ähnlichen Situationen umzugehen. Zwei Beispiele sollen dies illustrieren:

1. Als junger Erwachsener ist man vor die Wahl gestellt, ob man nach Abschluss der Schulzeit (wir nehmen mal an, dass die Hochschulreife erreicht wurde) entweder eine Lehre macht oder ein Studium beginnt. Eine Entscheidung, die man im Alter von ca. 20 Jahren trifft – und möglicherweise direkte Auswirkungen für den Rest des Lebens hat; das sind statistisch gesehen immerhin mindestens 50 Jahre. Auch wenn man sich mit der Entscheidung Lehre oder Studium Zeit lässt, einige Monate nach dem Abitur ist man festgelegt.
2. Als etwas älterer Erwachsener stellt sich oft die Frage, ob man Haus- oder Wohnungseigentum erwerben soll (meist gekoppelt mit Entscheidungen zur Familiengründung ...). Gleichzeitig befinden sich viele Erwachsene in diesem Alter in zeitlich befristeten Arbeitsverhältnissen, so dass man eigentlich nicht recht überblicken kann, ob man in den nächsten Jahrzehnten in der Lage sein wird, entsprechende Kredite zu bedienen (für dieses Beispiel klammern wir mal diejenigen Fälle aus, in denen man sich „mal eben“ ein Haus oder eine Wohnung kauft).

In beiden Beispielen ist eine Entscheidung unter Unsicherheit zu fällen. Der Zeithorizont ist durchaus mit dem Zeitraum von Klima- und Klimafolgenprojektionen vergleichbar: mehrere Jahrzehnte. Beim Klimawandel sehen wir den Aspekt „Unsicherheit“ als zentral an – im Alltäglichen fällt es offenbar leichter, mit Unsicherheit umzugehen. (Man könnte jetzt einwenden, dass Klimawandel und Alltagsentscheidungen nicht miteinander vergleichbar sind. Das ist zum Teil sicherlich der Fall; der Einwand verkennt aber, dass die Wahrnehmungs- und Bewertungssituationen von Unsicherheit ggü. dem Klimawandel und im Alltag *strukturell* ähnlich sind und dass Unsicherheiten von Aussagen zu Klimaänderungen und Klimafolgen *individuell* wahrgenommen und bewertet werden.)

Schlussfolgerungen:

- Die Unsicherheiten in Aussagen zu Klimaänderungen und Klimafolgen sollten auch weiterhin analysiert und kommuniziert werden – das Verschweigen von Unsicherheiten oder Spannbreiten bspw. der künftigen Temperaturentwicklung würde eine (nicht vorhandene) Sicherheit suggerieren.

- Die Klima(folgen)forschung sollte – auch weiterhin – Verfahren und Instrumente entwickeln, die das Verständnis von Unsicherheiten erleichtern; dies können bspw. grafische Darstellungen oder statistische Maße sein, die einen unmittelbaren Eindruck vom Grad der Unsicherheit geben.
- Unsicherheiten in Aussagen zu Klimaänderungen und Klimafolgen sind nicht komplett zu reduzieren – deswegen ist der angemessene Umgang mit Unsicherheiten wichtig. Deshalb sollte der Umgang mit Unsicherheit beim Thema Klimawandel an alltäglichen, lebensweltlichen Erfahrungen im gesellschaftlichen und individuellen Bereich orientiert sein, das heißt: vergleichbare individuelle und gesellschaftliche Situationen, die strukturell ähnliche Unsicherheiten aufweisen, in Relation zum Klimawandel setzen, um so die Unsicherheiten beim Klimawandel und die Diskussion darüber zu „veralltäglichen“.
- Entwicklung von Routinen im Umgang mit Unsicherheiten: Wahrnehmung, Bewertung und Entscheiden unter Unsicherheit können u. a. an den Kriterien Reversibilität (Fehlerfreundlichkeit), „no regret / low cost“⁷ und Transparenz der Ableitung von Aussagen zu Klimaänderungen und Klimafolgen orientiert sein. Damit vermeidet man eine zu starre Fixierung auf die Diskussionen über Unsicherheit in Aussagen zum Klimawandel.

3 Klimafolgen für Hamburg

3.1 Klimafolgen für die einzelnen Handlungsfelder

Eine Differenzierung der Klimafolgen in zwei unterschiedliche Szenarien (analog zu den Klimaänderungen) ist auf Grundlage der verfügbaren Wissensbasis nicht für alle Handlungsfelder umsetzbar. Da sowohl der Wasser- als auch der Bodenwasserhaushalt entscheidenden Einfluss auf die Handlungsfelder Land- und Forstwirtschaft sowie Boden- und Naturschutz haben, werden diese im Folgenden zunächst zusammenfassend betrachtet (Kapitel 3.1.3); zur Darstellung der Klimafolgen wird zwischen einem „feuchten“ und einem „trockenen“ Szenario unterschieden, wobei beim trockenen Szenario der Temperaturanstieg und damit die Verdunstung deutlich stärker ausfallen als beim feuchten Szenario, dessen Niederschlagsrückgang im Sommer zudem weniger stark ausgeprägt ist. Quellen für die Beschreibung der Klimafolgen sind: die veröffentlichten bzw. in Bearbeitung befindlichen Untersuchungen seitens der Wissenschaft und der Hamburger Behörden bzw. öffentlichen Unternehmen⁸ sowie die Vorüberlegungen und Vorarbeiten der Hamburger Behörden und öffentlichen Unternehmen zum Thema Klimaanpassung (unter Federführung der BSU; siehe hierzu die Workshop-Protokolle, die von der BSU zur Verfügung gestellt wurden).

3.1.1 Küsten- und Hochwasserschutz

Die Folgen des Klimawandels sind besonders für den Hamburger Hochwasser- und Küstenschutz gravierend, da durch den Klimawandel sowohl das binnenseitige als auch das seeseitige Hochwasserrisiko steigen kann. Als Ursache für die zunehmende Gefahr von Binnenhochwassern gelten erhöhte winterliche Niederschläge und die Häufigkeitszunahme

⁷ Reversibilität und „no regret / low cost“ beispielsweise bezogen auf Anpassungsmaßnahmen.

⁸ Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle ausdrücklich dafür, dass auch (noch) nicht veröffentlichte Berichte, Publikationen etc. für dieses Gutachten zur Verfügung gestellt wurden. Eine Weitergabe dieses Gutachtens bzw. der zugrunde liegenden Berichte erfolgt selbstverständlich nicht ohne Zustimmung der Hamburger Behörden und öffentlichen Unternehmen.

von Starkniederschlägen, die v. a. in versiegelten Gebieten als Oberflächenabfluss direkt dem Vorfluter zufließen könnten.

Der Meeresspiegelanstieg bewirkt zudem auf Grund höherer Wasserstände in der Elbe und steigender Grundwasserspiegel vermutlich einen Rückstau in die Binnengewässer und damit eine Verschlechterung der Vorflutverhältnisse, so dass die Binnenhochwasser schlechter abfließen können (<http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-07-29-Einzelheiten-T1.4>). Im Hinblick auf die Veränderung der Niederschlagsverhältnisse ist im Sommer mit einem gleich bleibenden Hochwasserrisiko zu rechnen, während im Winter die Gefahr voraussichtlich zunehmen wird (Göttel & Jacob 2009). Allerdings beeinflussen neben dem Niederschlag weitere Wasserhaushaltsgrößen wie Infiltration, Verdunstung und Bodenwasserhaushalt das Hochwasserrisiko, so dass für die Hochwasserrisikoanalyse eine Abflussmodellierung notwendig ist (Göttel & Jacob 2009).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf künftige Sturmfluthöhen und damit auf das seeseitige Hochwasserrisiko sind hingegen besser erforscht. So können die Sturmflutwasserstände am Pegel St. Pauli bis 2030 gegenüber 1961-1990 im Mittel um 18 cm und maximal um 23 cm ansteigen, wobei ein Unsicherheitszuschlag von ± 20 cm zu berücksichtigen ist (vgl. Tabelle 7, von Storch et al. 2007). Bis 2085 wird eine Erhöhung der Sturmflutwasserstände um 63 cm bzw. 82 cm berechnet, wobei die Unsicherheit hier ± 50 cm ausmachen kann (von Storch et al. 2007). Diese Berechnungen basieren auf dem SRES-Szenario A2 und berücksichtigen sowohl eine veränderte Sturmaktivität als auch den Anstieg des mittleren Wasserstandes auf Grund thermischer Expansion – Veränderungen in der Morphologie der Tideelbe werden hingegen nicht berücksichtigt (von Storch et al. 2007). Neben höheren Wasserständen durch den Meeresspiegelanstieg und höheren Windgeschwindigkeiten können die Änderung der Hauptwindrichtung sowie ein verändertes Gezeitenregime die Stärke und Häufigkeit von Sturmfluten beeinflussen (von Storch et al. 2009). Höhere Wasserstände und ein verändertes Windklima könnten zudem die Hochwasserschutzanlagen und Uferschutzwerke stärker belasten. Eine Erhöhung des Ausgangsniveaus für Sturmfluten bewirkt zudem, dass Hochwasserstände, die gegenwärtig als „schwere Sturmflut“ bezeichnet werden, künftig als „normale Sturmflut“ einzustufen sind. Für die Deutsche Bucht schätzen von Storch et al. (2009), dass Sturmfluten zum Ende des 21. Jahrhunderts etwa 30 bis 110 cm höher auflaufen als heute – vorausgesetzt der regionale Meeresspiegelanstieg in der Nordsee entspricht einem globalen Anstieg des Meeresspiegels von 20 bis 60 cm. Während der gegenwärtige Küstenschutz bis 2030 genauso wirksam sein dürfte wie heute, könnte bis zum Ende des 21. Jahrhunderts Handlungsbedarf entstehen (von Storch et al. 2009). Für den Küstenschutz ist weiterhin relevant, ob das Watt als natürlicher Küstenschutz mit dem steigenden Meeresspiegel „mitwachsen“ kann, um die Wellenenergie abzufangen. Hierüber besteht aus wissenschaftlicher Sicht allerdings kein Konsens.

Tabelle 7: zu erwartende Zunahme der Sturmfluthöhen an den Pegeln St. Pauli und Cuxhaven; mittlere Zunahme in Klammern. Quelle: von Storch et al. (2007)

Zunahme d. Sturmfluthöhe in m	2030	2085
St. Pauli	0,13 – 0,23 (0,18)	0,48 – 0,82 (0,63)
Cuxhaven	0,12 – 0,17 (0,14)	0,42 – 0,61 (0,50)

3.1.2 Wasserwirtschaft

Die Wasserwirtschaft in Hamburg wird sich in Zukunft auf zwei verschiedene Extreme einstellen müssen. Zum einen auf die Zunahme von hohen winterlichen Niederschlägen und Starkregenereignissen, zum anderen auf das häufigere Eintreten von Trocken- und Niedrigwasserperioden.

Auf Grund der Zunahme von Starkniederschlägen ist künftig mit Überlastungen und vermehrten Überlaufereignissen der Siele sowie mit erhöhter Bodenerosion und Abschwemmung zu rechnen, die sich negativ auf die Gewässerqualität der Vorfluter auswirken könnten. Untersuchungen von Kuchenbecker et al. (2009) unter Anwendung des A1B-Szenarios (REMO) haben ergeben, dass „in den kommenden Jahrzehnten von einer signifikanten klimainduzierten Steigerung der Mischwasserüberläufe ausgegangen werden kann“ (Kuchenbecker et al. 2009, S. 11). Eine Veränderung der Schachtüberstauungen konnte unter Verwendung der REMO-Klimadaten hingegen nicht nachgewiesen werden. Kuchenbecker et al. (2009) empfehlen bei zukünftigen Veränderungen bzw. Erweiterungen des Kanalnetzes, potentielle Auswirkungen veränderter Niederschlagsintensitäten im Rahmen von Sensitivitätsuntersuchungen unter Abwägung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu berücksichtigen und ferner auf Basis feinerer Klimamodelle und zusätzlicher Emissionsszenarien weitergehende Untersuchungen durchzuführen.

Da gerade die Niederschläge im Winter zur Grundwasserbildung beitragen, könnte die winterliche Niederschlagszunahme ein Anstieg der Grundwasserstände bewirken. Die Entwicklung der Grundwasserstände hängt allerdings von einer Vielzahl weiterer Faktoren ab, für die eine Modellierung des (Grund-)Wasserhaushaltes notwendig ist. Ohne Gegenmaßnahmen ist eine flächenhafte Vernässung tief liegender Gebiete möglich (<http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-07-02-Einzelheiten-T1.2>), von der sowohl Gebäude und Infrastrukturen als auch die Land- und Forstwirtschaft betroffen sein könnten. Auf der anderen Seite sind in bestimmten Regionen sinkende Grundwasserstände v. a. in den Sommermonaten möglich. Dies betrifft v. a. das nordöstliche Niedersachsen (Region Ostheide) auf Grund der leichten Sandböden, die eine geringe Wasserhaltekapazität und geringe Humusgehalte aufweisen (TuTech Innovation GmbH 2008). Insgesamt ist künftig mit größeren saisonalen Schwankungen der Grundwasserstände zu rechnen, wodurch es in einigen Gebieten zu Beeinträchtigungen der Grundwasserförderung (zur Trinkwassergewinnung und industriellen Nutzung) und Gefährdung der Ökosysteme kommen könnte. „Die Wasserhaltefähigkeit und Infiltrierbarkeit von Böden gewinnt somit zukünftig sowohl für die landwirtschaftliche Produktion als auch für regionale Grundwasserneubildungsraten und Oberflächenabflüsse (Starkregen, Flutgeschehen) erheblich an Bedeutung“ (TuTech Innovation GmbH o.J, S. 70).

Zunehmende Sommertrockenheit einhergehend mit häufigeren Niedrigwasserperioden und höheren Wassertemperaturen der Gewässer könnten sowohl die Qualität des Oberflächenwassers als auch die Qualität und Quantität des Grundwassers verschlechtern (<http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-07-13-Einzelheiten-T3.6>). Tetzlaff et al. (2004) haben festgestellt, dass die Grundwasserneubildung mit zunehmendem Versiegelungsgrad stark zurückgeht und dass in Ballungszentren die Bedarfsdeckung aus ortnahen Grundwasservorkommen häufig nicht ausreicht, was in besonderem Maße auch auf Hamburg zutrifft.

Der Meeresspiegelanstieg sowie die Abnahme des Oberwasserzuflusses auf Grund zunehmender Trockenphasen im Sommer könnte ein Vordringen der Brackwasserzone und damit ein stärkeres Eindringen salzigen Meerwassers in die Grundwasserressourcen bzw. ufernahen Aquifere bewirken (<http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-07-02-Einzelheiten-T1.2>) und so Einfluss auf die Wasserversorgung nehmen, wobei weniger die Trinkwasserversorgung als vielmehr die Landwirtschaft, insbesondere der Obstbau im Alten Land, betroffen sein könnte. Weiterhin bewirkt ein Vordringen der Brackwasserzone eine erhöhte Trübung und Salinität in der Elbe mit Auswirkungen auf die Ökosysteme der Tideelbe sowie eine verstärkte Sedimentation und damit eine Versandung der Nebenflüsse und des Hamburger Hafens.

3.1.3 Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz

Mit seinem Puffer-, Speicher-, Abbau- und Regulationsvermögen ist der Boden ein ökologisch zentrales Kompartiment, dem auch hinsichtlich des Klimawandels eine zentrale Rolle zukommt. Sowohl extreme Trockenheit als auch Vernässung können zum Verlust wichtiger Bodenfunktionen führen. Daher werden die Auswirkungen des Klimawandels für die Handlungsfelder Landwirtschaft, Boden- und Naturschutz zunächst hinsichtlich des Wasser- und Bodenwasserhaushaltes für ein *trockenes* und ein *feuchtes Szenario* beschrieben. Während einige Gebiete bereits jetzt für die Landwirtschaft wasserlimitiert sind (Bsp. Ostheide, von Haaren 2009⁹), steigen in anderen Gebieten die Grundwasserstände deutlich an (Prott 2009¹⁰). Anschließend werden Klimafolgen, die lediglich mittelbar von der Bodenfeuchte beeinflusst werden, für die Handlungsfelder Landwirtschaft und Naturschutz separat betrachtet. Aussagen über die Folgen des Klimawandels auf den Boden und seinen Wasser- und Wärmehaushalt sind mit den bisherigen Messungen und Modellen nicht möglich (Jensen et al. 2009). Deswegen kann im Folgenden der Bodenschutz nicht – wie die Bereiche Landwirtschaft und Naturschutz – eingehender dargestellt werden.

Feuchtes Szenario

Steigende Temperaturen bei gleichzeitig feuchten Bodenverhältnissen könnten die biologische Aktivität der Organismen im Boden erhöhen. Hierdurch steigt die Abbaurrate verschiedener Stoffe – eine erhöhte CO₂-Freisetzung sowie eine gesteigerte Mineralisationsrate können die Folge sein. Eine stärkere Nitratanreicherung im Boden könnte Pflanzen mit einem hohen Stickstoffaufnahmevermögen begünstigen (Jensen et al. 2009). Für eindeutige Aussagen ist jedoch eine Modellierung des Bodenwasserhaushaltes nötig, da extrem trockene, aber auch extrem feuchte Bodenbedingungen den Stoffumsatz, insbesondere die Stickstoffmineralisation, einschränken können.

Eine erhöhte Grundwasserneubildung, einhergehend mit steigenden Grundwasserständen, infolge zunehmender winterlicher Niederschläge könnte zur flächenhaften Vernässung bestimmter Gebiete führen, die eine termingerechte Bestellung von Ackerflächen erschwert und allgemein die Bodenbearbeitung beeinträchtigt (HLUG 2005) bzw. zu stärkerer Bodenverdichtung führt. Zudem könnten die Nutzpflanzen land- und forstwirtschaftlicher Flächen durch Staunässe beschädigt werden. So kann Staunässe v. a. durch

⁹ Persönliche Mitteilung vom 02.10.2009, Überbehördlicher Informationsaustausch, Klimzug-Nord, Landwirtschaftskammer Niedersachsen

¹⁰ Persönliche Mitteilung vom 02.10.2009, Überbehördlicher Informationsaustausch, Klimzug-Nord, BSU Amt für Umwelt und Naturschutz

Starkniederschläge im Sommer während der Vegetationsphase die Wurzeln der Obstbäume schädigen, die dadurch anfälliger für Schadorganismen werden und sogar noch Jahre später zu Ertragseinbußen führen (Weber 2009¹¹). Feuchtgebiete (z.B. Moore) hingegen könnten durch feuchtere Bedingungen begünstigt werden und durch ihre positiven Speicher-, Rückhalte- und Regulationsfunktionen zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz beitragen.

Trockenes Szenario

Sind die Bodenverhältnisse sehr trocken, nimmt die biologische Aktivität der (Mikro-) Organismen ab. Damit können sich Nährstoffdynamik sowie der mikrobiell gesteuerte Schadstoffabbau verändern. Je nach Mikroorganismen und Schadstoffen können sich diese veränderten Abbaubedingungen positiv oder negativ auf die Schadstoffverlagerung und -verfügbarkeit auswirken (LfU 2008). Die projizierten Klimaveränderungen mit einem feuchteren, milderen Winter und einem trockenen, wärmeren Sommer könnten den Eintrag von Nitrat ins Grundwasser intensivieren (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus MV 2008). Die geringe Bodenfeuchte während der Sommermonate hemmt die Mineralisierungsprozesse und verringert infolgedessen die Nitratbildung, so dass sich organische Substanz im Boden anreichert (HLUG 2005). Im Herbst, bei Wiederbefeuchtung des Bodens und noch relativ hoher Bodentemperatur, kann es dann zu einer verstärkten Mineralisierung der organischen Bodensubstanz und damit zu einer gesteigerten Freisetzung von Nitrat kommen (MUNLV 2007). Auf Grund der hohen Winterniederschläge ist im Winter von einer erhöhten Nitratverlagerung auszugehen.

Bei trockenen Bodenverhältnissen erleiden die Pflanzen nicht nur Wasser-, sondern auch Nährstoffmangel, so dass beim trockenen Szenario mit einer Verschlechterung der Wachstumsbedingungen und mit Ertragseinbußen bzw. mit höheren Kosten für die Bewässerung und Schädlingsbekämpfung gerechnet werden muss. Langanhaltende Trockenperioden erhöhen das Erosionsrisiko der Böden v. a. durch Starkregen und Wind, hiervon ist besonders die fruchtbare obere Bodenschicht betroffen (Chmielewski 2009). Lang anhaltende Trockenperioden können das Absenken der Grundwasserstände bewirken und zum Verlust der Speicher-, Rückhalte- und Regulationsfunktionen von Feuchtgebieten führen.

Niedrigwasserperioden und damit der Rückgang des Oberwasserzuflusses in die Tideelbe bewirken die Verschiebung der Brackwassergrenze stromaufwärts, sodass die Landwirtschaft in den Elbmarschen durch Salzwasserintrusion bedroht ist. Zudem ist der Lebensraum von Organismen wie dem Schierling-Wasserfenchel, der weltweit nur in der Tideelbe vorkommt, gefährdet (Jensen et al. 2009, Neubecker et al. 2005). Höhere Wassertemperaturen mit der Folge sinkenden Sauerstoffsgehalts sowie die Einleitung von Abwässern bei Niedrigwasserabflüssen können die Gewässerqualität stark verschlechtern (TuTech Innovation GmbH 2008).

Landwirtschaft

Die zu erwartenden negativen Folgen des Klimawandels für die Landwirtschaft sind im bundesweiten Vergleich an der Niederelbe verhältnismäßig gering (Chmielewski 2009). Jedoch können die Pflanzen auf Grund der Klimaänderung hin zu extremen Witterungsbedingungen wie Hitzeperioden, Starkregen und Hagelschlag v. a. innerhalb der

¹¹ Persönliche Mitteilung vom 25.09.2009

sensitiven Entwicklungsphasen sowie auf Grund der saisonalen Differenzen mit hohen Niederschlägen und Staunässe im Winter und geringen Niederschlägen und lang anhaltenden Trockenperioden im Sommer unter Stress geraten und dadurch anfälliger gegenüber Schadorganismen werden. Außerdem können Äpfel während ausgeprägter Hitzeperioden Sonnenbrand erleiden und Obstbäume bei Staunässe im Frühjahr nur flache Wurzeln ausbilden, die im Sommer bei Trockenperioden nicht mehr bis zum Grundwasser reichen (Weber 2009¹²). Weiterhin werden sich durch die veränderten Temperatur- und Niederschlagsbedingungen neue Schadorganismen wie die Schwarze Sommerfäule in der Metropolregion etablieren, während bereits bekannte Pilze, Infektionskrankheiten, Unkräuter und Insektenschädlinge wie der Apfelwickler durch den Klimawandel begünstigt werden könnten (Weber o. J.). So können mit steigender Temperatur Fortpflanzung, Entwicklung und Vitalität der Schadinsekten zunehmen – mit der Tendenz zur „zweiten Generation“. Der Ausfall Populationsmindernder kalter Winter kann einerseits neue Schadorganismen begünstigen und andererseits zum massenhaften Vermehrungsverhalten führen und so den Schädlingsdruck erhöhen (Chmielewski 2009).

Allerdings ist auf Grund des CO₂-Düngeeffektes und der dadurch gesteigerten Wassereffizienz ein besseres Pflanzenwachstum bei C₃-Pflanzen möglich. Zudem bewirkt der Temperaturanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode¹³ um 50-60 Tage beim SRES-Szenario B1 und 80-90 Tage beim SRES-Szenario A1B im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 (vgl. Abbildung 8, Chmielewski et al. 2008). Die Länge der thermischen Vegetationsperiode beträgt in Hamburg für den Zeitraum 1961-2000 im Mittel 252 Tage (deutsches Mittel: 235 Tage, Chmielewski et al. 2008). Die Verlängerung der Vegetationsperiode ermöglicht die Etablierung neuer Fruchtfolgen sowie den Anbau neuer Wärme liebender Sorten, kann aber auch regionale Sorten verdrängen.

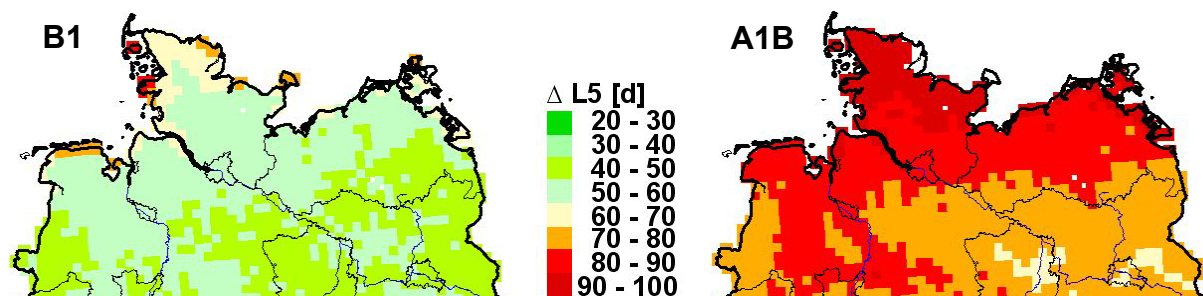


Abbildung 8: Mögliche Änderung in der Länge (L5) der thermischen Vegetationsperiode in Tagen (d) für das B1- (links) und A1B-Szenario (rechts) bis 2071-2100 (REMO), im Vergleich zu 1961-1990. Quelle: Chmielewski et al. (2008)

Auch wenn die Verlängerung der Vegetationsperiode zunächst eine Ertragssteigerung einzubringen scheint, nimmt diese ferner Einfluss auf die Vernalisation von Nutzpflanzen, was bedeutet, dass zahlreiche ein- und zweijährige Pflanzen aber auch Obstgehölze erst zu schossen und blühen beginnen, nachdem sie eine andauernde Periode mit niedrigen Temperaturen durchlebt haben. Außerdem bedeutet eine verlängerte Vegetationsperiode eine Verfrühung der Blüte (insbesondere im Obstbau), was die Gefahr durch Spätfrost

¹² Persönliche Mitteilung vom 25.09.2009, 1. Hamburger Klimawoche 2009

¹³ Zeitraum wird durch das Überschreiten der Tagesmitteltemperatur von 5 °C im Frühjahr und durch das Unterschreiten der Tagesmitteltemperatur von 5 °C im Herbst definiert

erhöht. So könnte sich basierend auf dem A1B-Szenario (WettReg) die Apfelblüte bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, verglichen mit 1961-1990, um 15 Tage verfrühen - innerhalb der letzten 30 Jahren ist bereits eine Verfrühung des Blühbeginns um 19 Tage zu beobachten. Hitzestress während sensibler Entwicklungsphasen, z.B. während der Blüte, kann zudem zu Ertragseinbußen führen (Chmielewski 2009). Weiterhin führt im Obstbau ein wärmerer Herbst zu einer mangelhaften Ausfärbung der Früchte, hierbei kann eine geeignete Sortenwahl der unerwünschten Färbung entgegen wirken (Weber 2009¹⁴). Höhere Temperaturen könnten zwar eine Ernteverfrühung vieler Nutzpflanzen bewirken, bei einigen Pflanzen wie etwa Grünkohl, die den ersten Frost abwarten sollten, führt ein wärmerer Herbst jedoch zur deutlich späteren Ernte (bis 2100 um 10 bis 28 Tage später) (GKSS 2008).

Um eine Vorstellung zu bekommen, welche Vegetation und welche Nutzpflanzen zum Ende des 21. Jahrhunderts im Hamburger Raum gedeihen könnten, nennt Weber (o. J.) eine Verschiebung der Anbaugrenzen von 200-300 km nach Norden pro 1 °C Erwärmung. Bezüglich des Pflanzenbaus sind hiernach für das *mittlere Szenario* bayrische Gegebenheiten in Hamburg (580-870 km) zu erwarten, während beim *ungünstigen Szenario* Anbauverhältnisse ähnlich der Toskana (940-1410 km) herrschen könnten.

Naturschutz

Die höhere Variabilität der Grundwasserneubildung (Zunahme im Winter, Abnahme im Sommer) wirkt sich möglicherweise negativ auf die Ökosysteme aus, so könnten laut Hessischem Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG 2005) Biotope durch extremere Grundwasserstandsänderungen in Stresssituationen geraten. Veränderte Temperatur- und Niederschlagverhältnisse sowie eine veränderte Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit auf Grund veränderter Bodeneigenschaften können die Arten- und Biotopzusammensetzung verschieben, die Invasion neuer Arten fördern und die Biomasseproduktion verändern (GKSS 2008). Durch ein verändertes Konkurrenzgefüge könnten viele Arten verdrängt werden bzw. aussterben. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Artenzusammensetzung in der Metropolregion Hamburg sind bisher kaum erforscht. Auch die Auswirkungen auf das Wattenmeer sind bisher unklar. Wissenschaftler gehen davon aus, dass das Wattenmeer bei einem Meeresspiegelanstieg von 25 cm in 50 Jahren noch mitwachsen kann, während sich das Ökosystem bei einer Meeresspiegelanstiegsrate von 50 cm in 50 Jahren deutlich wandeln wird.

Im Elbeästuar kann seit den 1990er Jahren eine Einwanderung lusitanischer (südlicher) Arten von Meerestischen wie Sardelle, Sardine und Streifenbarbe beobachtet werden. Zudem ändern sich die Bestände heimischer Arten, so verzeichnet beispielsweise die Finte eine Bestandszunahme im Nord- und Ostseeraum seit den 1990er Jahren. Eingeschleppte Arten könnten sich auf Grund des Klimawandels etablieren. So wird vermutlich die mit Ballastwasser eingeschleppte Schwarzmundgrundel von der Vergrößerung der Brackwasserzone der Elbe profitieren. (UHH Biozentrum 2009¹⁵)

¹⁴ Persönliche Mitteilung vom 25.09.2009, 1. Hamburger Klimawoche 2009

¹⁵ Persönliche Mitteilung vom 25.09.2009, 1. Hamburger Klimawoche 2009

3.1.4 Menschliche Gesundheit

Neben den allgemeinen Belastungen und den Herz-Kreislaufkrankungen durch Hitze, von denen v. a. ältere Menschen und Kleinkinder sowie kranke Menschen betroffen sind, kann eine Klimaänderung die Zunahme von Infektionskrankheiten, Stoffwechselerkrankungen und Allergien bewirken. Durch die größere Anzahl an regenfreien Tagen und die Verlängerung der Vegetationsperiode ist mit einem verstärkten Pollenflug zu rechnen. Hinzu kommt, dass möglicherweise Allergien auslösende Pflanzen wie Ambrosia durch die Klimaänderungen begünstigt werden. Weiterhin könnten Temperatur- und Niederschlagsänderungen die Ausbreitung neuer Krankheitserreger und Vektoren wie die Tigermücke fördern und die Populationen bereits vorhandener Vektoren wie Zecken stärken und so das Infektionsrisiko erhöhen. Das Risiko eingeschleppter Krankheitserreger und Vektoren ist in Hamburg durch den Flughafen Fuhlsbüttel und den Hamburger Hafen besonders hoch.

Bisher kaum erforscht sind die Auswirkungen des Klimawandels auf das Hautkrebsrisiko durch Veränderung der natürlichen UV-Belastung/-Einstrahlung sowie durch ein verändertes Verhalten des Menschen gegenüber Sonnenlicht/UV-Licht, hierzu liegen allerdings noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor (<http://www.climaderm.de/>). Die Temperaturerhöhung könnte zudem durch Unterbrechung der Kühlkette Einfluss auf die Hygiene in der Lebensmittelproduktion nehmen und somit das Risiko von Krankheitserregern erhöhen.

3.1.5 (Hafen-) Wirtschaft, Energie und Tourismus

Die wissenschaftliche Basis zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Wirtschaft und Tourismus ist äußerst gering. So zeigen getrennt voneinander durchgeführte Analysen zum Klimawandel und zum Tourismus, dass der Fremdenverkehr in Hamburg zukünftig von den trockeneren Sommern profitieren könnte, während sich erhöhte Niederschläge im Winter nachteilig auf den Tourismus auswirken könnten (Bartels & Heinrichs 2009).

Im Bereich der Energiewirtschaft und im produzierenden Gewerbe könnten häufigere Niedrigwasserperioden sowie höhere Wassertemperaturen der Elbe die Entnahme und Einleitung von Kühlwasser beschränken. Zusätzlich zur Zunahme von für den Hafenbetrieb existentiell notwendigen Baggerarbeiten zur Beseitigung der sich tendenziell verstärkenden Sedimentationen könnten diese Maßnahmen vermehrt den Restriktionen durch zunehmenden temperaturbedingten Sauerstoffmangel unterliegen (Fickert & Strotmann 2009; siehe auch Kapitel 2.4).

3.1.6 Stadt- und Bauleitplanung, Grünflächen und Infrastruktur

Schon bis 2050 ist mit einer deutlichen Zunahme an Sommer- und heißen Tagen sowie an tropischen Nächten zu rechnen. Der Klimawandel kann somit den ohnehin schon vorhandenen Wärmeinseleffekt der Stadt Hamburg noch verstärken, so dass künftig Beschattung, Frischluftzufuhr und Kühlung der Hamburger Innenstadt in den Mittelpunkt der Siedlungs- und Bauleitplanung rücken könnten (Gertz, Gutsche, Rümenapp 2008). In der Stadt- und Bauleitplanung sollten vermehrt Grünflächen berücksichtigt werden, da diese sowohl zur Kühlung der Stadt als auch zur Versickerung von Starkniederschlägen beitragen können. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass die Grünflächen im Sommer zunehmender Trockenheit und im Winter der Gefahr von Staunässe ausgesetzt sein könnten.

Die Entwicklung von Hitzeperioden und Starkniederschlägen sowie ein mögliches Ansteigen der Grundwasserstände betreffen den Gebäudesektor und die Infrastruktur ebenso wie die Stadtplanung. Auf Grund höherer Temperaturen in den Herbst- und Wintermonaten ist davon auszugehen, dass die Heizkosten sinken werden. So hat das GKSS ermittelt, dass Kälteperioden von drei aufeinander folgenden Nächten mit Temperaturen unter 12 °C bis zum Ende des Jahrhunderts um 8 bis 28 Tage später auftreten können (GKSS 2008). Im Sommer hingegen muss sich der Gebäudesektor an zunehmende Hitze anpassen. Auch gilt es, Gebäude in tiefer liegenden Gebieten gegenüber einem möglichen Anstieg des Grundwasserspiegels zu schützen. Neben erhöhten Grundwasserständen könnte die Zunahme von Starkniederschlägen verstärkt Schäden an Gebäuden und Inventar wie Heizungsanlagen durch überflutete Keller bewirken. Die Versicherungsbranche hat bereits signalisiert, dass auf Grund zunehmender Schadensfälle in den letzten Jahren das bisherige Versicherungsmodell kaum noch zu finanzieren ist (TuTech Innovation GmbH 2008, S. 47).

Sowohl eine mögliche Zunahme der Sedimentierung – in Form von Verschlickung und Versandung – im Hafenbecken, der Elbe und ihrer Nebengewässer als auch eine erhöhte Sturmflutgefahr im Herbst und Winter könnte die Befahrbarkeit der Wasserstraßen beeinträchtigen. Auch auf dem Lande ist mit einer zunehmenden Behinderung der Straßen und Verkehrswege durch häufigere Überflutungen auf Grund von Starkregenereignissen, Binnenhochwasser und Sturmfluten zu rechnen. Weitere Bereiche der Infrastruktur, wie etwa der Stadtreinigung, sind ebenfalls vom veränderten Klima betroffen, so könnten höhere Temperaturen im Sommer den Zyklus der Müllabfuhr in Hamburg beeinflussen.

3.1.7 Katastrophenschutz, Feuerwehr, Rettungsdienst

Zunehmende Extremwetterereignisse wie Starkregen, Orkanböen und Sturmfluten werden voraussichtlich einen häufigeren Einsatz von Rettungsdiensten erfordern. Durch die Zunahme des binnen- und seeseitigen Hochwasserrisikos könnten zudem Evakuierungsmaßnahmen aus überfluteten Gebieten steigen, dabei muss die kurzfristige Aufnahme von Flüchtlingen gewährleistet sein. Für die Anpassung an den Klimawandel ist es wichtig, dass der Katastrophenschutz nicht nur reaktiv agiert, sondern schon frühzeitig proaktiv im Sinne einer Katastrophenprävention in Prozesse der anderen Sektoren eingreift.

3.2 Schlussfolgerungen

Auf Grund der derzeitigen Wissensbasis sind quantitative Aussagen zu Klimafolgen in Hamburg schwierig und nicht für alle Handlungsfelder möglich, eine direkte Zuordnung von Klimafolgen zu den zwei vorgeschlagenen Klimaszenarien ist daher kaum möglich. Um konkrete Aussagen über die Folgen des Klimawandels in Hamburg treffen zu können, ist eine Modellierung des Wasserhaushalts, der neben der Wasserwirtschaft viele weitere Handlungsfelder berührt, sowie im Speziellen eine Modellierung des Grundwasserhaushaltes und eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung unter verschiedenen Klimaszenarien unabdingbar.

Grünflächen werden in Zukunft eine zentrale Rolle bei der Anpassung an den Klimawandel einnehmen, da diese sowohl das Stadtklima unter erhöhten Temperaturen als auch den Wasserhaushalt positiv beeinflussen können. Durch einen hohen Anteil an Grün- und Wasserflächen zur Belüftung, Beschattung und Kühlung kann Hamburg die Auswirkungen steigender Temperaturen auf Gesundheit und Lebensqualität mindern. Untersuchung des

Deutschen Wetterdienstes zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadt Frankfurt am Main ergaben, dass eine klimaverträgliche Stadt einen Grünflächenanteil von mindestens einem Viertel ihres Gebiets benötige, wobei es darauf ankomme, viele grüne Inseln mit mindestens einem Hektar Fläche zu schaffen (DWD 2009a).

Die Schaffung neuer Grünflächen (z.B. durch Entsiegelung) bzw. der Erhalt bestehender Grünflächen sollte daher gemeinsames Ziel der Stadtplanung, des Natur- und Bodenschutzes sowie des Gewässer-, Hochwasser- und Katastrophenschutzes sein. Dabei gilt es nicht nur einzelne grüne „Inseln“ zu schaffen, sondern ähnlich den Trittsteinen und Korridoren beim Biotopverbund lineare Strukturen aufzubauen, die Parks- und Grünflächen miteinander verbinden und somit einen Beitrag zum Naturschutz leisten. So eignen sich u. a. naturnahe Uferzonen der Innenstadtkanäle Hamburgs (Bsp.: Isebekkanal, Duchrow 2008) als lineare Verbindungsachsen. Die Schaffung natürlicher Uferstrukturen wird zudem durch die europäische Wasserrahmenrichtlinie¹⁶ bekräftigt. Vor allem die veränderte Niederschlagsverteilung und die Zunahme an Starkniederschlägen wird Hamburg vor neue Herausforderungen stellen. Mit der dezentralen naturnahen Regenwasserbewirtschaftung, die einen wesentlichen Baustein der Hamburger Anpassungsstrategie darstellt (Kuchenbeker et al. 2009), verfolgt die Stadt Hamburg das Ziel, Niederschläge dort, wo sie anfallen, zu erfassen und dem natürlichen Wasserkreislauf zuzuführen (BSU 2006). Grünflächen und wasserdurchlässige Flächenbefestigungen ermöglichen das Einsickern des Regenwassers in den Boden, hierdurch wird der Oberflächenabfluss verringert und die Boden- und Pflanzenverdunstung sowie die Grundwasserneubildung erhöht, was wiederum zu einem ausgeglichenen (Boden-) Wasserhaushalt und zur Verbesserung des Kleinklimas führt. Durch die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung werden zudem Schadstoffeinträge durch Abschwemmungen in die Gewässer verringert und Überlaufereignisse aus Mischwassersielen reduziert (BSU 2006).

Hamburg muss sich weiterhin auf den steigenden Meeresspiegelanstieg und das erhöhte Hochwasserrisiko einstellen, häufigere Binnenhochwasser und ein zunehmendes Sturmflutrisiko werden die Hochwasserschutzanlagen stärker belasten. Im Sinne des Hochwasserschutzgesetzes¹⁷ und der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie¹⁸ gilt es, den Flüssen wieder mehr Raum zu geben. Mit dem Tideelbkonzept (HPA & WSV 2006) verfolgt die Hamburg Port Authority (HPA) im Rahmen eines ganzheitlichen Strombau- und Sedimentmanagements eine Vergrößerung der als Flachwasserbereiche und Vorlandflächen angelegten Fluträume sowie die langfristige Schaffung neuer Fluträume (z.B. Polderflächen). Diese Maßnahmen sind nicht nur zur Sturmflutentlastung sinnvoll, sondern beeinflussen auch die Sedimentstrategie zur Verringerung des „*tidal pumping*“-Effektes positiv (HPA & WSV 2006).

Bei allen Maßnahmen zur Anpassung ist es wichtig alternative Anpassungsstrategien im Sinne von „low cost“- und „no regret“-Maßnahmen zu entwickeln, um in Zukunft flexibel auf

¹⁶ Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (<http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/wasserrichtlinie.pdf>)

¹⁷ Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes (<http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hochwasserschutzgesetz.pdf>)

¹⁸ Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:DE:PDF>)

neue Erkenntnisse der Klimaänderung- und Klimafolgenforschung reagieren zu können. Hierbei sollte ein integrierter Ansatz für Adaptation und Mitigation angewendet werden, damit rechtzeitig Konflikte zwischen Klimaschutz und Anpassung (an den Klimawandel) erkannt und Synergien genutzt werden können. Die Vermeidung bzw. Verminderung treibhauswirksamer Emissionen ist und bleibt eine zentrale Aufgabe der Klimapolitik. Aufgrund der Trägheit des Klimasystems wirken Maßnahmen zum Klimaschutz (Vermeidung) langfristig. Nur durch intensive Bemühungen im Klimaschutz lassen sich langfristig die globalen Risiken durch Klimaänderungen verringern. Es ist kein Widerspruch dazu, dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten gleichzeitig Aktivitäten zur Anpassung an den nicht mehr vermeidbaren Klimawandel intensiviert werden müssen. Auch wenn die Klimaschutzbemühungen Wirkung zeigen, gibt es einen spürbaren Klimawandel – hierfür bedarf es Strategien und Maßnahmen zur Anpassung.

Dringender Forschungsbedarf hinsichtlich der Klimafolgen für Hamburg besteht vor allem für die Handlungsfelder Gesundheit, Wirtschaft und Tourismus, Infrastruktur sowie Katastrophenschutz/Feuerwehr/Rettungsdienst und Bodenschutz, Naturschutz sowie Forstwirtschaft. Um den Prozess der Anpassungsstrategie zu unterstützen, spielt zudem der Bereich Bildung und Forschung eine wichtige Rolle.

4 Projekte und Gutachten zu Klimafolgen und Anpassung

Im Folgenden werden stichpunktartig abgeschlossene und laufende Projekte und Gutachten zu Klimafolgen und Anpassung in Hamburg nach Handlungsfeldern aufgelistet.

4.1 Abgeschlossene Projekte/Gutachten

Küsten- und Hochwasserschutz

- UFM – Urban Flood Management in Hamburg: Flächen- und Katastrophenmanagement überschwemmungsgefährdeter städtischer Gebiete als Konsequenz auf eine Risikozunahme durch Klimaänderung im Rahmen der BMBF Förderaktivität "RIMAX - Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse" <http://ufm-hamburg.wb.tu-hamburg.de/>
- FLOWS-Projekt (Flood Plain Land Use Optimizing Workable Sustainability) <http://www.flows.nu/>

Wasserwirtschaft

- Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg:
 - Umgang mit dem Klimawandel für verschiedene Bemessungsaufgaben in den Bundesländern (hydro & meteo 2009)
 - Auswertung regionaler Klimamodellergebnisse hinsichtlich Starkniederschlagsindizes für die Metropolregion Hamburg (Göttel & Jacob 2009)
 - Gutachten zur Auswertung der REMO-Daten im EZG der Wandse
- Hamburg Wasser und MPI: Auswirkungen des Klimawandels auf das Hamburger Kanalnetz (Kuchenbecker et al. 2005)
- URBAS - Urbane Sturzfluten: Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten <http://www.urbanesturzfluten.de/schlussbericht/fallstudien%20Hamburg%20bis%20Lohmar/view>

- Risk Assessment and Risk Management for Small Urban Catchments
http://suca.wb.tu-harburg.de/fileadmin/BackUsersResources/Downloads/SUCAProject_FinalReport_corr011208%20.pdf sowie <http://suca.wb.tu-harburg.de/index.php?id=402>

Stadtplanung / Grünflächen

- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Amt für Landes- und Landschaftsplanung: Grundlagenpapier „Eine Grobstruktur für die Beziehung zwischen der Siedlungs- und Freiflächenplanung und dem Klimaschutz bzw. Klimawandel“ (Gertz, Gutsche, Rümenapp 2008)
- Hafen City und IBA Labor „Architektur im Klimawandel“
http://www.iba-hamburg.de/bilder_dokumente/dokumente/labore/architektur_im_klimawandel/architektur_klimawandel_dokumentation.pdf

Infrastruktur

- Stadtreinigung Hamburg (SRH) „Abfallwirtschaft und Klimaschutz - Optimierung der Abfallwirtschaft in Hamburg unter dem besonderen Aspekt des Klimaschutzes“ (Dehoust et al. 2008)

4.2 Geplante laufende Projekte/Gutachten

Küsten- und Hochwasserschutz

- Das Tideelbekonzept (Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg)
http://www.tideelbe.de/files/strategiepapier_tideelbe_deu.pdf sowie <http://www.tideelbe.de/>

Wasserwirtschaft

- Kompetenznetzwerk Hamburg Wasser und der Landesbetrieb Straßen Brücken und Gewässer (LSBG) → Projekt Regenwassermanagement

Bodenschutz

- Einrichtung von HUSCO (Hamburg Urban Soil Climate Observatory) → eingebunden in CliSAP <http://www.mi.uni-hamburg.de/Hamburg-Urba.6566.0.html>
- Institut für Bodenkunde (E.-M. Pfeiffer und A. Eschenbach) der Uni Hamburg im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Abteilung Bodenschutz/Altlasten: laufender Auftrag „Handlungskonzept Bodenschutz und Klimafolgen“ → durchgeführt am Beispiel der „Kirchdorfer Wiesen“
- Altlasten → Gefahrenbeurteilung auf Grund steigender Grundwasserspiegel

Stadtplanung/Grünflächen

- Stadtklimatische Bestandaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm HH
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) „Sprung über die Elbe“ und IBA → „Stadt im Klimawandel“ Projekte zum Klimaschutz

Gesundheit

- CLIMAderm: Einfluss des Klimawandels auf die Prävalenz von Hautkrebserkrankungen
http://www.uke.de/kliniken/hautklinik/index_44545.php

- Institut für Hygiene und Umwelt
 - Identifikation möglicher Einschleppungsorte und -wege der asiatischen Tigermücke
 - Untersuchung und Monitoring der Stadtrattenpopulation
 - molekularbiologische Untersuchungen von Zecken

Sektorübergreifend

- Norddeutsches Klimabüro (am GKSS): Klimabericht für die Metropolregion Hamburg (erscheint Ende November)
 - KLIMZUG-NORD mit insgesamt 25 Teilprojekten zu:
 - Ästuarmanagement
 - Integrierte Stadt- und Raumentwicklung
 - Zukunftsfähige Kulturlandschaften
 - Querschnittsaufgaben (Klimawandel, Naturschutz, Ökonomie, Governance, Kommunikation und Bildung)
- <http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-03-30-KLIMZUG-NORD>

5 Literatur

- Bartels C & H Heinrichs (2009): Klimabedingte Änderungen in Wirtschaftssektoren – Tourismus. In: Klimabericht der Metropolregion Hamburg. In Vorbereitung.
- Bengtsson L, Hodges K, Roeckner E (2006) Storm tracks and climate change. *J Climate* 19: 3518–3543.
- BSU (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg) (2006): Dezentrale naturnahe Regenwasserbewirtschaftung. Broschüre. Abrufbar unter: <http://www.hamburg.de/contentblob/135118/data/regenwasserbroschuere.pdf> (23.09.2009)
- Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (2007) Ein Tideelbmanagement zur dauerhaften Sicherung der seeschifftiefen Zufahrt zum Hamburger Hafen. Hamburg (Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft; Drucksache 18/6207 vom 08.05.2007)
- CEC-Potsdam (Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH) (2007a) Szenarien mit STAR (Statistisches Regionalisierungsmodell). Abrufbar unter: <http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/STAR/star.html> (10.08.2009)
- CEC-Potsdam (Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH) (2007b) Szenarien mit CLM (Climate Lokal Model). Abrufbar unter: <http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/CLM/clm.html> (10.08.2009)
- Chmielewski, F.-M. (2009): Klimawandel und Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg In: Klimabericht der Metropolregion Hamburg. *In Vorbereitung*.
- Chmielewski, F.-M.; Blümel, K.; Henniges, Y.; Müller, A. (2008): Klimawandel und Obstbau in Deutschland. Zweiter projektspezifischer Teilbericht des BMBF-Verbundprojekts KliO. Humboldt-Universität, Selbstverlag.
- CLM-Community (2008): Climate Version of the „Lokal model“. Abrufbar unter: <http://www.clm-community.eu/index.php?menuid=17> (10.08.2009)
- Dahl-Jensen, D. (2009): The Greenland Ice Sheet in a changing climate. Component 2 in SWIPA: An Arctic Council Project coordinated by AMAP-IASC-WCRP/CLiC-IPY.
- Daschkeit A (2009): Mögliche Klimaentwicklungen bis 2100 in der Region. In: Klimabericht der Metropolregion Hamburg. *In Vorbereitung*.
- Dehoust G, Schüler D, Bleher D, Seum S, Süß K, Idelmann M, Turk T, Wöbbeking K H, Wollny V, Schaubbruch W (2008): Optimierung der Abfallwirtschaft in Hamburg unter dem besonderen Aspekt des Klimaschutzes - Abfallwirtschaft und Klimaschutz. *Unveröffentlicht*.

- Duchrow H (2008): Zum ökologischen Wert des Grünzuges am Isebek-Kanal. Abrufbar unter: <http://www.isebek-initiative.de/uploads/dokumente/background/20080719-Isebek-Biotope.pdf> (15.10.2009)
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2009a): Neue Fakten zum Klimawandel in Deutschland - Der Klimawandel hat sich beschleunigt. Pressemitteilung vom 28.04.2009. Abrufbar unter: http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?nfpb=true&pageLabel=dwdwww_menu2_presse&T98029gsbDocumentPath=Content%2FPresse%2FPressemitteilun-gen%2F2009%2F20090428_Klimawandel_Deutschland_news.html (03.09.2009)
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2009b): Klimawandel in Hamburg. Poster zur 1. Hamburger Klimawoche 2009, *bedarf Genehmigung*.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2007) Das Projekt ZWEK des Deutschen Wetterdienstes. Abrufbar unter: http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/ZWEK/sqa_websites_readme_deutsch.pdf (11.08.2009)
- Fickert M, Strotmann T (2009): Zur Entwicklung der Tideverhältnisse in der Elbe und dem Einfluss steigender Meeresspiegel auf die Tidedynamik in Ästuaren. HTG-Kongress September 2009 in Lübeck. Abrufbar unter: http://www.tideelbe.de/files/tb_htg_fickert_strotmann_a4.pdf (30.10.2009)
- Fickert M, Strotmann T (2007): Hydrodynamische Entwicklung der Tideelbe. In: Gönnert G, Pflüger B & Bremer J-A [Hrsg.] Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement. Coastline Reports 9, 59-68.
- Freitag C, Hochfeld B, Ohle N (2007): Lebensraum Tideelbe. In: Gönnert G, Pflüger B & Bremer J-A [Hrsg.] Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement. Coastline Reports 9, 69-79.
- Gertz, Gutsche, Rügenapp 2008: Eine Grobstruktur für die Beziehung zwischen der Siedlungs- und Freiflächenplanung und dem Klimaschutz bzw. Klimawandel – Grundlagenpapier.
- Gerstner E-M, Meinke I & H von Storch (2009): Norddeutsches Klimabüro nimmt Stellung: Maximaltemperaturen bis zu 50 Grad Celsius auch im Hamburger Raum? Mitteilungen DMG (Deutsche Meteorologische Gesellschaft) 1: 12-13.
- GKSS 2008: Klima wandelt Herbst in Norddeutschland: Später, wärmer, grüner. Pressemitteilung des GKSS-Forschungszentrum Geesthacht vom 10.11.2008. Abrufbar unter http://www.gkss.de/public_relations/press_releases/007094/index_0007094.html.de (18.08.2009)
- Gobiet A & H Truhetz (2008): Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich. In: Böhm, R., R. Godina, H.P. Nachtnebel & O. Pirker [Hrsg.]: Auswirkungen des Klimawandels auf die Österreichische Wasserwirtschaft: 71-82. Wien (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaft).
- Gönnert G, von Storch H, Jensen J, Thumm S, Wahl T, Weisse R (2009): Der Meeresspiegelanstieg – Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. *In Vorbereitung, erscheint in Die Küste*.
- Göttel H & D Jacob (2009) Erläuterungsbericht - Auswertung regionaler Klimamodellergebnisse entlang des IPCC Szenarios A1B hinsichtlich Starkniederschlagsindizes für die Metropolregion Hamburg. Im Auftrag des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg. *Unveröffentlicht*.
- Hagemann S & D Jacob (2006): Regionale Auswirkungen des Klimawandels über Deutschland und dem Rhein-Einzugsgebiet. Abrufbar unter http://www.zukunft-statt-braunkohle.de/documents/hagemann_pulheim.pdf (05.08.2009)

- Heyer H, Plüß A (2009): Mögliche Folgen des Klimawandels für die Seeschiffahrtsstraßen. Abrufbar unter: http://www.tideelbe.de/files/tb_htg_fickert_strotmann_a4.pdf (30.10.2009)
- HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2005): Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012 – Projektbaustein II: Klimawandel und Klimafolgen in Hessen. Abschlussbericht.
- HPA & WSV 2006: Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg - Ein Diskussionsbeitrag der Hamburg Port Authority und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Abrufbar unter http://www.tideelbe.de/files/strategiepapier_tideelbe_deu.pdf (18.08.2009).
- hydro & meteo (2009): Zusammenstellung und Bewertung des Umgangs mit dem Klimawandel für verschiedene Bemessungsaufgaben in den Bundesländern. Bericht an den Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer. *Unveröffentlicht*.
- Jacob, D. (2008): Klimaänderung in Europa: Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. www.laendlicher-raum.at/filemanager/download/28091/ (Stand: 18.09.2008).
- Jacob D, Göttel H, Kotlarski S, Lorenz P, Sieck K (2008) Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Umweltbundesamt [Hrsg.]. Dessau. Abrufbar unter: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3513.pdf> (Datum: 11.09.2008)
- Jensen K, Reisdorff C, Pfeiffer E-M, von Oheimb G, Schrautzer J, Meyer-Grünefeldt M und W Härdtle (2009): Auswirkungen des Klimas auf terrestrische und semi-terrestrische Ökosysteme. In: Klimabericht der Metropolregion Hamburg. *In Vorbereitung*.
- Kuchenbecker A., Bischoff G., Ziegler J., Krieger K. und H.-R. Verworn (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf das Hamburger Kanalnetz (unveröffentlicht, erfordert Genehmigung)
- LfU (Bayrisches Landesamt für Umwelt) (2008): Klimawandel und Boden. http://www.lfu.bayern.de/boden/forschung_und_projekte/klimawandel_und_boden/index.htm (Zugriff: 01.08.2008).
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern (2008): Studie aufgrund des Landtagsbeschlusses vom 29.03.2007 („Klimaschutz und Folgen des Klimawandels in Mecklenburg-Vorpommern“, Drs. 5/352). Schwerin.
- MUNLV (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen) (2007): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Wege zu einer Anpassungsstrategie. Düsseldorf.
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H.H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor & Z. Dadi (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge.
- Neubecker J, Köhler S, Obst G & K Jensen (2005): Der Schierlings-Wasserfenchel. Eine erfolgreiche Ansiedlung einer prioritären FFH-Art an der Elbe. *Naturschutz und Landschaftspflege* 37(8): 248-255.
- Norddeutsches Klimabüro (2009): Norddeutscher Klimaatlas: <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/startseite.html>. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht.
- PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V.) (2004): PIK Zweijahresbericht 2002/2003 - Potsdam. Abrufbar unter: <http://www.pik-potsdam.de/infoteh/broschueren/zweijahresberichte/zwjb2002-03d-lr.pdf> (10.08.2009)

- Rauner M (2009): Die Ruhe vor dem Sturm – Debatte um Küstenschutz. ZEIT Wissen Nr. 5. Abrufbar unter: <http://www.zeit.de/zeit-wissen/2009/05/Kueste> (06.08.2009)
- Riecke W & Rosenhagen G (2009): Das Klima von Hamburg. Ber. Dt. Wetterdienst, ergänzte Neuauflage von Ber. Dt. Wetterd. 15 (113), 1976. *In Vorbereitung.*
- Rosenhagen G (2008): Meteorologischer Hintergrund II: Zur Entwicklung der Sturmaktivität in Mittel- und Westeuropa. Promet, 34, Nr. 1/2, 2008, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, S. 58-60.
- Schlünzen K.H., Hoffmann P., Rosenhagen G., Riecke W. (2009): Regional differences in temperature and precipitation in the area of Hamburg. Internat. J. Climatology 2009.
- Schönwiese, C.-D., Janoschitz, R. (2005): Klima-Trendatlas Deutschland, 1901-2000. Ber. d. Inst. f. Atmosphäre u. Umwelt d. Uni. Frankfurt, 4, 63 pp.
- Spekat A, Enke W & F. Kreienkamp (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WettReg auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarios B1, A1B und A2. Endbericht, UBA, Dessau. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf.
- von Storch H, Meinke I, Weisse R, (2009): Nordseesturmfluten im Klimawandel. Vortrag auf dem Symposium "Stormvloed 1509 – Geschiedenis van de Dollard", 19. September 2009.
- von Storch H, Meinke I, Weisse R, Woth K (2007) Regionaler Klimawandel in Norddeutschland. Workshop von DKKV (Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge) und ARL (Akademie für Raumordnung und Landesplanung)
- Tetzlaff B, Kunkel R, Taugs R, Dörhöfer G & F Wendland (2004): Grundlagen für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen in der Metropolregion Hamburg. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich.
- TuTech Innovation GmbH (2008) KLIMZUG-NORD - Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg. Projektantrag im Rahmen der BMBF Ausschreibung: „Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten. Regionen gewinnen im Wettbewerb – die Welt gewinnt mit!“. *Unveröffentlicht.*
- University of Copenhagen (2009): Synthesis Report from Climate Change – Global Risk, Challenges & Decisions, March 2009. Copenhagen.
- Walkenhorst O & M Stock (2009) Regionale Klimaszenarien für Deutschland - Eine Leseanleitung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, E-Paper Nr. 6. Hannover.
- Weber R (o. J.): Klimawandel und Obstbau an der Niederelbe: Auswirkungen und Perspektiven. Präsentation. Obstbauversuchsanstalt Jork. Abrufbar unter: http://cdl.niedersachsen.de/blob/images/C43091707_L20.pdf (15.09.2009)
- Werner, P C, Gerstengarbe F-W, Wechsung F (2008): Großwetterlagen and precipitation trends in the Elbe river catchment. Met. Zeitschrift 17 (1): 61-66.
- Zorita E & H. von Storch (1999): The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods. In: Journal of Climate 12 (8): 2474-2489.

6 Anhang

Basisdaten zur Temperaturänderung

Tabelle A- 1: minimale und maximale Temperaturänderung für die **Metropolregion** Hamburg; Quelle: nach Norddeutsches Klimabüro (2009) und Daschkeit (2009); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCO, STAR und WettReg.

Klimaszenarien Referenzzeitraum	nur SRES A1B 1971/2000	SRES A1B, A2, B1, B2 1961/1990	
Änderung bis 2050 in °C	ZWEK 2021/2050	Klimaatlas 2011/2040 2041/2070	
Jahresmitteltemperatur	0,75 – 1,75	0,5 – 1,1	1,2 – 2,2
Frühjahr	0,0 – 2,0	-0,1 – 0,9	0,4 – 1,6
Sommer	0,5 – 2,0	0,7 – 0,9	1,1 – 1,9
Herbst	0,5 – 2,0	0,4 – 1,4	1,5 – 2,4
Winter	1,0 – 2,0	0,6 – 1,6	1,3 – 2,9

Änderung bis 2100 in °C	ZWEK ¹⁹ 2071/2100	Klimaatlas 2071/2100	
Jahresmitteltemperatur	2,25 – 3,0	2,0 – 4,7 (2,9)	
Frühjahr	0,5 – 2,5	1,4 – 4,1 (2,2)	
Sommer	2,0 – 3,0	1,8 – 5,3 (3,0)	
Herbst	2,0 – 3,5	2,1 – 4,4 (3,0)	
Winter	3,5 – 4,5	1,7 – 5,0 (3,1)	

Tabelle A- 2: minimale und maximale Temperaturänderung für **Hamburg** → REMO: A1B, A2, B1; Quelle: Jacob et al. (2008)

Änderung in °C (verglichen mit 1961/1990)	2021/2050	2071/2100
Jahresmitteltemperatur	0,6 – 1,5	1,9 – 2,9
Frühjahr	0,0 – 1,0	1,2 – 2,1
Sommer	0,7 – 1,4	1,8 – 2,9
Herbst	0,6 – 1,7	2,1 – 3,1
Winter	0,9 – 1,8	2,5 – 3,6

Tabelle A- 3: Mittlere Temperaturänderung für Norddeutschland (SH, HH, N), keine Angabe zum verwendeten Modell, basiert auf A2 und B2; Quelle: von Storch et al. (2007), vgl. Abbildung A- 1)

Temperaturänderung in °C (verglichen mit 1961/1990)	Zeithorizont 2030			Zeithorizont 2085		
	Tmean	Tmin	Tmax	Tmean	Tmin	Tmax
Wintermonate	1	1	1	3,1	3,1	3,1
Sommermonate	1	1	1,1	3,4	3,1	3,9

¹⁹ Ohne STAR (Projektion nur bis 2055)

Basisdaten zur Niederschlagsänderung

Tabelle A- 4: minimale und maximale relative Niederschlagsänderung für die Metropolregion Hamburg; Quelle: nach Norddeutsches Klimabüro (2009) und Daschkeit (2009); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCAO, STAR und WettReg.

Klimaszenarien	nur SRES A1B	SRES A1B, A2, B1, B2	
Referenzzeitraum	1971/2000	1961/1990	
Änderung bis 2050 in %	ZWEK 2021/2050	Klimaatlas 2011/2040 2041/2070	
Jahresniederschlag	-5 – +10	0 – +9	+2 – +10
Frühjahr	-15 – +15	-9 – +12	+6 – +14
Sommer	+5 – -25	-6 – +6	-2 – -10
Herbst	-5 – +40	+2 – +10	+3 – +20
Winter	-5 – +15	0 – +21	+9 – +33

Änderung bis 2100 in %	ZWEK ¹ 2071/2100	Klimaatlas 2071/2100	
Jahresniederschlag	-5 – +10	0 – +12 (unklar)	
Frühjahr	-5 – +15	-10 – +23 (+7)	
Sommer	-5 – -40	-7 – -41 (-21)	
Herbst	-15 – +25	+6 – +34 (+15)	
Winter	-25 – +40	+18 – +53 (+31)	

Tabelle A- 5: minimale und maximale relative Niederschlagsänderung für Hamburg (REMO: A1B, A2, B1); Quelle: Jacob et al. (2008)

Änderung in % (verglichen mit 1961/1990)	2021/2050	2071/2100
Jahresniederschlag	+4 – +8	+6 – +9
Frühjahr	+1 – +5	+5 – +14
Sommer	-7 – +8	-13 – -11
Herbst	+7 – +20	+14 – +20
Winter	+4 – +12	+19 – +23

Tabelle A- 6: Mittlere Niederschlagsänderung für Norddeutschland (SH, HH, N), keine Angabe zum verwendeten Modell, basiert auf A2 und B2; Quelle: von Storch et al. (2007), vgl. Abbildung A- 1)

Niederschlagsänderung in % (verglichen mit 1961/1990)	Zeithorizont 2030	Zeithorizont 2085
Wintermonate	+11%	+32%
Sommermonate	-10%	-30%

Kenntage

Tabelle A- 7: Änderung der Sommertage und heißen Tage; Quelle: nach Norddeutsches Klimabüro (2009) und Daschkeit (2009); basierend auf REMO, COSMO-CLM, RCAO, STAR und WettReg.

<i>Klimaszenarien</i>	<i>nur SRES A1B</i>	<i>SRES A1B, A2, B1, B2</i>	
Änderung bis 2050	ZWEK 2021/2050	Klimaatlas 2011/2040 2041/2070	
Sommertage/Jahr	0 – 24	0,7 – 4,0	4,6 – 8,8
Heiße Tage/Jahr	0 – 9	0,2 – 1,4	1,1 – 3,4
Tropische Nächte/Jahr		0,2 – 0,6	0,3 – 2,0
Frosttage/Jahr		-7,4 – -21,5	-16 – -39,8
Eistage/Jahr		-1,7 – -12,2	-6 – -19,4

<i>Klimaszenarien</i>	<i>nur SRES A1B</i>	<i>SRES A1B, A2, B1, B2</i>	
Änderung bis 2100	ZWEK ¹ 2071/2100	Klimaatlas 2071/2100	
Sommertage/Jahr	8 – 24	7,1 – 41,7 (17,7)	
Heiße Tage/Jahr	3 – 12	1,8 – 14,9 (6,1)	
Tropische Nächte/Jahr		1,2 – 18,4 (7,7)	
Frosttage/Jahr		-15,8 – -47,6	
Eistage/Jahr		-6,7 – -22,1	

Tabelle A- 8: Änderung der mittleren Windgeschwindigkeiten relativ zu 1961/1990; Quelle: nach Norddeutsches Klimabüro (2009) basierend auf REMO, COSMO-CLM und RCAO für die SRES-Szenarien A1B, A2, B1, B2.

Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit in %	Norddeutscher Klimaatlas		
	2011/2040	2041/2070	2071/2100
im Jahr	0 – +1 (unklar)	0 – +2 (unklar)	+1 – +4 (+2)
Frühjahr	-1 – +2 (0)	+1 – +4 (+2)	-1 – +4 (+2)
Sommer	-2 – +1 (0)	-1 – +2 (0)	-12 – +1 (-3)
Herbst	-1 – +2 (+1)	-1 – +4 (+1)	+1 – +8 (+3)
Winter	0 – +4 (unklar)	0 – +3 (0)	0 – +15 (unklar)

Tabelle A- 9: Änderung der Sturmtage verglichen mit 1961/1990; Quelle: nach Norddeutsches Klimabüro (2009) basierend auf REMO, COSMO-CLM und RCAO für die SRES-Szenarien A1B, A2, B1, B2.

Änderung in Tagen	2011/2040	2041/2070	2071/2100
Sturmtage im Jahr	-0,2 – +1,8 (+0,5)	-1,0 – +2,9 (+0,5)	+1,6 – +3,7 (+2,3)
Frühjahr	-0,4 – +0,4 (-0,1)	-0,3 – +0,7 (+0,1)	-0,2 – +0,6 (+0,2)
Sommer	-0,7 – +0,1 (-0,3)	-0,7 – +0,3 (-0,2)	-0,6 – +0,4 (-0,2)
Herbst	-0,1 – +0,7 (+0,4)	-0,4 – +2,1 (+0,8)	+0,6 – +1,6 (+0,9)
Winter	0,0 – +1,4 (unklar)	-0,6 – +1,2 (+0,4)	+0,7 – +2,8 (+1,6)

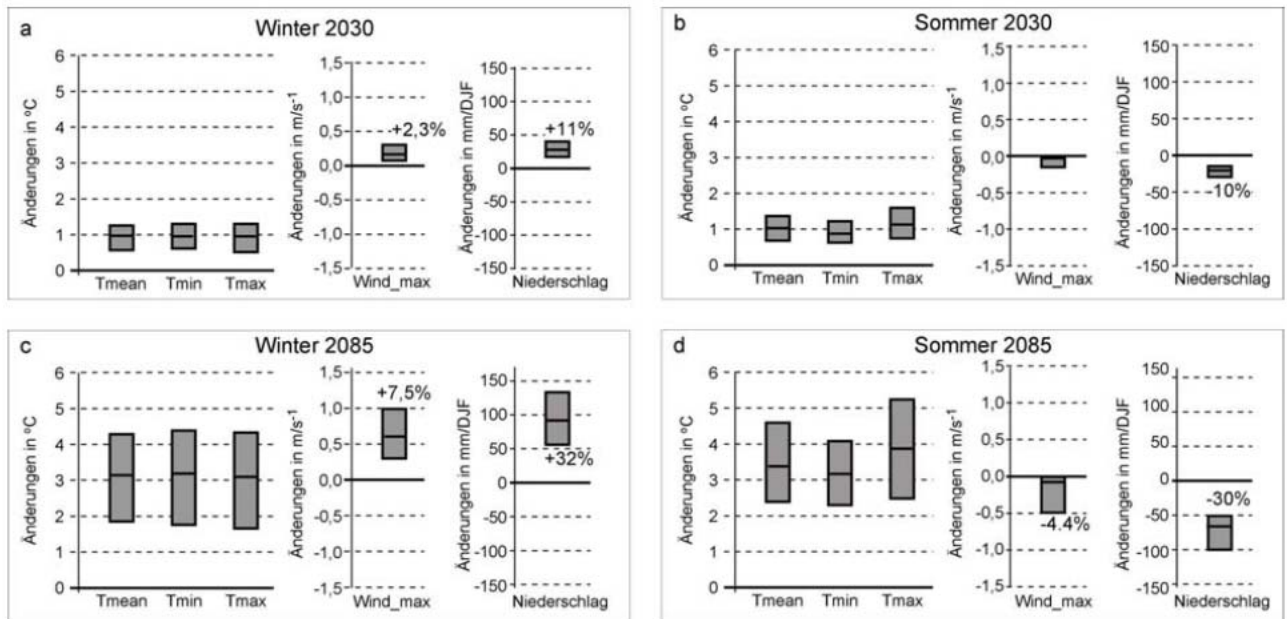


Abbildung A- 1: Szenarien von Änderungen der Temperatur (Tagesmittel, Tagesmaximum, Tagesminimum), der maximalen Windgeschwindigkeit und der monatliche Summe in Niederschlägen in Norddeutschland (Mittelwerte des Gebietes Schleswig-Holstein, Hamburg und Niedersachsen). Oben: Zeithorizont 2030; Unten: Zeithorizont 2085. Rechts: Sommermonate. Links: Wintermonate; Quelle: von Storch et al. (2007)

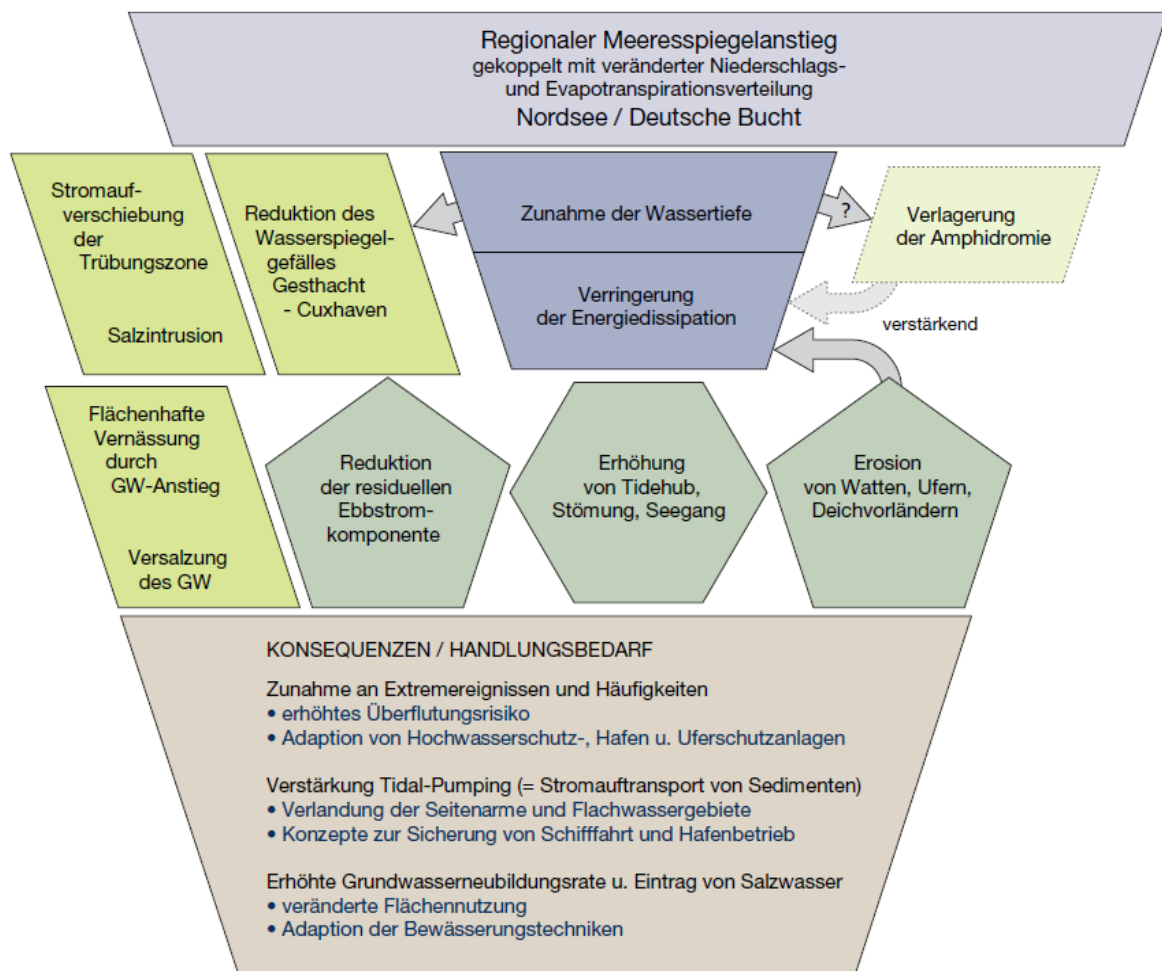


Abbildung A- 2: Auswirkungen auf das Elbeästuar unter geänderten Klimabedingungen; Quelle: TuTech Innovation GmbH (2008)