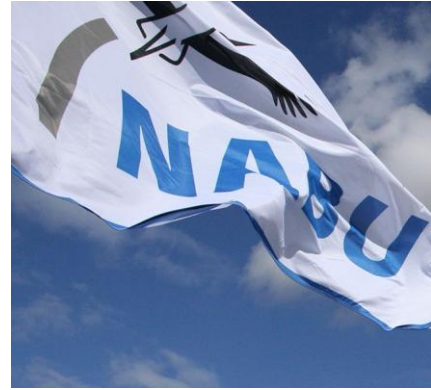




Klimaanpassung: Wie umgehen mit den Folgen der Klimakrise?

Ökosystembasierte Ansätze für Gesellschaft, Natur und Klima

Hitzewellen, Dürrephasen, Starkregen – die Anpassung an die Folgen der Klimakrise, kurz Klimaanpassung, gewinnt im Zuge der fortschreitenden Erderwärmung rasch an Bedeutung. Selbst wenn ab sofort keine Treibhausgase mehr in die Atmosphäre gelangten, würden die vergangenen Emissionen noch einige Jahrzehnte nachwirken. Um angesichts zunehmender Extremwetterereignisse und steigender Temperaturen die Gesundheit der Bevölkerung und die allgemeine Handlungsfähigkeit zu sichern, müssen vorbeugende und adaptive Maßnahmen ergriffen werden. Zugleich können nur intakte Ökosysteme weiterhin zentrale Leistungen wie Wasserspeicherung und Kohlenstoffbindung erbringen. Weitsichtige und ganzheitliche Anpassungsstrategien berücksichtigen daher sowohl soziale als auch ökologische Aspekte und fördern die Synergien zwischen beiden Bereichen. Neben dem Schutz von Klima und Biodiversität ist die Klimaanpassung damit ein wichtiger Baustein für eine lebenswerte Zukunft.



Kontakt

NABU Bundesgeschäftsstelle

Till Hopf
Leiter Biodiversität

Tel. +49 (0)30.28 49 84 16 18
Till.Hopf@NABU.de

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| I. Einführung | 1 |
| 1. Klimakrise: Globale Herausforderung, unvermeidliche Folgen | 1 |
| 2. Klimaanpassung: Chancen und Grenzen | 2 |
| a) Definition und Ziel | 2 |
| b) Kategorien von Anpassungsmaßnahmen | 3 |
| c) Wahl von Anpassungsmaßnahmen | 4 |
| d) Synergien und Konflikte | 5 |
| e) Ökosystembasierte Anpassung | 6 |
| f) Grenzen der Anpassung | 6 |
| II. Klimakrise: Entwicklungen in Deutschland | 9 |
| 1. Temperatur | 9 |
| 2. Niederschlag | 10 |
| 3. Extremereignisse | 11 |
| III. Klimaanpassung für Mensch und Umwelt | 14 |
| 1. Biologische Vielfalt | 14 |
| a) Wenn der Frühling früher kommt: Klimafolgen für Arten und Lebensräume ... | 14 |
| b) Anpassen und anpassen lassen: Klimaanpassung im Naturschutz | 18 |
| c) Empfehlungen | 22 |
| 2. Wald und Forst | 23 |
| a) Borkenkäfer, brennende Bäume: Wälder im Trockenstress | 23 |
| b) Heimisch und laubig: Klimaanpassung von Wald und Forst | 25 |
| c) Empfehlungen | 27 |
| 3. Wasser | 28 |
| a) Zu viel, zu wenig, zu warm: Landschaftswasserhaushalt in der Klimakrise | 29 |
| b) Wasserrückhalt in der Fläche: Anpassung an Wassermangel und -überschuss .. | 35 |
| c) Empfehlungen | 36 |
| 4. Landwirtschaft | 37 |
| a) Zwischen Dünger und Dürre: Landwirtschaft in der Klimakrise | 37 |
| b) Boden aufbauen, Vielfalt säen: Klimaanpassung auf Acker und Grünland | 38 |
| c) Empfehlungen | 40 |
| 5. Küste und Meer | 40 |
| a) Steigende Spiegel, saure See: Klimafolgen für Nord- und Ostsee | 41 |
| b) Flexible Küsten, geschützte Zonen: Klimaanpassung von Küste und Meer | 45 |
| c) Empfehlungen | 48 |
| 6. Städte und Siedlungen | 49 |
| a) Hitze in der Stadt: Klimafolgen in urbanen Regionen | 49 |
| b) Aus Grau mach' Grün: Robuste Strategien für resiliente Städte | 51 |
| c) Empfehlungen | 55 |
| IV. Quellenangaben | 57 |

I. Einführung

1. Klimakrise: Globale Herausforderung, unvermeidliche Folgen

Worüber in der Wissenschaft schon lange Konsens herrscht, ist inzwischen auch unter Laien bekannt, ja fast schon eine Binsenweisheit: Die gegenwärtige globale Erwärmung ist menschengemacht und maßgeblich durch anthropogene Treibhausgasemissionen bedingt (IPCC, 2021). Spätestens seit die Aktivistin Greta Thunberg das Thema mit der Fridays-for-Future-Bewegung national und international auf die politische Agenda hob, ist auch klar: Klimaschutz ist eine Frage der Gerechtigkeit, zwischen Generationen wie zwischen Nationen. Nun urteilt sogar das Bundesverfassungsgericht: Die notwendigen Anstrengungen zum Erreichen des in Paris vereinbarten 1,5-Grad-Limits dürfen nicht in die Zukunft verlagert werden; die bisherigen Emissionsminderungen reichen nicht aus. Kurzum: Klimaschutz scheint endlich in der Mitte der Gesellschaft angekommen. Was dabei aber oft vergessen wird: Die Klimakrise ist bereits in vollem Gange. Zwar kann womöglich noch verhindert werden, dass entscheidende Kippunkte überschritten und damit Kaskadeneffekte ausgelöst werden, die extreme, unumkehrbare Veränderungen des Erdsystems bewirken. Ein Beispiel ist das Abschmelzen des arktischen Meereises. Doch auch der beste Klimaschutz kann die vergangenen Treibhausgasemissionen nicht ungeschehen machen – und diese haben unausweichliche Konsequenzen.

Bereits jetzt sind die Auswirkungen der Klimakrise spürbar – längst nicht mehr nur im globalen Süden, wo Zyklone und Überschwemmungen regelmäßig die Lebensgrundlage unzähliger Menschen zerstören, sondern immer öfter auch vor der eigenen Haustür. Wiederkehrende Extremwetterereignisse haben Spuren hinterlassen; Dürresommer, Sturzfluten und Hochwasser haben die Krisensituation so greifbar gemacht wie nie zuvor. Auch Ökosysteme leiden unter der globalen Erwärmung; die Klimakrise befeuert das Artensterben und den Verlust einzigartiger Lebensräume. Bedrückend ist daher die Tatsache, dass die Klimafolgen zunehmen und die vergangenen Emissionen erst im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts ihre volle Wirkung entfalten werden. Denn das Klimasystem ist träge: Selbst wenn ab sofort keine Treibhausgase mehr in die Atmosphäre gelangten, nähme die Klimakatastrophe zunächst weiter Fahrt auf. Es ist daher essenziell, sich gegen ihre unvermeidlichen Auswirkungen zu wappnen und sich an diese anzupassen. Nur dann ist die Gesundheit der Menschen und die gesellschaftliche Handlungsfähigkeit – gerade in Bezug auf die Bekämpfung der Klima- und Artenkrise – auch in Zeiten von Extremwetterereignissen und steigenden Temperaturen gegeben.

Klimaanpassung spielt also eine entscheidende Rolle auf dem Weg in eine lebenswerte Zukunft. Dennoch fällt sie in der öffentlichen Wahrnehmung meist hinter Klima- und Naturschutz zurück. Warum Anpassung mehr Aufmerksamkeit verdient und welche Chancen sich aus ihr ergeben, soll in diesem Hintergrundpapier verdeutlicht werden. Es bietet einen breiten Einblick in die Thematik aus deutscher Perspektive, mit einem Fokus auf dem Zusammenspiel zwischen Naturschutz, Klimaschutz und Anpassung. Zu Beginn wird die Idee der Klimaanpassung näher beleuchtet, wobei verschiedene Arten von Anpassungsmaßnahmen vorgestellt werden. Ökosystembasierte Anpassung nimmt dabei als ganzheitlicher Ansatz einen besonderen Stellenwert ein. Auch die Grenzen der Anpassung werden thematisiert. Es folgt ein Abschnitt zu den Entwicklungen der Klimakrise in Deutschland, an deren Folgen es sich anzupassen gilt. Im Mittelpunkt stehen sodann sechs Schwerpunktbereiche, innerhalb derer die Klimakrise sich sowohl auf Ökosysteme als auch Gesellschaft auswirkt: Biologische Vielfalt, Wald und Forst, Wasser, Landwirtschaft, Küste und Meer sowie Städte und Siedlungen. Für jeden dieser Bereiche werden die bereits eingetretenen und die erwarteten Klimafolgen erläutert, bevor verschiedene Anpassungsoptionen vorgestellt werden. Den Abschluss der Schwerpunktkapitel bilden NABU-Empfehlungen zum Thema.

1,5-Grad-Limit

Das 1,5-Grad-Limit ist Teil des Übereinkommens von Paris, eine Vereinbarung im Rahmen der Klimarahmenkonvention der UN (UNFCCC). Das Hauptziel ist eine Beschränkung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius gegenüber den vorindustriellen Temperaturen (um 1850). Die 195 Vertragsparteien formulierten als zusätzliches Ziel Anstrengungen, den Anstieg auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, da die Klimafolgen im Vergleich zu 2 Grad Anstieg deutlich geringer wären. (EU Kommission, ohne Jahr)

Wetter

Der Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Tag in einer Region inklusive kurzfristiger Schwankungen.

Klima

Statistische Synthese des Wetters einer Region, bezogen auf einen Zeitraum von meist 30 Jahren. Die 30-jährigen Referenzperioden werden von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert, um die Vergleichbarkeit jeglicher Ergebnisse zu gewährleisten. (Bender et al., 2017)

2. Klimaanpassung: Chancen und Grenzen

Die Idee der Notwendigkeit einer Anpassung an die Folgen der Klimakrise, kurz Klimaanpassung, ist nicht neu. Schon im ersten Sachstandsbericht des Weltklimarats IPCC vom Jahre 1990 (IPCC, 1992) nimmt *Adaptation* (Klimaanpassung) eine prominente Rolle neben *Mitigation* (Minderung der Klimakrise bzw. Klimaschutz) ein. Seitdem haben die Berichte der Arbeitsgruppe II zu Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit im Kontext der Erderhitzung globale Bekanntheit erlangt – zumindest in akademischen Kreisen. In der politischen Diskussion wurde das Thema jedoch traditionell vom Klimaschutz überschattet. Zum einen herrschte lange die Ansicht, die Klimakrise sei allein mit Emissionsminderung in den Griff zu bekommen. Zum anderen gab es die Befürchtung, dass Anpassungsbestrebungen zu viele Ressourcen und die nötige Aufmerksamkeit vom Kampf gegen die Erderwärmung weglenken würden (Ford, 2007).

Um die Jahrtausendwende begann langsam ein Umdenken; Minderung und Anpassung wurden zunehmend als komplementäre Strategien und nicht mehr als sich gegenseitig ausschließende Alternativen betrachtet (Beck et al., 2011). Grund hierfür war vor allem die Erkenntnis, dass ein gewisser Grad an Erderhitzung mit erheblichen Folgen nicht mehr zu verhindern ist – zum einen, weil historische Emissionen nicht ungeschehen gemacht werden können, zum anderen aufgrund von unzureichendem Klimaschutz: Es gelangen weiterhin zu viele Treibhausgase in die Atmosphäre (Ford, 2007). Als erstes wurde diese Tatsache in den Ländern des globalen Südens deutlich, die immer häufiger von Extremwetter heimgesucht wurden. In den Medien wurde die Thematik zunächst nur sporadisch aufgegriffen, wobei Anpassung oft als vermeintliches Sonderinteresse untergehender Inselstaaten interpretiert wurde – man erinnere sich beispielsweise an die spektakuläre Unterwassersitzung der Regierung der Malediven im Jahre 2009. Nachdem einige Entwicklungsländer Anfang der 2000er-Jahre im Rahmen der Klimarahmenkonvention der UN erstmals sogenannte Nationale Aktionsprogramme für die Anpassung vorgelegt hatten, zogen sukzessive auch die Industrieländer nach. 2008 wurde die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel präsentiert, 2013 das erste Strategiedokument der EU. Heute beschäftigen sich Regierungen, Regionen und Städte weltweit mit dem Thema – nicht zuletzt, weil die Kosten möglicher Klimaschäden der Zukunft die der Anpassung weit übersteigen dürften (GCA, 2019).

a) Definition und Ziel

Was genau bedeutet nun Klimaanpassung und welchen Zweck erfüllt sie? Wer oder was muss sich anpassen bzw. angepasst werden? Und wie kann Anpassung gelingen? Der IPCC gibt Aufschluss mit seiner Definition aus dem vierten Sachstandsbericht. Demnach bezeichnet der Begriff (Klima-)Anpassung „Initiativen und Maßnahmen, um die Empfindlichkeit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung zu verringern“ (IPCC, 2007). Ziel ist es folglich, durch die Klimakrise verursachte oder drohende Schäden an menschlichen sowie natürlichen Systeme, d. h. Ökosystemen, zu vermindern bzw. zu vermeiden. Auf der gesellschaftlichen Ebene beinhaltet dies den Schutz von menschlicher Gesundheit sowie von Infrastruktur und finanziellen Ressourcen vor Schäden durch zunehmende Hitzebelastung und Extremereignisse. Bei Ökosystemen steht der Schutz von Lebensräumen, Arten und Biodiversität sowie Ökosystemleistungen wie Kohlenstoffbindung im Vordergrund. Hier kann die Anpassung durch Eingreifen des Menschen ermöglicht bzw. beschleunigt werden (IPCC, 2014). Das Konzept der Verletzlichkeit (Vulnerabilität) gibt Aufschluss darüber, wie dringend die Anpassung eines bestimmten Ökosystems oder einer sozialen Gruppe ist. Die Vulnerabilität setzt sich zusammen aus 1) der Art, dem Ausmaß und dem Tempo der Klimaänderungen, denen ein menschliches bzw. natürliches System ausgesetzt ist (Exposition), 2) der Empfindlichkeit des Systems gegenüber den Klimafolgen (Sensitivität) und 3) seiner Anpassungskapazität (IPCC, 2007).

b) Kategorien von Anpassungsmaßnahmen

Die obige Definition impliziert, dass Anpassungsmaßnahmen gemäß ihrer zeitlichen Relation zu (potenziellen) Klimafolgen in folgende Kategorien geteilt werden können:

- *Reaktive* Maßnahmen als Antwort auf bereits eingetretene Klimafolgen sowie
- *Proaktive* (auch vorbeugende bzw. präventive) Maßnahmen, die die Resilienz gegenüber zu erwartenden, aber noch nicht eingetretenen Klimafolgen erhöhen.

Resiliente Systeme sind in der Lage, „ein gefährliches Ereignis bzw. einen solchen Trend [...] zu bewältigen und dabei derart zu reagieren bzw. sich zu reorganisieren, dass ihre Grundfunktion, Identität und Struktur erhalten bleibt und sie sich gleichzeitig die Fähigkeit zur Anpassung, zum Lernen und zur Transformation bewahren“ (IPCC, 2014). Je nachdem, ob eine Transformation gewünscht bzw. vonnöten ist, kann man Anpassungsmaßnahmen in zwei weitere Arten unterteilen (IPCC, 2013/2014a):

- *Schrittweise Anpassung*: Maßnahmen, deren Ziel es ist, Wesen und Integrität eines Systems oder Prozesses auf einer bestimmten Ebene zu erhalten, sowie
- *Transformative Anpassung*: Maßnahmen, deren Ziel es ist, die grundlegenden Eigenschaften eines Systems im Sinne einer besseren Anpassungsfähigkeit zu verändern.

Neben zeitlichen und strategischen Aspekten gibt es zudem inhaltlich unterschiedliche Typen von Anpassungsmaßnahmen, die auf verschiedenen Ebenen ansetzen. Der Weltklimarat unterscheidet folgende Kategorien von Anpassungsoptionen (IPCC, 2014):

- *Strukturelle und physische Anpassung*
 - Bauliche und Ingenieursmaßnahmen (z. B. Deiche und Dämme, Kanalisation)
 - Technologische Maßnahmen (z. B. Gebäudeisolierung, Frühwarnsysteme)
 - Ökosystembasierte Maßnahmen (z. B. Renaturierung von Flüssen und Mooren)
 - Servicebasierte Maßnahmen (z. B. Tafeln und Impfprogramme)
- *Soziale Anpassung*
 - Bildungsmaßnahmen (z. B. Öffentlichkeitsarbeit und Forschungsnetzwerke)
 - Informationsmaßnahmen (z. B. Monitoring und Fernerkundung, Klimakarten)
 - Verhaltensbezogene Maßnahmen (z. B. Wassersparen, veränderte Pflanzzeiten)
- *Institutionelle Anpassung*
 - Ökonomische Maßnahmen (z. B. Steuern und Subventionen, Versicherung)
 - Gesetzgeberische und ordnungspolitische Maßnahmen (z. B. Gebäudestandards)
 - Regierungspolitik und -programme (z. B. Katastrophenschutz)

Während manche dieser Maßnahmen Anpassungsoptionen für alle darstellen – das Verhalten etwa kann sowohl auf individueller als auch auf unternehmerischer Ebene geändert werden – sind andere akteursspezifisch (z. B. Regierungsprogramme). Vor dem Hintergrund der nicht unerheblichen Unsicherheiten bei der Vorhersage klimatischer Entwicklungen sowie potenzieller Wechselwirkungen mit anderen Politikzielen bietet sich schließlich eine weitere, ergebnisbezogene Einteilung von Anpassungsoptionen an:

- *No-Regret-* bzw. *Low-Regret-* Maßnahmen, die *Win-Win-* Maßnahmen sein können, und
- Maßnahmen mit *Trade-offs*.

No-Regret-Maßnahmen (Engl. „keine Reue“) sind, unabhängig davon, ob die erwarteten Klimafolgen eintreten, ökonomisch, ökologisch und/oder sozial sinnvoll und zeichnen sich durch hohe Kosteneffizienz aus (UBA, 2016a). Eine Einführung energieeffizienter

Gebäudestandards z. B. würde dauerhaft zu niedrigeren Energiekosten und weniger Treibhausgasemissionen beitragen, auch wenn die Temperaturen nicht weiter stiegen.

Treten die Folgen allerdings wie erwartet ein, entsteht eine Win-Win-Situation, die für mindestens ein weiteres Zielvorhaben neben der Anpassung zuträglich ist: Im Falle der Gebäudestandards würden sowohl Klimaanpassung (Schutz vor großer Hitze) als auch Klimaschutz (Einsparung von Emissionen) profitieren; zusätzlich würden soziale Vorteile entstehen (niedrigere Energiekosten). Low-Regret-Optionen (Engl. „wenig Reue“) hingegen sind stets kostengünstig, sodass das eingegangene Risiko tragbar, der Nutzen aber potenziell groß ist (Beck et al., 2011). Daneben gibt es Maßnahmen, die Trade-offs, also (Ziel-) Konflikte mit anderen Umwelt-, Sozial- oder sonstigen Politikzielen beinhalten. Bei Low- und No-Regret-Maßnahmen überwiegt der Mehrwert, wenngleich einzelne Trade-offs mit anderen Zielen nicht gänzlich ausgeschlossen werden können.

c) Wahl von Anpassungsmaßnahmen

Die Auflistung von Maßnahmenarten erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Trotzdem macht insbesondere die inhaltliche Kategorisierung deutlich, wie groß die Bandbreite an möglichen Anpassungsoptionen ist. Während alle wichtig sind und sich durch das Wirken auf unterschiedlichen gesellschaftlichen Ebenen auch ergänzen, stellt sich die Frage, wie man angesichts begrenzter Ressourcen eine Priorisierung bzw. Auswahl vornehmen kann.

Nur wenige der inhaltlichen Maßnahmentypen sind ohne finanzielle Mittel realisierbar – die Verhaltensänderung ist wieder ein Beispiel. Der Großteil der inhaltlichen Arten von Maßnahmen bringt (Mehr-)Kosten mit sich. Um diese möglichst gering zu halten, bieten sich grundsätzlich die erwähnten Low-Regret-Maßnahmen an, die mit geringem finanziellen Aufwand bzw. kaum finanziellen Einbußen eine potenziell große Wirkung erzielen. Ein Beispiel ist die Einschränkung der Bebauung auf flutgefährdeten Flächen. Dennoch bedürfen manche Arten von Maßnahmen einer ausreichenden Finanzierung. Hier sollten No-Regret-Maßnahmen gewählt werden, die zwar teuer sein können, aber kosteneffizient sind, da sie in jedem Fall einen Mehrwert generieren – wenn auch für andere Politikziele. Sie sind kostspieligen Optionen, die nur nützlich sind, wenn die prognostizierten Klimafolgen tatsächlich eintreten, vorzuziehen. Maßnahmen mit großen Trade-offs zu anderen zentralen Politikzielen sind möglichst zu vermeiden.

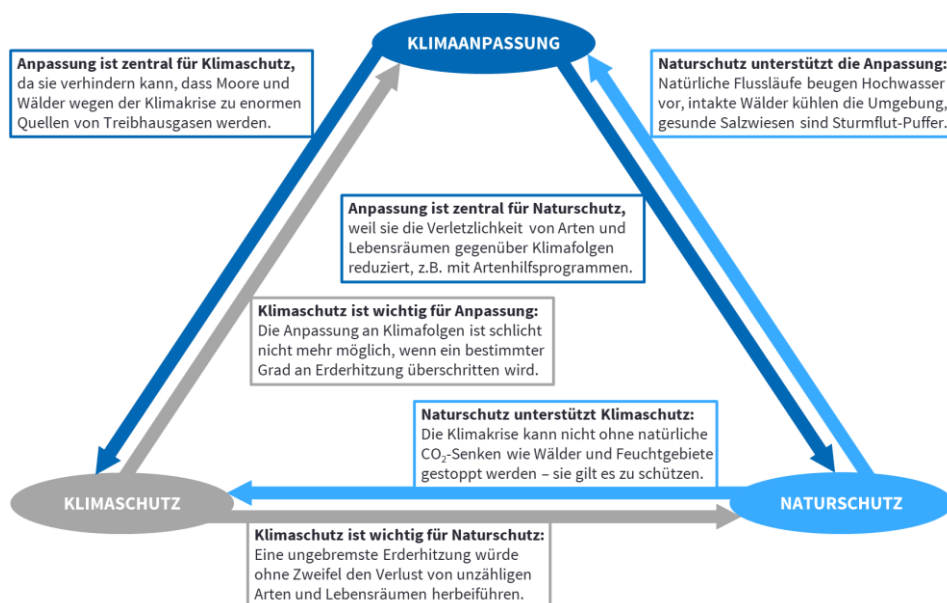


Abbildung 1: Die wechselseitigen Abhängigkeiten von Klimaanpassung, Klimaschutz und Naturschutz. Nicht nur zwischen Erderhitzung und Artensterben gibt es Wechselwirkungen, auch Naturschutz, Klimaschutz und Klimaanpassung bedingen sich gegenseitig. Quelle: Eigene Darstellung.

d) Synergien und Konflikte

Insbesondere in Hinblick auf die Bereiche Klima- und Naturschutz gibt es gegenseitige Abhängigkeiten und damit großes Synergie- aber auch Konfliktpotenzial. Innerhalb der Klimaanpassung bestehen ebenfalls Wechselwirkungen. Folgende Beziehungen sollten bei der Wahl von Anpassungsmaßnahmen Beachtung finden (Abb. 1):

Klimaanpassung und Klimaschutz

Dass der Bedarf an Klimaanpassung hochgradig vom Klimaschutz abhängt, liegt auf der Hand: Je früher Treibhausgasemissionen reduziert und Klimaschutzziele erreicht werden, umso weniger drastisch werden die Klimafolgen ausfallen und umso weniger Anpassung wird entsprechend benötigt. Wird Klimaschutz jedoch vernachlässigt, hat Klimaanpassung keine Chance: Eine Anpassung an Klimafolgen ist schlicht nicht möglich, wenn die Erderhitzung einen gewissen Grad überschreitet (s. Abschnitt f).

Andersherum hängt Klimaschutz auch von Klimaanpassung ab. Die Anpassung sichert die politische und finanzielle Handlungsfähigkeit einer Gesellschaft im Angesicht von Klimafolgen. Die Corona-Pandemie, aber auch die Flutkatastrophen im Sommer 2021 in Mittel- und Westeuropa haben zuletzt verdeutlicht, welche Auswirkungen eine Krisensituation auf das öffentliche Leben hat und wie andere Belange im Wettstreit um Aufmerksamkeit und finanzielle Ressourcen in den Hintergrund treten. Will man also vermeiden, dass wegen bereits auftretender Extremwetterereignisse kostbare Zeit beim Kampf gegen die weitere Erderhitzung verloren geht, müssen rechtzeitig die Weichen gestellt und Vorkehrungen gegen Schäden durch Extremwetter getroffen werden. Auch die Anpassung von Ökosystemen leistet einen Beitrag zum Klimaschutz, denn sie sichert deren Funktion als Kohlenstoffsenken. Bei unzureichender Anpassung an Klimafolgen nehmen Wälder, Moore etc. Schaden durch Wassermangel und Hitzestress, sodass ihre Senkenleistung abnimmt; häufig werden sie sogar selbst zu Treibhausgasquellen. Aufgrund landwirtschaftlicher Nutzung stoßen Feuchtgebiete schon heute mehr Treibhausgase aus, als sie aufnehmen (s. Kapitel III.4); die Wälder in Deutschland haben zuletzt in den Trockenjahren 2018, 2019 und 2020 an Senkenleistung eingebüßt (s. Kapitel III.2) (UBA, 2021a). Ohne Anpassung werden sich diese Trends fortsetzen.

Während sich Anpassung und Klimaschutz also grundsätzlich gegenseitig begünstigen, gibt es auch Maßnahmen, die sich nachteilig auf die jeweils andere Seite auswirken. So stellt eine Klimaanlage zwar eine Anpassungsmaßnahme an steigende Temperaturen dar, konterkariert aber durch ihren Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen die Klimaschutzbemühungen. Eine dichte Bebauung in Städten dagegen, die Verkehrswege kürzt und so dem Klimaschutz dient, verstärkt den Hitzeinseleffekt und erschwert damit die Anpassung (s. Kapitel III.6.). Entsprechende Maßnahmen bzw. die damit verbundenen Konflikte sollten nach Möglichkeit vermieden werden.

Klimaanpassung und Naturschutz

Auch zwischen Klimaanpassung und Naturschutz gibt es Wechselwirkungen. So ist der Naturschutz wie der Klimaschutz auf die Anpassung an Klimafolgen angewiesen, denn die Klimakrise stellt eine enorme Bedrohung für die biologische Vielfalt dar (s. Kapitel III.1.). Andersherum fördern Naturschutzmaßnahmen häufig die gesellschaftliche Klimaanpassung. So mindert etwa ein naturnaher Fluss mit intaktem Auensystem die Hochwassergefahr für nahegelegene Siedlungsgebiete (s. Kapitel III.3. und 6.). Konfliktpotenziale ergeben sich, wenn Trockenphasen beispielsweise zu mehr Bewässerung in

der Landwirtschaft führen und dadurch Wassermangel in angrenzenden Ökosystemen ausgelöst bzw. verstärkt wird (s. Kapitel III.3.), oder wenn Forstbesitzende zur besseren Resilienz auf nicht-standortheimische Baumarten setzen (s. Kapitel III.2.).

Anpassung gesellschaftlicher und natürlicher Systeme

Innerhalb des Themenfelds Klimaanpassung gibt es ebenfalls Wechselbeziehungen. Die Anpassung von Küstenökosystemen an den steigenden Meeresspiegel etwa ist zeitgleich eine gesellschaftliche und eine natürliche Anpassungsmaßnahme, da hierdurch sowohl Ökosysteme, als auch Siedlungen vor den steigenden Fluten geschützt werden können (s. Kapitel III.5.). Generell helfen Schritte zur Anpassung natürlicher Systeme oft dabei, Klimafolgen auch für die Bevölkerung abzuf puffern. Manche Anpassungsmaßnahmen können jedoch in Widerspruch zueinander stehen. So kann der Schutz von Kaltluftentstehungsgebieten vor der Stadt wie Wiesen und Feldern zu mehr Flächenkonkurrenz innerhalb des Stadtgebiets führen und die dort bestehenden Grün- und Freiflächen so unter Druck setzen (s. Kapitel III.6.).

e) Ökosystembasierte Anpassung

Denkt man Klimaanpassung, Klimaschutz und Naturschutz nicht zusammen, riskiert man also das Scheitern der Bemühungen, zumindest aber große Schwierigkeiten beim Erreichen der gesteckten Ziele. Das gleiche ist der Fall, wenn man gesellschaftliche und ökologische Aspekte der Anpassung gedanklich trennt. Strategien zur Klimaanpassung sollten die erwähnten Wechselwirkungen daher stets berücksichtigen. Von den oben genannten inhaltlichen Typen von Anpassungsmaßnahmen haben ökosystembasierte Ansätze ein besonders hohes Potenzial, Klimaanpassung, Klimaschutz und Naturschutz gleichzeitig gerecht zu werden. Ökosystembasierte Anpassung (ÖbA) ist eine Form naturbasierter Lösungen (*Nature-based Solutions*) und setzt damit auf die Natur und ihre Leistungen, um die Anpassung an Klimafolgen voranzubringen (Pauleit et al., 2017).

Konkret setzt ÖbA auf die Sicherung von Ökosystemleistungen zur Klimaanpassung: Durch nachhaltiges Management, Schutz sowie Wiederherstellung von Ökosystemen soll erreicht werden, dass diese (weiterhin) essenzielle Leistungen wie Kühlung oder Wasserspeicherung erbringen können, auf die die Menschheit bei der Anpassung an Klimafolgen angewiesen ist (CBD, 2009). Damit kann ÖbA auch einen großen Beitrag zum Naturschutz leisten. Häufig wird zudem die Ökosystemleistung der Bindung und Speicherung von Kohlenstoff gestärkt, die für den Klimaschutz zentral ist. ÖbA kann dadurch kosteneffizienter sein als technisch-bauliche Ansätze und hat häufig weniger Konfliktpotenzial in Bezug auf andere Zielvorhaben (Pauleit et al., 2017). So umfasst ÖbA überwiegend No-Regret- bzw. Win-Win-Maßnahmen. Ein weiterer Vorteil ist, dass ÖbA in verschiedensten Bereichen bzw. Sektoren Anwendung findet: Von Land- und Forstwirtschaft über Küstenschutz bis hin zu urbanen Regionen, wo sie in Form von grüner und blauer Infrastruktur zur Anpassung beitragen kann (s. Kapitel III.). Aus den genannten Gründen wird bei den in Kapitel III. vorgestellten Optionen zur Anpassung an Klimafolgen ein besonderer Fokus auf ÖbA gelegt.

f) Grenzen der Anpassung

Bevor nun zentrale Klimafolgen für Deutschland besprochen und Anpassungsoptionen vorgestellt werden, müssen die Grenzen der Anpassung bzw. der Anpassungsfähigkeit herausgestellt werden. Der Irrglaube, Klimaschutz mache Klimaanpassung überflüssig, wurde bereits entlarvt und die unausweichlichen Folgen der Klimakrise verdeutlicht. Um Missverständnissen vorzubeugen, sei noch einmal betont, dass auch Anpassung in keiner Weise Klimaschutz überflüssig macht. Im Gegenteil: Ein zügiger, effizienter und konsequenter Klimaschutz ist wichtiger denn je. Der Beitrag der Arbeitsgruppe I zum

sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC, 2021) hat gezeigt, wie wenig Zeit der Weltgesellschaft zum Erreichen des 1,5-Grad-Limits bleibt. Werden Emissionen nicht sehr bald sehr stark gesenkt, droht sogar das 2-Grad-Limit außer Reichweite zu gelangen. Im schlimmsten Fall könnte die globale Erwärmung sich auf weit über 2 Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Niveau belaufen.

Die Konsequenzen einer ungebremsten Klimakrise sind drastisch und nur schwer zu greifen. Allein die bereits unvermeidbaren Klimafolgen der bisherigen Emissionen könnten in Gestalt schwerer Dürren, Hungersnöte und Überschwemmungen bis 2050 über eine Milliarde Menschen aus ihrer Heimat vertreiben (IEP, 2020). Dabei fällt auch das erwartete Bevölkerungswachstum ins Gewicht. Schon 2040 könnten mehr als fünf Milliarden Menschen von hoher Wasserknappheit betroffen sein (ebd.). Scheitern die Klimaschutzbemühungen, sind noch dramatischere Folgen zu erwarten – spätestens, wenn Kipppunkte im Klimasystem überschritten und damit Kaskadeneffekte oder Rückkopplungen ausgelöst werden. Ein Beispiel ist das Auftauen von Dauerfrostböden, bei dem Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) freigesetzt werden, welche wiederum die Erderhitzung befeuern. Klimabedingtes Extremwetter und das Scheitern der Klimaschutzbemühungen gelten laut Global Risk Report des Weltwirtschaftsforums als die größten weltweiten Risiken bezüglich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit (WEF, 2021; Abb. 2). Die Folgen einer ungebremsten Klimakrise werden als drastischer eingestuft als jene von Massenvernichtungswaffen (ebd.). Die Anpassung kommt an ihre Grenzen, wenn Klimafolgen zu extrem werden – der drohende Untergang einiger Inselstaaten macht dies auf tragische Weise deutlich. Klimaschutz ist also unerlässlich, will man Tote und Verletzte durch Extremereignisse, klimabedingte Migration, die weitere Degradierung von Ökosystemen sowie Kriege um Ressourcen bestmöglich vermeiden.

Kippelemente im Klimasystem

Bestandteile des Erdsystems von überregionaler Größe, die ein Schwellenverhalten aufweisen. Sofern das Klima sie schon nahe an einen Schwellenwert gebracht hat, können sie also bereits durch kleine externe Störungen in einen neuen Zustand versetzt werden. Ein Beispiel ist das arktische Meereis, das zu schmelzen droht. Der Übergang zu einem neuen Zustand wird eingeleitet, wenn systemspezifische **Kipppunkte** überschritten werden, die klimaabhängig sind. Der Übergang kann dabei sprunghaft, aber auch kriechend erfolgen.

Dem Schwellenverhalten liegen oft selbstverstärkende Prozesse zugrunde, sogenannte positive **Rückkopplungen**, die – einmal angestoßen – auch ohne weiteren externen Einfluss weiterlaufen. So kann es passieren, dass der neu eingetretene Zustand eines Kippelements erhalten bleibt, selbst wenn das Klima wieder hinter den Schwellenwert fällt – die Änderungen können folglich unumkehrbar sein. Im Falle der Arktis bewirkt das Erreichen des Kipppunktes ein Abschmelzen des Meereises, wodurch sich die Albedo, das Reflexionsvermögen, der Erdoberfläche verringert (Eis ist heller als Wasser). Dadurch wird weniger Sonnenstrahlung reflektiert; ein weiterer Anstieg der globalen Temperatur ist die Folge. Das befeuert wiederum das Abschmelzen des Eises. Es besteht das Risiko, dass durch die selbstverstärkenden Prozesse weitere Kipppunkte im Erdsystem überschritten werden und so eine Kettenreaktion ausgelöst wird. Solche **Kipp-Kaskaden** könnten das Erdsystem dominoartig in eine neue Heißezeit katapultieren, die für Menschen sowie viele Tiere und Pflanzen lebensfeindliche Bedingungen bescheren würde.

(PIK, ohne Jahr a; UBA, 2008)

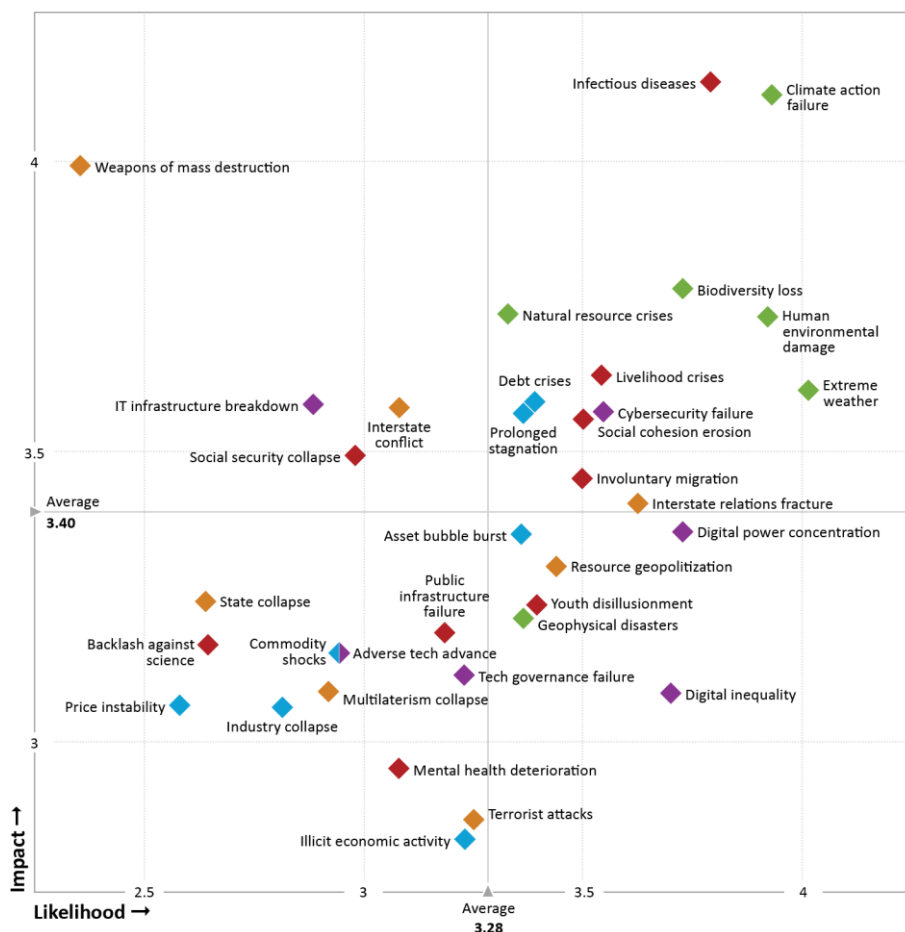


Abbildung 2: Globale Risiken nach Eintrittswahrscheinlichkeit → und Auswirkungen ↑ laut Global Risk Report 2021 des Weltwirtschaftsforums. Die Auswirkungen eines Scheiterns der Klimaschutzbemühungen (oben rechts) werden als drastischer eingeschätzt als jene von Massenvernichtungswaffen (oben links). Aufgrund der Corona-Pandemie werden lediglich Infektionskrankheiten als noch folgenreicher eingestuft – diese dürften aufgrund der Klimakrise allerdings noch wahrscheinlicher werden. Quelle: WEF, 2021 (eigene Darstellung).

II. Klimakrise: Entwicklungen in Deutschland

Obwohl die Klimakrise ein globales Phänomen ist, ändern sich die Klimabedingungen nicht gleichmäßig in allen Teilen der Erde. So gibt es regional große Abweichungen vom weltweiten Trend. Diese sind durch die Besonderheiten der jeweiligen Klimazonen bedingt, aber auch durch die Topografie (z. B. Land-Meer-Verhältnis, Höhenlage). Für die Klimaanpassung ist es erforderlich, solche regionalspezifischen Entwicklungen der Klimakrise zu berücksichtigen. Im Folgenden werden die bisherigen und erwarteten Änderungen des Klimas in Deutschland vorgestellt, größtenteils basierend auf Publikationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

1. Temperatur

Der wichtigste Aspekt der Klimakrise ist die Erderhitzung. In Deutschland sind die Lufttemperaturen seit 1881, dem Beginn der Aufzeichnungen, im Schnitt bereits um 1,6 Grad Celsius gestiegen (Abb. 3). Damit liegt der lineare Trend rund 0,5 Grad über der weltweiten Entwicklung – hier beträgt der Anstieg ca. 1,1 Grad Celsius. Das liegt vor allem daran, dass Landmassen sich schneller erwärmen als Meeresregionen (DWD, 2020a). Zuletzt hat sich die Entwicklung in Deutschland allerdings beschleunigt. Dies verdeutlicht der starke Anstieg der roten Balken in Abbildung 3 seit den späten 1980er-Jahren, welche die Abweichungen der Lufttemperatur vom Mittelwert der Jahre 1961–1990 darstellen. Dies deutet darauf hin, dass sich der Temperaturanstieg nicht linear vollzieht. Legt man eine nichtlineare Kurve über die Daten, beläuft sich die Erwärmung in Deutschland bereits auf 2 Grad Celsius seit 1881 (DKK, 2020; Leopoldina, 2021). Der Temperaturanstieg hat sich bisher relativ einheitlich dargestellt, sowohl in räumlicher als auch in saisonaler Hinsicht. Ein geringes geografisches Gefälle besteht dennoch: Die westlichen und südlichen Bundesländer haben sich etwas stärker als der Bundesschnitt erwärmt, die nördlichen Bundesländer sowie Brandenburg und Berlin etwas schwächer (UBA, 2019a). In den Alpen und Alpenvorländern ist die Erwärmung besonders deutlich ausgeprägt (DWD, 2020b).

Erwärmungstrend in Deutschland stärker als weltweit

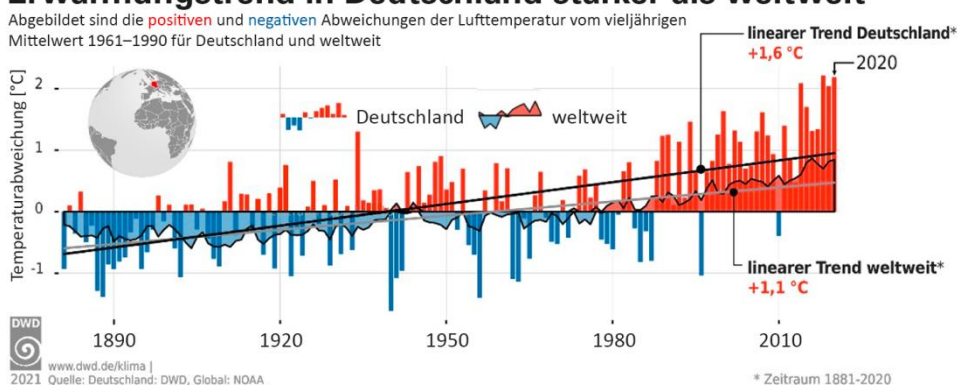


Abbildung 3: Entwicklung der Lufttemperatur in Deutschland seit 1881, verglichen mit dem weltweiten Trend. Die Entwicklung wird in Deutschland linear mit 1,6 Grad Temperaturanstieg beziffert. Legt man aber eine nichtlineare Kurve über die Daten, ergeben sich 2 Grad Celsius Anstieg seit 1881. Quelle: DWD, 2021a (eigene Darstellung).

Wie wird es mit dem Temperaturanstieg in den nächsten Jahrzehnten weitergehen? Die Grundlage für die Beantwortung dieser Frage sind hochkomplexe Klimamodelle, die auf Grundlage verschiedener Szenarien zu künftigen Treibhausgasemissionen bzw. -konzentrationen mögliche Klimaentwicklungen berechnen. Diese Modelle machen

Szenarien

Mögliche Pfade in die Zukunft, die auf Grundlage verschiedener Annahmen aufzeigen, wie sich die Emissionen von Treibhausgasen bzw. deren atmosphärischen Konzentrationen oder auch die gesamte Energiebilanz der Erde entwickeln könnten.

Die Annahmen beziehen sich etwa auf technischen Fortschritt oder die künftige Ausgestaltung der Politik. Es gibt Szenarien, die zeigen, wie die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius begrenzt werden könnte. Andere legen dar, was passiert, wenn die aktuellen Emissionsniveaus anhalten.

Die **SRES-Szenarien** entsprechen dem Stand der Wissenschaft aus dem Jahr 2000 (Special Report on Emissions Scenarios des IPCC).

Im fünften Sachstandsbericht des IPCC von 2013/2014 wurden die neuen **RCP-Szenarien** eingeführt (Representative Concentration Pathways bzw. repräsentative Konzentrationspfade). Neben Emissionen und Konzentrationen von Treibhausgasen beziehen diese weitere Faktoren ein, die den Strahlungsantrieb und die Energiebilanz der Erde bedingen. Dazu gehören beispielsweise die anthropogenen Änderungen der Landnutzung (z. B. Entwaldung), die Änderungen der Albedo, also des Reflexionsvermögens der Erdoberfläche, mit sich ziehen.

Der sechste Sachstandsbericht von 2021 nutzt sogenannte Shared Socioeconomic Pathways (**SSP**), also sozioökonomische Entwicklungspfade als Szenarien. Sie berücksichtigen verschiedene gesellschaftliche Entwicklungen, z. B. den Fall einer aktiven Klimaschutzpolitik.

(DKK, ohne Jahr; DWD, ohne Jahr b, c)

also keine sicheren Vorhersagen (Prognosen), denn die künftige Klimaentwicklung ist offen und abhängig davon, wie erfolgreich die globalen Klimaschutzbemühungen sind. Stattdessen liefern sie sogenannte Projektionen, die abbilden, wie sich das Klima unter bestimmten sozioökonomischen Bedingungen entwickeln könnte (Bender et al., 2017). Dementsprechend gehen die möglichen Temperaturanstiege weit auseinander (Abb 4.) Laut DWD könnten die Temperaturen in Deutschland Ende des 21. Jahrhunderts 1,9 bis 4,6 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau liegen (DWD, 2020b).

Deutschland im Klimawandel

Abgebildet sind die positiven und negativen Abweichungen der Lufttemperatur vom vieljährigen Mittelwert 1971–2000 sowie die zu erwartende Zunahme bis 2100

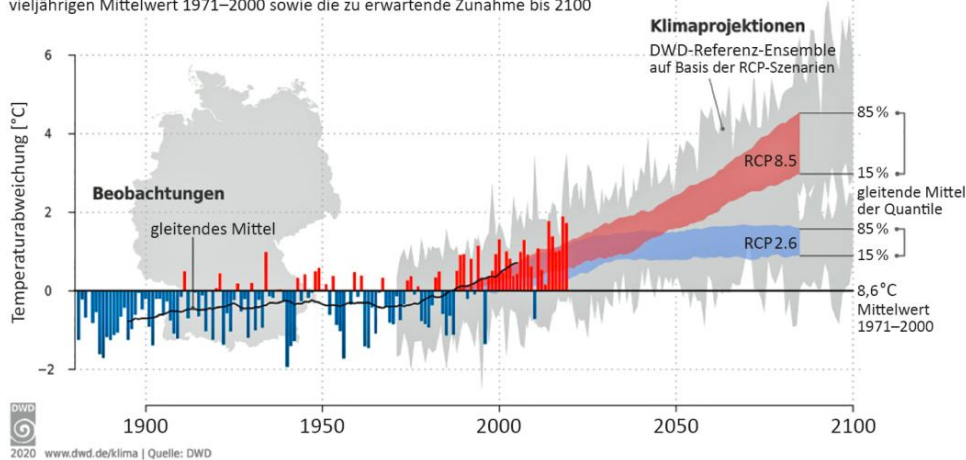


Abbildung 4: Beobachtete und projizierte Temperaturentwicklung für Deutschland 1881-2100. Das RCP8.5-Szenario entspricht einer Entwicklung ohne Klimaschutz bzw. mit gescheitertem Klimaschutz, das Szenario RCP2.6 geht von erfolgreichen Klimaschutzmaßnahmen aus. Die Temperaturangaben spiegeln die Abweichung vom vieljährigen Mittel 1971-2000 wider, welches 0,8°C über dem vorindustriellen Wert liegt. Um einen Bezug zum Pariser Klimaabkommen zu erhalten, muss zu den Abweichungswerten daher 0,8 °C addiert werden (DWD, 2020b). Quelle: DWD, 2021b (eigene Darstellung).

2. Niederschlag

Auch die Niederschlagsmengen haben seit Messbeginn 1881 zugenommen (Tabelle 1). Der lineare Anstieg der Jahresniederschläge in Deutschland zwischen 1881 und 2020 betrug 62,4 Millimeter. Bezogen auf den Mittelwert des Zeitraums 1961-1990 von 788,9 Millimetern, entspricht dies einer Zunahme von rund acht Prozent (DWD, 2021b). Dabei gibt es jedoch im Gegensatz zur Temperatur deutliche saisonale sowie regionale Unterschiede. Vor allem im Winter zeigt sich eine klare Tendenz; von Dezember bis Februar fallen rund 26 Prozent mehr Niederschläge als zu Beginn der Aufzeichnungen. Die in Tabelle 1 aufgeführte Zunahme in Frühling und Herbst und die Abnahme im Sommer sind dagegen nicht statistisch signifikant. Trotzdem werden die Sommer trockener: Wegen der steigenden Temperaturen verdunstet Wasser aus Niederschlägen schneller, was zu einer abnehmenden Bodenfeuchte führt. Die Zahl der Tage mit geringer Bodenfeuchte ist seit 1961 deutlich gestiegen; der Nordosten sowie das Rhein-Main-Gebiet sind besonders betroffen (DKK, 2020; UBA, 2019a).

Projektionen

Ergebnisse von Klimamodellen, die eine Auskunft über mögliche Entwicklungen des Klimas in der Zukunft geben. Projektionen sind keine sicheren Vorhersagen („Dies wird geschehen“), sondern „Wenn-Dann“ Aussagen: „Wenn dieses Szenario eintritt, dann...“. Sie bilden die Grundlage für die Bewertung von Risiken künftiger Klimaänderungen sowie für die Entwicklung von Maßnahmen zur Klimaanpassung.

(UBA, 2021d)

Tabelle 1: Lineare Trends der Niederschlagshöhe in Deutschland (1881-2020)

| Bezugszeitraum | Änderung der Niederschlagshöhe |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| Frühling (März, April, Mai) | 13,8 mm |
| Sommer (Juni, Juli, August) | -9,7 mm |
| Herbst (September, Oktober, November) | 9,6 mm |
| Winter (Dezember, Januar, Februar) | 48,0 mm |
| Jahr | 62,4 mm |

Kennzeichnung einer statistischen Signifikanz von mindestens 95 Prozent durch Einfärbung. Quelle: UBA, 2021b.

Regional betrachtet, verzeichnen insbesondere die nordwestlichen Bundesländer mehr Niederschlag. Spitzenreiter ist hier Schleswig-Holstein mit einem Jahresplus von 16 Prozent zwischen 1881 und 2020 sowie einer winterlichen Zunahme von fast einem Drittel (DWD, 2021b). In den östlichen Bundesländern ist es dagegen nur geringfügig feuchter, in Sachsen sogar rund fünf Prozent trockener geworden. Die Alpen sind nasseste Region in allen Jahreszeiten und bilden damit wie bei der Temperaturentwicklung eine Besonderheit (DWD, 2020b). Bis 2050 wird ein weiterer, leichter Anstieg des mittleren Jahresniederschlags um ungefähr vier Prozent erwartet, wenngleich je nach Emissionsszenario auch ein leichter Abfall möglich ist. Für den langfristigen Planungshorizont (2071–2100) ist der projizierte Anstieg mit rund sechs Prozent ebenfalls gering. Anders als bisher dürfte der Anstieg relativ gleichmäßig über die Bundesländer verteilt sein (ebd.).

3. Extremereignisse

Die dritte wesentliche Komponente der Klimakrise sind Extremwetterereignisse, die im Zuge der Erderhitzung häufiger auftreten und intensiver ausfallen. So gibt es vermehrt sogenannte Heiße Tage, also Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad (DWD, 2020a; Abb. 5). Die mittlere Zahl dieser Tage pro Jahr hat sich seit den 1950er-Jahren von ca. drei auf neun verdreifacht (ebd.). Dementsprechend steigt die Häufigkeit und Dauer von Hitzewellen, vor allem seit den 1990er-Jahren. Insbesondere der Osten und Teile Südwestdeutschlands sind zunehmend von extremer Hitze betroffen. Das kontinentale Klima spielt dabei eine Rolle, im Südwesten die Kessellage einiger Städte.

Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von heißen Tagen mit Höchstwerten über 30 Grad

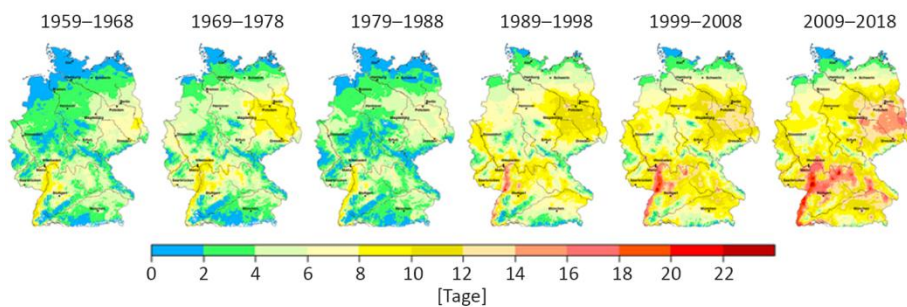


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl der Heißen Tage in Deutschland seit 1959. Heiße Tage sind Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius. Quelle: DWD, 2020a.

Was Niederschlagsextreme angeht, gestalten sich Erfassung und Monitoring schwierig (Becker et al., 2016). Eine Zunahme von Starkregenereignissen entspräche jedoch „dem

Starkniederschlag

Niederschlagssumme, die über dem statistischen Mittel, das auf Basis einer ausreichend großen Stichprobe ermittelt wurde, liegt. Je nach Anwendungsbereich gibt es verschiedene Definitionen von Starkniederschlag, die sich teils auf unterschiedliche Zeiträume beziehen.

Im Bereich der Klimaforschung wird meist der Tagesniederschlag betrachtet, da mit den aktuellen Möglichkeiten zur Modellierung klimatischer Trends eine höhere zeitliche Auflösung meist nicht möglich ist. Für eine Übersicht über Kennwerte zu Starkregen s. Rauthe et al. (2020).

physikalischen Grundverständnis, wonach die erhöhte Wasserdampfaufnahme der Atmosphäre durch die globale Erwärmung [schauerartige] Niederschläge verstärken könnte“ (DKK, 2020). Laut DWD (2021c) hat sich die Zahl der Tage mit mindestens 20 Liter Niederschlag pro Quadratmeter seit 1951 um fünf Prozent erhöht. Unter den Jahreszeiten verzeichnet nur der Herbst eine statistisch signifikante, aber dennoch geringe Zunahme an Starkregentagen (Rauthe et al., 2020). Im Winter hat jedoch laut Becker et al. (2016) die Häufigkeit sehr hoher täglicher Regenmengen, die im Mittel einmal in 100 Tagen erreicht werden, im Zeitraum 1951-2006 um ca. 25 Prozent zugenommen. Hinsichtlich der geografischen Verteilung scheint es eine besonders starke Zunahme in Süddeutschland gegeben zu haben; die Daten sind aber wegen der Kürze der Zeitreihen (noch) nicht aussagekräftig (DWD, 2020a). Prognosen zur Häufigkeit von Starkregenfällen sind ebenfalls unsicher. Insgesamt ist aber zu erwarten, dass mit den steigenden Niederschlägen im Winter auch die winterlichen Starkniederschläge zunehmen werden; für den Sommer war eine Prognose bislang nicht möglich (Becker et al., 2016).

Gleichzeitig gibt es einen Trend zu längeren Trockenphasen, vor allem im Sommer. Während die sommerlichen Niederschläge, wie in Kapitel II.2. erläutert, statistisch nicht signifikant abgenommen haben, hat sich die Anzahl der aufeinanderfolgenden Trockentage erhöht (DWD, 2020a). Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit für eine sehr niedrige Bodenfeuchte. Die jüngsten Dürrejahre in Deutschland waren „beispiellos für die vergangenen 250 Jahre“ (ebd.), die ab 2015 aufeinanderfolgenden Sommerdürren in Europa die gravierendsten seit über 2.000 Jahren (Büntgen et al., 2021). Wie erwähnt, ist der (Nord-) Osten Deutschlands besonders anfällig für Trockenheit, aber andere Regionen könnten künftig ebenfalls häufiger betroffen sein. Erwärmt sich die Erde um weitere drei Grad, könnte dies etwa für Teile des Südwestens doppelt so viel Dürrezeit bedeuten wie noch im Zeitraum 1971-2000 (DKK, 2020; Thober et al., 2020).

Bezüglich der Häufigkeit von Hochwasser gab es laut dem letzten Monitoringbericht der Deutschen Anpassungsstrategie bisher keine signifikanten Trends (UBA, 2019a). Blöschl et al. (2019) stellen jedoch eine Zunahme von Hochwasser in Nordwesteuropa fest, vor allem im Winterhalbjahr, in welchem der Niederschlag zugenommen hat. Der DWD (2020a) bemerkt, dass sich die Zahl der Tage mit der hochwasserförderlichen Großwetterlage „Trog Mitteleuropa“ deutlich erhöht hat. In den letzten drei Jahrzehnten kam diese Großwetterlage zwei- bis dreimal so oft vor wie noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Wegen des komplexen Ursachengefüges von Hochwasserereignissen, die neben Zeitpunkt, Dauer und Menge des Niederschlags auch durch Landschaftsstruktur (z. B. Tallage) und menschliche Einflüsse wie Bodenversiegelung bedingt sind, ist es sehr schwierig, sichere Prognosen zu ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit zu erstellen – vor allem im Kontext der Klimakrise (IPCC, 2012; Brasseur et al., 2017). Aktuell geht die Wissenschaft davon aus, dass Überschwemmungen im Zuge der Klimakrise häufiger auftreten und intensiver ausfallen werden – auch in Europa (IPCC, 2021).

Beim Wind gibt es bislang keine signifikanten Entwicklungen; Mittelwinde und Windspitzen über der Deutschen Bucht sind seit 1881 nahezu konstant geblieben (DWD, 2020a; Abb. 6). Trotz großer Unsicherheiten in der Vorhersage von Sturmereignissen wird erwartet, dass die Gesamtzahl von Stürmen bis Ende des Jahrhunderts abnimmt, einzelne Starkwindereignisse aber über Nordsee und Nordwestdeutschland häufiger auftreten – vor allem im Winter (Brasseur et al., 2017). Hinsichtlich der restlichen Teile Deutschlands wird nur mit geringfügigen Änderungen im Vergleich zum aktuellen Windregime gerechnet (ebd.).

Tiefdruckgebiet Bernd (2021)

Im Zusammenhang mit dem Tief „Bernd“ traten in Deutschland und den Nachbarländern im Juli 2021 regional sehr ausgeprägte Starkregenereignisse auf. Diese führten vor allem in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz zu starken Überschwemmungen. Das Jahr 2021 rangiert unter den Top 5 der Jahre mit den meisten Starkregenereignissen seit 2001 in Deutschland.

Einzelereignisse sind per se kein Beleg für die Klimakrise, da sich Klima immer auf lange Zeiträume wie Jahrzehnte bezieht. Ob die Klimakrise ein Unwetterereignis verstärkt hat, kann auch nicht pauschal beantwortet werden.

Die sogenannte Attributions-, also Zuordnungsforschung kann allerdings zeigen, dass sich im Zuge der Klimakrise allgemein die Eintrittswahrscheinlichkeit für ausgewählte Ereignisse erhöht hat. Eine entsprechende Studie zu den Überschwemmungen im Juli 2021 kommt zu dem Schluss, dass die globale Erwärmung die Starkregenereignisse, die die Flutkatastrophen auslösten, wahrscheinlicher machte (Kreienkamp et al., 2021). (Junghänel et al., 2021)

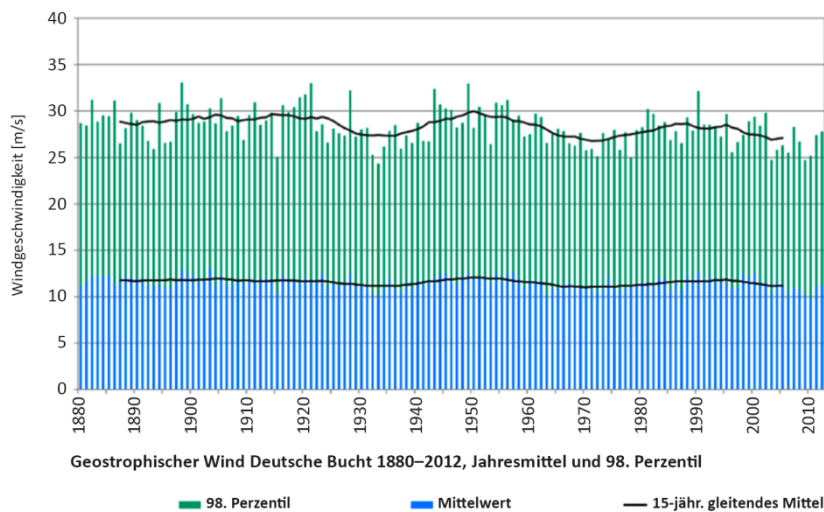


Abbildung 6: Entwicklung der Mittelwinde (blau) und Windspitzen (98. Perzentil, grün) sowie jeweils die gleitenden 30-jährigen Mittelwerte. Quelle: DWD, 2020a (eigene Darstellung).

Perzentil

Lagemaß aus der Statistik. Durch die Perzentile wird ein der Größe nach geordneter Datensatz in 100 umfangsgleiche Teile zerlegt. Perzentile teilen den Datensatz also in Ein-Prozent-Schritte auf. Das x-Prozent-Perzentil ist entsprechend ein Schwellenwert innerhalb eines geordneten Datensatzes, bei dem x Prozent aller Werte kleiner oder gleich dem Schwellenwert sind. Der Rest ist größer. Beim 98. Perzentil etwa liegen 98 Prozent der Werte des Datensatzes unterhalb dieses Perzentils bzw. entsprechen ihm. (DWD, 2020c)

III. Klimaanpassung für Mensch und Umwelt

Klimaanpassung ist ein Querschnittsthema, das Maßnahmen über alle Sektoren und gesellschaftlichen Ebenen hinweg erfordert. Im Mittelpunkt dieses Papiers stehen sechs Schwerpunktbereiche, innerhalb derer die Klimakrise sich in besonderem Maße sowohl auf Ökosysteme als auch Gesellschaft auswirkt und bei welchen es erhebliches Potenzial für Synergien zwischen Klimaanpassung, Naturschutz und Klimaschutz gibt. Diese sechs Bereiche sind Biologische Vielfalt, Wald und Forst, Wasser, Landwirtschaft, Küste und Meer sowie Städte und Siedlungen. Im den entsprechenden Kapiteln werden zunächst die Klimafolgen für jedes Gebiet vorgestellt, um anschließend durch verschiedene Anpassungsoptionen ergänzt zu werden.

1. Biologische Vielfalt

a) Wenn der Frühling früher kommt: Klimafolgen für Arten und Lebensräume

Die Klimakrise wirkt sich weitreichend auf Arten und Lebensräume und damit auf die Biodiversität aus. Die im Folgenden erläuterten generellen Auswirkungen auf Pflanzen, Tiere und Habitate werden in den weiteren Kapiteln anhand von Beispielen vertieft. Die Anpassung des Naturschutzes an die Klimafolgen ist aus gesellschaftlicher Sicht zentral, da davon die Erbringung wichtiger Ökosystemleistungen abhängt.

Folgen für Arten

Veränderte Phänologie

Eine allgegenwärtige Folge der Klimakrise sind Verschiebungen im jahreszeitlichen Rhythmus vieler Tier- und Pflanzenarten. Die saisonal charakteristische Erscheinung von Pflanzen und das typische Verhalten von Tieren zu einer bestimmten Jahreszeit ist Gegenstand der Phänologie (Griech. „Erscheinungslehre“). Im phänologischen Kalender werden die Jahreszeiten sowie deren Unterteilung anhand bestimmter Zeigerpflanzen und deren typischer Indikatoren festgehalten (Abb. 7). So zeigen etwa Blüte von Hasel und Schneeglöckchen den Beginn des sogenannten Vorfrühlings an, während Herbstzeitlose und reife Holunderbeeren den Herbst einläuten. Aufgrund der steigenden Temperaturen treten die Indikatoren für Frühling, Sommer und Teile des Herbstes immer früher auf, während der Winteranfang sich kaum verändert hat. Dies hat zu einer deutlichen Verkürzung des phänologischen Winters geführt: Er ist nun im Schnitt fast drei Wochen kürzer als im Zeitraum 1961-1990 (DWD, ohne Jahr a).

Auch in der Tierwelt sorgt die Erderwärmung für eine Verschiebung saisonal typischer Verhaltensweisen und Aktivitäten. Bei verschiedenen Vogelarten wurde bereits eine Vorverlegung des Brutbeginns sowie ein verändertes Zugverhalten, insbesondere in Form früherer Ankunfts- bzw. Durchzugszeiten, festgestellt (Essl und Rabitsch, 2013; Schuhmacher und Schuhmacher, 2013). Einige Tiere erwachen früher aus dem Winterschlaf; manche Kröten verzichten bei milden Temperaturen sogar ganz auf die Winterruhe (Rödter und Schulte, 2010). Auch die Entwicklung vieler Insekten verfrüht sich, sodass die Larven zeitiger schlüpfen als bisher (Baranov et al., 2020).

Während eine gewisse phänologische Flexibilität von Individuen auch eine Form der Anpassung darstellen kann (s. Abschnitt b), hat die Verschiebung von physiologischen und verhaltensbezogenen Mustern teils gravierende Konsequenzen. Bei Pflanzen führt der verfrühte Blattaustrieb bzw. die frühere Blüte zu einer höheren Empfindlichkeit gegenüber (Spät-) Frostschäden. Erwachen Säugetiere früher als gewöhnlich aus dem Winterschlaf, bereitet ihnen ein geringeres Nahrungsangebot Probleme. Bleibt die

Biodiversität

Biologische Vielfalt, unterteilt in drei Ebenen: 1) Genetische Variabilität innerhalb einer Art, 2) Vielfalt der Arten (Artenvielfalt) und 3) Vielfalt von Ökosystemen. (Spektrum Akademischer Verlag, 1999)

Winterruhe etwa bei Amphibien ganz aus, kann dies auch die reproduktive Fitness und damit die Wahrscheinlichkeit der Fortpflanzung mindern (Rödter und Schulte, 2010).

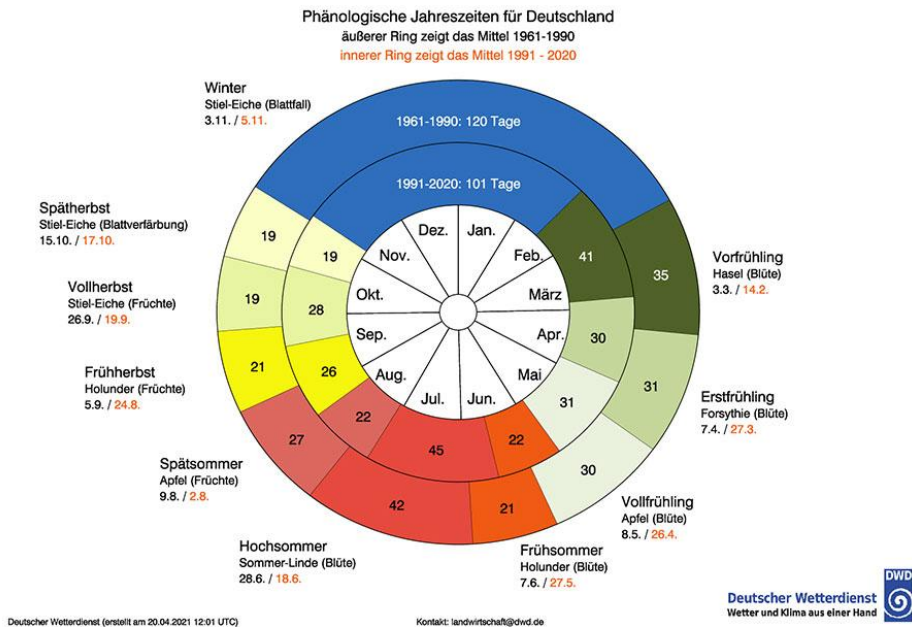


Abbildung 7: Phänologische Uhr Deutschlands: 1961-1990 im Vergleich zu 1991-2020. Quelle: DWD, 2021d.

Besonders schwerwiegend wirken sich phänologische Veränderungen auf biologische Interaktionen wie Symbiose, Parasitismus, Räuber-Beute-Beziehungen und Konkurrenz aus. Denn Arten reagieren unterschiedlich sensibel auf die Erderwärmung; besonders bei vielen Pflanzenarten beeinflussen neben der Temperatur zudem weitere Faktoren wie Tageslänge oder Bodenfeuchte die Phänologie. Dies hat zur Folge, dass sich der Rhythmus verschiedener Arten nicht immer synchron, sondern oft versetzt verlagert, sodass es zu einer Entkopplung normalerweise parallel ablaufender Prozesse kommt (Hauck et al., 2019): Pflanzen blühen, bevor ihre Bestäuber aktiv sind (oder umgekehrt), und einige Zugvögel finden bei ihrer Ankunft im Brutgebiet weniger Nahrung, weil die Insekten dort früher entwickelt sind (ebd., Visser und Both, 2005). Darunter kann auch der Bruterfolg leiden. Mit verschobenen Aktivitätszeiten verändern sich generell die Konkurrenzverhältnisse zwischen vielen Lebewesen, was weitreichende aber nur schwer vorhersagbare Folgen hat.

Veränderung potenzieller Verbreitungsgebiete

Neben phänologischen Einflüssen führt die Klimakrise dazu, dass sich das potenzielle Verbreitungsgebiet einer Art verändern kann, denn dieses ist in erheblichem Maße von Umweltbedingungen abhängig. Temperaturanstieg, veränderte Niederschlagsmuster und Extremwetterereignisse ändern die biotischen (z. B. spezifische Vegetationsformen) und abiotischen (z. B. Bodenfeuchte und -temperatur) Eigenschaften eines Gebiets, was die Fähigkeit einer Art zum Überleben bzw. zur Fortpflanzung beeinflusst (Essl und Rabitsch, 2013). So kann es passieren, dass ein zuvor geeignetes Areal nicht mehr den Lebensraumanprüchen einer Art genügt. Umgekehrt können sich zuvor ungeeignete Gebiete zu neuen Arealen entwickeln. Im Zuge der Erderwärmung verlagern sich die Klimazonen in den mittleren und höheren Breitengraden polwärts; in höheren Lagen nach oben (IPCC, 2019a). So verschieben sich die Vegetationszonen im Gebirge pro Grad Temperaturanstieg um 200 Höhenmeter Richtung Gipfel (UBA, 2021c). Da die Areale vieler Tier- und Pflanzenarten den Klimazonen folgen, finden die Verluste tendenziell an den südlichen bzw. tiefergelegenen Rändern der Gebiete statt,

Zahlen zu Arealen

Basierend auf einer Studie zu 105.000 Arten, warnt der IPCC: Schon bei einer Erwärmung um 1,5 Grad könnten sechs Prozent der Insekten, acht Prozent der Pflanzen und vier Prozent der Wirbeltiere über die Hälfte ihres klimatisch bedingten Verbreitungsgebiets verlieren; bei 2 Grad Erwärmung sind es 18 Prozent der Insekten, 16 Prozent der Pflanzen und acht Prozent der Wirbeltiere. (IPCC, 2018)

während im Norden bzw. in der Höhe Zugewinne möglich sind (Brasseur et al., 2017). Das potenzielle Areal einer Art kann sich also verlagern, erweitern oder verkleinern – Letzteres passiert, wenn die Verluste die Gewinne übertreffen (Schuhmacher und Schuhmacher, 2013). Zugvögel und andere wandernde Tierarten sind ein Sonderfall: Sie sind neben intakten Lebensräumen in der Heimat auch auf gleichbleibende Bedingungen in Brut-, Rast- und Überwinterungsgebieten angewiesen. Finden dort klimabedingt Veränderungen statt, wie der Verlust von Feuchtgebieten in Spanien oder die Ausbreitung der Wüste in Nordafrika, sind ein längerer Zugweg und Bestandsabnahmen mögliche Folgen.

Veränderung der Artenzusammensetzung und Neobiota

Die Veränderung von Verbreitungsgebieten führt dazu, dass sich Areale verschiedener Arten, die vorher keine Überschneidungen hatten, zukünftig überlappen könnten. Dadurch könnten sich Konkurrenzverhältnisse und weitere Wechselbeziehungen in den Artengemeinschaften wandeln. Da das Beziehungsgefüge zwischen Arten meist sehr komplex ist, kann man die Folgen für einzelne Arten nur schwer vorhersagen. Ein Trend zeichnet sich jedoch bereits ab: Neobiota, also Tier-, Pflanzen- oder Pilzarten, die vom Menschen unbewusst oder absichtlich in einen Lebensraum ausgebracht wurden, in dem sie zuvor nicht waren, können von der Erderwärmung profitieren. Invasive Neobiota verursachen schon ohne Klimakrise große Schäden: Manche schleppen Krankheitserreger in das von ihnen neu besiedelte Gebiet ein, andere sind Fressfeinde für die Tiere und Pflanzen, auf die sie treffen. Sie gelten daher als eine der Hauptursachen für den Verlust der biologischen Vielfalt (IPBES, 2019). Zudem verursachen gebietsfremde Arten erhebliche ökonomische Schäden und können auch die menschliche Gesundheit gefährden (Reinhardt et al., 2003). Da erfolgreiche Neobiota zumeist eine ausgeprägte Fähigkeit zur Anpassung an Umweltveränderungen besitzen, sind sie hinsichtlich neuer klimatischer Bedingungen häufig toleranter als heimische Arten. Weil die meisten in Deutschland vorkommenden terrestrischen Neobiota zudem wärmeliebend sind, haben sie auf längere Sicht einen weiteren Konkurrenzvorteil (Essl und Rabitsch, 2013). Die Klimakrise verstärkt also die ohnehin große Bedrohung durch invasive Arten.

Insgesamt gilt: Die Klimakrise verursacht weitreichende, komplexe Veränderungen, die für einzelne Arten und Lebensgemeinschaften positiv oder negativ ausfallen können. Aufgrund der Unsicherheiten von Klimaprognosen ist eine Vorhersage hinsichtlich Qualität und Quantität der Veränderungen schwierig, aber möglich. Die Bandbreite der Ergebnisse von Modellrechnungen ist relativ groß: Fünf bis 30 Prozent der Pflanzen- und Tierarten in Deutschland könnten langfristig klimabedingt verloren gehen; auch mit einem Verlust genetischer Vielfalt ist zu rechnen (Korn und Epple, 2006). Dabei sind vor allem solche Arten betroffen, die aufgrund bestimmter Eigenschaften besonders verletzlich gegenüber den Klimafolgen sind (Tabelle 2). Fakt ist, dass sich das Klima in einem so rasanten Tempo verändert, dass die Anpassungskapazität von Tieren und Pflanzen häufig an ihre Grenzen kommen wird (Badeck et al., 2007).

Tabelle 2: Besonders von der Klimakrise betroffene Arten (Sybertz und Reich, 2018)

| Faktoren und Folgen der Klimakrise | Besonders betroffene Arten |
|--------------------------------------|---|
| Erhöhung der Durchschnittstemperatur | Kälteliebende, z. B. alpine Arten, Eiszeitrelikte |
| Mildere bzw. kürzere Winter | Arten, die über den Winter ruhen oder migrieren |
| Zunahme von Hitzeextremen | Arten, die empfindlich auf Hitze reagieren |
| Zunahme von Sommertrockenheit/Dürre | Grund- und regenwasserabhängige Arten |
| Veränderung/Verlust von Lebensräumen | Arten mit geringer Mobilität bzw. hoher Standort-spezialisierung, vor allem bei seltenen Standorten |
| Veränderte Phänologie | Arten mit engen Beziehungen zu anderen Arten |
| Umweltveränderungen allgemein | Stenöke Arten; sich langsam fortpflanzende Arten; Arten mit geringer genetischer Vielfalt |

Stenök

Bezeichnung für Organismen, die keine großen Schwankungen der Umweltbedingungen tolerieren, die also eine geringe ökologische Potenz aufweisen (Stenökologie von Altgriech. stenos = eng und oikos = Haus, Wohnort).

(Spektrum Akademischer Verlag, 1999)

Folgen für Lebensräume

Parallel zu den Verbreitungsgebieten von Arten werden Lebensräume durch die Klimakrise verändert. Neben der Vielfalt von Arten und der genetischen Diversität innerhalb von Arten ist die Vielfalt an Lebensräumen Teil der globalen Biodiversität. Allerdings ist der Erkenntnisstand zu Klimafolgen für Lebensräume noch unbefriedigend (Heiland et al., 2019). Es ist zwar abzusehen, dass alle Lebensräume in Deutschland durch die Klimakrise beeinflusst werden; Art und Grad des Effekts werden jedoch lebensraum-spezifisch stark variieren (ebd.; Thuiller, 2007). Vor allem Lebensräume wie Moore oder altholzreiche Wälder, die sehr langsam entstehen und dabei auf relativ stabile Umweltbedingungen angewiesen sind, sind stark betroffen (Lexer et al., 2014). Bei Mooren und anderen wassergebundenen Biotopen verstärkt die Sensitivität gegenüber Trockenheit die Verletzlichkeit (s. Kapitel III.3.). Lebensräume in den Alpen, vor allem oberhalb der Waldgrenze, sind ebenfalls stark gefährdet, weil die Erderwärmung sich hier besonders schnell vollzieht (ebd.). Ein Spezialfall sind Küstenbiotope, die einer besonderen Bedrohung ausgesetzt sind: dem steigenden Meeresspiegel (s. Kapitel III.5.).

Die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) der EU sieht einen hohen Schutz für Lebensräume von gemeinschaftlicher Bedeutung vor. Diese Lebensraumtypen (LRT) sind im Anhang der Richtlinie aufgelistet und in weiteren Vorgaben des Bundesamts für Naturschutz bzw. der EU-Kommission näher definiert. Eine Studie verdeutlicht, wie empfindlich die FFH-LRT gegenüber der Klimakrise sind: Von den 91 in Deutschland vorkommenden LRT wird rund ein Viertel als besonders verletzlich eingestuft – dazu gehören verschiedene Moor-LRT wie Hoch- und Übergangsmoore, aber auch Schlucht- und Hangmischwälder (Petermann et al., 2007; Schuhmacher und Schuhmacher, 2013). Rund ein Drittel der LRT weist eine mittlere Vulnerabilität auf.

Insgesamt hat die Klimakrise immense Auswirkungen auf Arten und Lebensräume. Für die nächsten Jahrzehnte stuft der Weltbiodiversitätsrat sie als am stärksten wachsende Bedrohung der biologischen Vielfalt ein (IPBES, 2019). Bedenken sollte man dabei, dass die Klimakrise nicht isoliert zu betrachten ist, sondern einen zusätzlichen Stressfaktor neben weiteren menschengemachten Belastungen darstellt. Für viele Lebensräume und Arten ist die Situation schon ohne Klimakrise kritisch; die anhaltende Ausbeutung von natürlichen Ressourcen, die Zerschneidung und Entwässerung der Landschaft sowie Nährstoff- und Pestizideinträge gefährden ihren Fortbestand (Abb. 8). Aufgrund der Übernutzung durch den Menschen sind viele Ökosysteme in ihrer Anpassungsfähigkeit geschwächt. Umgekehrt nimmt die Verletzlichkeit der Ökosysteme in Bezug auf nicht-klimatische Faktoren durch die Klimakrise zu (IPBES, 2019).

Lebensräume

Das **Habitat** einer Art ist eine durch spezifische abiotische und biotische Faktoren definierte physische Umgebung, die mit den für Überleben und Vermehrung der Art nötigen Strukturen sowie Eigenschaften ausgestattet ist. Es ist jedoch, anders als das **Areal** (Verbreitungsgebiet) einer Art, kein geografisches, sondern ein theoretisches Konzept.

Es handelt sich um einen auf eine Art bezogenen (autökologischen) Begriff und unterscheidet sich so von synökologischen Begriffen wie **Biotop** (Kleinstlebensraum) oder **Biom** (Großlebensraum) als Lebensstätten einer **Biozönose**, d. h. einer Lebensgemeinschaft mehrerer Arten.

Im englischen und zunehmend auch im deutschen Sprachraum wird **Habitat** aber auch bezogen auf mehrere Arten gebraucht und zur Kennzeichnung spezifischer Biotopbestandteile (z. B. Totholz) mit Schlüsselfunktionen für Arten bzw. Artengruppen verwendet.

Die **Lebensraumtypen** der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie der EU bezeichnen Biotoptypen. (Spektrum Akademischer Verlag, 2001)

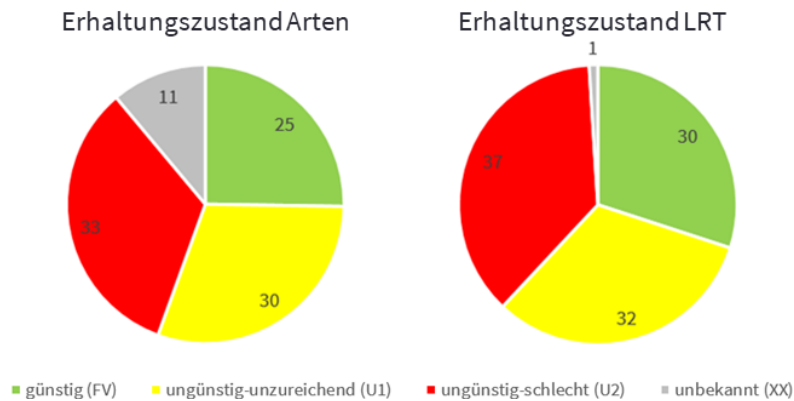


Abbildung 8: Bewertung des Erhaltungszustands der Lebensraumtypen (LRT) und Arten in Deutschland nach FFH-Bericht 2019. Neben der Landnutzung als Hauptstressor wächst die Bedeutung der Klimakrise als Bedrohung für Ökosysteme. Quelle: BMU, 2020a (eigene Darstellung).

b) Anpassen und anpassen lassen: Klimaanpassung im Naturschutz

Es bleibt festzuhalten, dass durch die Klimakrise veränderte abiotische und biotische Lebensraumbedingungen Änderungen in der Häufigkeit und Zusammensetzung von Arten bewirken, die zu einem lokalen Aussterben von Populationen, aber auch einem globalen Aussterben von Arten führen können (Ibisch und Kreft, 2008a). Schwindet die Biodiversität, wirkt sich das negativ auf Ökosystemleistungen wie Kohlenstoffbindung, Kühlung und Wasserspeicherung aus. Eine entscheidende Frage ist also, wie die Klimaanpassung von Ökosystemen gelingen kann, um solche Auswirkungen bestmöglich zu vermeiden. Arten haben mehrere Optionen, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Dazu gehören phänotypische Akklimatisierung, genetische Adaption und Migration. Wie diese Anpassung funktioniert, wie der Naturschutz diese unterstützen kann und was überdies getan werden muss, um Ökosysteme und deren Leistungen zu erhalten, soll im Folgenden erläutert werden.

Anpassungsoptionen von Flora und Fauna

Phänotypische Akklimatisierung

Kurzfristig haben Flora und Fauna die Möglichkeit, sich auf phänotypischer Ebene, also innerhalb des durch die Genetik vorgegebenen Spielraums, zu akklimatisieren. Anders gesagt, erfolgt die Anpassung durch Änderungen einzelner Merkmalsausprägungen, die umkehrbar sind; die Gene selbst bleiben unverändert (Durka und Michalski, 2013). Dies kann eine Anpassung auf morphologischer, physiologischer, verhaltens- sowie phänologischer Ebene beinhalten. Morphologische Eigenschaften betreffen Form und Struktur von Organismen, wie z. B. die Länge oder Form von Blättern. So erhöht etwa die Grau-Pappel bei Trockenstress die Dicke ihrer Blätter (Helbig, 2012). Physiologische Merkmale beziehen sich vor allem auf den Stoffwechsel von Tieren und Pflanzen. Bei wechselwarmen Tierarten – gerade solchen in Süßwasser- oder marinen Ökosystemen – ist eine erhöhte Stoffwechselrate oft die Antwort auf steigende Temperaturen (Seebacher et al., 2015). Akklimatisierung auf Verhaltensebene kann z. B. das Aufsuchen schattiger Plätze oder eine Verlagerung der Nahrungssuche bzw. -aufnahme in kühlere Tagesabschnitte beinhalten (Wolff et al., 2020). Auch phänologische Veränderungen im Jahresrhythmus können der Anpassung dienen, wenngleich diese häufig, wie erläutert, negative Folgen mit sich ziehen. So sind etwa Halsbandschnäpper (*Ficedula albicollis*) und Kohlmeise (*Parus major*) flexibler in der Wahl ihrer Brutzeitpunkte geworden, um sich an höhere Temperaturen und zunehmende Extremereignisse anzupassen (Przybylo et al., 2000; Nussey et al. 2005). Die je nach Individuum und Art unterschiedlich ausge-

Phänotyp

Vom Genotyp (der Gesamtheit der Gene) sowie Umweltfaktoren beeinflusstes Erscheinungsbild eines Organismus. Es umfasst sämtliche Merkmale, inneren Strukturen und Funktionen des betrachteten Lebewesens.

Der Phänotyp ist entsprechend nicht als konstante Eigenschaft eines Individuums zu verstehen, sondern kann – innerhalb eines genetisch bestimmten Rahmens – Veränderungen aufgrund von inneren und äußeren Einflüssen unterliegen.

(Spektrum Akademischer Verlag, 2000 und 2001)

prägte Fähigkeit, kurzfristig den Phänotyp anzupassen, wird phänotypische Plastizität genannt. Sie ist ein zentrales Indiz für die Resilienz gegenüber Klimafolgen.

Genetische Adaption (Evolution)

Die Klimakrise übt über Temperaturanstieg, sich wandelnde Niederschlagsmuster und zunehmende Extremereignisse sowie die dadurch bewirkten Änderungen der Lebensbedingungen einen hohen Selektionsdruck auf Arten aus. Arten können sich daher auch genetisch an Klimafolgen anpassen. Im Sinne der natürlichen Auslese (Selektion) überleben nur diejenigen Individuen, die durch spontane Veränderungen im Erbgut (Mutationen) besonders resilient gegenüber den neuen Bedingungen sind. Dank dieses Vorteils können sie ihr Erbgut besser weitergeben als ihre Artgenossen, welches sich in der Konsequenz zunächst in der Population und schließlich auf Artenebene durchsetzt. Während die phänotypische Akklimatisierung also kurzfristig und individuell bzw. maximal auf Populationsebene abläuft, vollzieht sich die genetische Anpassung über längere Zeiträume und auf Populations- bzw. Artenebene, also evolutionär (Hauck et al., 2019). Da die Klimakrise schnell voranschreitet, ist diese Option vor allem solchen Arten vorbehalten, die rasche Generationswechsel mit vielen Nachkommen vorweisen können.

Migration

Eine dritte Möglichkeit zur Anpassung an Klimafolgen ist das Ausweichen auf besser geeignete Habitate. Parmesan & Yohe (2003) wiesen nach, dass die Verbreitungsgebiete vieler Arten im Schnitt pro Jahrzehnt rund sechs Kilometer in Richtung der Pole bzw. sechs Meter nach oben wandern. Die Fähigkeit, ein neues potenziell geeignetes Areal tatsächlich zu besiedeln, hängt unter anderem davon ab, wie mobil eine Art ist (Essl und Rabitsch, 2013). Bei Tiergruppen mit geringer Mobilität, wie z. B. Kriechtieren, ist das Potenzial zur Migration gemindert. Pflanzen wiederum sind darauf angewiesen, dass ihre Samen geeignete Lebensräume erreichen, was je nach Verbreitungsweise stark variiert. Zudem werden Wanderung bei Tieren und Ausbreitung bei Pflanzen und Pilzen von menschengemachten und natürlichen Barrieren in der Landschaft behindert. Für viele Tierarten stellen Hindernisse wie Straßen, Städte sowie die strukturarme industrielle Agrarlandschaft ohne Versteckmöglichkeiten unüberwindbare Hindernisse dar. Für andere bilden Gebirge naturräumliche Grenzen. Insbesondere kältetolerante und -liebende Gebirgsarten wie das Alpen-Hornkraut (*Cerastium alpinum*) sind betroffen, denn sie können nur begrenzt in geeignetere Zonen – also nach oben – ausweichen (ebd.; s. Tabelle 2). Vögel wie das Alpenschneehuhn (*Lagopus muta*) geraten so ebenfalls in zunehmende Bedrängnis. Viele wärmeliebenden Arten profitieren dagegen von den klimatischen Änderungen und breiten sich nach Norden bzw. Nordosten aus. Beispiele sind die Stechpalme (*Ilex aquifolium*), der Bienenfresser (*Merops apiaster*) und die Feuerlibelle (*Crocothemis erythraea*) (Pompe et al. 2011, Schliep et al., 2017). Der Schwarzstorch (*Ciconia nigra*) dürfte unter dem Strich ebenfalls vom Temperaturanstieg profitieren: Er könnte Modellierungen zufolge seine Gebietsverluste mit Zugewinnen in Skandinavien mehr als ausgleichen, sodass sein Areal um bis zu 20 Prozent wachsen würde (Harrison et al., 2006; Schuhmacher und Schuhmacher, 2013).

Grundsätzlich hängt die Anpassungsfähigkeit von Individuen, Populationen und Arten also von deren phänotypischer Plastizität und genetischer Variabilität sowie von dem Vorhandensein und der Erreichbarkeit neuer, geeigneter Habitate ab. Während der Mensch auf die phänotypische Plastizität keinen direkten Einfluss nehmen kann, hat er z. B. über Schutzgebiete, Raumplanung und Landnutzung die Möglichkeit, Flora und Fauna bei der Anpassung zu unterstützen. Entsprechende Optionen, die Resilienz von Arten, Lebensräumen und Ökosystemen zu stärken, werden im folgenden Abschnitt näher beleuchtet, wobei ein Fokus auf den Naturschutz gelegt wird.

Phänotypische Plastizität

Bei vielen Pflanzen und Tieren, aber auch Bakterien auftretendes Phänomen, dass Individuen mit dem gleichen Genotyp (also den gleichen Erbinformationen) je nach den Umweltbedingungen, denen sie gerade ausgesetzt sind, unterschiedliche Phänotypen (also Erscheinungsbilder) haben. (Sommer et al., 2016)

Anpassungsoptionen im Naturschutz

Biotopverbund

Um Wanderungen von Tieren zu ermöglichen, aber auch, um Standortverlagerungen von Pflanzen zu erleichtern, braucht es eine Landschaft ohne Barrieren. Angesichts der hochgradig fragmentierten, von menschlicher Infrastruktur zerschnittenen Naturräume in Deutschland ist eine bessere Vernetzung bestehender Lebensräume essenziell. Diese als Biotopverbund bekannte Zielsetzung setzt auf den Erhalt, die Verbesserung und die Schaffung von Wanderkorridoren sowie Trittsteinhabitaten, die Lebensräume miteinander verbinden (Ibisch et al., 2014). Um erfolgreich zu sein, muss der Biotopverbund sektorübergreifend realisiert werden, wobei Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie Verkehrsplanung eine besondere Rolle einnehmen: Abseits der Schutzgebiete müssen, den Bedürfnissen der Arten entsprechend, Querungshilfen wie Wildbrücken sowie Strukturelemente wie Blühstreifen und Hecken zu dem Vorhaben beitragen. Wird eine Verinselung von Lebensräumen und die Isolation gefährdeter Populationen vermieden, ermöglicht bzw. erleichtert dies nicht nur die Migration in neue Gebiete. Auch der Genaustausch zwischen Populationen wird gefördert, was zu einer höheren genetischen Variabilität der Arten beiträgt. Somit unterstützt der Biotopverbund die Resilienz gegenüber Klimafolgen auf zweierlei Art und Weise.

Schutzgebiete

Um die Wirkung von Schutzgebieten vor dem Hintergrund zunehmender Klimafolgen aufrechtzuerhalten, können Revisionen von Größe, Form und Lage zielführend sein. Insbesondere kleine Gebiete sind großen Randeffekten ausgesetzt und daher besonders von den Auswirkungen der Klimakrise bedroht – sie laufen Gefahr, ihren Schutzzweck nicht ausreichend erfüllen zu können (Ibisch und Kreft, 2008a; Brasseur et al., 2017). Deshalb ist die im europäischen Vergleich geringe Größe deutscher FFH-Gebiete, Naturschutzgebiete und Nationalparks sowie die Aufspaltung von Natura-2000-Gebieten in Teilflächen problematisch (Ibisch und Kreft, 2008b; Ellwanger, 2009). Auch die Form der Gebiete kann sie anfälliger für Klimafolgen machen: Da eine Neuausweisung von Schutzgebieten angesichts von Landnutzungskonflikten kein leichtes Unterfangen ist, sollten hierfür vor allem solche Gebiete identifiziert werden, die „ein besonders ungünstiges Verhältnis von Umfang zu Fläche, etwa eine näherungsweise lineare Form, aufweisen“ (Ibisch und Kreft, 2008a). Bei kleinen und ungünstig geschnittenen Schutzgebieten ist eine Vergrößerung inklusive der Einrichtung von Pufferzonen, eine bessere Arrondierung sowie eine Vernetzung mit anderen Gebieten im Sinne des Biotopverbunds anzustreben (Ellwanger, 2009). Angesichts sich verlagernder Areale vieler Arten ist es zudem notwendig, über die Verschiebung vorhandener bzw. die Schaffung neuer Schutzgebiete in Gegenden nachzudenken, die künftig als Lebensraum oder Wanderkorridor für Arten dienen könnten. Damit ließe sich verhindern, dass Schutzgebiete als „leere Hüllen“ ohne ihre jeweiligen Schutzgüter enden, wobei Ellwanger (2009) diesbezüglich bei den meisten Gebieten keinen Grund zur Sorge sieht. In diesem Zusammenhang wird seit der Jahrtausendwende auch die Idee von flexiblen Schutzgebietsgrenzen diskutiert (Badeck et al., 2007).

Strategische Ansätze: Schutzziele und -objekte

Angesichts sich ändernder Umweltbedingungen müssen auch grundlegende Ansätze im Naturschutz hinterfragt werden, was die Definition von Schutzzielen und -gütern einschließt. Ibisch und Kreft (2008a) unterscheiden drei grundlegende Ansätze (s. Abb. 9). Demnach herrschten traditionell sogenannte statische Ansätze vor. Hier werden Schutzobjekte (z. B. eine Art oder eine bestimmte Lebensgemeinschaft) und Ziele (z. B. Erhalt einer Art an einem bestimmten Ort) zeitlich unbegrenzt festgelegt, wobei sie an historischen Referenzzuständen ausgerichtet werden (Ibisch und Kreft, 2009). Solche Referenzzustände – und die aus ihnen abgeleiteten Schutzziele und -objekte – sind in

Natura 2000

Schutzgebietssystem in der EU nach der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (Richtlinie 92/43/EWG). Es besteht aus „FFH-Gebieten“, die dem Schutz von europaweit gefährdeten Lebensraumtypen und Arten dienen, sowie den nach der Vogelschutzrichtlinie (Richtlinie 79/409/EWG) separat geführten Vogelschutzgebieten. (Spektrum Akademischer Verlag, 1999)

Zeiten sich rasant ändernder Klima- und damit ökologischer Verhältnisse zunehmend fraglich. Das Gegenstück zum statischen Naturschutz ist der Prozessschutz. Hierbei sind natürliche biologische Prozesse die Schutzobjekte; das Ziel ist deren (möglichst) ungestörter Ablauf und damit ergebnisoffen (Ibisch und Kreft, 2008a). Prozessschutzflächen demonstrieren, wie sich Ökosysteme weitgehend ohne menschlichen Einfluss entwickeln, und machen sichtbar, wie es um ihre Anpassungsfähigkeit bestellt ist. In seiner Reinform bedeutet dieser Ansatz, dass man gegebenenfalls einen Verlust von Biodiversität im Kontext von Klimafolgen hinnimmt. Da viele Arten durch die Klimakrise ohne aktive Hilfe in ihrem Fortbestand gefährdet sind, erscheint der Prozessschutz als Klimaanpassungsstrategie nur bedingt geeignet (ebd.).

Wenngleich beide Ansätze ihre Berechtigung haben, gewinnen neuere Strategien an Relevanz, die dem dynamischen Charakter der Klimakrise gerechter werden. Ibisch und Kreft (2008a; 2008b; 2009) schlagen einen adaptiven Naturschutz als Mittelweg vor, der seine Ziele und Schutzobjekte regelmäßig überprüft, im Kontext sich ändernder Umstände revidiert und dann gegebenenfalls neu definiert. Sie weisen darauf hin, dass ein solches adaptives Management „ein Schlüsselement des Ökosystemansatzes [ist], welcher nach seiner offiziellen Annahme durch das Übereinkommen über die biologische Vielfalt [der UN] seiner Umsetzung harrt“ (Ibisch und Kreft, 2008c).

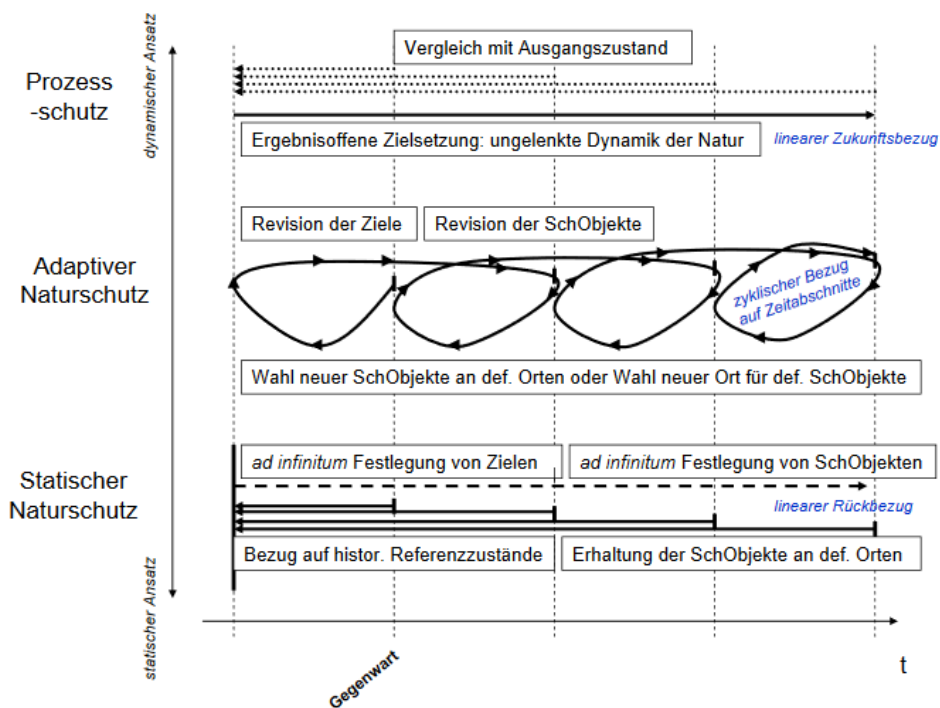


Abbildung 9: Vergleich der drei grundlegenden Ansätze im Naturschutz. Quelle: Ibisch und Kreft, 2008a.

Vor diesem Hintergrund wäre auch der Beitrag des Naturschutzes zu Klimaschutz und Anpassung zu überdenken. So könnten neben Arten und Lebensgemeinschaften ganze Ökosysteme als Schutzgüter in den Vordergrund treten; die zentrale Zielvorgabe wäre der Erhalt bzw. die Wiederherstellung wichtiger Ökosystemleistungen. Große, intakte Gebiete mit besonders benötigten Leistungen wie etwa naturnahe Wälder und Moore gewinnen hier an Bedeutung. Sie beherbergen nicht nur zahlreiche Arten, sondern speichern enorme Mengen an Kohlenstoff, wirken als Puffer bei hohen Temperaturen und regulieren den Landschaftswasserhaushalt. Um das Potenzial der Ökosysteme voll auszunutzen, müssen degradierte Flächen daher unbedingt renaturiert werden.



Renaturierung: Potenzial in Deutschland

Welche Flächen eignen sich in Deutschland besonders für die Wiederherstellung im Sinne von Biodiversität, Klimaschutz und Anpassung? Um diese Frage zu beantworten, gab der NABU eine Studie in Auftrag. Klicken Sie [hier](#)!

Naturschutzmanagement

Auch das Naturschutzmanagement sollte den Klimafolgen entsprechend ausgestaltet werden. Eine solide Grundlage von Managementplänen sind Vulnerabilitätsanalysen, die die Verletzlichkeit von Schutzgebieten oder einzelnen Objekten anhand von drei Faktoren bemessen: Der Exposition gegenüber Klimafolgen (wie stark ist das Gebiet z. B. zunehmender Trockenheit ausgesetzt?); der Sensitivität gegenüber diesen Klimafolgen (wie empfindlich reagieren das Gebiet und seine Schutzgüter auf Trockenheit?); und der Anpassungskapazität (wie gut können sich Gebiet bzw. Schutzgüter eigenständig an Klimafolgen anpassen?). Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) stellt Klimadaten und Szenarien speziell für Schutzgebiete zur Verfügung, die dabei helfen, deren Vulnerabilität einzuschätzen (PIK, ohne Jahr b). Generell sollte der Grundsatz im Sinne eines adaptiven Managements sein, proaktiv auf der Basis von Klimaprojektionen potenzielle Probleme zu antizipieren, entsprechende adaptive Maßnahmen einzuleiten und deren Wirksamkeit und Notwendigkeit im Rahmen eines Monitorings regelmäßig zu revidieren (Ibisch und Kreft, 2008b). So sollte man gezielt Arten identifizieren, die durch die Klimakrise besonders bedroht sind, weil ihre zukünftigen Lebensräume sich nicht mit heutigen Arealen überlappen oder sie nur beschränkt migrationsfähig sind. Auf dieser Basis könnten Maßnahmen entwickelt und durchgeführt werden, um die jeweilige Art bei der Umsiedlung in neue Lebensräume zu unterstützen bzw. um ein Weiterleben im bisherigen Habitat zu ermöglichen.

Reduktion nicht-klimatischer Belastungen

Schließlich soll noch einmal betont werden, dass der schlechte Erhaltungszustand zahlreicher Lebensräume und Arten überwiegend auf nicht nachhaltige Praktiken der Landnutzung und -bewirtschaftung sowie eine Übernutzung natürlicher Ressourcen durch den Menschen zurückzuführen ist. Dazu gehören Schad- und Nährstoffeinträge, die Entwässerung der Landschaft und die enorme Flächeninanspruchnahme, etwa durch Landwirtschaft und Siedlungen. Alle Anpassungsbemühungen müssen daher stets die Reduzierung solcher nicht-klimatischer Belastungen im Blick haben. Ohne die Einschränkung dieser Eingriffe ist die Resilienz von Ökosystemen nicht zu erreichen.

c) Empfehlungen

Damit die Klimaanpassung von Ökosystemen und damit der Erhalt von Lebensräumen und Arten sowie Leistungen wie Kohlenstoffbindung und Wasserspeicherung in Deutschland gelingt, empfiehlt der NABU:

- Die Aufnahme einer Gemeinschaftsaufgabe für Biodiversität und Renaturierung ins Grundgesetz, um unser Schutzgebietsnetzwerk ausreichend zu finanzieren.
- Einen Renaturierungsplan für Deutschland, der Ökosystemleistungen und Artenvielfalt auf mindestens 15 Prozent der Landes- und Meeresfläche wiederherstellt. Mindestens ein Viertel der Projekte muss bis 2025 umgesetzt werden.
- Einen nationalen Renaturierungsfonds von jährlich 500 Millionen Euro.
- Eine Bund-Länder-Initiative für mehr Wirksamkeit von Schutzgebieten, inklusive einer Investitionsoffensive zur Entwicklung und Stärkung von Erhaltungszielen und -strategien, vor allem für Natura-2000-, Großschutz- und Naturschutzgebiete.
- Mehr nationales Naturerbe: Die Bundesregierung muss auf eine weitere Privatisierung von Bundesflächen im ländlichen Raum dauerhaft verzichten. Diese Flächen sind im Interesse der biologischen Vielfalt und der regionalen Wertschöpfung etwa als Trittsteine im nationalen Biotopverbund zur Verfügung zu stellen.
- Die Entwicklung, Finanzierung und Evaluierung nationaler Artenhilfsprogramme, auch für besonders von der Klimakrise betroffene Arten.



NABU-Kernforderungen

Im Kontext der Bundestagswahl 2021 hat der NABU zentrale, an die künftige Regierung gerichtete Forderungen aufgestellt. Diese können [hier](#) abgerufen werden!

2. Wald und Forst

Wälder gehören neben Mooren zu den wichtigsten terrestrischen Kohlenstoffsinken und leisten damit einen erheblichen Beitrag zur Eindämmung der Klimakrise. Zudem tragen sie als Wasserreservoirs und natürliche Kühltürme zu einer Pufferung von Klimafolgen bei. Viel naturbelassener Wald gibt es jedoch nicht mehr in Deutschland; Monokulturen sind weit verbreitet. Solche Plantagen sind besonders anfällig gegenüber den Folgen der Erderhitzung. Ein Wandel zu naturnahen Strukturen ist erforderlich.

a) Borkenkäfer, brennende Bäume: Wälder im Trockenstress

Alle wesentlichen Komponenten der Klimakrise wirken sich auf Bäume aus. Allein der Temperaturanstieg hat weitreichende Folgen: So können Hitzeextreme etwa zu einer höheren Sterblichkeit junger Bäumen beitragen und auch bei älteren Exemplaren zu Gewebeschäden führen (Bolte und Ibisch, 2007). Schon die durchschnittlich höheren Temperaturen reichen jedoch aus, um Bäume zu beeinträchtigen. Milde Winter z. B. können dazu führen, dass Bäume ihren Stoffwechsel aktivieren. Dadurch zapfen sie ihre Reserven an und starten in der Folge geschwächt ins Frühjahr (ebd.). Ein weiteres Problem sind die oben erläuterten Spätfrostschäden, die durch einen phänologisch früheren Blattaustrieb häufiger auftreten können. In Kombination mit dem höheren CO₂-Gehalt in der Atmosphäre können sich steigende Temperaturen lokal auch positiv auswirken und das Wachstum der Bäume begünstigen. Dies ist jedoch artenabhängig und zudem nur der Fall, wenn ausreichend Wasser vorhanden ist – eine Bedingung, die häufig nicht erfüllt ist (Redmann et al., 2014).

Indirekt birgt der Temperaturanstieg weitere Gefahren: Wärmeliebende Schädlinge und bestimmte Krankheiten können sich ausbreiten. Der Buchdrucker (*Ips typographus*), eine Borkenkäferart, kann z. B. zusätzliche Entwicklungszyklen durchlaufen und seine Bestände so deutlich erweitern (Jakoby et al., 2015). Zuletzt kam es in den Dürrejahre 2018-2020 zu Massenvermehrungen in Fichtenbeständen ganz Mitteleuropas; auch Deutschland war betroffen (Sobczyk, 2020). Der Blaue Kiefernprachtkäfer (*Phaenops cyanea*) hingegen schließt seine Entwicklung bei Wärme schneller ab und kann auf diese Weise seine Zahl erhöhen (Brasseur et al., 2017). Auch Krankheitserreger wie manche Pilze profitieren von wärmeren Temperaturen (Engesser, 2008). Das gesteigerte Schädlingsaufkommen stellt eine Zusatzbelastung für die Bäume dar, die aufgrund der direkten Klimawirkungen bereits geschwächt sind.

Neben dem Temperaturanstieg sind vor allem die sich ändernden Niederschlags- und Verdunstungsverhältnisse ein Problem. Mehr Trockenheit im Sommer bedeutet mehr Trockenheit mitten in der Vegetationsperiode, wenn ausreichend Wasser besonders wichtig ist. Verstärkt wird die Dürrefahrer dadurch, dass Niederschlag vermehrt als Starkregen fällt, der schneller abfließt und dementsprechend weniger gut vom Boden aufgenommen werden kann (Bolte und Ibisch, 2007). Zusätzlich tragen anthropogene Nutzungen und die längere Vegetationsperiode zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels bei. Das sorgt für Trockenstress bei Bäumen – gerade bei den flachwurzigen Fichten und auf flachgründigen und sandigen Standorten, die ohnehin Schwierigkeiten haben, Wasser zu halten (ebd.). Von Trockenheit bleiben aber auch tiefer wurzelnde Arten nicht verschont. Vor allem in Kombination mit Schädlingsbefall erhöht dies die Mortalität der Bäume (Etzold et al., 2016). Der Waldzustandsbericht für 2020 hält fest:

„Der Kronenzustand hat sich bei vielen Baumarten weiter verschlechtert. [...] Die mittlere Kronenverlichtung ist im Durchschnitt aller Baumarten mit 26,5 Prozent so hoch wie noch nie. [...] Außerdem zeigt sich eine stark zunehmende Absterberate. Vor allem

unsere älteren Wälder über 60 Jahre, sind von Absterbeerscheinungen betroffen. Doch auch die jüngeren Bäume zeigen einen negativen Trend.“ – BMEL, 2021

Als weiterer Risikofaktor kommt die durch Trockenheit bedingte Waldbrandgefahr hinzu, die seit 1991 signifikant angestiegen ist (UBA, 2019a). Insbesondere in Jahren mit Dürresommern brannte es überdurchschnittlich viel. 2019 stand eine Fläche von 2.711 Hektar in Flammen; die größte Zahl seit 27 Jahren (UBA, 2020a). Deutlich stärker als Waldbrände gefährden jedoch Stürme den deutschen Baumbestand (UBA, 2019a). Sollten heftige Sturmereignisse wie erwartet zunehmen, wird es häufiger zu Schäden wie abgebrochenen Ästen und entwurzelten Bäumen kommen. Die Schadensbilanz ist dabei abhängig von Wechselwirkungen mit weiteren Belastungen, etwa durch Nassschnee, Trockenstress oder Schädlingsbefall (Bolte und Ibisch, 2007).

Wie in Kapitel III.1. generell für Flora und Fauna festgestellt, wird die Klimakrise also auch bei Baumarten zu einer veränderten Verteilung und Häufigkeit in Deutschland führen. Die individuellen Folgen für einzelne Wälder bzw. Plantagen lassen sich dabei nur „mit Kenntnis der betroffenen Baumarten und unter Einbeziehung von Boden (Nährstoffgehalt, verfügbare Wasserkapazität) sowie Topografie (Einstrahlung, Hanglage, Exposition)“ (Redmann et al., 2014) einschätzen. Pauschal kann man aber davon ausgehen, dass Monokulturen trockenheitssensibler, sturm- bzw. schädlinganfälliger Arten, wie der Fichte, alles andere als zukunftstauglich sind. So berechnen etwa Hanewinkel et al. (2010), dass gemäß dem SRES-Emissionsszenario A2 die geeigneten Flächen für Fichtenanbau in Baden-Württemberg bis 2100 um 93 Prozent zurückgehen könnten (Brasseur et al., 2017).

Deutlich resilienter und zudem für die gesellschaftliche Klimaanpassung zentral sind intakte, naturnahe Waldökosysteme. Sie sind Bereitsteller von Trinkwasser, können Hochwasser abschwächen und kühlen die Umgebungsluft. Gleichzeitig schützen sie als Treibhausgassenken das Klima: 2018 nahmen Wälder in Deutschland ca. 57 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent auf, fast so viel wie im selben Zeitraum in der Landwirtschaft emittiert wurde (BMU, 2021a; UBA, 2021a). Solche Ökosystemleistungen müssen gezielt erhalten und gefördert werden, um ihren Beitrag zu Anpassung und Klimaschutz trotz zunehmender Klimafolgen voll auszuschöpfen (Abb. 10). Umgekehrt ist zu vermeiden, dass Wälder bzw. Forste durch die Klimakrise zu Treibhausgasquellen werden – denn steigende Bodentemperaturen führen tendenziell zu höheren Emissionsraten, obgleich auch der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens eine Rolle spielt (Wu et al., 2010).

CO₂-Äquivalent

CO₂-Äquivalente (CO₂e) sind eine Maßeinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung verschiedener Treibhausgase.

Neben dem wichtigsten vom Menschen verursachten, also anthropogenen Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) existieren weitere, wie z. B. Methan (CH₄) oder Lachgas (N₂O). Sie entstehen vor allem in der Landwirtschaft, speziell durch Düngung und Massentierhaltung. Die verschiedenen Gase tragen nicht in gleichem Maße zum Treibhauseffekt bei und bleiben für unterschiedlich lange Zeiträume in der Atmosphäre. (myclimate, ohne Jahr)



Abbildung 10: Die grundlegenden, versorgenden, regulierenden und kulturellen Ökosystemleistungen von intakten Wäldern. Im Kontext der Klimakrise sind die Bindung von Treibhausgasen und die Linderung von Klimafolgen, z. B. durch Kühlung und Hochwasserschutz, zentral. Quelle: BfN, 2021 (abgewandelt).

b) Heimisch und laubig: Klimaanpassung von Wald und Forst

Die in Kapitel III.1. erläuterten Optionen natürlicher Anpassung – Akklimatisierung, genetische Adaption und Migration – stehen auch Bäumen zur Verfügung. Bei einigen Arten wurde bereits verschiedene Mechanismen der Akklimatisierung nachgewiesen: Pappeln etwa können bei Trockenheit ihre Blattfläche halbieren und die Blattanzahl reduzieren (Helbig, 2012), Buchen können ihre Spaltöffnungen schließen und so die Verdunstung mindern (Bolte, 2016), und Eichen steuern die Zahl ihrer Buchtenerven, die für die Wasserversorgung der Blätter zuständig sind (Bonfils et al., 2013). Auch über die Zellatmung kann die Toleranz gegenüber großer Hitze teilweise gesteigert werden (Hauck et al., 2019). Solche Abwehrmechanismen kommen allerdings an ihre Grenzen, wenn sich die Umweltbedingungen zu schnell bzw. zu stark verändern – die ernüchternde Bilanz des Waldzustandsberichts 2020 verdeutlicht dies (BMEL, 2021).

Was den Grad der genetischen Variabilität angeht, zeigt sich ein gemischtes Bild. Über ein Viertel (26,3 Prozent) der Gesamtwaldfläche Deutschlands sind nicht naturnahe Reinbestände (UBA, 2016b), also Monokulturen, die meist auf genetisch homogenem Pflanzgut beruhen. Solche Bestände sind besonders anfällig gegenüber Klimafolgen und ihre Fähigkeit zur genetischen Adaption stark begrenzt. Auf weiteren zehn Prozent der Waldfläche kommen höchstens zwei Baumarten vor. Knapp die Hälfte sind Mischbestände mit drei oder mehr Arten und entsprechend anpassungsfähiger (ebd.). Ganz ungestört, also ohne menschliche Einflussnahme, kann Anpassung auf weniger als drei Prozent der Waldfläche ablaufen (UBA, 2021e).

In puncto Migration ist die Anpassungskapazität von Bäumen insofern eingeschränkt, als sie ihre Standorte nur relativ langsam verlagern können. Lischke (2020) modellierte die Migration von Baumarten unter Betrachtung von u. a. Samenproduktion, -transport und Entwicklung der Jungbäume. Sie kam zu dem Schluss, dass „die räumlich-zeitliche Walddynamik wegen der begrenzten Wandergeschwindigkeit der Bäume der klimawandelbedingten Veränderung der Standortbedingungen hinterherhinkt“. Dadurch kann es regional zu Verlusten in den Beständen einzelner Arten kommen, wie sie etwa für die Buche möglich sind (Brasseur et al. 2017).

Die natürliche Anpassungskapazität von Bäumen ist also begrenzt, die Resilienz von Forsten wegen hoher Bestandsdichten und geringer Artenvielfalt zusätzlich verringert. Eine zentrale Anpassungsmaßnahme ist es daher, Forste zu naturnahen Wäldern mit hoher Baumartenvielfalt umzugestalten. Besonders schonend und effektiv gelingt dies, indem eine natürliche Regeneration des Walds zugelassen wird (Naturverjüngung). Eine sorgfältig geförderte Naturverjüngung stellt sicher, dass sich die an die lokalen Standortbedingungen angepassten Bäume vermehren, ohne dass große Eingriffe ins Ökosystem nötig sind. Damit genug genetische Vielfalt entsteht, muss darauf geachtet werden, dass Nachbarbestände als Verjüngungsquelle geeignet sind, also qualitativ hochwertig, vital und heimisch (Geburek, 2006). In Ausnahmefällen kann eine Naturverjüngung durch Pflanzung oder Saat besonders resilienter Herkünfte heimischer Baumarten ergänzt werden (Bolte und Ibisch, 2007). Das bedeutet, dass das Saat- bzw. Pflanzgut von einer Unterart der jeweiligen heimischen Art stammt, deren Herkunft bei sehr exponierten, z. B. trockenheitsanfälligen deutschen Standorten liegt.

Naturverjüngung

Vor allem durch Selbstansamung oder natürliche Vermehrung (Stockausschlag, Wurzelbrut) aus einem Altbestand heraus sich vollziehender Begründungs- oder Erneuerungsprozess eines Walds. Die Naturverjüngung führt, wenn der Mensch nicht eingreift, zur Entstehung eines Naturwalds. (Spektrum Akademischer Verlag, 2001)

Bei der Steigerung der Artenvielfalt sollte auf einen hohen Laubbaumanteil geachtet werden, vor allem in niederschlagsarmen Gebieten außerhalb der natürlichen Nadelwaldverbreitung. Insbesondere Buchen fangen mit ihrer Kronenform viel Regenwasser auf und leiten es am Stamm hinab zum Boden. Bei jungen Buchen erreicht ca. doppelt so viel Niederschlagswasser den Waldboden wie bei gleichaltrigen Kiefern (Abb. 11). Laubbäume haben außerdem eine höhere Kapillarwirkung als Nadelgehölz und können daher den Grundwasserstand besser anheben (Oertli, 1993). Damit sind sie ein wichtiges Hilfsmittel gegen zunehmende Trockenheit. Anders als Nadelbäume können Laubbäume außerdem zu einer deutlichen Senkung der Umgebungstemperatur im Sommer beitragen (Schwaab, 2020). Sie regulieren effektiv das Waldinnenklima und tragen so dazu bei, dass die phänotypische Plastizität (s. Kapitel III.1) der Lebewesen im Wald nicht überstrapaziert wird. Totholz ist ebenfalls Temperaturpuffer und Wasserspeicher in einem und bietet als zentrales Strukturelement Lebensraum für bedrohte Arten. Es sollte deshalb, wann immer möglich, auf der Fläche verbleiben.

Herkunft (Provenienz)

Forstwirtschaftliche Bezeichnung für das Herkunftsgebiet einer Baumrasse. Um den Anbauerfolg einer Baumart zu sichern, werden in der Regel Saat- oder Pflanzgut aus Provenienzen verwendet, die dem Anbaugbiet klimatisch und geologisch ähnlich sind.

(Spektrum Akademischer Verlag, 1999)

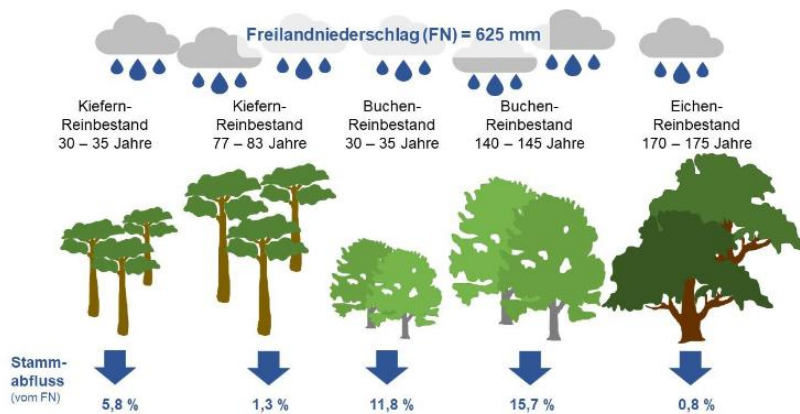


Abbildung 11: Stammabflussraten in Abhängigkeit von Jahresniederschlag, Baumart und -alter. Vor allem Buchen tragen zur Grundwasserneubildung bei. Quelle: Reise et al., 2020; basierend auf Müller, 2019.

Verzichtet werden muss auf nicht-heimische Baumarten, da deren Einbringung eine enorme Gefahr hinsichtlich des Einschleppens von Krankheiten und Schadinsekten birgt. Vermeintliche Vorteile, etwa durch eine höhere Trockenheitsresistenz südlicher Arten, stehen nicht im Verhältnis zum Risiko von biologischen Invasionen, das damit einhergeht. Dies gilt insbesondere für die Pflanzung von Exoten aus anderen Kontinenten. Aber auch die „unterstützte Wanderung“ (*Assisted Migration*) von Arten ist riskant. Dies betrifft Arten, die theoretisch auf dem Landweg in ein Gebiet migrieren könnten, was aber wegen der Geschwindigkeit des Klimawandels praktisch nicht möglich ist: Mittels unterstützter Wanderung soll ihnen bei der Migration geholfen werden, indem Saatgut gezielt einige hundert Kilometer nördlich der aktuellen Verbreitungsgrenze ausgebracht wird. Während die Wahrscheinlichkeit biologischer Invasionen bei diesem intrakontinentalen Prozess wohl geringer ist als die bei interkontinentaler Einbringung von Arten, sind die Effekte solcher Invasionen, so sie eintreten, gleichsam gravierend (Mueller und Hellmann, 2008). Zudem ist der Erfolg der Etablierung einer Art durch unterstützte Wanderung von einer Vielzahl an Variablen abhängig und dadurch schwer steuerbar – klimatische Parameter, wie die Frostsensitivität vieler mediterraner Arten, machen nur einen kleinen Anteil der Faktoren aus (Park und Talbot, 2018).

Auch in Deutschland etablierte fremde Arten wie die Douglasie sind kein Allheilmittel: Ihr Anbau wird im Kontext der Klimakrise nicht nur zunehmend riskant (Schüler und Chakraborty, 2021), sie wirkt sich auch negativ auf den sensiblen Wasserhaushalt aus – die Sickerwasserspende unter Douglasien ist deutlich niedriger als die ohnehin schon

minimalen Wasserspenden von Fichte und Kiefer (Prietzl und Bachmann, 2011). Da der Erhalt von Waldökosystemleistungen eine große Bedeutung für die Anpassung hat, müssen entsprechende Leistungen stets bei der Einstufung als zukunftssträchtige Baumart berücksichtigt werden. Dies gilt vor allem im Kontext der langen Planungszeiträume der Forstwirtschaft, die teilweise die gesamte Laufzeit der Klimaszenarien umfassen (Kölling und Zimmermann, 2007). Vor diesem Hintergrund muss auch die Kenntnis zur Resilienz heimischer Arten ausgeweitet werden, um die Potenziale bestimmten Artenzusammensetzungen besser einschätzen und nutzen zu können.

Zu einer Risikostreueung trägt neben der Baumartenvielfalt auch die Altersvielfalt in Wäldern bei, denn unterschiedlich alte Bäume reagieren unterschiedlich empfindlich auf klimatische Änderungen. Deshalb sollten alle Altersklassenwälder in Dauerwälder umgewandelt werden. So würden auch Kahlschläge und damit einhergehende höhere Lachgasemissionen vermieden (Papen und Brüggemann, 2006). Eine naturnahe Waldrandgestaltung mit heimischen Sträuchern fungiert darüber hinaus als Puffer gegenüber klimatischen und weiteren Störungen (UBA, 2016c). Neben den Anstrengungen, Forste naturnaher zu gestalten, sollten vermehrt Wälder aus der Nutzung genommen werden, um natürliche Anpassung im Rahmen des Prozessschutzes zuzulassen.

Zuletzt wird es auch in Bezug auf den Wald unerlässlich sein, im Sinne einer höheren Resilienz alle nicht-klimatischen Belastungen zu minimieren. Dies beinhaltet den Rückbau von Entwässerungsgräben, um dem Wald nicht unnötig Wasser zu entziehen; ein angepasstes Jagdmanagement, um das Abfressen von Jungbäumen durch Wild zu minimieren; die Reduzierung von Nährstoffeinträgen durch Land- und Forstwirtschaft, um die drastischen Auswirkungen auf Artenvielfalt und Waldfunktionen zu bremsen (Staude et al., 2020; Guntern et al., 2020); den Stopp eines weiteren Ausbaus der Waldinfrastruktur, da die daraus resultierende Bodenverdichtung noch Jahrzehnte später negativ nachwirken kann (Ebeling und Gaertig, 2015); den Verzicht auf Pestizide in der Forstwirtschaft, um die Belastung mit Chemikalien zu vermeiden; und die Begrenzung des Holzeinschlags, der wohl größte direkte Eingriff, der die Widerstandsfähigkeit des Forstes bzw. Waldes maßgeblich beeinträchtigt.

c) Empfehlungen

Um den Lebensraum Wald trotz Klimakrise zu schützen und Ökosystemleistungen wie Kohlenstoffbindung und Wasserspeicherung zu erhalten, empfiehlt der NABU:

- Eine Novellierung des Bundeswaldgesetzes: Natürliche Waldstrukturen mit Fokus auf heimischen Laubbäumen müssen gefördert, naturferne Nadelforste umgebaut, Entwässerungen zurückgebaut, und die Befahrung auf ein Minimum reduziert werden. Die Bundesregierung muss Förderprogramme entsprechend anpassen.
- Ein langfristig angelegtes Finanzierungsmodell zur Honorierung von Naturschutzleistungen im Privatwald: Mit monetären Anreizen kann die Förderung natürlicher Prozesse und Strukturen wie die Erhöhung von Altbaumanteilen gelingen.
- Den weitgehenden Verzicht auf die Nutzung nicht standortheimischer Arten: Bei Maßnahmen zur Wiederbewaldung in Schutzgebieten sind ausschließlich lebensraumtypische Gehölzarten zu verwenden, außerhalb von Schutzgebieten muss sich die Förderung auf die Pflanzung europäischer Baumarten beschränken.
- Mindestens zehn Prozent Naturwald ohne jegliche Nutzung durch den Menschen, auch als Referenzflächen für eine menschlich unbeeinflusste Waldentwicklung.
- Einen maximalen Einschlag von 30 Prozent des Holzvorrats pro Dekade in Forsten.

Altersklassenwald

Hochwald, der aus annähernd gleichaltrigen Beständen besteht, die nach Erreichen der Hiebsreife flächenweise geerntet werden.

(LZW Sachsen-Anhalt, 2016)



12-Punkte-Papier

Im 12-Punkte-Papier zu Wald und Forstwirtschaft im Klimawandel finden Sie weitere Informationen und NABU-Forderungen zum Thema. Klicken Sie [hier!](#)

3. Wasser

Wasser ist die Grundlage allen Lebens. Von Trinkwasserversorgung und Landwirtschaft über Ökosysteme wie Flüsse, Seen und Feuchtgebiete bis hin zu Energieerzeugung und Transport: Mensch und Umwelt sind hochgradig von dem Element abhängig. Dabei kommt es sowohl auf Quantität als auch auf Qualität an. Ist nicht genug da, trocknen Gewässer und Moore aus, laufen Schiffe auf Grund, fehlt Kraftwerken Kühlflüssigkeit. Stimmt die Qualität nicht, drohen Krankheiten und negative Folgen für Ökosysteme. Die Klimakrise ist hier nur ein Faktor von vielen. Bevor ihre Auswirkungen auf Wasserverfügbarkeit und -güte erklärt werden, lohnt sich ein Blick auf die Ausgangssituation. In Deutschland fallen pro Jahr ungefähr 307 Kubikkilometer Niederschlag. Ein Großteil verdunstet wieder (BMBF, 2014; Abb. 12). Im langjährigen Mittel verbleiben rund 117 Kubikkilometer im Gebiet der Bundesrepublik. Die Wasserressourcen sind dabei relativ ungleich verteilt; Niederschlagsmenge und Verdunstung unterscheiden sich teilweise stark von Region zu Region. So liegen die Abflüsse in den Alpen bei ca. 2.000 Millimeter pro Jahr, während in Teilen der östlichen Bundesländer jährlich unter 50 Millimeter abfließen (Hirschfeld, 2015). Massiv verschärft wird diese Diskrepanz durch Landnutzung: Allein in Brandenburg befinden sich mehr als 23.000 Kilometer Entwässerungsgräben; über 80 Prozent der dortigen Fließgewässer sind auf die Drainage der Landschaft ausgelegt (LfU Brandenburg, 2004). Hinzu kommt die Entnahme aus Grund- oder Oberflächenwasser: 2016 wurden ca. 24 Milliarden Kubikmeter Wasser für öffentliche Wasserversorgung, Landwirtschaft, Bergbau, Gewerbe sowie Energieversorgung entnommen; mehr als die Hälfte entfiel auf die Energiewirtschaft (UBA, 2020b).

Was die Qualität von Gewässern angeht, wird gemäß der Wasserrahmenrichtlinie der EU bei Oberflächengewässern zwischen dem ökologischen und chemischen Zustand unterschieden. Der ökologische Zustand wird maßgeblich durch biologische, chemisch-physikalische und hydromorphologische Aspekte wie etwa die Durchgängigkeit eines Flusses bestimmt (UBA, 2015). Sämtliche dieser Komponenten werden stark durch den Menschen beeinflusst, sei es durch die Entwässerung der Landschaft oder Nähr- und Schadstoffeinträge aus Landwirtschaft und Industrie. Bei Flüssen kommen Vertiefung, Begradigung, Befestigung und Wasserkraft dazu; Seen leiden besonders unter nicht nachhaltigen Fischereipraktiken. In der Folge sind nur etwa acht Prozent der Oberflächengewässer Deutschlands in einem ökologischen guten oder sehr guten Zustand; über die Hälfte werden als schlecht oder unbefriedigend eingestuft (ebd.).

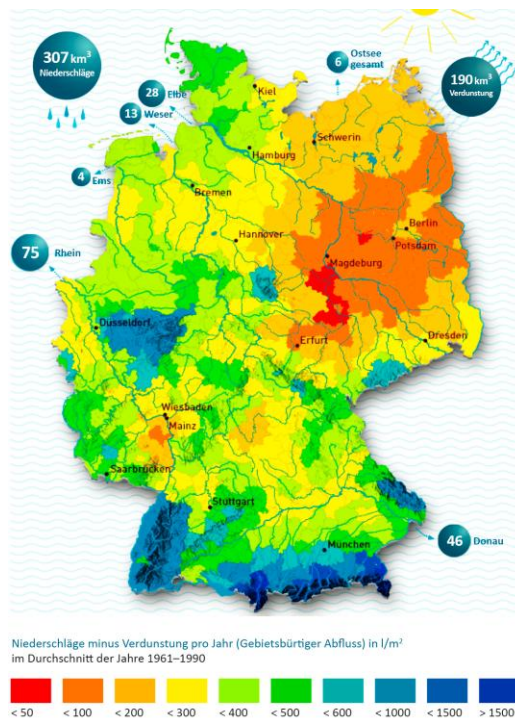


Abbildung 12: Gebietsbürtige Abflüsse (Niederschläge minus Verdunstung) nach Kreisen im Durchschnitt der Jahre 1961–1990 in l/m² sowie Gesamtvolumen der jährlichen Niederschläge und Verdunstung über Deutschland in km³. Quelle: BMBF, 2014 (eigene Darstellung).

Um den chemischen Zustand von Gewässern zu bestimmen, werden diese gesondert auf 45 prioritäre Stoffe sowie weitere gefährliche Substanzen überprüft. Da darunter sogenannte ubiquitäre Stoffe fallen, d. h. extrem persistente Chemikalien, die aufgrund menschlicher Nutzungen praktisch überall in der Umwelt vorhanden sind, haben alle Oberflächengewässer eine schlechte chemische Qualität (UBA, 2015). Bei den Grundwasserkörpern sind mehr als ein Drittel in einem chemisch schlechten Zustand. Eine ökologische Erhebung auf EU-Ebene ist für Grundwasser nicht vorgesehen, wenngleich es wegen der großen Bedeutung des Lebensraums für Artenvielfalt und Wasserqualität nationale Anstrengungen zur Entwicklung entsprechender Indikatoren gibt (UBA, 2014). Insgesamt sind Stygobionta, d. h. Flora und Fauna des Grundwassers, noch relativ wenig erforscht. Grundsätzlich gilt jedoch: Dort, wo die chemische Qualität schlecht ist, ist auch ein schlechter ökologischer Zustand nicht weit.

a) Zu viel, zu wenig, zu warm: Landschaftswasserhaushalt in der Klimakrise

Die Ausgangssituation von Süßwasserökosystemen in Deutschland ist also kritisch; der Wasserhaushalt ist in vielen Gegenden durch Menschen aus dem Gleichgewicht gebracht. Die Klimakrise tritt nun als verschärfender Faktor hinzu.

Zu wenig Wasser

Eine direkte Folge der Erderhitzung ist ihr Einfluss auf die klimatische Wasserbilanz, die sich aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung ergibt. Mit steigenden Temperaturen wächst auch die Rate der potenziellen Verdunstung, sodass diese immer häufiger den Niederschlag übertrifft. Dadurch kommt es, wie in Kapitel II.2. erläutert, vermehrt zu einer geringen Bodenfeuchte. Von einem Mehr an Verdunstung, kombiniert mit der wachsenden Zahl aufeinanderfolgender Trockentage, sind auch Wasserstände von Flüssen, Seen und Grundwasser betroffen. Wie groß der Einfluss der Klimakrise im Vergleich zu anderen Faktoren ist, lässt sich allerdings nicht immer leicht bestimmen.

Abfluss

Das Volumen des Wassers, das in einer festgelegten Zeit und unter Einfluss der Schwerkraft einen bestimmten Querschnitt des Festlands unter- und oberirdisch durchfließt.

(Bronstert & Engel, 2005; DIN 4049-3)

Meist bezieht sich der Begriff auf ein Einzugsgebiet (Gebietsabfluss oder **gebietsbürtiger Abfluss**). Er berechnet sich aus der Differenz zwischen Gebietsniederschlag und Gebietsverdunstung und ist eine wichtige Größe, um den **Wasserhaushalt** eines Gebiets zu berechnen (Wasserbilanz).

Die **Wasserbilanz** ist die Bilanz aus Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicheränderung bezogen auf ein Gebiet und einen Zeitraum. Bei Betrachtung der Wasserbilanz über einen längeren Zeitraum (> 30 Jahre) hinweg ist die Änderung des Speichervorrats vernachlässigbar – die Gleichung für die Bilanz lautet dann: Niederschlag = Abfluss + Verdunstung. Damit entspricht der Abfluss bei längeren Zeiträumen der Bilanz.

(Spektrum Akademischer Verlag, 2001)

Die **klimatische Wasserbilanz** ist definiert als Differenz zwischen der Höhe des Niederschlags und der potenziellen Verdunstung für einen Betrachtungsort in einer bestimmten Zeitspanne.

Je nachdem, ob der Niederschlag oder die potenzielle Verdunstung überwiegt, nimmt die klimatische Wasserbilanz entweder positive oder negative Werte an und macht damit eine Aussage über die klimatisch bedingten Defizite bzw. Überschüsse im jeweiligen Wasserhaushalt.

(BfG, ohne Jahr; DIN 4049-3).

Das Umweltbundesamt (UBA, 2019a) untersuchte 80 Pegel in Einzugsgebieten mittlerer Größe. Dabei wurde nach eigenen Angaben darauf geachtet, dass die Flüsse möglichst geringfügig durch den Menschen beeinflusst sind. Während die Abflusshöhen im eher nassen Winterhalbjahr seit 1961 weitgehend konstant geblieben sind, gibt es bei den sommerlichen Abflusshöhen laut UBA einen signifikanten Rückgang, wobei dieser nicht genau beziffert ist. Auch Niedrigwasserereignisse im Sommerhalbjahr haben im Vergleich zum Winterhalbjahr signifikant zugenommen, wenngleich innerhalb der Halbjahre keine eindeutigen Trends zu verzeichnen sind (ebd.). Dies deutet auf einen Rückgang der sommerlichen Wasserverfügbarkeit hin, was generell den klimatischen Entwicklungen entspricht. Oestermann und Mudersbach (2021) erkennen aber keinen Trend in 149 Pegeln zwischen 1957 und 2016, wobei allerdings nicht nach Sommer bzw. Winter differenziert wird. Ebenso legen Daten des BMU-Projekts „Verbesserung der Datengrundlage zur Bewertung hydrologischer Extreme“ nahe, dass es in der Zeit vor 1960 immer wieder extreme Niedrigwasserereignisse gab (BfG, 2019). Gerade bei der Einordnung bzw. Identifikation von Extremen wäre daher die Betrachtung längerer Zeitreihen, wie etwa von Faist et al. (2020) für die Elbe erarbeitet, sinnvoll.

Auch die Grundwasserneubildung wird bei einer hohen Verdunstungsrate vermindert, denn dann verdunstet ein Teil des Wassers, bevor es versickern und Grundwasserleiter erreichen kann. Die Menge des Niederschlags spielt ebenfalls eine wichtige Rolle (UBA, 2019a). Seit 1961 sind Monate mit unterdurchschnittlichen Grundwasserständen häufiger geworden, wobei insbesondere mehrere niederschlagsarme Jahre in Folge sinkende Grundwasserstände bewirken (ebd.). Seit 1970 gibt es ungefähr alle sechs bis acht Jahre Niedrigwasserperioden, die zunehmend länger ausfallen (Müller, 2021). Von solch einer Häufung niedriger Grundwasserspiegel sind besonders die niederschlagsarmen Gebiete im Osten Deutschlands betroffen. Der Dürremonitor des Helmholtzzentrums zeigt, dass hier die Trockenjahre 2018, 2019 und 2020 bis 2021 nachwirken (Abb. 13). Aber auch in der niederschlagsreichen Alpenregion haben Monate mit niedrigen Grundwasserständen zugenommen (UBA, 2019a). Die ergiebigeren Niederschläge im Winter können die Verluste nicht immer ausgleichen, weil das Wasser durch gesättigte bzw. gefrorene Böden häufig nicht bis zum Grundwasser vordringt (ebd.).

Niedrigwasser

Bei Fließgewässern spricht man von Niedrigwassertagen, wenn der Abfluss an einem Tag einen Schwellenwert unterschreitet, der in Abhängigkeit vom Abflussregime des Gewässers definiert wird.

Bei Seen bedeutet Niedrigwasser, dass der Wasserstand unter einen für dieses Gewässer typischen Schwellenwert fällt. (LFU Bayern, 2021)

Dürre

Mangel an Wasser, der durch eine höhere Verdunstung aufgrund von erhöhter Temperatur (oder Wind) und/oder weniger Niederschlag als üblich verursacht wird. Je nach Andauer der Dürre und entsprechend ihrer Auswirkungen wird diese als

- meteorologische Dürre (ein bis zwei Monate trockener als üblich),
- landwirtschaftliche Dürre (zwei Monate und länger trocken, Ernteeinbußen),
- hydrologische Dürre (ab vier Monate, Grundwasser und Pegel betroffen) und
- sozio-ökonomische Dürre (ab einem Jahr, Wassermangel bremst Wirtschaft) bezeichnet. Darüber hinaus gibt es je nach Anwendungsbereich weitere Definitionen. (DWD, ohne Jahr d)

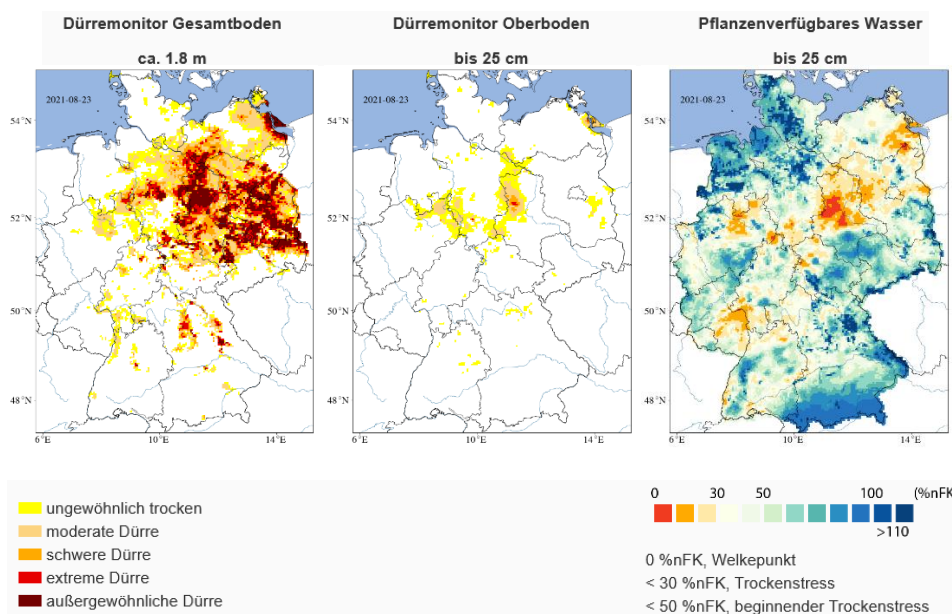


Abbildung 13: Dürremonitor für Gesamt- und Oberboden sowie pflanzenverfügbares Wasser, 23.08.2021. Die Trockenjahre 2018-2020 wirken noch 2021 im Nordosten nach, weil nicht genug Niederschlag fiel, um die Defizite abzubauen. Quelle: UFZ-Dürremonitor/Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ (2021).

Bei den Seen ist die Lage weniger eindeutig. Während einige, wie der brandenburgische Peetschsee, seit den 1980er-Jahren sinkende Wasserstände aufweisen, zeigen andere, wie der Parsteiner See (ebenfalls Brandenburg), relativ konstante Pegel und lediglich in den Trockenjahren 2018, 2019 und 2020 ein starkes Ausschlagen nach unten (Steinberg, 2021). Dies liegt auch daran, dass Seen oft individuell auf Veränderungen der Umweltbedingungen reagieren (IGB, 2018). Zudem muss man für eine korrekte Einordnung zwischen reinen Grundwasserseen und Seen, die von Fließgewässern gespeist werden, unterscheiden (Kaiser et al., 2012). Tendenziell steigt aber mit den Temperaturen und der Verdunstung das Risiko, dass Seen teilweise oder ganz austrocknen – wenn auch nur temporär. In diesem Kontext gibt eine Literaturlauswertungsstudie im Rahmen des Kooperationsvorhabens „KLIWA – Klimaveränderung und Wasserwirtschaft“ zu bedenken, dass dadurch auch Verhandlungsprozesse gefördert werden (KLIWA, 2015).

Generell ist bei Veränderungen von Wasserständen bzw. Abflüssen nicht immer klar, inwieweit die Klimakrise dafür verantwortlich ist. Gerade das Grundwasser wird von einer Reihe anderer Parameter beeinflusst – dazu gehört neben dem bereits erwähnten Bergbau und der Entwässerung der Landschaft auch die Art der Bewaldung im Gebiet der Grundwasserleiter (s. Kapitel III.2.). Pegel von Seen und Flüssen werden ebenfalls von diesen Variablen beeinflusst, je nachdem, wie stark sie vom Grundwasser abhängen (Herzog, et al., 2021; Abb. 14). Dennoch entfaltet die Erderhitzung eine zweifache Wirkung auf Pegel, indem sie nicht nur direkt in Form von vermehrten Trockenphasen und Verdunstung die klimatische Wasserbilanz beeinflusst, sondern auch indirekt durch einen höheren gesellschaftlichen Wasserverbrauch. Insgesamt kommen Germer et al. (2010) trotz Schwierigkeiten bei der quantitativen Einordnung der Klimawirkung zu dem Schluss, dass die Klimakrise eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung von Seespiegeln spielt. Woolway et al. (2020) erwarten, dass globale Verdunstungsraten über Seen bis 2100 um 16 Prozent zunehmen, vorbehaltlich regionaler Abweichungen. Auch beim Grundwasser werden erhebliche Klimafolgen erwartet: Hennig und Hilgert (2021) prognostizieren auf Basis eines pessimistischen Szenarios, dass sich das Grundwasserdargebot Vorpommerns bis 2050 um 22 Prozent verringern könnte. Oldorff und Vohland (2009) rechnen beim Brandenburgischen Stechlingebiet mit einem deutlichen Rückgang des Bodenwassers in demselben Zeitraum. Derweil berechnen Roers und Wechsung (2015) einen Rückgang des mittleren jährlichen Gesamtabflusses der Elbe um zehn bis 30 Prozent bis 2050.

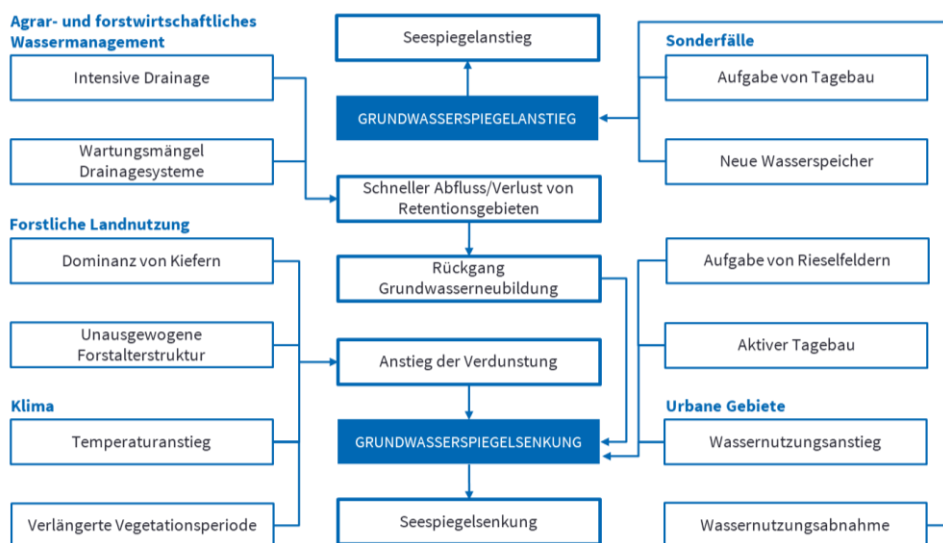


Abbildung 14: Mögliche Ursachen für Grundwasser- und Seespiegeländerungen. Das Klima ist lediglich ein Faktor unter vielen. Quelle: Germer et al., 2010 (abgewandelt).

Für den Menschen können niedrige Wasserstände teuer werden, wenn Schiffe etwa zeitweise keine oder weniger Ware transportieren können. Auch die Energieerzeugung ist betroffen, sobald nicht genügend Wasser für Kühlzwecke verfügbar ist (BfG, 2020). Zusätzlich sind Dürrephasen eine große Herausforderung für die Wasserversorgung: Obwohl Deutschlands Grundwasserkörper mengenmäßig in einem guten Zustand sind (UBA, 2015), können Trockenjahre wie 2018, 2019 und 2020 die Wasserversorgung – zumindest lokal und temporär – an ihre Grenzen bringen (DVGW, 2020). Davon sind neben Siedlungsgebieten (III.6.) auch Landwirtschaft (III.4) und Industrie betroffen. Bislang aber konnten großflächige Engpässe vermieden werden – nicht zuletzt, weil Wasser über Fernleitungen von wasserreichen zu wasserarmen Gebieten geleitet wird.

Anders sieht es bei Ökosystemen aus: Wenngleich die großen Grundwasserkörper der Republik wohl nie erschöpft werden, reicht schon ein geringes Absinken des Wasserspiegels aus, um bei empfindlichen Biotopen die Wasserversorgung zu kappen. Gerade kleinere oder flache Gewässer sowie Feuchtgebiete können dann – zumindest zeitweise – trockenfallen. Während einige Organismen wie Fische und Wasserpflanzen einer solch drastischen Veränderung der Umweltbedingungen direkt zum Opfer fallen, hat sie auch für Amphibien Konsequenzen. Viele Amphibienarten sind zwar auf temporäre Gewässer angewiesen, da durch das zeitweise Trockenfallen z. B. Fressfeinde reduziert werden (Schmidt et al., 2015). Problematisch wird es für solche Amphibien aber, wenn die Gewässer permanent austrocknen. Schwierig wird es zudem für Arten mit langer Entwicklungszeit wie Kammolche (z. B. *Triturus cristatus*), wenn Laichgewässer zu früh trockenfallen und die Larven nicht überleben. Für das Klima hat jegliches Austrocknen Konsequenzen: Moore, die bedeutendsten terrestrischen Kohlenstoffsinken, aber auch freigelegte Flussbetten stoßen dann große Mengen an CO₂ aus (Keller et al., 2020).

Auch ein abfallender Wasserstand ohne Austrocknen des Gewässers hat ökologische Folgen. Einerseits ist die Populationsdichte bei geringem Wasservolumen automatisch höher, was die Ausbreitung von Krankheiten und Parasiten begünstigt. Auch die Nähr- und Schadstoffkonzentration nimmt zu. Bei Seen kann eine teilweise Austrocknung die Schichtungsdynamik oder den Sauerstoffgehalt verändern, was wichtige Prozesse und Lebensräume innerhalb des Sees betrifft (KLIWA, 2015). Niedrigwasser kann auch eine Vermehrung von schwebenden Algen (Phytoplankton) begünstigen – etwa durch erhöhte Nährstoffkonzentrationen in Seen (Nöges und Nöges, 1999) oder stärkeren Lichteinfall in Flüssen (Herzog, et al., 2021). Darunter würde die Wasserqualität leiden. Überschreiten niedrige Wasserstände die für den Auenbereich natürliche Fluktuation, kann zudem großflächig die Ufervegetation von Flüssen inklusive Bäumen wie Weiden absterben, wie im Trockenjahr 2018 an der Elbe beobachtet (ebd.). Nicht zuletzt fließen Gewässer mit wenig Volumen langsamer, was ein Mehr an artenarmen Feinsedimenten zur Folge haben kann (Brunke, 2008; BUND, 2020). Insgesamt stellt Niedrigwasser bis hin zum Austrocknen von Gewässern eine Gefahr für viele Arten und Lebensräume dar und kann Populationsrückgänge unter anderem bei Fischen, Amphibien und dem Makrozoobenthos hervorrufen. Xenopoulos et al. (2008) schätzen, dass bei Flüssen mit abnehmenden Abflüssen bis 2070 vier bis 22 Prozent der lokalen Biodiversität an Fischen verschwinden könnten, im schlimmsten Fall sogar 75 Prozent (Brunke, 2008).

Zu warmes Wasser

Niedrige Wasserstände verschärfen ein weiteres Problem, das mit der Klimakrise einhergeht: Steigende Wassertemperaturen. Das durch die Erderhitzung ohnehin wärmer werdende Wasser heizt sich durch sinkende Pegel weiter auf. Zusätzlich befeuert das Einleiten von aufgewärmtem Kühlwasser aus Kraftwerken und Industrie die Situation.

Gemäß einer Studie zur Wärmelast des Rheins nahmen die mittleren Temperaturen des Flusses zwischen 1976 und 2002 um ungefähr 2,5 Grad Celsius zu (BUND, 2009).

Neuere Daten für Bayern und Baden-Württemberg lassen auf einen Anstieg der mittleren Wassertemperaturen um ca. 0,2 bis 0,7 Grad Celsius pro Dekade zwischen 1980 und 2015 schließen (KLIWA, 2019). Der Bodensee erwärmte sich ebenfalls zwischen 1971 und 2017 um ungefähr 2 Grad Celsius (UBA, 2019b). Laut Woolway et al. (2021) sind die Oberflächentemperaturen von Seen weltweit in den letzten Jahrzehnten um 0,34 Grad Celsius pro Jahrzehnt und damit fast genauso schnell wie die Lufttemperatur gestiegen. Auch beim Grundwasser zeichnet sich ein Trend ab, wenn auch nicht so deutlich wie bei Oberflächengewässern. Aufgrund unzureichender direkter Messdaten nähern sich Hemmerle und Bayer (2020) den tatsächlichen Werten in Bayern über die Bodentemperatur an: In 20 Metern Tiefe erwärmte sich der Boden um 0,28 und in 60 Metern Tiefe um 0,09 Grad Celsius pro Dekade. Obwohl die Rate der Veränderung also mit der Tiefe abnimmt, bezeichnen die Autoren die Entwicklung als bemerkenswert, da Grundwasserkörper normalerweise kaum Temperaturänderungen aufweisen (ebd.). Es ist zu erwarten, dass Gewässertemperaturen weiter ansteigen; Woolway et al. (2021) legen etwa dar, dass Hitzewellen in Seen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts heißer und langanhaltender ausfallen werden, wobei manche Seen in einem permanenten Hitzewellen-Stadium verbleiben. Laut KLIWA (2015) steigen die Oberflächentemperaturen dabei relativ unabhängig vom Typ des Sees ähnlich schnell (um 2 bis 3 Grad Celsius), mit Ausnahme von alpinen Seen, die sich etwas langsamer erwärmen.

Die höheren Temperaturen haben weitreichende Folgen für Ökosysteme. Wie auf dem Land führen sie auch unter Wasser zu einer veränderten Phänologie. So laichen Fische immer früher im Jahr oder gehen früher auf Wanderung, wodurch Nahrungsketten und biologische Interaktionen durcheinandergebracht werden (KLIWA, 2010). Einige Fischarten, wie die Forelle, geraten bereits bei geringfügig wärmeren Temperaturen in Hitzestress, was Wachstum, Nahrungsaufnahme und Fortpflanzung negativ beeinflusst (Melcher et al., 2013). Auch Flussfische versuchen deshalb, durch Migration in Gebiete mit geeigneten Umweltbedingungen zu gelangen. Bis 2100 rechnen Forschende daher mit einer längszonalen Verschiebung der typischen Fischregionen in Quellrichtung – im kalten Oberlauf leben andere Arten als im wärmeren Unterlauf (KLIWA, 2010). Der Erfolg der Migration hängt dabei auch von Aspekten wie der Verfügbarkeit von Laichplätzen ab, die oft ein limitierender Faktor sind. Warme Temperaturen regen zudem die Aktivität von Bakterien an, die bei ihren Abbauprozessen Sauerstoff verbrauchen. Insbesondere in unnatürlich tiefen Bereichen von Flüssen wie der Tideelbe, die aus wirtschaftlichen Gründen in der Vergangenheit etliche Male vertieft wurde, kommt es dadurch in den Sommermonaten regelmäßig zu Sauerstofflöchern. Mit der Klimakrise könnten diese immer länger andauern und so für unzählige Stinte und andere Fische zur tödlichen Falle werden. Schließlich verbreiten sich auch Parasiten und Krankheiten in wärmerem Wasser – so gibt es immer mehr Fälle der durch Parasiten ausgelösten Proliferativen Nierenkrankheit bei Fischen (KLIWA; 2010). Insgesamt steigt mit den Temperaturen so die Mortalität von Süßwasserfischen (ebd., Melcher et al., 2013).

Laut IGB (2018) sind Seeökosysteme äußerst komplex, weshalb Pauschalaussagen mit Vorsicht zu genießen sind. Tendenziell wirkt sich ein Temperaturanstieg auf ihr Schichtungsverhalten aus: Bei den hierzulande typischen geschichteten Seen, die sich zweimal pro Jahr durchmischen (dimiktisch), wird die Schichtung von der winterlichen Eisbedeckung beeinflusst. Fällt diese weg, kann sich das Wasser durchgehend von Herbst bis Frühjahr durchmischen – lediglich die sommerliche Schichtung bleibt. Sie entsteht, weil sich die obere Schicht (das Epilimnion) schneller als die untere Schicht (das Hypolimnion) erwärmt. So können dimiktische Seen durch die Erderhitzung zu

Zirkulationstypen (Seen)

Seen werden entsprechend der verschiedenen morphologischen Gestalten, geographischen Lage und Höhenlage in verschiedene Zirkulationstypen unterteilt. In Deutschland sind dimiktische Seen typisch, die sich zweimal im Jahr – im Frühling und Herbst – vollständig durchmischen. Aber auch polymiktische Seen (viele Durchmischungen pro Jahr) und monomiktische Seen (eine pro Jahr) gibt es hierzulande. (Spektrum Akademischer Verlag, 2000)

monomiktischen werden (ebd.; KLIWA, 2015). Gleichzeitig kann die sommerliche Schichtung aufgrund der Erderhitzung länger ausfallen (KLIWA, 2015). Ähnlich wie bei der Tideelbe führt dies dazu, dass der Sauerstoff in tieferen Schichten knapp wird, da sich die sauerstoffreiche obere Wasserschicht zu lange nicht mit dem Hypolimnion vermischt. Dadurch kann es zu einer Freisetzung von Nährstoffen aus dem Seegrund kommen, einer internen Düngung, die die Gewässerqualität durch Algenwachstum, insbesondere Cyanobakterien, mindert (IGB, 2018.). Durch die Anreicherung von Nährstoffen (Eutrophierung) und das dadurch induzierte Algenwachstum erreicht weniger Licht den Seegrund. Darunter leiden größere Unterwasserpflanzen (submerse Makrophyten), die normalerweise zu einer guten Wasserqualität beitragen und als Nahrung für viele Arten der Lebensgemeinschaften an Seen dienen (IGB, 2018). Verstärkt wird dies durch erhöhten Fraßdruck seitens karpfenartiger Fischarten, die teilweise für die Fischerei in Seen ausgesetzt werden und vom Klimawandel profitieren (KLIWA, 2015). Insgesamt wird die Erwärmung von Gewässern gemäß dem allgemeinen Trend tendenziell dazu führen, dass wärmetolerante Arten nach Norden vordringen, während kälteliebende Arten benachteiligt sind. Auch Neobiota stellen eine zunehmende Bedrohung dar (KLIWA, 2015; IGB, 2018). Von abnehmender Wasserqualität durch zu hohe Temperaturen sind auch Menschen betroffen – ob es um höhere Kosten bei der Trinkwasseraufbereitung oder um gesundheitsgefährdende Blaualgenblüten beim Baden geht.

Zu viel Wasser

Schließlich sind Hochwasserereignisse und Sturzfluten infolge von Starkregen eine wachsende Gefahr für Mensch und Natur – die Hochwasser in West- und Mitteleuropa, die im Juli 2021 unter anderem Teile von Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz verwüsteten, verdeutlichten dies auf dramatische Weise. Die Überflutung von Auen ist ein regelmäßiger natürlicher Vorgang mit wichtigen ökologischen Funktionen – Auenökosysteme haben sich an das saisonale Ausdehnen und Zurückziehen der Flussläufe angepasst und sind darauf angewiesen. Durch anthropogene Eingriffe wie Kanalisation, Bodenversiegelung und -verdichtung sowie Flussbegradigungen werden Hochwasser aber verstärkt, sodass sie große Sachschäden anrichten und Menschenleben gefährden. Oft sind die Auen und damit die natürlichen Überflutungsgebiete auch selbst bebaut; die dortige Infrastruktur gerät in zunehmende Bedrängnis. Neben den gravierenden Folgen für Menschen haben extreme Überschwemmungen auch nachteilige Effekte auf die Natur. Für Süßwasserökosysteme bedeutet dies, dass vermehrt Nähr- und Schadstoffe eingetragen werden, wenn Wassermassen über Äcker und durch Städte fließen und dabei verunreinigt werden. Dadurch wird die Eutrophierung und Verschmutzung von Gewässern weiter gefördert. Zusätzlich wird viel Material ab- und in die Flüsse eingetragen, welches Nischen am Flussbett verstopfen und so Lebensräume vernichten kann; andererseits wird festgesetztes Sediment aufgewirbelt und weggeschwemmt. Welcher Effekt überwiegt, hängt vom konkreten Ereignis und der Situation vor Ort ab.

Insgesamt sind die Klimawirkungen für Süßwasserökosysteme vielfältig – allein bei Flüssen sind unzählige Parameter betroffen (Abb. 15). Wie bereits mehrfach erwähnt, spielen neben der Erderhitzung jedoch auch weitere, nicht-klimatische Stressoren wie Nährstoffeinträge und Wassernutzung eine entscheidende Rolle und erschweren eine eindeutige Attribution von Klimaeffekten. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die Erderhitzung den ökologischen Zustand vieler Gewässer weiter verschlechtern dürfte, der aufgrund anthropogener Einflüsse ohnehin meist kritisch ist. Auch die chemische Qualität könnte weiter abnehmen, denn niedrige Wasserstände führen zu höheren Konzentrationen von Schadstoffen. Schließlich verstärkt die Klimakrise die regionalen Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit, die in Deutschland aufgrund der natürlichen Gegebenheiten aber auch der Wasser- und Landnutzungspraktiken vorherrschen – so wird es im Sommer vor allem in Ostdeutschland häufiger zu Wassermangel kommen.

Von diesen Folgen ist auch die Gesellschaft betroffen, da Bereiche wie Warentransport, Energieerzeugung und Trinkwasserversorgung von der Verfügbarkeit von ausreichend (sauberm) Wasser abhängen.

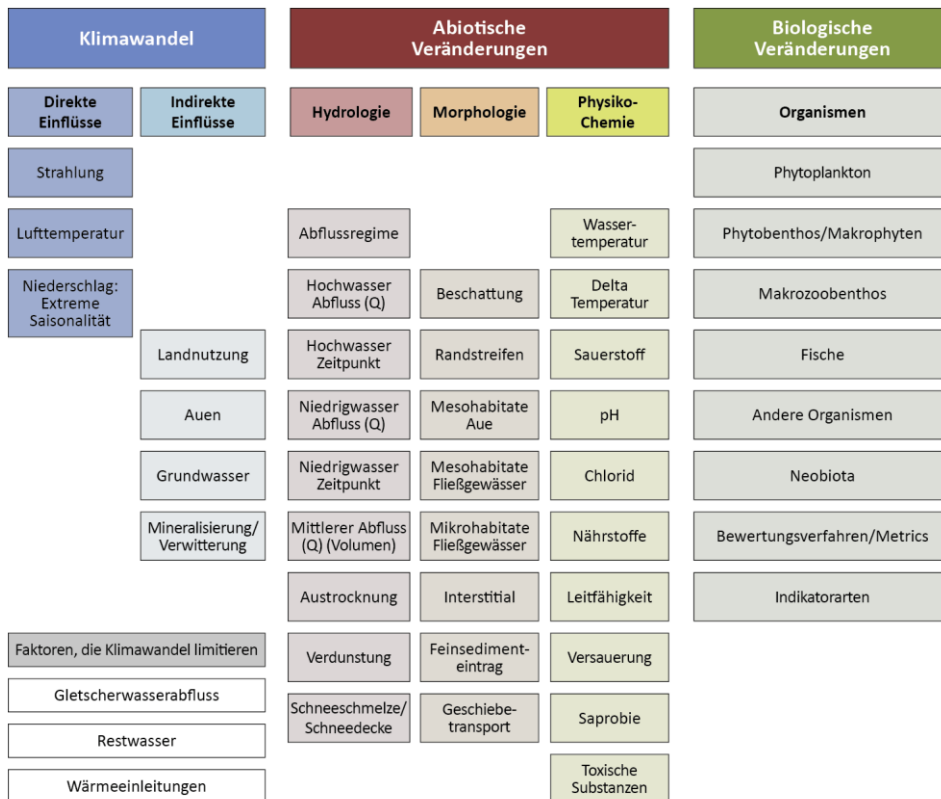


Abbildung 15: Direkte und indirekte Auswirkungen der Klimakrise auf Fließgewässer sowie die betroffenen hydrologischen, morphologischen, physiko-chemischen und biologischen Parameter. Quelle: LUBW, 2021.

b) Wasserrückhalt in der Fläche: Anpassung an Wassermangel und -überschuss

Der entscheidende Ansatz bei der Klimaanpassung von Süßwasserökosystemen und Wasserhaushalt ist, menschliche Eingriffe in den Landschaftswasserhaushalt drastisch zu reduzieren. Denn jegliche Anstrengungen, Wassermangel – aber auch -überschuss – vorzubeugen, werden durch die Entwässerung der Landschaft konterkariert. Ebenso sind technisch-bauliche Maßnahmen zum Hochwasserschutz ineffizient im Vergleich zur Pufferleistung von intakten Ökosystemen und zudem oft nicht naturverträglich. Neben einem Rückbau von Entwässerungsgräben ist deshalb eine Wiederherstellung natürlicher Wasserspeicher geboten. Dazu zählen Feuchtgebiete wie Moore, die Wasser nicht nur in großen Mengen aufnehmen und speichern, sondern es auch reinigen (Heller et al., 2016). So wirken sie regulierend bei Wassermangel und -überschuss. Zudem sind sie Lebensraum für bedrohte Tiere und Pflanzen, haben eine hohe Kühlleistung und enormes Potenzial zur Kohlenstoffspeicherung. Da die Aufgabe bzw. Schließung von Entwässerungsgräben und die Renaturierung von Mooren größtenteils die Landwirtschaft betreffen, werden diese Maßnahmen näher in Kapitel III.4 diskutiert.

Auch die Renaturierung von Flussauen, den natürlichen Überschwemmungsgebieten von Fließgewässern, ist eine zentrale Maßnahme. Der Auenzustandsbericht 2021 (BMU, 2021b) hat gezeigt, dass nur ein Drittel der natürlichen Überschwemmungsflächen an

Flüssen tatsächlich überflutet werden können (rezente Auen), während zwei Drittel durch Deiche vom Fluss abgeschnitten sind (historische Auen). Fast alle der rezenten Auen wurden darüber hinaus deutlich bis sehr stark vom Menschen verändert; die große Mehrheit wird landwirtschaftlich genutzt (ebd.). Obwohl die damit verbundenen Probleme lange bekannt sind, schreitet die Renaturierung nur langsam voran: In fast 40 Jahren wurde die überflutbare Fläche um nur 1,5 Prozent vergrößert (ebd.). Jegliche Bemühungen, Deiche zurückzubauen, Altarme wiederanzuschließen sowie Uferbefestigungen zu entfernen, müssen also deutlich verstärkt werden. Zudem bietet es sich an, Auenwald aufzuforsten und generell den Uferbewuchs zu fördern, da dieser durch die Beschattung der Umgebung sowie Verdunstung zur Kühlung von Gewässern beiträgt. Um die Wanderung von Fischen in kühlere Zonen zu ermöglichen, sollte zusätzlich die Durchlässigkeit und Vernetzung von Fließgewässern bestmöglich wiederhergestellt werden, indem etwa Querbauten abgebaut werden. Von einer weiteren Vertiefung von Flüssen sollte abgesehen und stattdessen, wo ökologisch sinnvoll, eine schrittweise Wiederanhebung der Gewässersohle insbesondere im Tidebereich angestrebt werden (s. Kapitel III.5.). Grundsätzlich muss im Sinne einer höheren Anpassungskapazität darauf hingewirkt werden, dass Oberflächengewässer ökologisch und chemisch einen guten Zustand erreichen und auch Grundwasserkörper nicht überbeansprucht werden. Der gesetzliche Rahmen ist mit der Wasserrahmenrichtlinie, der Richtlinie zum Schutz des Grundwassers und der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH) auf EU-Ebene sowie dem Bundesnaturschutzgesetz und weiteren Regelungen auf nationaler Ebene größtenteils gegeben. Daher kommt der Umsetzung solcher Vorgaben neben der Renaturierung von Ökosystemen eine hohe Bedeutung zu.

Zudem gilt es, Nutzungskonflikten um begrenzte Wasserressourcen vorzubeugen. Denkbare Maßnahmen wären eine gesetzliche Priorisierung bestimmter Nutzungen (z. B. Trinkwasserversorgung) in Zeiten von Wasserknappheit, wie sie auch der Entwurf der nationalen Wasserstrategie vorsieht (BMU, 2021c), und ein vorübergehendes Verbot bestimmter Nutzungen wie das Wässern von Sportanlagen. Auch eine Erhöhung bzw. Ausweitung von Wasserentnahmeentgelten und die Prüfung der Wassertarife für Brauch- und Trinkwasser werden in der Strategie in Betracht gezogen. Abhilfe können auch intensivierte Anstrengungen zur Aufbereitung und Nutzung von Grau- und Brauchwasser schaffen, etwa in der Landwirtschaft oder der Industrie.

c) Empfehlungen

Um die Biodiversität in Gewässern und Feuchtgebieten zu schützen und gleichzeitig Ökosystemleistungen wie Wasserspeicherung, Hochwasserschutz und Kohlenstoffbindung auch in Zeiten der Klimakrise zu bewahren, empfiehlt der NABU:

- Ein raumordnerisches Entwicklungsziel in Auen: Alle rezenten Auen und die stark hochwassergefährdeten Teile der historischen Aue sollten als Vorranggebiete für Hochwasser-, Trinkwasser- und Naturschutz sowie Erholung ausgewiesen werden.
- Deichrückverlegungen für Hochwasser- und Naturschutz: Die Anstrengungen bzgl. Deichrückverlegungen als Teil des natürlichen Wasserrückhalts in der Fläche müssen verstärkt, das Potenzial für besonders geeignete Bereiche ermittelt werden.
- Die Verbesserung des Wasserrückhalts in Hochwasserentstehungsgebieten: Dies beinhaltet die Entfernung von Rohren und Gräben in den Quellgebieten; die Verbesserung des natürlichen Rückhalts durch Gehölzpflanzungen; das Verschließen von Entwässerungsgräben im Wald und in der Feld- und Wiesenflur sowie die allmähliche Anpassung der Bewirtschaftung an die natürlichen Standortverhältnisse.
- Einen Stopp von Nutzungsintensivierungen in Flüssen und Auen und ein Beenden schädigender Nutzungen: Auf Auenstandorten sollte nur noch eine extensive



Verbändedeposition zum Hochwasserschutz

Im Kontext der Erarbeitung eines Nationalen Hochwasserschutzprogramms 2013/2014 legte der NABU gemeinsam mit anderen Verbänden eine [Position](#) zum Thema Hochwasserschutz vor. Die dort gesetzten Schwerpunkte sind auch heute noch relevant.



Lebendige Flüsse

Das NABU-Leitbild „Lebendige Flüsse“ finden Sie [hier!](#)

Grünlandnutzung erfolgen; andere Nutzungen, wie Acker oder Intensivgrünland, sind auszuschließen.

→ Weitere wasserbezogene Empfehlungen finden sich in Kapiteln III.4. und 6.

4. Landwirtschaft

Die Landwirtschaft ist in vielerlei Hinsicht Leidtragende in Bezug auf die Klimakrise. Trockenperioden führen zu Ernteausfällen; Schädlinge, Hitzestress und Starkregen zu Ertragseinbußen. Gleichzeitig läuft der Sektor Gefahr, die klimatischen Auswirkungen über seine Grenzen hinaus zu verschlimmern – durch wachsenden Wasserverbrauch oder mittels schädlicher Düngepraktiken. Auch die Emissionen des Agrarsektors könnten aufgrund von Klimafolgen steigen. Frühzeitige Anpassung ist daher unabdingbar.

a) Zwischen Dünger und Dürre: Landwirtschaft in der Klimakrise

Die veränderten klimatischen Bedingungen wirken sich direkt und indirekt auf das Wachstum und die Gesundheit von (Nutz-)Pflanzen und damit die Ertragssicherheit in der Landwirtschaft aus. Zunächst führt die durch steigende Temperaturen veränderte Phänologie zu einer längeren Vegetationsperiode; die Pflanzen entwickeln sich immer früher im Jahr. Das hat Vor- und Nachteile: Zum einen kann die Produktivität steigen, wenn die höheren Produktionspotenziale durch den längeren Anbauzeitraum genutzt werden (Schimmelpfennig et al., 2018). Zum anderen wächst damit der Wasserbedarf der Pflanzen, was einen höheren Wasserverbrauch durch Bewässerung verursachen könnte. Derzeit ist die Landwirtschaft für ein Prozent der etwa 24 Milliarden Kubikmeter Wasser verantwortlich, die Süßwasserökosystemen jährlich für menschliche Nutzung entnommen werden (UBA, 2020b). Das sind immerhin 24 Millionen Kubikmeter – eine Menge, die sich mit der Klimakrise erhöhen könnte. Außerdem steigt das Risiko für Frostschäden durch Spätfrost, da die Pflanzen im Frühjahr schon weit entwickelt sind.

Neben die veränderte Phänologie treten weitere Auswirkungen höherer Temperaturen. So kann extreme Hitze zu Zellschäden und einer gestörten Entwicklung bei Pflanzen führen (Bita und Gerats, 2013). Milde Winter mit weniger Frosttagen wiederum können verhindern, dass Prozesse wie das Schossen und die Blütenbildung eingeleitet werden, was Ertragsminderung und -ausfälle bedeutet (VLK, 2019). Kälteempfindliche Arten hingegen dürften besser gedeihen. Wie bereits in Kapitel III.2 erläutert, kommt es überdies zu einer Ausbreitung wärmeliebender Schadinsekten und Krankheitserreger. So wurde z. B. für Blattläuse und Maiszünsler ein klimabedingt verstärktes Aufkommen dokumentiert (von Tiedemann und Ulber, 2008). Parallel könnten Pflanzenschutzmittel witterungsbedingt an Wirkung einbüßen (VLK, 2019). Dies könnte zu einem höheren Einsatz von Pestiziden führen, was wiederum den Artenschwund befördern würde.

Hinsichtlich des Wasserdargebots kann es öfter zu Wassermangel und -überschuss kommen. Im Sommer leiden die Pflanzen unter längeren Trockenphasen, was durch die wärmebedingt höhere Verdunstung verstärkt wird. Wie bereits angedeutet, kann eine Bewässerung Konflikte hervorrufen, wenn die Wasserentnahme die Grundwasserneubildung in einer Region übersteigt. Bei geringer Bodenfeuchte in Trockenphasen werden Nährstoffe aus Dünger und Boden schlechter von den Pflanzen aufgenommen; sie reichern sich an und werden beim nächsten (Stark-)Regen weggeschwemmt (Klaus et al., 2020). Nährstoffeinträge in Gewässer und Grundwasser sind bereits ohne Klimakrise ein ernsthaftes ökologisches und gesundheitliches Problem (UBA, 2020c). Treffen Starkregenereignisse auf verdichtete Böden, ist das Risiko von Nitratauswaschungen besonders groß. Die Bodenverdichtung könnte aufgrund der kürzer werdenden Zeitfenster mit guten Bearbeitungsbedingungen zunehmen (VLK, 2019.) Auch Staunässe,

die zu Wurzelfäule führen kann, und ein Umknicken von Pflanzen wird durch heftige Niederschläge bewirkt (Schimmelpfennig et al., 2018; VLK, 2019). Diese sorgen – wie Stürme, die auf ausgetrocknete Äcker treffen – zudem für ein Mehr an Bodenerosion. So hat sich die langfristig mittlere Regenerosivität, ein Maß für die gebietspezifische erosionsauslösende Wirkung des Niederschlags, in Deutschland zwischen 1962 und 2017 klimabedingt verdoppelt (Auerswald et al., 2019). Damit geht nicht nur eine wertvolle Ressource zum Anbau von Lebensmitteln verloren; auch das Potenzial des Bodens als Kohlenstoffsенке wird gemindert (Triebe, 2007). Parallel trägt die wärmebedingt steigende mikrobielle Aktivität im Boden zu wachsenden Emissionen bei: Sie fördert die Mineralisation von Nährstoffen bzw. den Humusabbau, wodurch Treibhausgase freigesetzt werden (VLK, 2019). Insbesondere Emissionen von Lachgas (N_2O), die meist mit einer Düngung mit Stickstoff (N) zusammenhängen, könnten sich klimabedingt deutlich erhöhen (Kanter et al., 2016). Lachgas ist das drittrelevanteste Treibhausgas – es ist zwar weniger reichlich vorhanden als CO_2 , sein Effekt ist aber 300 Mal so stark. Aus entwässerten Mooren wird hingegen hauptsächlich CO_2 freigesetzt, was sich im Zuge vermehrter Trockenheit verstärken dürfte. Nur etwa ein Prozent der organischen Böden in Deutschland befindet sich noch in einem naturnahen Zustand; der Großteil wurde für landwirtschaftliche Zwecke trockengelegt (Heller et al., 2016). Bereits jetzt ist die Entwässerung von Mooren für rund fünf Prozent der gesamtdeutschen Emissionen verantwortlich, obwohl sie unter fünf Prozent der Fläche ausmachen (Zeitz et al., 2015).

Der Einfluss der Klimakrise auf landwirtschaftliche Erträge ist insgesamt stark von der Wasserversorgung abhängig und könnte somit vor allem im wasserarmen Osten und Südwesten Deutschlands zum Tragen kommen – in Brandenburg etwa bescherte der Dürresommer 2003 Ertragseinbußen von 40 Prozent (UBA, 2011). Selbstverständlich spielt auch die Vulnerabilität des angebauten Artenspektrums eine Rolle. Gesellschaft, Ökosysteme und Klima sind derweil von potenziell steigenden Nitratauswaschungen und landwirtschaftlichen Emissionen betroffen.

b) Boden aufbauen, Vielfalt säen: Klimaanpassung auf Acker und Grünland

Eine zentrale landwirtschaftliche Anpassungsmaßnahme ist der Humusaufbau, der den drohenden Verlusten organischer Bodensubstanz aufgrund von zunehmenden Temperaturen und vermehrter Erosion begegnet. Außerdem vermindert Humusaufbau das Risiko, dass die Kohlenstoffsенке Boden im Zuge der Klimakrise an Leistung einbüßt bzw. zu einer CO_2 -Quelle wird. Humus speichert zudem Wasser und unterstützt so die Anpassung an Trockenphasen. Die Nährstoffversorgung der Pflanzen wird ebenfalls verbessert, wodurch Dünger eingespart und Auswaschungen reduziert werden können (UBA, 2020d). Humus lässt sich gut mit organischem Dünger wie Kompost oder Mist aufbauen. Ein Feldversuch von Hartl et al. (2012) ergab einen höheren Humusgehalt und somit auch gesteigerte Kohlen- und Stickstoffgehalte im Boden bei der Düngung mit Kompost im Vergleich zum Einsatz von Mineraldünger. Damit ist Humusaufbau durch Kompost nicht nur wirksamer, sondern reduziert auch die Nitratbelastung von Grund- und Oberflächenwasser. Erntereste wie Stroh oder Pflanzenwurzeln können ebenfalls beim Humusaufbau helfen. Überdies fördert eine schonende, z. B. pfluglose, Bodenbearbeitung die Entstehung von Humus. Auch eine ganzjährige Bodenbedeckung mit Beikräutern oder Zwischenfrüchten und eine breite Fruchtfolge mit verschiedenen Kulturarten dienen dem Vorhaben. Letztere trägt zudem zur Streuung klimabedingter Risiken bei: Das Risiko von Totalausfällen wird durch den Anbau mehrerer Kulturen minimiert, das kulturspezifische Risiko mittels Anbau verschiedener Sorten derselben Kultur gestreut. Ökosysteme profitieren dabei von der zunehmenden Agrobiodiversität. Insbesondere Hülsenfrüchte (Leguminosen) als Bestandteil von Fruchtfolgen oder Mischkulturen sind vorteilhaft: Sie binden Stickstoff und erhöhen so

die Nährstoffversorgung der Ackerkulturen, während sie gleichzeitig Nährstoffeinträge in Grund- und Oberflächenwasser reduzieren (Böhm et al., 2020). In der Folge muss weniger gedüngt werden, wodurch Lachgasemissionen gemindert werden können (Fuchs et al., 2018).

Wie in Kapitel III.3. erläutert, spielt die Stabilisierung des Landschaftswasserhaushalts eine große Rolle in der Klimaanpassung, wobei Feuchtgebiete wie Moore als natürliche Wasserspeicher ein entscheidender Faktor sind. Eine Renaturierung von Mooren hilft nicht nur dabei, Wassermangel und -überschuss abzuwenden, sondern beugt auch dem möglichen klimabedingten Anwachsen der ohnehin hohen Emissionen degradierter Feuchtgebiete vor. Die Entwässerung von Mooren in der Landwirtschaft muss folglich eingedämmt und die Wiedervernässung der organischen Böden eingeleitet werden. Die Nutzung der Gebiete kann stattdessen als Paludikultur erfolgen, bei der z. B. Torfmoose als Torfersatz oder Schilf als Biomasse auf den feuchtnassen Böden angebaut werden. Extensiv genutztes Feuchtgrünland ist eine weitere Option für Moorstandorte. Hier können z. B. Wasserbüffel grasen.

Auch abseits torfhaltiger Böden gilt, dass Wasser in der Landschaft gehalten werden sollte. Ein zu schnelles Abfließen muss verhindert werden, um Wasserknappheit da zu vermeiden, wo der Niederschlag abfließt, und Hochwassergefahr dort, wo das Wasser ankommt. Seen, Teiche oder anderweitige Rückhaltebecken leisten hier einen Beitrag. Wurde ausreichend Wasser in solchen Vorrichtungen gespeichert, kann eine großzügige Bewässerung zu einer Kühlung des Mikroklimas beitragen. Bei Wasserknappheit können alternativ moderne Technologien den sorgsam Umgang mit Wasser fördern. Eine Bewässerung kann dann z. B. über sparsame, potenziell intelligente Tropfsysteme erfolgen. Die Aufbereitung und Anwendung von Brauchwasser bzw. Grauwasser sollte ebenfalls intensiviert werden. Auch die Düngung lässt sich mithilfe von Technik effizienter gestalten. Eine Düngung sollte stets präzise, standort- und witterungsgerecht erfolgen. Dabei können Präzisionsdüngemaschinen sowie Soft- und Hardwarelösungen im Rahmen der Präzisionslandwirtschaft (*Precision Farming*) zum Einsatz kommen, die beispielsweise die bereits gedüngten Bereiche dokumentieren oder das Monitoring von Bodeneigenschaften übernehmen.

Neue Anbausysteme und -methoden können ebenfalls helfen, Klimafolgen zu mindern. In Agroforstsystemen werden Elemente der Land- und Forstwirtschaft kombiniert. Das Integrieren von Obstbäumen oder Nutzhölzern in landwirtschaftliche Flächen kann die Windgeschwindigkeit reduzieren und die Taubildung fördern und den Boden so vor Austrocknung und Erosion schützen. Landschaftselemente wie Hecken säume und Gehölzinseln bieten Unterschlupf für Tiere und erhöhen die Biodiversität (Langenberg und Theuvsen, 2018). Da solche Systeme teils großer Investitionen bedürfen (ebd.), wäre vor allem für naturnahe Landschaftselemente eine Förderung wünschenswert. Agro-Photovoltaik-Systeme kombinieren derweil die Produktion erneuerbarer Energie mit Landwirtschaft. Mithilfe der Solarmodule können schattenliebende Pflanzen vor Hitzestress, hoher UV-Strahlung und Austrocknung geschützt werden; gleichzeitig wird dem zunehmenden Flächenverbrauch durch Doppelnutzung entgegengewirkt. Zur besseren Einschätzung der Eignung einzelner Kulturpflanzenarten für den Anbau unterhalb von Solarzellen bedarf es weiterer Forschung (Weselek et al., 2019).

Seit ein paar Jahren wird zudem vermehrt der Einsatz von Pflanzenkohle getestet, der laut Studien nicht nur landwirtschaftliche N₂O- und CO₂-Emissionen verringern, sondern auch die Resilienz gegenüber Schädlingen und Krankheiten verbessern kann (Elad et al., 2011; Wang et al., 2011). Erst kürzlich nahm die EU Pflanzenkohle in ihre Liste der Düngemittel auf, gültig im Rahmen der EU-Düngemittelverordnung ab Juli 2022

(Neumann, 2021). Eine Verbindung zum Naturschutz kann hergestellt werden, wenn pflanzliches Material, das bei der Landschaftspflege anfällt, zur Herstellung von Biokohle genutzt wird (UBA, 2016d). Jedoch bedarf es weiterer Forschung zur Nutzung von Pflanzenkohle, insbesondere hinsichtlich des Bodenschutzes (Möller und Höper, 2014).

Um zu vermeiden, dass ein erhöhtes Schädlingsaufkommen zu einem höheren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln führt, sollte man schließlich auf integrierten Pflanzenschutz setzen, der natürlich vorkommende Nützlinge umfasst. Fressfeinde bekannter Schädlinge sind Marienkäfer, Ohrwürmer und Schlupfwespen. Naturnahe Flächen wie Blühstreifen am Rand von Äckern bieten nicht nur Lebensraum für solche Insekten, sondern fördern generell die Biodiversität und damit resiliente Ökosysteme.

c) Empfehlungen

Für die Anpassung der Landwirtschaft an Klimafolgen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen des Sektors mit Ökosystemen und Klima empfiehlt der NABU:

- Die Renaturierung von Mooren: Renaturierung von organischen Böden durch Auflassen oder Rückbau von Entwässerungsgräben sowie Aufgabe oder Anpassung der Bewirtschaftung an die natürlichen Standortverhältnisse, z. B. durch Paludikultur. Agrar-Förderprogramme müssen an die Anforderungen des Hochwasserschutzes und des natürlichen Wasserrückhalts angepasst werden.
- Die Erarbeitung und Umsetzung einer umfassenden Moorschutzstrategie: Diese sollte neue Finanzierungsinstrumente (Fonds, CO₂-Abgabe) zur Wiederherstellung von Mooren und Förderung von Paludikultur einschließen. Die Renaturierung von Mooren bedarf eines aktiven Flächenmanagements (u. a. Flurneuordnung).
- Einen Stopp der Förderung von Maßnahmen, die die Resilienz und Biodiversität von Agrar-Ökosystemen weiter schwächen: Beispiele sind die Bewässerung in Gebieten, die heute schon unter sinkenden Grund- und Oberflächenwasserspiegeln leiden, oder Versicherungslösungen, die keinen Anreiz zum Umsteuern liefern.
- Die Erhöhung der Biodiversität auf der Fläche: Eine höhere Artenausstattung führt zur Stabilisierung von Ökosystemen und macht diese weniger anfällig für Extremereignisse und Schädlinge. Dafür sind mindestens zehn Prozent naturnahe Flächen pro Betrieb notwendig.
- Die Erstellung einer nachhaltigen Düngegesetzgebung zur Vermeidung von Nährstoffauswaschung und Emissionen: Die Düngung muss standort- und kulturartenspezifisch erfolgen und darf keine pauschalen Stickstoffüberschüsse erlauben.
- Die Erhöhung des Bodenhumusgehalts: Eine vielfältige Fruchtfolge, der Verbleib von organischen Reststoffen auf dem Feld sowie eine ganzjährige Bodenbedeckung durch Wildkräuter oder Zwischenfrüchte tragen zum Humusaufbau bei.
- Die Etablierung einer verbreiteten, mindestens fünfgliedrigen Fruchtfolge im Ackerbau: eine Fruchtfolge aus Sommerungen und Winterungen, Blatt- und Halmfrüchten, Zwischenfrüchten, Untersaaten und mehrjährigen Kulturen.



Landwirtschaft während der Klimakrise

Mehr zum Klimaschutz in der Landwirtschaft und weitere NABU-Forderungen zum Thema gibt es [hier!](#)

5. Küste und Meer

Für Küstenregionen und Ozeane geht von der Klimakrise eine besonders große Gefahr aus. Neben den Klimafolgen, die auch das Binnenland betreffen, vollziehen sich hier zwei Entwicklungen, die in ihren Auswirkungen drastischer nicht sein könnten: Die Ozeane versauern, die Meeresspiegel steigen. Das gefährdet nicht nur den Lebensraum Küste, der gleichsam für Mensch und Natur eine einzigartige Heimat bietet, sondern auch die Gesundheit der marinen Ökosysteme. Dadurch könnte die größte Kohlenstoffsenke des Planeten beeinträchtigt werden.

a) Steigende Spiegel, saure See: Klimafolgen für Nord- und Ostsee

Deutschland grenzt an gleich zwei Meere: Die raue Nordsee mit dem von Schlickböden und Salzwiesen geprägten Weltnaturerbe Wattenmeer und das Binnenmeer Ostsee mit torfreichen Salzgrünländern, Seegraswiesen und schilfbewachsenen Bodden. Für eine effektive Klimaanpassung muss nach den lokalen Gegebenheiten differenziert werden.

Folgen für die Küste

Die Erderhitzung bewirkt direkt und indirekt steigende Meeresspiegel. Auf der einen Seite erwärmen sich die Ozeane, was direkt zu einer Ausdehnung des Wasserkörpers führt. Auf der anderen Seite verlieren Eisschilde und Gletscher immer mehr an Masse; das Schmelzwasser fließt ins Meer und treibt den Meeresspiegelanstieg indirekt an (IPCC, 2019b). Zwischen 1901 und 2018 stieg der globale mittlere Meeresspiegel um 20 Zentimeter. In diesem Zeitraum lag der durchschnittliche Anstieg bei 1,3 Millimetern pro Jahr. Zwischen 2006 und 2018 betrug er bereits 3,7 Millimeter jährlich, Tendenz steigend (IPCC, 2021). Der rasche Verlust der Eismassen ist für die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs in den letzten Jahrzehnten ursächlich (IPCC, 2019b und 2021). Der Anstieg gestaltet sich aufgrund regionaler Verhältnisse, z. B. hinsichtlich Wind, Tektonik der Landmassen oder Meeresströmungen, nicht gleichmäßig (DKK, 2019). Nord- und Ostsee weichen allerdings nicht nennenswert vom globalen Trend ab. In Cuxhaven ist der Pegel seit 1843 um 42 Zentimeter gestiegen (DKK, 2020), während über die letzten 50 Jahre an vielen Nordseepegeln 14 bis 15 Zentimeter Anstieg zu beobachten waren (Helmholtz-Zentrum Hereon, ohne Jahr). Die Ostseepegel liegen mit ungefähr zehn Zentimetern Anstieg etwas darunter (ebd.). Bis 2100 werden Nordsee und Ostsee je nach Emissionsszenario und dem weltweiten Anstieg entsprechend etwa zwischen 30 Zentimetern und einem Meter ansteigen, verglichen mit dem mittleren Meeresspiegel 1986-2005 (IPCC, 2019b; Abb. 16). Im optimistischen Szenario würde der maximale Anstieg bis 2300 nur wenig höher liegen; ohne erfolgreichen Klimaschutz könnte er jedoch mehrere Meter betragen. Auch wenn es uns gelingt, die Treibhausgasemissionen deutlich zu reduzieren, könnte der Meeresspiegelanstieg noch mehrere Jahrhunderte weitergehen (IPCC, 2021).

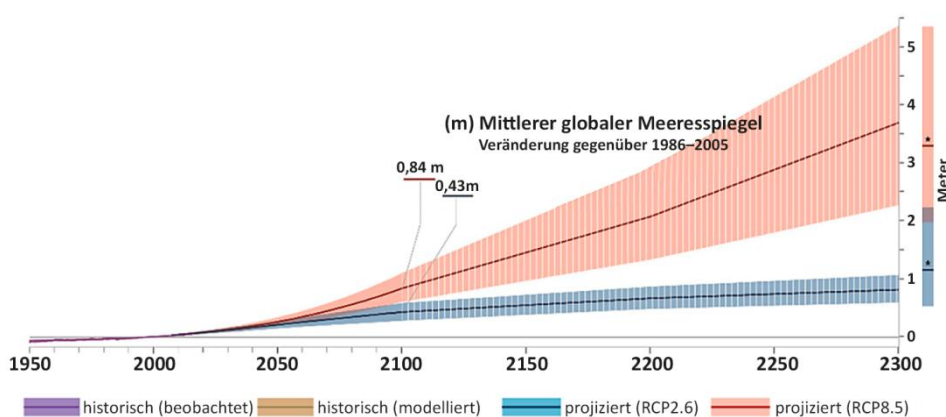


Abbildung 16: Historischer und projizierter mittlerer globaler Meeresspiegelanstieg von 1950 bis 2300 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1986-2005, gemäß pessimistischem (rot) und optimistischem Szenario (blau). Quelle: IPCC, 2019b (abgewandelt).

Schon ein Meeresspiegelanstieg von einem Meter würde europaweit schätzungsweise 13 Millionen Menschen betreffen – der größte Teil entfiel hierbei auf die Niederlande; am zweitstärksten betroffen wäre Deutschland mit 3,2 Millionen Menschen in Küstenregionen (EEA, 2005). Als besonders gefährdet gelten Bereiche, die weniger als fünf (Nordsee) bzw. drei Meter (Ostsee) über dem Meeresspiegel liegen – die Fläche wird in

Deutschland auf 14.000 Quadratkilometer geschätzt (WOR, 2010). Abbildung 17 zeigt die theoretischen Folgen eines Anstiegs von einem Meter, wenn man ausschließlich die Höhenlage des Geländes berücksichtigt; Deiche werden dabei nicht mit eingerechnet.

Der Meeresspiegelanstieg führt zu einer langsamen Erosion von Dünen, Inseln, Küsten und Stränden, punktuell verschärft durch Sturmflutereignisse. Die Deiche an Nord- und Ostsee geraten dabei zunehmend in Bedrängnis. Vor allem an der Nordsee hat der Deichbau eine lange Tradition: Im Wattenmeer wurde schon vor fast 1.000 Jahren damit begonnen, Gebiete einzudeichen, um sie dem Einfluss der Nordsee zu entziehen und so neues Land zu gewinnen (MELUND SH, 2015). Über die Jahrhunderte wurde das bewirtschaftete Marschgebiet Teil der regionalen Identität; der Küstenschutz verteidigt es bis heute gegen Sturmfluten. Bricht jedoch ein Deich, wird die dahinterliegende Marsch sofort überflutet – denn für die landwirtschaftliche Nutzung wird sie seit jeher entwässert, wodurch der Boden zumeist unter den Meeresspiegel abgesackt ist. Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs laufen Sturmfluten nun zunehmend höher auf, wozu auch die steigende Intensität von Winterstürmen beiträgt. Dadurch könnten Deiche zukünftig häufiger an ihre Belastungsgrenzen stoßen.

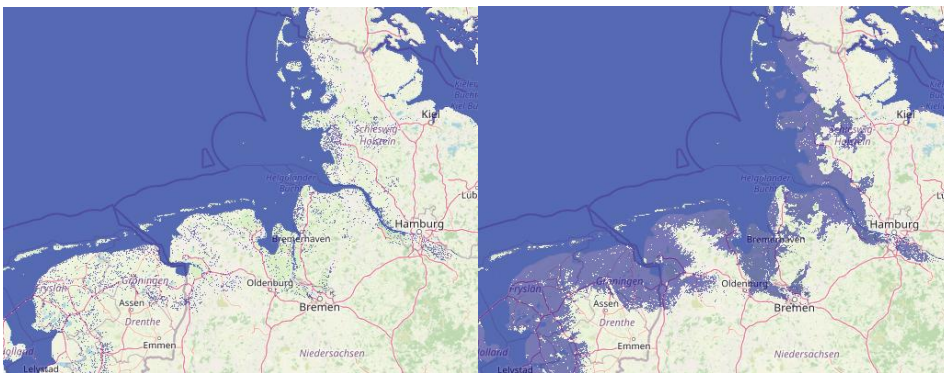


Abbildung 17: Vergleich des Status quo an der Nordseeküste (links) mit einem simulierten Meeresspiegelanstieg von einem Meter. Die Simulation beruht allein auf der Höhenlage der Flächen; die Schutzwirkung von Deichen wird nicht berücksichtigt. Große Küstengebiete sowie Teile des Binnenlands, etwa um Hamburg, würden ohne Küstenschutzvorrichtungen dauerhaft überflutet. Quelle: flood.firetree.net, ohne Jahr.

Nicht nur den Küstenschutz, auch Ökosysteme stellt der Meeresspiegelanstieg vor enorme Herausforderungen. Das Weltnaturerbe Wattenmeer ist die weltweit größte Wattlandschaft und reich an Arten und Lebensräumen. Dank seiner geografischen Lage dient es jährlich Millionen von Zugvögeln als Rastplatz und Habitat; unzählige Meeres- bzw. Wattvögel sind dort beheimatet. Eine große Vielfalt an Weichtieren, wie Würmern, Schnecken und Muscheln, liefert Vögeln und Fischen Nahrung; als Kinderstube vieler Fische ist die Region unersetzlich für das Leben in der Nordsee. Wegen des schwachen Gefälles ist das Gezeitenökosystem aber besonders anfällig für steigende Meeresspiegel; große Teile der Wattflächen, die heute zweimal täglich trockenfallen, könnten dauerhaft überflutet werden. Das Umweltministerium des Landes Schleswig-Holstein warnt in seiner „Strategie für das Wattenmeer 2100“ (MELUND SH, 2015), dass bis Ende des Jahrhunderts 15 Prozent bis drei Viertel der Wattfläche verloren gehen könnten. Denn das Tempo des Meeresspiegelanstiegs übersteigt möglicherweise die Fähigkeit der Wattflächen, über Sedimentablagerungen mit dem Meer mitzuwachsen. Dissanayake et al. (2012) berechneten, dass die Wattflächen um Ameland einen Anstieg von 3 bis 4 Millimetern pro Jahr verkraften, bei einem Anstieg von 7 Millimetern aber nicht mehr mitkommen. Gegen Ende des Jahrhunderts könnte das Meer je nach Emissionsszenario zwischen 4 und 16 Millimetern pro Jahr ansteigen (IPCC, 2013/2014b;

MELUND SH, 2015). Wie viel Wattfläche erhalten bleibt, hängt also sehr stark vom Klimaschutz ab.

Neben den Wattflächen sind auch die typischen Salzwiesen am Übergang von Watt zu Land von den steigenden Fluten bedroht. Sie sind nicht nur Lebensraum für viele Pflanzen und Tiere, sondern gehören auch zu den bedeutsamsten Kohlenstoffsinken der Welt. Pro Flächeneinheit binden Salzwiesen sogar mehr Kohlenstoff als Moore (Chmura et al., 2003). Wie Wattflächen können sie unter bestimmten Bedingungen mit dem Meer mitwachsen (Morris et al., 2002). Eine Studie legt jedoch nahe, dass über die Hälfte der Salzwiesen in gemäßigten Zonen bis 2100 dem steigenden Meeresspiegel zum Opfer fallen könnten, weil das Wasser zu schnell steigt (Crosby et al., 2016).

Der zweite Grund für den Verlust vieler Wattflächen und Salzwiesen ist ein harter Übergang von Land zu See in Gestalt einer unüberwindbaren Grenze. Sie verhindert landeinwärts die Ablagerung von Sedimenten und damit das Mitwachsen des Watts. Die Grenze kann dabei natürlich in Form von Landschaftsstrukturen (z. B. Steilküsten) oder künstlich im Sinne anthropogener Küstenschutzvorrichtungen sein. Die Situation wird als *Coastal Squeeze* (engl. „küstenseitiges Einquetschen“) bezeichnet (Pontee, 2013). An der Nordsee bilden vor allem Deiche diese künstliche Grenze.

Durch den Verlust von Lebensräumen im Wattenmeer droht ein Rückgang von Vogelarten wie dem Seeregenpfeifer (*Charadrius alexandrinus*), dem Alpenstrandläufer (*Calidris alpina*) und dem Säbelschnäbler (*Recurvirostra avosetta*) (Vohland et al., 2015; Kröncke et al., 2012); viele weitere Tier- und Pflanzenarten sind bedroht. Auch die Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff wird abnehmen, wenn Salzwiesen dauerhaft untergehen.

Beim Binnenmeer Ostsee ist der Einfluss der Gezeiten kaum merklich. Wattflächen gibt es nur vereinzelt in Form von Windwatten, die der Wind zeitweise trockenlegt. Auch diese einzigartigen Biotope in der flachen Boddenlandschaft der Ostsee sind durch den Meeresspiegelanstieg bedroht. An der Küste dominieren torfhaltige Böden. Wie an der Nordsee gibt es hier Salzwiesen, allerdings vornehmlich sekundär in Form von Salzgrünland, das durch die Beweidung von Brackwasserröhrichten entstanden ist (LUNG MV, 2011). Anders als Wattflächen und Salzwiesen der Nordsee sind die torfigen Gebiete theoretisch in der Lage, über Moorbewuchs mit dem Meer zu wachsen: Laut Nikelski (2016) können „Brackwasserröhrichte mit ihrer Torfbildung und zusätzlicher Sedimentation den Meeresspiegelanstieg ausgleichen, Salzgrünlandtorfe können sogar im Bereich einiger Dezimeter oberhalb Mittelwasser aus dem Meer herauswachsen“. Ein Großteil der torfhaltigen Böden bzw. Küstenmoore wurde jedoch eingedeicht und entwässert. Die übrigen Flächen könnten, wie an der Nordsee, sowohl durch das Tempo des Meeresspiegelanstiegs als auch das Phänomen des *Coastal Squeeze* verloren gehen. Damit würde die Senkenleistung der Ökosysteme langfristig abnehmen. Auch viele Naturschutzgebiete der schleswig-holsteinischen Ostseeküste liegen vor dem Deich in Bereichen, die bis Ende des Jahrhunderts dauerhaft überflutet werden könnten. Typische Ostsee-Vogelarten wie Sandregenpfeifer (*Charadrius hiaticula*), Eiderente (*Somateria mollissima*) und Austernfischer (*Haematopus ostralegus*) verlieren dann ihre Brutplätze; viele weitere Tier- und Pflanzenarten sowie Lebensgemeinschaften wären betroffen. Schließlich drohen eine Erosion der charakteristischen Kreidefelsen und ein Abbruch von Steilküsten (RADOST, 2013). Zusätzlich erschwert wird die Situation durch das nachschiebende Absinken von Teilen der Ostseeküste (Böse et al., 2018).

Bodden

Durch Inseln oder Landzungen vom Meer abgetrennte flache Küstengewässer (Lagunen), die typisch für die Ostseeküste sind. Im Vergleich zur Ostsee haben Bodden einen geringeren Salzgehalt, keinen Seegang und einen größeren Nährstoffreichtum. (Nationalparkamt Vorpommern, 2020)

Einen Sonderfall bilden die Ästuarie als Übergangsbereich zwischen Fluss und Meer. Sie sind großflächig im Rahmen der FFH- und Vogelschutzrichtlinie geschützt. Eine Klimafolge für Flussmündungen wurde bereits am Beispiel der Tideelbe erläutert, in der sich

die durch mehrfache Vertiefung befeuerten sommerlichen Sauerstofflöcher ausweiten könnten (s. Kapitel III.3.). Meerseitig werden die Ästuarökosysteme ebenfalls bedroht. Neben einem höheren Auflaufen von Sturmfluten und der *Coastal-Squeeze*-Problematik, die auch hier zum Tragen kommt, verstärkt die Klimakrise den Tidehub, also die Höhendifferenz zwischen den jeweiligen Wasserständen bei Niedrig- und Hochwasser. Bei der Tideelbe ist die damit einhergehende Tidepumpe – das Einströmen von Sedimenten bei Flut – wegen des vertieften Flussbetts bereits heute ein großes Problem. Durch die Klimakrise wird die Dynamik intensiviert, was zu einem höheren Schwebstoffgehalt und Trübungen führt (WWF, 2008). Auch die Kosten für die Unterhaltung des Hafens werden vor diesem Hintergrund weiter steigen und den Erhalt der derzeitigen Fahrrinne unwirtschaftlicher machen. Der Meeresspiegelanstieg verursacht darüber hinaus eine Verlagerung der Brackwasserzone ins Landesinnere, wodurch Tide-Auwald-Standorte, Flusswasserlebensräume, aber auch Obstanbaugebiete verloren gehen können (ebd.).

Der Meeresspiegelanstieg verschärft also die Probleme, die die Nutzung der Meere und Küsten durch den Menschen mit sich bringt, und sorgt für neue Herausforderungen. Die Flächenkonkurrenz zwischen Tourismus, Naturschutz, Küstenschutz, sowie Land- und Hafenwirtschaft an Nord- und Ostsee wird verschärft, je weiter das Meer vorrückt. Es droht der Verlust einzigartiger Habitate und wertvoller Ökosystemleistungen.

Folgen für das Meer

In den Ozeanen sind Veränderungen durch die Klimakrise schon seit geraumer Zeit auf allen Ebenen zu beobachten: Die Weltmeere reagieren

- physikalisch (Wassertemperatur, vertikale Schichtung, Strömungen etc.),
- chemisch (Gaslöslichkeit, pH-Wert, Nährstoffe, Salzgehalt etc.) sowie
- biologisch (Phänologie, Nahrungsnetz, invasive Arten etc.)

auf die höheren Temperaturen und den steigenden CO₂-Gehalt der Atmosphäre (UBA, 2009). Die globale mittlere Meeresoberflächentemperatur hat sich seit Anfang des 20. Jahrhunderts um ca. 0,88 Grad Celsius erhöht (IPCC, 2021). Auch marine Hitzewellen haben messbar zugenommen (ebd.). An der Meeresoberfläche ist der Temperaturanstieg am größten, aber die Ozeane erwärmen sich bis in über 2.000 Meter Tiefe. Dabei macht die Erwärmung der Meere mehr als 90 Prozent der gesamten Wärmezunahme auf der Erde aus – nur fünf Prozent entfallen auf die Erwärmung der Landmassen und lediglich ein Prozent auf die Erwärmung der Atmosphäre (ebd.). Der Temperaturanstieg fördert die Schichtung des Wasserkörpers, wodurch vertikale Nährstoff-, Kohlenstoff- und Sauerstoffflüsse gehemmt werden (IPCC, 2019b). Auch wichtige Meeresströmungen wie die Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation (AMOC), zu der auch der Golfstrom gehört, werden durch die Erwärmung beeinflusst. Beobachtungen deuten darauf hin, dass sich die AMOC gegenüber 1850–1900 abgeschwächt hat (ebd.; IPCC, 2021). Eine erhebliche Schwächung der AMOC mit dem zentralen Strömungssystem des Golfstroms hätte potenziell schwerwiegende Folgen für das Wetter in (Nord-)Europa (ebd.). Meeresströmungen sind zudem ein wichtiger Transportweg für Plankton und Larven von Fischen und Wirbellosen; eine Abschwächung hätte also auch Folgen für die marine Biodiversität und Produktivität (IPCC, 2019b; UBA, 2009).

Die Erwärmung der Meere hat phänologische Konsequenzen: Heringe z. B. schwimmen wegen der milden Winter immer früher zum Laichen in die flachen Boddengewässer der Ostsee. Weil die Entwicklung des Zooplanktons aber nicht von der Temperatur, sondern durch Lichtverhältnisse gesteuert wird, steht es den Larven des Herings nicht rechtzeitig als Nahrung zur Verfügung – abnehmende Heringsbestände sind die Folge

(Polte et al., 2021). Ein ähnliches Problem hat der Kabeljau in Nord- und Ostsee, der überdies Temperaturen unter 4 bis 5 Grad Celsius zum Laichen braucht, die immer seltener erreicht werden (UBA, 2009). Auf der Suche nach adäquaten Laichgewässern verschiebt der Kabeljau sein Verbreitungsgebiet nach Norden (AWI, 2014). Abnehmende Bestände und eine veränderte geografische Verteilung betreffen auch die Fischerei. Wie in Seen kann der Temperaturanstieg Blaualgenblüten und Sauerstoffmangel auch in der Ostsee fördern (Lennartz et al., 2014). Unter steigenden Temperaturen leiden zudem die Seegraswiesen: Dieser als „Kinderstube der Ostsee“ bekannte Lebensraum ist bereits durch die hohe Nährstoffbelastung gefährdet, die zu einer Trübung des Wassers führt. Die Erwärmung des Wassers bedeutet zusätzlichen Stress für das Ökosystem (Duarte et al., 2018).

Hinsichtlich chemischer Veränderungen ist der Sauerstoffgehalt in vielen Bereichen der Meere gesunken. Wie bereits erwähnt, liegt dies vor allem an der wärmebedingt zunehmenden Schichtung der Ozeane, die eine Vermischung des sauerstoffreichen Wassers an der Oberfläche mit tieferen Bereichen unterbindet (IPCC, 2021). Die wohl folgenreichste chemische Entwicklung ist die zunehmende Versauerung der Meere, die auf die anthropogenen CO₂-Emissionen zurückzuführen ist. Der Ozean ist die zentrale Kohlenstoffsенke des Planeten: Seit 1750 hat er rund 27 Prozent der menschlichen CO₂-Emissionen aufgenommen. Damit ist das Potenzial der marinen Kohlenstoffsенke in etwa so groß wie das aller Landökosysteme zusammengenommen (IPCC, 2013/2014b). Probleme bereitet die Kohlensäure, die bei der Reaktion von Wasser und CO₂ entsteht. Sie lässt den leicht basischen pH-Wert des Ozeans allmählich sinken. Seit Beginn der Industrialisierung ist der Säuregehalt des oberflächennahen Wassers um 26 Prozent gestiegen (IPCC, 2013/2014b). Die Versauerung hat weitreichende Folgen: Ein Großteil der marinen Organismen ist kalkproduzierend – Korallen, Muscheln, Krustentiere. Das Kalziumkarbonat in den Schalen und Skeletten dieser Lebewesen ist löslich und wird durch den sinkenden pH-Wert zunehmend angegriffen. Eine Reduktion der Zahl bzw. Vielfalt dieser Artengruppen hätte gravierende Folgen für die gesamte Biodiversität der Meere, da sie ein wichtiger Teil der marinen Nahrungsnetze sind. Schließlich könnten sogar die marinen Aufnahmemechanismen von CO₂ ins Wanken geraten: Die enormen biologischen Veränderungen im Zuge der Klimakrise könnten einen Einfluss auf die Senkenleistung der Ozeane haben – hier bedarf es mehr Forschung (IOC, 2021).

Insgesamt ist die Klimakrise eine wachsende Bedrohung für die marinen Ökosysteme. Diese sind aufgrund menschlicher Einflüsse wie Überfischung, Eintrag von Nähr- und Schadstoffen sowie Vermüllung bereits in einem schlechten Zustand (WOR, 2010). Von den Auswirkungen auf die Meeresökosysteme sind indirekt Tourismus und Fischerei betroffen. Auch der Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen geriete in Gefahr, sollten die biologischen Klimafolgen die CO₂-Senkenleistung der Ozeane mindern.

b) Flexible Küsten, geschützte Zonen: Klimaanpassung von Küste und Meer

Klimaanpassung an der Küste

Wie bereits erläutert, hat Deichbau eine lange Tradition. Vor allem an der Nordsee setzt man daher auf ein Aufstocken von Deichen, um sich gegen steigende Fluten zu wappnen. „Klima-Deiche“ sollen das Problem lösen: Alte Deiche werden erhöht und mit erweiterter Grundfläche und flachem Sockel ausgestattet, sodass ein späteres Nachrücken möglich bleibt. Schwierig wird es, wenn der Boden nachgiebig ist und unter dem Gewicht eines verstärkten Deichs absacken kann. In dem Fall muss ein neuer Deich an anderer Stelle gebaut werden, was den Flächenverlust an der Küste befeuert. Bereits die Vergrößerung von Deichen nimmt viel Platz in Anspruch: Das

Fundament eines neun Meter hohen Deiches kann über 100 Meter breit sein (BUND, 2013). Es ist daher fraglich, wie lange eine Verstärkung von Deichen verhältnismäßig ist, also nicht zu viel Grundfläche einnimmt oder zu teuer wird, bzw. wie lange sie möglich ist. Zudem steht diese Form des klassischen Küstenschutzes in Konkurrenz zum Naturschutz: Nicht nur gehen wertvolle Küstenökosysteme verloren, auch die Entnahme von Klei und Sand aus dem Inland oder dem offenen Meer für den Deichbau geht mit erheblichen Umweltstörungen einher. Überdies ist das Baumaterial nicht unendlich vorhanden. Der IPCC (2019b) weist darauf hin, dass Deiche nie absolute Sicherheit bieten und das Versagen von Schutzvorrichtungen katastrophale Auswirkungen hat. Kosteneffizient sind Deiche laut Weltklimarat nur, „wenn der Wert der Güter hinter der Schutzvorrichtung hoch ist, wie in vielen städtischen und dicht besiedelten Küstengebieten der Fall“ (ebd.). In solchen Bereichen könnten die Schäden durch den Meeresspiegelanstieg die Kosten der Anpassung um das Zehnfache übersteigen (GCA, 2019). Entsprechend sind in weniger dicht besiedelten Gebieten alternative Maßnahmen kosteneffizienter und können zudem naturverträglicher umgesetzt werden (Reise, 1996).

Beim ökosystembasierten Küstenschutz steht die wellenbrechende, erosionsmindernde Wirkung von Naturlandschaften im Vordergrund. Gibt man Wattflächen, Salzwiesen und Küstenmooren die Möglichkeit, mit dem Meeresspiegel über die Ablagerung von Sedimenten und Torfbildung mitzuwachsen, ergibt sich eine Win-Win-Win-Situation: Sturmfluten werden abgeschwächt, vielfältige Lebensräume bleiben erhalten und hochwirksame Kohlenstoffsinken können weiterhin ihre wertvolle Leistung erbringen. Will man die natürliche Anpassungskapazität dieser Küstenökosysteme unterstützen, müssen vermehrt Deichlinien entfernt bzw. rückverlagert werden, um die kritische *Coastal-Squeeze*-Situation zu vermeiden (Abb. 18). An der Ostsee muss außerdem die Entwässerung der torfhaltigen Böden ein Ende nehmen, damit das Wachstum der Moorflächen ermöglicht wird. Seegraswiesen müssen ebenfalls besser geschützt bzw. wiederhergestellt werden, damit ihre erosionsmindernden Eigenschaften und ihre Senkenleistung maximale Wirkung entfalten (Duarte et al., 2018).

Klei

Marschenboden, der aus einem Gemisch von Ton, Schluff und Sand mit organischen Anteilen besteht. Ursprünglich wurden Deiche als Vollkleideiche von ein bis zwei Metern Höhe gebaut. Heute werden sie als Sandkerndeiche mit Kleiabdeckung von bis zu neun Metern Höhe hergestellt – für den Ausbau als reiner Kleideich ist meist nicht genug Klei verfügbar. Schon für einen Kilometer Deich mit Kleiabdeckung werden bis zu 200.000 Tonnen Klei benötigt.

(Carstens, 2008)

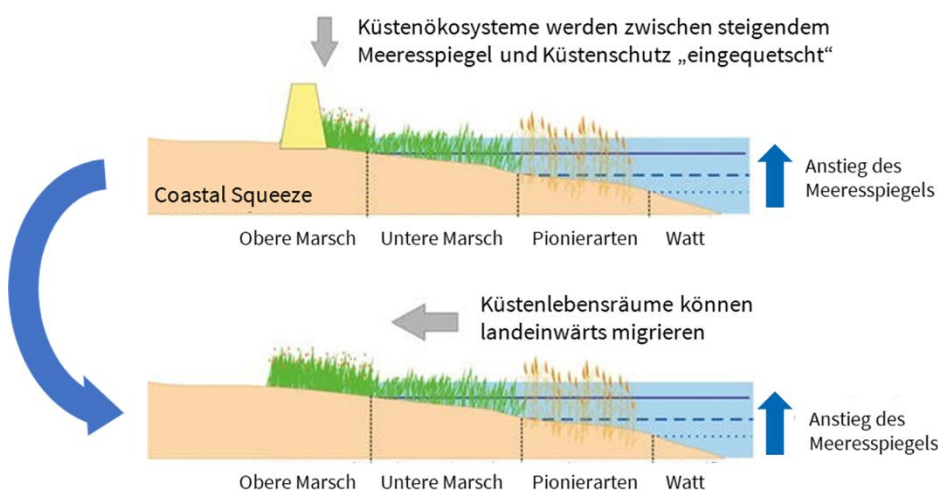


Abbildung 18: Vermeidung des *Coastal Squeeze* durch Entfernen oder Verlagern von Küstenschutzvorrichtungen. Küstenökosysteme können mit dem Meeresspiegel mitwachsen und so weiterhin als Puffer bei Sturmfluten sowie Kohlenstoffsinken agieren. Quelle: Esteves, 2016 (abgewandelt und übersetzt).

Speziell für das Wattenmeer gibt es Maßnahmen, die die gezeitenabhängigen Sedimentationsprozesse im Fokus haben. Schon vor 25 Jahren machte Reise (1996) Vorschläge, wie der Übergang zwischen Marsch und Meer fließender gestaltet werden könnte, ohne

Deiche entfernen, verlagern oder erheblich erhöhen zu müssen. Eine Möglichkeit, die auch die Umweltstiftung Michael Otto (UMO, 2010) anschaulich darlegt, ist die gezielte Öffnung von Deichen. Dazu eignen sich z. B. Deichsiele, welche normalerweise für die Entwässerung benutzt werden (Reise, 2016). Wird hier kontrolliert Wasser eingelassen, lagern sich bei Flut Sedimente auf der Marsch ab, sodass sich diese allmählich anhebt. Es entsteht eine Tidelage, die im Sinne des weichen Küstenschutzes Sturmfluten sanft abpuffert. Je nach Wetterlage bzw. Bedarf kann dort mehr oder weniger Wasser eingelassen bzw. zurückgehalten werden. Eine zweite Deichlinie, beispielsweise aus reaktivierten alten Deichen, bietet sich an, um die Landschaft hinter der Lagune zu schützen (Reise, 1996; UMO, 2010; Abb. 19).



Abbildung 19: Natürlicher Küstenschutz am Wattenmeer: Die Marsch wird durch Deichöffnung geflutet, Sedimente lagern sich ab und die Marsch hebt sich an; es entsteht eine Tidelage. Die dahinter liegende Landschaft wird mit einer zweiten Deichlinie geschützt. Quelle: studio urbane landschaften - hamburg (Antje Stokman, Sabine Rabe)/UMO, 2010 (abgewandelt).

In den neu geschaffenen Tidelandschaften hat man viele Gestaltungsmöglichkeiten: Sie können die Form geschützter Naturlandschaften annehmen, bieten aber auch Platz für Tourismus und Erholung. Auch Siedlungen können am Rande der überspülten Gebiete entstehen und sogar in die gefluteten Bereiche selbst integriert werden, wenn Strukturen wie Stelzen, Warften oder schwimmende Gebäude genutzt werden (UMO, 2010). Landwirtschaft bzw. Gartenbau sind in Form treibender Gewächshäuser oder mittels Paludikultur möglich (ebd.). Eine Tidelandschaft dient so naturverträglich dem Küstenschutz und kann Nutzungskonflikten in Küstenzonen vorbeugen, wenn die Planung eine gerechte Verteilung der Flächen sicherstellt. Eine Alternative für bruchgefährdete Deiche, bei denen ein Aufstocken nicht möglich bzw. verhältnismäßig ist, sind Flutpolder bzw. -kammern hinterm Deich (ebd.). Die Deiche werden dabei so strukturiert, dass sie einer Überflutung standhalten und überströmt werden können, ohne zu brechen (Reise, 1996). Das Wasser wird dahinter in einem Kammersystem gehalten. Wie in den Tidelagunen können auch in den zeitweilig überschwemmten Poldern vielfältige Nutzungen verfolgt werden, indem die Strukturen an die entsprechend möglichen Wasserstände angepasst werden (Reise, 2016; UMO, 2010).

Eine weitere Besonderheit der Nordsee sind die West- und Ostfriesischen Inseln, die als sogenannte Barriereinseln typisch für flache, von Gezeiten geprägte Küstengebiete wie das Wattenmeer sind. Aus Sedimentablagerungen entstanden, sind sie wie Watt und Salzwiesen theoretisch in der Lage, mit dem Meeresspiegel mitzuwachsen. Verhindert wird dies meist durch Deiche und die Bepflanzung von Dünen, die ein Überströmen der Inseln und eine Verlagerung von Sedimenten unterbinden. Lässt man hingegen durch Öffnen von Deichen und flexible Dünen die sogenannten *Washover*-Prozesse zu, wird ein Mitwandern der Inseln mit dem Meer in Richtung Küste möglich (UMO, 2010).

Als Alternative zu Rückdeichungen oder Deichöffnungen bzw. als Ergänzung zu diesen sowie klassischen Küstenschutzmaßnahmen werden Sandvorspülungen diskutiert, wie

Polder

Traditionell: Eingedeichtes und entwässertes Marschland, das landwirtschaftlich genutzt wird (Koog, Groden). Bei Sommer- und Überlaufpoldern sind die Deiche so strukturiert, dass sie einer Überflutung standhalten und die eingedeichten Flächen zeitweise unter Wasser stehen. In diesem Sinne sind Polder gemäß der zweiten, moderneren Bedeutung primär Retentionsbecken, die als Puffer bei Hochwasser bzw. Sturmfluten dienen. (Spektrum Akademischer Verlag, 2000)

sie seit Jahrzehnten für den Erhalt der Insel Sylt praktiziert werden. Hierbei wird Sand aus der Nordsee geholt und an der Küste platziert. Im Vergleich zu Betonwällen oder asphaltierten Schardeichen schafft die Methode einen sanfteren Übergang zur Küste. Dennoch sind ökologische Folgen zu bedenken, sowohl im Gebiet der Aufspülungen (Schratzberger und Thiel, 1995; Menn et al., 2003) als auch bei der Sandentnahme im Meer (Staudt et al., 2019), die teilweise sogar in Meeresschutzgebieten stattfindet. Hier sorgt der Abbau von Sand nicht nur für eine enorme Lärmbelastung unter Wasser, sondern zerstört weiträumig die Lebensräume unzähliger Arten. Tiere, die zwischen den Sandkörnern leben – die sogenannte Interstitialfauna – sind besonders betroffen. Zudem besteht die Gefahr, dass Vorspülungen die natürlichen Dynamiken der Sandverlagerung unterbinden und damit hinderlich für ein Mitwachsen von Inseln sein könnten.

Für Flussmündungen gilt ebenfalls der Grundsatz, dass die Verlagerung oder Öffnung von Deichen – in diesem Fall entlang der Flüsse – das Mitwachsen von Lebensräumen ermöglicht. Ein weiterer Anstieg des Tidehubs kann allerdings nur vermieden werden, wenn der Ausbau der Hafenzufahrten, also die Flussvertiefung, eingestellt wird. Statt tiefe Fahrrinnen für immer größere Schiffe auszuheben, sollte man auf Kooperationen mit vorhandenen Tiefwasserhäfen wie den Jade-Weser-Port setzen. Mittelfristig sollten die bestehenden Fahrrinnen wieder verflacht werden, um Tidehub, Sturmflutspitzen und deren Effekte auf Ökosysteme zu minimieren. Lässt sich trotz aller Vorkehrungen ein Verlust von Natura-2000-Flächen an Mündungen und weiteren Küstenabschnitten nicht vermeiden, sollte die Schaffung neuer Schutzgebiete im Binnenland in Erwägung gezogen werden.

Klimaanpassung der Meere

Bei den emissions- und klimabedingten Folgen für die Ozeane werden die Grenzen der Klimaanpassung deutlich. Die Auswirkungen vergangener Emissionen auf die marinen Lebensgemeinschaften sind kaum abzuwenden, wovon auch die Fischerei zunehmend betroffen ist. Daher ist es von größter Bedeutung, die Resilienz der Meere gegenüber den Folgen der Klimakrise zu stärken, indem andere menschengemachte Belastungen reduziert werden. Dafür sind effektive Schutzgebiete mit großteiligen Nullnutzungs-zonen essenziell, in denen weder gefischt wird, noch Rohstoffe ab- oder Windräder gebaut werden. Außerhalb von Schutzgebieten muss das Vorsorgeprinzip in Hinblick auf die Klimakrise noch stärker zum Tragen kommen, etwa bezogen auf die Fischerei-praxis und den Flächenverbrauch durch Infrastrukturvorhaben. Aquakultur und Landwirtschaft sind ebenfalls gefragt, Nährstoffeinträge auf ein Minimum zu begrenzen, um Algenblüten und damit verbundene Sauerstoffdefizite zu vermeiden.

c) Empfehlungen

Um Küstenregionen naturverträglich an den steigenden Meeresspiegel anzupassen und dabei Kohlenstoffsinken zu erhalten sowie Habitate – auch als Ersatzlebensräume – entstehen zu lassen, empfiehlt der NABU:

- Die Förderung von ökosystembasiertem Küstenschutz und dessen Anwendung vorzugsweise in schwach besiedelten Gebieten. Dies beinhaltet unter anderem die Rückverlegung bzw. Öffnung von Deichen, sodass Ökosysteme wie Salzwiesen und Küstenmoore mit dem Meeresspiegel mitwachsen können.
- Pilotstudien und -projekte zur aktiven Wiederherstellung klima- sowie küstenschutzrelevanter Biotope wie Salzwiesen, Salzgrünländer, Seegraswiesen sowie geogener und biogener Riffe.
- Eine marine Komponente eines bundesweit einzurichtenden Renaturierungsfonds von mindestens 50 Millionen Euro jährlich.

- Das Ende der Degradierung von Flüssen wie Elbe, Ems und Weser durch einen sofortigen Stopp und Rückbau der Vertiefung und Begradigung sowie einen konsequenten Schutz der Ästuare.

Um anthropogene Belastungen mariner Ökosysteme zu reduzieren und so zu einer höheren Resilienz gegenüber klimabedingten Folgen beizutragen, empfiehlt der NABU:

- Mindestens 50 Prozent der deutschen Meeresschutzgebiete der Nord- und Ostsee müssen frei von menschlicher Nutzung sein.
- Die Reduktion anthropogener Belastungen in der deutschen Nord- und Ostsee zur Erreichung des guten Umweltzustands nach EU-Meeresschutz-Rahmenrichtlinie. Dies wird mithilfe einer marinen Raumordnung möglich, die streng am Ökosystemansatz und den ökologischen Belastungsgrenzen ausgerichtet ist.

6. Städte und Siedlungen

In urbanen Regionen konzentrieren sich Menschen und Infrastruktur: Klimafolgen können hier besonders schwer wiegen. Eine Klimaanpassung bietet nicht nur Schutz gegenüber den städtischen Auswirkungen der Erderhitzung, sie beinhaltet auch viele Synergien zu weiteren kommunalen Entwicklungszielen.

a) Hitze in der Stadt: Klimafolgen in urbanen Regionen

Urbane Regionen sind besonders vulnerabel gegenüber der Klimakrise. Zum einen haben sie eine hohe Bevölkerungs- und Infrastrukturdichte, sodass dort viele Menschen gleichzeitig von örtlichen Klimafolgen betroffen sind und hohe Sachschäden drohen. Zum anderen fördern Verkehrsemissionen, die Abwärme von Gebäuden und Fahrzeugen sowie der hohe Grad an Bebauung und Versiegelung ein charakteristisches Stadtklima, geprägt durch den sogenannten Hitzeinseleffekt. Dadurch ist es in Städten im Jahresmittel ca. zwei Grad Celsius wärmer als im unbebauten Umland; in Einzelfällen kann die Differenz sogar bis zu 15 Grad betragen (BBSR, 2009a). Ballungsräume sind deshalb überdurchschnittlich von Hitzetagen (die Tageshöchsttemperatur beträgt mindestens 30 Grad Celsius) und Tropennächten (Nächte mit einer Mindesttemperatur von 20 Grad) betroffen. Geografische Besonderheiten wie Tal- bzw. Kessellagen verstärken den Effekt. Überdies gibt es tendenziell mehr Starkregen und stärkere Böen als auf dem Land (ebd.). Überschwemmungen aufgrund von Hochwasser und aus Starkregen resultierende Sturzfluten werden durch das hohe Maß an Bodenversiegelung verschärft. Im Kontext der Klimakrise spielen urbane Regionen also eine Doppelrolle: als wesentliche Verursacherstandorte – über 70 Prozent der globalen energiebezogenen CO₂-Emissionen sind auf Städte zurückzuführen (IEA, 2008) – und als Fokusorte der Anpassung, an denen sich viele Gefährdungsrisiken konzentrieren.

Ein hohes gesundheitliches Risiko geht von den steigenden Temperaturen in Städten aus. Insbesondere ältere Menschen leiden unter der zunehmenden Hitzebelastung, aber auch Kleinkinder und Menschen mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind betroffen. Rund ein Drittel der weltweiten hitzebedingten Todesfälle lassen sich inzwischen auf die Klimakrise zurückführen; auf allen Kontinenten ist die diesbezügliche Mortalität seit 1991 gestiegen (Vicedo-Cabrera et al., 2021). Bis 2050 wird in Deutschland ein Anstieg des Anteils hitzebedingter Todesfälle an der Gesamtzahl aller Todesfälle um das Vierfache im Vergleich zu einem Szenario ohne Klimawandel für möglich gehalten (BMU, 2020b). Hinzu kommt eine weitere Abnahme der Luftqualität: Die steigenden Temperaturen sorgen für höhere Schadstoffkonzentrationen, etwa von Stickoxiden. Die sommerliche Belastung durch Ozon wird ebenfalls wachsen (BBSR, 2009a). Wird es wärmer, breiten sich außerdem Krankheitsüberträger wie Mücken oder Zecken aus. Dadurch könnten auch Tropenkrankheiten vermehrt in Deutschland auftreten. Einige

dieser Überträger, wie z. B. die Tigermücke, sind hauptsächlich in Ballungsräumen aktiv und könnten folglich zu Massenausbrüchen in solchen Gebieten führen (Lippelt, 2013). Schließlich steigern die charakteristischen Eigenschaften von Städten wie beschrieben die Anzahl bzw. die Intensität von Extremereignissen, sodass sie für Stadtbewohnende ein vergleichsweise hohes gesundheitliches Risiko darstellen.

Gebäude und Infrastruktur laufen ebenfalls Gefahr, durch Hochwasser oder Sturm Schaden zu nehmen. Schwankende Grundwasserstände belasten die Gebäudestatik, hohe Temperaturen verkürzen die Lebensdauer von Materialien (BBSR, 2016). Auch die technische Infrastruktur, etwa zur Entwässerung, wird immer öfter an ihre Grenzen stoßen. Bei Mischkanalisationen, in denen Regen- und Schmutzwasser gemeinsam abgeleitet wird, kann extremer Niederschlag ein Überlaufen verursachen und so eine Verunreinigung von Gewässern herbeiführen. Gleichzeitig steigt der Energiebedarf für die Kühlung von Gebäuden und die Wasseraufbereitung (BBSR, 2009a).

Von Klimawirkungen ist neben Mensch und Material auch die Stadtnatur betroffen: Die Pflanzen leiden unter Trockenheit und Hitzestress. Wärmeliebende Schädlinge profitieren dabei nicht nur von höheren Temperaturen, sondern auch vom geschwächten Zustand des Grüns. Gerade Stadtpflanzen – besonders Straßenbäume – haben es schwer, weil sie oft auf isolierten Einzelstandorten stehen, einem hohen Grad an Verschmutzung und Bodenverdichtung ausgesetzt sind und wenig Wurzelraum zur Verfügung haben (Dickhaut et al., 2019). Die Folge ist ein erhöhter Pflege- und Bewässerungsaufwand, vor allem in Dürrephasen (BBSR, 2009a). Langfristig könnte sich klimabedingt die gesamte städtische Biodiversität verändern.

Zu bedenken ist, dass sich jede Stadt mit ihrer einzigartigen Topographie, Bebauung und Stadtnatur nicht nur klimatisch von anderen Orten unterscheidet, sondern auch innerhalb des Stadtgebiets je nach Umgebung und Einfluss menschlicher Aktivitäten verschiedene Lokalklimata herrschen (BBSR, 2016). Eine Vulnerabilitätsanalyse kann aufdecken, wie sich die Klimakrise lokal auswirkt. Sie untersucht die Exposition, die Empfindlichkeit und die Anpassungsfähigkeit gegenüber Klimafolgen. Bei der Analyse der Exposition helfen Klimafunktionskarten, die straßengenau die Temperatur oder die gefühlte Temperatur anzeigen. Ein gutes Beispiel ist der *Climate Impact Atlas* der Niederlande (Klimaateffectatlas, ohne Jahr). Dort kann man sich detailliert die Hitzebelastung in allen Städten anzeigen lassen; auch Trockenheit und Überschwemmungsrisiko durch steigende Meeresspiegel sind wählbare Parameter. Nordrhein-Westfalen hat ein ähnliches Angebot, allerdings in geringerer Auflösung und ohne Gefühlstemperatur (LANUV NRW, 2020). Viele Städte haben ebenfalls eigene Klimakarten, die aktuelle bzw. zukünftige Klimafolgen sichtbar machen – ein Beispiel ist Kassel (Abb. 20).

Klimafunktionskarte 2030

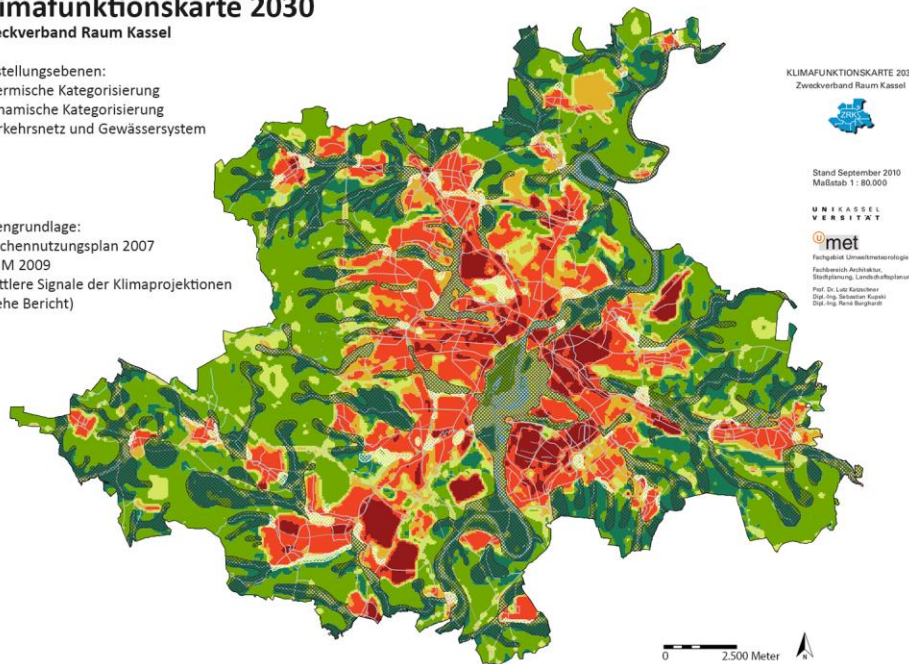
Zweckverband Raum Kassel

Darstellungsebenen:

- thermische Kategorisierung
- dynamische Kategorisierung
- Verkehrsnetz und Gewässersystem

Datengrundlage:

- Flächennutzungsplan 2007
- DGM 2009
- Mittlere Signale der Klimaprojektionen (siehe Bericht)



- | | |
|---|--|
| <p>1 Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiet Hoch aktive, vor allem kaltluftproduzierende Flächen im Außenbereich; Größtenteils mit geringer Rauigkeit und entsprechender Hangneigung.</p> <p>2 Frischluftentstehungsgebiet Flächen ohne Emissionsquellen; Hauptsächlich mit dichtem Baumbestand und hoher Filterwirkung.</p> <p>3 Misch- und Übergangsklimate Flächen mit sehr hohem Vegetationsanteil, geringe und diskontinuierliche Emissionen; Pufferbereiche zwischen unterschiedlichen Klimatopen.</p> <p>4 Überwärmungspotential Baulich geprägte Bereiche mit viel Vegetation in den Freiräumen.</p> | <p>5 Überwärmungsgebiet 1 Dichte Bebauung mit wenig Vegetation in den Freiräumen.</p> <p>6 Überwärmungsgebiet 2 Stark verdichtete Bereiche (City und Industrie/Gewerbe)</p> <p>7 Kaltluftabfluss und Ventilationsfläche Nächtliche Hangwinde, Flächen mit geringer Rauigkeit als Luftleitbahnen; Belüftungs- und Zirkulationssystem.</p> <p>8 Überströmungsbereiche Reduzierte Wirkung im bodennahen Bereich; Überströmung partiereller Siedlungsbereiche in Luftleitbahnen.</p> |
|---|--|

Abbildung 20: Klimafunktionskarte für den Raum Kassel im Jahr 2030. Die grünen Farbschattierungen deuten Kaltluftentstehungsgebiete wie Wälder oder Wiesen an, während orangefarbene bis rote Flächen Überhitzungsrisiken visualisieren. Grau schraffierte Bereiche sind gut belüftet. Quelle: Stadt Kassel, 2021.

b) Aus Grau mach' Grün: Robuste Strategien für resiliente Städte

Aufgrund der besonderen Vulnerabilität von Städten gegenüber Klimafolgen erlangt die Klimaanpassung hier eine hohe Priorität. Hinsichtlich physischer Maßnahmen lässt sich bei urbaner Anpassung zwischen sogenannten grauen, technisch-baulichen bzw. „harten“ Maßnahmen sowie grün-blauer Infrastruktur (GBI) unterscheiden. Unter GBI werden häufig alle Maßnahmen subsumiert, die grüne (vegetative) und/oder blaue (wasserbasierte) Elemente enthalten, die also sowohl ökosystembasiert (z. B. Stadtwald) als auch menschengemacht (z. B. Gründach) sein können (Alves et al., 2019; Brears, 2018; Foster et al., 2011). Teilweise werden darunter allerdings nur ökosystembasierte Lösungen verstanden, während semi-natürliche Lösungen ausgeklammert bzw. anders bezeichnet werden, etwa als hybride Ansätze (Depietri und McPhearson, 2017). Um beide Ansichten miteinander zu vereinbaren, wird das erste, breitere Verständnis Grundlage der weiteren Ausführungen, wobei aber gemäß dem Grad der Naturnähe zwischen ökosystembasierter und semi-natürlicher GBI differenziert wird (Tabelle 3).

GBI trägt auf vielfältige Weise zur urbanen Klimaanpassung bei. Gegenüber grauen Maßnahmen hat sie den Vorteil, dass sie neben der Anpassung zusätzlich Klima- und Naturschutz nützt. Urbane Ökosysteme wie Parks, Grünflächen und Stadtwälder sind besonders effektiv und kosteneffizient. Derartige Stadtnatur kühlt durch Verdunstung bzw. Verschattung die Umgebung, absorbiert Niederschlag, bietet Lebensraum für die

urbane Artenvielfalt und bindet CO₂. Dabei wird das Stadtimage aufgewertet und auch die Luftqualität profitiert, denn Bäume und Pflanzen filtern Schadstoffe (Haase, 2016). Zusammenhängende Flächen haben den größten Effekt, aber bereits einzelne Bäume können Wirkung zeigen. Vor allem alte Bäume tragen in hohem Maße zu Kühlung und Verschattung bei und haben eine gewisse Robustheit bewiesen, weshalb sie unbedingt erhalten werden sollten. Generell gilt es, vorhandenen Grünbestand konsequent zu schützen und die Pflegepläne an die neuen klimatischen Bedingungen anzupassen (Dickhaut et al., 2019). Dazu gehört beispielsweise, Flächen seltener zu mähen, um sie vor Austrocknung zu bewahren – davon profitieren nebenbei Insekten, die wiederum Vögeln als Nahrung dienen.

Tabelle 3: Kategorien von physischen urbanen Anpassungsmaßnahmen

| Grau | Grün-blaue Infrastruktur | |
|---|--|--|
| Technologische bzw. bauliche Maßnahmen | Semi-natürliche Elemente mit baulichen Anteilen | (Städtische) Ökosysteme und deren Leistungen |
| z. B. Kanäle, Dämme, Klär- und Filteranlagen, Klimaanlage, Wärmedämmung | z. B. Bio-Rigolen, grüne Dächer und Fassaden, Baubotanik, Wasser auf Plätzen | z. B. Stadtbäume bzw. -wälder, Grünflächen, Flüsse und deren Uferzonen |

Quelle: Depietri und McPhearson, 2017 (abgewandelt).

Um die klimaregulierende Wirkung von Vegetation voll auszuschöpfen, muss zudem neues Grün Einzug in urbane Räume finden. Da Stadtbäume auf Einzelstandorten, wie oben erwähnt, extremen Stressfaktoren ausgesetzt sind, sind hier besonders robuste, möglichst heimische Sorten gefragt. Bei der Wahl helfen Analysen wie die von Roloff et al. (2008), die in ihrer Erarbeitung resilienter Stadtbaum-Spezies nach heimisch und nicht-heimisch differenzieren. Teils sind einheimische Arten allerdings nicht so gut an die städtischen Extrembedingungen angepasst wie etwa mediterrane Spezies, die die veränderten klimatischen Bedingungen aus ihrem Herkunftsbereich „kennen“. Daher müssen mitunter nicht-einheimische Arten verwendet werden, um einen dauerhaften Erhalt zu gewährleisten. Das Risiko für Ausfälle sollte grundsätzlich durch Mischung verschiedener Arten in einem Planungsabschnitt (z. B. einer Allee) gestreut werden. Bei der Neupflanzung ist auf ausreichend Wurzelraum und eine möglichst geringe Bodenversiegelung und -verdichtung zu achten, um eine bessere Aufnahme von Regenwasser, Sauerstoff und Nährstoffen zu ermöglichen. Der Eintrag von Pestiziden, Streusalz und Abfall ist zu vermeiden. Da die Bewässerung gerade in Trockenphasen kaum allein von den zuständigen Betrieben gestemmt werden kann, können engagierte Bürger*innen durch Gießen der (Jung-)Bäume nachhelfen.

Auch Freiflächen sind zentral für die Anpassung, weil sie Luftaustausch ermöglichen und so die Wärmelast reduzieren. Um den Transport kühler Luft in den Stadtkörper hinein zu erleichtern, sind bei Frei- wie bei Grünflächen vor allem zusammenhängende Bereiche als „Frischluftschneisen“ essenziell (BBSR, 2009a). Der resultierende Bedarf an Freiflächen konkurriert mit Bauvorhaben für Gewerbe und Wohnen und setzt auch die verbleibenden Grünflächen unter Druck. Solchen Nutzungskonflikten kann man unter anderem begegnen, indem man Gebäude aufgestockt, gemeinschaftliches Wohnen fördert und Leerstand vermeidet, statt immer neue Frei- und Grünflächen zu bebauen. Eine Innenverdichtung der Städte ist zudem wichtig vor dem Hintergrund, dass Kaltluftentstehungsgebiete vor der Stadt erhalten werden müssen (NABU, 2020). Werden Auenbereiche, Wiesen, Felder und Wälder in Wohngebiete verwandelt, geht eine enorme Kühlungsleistung verloren, die Stadtgrün allein kaum erbringen kann.



Stadtbäume gießen

In trockenen Sommern brauchen Stadtbäume viel Wasser. Mit ein paar Gießaktionen können Sie den Schattenspendern helfen. Drauf sollten Sie achten:

- Einmal pro Woche ein bis drei Eimer Wasser gießen
- Früh am Morgen oder spät am Abend gießen, um die Verdunstung zu minimieren
- Langsam beginnen: Wasser erst versickern lassen, dann nachgießen – so kann es in tiefere Regionen vordringen
- Insbesondere junge Bäume brauchen Unterstützung
- Wenn möglich, Regenwasser nutzen



Stadtklimalotse

Der Maßnahmenkatalog des Stadtklimalotsen beinhaltet 138 Maßnahmen zur Klimaanpassung aus zehn Handlungsfeldern sowie 330 Verweise auf Gesetzestexte und 61 Beispiele für die Planung und Anwendung. Synergien und Konflikte zwischen einzelnen Maßnahmen werden ebenfalls aufgeführt. Der Stadtklimalotse ist eine Seite des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung und kann unter [diesem Link](#) erreicht werden.

Natürliche blaue Strukturen können ebenfalls zu einem besseren Stadtklima beitragen. Wie Grünflächen senken urbane Gewässer und Feuchtgebiete über Verdunstung die Umgebungstemperatur – allerdings nur tagsüber: Insbesondere stehende Wasserkörper haben, anders als Vegetation, relativ konstante Temperaturen und daher nachts kaum eine kühlende Wirkung; im Gegenteil können sie sogar die nächtliche Abnahme der Lufttemperatur verlangsamen (Baumüller, 2018; Mehl et al., 2018). Die nassen bzw. feuchten Biotope lassen allerdings aufgrund der Differenz zwischen Wasser- und Lufttemperatur thermische Winde entstehen und fördern so den Luftaustausch (Baumüller, 2018). Gleichzeitig dienen sie als Puffer bei Starkregen und als (Trittstein-)Habitat für Tiere und Pflanzen. Die Vorteile dieser Art von GBI sollten also überwiegen. Wie in Kapitel III.3. beschrieben, sind Flussauen außerdem wichtige Retentionsflächen bei Hochwasserereignissen. Es liegt also im Interesse von Städten in Flussnähe, sich für deren Renaturierung einzusetzen. In der Stadt selbst sind die Möglichkeiten zur (Fließ-)Gewässerrenaturierung aus Platzgründen meist begrenzt, aber dennoch vorhanden (UBA, 2019c). Es könnte etwa ein natürlicher Uferbewuchs wiederhergestellt werden, was das Kühlungspotenzial von Fließgewässern erhöht. Ist auch der Zugang zum Fluss gesichert, kann er Menschen an heißen Tagen eine direkte Abkühlung ermöglichen.

Blaue Elemente können auch in Form künstlicher Wasserflächen angelegt werden. Zu beachten ist, dass Grasflächen bei ausreichend Wasserversorgung mehr kühlen als Wasserflächen, was von Bäumen aufgrund der Verschattung noch einmal übertroffen wird (Baumüller, 2018). Allerdings beeinträchtigen Wasserflächen, anders als Bäume, nicht den Luftaustausch. Künstliche Wasserflächen sind daher vor allem auf versiegelten Plätzen sinnvoll, wenn eine Entsiegelung bzw. Umgestaltung zur Grünfläche dort nicht umsetzbar ist. Fontänen und Zerstäuber können den Erfrischungseffekt weiter steigern (ebd.). Dabei sind allerdings Stromverbrauch und – anders als bei den obigen Beispielen – die fehlenden Synergien zu Natur- und Klimaschutz zu bedenken.

Grüne Infrastruktur kann ebenfalls semi-natürlich gestaltet werden. Typische Beispiele sind begrünte Fassaden und Dächer an einzelnen Gebäuden. Bei der Dachbegrünung lässt sich je nach Pflanzengesellschaft, Kosten und Pflegeaufwand zwischen drei Arten unterscheiden (Tabelle 4). Die Extensivbegrünung macht rund 85 Prozent der Gründächer aus und besteht aus dünnen Substraten mit trockenheitsresistenten Pflanzengesellschaften wie Moos- und Sedum-Arten (Walker et al., 2016). Das Problem hierbei ist, dass solche Gründächer gerade in Trockenphasen die Restfeuchte nicht verdunsten lassen und somit kaum Kühlleistung erbringen, da das Speichern von Wasser eine Überlebensstrategie der robusten Pflanzen ist. Sollte hier eine Klimaregulierung erwünscht sein, muss – wie bei den intensiveren Begrünungsarten – bewässert werden (ebd.). Hierbei sollte kein Trinkwasser genutzt werden. Forschungsvorhaben wie das von Walker et al. (ebd.) zeigen auf, wie sich das Kühlungspotenzial von Gründächern unter Nutzung von Grauwasser, etwa aus Waschmaschinen, optimieren lässt.

Gründächer und -fassaden haben eine isolierende Wirkung – im Sommer schützen sie vor Aufheizung, im Winter vor Auskühlung (Brune et al., 2017). Bitumenbahnen werden im Sommer zudem bis zu 90 Grad Celsius heiß, während die Temperaturspitzen bepflanzter Dächer deutlich geringer ausfallen (ebd.). Dunkle Materialien speichern die Hitze zudem länger als Vegetation. Bei Gründächern wird das darunterliegende (dunkle) Material entsprechend weniger beansprucht, sodass seltener Reparaturen anfallen. Ein weiterer Nutzen grüner Fassaden und Dächer ist die Aufnahme von Niederschlagswasser und die Verlangsamung des Abflusses bei Starkregen (ebd.). Schließlich können Gründächer auch gut mit Photovoltaik-Anlagen auf dem Dach kombiniert werden: Durch die Verdunstungskühlung der Pflanzen wird die Betriebstemperatur der Solarmodule gesenkt, sodass die Leistung der Anlage steigt. Umgekehrt schützt die Anlage



Angepasstes Gärtnern

Auch im eigenen (Stadt-)Garten kann mit grün-blauen Strukturen eine kühle Oase kreiert werden, etwa mit kleinen Feuchtbiotopen wie Teichen oder Sumpfbeeten. Mehr Infos zum angepassten Gärtnern gibt es [hier!](#)

die Pflanzen vor Austrocknung (Schindler et al., 2016). Die Dachbepflanzung wirkt auch als Beschwerung für die Aufständering, sodass die Module sicherer stehen.

Tabelle 4: Verschiedene Arten der Dachbegrünung

| | Extensivbegrünung | Einfache Intensivbegrünung | Intensivbegrünung |
|------------------------------|--|---|--|
| Pflegeaufwand | gering | mittel | hoch |
| Pflanzengesellschaften | Ökologischer Schutzbe- lag: Moos, Sedum, Tro- ckengras bis Stauden | Gestaltete Begrünung: Gräser und Stauden bis niedrige Sträucher | Gepflegte Gartenanlage: Rasen oder Stauden bis Sträucher und Bäume |
| Substrathöhen und Gewicht | 6–20 cm 60–250 kg/m ² | 12–25 cm 150–300 kg/m ² | 15–200 cm 200–3000 kg/m ² |
| Kosten | niedrig | mittel | hoch |

Quelle: DDV, 2017 (abgewandelt).

Eine weitere Form semi-natürlicher grüner Infrastruktur ist die Baubotanik. Hierbei handelt es sich um Gewächse, wie z. B. Rankpflanzen oder Bäume, die mittels halt- und strukturgebender Gerüste in eine bestimmte Form gebracht werden – etwa eine Wand oder eine Laube –, bis sie zu einer stabilen, selbsttragenden Konstruktion verwachsen sind (Baumüller, 2018). Mit Pflanzendächern etwa können ästhetische sowie schattige Bereiche geschaffen werden, die zum Verweilen während Einkauf oder Stadtrundgang einladen. Insgesamt sorgen halb-natürliche grüne Strukturen für Win-Win-Situationen, nicht nur innerhalb der Anpassungsthematik, sondern auch bezüglich Klima- und Naturschutz. Zudem beanspruchen sie wenig Raum bzw. sind mit anderen Nutzungen vereinbar – bei begrünten Dächern etwa finden Wohnraum und GBI auf derselben Grundfläche Platz. Dadurch wird die städtische Konkurrenz um Fläche nicht weiter verschärft. Solche Elemente bieten sich daher besonders in Bereichen mit dichter Bebauung an.

Im Kontext der wasserrückhaltenden Wirkung von GBI ist das Konzept einer naturnahen bzw. dezentralen Regenwasserbewirtschaftung relevant. Die Idee ist, die bei Regen anfallenden Wassermassen dezentral abzupuffern bzw. aufzufangen und anschließend versickern oder verdunsten zu lassen oder alternativ zu nutzen (Abb. 21). Dies reduziert das Risiko von Überschwemmungen, beugt Personen- und Sachschäden vor und entlastet die (Misch-) Kanalisation, was wiederum das Risiko des Eintrags von Schmutzwasser in örtliche Gewässer reduziert. Neben GBI können dabei auch graue, technisch-bauliche Anpassungsmaßnahmen zum Einsatz kommen. Die Bodenentsiegelung als zentraler Aspekt der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung bildet den Übergang von GBI zu grauen Maßnahmen: Auf der einen Seite stehen undurchlässige graue Strukturen wie Asphalt oder Beton, die entfernt werden müssen, auf der anderen Seite die Aufnahmefähigkeit des Bodens bzw. der an der entsiegelten Stelle wachsenden oder gepflanzten Vegetation. Ist eine Entfernung der grauen Schicht aufgrund von zu viel Befahrung bzw. Begehung nicht praktikabel, können wasserdurchlässige Bodenbeläge wie sickerfähige Materialien oder Rasensteine genutzt werden. Auf versiegelten Bereichen kann Regenwasser gesammelt, mithilfe von Filteranlagen gereinigt und danach versickert, in Gewässer eingeleitet oder genutzt werden, z. B. für GBI: Es ließen sich damit Wasserbecken füllen oder Pflanzen gießen (UBA, 2019d).



Abbildung 21: Maßnahmen für die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung. Quelle: UBA, 2019d.

Graue Maßnahmen können auch die Anpassung an häufigere Hitzewellen erleichtern. Eine Wärmedämmung ist besonders kosteneffizient, weil sie nicht nur Innenräume im Sommer angenehm kühlt, sondern ganzjährig Heiz- bzw. Kühlenergie und damit auch Kosten einspart. Spezialfensterglas, Fensterläden, Sonnensegel und Markisen können ebenfalls zu einer Temperaturreduktion im Innen- bzw. Außenbereich beitragen. Über graue Maßnahmen kann zudem die Albedo, also das Reflexionsvermögen von Oberflächen gesteigert werden. Dies gelingt z. B. mithilfe heller Anstriche oder Materialien auf Dächern oder Fassaden. In diesem Fall setzen graue Maßnahmen also gerade nicht auf graue Materialien, sondern auf das Gegenteil. Schließlich sind verkehrsreduzierende Maßnahmen wie die Förderung des öffentlichen Nahverkehrs und gemischter Stadtquartiere wichtige Anpassungsmaßnahmen. Gemischte Quartiere bieten neben Wohnraum auch Gewerbe, Schulen, Freizeitmöglichkeiten sowie weiteren Nutzungen Platz und sorgen so für kurze Wege. Verkehrsreduzierende Maßnahmen beugen, gerade im Zusammenspiel mit grüner Infrastruktur, einer abnehmenden Luftqualität und einer verstärkten Aufheizung vor. Insgesamt haben graue Strategien also eine Bedeutung im Kontext der Klimaanpassung. Eine Kombination grauer und grün-blauer Maßnahmen ist aufgrund der vielen Synergien mit Klima- und Naturschutz aber grundsätzlich einer Beschränkung auf graue Maßnahmen vorzuziehen.

c) Empfehlungen

Um Städte und Siedlungen zukunftstauglich, also klimafreundlich und -angepasst zu gestalten und gleichzeitig die Lebensräume und Nahrungsquellen von Tieren und Pflanzen dauerhaft zu schützen, empfiehlt der NABU:

- Die Schaffung von platzsparenden Wohnangeboten: Dazu zählen unter anderem gemeinschaftliche Wohnformen sowie Angebote zum selbstbestimmten Wohnen für Single-Senioren aus Einfamilienhäusern in ihrem angestammten Wohnumfeld, ergänzt durch Wohnungstauschbörsen und zugeschnittene Mobilitätskonzepte.
- Eine angepasste Landschaftsplanung: Die Länder müssen Bewertungsmethoden und Mindestinhalte für eine qualifizierte und weitgehend einheitliche Umsetzung der Landschaftsplanung und naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung entwickeln.



Nachhaltige Entwicklung von Siedlungen

Ein Grundsatzprogramm des NABU legt dar, wie nachhaltige Siedlungsentwicklung aussehen kann. [Hier](#) können Sie es lesen!

Dabei müssen Kriterien wie landschaftliche Weite und unzerschnittene Räume bzw. Verinselung oder Zerschneidung stärker in die Bewertung einfließen.

- Mehr Raum für die Natur: Im Sinne der „doppelten Innenentwicklung“ müssen der Erhalt und die Entwicklung innerörtlicher Naturräume bei gleichzeitiger baulicher Nachverdichtung gefördert werden. Dies gelingt z. B. durch Freiflächensatzungen, in denen die Erhaltung privater Freiflächen und Begrünungsmaßnahmen geregelt sind.
- Eine Förderung grün-blauer Infrastruktur: Für grün-blaue Infrastruktur, also für Biotopverbund- und Klimaanpassungsmaßnahmen, Gewässerrenaturierungen und Naturerfahrungsräume etc., sind verbindliche Maßstäbe aufzustellen, wie es sie für die „graue Infrastruktur“, also bspw. für Straßen und Radwege schon lange gibt. Alle Städte und Gemeinden müssen eine Baumschutzsatzung für den gesamten Siedlungsbereich erlassen und regionalisierte Pflanzlisten mit empfehlenswerten, möglichst standortheimischen Arten herausgeben.
- Eine effizientere Nutzung von Flächen: Flächennutzungspläne sollten durch Landschaftspläne ergänzt werden, die verbindliche Vorgaben für Flächennutzungen in Bebauungsplänen festlegen. Die Einführung gemeindlicher Baulücken-, Leerstands- und Nutzflächenkataster muss verpflichtend sein.
- Die Umsetzung der Idee der „Schwammstadt“: Damit Wasser bei Starkregen nicht zu Sturzfluten und Überschwemmungen führt, müssen große Flächen entsiegelt und begrünt oder alternativ mit durchlässigen Materialien ausgestattet werden. Vorhandene Grün- bzw. Freiflächen sollten vor Versiegelung geschützt werden.
- Eine Förderung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung: Durch Anpassung rechtlicher Regelungen und finanzielle Anreize muss die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung gefördert werden. So sollte flächendeckend eine nach Niederschlags- und Schmutzwasser gesplittete Abwassergebühr eingeführt werden. Der Anschlusszwang an die Kanalisation muss bei Regenentwässerung mit akzeptierten Mitteln aufgehoben bzw. die entsprechenden kommunalen Satzungen an Landesrecht angeglichen werden.
- Die Abschaffung steuerlicher Fehlanreize und schädlicher Subventionen sowie eine zukunftsweisende Umgestaltung des Baurechts: Entsprechend sind die Aussetzung der Kompensationsverpflichtung und das beschleunigte Bebauungsplanverfahren für Außenbereichsflächen gemäß § 13a bzw. 13b BauGB zu streichen.
- Eine Förderung der „Stadt der kurzen Wege“: ein attraktives Angebot von Fuß- und Radwegen sowie öffentlichem Nahverkehr; Schaffung gemischt-genutzter Quartiere mit großzügigen, schnell erreichbaren Grün- und Freizeitflächen.
- Einen angepassten Gebäudebestand: Die öffentliche Hand sollte dabei als Vorbild vorangehen und ihre Gebäude bzw. Gelände nachhaltig und klimaangepasst (um-)gestalten. Auch sollte ein Sanierungsprogramm für Kommunalverwaltungen, Wohnungsunternehmen und Betriebe aufgelegt werden. Zu fördern ist etwa die energetische Sanierung von Gebäuden, die Begrünung von Dächern oder Fassaden und die Installation von Photovoltaik- oder solarthermischen Anlagen auf Dächern. Die Freigabe für Sanierungsarbeiten sollte nur mittels Nachweispflicht für die Überprüfung und Durchführung auf artenschutzrechtliche Erfordernisse erfolgen.

IV. Quellenangaben

Bei den glossarartigen Erläuterungen in der Marginalspalte handelt es sich größtenteils um wörtliche Übernahmen aus den angegebenen Quellen, die zwecks besserer Lesbarkeit ggf. leicht verändert wurden. Auf Anführungszeichen wurde verzichtet.

Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z., & Sanchez, A. (2019). [Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management](#). *Journal of environmental management*, 239, 244-254.

Auerswald, K., Fischer, F., Winterrath, T., Elhaus, D., Maier, H., & Brandhuber, R. (2019). [Klimabedingte Veränderung der Regenerosivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen](#). *BoS Erg.-Lfg.*, 2 (12)

AWI (2014). [Die Folgen des Klimawandels für das Leben in der Nordsee](#). Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung.

Badeck, F. W., Böhning-Gaese, K., Cramer, W., Ibisch, P. L., Klotz, S., Kreft, S., ... & Zander, U. (2007). [Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel: Risiken und Handlungsoptionen](#). *Naturschutz und biologische Vielfalt*, 46, 149-166.

Baranov, V., Jourdan, J., Pilotto, F., Wagner, R., & Haase, P. (2020). [Complex and nonlinear climate-driven changes in freshwater insect communities over 42 years](#). *Conservation Biology*, 34(5), 1241-1251.

Baumüller, N. (2018). [Stadt im Klimawandel: Klimaanpassung in der Stadtplanung – Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente](#). Universität Stuttgart, Fakultät Architektur und Stadtplanung.

BBSR (2009a). [Klimawandelgerechte Stadtentwicklung: Wirkfolgen des Klimawandels](#). BBSR-Online-Publikation, Nr. 23/2009. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

BBSR (2016). [Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region: Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen](#). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.

Becker, P., Becker, A., Dalelane, C., Deutschländer, T., Junghänel, T., & Walter, A. (2016). [Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland: Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung](#). Deutscher Wetterdienst.

Beck, S., Bovet, J., Baasch, S., Reiß, P., & Görg, C. (2011). [Synergien und Konflikte von Anpassungsstrategien und-maßnahmen](#). Förderkennzeichen (UFOPLAN) (FKZ 3709 41 126). Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ (Hrsg.) im Auftrag des Umweltbundesamts. Leipzig.

Bender, S., Butts, M., Hagemann, S., Smith, M., Vereecken, H. & Wendland, F. (2017): [Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland: Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013](#). Report 29. Climate Service Center Germany, Hamburg.

BfG (2019). Extremereignisse im Elbegebiet: Hochwasser, Niedrigwasser. Abgerufen am 19.07.2021 via http://undine.bafg.de/vorschau/elbe/extremereignisse/elbe_extremereignisse.html. BMU-Projekt „Verbesserung der Datengrundlage zur Bewertung hydrologischer Extreme“, Bundesanstalt für Gewässerkunde.

BfG (2020). Niedrigwasserereignisse im Rheingebiet: Das Niedrigwasser im Sommer und Herbst 2003. Abgerufen am 19.07.2021 via http://undine.bafg.de/rhein/extremereignisse/rhein_nw2003.html. Bundesanstalt für Gewässerkunde.

BfG (ohne Jahr). [Mittlere jährliche klimatische Wasserbilanz](#). Geoportal der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

BfN (2021). Ökosystemleistungen von Auen und Fließgewässern. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.bfn.de/themen/gewaesser-und-auenschutz/oekosystemleistungen-auen.html>. Bundesamt für Naturschutz.

Bitá, C., & Gerats, T. (2013). [Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops](#). *Frontiers in plant science*, 4, 273.

Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A., Parajka, J., Merz, B., ... & Živković, N. (2019). [Changing climate both increases and decreases European river floods](#). *Nature*, 573(7772), 108-111.

BMBF (2014). Alles im Fluss: Eine deutsche Wasserbilanz. Abgerufen am 19.07.2021 via <http://www.bmbf.wasserfluesse.de/>. Bundesministerium für Bildung und Forschung.

BMEL (2021). [Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2020](#). Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Referat 515 – Nachhaltige Waldbewirtschaftung, Holzmarkt, Bonn.

BMU (2020a). [Die Lage der Natur in Deutschland: Ergebnisse von EU-Vogelschutz- und FFH-Bericht](#). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Bundesamt für Naturschutz.

- BMU (2020b). [Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel](#). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BMU (2021a). Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.bmu.de/pressemitteilung/treibhausgasemissionen-sinken-2020-um-87-prozent/>. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BMU (2021b). [Auenzustandsbericht 2021: Flussauen in Deutschland](#). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Bundesamt für Naturschutz.
- BMU (2021c). [Nationale Wasserstrategie: Entwurf des Bundesumweltministeriums](#). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- Böhm, H., Dauber, J., Dehler, M., Gallardo, D. A. A., de Witte, T., Fuß, R., ... & Schittenhelm, S. (2020). [Fruchterfolge mit und ohne Leguminosen: ein Review](#). *Journal für Kulturpflanzen*, 72(10-11), 489-509.
- Böse, M., Ehlers, J., & Lehmkuhl, F. (2018). [Die Ostseeküste](#). *Deutschlands Norden: Vom Erdaltertum zur Gegenwart*. Springer, Heidelberg.
- Bolte, A. (2016). [Chancen und Risiken der Buche im Klimawandel](#). *AFZ-DerWald*, 71, 17-19.
- Bolte, A., & Ibisch, P. L. (2007). [Neun Thesen zu Klimawandel, Waldbau und Waldnaturschutz](#). *AFZ/Der Wald*, 11, 572-576.
- Bonfils, P., Kuster, T. M., Fonti, P., Arend, M., & Vollenweider, P. (2013). [Die Eiche reagiert plastisch](#). *Wald und Holz*, 3(13), 45-49.
- Brears, R. C. (2018). [Blue and green cities: the role of blue-green infrastructure in managing urban water resources](#). Springer.
- Brasseur, G. P., Jacob, D., & Schuck-Zöllner, S. (2017). [Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven](#). Springer Nature, Heidelberg.
- Bronstert, A., & Engel, H. (2005). Veränderungen der Abflüsse. In: Lozán, J.L., Graßl, H. Hupfer, P. Karbe, L. & Schönwiese, C.-D. *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*
- Brune, M., Bender, S. und Groth, M. (2017): [Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung](#). Report 30. Climate Service Center Germany, Hamburg.
- Brunke, M. (2008). [Klimawandel und Fließgewässer in Schleswig-Holstein](#). Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. *Jahresbericht des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein 2007/08*, Flintbek.
- Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P. J., Rybníček, M., Kolář, T., Kyncl, T., ... & Trnka, M. (2021). [Recent European drought extremes beyond Common Era background variability](#). *Nature Geoscience*, 14(4), 190-196.
- BUND (2009). [BUND Studie – Abwärmelast Rhein](#). Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, BUND Rheinland-Pfalz, Mainz.
- BUND (2013). [Sturmfluten und Sturmhochwasser](#). Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland.
- BUND (2020). [BUND-Gewässerpapier: Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt. Ein Hintergrunddossier zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Zustand und die Gefährdung der Gewässer in Deutschland und die Folgen für die Nutzungen](#). Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
- Carstens, V. R. (2008). [Ohne Klei kein Deichbau: Reichen die Vorräte?](#) Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2009). Jahresbericht, 32-33.
- CBD (2009). [Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation](#): Report of the second ad hoc technical expert group on biodiversity and climate change. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity – Sekretariat des Übereinkommens über die biologische Vielfalt.
- Chmura, G. L., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R., & Lynch, J. C. (2003). [Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils](#). *Global biogeochemical cycles*, 17(4).
- Crosby, S. C., Sax, D. F., Palmer, M. E., Booth, H. S., Deegan, L. A., Bertness, M. D., & Leslie, H. M. (2016). [Salt marsh persistence is threatened by predicted sea-level rise](#). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 181, 93-99.
- Depietri, Y., & McPhearson, T. (2017). [Integrating the grey, green, and blue in cities: nature-based solutions for climate change adaptation and risk reduction](#). In: Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: Linkages between science, policy and practice*. Springer Nature, Cham, 91-109.
- Dickhaut, W., Doobe, G., Eschenbach, A., Fellmer, M., Gerstner, J., Gröngroft, A., ... & Winkelmann, A. (2019). [Entwicklungskonzept Stadtbäume. Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen](#). HafenCity Universität Hamburg.

- Dissanayake, D. M. P. K., Ranasinghe, R., & Roelvink, J. A. (2012). [The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise](#). *Climatic change*, 113(2), 253-276.
- DKK (2019). [Zukunft der Meeresspiegel: Fakten und Hintergründe aus der Forschung](#). Deutsches Klima-Konsortium, Berlin.
- DKK (2020). [Was wir heute übers Klima wissen: Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind](#). Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de.
- DKK (ohne Jahr). So funktioniert Klimamodellierung: Glossar. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.klimasimulationen.de/modelle.html#Glossar>. Deutsches Klima-Konsortium.
- Duarte, B., Martins, I., Rosa, R., Matos, A. R., Roleda, M. Y., Reusch, T. B., ... & Jueterbock, A. (2018). [Climate change impacts on seagrass meadows and macroalgal forests: an integrative perspective on acclimation and adaptation potential](#). *Frontiers in Marine Science*, 5, 190.
- Durka, W. und Michalski, S. G. (2013). [Genetische Vielfalt und Klimawandel](#). In: Essl, F. & Rabitsch, W. *Biodiversität und Klimawandel: Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- DVGW (2020). [Die Wasserversorgung im Trockenjahr 2018 Stressindikatoren und Ergebnisse einer aktuellen DVGW-Umfrage](#). Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs DVGW e. V., Bonn.
- DDV (2017). [Natürlich Dachbegrünung: Natur genießen – Geld sparen – Umwelt schützen](#). Deutscher Dachgärtner Verband e. V., Nürtingen.
- DWD (2019). [Bundespressekonferenz zum Monitoring-Bericht zu Klimawandelfolgen in Deutschland am 26.11.2019 in Berlin](#). Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2020a). [Was wir heute über das Extremwetter in Deutschland wissen: Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in Deutschland](#). Deutscher Wetterdienst und Extremwetterkongress Hamburg.
- DWD (2020b). [Nationaler Klimareport: Klima – Gestern, heute und in der Zukunft](#). Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- DWD (2020c). Perzentile. Abgerufen am 09.08.2021 via https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/perzentile_doku.html.
- DWD (2021a). ‚Virtuelle‘ Klima-Presskonferenz 2021 des Deutschen Wetterdienstes: Abbildungen zur Pressemitteilung. Abgerufen am 09.07.2021 via https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2021/20200317_pressemitteilung_klima_pk_news.html?nn=16210.
- DWD (2021b). [Klimastatusbericht Deutschland: Jahr 2020](#). Deutscher Wetterdienst, Bildungszentrum, Langen.
- DWD (2021c). Tweet von @DWD_presse vom 14.06.2021. Abgerufen am 09.07.2021 auf Twitter via https://twitter.com/DWD_presse/status/1404364730710515715/photo/1. Deutscher Wetterdienst.
- DWD (2021d). Grafik: Phänologische Jahreszeiten für Deutschland. Abgerufen am 09.07.2021 via https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/produkte/phaenouhr/doppeltep_haenouhr_grafik.jpg;jsessionid=369025F8DE47D87EDB120364FE452E61.live21072?_blob=normal&v=9. Deutscher Wetterdienst.
- DWD (ohne Jahr a). Die phänologische Uhr. Abgerufen am 09.07.2021 via <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/produkte/phaenouhr/phaenouhr.html>. Deutscher Wetterdienst.
- DWD (ohne Jahr b). RCP-Szenarien: Die neuen RCP-Szenarien für den 5. IPCC Sachstandsbericht. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien.html?nn=582524>. Deutscher Wetterdienst.
- DWD (ohne Jahr c). SRES-Szenarien: Die SRES-Szenarien entsprechen den Stand der Wissenschaft aus dem Jahr 2000. Der aktuelle Stand der Wissenschaft wird durch die RCP-Szenarien repräsentiert. Abgerufen am 19.07.2021 via https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/sres-szenarien_node.html. Deutscher Wetterdienst.
- DWD (ohne Jahr d). Dürre. Abgerufen am 20.08.2021 via <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100578&lv3=603288>. Deutscher Wetterdienst.
- Ebeling, C., & Gaertig, T. (2015) [Natürliche Regeneration von Fahrspuren im Wald: Bodenphysikalische und bodenbiologische Betrachtungen](#). *Jahrestagung der DBG 2015: Unsere Böden – unser Leben*, 05.-10.09.2015, München.

- EEA (2005). [Vulnerability and adaptation to climate change in Europe](#). EEA Technical report No 7/2005. European Environment Agency, Kopenhagen.
- Elad, Y., Cytryn, E., Harel, Y. M., Lew, B., & Graber, E. R. (2011). [The biochar effect: plant resistance to biotic stresses](#). *Phytopathologia Mediterranea*, 50(3), 335-349.
- Ellwanger, G. [Das Schutzgebietsnetz NATURA 2000 im Klimawandel – Risiken und Handlungsoptionen](#). In: Korn H., Schliep R., & Stadler, J. Biodiversität und Klima-Vernetzung der Akteure in Deutschland V: Ergebnisse und Dokumentation des 5. Workshops. Bundesamt für Naturschutz, *BfN-Skripten*, 252, 48-53.
- Engesser, R., Forster, B., Meier, F., & Wermelinger, B. (2008). [Forstliche Schadorganismen im Zeichen des Klimawandels](#) | [Effects of climate change on forest pests and diseases](#). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 159(10), 344-351.
- Essl, F., & Rabitsch, W. (2013). [Biodiversität und Klimawandel: Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa](#). Springer-Verlag, Heidelberg.
- Esteves, L. S. (2016) [Coastal Squeeze](#). In: Kennish M. J. (Hrsg.) *Encyclopedia of Estuaries*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer, Dordrecht.
- Etzold, S., Wunder, J., Braun, S., Rohner, B., Bigler, C., Abegg, M., & Rigling, A. (2016). [Mortalität von Waldbäumen: Ursachen und Trends](#). In: Pluess, A. R., Augustin, S., & Brang, P. *Wald im Klimawandel: Grundlagen für Adaptionsstrategien*. Haupt Verlag.
- EU-Kommission (ohne Jahr). Übereinkommen von Paris. Abgerufen am 16.07.2021 via https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de#tab-0-0.
- Faist, H., Recknagel, T., & Vietinghoff, H. (2020): [Historische Abflussdaten für die Elbe – Ableitung von Tagesabflüssen am Pegel Magdeburg-Strombrücke im Zeitraum von 1727 bis 1890](#). Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde, *Mitteilungen*, 34.
- Flood.firetree.net (ohne Jahr). Ohne Titel. Abgerufen am 19.07.2021 via <http://flood.firetree.net/?l=48.3416,14.6777&z=13&m=7>.
- Ford, J. (2007). [Emerging trends in climate change policy: the role of adaptation](#). *Journal of Climate*, 3(2), 12.
- Foster, J., Lowe, A., & Winkelmann, S. (2011). [The value of green infrastructure for urban climate adaptation](#). *Center for Clean Air Policy*, 750(1), 1-52.
- Fuchs, K., Hörtnagl, L., Buchmann, N., Eugster, W., Snow, V., & Merbold, L. (2018). [Management matters: testing a mitigation strategy for nitrous oxide emissions using legumes on intensively managed grassland](#). *Biogeosciences*, 15(18), 5519-5543.
- GCA (2019). [Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience](#). Global Commission on Adaptation, Rotterdam.
- Geburek, T. (2006). [Klimawandel – Forstliche Maßnahmen aus genetischer Sicht](#). *Klimawandel – Auswirkungen auf die Forstwirtschaft*. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft Österreich, *BFW Praxis Information*, 10, 12-14.
- Germer, S., Kaiser, K., Mauersberger, R., Stüve, P., Timmermann, T., Bens, O., & Hüttl, R. F. (2010). [Sinkende Seespiegel in Nordostdeutschland: Vielzahl hydrologischer Spezialfälle oder Gruppen von ähnlichen Seesystemen?](#) In: Deutsches Geoforschungszentrum GFZ. *Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen*, 40-48.
- Guntern, J., Eichler, A., Hagedorn, F., Pellissier, L., Schwikowski, M., Seehausen, O., ... & Altermatt, F. (2020). [Übermäßige Stickstoff- und Phosphoreinträge schädigen Biodiversität, Wald und Gewässer](#). *Fact-sheets/Swiss Academies*, 15(8), 1-8.
- Haase, D. (2016). [Was leisten Stadtökosysteme für die Menschen in der Stadt?](#) In: Breuste, J., Pauleit, S., Haase, D., & Sauerwein, M. *Stadtökosysteme*. Springer, Berlin Heidelberg, 129-163).
- Hanewinkel, M., Hummel, S., & Cullmann, D. A. (2010). [Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany](#). *Forest Ecology and Management*, 259(4), 710-719.
- Harrison, P., Berry, P. M., Butt, N., & New, M. (2006). [Modelling climate change impacts on species' distributions at the European scale: implications for conservation policy](#). *Environmental Science & Policy*, 9(2), 116-128.
- Hartl, W., Erhart, E., & Feichtinger, F. (2012). [Humusaufbau auf Ackerflächen im Zusammenhang mit Klima-, Boden- und Gewässerschutz](#). 3. *Umweltökologisches Symposium*, 39-44.
- Hauck, M., Leuschner, C., & Homeier, J. (2019). [Temperate Waldzone](#). In: *Klimawandel und Vegetation: Eine globale Übersicht*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 183-238

- Heiland, S., Schliep, R., Sukopp, Dr U., & Braeckvelt, E. (2019). [Indikatoren und Berichterstattung für die Deutsche Anpassungsstrategie: Hintergrundpapier Handlungsfeld Biologische Vielfalt](#). Bundesamt für Naturschutz.
- Helbig, M. (2012). [Einflüsse von erhöhtem CO₂ und Trockenstress auf Physiologie und Anatomie von *Populus x canescens* \(Ait\) und *Fagus sylvatica* \(L.\)](#). Doktorarbeit, Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg.
- Heller, C., Klingenfuss, C., Möller, D., & Zeitz, J. (2016). [Bewertung der Ökosystemleistungen von Moorböden am Beispiel Berlins – Grundlage für den Moor- und Klimaschutz](#). *TELMA-Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde*, 46, 15-38.
- Helmholtz-Zentrum Hereon (ohne Jahr). Bisheriger Meeresspiegelanstieg. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://meeresspiegel-monitor.de/cuxhaven/sla/index.php.de>.
- Hemmerle, H., & Bayer, P. (2020). [Climate change yields groundwater warming in Bavaria, Germany](#). *Frontiers in Earth Science*, 8, 523.
- Hennig, H., & Hilgert, T. (2021). [Der Grundwasserhaushalt in Vorpommern – Seine anthropogene Prägung, Auswirkungen von Klimaänderungen und Anpassungsstrategien](#). *Grundwasser*, 26(1), 3-16.
- Herzog, P., Fischer, H., & Horchler, P. (2021). [Hoch- und Niedrigwasser an großen Fließgewässern aus quantitativer und qualitativer Sicht sowie ökologische Auswirkungen](#). In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): *Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*, 65, 5-15.
- Hirschfeld, J. (2015). [Wo ist Wasser in Deutschland knapp und könnte es in Zukunft knapper werden](#). *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 8(11), 710-715.
- Ibisch, P. L., & Kreft, S. (2008a). [Anpassung an den Klimawandel: eine systematische Analyse von Handlungsoptionen für den Naturschutz](#). *ANLiegen Natur*, 32(1), 3-23.
- Ibisch, P. L., & Kreft, S. (2008b). [Natura 2000 und Klimawandel](#). Tagungsband des Deutschen Naturschutztages.
- Ibisch, P. L., & Kreft, S. (2008c). [Klimawandel gleich Naturschutzwandel? Klimawandel und Biodiversität: Tagungsdokumentation 8./9. April 2008](#). Naturschutzbund Deutschland (e. V.).
- Ibisch, P. L., Luthardt, V., Kreft, S., Nusko, N., Strixner, L., & Arndt, P. (2014). [Anpassung des Naturschutzes an den Klimawandel in Brandenburg: Empfehlungen für Entscheidungsträger](#). Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde
- Ibisch, P. L., & Kreft, S. (2009). [Konzepte zur Anpassung des Naturschutzes an den Klimawandel](#). In: Korn H., Schliep R., & Stadler, J. Biodiversität und Klima-Vernetzung der Akteure in Deutschland V: Ergebnisse und Dokumentation des 5. Workshops. Bundesamt für Naturschutz, *BfN-Skripten*, 252, 41-47.
- International Energy Agency (2008), [Implications of the reference scenario for the global climate](#). *World Energy Outlook*, Paris, 381-406.
- IEP (2020). [Ecological Threat Register 2020: Understanding Ecological Threats, Resilience and Peace](#). Institute for Economics & Peace, Sydney.
- IGB (2018). [Seen im Klimawandel: Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung](#). Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin.
- IOC (2021). [Integrated ocean carbon research: a summary of ocean carbon research, and vision of coordinated ocean carbon research and observations for the next decade](#). Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO (UNESCO-IOC), Paris.
- IPBES (2019): [Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services](#). E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – Zwischenstaatliche Plattform für Biodiversität und Ökosystem-Dienstleistungen (Weltbiodiversitätsrat), Bonn.
- IPCC (1992). [Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments: IPCC First Assessment Report Overview and Policymaker Summaries and 1992 IPCC Supplement](#). Intergovernmental Panel on Climate Change – Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Weltklimarat).
- IPCC (2012). [Summary for Policymakers](#). In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 1-19.
- IPCC (2007). [Klimaänderung 2007: Synthesebericht](#). Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung [Hauptautoren: R. K. Pachauri

und A. Reisinger (Hrsg.)). IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. Berlin, 2008.

IPCC (2013/2014a). [Anhang zu den Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger der Beiträge der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen \(IPCC\)](#). Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.

IPCC (2013/2014b). [Klimaänderung 2013 – Naturwissenschaftliche Grundlagen: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger](#). Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern, 2016

IPCC (2014). [Klimaänderung 2014: Synthesebericht](#). Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [Hauptautoren, R. K. Pachauri und L. A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.

IPCC (2018). [Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger](#). In: *1,5 °C globale Erwärmung. Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut*. [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (Hrsg.)]. World Meteorological Organization, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom 14.11.2018. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, ProClim/SCNAT, Österreichisches Umweltbundesamt, Bonn/Bern/Wien, November 2018.

IPCC (2019a). [Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger](#). *Klimawandel und Landsysteme: ein IPCC-Sonderbericht über Klimawandel, Desertifikation, Landdegradierung, nachhaltiges Landmanagement, Ernährungssicherheit und Treibhausgasfüsse in terrestrischen Ökosystemen* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendía, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (Hrsg.)]. In Druck. Deutsche Übersetzung auf Basis der Onlineversion inklusive Errata vom 12. Dezember 2019. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, Mai 2020.

IPCC (2019b). [Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger](#). *IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima* [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (Hrsg.)]. In Druck. Deutsche Übersetzung auf Basis der Onlineversion inklusive Errata vom 2. März 2020. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, Januar 2021.

IPCC, 2021: [Summary for Policymakers](#). In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (Hrsg.)]. Cambridge University Press. Im Druck.

Jakoby O., Wermelinger B., Stadelmann G., & Lischke H., 2015: [Borkenkäfer im Klimawandel – Modellierung des künftigen Befallsrisikos durch den Buchdrucker \(Ips typographus\)](#). Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.

Junghänel, T., Bissolli, P., Daßler, J., Fleckenstein, R., Imbery, F., Janssen, W., ... & Weigl, E. [Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021](#). Deutscher Wetterdienst.

Kaiser, K., Germer, S., Küster, M., Lorenz, S., Stüve, P., & Bens, O. (2012). [Seespiegelschwankungen in Nordostdeutschland: Beobachtung und Rekonstruktion](#). *System Erde*, 2(1), 62-67.

Kanter, D. R., Zhang, X., Mauzerall, D. L., Malyshev, S., & Shevliakova, E. (2016). [The importance of climate change and nitrogen use efficiency for future nitrous oxide emissions from agriculture](#). *Environmental Research Letters*, 11(9).

Keller, P. S., Catalán, N., von Schiller, D., Grossart, H. P., Koschorreck, M., Obrador, B., ... & Marcé, R. (2020). [Global CO₂ emissions from dry inland waters share common drivers across ecosystems](#). *Nature communications*, 11(1), 1-8.

Klaus, V. H., Friedritz, L., Hamer, U., & Kleinebecker, T. (2020). [Drought boosts risk of nitrate leaching from grassland fertilisation](#). *Science of The Total Environment*, 726, 137877.

Klimaateffectatlas (ohne Jahr). Climate Impact Atlas. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.klimaateffectatlas.nl/en/>.

- KLIWA (2010). [Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturlauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung](#). Kooperationsvorhaben KLIWA – Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- KLIWA (2015). [Einfluss des Klimawandels auf Seen: Literaturlauswertungsstudie im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA](#). Kooperationsvorhaben KLIWA – Klimaveränderung und Wasserwirtschaft, Konstanz.
- KLIWA (2019). [KLIWA-Kurzbericht: Das Jahr 2018 im Zeichen des Klimawandels? Viel Wärme, wenig Wasser in Süddeutschland](#). Kooperation KLIWA – Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- Kölling, C., & Zimmermann, L. (2007). [Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft](#), 67(6), 259-268.
- Korn, H., & Epple, C. (2006). [Biologische Vielfalt und Klimawandel-Gefahren, Chancen, Handlungsoptionen](#). Bundesamt für Naturschutz, *BfN-Skripten*, 148.
- Kreienkamp, F., Philip, S. Y., Tradowsky, J. S., Kew, S. F., Lorenz, P., Arrighi, J., Belleflamme, A., Bettmann, T., Caluwaerts, S., Chan, S. C., Ciavarella, A., De Cruz, L., de Vries, H., ... & Wanders, N. (2021). [Heavy rainfall which led to severe flooding in Western Europe made more likely by climate change](#). World Weather Attribution Initiative.
- Kröncke, I., Boersma, M., Czeck, R., Dippner, J. W., Ehrich, S., Exo, M. K., ... & Wirtz, K. (2012). [Auswirkungen auf marine Lebensräume](#). In: Mosbrugger, V., Brasseur, G., Schaller, M. & Stribney, B. [Hrsg.]: *Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 106-127).
- Langenberg, J., & Theuvsen, L. (2018). [Agroforstwirtschaft in Deutschland: Alley-Cropping-Systeme aus ökonomischer Perspektive](#). *Journal für Kulturpflanzen*, 70(4), 113-123.
- LANUV NRW (2020). Klimaatlas NRW. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.klimaatlas.nrw.de/karte-klimaatlas>. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen.
- Leopoldina (2021). [Klimawandel: Ursachen, Folgen und Handlungsmöglichkeiten](#). Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle (Saale).
- Lennartz, S. T., Lehmann, A., Herrford, J., Malien, F., Hansen, H. P., Biester, H., & Bange, H. W. (2014). [Long-term trends at the Boknis Eck time series station \(Baltic Sea\), 1957–2013: does climate change counteract the decline in eutrophication?](#) *Biogeosciences*, 11(22), 6323-6339.
- Lexer, M. J., Rabitsch, W., Grabherr, G., Dokulil, M., Dullinger, S., Eitzinger, J., Englisch, M., Essl, F., ... & Zechmeister, H. (2014). [Der Einfluss des Klimawandels auf die Biosphäre und Ökosystemleistungen](#). *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, S. 467–556.
- LfU Brandenburg (2004). [Leitfaden zur Renaturierung von Feuchtgebieten in Brandenburg](#). Landesumweltamt Brandenburg. *Studien und Tagungsberichte*, Band 50.
- Lischke, H. (2020). [Simulation der Baumartenmigration im Klimawandel](#). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 171(3), 151-157.
- Lippelt, J. (2013). [Kurz zum Klima: Klimawandel und die Ausbreitung von Krankheiten – übertriebene Angst oder Wirklichkeit?](#) *ifo Schnelldienst*, 66(04), 55-59.
- LUBW (2021). Fließgewässer, Gewässerökologie: Klimawandel beeinflusst die Gewässerökologie in vielfacher Weise. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung/fliessgewaesser-und-gewaesseroekologie>. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.
- LUNG MV (2011). [Steckbriefe der in M-V vorkommenden Lebensraumtypen des Anhangs I der FFH-Richtlinie - 1330 Atlantische Salzwiesen \(Glauco-Puccinellietalia maritima\)](#). Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow.
- LZW Sachsen-Anhalt (2016). [Definitionen wichtiger forstlicher Begriffe](#). Landeszentrum Wald Sachsen-Anhalt, Halberstadt.
- Mehl, D., Hoffmann, T. G., Iwanowski, J., Schneider, M., & Foy, T. (2018). [Ein Beitrag zur Analyse und Bewertung der Ökosystemleistungen kleiner urbaner Gewässer und Feuchtgebiete am Beispiel der Hansestadt Rostock](#). *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 11(3), 148-153.
- Melcher, A., Pletterbauer, F., Kremser, H., & Schmutz, S. (2013). [Temperaturansprüche und Auswirkungen des Klimawandels auf die Fischfauna in Flüssen und unterhalb von Seen](#). *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 65(11-12), 408-417.
- MELUR SH (2015). [Strategie für das Wattenmeer 2100](#). Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Menn, I., Junghans, C., & Reise, K. (2003). [Buried alive: Effects of beach nourishment on the infauna of an erosive shore in the North Sea](#). *Senckenbergiana maritima*, 32(1), 125-145.

- Möller, A., & Höper, H. (2014): [Bewertung des Einsatzes von Biokohle in der Landwirtschaft aus Sicht des Bodenschutzes](#). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, Geobericht 29.
- Morris, J. T., Sundareshwar, P. V., Nietch, C. T., Kjerfve, B., & Cahoon, D. R. (2002). [Responses of coastal wetlands to rising sea level](#). *Ecology*, 83(10), 2869-2877.
- Müller, J. (2019) [Die forsthydrologische Forschung im Nordostdeutschen Tiefland: Veranlassung, Methoden, Ergebnisse und Perspektiven](#). In: Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Habilitation, *Schriftenreihe Umweltingenieurwesen*, 91.
- Mueller, J. M., & Hellmann, J. J. (2008). [An assessment of invasion risk from assisted migration](#). *Conservation Biology*, 22(3), 562-567.
- Müller, U. (2021). [Trockenheit – mehr als nur Wassermangel?](#) In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): *Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*, 65, 163-174.
- myclimate (ohne Jahr). Was sind CO₂-Äquivalente? Abgerufen am 02.08.2021 via <https://www.myclimate.org/de/informieren/faq/faq-detail/was-sind-co2-aequivalente/>.
- NABU (2020). [Nachhaltige Siedlungsentwicklung: Das NABU-Grundsatzprogramm zum Planen und Bauen in Deutschland](#). Naturschutzbund Deutschland (e. V.).
- Nationalparkamt Vorpommern (2020). Die Boddengewässer im Nationalpark Vorpommersche Boddenlandschaft: Die Lagunen der Ostsee. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.nationalpark-vorpommersche-boddenlandschaft.de/wissen-verstehen/natur-landschaft/lebensraeume/bodden>. Nationale Naturlandschaften in Mecklenburg-Vorpommern.
- Nikelski, G. (2016). [Küstenüberflutungsräume als Beitrag zu Klimawandelanpassung, Klimaschutz und Biodiversität](#). In: Korn, H., Bockmühl, K., & Schliep, R.: Biodiversität und Klima – Vernetzung der Akteure in Deutschland XII. Dokumentation der 12. Tagung. Bundesamt für Naturschutz, *BfN-Skripten*, 432, 83-84.
- Nöges, T., & Nöges, P. (1999). [The effect of extreme water level decrease on hydrochemistry and phytoplankton in a shallow eutrophic lake](#). In: Walz, N., & Nixdorf, B. *Shallow Lakes 98'*, Springer, Dordrecht, 277-283.
- Nussey, D. H., Postma, E., Gienapp, P., & Visser, M. E. (2005). [Selection on heritable phenotypic plasticity in a wild bird population](#). *Science*, 310(5746), 304-306.
- Oertli, J. J. (1993). [Der Saftaufstieg in Bäumen](#). *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 183(3), 169-190.
- Oestermann, F., & Mudersbach, C. (2021): [Trendanalysen von Niedrigwasserkennwerten an Deutschen Flüssen](#). In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): *Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*, 65, 317-326.
- Oldorf, S., & Vohland, K. (2009). [Berücksichtigung des Klimawandels im Pflege- und Entwicklungsplan und der „NATURA 2000“-Managementplanung des Naturparks Stechlin-Ruppiner Land](#). In: Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (ed.). *Ökologische Folgen des Klimawandels*, 5, 63-79.
- Papen, H., & Brüggemann, N. (2006). [Klimarelevante Spurengase im ökologischen Waldumbau](#). In: Fritz, P. *Ökologischer Waldumbau in Deutschland*. oekom, München, 187-204.
- Park, A., & Talbot, C. (2018). [Information underload: ecological complexity, incomplete knowledge, and data deficits create challenges for the assisted migration of forest trees](#). *BioScience*, 68(4), 251-263.
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). [A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems](#). *Nature*, 421(6918), 37-42.
- Pauleit, S., Zölch, T., Hansen, R., Randrup, T. B., & van den Bosch, C. K. (2017). [Nature-based solutions and climate change – four shades of green](#). *Nature-Based solutions to climate change adaptation in urban areas* (pp. 29-49). Springer, Cham.
- PIK (ohne Jahr a). Kippelemente – Achillesfersen im Erdsystem. Abgerufen am 04.08.2021 via <https://www.pik-potsdam.de/de/produkte/infothek/kippelemente>.
- PIK (ohne Jahr b). Klimadaten und Szenarien für Schutzgebiete: Bundesländer. Abgerufen am 19.07.2021 via http://www.pik-potsdam.de/~wrobels/sg-klima-3/nav_bl.html.
- Polte, P., Gröhsler, T., Kotterba, P., von Nordheim, L., Moll, D., Santos, J., ... & Zimmermann, C. (2021). [Reduced reproductive success of Western Baltic herring \(Clupea harengus\) as a response to warming winters](#). *Frontiers in Marine Science*, 8, 10.
- Pompe, S., Berger, S., Bergmann, J., Badeck, F., Lübbert, J., Klotz, S., ... & Kühn, I. (2011). [Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland](#). Bundesamt für Naturschutz, *BfN-Skripten*, 304.
- Pontee, N. (2013). [Defining coastal squeeze: A discussion](#). *Ocean & coastal management*, 84, 204-207.

- Prietzl, J., & Bachmann, S. (2011) [Verändern Douglasien Wasser und Boden? Bayernweite Studie zu ökologischen Aspekten bestätigt Erwartetes und enthüllt Unerwartetes](#). *LWF aktuell*, 84, 50.
- Przybylo, R., Sheldon, B. C., & Merilä, J. (2000). [Climatic effects on breeding and morphology: evidence for phenotypic plasticity](#). *Journal of Animal Ecology*, 69(3), 395-403.
- RADOST (2013). [Ostseeküste 2100 – auf dem Weg zu regionaler Klimaanpassung: Ergebnisse der RADOST-Tour 2012](#). In: Ecologic Institut, *RADOST-Berichtsreihe*, Bericht Nr. 16, Berlin.
- Rauthe M., Brendel C., Helms., Lohrengel A.-F., Meine L., Nilson E., Norpoth M., Rasquin C., Rudolph E., Schade N. H., Deuschländer T., Forbriger M., Fleischer C., Ganske A., Herrmann C., Kirsten J., Möller J., Seiffert R. (2020): [Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren \(SP-103\) im Themenfeld 1 des BMVI-ExpertenNetzwerks](#).
- Redmann, M., Weinreich, A., & Winking, A. (2014). [Klimawandel im Wald – Konzept für eine Anpassungsstrategie für Nordrhein-Westfalen: Klimafolgen, Anpassungsmaßnahmen und klimadynamisches Waldinformationssystem](#). Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, UNIQUE forestry and land use GmbH, Freiburg.
- Reinhardt, F., Herle, M., Bastiansen, F., & Streit, B. (2003). [Ökonomische Folgen der Ausbreitung von Neobiota](#). *Forschungsbericht*, 201(86), 211.
- Reise, J., Urrutia, C., Böttcher, H., & Hennenberg, K. (2020). [Literaturstudie zum Thema Wasserhaushalt und Forstwirtschaft: Studie für den Naturschutzbund Deutschland \(NABU\)](#). Ökoinstitut e. V., Freiburg.
- Reise, K. (1996). [Wattökologische Folgen bei Änderung von Klima und Küste](#). *Schriftenreihe der Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste*, 1, 31-45.
- Reise, K. (2006). [Neue Ufer für die Nordseeküste](#). In: Bungenstock, F., Riexinger, S., & Bittmann, F. *Forschungszentrum Terramare 16*. Beiträge der 24. Jahrestagung des Arbeitskreises „Geographie der Meere und Küsten“, veranstaltet vom 27. bis zum 29. April 2006 in Wilhelmshaven, 22-25.
- Reise, K. (2016): [Meeresspiegelanstieg bedrängt Biodiversität: Was ist zu tun?](#) In: Lozán, J. L., Breckle, S.-W., Müller, R., & Rachor, E. (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*, 314-318.
- Rödger, D., & Schulte, U. (2010). [Amphibien und Reptilien im anthropogenen Klimawandel: Was wissen wir und was erwarten wir](#). *Zeitschrift für Feldherpetologie*, 17(1), 22.
- Roers, M., & Wechsung, F. (2015). [Neubewertung der Auswirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Elbegebiet](#). *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 59(3), 109-119.
- Roloff, A., Gillner, S., & Bonn, S. (2008). [KLimaArtenMatrix für Stadtbaumarten: Gehölzartenwahl im urbanen Raum](#). In: Bund deutscher Baumschulen (Hrsg.). *Forschungsstudien: Klimawandel und Gehölze*, 30-42.
- Schimmelpfennig, S., Heidecke, C., Beer, H., Bittner, F., Klages, S., Krengel, S., & Lange, S. (2018). [Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft: Ergebnisse eines Workshops der Ressortforschungsinstitute FLI, JKI und Thünen-Institut](#). Thünen Working Paper 86.
- Schindler, B. Y., Blank, L., Levy, S., Kadas, G., Pearlmutter, D., & Blaustein, L. (2016). [Integration of photovoltaic panels and green roofs: review and predictions of effects on electricity production and plant communities](#). *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 62(1-2), 68-73.
- Schliep, R., Bartz, R., Dröschmeister, R., Dziock, F., Dziock, S., Fina, S., ... & Heiland, S. (2017). [Indikatorensystem zur Darstellung direkter und indirekter Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt](#). Bundesamt für Naturschutz, *BfN-Skripten*, 470.
- Schmidt, B. R., Zumbach, S., Tobler, U., & Lippuner, M. (2015). [Amphibien brauchen temporäre Gewässer](#). *Zeitschrift für Feldherpetologie*, 22(2), 137-150.
- Schratzberger, M., & Thiel, H. (1995). [Ökologische Auswirkungen von Sandvorspülungen auf die Strandfauna](#). *Die Küste*, 57, (57), 47-64.
- Schüler, S., & Chakraborty, D. (2021). [Limitierende Faktoren für den Douglasienanbau in Mitteleuropa im Klimawandel](#). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 172(2), 84-93.
- Schumacher, A., & Schumacher, J. (2013). [Tauglichkeit der Vogelschutz- und FFH-Richtlinie für Anpassungen an den Klimawandel](#). *Natur und Recht*, 35(6), 377-387.
- Schwaab, J., Davin, E. L., Bebi, P., Duguay-Tetzlaff, A., Waser, L. T., Haeni, M., & Meier, R. (2020). [Increasing the broad-leaved tree fraction in European forests mitigates hot temperature extremes](#). *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.
- Seebacher, F., White, C. R., & Franklin, C. E. (2015). [Physiological plasticity increases resilience of ectothermic animals to climate change](#). *Nature Climate Change*, 5(1), 61-66.

- Sobczyk, V. T. [Die Massenvermehrung des Buchdruckers, *Ips typographus* \(Linnaeus, 1758\), in den Jahren 2018–2020 im sächsischen Teil der Oberlausitz \(Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae\)](#). *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft der Oberlausitz*, 28, 79-84.
- Sommer, R. J., Loschko, T., Riebesell, M., Röseler, W., & Witte, H. (2016). [Phänotypische Plastizität – wie Umwelt und Genetik interagieren: Forschungsbericht 2016](#). Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie.
- Spektrum Akademischer Verlag (1999). Lexikon der Biologie. Abgerufen am 09.07.2021 via <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/>.
- Spektrum Akademischer Verlag (2000). Lexikon der Geowissenschaften. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/>.
- Spektrum Akademischer Verlag (2001). Lexikon der Geographie. Abgerufen am 09.07.2021 via <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/>.
- Staupe, I. R., Waller, D. M., Bernhardt-Römermann, M., Bjorkman, A. D., Brunet, J., De Frenne, P., ... & Baeten, L. (2020). [Replacements of small-by large-ranged species scale up to diversity loss in Europe's temperate forest biome](#). *Nature ecology & evolution*, 4(6), 802-808.
- Stadt Kassel (2021). [Klimafunktionskarte 2030](#). Zweckverband Raum Kassel.
- Staudt, F., Ganai, C., Gijmsan, R., Hass, H. C., Mielck, F., Schürenkamp, D., ... & Schimmels, S. (2019). [Erfahrungen mit Sandersatz im Küstenschutz: Eine allgemeine Entscheidungsunterstützung für die Praxis mit aktuellen Erkenntnissen aus der Wissenschaft](#). Hannover.
- Steinberg, Friederike (2021). Grundwassermangel lässt die Wasserstände der Seen sinken. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.rbb24.de/panorama/beitrag/2021/04/seen-brandenburg-wasser-grundwasser-niedrigwasser-mangel.html>. Rundfunk Berlin-Brandenburg.
- Sybertz, J., & Reich, M. (2018). [Tierarten im Klimawandel in Harz und Lüneburger Heide](#). *Umwelt und Raum*; 10.
- Thober, S., Marx, A., & Boeing, F. (2020). [Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland: Ergebnisse aus dem Projekt HOKLIM: Hochaufgelöste Klimaindikatoren bei einer Erderwärmung von 1.5 Grad](#). Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung.
- Thuiller, W. (2007). [Climate change and the ecologist](#). *Nature*, 448(7153), 550-552.
- Triebe, S. (2007). [Reduktion von Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft: dargestellt für die Bundesländer Brandenburg und Niedersachsen \(Vol. 1\)](#). Josef Eul Verlag GmbH.
- UBA (2008). [Kipp-Punkte im Klimasystem – welche Gefahren drohen?](#) Umweltbundesamt, Dessau.
- UBA (2009). [Klimawandel und marine Ökosysteme: Meeresschutz ist Klimaschutz](#). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2011). [Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel: Landwirtschaft](#). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2014). [Entwicklung biologischer Bewertungsmethoden und -kriterien für Grundwasserökosysteme](#). Umweltbundesamt, Dessau.
- UBA (2015). [Die Wasserrahmenrichtlinie – Deutschlands Gewässer 2015](#). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2016a). [Planen im Klimawandel](#). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2016b). Strukturvielfalt der Wälder. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/strukturvielfalt-der-waelder#mischbestande-fordern-die-waldfunktionen-und-streuen-das-risiko>. Umweltbundesamt.
- UBA (2016c). [Hintergrund/April 2016: Umweltschutz, Wald und nachhaltige Holznutzung in Deutschland](#). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2016d). [Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden](#). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2019a). [Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel: Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung](#). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2019b). WW-I-5: Wassertemperatur stehender Gewässer – Fallstudie. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/ww-i-5-das-indikator#ww-i-5-wassertemperatur-stehender-gewasser-fallstudie>. Umweltbundesamt.
- UBA (2019c). Gewässerentwicklung in der Stadt – geht (fast) überall. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/gewaesserentwicklung-in-der-stadt-geht-fast#renaturierungen-in-staeden-schaffen-lebensqualität>. Umweltbundesamt.

- UBA (2019d). Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasser-bewirtschaften/naturnahe-regenwasserbewirtschaftung>. Umweltbundesamt.
- UBA (2020a) Waldbrände. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/waldbraende>. Umweltbundesamt.
- UBA (2020b). Wasserressourcen und ihre Nutzung. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage>. Umweltbundesamt.
- UBA (2020c). Stickstoffeintrag aus der Landwirtschaft und Stickstoffüberschuss. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/stickstoffeintrag-aus-der-landwirtschaft#stickstoffuberschuss-der-landwirtschaft>. Umweltbundesamt.
- UBA (2020d). Humusstatus der Böden. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/humusstatus-der-boeden#humusfunktionen-und-gehalte-von-boden>. Umweltbundesamt.
- UBA (2021a). Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft. Abgerufen am 08.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#bedeutung-von-landnutzung-und-forstwirtschaft>. Umweltbundesamt.
- UBA (2021b). Trends der Niederschlagshöhe. Abgerufen am 09.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>. Umweltbundesamt.
- UBA (2021c). [Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland: Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land](#). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (2021d). Klimamodelle und Szenarien. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimamodelle-szenarien#was-sind-klimamodelle>. Umweltbundesamt.
- UBA (2021e). Nachhaltige Waldwirtschaft. Abgerufen am 19.07.2021 via <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/nachhaltige-waldwirtschaft#die-vielfaltigen-funktionen-des-waldes>. Umweltbundesamt.
- UFZ (2021). Dürremonitor Deutschland. Abgerufen am 20.08.2021 via <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>. UFZ-Dürremonitor, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung.
- UMO (2010). [Ein Zukunftsbild für eine klimasichere Wattenmeerregion](#). Umweltstiftung Michael Otto.
- Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., Sera, F., Royé, D., Schneider, R., Tobias, A., ... & Gasparrini, A. (2021). [The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change](#). *Nature climate change*, 11(6), 492-500.
- Visser, M. E., & Both, C. (2005). [Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick](#). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1581), 2561-2569.
- VLK (2019). [Klimawandel und Landwirtschaft: Anpassungsstrategien im Ackerbau](#). Verband der Landwirtschaftskammern.
- Vohland, K., Doyle, U., Albert, C., ..., Witing, F. (2015). [Ökosystemleistungen, Biodiversität und Klimawandel: Grundlagen](#). In: Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2015): *Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte*. Hartje, V., Wüstemann, H., & Bonn, A. [Hrsg.]. Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ. Berlin, Leipzig, 66-99.
- von Tiedemann, A., & Ulber, B. (2008). [Verändertes Auftreten von Krankheiten und Schädlingen durch Klimaschwankungen](#). In: von Tiedemann, A.; R. Heitefuss & F. Feldmann (Hrsg.): *Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz*, 79-89.
- Walker, R., Schenk, D., ZinCo, F., Jauch, M., Krummradt, I., Schmitz, H. J., ... & Meinken, E. (2016). [Optimierung der Evapotranspirations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser](#). Abschlussbericht für die Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Freising/Nürtingen.
- Wang, J., Zhang, M., Xiong, Z., Liu, P., & Pan, G. (2011). [Effects of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from two paddy soils](#). *Biology and Fertility of Soils*, 47(8), 887-896.
- WEF (2021). [The Global Risks Report 2021](#), 16th Edition. World Economic Forum – Weltwirtschaftsforum, Genf.
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). [Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review](#). *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 1-20.
- Wolff, C. L., Demarais, S., Brooks, C. P., & Barton, B. T. (2020). [Behavioral plasticity mitigates the effect of warming on white-tailed deer](#). *Ecology and evolution*, 10(5), 2579-2587.

- Woolway, R. I., Jennings, E., Shatwell, T., Golub, M., Pierson, D. C., & Maberly, S. C. (2021). [Lake heatwaves under climate change](#). *Nature*, 589(7842), 402-407.
- Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M., & Sharma, S. (2020). [Global lake responses to climate change](#). *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8), 388-403.
- WOR (2010). [World Ocean Review 1: Mit dem Meer leben](#). maribus gGmbH, Hamburg.
- Wu, X., Brüggemann, N., Gasche, R., Shen, Z., Wolf, B., & Butterbach-Bahl, K. (2010). [Environmental controls over soil-atmosphere exchange of N₂O, NO, and CO₂ in a temperate Norway spruce forest](#). *Global Biogeochemical Cycles*, 24(2).
- WWF (2008). [Klimawandel und Ästuare: Perspektiven für den Naturschutz](#). WWF Deutschland, Frankfurt am Main.
- Xenopoulos, M. A., Lodge, D. M., Alcamo, J., Märker, M., Schulze, K., & Van Vuuren, D. P. (2005). [Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal](#). *Global change biology*, 11(10), 1557-1564.
- Zeitz, J., Fell, H., & Roßkopf, N. (2015). [Aktuelle Zahlen zur Verbreitung der organischen Böden inklusive Moore in Deutschland sowie der darin gespeicherten Menge an organischem Kohlenstoff](#). *TELMA-Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde*, 45, 175-178.

Impressum: © 2021, NABU (Naturschutzbund Deutschland) e. V.
Charitéstraße 3, 10117 Berlin, www.NABU.de. Text: Frauke Scholvin, Tilmann Disselhoff.
09/2021