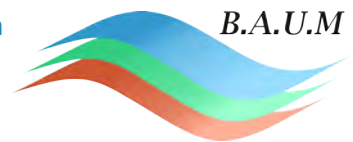


Klimawandel und Wetteranomalien:

Bewertung von Agrar-Umwelt-Maßnahmen



Danksagung

Im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel förderte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschu. und nukleare Sicherheit das Projekt B.A.U.M von Oktober 2015 bis Juni 2018 im Programm „Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel“. Partner waren das Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) und die Forschungseinrichtung ASWEX (Association of Senior Water Experts), zusammen mit den Klimaschutzmanagern von Beeskow und des Landkreises Havelland. Das Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) sowie das Landesamt für Umwelt Brandenburgs (LfU) begleiteten das Projekt.

Für die Zusammenarbeit bedanken wir uns bei Dr. T. Conradt (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK), S. Lüdtko (GeoForschungsZentrum Potsdam, GFZ), U. Häußermann und Dr. M. Bach (Universität Gießen), Dr. J. Kiesel (IGB), Dr. D. Deumlich und Dr. C. Hoffmann (ZALF), J. Pätzolt und A. Oelze (LfU), M. Matheis (ehemals Klimaschutzmanager Beeskow) sowie bei allen Landwirten, die an den Interviews und der Umfrage teilnahmen.

Dank gebührt den Landesämtern für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung bzw. Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburgs, der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, den Landwirtschaftsämtern der Landkreise Havelland und Oder-Spree, K. Lorenz (ehemals Landesbauernverband) sowie dem Deutschen Wetterdienst (DWD), der Climate Research Unit (CRU) der University of East Anglia und den EURO-CORDEX beteiligten Institutionen für die Bereitstellung ihrer Daten.

Häufig verwendete Abkürzungen

ABAG	allgemeine Bodenabtragsgleichung
AL, GL	Acker-, Grünland
AUKM	Agrar-Umwelt-Klima-Maßnahmen
ENSO	El Niño–Southern Oscillation
HVL, LOS	Landkreise Havelland, Oder-Spree
MPFM	ein Verfahren der Datenanalyse
N, P	Stickstoff, Phosphor
NH, SH	Nord-, Südhemisphäre
R-Faktor	Niederschlags- und Abflussfaktor der ABAG
RCP	Szenarien der Treibhausgaskonzentration

Über diese Broschüre

Die vorliegende Broschüre gibt Ihnen einen Überblick über Ergebnisse des Projekts „Klimawandel und Wetteranomalien: Bewertung von Agrar-Umwelt-Maßnahmen“ (B.A.U.M). In seinem regionalen Bezug widmete sich das Projekt der Schnittstelle Klimawandel, Landwirtschaft, Gewässerökologie und zeichnete sich u.a. durch die Einbeziehung von Landwirten und Verwaltungen der Partnerregionen Beeskow und Havelland in die Definition von Arbeitszielen aus.

Als Grundlage für die Diskussion von Anpassungsmaßnahmen stellen wir aktuelle und prognostizierte Klimaänderungen in der Region dar. Dabei berücksichtigen wir zwei Zeithorizonte: kurzzeitige Klimanalysen und datenbasierte Prognosen sollen Landwirte bei ihren Planungen unterstützen, während der Vergleich der Ergebnisse mehrerer Klimamodelle für die längerfristige Perspektive von Landes- und Kreisverwaltungen relevant ist.

Die Broschüre richtet sich aber nicht nur an Landwirte und Verwaltungen, denn Klima und Wetter betreffen uns alle und wir müssen mit Veränderungen angemessen umgehen. Im Unterschied zum Klimaschutz ist das Thema „Klimaanpassung“ jedoch noch nicht in den Partnerregionen verankert. Wir hoffen, dass B.A.U.M zu dessen Etablierung beitragen kann.

Die im Projekt erzeugten Daten, Modelle und Methoden sind nicht auf die beiden Partnerregionen beschränkt und für weitergehende Studien verfügbar. Sprechen Sie uns an, wenn Sie Interesse haben! Die Vorträge unseres Abschluss-Workshops in Beeskow sind online verfügbar (siehe Umschlagseite hinten). Außerdem begleitet ASWEX den Verlauf der Saison 2018 mit vertiefenden Newslettern, die Sie auf der Webseite finden.

Inhalt

Klimawandel & Wetteranomalien: Themen von allgemeinem Interesse.....	2
Befragung von Landwirten zu Klimaänderungen und Maßnahmen.....	5
Leben wir in einem Klimaregime oder in einer Übergangsphase?.....	7
Klimaprognosen anhand von Beobachtungsdaten.....	10
Regionale modellbasierte Klimaszenarien.....	12
Wie wirken sich Klimaänderungen mittelfristig auf Bodenerosion, Wasserhaushalt und Nährstoffeintrag aus?.....	14
Folgen des Klimawandels und Agrar-Umwelt-Maßnahmen.....	21
Fazit und Ausblick.....	28

Klimawandel & Wetteranomalien: Themen von allgemeinem Interesse

Ereignisse wie Starkregen, Sturmtiefs und Hitzewellen werfen stets die Frage nach einer Zunahme von Wetterextremen infolge des Klimawandels auf. Tatsächlich treten Extremereignisse oft nicht isoliert und zufällig auf, sondern sind Teil großräumiger Änderungen, die entweder mit regulären klimatischen Prozessen einhergehen oder selbst Abweichungen von der Norm sein können. Wir müssen zwar lernen, beides besser zu unterscheiden, das Projekt war aber von Beginn an konfrontiert mit einer globalen Klima-Anomalie, die ihresgleichen sucht seit Beginn systematischer Messungen: die extreme Temperatur-Exkursion ab Herbst 2015, die das Ende einer ca. 15-jährigen „Pause“ der globalen Erwärmung einzuläuten schien (Abb. 1).

Wir haben auf diese unerwartete und klimapolitisch brisante Situation reagiert, indem wir sie projektbegleitend analysiert und dabei die Methodik zur datenbasierten Vorhersage weiterentwickelt haben – auch um künftig regionale Veränderungen im Saisonverlauf rechtzeitig zu erkennen. Dazu ist der Abgleich mit dem Erfahrungswissen der Akteure vor Ort wesentlich.

Datenanalysen bestätigen die Wahrnehmungen von uns befragter Landwirte: Seit zwei, drei Dekaden haben Starkregen sowie die Anzahl von Hitzetagen und Trockenphasen zugenommen. Neben Wetteranomalien

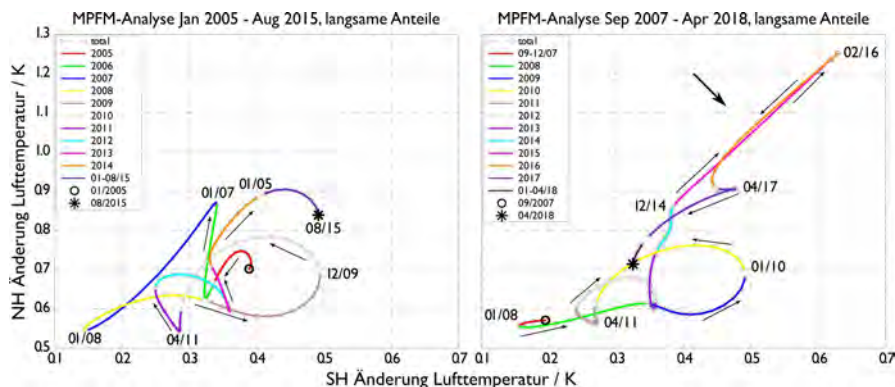
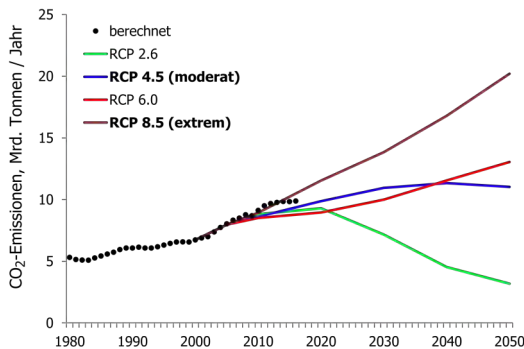


Abb. 1. Dekadischer Verlauf der hemisphärisch gemittelten bodennahen Lufttemperatur in Monatswerten; links: nach Datenlage vor Projektbeginn, rechts: extremer Ausbruch während der Projektlaufzeit und (vorläufige) Rückkehr beim Projektende. Gegeneinander aufgetragen sind die langsamen Temperaturänderungen von Nord- (NH) und Südhemisphäre (SH), die Zeit schreitet entlang der Kurven fort (jede Farbe ein Jahr), MPFM ist die Analysemethode, Referenzzeitraum 1961–90.

Die extreme Exkursion 2015/16 aus dem links dargestellten Temperaturregime vor Projektbeginn verläuft entlang der Bilddiagonale (rechts, dicker Pfeil), besteht also in der gleichzeitigen starken Erwärmung beider Hemisphären.

wurden auch allmähliche Änderungen thematisiert. Steigende Temperaturen erhöhen die Verdunstung und begünstigen „Schädlinge“, verlängern aber auch die Wachstumsperiode. Klimaänderungen und ihre Folgen sind also nicht pauschal zu beurteilen, und für die stabile Bewertung möglicher Anpassungsmaßnahmen ist ein vertieftes Verständnis des regionalen Klimas, einschließlich seiner Vergangenheit, unerlässlich.

Die Mehrheit der befragten Landwirte sieht die Notwendigkeit, sich mit dem Thema „Klimaanpassung“ zu beschäftigen – zumal Klimamodelle das verstärkte Auftreten von Extremereignissen im Zuge des Klimawandels prognostizieren. Die Landwirtschaft kann auf etablierte Maßnahmen zurückgreifen, ist also durchaus widerstandsfähig („resilient“) gegenüber klimatischen Herausforderungen. Das bedeutet aber nicht, auf Klimaschutz zu verzichten, denn unser Handeln beeinflusst das Ausmaß von Klimaänderungen und so auch Art, Umfang und Kosten notwendiger Anpassungen:



Globale CO₂-Emissionen (GCP 2018) und Konzentrationspfade (RCP). RCP sind Grundlage der Abschätzung von Folgen des Klimawandels. Mit Klimaschutz können extreme Entwicklungen wie RCP 8.5 vermieden werden, die vorhandene Anpassungspotenziale überfordern könnten. Wir verglichen RCP 8.5 mit dem eher moderaten RCP 4.5.

Herausforderung Unsicherheit

Ein großes Problem für das Verständnis von Veränderungen und die Planung und Umsetzung von Maßnahmen sind unsichere Klimaaussagen. Modelle mögen zwar plausibel beschreiben, wie sich das Klima unter bestimmten Voraussetzungen entwickeln wird, wir wissen jedoch weder, wie wahrscheinlich diese Voraussetzungen sind, noch wie stabil und robust sich das entsprechende Modellklima einstellt. Klimamodelle sind zudem durch Vereinfachung der komplexen Realität beschränkt, und unterschiedliche Modelle liefern voneinander abweichende Resultate. Es handelt sich also um mögliche Entwicklungen, nicht um harte, belastbare Prognosen.

In der Praxis können Unsicherheiten durch („no-regret“-)Maßnahmen aufgefangen werden, die ein Nachsteuern erlauben oder unabhängig vom Ausmaß des Klimawandels nützlich sind. So verbindet das Humusaufbauprojekt des Havellands Klimaanpassung mit Klimaschutz.

Warum das Projekt B.A.U.M?

B.A.U.M wurde von der Arbeitsgruppe „Nährstoffbilanzen in Flusseinzugsgebieten“ des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei geleitet. Landwirtschaftliche Einträge von Nährstoffen beeinflussen den ökologischen Zustand der Gewässer. Die Ergebnisse helfen uns, mögliche Antworten der Landwirtschaft auf den Klimawandel besser in Modellen abzubilden, die Grundlagen für ein Einzugsgebietsmanagement sind.

ASWEX beteiligte sich, um zu erkunden, inwieweit konzeptionelle Vorstellungen von der Dynamik des globalen Wasserkreislaufs regional wirksam und vor Ort überprüfbar und nutzbar sind. Dazu gehört die Schärfung unseres Methodenprofils für einen breiten Bereich raum-zeitlicher Maßstäbe, von den globalen Playern in der Monsunregion und den tropischen Ozeanen bis hin zu Pegel- und Klima-Stationen im Havelgebiet. Auf einem deutlich höheren Niveau knüpft dies an Aktivitäten der 1990er Jahre an.

Die Stadt Beeskow ist die landesweit erste mit dem „European Energy Award“ (eea) zertifizierte Kommune. Der eea berücksichtigt Maßnahmen und Daten zu Klimawandel und -anpassung. Das Projekt wurde dem Handlungsfeld „Entwicklungsplanung, Raumordnung“ (Evaluation von Klimawandeleffekten) zugeordnet.



Das Havelland setzt seit 2015 ein Projekt zum Humusaufbau um – als einziger Landkreis im Rahmen seines Klimaschutzkonzeptes sowie zusammen mit konventionell und biologisch-dynamisch wirtschaftenden Landwirten. Mehr Humus soll in Sandböden Kohlenstoff und Nährstoffe binden. Das verbessert die Klimabilanz, aktiviert das Bodenleben und steigert die Erträge – und soll zur Anpassung an den Klimawandel beitragen.

Forschungsthemen im Projekt

Mit Beobachtungsdaten und konzeptionellen Erkenntnissen aus der Arbeit mit einem globalen Klimamodell widmeten wir uns vier Fragen:

- Was verstehen wir unter Klimawandel im Unterschied zur -variabilität?
- Gibt es überregionale Zusammenhänge, die uns helfen, Klima, Wetter und Hydrologie vor Ort besser zu verstehen?
- Welche Signale in Niederschlag & Temperatur lassen sich aus dem kurz-periodischen „Rauschen“ isolieren und für die Prognose nutzen?
- Wie können Zusammenhänge nachvollziehbar dargestellt werden?

Mit weiteren Modellen wurden Folgen des Klimawandels und Potenziale landwirtschaftlicher Maßnahmen beispielhaft verglichen hinsichtlich

- Niederschlagserosivität und Bodenabtragsrisiken,
- Wasserhaushalt und Abfluss sowie
- Nährstoffeintrag und Zustand der Oberflächengewässer.

Befragung von Landwirten zu Klimaänderungen und Maßnahmen

Durch Interviews und eine (nicht repräsentative) Online-Umfrage wollten wir verstehen, wie Landwirte Witterungs- und Klimaänderungen wahrnehmen, wie sie darauf reagieren und wie ihr Informationsbedarf ist. Wir bekamen Rückmeldungen von 28 Betrieben.

Die gegenwärtigen Niederschlags- und Temperaturänderungen werden meist negativ bewertet (Abb. 2). Besonders kritisch sind längere und häufigere Trockenperioden im Frühjahr, aber auch häufigere Starkregen, wegen des Risikos von Bodenabtrag. Höhere Temperaturen belasten Tier und Mensch gesundheitlich und erhöhen z.B. das Risiko von Ernteausfall.

Die Befragung bestätigte, dass Maßnahmen vor allem auf den Erhalt des Bodenzustandes und auf den Wasserrückhalt abzielen. Dies dient nicht nur der Steigerung der Produktion, sondern ist Teil der gesetzlich geforderten „guten fachlichen Praxis“, die u.a. die „nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens als natürliche Ressource“ sicherstellen soll (§17(2) BBodSchG).

Mehrheitlich bewerten die Befragten die konservierende Bodenbearbeitung, die Änderung von Fruchtfolgen, den Einsatz festen organischen Düngers und die Vermeidung von Bodenverdichtung durch geringere Auflast als geeignet. Die Ziele von Maßnahmen, wie die Minimierung des Bodenabtrags, sind dabei unterschiedlich erreichbar – z.B. durch eine höhere Bodenbedeckung (Fruchtfolge) oder weniger verdichtete Böden (vgl. Abb. 3).

Maßnahmen wirken auch außerhalb des jeweiligen Betriebes. So erhöht eine bessere Bodenstruktur die Infiltrationskapazität und kann dadurch die Belastung naher Gewässer mit Nährstoffen oder Pestiziden senken. Die Mehrheit nennt auch Klima- und Naturschutz als Maßnahmenziele.

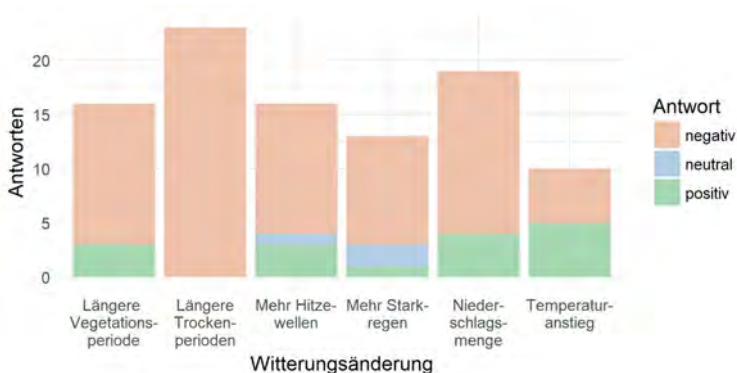


Abb. 2. Ergebnisse der Umfrage: Nehmen Sie Wetterveränderungen wahr? Wie ist der Einfluss auf die Produktion?

Landwirte nehmen also Klimaänderungen wahr und reagieren vielfältig darauf. Es gibt aber geteilte Ansichten zur kritischen Frage, ob Veränderungen Ausdruck des Klimawandels oder Teil der natürlichen Variabilität sind.

Dass der gewünschte Informationsvorlauf zu klimatischen Entwicklungen und Ereignissen nur wenige Wochen bis etwa ein Jahr beträgt, mag überraschen. Dass längere Zeiträume kaum genannt wurden, liegt aber nicht nur an unsicheren Klimamodellen, sondern auch an der Bedeutung kurzfristiger Börseneffekte und an der Änderung von Förderprogrammen.

An dem Bedarf von Landwirten orientierte Klimaanalysen

Auch im Hinblick auf die Umfrage richteten wir die Klimaanalysen aus auf

- die Vorhersagbarkeit des Saisonverlaufs aus der Beobachtung,
- (sommerliche) Starkregen und Trockenheit,
- den dekadischen Zeithorizont für datenbasierte Klimaprognosen, sowie
- modellbasierte Aussagen bis Mitte des Jahrhunderts.

Mit der Analyse von Ergebnissen mehrerer Klimamodelle und einer profunden Auswertung von Beobachtungsdaten zielen wir nicht nur auf kurz- bis mittelfristige Aussagen für Landwirte und Verwaltung, sondern berücksichtigen auch die Unsicherheit von Klimaaussagen. Für die Bewertung und Planung von Maßnahmen ist es außerdem wichtig, Risikogebiete besser zu kennen. Dabei können unsere aktualisierten Ansätze und Datensätze helfen.

Wir nehmen Sie nun zunächst auf eine – zugegeben nicht ganz einfache – Reise mit. Sie soll Ihnen u.a. helfen, die dynamischen Vorgänge besser zu verstehen, die den aktuellen Veränderungen im Klimasystem zugrunde liegen. Wir haben dazu die spezifische Perspektive einer teilweisen tropisch-subtropischen Steuerung unseres Regionalklimas weiter ausgearbeitet und versuchen so, dessen komplexes Erscheinungsbild zu entschlüsseln.

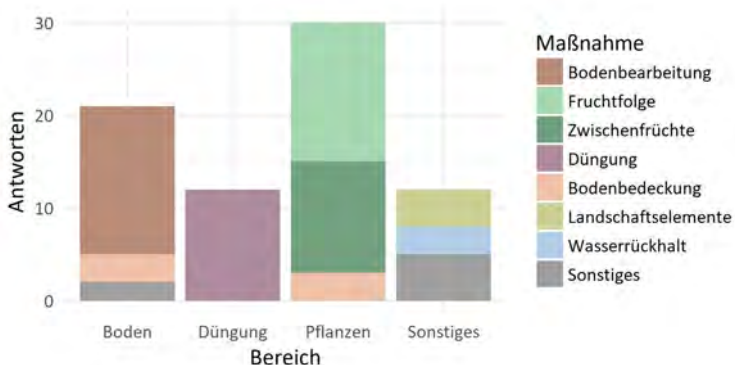


Abb. 3. Gruppierung der (Mehrfach-)Antworten auf die Frage „Welche Maßnahmen empfehlen Sie für Bodenschutz, Wasserrückhalt und Nährstoffrückhalt?“

Leben wir in einem Klimaregime oder in einer Übergangsphase?

Abbildung 4 illustriert den Unterschied zwischen Klimaänderung und Klimavariabilität und zeigt, dass wir den Begriff des „Klimaregimes“ brauchen. Man erkennt nämlich drei verschiedene Stationen („Regimes“) in der Temperaturentwicklung seit Beginn der Messungen:

- eher zirkuläre Schwankungen bis Anfang der 1920er Jahre (A in Abb. 4),
- Hin- und Her-Schwingen Mitte des 20. Jahrhunderts (B), sowie
- Verlangsamung und Stagnationstendenz ab Beginn des 21. Jh.s (C).

Zwischen diesen Zuständen, in denen das Klimasystem zeitweilig gefangen scheint, gibt es Übergänge, die einen Ausbruch aus dem jeweiligen Regime der Klimavariabilität darstellen: die beiden Erwärmungsschübe von ca. 1920 bis Ende der 1930er und von Mitte der 1970er bis Ende des Jahrhunderts.

Der Klimawandel geschieht also nicht nur allmählich, sondern vor allem auch episodisch. Dass es Schwankungen gibt, die nicht durch astronomische Antriebe oder veränderte atmosphärische Bestandteile wie Treibhausgase oder Aerosole zu erklären sind, ist wesentlich: Das Klimasystem folgt nicht gehorsam äußeren Antrieben, sondern entwickelt quasi einen eigenen Willen. Dessen Regeln zu erkennen wäre ein großer Fortschritt.

Wir sprechen von einem nichtlinearen System außerhalb des Gleichgewichts – und schreiben ihm damit Eigenschaften des Lebens auf der Erde zu. Wie dieses besitzt es innere Uhren, die sich untereinander und mit dem Jahresgang der Sonneneinstrahlung arrangieren müssen. Dies führt zu Anomalien globalen Ausmaßes – bekanntestes Beispiel ist der unregelmäßige ENSO-Zyklus (El Niño–Southern Oscillation) im äquatorialen Pazifik.

Mit dem starken El Niño von 1997/98 endet die langsame thermische Drift (in Monatswerten), die die Klimavariabilität seit den 1980er Jahren ausmachte (Abb. 5, links). Das System bricht aus diesem Regime aus, wird aber erneut unter Kontrolle gebracht – ohne dass es sich wieder beruhigt

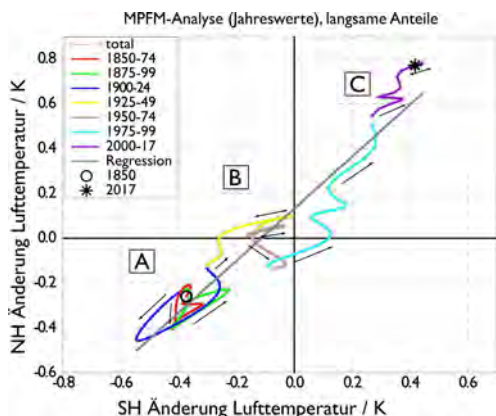


Abb. 4. Verlauf der globalen Erwärmung 1850–2017 (Jahreswerte); Darstellung analog zu Abb. 1 (25 Jahre je Linienfarbe). Seit Ende der 1970er Jahre dominiert die rasche Erwärmung der Nordhemisphäre (NH, türkisch, über 0,7 Grad), so dass regelmäßig angedeutete Stagnationstendenzen überprägt werden. Die Klimaregimes A–C sind im Text beschrieben.

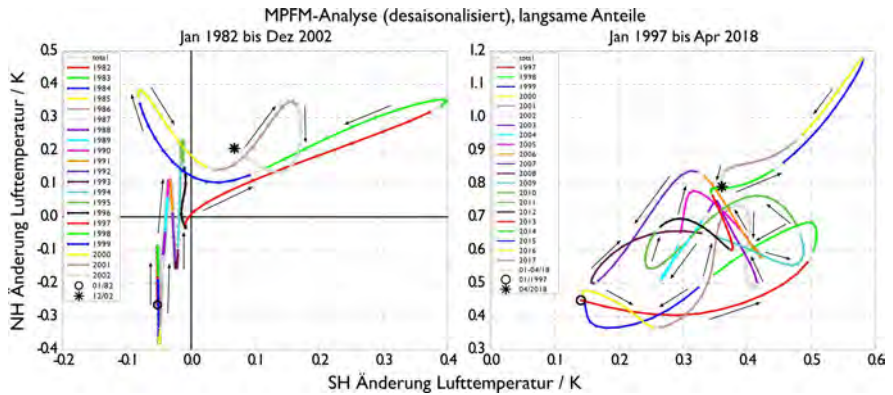


Abb. 5. Verlauf der hemisphärischen Temperaturänderungen seit 1982, analog zu Abb. 1; links 1982–2002 (zentriert), rechts 1997–2018.

(Abb. 5, rechts): Es ist in einem neuen Variabilitätsregime angekommen, das auf der Nordhemisphäre von ca. zweijährigen und auf der Südhemisphäre von vier- bis sechsjährigen Schwankungen dominiert wird (Abb. 6).

Erstere sind aus dem Monsunsystem als Troposphärische Zweijährige Oszillation (TBO) bekannt, letztere repräsentieren den ENSO-Zyklus. Wie sich beide einigen, bestimmt das Klimaregime seit Beginn dieses Jahrhunderts – das zwar im Mittel die langsame Erwärmung der Nordhemisphäre fortsetzt, aber als „Pause“ in der globalen Erwärmung (engl. „hiatus“) seit einigen Jahren klimapolitischen Staub aufwirbelt.

Die gleichzeitigen Temperaturexkursionen auf beiden Hemisphären sind mit starken El Niño-Ereignissen verbunden. Ansonsten sind nur die Minima

MPFM-Analyse 01/97-04/18, desaisonalisiert, langsame Anteile

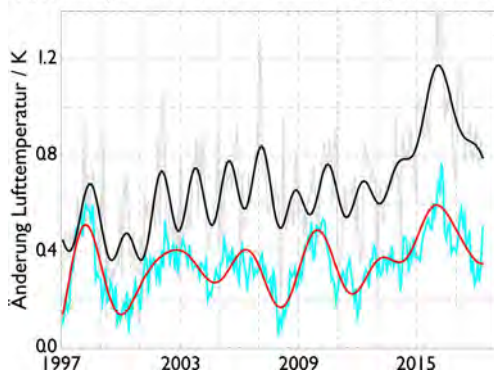


Abb. 6. Temperaturanomalien 01/97–04/18, Nord- (schwarz) bzw. Süd-Hemisphäre (rot).

synchron, und Maxima im Süden fallen mit Minima im Norden zusammen. In dekadischen Analysen haben wir die Klimaregimes seit Beginn der Aufzeichnungen untersucht, um weitere Regeln bzw. Muster zu erkennen sowie Hinweise auf das Ausbruchs- und Einfang-Verhalten des Systems zu bekommen. Dies war im Projekt mit dem extremen El Niño von 2015/16 besonders aktuell.

Abb. 5 legt die Interpretation nahe, dass das Klimasystem mit dem El Niño vor 20 Jahren aus einer Phase relativ „normaler“ Jahresgänge (langsame Driftbewegung) ausbrach und seither nicht wieder in ein solches Verhalten zurückgekehrt ist – mithin der Verlauf jedes einzelnen Jahres eher „anomal“ ist und damit separater Untersuchung bedarf. Diese Interpretation ist indirekt, da die Jahresgänge an jeder Station leider herausgerechnet werden müssen, wenn man hemisphärische Mittelwerte bildet.

Die hohe Variabilität betrifft auch unsere Projektregion, für die wir beispielhaft Daten der Klimastation Lindenberg (Mark) untersucht haben. Abb. 7 zeigt für die Jahre 2013 und 2016 den Verlauf des Nordsommers. Die Analysemethode (MPFM) wird im ASWEX-Newsletter Nr. 1 skizziert.

Wie geht es nun weiter? Synchronisieren sich TBO und ENSO dauerhaft? Wohin führt der nächste Ausbruchsversuch aus dem aktuellen Klimaregime? Wie weit können wir uns auf Regeln in den tropisch-subtropischen Einflüssen auf das Klima mittlerer Breiten stützen, um innersaisonale bis dekadische Entwicklungen vorauszusehen?

All dies gehört zu der ‚akademischen‘ Frage in der Überschrift dieses Kapitels. Von praktischer Bedeutung dürfte sein, dass der Klimawandel sich gerade auch in veränderter Klimavariabilität zeigt, denn dies berührt einen speziellen Aspekt der Diskussion von Anpassungsmaßnahmen: die Zeit, die uns u.a. im aktuellen Klimaregime bis zur nächsten Übergangsphase bleibt.

Die im Projekt entwickelte Methode der innersaisonalen Prognose muss weiter kultiviert und breiter angewendet werden. Bisher haben wir die Klimageschichte von Lindenberg nur mit einer Analyse pro Saison untersucht (wie in Abb. 7), verfolgen aber die 2018er Entwicklung tagesgenau.

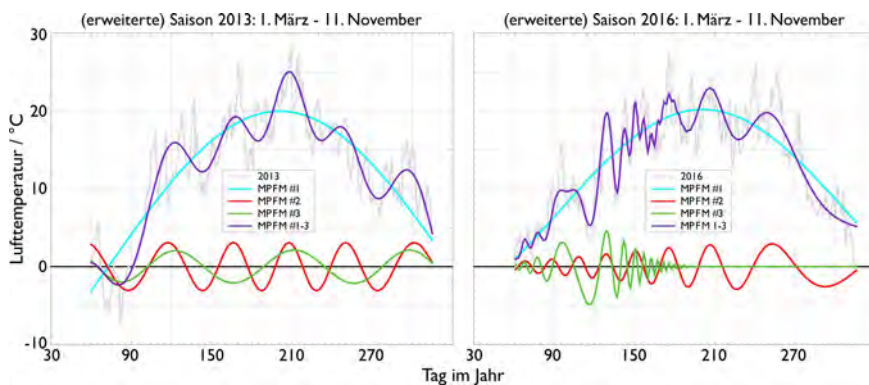


Abb. 7. Temperaturverlauf (grau) an der Station Lindenberg, die drei führenden MPFM-Moden und ihre Summe (violett) für 2013 (links; Beispiel mit ausgeprägter Periodenverdopplung) und 2016 (rechts; vorzeitiges Saisonende).

Klimaprognosen anhand von Beobachtungsdaten

Was sind die Herausforderungen?

Aktueller Hintergrund für die Suche nach einer Alternative zur Modellierung war die ca. 15-jährige weitgehende Stagnation in der globalen Erwärmung, die von den gängigen „großen“ Klimamodellen nicht erfasst wurde. Hinzu kommen notorische Probleme bei der Modellierung des Monsunsystems – und damit des globalen Wasserkreislaufs. Gerade im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels ist dies ein gravierender Mangel.

Er wird zumindest verständlich, wenn man das bei ASWEX betriebene „kleine“ Klimamodell zu Rate zieht. Dessen „Monsunklima“, repräsentiert durch einen 30–60-tägigen Aktivitätszyklus im Nordsummer, der die gesamte planetare Zirkulation erfasst, folgt einem voll ausgeprägten „Pfad ins Chaos“ – mit einem ‚Minenfeld‘ von Instabilitäten, wo unter hundert Modell-Abstürzen einmal die Systemantwort kommt. Bei Modellen mit hohem Ressourcenbedarf ist dies nicht hinnehmbar. Stabilisiert man aber das ASWEX-Modell, so verliert es die qualitativ korrekte innersaisonale Dynamik.

Keine leichte Aufgabe also, ein stabiles „Betriebsregime“ zu finden, das der Realität entspricht. Der Wert dieses räumlich nur grob auflösenden Modells ist daher vor allem konzeptioneller Natur. Mit mehr als tausend Experimenten wurde ein „dynamisches Skelett“ sondiert, das sein Verhalten in geometrische Muster ‚übersetzt‘ und so verständlich macht. Es überrascht, wie sich Details dieser „Geometrie des Verhaltens“ (Abraham & Shaw 1992) in Beobachtungsdaten, selbst unserer Region, wiederfinden.

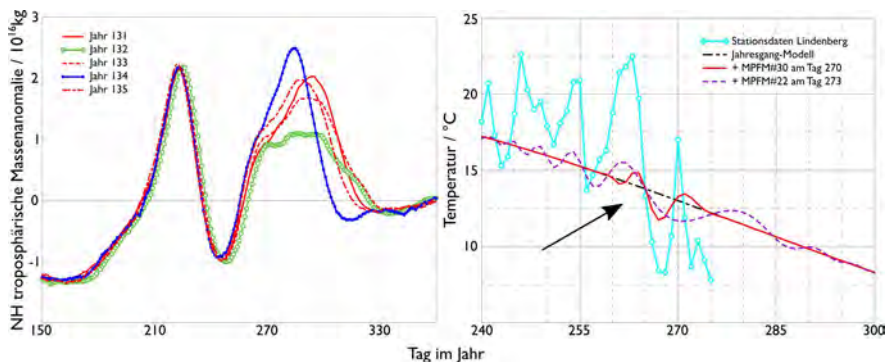


Abb. 8: Monsun-Rückzug als kritisches Phänomen: hohe Sensitivität des Klimasystems ab Mitte September. Links: Luftmassen-Verlagerung zwischen den Hemisphären im ASWEX-Modell für fünf Jahre einer Sommermonsun-Simulation; rechts: Temperatursturz beim kritischen Punkt (Pfeil, Beispiel Lindenberg); Beobachtung und tagesgenaue MPPFM-Analyse lokalisieren das Signal wie im Modell.

Ermutigende Ergebnisse

In den regionalen Beobachtungsdaten zeigen sich analog zum Modell

- der abrupte Übergang zu 30–60-tägiger Aktivität beim Monsuneinsatz,
- die „Periodenverdopplung“ im Hochsommer, die abwechselnd stärkere und schwächere Zyklen (und damit auch Hitzewellen) erzeugt,
- eine Periodenstreckung (Verlangsamung) nach dem Hochsommer,
- die Variabilität und das Timing des Übergangs in den Herbst.

Abb. 8 (links) zeigt eine Art umgekehrtes Roulette beim Monsunrückzug, mit unterschiedlichen Typen des Herbstklimas. Der konkrete Pfad dieses Übergangs ist manchmal frühzeitig nach dem Hochsommer zu „erahnen“: So kündigte sich 2016 das frühe Saisonende Mitte August an (Abb. 7, rechts).

Die Saisonanalyse 2013 der Lindenberg-Temperaturreihe (Abb. 7, links) weist eine klare Monsun-Signatur auf, in der das Phänomen der Periodenverdopplung prägnant ist. Hat man einen solchen Rhythmus in den Daten erkannt, so liegt es nahe, ihn für die Prognose zu nutzen. Dies ist Gegenstand laufender Experimente zur innersaisonalen Vorhersage.

Die Methode MPFM gestattet eine technisch einfache Vorhersage, da sie Zeitreihen quasi in Formeln übersetzt. Sie ist als sog. „inverse“ Aufgabe aber nicht eindeutig, braucht also „Leitplanken“, wie z.B. ein Jahresgang-Modell. Ansonsten sind Vorhersagen derzeit nur für den Nahbereich sinnvoll. Dies betrifft auch den Verlauf des Klimawandels, solange wir geometrische Zwänge nicht genau genug kennen, denen dessen Dynamik unterliegt.

MPFM ist übrigens auch an anderen Aufgaben der Datenanalyse beteiligt, u.a. um Klimasignale im Abfluss der Havel zu identifizieren und bei der raum-zeitlichen Analyse des Niederschlags. Hier werden Zeitreihen für das Auftreten räumlicher Muster der Klima-Analyse unterzogen. Die datenbasierte Prognose kann damit also auch räumliche Strukturen erfassen.

Innersaisonale Vorhersage: Ein laufendes Experiment von ASWEX

Als Beitrag zu einer gemeinsamen Wissensbasis im Hinblick auf die Anpassung an den Klimawandel erstellt ASWEX einen Newsletter mit Analysen der Saison 2018 und Prognose-Versuchen. Untersucht wird zunächst die Temperatur an der Station Lindenberg. Inhalte sind u.a.

- die Aktivität der Vormonsunperiode von Januar bis März,
- eine Bestätigung der 50–60-tägigen Monsunaktivität auch 2018,
- die qualitative Vorhersage einer starken Hitzewelle im Hochsommer.

Ausgabe 3 befasst sich mit dem Herbstübergang. Weitere Ausgaben sollen neben Ergebnissen der Datenanalyse auch zum Verständnis und zur Einordnung regionaler Klimaphänomene beitragen. Der Newsletter bietet die Möglichkeit, schrittweise etwas tiefer in die Materie einzusteigen und Probleme und Möglichkeiten der Vorhersage kennenzulernen.

Regionale modellbasierte Klimaszenarien

Die Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes zeigen für die letzten drei Jahrzehnte Trends, die sich mit der Wahrnehmung von Landwirten decken:

- höhere Temperaturen und mehr Hitzetage mit $>30^{\circ}\text{C}$ (vgl. Abb. 9),
- höhere Niederschläge im Sommer, geringere im Winter,
- mehr Starkregen im Sommer (Anzahl der Tage), sowie
- mehr Trockentage im März und April, weniger im Mai.

Die Trends sind allerdings regional und zeitlich variabel, daher nicht einfach übertragbar. Kommt nach dem Anstieg wieder ein Rückgang der Starkregentage, handelt es sich also um ein zyklisches Phänomen? Für eine datenbasierte Prognose brauchen wir solche qualitativen Aussagen über die Dynamik der Prozesse und müssen diese erkunden. Um die Frage vorerst zu beantworten, waren wir daher noch auf Modellergebnisse angewiesen. Wegen der Modellunsicherheiten zogen wir ein Ensemble von 15 Kombinationen etablierter globaler und regionaler Klimamodelle heran.

Klimamodelldaten sind keine Stationsdaten. Obwohl systematische Abweichungen daher vorab korrigiert wurden, beschreiben dennoch nicht alle Modelle die beobachteten Trends gleichermaßen plausibel. Wir wählten also Klimamodelle aus, die die Vergangenheit besonders gut beschreiben – der Annahme folgend, eine gute Beschreibung der Vergangenheit erhöhe die Wahrscheinlichkeit einer zutreffenden Beschreibung der Zukunft. Unsere Auswahl ist aber keine Qualitätsaussage. Wie eine andere IGB-Studie zeigte, variiert die „Passgenauigkeit“ von Klimamodellen mit der betrachteten Größe (Temperatur, Niederschlag oder Abfluss) und der Region.

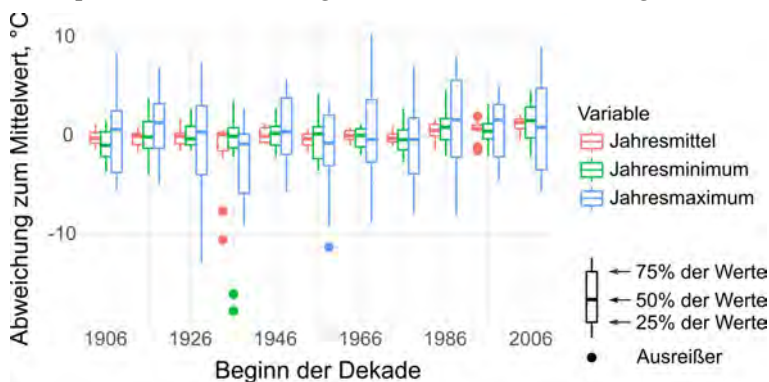


Abb. 9. Verteilung der Abweichung der Temperaturen vom Mittelwert über den gesamten Zeitraum bei Cottbus, Lindenberg und Potsdam. Die Schwankungen innerhalb der Dekaden sind größer als zwischen den Dekaden. Seit den 1980er Jahren überwiegen überdurchschnittlich warme Jahre, parallel zu dem deutlichen Temperaturanstieg auf der Nordhalbkugel (vgl. Abb. 4), Daten: DWD.

Die Wahl (oder Verfügbarkeit) von Klimamodellergebnissen beeinflusst nicht nur Aussagen zur Stärke von Niederschlagsänderungen, sondern bei sommerlichen (Stark-)Regen sogar die Richtung. So ergibt sich mit der Annahme eines moderaten Klimawandels (RCP 4.5) und der Auswahl der Modelle im Mittel für 2031–55 im Vergleich zu 2001–15 ein Rückgang, der bei der Gesamtsumme (–5%) stärker ausfällt als bei Starkregensummen (–1%). Der Rückgang gilt nicht für den Norden Brandenburgs einschließlich Havelland. Insgesamt sind die räumlichen Unterschiede aber geringer als die Variabilität der Klimamodelle. Mit dem Gesamtensemble und RCP 8.5 steigen z.B. die Werte deutlich an (+15%). Trotz aller Unsicherheiten stimmen die Modelle für die kommenden Jahrzehnte darin überein, dass

- die Starkregen nicht auf das Niveau der Vergangenheit zurückgehen,
- die Winterniederschläge beständig zunehmen,
- Trockenperioden im Frühjahr und Spätsommer länger werden,
- Wachstumsgradtage (d.h. aufsummierte Tagestemperaturen zur Prognose phänologischer Zustände wie z.B. Vollreife) zunehmen,
- Mitteltemperaturen um 0,7 (Sommer) bis 1,3 Grad (Winter) steigen,
- Hitzetage häufiger werden (+4–5 Tage für 2041–2055).

Maße für die Trockenheit beschreiben das Zusammenwirken von Niederschlag und Temperatur. Diese ändern sich im Winter kaum. Für den Sommer sind die Aussagen unsicherer: Während es beim Gesamtensemble auch kaum Veränderungen gibt, nimmt bei der Modellauswahl die Trockenheit zur Mitte des Jahrhunderts zu (RCP 4.5) bzw. ab (RCP 8.5).

Parallel zu den Lufttemperaturen steigen auch die Wassertemperaturen in unserer Region weiter an (eine aktuelle IGB-Studie zeigt ab Mitte der 1980er Jahre positive Trends in Nordost-Deutschland). Diese steuern wiederum die Löslichkeit von Sauerstoff, den Stoffumsatz sowie die Photosynthese der Algen und bestimmen so maßgeblich die Gewässergüte.

Klimamodelle bilden...

...atmosphärische, hydrologische und andere Prozesse ab, um das globale Klima zu simulieren. Sie gehören zu den komplexesten und aufwändigsten Computermodellen. Das künftige Klima wird anhand von Szenarien der Treibhausgaskonzentration (RCP, S. 3) berechnet. Da wir deren Entwicklung nicht kennen, verglichen wir die Ergebnisse mehrerer Modelle für einen moderaten (RCP 4.5) und einen extremen Klimawandel (RCP 8.5). Um den Rechenaufwand zu begrenzen, ist die Auflösung globaler Modelle beschränkt. Regionale Klimamodelle verfeinern diese. Unsere Daten stammen von der internationalen Initiative EURO-CORDEX (<https://euro-cordex.net/>). Sie sind europaweit als Tageswerte in hoher räumlicher Auflösung bis 2100 frei verfügbar.

Wie wirken sich Klimaänderungen mittelfristig auf Bodenerosion, Wasserhaushalt und Nährstoffeintrag aus?

Erosivität von Niederschlägen und Bodenerosion durch Wasser

Die „Erosivität“ eines Niederschlags vereint die Wirkung seiner Menge und Intensität auf den Bodenabtrag. Erosion geht nicht nur mit dem Verlust wichtiger Bodenfunktionen einher. Durch eingetragenes Sediment und daran gebundene Nähr- und Schadstoffe leidet auch die Qualität von Gewässern. Auch wenn Tageswerte keine direkte Berechnung erlauben, weisen die verfügbaren Daten der Klimamodelle auf ein steigendes Erosionsrisiko hin.

Die mittlere Jahreserosivität geht als Regen- und Oberflächenabflussfaktor (R-Faktor) in die allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) ein. Dies ist ein empirisches Modell, das bis heute für die landwirtschaftliche Beratung und zur Abschätzung von Erosionsrisiken verwendet wird. Dessen Berechnung erfordert eigentlich hoch aufgelöste Daten, die nicht immer verfügbar sind. So basiert die aktuelle Erosionskarte Brandenburgs, Grundlage u.a. für die Ausweisung erosionsgefährdeter Ackerflächen durch das Land, auf einer schon 30 Jahre alten Schätzformel. Unsere berechneten R-Faktoren zeigen jedoch (Abb. 10), dass

- die aktuellen Werte (2000–2015) im Mittel um 50% unterschätzt werden,
- die Erosivität im Sommer angestiegen ist, vor allem im Juli / August,
- deren Schätzung sich auf starkregenbasierte Größen stützen sollte,
- die Änderung zur alten Schätzgleichung von Nord nach Süd ansteigt.

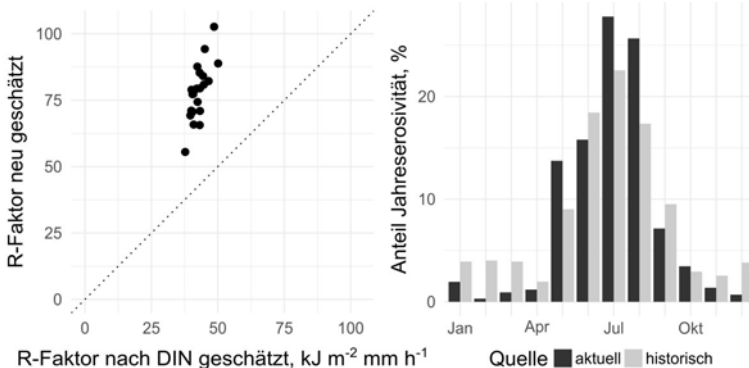


Abb. 10. Nach DIN geschätzte Niederschlagsfaktoren der allgemeinen Bodenabtragungsgleichung für 2000–15 sind im Mittel 50% zu niedrig (links). Zur neuen Schätzung waren starkregenbasierte Summen (hier der 10 höchsten Tagesniederschläge von Mai bis September) geeigneter als die Gesamtsumme. 90% der jährlichen Erosivität tritt zwischen Mai und September auf, über 50% im Juli und August (rechts). Daten: DWD, historische Werte Deumlich (1999), ZALF (2013).

Die neuen R-Faktoren und ihre monatliche Verteilung passen zu den für Sachsen berechneten Werten. Ihr Anstieg geht konform mit dem tagesbasierter Starkregenindizes und Beobachtungen in anderen Bundesländern. Gemäß ABAG erhöht sich damit in den Projektregionen das Erosionsrisiko.



Auch schleichende Bodenerosion kann die Bodenqualität und Gewässer beeinträchtigen. Durch den Anstieg des klimabedingten Erosionsrisikos werden angepasste Bearbeitungstermine und eine angepasste Bewirtschaftung wichtiger.

Wegen der Schätzgleichung entspricht die Entwicklung des R-Faktors der von Starkregensummen. Demnach gibt es vorläufig kein Zurück zur Vergangenheit (Abb. 11). Legen wir nur die „passenden“ Klimamodelle zugrunde, ist außerhalb Nord-Brandenburgs bei moderatem Klimawandel bis zur Mitte des Jahrhunderts immerhin ein leichter Rückgang zum heutigen Niveau möglich (bei gleichzeitig zunehmender Trockenheit, vgl. S. 13). Bei extremem Klimawandel ist ein weiterer Anstieg von 40% bis 2050 denkbar.

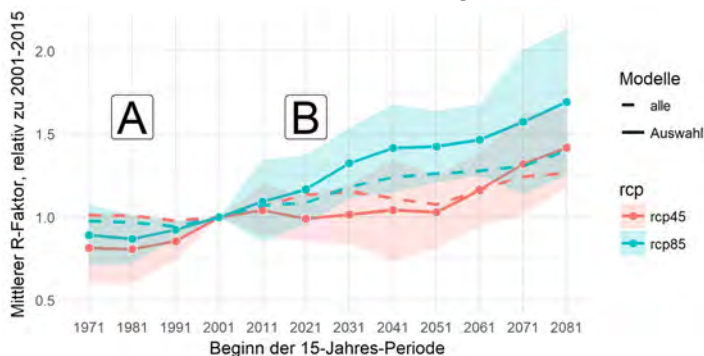


Abb. 11. Niederschlagsfaktoren der Bodenabtragungsgleichung (15-Jahres-Mittel) relativ zu 2001–15. A: Der Anstieg der Vergangenheit wird nicht vom gesamten Modellensemble („alle“, Mittel gestrichelt), aber von unserer Auswahl beschrieben, B: Die Projektion hängt von der Wahl der Klimamodelle und vom RCP-Szenarium ab. Die Flächen zeigen die hohe Unsicherheit der Mittelwerte der Auswahl. Beim moderaten RCP 4.5 ist ein Rückgang zum heutigen Erosionsrisiko möglich.

Entscheidend ist aber nicht nur die Änderung der Tagessummen, sondern vor allem, ob die Intensitätsspitzen ansteigen. Setzt sich der Trend zu mehr Hitzetagen fort, ist mit kräftigeren Gewittern zu rechnen. Auch die neue Schätzgleichung könnte die künftige Erosionsgefahr dann unterschätzen.

Wasserhaushalt und Abfluss

Temperatur, Niederschlag und Einstrahlung wirken auf den Wasserhaushalt, dessen Bilanz sich beschreiben lässt als $\text{Abfluss} = \text{Niederschlag} - \text{Verdunstung} \pm \text{Speicher}$ (wie z.B. Grundwasser). Die Folgen von Klimaänderungen können vielfältig sein:

- Steht im Boden zu wenig Wasser zur Verfügung, werden Wachstumsfunktionen von Pflanzen beeinträchtigt. Sie leiden unter Trockenstress.
- Häufigere Starkregen erhöhen das Risiko von Oberflächenabfluss, besonders bei ausgetrockneten, unbedeckten oder verdichteten Böden. Dadurch gelangen Nährstoffe und Pestizide schneller in die Gewässer.
- Änderungen von Niedrig-, Mittel- und Hochwasser beeinflussen den ökologischen Zustand von Fließgewässern und Auen.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den regionalen Wasserhaushalt haben wir mit dem öko-hydrologischen Modell SWIM des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung untersucht. Ohne Annahmen zur künftigen Entwicklung des Tagebaus in der Lausitz sowie des Zuflusses aus dem Elbe-Einzugsgebiet konnten wir jedoch den Gesamtabfluss von Spree und unterer Havel nicht berechnen. Mit dieser Einschränkung ergab sich für die Projektregionen, dass

- im Winter der Abfluss mit den Niederschlägen ansteigt (vgl. Abb. 12),

Risiken von Bodenerosion durch Wind und Bearbeitung

Bodenpartikel werden auch durch Wind und Bodenbearbeitung verlagert und können u.a. die Gesundheit beeinträchtigen. Gefährdet sind exponierte, trockene, unbedeckte Feinstsand- und Moorfolgeböden (Anmoore). Das Winderosionsrisiko ist hoch (Wurbs & Steininger 2017) und betrifft z.B. Teile des Havellandes (Rhin- und Havelländisches Luch), aber auch die Beeskower Platte östlich des Schwielochsees (Funk 2015).

Das Erosionsrisiko in Brandenburg stieg im Vergleich zu 1971–2000 schon an und wird bis Mitte des Jahrhunderts 10–20% höher bleiben (Wurbs & Steininger 2017). Die Bodenbedeckung gewinnt also bei zunehmender Trockenheit im Frühjahr und Spätsommer an Bedeutung.

Wind verlagert zwar in kurzer Zeit große Mengen an Feinboden. Dies tritt aber selten und eher bei Sommerkulturen auf. Bodenbearbeitung bewegt weniger Material, findet aber häufiger und bei allen Kulturen statt. Das Potenzial von Maßnahmen ist hier insgesamt höher (Funk 2015).

- die schon niedrigen Pegelstände im Sommer eher weiter sinken,
 - die Grundwasserneubildung im Winter zunimmt
 - im Sommer die Trends dagegen variabel sind,
 - der Trockenstress auf grundwasserfernen Standorten zunimmt.
- Trendstärke und -richtung hängen jedoch sehr von den verwendeten Klimamodellen ab. Die Aussagen gelten für das Mittel der 7 Modelle, die die Beobachtung am besten beschreiben. Sie variieren zudem zeitlich und regional.

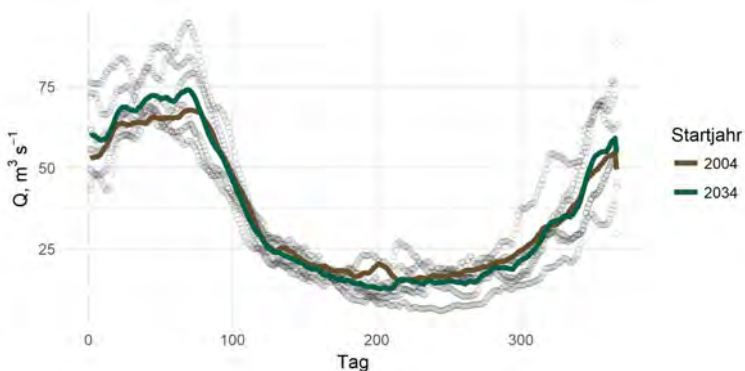


Abb. 12. Jahresgang des Abflusses bei Ketzin, 15-Jahres-Mittel für RCP 4.5 unterhalb von Leibsch. Das Mittel der dargestellten Klimaszenarien ist farbig. Sophienwerder (untere Spree) zeigt ein ähnliches Muster, andere Pegel weichen ab.

Brandenburgs Wasserhaushalt – Einflussfaktoren und Trends

Wegen der geringen Niederschläge bei hoher Verdunstung, der vielen flachen Gewässer und der armen Sandböden mit geringer Wasserhaltekapazität, reagiert der Wasserhaushalt im Havel-Einzugsgebiet stärker auf Klimaänderungen als anderswo (Lischeid 2010). Infolge der abgenommenen Winterniederschläge und gestiegenen Temperaturen steht zwar weniger Wasser zur Abflussbildung und zur Auffüllung des Grundwassers zur Verfügung, doch prägt besonders die Land- und Wasserwirtschaft den lokalen und regionalen Wasserhaushalt. So sank nach 1990 zwar der Abfluss im Landesmittel um 11%. Wegen des Bergbaus war der Rückgang in der Spree aber drastisch, während die obere Havel und Nuthe sogar steigende Trends aufwiesen (LfU 2011).

Auch die Grundwasserstände der Hochflächen sanken von Mitte der 1970er bis zum Anfang der 2000er Jahre um etwa 2 cm pro Jahr (LfU 2014). Das betraf in der Projektregion das Westhavelländische Ländchen um Kotzen, Dallgow-Döberitz sowie den Naturraum Lieberoser Heide und Schlaubegebiet. 7–8-jährige Schwankungen von 20–40 cm weisen dabei auf langsame Einflüsse des Klimasystems hin.

Nährstoffeintrag im Einzugsgebiet von Spree und Havel

Ohne Phosphor (P) und Stickstoff (N) gäbe es kein Leben in den Gewässern. Im Übermaß führen diese Nährstoffe aber zu mehr Algenwachstum (Eutrophierung). Nach dem Absterben werden die Algen zersetzt. Sauerstoffmangel ist die Folge, bis hin zu lebensfeindlichen Bedingungen für Fische. Zudem können Cyanobakterien („Blualgen“) giftige Stoffe abgeben und so die Nutzung von Gewässern für Erholung und Trinkwasser einschränken.

Trotz der Umsetzung von Bewirtschaftungsplänen zur Verbesserung der Gewässergüte sind noch immer viele Oberflächengewässer Brandenburgs nicht in einem von der EU-Wasserrahmenrichtlinie bis 2027 geforderten guten ökologischen Zustand, auch wegen zu hoher N- und P-Konzentrationen (vgl. Abb. 13).

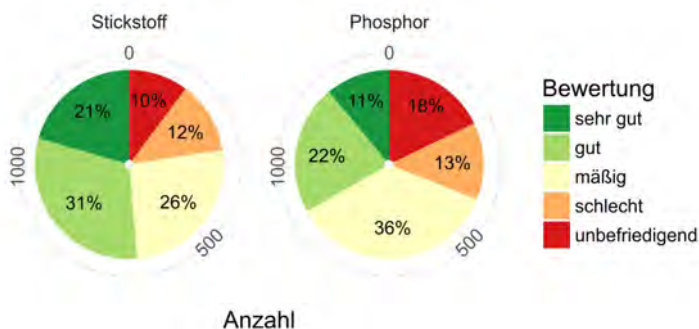


Abb. 13. Aktueller Zustand von Fließgewässern in Brandenburg aufgrund der Nährstoffkonzentration (1340 Gewässer). Nährstoffe sind ein Kriterium zur Bewertung der Gewässer nach der Wasserrahmenrichtlinie (Daten MLUL 2016).

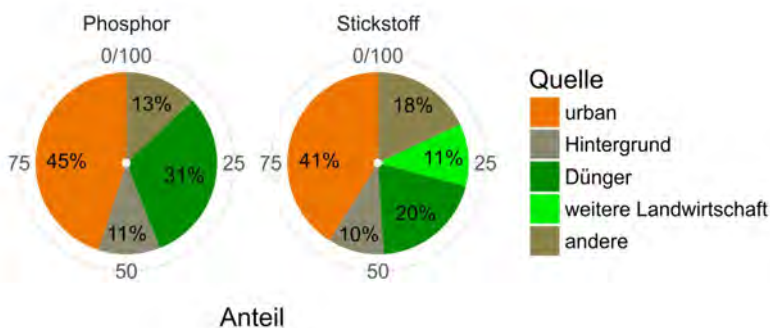


Abb. 14. Quellen der Stickstoff- und Phosphoreinträge, berechnet für 2012–14. Ein Drittel der Einträge entstammt der Landwirtschaft. Sie gelangen via Grundwasser, Oberflächenabfluss, Drainagen und Bodenerosion in die Gewässer.

Mit dem IGB-Modell MONERIS haben wir daher ermittelt, über welche diffusen (meist landwirtschaftlichen) und punktuellen Quellen (wie Kläranlagen) und Eintragspfade N und P in die Oberflächengewässer gelangen und welchen Einfluss Maßnahmen auf die Gewässerqualität haben. Unsere Berechnungen erfolgten unter Verwendung aktueller Datensätze, unter anderem einer überarbeiteten Erosionskarte und regionalisierter N-Bilanzen, sowie der Ergebnisse von Klima- und hydrologischen Modellen.

Demnach gelangten im Referenzzeitraum 2012–14 jedes Jahr etwa 10000 Tonnen N und 700 Tonnen P in die Gewässer des Einzugsgebiets von Spree und Havel. Den höchsten Anteil an den Nährstoffeinträgen haben mit 40% die urbanen Quellen (Kanalisation und Kläranlagen). Allein die Berliner Kläranlagen stellen 30% der urbanen P- bzw. 80% der N-Quellen.

Etwa ein Drittel der Nährstoffe gelangte über Düngemittel der Landwirtschaft in die Gewässer (Abb. 14). Aufgrund der langen Grundwasserverweilzeiten tragen auch die Nährstoffüberschüsse der Vergangenheit zu diesem Eintrag bei. Während heute, nach Umsetzung zahlreicher Maßnahmen, die Werte mit 32 kg je Hektar und Jahr (2010–15) bundesweit relativ gering sind, lagen diese in den 1980er Jahren noch bei über 100 kg. Eine (weitere) Verringerung der Überschüsse wirkt sich nur über den Drainageabfluss grundwassernaher Standorte sowie den Oberflächenabfluss direkt aus, führt aber mittelfristig auch zu geringeren Konzentrationen im tieferen Grundwasser. Für eine genaue Berechnung dieser Entwicklung fehlen jedoch exakte Kenntnisse über die Grundwasseraufenthaltszeiten.

Nährstoffeintrag in Gewässer – ein Kernthema des IGB

Wann, woher und wie gelangen Nährstoffe in Gewässer? Was ist zu tun, um die Wasserqualität zu verbessern? Das IGB Berlin arbeitet seit Mitte der 1990er Jahre an „Nährstoffeinträgen in Flusseinzugsgebieten“ und nutzt zur Beantwortung solcher Fragen das Modell MONERIS. Damit können Quellen und Eintragspfade auf regionaler bis internationaler Ebene bestimmt und Managementoptionen geprüft werden. Das Modell berücksichtigt den gewässerinternen Rückhalt und kann damit aus Einträgen ökologisch relevante Frachten und Konzentrationen ableiten.



MONERIS bildet Prozesse empirisch-konzeptionell ab. So verringern Maßnahmen die Einträge je nach Umfang und Wirksamkeit. Für die erfolgreiche Anwendung des Modells ist eine kritische Bewertung der Datengrundlagen und Modellannahmen unerlässlich. Im Projekt überarbeiteten wir z.B. die bisher verwendete Stickstoffbilanz der Landwirtschaft.

Für den Pegel Havelberg, der das gesamte Havel-Einzugsgebiet abdeckt, haben wir berechnet, um wieviel der Nährstoffeintrag verringert werden muss, um den guten chemischen Zustand zu erreichen. Die zu erreichenden Nährstoffkonzentrationen betragen im Jahresmittel 1,2 mg N je Liter bzw. 0,8 mg P. Dafür müsste der N-Eintrag bis 2027 um 34% (auf 6700 Tonnen pro Jahr) und der P-Eintrag um 16% (auf 580 Tonnen) reduziert werden. Mit den Klimaszenarien ergab sich jedoch ein Anstieg von 1–5%. Die Verbesserung der Gewässerqualität erfordert also noch zusätzliche Anstrengungen.

Abb. 15 verdeutlicht, dass landwirtschaftliche Maßnahmen allein nicht zu einer besseren Gewässergüteklasse bis 2027 führen (Szenario SZ 2). Erst zusammen mit der Optimierung und dem Ausbau von Kläranlagen wäre der Orientierungswert für N zu schaffen. Für P kann der Orientierungswert sogar allein durch Maßnahmen an Kläranlagen erreicht werden. Wegen der Nähe zum Referenzpegel Havelberg ist die Situation der Havel im Landkreis Havelland sehr ähnlich. Für die Spree in der Region Beeskow könnten die Orientierungswerte durch Optimierung (bei Phosphor) bzw. Ausbau (bei Stickstoff) der Kläranlagen erreicht werden. In Teilgebieten, wo Kläranlagen eine untergeordnete Rolle spielen, müssen jedoch landwirtschaftliche Einträge verringert werden. Die Wahl der Maßnahmen hängt letztlich von den ökonomischen Ressourcen (Fördermitteln) ab. Eine Übersicht von Kosten und Nutzen am Beispiel der Berliner Havel zeigt NITROLIMIT (2016).

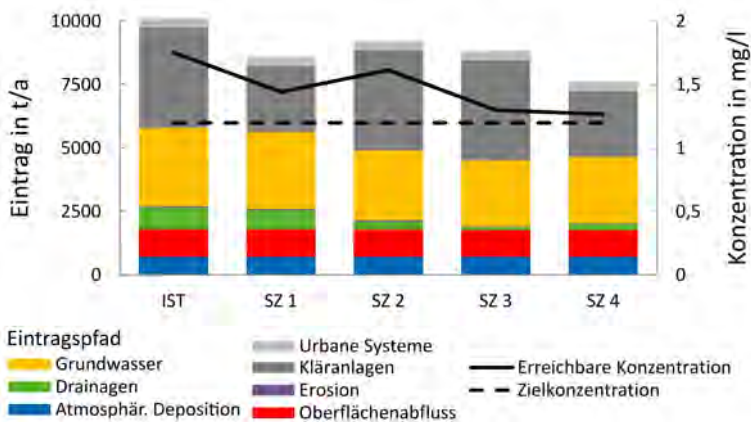


Abb. 15. Stickstoffeintrag und -konzentration für den Ist-Zustand und 4 Szenarien, Zielkonzentration zum Erreichen des guten chemischen Zustands bei Havelberg; SZ1: Ausbau & Optimierung Kläranlagen, SZ2: Agrar-Umwelt-Maßnahmen auf gesamtem Acker- und Grünland, SZ3: wie SZ1+2 und Halbierung der drainierten Fläche, SZ4: wie SZ1+2 und Umwandlung von 50% der Acker- in Grünlandfläche.

Folgen des Klimawandels und Agrar-Umwelt-Maßnahmen

Was wird schon gemacht?

Mit ihren Kulturlandschaftsprogrammen (KULAP) fördern viele Bundesländer Maßnahmen zur nachhaltigen Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen oder auch zum Klimaschutz. Für das Projekt B.A.U.M waren Agrar-Umwelt-(Klima-)Maßnahmen (AUKM) mit Bezug zum Boden- und Gewässerschutz besonders relevant. Im Kontext des Klimawandels sind sie auch als Teil einer Anpassung des ländlichen Raumes zu sehen.

Unsere statistischen Auswertungen basierten vor allem auf schlaggenauen Angaben zu Kulturart und Maßnahme aus InVeKoS, dem EU-weiten „Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem“. Die Maßnahmen wurden für Acker- (AL) und Grünland (GL) zusammengefasst nach „öko“ (Förderprogramm 880), „extensiv“ (FP 810), „Umwandlung von Acker- in Grünland“ bzw. Nutzung als solches (FP 840). Die neue moorschonende Stauhaltung (FP 830) fehlte noch und wurde nur exemplarisch betrachtet.

Risikogebiete überarbeiten

Wie im vorigen Kapitel dargelegt, entfalten AUKM ihre Wirkung im gesamten Havelgebiet teilweise verzögert. Bei nahem Grund- und Oberflächenwasser wirkt eine Änderung der Bewirtschaftung jedoch deutlich schneller. Die Umsetzung von AUKM ist daher gerade in solch sensiblen Gebieten („Kulissen“) bedeutsam und z.T. nur dort förderfähig. Wichtig für die Bewertung von AUKM – nicht nur ob, sondern auch wo sie nötig sind – ist daher die (Neu-)Ausweisung dieser Kulissen durch das Land. Vier von ihnen haben Bezüge zum Gewässerschutz:

- Gefährdete Standorte hinsichtlich Bodenerosion (Erosionskulisse)
Was: Neuausweisung für die kommende Förderperiode ab 2021
Wie: mit aktualisierten R-Faktoren der Bodenabtragsgleichung (ABAG)
- Grundwasser- und gewässernahe Flächen mit Eintragsrisiko für Nährstoffe (nährstoffsensible Flächen)
Was: Höherer Niederschlag im Winter und mehr Starkregen im Sommer bedeuten künftig höhere Eintragsrisiken in Gewässer durch Versickerung und Abschwemmung
Wie: Berechnung diffuser Einträge mit überarbeiteten Nährstoffbilanzen
- Gewässerrandflächen um Flüsse, Seen, Gräben usw.
Wie: kleinräumige Anwendung der neuen Stickstoffbilanzen (Verfeinern der Annahmen zur Verteilung von Gärresten und Wirtschaftsdünger)
- Flächen für eine moorschonende Stauhaltung.
Diese AUKM wurde erst mit der aktuellen Förderperiode eingeführt und noch nicht im Projekt B.A.U.M berücksichtigt.

Mit Unsicherheit und zunehmender Klimavariabilität umgehen

Anpassungsmaßnahmen sollten möglichst unabhängig vom Ausmaß des Klimawandels vorteilhaft bzw. nachsteuerbar sein. Dazu können beitragen:

- Ertragsrisiken der Landwirte streuen
Was: Wetteranomalien mögen zwar zunehmen, aber die konkreten Folgen hängen von Kulturart, Zeitpunkt und Bodeneigenschaften ab.
Wie: Sorten- und Artenspektrum diversifizieren, Humusaufbau
- Bereitstellen von Klimadaten für adäquate Planung von Maßnahmen
Was: Das Projekt EMRA (2018) baut ein Extremwettermanagementsystem für zeitnahe Wetterrisiken auf. Modellregion ist die Uckermark.
Wer: Verwaltung (Informationssystem), Landwirte (App-Nutzer)
Was: enges Verfolgen der Klimaentwicklung auf unterschiedlichen raum-zeitlichen Skalen, laufende begleitende Prognose, Wissenstransfer
Was: Fallstudien in der Vergangenheit, um mehr über aktuelle Entwicklungen zu lernen, sowie in der Herkunftsregion der beschriebenen (sub-)tropischen Einflüsse auf unser Klima, für ggf. frühzeitigere Vorhersagen
Wer: wissenschaftliche Einrichtungen in Kooperation mit Verwaltungen



Regenwurm Kot ist wertvoller Humus. Regenwürmer verbessern die Infiltration und vermindern so den Oberflächenabfluss. Zunehmende und längere Trockenphasen gefährden sie. Zur Klimaanpassung empfiehlt es sich, weniger zu pflügen, regelmäßig organisch zu düngen und humusmehrende Kulturen anzubauen.

Erosionsrisiken senken

Bei gleichen Bewertungskriterien führt die empfohlene Aktualisierung der Erosionskarte zu einer größeren Erosionskulisse. Gehörten nach unseren Berechnungen in den Projektregionen bisher knapp 0,7% des Ackerlands dazu (aus InVeKoS 2015), so sind es aktuell 1,5%. Bis zur Mitte des Jahrhunderts könnte der Anteil auf 3% steigen. Dem steht ein Bündel effektiver acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen gegenüber (Abb. 16), so z.B.

- Ackerbegrünung, Hackfrüchte nur auf ungefährdeten Flächen,
- Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten,
- konservierende Bodenbearbeitung, geringere Überrollhäufigkeit,
- Unterteilung geneigter Schläge durch Grünstreifen,
- zeitgerechte Bearbeitung, bei Trockenperioden z.B. am frühen Morgen

Das Ziel einer intakten, schützenden Bodenbedeckung im Frühjahr (Wind-) und Sommer (Wassererosion) ist dabei entscheidend, bis hin zur Aufforstung auf stark gefährdeten Standorten. Weniger verdichtete und nicht zu

fein bearbeitete Böden verschlämmen weniger und reduzieren den Oberflächenabfluss. Die konservierende Bodenbearbeitung ist in Brandenburg etabliert und aus Sicht des Bodenschutzes gegen die klimatischen Herausforderungen empfehlenswert. Problematisch ist der damit verbundene vermehrte Einsatz von Glyphosat. Der Vergleich des Havellandes mit dem Landesmittel deutet auf einen erhöhten Handlungsbedarf, denn

- konservierende Bodenbearbeitung und Ökolandbau sind unterdurchschnittlich, auch geringer als im Landkreis Oder-Spree (Abb. 17 und 18),
- auf 33% der Maisfläche wurde diese erosionsfördernde und humuszehrende Pflanze von 2013 bis 2015 durchgehend angebaut. Im Landesmittel waren es nur 18%, im Landkreis Oder-Spree sogar weniger als 5%.

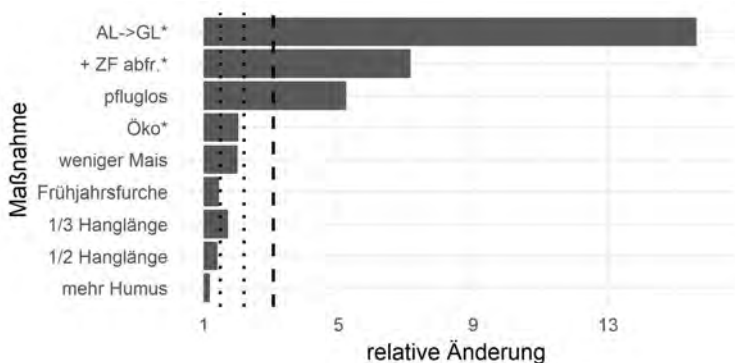


Abb. 16. Ackerbauliche Maßnahmen können den klimabedingten Anstieg des Erosionsrisikos ausgleichen (eig. Werte, ZALF 2013). Referenz: Fruchtfolge Winterroggen/Silomais auf Sandboden mit Herbstfurche, *AUKM, gepunktet: mittlere/maximale aktuelle Änderung des R-Faktors, gestrichelt: Anstieg um 40% bis 2050 (RCP 8.5). AL->GL = Acker- zu Grünland, ZF abfr. = abfrierende Zwischenfrüchte.

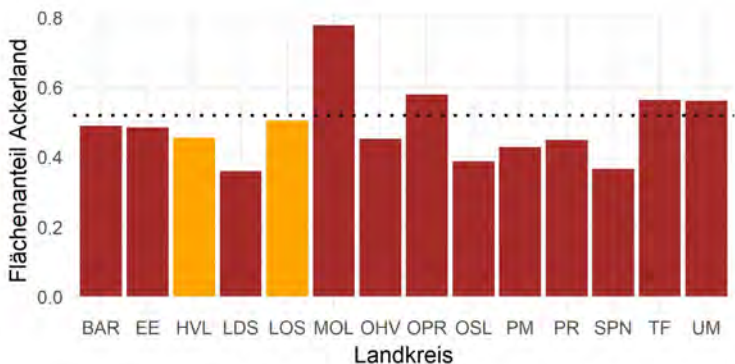


Abb. 17. Konservierende Bodenbearbeitung 2016 (Statistik Berlin-Brandenburg 2017)

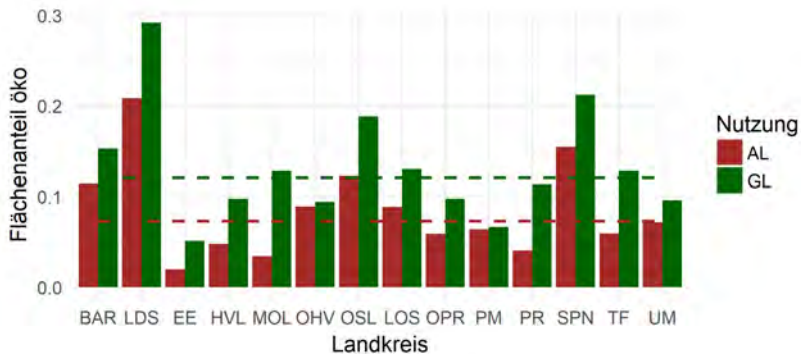


Abb. 18. Flächenanteile ökologisch bewirtschafteten Acker- und Grünlands (AL, GL) in den Landkreisen Brandenburgs, gestrichelt: Landesmittel, Daten: InVeKoS 2015.

Nährstoffeintrag in Gewässer mindern

Eine weitere Reduktion der Nährstoffbilanzen bleibt vor allem auf gewässernahen, „nährstoffsensiblen“ Landwirtschaftsflächen relevant. Diese umfassen 11% der Flächen im Havelland bzw. 16% im Landkreis Oder-Spree. Ergänzende Bausteine im ländlichen Raum sind effizientere Sammelgruben und Kleinkläranlagen, zusätzliche Dränteiche, sowie die langfristige Wiederherstellung von Mooren (Böckmann & Pätzolt 2012).

Mehr Bodenschutz oder „weniger Chemie“?

Konservierende Bodenbearbeitung heißt, weniger in das Bodengefüge einzugreifen. Sie hat sich bundesweit etabliert, auch um Kosten zu senken (Mal et al. 2015). Doch verwenden Landwirte dafür i. Allg. Glyphosat. Allein dessen Ablehnung in Teilen der Bevölkerung verdeutlicht den Diskussionsbedarf zu Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.



Erosion bei konventioneller (links), aber nicht bei konservierender Bodenbearbeitung (rechts)

Wie würde sich ein Glyphosat-Verbot auswirken? Nach Schmitz und Garvert (2012) blieben die neuen Bundesländer aus ökonomischen Gründen beim Pflugverzicht. Trotz intensiverer Bodenbearbeitung und dem Einsatz anderer Herbizide würden die Erträge um bis zu 10% sinken.

Fast die Hälfte des Stickstoffeintrags in Brandenburg entstammt Mineraldüngern (vor Wirtschaftsdüngern und Gärresten). Daraus ergibt sich das besonders hohe Potenzial der ökologischen Bewirtschaftung von Ackerland (Abb. 19). Die noch günstigere extensive, weil düngersparende, Acker- nutzung beschränkt sich allerdings auf den Vertragsnaturschutz. Grünland wird dagegen schon heute zu mehr als einem Drittel extensiv bewirtschaftet. Modellergebnisse von ZALF (2013) bestätigen, dass zum Gegensteuern

- stärker auf den tatsächlichen Bedarf (Trockenperioden!) zu düngen ist,
- die Bodenbedeckung möglichst dauerhaft sein sollte, z.B. durch Zwischenfrüchte im Winter oder weniger Mais in der Fruchtfolge (Aufnahme von mehr Nährstoffen und Wasser, somit weniger Sickerwasser),
- nährstoffsensible Flächen (weiter) zu extensivieren sind.

Die Umsetzung dieser Maßnahmen sollte begleitet werden durch

- Beratung inkl. Informationen zu Klimaänderungen und Saisonverlauf
- Ziele sollten die flächenhafte Umsetzung sowie die Vermeidung geringer Nährstoffaufnahme (u. a. infolge von Trockenstress) sein

- Anlage breiterer Gewässerrandstreifen

Neuanlage und Verbreiterung auf wenigstens 10 m, analog zu Sachsen; Fließlänge mit Handlungsmöglichkeiten und Erosionsgefährdung: Havelland 20 km, Oder-Spree 40 km (nach LUFTBILD Brandenburg 2011).

Stickstoffbilanzen – Ein Thema nicht nur für Landwirte

Die Stickstoffbilanz ist eine wichtige Größe für Politik, Wissenschaft und den einzelnen Landwirt, um unerwünschten Stickstoffeintrag in die Umwelt zu bewerten. Sie erfasst Zu- und Abfuhr über verschiedene Pfade. Je nach Zweck unterscheiden sich Zeitraum und Bilanzrahmen, erkennbar an Namen wie Hof-, Stall-, Flächen- oder nationale Gesamtbilanz.

Unsere landesweite Neuberechnung regionalisierter Flächenbilanzen



(2010–15) basiert u.a. auf Daten zum Einsatz von Wirtschafts- und Mineraldüngern, zur atmosphärischen Deposition und zum Erntertrag. Raum-zeitliche Unterschiede ergeben sich aus Witterung, Bodenfruchtbarkeit, Erntertrag und vor allem Bewirtschaftungsform.

Mittlere Stickstoffbilanzen in Brandenburg für mehrere Arten der Landwirtschaft (2010–15).

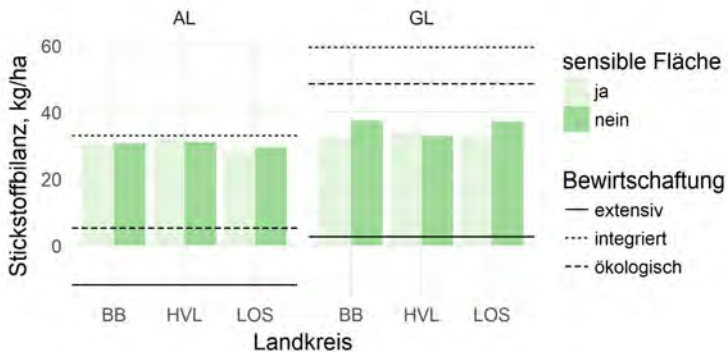
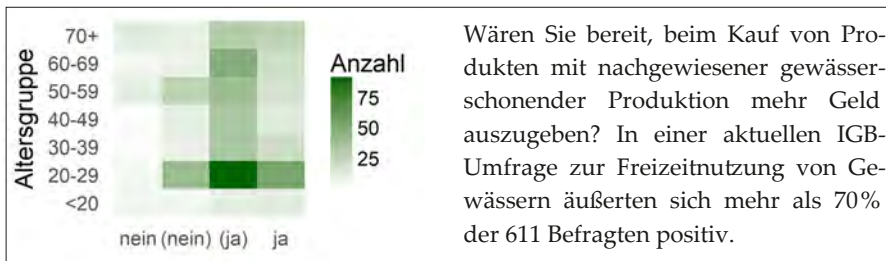


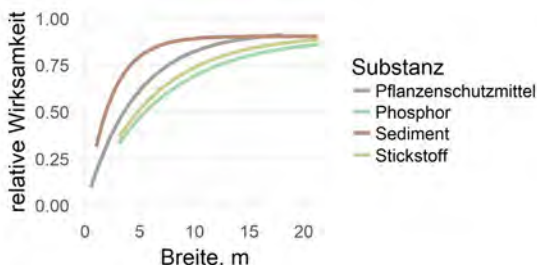
Abb. 19. Mittlere Stickstoffbilanzen 2010–15 für Brandenburg (Linien) und aus InVeKoS 2015 abgeleitete Werte nach Umsetzungsgrad von Maßnahmen (Balken).



Wären Sie bereit, beim Kauf von Produkten mit nachgewiesener gewässerschonender Produktion mehr Geld auszugeben? In einer aktuellen IGB-Umfrage zur Freizeitnutzung von Gewässern äußerten sich mehr als 70% der 611 Befragten positiv.

Gewässerrandstreifen (GRS) zur Reduktion diffuser Einträge

GRS sind Puffer zwischen Gewässern und Landwirtschaftsflächen. Sie dienen dem Erhalt und der Verbesserung ökologischer Funktionen von Oberflächengewässern. Sie halten nicht nur Nährstoffe zurück, sondern können auch die Biodiversität fördern und, durch Beschattung, die Wassertemperatur senken. In Brandenburg sind GRS laut Gesetz erforderlich, wenn der gute Zustand von Gewässerabschnitten vor allem durch diffusen Stoffeintrag beeinträchtigt wird. Brandenburg sieht jedoch nur



eine Breite von 5 m vor, ohne Beschränkung des Dünger- und Pestizideinsatzes. Zu empfehlen sind aber mindestens 10 m und eine extensive Nutzung, wie es u.a. Sachsen vorschreibt.

Breite GRS halten Stoffe besser zurück, Daten: Zhang et al. (2010).

Steigenden Temperaturen und Wassermangel entgegenwirken

Den Folgen steigender Temperaturen und zunehmender (Frühjahrs-)Trockenheit kann vor Ort begegnet werden durch

- spätere Aussaat im Herbst (verhindert das Überwachsen), zeitigere im Frühjahr (nutzt die Winterfeuchte) – aber damit steigt das Frostrisiko,
- Humusaufbau auf Sandböden, weniger humuszehrende Pflanzen,
- Anbau hitze- und trockenresistenter Arten sowie Mulchsaat (die Hauptfrucht wird in die Erntereste der Vor- oder Zwischenfrucht eingesät),
- Überprüfung von Entwässerungsmaßnahmen,
- Diversifizierung, Strategien gegen verändertes Schädlingsaufkommen,
- Umstellung der Arbeitsabläufe, bauliche Gestaltung, bessere Kühlung.

Infolge der höheren Verdunstung wirken Feuchtflächen kühlend. Wird es künftig noch wärmer, ist der Wasserrückhalt in der Fläche nicht nur für die Landwirte wichtig. Intakte Moore halten auch Nährstoffe zurück, binden CO₂ und sind wertvolle Lebensräume. Landesweit sind 100000 ha der Entwässerung zum Opfer gefallen. Je tiefer diese reicht, desto negativer ist die Klimawirkung. Steigende Temperaturen und die eher abnehmende Grundwasserneubildung im Sommer gefährden Moore weiter. Sie und andere Feuchtflächen gilt es also zu schützen und (langfristig) wieder herzustellen.

Darauf zielt auch die noch junge AUKM „moorschonende Stauhaltung“, mit der wir die Diskussion von Anpassungsmaßnahmen abschließen. Sie hat allein im Havelland ein Potenzial von mehreren tausend Hektar (Abb. 20). Wiedervernässung ist effektiv, kann aber zunächst zu mehr Treibhausgasen und Phosphoraustrag führen. Flächen sind also sorgfältig auszuwählen und zu bewirtschaften (Böckmann & Pätzolt 2012).



Abb. 20. Flächenpotenzial in der Projektregion für moorschonende Stauhaltung auf Grünland (InVeKoS 2015, Moorkarte 2013). Moorschutz verringert Treibhausgasemissionen und unterstützt den Rückhalt von Wasser und Nährstoffen. Mehr dazu unter: <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.389149.de>.

Fazit und Ausblick

Die Resilienz („Widerstandsfähigkeit“) der Landwirtschaft gegenüber den Folgen des Klimawandels beruht auf einem breiten Portfolio wirksamer Maßnahmen von Landwirten und Verwaltung. Angesichts der Unsicherheit über die diskutierten Klimaänderungen und deren Auswirkungen auf die Produktion besteht die Herausforderung darin, solche Kombinationen auszuwählen und anzupassen, die sich – bei ökonomisch und ökologisch vertretbarem Aufwand – an drei Hauptzielen treffen:

- Bodenfunktionen erhalten und ggf. verbessern,
- Wasserqualität verbessern,
- Ernteerträge sichern.

Dies erfordert eine seriöse Einschätzung aktueller und künftiger Risiken sowie vorhandener (auch zeitlicher) Handlungsspielräume. Denn der Klimawandel geschieht zum Teil schubweise und zeigt sich zudem in veränderter Variabilität. Die während des Projekts aufgetretene globale Klima-Anomalie, die in ihrer extremen Stärke von niemandem vorhergesehen wurde, macht das besonders deutlich.

Die von uns aufgedeckte hohe Variabilität des gegenwärtigen Klimaregimes und die von Klimamodellen prognostizierte Zunahme von Wetteranomalien, wie Starkregen, in diesem Jahrhundert, stellen höhere Anforderungen an die Geschwindigkeit, mit der die Landwirtschaft auf Veränderungen reagieren muss – und auch an deren engere wissenschaftliche Begleitung.

Wir haben skizziert, wie die datenbasierte Analyse und Prognose ihren Beitrag leisten können. Neben begleitenden Auswertungen des aktuellen Klimaregimes, sollten weitere Kooperationen folgende Fragen bearbeiten:

1. Was können wir (noch) aus der Vergangenheit über die aktuelle Klima-Entwicklung lernen? Finden sich die gezeigten Klimaeinflüsse auch bei Parametern wie Abfluss und Niederschlag sowie bei anderen Stationen?
2. Wo stößt unsere innersaisonale bis dekadische Prognose-Fähigkeit an methodische und prinzipielle Grenzen?
3. Welche konkreten Maßnahmen können künftige Risiken, wie z.B. mehr Nährstoffeinträge in Gewässer, minimieren?
4. Welches Umsetzungspotenzial in der Fläche haben landwirtschaftliche Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel?

Weder pauschale Empfehlungen von Maßnahmen noch „einfache“ Vorhersageregeln sind bisher sinnvoll ableitbar. Auch für künftige regionale Anpassungsstrategien an den Klimawandel sollte das Einsteinsche Credo gelten: „so einfach wie möglich, aber so komplex wie nötig“.

Verwendete Literatur

- Abraham & Shaw 1992. Dynamics. The geometry of behavior. Addison-Wesley, 600 S
- Böckmann & Pätzolt 2012. Regionales Nährstoffreduzierungskonzept Schwielochsee, Fachbeiträge des LUGV 125, 67 S.
- Deumlich 1999. Erosive Niederschläge und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit im Nordosten Deutschlands, Meteorolog. Z. 8(5), 155–161
- EMRA 2018. Projekt-Webseite mit Umfrage, <https://emra.julius-kuehn.de/>
- GCP (Global Carbon Project) 2018. Carbon budget and trends 2017 v 1.3, <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>, Datenstand 9. März 2018
- Funk 2015. Winderosion in Brandenburg – Bodendegradierung und Bodenschutz, Vortrag Bodenschutztag, 04.06.2015, Paulinenaue
- LfU 2010. Land Brandenburg Trend der Grundwasserstände, 1976–2005, http://www.mlul.brandenburg.de/media_fast/4055/udb_gwtrend.pdf
- LfU 2011. Abflussentwicklung im Land Brandenburg 1980–2009 und 1990–2009, Stand 01.07.2011, <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.326583.de>
- Lischeid 2010. Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg, Diskussionspapier 2 01/2010, BBAW, Berlin, 59 S.
- LUFTBILD Brandenburg GmbH 2011. Empfehlungen zur Sicherung von Gewässerrandflächen im Land Brandenburg, 28 S.
- LUGV 2014. Die Wasserbilanzen der Grundwasserkörper im Land Brandenburg, Fachbeiträge des LUGV 142, 54 S.
- Mal et al. 2015. Konservierende Bodenbearbeitung in Deutschland als Lösungsbeitrag gegen Bodenerosion, J. für Kulturpflanzen, 67(9), S. 310–319
- MLUL 2016. Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie – Beiträge des Landes Brandenburg zu den Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen der Flussgebietseinheiten Elbe und Oder für den Zeitraum 2016–2021, 194 S.
- NITROLIMIT 2016. Kosten und Nutzen einer verbesserten Gewässergüte am Beispiel der Berliner Unterhavel, Diskussionspapier, Band 4. 20 S.
- Schmitz & Garvert 2012. Die ökonomische Bedeutung des Wirkstoffes Glyphosat für den Ackerbau in Deutschland, J. für Kulturpflanzen 64(5), S. 150–162
- Wurbs & Steininger 2017. Bodenerosion durch Wind – Sachstand und Handlungsempfehlungen zur Gefahrenabwehr, Umweltbundesamt (Hrsg.), 36 S.
- ZALF 2013. Berechnung von Wirkungs- und Kostenbandbreiten von landwirtschaftlichen Nährstoffreduzierungsmaßnahmen für die Ermittlung der Kosteneffizienz innerhalb einer vorgegebenen Matrix, 65 S.
- Zhang et al. 2010. A Review of Vegetated Buffers and a Meta-analysis of Their Mitigation Efficacy in Reducing Nonpoint Source Pollution, J Environ Qual 39(1), 76–84 (Anhang mit Daten frei verfügbar, Artikel kostenpflichtig)
- Fotos:** Gericke (Titel, S. 15), PortalJardin (pixabay.com, S. 22), Deumlich (S. 24)
- Klimadaten:** CRU (Abb. 1 und 4–6; <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature>) und DWD (Abb. 7, 8 rechts, 9–10; <ftp://ftp-cdc.dwd.de>).

Klimawandel und Wetteranomalien: Bewertung von Agrar-Umwelt-Maßnahmen

Herausgeber: A. Gericke, M. Matranga, M. Venohr (alle IGB), P. Carl (ASWEX),
M. Müller (Beeskow), J. Hornig (Havelland)

Autoren: A. Gericke, M. Matranga, P. Carl

Förderung: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz & nukleare Sicherheit

FKZ: 03DAS074

Unterstützung: Projektträger Jülich (PTJ)

1. Auflage, 2018

Internet und Kontakt:

<https://www.havelland.de/umwelt-landwirtschaft/umwelt/klimaschutz/>

<https://www.beeskow.de/seite/363580/projekt-baum.html>

<https://www.beeskow.de/texte/seite.php?id=96822>

<https://www.beeskow.de/seite/333524/european-energy-award.html>

<http://www.igb-berlin.de>

<http://www.igb-berlin.de/moneris>

<http://www.aswex.de>

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages