

Forschungsempfehlungen für den Komplex Landnutzungsoptimierung im Konfliktfeld THG-Emissions-Reduktion, Ressourcenschonung und menschliches Wohlergehen

Zwischenbericht des BMBF-Projekts FKZ 01LG0801A

Koordination: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Department Landschaftsökologie, Prof. Dr. Ralf Seppelt



Zwischenbericht des BMBF-Projekts FKZ 01LG0801A

„Potenzialanalyse zur Beeinflussung von Landnutzungssystemen und deren biogeochemischen Kreisläufe zur Erreichung der Treibhausgas-Reduktionsziele“

Koordination:

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Department Landschaftsökologie
Ansprechpartner: Prof. Dr. Ralf Seppelt

Projektpartner:

von Thünen Institut für Ländliche Räume, Forst und Fischerei (vTI)
Institut für Ländliche Räume
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Bernhard Osterburg

GeoForschungsZentrum Potsdam in der Helmholtz Gemeinschaft
Ansprechpartner: Dr. Bernd Uwe Schneider

Institut für Energetik und Umwelt gGmbH
Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Max-Planck-Institut für Biogeochemie
Ansprechpartner: Dr. Annette Freibauer

Technische Universität München
Department für Ökologie und Ökosystemmanagement
Ansprechpartner: Dr. Margit von Lützwow

Titel des Berichts:

Forschungsempfehlungen für den Komplex Landnutzungsoptimierung im Konfliktfeld THG-Emissions-Reduktion, Ressourcenschonung und menschliches Wohlergehen

Autoren und Beteiligte:

Axel Don, Karin Frank, Annette Freibauer, Christoph Fühner, Christoph Görg, Mirjam Helfrich, Andreas Huth, Martin Kaltschmitt, Ingrid Kögel-Knabner, Sigrid Köhne, Sven Lautenbach, Margit v. Lützwow, Franziska Müller-Langer, Carsten Neßhöver, Heike Nitsch, Bernhard Osterburg, Annette Prechtel, Bernd Uwe Schneider, Ralf Seppelt, Daniela Thrän, Martin Volk, Thomas Zwingmann

Leipzig, 10. April 2008

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	1
1 KURZFASSUNG	2
2 ZIEL, UMFANG DER EMPFEHLUNG	4
3 KONTEXT	4
3.1 HINTERGRUND	4
3.2 METHODIK	9
4 ZUSAMMENSTELLUNG DER KENNTNISDEFIZITE	15
4.1 KENNTNISDEFIZITE BODEN UND VEGETATION	19
4.1.1 Qualitatives und quantitatives Prozessverständnis der Kohlenstoffstabilisierung und der Freisetzung von THGs aus Böden:.....	19
4.1.2 Einfluss der agrarischen und forstwirtschaftlichen Landnutzung auf THG Bilanzen.....	19
4.1.3 Skalen.....	20
4.2 KENNTNISDEFIZITE LANDNUTZUNGSSYSTEME UND GOVERNANCE	20
4.2.1 Treibende Kräfte der Landnutzung	20
4.2.2 Steuerungsinstrumente und Governance	21
4.2.3 Physisch-ökonomische Charakterisierung.....	21
4.2.4 Syndrom-spezifische Kenntnisdefizite.....	21
4.3 KENNTNISDEFIZITE INTEGRATIVE ANALYSE UND BEWERTUNG	22
4.3.1 Integrative Bewertung.....	22
4.3.2 Methoden und Indikatoren	23
5 FORSCHUNGSBEDARF	24
5.1 FORSCHUNGSBEDARF BODEN UND VEGETATION	24
5.1.1. Qualitatives und quantitatives Prozessverständnis der Kohlenstoffstabilisierung und der Freisetzung von THGs aus Böden.....	24
5.1.2 Einfluss der agrarischen und forstwirtschaftlichen Landnutzung auf THG Bilanzen:.....	25
5.1.3 Erfassung von Raum und Zeitskalen:	27
5.2 FORSCHUNGSBEDARF LANDNUTZUNGSSYSTEME UND GOVERNANCE	28
5.2.1 Triebkräfte des Landnutzungswandels	28
5.2.2 Steuerungsinstrumente und Governance:	28
5.2.3 Physisch-Ökonomische Charakterisierung.....	29
5.3 FORSCHUNGSBEDARF INTEGRATIVE ANALYSE UND BEWERTUNG VON LANDNUTZUNGSSYSTEMEN	30
5.3.1 Einfluss von Landnutzung(sänderungen) auf Ökosystemdienstleistungen sowie Energie- und Stoffbilanzen	30
5.3.2 Regionale Szenarienentwicklung für globale Wandelprozesse, die klimatische, landnutzungsbezogene und sozioökonomische Treiber einschließen.....	30
5.3.3 Erfassung überregionaler Sekundär- und Substitutionseffekte auf Ökosystemdienstleistungen und Energie- und Stoffbilanzen.....	31
5.3.4 Methodenentwicklung, Mehrskalenproblematik, Upscaling, angepasste Indikatoren und Monitoringstrategien	32
6 STRATEGIEN ZUR IMPLEMENTIERUNG DER IDENTIFIZIERTEN THEMEN IN EIN PROGRAMM	33
ANHANG 1: ANKNÜPFUNGSPUNKTE ZU NATIONALEN UND INTERNATIONALEN FORSCHUNGSPROGRAMMEN	36
ANHANG 2: LITERATUR	39

Vorwort

Landnutzungswandel, wie Rodung von Wäldern und Umwandlung von Grünland in Acker hat zu Verlusten von Kohlenstoffvorräten aus Böden und Vegetation zu Lasten der Erdatmosphäre und der Ökosystemfunktionen sowie zu regionalen sozioökonomischen Veränderungen beigetragen. Aufgrund des Bevölkerungswachstums und einer verstärkten Nachfrage in den Industrie- und Schwellenländern ist in den kommenden Dekaden mit zunehmendem Bedarf an Nahrungsmitteln und Energieträgern zu rechnen. Hierdurch wird sich der Landnutzungswandel weiter fortsetzen. Es gilt den Landnutzungswandel zwischen Klimafolgen und ökosystemaren sowie sozioökonomischen Wirkungen optimal zu gestalten.

Der vorliegende Bericht zeigt Forschungsprioritäten in diesem Kontext auf.

Vorangestellt ist eine Kurzfassung (Sektion 1). Nach einer kurzen Darstellung der Ziele dieses Papiers (Sektion 2) wird zunächst auf den Hintergrund des Landnutzungswandels eingegangen (Sektion 3.1) und dann darauf, wie die Forschungsprioritäten ermittelt wurden (Sektion 3.2). Anhand von Syndromen – typischen Krankheitsbildern von Mensch-Umwelt-Interaktionen – wurden Forschungsdefizite analysiert. Diese Syndrome sind ebenfalls in Sektion 3.2 dargestellt.

Anschließend werden die Forschungsdefizite, gegliedert in drei Kernthemen, dargestellt und die Hintergründe sowie die Relevanz dieser Kernthemen aufgezeigt (Sektion 4). In Sektion 5 werden Forschungsthemen für die drei Kernthemen vorgeschlagen, die ihre Motivation in der Defizit-Analyse finden. Eine übergreifende Strategie für die anzustrebende Forschung wird in Sektion 6 dargelegt.

Das Papier enthält zwei Anhänge: laufende Forschungsprogramme, die ebenfalls im Themenkomplex Landnutzung - Klimawandel aktiv sind sowie die in die Studie eingeflossene Literatur.

1 Kurzfassung

Durch Landnutzung und Landnutzungswandel werden die Treibhausgase (THG) Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O) lokal in die Atmosphäre abgegeben. Dies trägt wesentlich zur globalen Erwärmung bei.

Anhand von ökologisch-sozioökonomischen Krankheitsbildern (Syndromen) wurden Kenntnisdefizite für die Wirkung von Landnutzungswandel auf die THG-Emissionen und eine nachhaltige Gestaltung der Landnutzung zusammengestellt. Vier Syndrome wurden untersucht, drei davon fanden Eingang in die Auswertung, wegen ihrer besonderen Klimarelevanz: Das „*Regulierungs-Syndrom*“ beschreibt die stark politisch regulierten Wirkungsgefüge der Landnutzung in Zentraleuropa, das „*Intensivierungs-Syndrom*“ Auswirkungen der Umwandlung bzw. Nutzung natürlicher Ökosysteme zur Bioenergieerzeugung in den Tropen und Subtropen und das „*Sibirien-Syndrom*“ die prospektiven Probleme und Landnutzungsoptionen im Zusammenhang mit dem Auftauen von Permafrost und der damit verbundenen Gefahr, dass die sehr großen terrestrisch gebundenen Kohlenstoff (C) Vorräte freigesetzt werden.

Für eine übersichtliche Strukturierung wurden die ermittelten Defizite in drei thematische Schwerpunkte (Kernthemen) gegliedert: *Boden und Vegetation*, *Landnutzungssysteme und Governance* sowie *Integrative Analyse und Bewertung der Landnutzung*. In einer weiteren Gliederungsebene wurden dann Forschungsempfehlungen ausgesprochen. Mit den in den Forschungsempfehlungen dargestellten Themen können Grenzen der wissenschaftlichen Erkenntnis ausgeweitet und technologische/methodische Neuerungen entwickelt werden. Sie dienen dem Verständnis von Einzelprozessen, Prozessinteraktionen und komplexen Systemen, die für den Klimaschutz relevant sind und als Grundlage für kenntnisbasierte Entscheidungen für Landnutzungsstrategien mit multiplen Zielen (THG-Reduktion, Ressourcenschonung, menschliches Wohlergehen).

Im Kernthema Boden und Vegetation fehlen neben Kenntnissen zu biogeochemischen und physikalischen Prozessen der Entstehung von THG-Emission aus terrestrischen C-Vorräten (Boden und Vegetation) auch Kenntnisse zu der Beeinflussbarkeit der THG-Emissionen durch Anbausysteme und Bewirtschaftungsoptionen. Daten zu terrestrischen C-Vorräten und ihren Veränderungen müssen lokal, regional und global erfasst werden. Ebenso sind die ökosystemaren Nebenwirkungen C-optimierter Landnutzungsverfahren – insbesondere solche auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt von Böden und die Funktion der Vegetation zu untersuchen. Im Kernthema Landnutzungssysteme und Governance liegen Schwerpunkte auf der Charakterisierung komplexer Produktionssysteme und dabei entstehender Emissionen, der Analyse der Triebkräfte des Landnutzungswandels und der Ableitung von Steuerinstrumenten im Spannungsbereich verschiedener Politikfelder und unterschiedlicher Handlungsebenen. Das Kernthema Integrative Analyse und Bewertung von Landnutzung setzt sich mit der gesamtheitlichen (THG-Emissionen, ökosystemare Nebenwirkungen, sozioökonomische Entwicklung) Erfassung und Bewertung der Auswirkungen von Landnutzung auseinander. Dabei werden regionale und überregionale Wirkungen von Landnutzung einbezogen.

Die lokale Produktion von THG steht ihrer globalen Wirkung gegenüber. Die verursachenden ökologischen und gesellschaftlichen Mechanismen und ihre Steuergrößen variieren räumlich und zeitlich und verändern sich in ihrer Relevanz je nach Betrachtungsebene. Landnutzungsstrategien und Handlungsoptionen werden auf der Feldskala, regional und überregional durch unterschiedliche Beteiligte gestaltet. Die Effizienz von Maßnahmen bezüglich der Emissionsreduktion muss lokal über spezifische Adressaten und deren Umgang mit Böden und Vegeta-

tion greifen. Für eine integrative Bewertung von Landnutzungsänderungen müssen daher insbesondere die Übergänge zwischen Raumskalen und zwischen Perspektiven untersucht und dargestellt werden und ggf. entsprechende Methoden entwickelt werden.

Die empfohlenen Forschungsthemen beinhalten zwei vorrangige Forschungsrichtungen: Einerseits sollte rein themenorientiert geforscht werden, um einen Beitrag zum Verständnis von Prozessen der THG-Emission und deren Beeinflussbarkeit aus verschiedenen Perspektiven (wie biogeochemische Prozesse, Management und Handlungsmechanismen, Bewertungsmethodik) durch Grundlagenforschung und angewandte Forschung zu leisten. Diese Forschung kann auch unabhängig von den für die Syndrome spezifizierten Regionen erfolgen. Andererseits soll mit einer syndromorientierten Forschung umfassendes Verständnis der komplexen Wechselwirkungen innerhalb der Syndrome sowie der externen Interaktionen der Syndrome entstehen. Dies kann durch eine systematische und planmäßige Vernetzung von themenspezifischer Forschung erreicht werden, soweit diese innerhalb der Syndrome erfolgt. Auch integrierte regionale Fallstudien können hierbei einerseits zur Verbesserung des methodischen Wissensstands und andererseits - als vergleichende Analysen (auf der Basis eines aufzubauenden globalen integrierten Datensatzes) - zum Erkennen und Bewerten überregionaler Trade-offs und Synergien beitragen. Die syndromorientierte Forschung stellt somit eine Fortentwicklung und Erweiterung des im Millennium Assessment verfolgten Ansatzes dar.

2 Ziel, Umfang der Empfehlung

Ziel dieser Empfehlung ist es Forschungsprioritäten aufzuzeigen, die den Kenntnisstand über die Wechselwirkungen zwischen der Landnutzung und THG-Emissionen, Ökosystemfunktionen sowie sozioökonomischen Rahmenbedingungen verbessern.

Für Entwicklung von Landnutzungsstrategien zur nachhaltigen Verminderung von THG-Emissionen fehlen Erkenntnisse: a) zu biotischen und abiotischen Prozessen der THG-Emissionen aus Böden und Vegetation und deren Steuergrößen, b) zum Zusammenhang zwischen verschiedenen Produktionssystemen und THG-Emissionen, zu den bestimmenden Faktoren für die Landnutzung und zu Steuerungsmechanismen und Gestaltungsmöglichkeiten und c) zu integrativen Bewertungsansätzen für Landnutzungsänderungen (integrierend über THG-Emissionen, ökosystemare Funktionen und sozioökonomische Parameter).

In den empfohlenen Forschungsrichtungen können einerseits aus wissenschaftlicher Sicht hochbrisante Forschungsfelder bearbeitet und technologische/methodische Neuerungen entwickelt werden. Andererseits begründet die anzustrebende Forschung eine hochqualifizierte wissenschaftliche Grundlage für kenntnisbasierte Entscheidungen zu Landnutzungsstrategien zur THG-Reduktion.

3 Kontext

3.1 Hintergrund

Treibhausgase (THGs), insbesondere CO₂, CH₄ und N₂O tragen wesentlich zur globalen Erwärmung bei. Global entfallen ca. 30% der THG-Emissionen auf den Agrarsektor sowie den Landnutzungswandel und den Forstsektor [1]. Böden und Vegetation weisen im globalen Kohlenstoffkreislauf einen wesentlichen Vorrat an Kohlenstoff auf (vgl. Abb. 1). So liegt der geschätzte terrestrische C-Vorrat bei 2150 Pg C, davon jeweils ca. 1400, 60 und 610 Pg in Böden, Streu und Vegetation [2]. Je nach Ökosystemtyp sind die terrestrischen Vorräte unterschiedlich auf Böden und Vegetation verteilt und unterschiedlich hoch (Abb. 2). Im Zuge des Klimawandels, Bevölkerungswachstums, Landnutzungswandels sowie der agrarischen und forstlichen Nutzungsintensivierung fand in den vergangenen Dekaden in vielen Regionen der Welt ein Netto-Abbau der C-Vorräte in Boden und Vegetation, verbunden mit erhöhten THG-Freisetzungen, statt [3; 2; 4; 5].

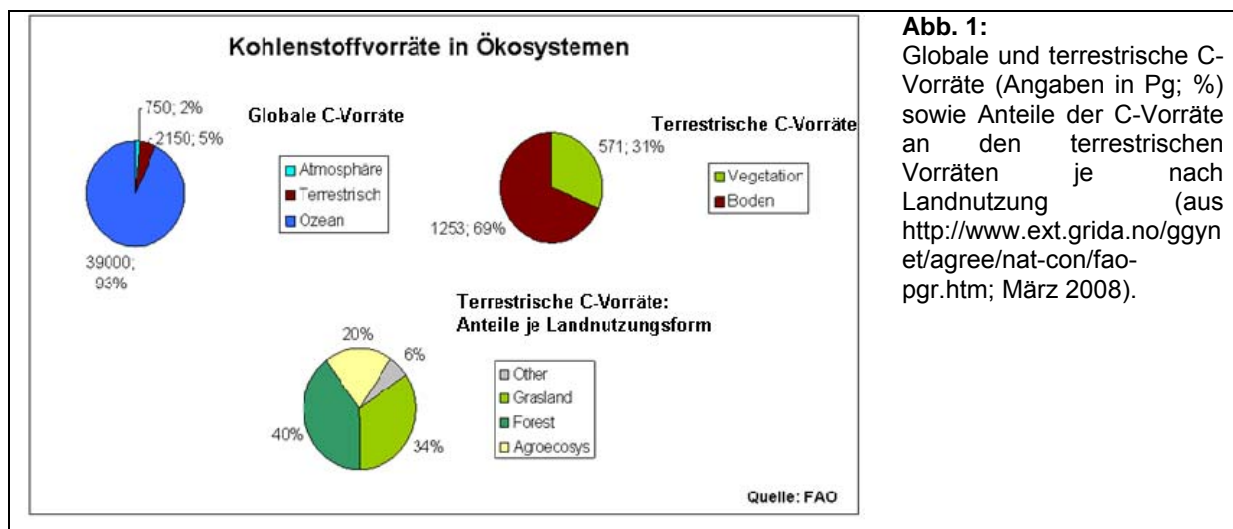
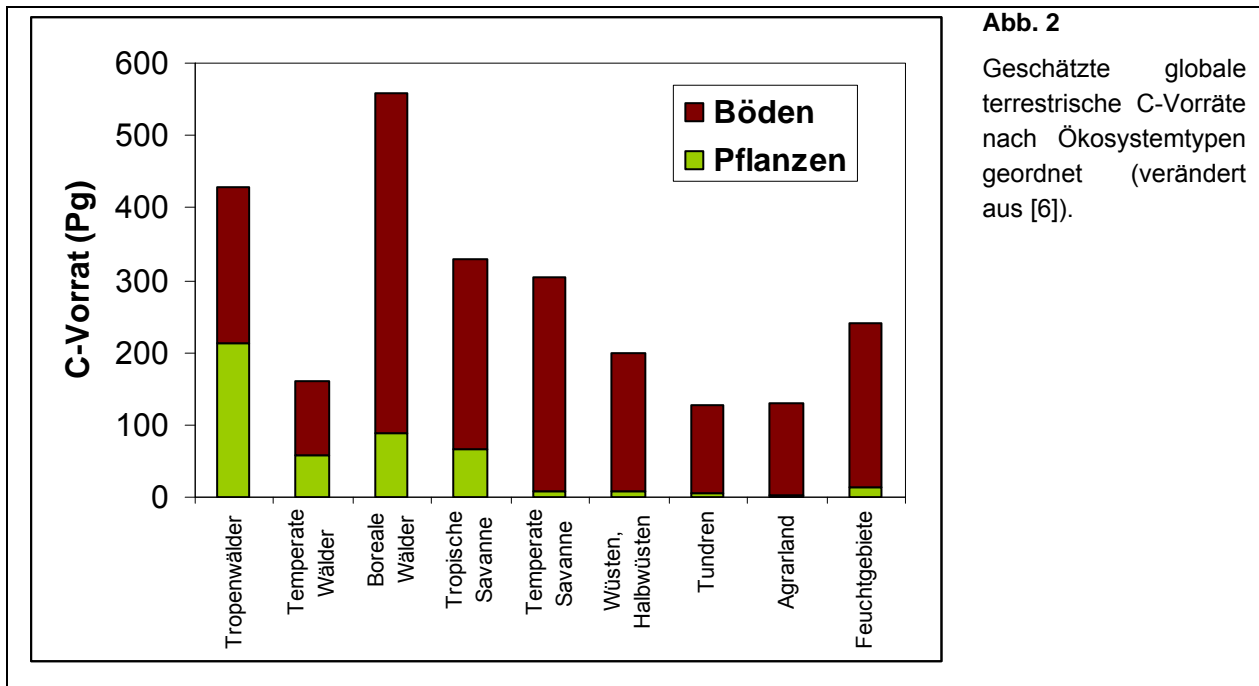
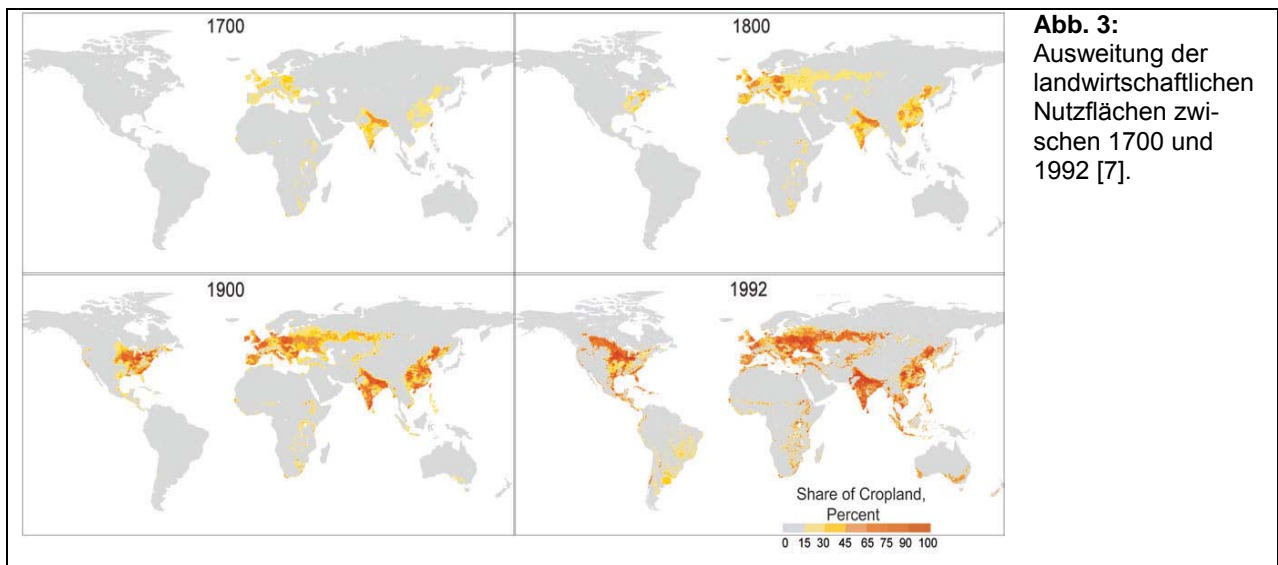


Abb. 1: Globale und terrestrische C-Vorräte (Angaben in Pg; %) sowie Anteile der C-Vorräte an den terrestrischen Vorräten je nach Landnutzung (aus <http://www.ext.grida.no/ggyn/et/agree/nat-con/fao-pgr.htm>; März 2008).



Landnutzungsänderungen haben global ein bedeutendes Ausmaß und Tempo erreicht (Abb. 3 und 4). Relevant sind insbesondere die Abnahme der Waldflächen durch Entwaldung, die Ausdehnung landwirtschaftlicher Nutzflächen (besonders in den Tropen und Subtropen), aber auch ihr Brachfallen [7; 8; 1; 9-11].



Die mit dem Landnutzungswandel einhergehenden Änderungen der Bodenbedeckung und der Nutzungsintensität beeinflussen Funktionen von Ökosystemen, wie z.B. die Regulierung von Energie- und Stoffhaushalten (Wasser- und Nährstoffzyklen) [13-15] oder die Regulierung der Fortpflanzung, Konkurrenzfähigkeit und Nahrungsbeziehung von Arten/Individuen (sog. Biocontrol) [16]. Landnutzungsänderungen haben außerdem Auswirkungen auf die Anpassungsfähigkeit von Standorten und Menschen an klimatische, sozioökonomische und politische Veränderungen [9; 12; 17; 11]. Mit dem Konzept der Ökosystemdienstleistungen (ecosystem services) wird versucht, die Beziehungen zwischen dem Wohlergehen des

Menschen und der Leistungsfähigkeit des umgebenden Ökosystems wissenschaftlich zu beschreiben und politikrelevant aufzubereiten [18]. Die Konsequenzen der Ressourcennutzung/Landnutzung werden im Bezug zum menschlichen Wohlergehen betrachtet. Diese Nutznießerbetrachtung impliziert zum einen, dass Ökosystemfunktionen einen potentiell benennbaren Wert haben und zum anderen, dass konkurrierende Funktionen bewusst gegeneinander abgewägt werden können.

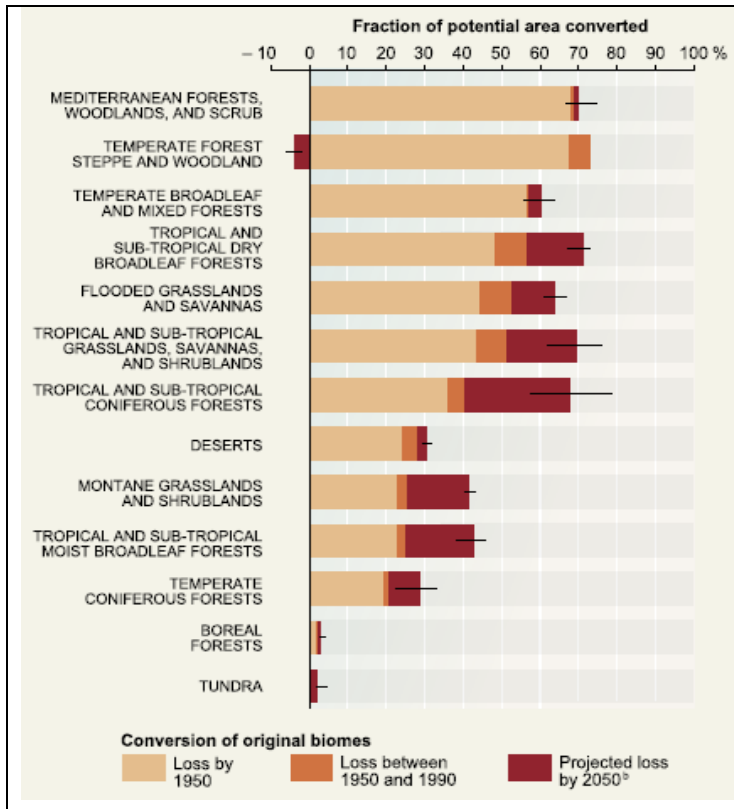


Abb. 4:

Prozentuale Konversion der potentiellen natürlichen Vegetation in verschiedenen Biomen der Erde bis 1950, zwischen 1950 und 1990 sowie als Mittelwert von vier verschiedenen Szenarien bis 2050. Schwarze dünne Linien indizieren den Bereich der vier Szenarien [12].

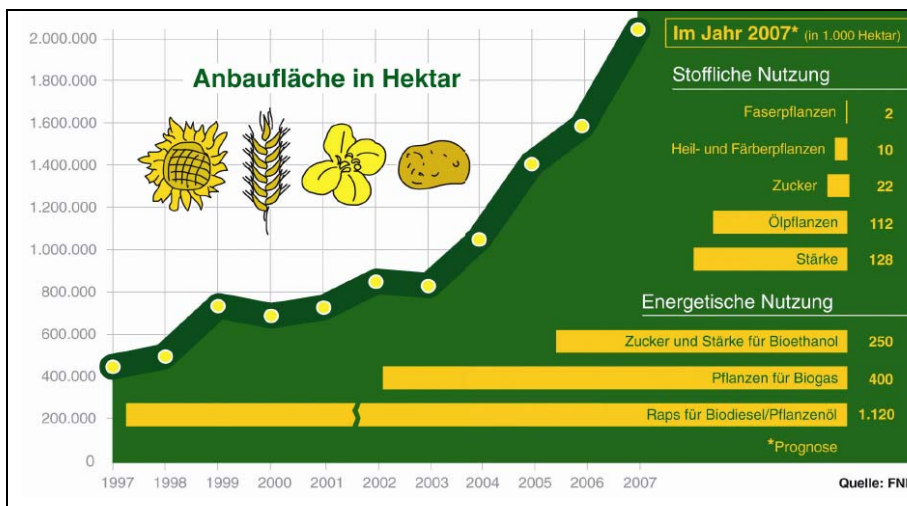


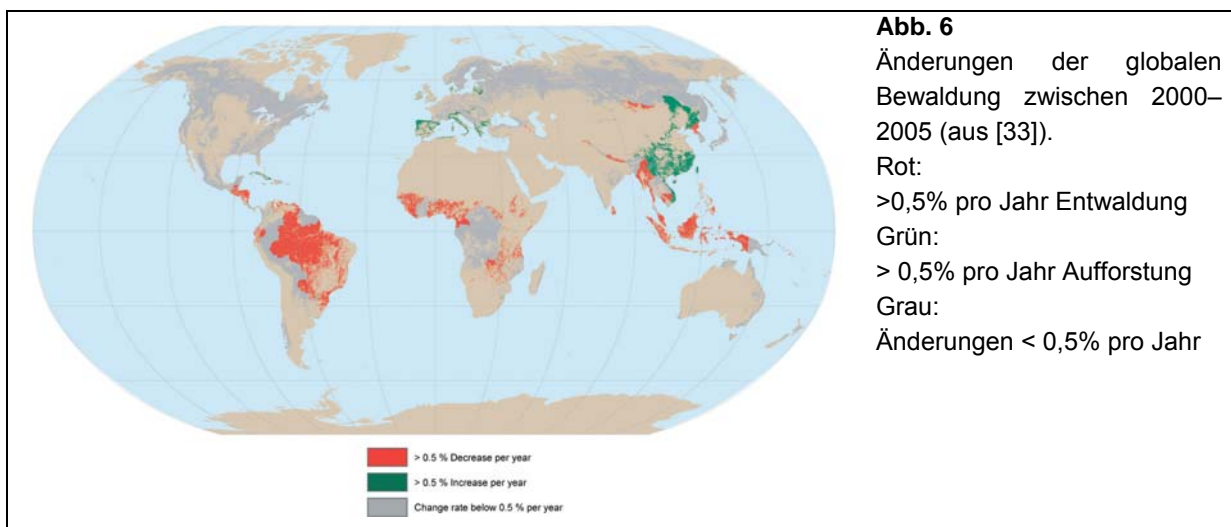
Abb. 5

Anstieg der Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe zwischen 1997 und 2007 sowie prognostizierte Anteile verschiedener nachwachsender Rohstoffe für die stoffliche und energetische Nutzung im Jahr 2007 in der Bundesrepublik Deutschland (aus: FNR <http://www.bioenergie.de/>; März 2008).

In der letzten Dekade hat insbesondere die Nachfrage nach Energie aus Biomasse, angetrieben durch Klimawandel, Energiesicherheitsbedenken und Bestrebungen zur sozioökonomischen Entwicklung ländlicher Räume, zugenommen [19] (vgl. Abb. 5). Insbesondere die Produktion von Biotreibstoffen, die nach Schätzungen mit einem Potential

bis zu 20% zu den THG-Reduktionszielen beitragen kann [20], wird sich verstärkt weiter ausdehnen und verändern: Ab spätestens 2016 sollen Raffinerien in den USA beginnen, Cellulose- statt Maisstärke-basiertes Ethanol abzugeben [21]. Die Europäische Kommission hat im vergangenen Herbst beschlossen, dass bis 2020 20% des Energiebedarfs der EU aus erneuerbaren Quellen (z.B. Biomasse) stammen sollen, damit der Ausstoß von THG durch den Verbrauch fossiler Energieträger reduziert wird. Der Präsident der Europäischen Kommission, Manuel Barroso, hat in seiner Rede vor dem EU Parlament vom 23. Januar 2008 ¹ abermals festgestellt, worin das Mandat konkret besteht: *“... I want to be clear that in putting forward proposals on biofuels, we have also fully respected the other side of the mandate, the need for environmental sustainability.”* Und weiter verspricht er: *“So the proposal creates the most comprehensive and sustainable system anywhere in the world for the certification of biofuels – and for domestic and imported biofuels alike. We will also continue to promote the rapid development of second generation biofuels.”* Es gilt also, nicht nur die THG-Emissionen aus der Produktion und Verwertung von nachwachsenden Energieträgern zu kennen, sondern auch ökologische, ökonomische und soziale Sekundäreffekte auf der lokalen und globalen Ebene integrativ zu berücksichtigen.

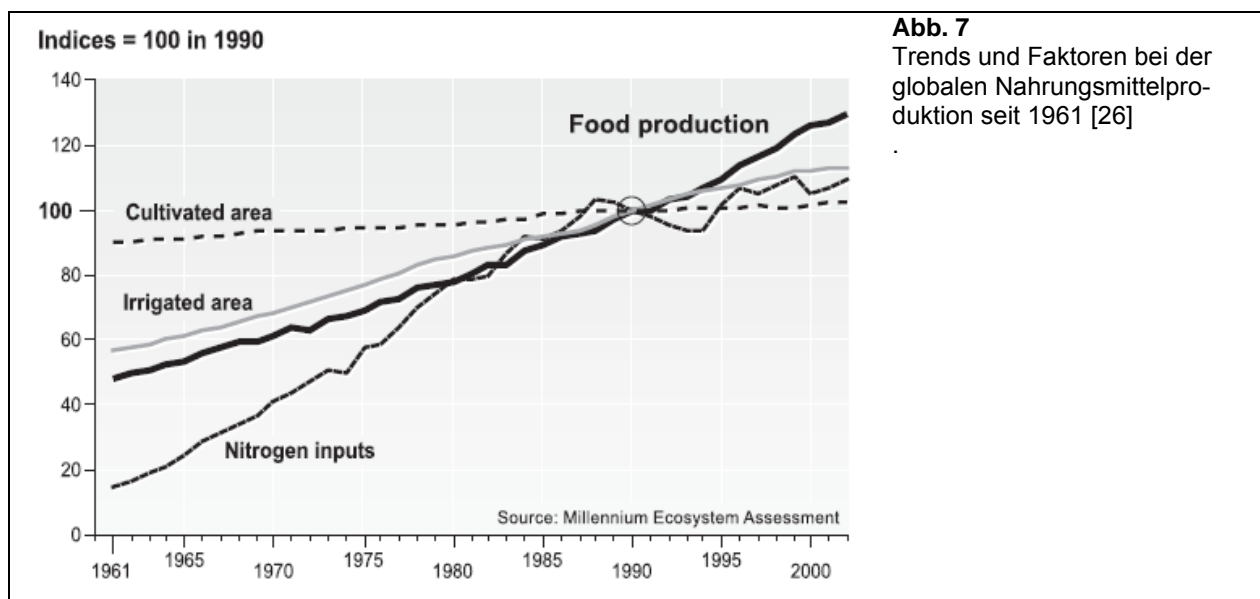
Aktuell werden mehr als ein Viertel der Landoberfläche landwirtschaftlich genutzt. Hiervon weisen ca. drei Viertel nährstoffarme Böden auf. Zwei Drittel dieser Flächen sind bereits heute durch die Bewirtschaftung degradiert, davon 40% sehr stark.



Für die nächsten 20 Jahre wird ein Bevölkerungswachstum von ca. 1,7 Mrd. Menschen prognostiziert. Zudem ist mir einer verstärkten Nachfrage in Industrie- und Schwellenländern zu rechnen. Hierdurch wird der Nutzungsdruck durch Nahrungsmittel- und Energieproduktion stetig steigen und eine Expansion der landwirtschaftlich Nutzfläche und die weitere Intensivierung der Landwirtschaft mit sich bringen, die die Agrar-Ökosysteme mit hoher Wahrscheinlichkeit zusätzlich negativ beeinflussen [7]. Ohne neue Landnutzungsstrategien werden dabei Ökosysteme zunehmend in ihren Funktionen eingeschränkt oder gänzlich verdrängt. Seit der Prä-Agrarzeit fand bereits eine Abnahme der Waldbedeckung um 45% statt [22]. Während in der EU der Waldanteil aufgrund von Aufforstungsprogrammen und Restriktionen bezüglich einer Umwandlung von Wald in andere Landnutzungsformen

¹ <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=SPEECH/08/34>, April 2008

zwischen 2000 und 2005 leicht zugenommen hat, schreitet in anderen Teilen der Welt Entwaldung rasch voran (vgl. Abb. 6). Die höchsten Netto-Verluste zeigen Brasilien und Indonesien), ganz überwiegend durch eine Umnutzung der Fläche [23] mit resultierenden Emissionen klimawirksamer Gase bzw. dem Verlust von Senkenfunktionen. Durch den vermehrten Einsatz von Agrochemikalien haben sich seit 1945 die Nutzpflanzenerträge vervielfacht. Unausgewogene Anbaumaßnahmen und eine stetige Intensivierung (vgl. Abb. 7) führen seitdem zu Belastungen der Umwelt und zu einem Abbau der Kohlenstoffvorräte in Boden und Vegetation. So werden beispielsweise nur 50-60% des Stickstoffdüngers von den Pflanzen verwertet [24]. Überschüsse gelangen über den Stickstoffzyklus des Bodens in das Grund- und Oberflächenwasser sowie in die Atmosphäre und führen so zur Gewässereutrophierung, zur Belastung von Trinkwasserressourcen oder infolge der Wirkung von THG zur Erwärmung der Erdatmosphäre. Weitere Umweltschäden, sind u. a. Erosion, Bodenversalzung und Bodenverdichtung. Durch Habitatfragmentierung, Etablierung von Monokulturen, Eutrophierung sowie veränderte Bodenfunktionen führen die Ausweitung und Intensivierung der Landnutzung auch zu einer Reduktion der Biodiversität. Landnutzung ist nachweislich ein entscheidender Faktor in der THG-Reduktion. Für Deutschland rechnet man mit einem Anteil von 10% der THG-Emissionen durch die anthropogene Landnutzung. Dabei haben unterschiedliche Nutzungssysteme einen unterschiedlichen Anteil an den Emissionen (Forstwirtschaft -5%, Energie in land- und forstwirtschaftlicher Produktion 10-20%, Moornutzung 2-4%). Die Landwirtschaft ist die Hauptquelle für die Freisetzung von N₂O und CH₄ [25; 1].



In Vegetation und Boden sind weltweit etwa 2.150 Pg C gespeichert. Bis zu einem Viertel davon könnte im nächsten Jahrhundert durch Klimawandel und Landnutzungsänderung freigesetzt werden und dadurch den Klimawandel weiter beschleunigen. Andererseits zeigt sich regional und sektoral auch das Potential die C-Vorräte in terrestrischen Ökosystemen zu erhöhen [27]. Verglichen mit anderen großen globalen Kohlenstoffpools, wie z.B. denen der Ozeane, CH₄-Clathrate und fossiler Lagerstätten erscheint der Erhalt und die Vermehrung der terrestrisch gebundenen Kohlenstoffvorräte über die Landnutzung besser beeinflussbar. Allerdings fehlen Kenntnisse der zugrunde liegenden biogeochemisch und physikalischen

Prozesse und Ökosystemfunktionen, wie auch solche des Wirkungsgeflechts zwischen sozioökonomischen Treibern und Steuergrößen. Schließlich mangelt es an ganzheitlichen Bewertungsansätzen für den Landnutzungswandel [28; 7].

Folgende Fragen stellen sich hier: a) Können die C-Pools in Böden und Vegetation durch ein angepasste Landnutzung kurz oder mittelfristig erhöht werden, wie und in welchem Umfang kann dies geschehen? b) Inwieweit konkurriert solches Bestreben mit anderen Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen auf lokaler, regionaler und globaler Ebene und c) Welche Bewertungs- und Umsetzungswerkzeuge werden einer integrativen Betrachtung der THG-Emissionen gerecht?

3.2 Methodik

Die vorliegende Empfehlung basiert auf einer syndromorientierten Analyse von Kenntnisdefiziten. Dies heißt anhand der Analyse international publizierter Literatur zu unten näher definierten Syndromen (s.a. Kasten 1), die alle Hotspots im Hinblick auf THG-Emissionen sind, wurden Kenntnisdefizite und Forschungsthemen identifiziert. In die Analyse einbezogen sind die Pedosphäre, Hydrosphäre, Ökosysteme, Wirtschaft und Politik/Gesellschaft.

Kasten 1: Begriffsdefinitionen

Landnutzung (land use): Flächennutzung für agrarische oder forstliche Produktion, natürliche Ökosysteme, Siedlung, Industrie und Verkehr. Die Forschungsempfehlungen beziehen sich auf den land- und forstwirtschaftliche Nutzungen sowie Innutzungnahmen natürlicher Ökosysteme.

Landnutzungswandel/Landnutzungsänderung (land use change): Änderungen der Flächennutzung im Agrar- und Forstsektor (für Grünland, Acker, Wald, Feuchtgebieten nach dem Kyoto-Protokoll) und Innutzungnahme natürlicher Ökosysteme [29].

Anbausystem (cropping system): Charakterisiert durch alle Maßnahmen, die in Verbindung mit Pflanzenbeständen auf den Boden wirken (Merkmale solcher Systeme sind z. B. Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz). Synonyme: Produktionssystem -form bzw. Bewirtschaftungssystem, -form.

Ökosystemfunktion (ecosystem function): Intrinsische Abläufe eines Ökosystems: Ökosystemfunktionen oder auch -prozesse sind z.B. Produktions- und Abbauprozesse, Nährstoffkreisläufe, Nährstoff- und Energieflüsse [29].

Ökosystemdienstleistung (ecosystem service, ESS): Konzept zur Darstellung der Beiträge von Ökosystemen zum Wohlbefinden des Menschen. Ein ESS ist der Nutzen, den Menschen aus einer Ökosystemfunktion ziehen. ESS werden als *Basis-, Versorgungs-, Regulierungs-, und Kulturleistungen* gruppiert. Sie beeinflussen die Elemente des menschlichen Wohlbefindens *Sicherheit, gute Grundversorgung, Gesundheit, gute Sozialeinbindung* und *Wahl- und Handlungsfreiheit* [29].

Syndrome: Als Syndrome werden typische funktionale Muster problematischer Mensch-Umwelt-Interaktionen verstanden, die durch Kombination einzelner Trends und Teilaspekte des Globalen Wandels (Symptome) die wichtigsten Veränderungen in Zivilisation und Natur charakterisieren. [30].

Vulnerabilität: Grad der Empfänglichkeit für nachteilige Auswirkungen des Klimawandels (inkl. Variabilität und Extremereignisse) oder Grad der Unfähigkeit sich an solche Effekte anzupassen. Vulnerabilität ist eine Funktion von Art, Ausmaß und Geschwindigkeit des Klimawandels sowie der Sensibilität des Systems und seiner Anpassungsfähigkeit [31].

Syndrome sind regional auftretende, komplexe „Krankheitsbilder“ in den Mensch-Umwelt-

Interaktionen. Der Syndromansatz [32] wurde als konzeptioneller Rahmen der Empfehlung gewählt, weil er eine integrative Problemerkennung im multidimensionalen Umfeld ermöglicht und bei transregionaler Gültigkeit lokale Untersuchungen erlaubt. Aus der Analyse eines Syndroms kann man also sowohl Erkenntnisse zu Einzelprozessen als auch zu multidimensionalen Wirkungskomplexen gewinnen und so nachhaltige und auf Regionen mit vergleichbarer Disposition und Vulnerabilität übertragbare Handlungsoptionen entwickeln. Auch der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) empfiehlt das Syndromkonzept zur integrativen Beschreibung und Behebung globaler Umwelt- und Entwicklungsprobleme.²

In Tab. 1 werden drei Syndrome³ beschrieben, bei denen Landnutzungswandel und THG-Emissionen stark interagieren und darüber hinaus weitere typische Querbezüge (z.B. Einschränkung von bestimmten Ökosystemdienstleistungen) auftreten.

Regulierungs-Syndrom

Der Agrar- und Forstsektor ist als größter Flächennutzer in Mitteleuropa [33; 34] wichtig für Vermeidungsstrategien von THG-Emissionen und eine klimaschonende Bereitstellung von Nahrungsmitteln und nachwachsenden Rohstoffen, einschließlich Energieträger. Ziel künftiger Forschungsprojekte für dieses Syndrom ist es, hier die Grundlagen einer multikriteriellen bzw. integrativen Optimierung für den Klimaschutz zu schaffen.

In Mitteleuropa ist sowohl im Bereich der Nahrungs- und Futtermittelproduktion als auch bei der Produktion nachwachsender Rohstoffe eine weitere Intensivierung der Bewirtschaftung zu beobachten, die unter anderem durch den Einsatz von Hochleistungssorten zu einem Humusvorratsabbau und damit zur Bodendegradation beiträgt [13-15]. Forciert wird dieses Problem durch die Zunahme klimatischer Extreme in Form von lang anhaltenden Trockenphasen oder Überschwemmungsereignissen in der Vegetationsperiode, aber auch durch eine Düngepraxis, die sich nicht an standörtlichen Heterogenitäten und an dem Nährstoffbedarf der Pflanzen orientiert und so direkt oder indirekt (Auswaschung, gasförmige Verluste etc.) angrenzende Ökosysteme belasten [35-38].

Regionen des Syndroms sind durch eine besonders hohe Regelungsdichte und ein großes Angebot von Förderinstrumenten im Bereich der Agrar-, Umwelt-, Raumordnungs- und Energiepolitik charakterisiert. Aufgrund seines stark regulierten Charakters wirkt es besonders das Problem der horizontalen und angesichts der Mehrebenensysteme der Europäischen Union [39] zusätzlich das der vertikalen Politikintegration auf [40]. Die gut entwickelten Steuerungsmechanismen der EU-Agrarpolitik führen aber auch dazu, dass politische Entscheidungen zur Umsteuerung der Schwerpunktsetzung in der Landwirtschaft, etwa die verstärkte Förderung des Biomasseanbaus, insbesondere für die energetische Verwertung, innerhalb kürzester Zeit flächendeckende ökologische und sozioökonomische Effekte entfalten können. Dies gilt beispielsweise für die Aufhebung der Förderung von Brachflächen im Herbst 2007 [41-43]

Der steigende Bedarf an Biomasse zur energetischen Nutzung hat gemeinsam mit steuerpolitischen Maßnahmen zu einer starken Dynamik beim Energiepflanzenanbau geführt

² http://www.wbgu.de/wbgu_syndromkonzept.html; März 2008

³ Das im Projektantrag zusätzlich benannte Syndrom „Tropische Bergregionen“ wird in der vorliegenden Forschungsempfehlung nicht behandelt, da die betreffenden Regionen nach eingehender Literaturanalyse allenfalls ein geringes Potential zur Reduktion von THG-Emissionen bieten.

[44]. In der Bundesrepublik Deutschland stieg die Anbaufläche nachwachsender Rohstoffe für die stoffliche und energetische Verwertung innerhalb der vergangenen zehn Jahre um etwa 400 % (Abb.5). Mit 1,56 Mio. ha hatte sie im Jahr 2006 einen Anteil von 13 % an der gesamten Ackerfläche. Hiervon nahm die Biomasseproduktion für den Energiesektor den weitaus größten Teil in Anspruch. Weniger als 15 % dieser Fläche wurde für die Kultivierung von Pflanzen für die stoffliche Verwertung genutzt.⁴

Aus der Produktion nachwachsender Rohstoffe resultieren bereits heute Flächennutzungskonkurrenzen zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion [43] sowie Zielkonflikte insbesondere mit dem Natur-, Boden- und Wasserschutz [45; 43]. Die Intensivierung und Ausweitung der Landwirtschaft für die Produktion von Energiepflanzen geht mit einer zusätzlichen Gefährdung der regionalen Biodiversität [46; 47] und Ökosystemdienstleistungen [48] einher. Da die Produktionskapazität in Europa die Nachfrage nach Biokraftstoffen nicht decken kann [49], besteht gleichzeitig ein erheblicher Druck auf andere Regionen der Erde, den Biomasseanbau für den Energiesektor zu forcieren [50; 43] (s. „Intensivierungs-Syndrom“).

Untersuchungsgebiete: Regionen in Zentraleuropa. Die Produktion nachwachsender Rohstoffe erfolgt vorzugsweise in Regionen mit verhältnismäßig hohen Niederschlägen/Wasserressourcen. Nicht zuletzt aufgrund des hohen Anteils der Pflanzenproduktion für den Energiesektor bietet sich Deutschland für Untersuchungen des „Regulierungs-Syndrom“ an. Die Betrachtung von Regionen etwa in Polen, der Tschechischen Republik, den Niederlanden, Belgien, Nordfrankreich oder Südengland erlaubt Vergleiche nationaler Regelungsinstrumentarien und regionaler Besonderheiten.

Intensivierungs-Syndrom

Die weltweit steigende Nachfrage insbesondere nach Biokraftstoffen führt in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern zu einer vermehrten Ausrichtung der land- und forstwirtschaftlichen Produktion auf den Energiesektor. Dieser Trend kann potenziell nicht nur zu einer Minderung der globalen THG-Emissionen, sondern auch zur ökonomischen Entwicklung der betreffenden Länder beitragen [51]. Indes zielen hier Anstrengungen in vielen Fällen allein auf die Maximierung der landwirtschaftlichen Produktion ab, ohne damit verbundene Sekundäreffekte zu berücksichtigen [52]. Nicht selten führen die mit der Produktion von biogenen Energieträgern einhergehenden Maßnahmen, insbesondere die Zerstörung natürlicher C-Senken, zu negativen CO₂-Bilanzen [53; 54]. Aufgrund des Bevölkerungswachstums und einer verstärkten Nachfrage in den Industrie- und Schwellenländern ist in den kommenden Dekaden mit zunehmendem Bedarf an Nahrungsmitteln und Energieträgern zu rechnen. Gerade in Entwicklungs- und Schwellenländern ist es auch der Anbau von Bioenergiepflanzen, der häufig mit schwer wiegenden Beeinträchtigungen der Umwelt einhergeht. Zu nennen sind hier vor allem die Zerstörung von Wäldern [55] und Feuchtgebieten [56], die Übernutzung von Wasserressourcen [57], die Bodenversalzung [58], die Freisetzung von Pestiziden [59], Bodenerosion [60] und Bodendegradation [58], die Abnahme der Gehalte an organischem Material der Böden [61] sowie die Etablierung invasiver Arten [62]. Gleichzeitig kann diese Entwicklung aber auch zu sozioökonomischen Verwerfungen, wie etwa die Verdrängung kleiner Produzenten durch integrierte Produktionsgesellschaften [63; 64] oder zum Anstieg der

⁴ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: <http://www.bio-energie.de/>; März 2008

Lebenshaltungskosten infolge einer verminderten Nahrungsmittelproduktion führen [65-67]. Ziel der deutschen Bundesregierung und der Europäischen Union ist es, durch geeignete Steuerungsinstrumente, wie etwa integrative Zertifizierungssysteme, eine nachhaltige Produktion und Vermarktung von Bioenergieträgern zu gewährleisten und damit potenziell mit der Bioenergieproduktion verbundene ökologische, ökonomische und soziale Probleme zu verhindern.

Untersuchungsgebiete: Für Untersuchungen des „Intensivierungs-Syndroms“ bieten sich aufgrund der bereits seit Jahrzehnten etablierten Produktion von Biokraftstoffen, des Auftretens sozialer Disparitäten und der negativen Folgen der Erweiterung der Anbaufläche von nachwachsenden Rohstoffen auf Kosten des Amazonasregenwaldes und der Savanne Anbauregionen in Brasilien an [68; 54]. Am Beispiel von Mexiko können u. a. überregionale Sekundäreffekte, beispielsweise in Bezug auf den Anstieg der Lebenshaltungskosten durch die Konkurrenz der Flächennutzung für die Produktion von Nahrungsmitteln und Biotreibstoffen untersucht werden (vgl. [51]). Um eine einseitige Ausrichtung auf Südamerika zu vermeiden, sollten ähnlich gelagerte Probleme, wie etwa infolge der Ausweitung von Palmölplantagen v. a. auf Kosten tropischer Regenwälder, in Malaysia und Indonesien analysiert werden [54; 69]. Indien als Land mit hohem Potential für die Bioenergiepflanzenproduktion, aber noch geringem Anteil an der Produktion, könnte ebenfalls in die Liste potenzieller Untersuchungsregionen aufgenommen werden (vgl. [70]).

Sibirien-Syndrom

Aufgrund ihrer niedrigen Temperaturen und geringen Störungen fungieren Ökosysteme der hohen nördlichen Breiten seit Jahrtausenden als Kohlenstoffsinken [71]. Boreale Nadelwälder, Permafrostböden und Moore speichern hohe Kohlenstoffvorräte, die weiterhin aufgebaut werden. Als Kohlenstoffsinken waren und sind diese Ökosysteme für die Regulation des globalen Klimas von entscheidender Bedeutung. Insbesondere infolge der physikochemischen Veränderungen und abiotisch-biotischen Effekte, die mit dem Überschreiten des Gefrierpunktes einhergehen, erweisen sich die betreffenden Standorte und Ökosysteme als besonders vulnerabel gegenüber Klimaveränderungen [72]. Durch das Auftauen von Permafrostböden [73] und die damit einhergehende Freisetzung bisher im Boden gebundener THG sowie deren beschleunigte Genese im Zuge der temperaturabhängigen Metabolisierung des hier in großen Mengen vorliegenden organischen Materials (vgl. Abb. 2) kann der globale Klimawandel eine weitere Beschleunigung erfahren [74-76]. Neuere Untersuchungen weisen den subpolaren und borealen Permafrostgebieten sehr viel höhere Methanemissionen zu als bisher angenommen [31]. Zu den selbstverstärkenden Effekten des Globalen Klimawandels trägt hier v. a. das Auftauen von Yedoma bei, einem Lössmaterial, das in der Tundra mit ca. 500 Pg sogar höhere Gehalte an labilem organischen Kohlenstoff aufweist als die Böden der betreffenden Regionen [31].

Szenarienanalyse gehen davon aus, dass bis 2080 die Permafrostflächen um 20-35 % abnehmen und sich die südliche Grenze des kontinuierlichen und diskontinuierlichen Permafrostgebiets um mehrere Hundert Kilometer nach Norden verschiebt [77]. Mit dieser Entwicklung werden erhebliche, aber noch weitgehend unbekannte ökosystemare und landnutzungsbezogene Veränderungen einhergehen, die ihrerseits im Zusammenhang mit künftigen Treibhausgasemissionen und Beeinflussungen ökologischer und sozioökonomischer Systeme gesehen werden müssen. Unklar ist auch, wie sich die Erwärmung und veränderten

Niederschläge auf das Störungsregime, etwa hinsichtlich des Auftretens von Bränden und Insekten, und die Vegetationsdynamik sowie die Wasserbilanz der Moore auswirken werden.

Für die Entwicklung der forstwirtschaftlichen Nutzung borealer Nadelwälder könnte sich der weltweit steigende Rohstoff- und (Bio-) Energiebedarf [78] zu einem wichtigen Faktor entwickeln, dessen Potential und Folgen für die natürlichen Ressourcen es zu untersuchen gilt. Die Nähe zum dynamischen Holzmarkt in China führt bereits zu einem intensiveren legalen und illegalen Holzeinschlag in sibirischen Wäldern.⁵ Dies bewirkt Zielkonflikte zwischen der Holznutzung und der Reduktion der N- und C-Pools in bisher ungenutzten Primärwäldern [335] und vor allem auch bei Eingriffen in den westsibirischen Mooren. Gleichzeitig ist die Feuerhäufigkeit in der Nähe menschlicher Siedlungen und Infrastruktur stark erhöht [79]. Wie sich die intensivere Nutzung und Feuerhäufigkeit auf die Netto-C- und N-Bilanz der Ökosysteme auswirken, ist unklar, da ihr Einfluss auf die Sukzession in den Wäldern unbekannt ist. Auch die Interaktionen zwischen Erwärmung, Feuer und Schädlingskalamitäten ist in Sibirien unbekannt, aber bereits als großes forstwirtschaftliches Risiko in Kanada und Alaska erkannt [80; 81]. Schließlich drohen in vielen Regionen des hohen Nordens sozioökonomische und ökologische Implikationen durch die zunehmende Erschließung und den zunehmenden Abbau von Bodenschätzen [82; 83]. Bisher gibt es keine (proaktiven) Ansätze, durch Anpassung, Nichtnutzung von Primärwäldern oder nachhaltige Waldwirtschaft die Emissionen von THG aus den borealen und arktischen Gebieten zu reduzieren.

Es wird eine Fokussierung künftiger Forschungsarbeiten auf Regionen Sibiriens empfohlen, da hier sowohl die Grundvoraussetzungen als auch die dringende Erfordernis vorliegen, Wissensdefizite für die Benennung standortgerechter nachhaltiger Landnutzungsformen auszuräumen und zugleich geeignete Governance- und Managementstrukturen zu entwickeln: Neben prinzipiell sehr viel größeren Wissensdefiziten als im Falle Fennoskandiaviens und Nordamerikas ist diesbezüglich anzumerken: a) Sibirien weist weltweit das größte Areal mit Permafrostböden [84], die größten Nadelwälder [22; 23] und Torfmoorgebiete [85; 86] auf, b) Sibirien bietet sowohl große anthropogen ungenutzte Flächen für die Untersuchung natürlicher Sukzessionen als auch Areale mit industrieller, land- und forstwirtschaftlicher Nutzung für differenzierte Untersuchungen von Effekten durch bzw. auf anthropogene Nutzungsformen [84], c) in einigen Regionen Sibiriens treten derzeit besonders weit reichende Änderungen der Waldbedeckung auf [79], d) in Ost-Sibirien [87] und Nordwest-Sibirien [88] führen Temperaturerhöhungen zu einem fortschreitenden Auftauen von Permafrostböden, e) die feedbacks zwischen den großen westsibirischen Mooren und dem Klimawandel sind unbekannt aber waren durchs Holozän hindurch global relevant [89], f) in Sibirien ist als Folge von Klimaanomalien und menschlichen Einflüssen eine besonders starke Zunahme der Waldbrände zu verzeichnen [79; 90], g) in Sibirien fehlen geeignete staatliche Steuerungsinstrumentarien und integrierte Managementstrukturen; diese gilt es zu entwickeln bzw. zu implementieren [91; 84].

⁵ http://new.forestsmonitor.org/capacityBuildingInRussia/_ecologyBackground.htm; März 2008

Tabelle 1: Charakteristika der Syndrome

	Regulierungs-Syndrom	Intensivierungs-Syndrom	Sibirien-Syndrom
Kurzbeschreibung	Ursachen-Wirkungskomplex von intensiv genutzten Agrarräumen.	Vernichtung natürlicher Ökosysteme und Veränderung bestehender Kulturräume durch verstärkten Anbau von Energiepflanzen.	Auftauen und fortschreitende land/forstwirtschaftliche Erschließung von Permafrostgebieten.
Vorherrschende Landnutzung	Intensivlandwirtschaft	Landwirtschaft	Forstwirtschaft, (Abbau von Bodenschätzen)
Klimate	Gemäßigt (temperat)	Tropisch, subtropisch	Subpolar (boreal)
Treiber	Politik, Ökonomie	Politik, Ökonomie	Klimawandel, Ökonomie
Markt	EU-Markt	Weltmarkt	Regionaler und internationaler Markt
Produktion	Intensivierung der Landwirtschaft auf bereits hohem Niveau	Intensivierung der Landnutzung Biomasseproduktion zur Ethanolherstellung Biomasseproduktion in Form von Palmöl	Erstnutzung von Primärwäldern und landwirtschaftliche Nutzung von Mooren
Trade-offs	Regulierungsfunktionen (v. a. Puffer-Filter-Funktion von Böden für Wasser und Nährstoffe;; Klimaregulierung) Versorgungsfunktionen (Produktionsfunktion Nahrung)	Regulierungsfunktionen (v. a. Puffer-Filter-Funktion von Böden für Wasser und Nährstoffe;; Produktionsfunktion, Klimaregulierung) Versorgungsfunktionen (Nahrung)	Regulierungsfunktionen (Puffer-Filter-Funktion von Böden für Wasser und Nährstoffe; Klimaregulierung; Abfluß) Versorgungsfunktionen (Holz, Torf)
Terrestrischen Kohlenstoff	Abbau des C-Vorrates des Bodens Entkopplung von Stoffkreisläufen (C N) Verhalten passiver C-Pools unklar	Bilanz des C in Böden und Vegetation langfristig unklar	Abbau des C-Vorrates in Böden und Vegetation; langfristige Entwicklung der Vegetation unklar.
Problemfelder	Hoher Beitrag des Agrarsektors zu THG-Emissionen; Hoher Einsatz von Agrochemikalien (negative Wirkung auf Wasserqualität); Humusabbau und qualitative Veränderungen der org. Substanz in Böden; Reduktion der Biodiversität; Veränderung von Bodenfunktionen; Ineffiziente stoffliche und energetische Verwertung von Produkten Konkurrenz Nahrungsmittel zu Energiepflanzen und beide zu Naturschutz	Ausdehnung der Produktion von nachwachsenden Energieträgern für den internat. Markt zu Lasten extensiver Produktion oder Naturwälder; Abholzung tropischer Regenwälder; Entwässerung von Feuchtgebieten; Degradierende Boden- und Wasserqualität; Wald- und Moorbrände; Reduktion der Biodiversität Konkurrenz Nahrungsmittel zu Energiepflanzen und beide zu Naturschutz Soziale und ökonomische Veränderungen	Gefahr der raschen, nachhaltigen und hohen THG-Freisetzung bei Umwandlung von Primärwäldern mit Verlusten der C-Vorräte und der Biodiversität. Stark gestiegene Waldbrandhäufigkeit verursacht durch Menschen, begünstigt durch Klimaerwärmung, Trockenheit Veränderliche Bodenhydrologie Abnehmende Bodenstabilität; Verlagerung der Zonobiome;
Prioritäre Untersuchungsregionen	Zentrales Mitteleuropa, z.B. Deutschland, Polen, Tschechische Republik, Niederlande, Belgien, Nordfrankreich, Südengland	Brasilien (z.B. Cerrado und Patanal-Regionen), Mexiko, Indonesien, Malaysia	Russland (Sibirien), Kanada

4. Zusammenstellung der Kenntnisdefizite

Aus der literaturbasierten Analyse der Syndrome leitete sich zur Strukturierung der Defizite eine Gliederung mit drei thematischen Schwerpunkten (sog. Kernthemen) ab. In den Kernthemen *Boden und Vegetation*, *Landnutzungssysteme und Governance* sowie *Integrative Analyse und Bewertung der Landnutzung* (Abb. 8) wurden über alle Syndrome hinweg Kenntnisdefizite bezüglich einer Gestaltung der Landnutzung zu Reduktion der THG-Emissionen und weiterer Nachhaltigkeitsaspekte (wie Naturressourcen, ihre Funktion und Sozioökonomie) offenbar. Jedes Kernthema gliedert sich in 3-4 verschiedene Schwerpunktbereiche.

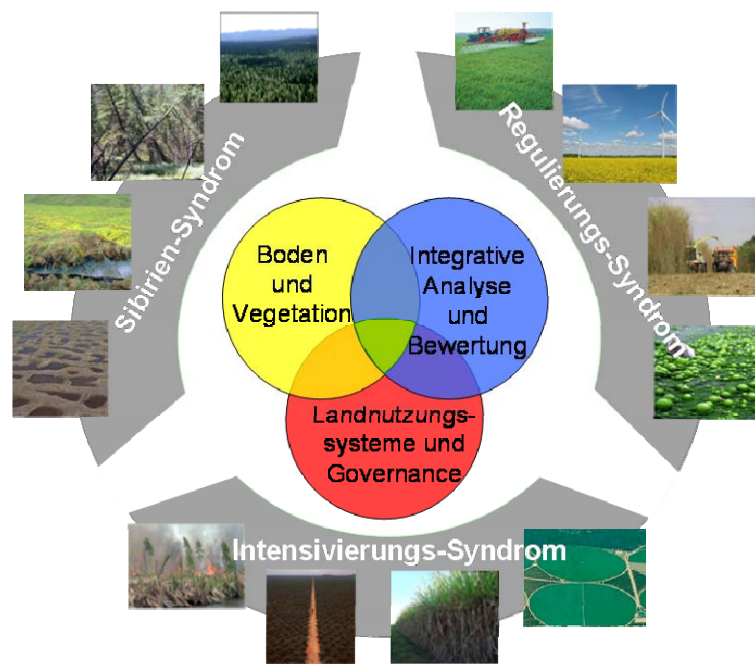


Abb. 8. Kenntnisgrundlagen für eine THG-optimierte Gestaltung der Landnutzung.

Böden und Vegetation stellen einen der größten globalen Kohlenstoffvorräte dar, wobei globale Schätzungen davon ausgehen, dass ca. 70 % dieser Vorräte in Böden und 30% in der Vegetation gebunden sind [2; 92]. Für die betrachteten Syndrome sind die terrestrischen Kohlenstoffvorräte, entsprechend der vorherrschenden Ökosystemtypen, überwiegend im Boden gebunden („Regulierungs-Syndrom“, „Sibirien-Syndrom“) oder vermehrt auch in der Vegetation („Intensivierungs-Syndrom“) (vgl. Abb. 2). Der Umsatz dieser Vorräte wird neben dem Klima sowie den geologischen Ausgangsbedingungen (Mineralogie/Pedogenese) durch Landnutzung und Anbausysteme erheblich beeinflusst [93; 5; 94]. Beispielsweise wird die Brandrodung von Wäldern mit 25 % der globalen anthropogenen C-Emissionen beziffert [31]. Die Verhinderung der Waldzerstörung birgt auf der anderen Seite ein THG-Emissionsminderungspotential von 450-800 Pg C aus Böden und Vegetation [95; 96].

Die globale Einführung von Anbausystemen mit Minimalbodenbearbeitung hat ein theoretisches Emissionsminderungspotential von 25 Pg C in den nächsten 50 Jahren [97] - ein allerdings kontrovers diskutiertes Potential [98]. Indes werden nachweislich 7 bis 12% der europäischen Treibhausgasemissionen durch die terrestrischen Ökosysteme wieder aufgenommen [6]. Aufgrund der hohen Vorräte (geschätzt sind global 1400, 60, 610 Pg C in Böden,

Streu und Vegetation) können selbst kleinste Veränderungen der Größe oder Umsatzzeit von C-Pools die atmosphärischen CO₂-, N₂O- und CH₄-Konzentrationen stark beeinflussen [99].

Mit Rückkopplungen zum Kohlenstoffhaushalt von Böden und zur Vegetation werden die Versorgung-, Puffer- und Filterfunktionen für Wasser und für Nährstoffe durch Landnutzungswandel und Anbauintensivierung vermehrt Störungen ausgesetzt: Intensivierte Landnutzung schlägt sich in Form lokaler und regionaler Verluste der Bodenqualität/Bodenfruchtbarkeit aber auch der Wasserqualität sowie der Wasservorräte nieder [13-15], [100]. Habitatwandel (Lebensraumverlust, Fragmentierung) infolge von Entwaldung oder der Einsatz von Monokulturen können zudem zu einer veränderten Leistungsfähigkeit (z.B. Biomasseproduktion) der Vegetation führen. Überlagert werden anbau- und landnutzungsinduzierte Störungen von den Trends des Klimawandels. Als primäre Probleme der Bereitstellung einer ausreichenden Nahrungsgrundlage für die Menschen, werden der landnutzungsinduzierte Verlust an Nährstoffen aus Böden und die qualitative und quantitative Beeinträchtigung der Wasserressourcen angesehen [29; 25;101].

Landnutzungssysteme und Governance: Landnutzungssysteme beeinflussen – zusammen mit Veränderungen der Bodenbedeckung und der Nutzungsintensität – natürliche Schlüsselfunktionen wie z.B. Klimaregulierung, Wasserhaushalt, Bodenfunktionen und Biocontrol. Sie haben außerdem Auswirkungen auf die Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen und Menschen an klimatische, sozioökonomische und politische Veränderungen [9; 12; 17; 11]. Um bestehende Landnutzungsmuster verstehen, Vorhersagen treffen und eine wirksame und effiziente Steuerung von Landnutzungsentscheidungen ermöglichen zu können, sind nicht nur Daten über das bisherige Ausmaß von Landnutzungsänderungen erforderlich, sondern es ist auch ein verbessertes Verständnis des Ursachenkomplexes notwendig. Die verschiedenen naturräumlichen, sozialen, ökonomischen, kulturellen und politischen Bestimmungsfaktoren für die Landnutzung als auch die Triebkräfte und Konsequenzen von Landnutzungswandel bedürfen einer interdisziplinären Analyse und einer Betrachtung auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene [102; 103; 17].

Eine integrierte Betrachtung physischer und ökonomischer Faktoren der Landnutzung wird auch benötigt, um die Grundlagen für die Analyse der Ressourceneffizienz der flächengebundenen Produktion und der dabei entstehenden Emissionen zu verbessern. In der Klimaberichterstattung wird nach Quellgruppen strukturiert, wobei die in Wirtschaftssystemen stattfindenden Energie- und Stoffflüsse und monetäre Verflechtungen keine Berücksichtigung finden [104] [UN ECE 2002]⁶: Inter- und intrasektorale Verflechtungen können daher nicht direkt aus den Emissionsberichten abgelesen werden, sind aber entscheidend für die Bewertung von Produktionssystemen. Land- und forstwirtschaftliche Produktionssysteme sind organische Einheiten, deren Wirkungszusammenhänge sich sehr komplex darstellen und unterschiedliche Belastungseinheiten bei gleichen Outputs produzieren [105]. Internationale Betriebsvergleiche⁷ bieten geeignete Ansatzstellen, um Betriebe unterschiedlicher Struktur und Rahmenbedingungen gegenüberzustellen.

Geeignete Governanceinstrumente und -strategien müssen die zentralen Triebkräfte des Landnutzungswandels vor dem Hintergrund der jeweils spezifischen naturräumlichen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen adressieren. Diese Faktoren unterscheiden sich

⁶ UN ECE 2002:

<http://www.unece.org/env/documents/2002/eb/ge1/eb.air.ge.1.2002.7.e.pdf>; März 2008

⁷ http://www.agribenchmark.org/who_we_are.html; <http://www.ifcndairy.org/>; März 2008

jedoch sehr stark zwischen den verschiedenen Syndromen. Insbesondere die Relevanz politischer Subventionen, weltmarktinduzierten Nachfragedrucks sowie nationaler Entwicklungsstrategien als Triebkräfte des Landnutzungswandels differieren erheblich und erfordern unterschiedliche Reaktionsstrategien. Eine Voraussetzung für das Design problemadäquater Governanceinstrumente ist daher eine Erforschung der Vulnerabilität, die dem Zusammenspiel natürlicher und gesellschaftlicher Faktoren Rechnung trägt [106].

Die aktuelle starke Dynamik beim Energiepflanzenanbau [44] und bereits daraus resultierende Flächennutzungskonkurrenzen [45; 54; 43; 107] verdeutlichen die Notwendigkeit von Anbausystemen, die diese Konflikte limitieren. Entscheidend für deren tatsächliche Nutzung ist die Entwicklung von Konzepten zur Etablierung, die die Analyse von treibenden Kräften und Hemmschwellen, Flächenpotenzialen und -konkurrenzen, Wirtschaftlichkeitsaspekten und Förder- und Steuerungsinstrumenten mit einbeziehen.

Integrative Analyse und Bewertung von Landnutzungssystemen: Die Wechselwirkungen zwischen land- und forstwirtschaftlicher Produktion und anderen Ökosystemdienstleistungen sind vielfältig und werden durch den Klimawandel bzw. Anpassungen an ihn beeinflusst [108; 109]. Daher müssen Landnutzungsänderungen, die auf die Reduktion von THG-Emissionen abzielen oder durch den Klimawandel selber verursacht werden, im Zusammenhang mit möglichen Effekten insbesondere auf Regulierungs- und Bevorratungsfunktionen des Naturhaushalts gesehen werden [29; 110-114; 7]. Unter diesem Gesichtspunkt sind aber auch natürliche und naturnahe Ökosysteme zu betrachten, die durch den globalen Wandel weit reichende Veränderungen erfahren und in diesem Zuge auf das Klima zurückwirken können [115]. In besonderem Maße gilt dies für Permafrostgebiete mit ihren ausgedehnten Mooren und Wäldern [74-76; 116-118].

Ökosystemdienstleistungen, deren Grundlage Ökosystemfunktionen und Biodiversität sind, können nicht unabhängig von gesellschaftlichen Belangen korrekt erfasst und bewertet werden und erfordern deshalb die Berücksichtigung auch sozioökonomischer Faktoren [119; 28; 120-122]. Neben kurzfristigen sollten immer auch mittel- und langfristige ökologische, ökonomische und soziale Effekte des Klima- und Landnutzungswandels auf lokaler, regionaler und globaler Ebene sowie zwischen diesen verschiedenen Ebenen betrachtet werden [29; 60].

Skalen der Kernthemen: THG-Emissionen entstehen lokal, ihr Beitrag zum Klimawandel ist aber ein globales Problem. Die verursachenden ökologischen und gesellschaftlichen Mechanismen und ihre Steuergrößen variieren räumlich und zeitlich und verändern sich in ihrer Relevanz je nach Betrachtungsebene.

Untersuchungs-, Beobachtungs- und Steuerungsansätze greifen Fragestellungen aus der jeweiligen Perspektive (z.B. biogeochemische Prozessforschung, betriebliche oder administrative Managementeinheiten, politische Wirkungskreise) auf und greifen dabei jeweils auf eine entsprechende räumliche und zeitliche Abgrenzung/-Skala zurück. Entscheidungen zur Landnutzung werden, je nach Akteur (z.B. Betriebsleiter oder Politiker) auf der Feld- bis zur regionalen Ebene getroffen und vor dem Hintergrund unterschiedlicher Zielsetzungen (z.B. Gewinnoptimierung oder nachhaltiger Ressourcenschutz) (vgl. Abb. 9). Beschreibende Daten oder funktionale Zusammenhänge sind für bestimmte Maßstabsebenen vorhanden, ihre Gültigkeit für andere Skalen oder unter veränderter Perspektive ist nicht zwingend gegeben [123; 124]. Hierdurch entstehen Erkenntnisverluste, die für Entscheidungsprozesse zur

Landnutzung relevant sein könnten und auch Entscheidungen, die auf angrenzenden Skalen Fehlentwicklungen bedingen können.

Obwohl Raum und Zeit wissenschaftlich betrachtet Kontinua sind, werden jeweils nur die Skalensequenzen betrachtet, die für gegebene Probleme oder Interessen relevant erscheinen. Es bestehen z.T. erhebliche Diskrepanzen zwischen den Maßstäben, auf denen sich z.B. die Prozesse der THG-Bildung und -Emission oder angrenzende Ökosystemfunktionen (Wasserhaushalt) abspielen, auf denen sie gemessen werden (oder technisch messbar sind) und auf denen Management oder Politik angreift, um sie zu bewerten und zu beeinflussen. Für den Aufbau einer nachhaltigen Landnutzung müssen Erkenntnisse aus verschiedenen Skalen integriert werden, wobei spezifische Skalen und Skalenübergänge explizit berücksichtigt werden müssen, um Informationsverluste und nachteilige Wirkungen einer Entscheidung auf angrenzenden Skalen und den damit veränderten relevanten Zielgrößen/Mechanismen zu vermeiden.

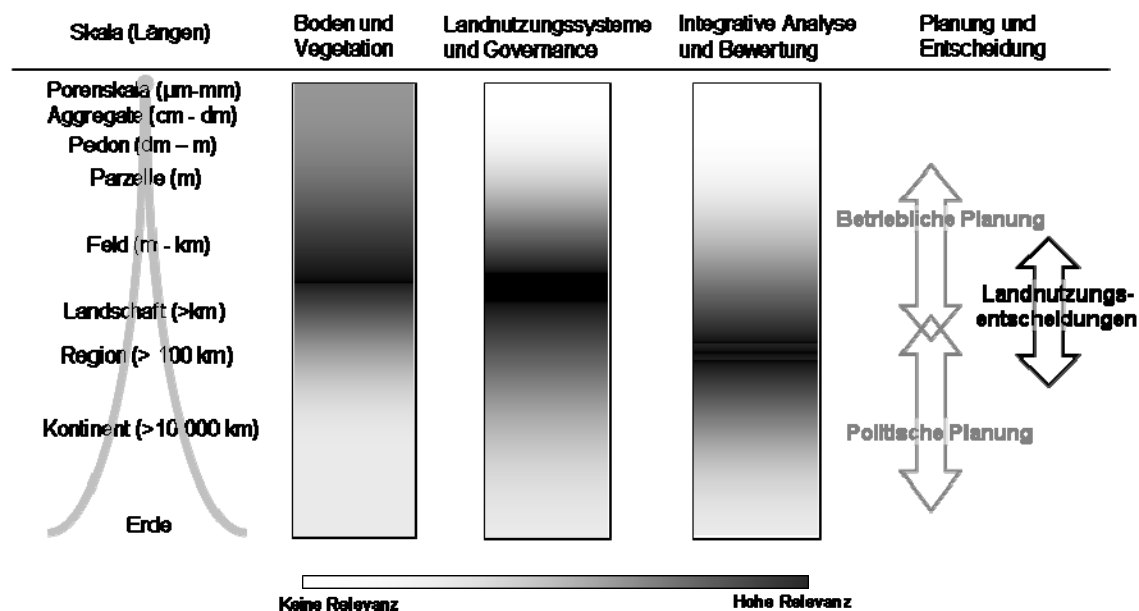


Abb. 9. Übersicht zu Raumskalen, die für Kernthemen vorrangig interessant sind und auf denen für einen verbesserten Klimaschutz Erkenntnisse gewonnen werden sollen.

Abbildung 9 kennzeichnet die räumlichen Skalen die für die Kernthemen relevant sind, d.h. in Forschung und Anwendung besonders berücksichtigt werden. Dabei ist zu erkennen, dass Inhalte innerhalb von Kernthemen mehrskalig verfolgt werden, und dass es Überlappungen in den betrachteten Skalen zwischen den Kernthemen gibt. Im Hinblick auf eine integrierte Sichtweise zu Folgen und Optionen der Landnutzung gilt es, besonderes Augenmerk auf die Skalenübergänge innerhalb und zwischen den Kernthemen zu lenken. Forschungsaspekte zu Skalenübergängen werden deshalb explizit in den Kernthemen aufgegriffen.

4.1. Kenntnisdefizite Boden und Vegetation

4.1.1 Qualitatives und quantitatives Prozessverständnis der Kohlenstoffstabilisierung und der Freisetzung von THGs aus Böden:

Das Kyoto Protokoll, das Millennium Assessment und Arbeiten des IPCC weisen auf die Notwendigkeit hin, fundamentales Prozessverständnis als Grundlage für einen nachhaltigen Klimaschutz zu erreichen [1; 125]. Beispielsweise ist die quantitative Schätzung - insbesondere für die mengen- und wirkungsmäßig relevanten Emissionen von CH₄ (GWP-Faktor 23) und N₂O (GWP-Faktor 296) - nach dem aktuellen Stand mit hohen Kenntnisdefiziten und Unsicherheiten behaftet [1]. Im Detail fehlen das Prozessverständnis zur Stabilisierung und Destabilisierung von C in Böden, die Identifikation der Schlüsselmechanismen (Rekalzitranz, räumlicher Ausschluss und organo-mineralische Assoziationen) - insbesondere in den Tropen [126-127; 5] -, sowie die Differenzierung und Charakterisierung der passiven C-Pools (mit Umsatzzeiten >100 Jahren) [128-134]. Ebenso fehlt eine Einschätzung der Relevanz der C-Umsatzmechanismen und ihrer Steuergrößen, wie Wasserhaushalt [135-138; 71], Bodenstruktur und strukturbedingte Redox-Systeme [139], Temperatur [140; 38; 141] oder Stickstoffhaushalt [142-144]. Auch fehlen konzeptionelle und quantitative Kenntnisse über gekoppelte bodenphysikalische - biogeochemische Prozesse und der Interaktionen zwischen Boden und Vegetation [136; 145; 146; 14].

4.1.2 Einfluss der agrarischen und forstwirtschaftlichen Landnutzung auf THG Bilanzen

Durch Nutzungseingriffe und -änderungen in Agrar- und in Forstsysteme hat der Mensch einen erheblichen Einfluss auf die C- und N-Umsätze im Boden und damit auf die Bodenfunktionen (d.h. auf die Leistungsfähigkeit der Systeme bezüglich z.B. Produktion, Puffer- und Filter, Stabilität etc.). Eingriffe erfolgen häufig mit anderen Zielen, als den C-Haushalt zu steuern, oder nur auf der Basis von Erfahrungswissen [147; 148]. Letztlich ist mit dem Begriff der nachhaltigen Nutzung von Böden auch die Wahrung und Optimierung des Gehaltes an organischer Substanz im Zuge der Nutzung verbunden [149; 150]. Das Ausmaß, in dem die Bewirtschaftung Gewinne oder Verluste an organischer Substanz im Boden verursacht, ist sehr variabel und schwer vorherzusagen [151]. Die Forschung der letzten Jahre hat einiges zum grundsätzlichen Verständnis der C-Stabilisierung in Böden geleistet. Qualitative Erkenntnis muss aber für viele Landnutzungssysteme noch weiter spezifiziert und auch quantitativ erfasst werden. Dazu gehören etwa für gemäßigte Klimate die Art der Bodenbearbeitung sowie das Management von Ernterückständen [151; 5; 152; 94; 153; 97] oder die Konzeption von Agroforstsystemen, das Weidemanagement oder der Einsatz tiefwurzelnder, schnellwüchsiger Gräser und Bäume für die Tropen [154; 155; 5; 152].

Es fehlen mittel- und langfristige, standortspezifische Daten, um den Effekt verschiedener Landnutzungssysteme auf die THG-Emissionen und die C-Stabilisierung im Spannungsfeld von Klimawandel, Ressourcenschutz, Nahrungs- und Energienachfrage quantifizieren zu können. Insbesondere bestehen Kenntnisdefizite zu mittel und langfristigen Veränderungen der C-Vorräte im Boden (v.a. in Unterböden und passiven C-Pools) und in der Vegetation [154] sowie datenbasierte Kenntnisse zu C-Sättigungsgehalten und der C-Dynamik in verschiedenen Bodenpools [156-159; 31; 160-162] für konventionelle und innovative Anbausysteme. Diese Größen bilden die Grundlage für die Beurteilung der Funktion von Böden und der Vegetation als Senken oder Quellen für Kohlenstoff. Vor diesem Hintergrund ist das De-

sign und der Aufbau geeigneter Monitoringsysteme für C-Vorräte in Böden und Vegetation notwendig [163] sowie der Erhalt und Aufbau von Langzeitversuchen.

Darüber hinaus bestehen erhebliche Kenntnisdefizite und Widersprüche über die Wirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen (wie Bodenbearbeitung, N-Düngung und Pflanzenarten, Fruchtfolgen) auf den C-Umsatz [142; 164-167; 132; 144], die qualitative Zusammensetzung der C-Pools von Böden [168-170] und die Stabilisierungsmechanismen [164; 130; 132].

Schließlich sind die ökosystemaren Nebenwirkungen - besonders bezüglich der Puffer- und Filterfunktion für Wasser und Nährstoffe oder der Produktionsfunktion - von Anbausystemen, die auf einen Klimaschutz bzw. die C-Optimierung abzielen, nicht hinreichend bekannt. Im Kontext mit dem Klimawandel betrifft dies insbesondere die Interaktionen zwischen Pflanzenproduktion, Bodenstruktur und Bodenwasserhaushalt [171; 172]. Kenntnisse fehlen hier hinsichtlich der Beziehung zwischen Pflanzeigenschaften (Wurzelwachstum und -funktion, Wuchsform von z.B. Biomassepflanzen) und der Dynamik des Bodenwasserhaushalts sowie Prozessen an der Bodenoberfläche, z.B. dem Transport von Wasser und Gas über die Schnittstelle Boden - Atmosphäre [171; 146].

Während für die landwirtschaftlichen Systeme das Management des Boden-C-Pools im Vordergrund steht, muss in Waldökosystemen die ober- und unterirdische Biomasse als wesentlicher C-Pool mit berücksichtigt werden. Boden- und Biomasse-Pool werden durch die Störungshäufigkeit (Feuer, Ernte) begrenzt [173]. Wie durch unterschiedliche Waldbewirtschaftungssysteme die C-Vorräte im Wald langfristig positiv beeinflusst werden können, ist weitgehend ungeklärt, da dies nur durch Modelle und langfristige Inventurdaten abschätzbar ist [174; 175].

4.1.3 Skalen

Ungelöste methodische Probleme bestehen in dem Umgang mit Skalenübergängen. Um die Klimawirksamkeit bestimmter Landnutzungssysteme abschätzen zu können ist eine skalenkonsistente Beschreibung von Prozessen und eine räumliche Hoch-Skalierung von Feld- zur Regionalskala oder auf die globale Skala nötig. Hier fehlen konsistente Datensätze zur Validierung von Upscaling- und Downscaling-Methoden und insbesondere Methoden und Daten zur Skalierung von gekoppelten Prozessen [172]. Die Frage nach den räumlichen und zeitlichen Skalen, die die Bereitstellung bestimmter Ökosystemfunktionen (z.B. Puffer- und Filterfunktion, Produktionsfunktion) ermöglicht [176] ist hieran anzuschließen.

4.2 Kenntnisdefizite Landnutzungssysteme und Governance

4.2.1 Treibende Kräfte der Landnutzung

Obgleich hinsichtlich der Bestimmungsfaktoren für die Landnutzung die Notwendigkeit erkannt ist, sowohl sozio-ökonomische als auch biophysikalische Aspekte gemeinsam zu betrachten, besteht weiterhin Forschungsbedarf bezüglich Datenverfügbarkeit und methodischer und analytischer Ansätze, um die komplexen Entscheidungsmechanismen für die Landnutzung zu charakterisieren [271]. Eine multisektorale und skalenübergreifende integrierte Betrachtung von Politiken als treibende Faktoren ist notwendig (MA, 2005b). Die Bedeutung globaler Einflussfaktoren nimmt zu und muss dementsprechend berücksichtigt werden [177].

Szenarien zu Landnutzung (z.B. [178-180]) als weiteres wichtiges Instrument sind bislang meist auf bestimmte Regionen (z.B. auf die EU-Ebene) begrenzt. Defizite bestehen zudem hinsichtlich einer weiteren Integration geographischer und ökonomischer Bestimmungsfaktoren [8].

4.2.2 Steuerungsinstrumente und Governance

Die Governance von Landnutzungssystemen spielt sich, gerade auch aufgrund von Umweltaspekten, auf sehr unterschiedlichen räumlichen Ebenen ab, deren Zusammenspiel in vielen Fällen noch unzureichend bekannt ist. Neben der Beschreibung und Analyse bestehender Bedingungen spielen dabei auch ein Monitoring sowie die Nutzung von Szenarien zur Unterstützung zukünftiger Politikoptionen eine wichtige Rolle.

Allen Syndromen gemeinsam sind Defizite in der kausalen Erfassung und des politikwirksamen Monitorings des Einflusses von Landnutzungsänderungen und Produktionssystemen auf THG-Emissionen: Ein zentrales Defizit ist dabei die entscheidungsrelevante Aufarbeitung entsprechender Befunde und ihre Einspeisung in die jeweiligen Entscheidungsprozesse. Es fehlen zudem transnationale Regelwerke zur Anrechnung und zur Minderung landnutzungsbedingter THG-Emissionen und zur Vermeidung unerwünschter (Neben-)Effekte anderer Politiken (wie z.B. bei der Förderung von Biotreibstoffen). Zertifizierungen, Anforderungen an nationale und regionale Landnutzungsplanung und die Flexibilitätsmechanismen des Kyoto-Protokolls (Joint Implementation, Clean Development Mechanism) stellen bisher allenfalls Ausgangspunkte für die Entwicklung solcher neuartiger, politischer Instrumente und institutioneller Regelungen dar und bedürfen der Entwicklung.

4.2.3 Physisch-ökonomische Charakterisierung

Bezüglich der Beschreibung unterschiedlicher Produktionssysteme gibt es bisher keine systematische Darstellung und globale Verknüpfung von Zusammenhängen zwischen Vorleistungseinsatz, Agrarproduktion, Ernährungswirtschaft, Nutzung erneuerbarer Energien und privatem Verbrauch. Es bestehen Defizite hinsichtlich der Erfassung von Stoffströmen der Ernährungswirtschaft (der Bereitstellung von erneuerbaren Energien aus Biomasse, von Forstprodukten) und der monetären Verflechtungen innerhalb einer Region im Hinblick auf ihre vollständige und konsistente statistische Abbildung. Für solche umfassenden, sektor- und regionenübergreifenden I/O-Analysen gibt es im Bereich der Agrar- und Forstwirtschaft bisher nur erste Ansätze [181]. In der Umweltgesamtrechnung wird der Agrarsektor nur pauschal betrachtet. Insbesondere besteht auch Forschungsbedarf zu einer systematischen, mehrstufigen Verwendung von Pflanzen als Nahrungsmittel, Rohstofflieferant und Energiequelle (Ausschöpfung des Nutzungspotentials) [20] zur Steigerung der Ressourceneffizienz und zur Minderung der THG-Emissionen.

4.2.4 Syndrom-spezifische Kenntnisdefizite

Das „Regulierungs-Syndrom“ wirft aufgrund seines stark reglementierenden Charakters besonders das Problem der horizontalen, sowie in Mehrebenensystemen wie der Europäischen Union, zusätzlich das der vertikalen Politikintegration auf [182; 183]. Untersuchungsbedarf besteht im Zusammenwirken der Vielzahl bestehender Förder- und Steuerungsinstrumente im Bereich der Agrar-, Umwelt-, Raumordnungs- und Energiepolitik innerhalb und zwischen unterschiedlichen Sektoren und ihrer Auswirkungen auf die Landnutzung im Zusammenhang mit anderen treibenden Kräften. Es besteht die Gefahr der Fehlsubventionierung und Fehlsteuerung aufgrund mangelnder Abstimmung politischer Maßnahmen [43; 107; 183]. Dies

berührt auch die Aspekte des tatsächlichen Vollzugs und der Effizienz von Maßnahmen. Es besteht ein Bedarf zu Analyse von Relevanz und Möglichkeiten zur angepassten energetischen Nutzung marginaler Standorte bzw. naturschutzfachlich wertvoller Flächen [45; 43; 184; 185] und zur Etablierung insbesondere mehrjähriger (holzartiger) Energiepflanzen auf Ackerland [186-188] (Förderung/Steuerung; Flächenpotenziale und -konkurrenzen, Wirtschaftlichkeit, Beitrag zur Verwirklichung multipler Ziele; Grenze landwirtschaftliche Nutzfläche/Wald).

Auch bei den anderen Syndromen gibt es Hinweise auf widersprüchlich wirkende Politiken bezüglich Landnutzung [102]. Gleichzeitig besteht Handlungsbedarf durch ein hohes Potenzial für nachteilige Landnutzungsänderungen, insbesondere durch Innutzungnahme von Wäldern und Mooren beim „Intensivierungs-“ und beim „Sibirien-Syndrom“, und eine dringende Notwendigkeit, die energetische Nutzung von Biomasse durch umweltpolitische Steuerungsinstrumente zu begleiten [107]. Beim „Intensivierungs-Syndrom“ stellen weltmarktin-duzierte Anreize zum Landnutzungswandel, oftmals gekoppelt mit nationalen Entwicklungsstrategien, die zentralen Herausforderungen dar [189; 190], allerdings in Verbindung mit regionenübergreifenden Wechselwirkungen (z.B. cross-scale interactions zwischen US-amerikanischen oder europäischen Subventionen und der Produktion von Biokraftstoffen in Schwellenländern [102; 179; 107]. Weltmarktanreize können hier zu einer Fehlansrichtung nationaler Entwicklungsstrategien führen [102; 54; 189; 107; 190]. Angepasste Governance-Strategien müssen dies berücksichtigen. Beim „Sibirien-Syndrom“ steht ebenfalls die Frage der institutionellen Anpassungskapazitäten im Raum; spezifisch ist hier die Entwicklung von alternativen Nutzungsstrategien bzw. eines eventuellen Nutzungsverzichts und von Ausgleichszahlungen zu nennen. Mit der integrierten Beschreibung von Landnutzungssystemen besteht für das „Sibirien-Syndrom“ keine praktische Erfahrung. Simulationsmodelle sind nicht auf entsprechende Bodendynamik in Bezug auf die Inkulturnahme und unterschiedliche Produktionssysteme angepasst. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

4.3. Kenntnisdefizite Integrative Analyse und Bewertung

Landnutzungswandel wirkt sich nicht nur auf den Produktionsertrag und die THG-Emissionen aus, sondern auch auf weitere Faktoren und Funktionen von Landoberflächen. Derartige externe Effekte im Zusammenhang mit dem Landnutzungswandel zu erkennen, steuerungsrelevant aufzubereiten und zu bewerten, ist bisher sehr problematisch [28; 25; 1]. Verschiedene Ansätze bieten sich an, um externe Effekte, insbesondere solche, die keinen Marktbezug haben, zu untersuchen: Evaluationen von Ökosystemdienstleistungen (Ecosystem Services, ESS) sowie Ökobilanzen oder Life Cycle Assessment (LCA). Innovativ und besonders viel versprechend ist eine Kombination dieser beiden Ansätze.

4.3.1 Integrative Bewertung

Das Konzept der Ökosystemdienstleistungen wurde in den letzten 15 Jahren entwickelt [111; 113] und z. B. Rahmen des Millennium Assessment und des Heinz-Reports [191] genutzt, um a) den Einfluss von Ökosystemen und ihren Dienstleistungen auf das anthropogene System im Sinne von menschlichem Wohlergehen (Human-Well-Being) zu analysieren und b) Perspektiven für deren zukünftige Entwicklung durch Szenarioanalysen zu beschreiben [7]. Im Rahmen der hier diskutierten Fragestellungen handelt es sich bei den relevanten Ökosystemdienstleistungen um:

- die Produktion von Nutzgütern
- Klimaregulation und C-Sequestrierung
- Wasserregulation, Sedimentrückhalt und Erosionskontrolle
- Bestäubung und Biocontrol.

In vielen Fällen ist das Verständnis der Ökosystemstabilität und der Ökosystemfunktionen sowie der Rolle von Komponenten der Biologischen Vielfalt, vor allem aber deren Wechselwirkungen noch sehr begrenzt [192-195]. Obwohl häufig die direkten Dienstleistungen eines Ökosystems benannt werden können, ist bis heute eine quantitative Aussage zu Ausmaß und Dynamik der Dienstleistungen in vielen Fällen nicht möglich [196]. Zudem fehlen Kenntnisse der Beziehungen zwischen Dienstleistungen (Trade-offs, Synergien) sowie räumlichen und zeitlichen Skalen, auf denen ESS und ihre Interaktionen entstehen und wirken [196; 176]. Solche Aussagen und Kenntnisse sind aber für nachhaltige politische Entscheidungen zur Landnutzung grundlegend. Für die Bewertung der Auswirkungen land- und forstwirtschaftlicher Produktion sind demnach nicht nur die direkten Effekte der Produktion selber, sondern insbesondere auch indirekte sekundäre Effekte (d. h. auf Regulierungs- und Bevorratungsfunktionen des Naturhaushalts) mit Hilfe des ESS-Konzeptes zu berücksichtigen [197].

4.3.2 Methoden und Indikatoren

Existierende Zusammenfassungen wie das Millennium Assessment [198; 199] oder der Heinz Report [191] zeigen, dass Forschungsbedarf hinsichtlich der methodischen Unterfütterung bei der Erfassung und Bewertung von Biodiversität und Ökosystemfunktionen sowie integrierten Monitoring-Ansätzen besteht. Dies gilt insbesondere für die Berücksichtigung von Mehrskalen-Effekten in der Analyse von Ökosystemfunktionen [28; 200; 195; 201-204]. Integrativ zu betrachten sind hier u. a. Auswirkungen der Land- und Forstwirtschaft auf THG-Emissionen, ESS und sozioökonomische Zielgrößen (als Indikatoren des materiellen Wohlergehens). Nur so lassen sich Synergien und Trade-offs zwischen ESS und sozioökonomischen Schlüsselgrößen identifizieren. Politische Steuerungsinstrumente berücksichtigten diese Synergien und Trade-offs bisher nur unzureichend [28; 205; 206]. Analysen, die auf diese Aspekte abzielen, können als Grundlage für die Konzeption integrierter Steuerungsinstrumente dienen. Um sowohl die übergreifenden Effekte als auch regional- und syndromspezifische Besonderheiten zu erfassen, ist eine umfassende Betrachtung auf globaler und regionaler Ebene erforderlich, wie sich insbesondere bei der Durchführung der subglobalen Assessment des Millennium Assessments gezeigt hat [29]. Hierdurch können Synergien und Trade-offs zwischen den Regionen identifiziert werden und ein abgestimmter Methodenpool entwickelt werden [197].

Ein weiteres wichtiges Instrument, die Nachhaltigkeit von Landnutzungssystemen zu untersuchen, sind LCA, in denen umfassend beispielsweise Größen des Kohlenstoffhaushalts berücksichtigt werden. Lebenszyklusanalysen für die Produktion und die Nutzung nachwachsender Rohstoffe beschränken sich auch in den Industrienationen bisher zumeist auf Bilanzierungen von Treibhausgasemissionen und kumulierten Energieaufwendungen. Andere Größen (z. B. Umweltwirkungen, wie Eutrophierung und Versauerung von Böden sowie Humantoxizität) wurden hier bisher nicht oder in nur sehr begrenztem Maße berücksichtigt [207; 208]. Für Schwellen- und Entwicklungsländer bestehen diesbezüglich noch sehr viel größere Defizite. So fehlen bisher beispielsweise grundlegende Betrachtungen der energetischen Nutzung wichtiger Kulturarten, wie Jatropha, Ölpalmen und Cassava [209]. Im Kontext

der Bioenergieproduktion gilt es, sowohl regionale wie globale Substitutionseffekte in LCAs zu berücksichtigen. Um mittels LCA Fragestellungen des Klimaeinflusses und der regionalen und globalen Substitutionseffekte beantworten zu können, fehlt es an einheitlichen, belastbaren und transparenten Methodiken zur Ökobilanzierung im Rahmen der durch die ISO 14040 und ISO 14044 vorgegebenen Ansätze, geeigneten Kenngrößen für messbare Nachhaltigkeit am Beispiel von Biomassen zur Energiegewinnung und geeigneten Zertifizierungsansätzen für einen internationalen Handel [210; 211; 43; 212].

5. Forschungsbedarf

5.1 Forschungsbedarf Boden und Vegetation

5.1.1. Qualitatives und quantitatives Prozessverständnis der Kohlenstoffstabilisierung und der Freisetzung von THGs aus Böden

Kontext: Im Kreislauf des Umsatzes zwischen Biomasseaufbau (Primärproduktion) und -zersetzung werden Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) aus Böden mineralisiert oder als ‚Humus‘ stabilisiert. Diese Stoffumsetzungen sind größtenteils mikrobiell gesteuert [213]. Dabei nutzen Mikroorganismen organische Verbindungen als Wasserstoff- und Elektronen-Donatoren zur Aufrechterhaltung ihres Energie- und Baustoffwechsels. Kohlenstoff- und Stickstoff-Kreisläufe sind dabei unmittelbar miteinander gekoppelt [214; 215]. C- und N-Mineralisationsprozesse führen mit abfallendem Redoxpotential durch die Nutzung alternativer Elektronen-Akzeptoren zur sequenziellen Freisetzung unterschiedlich klimawirksamer Reduktionsprodukte wie CO₂, N₂O, und CH₄ [216; 38]. Die Funktionalität boden-biochemischer Umsetzungen unter Feldbedingungen ist stark von bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften, d.h. Bodenstruktur, Temperatur [217-221; 167; 222; 223], Wasser- und Gastransport [135; 136; 140; 146; 138; 97; 141], pH, Substratverfügbarkeit [224-228; 216] sowie der Wechselwirkung mit Pflanzenbeständen [145] geprägt. Der Bodenwassergehalt und das Redoxpotential sind die wesentlichen Einflussgrößen für die bei der Umsetzung org. Substanz gebildeten Klimagasarten, indem sie aerob vs. anoerobe Bedingungen im Boden steuern [229; 145]. Wasserhaushalt, Bodenstruktur, Bodentemperatur, und Pflanzenbestand (Wurzelaktivität, Substratverfügbarkeit) gemeinsam bestimmen den Umfang der emittierten Gase (Umsatz und Transport).

In diesem Themenbereich gewonnenes Kausalverständnis dient der Weiter- und Neuentwicklung quantitativer Modelle zum C- und N-Umsatz und Transport in Boden-Pflanzensystemen und dem quantitativen Verständnis der Quellen/Senken Funktion von Böden für THG in Abhängigkeit von Nutzungswandel- und Klimawandelrelevanten Steuergrößen.

Vor dem Hintergrund dieser Prozessabläufe besteht Forschungsbedarf zu:

- Prozessverständnis der C-Stabilisierung:

Kausalzusammenhänge der Limitierung der C-Stabilisierung durch die N-Verfügbarkeit in temperaten Klimaten sowie ein detailliertes Prozessverständnis zum Einfluss des Redoxpotentials bzw. des Wassergehaltes [142; 139; 167; 144].

Schlüsselmechanismen der C-Stabilisierung tropischer Ober- und Unterböden (Alfisol, Ultisol, Oxisol, Psamment, (ggf. Andosol) [126]. Die stark verwitterten tropischen

Böden unterscheiden sich aufgrund ihrer Mineralogie von den Böden des temperaten Bereichs – ebenso ist bekannt, dass keine Aggregathierarchie zu finden ist und komplexierende Kationen vorliegen [230] – so dass zu erwarten ist, dass sich die tropischen Böden in ihren Schlüsselmechanismen der C-Stabilisierung stark von denen des temperaten Bereichs unterscheiden [231; 232] [126; 232] (insbesondere „Intensivierungs-Syndrom“).

- Prozessverständnis der Temperatursensibilität von Bodenpools, insbesondere der passiven C-Pools. Untersuchungen zu Veränderungen der Umsatzraten [217-221; 167; 222; 223] und der Qualität [140; 141] von organischer Substanz in Böden bei Temperaturerhöhung mit dem Ziel, temperaturgesteuerte THG-Emissionen und Auswirkungen auf die Produktivität (Bodenfruchtbarkeit) von Böden beschreiben zu können.
- Entwicklung operationeller Fraktionierungs-Methoden zur Differenzierung des passiven Boden-Pools [128; 131; 133; 134], in dem der größte Anteil der organischen Substanz (bis zu 75%) gespeichert ist [164; 128-134].
- Entwicklung prozessorientierter C- und N-Umsatzmodelle, z.B. durch den Ersatz konzeptioneller Modell-Pools durch funktionelle Fraktionen, d.h. durch Fraktionen, die definierten Stabilisierungsprozessen zugeordnet werden können. Modelle mit gekoppeltem C- und N-Kreislauf sollen die Interaktion beider Kreisläufe mit erfassen und besser beschreiben.
- Untersuchung der Prozessinteraktionen zur verbesserten Erfassung und Prognose der aggregierten (Summe der Klimagasemissionen CO₂, CH₄ und N₂O) THG-Emissionen von Böden unter Nutzungsbedingungen und Klimaänderung (d.h. natürliche Lagerung, variabler Wasserhaushalt und Pflanzen/Wurzelaktivität) [135; 171; 145; 14]. Dies bedeutet die Betrachtung der Kopplung von mikrobieller Aktivität, Bodenstruktur und Bodenwasserhaushalt im Hinblick auf Produktion, Konsum und Transport von CO₂, N₂O und CH₄. (Alle Syndrome, Böden mit temporär und lokal hoher Wassersättigung, syndromspezifische Bodentypen).

5.1.2 Einfluss der agrarischen und forstwirtschaftlichen Landnutzung auf THG Bilanzen:

Kontext: Die C-Vorräte von Böden werden nicht nur von Klima, Pedogenese und Mineralogie geprägt sondern auch sehr stark durch die Bewirtschaftung beeinflusst [233; 154; 3; 151; 93; 5; 152; 94; 153; 234-236]. So kommt es durch die Bewirtschaftung (Veränderung der Bodenbedeckung und Nutzungsintensität) nativer Böden zu Verlusten bis zu 50% des Bodenkohlenstoffs [237; 238]. Die Rodung von Wäldern trägt zu hohen Verlusten an vegetationsgebundenem und an bodengebundenem C bei. Die meisten unserer heutigen Ackerböden sind durch den erhöhten Export von Pflanzenbiomasse und durch das zeitweilige Fehlen eines ganzjährig geschlossenen Pflanzenbestandes stark C-verarmt und stellen eine potentielle C-Senke dar [5; 152; 162]. Verbesserte Anbauverfahren haben in der Landwirtschaft aber in den letzten Jahrzehnten nicht nur zu Produktionssteigerungen geführt, sondern auch durch die Reduktion der Schwarzbrachen, die Einführung von Zwischenfrüchten und der Minimalbodenbearbeitung sowie durch ein verbessertes Management von Ernterückständen meist eine Erhöhung der C-Einträge in den Boden

bewirken können [239-242]. Landnutzungswandel und Anbauintensivierung wirken sich durch ihren Einfluss auf Versorgungs-, Puffer- und Filterfunktionen lokal und regional insbesondere auch auf die Wasserqualität sowie die Wasservorräte aus [100; 14]. Überlagert werden diese Effekte von den Trends des Klimawandels.

Die hier aufgebauten Kenntnisse bilden die Grundlage für die Beurteilung der Quellen/Senkenfunktion von Böden und Vegetation, ein gezieltes und nachhaltiges Management von Böden im Sinne einer C-Anreicherung und THG-Emissions-Reduktion, sowie der Nebenwirkungen von Landnutzungs- und Anbausystemveränderungen im Bezug auf den Nährstoffhaushalt und die Wasserressourcen. Die gestellten Fragen ermöglichen die Entwicklung und Evaluierung angepasster Anbautechnologien und die Weiter- und Neuentwicklung von prozessorientierten Simulationsmodellen zur Unterstützung von politischen Entscheidungsprozessen.

Folgende Forschungsfragen sind in diesem Kontext offen:

- Quantifizierung der C-Stabilisierung und deren Sättigung in verschiedenen Boden-Pools in Abhängigkeit von Anbausystemen. Implementierung von Konzepten für C-Gleichgewichtsgehalte (wie z.B. Sättigungsgehalten) in C-Umsatzmodelle [159-161; 243; 162]. Diese Untersuchungen sollten neue klimafreundliche (THG-arme) Landnutzungs- und Anbausysteme für Biomassepflanzen zur stofflichen und energetischen Verwertung einschließen.
- Prozessverständnis der Auswirkungen des Managements auf unterschiedlich stabile Boden-C-Fractionen – insbesondere auf passive Pools (*priming Effekt*, Förderung der organo-mineralischen Interaktionen durch Bodenbearbeitung [164; 224; 244; 132] im Hinblick auf THG-Emissionen und einer nachhaltigen Bodennutzung (Erhalt der Produktionsfunktion, Ressourcenschutz). Die Betrachtung schließt Stoffumsetzungen in Unterböden [233] und microsites [139] mit ein.
- Limitierung der C-Stabilisierung in Abhängigkeit von der bewirtschaftungsbedingten N-Verfügbarkeit (z.B. C/N-Verhältnis der Pflanzenrückstände, mineralische/organische N-Düngung, Leguminosenanbau, Mykorrhizierung, Bodenbearbeitung zur Synchronisation von N-Mineralisation und Pflanzenernährung) [245; 246; 101; 247-252; 214; 253-256] unter Berücksichtigung atmosphärischer N-Einträge.
- Innovative Verfahren zur Erhöhung der C-Stabilisierung in Ackerböden: Erhöhung der Produktivität und der C-Stabilisierung durch Hydrophobierung (z.B. durch Biokohle) [257-259], durch Förderung der Aggregation (z.B. durch Mykorrhizierung und reduzierte Bodenbearbeitung [260; 261]) sowie Erhöhung der Resilienz der Anbausysteme und der Effizienz mikrobieller Stoffumsetzungen [165; 262-265]. Wirkung solcher Verfahren auf die Filterfunktion von Böden.
- Quantifizierung der C-Vorräte bzw. Humusvorräte in Vegetation, Mineralböden und Mooren (inkl. Unterböden). Flächenhafte Datenbasen für Zustand, Dynamik und Gehalts-Richtwerte mit Hilfe von Inventuren und regional/syndromspezifisch angepassten Inventurdesigns inkl. Fernerkundung.
- Differenzierung pflanzlicher und bodenbürtiger Beiträge zu THG-Emissionen [145].
- Kombiniertes Einfluss von Anbausystemen/Landnutzung und Klimawandel auf den Bodenwasserhaushalt und Nährstoffverluste (gelöst und/oder gasförmig (v.a. CH₄

und N₂O) in Abhängigkeit von räumlichen Skalen [171; 123]. Quantitative Bewertung der Dynamik des Bodenwasserhaushalts und seiner Auswirkungen auf die Ökosystemdienstleistungen Versorgung-, Puffer- und Filterfunktionen [13-15] und THG-Emission.

- Verbleib von Bodenkohlenstoff bei Erosion von Bodenmaterial und nach Sedimentation [266-268]. Um eine komplette horizontale C-Bilanz erstellen zu können sind auch die Erosionseffekte auf die Abtragungsflächen (Äcker) mit zu berücksichtigen. Erodierete Flächen können sowohl durch verringerte Produktionsleistung (C-Input) zu C-Quellen werden als auch zu C-Senken durch verringerte heterotrophe Atmung des Bodens.
- Nutzungsstrategien für Wälder: Langfristige Betrachtung der Speicherung von Kohlenstoff und der THG-Emissionen verschiedener Waldnutzungssysteme (mittels Modellen). Strategien für eine Nutzung und gleichzeitige Stabilisierung von Waldökosystemen im Kontext des Klimawandels. Analyse der Senkenfunktion von nachwachsenden Wäldern.

5.1.3 Erfassung von Raum und Zeitskalen:

Kontext: Vertiefte qualitative und quantitative Einblicke in Prozessabläufe und Kausalzusammenhänge zur THG-Emission aus Böden und Vegetation und die Entwicklung von klimafreundlichen Nutzungssystemen muss stets auch als Baustein regional und globalskaliger, integrativer Anwendungen betrachtet werden. Prozessverständnis und Technologieentwicklung muss zudem hinsichtlich der Bewertung der Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen oder der Ableitung/Konzipierung quantitativer Modelle, die gleichermaßen der Wissenschaft und der Politik die Einschätzung von Konsequenzen des Landnutzungswandels geben, verwertbar sein. Hier gilt es Entwicklungen zu fördern, die diesen Transfer ermöglichen oder politischen Anforderungen, wie z.B. der Bewertung des Zustandes von Böden und Vegetation, gerecht werden. Die Untersuchungen bilden eine Grundlage für die Anwendung und Entwicklung integrativer Modelle sowie für die Bewertung von Ökosystemprozessen.

- Upscaling von gekoppelten Prozessen (Konsistente Datenbasis und Methodik) [172].
- Entwicklung prozessbasierter Modelle (unter Einbeziehung der vertikalen Komponente des Bodens und der zeitlichen Dynamik der Landnutzungsänderung) [132] zur Datenintegration und Extrapolation auf größere Skalen (regional bis global). Weiterentwicklung fernerkundlicher Techniken und die Nutzung rezenter und historischer Fernerkundungsdaten (Satelliten, Luftbilder), um die Dynamik und geographische Verteilung der Landnutzung, der Biomassebestände und anderer Ökosystemparameter zu erfassen.
- Räumlichen und zeitlichen Skalen der Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen (Versorgung-, Puffer- und Filterfunktionen von Böden) [196; 176].

5.2 Forschungsbedarf Landnutzungssysteme und Governance

5.2.1 Triebkräfte des Landnutzungswandels

Kontext: Es bestehen bereits verschiedene Ansatzpunkte, auf Ökosysteme und damit auch auf die Landnutzung wirkende Faktoren zu systematisieren (z.B. [269-272]). In verschiedenen Studien wurden Ursachen für Landnutzung und Landnutzungswandel zusammengestellt (z.B. [9; 103; 12; 11]) und in Modellierungen von zukünftiger Landnutzung wird ein Teil dieser Treiber abgebildet und für verschiedene Szenarien modifiziert (z.B. [178; 273; 179; 180; 12]). Diese Modellierungen bedienen sich allerdings häufig einer sehr begrenzten Anzahl von Treibern und normativen Annahmen. Die treibenden Faktoren der Landnutzung sind jedoch durch vielschichtige Interaktionen gekennzeichnet [103; 12]. Bei der Gestaltung von Maßnahmen können Leakage-Effekte auftreten, wenn nur direkt wirkende Einflussfaktoren betrachtet und indirekte Faktoren ignoriert werden [102]. Im Sinne einer Steuerung der Landnutzung im Hinblick auf den Klimaschutz ist insbesondere die Beeinflussbarkeit unterschiedlicher Faktoren von Interesse.

Forschungsbedarf besteht hinsichtlich

- Darstellung methodischer Analyseansätze zu bestimmenden Faktoren für die Landnutzung, einschließlich sozioökonomischer und politischer Einflüsse, und der Identifizierung charakteristischer Wirkungskomplexe, um die Basis für Landnutzungsentscheidungen besser zu verstehen.
- Typisierung ländlicher Räume bzgl. sozioökonomischer Rahmenbedingungen, Flächennutzung, Produktivität, Vulnerabilität gegenüber Klimawandel, Dynamik des Landnutzungswandels und Einbindung in internationale Handelsbeziehungen.
- Systematische ex-post-Analysen insbesondere in Gebieten mit hoher Dynamik der Landnutzungsänderung und Vergleich ähnlicher Naturräume mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen können Grundlagen bieten für die Kalibrierung von Modellen zur Szenarioerstellung und eine Basis für Analysen zu Governance und Steuerungsinstrumenten.
- In Hinblick auf politisch und institutionell beeinflussbare Faktoren bieten sich die folgenden Untersuchungsschwerpunkte für vertiefende Analysen an: Wirkung von Infrastruktur- und Erschließungsmaßnahmen (Straßenbau), Eigentums- und Nutzungsrechten (insbesondere beim „Intensivierungs-Syndrom“), flächenbezogene Fördermaßnahmen (z.B. im Rahmen der EU-Agrarpolitik) und Schutzgebieten mit Einschränkungen der Nutzungsrechte auf die Landnutzung.
- Analyse treibender Kräfte und Hemmschwellen speziell für die Etablierung neuartiger Landnutzungssysteme zur energetischen Nutzung von Biomasse (z.B. Kurzumtriebsplantagen (KUP), Agroforst, extensive Systeme auf marginalen Flächen).

5.2.2 Steuerungsinstrumente und Governance:

Kontext: Das Millennium Ecosystem Assessment [102], verschiedene Strategiepapiere [274], Gutachten [43] und sozialwissenschaftliche Untersuchungen [275-277] betonen die Notwendigkeit einer horizontalen und vertikalen Integration klimarelevanter Maßnahmen (Politikkohärenz). Dies betrifft einerseits in horizontaler Hinsicht die Integration in sektorspezifische Maßnahmen wie die EU-Agrarpolitik oder die Siedlungs- und Infrastrukturpolitik, ande-

rerseits in vertikaler Hinsicht die Abstimmung internationaler, supranationaler, nationaler und regional/lokaler Maßnahmen. Dabei gilt es Trade-offs zwischen unterschiedlichen Nutzungsformen und darauf bezogenen Politikfeldern (z.B. Bioenergie und Ernährung, Klimaschutz) und andere Umweltziele wie Biodiversitätsschutz oder Wasserschutz [179; 43] zu vermeiden bzw. zu reduzieren und Maßnahmen mit Synergien zu fördern.

Forschungsbedarf:

- Analyse von institutionellen Aspekten bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im Rahmen der Landnutzung und diesbezüglicher politischer Interventionsoptionen mit Hilfe folgender Methoden: Sozialwissenschaftlicher Methoden (insb. Akteurs- und Institutionenanalyse), ex-post-Analyse, Abschätzung von Handlungsoptionen, Optimierungsstrategien, integriertes Assessment (integrierte Bewertung) und handlungsorientierte Szenarien. Methoden des integrierten Assessments sollten in Richtung skalen-übergreifender Wechselwirkungen weiterentwickelt werden; Cross Compliance bietet Potenziale zur Weiterentwicklung und Übertragung der Methodik auf andere Instrumente.
- Untersuchung von Strategien zur Stärkung regionaler Ansätze bei der Flächennutzung zur Integration unterschiedlicher Ziele (Schwerpunkt EU):
- Konzepte zur Etablierung von angepassten Systemen zur energetischen Nutzung von Biomasse, Potenzialen globaler Zertifizierungssysteme und Strategien für Kompensationszahlungen für einen Verzicht der landwirtschaftlichen Nutzung von Wald- und Moorböden im „Intensivierungs-Syndrom“ und im „Sibirien-Syndrom“.

5.2.3 Physisch-Ökonomische Charakterisierung

Kontext: Eine strukturierte Analyse zur Bewertung von land- und forstwirtschaftlichen Produktionssystemen auf Basis physischer und ökonomischer Parameter soll zu Kenntnissen über Effizienzen komplexer Produktionssysteme hinsichtlich Quellen und Senken von Treibhausgasen beitragen, interne Zusammenhänge und externe Abhängigkeiten verdeutlichen und die Entscheidungsgrundlagen für die Vorzüglichkeit alternativer Landnutzungen verbessern.

Forschungsbedarf.

- Charakterisierung komplexer Produktionssysteme mit unterschiedlichen naturräumlichen, klimatischen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen. Anknüpfungspunkte an Landnutzungsstrategien sollen aufgezeigt und sensitive Einflussgrößen (Indikatoren) dargestellt werden. Die Verwendung sektoraler Input-Output-Matrizen (I/O-Matrizen) für den Bereich Land- und Forstwirtschaft bietet sich an, da die darin enthaltenen Einheiten (landw. Betrieb) oft sehr komplexe Strukturen aufweisen und selten eine Inputeinheit ausschließlich einer Outputeinheit zugewiesen werden kann [181; 278].
- Disaggregation sektoraler I/O-Matrizen nach relevanten Produktionsverfahren, Standorten und Betriebsstrukturen. Hierbei sichern Rahmendaten aus der Umweltgesamtrechnung die sektorale Konsistenz und Analysen betrieblicher Daten sowie LCA-Datenbanken (z.B. ecoinvent) optimieren den Detailliertheitsgrad.
- Strategien zur Ausschöpfung von Nutzungspotentialen über mehrstufige Verwendung von Produkten.

5.3 Forschungsbedarf Integrative Analyse und Bewertung von Landnutzungssystemen

5.3.1 Einfluss von Landnutzung(sänderungen) auf Ökosystemdienstleistungen sowie Energie- und Stoffbilanzen

Kontext: Viele Wirkungsmechanismen der Beeinflussung von ESS durch sozioökonomische Faktoren und Landnutzungsformen sind unbekannt oder derzeit noch nicht exakt genug zu quantifizieren. Dies ist insbesondere für die regionale Skala und Landschaftsebene von großer Bedeutung [279; 280] und betrifft sowohl die direkten als auch die indirekten Auswirkungen, die etwa durch die Beeinflussung von Komponenten der Biodiversität (Artenzusammensetzung, Populationsgrößen und funktionelle Diversität) entstehen [193]. Bisherige Untersuchungen fokussierten auf Wechselwirkungen zwischen Landnutzung bzw. Anbausystemen und einzelnen ESS. Dabei blieben mögliche Trade-offs und Synergien bisher weitgehend unberücksichtigt [281; 206]. Anhand von Fallstudien können sowohl die von den gesellschaftlichen Rahmenbedingungen abhängige Bewertung der ESS erfolgen als auch regionale Trade-offs und Synergien abgebildet werden. Erste Beispiele finden sich dazu in den Regionalstudien des Millennium Assessments [282], die jedoch vor allem im Hinblick auf abzuleitende Managementstrategien unvollständig bleiben.

Beispiele für Forschungsthemen in diesem Bereich sind

- Robuste Verfahren zur Quantifizierung von Ökosystemdienstleistungen [283] [284], Stoff- und Energieströmen [285; 43], Bodenschutz [61; 60; 58] sowie der Resilienz der betreffenden Ökosysteme [192; 286; 195; 287; 279; 280].
- Funktionale und quantitative Untersuchungen zur Abhängigkeit der Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen von der Biodiversität [193; 288; 289; 279].
- Ökosystemare Veränderungen im Zuge des Klimawandels unter besonderer Berücksichtigung ihrer Bedeutung für die Forst- und Landwirtschaft [192; 290; 291].
- Einflussgrößen (Klimawandel, Sukzession, Forstmanagement), die sich u. a. auf das räumliche und zeitliche Muster von Störungen (Waldbrände, Pathogene, Phytophage etc.) und des Prozesses der Wiederbewaldung auswirken [72; 292-294].

5.3.2 Regionale Szenarientwicklung für globale Wandelprozesse, die klimatische, landnutzungsbezogene und sozioökonomische Treiber einschließen

Kontext: Auswirkungen von Landnutzungswandel und Veränderungen in den Anbausystemen können nicht nur unter Berücksichtigung des Status-quo analysiert werden. In die betreffenden Analysen sollen auch prospektive Veränderungen der Rahmenbedingungen (u. a. Klimawandel, demographische Entwicklung, weltwirtschaftliche Entwicklung) einbezogen werden. Hierfür sind integrierte regionale Szenarien zu entwickeln, die eine Vielzahl möglicher zukünftiger Entwicklungen abdecken. Dabei sind nicht nur Auswirkungen auf Versorgungs- und Regulierungsdienstleistungen zu berücksichtigen, sondern auch solche auf Basisdienstleistungen, die Biodiversität und die Resilienz der Ökosysteme. Es gilt bestehende Szenarienansätze, wie z. B. die des EU IP-ALARM [295-297] oder die des SRES des IPCC [298] insbesondere für regionale Fragestellungen – u. a. mithilfe von Simulationsmodel-

len und Langzeitprognosen – weiterzuentwickeln [299]. Dies hat für alle Regionen der hier behandelten Syndrome Gültigkeit, wobei sich die entscheidenden Treiber (z. B. Sozioökonomie, Klima) in ihrer Gewichtung unterscheiden. Für die integrierte Betrachtung und Bewertung der aktuellen und prospektiven Landnutzung müssen mögliche Verschiebungen, beispielsweise der klimatischen Rahmenbedingungen und den daraus resultierenden Effekte, berücksichtigt werden, um darüber die Eignung von Strategien unter unsicheren Umweltbedingungen abschätzen zu können.

Beispiele für Forschungsthemen in diesem Bereich sind

- Szenarioanalysen der forstwirtschaftlichen Entwicklungen im Zuge einer vermehrten Bioenergienachfrage [54; 78; 300; 301]
- Szenarioanalysen hinsichtlich des Auftauens der Permafrostböden, der Verlagerungen der Zonobiome sowie der potenziell damit verbundenen landnutzungsbezogenen Entwicklungen und Einflüsse auf die Emissionen von Treibhausgasen, Ökosystemdienstleistungen und sozioökonomische Aspekte [302; 303; 72; 192; 304; 84; 82; 83].
- Integrierte ex-ante Szenarienanalysen (z. B. durch umfassende LCA) als Grundlage für die Entwicklung und erfolgreiche Implementierung politischer Steuerungsinstrumente, einschließlich geeigneter Förderungsinstrumente [305-308; 43; 309; 310].
- Langzeitanalysen der verschiedenen Szenarien mit Hilfe von Simulationsmodellen, insbesondere auch für biotische Prozesse auf regionaler Skala [311-316].

5.3.3 Erfassung überregionaler Sekundär- und Substitutionseffekte auf Ökosystemdienstleistungen und Energie- und Stoffbilanzen

Kontext: Um abschätzen zu können, welche Konsequenzen Landnutzungsänderungen auf THG-Emissionen und ESS in anderen Regionen haben, sind neben Effekten auf der regionalen Ebene Substitutions- und Sekundäreffekte zwischen Regionen und auf der globalen Skalenebene zu berücksichtigen. Dadurch soll ein Export von negativen Auswirkungen in andere Regionen erfasst und womöglich verhindert werden. Bisher fehlen hierfür Ansätze und Fallstudien. Insbesondere innerhalb von Regionen des „Intensivierungs-Syndroms“ aber auch zwischen Regionen, die den „Regulierungs-“ und „Intensivierungs-Syndromen“ zuzuordnen sind, sind Substitutionseffekte zu erwarten. Überregionale sekundäre Effekte im Zusammenhang mit den „Regulierungs-“ und „Intensivierungs-Syndromen“ werden v. a. durch internationale Märkte vermittelt und beziehen sich auf vielfältige sozioökonomische und ökologische Aspekte. Auch die Regionen des „Sibirien-Syndroms“ können von weltmarktinduzierten Substitutionseffekten erfasst werden.

Forschungsbedarf besteht hier beispielsweise hinsichtlich der folgenden Punkte:

- Ansätze und Fallstudien (u. a. LCA) zur Erfassung überregionaler Sekundär- und Substitutionseffekte [28; 317; 318; 207; 47; 83].
- Lösung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Trade-offs und Synergien auf und zwischen verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen [28; 200; 195; 201-203; 279].

5.3.4 Methodenentwicklung, Mehrskalenproblematik, Upscaling, angepasste Indikatoren und Monitoringstrategien

Kontext: Die integrierte Bewertung erfordert die Weiterentwicklung von Indikatoren und Monitoringsystemen für die regionale und globale Skalenebene. Erforderlich hierbei ist das Design integrierter Monitoring-Programme für *on-site* Untersuchungen und Fernerkundungskampagnen sowie die Integration/Synchronisation der Datensätze mit bestehenden Datenbanken. Das Konzept der Monitoring-Programme muss sich an der Zielstellung ökologisch-ökonomischer Bilanzierungen und dem Einsatz von regionalen Simulationsmodellen ausrichten.

Beispiele für Forschungsthemen in diesem Bereich sind:

- Identifizierung robuster Indikatoren, v. a. auch für die Vulnerabilität der Systeme gegenüber Klimawandel und Landnutzungswandel [192; 210; 319].
- Anpassung und Ergänzung bestehender Indikatorsysteme für die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen land- und forstwirtschaftlicher Nutzung einerseits sowie Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen andererseits, so dass sie in politischen Steuerungsinstrumenten eingesetzt werden können (z.B. Zertifizierung von Forst- und Agrarnutzungen) [120].
- Methoden zum Umgang mit nicht-linearen Beziehungen und kritischen Schwellenwerten in Indikator- und Bewertungsverfahren [28; 320; 279].
- Entwicklung von neuen Methoden in der Fernerkundung, um die Messung von ausgewählten ESS-Indikatoren großflächig zu ermöglichen. Insbesondere sollten Fernerkundungssysteme auch dazu genutzt werden können, Veränderungen von ESS zu ermitteln [321-323].

6 Strategien zur Implementierung der identifizierten Themen in ein Programm

Strategien zur Landnutzung im Konfliktfeld THG-Emission, Ressourcenschutz und menschlichem Wohlergehen müssen erkenntnisbasiert entwickelt und umgesetzt werden. Die vorliegende Empfehlung hat anhand von drei Syndromen Kenntnisdefizite in diesem Konfliktfeld dargestellt und entsprechende Forschungsthemen, gegliedert nach Kernthemen, identifiziert. Mit den empfohlenen Forschungsthemen können Grenzen der wissenschaftlichen Erkenntnis ausgeweitet werden und technologische/methodische Neuerungen entwickelt werden. Sie dienen dem Verständnis von Einzelprozessen, Prozessinteraktionen und komplexen Systemen, die für den Klimaschutz relevant sind und als Grundlage für kenntnisbasierte Entscheidungen hinsichtlich Landnutzungsstrategien mit multiplen Zielen (THG-Reduktion, Ressourcenschonung, Wohlergehen des Menschen).

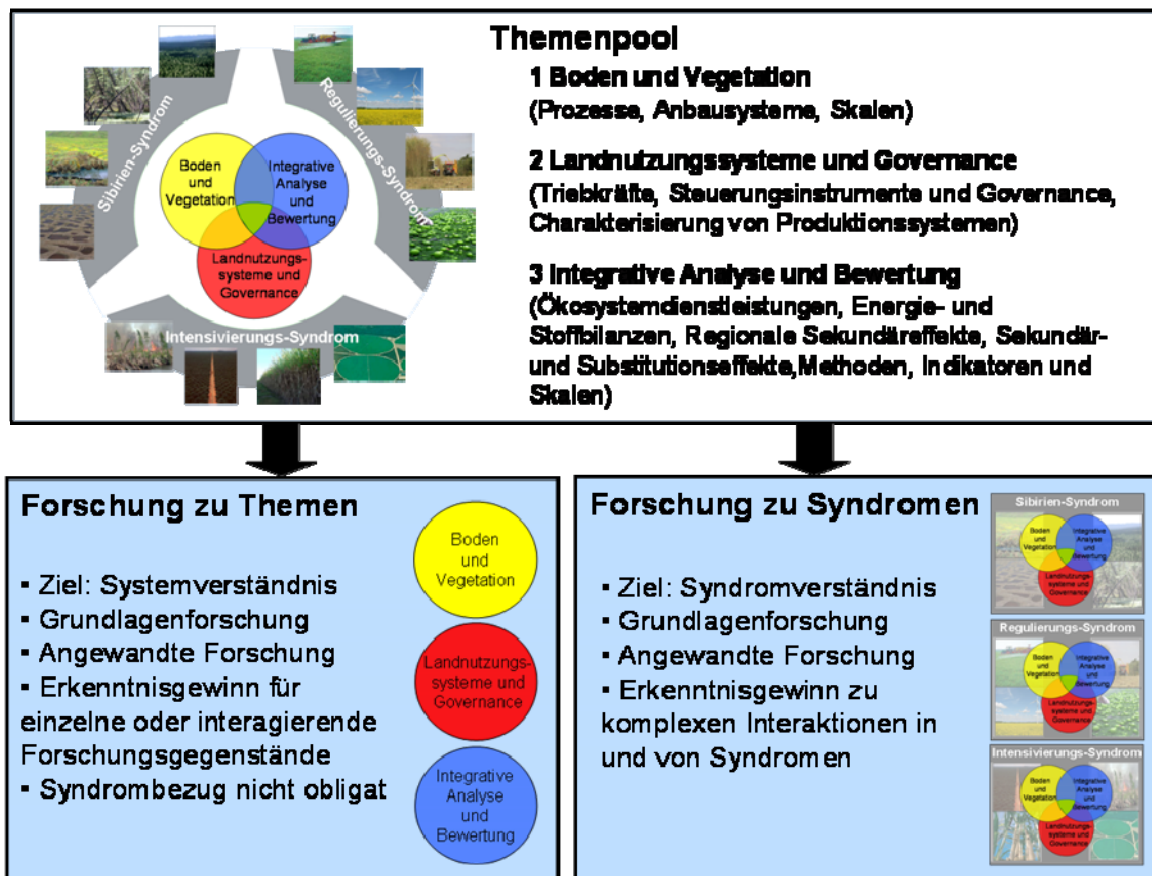


Abb. 10. Verwertung der Forschungsthemen innerhalb eines Programms

Abbildung 10 stellt die Verwertung der Themen innerhalb eines Forschungsprogramms dar. Die identifizierten Themen (Themenpool) können stärker fokussiert, d.h. als Einzelthemen oder unter Einbeziehung unmittelbar interagierender Themen beforscht werden. Die Ergebnisse dieser **Forschung zu Themen** leisten Beiträge zum Verständnis von Prozessen der THG-Emission und deren Beeinflussbarkeit für verschiedene Perspektiven (wie biogeochemische Prozesse, Management und Handlungsmechanismen, Bewertungsmethodik). Es werden sowohl Grundlagenforschungsaspekte wie auch stärker anwendungsorientierte For-

schungsgegenstände aufgegriffen. Dabei sind im Kernthema Boden und Vegetation skalenübergreifende Untersuchungsansätze (hier: Bodenprofil (physikalisch-biochemische Prozessskala) – Landschaft (Multifunktionsskala)) sowohl für Studien zum Prozessverständnis [123] als auch für solche zur Bewertung der Ökosystemdienstleistungen [176] besonders nützlich. Verschiedene Prozesse (z.B. Gas- und Wasserflüsse, mikrobielle Umsetzungen, Boden-Wasser-Pflanze-Interaktionen) weisen zwar einerseits eine sehr hohe Dynamik auf, diese schlägt sich aber verzögert in Trends für die resultierenden Ökosystemfunktionen nieder. Um dieser Disparität zwischen Prozess- und Wirkungsskalen in Untersuchungen gerecht zu werden, sollte die Anbindung von Studien an entsprechende langfristig ausgelegte Forschungsnetzwerke (mit Datenbanken, Dauerversuchen oder Observatorien sowie Modellierung) angestrebt werden [324]. Disziplinenübergreifende Forschung ist vor allem in den Kernthemen Landnutzungssysteme und Governance und Integrierte Analyse und Bewertung von Landnutzungssystemen bedeutend.

Kasten 2: Beispiel regionale und überregionale Effekte von Landnutzungsänderungen

Die Intensivierung und Ausweitung der Land- und Forstwirtschaft für die Produktion von Energiepflanzen geht in Mitteleuropa v. a. mit Beeinträchtigungen der regionalen Biodiversität [325; 326] und Ökosystemdienstleistungen [48] einher. Erste Studien zur Lebenszyklusanalyse des konventionellen Biokraftstoffanbaus in Europa machen deutlich, dass diese Umweltwirkungen den vermeintlich positiven Effekt durch CO₂-Einsparung erheblich relativieren [50; 49; 208]. Es besteht hier aber noch erheblicher Forschungsbedarf. Gleiches gilt für sogenannte *low-input high-diversity-Systeme*, Anbauverfahren auf marginalen Standorten, die mit einem geringen Einsatz etwa an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln einhergehen. Sie sind Gegenstand einer kontrovers geführten Debatte [327; 185; 328]. Die Beeinträchtigung anderer Umweltziele wird beim Anbau mehrjähriger Pflanzen generell als deutlich geringer eingeschätzt als bei den bisher überwiegend genutzten annualen Kulturen [329; 45; 330; 185]. Insbesondere mit Agroforstsystemen wird die Erwartung verbunden, multiple Ziele bei der Landnutzung zu vereinen [186; 330; 331; 12; 332; 333].

Die gut entwickelten Steuerungsmechanismen der EU-Agrarpolitik führen dazu, dass politische Entscheidungen zur Umsteuerung der Schwerpunktsetzung in der Landwirtschaft, etwa die verstärkte Förderung des Biomasse-Anbaus innerhalb kürzester Zeit flächendeckende Effekte auf die Umwelt, aber zum Beispiel auch auf die Beschäftigung im ländlichen Raum entfalten können. Dies gilt beispielsweise für die Aufhebung der Förderung obligatorischen Flächenstilllegung im Herbst 2007 [42; 334]. Da die Produktionskapazität in Europa die Nachfrage nach Biokraftstoffen nicht decken kann [49], besteht ein erheblicher Druck auf andere Regionen der Erde, den Anbau von Biomasse zu forcieren [50; 43]. Die fortschreitende Ausrichtung der land- und forstwirtschaftlichen Produktion auf den Bioenergiesektor ist demnach in den meisten Entwicklungs- und Schwellenländern auf die weltweit steigende Nachfrage nach Biokraftstoffen zurückzuführen. Dieser Trend kann potenziell zur ökonomischen Entwicklung der betreffenden Regionen und Staaten beitragen [51]. Indes zielen hier Anstrengungen vielfach allein auf die Maximierung der landwirtschaftlichen Produktion ab, ohne Einflüsse auf andere Sektoren zu berücksichtigen [52]. Daher geht der Anbau von Bioenergiepflanzen gerade in Entwicklungs- und Schwellenländern häufig mit schwer wiegenden Beeinträchtigungen der Umwelt und der sozioökonomischen Strukturen einher (für Details s. Sektion 3.2).

In der **Forschung zu Syndromen** soll ein umfassendes Verständnis der komplexen Wechselwirkungen innerhalb der Syndrome sowie der externen Interaktionen der Syndrome entstehen (vgl. Abb. 10). Wechselwirkungen innerhalb von Syndromen und zwischen verschiedenen Syndromen, so etwa dem „Regulierungs-Syndrom“ und dem „Intensivierungs-Syndrom“ sollen anhand eines Beispiels illustriert werden (Kasten 2).

Für die Forschung zu Syndromen sind deshalb **integrative Untersuchungen** zielführend. Dies kann durch eine systematische und planmäßige Vernetzung von themenspezifischer Forschung erreicht werden, soweit die innerhalb der Syndrome erfolgt.

Integrierte regionale Fallstudien tragen hierbei einerseits zur Verbesserung des methodischen Wissensstands und andererseits - als vergleichende Analysen (auf der Basis eines aufzubauenden globalen integrierten Datensatzes) - zum Erkennen und Bewerten überregionaler Trade-offs und Synergien bei. Zudem können solche Studien Beiträge zu partizipatorischen Entscheidungsfindungen liefern. Damit wird eine Fortentwicklung und Erweiterung des im Millennium Assessment [199] verfolgten Ansatzes vorgeschlagen. Relevant ist bei den Untersuchungen die Fokussierung auf Ökosystemdienstleistungen, die direkt und indirekt von land- und forstwirtschaftlichen Nutzungen abhängen. Unter letztere fallen vor allem Regulierungs- und Versorgungsfunktionen, beispielsweise C-Sequestrierung, Wasser- und Sedimentrückhalt, Bestäubung, Biocontrol. Die integrierte Bewertung und der Vergleich verschiedener Landnutzungsoptionen können durch Lebenszyklusanalysen (LCA) erfolgen oder durch solche ergänzt werden. In diesen sollten die gesamte Vorleistungs- und Nutzungskette und hierbei insbesondere Trade-offs und Synergien im Hinblick auf Ökosystemdienstleistungen einbezogen werden.

Es sind stets integrative, disziplinenübergreifende Ansätze zur Erfassung und Bewertung von relevanten (direkten und indirekten) Effekten des Landnutzungswandels gefordert.

Anhang 1: Anknüpfungspunkte zu nationalen und internationalen Forschungsprogrammen

Angaben zu Internetseiten vom März 2008.

National (Deutschland)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):

Rahmenprogramm FONA, Forschungsfeld: *System* *Erde*
http://www.fona.de/de/1_forschung/system_erde/index.php

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)

<http://www.bmelv-forschung.de/de/forschung/forschungsaufgaben>

Forschungsinitiativen zum Themenkomplex Landnutzung/Klima beziehen sich v. a. auf die Hauptziele 2 und 4 der sieben Hauptziele des Forschungsplans:

→ Hauptziel 2: "Nachhaltige Land-, Gartenbau-, Forst-, Fischerei- und Ernährungswirtschaft; Erschließung des Potenzials nachwachsender Rohstoffe"

Forschungsgegenstand: Innovationen zur Verbesserung der Ressourcen- und Energieeffizienz, z. B. Ermittlung der Potenziale an Biomasse, Sicherung einer nachhaltigen Erzeugung nachwachsender Rohstoffe, Bewertung ökonomischer Einflussfaktoren und Effekte.

→ Hauptziel 4: "Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel"

Forschungsgegenstand: Regionale und überregionale Auswirkungen des Klimawandels (z. B. auf den Zustand von Böden oder Biomasseproduktionssystemen), Anpassungsmaßnahmen in Agrarwirtschaft und ländlichen Räumen, Minimierung oder Vermeidung von Treibhausgasemissionen, Strategien und Maßnahmen für einen effizienten aktiven Klimaschutz in der Agrarwirtschaft und in ländlichen Räumen.

Bundesministerium für Umwelt (UBA) – UFO-Plan 2008

→ Schwerpunkt 2: Klimaschutz national und international, 2.2 Begleitforschung zur Ausgestaltung des Post2012-Klimaregimes (Beispiel: "Optionen zur Berücksichtigung von Quellen und Senken im Bereich Landnutzung/Landnutzungsänderung", FKZ 3708 41 101)

→ Schwerpunkt 4: Ausbau der erneuerbaren Energien, 4.2 Verstärkte Biomassennutzung/CO₂-Effizient (Beispiel: "Flächeneffizienz, Aktualisierung der Landnutzungsdaten CORINE Land Cover für das Jahr 2006 (CLC 2006) unter Nutzung von GMES Diensten", FKZ 3708 12 200)

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): <http://www.dfg.de>

→ Zur Zeit z.B. Ausschreibung im Infrastruktur-Schwerpunktprogramm 1374 "Exploratorien zur funktionellen Biodiversitätsforschung"

International:

7. Forschungsrahmenprogramm der EU

<http://cordis.europa.eu/fp7>

Im 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union werden Probleme und Herausforderungen des Klimawandels übergreifend in allen zehn Themengebieten des spezifischen Programms "Kooperation" adressiert. Besondere Berücksichtigung finden sie im Thema 2 "Nahrung, Landwirtschaft und Fischerei, Biotechnologie" und Thema 6 "Umwelt (einschließlich Klimawandel)" sowie Thema 5 "Energie".

→ Thema 2 "Nahrung, Landwirtschaft und Fischerei, Biotechnologie"

Forschungsinitiativen des Themenbereichs 2 zielen auf eine nachhaltige Nutzung der Produkte und Dienstleistungen biologischer Ressourcen ab. Besondere Förderung finden hier Anstrengungen im Bereich der Erneuerbaren Energien.

Beispiele für Aufrufe mit Bezug zum Themenkomplex Landnutzung/Klima (Auswahl)

- KBBE-2008-1-2-07: "Forest energy – Short rotation forestry as a sustainable and eco-efficient land use management system for fossil fuels substitution within CDM-projects" Call: FP7-KBBE-2008-2B.
- KBBE-2008-1-2-08: "Novel approaches for reducing nitrogen losses" Call: FP7-KBBE-2008-2B.
- KBBE-2008-3-2-05: "Life cycle analysis and socioeconomic assessment of integrated bio-refineries" Call: FP7-KBBE-2008-2B.
- KBBE-2008-1-2-06: "Forecasting forest diversity under the influence of climatic changes and the consequences for stability and productivity of forest ecosystems" Call: FP7-KBBE-2008-2B.
- KBBE-2008-3-1-02: "Sweet sorghum – An alternative energy crop for biofuel production in semi-arid and temperate regions – SICA (Latin America, South Africa, India)" Call: FP7-KBBE-2008-2B.

→ Thema 6: "Umwelt (einschließlich Klimawandel)"

Forschungsinitiativen des Thema 6 zielen auf das Verständnis der Interaktionen zwischen Klima, Biosphäre, Ökosystemen und menschlichen Aktivitäten ab. Hauptbereiche (Activities) dieses Themenkomplexes sind im laufenden Rahmenprogramm Klimaänderung, Umweltverschmutzung und Risiken (6.1), Nachhaltige Ressourcennutzung (6.2), Umwelttechnologien (6.3) und Instrumente der Erdbeobachtung und Erfassung der Nachhaltigkeit (6.4).

Sub-activity 6.1.1. "Belastungen von Umwelt und Klima" greift v. a. Schlussfolgerungen und Empfehlungen des 4. Berichts des IPCC (2006) und des Ozonberichts der/des WMO/UNEP (2006) auf. Die zweite Ausschreibung (FP7-ENV-2008-1 und FP7-ENV-2008-2) zu Thema 6 wurde am 15. Februar 2008 geschlossen. Es laufen jedoch die Vorbereitungen zur Gestaltung der dritten Ausschreibungsrunde. Mit der Veröffentlichung des Aufrufe wird im Juli 2008 gerechnet.

Beispiele für Aufrufe mit Bezug zum Themenkomplex Landnutzung/Klima (Auswahl)

- ENV.1.1.3.1 "Impacts of climate variability, extreme events and increasing atmospheric greenhouse gas concentrations on terrestrial carbon storage, exchange flows and soil carbon dynamics".
- ENV.2008.1.1.5.1 " Addressing deforestation in tropical areas: Greenhouse gas emissions, socio-economic drivers and impacts, and policy options for emissions reduction".
- ENV.2008.2.1.6.1 "Development of adaptive forest management models"

European Research Agenda ERA Net: http://cordis.europa.eu/fp7/coordination/eranet_en.html

European Science Foundation (ESF): <http://www.esf.org/>

Insbesondere ESF Research Area Life "Earth and Environmental Sciences"

Earth System Science Partnership (ESSP):

<http://www.essp.org/index.php?id=10>

- International Geosphere Biosphere Program (IGBP) <http://www.igbp.kva.se/>
- DIVERSITAS program: <http://www.diversitas-international.org/>
- World Climate Research Program (WCRP), Sektion "Earth Systems"
http://wcrp.wmo.int/EarthSystems_index.html
- (International Human Dimensions Program (IHDP) <http://www.ihdp.unu.edu/>)
- Gemeinsames Rahmenprogramm "Global Carbon Project (GCP)"
[<http://www.essp.org/index.php?id=16>]

United Nations Environment Programme (UNEP)

z. B. Land Use/Land Cover Monitoring and Assessment of Asia
<http://www.rrcap.unep.org/ew/land/projects/project1.cfm>

US Global Change Research Program (USGCRP)

CCSP (Climate Change Science Program): Insbesondere USGCRP Research Elements & Cross-cutting Activities: Strategischer U.S.-nationaler Forschungsplan zu quervernetzten Themen im Bereich der Klimawandelforschung. Hier u.a. Bereiche Kohlenstoffzyklen, Landnutzungswandel etc.

<http://www.usgcrp.gov/usgcrp/ProgramElements/default.htm>

NASA Science Plan 2007-2016; Science Area: Earth Science

<http://lcluc.umd.edu/index.asp>

Anhang 2: Literatur

1. IPCC (2007). Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
2. Grace J. (2004). Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* 92: 189-202.
3. Bellamy P.H., Loveland P.J., Bradley R.I., Lark R.M., Kirk G.J.D. (2005). Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature* 437: 245-248.
4. Hassan R., Scholes R., Ash N. (2005). Millennium Ecosystem Assessment - Ecosystem and Human Well-being: Current state and trends (Volume 1), Chapter 28 - Synthesis: Condition and Trends in Systems and Services, Trade-offs for Human Well-being, and Implications for the Future. 827-838.
5. Hutchinson J.J., Campbell C.A., Desjardins R.L. (2007). Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 142: 288-302.
6. Janzen H.H. (2004). Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. *Agriculture Ecosystems & Environment* 104: 399-417.
7. Hassan R., Scholes R., Ash N. (2005). Millennium Ecosystem Assessment - Ecosystem and Human Well-being: Current state and trends (Volume 1). Island Press, Washington D. C.: 560 p.
8. Heistermann M., Müller C., Ronneberger K. (2006). Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114: 141.
9. Lambin E.F., Baulies X., Bockstael N., Fischer G., Krug T. et al. (1999). Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) Implementation Strategy. IGBP.
10. Lepers E., Lambin E.F., Janetos A.C., DeFries R., Achard F. et al. (2005). A Synthesis of Information on Rapid Land-cover Change for the Period 1981-2000. *BioScience* 55: 115.
11. UNEP (2007). Global Environment Outlook 4. United Nations Environment Programme.
12. Reid W.V., Harold A. Mooney H.A., Cropper A., Capistrano D., Carpenter S.R. et al. (2005). Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being: General Synthesis. 1-137.
13. Lambin E.F., Geist H.J. (2006). Land Use and Land-Cover Change. Springer, Berlin: 222 p.
14. Roulet N., Moore T., Bubier J., Lafleur P. (1992). Northern Fens - Methane Flux and Climatic-Change. *Tellus Ser. B-Chem. Phys. Meteorol.* 44: 100-105.
15. Tilman D., Fargione J., Wolff B., D'Antonio C., Dobson A. et al. (2001). Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* 291: 281-284.
16. Steffan-Dewenter I., Munzenberg U., Burger C., Thies C., Tschardt T. (2002). Scale-dependent effects of landscape context on three pollinator guilds. *Ecology* 83: 1421-1432.
17. Rosenzweig C., Casassa G., Karoly D.J., Imeson A., Liu C. et al. (2007). Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK: 79 p.
18. Reid W.V. (2003). Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being: A Framework For Assessment: 266 p.
19. FAO/GBEP (2007). Bioenergy development in G8 +5 countries. 292 p.

20. Sims R.E.H., Hastings A., Schlamadinger B., Taylor G., Smith P. (2006). Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biology* 12: 2054-2076.
21. [Anon] (2008). Forward with biofuels. *Nature* 451: 865-866.
22. Bryant D., Nilson D., Tanglely L. (1997). *The Last Frontier Forests*. World Resource Institute, Washington D.C.: 43 p.
23. FAO (2005). *Global Forest Resources Assessment 2005 - Progress towards sustainable forest management*. FAO, Rome.
24. Smith J.L. (1994). Cycling of nitrogen through microbial activity. *In Soil biology: effects on soil quality*. Hatfield J.L., Steward B.A. (Eds.) Lewis Publishers, London: 91-120.
25. European Environment Agency (2007). *The pan-European environment: glimpses into an uncertain future*. EEA-Report 4: 82.
26. Hassan R., Scholes R., Ash N. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment - Ecosystem and Human Well-being: Current state and trends (Volume 1), Chapter 1 - MA Conceptual Framework*. 25-36.
27. Houghton R.A. (2003). Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus B* 55: 378-390.
28. Carpenter S.R., DeFries R., Dietz T., Mooney H.A., Polasky S. et al. (2006). *Millennium Ecosystem Assessment: Research Needs*. *Science* 314: 257-258.
29. Capistrano D., Samper K. C., Lee M.J., Raudsepp-Hearne C. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being: Multiscale Assessments (Volume 4)*. Island Press, Washington D. C.: 388 p.
30. Nentwig W., Bacher S., Beierkuhnlein C., Brandl R., Grabherr G. (2004). *Ökologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg: 466 p.
31. IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of the Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge: 976 p.
32. Petschel Held G., Block A., Cassel Gintz M., Kropp J., Lüdeke M.K.B. et al. (1999). *Syndromes of Global Change: a qualitative modelling approach to assist global environmental management*. *Environmental Modeling and Assessment* 44: 295-314.
33. FAO (2006). *FAO Statistical Yearbook 2005/2006*. FAO, Rome.
34. FAO (2006). *Global Forest Resources Assessment 2005 - Progress towards sustainable forest management*. FAO, Rome.
35. de Vries W., Kros J., Oenema O., de Klein J. (2003). Uncertainties in the fate of nitrogen II: A quantitative assessment of the uncertainties in major nitrogen fluxes in the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66: 71-102.
36. Goulding K.W.T., Bailey N.J., Bradbury N.J., Hargreaves P., Howe M. et al. (1998). Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. *New Phytologist* 139: 49-58.
37. Norse D. (2005). Non-point pollution from crop production: Global, regional and national issues. *Pedosphere* 15: 499-508.
38. Ottow J.C.G. (1997). *Ökophysiologische Sequenz der Mineralisationsprozesse*. *In Umweltbiotechnologie*. Ottow J.C.G., Bidlingmaier W. (Eds.) Gustav Fischer Verlag, Ulm: 101-104.
39. Bache I., Flinders M. (2004). *Multi-Level Governance*. Oxford University Press, Oxford, New York: Pages.
40. Jordan A. (2005). *Environmental Policy in the European Union*. Earthscan Publications Ltd., London: 366 p.

41. Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2007). Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU. EU-Kommission, Brüssel: 31 p.
42. Plieninger T., Bens O., Huttli R.F. (2006). Perspectives of bioenergy for agriculture and rural areas. *Outlook On Agriculture* 35: 123-127.
43. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2007). Klimaschutz durch Biomasse - Sondergutachten. Erich Schmidt Verlag, Berlin: 124 p.
44. OECD, FAO (2007). OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016. OECD-Publishing, Paris: 87 p.
45. European Environment Agency (2007). Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture, Kopenhagen.
46. Henle K., Alard D., Clitherow J., Cobb P., Firbank L. et al. (2008). Identifying and managing the conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe – A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 124: 60-71.
47. Urban B., Krahl J., Munack A., Kanning H., von Haaren C. (2007). Analyse der Ökobilanz als Methode zur Beurteilung von Auswirkungen des landwirtschaftlichen Anbaus für Biokraftstoffe auf die Biodiversität. *Landbauforschung Völkenrode* 4 57: 419-427.
48. Palmer M.W. (2007). Biofuels and the environment. *Science* 317: 897-897.
49. European Environment Agency (2006). How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? European Environment Agency, Copenhagen: 67 p.
50. Doornbosch R., Steenblik R. (2007). Biofuels: Is the cure worse than the disease? *In Round Table on Sustainable Development. Organization for Economic Cooperation and Development*, Paris: 57 p.
51. Sagar A.D., Kartha S. (2007). Bioenergy and sustainable development? *Annual Review of Environment and Resources* 32: 131-167.
52. Altieri M.A., Nicholes C.I. (2005). Agroecology and the Search for a Truly Sustainable Agriculture. *PNUMA, UNEP* 1: 1-291.
53. Curran L.M., Trigg S.N., McDonald A.K., Astiani D., Hardiono Y.M. et al. (2004). Lowland forest loss in protected areas of Indonesian Borneo. *Science* 303: 1000-1003.
54. Fargione J., Hill J., Tilman D., Polasky S., Hawthorne P. (2008). Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. *Science* 319: 1235-1238.
55. Rosenthal E. (2007). Once a Dream Fuel, Palm Oil May Be an Eco-Nightmare. *New York Times* 31.
56. Hooijer A., Silvius M., Woosten H., Page S. (2006). PEAT-CO2 Assessment of CO2 emissions from drained peatlands in SE Asia. *Delft Hydraulics report Q3943 (2006)* 1: 1-41.
57. Berndes G. (2002). Bioenergy and water - the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 12: 253-271.
58. Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A., Sombroek W.G. (1991). Book Review World map of the status of humaninduced soil degradation: A brief explanatory note. *ISRIC and United Nations Environment Programme*, Wageningen.
59. WHO (1990). Public Health Impact of Pesticides Used in Agriculture. *World Health Organization*, Geneva: 128 p.
60. Foley J.A., DeFries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G. et al. (2005). Global consequences of land use. *Science* 309: 570-574.

61. Cerri C.E.P., Sparovek G., Bernoux M., Easterling W.E., Melillo J.M. et al. (2007). Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. *Sci. Agri.* 64: 83-99.
62. Barney J.N., Ditomaso J.M. (2008). Nonnative species and bioenergy: Are we cultivating the next invader? *Bioscience* 58: 64-70.
63. FAO (2004). *The State of Agricultural Commodity Markets*. FAO, Rom: 52 p.
64. Hallam D., Liu P., Lavers G., Pilkauskas P., Rapsomanikis G. et al. (2004). The market for non-traditional agricultural exports. *In* *FAO Commodities and Trade Technical Papers*. FAO, Rom: 181 p.
65. Faaij A.P.C., Domac J. (2006). Emerging international bio-energy markets and opportunities for socio-economic development. *The Journal of the International Energy Initiative* 10: 7-19.
66. Kartha S., Larson E.D. (1999). *A Bioenergy Primer: Roles for Biomass Energy Systems in Promoting Sustainable Development*.
67. Kartha S., Leach G., Rajan S.C. (2005). Advancing bioenergy for sustainable development: guidelines for policy makers and investors. 1-3: 1-236.
68. Andrietta M.G.S., Andrietta S.R., Steckelberg C., Stupiello E.N.A. (2007). Bioethanol - Brazil, 30 years of Proalcool. *International Sugar Journal* 109: 195-200.
69. Koh L.P., Wilcove D.S. (2007). Cashing in palm oil for conservation. *Nature* 448: 993-994.
70. Martinot E., Dienst C., Weiliang L., Qimin C. (2007). Renewable energy futures: Targets, scenarios, and pathways. *Annual Review of Environment and Resources* 32: 205-239.
71. Umweltbundesamt (2006). *UBA-Hintergrundpapier - Klimagefahr durch tauenden Permafrost?* Umweltbundesamt, Dessau: 20 p.
72. Chapin F.S., Callaghan T.V., Bergeron Y., Fukuda M., Johnstone J.F. et al. (2004). Global Change and the Boreal Forest: Thresholds, Shifting States or gradual Change? *Ambio* 33: 361-365.
73. Hinzman L.D., Bettez N.D., Bolton W.R., Chapin F.S., Dyrurgerov M.B. et al. (2005). Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other arctic regions. *Climatic Change* 72: 251-298.
74. Christensen T.R., Johansson T.R., Akerman H.J., Mastepanov M., Malmer N. et al. (2004). Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions. *Geophysical Research Letters* 31.
75. Johansson T., Malmer N., Crill P.M., Friberg T., Akerman J.H. et al. (2006). Decadal vegetation changes in a northern peatland, greenhouse gas fluxes and net radiative forcing. *Global Change Biology* 12: 2352-2369.
76. Wickland K.P., Striegl R.G., Neff J.C., Sachs T. (2006). Effects of permafrost melting on CO₂ and CH₄ exchange of a poorly drained black spruce lowland. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 111: G02011.
77. Anisimov O.A., Belotoutskaia M.A., Lobanov V.A. (2003). Observed climatic and environmental changes in the high latitudes of the northern hemisphere. *Meteorology and Hydrology* 2: 18-30.
78. Hillring B. (2006). World trade in forest products and wood fuel. *Biomass & Bioenergy* 30: 815-825.
79. Mollicone D., Eva H.D., Achard F. (2006). Human role on Russian wild fires. *Nature* 440: 436-437.
80. Kurz W., Stinson G., Rampley G.J., Dymond C.C., Neilson E.T. (2008). Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle

- highly uncertain. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America 105: 1551-1555.
81. Kurz W.A., Apps M.J. (1999). A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecological Applications* 9: 526-547.
 82. Mazhitova G., Karstkarel N., Oberman N., Romanovsky V., Kuhry P. (2004). Permafrost and Infrastructure in the Usa Basin (Northeast European Russia): Possible Impacts of Global Warming. 33: 289-294.
 83. Whiteman G., Forbes B.C., Niemela J., Chapin F.S. (2004). Bringing feedback and resilience of high-latitude ecosystems into the corporate boardroom. *Ambio* 33: 371-376.
 84. Forbes B., Fresco N., Shvidenko A., Danell K., Chapin F.S. (2004). Geographic Variations in Anthropogenic Drivers that Influence the Vulnerability and Resilience of Social-Ecological Systems. *Ambio* 33: 377-382.
 85. Bragazza L., Freeman C., Jones T., Rydin H., Limpens J. et al. (2006). Atmospheric nitrogen deposition promotes carbon loss from peat bogs. *P Natl Acad Sci USA* 103: 19386-19389.
 86. Rydin H., Jeglum J. (2006). *The Biology of Peatlands*. Oxford University Press, New York: 342 p.
 87. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrilo A., Tumskey V.E., Kholodov A.L. (2004). Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands. *Quaternary Science Reviews* 23: 1359-1369.
 88. Pavlov A.V. (1996). Permafrost-climate monitoring of Russia: analysis of field data and forecast. *Polar Geography* 20: 44-64.
 89. Smith L.C., MacDonald G.M., Velichko A.A., Beilman D.W., Borisova O.K. et al. (2004). Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the early Holocene. *Science* 303: 353-356.
 90. Mouillot F., Field C.B. (2005). Fire history and the global carbon budget: a 1° x 1° fire history construction for the 20th century. *Global Change Biol* 11: 398-420.
 91. Carlsson L., Lazdinis M. (2004). Institutional frameworks for sustainability? A comparative analysis of the forest sectors of Russia and the Baltic states. *Ambio* 33: 366-370.
 92. Schlesinger W.H. (1995). An overview of the C cycle. *In Soils and Global Change*. Lal R., Kimble J., Levin J., Stewart B.A. (Eds.) Lewis Publishers, Boca Raton, FL: 9-26.
 93. Dawson J.J.C., Smith P. (2007). Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of the Total Environment* 382: 165-190.
 94. Jarecki M.K., Lal R. (2003). Crop management for soil carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences* 22: 471-502.
 95. House J.I., Prentice I.C., Le Quere C. (2002). Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. *Global Change Biol* 8: 1047-1052.
 96. Nabuurs G.J., Masera O., Andrasko K., Benitez-Ponce P., Boer R. et al. (2007). Forestry. *In Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R., Meyer L.A. (Eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: 541-584 p.
 97. Pacala S., Socolow R. (2004). Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 305: 968-972.
 98. Baker J.M., Ochsner T.E., Venterea R.T., Griffis T.J. (2007). Tillage and soil carbon sequestration - What do we really know? *Agriculture Ecosystems & Environment* 118: 1-5.
 99. Lützw M.v., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G. et al. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their rele-

- vance under different soil conditions - a review. *European Journal of Soil Science* 57: 426-445.
100. Chhabra A., Geist H. (2006). Multiple Impacts of Land-Use/Cover Change. *In* Land-use and land cover change. Global Change - The IGPB series. Lambin E.F., Geist H.J. (Eds.) Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
 101. Davidson E.A., Chorover J., Dail D.B. (2003). A mechanism of abiotic immobilization of nitrate in forest ecosystems: the ferrous wheel hypothesis. *Global Change Biology* 9: 228-236.
 102. Chopra K., Leemans R., Kumar P., Simons H. (2005). Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystem and Human Well-being: Policy Responses (Volume 3). Island Press, Washington D. C.: 621 p.
 103. Lambin E.F., Geist H.J. (2007). Causes of land-use and land-cover change. *In* Encyclopedia of Earth. Ed C.J. Cleveland. Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, Washington, D.C.
 104. UNFCCC (2003). Review of the Implementation of Commitments and Other Provisions of the Convention. National Communications: Greenhouse Gas Inventories from Parties Included in the Annex I to the Convention. UNFCCC guidelines on reporting and review. FCCC/CP/2002/8 dd 28 March 2003.
 105. Dalgaard R., Halberg N., Kristensen I.S., Larsen I. (2006). Modelling representative and coherent Danish farm types based on farm accountancy data for use in environmental assessments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 117: 223-237.
 106. Dietz K. (2006). Vulnerabilität und Anpassung im Kontext von Klimawandel und Entwicklung., Diskussionspapier 01/06 des Projektes „Global Governance und Klimawandel“, Berlin.
 107. UN Energy (2007). Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision-Makers. United Nations, Washington: 61 p.
 108. Cassman K.G., Wood S. (2005). Chapter 26: Cultivated systems. *In* Millennium Ecosystem Assessment: Current state and trends (Volume 1) - Findings of the Condition and Trends Working Group. Hassan R., Scholes R., Ash N. (Eds.) Island Press, Washington D. C.: 745-795.
 109. Shvidenko A., Barber C.V., Persson R. (2005). Forest and Woodland systems. *In* Millennium Ecosystem Assessment: Current state and trends (Volume 1) - Findings of the Condition and Trends Working Group. Hassan R., Scholes R., Ash N. (Eds.) Island Press, Washington D. C.: 585-621.
 110. Boyd J., Banzhaf S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63: 616-626.
 111. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M. et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
 112. Daily G. (1997). Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Island Press, Washington, DC.
 113. de Groot R.S., Wilson M.A., Boumans R.M.J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41.
 114. Wallace K.J. (2007). Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation* 139: 235-246.
 115. Field C.B., Lobell D.B., Peters H.A., Chiariello N.R. (2007). Feedbacks of terrestrial ecosystems to climate change. *Annual Review of Environment and Resources* 32: 1-29.
 116. Davidson E.A., Janssens I.A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440: 165-173.

117. McGuire A.D., Chapin F.S., Walsh J.E., Wirth C. (2006). Integrated regional changes in arctic climate feedbacks: Implications for the global climate system. *Annual Review of Environment and Resources* 31: 61-91.
118. Zhuang Q.L., Melillo J.M., Sarofim M.C., Kicklighter D.W., McGuire A.D. et al. (2006). CO₂ and CH₄ exchanges between land ecosystems and the atmosphere in northern high latitudes over the 21st century. *Geophysical Research Letters* 33: L17403.
119. Barkmann J., Glenk K., Keil A., Leemhuis C., Dietrich N. et al. (2007). Confronting unfamiliarity with ecosystem functions: The case for an ecosystem service approach to environmental valuation with stated preference methods. *Ecological Economics* 65: 48-62.
120. Dale V.J., Polasky S. (2007). Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics* 64: 286-296.
121. Gatzweiler F.W. (2006). Organizing a public ecosystem service economy for sustaining biodiversity. *Ecological Economics* 59: 296-304.
122. Steffan-Dewenter I., Kessler M., Barkmann J., Bos M.M., Bucharl D. et al. (2007). Tradeoffs between income, biodiversity, and ecosystem functioning during tropical rainforest conversion and agroforestry intensification. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 104: 4973-4978.
123. Corwin D.L., Hopmans J., de Rooij G.H. (2006). From field- to landscape-scale vadose zone processes: scale issues, modeling and monitoring. *Vadose Zone Journal* 5: 129-139.
124. Volk M., Hirschfeld J., Dehnhardt A., Schmidt G., Bohn C. et al. (2008). Integrated ecological-economic modelling of water pollution abatement management options in the Upper Ems River Basin. *Ecological Economics*: in press.
125. UN (1998). Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. *J Environ Law* 10: 215-224.
126. Anderson J.M., Flanagan A., Flanagan P. (1989). Biological processes regulating organic matter dynamics in tropical soils. *In* Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Coleman D.C., Oades J.M., Uehara G. (Eds.) NifTAL Project, University of Hawaii: 97-124.
127. Paul S. (2007). Fate of organic carbon in soil fractions following land use conversion in the humid tropics. *In* Institute of Soil Science and Forest Nutrition. Georg-August University Göttingen, Göttingen: 143 p.
128. Helfrich M., Flessa H., Mikutta R., Dreves A., Ludwig B. (2007). Comparison of chemical fractionation methods for isolating stable soil organic carbon pools. *European Journal of Soil Science* 58: 1316-1329.
129. Jenkinson D.S., Adams D.E., Wild A. (1991). Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature* 351: 304-306.
130. Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., Kandeler E., Kalbitz K. et al. (2008). Organo-mineral associations in temperate soils: integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 61-82.
131. Lützw M.v., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G. et al. (2007). SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology & Biochemistry* 39: 2183-2207.
132. Lützw M.v., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H. et al. (2008). Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 111-124.
133. Parton W.J., Ojima D.S., Cole C.V., Schimel D.S. (1994). A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management. *In*

- Quantitative modeling of soil forming processes. Bryant R.B., Arnold R.W. (Eds.) SSSA Special Pub, Madison, Wisconsin, USA: 147-167.
134. Sanchez P.A., Palm C.A., Szott L.T., Chuevas E., Lal R. (1989). Organic input management in tropical agroecosystems. *In* Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Coleman D.C., Oades J.M., Uehara G. (Eds.) NifTAL Project, University of Hawaii: 125-152.
 135. Chapuis-Lardy L., Wrage N., Metay A., Chotte J.L., Bernoux M. (2007). Soils, a sink for N₂O? A review. *Global Change Biol* 13: 1-17.
 136. Clough T.J., Sherlock R.R., Rolston D.E. (2005). A review of the movement and fate of N₂O in the subsoil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72: 3-11.
 137. Curiel-Yuste J., Baldocchi D.D., Gershenson A., Goldstein A., Misson L. et al. (2007). Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture. *Global Change Biology* 13: 1-18.
 138. McLain J.E.T., Martens D.A. (2006). Moisture controls on trace gas fluxes in semiarid riparian soils. *Soil Science Society of America Journal* 70: 367-377.
 139. Insam H., Wett B. (2008). Control of GHG emission at the microbial community level. *Waste Manage* 28: 699-706.
 140. Fissore C., Giardina C.P., Kolka R.K., Trettin C.C., King G.M. et al. (2008). Temperature and vegetation effects on soil organic carbon quality along a forested mean annual temperature gradient in North America. *Global Change Biology* 14: 193-205.
 141. Xu X.K., Inubushi K., Sakamoto K. (2006). Effect of vegetations and temperature on microbial biomass carbon and metabolic quotients of temperate volcanic forest soils. *Geoderma* 136: 310-319.
 142. Duxbury J.M., Smith M.S., Doran J.W. (1989). Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. *In* Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Coleman D.C., Oades J.M., Uehara G. (Eds.) NifTAL Project, University of Hawaii: 33-68.
 143. Knorr M., Frey S.D., Curtis P.S. (2005). Nitrogen additions and litter decomposition: A meta-analysis. *Ecology* 86: 3252-3257.
 144. Pregitzer K.S., Burton A.J., Zak D.R., Talhelm A.F. (2008). Simulated chronic nitrogen deposition increases carbon storage in Northern Temperate forests. *Global Change Biology* 14: 142-153.
 145. Jungkunst H., Fiedler S. (2007). Latitudinal differentiated water table control of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from hydromorphic soils: feedbacks to climate change. *Global Change Biology* 13: 2668-2683.
 146. Li C., Frolking S., Butterbach-Bahl K. (2005). Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. *Climatic Change* 72: 321-338.
 147. Elliott E.T. (1997). Rationale for developing bioindicators of soil health. *In* Biological Indicators of Soil Health. Pankhurst C., Doube B.M., Gupta V.V.S.R. (Eds.) CSIRO Division of Soils, Adelaide, Australia.
 148. Körschens M. (1998). Effect of different management systems on carbon and nitrogen dynamics of various soils. *Soil Science*: 297-304.
 149. Johnson D.W. (1992). Effects of Forest Management on Soil Carbon Storage. *Water Air and Soil Pollution* 64: 83-120.
 150. Rasmussen P.E., Goulding K.W.T., Brown J.R., Grace P.R., Janzen H.H. et al. (1998). Agroecosystem - Long-term agroecosystem experiments: Assessing agricultural sustainability and global change. *Science* 282: 893-896.
 151. Cole C.V., Flach K., Lee J., Sauerbeck D., Stewart B. (1993). Agricultural sources and sinks of carbon. *Water Air Soil Poll* 70: 111-122.

152. Ingram J.S.I., Fernandes E.C.M. (2001). Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agr Ecosyst Environ* 87: 111-117.
153. Lal R. (2002). Why carbon sequestration in agricultural soils. *In Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil*. J.M. Kimble Eds, Lal R., Follett R.F. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida: 21-30.
154. Batjes N.H., Sombroek W.G. (1997). Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology* 3: 161-173.
155. Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C. et al. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
156. Coleman D.C., Oades J.M., Uehara G. (1989). Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. University of Hawaii, Honolulu: 245 p.
157. Drijber R.A., Doran J.W., Parkhurst A.M., Lyon D.J. (2000). Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1419-1430.
158. Hassink J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191: 77-87.
159. Hassink J., Whitmore A.P., Kubat J. (1997). Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter. *European Journal of Agronomy* 7: 189-199.
160. McLaughlan K.K. (2006). Effects of soil texture on soil carbon and nitrogen dynamics after cessation of agriculture. *Geoderma* 136: 289-299.
161. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155-176.
162. Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six J. (2007). Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry* 86: 19-31.
163. Richards G.P., Skjemstad J.O., Swift, R.S., McDonald, W. (2003). What are the current impediments and research needs to improving soil carbon measurement? 1-6.
164. Flessa H., Amelung W., Helfrich M., Wiesenberg G.L.B., Gleixner G. et al. (2008). Storage and stability of organic matter and fossil carbon in a Luvisol and Phaeozem with continuous maize cropping: A synthesis. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171: 36-51.
165. Fliessbach A., Mäder P., Niggli U. (2000). Mineralization and microbial assimilation of C-14-labeled straw in soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1131-1139.
166. Kandeler E., Mosier A.R., Morgan J.A., Milchunas D.G., King J.Y. et al. (2008). Transient elevation of carbon dioxide modifies the microbial community composition in a semi-arid grassland. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 162-171.
167. Knorr W., Prentice I.C., House J.I., Holland E.A. (2005). Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature* 433: 298-301.
168. Gerzabek M.H., Antil R.S., Kögel-Knabner I., Knicker H., Kirchmann H. et al. (2006). How are soil use and management reflected by soil organic matter characteristics: a spectroscopic approach. *European Journal of Soil Science* 57: 485-494.
169. Helfrich M., Ludwig B., Buurman P., Flessa H. (2006). Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as revealed by solid-state C-13 NMR spectroscopy. *Geoderma* 136: 331-341.
170. Kaiser M., Ellerbrock R.H., Gerke H.H. (2007). Long-term effects of crop rotation and fertilization on soil organic matter composition. *European Journal of Soil Science* 58: 1460-1470.

171. Clothier B.E., Green S.R., Deurer M. (2008). Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *European Journal of Soil Science* 59: 2-13.
172. Vereecken H., Kasteel R., Vanderborght J., Harter T. (2007). Upscaling hydraulic properties and soil water flow processes in heterogeneous soils: A review. *Vadose Zone Journal* 6: 1-28.
173. Harden J.W., Trumbore S.E., Stocks B.J., Hirsch A., Gower S.T. et al. (2000). The role of fire in the boreal carbon budget. *Global Change Biology* 11: 174-184.
174. Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R. et al. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137: 253-268.
175. Mund M., Schulze E.D. (2006). Impacts of forest management on the carbon budget of European beech (*Fagus sylvatica*) forests. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 177: 47-63.
176. Lemaire G., Wilkins R., Hodgson J. (2005). Challenges for grassland science: managing research priorities. *Agriculture Ecosystems & Environment* 108: 99-108.
177. Lambin E.F., Turner B.L., Geist H., Agbola S., Angelsen A. et al. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental Change* 11: 261.
178. Audsley E., Pearn K.R., Simota C., Cojocaru G., Koutsidou E. et al. (2006). What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use, and what not? *Environmental Science & Policy* 9: 148-162.
179. European Commission (2006). SCENAR 2020 - Scenario study on agriculture and the rural world. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
180. Klijn J.A., Vullings L.A.E., v.d.Berg M., van Meijl H., van Lammeren R. et al. (2005). The EURURALIS Study. Technical document. Alterra, Wageningen.
181. Statistisches Bundesamt (2003). *Umweltnutzung und Wirtschaft - Bericht und Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen*.
182. European Commission (2007). Green Paper from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Adapting to climate change in Europe – options for EU action. Office for Official Publications of the European Communities, Brussels: 27 p.
183. Urwin K., Jordan A. (2008). Does public policy support or undermine climate change adaptation? *Global environmental Change* 18: 180–191.
184. Stange F., Butterbach-Bahl K., Papen H., Zechmeister-Boltenstern S., Li C. et al. (2000). A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils 2. sensitivity analysis and validation. *J Geophys Res-Atmos* 105: 4385-4398.
185. Tilman D., Hill J., Lehman C. (2006). Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass. *Science* 314: 1598-1600.
186. Hoffmann D., Weih M. (2005). Limitations and improvement of the potential utilisation of woody biomass for energy derived from short rotation woody crops in Sweden and Germany. *Biomass & Bioenergy* 28: 267-279.
187. Jenssen K., Clark C.D., Ellis P., English B., Menard J. et al. (2007). Farmer willingness to grow switchgrass for energy production. *Biomass and Bioenergy* 31: 773.
188. McCormic K., Kaberger T. (2007). Key barriers for bioenergy in Europe: Economic conditions, know-how and institutional capacity, and supply chain co-ordination. *Biomass and Bioenergy* 31: 443-452.
189. GTZ (2007). *Reducing Emissions from Deforestation in Developing Countries*, Eschborn: 29 p.
190. UN Secretary General (2007). *The Right to Food*, United Nations General Assembly A/62/289.

191. The H. John Heinz III Center for Science, Economics, the Environment (2002). *The State of the Nation's Ecosystems: Measuring the Lands, Waters, and Living Resources of the United States*. Cambridge University Press, Cambridge.
192. Chapin F.S., Robards M.D., Huntington T.G., Johnstone J.F., Trainor S.F. et al. (2006). Directional Changes in Ecological Communities and Social-Ecological Systems: A Framework for Prediction Based on Alaskan Examples. *American Naturalist* 168: 36-49.
193. Hooper D.U., Chapin F.S., Ewel J.J., Hector A., Inchausti P. et al. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs* 75: 3-35.
194. Ives A.R., Carpenter S.R. (2007). Stability and diversity of ecosystems. *Science* 317: 58-62.
195. Kremen C. (2005). Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters* 8: 468-479.
196. Brauman K.A., Daily G.C., Duarte T.K., Mooney H.A. (2007). The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources* 32: 67-98.
197. European Platform for Biodiversity Research Strategy (2007). EPBRS recommendations on Biodiversity and ecosystem services – the Millennium Ecosystem Assessment framework in a European perspective. <http://www.epbrs.org/PDF/EPBRS-DE2007-Mill%20Ecosystem%20final.pdf>.
198. Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Global Assessment Reports*. Island Press, Washington, DC.
199. Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
200. Cumming G.S. (2007). Global biodiversity scenarios and landscape ecology. *Landscape Ecology* 22: 671-685.
201. Kremen C., Williams N.M., Aizen M.A., Gemmill-Herren B., LeBuhn G. et al. (2007). Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology Letters* 10: 299-314.
202. Naidoo R., Ricketts T.H. (2006). Mapping the Economic Costs and Benefits of Conservation. *Plos Biology* 4: 2153-2164.
203. Naidoo R., Wamura T. (2007). Global-scale mapping of economic benefits from agricultural lands: Implications for conservation priorities. *Biological Conservation*. 140: 40-49.
204. Rossing W.A.H., Zander P., Josien E., Groot J.C.J., Meyer B.C. et al. (2007). Integrative modelling approaches for analysis of impact of multifunctional agriculture: A review for France, Germany and the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 120: 41-57.
205. Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418: 671-677.
206. Zhang W., Ricketts T.H., Kremen C., Carney K., Swington S.M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics* 64: 253-260.
207. Quirin M., Gärtner S.O., Pehnt M., Reinhardt G.A. (2004). *CO₂-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme*. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt am Main, Germany: 228 p.
208. Zah R., Böni H., Gauch M., Hischier R., Lehmann M. et al. (2007). *Ökobilanz von Energieprodukten: ökologische Bewertung von Biotreibstoffen Schlussbericht*. EMPA (Eidgenössische Materialsprüfungs- und Forschungsanstalt), Bern: 1-206 p.

209. Delucchi M.A. (2006). Lifecycle analyses of biofuels (draft report). Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Davis: 80 p.
210. Fritsche U.R., Hünecke K., Hermann A., Schulze F., Wiegmann K. (2006). Sustainability Standards for Bioenergy. WWF Germany, Frankfurt.
211. Lewandowski I., Faaij A.P.C. (2006). Steps towards the development of a certification system for sustainable bio-energy trade. *Biomass & Bioenergy* 30: 83-104.
212. Thrän D. (2007). Perspektiven und Szenarien für eine nachhaltige Biomassenutzung. *In* Rundgespräche der Kommission für Ökologie. Bd. 33 "Energie aus Biomasse". Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München: 59-68.
213. Lavelle P., Blanchart E., Martin A., Martin S., Spain A. et al. (1993). A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems - Application to soils of the humid tropics. *Biotropica* 25: 130-150.
214. Luxhoi J., Bruun S., Stenberg B., Breland T.A., Jensen L.S. (2006). Prediction of gross and net nitrogen mineralization-immobilization turnover from respiration. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1121-1128.
215. Paul E.A., Juma N.G. (1981). Mineralization and immobilization of soil nitrogen by microorganisms. *In* Terrestrial nitrogen cycles. Clark F.E., Rosswall T. (Eds.) Ecological bulletins: 179-195.
216. Oades J., M. (1995). An overview of processes affecting the cycling of carbon in soils. *In* The role of nonliving organic matter in the earth's carbon cycle. Zepp R.G., Sonntag C. John (Eds.) Wiley & Sons Ltd, New York: 192-209.
217. Conant R.T., Drijber R.A., Haddix M., Parton W.J., Paul E.A. et al. (2008). Sensitivity of organic matter decomposition to warming varies with its quality. *Global Change Biology* in press.
218. Conen F., Leifeld J., Seth B., Alewell C. (2006). Warming mineralises young and old soil carbon equally. *Biogeosciences* 3: 515-519.
219. Fang C., Smith P., Smith J.U. (2006). Is resistant soil organic matter more sensitive to temperature than the labile organic matter? *Biogeosciences* 3: 65-68.
220. Fierer N., Allen A.S., Schimel J.P., Holden P.A. (2003). Controls on microbial CO₂ production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. *Global Change Biology* 9: 1322-1332.
221. Giardina C.P., Ryan M.G. (2000). Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature* 404: 858-861.
222. Leifeld J., Fuhrer J. (2005). The temperature response of CO₂ production from bulk soils and soil fractions is related to soil organic matter quality. *Biogeochemistry* 75: 433-453.
223. Melillo J.M., Steudler P.A., Aber J.D., Newkirk K., Lux H. et al. (2002). Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science* 298: 2173-2176.
224. Fontaine S., Barot S., Barre P., Bdioui N., Mary B. et al. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* 450: 277-281.
225. Jastrow J.D., Amonette J.E., Bailey V.L. (2007). Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change* 80: 5-23.
226. Jenkinson D.S. (1981). The fate of plant and animal residues in soil. *In* The chemistry of soil processes. Greenland D.J., Hayes M.H.B. (Eds.) John Wiley and Sons Ltd, Chichester: 505-561.
227. Sollins P., Homann P., Caldwell B.A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma* 74: 65-105.

228. Werner C., Kiese R., Butterbach-Bahl K. (2007). Soil-atmosphere exchange of N₂O, CH₄, and CO₂ and controlling environmental factors for tropical rain forest sites in western Kenya. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 112.
229. Abbasi M.K., Adams W.A. (1998). Loss of nitrogen in compacted grassland soil by simultaneous nitrification and denitrification. *Plant and Soil* 200: 265-277.
230. Oades J.M., Gillman G.P., Uehara G. (1989). Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. *In Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Coleman D.C., Oades J.M., Uehara G. (Eds.) NifTAL Project, University of Hawaii: 69-96.
231. Krull E.S., Baldock J.A., Skjemstad J.O. (2003). Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover. *Functional Plant Biology* 30: 207-222.
232. Percival H.J., Parfitt R.L., Scott N.A. (2000). Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: Is clay content important? *Soil Science Society of America Journal* 64: 1623-1630.
233. Batjes N.H. (1998). Mitigation of atmospheric CO₂ concentrations by increased carbon sequestration in the soil. *Biology and Fertility of Soils* 27: 230-235.
234. Lettens S., van Orshoven J., van Wesemael B., Muys B., Perrin D. (2005). Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990. *Global Change Biol* 11: 2128-2140.
235. Müller C.W., Kögel-Knabner I. (2008). Soil organic carbon stocks, distribution and composition affected by historic land use changes on adjacent sites. *Global Change Biol*: submitted.
236. Steffens M., Kölbl A., Totsche K.U., Kögel-Knabner I. (2008). Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (P.R. China). *Geoderma*: in press.
237. Guo L.B., Gifford R.M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8: 345-360.
238. Mann L.K. (1986). Changes in Soil Carbon Storage after Cultivation. *Soil Sci.* 142: 279-288.
239. Gingrich S., Erb K.H., Krausmann F., Gaube V., Haberl H. (2007). Long-term dynamics of terrestrial carbon stocks in Austria: a comprehensive assessment of the time period from 1830 to 2000. *Regional Environmental Change* 7: 37-47.
240. Liski J., Perruchoud D., Karjalainen T. (2002). Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* 169: 159-175.
241. Meirvenne M.v., Pannier J., Hofman G., Louwagie G. (1996). Regional characterization of the long-term change in soil organic carbon under intensive agriculture. *Soil Use and Management* 12: 86-94.
242. Nieder R., Richter J. (2000). C and N accumulation in arable soils of West Germany and its influence on the environment - Developments 1970 to 1998. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernahrung und Bodenkunde* 163: 65-72.
243. Smittenberg R.H., Eglinton T.I., Schouten S., Damste J.S.S. (2006). Ongoing buildup of refractory organic carbon in boreal soils during the Holocene. *Science* 314: 1283-1286.
244. Lorenz K., Lal R. (2005). The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *In Advances in Agronomy*, Vol 88: 35-66.
245. Berg B., Matzner E. (1997). Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems. *Environmental Rev.* 5: 1-25.

246. Carreiro M.M., Sinsabaugh R.L., Rebert D.A., Parkhurst D.F. (2000). Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology* 81: 2359-2365.
247. de Vries W., Reinds G.J., Gundersen P., Sterba H. (2006). The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. *Global Change Biology* 12: 1151-1173.
248. Hagedorn F., Spinnler D., Siegwolf R. (2003). Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry* 35: 1683-1692.
249. Jenkinson D.S., Goulding K., Powlson D.S. (1999). Nitrogen deposition and carbon sequestration. *Nature* 400: 629-629.
250. Kang H., Lee D. (2005). Inhibition of extracellular enzyme activities in a forest soil by additions of inorganic nitrogen. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36: 2129-2135.
251. Khan S.A., Mulvaney R.L., Ellsworth T.R., Boast C.W. (2007). The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality* 36: 1821-1832.
252. Lamarque J.F., Kiehl J.T., Brasseur G.P., Butler T., Cameron-Smith P. et al. (2005). Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multimodel approach: Analysis of nitrogen deposition. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 110.
253. Magill A.H., Aber J.D. (1998). Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems. *Plant and Soil* 203: 301-311.
254. Sinsabaugh R.L., Antibus R.K., Linkins A.E., McClaugherty C.A., Rayburn L. et al. (1993). Wood Decomposition - Nitrogen and Phosphorus Dynamics in Relation to Extracellular Enzyme-Activity. *Ecology* 74: 1586-1593.
255. Treseder K.K., Turner K.M., Mack M.C. (2007). Mycorrhizal responses to nitrogen fertilization in boreal ecosystems: potential consequences for soil carbon storage. *Global Change Biology* 13: 78-88.
256. Vestgarden L.S. (2001). Carbon and nitrogen turnover in the early stage of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needle litter decomposition: effects of internal and external nitrogen. *Soil Biology & Biochemistry* 33: 465-474.
257. Brodowski S., John B., Flessa H., Amelung W. (2006). Aggregate-occluded black carbon in soil. *European Journal of Soil Science* 57: 539-546.
258. Czimczik C.I., Masiello C.A. (2007). Controls on black carbon storage in soils. *Global Biogeochemical Cycles* 21.
259. Lehmann J. (2007). A handful of carbon. *Nature* 447: 143-144.
260. Pimentel D., Hepperly P., Hanson J., Douds D., Seidel R. (2005). Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *Bioscience* 55: 573-582.
261. Six J., Ogle S.M., Breidt F.J., Conant R.T., Mosier A.R. et al. (2004). The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. *Global Change Biology* 10: 155-160.
262. Insam H., Domsch K.H. (1988). Relationship between soil organic-carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology* 15: 177-188.
263. Insam H., Haselwandter K. (1989). Metabolic quotient of the soil microflora in relation to plant succession. *Oecologia* 79: 174-178.
264. Mäder P., Fliessbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P. et al. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296: 1694-1697.

265. Robertson G.P., Paul E.A., Harwood R.R. (2000). Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289: 1922-1925.
266. Berhe A.A., Harte J., Harden J.W., Torn M.S. (2007). The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink. *Bioscience* 57: 337-346.
267. Gregorich E.G., Greer K.J., Anderson D.W., Liang B.C. (1998). Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil Till Res* 47: 291-302.
268. Lal R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 29: 437-450.
269. Kozak J., Estreguil C., Troll M. (2007). Forest cover changes in the northern Carpathians in the 20th century: a slow transition. *Journal of Land Use Science* 2: 127-146.
270. Lambin E.F., Geist H., Lepers E. (2003). Dynamics of land use and cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources* 28: 241.
271. Mottet A., Ladet S., Coque N., Gibon A. (2006). Agricultural land-use change and its drivers in mountain landscapes: A case study in the Pyrenees. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114: 296.
272. Scouvar M., Adams R.T., Caldas M., Dale V., Mertens B. et al. (2007). Causes of deforestation in the Brazilian Amazon: a qualitative comparative analysis. *Journal of Land Use Science* 2: 257.
273. Contreras-Hermosilla A. (2000). The underlying causes of forest decline. Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia.
274. UN Energy (2007). Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision-Makers. United Nations, Washington.
275. Biermann F. (2007). 'Earth system governance' as a crosscutting theme of global change research. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 17: 326-337.
276. Mickwitz P., Kivimaa P. (2007). Evaluating Policy Integration - The Case of Policies for Environmentally Friendlier Technological Innovations. *Evaluation* 13: 6886.
277. Young O.R. (2002). *The Institutional Dimensions of Environmental Change: Fit, Interplay, Scale*. MIT Press, Cambridge.
278. United Nations, European Commission, International Monetary Fund, Organisation for Economic Co-operation and Development, World Bank (2003). *Integrated Environmental and Economic Accounting 2003 - Handbook of National Accounting*.
279. Swift M.J., Izac A.M.N., van Noordwijk M. (2004). Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes - are we asking the right questions? *Agriculture Ecosystems & Environment* 104: 113-134.
280. Tschardt T., Klein A.M., Kruess A., Steffan-Dewenter I., Thies C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management. *Ecology Letters* 8: 857-874.
281. Rodriguez J.P., Beard T.D., Bennett E.M., Cumming G.S., Cork S.J. et al. (2006). Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society* 11.
282. Carpenter S.R., Bennett E.M., Peterson G.D. (2005). Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystem and Human Well-being: Scenarios (Volume 2): 560 p.
283. Chapin F.S., Zavaleta E.S., Eviner V.T., Naylor R.L., Vitousek P.M. et al. (2000). Consequences of changing biodiversity. *Nature* 405: 234-242.
284. Matson P.A., Parton W.J., Power A.G., Swift M.J. (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277: 504-509.

285. Beck S., Born W., Dziock S., Görg C., Hansjürgens B. et al. (2005). Die Relevanz des Millenium Ecosystem Assessment für Deutschland. *In* UFZ Bericht, Ed D.C. Neßhöver. UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Leipzig, Germany.
286. Eakin H., Luers A.L. (2006). Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annual Review of Environment and Resources* 31: 365-394.
287. Nelson D.R., Adger W.N., Brown K. (2007). Adaptation to environmental change: Contributions of a resilience framework. *Annual Review of Environment and Resources* 32: 395-419.
288. Ostfeld R.S., LoGiudice K. (2003). Community disassembly, biodiversity loss, and the erosion of an ecosystem service. *Ecology* 84: 1421-1427.
289. Quetier F., Lavorel S., Thuiller W., Davies I. (2007). Plant-trait-based modeling assessment of ecosystem-service sensitivity to land-use change. *Ecological Applications* 17: 2377-2386.
290. Eviner V.T., Chapin F.S., III (2003). Functional matrix: a conceptual framework for predicting multiple plant effects on ecosystem processes. *Annual Review of Ecology and Systematics* 34: 455-485.
291. Scheffer M., Carpenter S.R. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology & Evolution* 18: 648-656.
292. Chapin F.S., Peterson G., Berkes F., Callaghan T.V., Angelstam P. et al. (2004). Resilience and vulnerability of northern regions to social and environmental change. *Ambio* 33: 344-349.
293. Flannigan M.D., Bergeron Y., Engelmark O., Wotton B.M. (1998). Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. *Journal of Vegetation Science* 9: 469-476.
294. Johnstone J.F., Chapin F.S. (2006). Fire interval effects on successional trajectory in boreal forests of northwest Canada. *Ecosystems* 9: 268-277.
295. Metzger M.J., Rounsevell M.D.A., Acosta-Michlik L., Leemans R., Schröter D. (2006). The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 69-85.
296. Rounsevell M.D.A., Ewert F., Reginster I., Leemans R., Carter T.R. (2005). Future scenarios of European agricultural land use II. Projecting changes in cropland and grassland. *Agriculture Ecosystems & Environment* 107: 117-135.
297. Schröter D., L. Acosta-Michlik, A.W. Arnell, M.B. Araújo, F. Badeck et al. (2004). ATEAM - Final report 2004, Section 5 and 6. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam: 139 p.
298. Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J. et al. (2000). Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Ed IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK: 595 p.
299. Gerstengarbe F.W., Werner P.C. (2005). Simulationsergebnisse des regionalen Klimamodells STAR. *In* Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Wechsung A.B.F., Gräfe P. (Eds.) Weißensee Verlag, Berlin: 110-118 p.
300. Scheffer K. (2003). Der Anbau von Energiepflanzen als Chance einer weiteren Ökologisierung der Landnutzung. *Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 14: 114-119.
301. Splechtna B., Glatzel G. (2005). Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppe "Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume, LandInnovation": Optionen der Bereitstellung von Biomasse aus Wäldern und Energieholzplantagen für die energetische Nut-

- zung - Szenarien, ökologische Auswirkungen, Forschungsbedarf. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin: 44 p.
302. Achard F., Mollicone D., Stibig H.J., Aksenov D., Laestadius L. et al. (2006). Areas of rapid forest-cover change in boreal Eurasia. *Forest Ecology and Management* 237: 322-334.
 303. Bergeron Y., Flannigan M., Gauthier S., Leduc A., Lefort P. (2004). Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: Implications for sustainable forest management. *Ambio* 33: 356-360.
 304. Elmqvist T., Berkes F., Folke C., Angelstam P., Crepin A.S. et al. (2004). The dynamics of ecosystems, biodiversity management and social institutions at high northern latitudes. *Ambio* 33: 350-355.
 305. Brentrup F., Kusters J., Kuhlmann H., Lammel J. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology - I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *European Journal of Agronomy* 20: 247-264.
 306. Hanegraaf M.C., Biewinga E.E., van der Bijl G. (1998). Assessing the ecological and economic sustainability of energy crops. *Biomass and Bioenergy* 15: 345-355.
 307. Heiskanen E. (2002). The institutional logic of life cycle energy thinking. *Journal of Cleaner Production* 10: 427-437.
 308. Rebitzer G., Ekvall T., Frischknecht R., Hunkeler D., Norris G. et al. (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International* 30: 701-720.
 309. Sarigiannis D.A., Triacchini G. (2000). Meso-scale life-cycle impact assessment of novel technologies policies: The cast of renewable. *Journal of Hazardous Materials* 78: 145-171.
 310. Vogtlander J.G., Lindeijer E., Witte J.P.M., Hendriks C. (2004). Characterizing the change of land-use based on flora: application for EIA and LCA. *Journal of Cleaner Production* 12: 47-57.
 311. Jetz W., Wilcove D.S., Dobson A.P. (2007). Projected impacts of climate and land-use change on the global diversity of birds. *Plos Biology* 5: 1211-1219.
 312. Kissling W.D., Rahbek C., Bohning-Graese K. (2007). Food plant diversity as broad-scale determinant of avian frugivore richness. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 274: 799-808.
 313. Lischke H., Zimmermann N.E., Bolliger J., Rickebusch S., Löffler T.J. (2006). TreeMig: A forest-landscape model for simulating spatio-temporal patterns from stand to landscape scale. *Ecological Modelling* 199: 409-420.
 314. Moolenaar H.E., Grasman J., Selten F.M., de Gee M. (2007). Testing a method for analyzing the effect of parameter change in climate driven ecological systems. *Ecological Modelling* 205: 398-300.
 315. Schwartz M.W., Iverson L.R., Prasad A.M., Matthews S.N., O'Connor R.J. (2006). Predicting extinctions as a result of climate change. *Ecology* 87: 1611-1615.
 316. Tews J., Esther A., Milton S.J., Jeltsch F. (2006). Linking a population model with an ecosystem model: Assessing the impact of land use and climate change on savanna shrub cover dynamics. *Ecological Modelling* 195: 219-228.
 317. Choudhury K., Dziedziuch C., Häusler A., Ploetz C. (2004). Zusammenstellung und Auswertung geeigneter Kriterien, Indikatoren, UVP und dergleichen für die notwendige Berücksichtigung von Biodiversitätsaspekten bei Maßnahmen des Klimaschutzes, insbesondere bei Landnutzungsänderungen. *In* Climate Change, Ed Umweltbundesamt. Umweltbundesamt, Berlin: 202 85 275, UBA-FB 000705.

318. Fischlin A., Midgley G.F., Price J.T., Leemans R., Gopal B. et al. (2008). Ecosystems, their properties, goods and services. IPCC AR 4 WK II: 211-272.
319. Schröter D., Cramer W., Leemans R., Prentice I.C., Araujo M.B. et al. (2005). Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310: 1333-1337.
320. Mertz O., Ravnborg H.M., Lövei G.L., Nielsen I., Konijnendijk C.C. (2007). Ecosystem services and biodiversity in developing countries. *Biodiversity and Conservation* 16: 2729-2737.
321. Asner G.P., Broadbent E.N., Oliveira P.J.C., Keller M., Knapp D.E. et al. (2006). Condition and fate of logged forests in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103: 12947-12950.
322. Buermann W., Saatchi S., Smith T.B., Zutta B.R., Chaves J.A. et al. (2008). Predicting species distributions across the Amazonian and Andean regions using remote sensing data. *Journal of Biogeography* online reprint: doi:10.1111/j.1365-2699.2007.01858.x.
323. Loarie S.R., Joppa L.N., Pimm S.L. (2007). Satellites miss environmental priorities. *Trends in Ecology & Evolution* 22: 630-632.
324. Bogena H., Schulz K., Vereecken H. (2006). Towards a network of observatories in terrestrial environmental research. *Advances in Geosciences* 9: 109-114.
325. Henle K., Alard D., Clitherow J., Cobb P., Firbank L. et al. (2008). Identifying and managing the conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe – A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 124: 60-71.
326. Urban B., Krahl J., Munack A., Kanning H., von Haaren C. (2007). Analysis of the life cycle assessment approach for the evaluation of land use related impacts on biodiversity in biofuels production. *Landbauforschung Volkenrode* 57: 419-427.
327. Russelle M.P., Morey R.V., Baker J.M., Porter P.M., Jung H.-J. (2007). Comment on "Carbon-negative" biofuels from low-input high-diversity grassland biomass". *Science* 316: 1567 b.
328. Tilman D., Hill J., Lehman C. (2007). Response to comment on "Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass". *Science* 316: 1567 c.
329. Borjesson P., Berndes G. (2006). The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 30: 428.
330. IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. 1-52.
331. Jorgensen U., Dalgaard T., Kristensen E.S. (2005). Biomass energy in organic farming - the potential role of short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy* 28: 237.
332. Wöllecke J., Grünwald H., Schneider B.U., Hüttl R.F. (2007). Alley-Cropping - a chance to connect habitats in the agricultural landscape? *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* 37: 497.
333. World Agroforestry Centre (2007). *Annual Report for 2006: Tackling global challenges through agroforestry*. Kenia, Nairobi.
334. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2007). *Klimaschutz durch Biomasse - Sondergutachten*. Sachverständigenrat für Umweltfragen: 124 p.
335. Schulze E.D. (2006). Biological control of the terrestrial carbon sink. *Biogeosciences* 3: 147-166.