



Abschlussbericht
der Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“
der Allianz der Wissenschaftsorganisationen

Empfehlung zur Einrichtung eines nationalen Observatorien-Netzes für die terrestrische Ökosystemforschung

Impressum

Herausgeber: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Permoserstraße 15 | 04318 Leipzig
Telefon 0341/235-1269 | Fax 0341/235-450819
E-Mail: info@ufz.de | Internet: www.ufz.de

Titelbild: Harry Vereecken (FZ Jülich)

Stand: November 2017

Verfasser

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ der Allianz der Wissenschaftsorganisationen

Prof. Dr. Ingrid-Kögel-Knabner | Technische Universität München, Vorsitz
Prof. Dr. Georg Teutsch | Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig, Vorsitz
Prof. Dr. Rita Adrian | Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Stechlin
Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg | Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam
Prof. Dr. Ulf-Ingo Flügge | Universität zu Köln
Olaf Kolle | Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena
Prof. Dr. Christoph Kleinn | Georg-August-Universität, Göttingen
Prof. Dr. Kirsten Küsel | Friedrich-Schiller-Universität, Jena
Prof. Dr. Gunnar Lischeid | Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg
Prof. Dr. Alexander Löw † | Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Christoph Schäfers | Fraunhofer-Institut IME, Schmallenberg
Prof. Dr. Hans Peter Schmid | Karlsruher Institut für Technologie, Garmisch-Partenkirchen
Prof. Dr. Clemens Simmer | Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn
Prof. Dr. Harry Vereecken | Forschungszentrum Jülich
Prof. Dr. Rainer Walz | Fraunhofer-Institut ISI, Karlsruhe

Gäste

Prof. Dr. Peter Haase | Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Gelnhausen
Dr. Elke Lütke-meier | Wissenschaftsrat, Köln
Dr. Daniel Weymann | DAAD, Bonn

Koordinatorinnen der Allianz-Arbeitsgruppe

Dr. Cathrin Brüchmann | Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin
Dr. Patricia Schmitz-Möller | Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn
Dr. Ute Weber | Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn / Helmholtz-Gemeinschaft, Bonn

Danksagung

Die Allianz-Arbeitsgruppe dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Forschungszentrum Jülich für die Unterstützung bei den Auswertungen des Kapitels 3. Weiterhin dankt sie den Mitgliedern der Expertengruppen für ihre Beiträge und Unterstützung.

In Gedenken an

Die Arbeitsgruppe gedenkt ihrem kürzlich verstorbenen Mitglied **Professor Dr. Alexander Löw**, der als Leiter der Expertengruppe „Datenmanagement“ mit seinem Wissen und seiner ausgleichenden, konstruktiven Art wesentliche Beiträge für die Allianz-Arbeitsgruppe und darüber hinaus geleistet hat.

Inhalt

1	Zusammenfassung und Empfehlung	5
2	Genese, Ziele und Organisation der Allianz-Arbeitsgruppe und Expertengruppen	8
3	Berichte und Empfehlungen der Expertengruppen	9
3.1	Nationale und internationale Umweltobservatorien: Status quo und Entwicklungen	9
3.2	Observatorien in der terrestrischen Umweltforschung Deutschlands: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für ein nationales Observatorien-Netz	11
3.3	Der Integrationsgrad in der terrestrischen Umweltforschung: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für mehr Systemorientierung	17
3.4	Integratives Datenmanagement: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für bessere Datenmanagement-Konzepte	20
3.5	Definition der Anforderungen an ein nationales Observatorien-Netz	22
4	Vorschlag zur Umsetzungsstrategie an die Allianz der Wissenschaftsorganisationen	24
	Abkürzungsverzeichnis	26

Anhang*

- A.1 DFG-Strategiepapier
- A.2 Zusammensetzung der Allianz-Arbeitsgruppe und der Expertengruppen
- A.3 Bericht Observatorien-Umfrage
- A.4 Bericht Umweltsystemtheorien: Publikations-Manuskript
- A.5 Bericht Datenmanagement

* alle Anhänge siehe USB-Stick

Begriffserläuterungen

Der Begriff **terrestrische Umweltforschung** wird im Folgenden allgemein und für alle Forschungsbereiche mit Bezug zur Landoberfläche verwendet.

Der Begriff **Ökosystemforschung** umfasst hier integrierende Forschung mit gemeinsamer Berücksichtigung abiotischer und biotischer Prozesse sowie der Interaktion von Mensch und Natur.

Der Begriff **Kompartiment** wird für Teilbereiche des Erdsystems verwendet wie z. B. Atmosphäre, Boden oder Vegetation, Fauna (siehe Seite 12).

Der Begriff **Observatorium** umfasst einzelne Untersuchungsstandorte sowie regionale und überregionale Messnetze für die Umweltforschung und -beobachtung (siehe Seite 11)

1 Zusammenfassung und Empfehlung

Gegenwärtig hat der Mensch einen nie gekannten Einfluss auf seine natürlichen Lebensgrundlagen, deren Basis Ökosysteme mit ihren Leistungen sind. Sie garantieren den Erhalt und die Fortentwicklung menschlicher Gesellschaften. Aktuell jedoch stößt die Menschheit in zahlreichen Regionen der Welt an die Leistungsgrenze der Ökosysteme oder überschreitet diese bereits in bedenklicher Weise.

Die besondere Herausforderung der terrestrischen Ökosystemforschung liegt darin, die Funktionsweisen von Ökosystemen und damit ihre Limitierungen zu verstehen: Wie ändern sich die ohnehin komplexen abiotischen und biotischen Wechselwirkungen unter den Bedingungen des Globalen Wandels? Nur mit einem systemorientierten Forschungsansatz können belastbare Zukunfts-Szenarien entwickelt und Handlungsoptionen abgeleitet werden; in diese Forschung müssen deshalb auch die sozialen und ökonomischen Veränderungen unserer Umwelt einbezogen werden.

Umwelt-Observatorien – Status Quo

Deutschland hat auf dem Gebiet der terrestrischen Umweltforschung, nicht zuletzt wegen der frühen politischen Akzeptanz ökologischer Themen, eine Spitzenstellung in Europa und weltweit einnehmen können. Zahlreiche BMBF-, DFG- und EU-Forschungsprogramme sowie die umfassenden Monitoring-Programme der Länder sind das Fundament dieses Erfolgs. Insbesondere in den zurückliegenden 30 Jahren wurde in Deutschland eine große Anzahl neuer Umwelt-Observatorien eingerichtet, die sich primär den Veränderungen wie beispielsweise dem Ressourcenverbrauch auf unserer Landoberfläche widmen. Für die terrestrische Umweltforschung und -beobachtung steht derzeit eine Infrastruktur-Substanz von weit über 100 Observatorien zur Verfügung, darunter auch Beobachtungsstandorte mit Zeitreihen über viele Jahrzehnte. Die bisherigen Investitionen in diese Infrastrukturen belaufen sich schätzungsweise auf viele 100 Mio. Euro, eine belastbare Übersicht existiert jedoch nicht.

Vermutlich die Hälfte dieser Observatorien wird in den kommenden 15–20 Jahren den Betrieb einstel-

len, während für die andere Hälfte eine längerfristige Laufzeit vorgesehen ist. Die Betreiber der nationalen Observatorien stehen in den nächsten Jahren vor der Herausforderung, Konzepte zu entwickeln, in welchem Umfang, mit welcher Priorität und mit welcher Organisationsstruktur die Infrastrukturen unserer Observatorien-Landschaft langfristig weitergeführt oder erneuert werden sollen. Dabei ist sicherzustellen, dass die mit sehr viel Geld und Aufwand erhobenen und analysierten Datensätze den Behörden und der Wissenschaft verfügbar gemacht werden.

Die bestehenden Observatorien wurden vorrangig unter Fach- und Kompartiment-spezifischen Aspekten eingerichtet, beispielsweise für die Bereiche Atmosphäre, Biodiversität, Boden, Gewässer oder Vegetation. Aufgrund ihrer originär disziplinär gewachsenen Struktur ist die Observatorien-Landschaft in Deutschland – wie auch international – überaus fragmentiert: Trotz des erheblichen Ausbaus der Infrastrukturen sowie eines deutlichen Anstiegs der Forschungsförderung mangelt es in der terrestrischen Umweltforschung und -beobachtung an Abstimmung oder Koordination zwischen Standorten, Messnetzen und Akteuren. Neben den fachspezifischen Gründen erschweren die föderalen Verantwortlichkeiten den Ausbau von Netzwerk-Strukturen in Deutschland.

Umwelt-Observatorien – Herausforderungen

Um die Ursachen und Auswirkungen des Globalen Wandels zu erforschen und Anpassungsstrategien zu erarbeiten, ist aber ein systemorientierter Forschungsansatz notwendig, der die Beobachtungen aller Umweltkompartimente einbezieht. Dass sich seit einigen Jahren internationale Observatorien-Netze und Infrastruktur-Initiativen entwickeln, die einen zunehmend systemorientierten Beobachtungsansatz verfolgen, unterstreicht deutlich den Bedarf: Eine explizit systemorientierte Ausrichtung der terrestrischen Umweltforschung, die sich als neue Forschungsrichtung („emerging field“) zu etablieren beginnt, braucht auch einen systemorientierten Beobachtungsansatz. Observatorien-Netzwerke wie beispielsweise die „Zones Ateliers“ in Frankreich, das „Terrestrial Ecosystem Research Network“ (TERN) in

Australien, das internationale Programm „Integrated Carbon Observation System“ (ICOS) oder die in den USA initiierten „Critical Zone Observatories“ (CZO) verfolgen bereits systemorientierte Beobachtungsstrategien.

In Deutschland gibt es bislang keine Initiative für eine explizit systemorientierte terrestrische Umweltbeobachtung und -forschung. Die große Zahl sehr gut ausgerüsteter und in Summe nahezu flächendeckender Standorte und Messnetze bildet im internationalen Vergleich jedoch eine hervorragende Ausgangsbasis. Viele Observatorien verfügen über Messreihen von mehreren Dekaden. Einige

der Observatorien haben bereits systemorientierte Beobachtungskonzepte entwickelt. Die Daten der meisten Observatorien sind mittlerweile öffentlich zugänglich. Auch wenn das Datenmanagement fachbedingt sehr heterogen ist, verfügen die beteiligten Disziplinen über passende, d.h. im Sinne einer integrierenden Datennutzung ausbaufähige, Dateninfrastruktur-Konzepte.

Das Potenzial für ein nationales systemorientiertes Observatorien-Netz ist vorhanden. Was fehlt, sind eine übergreifende Strategie und koordinierte Schritte für den Aufbau.

Empfehlung

Die Allianz-Arbeitsgruppe empfiehlt die Einrichtung eines Observatorien-Netzes für die terrestrische Ökosystemforschung. Ein solches Netzwerk kann den Nukleus eines national abgestimmten Langfrist-Konzepts bilden, um unsere Beobachtungs- und Untersuchungsgrundlagen zu sichern. Zugleich eignet es sich als Nukleus für den Aufbau einer national abgestimmten Koordinationsstruktur der terrestrischen Umweltbeobachtung und ihres Datenmanagements.

Observatorien-Netzwerke, geregelte und möglichst offene Zugangsverfahren zu Infrastrukturen und den gewonnenen Daten und Erkenntnissen sind nach Ansicht der Allianz-Arbeitsgruppe elementare Voraussetzungen für eine zukunftsgerichtete und inter-

national konkurrenzfähige Ökosystemforschung, ebenso für ein zukunftsfähiges Umweltmonitoring. Der Mehrwert eines Netzwerks gegenüber dem Status quo unserer Observatorien-Landschaft ist in der folgenden Übersicht zusammengefasst.

Mehrwert durch ein systemorientiertes Observatorien-Netz

- ➔ Aufbau einer nationalen Infrastruktur für eine systemorientierte Umweltforschung und -beobachtung von internationaler Bedeutung
- ➔ Integration der noch weitgehend fragmentierten Langzeitforschung in Deutschland
- ➔ Koordinierte und integrierende Umwelt-Beobachtungen aller Kompartimente
- ➔ Geregelter Zugang zu den Observatorien sowie zu den Umweltdaten mittels integrierender Dateninfrastruktur für Wissenschaft und Praxis

- ➔ **Abgestimmte Entwicklung, Standardisierung und Harmonisierung von Untersuchungsmethoden und -verfahren**
- ➔ **Verbesserung der Zusammenarbeit von Wissenschaft und staatlichen Einrichtungen auf Bundes- und Landesebene**
- ➔ **Zentrale Komponente zur Langfrist-Sicherung terrestrischer Umweltobservatorien in Deutschland**

Wenn es gelingt, für die terrestrische Ökosystemforschung in Deutschland ein von der Community langfristig getragenes, systemorientiertes Observatorien-Netzwerk einzurichten, eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten für die Institutionen- und Standort-übergreifende Forschung. Gleiches gilt für das nationale Umwelt-Monitoring, es gibt mittlerweile ein großes fachliches Interesse und eine starke Kooperationsbereitschaft auf beiden Seiten. Mit einer vernetzten Dateninfrastruktur könnten die über Jahrzehnte gewonnenen Daten und Erkenntnisse bestehender Observatorien umfassend genutzt und ausgewertet werden. Forschungsmittel könnten zudem effektiver eingesetzt werden, weil wiederholte Investitionskosten

und Standort-Charakterisierungen reduziert würden. Dass gemeinsame Forschungsinfrastrukturen die Forschung von der Theorie bis in die Praxis überaus erfolgreich unterstützen, zeigen die Teilchenbeschleuniger in der Physik oder die Forschungsschiffe in der Meeresforschung. Diese exzellente Forschung mit ihrer großen internationalen Sichtbarkeit ist nicht zuletzt das Ergebnis einer langfristigen und von der wissenschaftlichen Community unterstützten Förderung. Die terrestrische Ökosystemforschung ist im Gegensatz hierzu jedoch auf verteilte und vernetzte Infrastrukturen unterschiedlicher Betreiber angewiesen, was für alle Beteiligten eine ungleich größere organisatorische Herausforderung bedeutet.

Die Allianz-Arbeitsgruppe empfiehlt eine schrittweise Umsetzungsstrategie zur Einrichtung eines nationalen Observatorien-Netzes für die terrestrische Ökosystemforschung:

- 1** Veröffentlichung des Abschlussberichts als Diskussionsgrundlage für die wissenschaftliche Community, Observatorien-Betreiber und Förderorganisationen.
- 2** Koordination der weiteren Schritte durch geeignete Wissenschaftsorganisationen.
- 3** Diskussion von Umsetzungs- und Finanzierungsoptionen mit dem BMBF, Observatorien-Betreibern und Förderorganisationen.
- 4** Ausarbeitung eines begutachtungsfähigen Konzepts zur Einrichtung des nationalen Observatorien-Netzes.
- 5** Wissenschaftsgeleitetes Entscheidungsverfahren über die Einrichtung des Observatorien-Netzes.
- 6** Unabhängiges, qualitätsbasiertes Ausschreibungs- und Auswahlverfahren für die Aufnahme bestehender Observatorien in das Observatorien-Netz.

2 Genese, Ziele und Organisation der Allianz-Arbeitsgruppe und Expertengruppen

Die Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ wurde Ende 2013 von der Allianz der Wissenschaftsorganisationen unter Federführung der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft eingerichtet, um sich dem Thema „Langzeitbeobachtungen mit vernetzter Infrastruktur in der terrestrischen Umweltforschung“ fächer- und institutionenübergreifend zu widmen.

Die Wissenschaftsorganisationen haben nach einer gemeinsamen Anfrage der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Helmholtz-Gemeinschaft Anfang 2014 ihre Vertreter für die Allianz-Arbeitsgruppe benannt. Die Gruppe umfasst 17 Personen, sie hat sich im März 2014 konstituiert. Den Vorsitz teilen sich Prof. Ingrid Kögel-Knabner von der TU München als Vertreterin der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Prof. Georg Teutsch vom UFZ Leipzig als Vertreter der Helmholtz-Gemeinschaft. Die Zusammensetzung der Arbeitsgruppe ist Seite 3 sowie Anhang A.2 zu entnehmen.

Die Initiative basiert auf den Empfehlungen des DFG-Strategiepapiers „Langzeitperspektiven und Infrastruktur der terrestrischen Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz“, das 2013 von Vertretern mehrerer DFG-Senatskommissionen aus dem Bereich der Erd- und Umweltforschung veröffentlicht wurde (ISBN 978-3-527-33864-1, Anhang 4.1). In dem Papier wird die Einrichtung eines langfristig finanzierten und systemorientierten Observatorien-Netzes vorgeschlagen, um die empirische Datenbasis für Beobachtung, Verständnis und Prognose der Veränderungen unserer Landoberflächen zu verbessern: Entsprechende Langfristdaten sind eine notwendige Voraussetzung für das Prozessverständnis der Dynamik, Resilienz und Adaptation terrestrischer Ökosysteme in einer sich ändernden Umwelt. Sie sind damit auch eine notwendige Voraussetzung für belastbare Prognosen des Globalen Wandels. Mit dem Strategiepapier wurde ein erstes Grobkonzept entworfen, wie in Zukunft die etablierten und vorrangig fachspezifisch ausgerichteten Observatorien

und Messnetze in Richtung einer stärker systemorientierten Umweltforschung ausgebaut werden können.

Ziel der Allianz-Arbeitsgruppe war es, dieses Grobkonzept nach einer umfassenden Bestandsaufnahme der bestehenden Observatorien-Landschaft weiterzuentwickeln.

Im Zentrum der Aktivitäten stand:

- ➔ die Analyse der vielfältigen und dabei sehr kleinteiligen Organisationsstruktur der terrestrischen Umweltforschung Deutschlands, die sich einerseits durch eine große fachliche Breite mit hoher internationaler Sichtbarkeit einzelner Fachdisziplinen auszeichnet, die aber andererseits regional sowie institutionell stark zersplittert ist: Neben den Hochschulen und den außeruniversitären Forschungsinstitutionen sind Einrichtungen von Bund und Ländern in der terrestrischen Umweltbeobachtung und -forschung aktiv. Bund und Länder mit ihren nachgeordneten Behörden betreiben im Rahmen ihrer hoheitlichen Überwachungsaufgaben zahlreiche Messstationen und Messnetze; hinzu kommen die Observatorien und Messnetze der Forschungsinstitutionen.
- ➔ ein Vernetzungskonzept, um Wege aufzuzeigen, mit denen die bestehenden Hindernisse für eine stärker systemorientierte Ökosystemforschung überwunden werden können. Dabei soll insbesondere die institutionenübergreifende Nutzung etablierter Infrastrukturen und erhobener Daten erleichtert werden – sowohl für die Forschungseinrichtungen untereinander als auch zwischen Forschung und den Behörden von Bund und Ländern. Ein wichtiger Aspekt ist dabei, den Universitäten einen besseren Zugang zu Observatorien und Daten der außeruniversitären Forschungsinstitutionen zu ermöglichen. Zudem ist ein solches nationales Netzwerk in internationale Beobachtungs- und Forschungsnetze einzubinden.

Um diese Ziele zu erreichen, hat sich die Allianz-Arbeitsgruppe folgende Aufgaben gestellt:

- ① Nationale und internationale Umwelt-Observatorien: Status quo und Entwicklungen
- ② Observatorien in der terrestrischen Umweltforschung Deutschlands: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für ein nationales Observatorien-Netz
- ③ Integrationsgrad in der terrestrischen Umweltforschung: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für mehr Systemorientierung
- ④ Integratives Datenmanagement: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für bessere Datenmanagement-Konzepte
- ⑤ Definition der Anforderungen an ein nationales Observatorien-Netz

- ⑥ Vorschlag einer Umsetzungsstrategie an die Allianz der Wissenschaftsorganisationen

Zur Umsetzung wurden drei Expertengruppen zu den Themen „Datenmanagement“ (federführend Prof. Alexander Löw, LMU München), „Umwelt-System-Theorien“ (federführend Prof. Gunnar Lischeid, ZALF Müncheberg) sowie „Governance und internationale Vernetzung“ (federführend Prof. Harry Vereecken, Forschungszentrum Jülich) eingerichtet. Nach dem Kick-Off-Workshop der Allianz-Arbeitsgruppe im November 2014, an dem Vertreter aus Forschungseinrichtungen sowie aus Bundes- und Landesbehörden teilgenommen hatten, konnten weitere externe Experten/innen einbezogen werden. Insgesamt haben sich hier 43 Personen beteiligt, die Übersicht der Mitglieder findet sich in Anhang A.2.

3 Berichte und Empfehlungen der Expertengruppen

3.1 Nationale und internationale Umweltobservatorien: Status quo und Entwicklungen

Weltweit wurden in der letzten Dekade umfangreiche Anstrengungen unternommen, die terrestrische Umweltforschung stärker zu vernetzen, interdisziplinärer aufzustellen und Standards in der Umweltbeobachtung zu harmonisieren und zu etablieren. Trotz der Fortschritte, wie sie beispielsweise in der Einrichtung internationaler bzw. kontinentaler Netzwerke wie LTER (Long-Term Ecosystem Research), ICOS (Integrated Carbon Observatory System), NEON (National Ecological Observatory Network, USA) oder CZO (Critical Zone Observatories, USA und internationale Partner-Observatorien) zum Ausdruck kommen, ist die integrierte terrestrische Umweltbeobachtung nach wie vor ein sich entwickelndes Forschungsfeld und eine wissenschaftliche, technische und organisatorische Herausforderung. Aktuelle nationale und internationale Bestrebungen konzentrieren sich sowohl darauf, die Vernetzung von Forschungsaktivitäten zu stärken, als auch auf eine zunehmende Orientierung auf das Umweltsystem als Ganzes. Skalenübergreifende Beobachtungskon-

zepte und die fortschreitende Einbindung von Satellitendaten sind Kernelemente dieser Entwicklung.

In Europa wurden in den letzten Jahren insbesondere im Rahmen von ICOS als ESFRI-Initiative und im Rahmen der LTER-Observatorien Netzwerke aufgebaut, die einen explizit systemorientierten Beobachtungsansatz verfolgen, dabei jedoch vorwiegend im abiotischen bzw. biotischen Bereich aktiv sind. Beide haben Standards in den jeweiligen wissenschaftlichen Fachgebieten gesetzt, blieben jedoch auf diese beschränkt. Hervorzuheben ist ebenfalls die digitale ESFRI-Initiative LifeWatch mit Fokus auf der biotischen Ökosystemkomponente, die es sich zum Ziel gesetzt hat, existierende und neue Datenbestände besser verfügbar zu machen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang auch die aktuellen Bemühungen, ein europäisches Netzwerk systemorientierter Umweltobservatorien auf der Basis bestehender Infrastrukturen des Europäischen LTER-Netzwerkes (LTER-Europe) gemeinsam mit den Europäischen

Critical Zone Observatories (CZO) zu etablieren: eLTER. Der Antrag von eLTER zur Aufnahme auf die europäische ESFRI-Roadmap wurde im Sommer 2017 von einem internationalen Konsortium unter Federführung des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung Leipzig (UFZ) eingereicht. Diese Initiative zielt u.a. darauf ab, biotische und abiotische Untersuchungsansätze enger abzustimmen. Auch die neue ESFRI-Initiative DANUBIUS verfolgt einen systemorientierten Ansatz, der sich auf die Betrachtung großer Flusseinzugsgebiete konzentriert.

Während in einigen Ländern bereits nationale systemorientierte Observatorien-Netze etabliert wurden (Zones Ateliers in Frankreich, NEON in den USA, Terrestrial Ecosystem Research Network (TERN) in Australien), gibt es in Deutschland bislang keine vergleichbaren und explizit systemorientierten Ansätze für die terrestrische Ökosystemforschung.

Deutschland kann aber mehrere erfolgreiche Projekte im Bereich langfristiger Umweltbeobachtung und -forschung unter Einbeziehung interdisziplinärer Konzepte vorweisen. Zu nennen sind hier TERENO (Terrestrial Environmental Observatories) der Helmholtz-Gemeinschaft und die Biodiversitäts-

exploratorien der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie die Langfrist-Monitoringprojekte innerhalb von LTER-D (Long-Term Ecosystem Research – Deutschland). Während in TERENO die abiotischen Umweltkompartimente sehr umfänglich erfasst werden, wird die biotische Komponente hier bisher nicht in vergleichbarem Umfang untersucht. Das Konzept der Biodiversitätsexploratorien ist dagegen vorrangig auf die Messung biotischer Komponenten ausgerichtet. Neben diesen überregionalen Observatorien gibt es in Deutschland auch einige regionale Standorte, die systemorientierte Konzepte realisieren (Anlage 4.3, Abb. 14 und 15). Weitere nationale Observatorien wie beispielsweise die des internationalen Programms zur Beobachtung des Waldzustandes ICP Forests und die Bundeswaldinventur sowie die Bodenzustandserhebung BZE wurden primär für fachspezifische Themenstellungen oder die Beobachtung von Veränderungen in einzelnen Kompartimenten eingerichtet. Diese langfristig operierenden Observatorien und Messnetze stellen eine wertvolle, harmonisierte Datengrundlage und profunde Expertisen für ihre jeweiligen Fachdisziplinen bereit. Auch ihre gute räumliche Abdeckung qualifiziert diese Einrichtungen als wichtige Partner in einem systemorientierten Observatorien-Verbund.

Fazit und Empfehlungen

Eine Vernetzung der etablierten Umwelt-Observatorien würde Deutschland in die Lage versetzen, die aktuelle internationale Entwicklung in der terrestrischen Ökosystemforschung führend mitzugestalten. Insbesondere die Integration abiotischer und biotischer Prozesse und Kompartimente befindet sich international betrachtet noch in der Anfangsphase. Hier könnte Deutschland mit dem vorgeschlagenen Observatorien-Netz eine Vorreiter-Position übernehmen.

Ein solches nationales Observatorien-Netz wäre über die bereits etablierten Einzel-Observatorien direkt in die internationalen Beobachtungsnetze eingebunden. Es könnte somit als Anlaufstelle für Austausch und Abstimmung der nationalen Aktivitäten in den internationalen Netzwerken fungieren. Durch das Observatorien-Netz könnten ebenfalls Abstimmungsprozesse zur Einbindung der Einzel-Observatorien in internationale Datenmanagementsysteme und Satellitenmissionen initiiert werden.

3.2 Observatorien in der terrestrischen Umweltforschung Deutschlands: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für ein nationales Observatorien-Netz

Die Expertengruppe „Governance“ hat im Herbst 2015 eine Umfrage durchgeführt, um die bestehenden Observatorien im Bereich der terrestrischen Umweltforschung und des Umwelt-Monitorings Deutschlands zu erfassen und zu charakterisieren. Mit der Umfrage sollte ein Überblick über die vorhandenen Observatorien und ihre Infrastrukturen gewonnen werden, um so die Ausgangsbasis für ein nationales Observatorien-Netzwerk besser beurteilen zu können. Weiterhin sollten bestehende Lücken in der systemorientierten Umweltbeobachtung und -forschung identifiziert und wesentliche Grundzüge des neuen Netzwerks definiert werden.

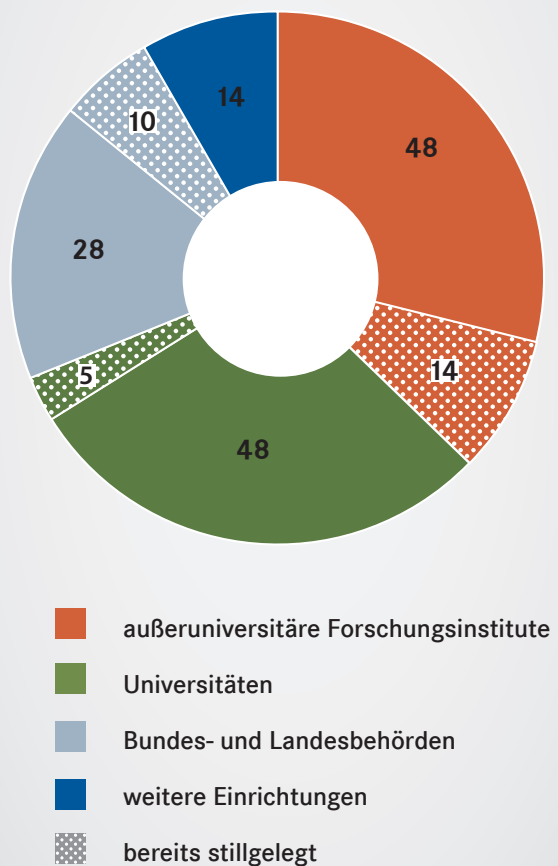
Der Begriff „Observatorium“ wurde dabei weit ausgelegt, um ein möglichst umfassendes Bild der vorhandenen Forschungsinfrastrukturen zu erhalten. Im Folgenden werden sowohl Untersuchungsstandorte sehr unterschiedlicher Größe als auch regionale sowie überregionale Messnetze als Observatorien betrachtet. Die Befragung erforderte Angaben über Lage und fachliche Ausrichtung des Observatoriums, der erfassten Kompartimente und der gemessenen Parameter. Hinzu kamen Angaben zur Durchführung von Messkampagnen, Experimenten und zur Verwendung erhobener Daten in numerischen Modellen. Datenmanagement, -zugang sowie die Einbindung in nationale und internationale Observatorien-Netze wurden ebenfalls abgefragt.

Insgesamt wurden über 300 Vertreter der relevanten Forschungsinstitutionen und der Bundes- und Landesämter gebeten, an der Online-Umfrage teilzunehmen. Es gingen 114 Rückmeldungen ein; 84 Personen und Institutionen beteiligten sich an der Umfrage. Die Befragung ergab eine Anzahl von 183 Observatorien, von denen 167 für die weitere Auswertung herangezogen werden konnten. 29 dieser Observatorien wurden kürzlich (bis Ende 2015) stillgelegt. Diese sind trotzdem berücksichtigt, da sie weiterhin als Ausgangsbasis eines Observatorien-Netztes infrage kommen. **Abbildung 1** zeigt die Verteilung der Observatorien-Betreiber, die sich relativ gleichmäßig aus außeruniversitären Einrichtungen, Universitäten

und Bundes- und Landesbehörden zusammensetzt. Die ausführliche Übersicht der teilnehmenden Einrichtungen ist Anhang A.3 zu entnehmen.

Diese freiwillige Umfrage erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie bietet dennoch einen guten Überblick über die vielfältigen Observatorien-Landschaft Deutschlands und das vorhandene Potenzial für den Aufbau eines systemorientierten und flächendeckenden Netzwerks. Eine ausführliche Zusammenstellung des Umfrageverfahrens und der Ergebnisse findet sich in Anhang A.3.

Abbildung 1
Betreiber der 167 ausgewerteten Observatorien



Ausrichtung der Observatorien

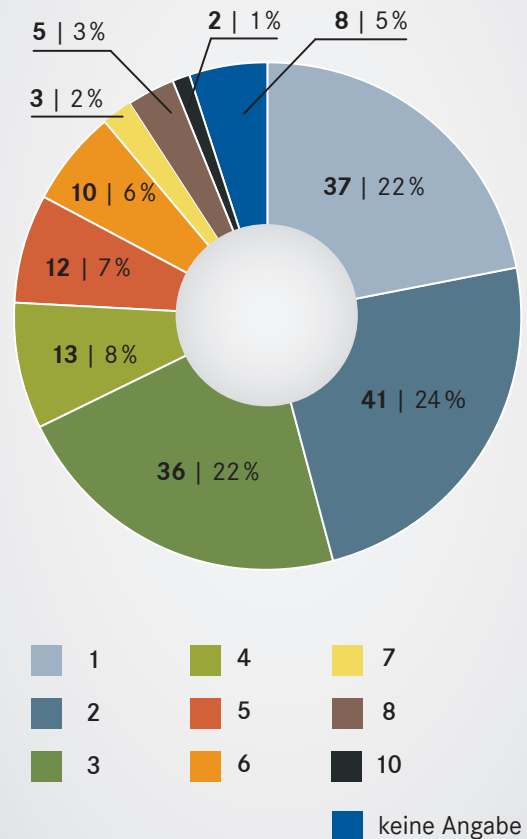
Ein systemorientiertes Beobachtungskonzept erfordert Kompartiment-übergreifende Messungen innerhalb eines Observatoriums, da nur so die Wechselwirkungen zwischen den Lebensbereichen erkannt, untersucht und letztlich zukünftige Entwicklungen abgeleitet werden können. In der Umfrage wurden 10 Kompartimente berücksichtigt:

- ➔ Boden / Sedimente
- ➔ Vegetation
- ➔ Fauna
- ➔ Marine/limnische Biota
- ➔ Grundwasser
- ➔ Fließgewässer
- ➔ Standgewässer
- ➔ Küste
- ➔ Atmosphäre
- ➔ andere

Die 167 ausgewerteten Observatorien decken sowohl die vielfältigen Naturräume Deutschlands als auch die vorherrschenden Landnutzungsformen ab, wobei allein zwei Drittel aller Observatorien Waldgebiete und landwirtschaftlich genutzte Regionen erfassen (Anhang A.3, Kap. 2.3).

Knapp die Hälfte der Observatorien deckt ein bis zwei Kompartimente ab, was in der Regel eine Fach- bzw. Kompartiment-spezifische Ausrichtung widerspiegelt (**Abbildung 2**). Auch Observatorien mit drei Kompartimenten verfolgen selten einen systemorientierten Beobachtungsansatz, könnten jedoch in diese Richtung ausgebaut werden. Insgesamt fallen zwei Drittel der ausgewerteten Observatorien in die Gruppen von ein bis drei Kompartimenten. Ein Viertel deckt vier und mehr Kompartimente ab, diese Observatorien können prinzipiell als gute Ausgangsbasis für systemorientierte Beobachtungen betrachtet werden. Sie werden mehrheitlich von Einrichtungen der außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie von Bund und Ländern betrieben. Insbesondere fallen überregionale Messnetze wie z.B. das „Intensive Umweltmonitoring Nordwestdeutschland“ oder die deutschen Standorte von ICOS und LTER in diese Kategorie.

Abbildung 2
Anzahl der Kompartimente
pro Observatorium



Die Auswertung zeigt, dass in Deutschland bereits einige Observatorien betrieben werden, die einen Kompartiment-übergreifenden und damit systemorientierten Ansatz verfolgen. Eine Ausgangsbasis für das angestrebte Observatorien-Netz ist somit vorhanden.

Internationale Einbindung

Von den berücksichtigten Observatorien sind ca. 40 % in nationale und ca. 30 % in internationale Netzwerke eingebunden. Insgesamt beteiligt sich etwas mehr als die Hälfte an Observatorien-Netzwerken (**Abbildung 3**). Die am häufigsten genannten internationalen Netzwerke sind LTER, ICP Forest und ICOS, als nationales Netzwerk wurde TERENO am häufigsten aufgeführt.

Knapp die Hälfte der ausgewerteten Observatorien ist weder in nationale noch in internationale Beobachtungsnetze eingebunden. Die Vernetzung und Kooperation der Observatorien ist durchaus ausbaufähig: Auf nationaler Ebene für einen intensiveren Erfahrungsaustausch und engere Abstimmungen beispielsweise bei Messtechniken oder Datenaustausch. Auf internationaler Ebene im Interesse einer stärkeren Gestaltung internationaler Forschungs- und Monitoring-Programme seitens der deutschen Wissenschafts-Community.

Datennutzung

Abbildung 4 veranschaulicht wichtige Aspekte der Datennutzung in den erfassten Observatorien. Die Einbindung von Messdaten in numerische Modelle ist ein zentrales Element für das Kompartiment-übergreifende Prozess- und Systemverständnis und somit dafür, Ursachen und Auswirkungen der Veränderung unserer Landoberfläche zu erforschen. Bei etwas mehr als der Hälfte der ausgewerteten Observatorien finden die erhobenen Datensätze Eingang in Modellrechnungen. Es kommt ein breites Spektrum von hydrologischen Modellen, Atmosphären- und Klimamodellen, Landoberflächenmodellen sowie Ökosystem-, Pflanzenwachstums- und Photosynthese-Modellen

Abbildung 3
Einbindung der Observatorien in nationale und internationale Netzwerke

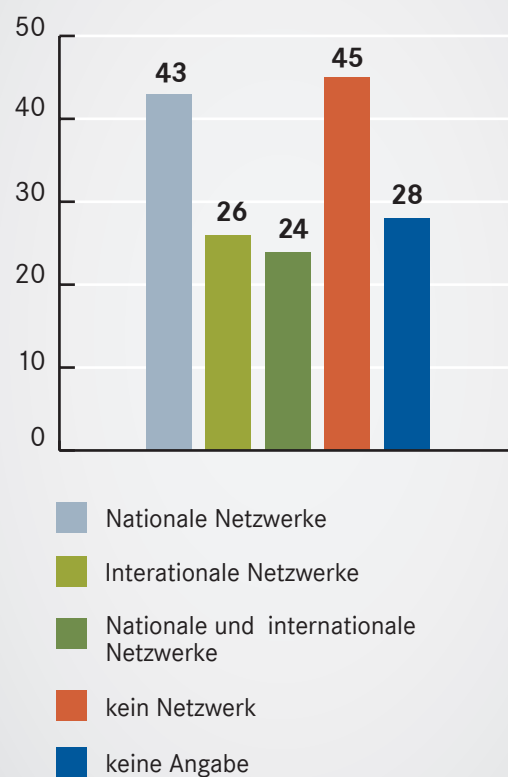
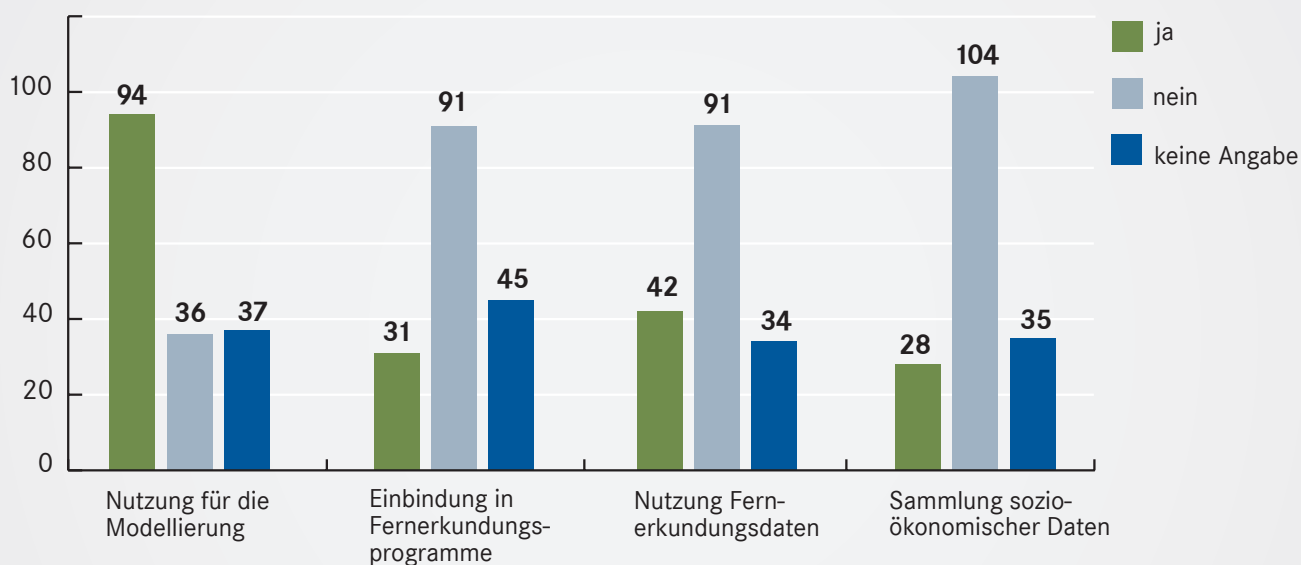


Abbildung 4
Nutzung der in den Observatorien erhobenen Datensätze



zum Einsatz, wobei es bislang wenig Austausch zwischen den Modellierungsansätzen der verschiedenen Fachgebiete gibt (vergl. Kap. 3.3).

Die Fernerkundung bietet wegen des rasanten Fortschritts in der Sensortechnik und insbesondere in der räumlichen sowie zeitlichen Auflösung mittlerweile hervorragende Daten für flächendeckende Beobachtungen. Satellitenmissionen wie Landsat (seit 1972) oder MODIS (seit 1999) liefern kontinuierliche Messreihen seit Jahrzehnten. Trotzdem nutzt nur knapp ein Viertel der Observatorien Fernerkundungsdaten, ein noch geringerer Anteil ist aktiv in die internationalen Fernerkundungsprogramme eingebunden. Genannt wurden hier u.a. die ESA-Missionen der Sentinels, TerraSAR-X, Rapid Eye und Tandem-X sowie die NASA-Missionen MODIS, GRACE und SMAP. Die meist genutzten Fernerkundungsprodukte sind digitale Höhenmodelle, Luftbilder und Vegetationsindizes.

Daten zum Landmanagement und zu sozio-ökonomischen Veränderungen der Region werden nur in geringem Maße (ca. 30 %) erfasst oder in weitere Auswertungen einbezogen (Anhang A.3, Kap. 2.10). Berücksichtigung finden hier hauptsächlich Managementdaten für landwirtschaftliche Standorte und Waldgebiete wie z.B. Maßnahmen im Pflanzenbau und bei der Waldbewirtschaftung. Vor dem Hintergrund, dass zwei Drittel der Observatorien in diesen beiden Landnutzungskategorien angesiedelt sind, ist dieser Anteil überraschend gering.

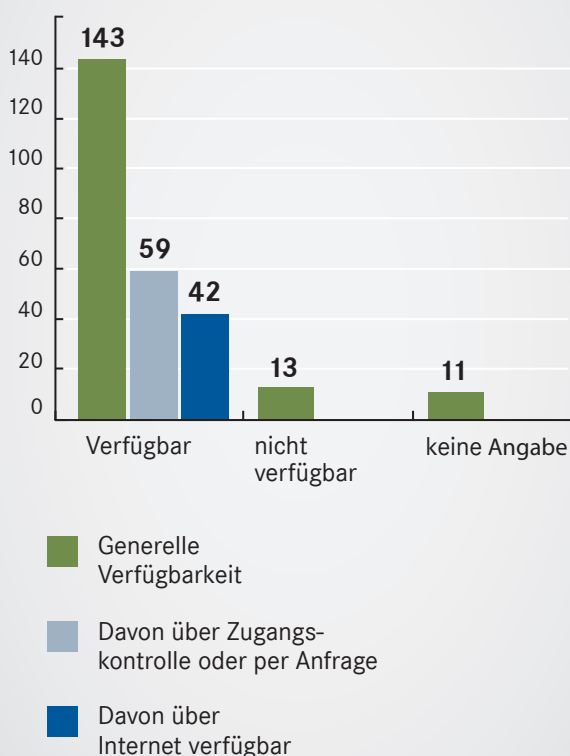
Innerhalb der Observatorien werden numerische Modelle mittlerweile intensiv für Auswertungen und für Prognosen von Umweltveränderungen genutzt. Dieser Fundus an spezifischen Prozess- und Systemkenntnissen kann jedoch nur unzureichend verwendet werden, da die Disziplinen ihre Modellansätze untereinander zu wenig austauschen. Auch das Potenzial der Fernerkundung wird bislang zu wenig genutzt; sozioökonomische Rahmenbedingungen und Veränderungen werden kaum berücksichtigt.

Datenmanagement und Zugang

Zentrale Voraussetzung für belastbare Umweltbeobachtungen und -forschung ist der öffentliche Zugang zu den erhobenen Daten. Mit ca. 80 % stellt eine deutliche Mehrheit der berücksichtigten Observatorien ihre Daten grundsätzlich öffentlich zur Verfügung (**Abbildung 5**). Von diesen unterliegt etwa die Hälfte einer Zugangskontrolle; ungefähr ein Drittel ermöglicht den Zugang via Internet. Ungefähr 80 % der Observatorien archivieren die erhobenen Daten in internen Datenbanken.

Zwei Drittel der erfassten Observatorien führen Qualitätskontrollen der erhobenen Daten durch (Anhang A.3, Kap. 3.2), ein Drittel dieser Einrichtungen gibt wiederum an, interne oder offizielle Standards zu verwenden. Bereits bei den offiziellen Standards gibt es eine große Bandbreite, weiterhin werden etablierte Vorgaben von Netzwerken wie ICOS, TERENO oder ICP Forests als Grundlage der internen Qualitätsprüfung angegeben. Die mehrheitlich genannten Qualitätskontrollen ohne definierte Standards basieren u.a. auf Plausibilitätskontrollen, visueller Kontrolle und Vergleich mit anderen Messungen.

Abbildung 5
Datenverfügbarkeit der Observatorien



Datenmanagementverfahren und auch ein geregelter Datenzugang sind bei den Observatorien mittlerweile weitgehend etabliert. Allerdings verhindert die Vielfalt der eingesetzten Datenmanagement-Methoden und -Standards eine umfassende Nutzung und Auswertung dieser wertvollen Datenbasis durch die Wissenschafts-Community.

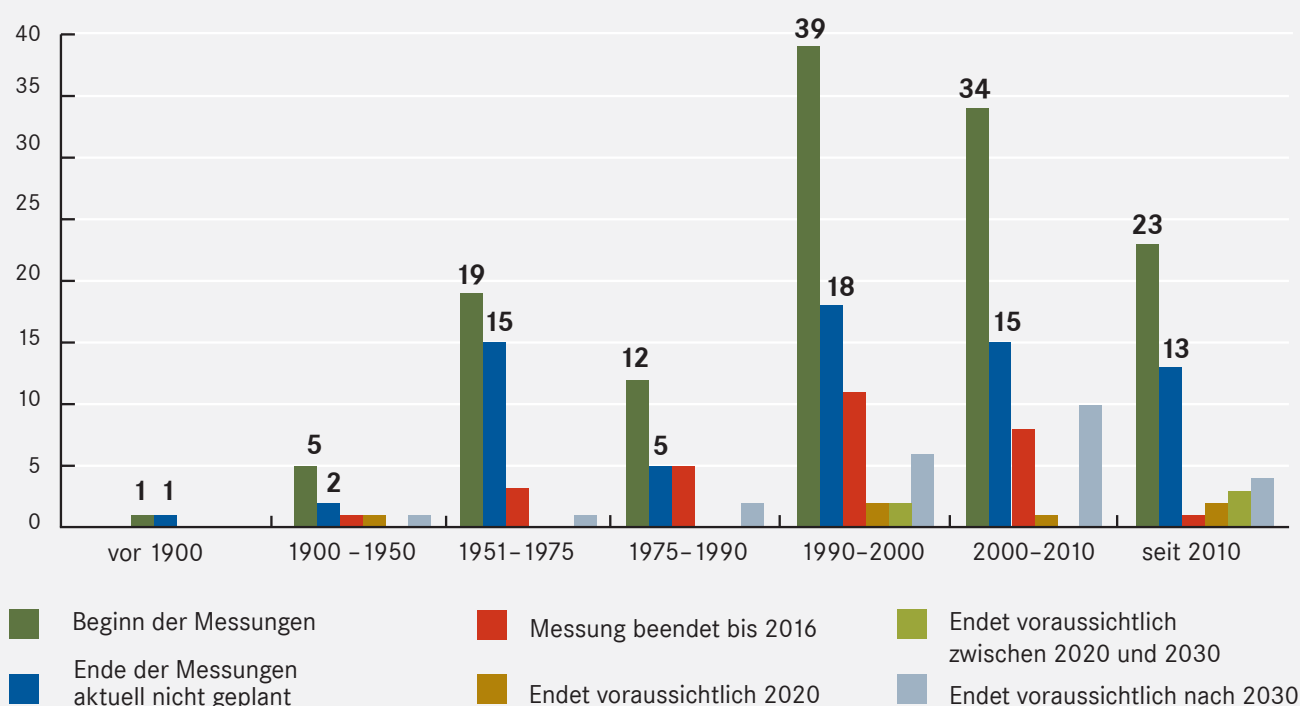
Betrieb, Laufzeit und Finanzierung

Umweltveränderungen – global wie regional – können nur durch langfristige Beobachtungsreihen erfasst werden. Diese Daten bilden die notwendige Grundlage für prozess- und systemorientierte Forschung und letztlich zur Analyse der Ursachen und Folgen des Globalen Wandels. Von den ausgewerteten Observatorien haben 133 ihre Einrichtungszeiten und das voraussichtliche Ende der Messungen angegeben (**Abbildung 6**). Bei 29 dieser Observatorien wurden die Messungen vor kurzem eingestellt, hiervon erhofft knapp die Hälfte die Wiederaufnahme des Betriebs, sobald die Finanzierung geklärt ist. Die Mehrheit dieser Observatorien wurde von außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie Bund- und Ländern betrieben (Abb. 1, Seite 11).

Messreihen von über 100 bis zu 65 Jahren können sechs Observatorien vorweisen, von diesen werden voraussichtlich drei bis 2030 eingestellt. 31 Observatorien verfügen über Zeitreihen von 70 bis 25 Jahren. Allein zwischen 1990 und 2010 wurden mehr als 70 neue Observatorien in Betrieb genommen, davon wurden 19 bereits wieder eingestellt. Seit 2010 gab es über 20 Neueinrichtungen. Insgesamt soll ungefähr die Hälfte der 133 Observatorien langfristig, über 2030 hinaus, betrieben werden. Die andere Hälfte wird voraussichtlich in den kommenden 15 bis ca. 20 Jahren stillgelegt. Bei den Observatorien mit einer gesicherten Langzeitperspektive überwiegen die Einrichtungen von Bund und Ländern, gefolgt von denen der außeruniversitären Forschungseinrichtungen.

Die Hälfte aller erfassten Observatorien wird ausschließlich durch Haushaltsmittel finanziert, weitere ca. 20 % erhalten Haushalts- und Drittmittel. Eine reine Drittmittelfinanzierung ist dagegen mit ca. 5 % selten. Als wichtigste Drittmittelgeber werden BMBF und DFG genannt. Andere Arten der Finanzierung erfolgen u.a. über Auftragsforschung und aus privater Hand.

Abbildung 6
Laufzeit der Observatorien



Deutschland verfügt derzeit über vielfältige und in ihrer Gesamtheit annähernd flächendeckende Observatorien mit einzigartigen Langfrist-Daten. Die Finanzierung erfolgt zum größten Teil über Haushaltsmittel. Über 2030 hinaus ist der Betrieb vieler dieser Observatorien ungeklärt. Am zuverlässigsten ist die Langfrist-Perspektive bei den Observatorien von Bund und Ländern und denen der außeruniversitären For-

schungseinrichtungen. Gleichzeitig entfallen auf diese Betreiber die meisten der aktuellen Schließungen, was einen internen Priorisierungsprozess vermuten lässt. Am unsichersten ist die Perspektive für die Observatorien der universitären Forschung. Eine nationale Initiative oder Koordination hinsichtlich des Langfrist-Betriebs von Umweltobservatorien existiert bislang nicht.

Fazit und Empfehlungen

Auch wenn diese Umfrage kein vollständiges Bild der bestehenden terrestrischen Observatorien geben kann, zeigt sie den großen Wert und das Potenzial dieser Infrastrukturen für eine langfristige und international konkurrenzfähige Umweltforschung. Sie verdeutlicht aber ebenso die Notwendigkeit, diese Standorte besser zu integrieren. Einige wenige Observatorien sind für die systemorientierte Beobachtung und Forschung bereits hervorragend ausgestattet, sie könnten den Nukleus des nationalen Netzwerks bilden. Das Zusammenspiel der Forschungs- und der staatlichen Monitoring-Einrichtungen kann und muss verbessert werden. Hier gibt es mittlerweile ein großes fachliches Interesse und eine starke Kooperationsbereitschaft auf beiden Seiten. Die bislang noch recht geringe Kooperation und Abstimmung zwischen einzelnen Disziplinen und Observatorien hemmt eine umfassende Nutzung und Auswertung der z.T. über Jahrzehnte erhobenen Daten. Die Teilnehmer der Umfrage sehen hier dringenden Handlungsbedarf, damit das Potenzial dieser Beobachtungen in Zukunft voll ausgeschöpft werden kann.

Stärken

- ➔ Große Zahl fach- und ortspezifisch gut ausgebauter Observatorien
- ➔ Zahlreiche Observatorien mit langen Messreihen
- ➔ Mehrheit der Observatorien stellt Daten öffentlich bereit
- ➔ Anwendung numerischer Modelle ist etabliert

Potenziele

- ➔ Etablierung systemorientierter und großräumiger Observatorien
- ➔ Aufbau eines Datenmanagements für die integrative Nutzung und Analysen von Umweltdaten
- ➔ Übergreifende Nutzung und Weiterentwicklung numerischer Modelle, insbesondere auch als Prognose-Instrumente
- ➔ Bessere Einbindung der Fernerkundung und sozio-ökonomischer Entwicklungen

Im internationalen Vergleich verfügt Deutschland über eine außergewöhnlich gut ausgebaute sowie annähernd flächendeckende Observatorien-Landschaft. Diesen Fundus gilt es langfristig zu sichern und weiterzuentwickeln: Ein repräsentatives und hochwertiges Observatorien-Netz ist die Grundlage des Umwelt-Monitorings von Bund und Ländern im Rahmen der Daseinsvorsorge; ebenso ist es die Grundlage einer zukunftsorientierten und international wettbewerbsfähigen Ökosystemforschung in Deutschland. Die etablierten Strukturen müssen mit dem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt weiterentwickelt werden.

3.3 Der Integrationsgrad in der terrestrischen Umweltforschung: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für mehr Systemorientierung

In der Entwicklungsphase des DFG-Strategiepapiers „Langzeitperspektiven und Infrastruktur der terrestrischen Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz“ waren Umweltsystem-Theorien ein zentrales Diskussionsthema, da theoretische Ansätze für eine Kompartiment-übergreifende Forschung bislang weitgehend fehlen. Es wurde deshalb die Einrichtung einer Expertengruppe „Umwelt-System-Theorien“ innerhalb der Allianz-Arbeitsgruppe empfohlen, um die Möglichkeiten theoretischer Weiterentwicklungen durch ein Observatorien-Netz von Beginn an zu berücksichtigen.

In den Umweltwissenschaften liegen weitgehend akzeptierte Theorien bisher nur für eng abgegrenzte Teilbereiche und Phänomene vor, wie z.B. das Darcy-Gesetz in der Hydrologie oder allometrische Skalierungsgesetze in der Biologie. Theoretische Ansätze zur Integration der unterschiedlichen Disziplinen haben dagegen einen eher deskriptiven Charakter und erwiesen sich bisher als wenig geeignet, überprüfbare Hypothesen abzuleiten. Nach einer intensiven Diskussion solcher Ansätze in den 1980er und 1990er Jahren fanden hierzu kaum noch Forschungsaktivitäten statt. Ein systemorientiertes Observatorien-Netz kann daher weder auf allgemein anerkannte theoretische Grundlagen aufbauen noch zur Überprüfung davon abgeleiteter Hypothesen dienen. Der Aufbau eines solchen Netzwerks bietet aber neue Möglichkeiten, die inzwischen als dringend notwendig erachtete Entwicklung solcher theoretischer Grundlagen voranzubringen.

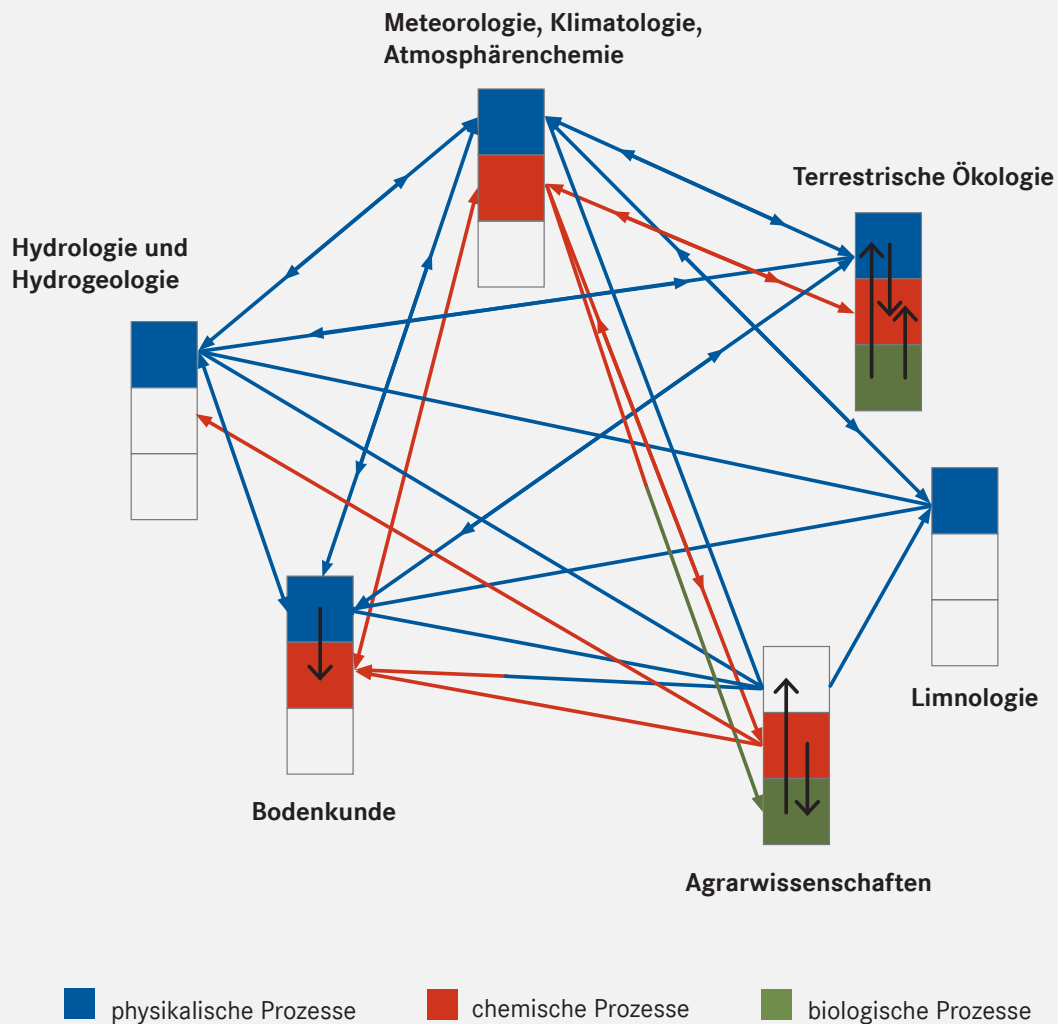
Die Expertengruppe „Umwelt-System-Theorien“ hat versucht, eine Bestandsaufnahme vorhandener Teilbereiche einer möglichen integrativen Umwelt-System-Theorie vorzunehmen. Dabei erwies sich die Recherche in der wissenschaftlichen Literatur aufgrund der primär disziplinär ausgerichteten Forschung als wenig aussagekräftig. Stattdessen wurde eine Bestandsaufnahme von mathematischen Modellen zur Kompartiment-überschreitenden Simulation von Umweltsystemen durchgeführt. Diese mathematischen Ansätze basieren auf den Ergebnissen

von Experimenten und der Auswertung von Monitoring-Daten, die über die Bedingungen der jeweiligen Studie hinaus verallgemeinert wurden und somit als Teil einer Theorie von Umweltsystemen angesehen werden können. Die Art der Implementierung von Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Kompartimenten erlaubt somit einen Rückschluss auf den aktuellen Kenntnisstand systemorientierter Umweltforschung. Anschließend wurde ausgewertet, welcher Forschungsbedarf hinsichtlich der numerischen Kopplung verschiedener Kompartimente in der Fachliteratur benannt wurde. Mit diesem Ansatz sollten integrierende Forschungsbedarfe aus Sicht der Fachdisziplinen identifiziert und bei der Konzeption des Observatorien-Netzes berücksichtigt werden.

Bestandsaufnahme anhand numerischer Modelle

Als Basis dieser Analyse dienten über 300 Publikationen aus dem Zeitraum 2007–2016, in denen einzelne Modelle beschrieben wurden, aber auch Übersichtsartikel und Modellvergleiche. Hieraus konnten Informationen für 118 Modelle extrahiert und 23 unterschiedlichen Modelltypen zugeordnet werden. Berücksichtigt wurden nur Modelle, die Prozesse aus mindestens zwei bis zu sieben Fachgebieten abbilden (Atmosphären- und Klimaforschung, Bodenkunde, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Limnologie, Agrar- und Forstwissenschaften, Ökologie und Biodiversitätsforschung). Dabei wurden insgesamt knapp 400 Prozesse (z.B. Strahlungs-Absorption in der Atmosphäre, Denitrifikation, präferenzielles Fließen im Boden) erfasst, die jeweils eindeutig den Kategorien Physik, Chemie und Biologie zugeordnet wurden. Die Modelle wurden hinsichtlich dynamischer Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Kompartimenten analysiert. Die Bestandsaufnahme erfasste sowohl bereits in Modelle implementierte Wechselwirkungen als auch solche, die in der aktuellen Fachliteratur gefordert werden, um den Ist- und einen von der Community angestrebten Sollzustand vergleichen zu können. Die umfassenden Ergebnisse sind dem Publikationsmanuskript des Anhangs A.4 zu entnehmen.

Abbildung 7: **Methodik der Analyse dynamischer Kopplungen zwischen verschiedenen Umwelt-Kompartimenten am Beispiel des „Lund-Potsdam-Jena managed Land (LPJmL)-Modells“.** Das Modell berechnet die globale Vegetationsentwicklung unter Berücksichtigung des terrestrischen Kohlenstoff- und Wasserhaushalts. Die Pfeile zeigen die in diesem Modell implementierten dynamischen Kopplungen zwischen verschiedenen Kompartimenten.



Die Bestandsaufnahme anhand numerischer Modelle zeigt, dass in den betrachteten 118 mathematischen Modellen vor allem physikalische Prozesse abgebildet werden, während biologische und chemische Prozesse eine deutlich geringe Rolle spielen. Diese unterschiedlichen Vernetzungsgrade werden darauf zurückgeführt, dass physikalische Prozesse wesentlich stärker durch eindeutige und enge Kausalzusammenhänge gekennzeichnet sind als biologische Pro-

zesse – bedingt durch die hohe Anpassungsfähigkeit von Organismen und Organismengemeinschaften an veränderte Lebensbedingungen. Eine verstärkte Berücksichtigung von biologischen Prozessen in Simulationsmodellen in strikt deterministischer Weise, wie es momentan für viele physikalische Prozesse der Fall ist, stößt hier offensichtlich an grundlegende Grenzen. Auch bei den chemischen Prozessen erschwert die Vielzahl möglicher Reaktionen deren

Abbildung in deterministischen Modellen erheblich. Chemische Prozesse sind häufig in nicht-linearer Weise von der Konzentration ihrer Reaktionspartner und weiteren Randbedingungen wie Temperatur oder Druck abhängig, zudem werden sie oft von Mikroorganismen katalysiert.

Bei der Auswertung fanden sich in den Publikationen zahlreiche Forderungen nach einer Erweiterung einzelner Modelltypen bzgl. Kompartiment-übergreifender Wechselwirkungen. Häufig werden diese Prozesse jedoch in anderen Modelltypen bereits realisiert, so dass hier nicht von prinzipiellen Erkenntnislücken gesprochen werden kann. Vielmehr bestehen die Lücken eher im Informationsaustausch zwischen den Fachdisziplinen mit ihren spezifischen Modelltypen.

Interessanterweise wird gerade für solche Modelltypen eine Erweiterung der Kopplungen gefordert, die ohnehin schon die meisten Kompartiment-übergreifenden Prozesse implementiert haben. Das lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass solche Modelltypen vorrangig in der systemorientierten Forschung eingesetzt werden.

Bei den in der Fachliteratur genannten Forschungsbedarfen hinsichtlich Kompartiment-übergreifender Kopplungen ließen sich keine signifikanten Schwerpunkte erkennen, die für die Konzeption des Observatorien-Netzes berücksichtigt werden könnten. Hier zeigt sich, dass eine gemeinsame theoretische Grundlage fehlt, die die verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen der Umweltforschung verbindet.

Fazit und Empfehlungen

Theoretische Entwicklungen finden in der systemorientierten Umweltforschung vorrangig im Bereich der numerischen Modellentwicklung und -kopplung statt. Klassische Umwelt-System-Theorien sind derzeit weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene ein aktives Forschungsfeld. Gleichzeitig wird das Fehlen einer soliden theoretischen Grundlage in weiten Bereichen der Umweltforschung zunehmend als grundlegender Mangel empfunden. Ein integrierendes Observatorien-Netz könnte als Plattform der Theoriebildung fungieren, da es sowohl die Daten als auch die Wissenschaftler der verschiedenen Disziplinen der Umweltforschung zusammenbringt. Auch die Weiterentwicklung systemorientierter numerischer Modelle würde von einem intensiveren Austausch der einzelnen Disziplinen und ihrer numerischen Ansätze profitieren.

Stärken

- ➔ Der Energie- und Wasserhaushalt wird bereits Kompartiment-übergreifend erfasst und modelliert
- ➔ Vorhandene mathematische Modelle berücksichtigen bereits eine Vielzahl Kompartiment-übergreifender Prozesse

Potenziale

- ➔ Stärkung der Kompartiment-übergreifenden Erfassung und Modellierung chemischer und biologischer Prozesse
- ➔ Weiterentwicklung systemorientierter Umwelt-Modelle durch Austausch etablierter Ansätze zwischen den Disziplinen

Der Energie- und Wasserhaushalt von Umweltsystemen wird bereits recht gut verstanden und ist quantitativ gut beschreibbar. Großer Forschungsbedarf besteht jedoch hinsichtlich chemischer und biologischer Prozesse auf der größeren Raumskala und ihrer dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Kompartimenten. Ein systemorientiertes Observatorien-Netz kann für diese Forschung die notwendige Datengrundlage schaffen.

3.4 Integratives Datenmanagement: Bestandsaufnahme und Empfehlungen für bessere Datenmanagement-Konzepte

Die in der terrestrischen Umweltforschung erhobenen Daten sind in ihrer Struktur äußerst heterogen. Für integrierende Auswertungen ist es notwendig, große und vielfältige Datenmengen zu analysieren, die darüber hinaus ein breites Spektrum räumlicher und zeitlicher Skalen umfassen. Die Voraussetzungen für ein einheitliches Datenmanagement für das terrestrische Observatorien-Netz sind daher:

- ➔ Messdaten in standardisierter und qualitäts gesicherter Form Kompartiment-übergreifend frei zugänglich anzubieten,
- ➔ existierende Datenbestände zu erschließen und sichtbar sowie nutzbar zu machen,
- ➔ Daten unterschiedlicher Datenquellen und Messverfahren zu verknüpfen und gegenseitig verfügbar zu machen,
- ➔ die Daten in internationale Forschungsnetzwerke einzubringen,
- ➔ eine Nutzerschnittstelle anzubieten, die eine Suche nach Daten und einen Zugriff auf Messdaten erlaubt.

Die Expertengruppe „Datenmanagement“ hat untersucht, inwieweit diese Ziele in laufenden Forschungsprojekten und Monitoring-Programmen bereits erreicht werden. Im Rahmen einer umfangreichen Inventur wurden etablierte Datenmanagementpraktiken in den Fachgebieten Atmosphären- und Klimaforschung, Bodenkunde, Geologie, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Limnologie, Agrar- und Forstwissenschaften, Ökologie, Mikrobiologie und Biodiversitätsforschung durchgeführt. Ausgewertet wurden sowohl sektorale Projekte als auch Kompartiment-übergreifende Datenzentren und Projekte. Die Inventur basiert im Wesentlichen auf der Abfrage von Expertenwissen. Durch die Inventur sollte die Ausgangsbasis für ein integratives Datenmanagement des Observatorien-Netzwerks evaluiert werden. Eine ausführliche Zusammenfassung dieser Ergebnisse findet sich in Anhang A.5.

Die Inventur verdeutlicht, dass in vielen sektoralen Umwelt-Observatorien Daten auf unterschiedlich-

te Art und Weise gesammelt, gespeichert und analysiert werden. Eine Vernetzung dieser vielfältigen und umfangreichen Datenquellen existiert derzeit jedoch nicht. Dies unterscheidet die terrestrische Umweltforschung in Ihrer Gesamtheit substantiell vom Stand einzelner Disziplinen wie z.B. den Atmosphärenwissenschaften oder der Meeresforschung, bei denen ein standardisiertes Datenmanagement international bereits etabliert ist.

Ansprüche und Grundstruktur einer Dateninfrastruktur für terrestrische Umwelt-Observatorien

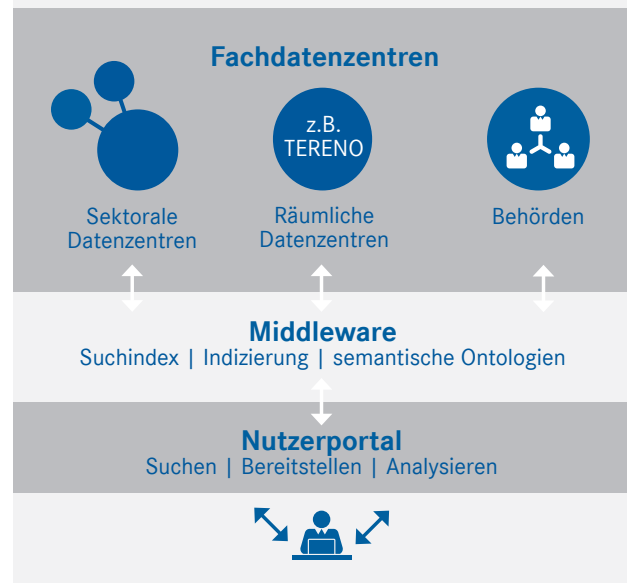
Generell müssen für eine vernetzte Umweltdateninfrastruktur unterschiedlichste Ansprüche berücksichtigt werden: Diese reichen vom Nutzerzugriff auf die Datenbestände über die Vernetzung von verschiedenen Datenzentren bis hin zur Langzeitstrategie für die Archivierung terrestrischer Umweltdaten. Existierende Projekte und Datenportale wie GFBio, TERENO oder PANGEA sind hierbei wichtige Beispielprojekte, die mögliche technische Umsetzungen aufzeigen, die aber bisher die Anforderungen für ein Kompartiment-übergreifendes Management terrestrischer Umweltdaten nur in Teilbereichen abdecken können. Projekte zur Umsetzung der EU-Initiative „European Open Science Cloud“ entwickeln erste Schritte in Richtung einer internationalen Strategie zur Verknüpfung von Datenbanken und Datenportalen in Umweltforschungsbereich. Herauszuheben ist hier die Umsetzungsinitiative GOFAIR, die für offene maschinenlesbare Datenbestände auch in Deutschland an Bedeutung gewinnt.

Zu den grundlegenden Anforderungen an eine Datenplattform für terrestrische Umweltdaten gehört, Daten unterschiedlichster Messnetze und Institutionen (z.B. Behörden, Forschungseinrichtungen) zu integrieren und verfügbar zu machen. Hierbei sind semantische Netzwerke von großer Bedeutung. Sie ermöglichen es, dass inhaltlich verwandte Datenbestände einfach gefunden werden können.

Die Grundelemente einer integrierten Dateninfrastruktur des Observatorien-Netzes sind in **Abbildung 8** skizziert: Die Datenhaltung kann in Fachdatenzentren erfolgen, welche fachspezifisch entweder einzelne Sektoren abdecken (z.B. Boden, Wasser etc.) oder aber Daten räumlicher Einheiten abbilden (z.B. einzelne Observatorien). Behörden fungieren als Fachdatenzentren, die bereits über sehr gute Standardisierungen verfügen.

Der Zugriff auf die Daten erfolgt mittels internationaler standardisierter Schnittstellen. Intelligente Suchalgorithmen und semantische Ontologien ermöglichen hierbei eine Kompartiment-übergreifende und effiziente Suche innerhalb der verschiedenen Datenbestände. Die Bereitstellung der Daten erfolgt über eine Nutzerschnittstelle, die sowohl interaktives Arbeiten (web-basierte Schnittstelle) als auch einen automatisierten Zugriff (Programmierschnittstelle, API) ermöglicht.

Abbildung 8: **Generelle Struktur für die Dateninfrastruktur eines vernetzten terrestrischen Observatorien-Netzes**



Fazit und Empfehlungen

Basierend auf der Inventur des Datenmanagements bestehender Forschungsprojekte und Monitoring-Programme sind die einzelnen technischen Voraussetzungen für ein integrierendes Datenmanagement, wie es ein terrestrisches Observatorien-Netz erfordert, prinzipiell vorhanden. In den einzelnen Fachbereichen existieren unterschiedliche Datenmanagement-Konzepte, diese sind jedoch nur selten vernetzt.

Stärken

- ➔ Generelle Dateninfrastrukturkonzepte existieren
- ➔ Passende Modellprojekte existieren
- ➔ Anbindung von Behörden ist durch die INSPIRE-Richtlinien der EU gegeben

Potenziale

- ➔ Überblick über existierende Datenbestände
- ➔ Entwicklung eines Datenmanagements für hochkomplexe Umweltdaten
- ➔ Interdisziplinäre Vernetzung und Interoperabilität von Umweltdaten

Die Inventur zeigt, dass die größten Herausforderungen für das Datenmanagement eines Observatorien-Netzes in der Integration und Skalierung der Dateninfrastruktur liegen, d.h. in der Anpassung an jeweils neue Datentypen und -quellen. Das gilt gleichermaßen für bereits existierende Datenbestände als auch für künftig zu erhebende Daten. Der interdisziplinäre Ansatz mit einer Anbindung verschiedener Fachdatenzentren erfordert umfangreiche Arbeiten, um die Datenqualität zu sichern, Daten zu verknüpfen und zu harmonisieren. Dabei könnte das zu entwickelnde Datenmanagement-Konzept von laufenden Modellprojekten wie der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Initiative GFBio (German Federation for the Curation of Biological Data), dem TERENO Datenportal TEODOOR oder der Geo- und Umwelt-Datenbank PANGAEA lernen.

3.5 Definition der Anforderungen an ein nationales Observatorien-Netz

Für das nationale Observatorien-Netz sollen etablierte Einzelstandorte und Messnetze zu Kompartiment-übergreifenden Observatorien ausgebaut werden. Einzelobservatorien sollten für eine Aufnahme in das Netzwerk folgende Basis-Anforderungen erfüllen:

Anforderungen an Einzelobservatorien

- ➔ Systemorientiertes Beobachtungs- / Forschungskonzept mit gemeinsamer Berücksichtigung abiotischer und biotischer Prozesse bzw. Kompartimente
- ➔ Verfügbarkeit von Messreihen mit Beobachtungszeiten länger als fünf Jahre
- ➔ Verfügbarkeit der Daten für numerische Modelle
- ➔ Qualitätssicherung der erhobenen Daten, Betrieb einer Datenbank sowie Datenverfügbarkeit über definierte Schnittstellen
- ➔ Betriebskonzept zur langfristigen Nutzung des Observatoriums
- ➔ Bereitschaft zur Einbindung in die Dateninfrastruktur des Observatorien-Netzes
- ➔ Bereitschaft zur Nutzung des Observatoriums durch andere Partner des Netzes
- ➔ Bereitschaft zur Einbindung des Observatoriums in internationale Programme
- ➔ Bereitschaft zur aktiven Weiterentwicklung des Observatorien-Netzes

Um zu prüfen, in welchem Maß bestehende Einzelobservatorien grundlegende (d.h. multi-kriterielle) Anforderungen für das Observatorien-Netz bereits erfüllen können, wurde eine exemplarische Auswertung der Umfrage-Observatorien durchgeführt (Anhang A.3, Kap. 4). Dabei wurden fünf Muster-Kriterien definiert, die – jedes für sich betrachtet – von vielen Observatorien abgedeckt werden:

- ① Messungen mindestens in den Kompartimenten Boden + Vegetation + Atmosphäre
- ② Qualitätskontrolle der Daten
- ③ Datenspeicherung in einer Datenbank
- ④ öffentliche Verfügbarkeit der Daten
- ⑤ Nutzung der Daten in numerischen Modellen

In Deutschland erfüllen 18 der in der Umfrage erfassten 167 Observatorien diese Kriterien. Darunter sind Observatorien universitärer und außeruniversitärer Forschungseinrichtungen sowie von Bund und Ländern. Diese Auswertung zeigt einerseits, dass derzeit nur ein Bruchteil der bestehenden Observatorien solche multi-kriteriellen Anforderungen bedienen kann. Andererseits veranschaulicht sie, dass eine entsprechende Ausgangsbasis zumindest vorhanden ist. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die gewählten Muster-Kriterien in keiner Weise Auswahlkriterien für das Observatorien-Netz vorwegnehmen sollen. Sie sind vielmehr als exemplarisches Beispiel für einen solchen Auswahlprozess zu verstehen.

Als Ergebnis der hier vorgelegten Bestandsaufnahmen und Auswertungen sollte ein nationales Observatorien-Netz für die terrestrische Ökosystemforschung längerfristig folgende Anforderungen bzw. Aufgaben erfüllen:

Anforderungen an das nationale Observatorien-Netz

- ➔ Ausrichtung auf systemorientierte und skalenübergreifende Langzeitforschung
- ➔ Abdeckung aller relevanten Kompartimente und regionalen Ökosysteme Deutschlands
- ➔ Zentrale Koordinationsstruktur
- ➔ Geregelter Institutionen-übergreifender Zugang zu Infrastrukturen und Daten
- ➔ Standardisierung / Harmonisierung von Untersuchungsmethoden und Datenmanagement
- ➔ Unterstützung der übergreifenden Nutzung von numerischen Modellen, Fernerkundungsdaten und sozio-ökonomischen Informationen
- ➔ Wissenstransfer zwischen den beteiligten Einrichtungen der Forschung sowie des Bundes und der Länder bis zur Entwicklung von Handlungsoptionen
- ➔ Erkenntnistransfer in die Öffentlichkeit
- ➔ Integration in internationale / nationale Forschungs- und Monitoring-Netzwerke

Ein solches Observatorien-Netzwerk benötigt sowohl neue strukturelle Komponenten als auch neue Infrastrukturen, die langfristig finanziert werden müssen:

- ① Eine zentrale Koordinationsstelle, über die Betriebs- und Zugangsverfahren sowie das Datenmanagement des Netzwerks abgestimmt und koordiniert werden.
- ② Dezentrale Kompetenzzentren, die der zentralen Koordinationsstelle zugeordnet sind. Sie sind zugleich Serviceeinrichtungen sowie Informationsstellen bspw. für die Bereiche Sozioökonomie oder Fernerkundung, für die Entwicklung und Harmonisierung von Mess- und Untersuchungsverfahren sowie für spezifische Analysen (z.B. Isotopenanalytik, eDNA).
- ③ Den Ausbau geeigneter Einzel-Observatorien als langfristige Infrastrukturkomponente des Netzwerks, um einen abgestimmten und systemorientierten Beobachtungs- und Forschungsansatz für das Netzwerk zu gewährleisten. Die Entscheidung, welche Einzelobservatorien das sind, erfordert ein qualitätsbasiertes Auswahlverfahren.

4 Vorschlag zur Umsetzungsstrategie an die Allianz der Wissenschaftsorganisationen

Aus den Ausführungen wird deutlich, dass die terrestrische Umweltforschung Deutschlands dringend eine mittel- und langfristig zu betreibende Infrastrukturbasis vernetzter sowie integrierter Observatorien braucht, deren Daten allgemein verfügbar sind und die belastbare Aussagen zum Zustand und

zu Entwicklungsszenarien unserer Landoberfläche ermöglicht. Damit wäre das nationale Observatorien-Netz eine bedeutende Komponente der internationalen Erd- und Umweltforschung und des globalen Umwelt-Monitorings.

Empfehlung

Die Allianz-Arbeitsgruppe empfiehlt die Einrichtung eines nationalen Observatorien-Netzes für die terrestrische Ökosystemforschung. Über die Aufnahme von Observatorien in das Netzwerk soll im Rahmen eines Ausschreibungs- und Bewerbungsverfahrens entschieden werden, damit das Potenzial der bestehenden Observatorien so umfassend wie möglich berücksichtigt werden kann.

Die Schritte von der Gestaltung bis zur Umsetzung eines solchen Einrichtungsverfahrens sollten im Rahmen eines Abstimmungsprozesses mit der wissenschaftlichen Community, interessierten Observatorien-Betreibern und Forschungsförderern organisiert werden. Dabei sind auch die erforderlichen Ressourcen für die Einrichtung und den Betrieb des

Observatorien-Netzes zu quantifizieren. Über die Einrichtung des Netzwerks muss in einem geregelten Verfahren – ähnlich wie bei langfristigen Großinvestitionen in der Physik oder in der marinen Forschung – nach wissenschaftsgeleiteten Kriterien entschieden werden.

Vorschlag zur Umsetzung

- 1 Veröffentlichung des vorgelegten Berichts als Abschlussbericht der Allianz-Arbeitsgruppe, damit das Konzept für ein nationales Observatorien-Netz mit der wissenschaftlichen Community, den Observatorien-Betreibern und den Förderorganisationen diskutiert werden kann.
- 2 Die Koordination weiterer Schritte sollte nach Abstimmung in der Allianz der Wissenschaftsorganisationen federführend auf eine Wissenschaftsorganisation bzw. ein Konsortium geeigneter Wissenschaftsorganisationen übertragen werden. Die Allianz-Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ beendet mit diesem Schritt ihre Tätigkeit.
- 3 Vorstellung und Diskussion des Abschlussberichts im BMBF, damit frühzeitig Optionen diskutiert und entwickelt werden können, wie ein nationales Observatorien-Netz für die terrestrische Ökosystemforschung umgesetzt und finanziert werden kann. Die Koordination dieses Prozesses liegt bei der/den federführenden Wissenschaftsorganisation/en, einzubeziehen sind Vertreter betroffener Förderorganisationen und Vertreter der Institutionen, die Observatorien betreiben.

- 4 Basierend auf den unter 3. entwickelten Umsetzungs- und Finanzierungsoptionen sollte ein Diskussions- und Abstimmungsprozess mit dem Ziel durchgeführt werden, ein begutachtungsfähiges Konzept zur Einrichtung des nationalen Observatorien-Netzes auszuarbeiten. Die Koordination dieses Prozesses liegt bei der/den federführenden Wissenschaftsorganisation/en, einzubeziehen sind die unter 1. aufgeführten Akteure.
- 5 Über die Einrichtung des Observatorien-Netzes muss in einem geregelten und wissenschaftsgeleiteten Verfahren entschieden werden.
- 6 Über die Aufnahme bestehender Observatorien in das Observatorien-Netz muss in einem unabhängigen, transparenten Ausschreibungs- und Auswahlverfahren nach qualitätsbasierten Kriterien entschieden werden.

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
TERN	Terrestrial Ecosystem Research Network
ICOS	Integrated Carbon Observation System
CZO	Critical Zone Observatories
LTER	Long-Term Ecosystem Research
LTER-D	Long-Term Ecosystem Research – Deutschland
NEON	National Ecological Observatory Network
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures
DANUBIUS	Danube International Centre for Advanced Studies for River-Delta-Sea Systems
TERENO	Terrestrial Environmental Observatories
BZE	Bodenzustandserhebung
ICP	Forests International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests
GFBio	German Federation for Biological Data
TEODOOR	Geodateninfrastruktur zur Verwaltung und Veröffentlichung terrestrischer Beobachtungsdaten aus TERENO
PANGEA	Data Publisher for Earth & Environmental Science (Datenportal)
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in the European Community
API	Application Programming Interface
ESA	European Space Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
MODIS	NASA's Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
GRACE	NASA's Gravity Recovery and Climate Experiment
SMAP	NASA's Soil Moisture Active Passive

Anhang

DFG-Strategiepapier	A.1
Zusammensetzung der Allianz-Arbeitsgruppe und der Expertengruppen	A.2
Bericht Observatorien-Umfrage	A.3
Bericht Umweltsystemtheorien: Publikations-Manuskript	A.4
Bericht Datenmanagement	A.5



Anhang A.1

DFG Strategiepapier



Deutsche Forschungsgemeinschaft

Langzeitperspektiven und Infrastruktur der terrestrischen Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz

Strategiepapier

Arbeitsgruppe „Infrastruktur für die terrestrische Forschung“
Senatskommission für Agrarökosystemforschung
Senatskommission für Wasserforschung
Senatskommission für Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften
Nationales Komitee für Global Change Forschung

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Kennedyallee 40 • 53175 Bonn

Postanschrift: 53170 Bonn

Telefon: + 49 228 885-1

Telefax: + 49 228 885-2777

postmaster@dfg.de

www.dfg.de

Stand: 9. Januar 2013

Grundlayout, Typografie: Tim Wübben, DFG

Lektorat: Susanne Pütz; Stephanie Henseler, DFG

Titelbild: Agentur Bosse und Meinhard Wissenschaftskommunikation, Bonn



Deutsche Forschungsgemeinschaft

**Langzeitperspektiven und Infrastruktur
der terrestrischen Forschung
Deutschlands – ein systemischer Ansatz**

Strategiepapier

Arbeitsgruppe „Infrastruktur für die terrestrische Forschung“
Senatskommission für Agrarökosystemforschung
Senatskommission für Wasserforschung
Senatskommission für Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften
Nationales Komitee für Global Change Forschung

Verfasser

Kommissionsübergreifende Arbeitsgruppe „Infrastruktur für terrestrische Forschung“

Senatskommission für Agrarökosystemforschung¹, Federführung

Vorsitzende: Prof. Dr. Ingrid Kögel-Knabner

Wissenschaftliches Sekretariat: Dr. Margit v. Lützow

Senatskommission für Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften²

vertreten durch: Prof. Dr. Erika Kothe

Senatskommission für Wasserforschung

vertreten durch: Prof. Dr. Harry Vereecken

Nationales Komitee für Global Change Forschung

vertreten durch: Prof. Dr. Georg Teutsch

DFG-Geschäftsstelle: Dr. Patricia Schmitz-Möller

DFG-Geschäftsstelle: Dr. Ute Weber

Experten verschiedener Fachgebiete und Institutionen

Prof. Dr. Susanne Crewell, Universität Köln, Fachgebiet Geophysik und Meteorologie

Prof. Dr. Heinz Flessa, Thünen-Institut Braunschweig, Fachgebiet Agrarklimaschutz

Prof. Dr. Bernd Freier, Julius Kühn-Institut

Dr. Klaus Friedrich, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Prof. Dr. Peter Grathwohl, Universität Tübingen, Fachgebiet Geowissenschaften

Prof. Dr. Peter Haase, Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum Frankfurt,

Stellvertretender Vorsitzender von LTER-D

Prof. Dr. Bernd Hansjürgens, UFZ Leipzig, Fachgebiet Sozioökonomie

Prof. Dr. Daniela Jacob, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Fachgebiet Regionale Klimamodellierung

Prof. Dr. Florian Jeltsch, Universität Potsdam, Fachgebiet Vegetationsökologie und Naturschutz

Dr. Wolfgang Leuchs, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Recklinghausen

Prof. Dr. Wolfram Mauser, LMU München, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung

Dr. Uwe Rammert, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Flintbek

Prof. Dr. Erko Stackebrandt, Mitglied der Senatskommission für Biodiversitätsforschung, Paris,

Fachgebiet Molekularbiologie

Prof. Dr. Thilo Streck, Universität Hohenheim, Fachgebiet Biogeophysik

Prof. Dr. Hartmut Stützel, Universität Hannover, Fachgebiet Landwirtschaftliche Produktionssysteme – Nutzpflanzen

Professor Dr. Günther Turian, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart

Direktor Wolfgang Vogel, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Flintbek

Prof. Dr.-Ing. Erwin Zehe, Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Hydrologie

¹ Folgekommission der DFG-Senatskommission für Stoffe und Ressourcen in der Landwirtschaft

² Folgekommission der DFG-Senatskommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung

Inhalt

1. Hintergrund und Ziele des Strategiepapiers.....	6
1.1 Adressaten.....	7
1.2 Wissenschaftliche und gesellschaftliche Herausforderungen der terrestrischen Ökosystemforschung.....	7
2. Aktuelle Entwicklungen in der terrestrischen Ökosystemforschung.....	11
2.1 Internationale Untersuchungsgebiete und Forschungsinfrastrukturen.....	11
3. Ausgangsbasis und neue Untersuchungsmethoden.....	14
3.1 Bestehende Standorte.....	14
3.2 Neue Messmethoden und Verknüpfung der Skalen.....	16
3.3 Numerische Modellierung und Rechenkapazitäten.....	17
4. Ziele und Zweck einer integrierenden Infrastruktur.....	18
4.1 Beobachtungs- und Experimentierplattformen.....	18
4.2 Zentrale Datenplattformen und Datenmanagement.....	19
4.3 Internationale Vernetzung.....	21
4.4 Ausbildung und Erkenntnistransfer.....	21
5. Empfehlungen zur Umsetzung.....	22
5.1 Organisation.....	22
5.2 Instrumente.....	22
 Anhang.....	 24
Literatur.....	24
Abkürzungsverzeichnis und Glossar.....	25
Tabelle 1: Exemplarische Beispiele nationaler und internationaler Plattformen für die Langzeitbeobachtung terrestrischer Systeme.....	28

1. Hintergrund und Ziele des Strategiepapiers

Mit diesem Strategiepapier wollen die Senatskommissionen Konzepte und Empfehlungen vorstellen, die der terrestrischen Umweltforschung Deutschlands Zugang zu adäquaten Forschungsinfrastrukturen sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene sichern sollen. Entsprechende Infrastrukturen sind notwendig, um im Rahmen von Langzeitbeobachtungen negative Entwicklungen unserer Ökosysteme zu erkennen und diesen rechtzeitig entgegenzusteuern oder zumindest gesellschaftlich negative Auswirkungen zu mindern.

Terrestrische Ökosysteme sind Landschaften oder Teile davon, in denen sich Lebensräume mit charakteristischen Strukturen und Funktionen herausgebildet haben. Sie umfassen typischerweise die Kompartimente Atmosphäre, Bio- und Anthroposphäre, Pedosphäre, Geosphäre und die Hydrosphäre mit ihren aquatischen Systemen. Als Teile komplexer Landschaften existieren in terrestrischen Ökosystemen funktionale Beziehungen und Austauschvorgänge (Wärmestrom, Wasser- und Stoffflüsse, chemische Reaktionen etc.) wie z. B. zwischen Produktionsflächen und anderen Lebensräumen (DFG, 2005). Diese beziehen auch die Organismen und ihre Interaktionen mit ihrer abiotischen Umwelt ein.

Die gegenwärtige Entwicklung unserer Erde ist gekennzeichnet durch eine rapide Zunahme der Weltbevölkerung sowie die Ausbreitung westlicher Konsummuster mit steigender Nahrungsmittel- und Energienachfrage (Godfrey et al., 2011); damit verbunden ist auch eine Veränderung gesellschaftlicher Wertemuster. Als Folge menschlicher Eingriffe in terrestrische Ökosysteme beobachten wir eine Verknappung unserer Material- und Leistungsressourcen, wie Energieträger und Rohstoffe, aber auch den Verlust beziehungsweise die Degradation von Böden und Wasservorräten. Dies geht einher mit einer sich langfristig verändernden Zusammensetzung unserer Atmosphäre sowie dem Rückgang der biologischen Vielfalt (u. a. WBGU, 2011; EIA, 2010; FAO & OECD, 2009; Rockström et al., 2009; RS, 2009; UN, 2009; von Braun, 2007). Die Auswirkungen dieser globalen Veränderungen umfassen alle Ökosystemkompartimente.

Terrestrische Ökosysteme weisen eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität, eine hohe Parameter- und Prozesskomplexität sowie eine hohe Skaldynamik auf, was die Vorhersage regionaler Veränderungen zusätzlich erschwert. Die Reaktionen einzelner Ökosystemkompartimente auf Klima- und Landnutzungsänderungen sind daher gegenwärtig weitgehend unbekannt (IPCC, 2007). So ist beispielsweise noch immer ungeklärt, in welchem Maße terrestrische Systeme durch Klimawandel und Landnutzungsänderungen zukünftig zu Senken oder Quellen für klimarelevante Gase werden.

Um natürliche und anthropogene Fluktuationen von Ökosystemen verstehen und bewerten zu können, müssen qualitative und quantitative Veränderungen über längere Zeiträume erfasst und ausgewertet werden, und es muss versucht werden, Ursachen von Landnutzungsveränderungen herauszukristallisieren. Dies gilt für langsame Prozesse, wie die Änderung von Klima und Landnutzung, für Extremereignisse (Hochwasser, Stürme), aber auch für Prozesse mit hoher Variabilität im Hinblick auf eine valide Trendprognose (Stoffeinträge und -austräge, z. B. für Nährstoffe oder anthropogene Schadstoffe sowie mikrobiell gesteuerte Prozesse). Generell erfordert die Beurteilung von komplexen Prozessen und Wirkungsnetzen in Ökosystemen Langzeituntersuchungen über ein Jahrzehnt hinaus. Voraussetzung für die Untersuchung und auch Quantifizierung der oben genannten Zusammenhänge sind dauerhafte und

multiskalige Forschungs- und Monitoringinfrastrukturen, die es erlauben, diese gekoppelten Prozesse aufeinander abgestimmt zu analysieren. Die detaillierte, langfristig angelegte Erfassung der Stoff-, und Energieflüsse sowie der Biodiversität unter Berücksichtigung der sozio-ökonomischen Entwicklungen innerhalb eines Ökosystems ist die notwendige Voraussetzung für die Beantwortung aktueller Fragestellungen mit hoher gesellschaftlicher Relevanz, wie beispielsweise nach

- ▶ dem Erhalt der Adaptationsfähigkeit terrestrischer Ökosysteme auf sich ändernde Umweltbedingungen sowie ihrer Resilienz gegenüber anthropogenen Eingriffen und extremen Ereignissen,
- ▶ der Sicherung der Funktions- und Leistungsfähigkeit terrestrischer Ökosysteme zum Erhalt der Ökosystemdienstleistungen, etwa zur Lebensmittelproduktion oder Klimaregulation und der Sicherung von Boden- und Wasserressourcen,
- ▶ der Ursachenanalyse gegenwärtiger Störfaktoren eines guten Natur- und Umweltzustands und die Ableitung geeigneter Abhilfemaßnahmen (z. B. bei der Umsetzung der Ziele der europäischen Wasserrahmenrichtlinie),
- ▶ dem Aufzeigen von wissenschaftlich begründeten Lösungswegen zur Überwindung von Nutzungskonflikten, z. B. zwischen Nahrungs- und Energieproduktion, zwischen Landwirtschaft und Wasserwirtschaft oder auch zwischen der Steigerung der Produktionsintensität und Naturschutzbelangen,
- ▶ dem Aufdecken gesellschaftlicher Wertestrukturen und gezielter Ursachenforschung, um Gründe für Entwicklungen aufzudecken und Entscheidungswege zu optimieren.

1.1 Adressaten

Das Papier richtet sich übergreifend an drei Zielgruppen: Erstens sollen den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie den Forschungsorganisationen in Deutschland die Möglichkeiten verdeutlicht werden, die die hier vorgeschlagenen Infrastruktursysteme und Kooperationen zur Beantwortung der neu aufgetretenen Fragestellungen bieten. Zweitens richtet sich das Papier an die für Natur, Umwelt und Ressourcennutzung verantwortlichen Behörden und Institutionen auf der Ebene des Bundes und der Länder, indem es auf potenzielle Synergieeffekte aus der Zusammenführung bestehender und der Generierung neuer Daten hinweist. Und drittens sollen die Forschungsförderer Informationen zur Notwendigkeit und zu den Vorteilen einer neuen Generation von Infrastruktursystemen erlangen.

1.2 Wissenschaftliche und gesellschaftliche Herausforderungen der terrestrischen Ökosystemforschung

Die zentrale wissenschaftliche Herausforderung besteht in der Quantifizierung gekoppelter Prozesse und in der Prognose der Dynamik, Resilienz und Adaptation von terrestrischen Ökosystemen in einer sich ändernden Umwelt. Hinzu kommt die Analyse anthropogener Treiber und der durch diese ausgelösten Veränderungen von Ökosystemen. Dazu müssen die naturwissenschaftlichen Erhebungen so ausgerichtet werden, dass sie auch in sozioökonomischen

Projekten verwendet werden können und damit eine systemorientierte Forschung in der fachlich notwendigen Breite erlauben.

Die bestehenden Forschungs- und Monitoringinfrastruktursysteme mit ihren umfangreichen Daten, Mess-, Test- und Modellierungssystemen sind zum größten Teil auf spezielle wissenschaftliche Fragen fokussiert. Sie greifen jeweils Teilaspekte heraus und analysieren diese detailliert. Die Gesellschaft erwartet dagegen ganzheitliche Problemlösungen „aus einer Hand“, unter Einbeziehung aller Akteure und unter Beachtung sowie Offenlegung von Kosten und Nutzen. Zur Lösung komplexer Natur- und Umweltprobleme müssen die verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen mit ihren jeweiligen Kompetenzen beitragen, wobei die Einzelbeiträge der Wissenschaften zu synthetisieren und in eine Gesamtperspektive zu integrieren sind. Diese Herausforderungen konnten bisher nicht gelöst werden (ICSU, 2010; Plieninger et al., 2008; UBA, 2003). Folgende **aktuelle Forschungsbereiche** mögen dies beispielhaft verdeutlichen:

- ▶ Als dynamische Systeme haben **Ökosysteme** in bestimmten Grenzen die Fähigkeit zur Selbstregulation und Selbsterneuerung. Werden diese Grenzen durch den Einfluss externer Belastungen überschritten, kann das System in einen neuen Zustand drifteten und damit seine strukturelle und funktionelle Identität verlieren: Das ursprüngliche Ökosystem hört auf zu existieren. Die Dauer des Destabilisierungsprozesses und das Ausmaß der Veränderungen hängen von der Resistenz, der Resilienz und der Fragilität des Ökosystems ab. Diese Eigenschaften sind Gegenstand intensiver Forschung, aber eine Prognose der Widerstandskraft beziehungsweise des Zusammenbrechens von Ökosystemen ist derzeit wegen des hochkomplexen Zusammenwirkens vieler Einzelprozesse, gegebenenfalls über Zeiträume von mehreren Jahrzehnten hinweg, noch nicht möglich (Doré et al., 2011).
- ▶ Die **Stoffflüsse** in und zwischen den Kompartimenten werden in der Regel durch nicht lineare Prozesse verursacht und sind daher auf komplexe Weise miteinander gekoppelt. Bisher sind die Relevanz der Einflussfaktoren und Trendentwicklungen, beispielsweise hinsichtlich der Bodenbelastung und Produktivität oder auch der Wasserqualität, unzureichend bekannt. Daher sind die Erfassung von Stoffflüssen bis hin zu Massenbilanzen unter Berücksichtigung aller Kompartimente sowie deren Prognose im größeren räumlichen Maßstab derzeit nicht möglich.
- ▶ Innerhalb der einzelnen Kompartimente herrscht eine ausgeprägte räumliche und zum Teil zeitliche **Heterogenität**, deren Erfassung in unterschiedlicher Weise vom verwendeten Beobachtungsmaßstab abhängt. Es fehlen weiterhin Konzepte, wie diese Heterogenität adäquat in Modellen größerer Regionen zu berücksichtigen und wie die Skalenübergänge zu bewältigen sind.
- ▶ Die Veränderungen in der terrestrischen Umwelt, vor allem Landnutzungsänderungen, sind zudem auf eine Vielzahl sich überlagernder **Entwicklungstrends** zurückzuführen, die von dem demografischen Wandel über sich ändernde Konsummuster bis hin zu ökonomischen Globalisierungsprozessen reichen. In den meisten Fällen gibt es keine einheitlichen Datenquellen, die diese Trends übergreifend und in sich konsistent berücksichtigen und in ihren Auswirkungen auf die Umweltkompartimente abbilden. Hier müssen daher auch neue Formen der sozioökonomischen Datengenerierung und -zusammenführung sowie deren Abstimmung mit naturwissenschaftlichen Daten gefunden werden (Ohl & Hansjürgens, 2011).

Eine integrative und bereits im Ansatz systemorientierte Bearbeitung solcher Forschungsthemen trägt wesentlich dazu bei, Langzeitprognosen über Ökosystemveränderungen zu entwickeln und deren Konsequenzen einschließlich der Kosten von Veränderungen von Ökosystemleistungen abzuschätzen. Hierbei sollte ein besonderer Fokus auf die Aussage-sicherheit hochkomplexer und gekoppelter Prognosemodelle gelegt werden, um belastbare Anpassungsstrategien und Handlungsoptionen ableiten beziehungsweise die Unsicherheiten adäquat quantitativ beschreiben zu können.

Prognosen dieser Wandelprozesse und -folgen erfordern eine Entwicklung umfassender Umweltsystemtheorien zur konsistenten Beschreibung dieser rückgekoppelten Dynamiken. Solche umfassenden Umweltsystemtheorien wären nicht nur ein deutlicher Fortschritt in der terrestrischen Umweltforschung, sondern auch eine wichtige Grundlage für eine neue Generation numerischer Modellsysteme, die z. B. Abiotik-Biotik-Wechselwirkungen explizit erfassen und die Rückkopplungen biotischer und abiotischer Anpassungsprozesse quantifizieren können. Simulationen mit dieser neuen Generation rückgekoppelter Modellsysteme würden erheblich dazu beitragen, belastbare und prüfbare Hypothesen zu den Auswirkungen des globalen Wandels in komplexen terrestrischen Ökosystemen besser zu formulieren.

Solche Infrastrukturplattformen wären auch ein „Beschleuniger“ für Einzelforschungsvorhaben, weil aufwendige Voruntersuchungen, wie z. B. die Ermittlung einer funktionellen Bodenkarte oder die Beschaffung von hydrometeorologischen Daten, nicht mehr notwendig sind. Letztendlich sind terrestrische Infrastrukturplattformen ein Schlüssel zur Lösung vieler methodischer Probleme, insbesondere der Skalenproblematik, weil nur durch gemeinschaftliche Anstrengung die dafür notwendigen multiskaligen Beobachtungsnetze mit ausreichender Dichte und Qualität aufgebaut und betrieben werden können.

Für die Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden von Bund und Ländern ergibt sich der Nutzen, dass für die vollzugsorientierten Fragestellungen neben den eigenen Grundlagendaten auch die Forschungsdaten und -ergebnisse der „Wissenschaft“ genutzt werden können. Zudem sollten bestehende und seit Langem etablierte und valide Daten liefernde Einrichtungen weiter unterhalten und in den Gesamtansatz integriert werden. Hier werden langfristig konzipierte Daten- und Monitoringsysteme betrieben, die in Zusammenarbeit mit den Wissenschaftsdisziplinen Datenstandards und qualitätsgesicherte Datenpools auch für zukünftige Projekte bereitstellen können. Dazu gehören neben technischen Messnetzen auch solche, die direkte organismische Reaktionen auf sich verändernde Umweltbedingungen anzeigen (z. B. phänologische Gärten, Erhebungen von Arteninventaren).



Luft, Boden, Gewässer und Organismen stehen in direkter Wechselwirkung. Dadurch sind auch die dort ablaufenden Prozesse mehrfach miteinander gekoppelt (Wärmestrom, Wasser- und Stoffflüsse, biogeochemische Reaktionen etc.). Änderungen in einem Kompartiment wirken sich auch auf die Nachbarkompartimente aus. Die Herausforderung besteht darin, künftige und gegebenenfalls schleichende Veränderungen in diesen heterogenen Kompartimenten rechtzeitig zu erkennen – denn einmal eingetretene großskalige Zustandsänderungen sind häufig nicht reversibel. Beispiele sind die Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Vegetation und Böden mit Folgen für die Grund- und Oberflächenwasserqualität oder die Auswirkung von fallenden/steigenden Wasserständen auf Ökosysteme und deren Leistungen. Die Beantwortung solcher Fragen und damit auch die Entwicklung von Managementstrategien erfordern die Erfassung von Zustandsgrößen der verschiedenen Kompartimente von der mikroskopischen Skala bis zur Landschaftsskala in langen Zeitreihen (Jahrzehnte). Die Ableitung von Massen- und Energiebilanzen des Gesamtgebietes, die Untersuchung der Integration von Prozessen auf verschiedenen Skalen und Skalenebenen sowie die Aufklärung von Funktionsbeziehungen und Rückkopplungen können jetzt durch die Integration unterschiedlicher Monitoringmethoden der verschiedenen Forschungsdisziplinen erreicht werden. Das Monitoring reicht von boden-, flugzeug- und satellitengestützten Fernerkundungssystemen über Sensornetzwerke bis hin zur direkten Beprobung von Luft, Boden, Gewässern und Organismen.

2. Aktuelle Entwicklungen in der terrestrischen Ökosystemforschung

In den zurückliegenden 30 Jahren hat es drei zentrale Entwicklungsschritte gegeben, die jetzt den Aufbau systemübergreifender Infrastrukturen Erfolg versprechend erscheinen lassen:

1. Durch die Einrichtung von nationalen wie internationalen Observatorien und Exploratorien besteht eine sehr gute wissenschaftliche Ausgangsbasis für systemische Ansätze, die über bestehende Beschränkungen hinausgehen.
2. Die Entwicklung nicht invasiver Untersuchungsmethoden und der rasante Fortschritt in der boden-, flugzeug- und satellitengestützten Fernerkundung erlauben die Annäherung der untersuchten Skalen der beteiligten Disziplinen. Diese sind traditionell sehr unterschiedlich, sodass bisher in vielen Bereichen eine Zusammenarbeit kaum möglich schien.
3. Die Entwicklung im Bereich des wissenschaftlichen Rechnens ermöglicht es mittlerweile, gekoppelte Simulationen mit der notwendigen Komplexität sowie in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu rechnen. Die Verfügbarkeit von Hochleistungsrechnern ist aber auch eine notwendige Voraussetzung für das Management und die Analyse von großen Datenmengen, wie sie beispielsweise in der Satelliten- und Fernerkundung anfallen.

Die Untersuchung von Prozessen und Rückkopplungen auf der Skala von Wassereinzugsgebieten oder Landschaften ist durch deren Heterogenität und die Vielfalt der auftretenden Wechselwirkungen schwierig. Hinzu kommt, dass die relevanten Prozesse auf sehr unterschiedlichen, teilweise großen Zeitskalen ablaufen. Deshalb muss eine Forschungsinfrastruktur mit gemeinsamen Forschungsplattformen und Simulationsmodellen langfristig angelegt sein. Unter diesen Bedingungen wird die Forschung durch die enge Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen wesentlich profitieren. In der Vernetzung mit den Aufgaben der zuständigen Behörden kann dadurch ein zusätzlicher gesellschaftlicher Mehrwert geschaffen werden.

2.1 Internationale Untersuchungsgebiete und Forschungsinfrastrukturen

Global betrachtet können die vielfältigen Ökosysteme nur durch internationale Zusammenarbeit abgedeckt werden. Im Bereich der ökologischen und atmosphärischen Forschung werden schon seit mehreren Jahren langfristig und global angelegte terrestrische Forschungsplattformen wie beispielsweise *FLUXNET* oder *LTER* (Erläuterung der Abkürzungen s. Anhang) betrieben. Seit 2011 wird in den USA das *National Ecological Observatory Network (NEON)* aufgebaut. Ziel dieser Plattform ist die Erfassung und Vorhersage ökologischer Veränderungen in 20 ausgewählten ökoklimatischen Zonen des nordamerikanischen Kontinents über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten. Fast gleichzeitig begann in den USA die Einrichtung von *Critical Zone Observatories (CZO)*, finanziert durch die National Science Foundation.

Auf europäischer Ebene befindet sich mit dem *Integrated Carbon Observation System (ICOS)* die erste alle Kompartimente integrierende Forschungsplattform in der Implementierungsphase.

ICOS zielt auf die langfristige Beobachtung von klimawirksamen Spurengasen in der Atmosphäre, im Ozean sowie in terrestrischen Ökosystemen und wird von den europäischen Mitgliedstaaten im Rahmen von *ESFRI* finanziert. Eine weitere *ESFRI*-Initiative stellt die Forschungs- und Experimentierplattform *ANAE* dar. Diese Initiative fokussiert auf die Entwicklung eines Netzwerks von Experimentierplattformen zur Erkundung, Analyse und Vorhersage von Ökosystemveränderungen im Rahmen des Klima- und Landnutzungswandels in Europa. Weitere Plattformen im Bereich der Biodiversitätsforschung und der hydrologischen Forschung sind entweder in Vorbereitung oder wurden vorgeschlagen (z. B. *LifeWatch*).

Zur Stärkung der deutschen Beteiligung an den europäischen terrestrischen Forschungsplattformen bis hin zu einer führenden und koordinierenden Rolle, ist eine abgestimmte und gemeinsame Vorgehensweise der deutschen Forschung über die Disziplinen und Forschungsorganisationen hinweg notwendig. So könnten die bestehenden und die im Aufbau befindlichen Forschungsplattformen Deutschlands, die in der Regel eher disziplinorientiert oder den spezifischen Aufgaben der einzelnen Forschungsorganisationen entsprechend ausgerichtet wurden, stärker in diese internationalen Netzwerke integriert werden. Dies würde ihre internationale Sichtbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit zusätzlich stärken. Derzeit ist Deutschland an verschiedenen Plattformen aktiv beteiligt, besitzt jedoch bei keiner der laufenden Aktivitäten auf europäischer Ebene eine Führungsrolle.

Ein gutes Beispiel für die Herausforderungen und Entwicklungsmöglichkeiten, die eine enge Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen bieten, ist die Kopplung physikalischer Prozesse an der Landoberfläche, der Grenzfläche zwischen den Umweltkompartimenten Boden (inkl. Vegetation) und Atmosphäre. Diese Grenzfläche bildet traditionell auch die Grenze zwischen Disziplinen wie der Hydrologie, der Hydrogeologie, der Bodenwissenschaften und der Pflanzenwissenschaften auf der einen Seite sowie der Meteorologie auf der anderen Seite. Aus Mangel an Daten und übergreifenden Fachkenntnissen werden Flüsse und Zustandsvariablen an solchen Grenzflächen von den einzelnen Disziplinen typischerweise als Randbedingungen behandelt. Bodenwissenschaftler, Hydrologen etc. verwenden Daten von Wetterstationen oder, z.B. für Projektionen auf der Basis von Klimaszenarien, die entsprechenden Daten aus den Klimasimulationen. Nicht selten werden Randflüsse bei der Modellkalibrierung optimiert (Hydrogeologie: Grundwasserneubildung) oder auch einfach negiert (Meteorologie: Gebietsabfluss).

Solche Vereinfachungen mögen ihre Berechtigung bei disziplinären Fragestellungen haben, sind aber nicht mehr akzeptabel, wenn es um die Darstellung des gesamten Wasserkreislaufs geht. Meteorologen sind sich der Bedeutung der Landoberfläche, speziell der Wasserspeicherung des Bodens, für die Ausbildung von Wetterprozessen inzwischen bewusst und beziehen das System Boden-Pflanze mit ein. (Hydro-)Geologen haben begonnen, mikrobielle Stoffumsätze einzubinden. Die grundlegenden Prozesse werden jedoch so stark vereinfacht, dass simulierte Variablen für mögliche Nutzer, z.B. aus den Boden- und Pflanzenwissenschaften oder auch der Agrarökonomie, kaum verwendbar sind. So wird z.B. der Wachstumszustand von Pflanzen, wichtig für die Aufteilung der eingestrahelten Energie in Verdunstung und fühlbaren Wärmefluss, nur indirekt über Strahlungstemperaturen und Reflektivitäten aus der Fernerkundung erfasst. Andererseits wird in typischen Pflanzenwachstumsmodellen die aktuelle Verdunstung aus der potenziellen Verdunstung über Reduktionsfunktionen in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte berechnet, ohne dass berücksichtigt wird, wie sich hierdurch die Energieaufteilung an der Landoberfläche ändert. Die Energieaufteilung ist jedoch mit Prozessen in der atmosphärischen Grenzschicht und der Wolken- und Niederschlagsbildung rückgekoppelt. Über die mangelhafte Darstellung solcher Wechselwirkungen hinaus führt die Missachtung von Rückkopplungen zu Inkonsistenzen in den Randflüssen und damit zur Verletzung physikalischer Prinzipien wie in der Energie- und Massenerhaltung.

Eine enge Zusammenarbeit der benachbarten Disziplinen wird es ermöglichen, die Entstehung und die Heterogenität des sensiblen und latenten Wärmeflusses über einer Landschaft mit komplexer Orografie besser zu messen und zu simulieren. Zusätzlich steht zu hoffen, dass auch spezielle messtechnische Probleme wie z.B. die Schließung der Energiebilanz bei Eddy-Flussmessungen gelöst werden können. Auch die Erforschung längerfristiger Rückkopplungen wie jene zwischen Klimawandel, Landnutzung und Geomorphologie wird von einer engen Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen profitieren. Ein zusätzlicher Nutzen entsteht dadurch, dass sich auch disziplinäre Hypothesen und Modelle rigoros überprüfen lassen, wenn Randbedingungen von benachbarten Disziplinen genauer erfasst und z.B. über Prozessmodelle interpoliert werden.

3. Ausgangsbasis und neue Untersuchungsmethoden

Die terrestrische Ökosystemforschung Deutschlands mit ihren vorhandenen Beobachtungsplattformen einschließlich der Monitoringsysteme von Bund und Ländern bietet eine sehr gute Ausgangsbasis, um die genannten Herausforderungen aufzugreifen und sich maßgeblich an der Gestaltung europäischer Forschungsplattformen zu beteiligen. Die Einzeldisziplinen einer systemisch orientierten Ökosystemforschung sind insgesamt sehr gut aufgestellt (Adams, 1998) und in einigen Bereichen international führend. Die wissenschaftliche Kompetenz ist breit gefächert und verteilt sich auf Hochschulen, Institute der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, der Leibniz-Gemeinschaft und der Max-Planck-Gesellschaft sowie auf die Ressortforschung. Trotz ihres hohen Niveaus und ihrer großen fachlichen Breite kann die deutsche Ökosystemforschung aber wegen standörtlicher und fachlicher Aufsplitterung ihr Potenzial nicht ausschöpfen (Plieninger et al., 2008; Albarran et al., 2010). Bund und Länder haben umfangreiche qualitätsgesicherte Datenbasen (Boden, Geologie, Hydrologie) aufgebaut und betreiben im internationalen Vergleich dichte Messnetze sowie Messstationen, die in teilweise hoher zeitlicher Auflösung Daten liefern. Gleichwohl werden die Datenschatze aus Mangel an Ressourcen bislang nur unzureichend genutzt. Zudem ist es bislang kaum gelungen, diese naturwissenschaftlichen Daten mit sozioökonomischen Daten zu verbinden. Erste Ansätze hierzu liefern beispielsweise die „ecosystem services“ (TEEB, 2010).

3.1 Bestehende Standorte

Erste integrierende Ökosystem-Forschungszentren wurden in Deutschland in den 1980er-Jahren eingerichtet. Sie hatten das Ziel, im Rahmen von langfristig angelegten Forschungsprojekten effiziente Maßnahmen zur Umweltvorsorge zu konzipieren. Die Zentren wurden an Universitäten sowie Großforschungseinrichtungen etabliert, wie z. B. der *Forschungsverbund Agrarökosysteme München (FAM)*, das *Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK)*, das *Forschungszentrum Waldökosysteme (FZW)* in Göttingen und das *Projektzentrum Ökosystemforschung (PZÖ)* in Kiel. Diese, auf die Beantwortung von damals aktuellen und national relevanten Fragestellungen fokussierten Zentren konzentrierten sich beispielsweise auf die Waldschadensforschung oder Themen des Boden- und Gewässerschutzes. Sie hatten einen erheblichen Einfluss auf politische und administrative Entscheidungen beziehungsweise gesetzliche Regelungen und führten darüber hinaus zur Stärkung des Bewusstseins um die Notwendigkeit systemarer Ansätze im Umweltschutz.

Hinzu kommt eine Vielzahl von Messstellen und Untersuchungsstandorten, die primär für behördliche Überwachungsaufgaben oder für fachspezifische Fragestellungen eingerichtet wurden. Bund und Länder betreiben im Rahmen ihrer Aufgaben flächenrepräsentative langjährige Untersuchungsstandorte, Messstellennetze beziehungsweise Monitoringprogramme in den Bereichen Wasser, Boden, Natur, Land- und Forstwirtschaft, Meteorologie und Luft und erheben kontinuierlich oder diskontinuierlich (in minütlicher bis mehrjähriger Auflösung) Mess- oder Analysedaten. Der Bereich der quantitativen und qualitativen Hydrologie umfasst beispielsweise Abflusspegel, Niederschlagsmessstellen, Lysimeterstationen, Gewässergütemessstellen und -stationen sowie Grundwassermessstellen. Für Abflüsse und Wasserstände liegen teilweise Messreihen von mehr als 100 Jahren vor.

Die Bodendauerbeobachtung, die landwirtschaftlichen Dauerversuche, das Agrarmeteorologische Netzwerk, das Biotop- und Artenschutzmonitoring, das Internationale Koordinationsprogramm zur Erfassung und Überwachung der Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf Wälder (*ICP-Forests*) sind seit fast 30 Jahren in Betrieb und liefern wichtige Grundlagen und Zeitreihendaten. Die Luftüberwachungsprogramme sind sowohl auf qualitative Luftverunreinigungen (Immissionsmessungen) als auch auf Belastungen der trockenen und nassen Deposition ausgerichtet.

Seit 2004 ist *LTER-D* als deutsches Netzwerk für ökologische und ökosystemare Langzeitforschung eine Plattform für Kommunikation, Dokumentation und Zusammenarbeit von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in der langfristigen, systemorientierten und interdisziplinären Umweltbeobachtung in Deutschland. Es besteht aus 20 *LTER*-Gebieten, die quer über ganz Deutschland die Ökosysteme vom Gebirge bis zum Wattenmeer umfassen. *LTER-D* ist Mitglied im internationalen Verbund *ILTER* sowie im europäischen *LTER-Europe*-Netzwerk (Müller et al., 2010).

Als Neugründungen sind die von der DFG finanzierten *Biodiversitätsexploratorien* und das *iDIV* zu nennen, mit einem integrierenden Ansatz verschiedener Fachdisziplinen der Biodiversitätsforschung. Die Biodiversitätsexploratorien sind über *LTER-D* international eingebunden.

Seit 2008 werden von der Helmholtz-Gemeinschaft die *TERENO*-Standorte ausgebaut, die sich in einem integrierenden Ansatz auf die Beobachtung und Vorhersage gekoppelter Stoffflüsse in terrestrischen Systemen konzentrieren. Ziel ist es, langfristige Datenreihen für die Validierung mathematischer Modelle zur Verfügung zu stellen, neue Technologien zur Erfassung wichtiger Systemzustände zu entwickeln sowie die Grundlage für die Entwicklung von Adaptationsstrategien im Rahmen des Klima- und Landnutzungswandels bereitzustellen. *TERENO*, *ICOS-D* und *LTER-D* werden an einigen Standorten zusammengeführt und die Messungen aufeinander abgestimmt.

Auf eine Zusammenstellung aller in Betrieb befindlichen Untersuchungsgebiete und Stationen wurde im Rahmen dieses Papiers wegen ihrer Vielzahl verzichtet. Stattdessen sind als exemplarische Beispiele einige aktuelle nationale und internationale Initiativen in Tabelle 1 (s. Anhang) aufgeführt. Solche Standorte liefern eine wichtige Basis für die langfristig ausgelegte terrestrische Umweltforschung und für die Ableitung von gesellschaftspolitischen Handlungsstrategien, beispielsweise im Hinblick auf Anpassungsstrategien an den Klimawandel und die Steuerung von Landnutzungsänderungen. Sie sind Referenzpunkte für die globale Beobachtung terrestrischer Ökosysteme.

Die exemplarische Übersicht zeigt jedoch auch, dass die überwiegende Mehrheit der Standorte bislang primär auf fachspezifische und kleinskalige Untersuchungen fokussiert ist und durch verschiedene Einrichtungen betrieben wird. Auch werden sozioökonomische Daten bisher so gut wie gar nicht mit naturwissenschaftlichen Daten über den Zustand und die Trends in den Umweltkompartimenten verbunden. Standorte, die auf einer größeren Untersuchungsskala die verschiedenen Kompartimente und Disziplinen integrieren, befinden sich noch in der Aufbau- (*ICOS*, *TERENO*) oder in der Planungsphase (*NOHA*). In Deutschland fehlt eine koordinierende und institutionenübergreifende Vorgehensweise, um das Potenzial der bestehenden Standorte und der durch sie gewonnenen Erfahrung für eine integrierende Ökosystemforschung auf nationaler wie internationaler Ebene effektiver zu nutzen und sie auch für zuständige Behörden nutzbar zu machen.

3.2 Neue Messmethoden und Verknüpfung der Skalen

Die rasante Entwicklung im Bereich von nicht invasiven Messsystemen (boden-, wasser-, luft- und satellitengestützt) und Sensornetzwerken in Kombination mit modernen Kommunikationssystemen und Geoinformationssystemen (GIS) eröffnet neue Perspektiven und Möglichkeiten, die zum besseren Verständnis und zur Vorhersage terrestrischer Prozesse beitragen werden, wie sie vor wenigen Jahren noch nicht denkbar waren.

Der Übergang von einer primär prozessorientierten, kleinskaligen „Punktmessung“ auf die gesamte Landoberfläche stellt weiterhin eine der größten Herausforderungen in der terrestrischen Ökosystemforschung dar – insbesondere wegen der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität des Systems. Über das Zusammenspiel von Prozessen, die an den jeweiligen Punktmessungen bis ins Detail erforscht sind, wissen wir in dem dazwischen liegenden Raum, der mit Abstand den größten Teil der Erdoberfläche ausmacht, immer noch erstaunlich wenig.

Die satellitengestützte Fernerkundung der Landoberfläche hat als eine der wenigen flächendeckenden Messansätze prinzipiell das Potenzial, die Lücke zwischen den prozessorientierten/punktbezogenen Ansätzen der klassischen Ökosystemforschung und den in der Fläche notwendigen Antworten auf die gestellten wissenschaftlichen Herausforderungen zu schließen. Unterschiedliche Satelliten erfassen auf verschiedenen Skalen bereits heute die Landoberfläche, das Angebot wird sich in der Zukunft vergrößern. Dank qualitativer Verbesserung wie quantitativer Erweiterung in den letzten Jahren ist aus den Bildern der Vergangenheit inzwischen ein kalibrierter, reproduzierbarer, kontinuierlicher Strom von Messungen der Reflexions- und Emissionseigenschaften der Erdoberfläche geworden. Dieser kontinuierliche Datenstrom der Fernerkundung kann genutzt werden, um die Wechselwirkungen der Biosphäre (als Treiber der terrestrischen Stoffkreisläufe) mit geologischen, meteorologischen und bewirtschaftungsbedingten Parametern aufzuschlüsseln. Beispielsweise werden mikrobiell gesteuerte Stoffumsetzungen in Böden stark durch deren Bewirtschaftung, Temperatur und Niederschlag und die Bodentextur beeinflusst und sind Quellen atmosphärischer Spurengase, die wiederum die Produktivität und Verdunstungsleistung der Pflanzen beeinflussen. Eine geänderte Verdunstungsleistung wirkt sich wiederum lokal und regional auf Einstrahlungsverhältnisse und Niederschlag aus.

Die Präzisionslandwirtschaft setzt Sensoren, Automatisierungstechniken und Informationsverarbeitungssysteme zur prozessorientierten *in-situ*-Datenerhebung für möglichst ortsdifferenzierte und ressourcenschonende Produktionstechniken ein. Sie generiert dabei aber auch eine Vielzahl von Informationen zur Variabilität des Agrarökosystems.

Auf solche Art gewonnene Daten können jedoch nur genutzt werden, wenn es gelingt, sie gemeinsam mit dem Prozessverständnis aus den Observatorien und Exploratorien in Landoberflächenmodellen zu nutzen. Eine weltweite, flächendeckende Anwendung im „Dazwischen“ erfordert neue Ansätze zur fernerkundlichen Informationsgewinnung. Im Gegensatz zu den heute üblichen, lokal gültigen statistischen Regressionsansätzen müssen sie physikalische Zusammenhänge zwischen Landoberflächenprozessen und Heterogenitätsmustern und ihrer Abbildung im Strahlungstransfer erforschen und diese zur Grundlage universell gültiger Algorithmen zur Bestimmung von Struktur und Dynamik der Erdoberfläche machen. Hier zeigt sich, dass wegen der Größe und Komplexität nur disziplin- und ressortübergreifende Verbundforschung erfolgreiche Bearbeitung sichern kann.

3.3 Numerische Modellierung und Rechenkapazitäten

Erst durch die rasante Entwicklung im Bereich des wissenschaftlichen Rechnens und den Einsatz von Hoch- und Höchstleistungsrechnern ist es möglich geworden, Systeme dieser Komplexität mit der benötigten zeitlichen und räumlichen Auflösung zu simulieren. Modelle, die Wasser- und Energieflüsse im System Atmosphäre-Boden/Pflanze-Untergrund darstellen, müssen komplizierte, mindestens zweidimensionale Strömungsfelder in der Atmosphäre und im wassergesättigten und teilgesättigten Untergrund berechnen. Diese Strömungsfelder sind über komplizierte Mechanismen des Energie- und Stoffaustausches an der Landoberfläche (Boden-Pflanze-System) miteinander gekoppelt. Ein weiterer wichtiger Bereich mit komplizierten Wechselwirkungen existiert zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern (hyporheische Zone).

Um Umsetzungen und den Transport von Stoffen zu berechnen, werden an die Strömungsfelder der Modelle unterschiedlicher Komplexität angekoppelt, die von einfachen Übertragungsfunktionen bis zu vollgekoppelten thermodynamischen Gleichungen mit Phasenumwandlungen (Auflösung, Fällung) einschließlich der Berücksichtigung der Reaktionskinetik reichen. Fast ebenso rechenintensiv sind räumlich explizite ökonomische Modelle zur Simulation von Landnutzungsänderungen (Multi-Agenten-Systeme), die zumindest bei langfristigen Rechnungen wie Klimaprojektionen mit den biophysikalischen Modellen rückgekoppelt werden müssen.

Ein Mehrfaches dieser schon an die Grenzen der heutigen Rechenkapazitäten stoßenden Rechenleistung wird für inverse Simulationen und die Datenassimilation benötigt. Inverse Simulationen dienen zur Schätzung der räumlichen Verteilung von Parametern, die vor allem im Untergrund (Grundwasser) mit direkten Messungen kaum zugänglich sind. Die Datenassimilation ist bei hochaufgelösten Wetter- und Klimasimulationen zur Abschätzung von Anfangsfeldern und Randwerten sowie für Reanalysen unverzichtbar.

Nach heutiger Auffassung sollten Simulationen, ähnlich wie in der Statistik üblich, mit Konfidenzbereichen versehen werden, gerade wenn sie, meist unter verschiedenen Szenarien, als Grundlage für politische und ökonomische Entscheidungen dienen sollen. Bei großen numerischen Modellen werden die Konfidenzbereiche typischerweise mit Monte-Carlo- oder ähnlichen Techniken erzeugt, die zahlreiche Simulationen mit dem vollgekoppelten Modell und damit höchste Rechenleistung erfordern.

4. Ziele und Zweck einer integrierenden Infrastruktur

Zukünftige integrierende Forschungsinfrastrukturen der terrestrischen Ökosystemforschung müssten die im Folgenden aufgeführten Anforderungen erfüllen:

- ▶ eine systemische und somit kompartment- und skalenübergreifende Langzeitforschung unterstützen;
- ▶ die verschiedenen Forschungsinstitutionen Deutschlands besser vernetzen, als es gegenwärtig der Fall ist;
- ▶ als Basis angelegt sein, um die Zusammenarbeit mit den staatlichen Ministerien und Behörden auf Bundes- und Landesebene zu intensivieren;
- ▶ Methoden und Dienste zur Datenverfügbarkeit entwickeln, die beispielhaft Messdaten und Untersuchungsergebnisse in standardisierter und qualitätsgesicherter Form anbieten;
- ▶ eine Standardisierung und Harmonisierung von Untersuchungsmethoden und -verfahren ermöglichen;
- ▶ das Potenzial besitzen, in internationale Forschungsnetzwerke integriert zu werden.

In den anschließenden Abschnitten werden Vorschläge für den Aufbau eines deutschen Netzwerks „Infrastruktur für terrestrische Ökosystemforschung“ entwickelt. Diese umfassen die Bereiche Untersuchungsstandorte, Datenmanagement, internationale Vernetzung sowie Ausbildung und Erkenntnistransfer.

4.1 Beobachtungs- und Experimentierplattformen

Kernelement einer integrierenden nationalen Forschungsinfrastruktur sind Beobachtungs- und Experimentierplattformen. Sie umfassen regional lokalisierte Landschaftsausschnitte mit hochinstrumentierten Standorten für die Erfassung der zeitlichen und räumlichen Variabilität von Systemzuständen und der kompartmentübergreifenden Stoffflüsse. Die Untersuchungsstandorte sollten möglichst in ein Wassereinzugsgebiet integriert sein, da dies die Ableitung von Massen- und Energiebilanzen des Gesamtgebiets vereinfacht.

Im Zuge der Etablierung von integrierten terrestrischen Infrastrukturen ist eine engere Abstimmung zwischen Untersuchungsstandorten von Forschungsinstitutionen mit bestehenden Grundlagenenerhebungen (z. B. Bodenkartierung, digitale Geländemodelle), Messstationen und Beobachtungsflächen der öffentlichen Einrichtungen wünschenswert, um Synergien hinsichtlich der Datengrundlage wie auch der Auswertung zu nutzen. Insbesondere die Wartung und Sicherung der Systeme könnten durch eine gegenseitige Unterstützung wesentlich verbessert werden.

Die Beobachtungs- und Experimentierplattformen sollen Freiflächen und Standorte zur Durchführung von zielgerichteten Feldversuchen mit kontrollierten Faktorvariationen (z. B. Wasser- und Nährstoffangebot, CO₂-Konzentration) bereitstellen, in denen Wirkungsfaktoren mensch-

licher Eingriffe wie die Bodenbearbeitung oder Düngung ermittelt werden können, die für die Landnutzungsmodellierung unerlässlich sind.

Da in Deutschland eine breite Basis von Untersuchungsstandorten besteht, sollte diese Basis möglichst effektiv genutzt – das heißt vernetzt – werden, um zu einer Abdeckung mit repräsentativen Standorten zu gelangen. Repräsentanz umfasst hierbei: Berücksichtigung der wesentlichen Landschaftsformen und Landnutzungsarten inklusive des urbanen Raums und der verschiedenen Boden- und Klimaregionen Deutschlands.

In einem ersten Schritt müssen die geeigneten existierenden Standorte erfasst und zu einem Infrastrukturnetzwerk zusammengefasst werden. In einem zweiten Schritt wäre dann zu untersuchen, ob zusätzliche Standorte im Hinblick auf nationale und internationale Forschungsfragen beziehungsweise Repräsentanz von Regionen benötigt werden.

Ausgehend vom Stand der jeweiligen Instrumentierung müssen die Untersuchungsgebiete eines Infrastrukturnetzwerks der jeweiligen Fragestellung angepasst mit den modernsten Messtechnologien ausgestattet werden, damit sie einheitlich die folgenden Anforderungen erfüllen können:

- ▶ Eine räumlich und zeitlich hochauflösende Beobachtung ausgewählter Systemzustände und Stoffflüsse. Die Stoffflüsse von Wasser, Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphat und ausgewählten, durch den Menschen eingetragenen Substanzen sind kontinuierlich zu messen. In diesem Zusammenhang sollte der Einsatz von Umwelt-Tracern, wie z. B. Isotopenmessungen, verstärkt werden.
- ▶ Eine größtmögliche Reduktion manueller Probenahmen bei der Erfassung von Kerndaten erfolgt durch den Einsatz bodengestützter Beobachtungsmethoden, wie z. B. Feuchtesensoren, *in-situ*-Datenloggern, Oberflächengeophysik, eine multitemporale und mehrskalige Beobachtung durch die Kombination von bodengestützten Beobachtungsmethoden mit Fernerkundungsmethoden.
- ▶ Eine Reduktion der manuellen Probennahme ist auch bei der Erfassung der Biodiversität möglich, z. B. durch *barcoding*, Metagenomanalysen (Jansson, 2011) oder durch *environmental* DNA-Analysen.

Zur Komplettierung der ortsfesten Messeinrichtungen sollte ein Gerätepool mit mobilen Messgeräten etabliert werden, die auch an verschiedenen Standorten genutzt werden können. Hierzu gehören beispielsweise: Radiometer, Georadar, EMI, 3-D-Lidar, DTS, DirectPush, Isotopen-Analysatoren und Bodensensorsysteme. Dies würde die Durchführung von gezielten, zeitlich befristeten Messkampagnen im Rahmen einer standardisierten Vorgehensweise und eines standardisierten Datenmanagements unterstützen.

4.2 Zentrale Datenplattformen und Datenmanagement

Die bislang existierenden Infrastrukturen der terrestrischen Ökosystemforschung arbeiten und forschen zurzeit mit relativ wenig Abstimmung untereinander. Folglich wurden Daten, Untersuchungsmethoden, Auswertungsergebnisse und numerische Modellentwicklungen der verschiedenen Forschungsstandorte nur begrenzt ausgetauscht.

Eine wesentliche Ausgangsbasis zum Management von terrestrischen Systemen liegt im Aufbau einer gemeinsamen Wissensbasis, die zu einem großen Teil aus erhobenen Daten und Messungen besteht. Die erfolgreichen, engen Kooperationen zwischen Behörden und wissenschaftlichen Institutionen innerhalb der Forschungsaktivitäten *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)* sowie zwischen BMBF, BMVBS und Länderprojekten im Rahmen der Förderprogramme *KLIMZUG*, *KLIWAS* und *KLIFF* haben gezeigt, dass ein schneller, unkomplizierter und unbürokratischer Zugang zu existierenden Datenbanken möglich ist. Innerhalb dieser gemeinsamen Projekte – die jedoch keine gemeinsamen Infrastrukturen als Grundlage hatten – konnte ein deutlicher Wissensgewinn für alle Beteiligten erzielt werden.

Die DFG-Biodiversitätsexploratorien haben ein zentrales Datenmanagementsystem, in das erhobene Forschungsdaten eingespeist und miteinander vernetzt werden können. Die Dateninfrastruktur wird derzeit in einem von der DFG finanzierten Projekt weiter professionalisiert, um eine für andere Verbundprojekte verfügbare Informationsinfrastruktur zu schaffen. Eingebettet ist das Projekt in Bestrebungen der Uni Jena/MPI, ein Kompetenzzentrum für Forschungsdatenmanagement aufzubauen.

Im Rahmen von *TERENO* wurde ein zentrales Datenportal *TEODOOR* eingerichtet. Es ist der gemeinsame Zugangspunkt zu den dezentralen Datenbanken der in *TERENO* involvierten Zentren und Institutionen. Die Daten aus *TERENO* werden allen interessierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern oder Institutionen auf Basis eines Abkommens zum Datenmanagement zur Verfügung gestellt. Das Abkommen, das die Standards der Datenübertragung festlegt, garantiert die Kompatibilität des Datenzugangs und gewährleistet eine möglichst effiziente Datensicherung und -prozessierung, die Nutzung vereinbarter Daten- und Metadatenstandards sowie die Wahrung der Datenurheberrechte. Der Datenaustausch wird über Webservices nach Spezifikationen des *Open Geospatial Consortium (OGC)* realisiert. Die Metadaten werden in einer separaten Datenbank gespeichert und über den OGC-kompatiblen Katalogdienst WCAS im Internet veröffentlicht.

Die rasante Entwicklung des *Next Generation Sequencing (NGS)* von Metagenomen und Reinkulturen von Arten in der Medizin und Ökologie führt zu einer Datenflut, die sich mit aktuellen Rechnersystemen kaum noch effizient und zeitnah auswerten lässt. Hier bietet sich die Nutzung von Hochleistungsrechnern (High Performance Computer, HPC) an, die mithilfe der Anpassung der Algorithmen zur „Assemblierung“ und zum „Mapping“ der NGS-Daten an die HPC-Hardwarearchitektur neue Dimensionen für eine schnelle und zuverlässige Datenanalyse erreichen wird. Das Potenzial der HPC wird insbesondere dann ausgeschöpft werden, wenn das Metagenom einer Standortprobe mit mehr als 10 000 Arten assembliert, Gene erkannt und Funktionen vorhergesagt werden müssen.

Diese Beispiele sollten als Anlass gesehen werden, im Bereich der Infrastruktur für terrestrische Forschung eine kontinuierliche Öffnung der bestehenden behördlichen und wissenschaftlichen Datenarchive zu vereinbaren – unabhängig von gemeinsam getragenen Einzelprojekten, wie es derzeit in der Regel als Eingangsvoraussetzung gefordert wird.

Für den Zugang zu den umfassenden und verteilten Datenbeständen ist der Betrieb eines Metainformationssystems als zentrale Kommunikations- und Datenmanagementplattform für einen effizienten Informationsaustausch notwendig. Wichtig sind hier Auskünfte über existierende Daten, ihren Lagerungsort, gegebenenfalls detaillierte Inhalte, Maßstabsbereich, For-

mate, Datenschutz, Datenzugang, Nutzungsbedingungen und Ansprechpartner. Der Aufbau und Betrieb eines solchen Metainformationssystems ist sehr aufwendig. Dies betrifft vor allem die langfristige Pflege der zeitlich sehr dynamischen Datenbestände. Daher ist in einem ersten Schritt eine Verzahnung bestehender nationaler und internationaler Metainformationssysteme und Datenplattformen (PortalU, GDI-DE, infoGEO, D-GEO, WasserBLICK, INSPIRE u.v.a.) im Hinblick auf den Datenbedarf der terrestrischen Forschung anzustreben. In einem zweiten Schritt sind die Ziele, die durch diese Verzahnung nicht erreicht werden können, durch geeignete Maßnahmen zu implementieren. Außerdem müssen geeignete Anreize geschaffen werden, um die Datenbesitzer anzuhalten, ihre Datenbestände zeitnah zu dokumentieren und auf einer zentralen Kommunikations- und Datenmanagementplattform bereitzustellen. Die auf Basis terrestrischer Daten erzielten Ergebnisse aus der Forschung müssten im Gegenzug ebenfalls frei zugänglich zurückfließen und zum Bestandteil der Metainformation für terrestrische Forschung werden.

4.3 Internationale Vernetzung

Für eine stärkere Integration deutscher Untersuchungsstandorte in internationale Initiativen ist es notwendig, deren Sichtbarkeit zu erhöhen. Hier könnte ein deutsches Infrastrukturnetzwerk mit seinen Konzepten zur integrierten Beobachtung wichtige Impulse liefern und auch als nationale Kontaktstelle fungieren. Eine zentrale Rolle spielt in diesem Zusammenhang ebenfalls ein zentraler Informations- und Datenzugang.

Die Zusammenarbeit mit bestehenden oder geplanten *ESFRI*-Projekten wie beispielsweise *ICOS*, *ANAE*, *NOHA*, *LifeWatch* sowie anderen europäischen Aktivitäten (z.B. *LTER-Europe*) könnte von einem deutschen Infrastrukturnetzwerk mit einer breiteren Repräsentanz unserer Forschungslandschaft unterstützt werden. In Hinblick auf die USA wäre eine engere Vernetzung mit *NEON* und *CZO* aufgrund der guten bestehenden wissenschaftlichen Kontakte Erfolg versprechend.

4.4 Ausbildung und Erkenntnistransfer

Integrierende Forschungsinfrastrukturen bilden eine ideale Plattform, um Studierenden und Doktoranden einen Zugang zu modernst ausgestatteten Forschungsstandorten zu ermöglichen. Durch den fachübergreifenden Ansatz kommen Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler leichter in Kontakt mit anderen Fachdisziplinen und deren Arbeitsweisen. Weiterhin ermöglichen entsprechende Standorte, aber auch eine kontinuierliche Weiterbildung von etablierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der Forschung wie auch von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus Behörden hinsichtlich aktueller Entwicklungen der verschiedenen Fachdisziplinen. Letzteres könnte den wechselseitigen Austausch von Forschung und Praxis wesentlich beschleunigen und somit verbessern.

5. Empfehlungen zur Umsetzung

Um ein repräsentatives und international konkurrenzfähiges Netzwerk von Untersuchungsstandorten in Deutschland aufzubauen, schlagen wir ein zweistufiges Verfahren vor, in dem sich zuerst geeignete, bestehende Standorte zu einem Netzwerk zusammenschließen; in einem zweiten Schritt ist zu evaluieren, inwieweit ein solches Netzwerk um neue Standorte ergänzt werden muss. Eine solche Vernetzung kann nur im Rahmen einer gemeinsamen Anstrengung und Unterstützung aller relevanten Akteure gelingen. Hierzu gehören die unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen und die universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie die Forschungsförderer, weiterhin die Ressortforschung und die betreffenden Bundes- und Landesbehörden.

5.1 Organisation

Die Autoren dieser Stellungnahme empfehlen der Allianz der Wissenschaftsorganisationen, das Thema „Infrastruktur für terrestrische Ökosystemforschung“ im Rahmen ihres Forums für Forschungsförderung aufzugreifen. Um ein deutsches Infrastrukturnetzwerk zu initiieren, wird angeregt, eine operativ tätige Arbeitsgruppe mit Vertretern der Allianz-Mitglieder zu etablieren, ergänzt durch Repräsentanten relevanter Bundes- und Landeseinrichtungen sowie der Ressortforschung. Dabei kommt dem BMBF und dem BMU eine zentrale Bedeutung zu, da die langfristig angelegte Forschungsförderung in den Aufgabenbereich des BMBF fällt; die nachhaltige Sicherung unserer Umwelt bildet die Kernaufgabe des BMU.

5.2 Instrumente

Die Aufgabe der Arbeitsgruppe liegt im Aufbau des beschriebenen Infrastrukturnetzwerks. Dabei sind in einem ersten Schritt die Rahmenbedingungen wie bestehende Infrastrukturen, Datengrundlage und -verfügbarkeit zusammenzustellen. Hierauf aufbauend könnte im Rahmen eines Wettbewerbs ein Initialnetzwerk etabliert werden, in dem sich bestehende Plattformen um Aufnahme in den Verbund bewerben. Voraussetzung für die Aufnahme in das Netzwerk wäre neben einer geeigneten vorhandenen Infrastruktur der Wille und die Kompetenz, die eigenen Untersuchungen verstärkt in eine kompartimentübergreifende, systemische Forschung zu integrieren sowie sich an der Weiterentwicklung gemeinsamer Forschung, des Datenmanagements und – wo möglich – an internationalen Plattformen zu beteiligen. Ein solches Netzwerk könnte durch weitere Wettbewerbsrunden sukzessive erweitert werden. Die Arbeitsgruppe hätte im Rahmen dieses Prozesses auch die Aufgabe, bei der Auswahl der Bewerberinstitutionen auf einen Ausgleich bezüglich der unterschiedlichen Ausgangssituationen von außeruniversitären, universitären und behördlichen Gruppen zu achten. Falls erkennbar wird, dass im Hinblick auf nationale und internationale Forschungsfragen oder hinsichtlich der Repräsentanz von Regionen bestimmte Untersuchungsstandorte oder auch Instrumentierungen fehlen, müssten diese gezielt neu eingerichtet werden.

Auch die Entwicklung von zentralen Datenplattformen und Managementstrukturen für die terrestrische Ökosystemforschung erfordert als ersten Schritt eine Sichtung der bisherigen

Datenbanken und Managementansätze. Dabei ist zu berücksichtigen, welche Datenhaltungsstrukturen von den Behörden und wissenschaftlichen Institutionen bereits verwendet werden und wie eine Verknüpfung mit bereits bestehenden Datenbanken durchgeführt werden kann. Daher wäre es sinnvoll, dass unter dem Dach der oben genannten Arbeitsgruppe eine **Expertengruppe** die Ausarbeitung eines Konzepts „**Datenmanagement**“ übernimmt.

Die Einrichtung der integrierenden Forschungsplattformen ist von zentraler Bedeutung für die Entwicklung umfassender Umwelt-System-Theorien. Die hohe Komplexität interagierender abiotischer und biotischer Rückkoppelungen terrestrischer ökologischer Systeme erfordert eine langfristige kompartiment- und skalenübergreifende Datenerfassung und -verarbeitung. Eine solche systemische Wissensgrundlage erlaubt die modellgestützte Entwicklung und kontinuierliche Überprüfung von Umwelt-System-Theorien, verlässlichere Prognosen von Dynamik, Resilienz und Adaptation terrestrischer Ökosysteme in einer sich ändernden Umwelt. Um dieses Ziel von Beginn an zu fördern, wird die Einrichtung einer **Expertengruppe „Umwelt-System-Theorien“** im Rahmen der oben beschriebenen Allianz-Arbeitsgruppe angeregt.

Zusätzlich sollte unter dem Dach der oben genannten Arbeitsgruppe eine **Expertengruppe „Internationale Vernetzung“** gebildet werden mit der Aufgabe, ein Konzept zu entwickeln, wie bestehende Standorte beziehungsweise Standorte eines deutschen Netzwerks frühzeitig in internationale Initiativen eingebettet werden können. Ein solches Konzept sollte weiterhin Empfehlungen beinhalten, wie die deutsche Wissenschaft stärker als bisher die Entwicklung internationaler Initiativen gestalten kann.

Anhang

Literatur

- J. Adams, 1998: Benchmarking international research. *Nature*, 396 (6712): 615–618.
- P. Albarran, J. Crespo, I. Ortuno, J. Ruiz-Castillo, 2010: A comparison of the scientific performance of the U.S. and the European Union at the turn of the 21st century. *Scientometrics*, 85: 329–344.
- DFG, 2005: Perspektiven der agrarwissenschaftlichen Forschung / Future Perspectives of Agricultural Science and Research. Denkschrift/Memorandum. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- T. Doré, D. Makowski, E. Malézieux, N. Munier-Jolain, M. Tchamitchian, P. Tittone, 2011: Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy*, 34: 197–210.
- EIA, 2010: U.S. Energy Information Administration / International Energy Outlook.
- FAO & OECD, 2009: Agricultural outlook 2009–2018. OECD, Paris.
- H. C. J. Godfrey, J. Pretty, S. M. Thomas, E. J. Warham, J. R. Beddington, 2011: Linking policy on climate and food. *Science*, 331: 1013–1014.
- ICSU, 2010: Earth System Sciences for Global Sustainability: The Grand Challenges. International Council for Sciences, Paris.
- IPCC, 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor und H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin.
- J. Jansson, 2011: Towards „Tera-terra“: Terabase sequencing of terrestrial metagenomes. *Microbe*, ASM news 6, 309–315.
- F. Müller, C. Baessler, H. Schubert, S. Klotz, 2010: Long-term ecological research: between theory and application. Springer, Dordrecht.
- C. Ohl, B. Hansjürgens, 2011: Environment. In: German Data Forum (Ed.): Building on Progress. Expanding the Research Infrastructure for the Social, Economic, and Behavioral Sciences, Vol. 2, pp. 1217–1229.
- T. Plieninger, E. Barlösius, R. F. Hüttel, 2008: Die deutsche Agrarwissenschaft: Lokale Probleme, globale Forschungsfragen. *GAIA*, 17: 289–291.
- J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F. S. Chapin, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sorlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, J. A. Foley, 2009: A safe operating space for humanity. *Nature*, 461: 472–475.
- RS, 2009: Royal Society Policy Document. Reaping the benefits. Science and the sustainable intensification of global agriculture. In: D. Baulcombe, I. Crute, B. Davies, J. Dunwell, M. Gale, J. Jones, J. Pretty, W. Sutherland, C. Toulmin, N. Green, S. Mee, A. J. Simpson, J. Stilgoe (Eds). The Royal Society Science Policy, London, 6–9 Carlton House Terrace, SW1Y 5AG.
- TEEB, 2010: Die Ökonomie von Ökosystemen und Biodiversität: Die ökonomische Bedeutung der Natur in Entscheidungsprozesse integrieren (TEEB, 2010: The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature). Ansatz, Schlussfolgerungen und Empfehlungen von TEEB – eine Synthese. Münster.
- UBA, 2003: Synopse von Ansätzen zur systemaren Umweltforschung – deutsche Beiträge zum Ökosystemmanagement. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 200 11 201, UBA-FB 000536. ISSN 0722 – 186X.
- UN, 2009: World population prospects: the 2008 revision population database. Available online at: <http://esa.un.org/unpp/index.asp?panel=1>.

J. von Braun, 2007: The World Food Situation: New Driving Forces and Required Actions. International Food Policy, Research Institute, Washington, DC, USA.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), 2011: Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Berlin.

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

Allianz der Wissenschaftsorganisationen	Mitglieder sind die Alexander von Humboldt-Stiftung (AvH), die Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, der Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD), die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), die Fraunhofer-Gesellschaft (FhG), die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) sowie die Hochschulrektorenkonferenz (HRK), die Leibniz-Gemeinschaft, die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) und der Wissenschaftsrat (WR).
ANAEE	Analysis and Experimentation on Ecosystems
BITÖK	Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (1989–2004)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CZO	Critical Zone Observatory
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DirectPush	Eine geophysikalische Untersuchungsmethodik, die mit kleinen Maschinen kleinkalibrige Mess- und Probenahmesonden schnell und kosteneffizient in den Untergrund vortreibt.
D-GEO	Deutscher Beitrag zur Group on Earth Observations und zum Aufbau des Global Earth Observation System of Systems
DTS	Distributed Temperature Sensing. DTS verwendet Glasfaserkabeln zur Bestimmung von Bodenfeuchte und -temperatur.
EMI	Electric Magnetic Induction, geophysikalisches Messverfahren zur nicht invasiven Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeiten von Böden und Sedimenten
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures. ESFRI bewegt sich als multidisziplinäre Plattform für die EU-Länder auf einer Art Metaebene der europäischen Forschungsaktivitäten.
FAM	Forschungsverbund Agrarökosysteme München (1990–2003)
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
FLUXNET	Globales Netzwerk von Standorten mit mikrometeorologischen Messtürmen mit Eddy-Kovarianz-System zur Erfassung des Energie-, Wasser- und Spurengasaustauschs zwischen der Landoberfläche und der bodennahen Atmosphäre. Ziel ist die Bereitstellung von Informationen zur Validierung von Fernerkundungsprodukten für Nettoprimärproduktion, Evaporation und Energieabsorption.
FZW	Forschungszentrum Waldökosysteme an der Universität Göttingen (1989–2003)
GCEF	Global Change Exploratory Facility
Georadar	engl. Ground Penetrating Radar (GPR) oder Radio Echo Sounding (RES), wird zur Charakterisierung des Untergrundes eingesetzt und erfasst insbesondere die elektrische Permittivität durch Reflexionsmessungen von gesendeten elektromagnetischen Wellen.
GDI-DE	Die Geodateninfrastruktur Deutschland ist eine Initiative von Bund, Ländern und Kommunen. Die Partner vernetzen Geodaten aus ganz Deutschland. Politik, Wirtschaft und Privatpersonen können auf diese Daten zugreifen, die eine zuverlässige Grundlage für effiziente Entscheidungen bieten.
HPC	High Performance Computer
ICOS	Integrated Carbon Observation System
ICP-Forests	Internationales Kooperationsprogramm zur Erfassung und Überwachung der Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf Wälder

iDIV	Forschungszentrum der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zur „Integrativen Biodiversitätsforschung“ (seit 1.10.2012). http://www.idiv-biodiversity.de/
infoGEO	Internetportal der Staatlichen Geologischen Dienste. http://www.geokommission.de/
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe. Richtlinie zum Aufbau einer europäischen Geodateninfrastruktur
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KLIFF	Klimafolgenforschung in Niedersachsen. Anpassungsstrategien an den Klimawandel
KLIMZUG	BMBF-Verbundprojekt: Klimawandel in Regionen. Mit KLIMZUG sollen ausgehend von konkreten lokalen Anforderungen innovative Anpassungsstrategien an den Klimawandel und damit einhergehende Wetterextreme für Regionen entwickelt werden.
KLIWAS	Ressortforschungsprogramm des BMVBS: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen
LAI	Leaf Area Index, Blattflächenindex
3-D-Lidar	Light detection and ranging, eine dem Radar verwandte Methode zur entfernungs aufgelösten Messung atmosphärischer Variablen
LifeWatch	Research Infrastructure: E-Science and Technology Infrastructure for Biodiversity Data and Observatories
LTER	LTER steht für ökosystemare Langzeitforschung (Long-Term Ecosystem Research): Forschung, die sich mit der Gesamtheit von Ökosystemen, der Entwicklung von Prozessen und Strukturen über Jahrzehnte befasst.
LTER-D	Long-Term Ecosystem Research-Deutschland. Das deutsche Netzwerk für ökologische und ökosystemare Langzeitforschung ist eine Plattform für Kommunikation, Dokumentation und Zusammenarbeit von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in der langfristigen, systemorientierten und interdisziplinären Umweltbeobachtung in Deutschland. LTER-D ist Mitglied im internationalen LTER-Verbund ILTER sowie im regionalen Netzwerk LTER-Europe. ILTER und LTER-Europe sind offene Verbünde, die sich ausschließlich durch die Verpflichtung auf gemeinsame Ziele definieren. LTER-Europe konzentriert sich auf eine gemeinsame Forschungsstrategie sowie die Festlegung von Kriterien und Standards für die europäischen nationalen Netzwerke.
NEON	National Ecological Observatory Network der U.S. National Science Foundation
NGS	Next Generation Sequencing
NOHA	Network of Hydrological Observatories, das EU-Projekt soll den Wasserhaushalt in vielen Regionen Europas erfassen.
OGC	Das Open Geospatial Consortium ist eine 1994 gegründete gemeinnützige Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, die Entwicklung von raumbezogener Informationsverarbeitung (insbesondere Geodaten) auf Basis allgemeingültiger Standards zum Zweck der Interoperabilität festzulegen. Das OGC setzt sich aus Mitgliedern von Regierungsorganisationen, privater Industrie und Universitäten zusammen.
PortalU	Umweltportal Deutschland. Internet serviceangebot der Umweltverwaltungen des Bundes und der Länder Deutschlands. http://www.portalu.de/
PZÖ	Projektzentrum Ökosystemforschung in Kiel
Radiometer	Detektor zur Messung der Helligkeitstemperatur von Oberflächen
Reanalyse	Rekonstruktion der Bedingungen in Atmosphäre und an der Erdoberfläche durch Kombination von historischen Beobachtungen und Vorhersagemodell. Besonders bekannt ist die Europäische Reanalyse ERA-40, die das Klima für den Zeitraum von 1957 bis 2001 beschreibt.
TDR-Sonden	Sonden zur Messung des Bodenwassergehalts
TanDEM-X	Die TanDEM-X-Mission (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) basiert auf zwei nahezu identischen Erdbeobachtungssatelliten: TerraSAR-X und TanDEM-X. Beide sind mit einem modernen, leistungsfähigen Radarsystem, dem Synthetic Aperture Radar (SAR), ausgestattet. Mit diesem kann die Erde nicht nur bei Tageslicht, sondern auch bei Nacht und Wolkenbedeckung beobachtet werden.
TEODOOR	Datenportal der TERENO-Beobachtungsplattform

TERENO	TERrestrial ENvironmental Observatories. Initiative der Helmholtz-Gemeinschaft, zielt auf die Schaffung einer Beobachtungsplattform, die verschiedenste terrestrische Observatorien in unterschiedlichen Regionen verbindet. 2008 wurden drei Observatorien errichtet.
TERENO-MED	Basierend auf den Konzepten und Erfahrungen des TERENO-Projektes in Deutschland wurde ab 2012 damit begonnen, TERENO-MED, ein Observatorien-Netzwerk speziell für den mediterranen Raum, aufzubauen, wobei der Schwerpunkt der Aktivität zunächst auf der Untersuchung des Wasserkreislaufs liegt.
UN	United Nations
WasserBLiCK	Ein Bund-Länder-Informationsportal der Bundesrepublik Deutschland zum Themenschwerpunkt Europäische Wasserrahmenrichtlinie
WCAS	Web Catalogue Service (WCAS), auch Catalogue Service for the Web (CSW) genannt. Internet-gestützte Veröffentlichung von Informationen über Geoanwendungen, Geodienste und Geodaten (Metadaten) in einer Geodaten-Infrastruktur. Der Dienst enthält selbst keine Geodaten, sondern lediglich beschreibende Metadaten. Dieser Geodienst wurde durch das Open Geospatial Consortium (OGC) spezifiziert.

Tabelle 1: Exemplarische Beispiele nationaler und internationaler Plattformen für die Langzeitbeobachtung terrestrischer Systeme

Plattform	Kompartiment	Landnutzung	Skala	Status	Exp.	Obs.	Hyp.	RS	Laufzeit*	Organisation
Nationale Plattformen – Deutschland										
ICOS-D	PE/BIO/AT	W/A/G	P/F	G	-	+	+	-	2008–2031 Start 1982	BMBF Länder
Boden-Dauerbeobachtung (BDF)	PE/BIO/HY	W/A/G	P/F	L	-	+	-	-	Start 1982	Länder
Bodenzustandserhebung Wald (BZE)	PE/BIO/HY	W	P/F	L	+	+	-	-	Start 1987	Länder
Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW)	PE/BIO/HY	A/G	P/F	L	+	+	-	-	Start 2011	Thünen-Institut
Landwirtschaftliche Dauerversuche	PE/BIO	A/G	P/F	L	+	+	+/-	-	unterschiedliche Laufzeiten	Länder
ICP-Forest Level	PE/BIO/AT	W	P/F	L	-	+	-	-	Start 2008	Länder
TERENO	PE/BIO/AT/HY/GE	W/A/G	P/F/E/R	L	+	+	+	+	Start 2012	HGF
GCEF	PE/BIO	A/G	P/F	G	+	-	+	-	Start 2009	HGF
COSYNA	BIO/AT/HY	Meer	R	L	-	+	-	+	Start 2006	DFG
DFG-Biodiv. Exploratorien	PE/BIO	W/A/G	P/F/I	L	+	+	+	-	unterschiedliche Laufzeiten	DWD
Agrarmeteorologisches Netzwerk	PE/BIO	W/A/G	P/F	L	-	+	-	-	Start 2004	LTER
LTER-D	PE/BIO	W/A/G	P/F/I	L	-	+	+	+	Start 2004	Bund und Länder
WasserBLiCK, WISE	HY	W/A/G	P/F/E/R	L	-	+	-	-	Start 2004	
Nationale Plattformen – Andere Länder										
MISTRALS	PE/BIO/AT/HY	W/A/G	P/F/R	L	+	+	+	+	2007–2020	CNRS, France
NATIONAL CRITICAL ZONE OBSERVATORY PROGRAME	PE/BIO/AT/HY	W/A/G	P/F/E/R	L	+	+	+	-	Start 2007	USA
NEON	PE/BIO/AT/HY	W/A/G	P/F/E/R/G	L	-	+	-/+	+	2012 Start der Konstruktionsphase	USA
Internationale Plattformen										
ANAE	PE/BIO	W/A/G	P/F/R	G	+	+	+	+	2010 Start der Vorbereitungsphase	ESFRI
ICOS	PE/BIO/AT/HY	W/A/G	P/F/R/G	L	-	+	+	-	Start 2014	ESFRI
IAGOS	AT/BIO	-	R	L	-	+	+	-	Start 2012	ESFRI
NOHA	PE/BIO/AT/HY	W/A/G	P/F/E/R	G	+	+	+	+	in Planung	ESFRI
SOILTREC	PE/HY	W/A/G	P	L	+	+	+	-	2009	EU
LTER-Europe	PE/BIO/HY	W/A/G	P/F/E/R	L	-	+	-	-	2003	LTER
TERENO-MED	PE/BIO/AT/HY	W/A/G	P/F/E	G	+	+	+	+	Start 2012	HGF

Legende

Kompartiment:	AT = Atmosphäre, BIO = Biosphäre, HY = Hydrosphäre, PE = Pedosphäre, GE = Geosphäre
Landnutzung:	A = Acker, W = Wald, G = Grasland
Skala:	P = Plot (10^2 m^2), F = Feld (10^4 m^2), E = Einzugsgebiet (10^9 m^2), R = Region (10^{10} m^2), G = Global/Kontinental
Status:	G = Geplant, L = Laufend
Methodik:	Exp. = Experimente, Obs. = Observations (Beobachtungen), Hyp. = hypothesenbasiert, RS = Remote Sensing (Fernerkundung)

**Laufzeit soweit bekannt*

Plattformen

ANAAEE	Analysis and Experimentation on Ecosystems
CNRS	Centre national de la recherche scientifique, France
COSYNA	Coastal Biodiversity Exploratories
DFG-Expl.	DFG Biodiversity Exploratories
GCEF	Global Change Exploratory Facility
IAGOS	In Service Aircraft for a Global Observing System
ICP Forests	International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests
ICOS	Integrated Carbon Observation System
LTER-D	Long-Term Ecosystem Research-Deutschland
LTER-Europe	Long-Term Ecosystem Research Europe
MISTRALS	Mediterranean Integrated Studies at Regional and Local Scales
NEON	National Ecological Observatory Network
NOHA	Network of Hydrological Observatories for Water Resources Research in Europe
SOILTREC	Soil Transformations in European Catchments
TERENO	TERrestrial ENVironmental Observatories
TERENO-MED	TERrestrial ENVironmental Observatories-Mediterranean

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Kennedyallee 40 · 53175 Bonn

Postanschrift: 53170 Bonn

Telefon: +49 228 885-1

Telefax: +49 228 885-2777

postmaster@dfg.de

www.dfg.de

Anhang A.2

Zusammensetzung der Allianz-Arbeitsgruppe und der Expertengruppen

Allianz-Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Ingrid-Kögel-Knabner / Technische Universität München, Vorsitz

Prof. Dr. Georg Teutsch | Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig, Vorsitz

Prof. Dr. Rita Adrian | Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Stechlin

Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg | Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Prof. Dr. Ulf-Ingo Flügge | Universität zu Köln

Olaf Kolle | Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena

Prof. Dr. Christoph Kleinn | Georg-August-Universität, Göttingen

Prof. Dr. Kirsten Küsel | Friedrich-Schiller-Universität, Jena

Prof. Dr. Gunnar Lischeid | Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg

Prof. Dr. Alexander Löw † | Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Dr. Christoph Schäfers | Fraunhofer-Institut IME, Schmallenberg

Prof. Dr. Hans Peter Schmid | Karlsruher Institut für Technologie, Garmisch-Partenkirchen

Prof. Dr. Clemens Simmer | Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn

Prof. Dr. Harry Vereecken | Forschungszentrum Jülich

Prof. Dr. Rainer Walz | Fraunhofer-Institut ISI, Karlsruhe

Gäste

Prof. Dr. Peter Haase | Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Gelnhausen

Dr. Elke Lütke-meier | Wissenschaftsrat, Köln

Dr. Daniel Weymann | DAAD, Bonn

Koordinatorinnen der Allianz-Arbeitsgruppe

Dr. Cathrin Brüchmann (Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin)

Dr. Patricia Schmitz-Möller (Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn)

Dr. Ute Weber (Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn; Helmholtz-Gemeinschaft, Bonn)

Expertengruppe Datenmanagement

[Prof. Dr. Alexander Löw](#) † | Ludwig-Maximilians-Universität München, Koordination
[Prof. Dr. Rita Adrian](#) | Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Stechlin
[Prof. Dr. Susanne Crewell](#) | Universität zu Köln
[Dr. Johannes Cullmann](#) | Internationales Hydrologisches Programm, Koblenz
[Dr. Albrecht von Barga](#)n | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Köln
[Dr. Til Feike](#) | Julius Kühn-Institut, Kleinmachnow
[Prof. Dr. Bernd Freier](#) | Julius Kühn-Institut, Kleinmachnow
[Olaf Kolle](#) | Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena
[Prof. Dr. Britta König-Ries](#) | Universität Jena
[Dr. Ralf Kunkel](#) | Forschungszentrum Jülich
[Dr. Wolfgang Leuchs](#) | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
[Dr. Uwe Rammert](#) | Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein

Expertengruppe Governance und internationale Vernetzung

[Prof. Dr. Harry Vereecken](#) | Forschungszentrum Jülich, Koordination)
[Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg](#) | Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam
[Prof. Dr. Erwin Beck](#) | Universität Bayreuth
[Dr. Frank Beyrich](#) | Meteorologisches Observatorium Lindenberg, Tauche-Lindenberg
[Prof. Dr. Ulf-Ingo Flügge](#) | Universität zu Köln
[Prof. Dr. Peter Haase](#) | Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum, Gelnhausen
[Prof. Dr. Christoph Kleinn](#) | Georg-August-Universität, Göttingen
[Prof. Dr. Christoph Schäfers](#) | Fraunhofer-Institut, Schmallingenberg
[Prof. Dr. Clemens Simmer](#) | Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn

Expertengruppe Umweltsystem-Theorien

[Prof. Dr. Gunnar Lischeid](#) | Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Müncheberg, Koordination

[Prof. Dr. Sabine Attinger](#) | Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig

[Prof. Dr. Andreas Hense](#) | Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn

[Prof. Dr. Clemens Simmer](#) | Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn

[Prof. Dr. Ingrid-Kögel-Knabner](#) | Technische Universität München

[Prof. Dr. Thilo Streck](#) | Universität Hohenheim

[Prof. Dr. Ingolf Steffan-Dewenter](#) | Julius Maximilians Universität, Würzburg

[Prof. Dr. Volker Grimm](#) | Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig

[Prof. Dr. Michael Hauhs](#) | Universität Bayreuth

[Markus Fahle](#) | Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Müncheberg

[Dr. Daniel Ayllon](#) | Universidad Complutense de Madrid; Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Müncheberg und | Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig

[Prof. Dr. Florian Jeltsch](#) | Universität Potsdam

[Prof. Dr. Felix Müller](#) | Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Anhang A.3

Bericht Observatorien-Umfrage

Zusammenfassung

Die Initiative zur Erfassung terrestrischer Observatorien liegt bei der Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ der Deutschen Forschungsgesellschaft mit ihrem Projekt „Langzeitperspektiven und Infrastruktur der terrestrischen Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz“. Ziel dieses Projektes ist es, der terrestrischen Umweltforschung in Deutschland Zugang zu adäquaten Forschungsinfrastrukturen auf nationaler und internationaler Ebene zu sichern und dafür ein nationales Infrastruktur-Netzwerk mit nationalen und auch internationalen Untersuchungsstandorten einzurichten. Die Ausgangsbasis hierfür sollen bereits vorhandene Observatorien sein. Es gibt innerhalb und außerhalb Deutschlands bereits eine große Anzahl an Observatorien, teilweise mit dichten Messnetzen, die Messungen mit hoher Qualität erheben. Allerdings arbeiten viele Observatorien bislang sehr fachspezifisch und kleinskalig, womit ihr volles Potenzial nicht ausgeschöpft werden kann. Effiziente Maßnahmen zur Umweltvorsorge benötigen ein integrierendes Ökosystem-Konzept. Dafür wurden seit den 1980er Jahren in Deutschland erste integrierende Ökosystem-Forschungszentren mit dem Ziel langfristig angelegter Forschungsprojekte eingerichtet. Um nun ein neues repräsentatives und international konkurrenzfähige Netzwerk von Untersuchungsstandorten in Deutschland aufzubauen, ist es notwendig, einen Überblick über bereits vorhandene Messnetze und Observatorien zu erhalten, die dann die Grundlage für dieses Netzwerk bilden können.

Ziel der hier ausgewerteten Umfrage ist die Erfassung und Charakterisierung der bestehenden Observatorien im Bereich der terrestrischen Umweltforschung und des Umwelt-Monitorings in Deutschland. Der Begriff „Observatorium“ wurde dabei sehr weit gefasst, um die Vielfalt an Forschungsinfrastrukturen in Deutschland besser abbilden zu können.

Die Befragung erbat Angaben über Art, Eigenschaften und Lage des Observatoriums sowie der überwachten und gemessenen Kompartimente und Parameter. Auch Aktivitäten wie Experimente und Messkampagnen und die weitere Verwendung der Messdaten, z.B. in Modellen, wurden abgefragt. Weiterhin wurden Fragen zum Datenmanagement und zur Verfügbarkeit der Daten für die Öffentlichkeit gestellt. Insgesamt wurden 326 Personen postalisch gebeten, an der Online-Umfrage teilzunehmen. Mit der Aufforderung wurde auch ein persönlicher Zugang für jeden potentiellen Teilnehmer verschickt. Eine Erinnerung erfolgte wenige Wochen vor Ablauf der Umfragefrist per E-Mail. Die Umfrage war offen bis

zum 31.12.2015, auf Anfrage wurden auch danach noch Teilnehmer zugelassen. Zu den angefragten Teilnehmern gehörten Bundes- und Landesämter genauso wie Universitäten und außeruniversitäre Forschungsinstitute, unter anderem der Helmholtz-Gemeinschaft und der Max-Planck-Gesellschaft, der Fraunhofer-Gesellschaft und der Leibniz-Gemeinschaft.

Von diesen Angefragten nahmen 84 an der Umfrage teil, während 30 Antwortende mitteilten, dass bei ihnen kein passendes Observatorium vorhanden sei. Am Ende ergab die Befragung eine Anzahl von insgesamt 183 Observatorien, von denen am Ende 167 für die Auswertung verwendet werden konnten. Von den auswertbaren Forschungsinfrastrukturen werden 53 von Universitäten, 38 von Behörden, 62 von Mitgliedern außeruniversitärer Forschungsinstitute sowie 14 von anderen Einrichtungen betrieben.

Die registrierten Observatorien sind bezüglich ihrer Größe und Zusammensetzung sehr unterschiedlich. Aufgrund der hohen Vielfalt und der selektiven Teilnahme der Observatorien an der Umfrage ist diese Umfrage nur unter Vorbehalt quantitativ auf alle deutschen terrestrischen Forschungsinfrastrukturen anzuwenden. Dennoch liefert diese Auswertung einen qualitativen Überblick über die große Vielfalt der Forschungsinfrastrukturen in Deutschland. Die Observatorien, die an der Umfrage teilgenommen haben, zeigen beträchtliche Variationen in ihrer Größe genauso wie in ihrer Ausrichtung auf unterschiedliche wissenschaftliche Fragestellungen. Die Umfrage zeigte auf, dass in fast allen Naturräumen Deutschlands eine große Auswahl an Kompartimenten und Parametergruppen in unterschiedlichen Kombinationen untersucht wird. Die Vielfältigkeit der gemessenen Parameter, der beobachteten Kompartimente und der abgedeckten Naturräume erlaubt es, auf einen starken Rückhalt durch viele wissenschaftliche Institute für ein deutschlandweites, Kompartimente-übergreifendes Observatorien-Netzwerk zu schließen. Die erhobenen Daten werden häufig zu Modellierungszwecken, teilweise auch für die Fernerkundung eingesetzt. Die Einbindung in Netzwerke unterscheidet sich von Observatorium zu Observatorium. Während manche Observatorien in eine Reihe von nationalen und internationalen Netzwerken mit speziellen wissenschaftlichen Fragestellungen involviert sind, sind andere Observatorien nicht vernetzt.

Obwohl die Daten der meisten Observatorien grundsätzlich für die Forschung zur Verfügung gestellt werden, bestehen doch große Unterschiede darin, wie die Daten qualitätsgeprüft und möglichen Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Ein nationales Observatorien-Netzwerk könnte hier Abhilfe schaffen und den Zugang zu Forschungsdaten deutlich vereinfachen. Mit einem verbesserten Zugang zu den Daten können Forschung und Entscheidungsträger diese besser nutzen und damit effiziente Maßnahmen zur Umweltvorsorge treffen.

1 Einleitung

Die Initiative zur Erfassung terrestrischer Observatorien liegt bei der Arbeitsgruppe „Infrastrukturen in der terrestrischen Forschung“ der Deutschen Forschungsgesellschaft mit ihrem Projekt „Langzeitperspektiven und Infrastruktur der terrestrischen Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz“. Ziel dieses Projektes ist es, der terrestrischen Umweltforschung in Deutschland Zugang zu adäquaten Forschungsinfrastrukturen auf nationaler und internationaler Ebene zu sichern und dafür ein nationales Infrastruktur-Netzwerk mit nationalen und auch internationalen Untersuchungsstandorten einzurichten. Die Ausgangsbasis hierfür sollen bereits vorhandene Observatorien sein. Es gibt innerhalb und außerhalb Deutschlands bereits eine große Anzahl an Observatorien, teilweise mit dichten Messnetzen, die Messungen mit hoher Qualität erheben. Allerdings arbeiten viele Observatorien bislang sehr fachspezifisch und kleinskalig, womit ihr volles Potenzial nicht ausgeschöpft werden kann. Effiziente Maßnahmen zur Umweltvorsorge benötigen ein integrierendes Ökosystem-Konzept. Dafür wurden seit den 1980er Jahren in Deutschland erste integrierende Ökosystem-Forschungszentren mit dem Ziel langfristig angelegter Forschungsprojekte eingerichtet. Um nun ein neues repräsentatives und international konkurrenzfähige Netzwerk von Untersuchungsstandorten in Deutschland aufzubauen, ist es notwendig, einen Überblick über bereits vorhandene Messnetze und Observatorien zu erhalten, die dann die Grundlage für dieses Netzwerk bilden können.

Ziel der hier ausgewerteten Umfrage ist die Erfassung und Charakterisierung der bestehenden Observatorien im Bereich der terrestrischen Umweltforschung und des Umwelt-Monitorings in Deutschland. Der Begriff „Observatorium“ wurde dabei sehr weit gefasst, um die Vielfalt an Forschungsinfrastrukturen in Deutschland besser abbilden zu können. Laut der der Befragung vorangehenden Definition kann ein Observatorium einem Feldstandort, einem Einzugsgebiet, einer Klimastation, einer Lysimeterstation, einem Satelliten, einem Wetterradar oder auch einem Grundwasserpegel entsprechen. Da Instrumente wie Lysimeter oder Satelliten eher nicht als Observatorien im Sinne von Standorten für eine neu zu gründende deutsche Forschungsinfrastruktur in Frage kommen, sollte die vorher genannte Definition bei der Auswahl dieser Standorte genauer diskutiert werden. Da jedoch die Umfrage auf dieser Definition basiert, wurde sie in dieser Auswertung beibehalten, was bei der Nutzung der Ergebnisse gegebenenfalls zu berücksichtigen ist.

Die Befragung erbat Angaben über Art, Eigenschaften und Lage des Observatoriums sowie der überwachten und gemessenen Kompartimente und Parameter. Auch Aktivitäten wie Experimente und Messkampagnen und die weitere Verwendung der Messdaten, z.B. in Modellen, wurden abgefragt. Weiterhin wurden Fragen zum Datenmanagement und zur Verfügbarkeit der Daten für die Öffentlichkeit gestellt. Eine vollständige Auflistung der Fragen findet sich im Anhang (A1).

Insgesamt wurden 326 Personen postalisch gebeten, an der Online-Umfrage teilzunehmen. Mit der Aufforderung wurde auch ein persönlicher Zugang für jeden potentiellen Teilnehmer verschickt. Eine Erinnerung erfolgte wenige Wochen vor Ablauf der Umfragefrist per E-Mail. Die Umfrage war offen bis zum 31.12.2015, auf Anfrage wurden auch danach noch Teilnehmer zugelassen. Zu den angefragten Teilnehmern gehörten Bundes- und Landesämter genauso wie Universitäten und außeruniversitäre Forschungsinstitute, unter anderem der Helmholtz-Gemeinschaft und der Max-Planck-Gesellschaft, der Fraunhofer-Gesellschaft und der Leibniz-Gemeinschaft.

Von diesen Angefragten nahmen 84 an der Umfrage teil, während 30 Antwortende mitteilten, dass bei ihnen kein passendes Observatorium vorhanden sei. Am Ende ergab die Befragung eine Anzahl von insgesamt 183 Observatorien, von denen am Ende 167 für die Auswertung verwendet werden konnten. Von den auswertbaren Forschungsinfrastrukturen werden 53 von Universitäten, 38 von Behörden, 62 von Mitgliedern außeruniversitärer Forschungsinstitute sowie 14 von anderen Einrichtungen betrieben. Eine vollständige Liste der teilnehmenden Observatorien und Institute findet sich im Anhang (A2).

Die registrierten Observatorien sind bezüglich ihrer Größe und Zusammensetzung sehr unterschiedlich. Unter anderem manifestiert sich dies darin, dass auch sechs Netzwerke von Observatorien registriert wurden, die wiederum andere einzeln registrierte Observatorien beinhalten. Duplikationen dieser Art wurden nicht aus der Umfrage entfernt, da sich in der Unterschiedlichkeit der Teilnehmer die Vielfalt der in Deutschland vorhandenen Observatorien und Messnetze widerspiegelt. Ein Beispiel dafür ist das Deutsche Netzwerk für ökosystemare Langzeitforschung (LTER-D). Aufgrund der hohen Vielfalt und der freiwilligen Teilnahme der Observatorien an der Umfrage ist diese Umfrage nur unter Vorbehalt quantitativ auf alle deutschen terrestrischen Forschungsinfrastrukturen anzuwenden. Dennoch liefert diese Auswertung einen qualitativen Überblick über die große Vielfalt der Forschungsinfrastrukturen in Deutschland.

2 Charakterisierung der erfassten Observatorien

2.1 Größe und Lage der Observatorien

Während sich der Großteil der von Deutschland aus betriebenen Observatorien innerhalb des Landes befindet, gibt es auch eine beträchtliche Anzahl von Observatorien, die weltweit verteilt sind. 153, das sind 91,6 % der erfassten Observatorien, liegen innerhalb Deutschlands. Die in dieser Umfrage gemeldeten Observatorien bieten eine gute Abdeckung Deutschlands, um auf dieser Basis ein deutschlandweites, systemorientiertes Observatorien-Netzwerk aufzubauen. Die gemessenen Parameter, beobachteten Kompartimente und abgedeckten Naturräume innerhalb Deutschlands sind mannigfaltig und ausgewogen

vertreten. KIT und LTER-D gaben an, Observatorien im In- und Ausland zu betreiben. Von den gemeldeten Observatorien liegen 12 im Ausland. Die im Ausland betriebenen Observatorien umfassen vor allem die Observatorien des Alfred-Wegener-Institutes in der Arktis und Antarktis, mehrere Standorte in Südamerika, sowie jeweils einen Standort in der Mongolei, auf den Philippinen und in Norwegen. Eine vollständige Auflistung der im Ausland liegenden Forschungsinfrastrukturen findet sich im Anhang (A4).

2.2 Naturräume

Die Vielfaltigkeit der Naturräume in Deutschland erfordert ein breit gefächertes Monitoring, da Messungen in einem Naturraum schwer auf andere Naturräume übertragen werden können. Deutschlandweit wurden 29 unterschiedliche Naturräume für die Befragung vorgegeben (Tab. 1). Jedes Observatorium wurde nach der räumlichen Zuordnung zu einem oder mehreren der vorgegebenen Naturräume gefragt, was Mehrfachnennung einschließt. In Tab. 1 ist die Abdeckung der jeweiligen Naturräume durch die erfassten Observatorien ersichtlich. Das Norddeutsche Tiefland beherbergt die bei Weitem meisten Observatorien (insgesamt 58 bzw. 34,3 %), wobei das Norddeutsche Tiefland auch einen großen Anteil an der Gesamtfläche Deutschlands hat. Die flächenmäßige Verteilung der Naturräume innerhalb Deutschlands ist sehr unterschiedlich. Allgemein ist eine gute Abdeckung der Naturräume in Deutschland gegeben. In allen Gebieten außer dem deutschen Teil der westlichen Sudeten sind mindestens 2 Observatorien vorhanden. In den flächenmäßig größeren Gebieten sind es durchweg mehr.

Tab. 1: Anzahl und Anteil der Observatorien in den einzelnen Naturräumen. Die Naturräume folgen der Einteilung des Bundesamts für Naturschutz und waren in der Umfrage vorgegeben.

Naturraum	Anzahl Observatorien	Observatorien Anteil in %
Norddeutsches Tiefland	58	34.3
Südwestdeutsches Stufenland	23	13.6
Oberrheinisches Tiefland	21	12.4
Rheinisches Schiefergebirge	20	11.8
Nord(ost)deutsche Seenplatte	18	10.7
Lössbörden	13	7.7
Harz (Grundgebirgsschollenland)	10	5.9
Thüringer Becken (mit Randplatten)	10	5.9
Mittelgebirgsschwelle	9	5.3
Mecklenburgisch-Vorpommersches Küstengebiet	8	4.7
West- und Osthessisches Bergland	8	4.7
Erzgebirge	8	4.7
Oberpfälzisch-Bayerischer Wald	8	4.7
Schichtstufenland beiderseits des Oberheingrabens	8	4.7
Alpenvorland	8	4.7
Nördliches Alpenvorland	8	4.7
Norddeutsches Heide-, Geest-, Hügel- und Flachland	7	4.1
Niedersächsisch-Hessisches Bergland	7	4.1
Niedersächsisches Bergland	6	3.6
Marschland	5	3.0
Thüringisch-Fränkisches Mittelgebirge/Vogtland	5	3.0
Nordfranzösisches Schichtstufenland	5	3.0
Voralpines Hügel- und Moorland	4	2.4
Alpen	4	2.4
Schwäbisch-Bayerische Voralpen	3	1.8
Östliche Mittelgebirgsschwelle	2	1.2
Oberpfälzisch-Obermainisches Hügelland	2	1.2
Nördliche Kalkalpen	2	1.2
Westliche Sudeten	0	0.0

Mit 69 % liegt der Großteil aller Observatorien innerhalb nur eines Naturraums. 15 % der Observatorien erstrecken sich über 2 Naturräume (s. Abb. 1). Der Rest der Observatorien, der eine Angabe zu dieser Frage machte, deckt 3 oder mehr Naturräume ab. Die größte deutschlandweite Verbreitung zeigen mit einer Abdeckung von 15 Naturräumen LTER-D und die Netzwerke von Observatorien der bundesweiten Boden- und Waldzustandserhebung, die beide eine Verbreitung über 27 Naturräume angeben.

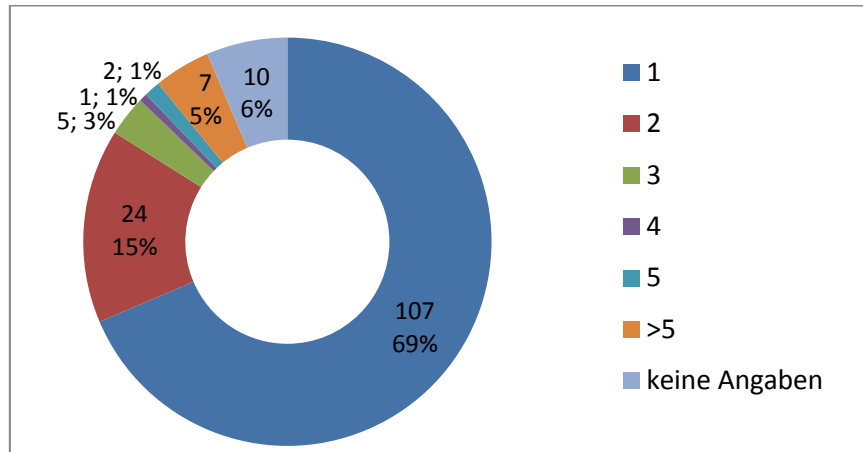


Abb. 1: Anzahl der Naturräume pro Observatorium

2.3 Landnutzung

Weiterhin wurde in der Umfrage nach den in den Observatorien überwachten Arten der Landnutzung gefragt. Insgesamt standen 12 Landnutzungsarten (Abb. 2) zur Auswahl, Mehrfachnennungen waren möglich. Die in den meisten Observatorien untersuchte Landnutzungsart ist Wald. Dieser gliedert sich zu ähnlich großen Teilen in Nadel-, Laub- und Mischwald auf (Abb. 2). Grünland und Acker machen jeweils 16 % bzw. 15 % an der gesamten Landnutzung aus. Andere Landnutzungsformen sind Gewässer (Standgewässer, Fließgewässer, Küsten) und urbane Umgebungen. Fünf Prozent der Betreiber von Observatorien geben an (auch) auf anderen in der Umfrage nicht explizit genannten Landnutzungsformen zu arbeiten.

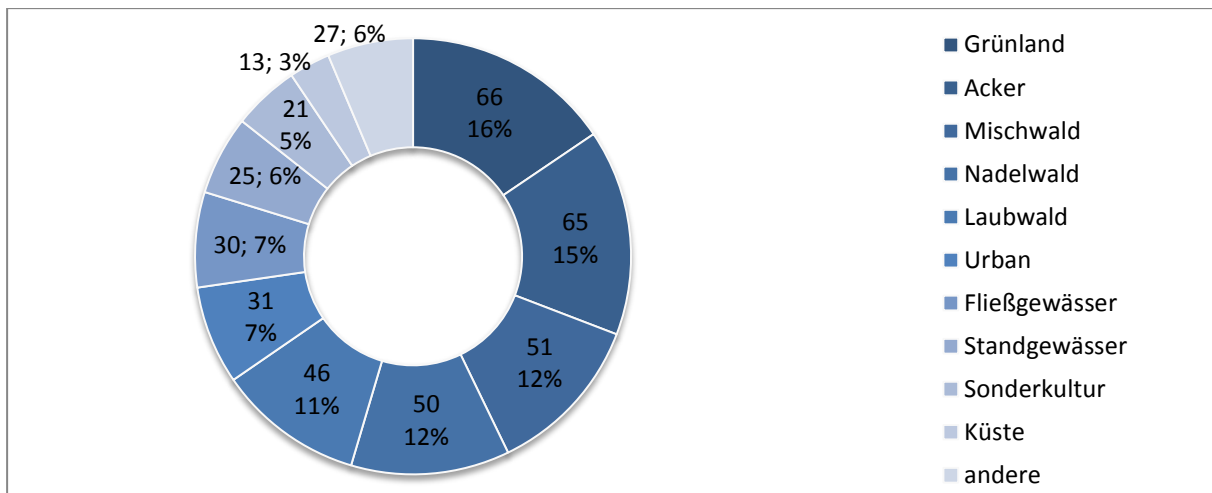


Abb. 2: Landnutzungsformen in den Observatorien

Die Anzahl an Landnutzungsarten, die von den erfassten Observatorien abgedeckt wird, ist sehr unterschiedlich (s. Abb. 3). 57 Observatorien, 34 %, konzentrieren sich auf eine einzige Landnutzungsform, während 36 Observatorien 2 Landnutzungsarten untersuchen. 25 Observatorien sind auf insgesamt 3 Landnutzungsarten aktiv, die übrigen 36 Observatorien, die zu dieser Frage Angaben machten, erforschen 4 oder mehr unterschiedliche Landnutzungsarten.

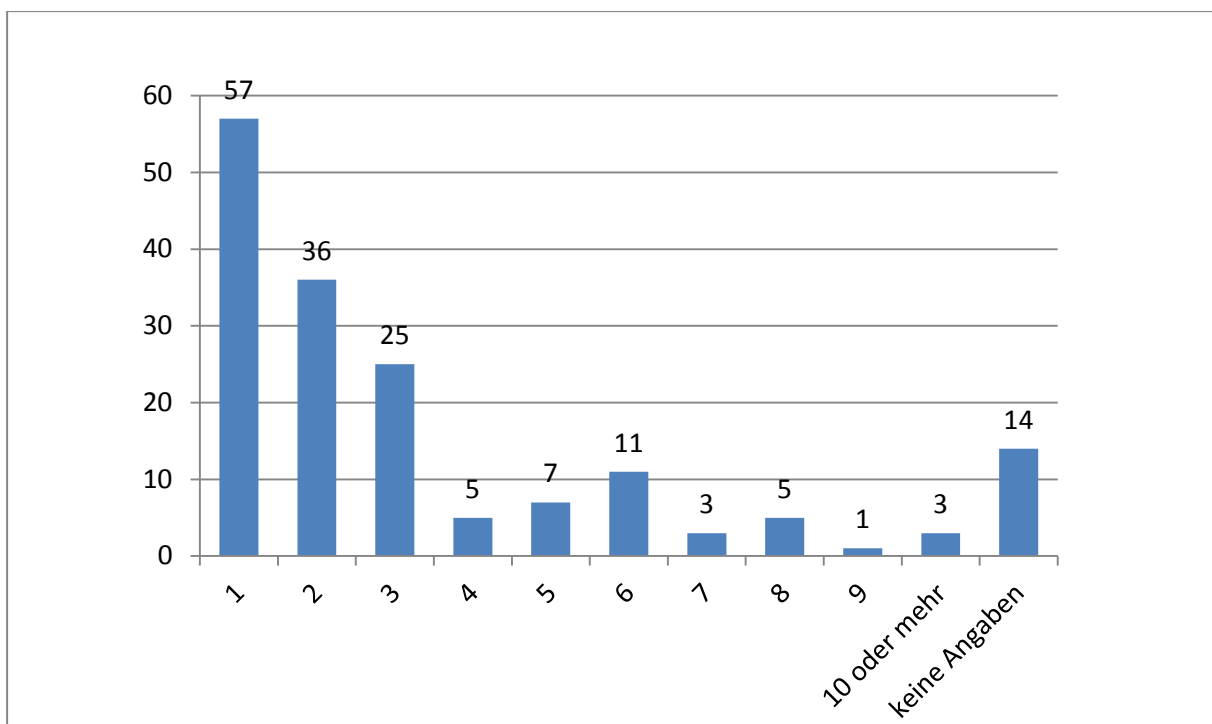


Abb. 3: Anzahl der Landnutzungsarten pro Observatorium

2.4 Kompartimente in den Observatorien

Ein wichtiger Punkt für die Charakterisierung der erfassten Observatorien sind die dort beobachteten Kompartimente, da diese ausschlaggebend sind für die Nutzungsmöglichkeiten der erhobenen Daten. In der Befragung standen 10 Kompartimente zur Auswahl, dabei waren Mehrfachnennungen möglich. Die in den Observatorien beobachteten Kompartimente sind in Abb. 4 zu sehen. Mit 107 Nennungen und damit 22 % aller genannten Kompartimente ist Boden und Sedimente das am besten überwachte Kompartiment in den erfassten Observatorien. Insgesamt erheben damit 64,1 % aller erfassten Observatorien Daten in diesem Kompartiment. Messungen zu Vegetation und Atmosphäre werden ebenfalls in über 50 % der Observatorien erhoben. 89 bzw. 88 Observatorien gaben an, in diesen Bereichen tätig zu sein, was 19 % bzw. 18 % aller genannten Kompartimenten entspricht. Schon deutlich weniger häufig, in etwa einem Viertel aller Observatorien werden Grundwasser, Fauna und Fließgewässer (44, 41 und 37 Nennungen) beobachtet. Fünfzehn Prozent der Observatorien erheben unter anderem Daten zu Standgewässern, die damit 5 % aller überwachten Kompartimente ausmachen, während marine und limnische Biota, genauso wie marine Gewässer, in 10,2 % bzw. 6,6 % der Observatorien beobachtet werden und damit weniger als 5 % der überwachten Kompartimente ausmachen (17 und 11 Nennungen).

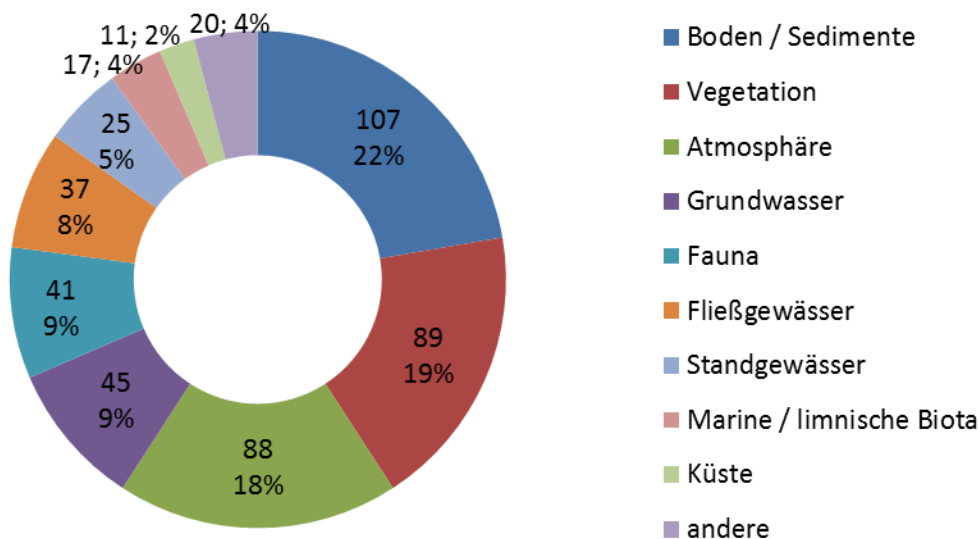


Abb. 4: In den Observatorien beobachtete Kompartimente

Abb. 5 zeigt, dass 37 Observatorien nur ein Kompartiment überwachen, 36 Observatorien beobachten 3 Kompartimente. Mit 41 die meisten der erfassten Observatorien (24 %) sind in 2 Kompartimenten aktiv. Zwei Befragte geben an, dass sie in allen 10 Kompartimenten Messungen vornehmen. Diese sind das Forschungsnetzwerk LTER-D und die Forschungsstation Samoylov in der russischen Arktis.

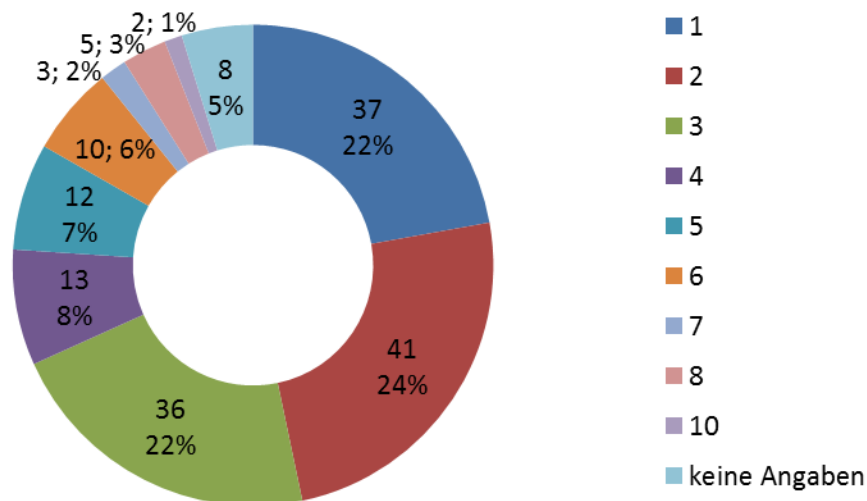


Abb. 5: Anzahl der beobachteten Kompartimente pro Observatorium

2.5 Gemessene Parameter in den Observatorien

Ebenfalls von großer Wichtigkeit ist die Art der Parameter, die in den Observatorien erhoben wird, da diese ebenfalls Einfluss auf die Art der Datennutzung und ihre Verwendbarkeit haben. In der Befragung konnte aus insgesamt 8 Parametergruppen diejenigen ausgewählt werden, die für das jeweilige Observatorium zutreffen, Mehrfachnennungen waren dabei möglich. Abb. 6 zeigt die Anzahl der gemessenen Parametergruppen. Danach werden mit 97 Observatorien am häufigsten Bodenparameter erhoben (58,1 % aller Observatorien). Hauptsächlich werden in der Beschreibung der Observatorien Bodenproben und Bodentemperatur erwähnt. Fast ebenso häufig werden atmosphärische Parameter erhoben (94 Observatorien). Das korrespondiert mit den am häufigsten erhobenen Kompartimenten Boden und Sedimente sowie Atmosphäre. Zu den gemessenen Parametern im Bereich Meteorologie und Atmosphäre zählen laut Nennung in der Beschreibung der Observatorien vor allem Niederschlag, relative Feuchte und Wind (mehr als 10 Erwähnungen), außerdem Lufttemperatur, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung. 85, und damit 50,9 % der Observatorien erheben biotische Parameter, unter anderem werden im Allgemeinen Biodiversität und im Einzelnen Rehe, Regenwürmer, Taubeneier, Buchen und Fichten(triebe)

erwähnt. In 62 Observatorien werden hydrologische Parameter erfasst, in der Beschreibung der Observatorien werden häufig Grundwasser (mehr als 10 Erwähnungen), Bodenfeuchte, Wassertemperatur und Pegel genannt. Geophysikalische Parameter werden in den wenigsten Observatorien erfasst: nur 29 Observatorien geben an, in dieser Parametergruppe Daten zu erheben.

Abb. 6 zeigt ebenfalls, wie viele Observatorien die jeweiligen Parametergruppen automatisiert erfassen. Bei weitem am häufigsten werden atmosphärische Parameter automatisiert überwacht (88,3 % der Parametergruppe). Auch in der Hydrologie werden Parameter häufig automatisiert überwacht: Gewässer und hydrogeologische Parameter werden zu 56,4 % automatisiert überwacht, hydrologische Parameter zu 58,1 %. Besonders selten werden biotische Parameter (10,1 %) und Managementparameter (2,0 %) automatisiert erhoben.

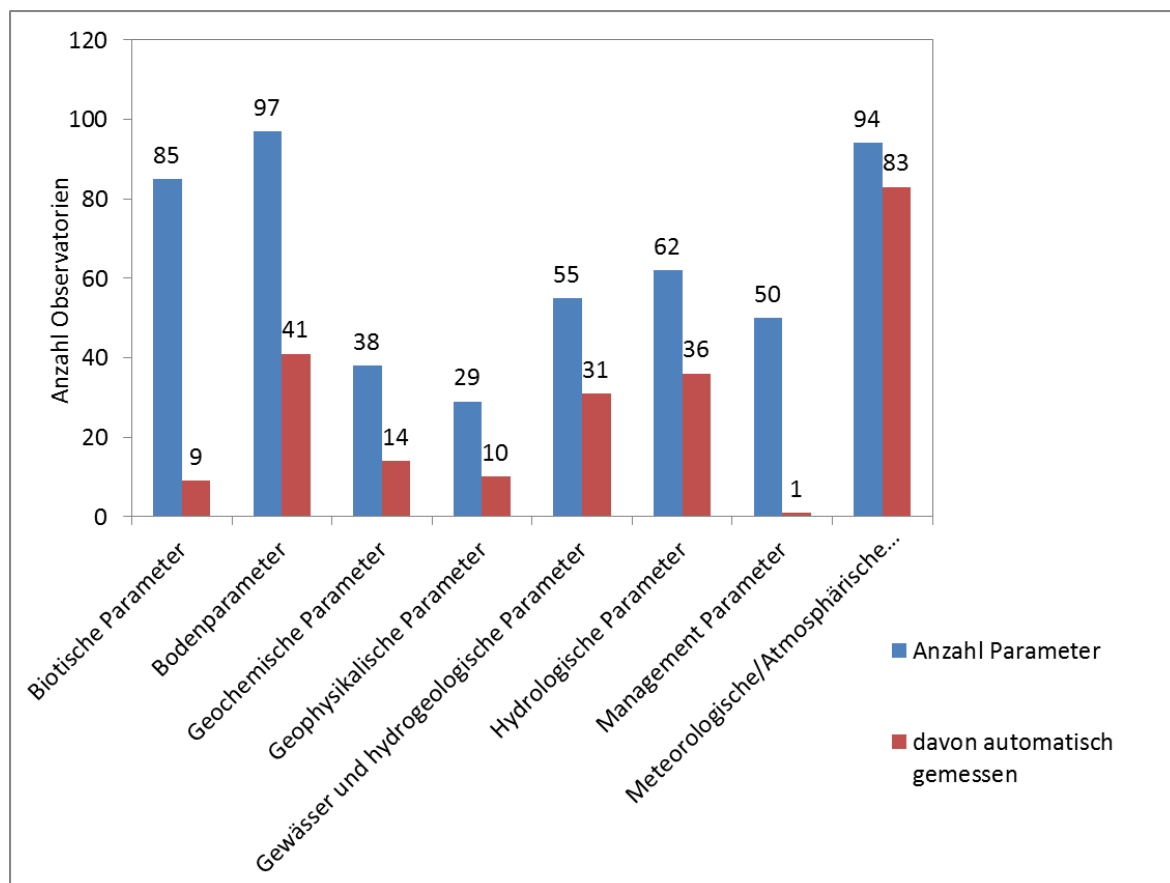


Abb. 6: Gemessene Parametergruppen in den Observatorien

Abb. 7 zeigt die Anzahl an Parametergruppen, die in den einzelnen Observatorien erfasst werden. 33 Observatorien (20 %) erheben Daten in nur einer Gruppe von Parametern, während der Großteil von 28 % (47 Observatorien) in 2 Gruppen Daten erheben. Ebenfalls

häufig werden 3 und 4 Parametergruppen erfasst, dies ist der Fall in 20 bzw. 19 Observatorien. In 15 Observatorien werden 5 unterschiedlichen Gruppen von Parametern erhoben, in 11 Observatorien sogar Daten zu allen 8 Parametergruppen.

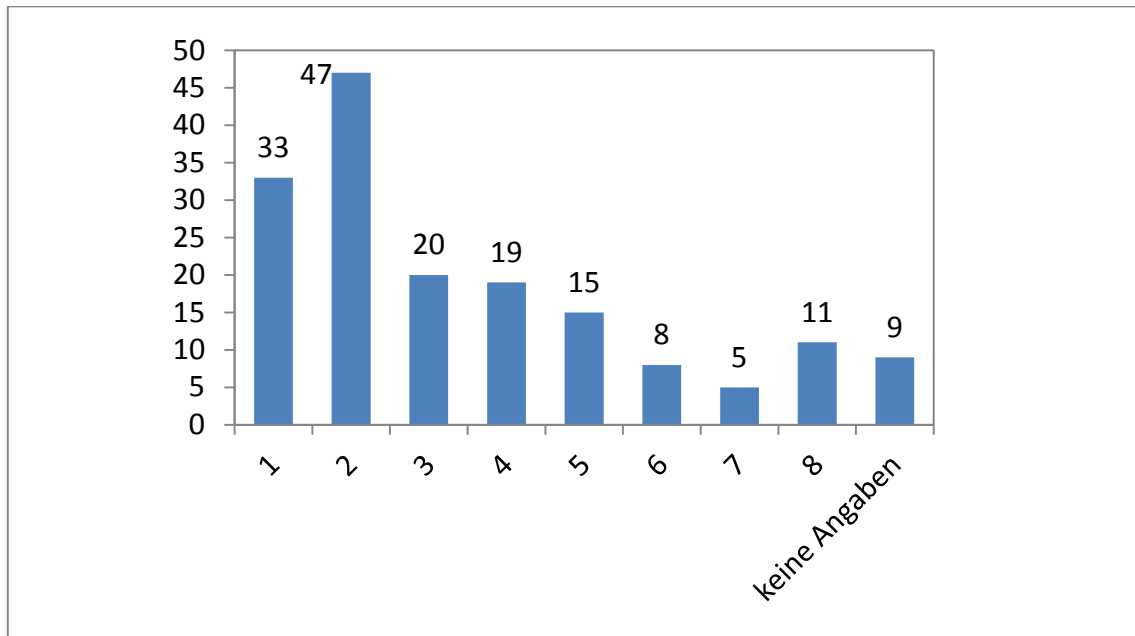


Abb. 7: Anzahl der Parametergruppen pro Observatorium

2.6 Experimente und Kampagnen

Wie Abb. 8 zeigt, finden in einem großen Teil der erfassten Observatorien, nämlich in 126 bzw. 75,4 % aller Observatorien, regelmäßig Messkampagnen statt. Auch Experimente wurden in 87 Observatorien (52,1 %) bereits durchgeführt. Sie spiegeln die Vielfalt der einzelnen Observatorien wider. Um einen Überblick über die Bandbreite an Experimenten zu geben, seien hier als Beispiele aufgeführt: geophysikalische Messkampagnen, beispielsweise mit Georadar, Freilandexperimente unter erhöhtem atmosphärischen CO₂-Gehalt, Versuche zur Messung der Energiebilanz, Tracerexperimente, Lysimeterexperimente, Waldumbaumaßnahmen, pflanzenbauliche Versuche oder ozeanographische Messkampagnen. 53 Befragte geben an, dass in ihren Observatorien bisher keine Experimente durchgeführt wurden.

Die Angaben für zukünftig geplante Experimente fallen nicht so deutlich aus: 69 Observatorien geben an, Experimente zu planen, dabei wollen viele von ihnen die bereits durchgeführten Experimente weiterführen. 48 Observatorien haben bisher keine Experimente geplant, 49 Befragte geben keine Auskunft über bevorstehende Experimente.

Mobile Messsysteme, die gegebenenfalls auch an anderen Standorten einer zukünftigen nationalen Forschungsplattform eingesetzt werden könnten, sind in 48 Observatorien

(28,7%) vorhanden. Diese beinhalten geophysikalische Messsysteme wie Ground Penetrating Radar (GPR) und Electromagnetic Induction (EMI) Geräte, Fernerkundungssensoren wie LiDAR und das Polarimetric L-band Multibeam Radiometer (PLMR), mobile Eddy Covariance-Stationen, mobile Bodensensoren und Grundwasserprobensysteme und mobile Niederschlagssammler. 53,9 % (90 Observatorien) geben an, nicht über mobile Messsysteme zu verfügen.

Ein großer Teil, nämlich 114 oder 68,3 % der Observatorien verfügt aber über eine zentrale Serviceeinrichtung, viele davon sind Zentral- und Analytiklabore. Oft wurden auch Probenbanken und -archive und Datenbanken erwähnt. Nur 23 Befragte geben an, keine Serviceeinrichtung zu besitzen.

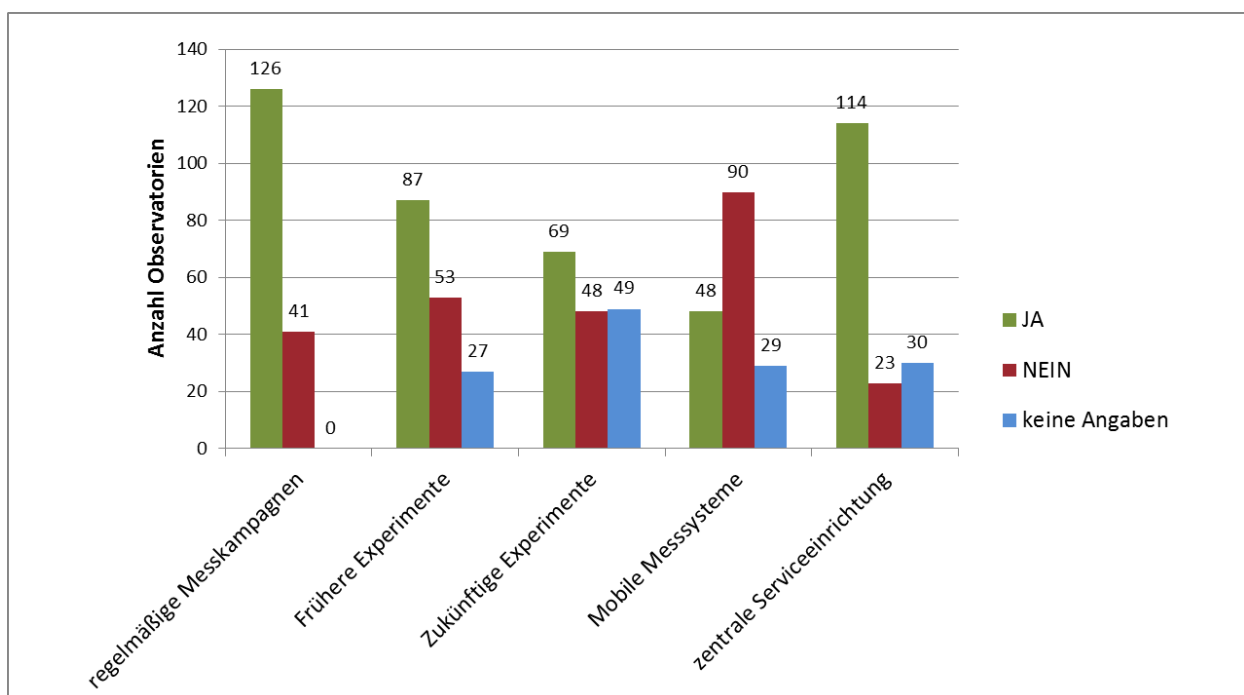


Abb. 8: Messkampagnen, Experimente und Serviceeinrichtungen in den Observatorien

2.7 Einbindung in Netzwerke

Die Umfrage zeigte deutliche Unterschiede bei der Einbindung der erfassten Observatorien in Forschungsnetzwerke. Wie Abb. 9 zeigt, gehören 93 Observatorien, das sind 55,7 % der an der Umfrage teilnehmenden Observatorien, mindestens einem Netzwerk an. Der größte Teil davon (43) arbeitet innerhalb eines oder mehrerer nationaler Netzwerke, während 26 Observatorien ausschließlich Mitglieder von internationalen Netzwerken sind. Immerhin 24 Observatorien gehören sowohl nationalen als auch internationalen Netzwerken an. Für 28 Observatorien gibt es zu dieser Frage keine Angaben. Die in den Antworten am häufigsten

genannten Netzwerke sind LTER mit 15 Nennungen, TERENO mit 13 Anführungen, ICP Forests mit 7, ICOS mit 6 und CZEN mit insgesamt 5 Nennungen. Bei der Interpretation dieser Zahlen ist allerdings zu beachten, dass die Antwort zu dieser Frage über ein Textfeld erfolgte, womit die Angabe eines bestimmten Netzwerkes nicht zwingend gefordert war.

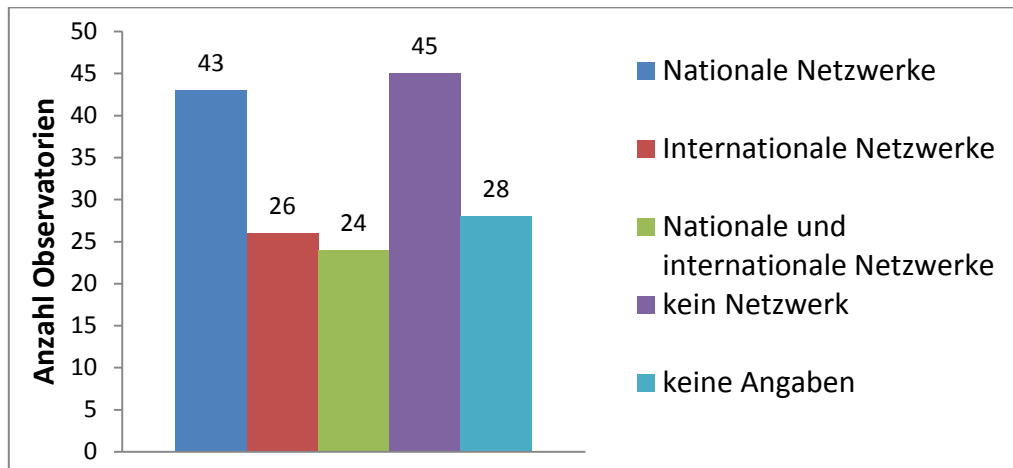


Abb. 9: Einbindung in nationale und internationale Netzwerke

2.8 Messzeiträume

Abb. 10 zeigt die Anzahl der Observatorien, die in einem bestimmten Zeitabschnitt eingerichtet wurden, in wie vielen die Messungen bereits wieder beendet wurden, und ob das Ende des Beobachtungszeitraums bereits abgeschätzt werden kann. Die Umfrage wurde im Jahr 2015 durchgeführt weshalb aus dieser zeitlichen Perspektive alle Entwicklungen ab dem Jahr 2016 in der Zukunft liegen. Das am Längsten operierende Observatorium der Umfrage ist die Klimastation Hohenheim mit einem Beginn der Messungen im Jahr 1878. Ein Ende der Messungen in Hohenheim ist nicht geplant. Fünf weitere Observatorien wurden in der Zeit zwischen 1900 und 1950 eingerichtet. Davon hat ein Observatorium die Messungen bereits eingestellt, für ein Observatorium war das Ende der Beobachtungszeit zwischen 2016 und 2020 geplant und eine dritte wird ihre Messungen voraussichtlich nach 2030 beenden. Für die restlichen Observatorien, die zwischen 1900 und 1950 eingerichtet wurden, wurde kein Endzeitpunkt für die Beobachtung angegeben. Die größte Anzahl an Observatorien, nämlich 39, wurde in den Jahren zwischen 1990 und 2000 eingerichtet, allerdings wurden die Messungen an 11 dieser Observatorien bereits beendet. Wenn auch die Zahl der neu eingerichteten Observatorien zwischen 2000 und 2010 und seit 2010 nicht mehr so hoch ist wie in den 1990er Jahren, ist die Zahl mit jeweils 34 und 23 neuen Observatorien immer noch deutlich höher als vor den 1990er Jahren. Von den 133 Observatorien mit Angabe der Messzeiträume, haben 35 Observatorien einen begrenzten Messzeitraum, wobei 24

Observatorien bis mindestens 2030 und darüber hinaus laufen werden. Die Mehrzahl von 69 Observatorien hat derzeit kein geplantes Ende der Messungen. 29 Observatorien hingegen mussten den Betrieb bis Anfang 2016 einstellen, wobei bei 12 der 29 kurzfristig stillgelegten Observatorien eine baldige Weiterführung der Messungen geplant ist. Diese kurzfristig stillgelegten Observatorien wurden auch in der Umfrage berücksichtigt, weil sie für die Umfrage bereits vorhandene Daten, den Rahmen und das Potential der in Deutschland vorhandenen Forschungsinfrastruktur terrestrischer Observatorien abbilden.

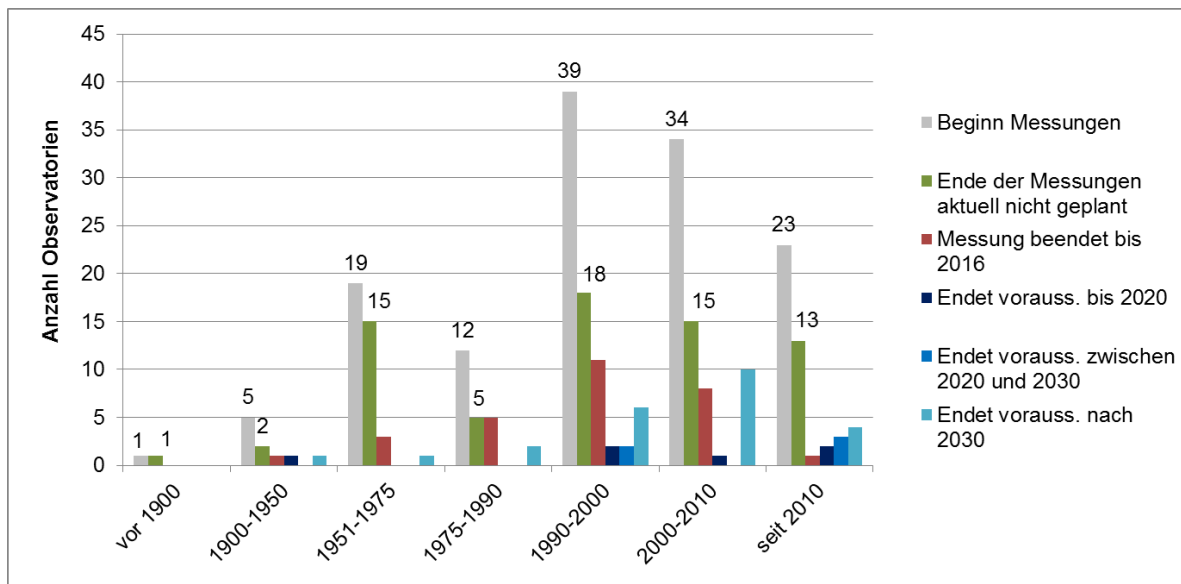


Abb. 10: Messzeiträume in den Observatorien

2.9 Finanzierung

Tab. 2 zeigt die Art der Finanzierung der erfassten Observatorien. Der größte Teil mit 78 Observatorien wird zu 100 % durch Grundmittel finanziert. Ein weiterer großer Anteil von 33 Observatorien wird durch eine Mischung aus Grund- und Drittmittel finanziert. Eine reine Finanzierung aus Drittmitteln ist dagegen eher selten und nur in 9 der erfassten Observatorien der Fall. Drittmittel werden häufig von DFG und BMBF bereitgestellt. Insgesamt 15-mal wurde angegeben, dass das Observatorium ganz oder teilweise durch andere Arten der Finanzierung unterhalten wird. Diese bestehen zum Beispiel aus Finanzierung aus privater Hand, aus Auftragsforschung oder aus Geldern des Bundes auf Basis einer Entgeltordnung wie des Grundwasserentnahmeentgelts.

Tab. 2: Art der Finanzierung in den Observatorien. Anzahl und % Anteil beziehen sich auf die Observatorien

Art der Finanzierung	Anzahl	% Anteil
100 % grundfinanziert	78	46.7
100% Drittmittel	9	5.4
100% andere	10	6.0
Grundfinanziert + Drittmittel	33	19.8
Grundfinanziert + Drittmittel+ andere	2	1.2
Grundfinanziert + andere	2	1.2
keine Angaben	33	19.8

2.10 Nutzung der in den Observatorien erhobenen Daten

Abb. 11 beleuchtet einige Aspekte zur Nutzung der in den erfassten Observatorien gesammelten Daten. Die Daten von 94 Observatorien, und damit von 56,3 % aller erfassten Observatorien, werden für die Modellierung verwendet. Dabei kommen vor allem Wasserhaushalts- und andere hydrologische Modelle, Atmosphären- und Klimamodelle, Landoberflächenmodelle, Ökosystemmodelle, Pflanzenwachstums- und Photosynthesemodelle und SVAT-Modelle zum Einsatz. Auch für die Modellierung des Permafrostes, des Kohlenstoffaustauschs oder von anderen Spurenstoffen werden in den Observatorien gesammelte Daten verwendet.

Nur eine geringe Anzahl von 31 Observatorien gibt an, in Fernerkundungsprogramme eingebunden zu sein. Zu diesen Programmen zählen unter anderem die ESA-Missionen Sentinel1 und Sentinel2, TerraSAR-X und Tandem-X, SWARM und SMOS, sowie die NASA Missionen MODIS, GRACE und SMAP. Die meisten der Befragten, die angeben in Fernerkundungsprogramme eingebunden zu sein, sind an mehr als einem Projekt beteiligt.

Eine nur etwas größere Zahl von 42 Observatorien nutzt regelmäßig Fernerkundungsdaten. Diese beinhalten vor allem Digitale Höhenmodelle, Luftbilder und Vegetationsparameter wie Blattflächenindex und NDVI. Häufig werden auch die Daten der oben genannten Satellitenmissionen verwendet.

Sozio-ökonomische Informationen werden nur in 28 Observatorien (16,7 %) gesammelt, während 104 Observatorien angeben keine derartigen Informationen aufzuzeichnen. Die gesammelten sozio-ökonomischen Informationen beinhalten vor allem Managementdaten von bewirtschafteten Ökosystemen wie landwirtschaftlichen Standorten, Grünland und Wald, und pflanzenbauliche und Holzerntemaßnahmen. Auch Untersuchungen zu Vermarktung und Akzeptanz von Agrarprodukten und Daten zum Fischfang werden in den Antworten zu dieser Frage erwähnt.

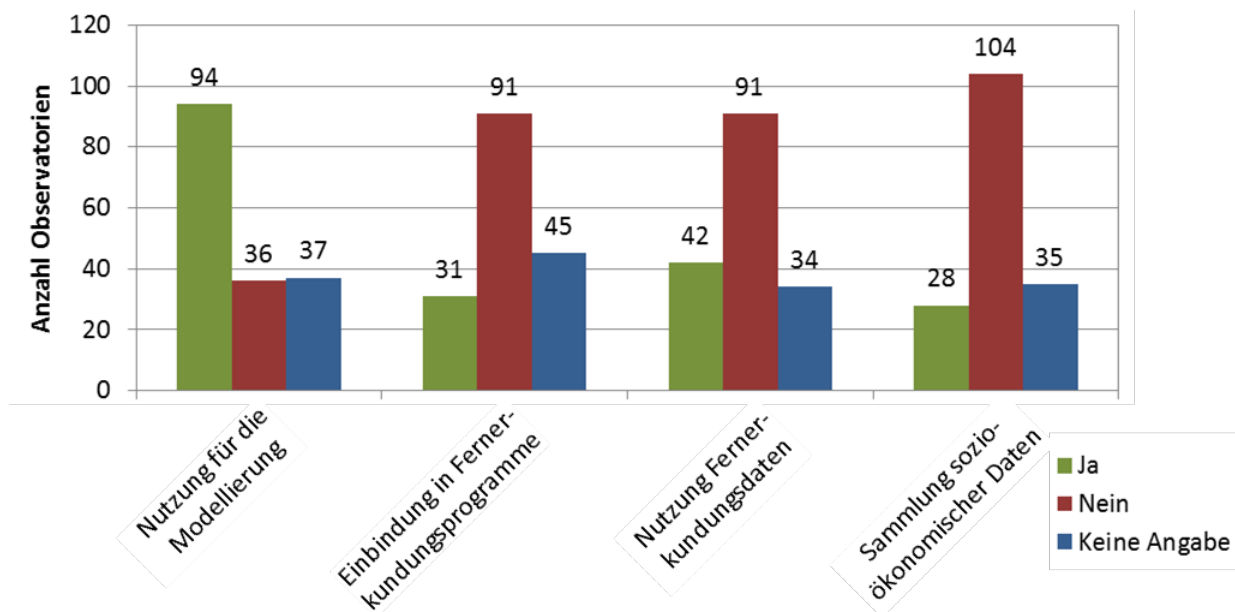


Abb. 11: Nutzung der in den Observatorien gesammelten Daten durch Modellierung und Fernerkundung, Sammlung von sozio-ökonomischen Daten

3 Verfügbarkeit und Qualität von Daten

3.1 Datenzugang

Um einen Austausch der Daten zwischen unterschiedlichen Forschungseinrichtungen und damit eine effiziente Datennutzung zu gewährleisten, ist die öffentliche Verfügbarkeit der Daten ein wichtiger Aspekt für jedes Observatorium. Wie Abb. 12 zeigt, stellen fast alle erfassten Observatorien (insgesamt 143, bzw. 86 %) ihre Daten grundsätzlich öffentlich zur Verfügung. Davon wiederum ist knapp die Hälfte (35 % aller Observatorien, bzw. 59 Observatorien) durch eine Zugangskontrolle beschränkt oder nur auf Anfrage erhältlich. Ein etwas kleinerer Anteil von 25 % der verfügbaren Daten ist über das Internet erhältlich. 13 Observatorien erheben ihre Daten nur zur Eigennutzung, ohne diese für mögliche auswertige Analysen verfügbar zu machen. Die Beantwortung dieser Frage erfolgte in der Umfrage über ein Textfeld, was zur Folge hat, dass die Antworten sehr unterschiedlich ausfielen. Die Angaben insbesondere zu „verfügbar über Zugangskontrolle oder Anfrage“ und „im Internet verfügbar“ sind nur als Richtwerte zu verstehen, da nach diesen Kategorien nicht explizit gefragt wurde und deshalb möglicherweise nicht alle Befragten darauf eine erschöpfende Antwort gegeben haben. Auch kann ein Observatorium in den Zahlen zu beiden Kategorien vorkommen.

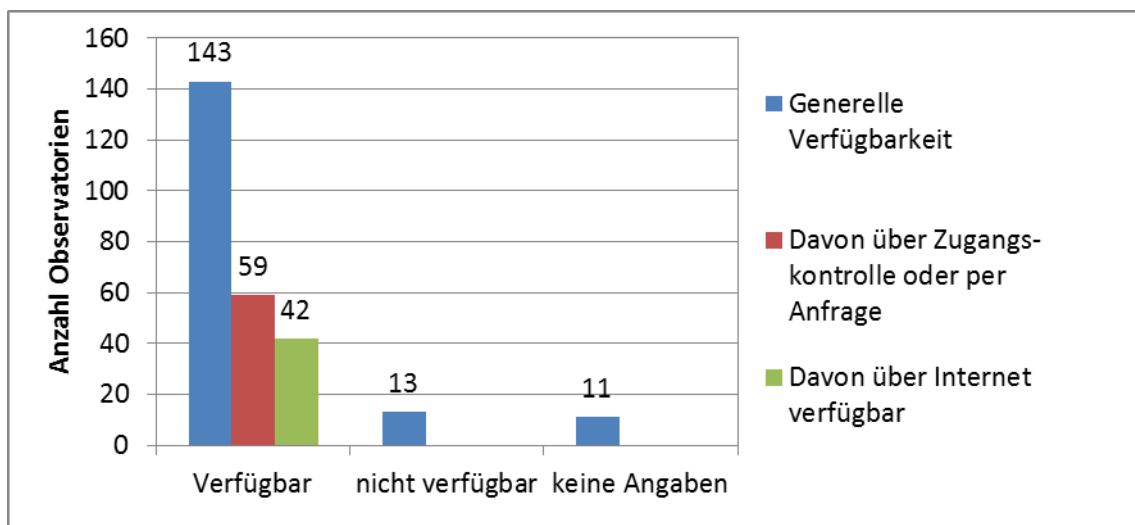


Abb. 12: Datenverfügbarkeit in den Observatorien

3.2 Qualitätskontrollen

Wie Tab. 3 zeigt, werden Qualitätskontrollen in einem Großteil der Observatorien, nämlich in 68,3 % aller erfassten Observatorien, durchgeführt. Davon wiederum geben 34,7 % der Befragten an, nach einem internen oder offiziellen Standard zu prüfen. Die verwendeten offiziellen Standards sind dabei sehr unterschiedlich, unter anderem werden DIN-Normen, GLP oder WMO-Vorgaben genannt. Auch Vorgaben von Forschungsnetzwerken wie ICOS, TERENO oder ICP Forests werden als Grundlage für die Qualitätsprüfung genannt. Zu der Prüfung ohne Standard gehören unter anderem Plausibilitätsprüfungen, visuelle Kontrolle und der Vergleich mit anderen Messungen. 16,7 % der Observatorien führen keine Qualitätskontrollen durch und 3,0 % der Observatorien kontrollieren die Qualität nur eines Teils ihrer Daten. Da auch dieser Punkt als offene Frage formuliert war, sind auch hier die Zahlen nur unter Vorbehalt zu verstehen, da die Antworten wiederum sehr unterschiedlich ausfielen und damit schwer quantifizierbar waren.

Tab. 3: Qualitätskontrolle in den Observatorien

Qualitätskontrolle	Anzahl Observatorien	% Observatorien
wird durchgeführt	114	68,3
nicht durchgeführt	27	16,7
teilweise durchgeführt	5	3,0
keine Angaben	21	12,6

3.3 Datenspeicherungsformate

Tab. 4 zeigt die Art der Datenspeicherung in den erfassten Observatorien. Danach sind die Daten von 131 Observatorien (78,4 % aller erfassten Observatorien) über eine Datenbank verfügbar. In 52 Observatorien sind die Daten darüber hinaus noch in anderen Formaten verfügbar: in 20 als Text oder Tabelle, in 5 als GIS-Layer, und in 27 in allen zuvor genannten Formaten. In 26 Observatorien sind die Daten nur als Textdatei oder Tabelle erhältlich, in 5 als Textdatei, Tabelle oder GIS-Datei. Nur 3 der an der Befragung teilnehmenden Observatorien halten die Daten in keinem dieser Formate zur Verfügung und weichen stattdessen auf ASCII-, Seedlink- oder NetCDF-Dateien aus.

Tab. 4: Formate der Datenspeicherung in den Observatorien

Datenform	Anzahl Observatorien	% Observatorien
Datenbank	79	47,3
Text / Tabelle	26	15,6
Text / Tabelle, GIS	5	3,0
Text / Tabelle, Datenbank	20	12,0
GIS, Datenbank	5	3,0
Text / Tabelle, GIS, Datenbank	27	16,2
nur andere Formate	3	1,8
keine Angaben	2	1,2

4 Fallstudie: Observatorien für ein deutsches Forschungsnetzwerk

Im Folgenden werden beispielhaft mögliche Kriterien erstellt, um ein System-orientiertes deutschlandweites Forschungsnetzwerk bereits bestehender Observatorien aufzubauen:

- (1) Messung mindestens in den Kompartimenten Boden, Vegetation und Atmosphäre
- (2) regelmäßige Nutzung der gemessenen Daten für die Modellierung
- (3) generelle öffentliche Verfügbarkeit der Daten
- (4) regelmäßige Qualitätskontrolle (unbeachtet dessen, ob ein Standard zur Prüfung verwendet wird oder nicht) und
- (5) Speicherung der Daten in einer Datenbank.

Basierend auf diesen Kriterien und der vorangegangenen Analyse erfüllen insgesamt 21 der erfassten Observatorien diese Kriterien. Sie sind in Tab. 5 aufgelistet. Während sich 18 der Observatorien innerhalb Deutschlands befinden, liegen 3 dieser Observatorien im Ausland (in Tab. 5 hellblau hinterlegt). Weiterhin ist in Tab. 5 der Beginn des Beobachtungs-

zeitraumes für die jeweiligen Observatorien angegeben. Die jüngsten Observatorien sind demnach das Observatorium Integrated Carbon Observation System (ICOS) und die Forschungsstation Samoylov, die beide 2011 gegründet oder eingerichtet wurden. Damit wird deutlich, dass für jedes der hier ausgewählten Observatorien mindestens 5 Jahre an Daten vorliegen sollten.

Tab. 5: Die Kriterien erfüllende Observatorien. Hellblau hinterlegt sind Standorte außerhalb Deutschlands, grau hinterlegt sind Netzwerke von Observatorien ohne Koordinatenangabe.

Titel	Institution	Beginn Beobachtungen
DWD Braunschweig	DWD - Zentrum für Agrar-meteorologische Forschung	1952
TERENO Observatorium Eifel/Niederrheinische Bucht	Forschungszentrum Jülich	2008
TERENO Observatorium "Harz/ Mitteldeutsches Tiefland"	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig UFZ	2008
Forstliches Umweltmonitoring	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland	1990
AgroScapeLab Quillow	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.	1999
Nationalpark Bayerischer Wald	Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald	1970
Forsthydrologisches Forschungsgebiet Krofdorf	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt	1970
Großlysimeter Colbitz	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt	1972
Intensives Umweltmonitoring Nordwestdeutschland	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt	1966
Lange Bramke	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt	1948
Solling	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt	1966
Rhein-Main-Observatorium	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung	2001
Integrated Carbon Observation System (ICOS)	Thünen Institut fuer Agrarklimaschutz	2012
Intensives Waldmonitoring	Thünen Institut, Institut für Waldökosysteme	1990
Ankerstation Oberbärenburg	TU Bergakademie Freiberg	1985
TU Dresden Cluster - Flussmessungen (TUD-CF)	TU Dresden, Meteorologie	1996
Kraichgau	Universität Hohenheim	2009
Schwäbische Alb	Universität Hohenheim	2009
Bayelva-Spitsbergen	Alfred-Wegener-Institut	1998
Forschungsstation Samoylov	Alfred-Wegener-Institut	2011
Los Baños, Philippinen	KIT, IMK-IFU	1998

Wie in Abb. 13 zu sehen, sind die häufigsten in den Observatorien überwachten Kompartimente (abgesehen von Boden / Sedimente, Vegetation und Atmosphäre, die für die Erfüllung der Kriterien alle beobachtet werden müssen) Grundwasser (11 Observatorien), Fauna und Fließgewässer. Auch alle anderen abgefragten Kompartimente werden in mindestens einem Observatorium überwacht, 4 Observatorien messen darüber hinaus in anderen als den abgefragten Kompartimenten.

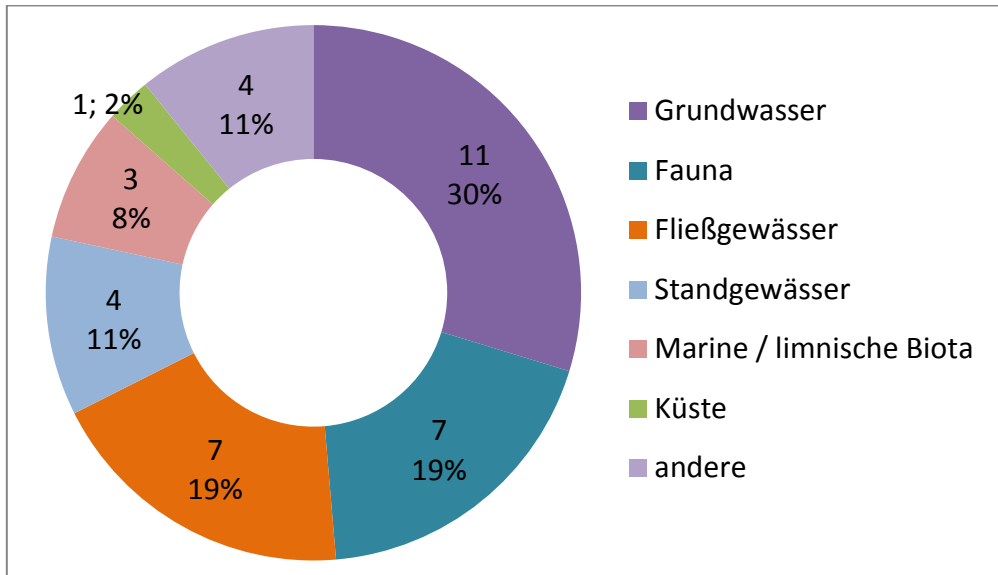


Abb. 13: Beobachtete Kompartimente in den beispielhaft ausgewählten Observatorien

Die Anzahl der in den ausgewählten Observatorien überwachten Kompartimente ist mindestens 3 (Abb. 14), da dies von den vorher definierten Kriterien so vorgegeben wurde. Jedoch überwachen die meisten der Observatorien noch mehr Kompartimente, am häufigsten (in 6 Observatorien) werden 4 Kompartimente überwacht, in immerhin 4 Observatorien werden sogar 8 Kompartimente überwacht.

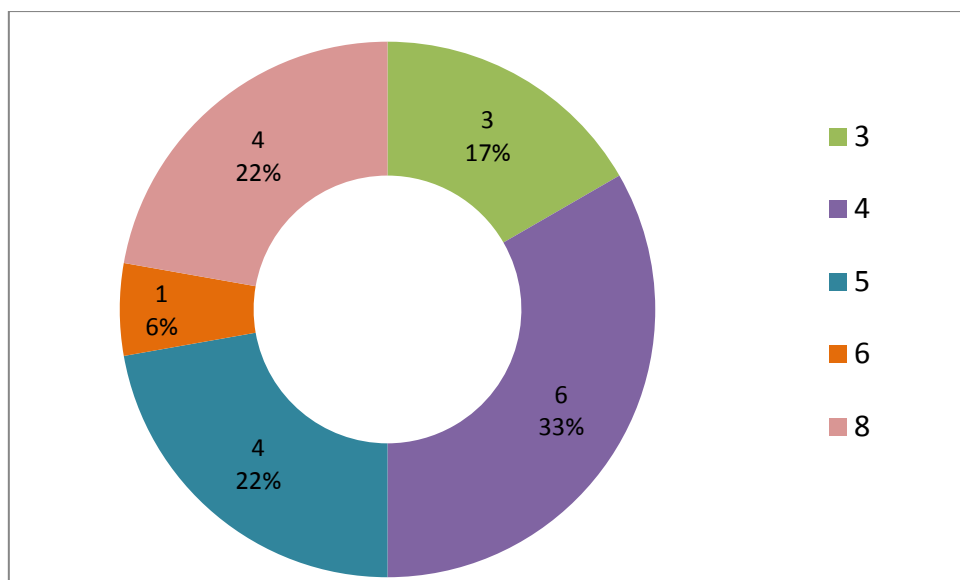


Abb. 14: Anzahl der Kompartimente pro Observatorium für die beispielhaft ausgewählten Observatorien

Abb. 15 zeigt die Lage der Observatorien nach Anzahl ihrer Kompartimente. Auch hier zeigt sich eine gute Streuung der Observatorien unterschiedlicher Größen über Deutschland. Die Abbildung zeigt, dass die vorgeschlagenen Kriterien und das aus der Umfrage resultierende Forschungsnetzwerk bereits eine prinzipiell ausreichende deutschlandweite Basis an Observatorien bieten können, um ein systemorientiertes Forschungsnetzwerk aufzubauen. Dennoch soll diese Studie nur als Beispiel verstanden werden, weil dieses Netzwerk allein auf Grundlage der Umfrage erstellt wurde und einzelne bereits bestehende Netzwerke in der Grafik nicht dargestellt sind.

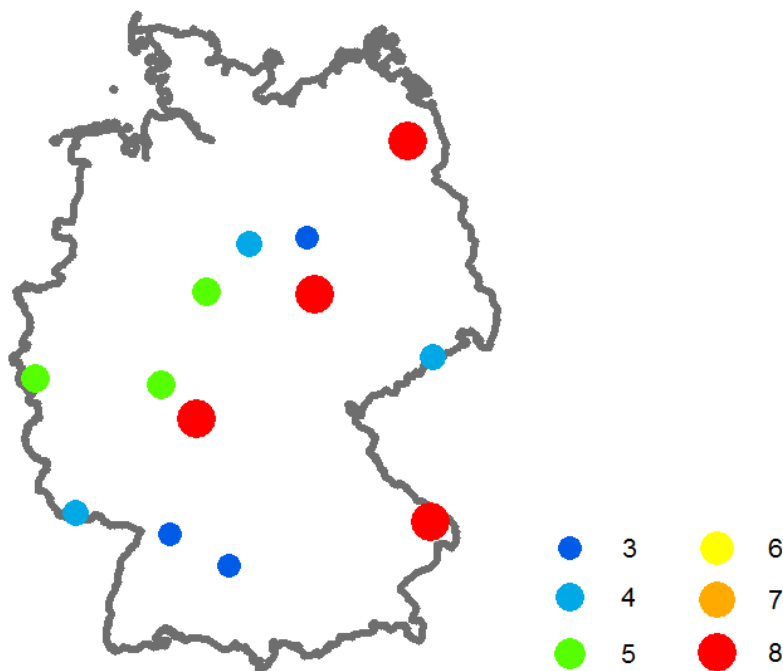


Abb. 15: Lage der nach den Kriterien ausgewählten Observatorien mit Anzahl der Kompartimente exklusive der Observatorien-Netzwerke (Tab. 5).

Weiterhin zeigt die Umfrage, dass die anhand der vorgeschlagenen Kriterien ausgewählten Observatorien mindestens 5 Jahre an Messdaten bieten, einen guten Überblick über die deutschen Naturräume ermöglichen und eine große Auswahl an Landnutzungsarten und Kompartimenten überwachen.

Anhang

A1 Umfrageaufbau

A2 Liste der teilnehmenden Observatorien

A3 Liste der Observatorien ohne Koordinatenangaben

A4 Liste der erfassten Observatorien im Ausland

[Impressum](#)

Gespeicherte Sitzung laden

Falls Sie eine vorhergehende Sitzung weiter bearbeiten möchten, selektieren und laden Sie diese mit Hilfe der Auswahlbox und des "Laden"-Schaltelements. Durch anschließendes Betätigen des "Start"-Schaltelements gelangen Sie zur ersten Seite der Umfrage und können Ihre bereits vorhandenen Angaben nochmals editieren.

Sitzung:

Erläuterungen zur Umfrage

Zum Verständnis der Strukturierung der Umfrage und der verwendeten Nomenklatur beachten Sie bitte folgende Punkte:

- Sie können die aktuelle Sitzung in jedem Teilschritt durch Betätigen des "Speichern"-Schaltelements speichern und zu einem späteren Zeitpunkt weiterbearbeiten.
- Ein Observatorium besteht aus einer oder mehreren Messplattformen, wobei ein Observatorium z.B. einem der folgenden Begriffe entspricht:
 - Feldstandort
 - Einzugsgebiet
 - Klimastation
 - Lysimeterstation
 - Satellit (SMOS)
 - Wetterradar
 - Grundwasserpegel

Eindeutiger Name der zu erfassenden Daten

Geben Sie einen eindeutigen Namen an.

Name:

Art und Eigenschaften des Observatoriums (Beobachtung und Experimentell), an denen Daten erhoben werden.

1. Art des Observatoriums

- Standort ☐
 Einzugsgebiet ☐
 Region ☐
 Land ☐
 Bund ☐

2. Eigenschaften des Observatoriums

Größe [ha]

Länge [Dezimalgrad des Zentroids] Optional

Breite [Dezimalgrad des Zentroids] Optional

Höhe[m ü. NN]

Beginn der Beobachtung [YYYY]

Ende der Beobachtung [YYYY]

Naturraum (BFN)

- o Eine Karte mit den Naturräumen Deutschlands finden Sie [hier](#)
- o Falls Sie mehr als eine Auswahl treffen möchten, halten Sie die Strg-Taste gedrückt und selektieren Sie mit der Maus die gewünschten Zeilen.

Norddeutsches Tiefland
 Marschland
 Mecklenburgisch-Vorpommersches Küstengebiet
 Nord(ost)deutsche Seenplatte
 Norddeutsches Heide-, Geest-, Hügel- und Flachland
 Lössböden
 Mittelgebirgsschwelle
 Rheinisches Schiefergebirge
 Niedersächsisch-Hessisches Bergland
 Niedersächsisches Bergland

Anzahl der Messplattformen

Spezifische Informationen des Observatoriums (1)

1. Landnutzung (bitte die Nutzung ankreuzen).

☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Acker	Grünland	Sonderkultur	Nadelwald	Laubwald	Mischwald	Standgewässer	Fließgewässer	Küste	Meer	Urban	Andere						

2. Bitte selektieren Sie die Kompartimente an denen Messungen durchgeführt werden.

☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Boden/Sediment	Grundwasser	Vegetation	Fauna	Marine/limnische Biota	Fließgewässer	Standgewässer	Marine Gewässer	Atmosphäre	Andere								

3. Welche Parameter werden bei der Beobachtung untersucht? Spezifizieren Sie bitte hier nur die unten aufgeführten allgemeinen Kategorien der gemessenen Parameter:

Parameter	Daten erhoben	Automatisierte Messung	Beginn d. Messung	Ende d. Messung	Anzahl der Messstellen
Hydrologische Parameter	☐	☐			
Bodenparameter	☐	☐			
Meteorologische/Atmosphäri	☐	☐			
Gewässer und hydrogeologis	☐	☐			
Management Parameter	☐	☐			
Biotische Parameter	☐	☐			
Geochemische Parameter	☐	☐			
Geophysikalische Parameter	☐	☐			

Spezifische Informationen des Observatoriums (2)

1. Kurzbeschreibung des Observatoriums: Max. 500 Zeichen

2. Ist das Observatorium Teil von Netzwerken? Falls Ja, spezifizieren Sie bitte ob es sich um nationale und/oder internationale Netzwerke handelt: Max. 500 Zeichen

3. Wurden Experimente durchgeführt? Wenn Ja, welche. Bitte kurz beschreiben. Max. 500 Zeichen

4. Sind Experimente in die Zukunft geplant? Wenn Ja, welche. Bitte kurz beschreiben. Max. 500 Zeichen

5. Werden regelmäßig Messkampagnen durchgeführt?

Ja ☐

6. Verfügt das Observatorium über mobile Mess-Systeme, die ggf. auch an anderen Standorten einer zukünftigen nationalen Forschungsplattform eingesetzt werden könnten? Wenn Ja, bitte spezifizieren Sie Ihre Angabe.

7. Gibt es zentrale Serviceeinrichtungen (Analytik, Probenbank, Sammlungen)? Wenn ja, bitte spezifizieren Sie Ihre Angabe.

8. Werden Daten für Modellierungsarbeiten genutzt? Wenn ja, welche Modelle kommen zum Einsatz?

9. Ist der Standort in Fernerkundungsprogramme eingebunden? Wenn ja, bitte spezifizieren Sie Ihre Angabe.

10. Nutzen Sie regelmäßig Fernerkundungsdaten?

11. Werden sozio-ökonomische Informationen gesammelt oder bereitgestellt?

12. Wie ist der Betrieb des Observatoriums gesichert? (Anteile in %. Falls Mittel von Dritten bereitgestellt werden, geben Sie diese prozentual mit einer kurzen Beschreibung an.)

Grundfinanziert:

Drittmittel:

Beschreibung:

Andere:

Beschreibung:

Zurück

Weiter

Speichern

Adresse

Email

Internetadresse

7. Webseite mit Informationen über das Observatorium

8. Bitte nennen Sie die wichtigsten Publikationen, über die Daten und Information des Observatoriums verfügbar sind (Bis zu 5)

A2 Liste der teilnehmenden Observatorien

Titel	Institution
Forstmeteorologische Messstelle	Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Umweltmeteorologie
HU_ADTI_Berlin-Dahlem	Albrecht Daniel Thaer - Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften an der HU Berlin
Dallmann-Labor	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Drescher Ice Camp	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Forschungsstation Kohnen	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Forschungsstation Samoylov	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Neumayer Station III	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Bayelva-Spitsbergen	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Ökologisch Botanischer Garten	Bayceer, Universität Bayreuth
Voitsumra	Bayceer, Universität Bayreuth
Waldstein	Bayceer, Universität Bayreuth
BEO	Biodiversity Exploratories Office (BEO)
AgroforstForst	BTU Cottbus-Senftenberg
Hühnerwasser	BTU Cottbus-Senftenberg, Forschungszentrum Landschaftsentwicklung und Bergbaulandschaften
Messnetz Radiologie	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, WS 14
DWD Lindenberg	Deutscher Wetterdienst
DWD Messnetz	Deutscher Wetterdienst
DWD Weißenstephan	Deutscher Wetterdienst - Agrarmeteorologische Forschung und Beratung - NL Weißenstephan
DWD Braunschweig	Deutscher Wetterdienst - Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung Braunschweig
Feldstandort Ehlers	Eberhard-Karls-Universität Tübingen
Merklingen	Fachhochschule Südwestfalen
TERENO Observatorium Eifel/Niederrheinische Bucht	Forschungszentrum Jülich
Umweltprobenbank / Bornhöveder Seengebiet	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / BR Pfälzer Wald	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / BR/NP Berchtesgaden	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / Dübener Heide	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / NP Bayerischer Wald	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / NP Harz	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt

Umweltprobenbank / Oberbayerisches Tertiärhügelland	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / Saarländischer Verdichtungsraum	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / Solling	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Hainich CZO	Friedrich Schiller Universität Jena, Institut für Ökologie
Transekt	Friedrich Schiller Universität Jena, Institut für Ökologie
Bodenfeuchtemessnetz	Friedrich-Schiller Universität Jena
Berlin- Botanischer Garten	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Fasanenstraße	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Fichtenberg	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Funkturm	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Gatow	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Marzahn	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Müggelsee	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Pichelsdorf	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Planetarium Ost	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Tegeler See	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin Tempelhof	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin- Wannsee	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Berlin-Tegel-Forstamt	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Weideversuch	Georg-August-Universität Göttingen
Metaproteomics	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung
Fließgerinne UFZ Leipzig	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig UFZ
Isotopennetzwerk-Bode	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig UFZ
TERENO Observatorium "Harz/ Mitteldeutsches Tiefland"	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig UFZ
UFZ-HDG	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig UFZ
Deutsches Netzwerk für ökosystemare Langzeitforschung (LTER-D)	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig UFZ, Department Biozönoseforschung
Talsperrenobservatorium Rappbode (TOR)	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig UFZ, Department Seenforschung
Einzugsgebiet	Helmholtz Zentrum München
Klostergut Scheyern TERENO CZO	Helmholtz Zentrum München
JeanCharlesMunch	Helmholtz Zentrum München, BIOP
Boknis Eck Zeitserienstation	Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel GEOMAR
GEOMAR-Kiel	Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel GEOMAR
COSYNA - Coastal Observing System for Northern and Arctic Seas	Helmholtz-Zentrum Geesthacht
FE-Validation Demmin	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

GRACE	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
TERENO-NE	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
BDF_Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
HED_Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Luftmessnetz Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Wasser_MS_Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dahnsdorf	Julius Kühn-Institut
BN-Befallsdynamik	Julius Kühn-Institut für Pflanzenschutz in Obst- und Weinbau
FeldstandortWein	Julius Kühn-Institut für Rebenzüchtung Geilweilerhof
Feldstandort	Julius Kühn-Institut, Versuchsstation Groß Lüsewitz
KIT Observatorium	Karlsruher Institut für Technologie
Lackenberg	Karlsruher Institut für Technologie
Schechenfilz	Karlsruher Institut für Technologie
Höglwald	Karlsruher Institut für Technologie, IMK-IFU
Los Baños, Philippinen	Karlsruher Institut für Technologie, IMK-IFU
TERENO Prealpin/ Alpin	Karlsruher Institut für Technologie, IMK-IFU + Partner
Baumberge	kein offizieller Träger
Großlysimeter St. Arnold NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Grundwasserstandsmessnetz NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Durchfluss BB	Landesamt für Umwelt Brandenburg
Grundwasserstand BB	Landesamt für Umwelt Brandenburg
Wasserstand BB	Landesamt für Umwelt Brandenburg
Gewässerchemie	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Gewässerökologie	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Grundwassermessstellen (Güte) RP	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Grundwassermessstellen (Menge) RP	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Pegel RP	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Pegelmessnetz RP	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Seen in R.P.	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Bodendauerbeobachtung	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
EUA-Messnetz	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Forstliches Umweltmonitoring	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Grundwasseraltersdatierung Saarland	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Messnetz WRRL-Grundwasser (Qualität)	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Messnetz WRRL-Grundwasser (Quantität)	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Boden-Dauerbeobachtung BB	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg

ÖÜB Flusslandschaft Elbe Brandenburg	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Abteilung Großschutzgebiete
ÖÜB Schorfheide-Chorin	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Abteilung Großschutzgebiete
ÖÜB Spreewald	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Abteilung Großschutzgebiete
LUNG-Abt3-GW	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
LUNG-Abt3-OFL	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
LUNG-Abt3-PG	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
LUNG-Abt6-RAD	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Bundesamt für Strahlenschutz
Automatisches Wassergütemessnetz	Landesamt für Umweltschutz Brandenburg, Referat T14
Luftgütemessnetz	Landesamt für Umweltschutz Brandenburg, Referat T14
Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Grünland	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Wald	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Bodendauerbeobachtung BW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Fließgewässer	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Schadstoffmonitoring	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Stechlinsee und Seelabor	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei
IPK-Gatersleben	Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung
Juliusruh	Universität Rostock, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik
Forschungsstandort Marquardt	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Müggelsee-Messstation	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei
Beerenbusch	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.
AgroScapeLab Quillow	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.
Forschungsstation ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Forschungsstation Dedelow
Lysimeteranlage Paulinenaue	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Müncheberg
Nationalpark Bayerischer Wald	Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald
Forsthydrologisches Forschungsgebiet Krofdorf	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Großlysimeter Colbitz	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Intensives Umweltmonitoring Nordwestdeutschland	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Lange Bramke	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Solling	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Biotopkartierung Frankfurt/Main	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung

Monitoring_Mongolia	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung
Rhein-Main-Observatorium	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung
FACE	Thünen Institut für Biodiversität
Öko-Systemvergleich Trenthorst	Thünen Institut für Ökologischen Landbau
Integrated Carbon Observation System (ICOS)	Thünen Institut für Agrarklimaschutz
Gebesee	Thünen Institut für Agrarklimaschutz
FG	Thünen Institut für Forstgenetik
Bundesweite Bodenzustandserhebung	Thünen Institut für Waldökosysteme
Bundeweite Waldzustandserhebung	Thünen Institut für Waldökosysteme
Intensives Waldmonitoring	Thünen Institut für Waldökosysteme
Ankerstation Oberbärenburg	TU Bergakademie Freiberg
Gründach_Austausch	TU Braunschweig, Institut für Geoökologie
TU Dresden- Wasserhaushaltsobservatorien (TUD-WHH)	TU Dresden Fakultät für Umweltwissenschaften Professur für Meteorologie
TU Dresden - Internationaler Phänologischer Garten Tharandt-Hartha (TUD-Phäno)	TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Professur für Meteorologie
TU Dresden Cluster - Flussmessungen (TUD-CF)	TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Professur für Meteorologie
TUM-CZO Otterbach	TU München
Viehhausen	TU München
Lehr- und Forschungsstation für pflanzenbauliche und gärtnerische Kulturen	Universität Bonn
Bodenwassermessnetz Alb	Universität Hohenheim
Bodenwassermessnetz Kraichgau	Universität Hohenheim
Eckartsweier	Universität Hohenheim
FACE_Hohenheim	Universität Hohenheim
Heidfeldhof	Universität Hohenheim
Ihinger Hof	Universität Hohenheim
Kleinhohenheim	Universität Hohenheim
Kraichgau	Universität Hohenheim
Mobile Lidar-Systeme	Universität Hohenheim
Oberer Lindenhof	Universität Hohenheim
Schwäbische Alb	Universität Hohenheim
Klimastation Hohenheim	Institut für Physik und Meteorologie, Universität Hohenheim
Luftstaubbmessungen	Universität Hohenheim, Institut für Physik und Meteorologie
Bodensee	Universität Konstanz, Limnologisches Institut
TMF	Universität Marburg, FB Geographie
Otto Klemm	Universität Münster
Kleyerdaten	Universität Oldenburg
ALOMAR	Universität Rostock, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik
IAP Kühlungsborn	Universität Rostock, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik

Jena Experiment	-
KULUNDA	-

A3 Liste der Observatorien ohne Koordinatenangaben

Titel	Institution
BEO	Biodiversity Exploratories Office (BEO)
AgroforstForst	BTU Cottbus-Senftenberg
Messnetz Radiologie	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, WS 14
DWD Messnetz	Deutscher Wetterdienst
DWD Weihestephane	Deutscher Wetterdienst - Agrarmeteorologische Forschung und Beratung - NL Weihestephane
Umweltprobenbank / Bornhöveder Seengebiet	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / BR Pfälzer Wald	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / BR/NP Berchtesgaden	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / Dübener Heide	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / NP Bayerischer Wald	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / NP Harz	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / Oberbayerisches Tertiärhügelland	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / Saarländischer Verdichtungsraum	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Umweltprobenbank / Solling	Fraunhofer-Institut, Umweltbundesamt
Transekt	Friedrich Schiller Universität Jena, Institut für Ökologie
Berlin- Funkturm	FU Berlin, Institut für Meteorologie
Weideversuch	Georg-August-Universität Göttingen
Metaproteomics	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ Leipzig
Deutsches Netzwerk für ökosystemare Langzeitforschung (LTER-D)	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ Leipzig, Department Biozönoseforschung
Einzugsgebiet	Helmholtz Zentrum München
JeanCharlesMunch	Helmholtz Zentrum München, BIOP
GRACE	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
TERENO-NE	Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
BDF_Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
HED_Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Luftmessnetz Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Wasser_MS_Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dahnsdorf	Julius Kühn-Institut
BN-Befallsdynamik	Julius Kühn-Institut für Pflanzenschutz in Obst- und Weinbau
KIT Observatorium	Karlsruher Institut für Technologie

TERENO Prealpin/ Alpin	Karlsruher Institut für Technologie, IMK-IFU + Partner
Durchfluss BB	Landesamt für Umwelt Brandenburg
Grundwasserstand BB	Landesamt für Umwelt Brandenburg
Wasserstand BB	Landesamt für Umwelt Brandenburg
Gewässerchemie	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Gewässerökologie	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Grundwassermessstellen (Güte) RP	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Grundwassermessstellen (Menge) RP	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Pegel RP	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Pegelmessnetz RP	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Seen in R.P.	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Bodendauerbeobachtung	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
EUA-Messnetz	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Grundwasseraltersdatierung Saarland	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Messnetz WRRL-Grundwasser (Qualität)	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Messnetz WRRL-Grundwasser (Quantität)	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Boden-Dauerbeobachtung BB	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg
LUNG-Abt3-GW	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg- Vorpommern
LUNG-Abt3-OFL	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg- Vorpommern
LUNG-Abt3-PG	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg- Vorpommern
LUNG-Abt6-RAD	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg- Vorpommern, Bundesamt für Strahlenschutz
Automatisches Wassergütemessnetz	Landesamt für Umweltschutz Brandenburg, Referat T14
Luftgütemessnetz	Landesamt für Umweltschutz Brandenburg, Referat T14
Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Grünland	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg
Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Wald	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg
Bodendauerbeobachtung BW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg
Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Fließgewässer	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg
Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Schadstoffmonitoring	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg
IPK-Gatersleben	Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung
Forschungsstation ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Forschungsstation Dedelow

Intensives Umweltmonitoring Nordwestdeutschland	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Lange Bramke	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Biotopkartierung Frankfurt/Main	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung
FACE	Thünen Institut
Öko-Systemvergleich Trenthorst	Thünen Institut
Integrated Carbon Observation System (ICOS)	Thünen Institut fuer Agrarklimaschutz
Gebesee	Thünen Institut für Agrarklimaschutz
FG	Thünen Institut für Forstgenetik
Bundesweite Bodenzustandserhebung	Thünen Institut für Waldökosysteme
Bundeweite Waldzustandserhebung	Thünen Institut für Waldökosysteme
Intensives Waldmonitoring	Thünen Institut, Institut für Waldökosysteme
Gründach_Austausch	TU Braunschweig, Institut für Geoökologie
TU Dresden- Wasserhaushaltsobservatorien (TUD-WHH)	TU Dresden Fakultät für Umweltwissenschaften Professur für Meteorologie
TU Dresden - Internationaler Phänologischer Garten Tharandt- Hartha (TUD-Phäno)	TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Professur für Meteorologie
TU Dresden Cluster - Flussmessungen (TUD-CF)	TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Professur für Meteorologie
Viehhausen	TU München
Lehr- und Forschungsstation für pflanzenbauliche und gärtnerische Kulturen	Universität Bonn
Bodenwassermessnetz Alb	Universität Hohenheim
Bodenwassermessnetz Kraichgau	Universität Hohenheim
Eckartsweier	Universität Hohenheim
Mobile Lidar-Systeme	Universität Hohenheim
Jena Experiment	-
KULUNDA	-

A4 Liste der erfassten Observatorien im Ausland

Titel	Institution
Forschungsstation Samoylov	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Forschungsstation Kohnen	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Drescher Ice Camp	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Dallmann-Labor	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Neumayer Station III	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Bayelva-Spitsbergen	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
Feldstandort Ehlers	Eberhard-Karls-Universität Tübingen
Los Banos Philippinen	Karlsruher Institut für Technologie, IMK-IFU
Monitoring_Mongolia	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung
TMF	Universität Marburg, FB Geographie
ALOMAR	Universität Rostock, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik
KULUNDA	

Anhang A.4

Bericht Umweltsystemtheorien: Publikations-Manuskript

Manuscript Number:

Title: Cross-disciplinary links in environmental systems science: current state and claimed needs identified in a meta-review of process models

Article Type: Review Article

Keywords: Review; interdisciplinary links; integrated environmental modeling; research needs

Corresponding Author: Dr. Daniel Ayllón,

Corresponding Author's Institution: Universidad Complutense de Madrid

First Author: Daniel Ayllón

Order of Authors: Daniel Ayllón; Volker Grimm; Sabine Attinger; Michael Hauhs; Clemens Simmer; Harry Vereecken; Gunnar Lischeid

Abstract: Terrestrial environmental systems are characterized by numerous feedback links between their different compartments. However, scientific research is organized into disciplines that focus on processes within the respective compartments rather than on interdisciplinary links. Major feedback mechanisms between compartments might therefore have been systematically overlooked so far. Without identifying these gaps, initiatives on future comprehensive environmental monitoring schemes and experimental platforms might fail. We performed a comprehensive overview of feedbacks between compartments currently represented in environmental sciences and explores to what degree missing links have already been acknowledged in the literature. We focused on process models as they can be regarded as repositories of scientific knowledge that compile findings of numerous single studies. In total, 118 simulation models from 23 model types were analysed. Missing processes linking different environmental compartments were identified based on a meta-review of 346 published reviews, model intercomparison studies, and model descriptions. Eight disciplines of environmental sciences were considered and 396 linking processes were identified and ascribed to the physical, chemical or biological domain. There were significant differences between model types and scientific disciplines regarding implemented interdisciplinary links. The most wide-spread interdisciplinary links were between physical processes in meteorology, hydrology and soil science that drive or set the boundary conditions for other processes (e.g., ecological processes). In contrast, most chemical and biological processes were restricted to links within the same compartment. Integration of multiple environmental compartments and interdisciplinary knowledge was scarce in most model types. There was a strong bias of suggested future research foci and model extensions towards reinforcing existing interdisciplinary knowledge rather than to open up new interdisciplinary pathways. No clear pattern across disciplines exists with respect to suggested future research efforts. There is no evidence that environmental research would clearly converge towards more integrated approaches or towards an overarching environmental systems theory.

Dear Editor,

Please, find enclosed our manuscript

Ayllón, D., Grimm, V., Attinger, S., Hauhs, M., Simmer, C., Vereecken, H., Lischheid, G.: **Cross-disciplinary links in environmental systems science: current state and claimed needs identified in a meta-review of process models**,

which we herewith submit for publication in *Science of the Total Environment* as a Review Article. As advised by the journal's guide for authors, we already consulted the Co-Editors in Chief, Drs. Barceló and Gan, concerning acceptability of topic and length of the manuscript, and submission of our review paper was encouraged.

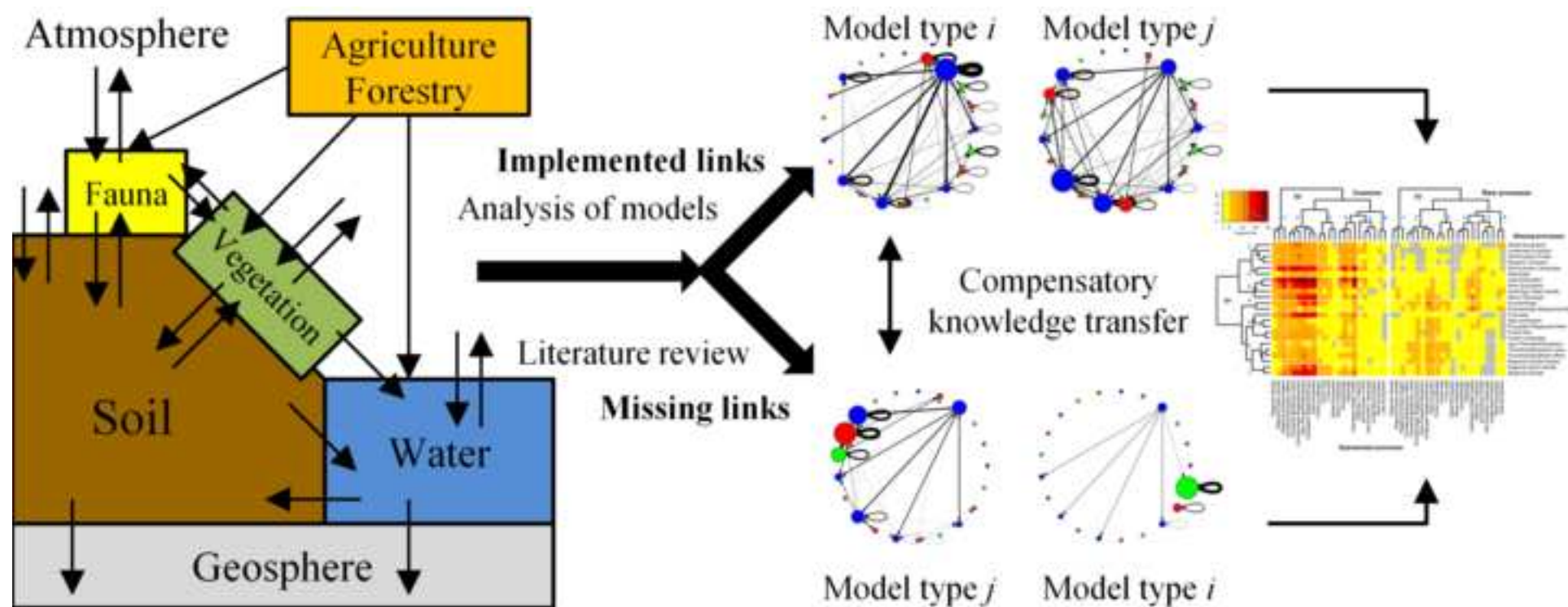
The last decades have boosted our insight into complex relationships between numerous biotic and abiotic components of environmental sciences. However, scientific research is organized into disciplines that focus on processes within the respective compartments rather than on interdisciplinary links. So relevant feedback mechanisms between different compartments might therefore have been systematically overlooked so far. Representatives from all major German research associations and from various disciplines of environmental sciences thus performed a comprehensive survey of established links between different compartments of terrestrial environmental systems as well as of future research needs stated in the literature which might point to emerging new integrated fields in environmental sciences. To that end we used simulation models as proxies for repositories of scientific knowledge. We feel our study fits the aims and scope of the journal as we have analyzed around 350 papers and 120 simulation models from a wide variety of subject areas belonging to eight different scientific disciplines, including Atmospheric science (Meteorology and Climatology), Soil science, Geology (excluding Palaeontology), Terrestrial Ecology, Hydrology and Hydrogeology, and Freshwater science, covering thus research on all the five environmental spheres. We believe that our review provides a new, integrated view on earth system modelling and science, with unprecedented depth and width. Besides of our own conclusions, we provide material and results that can also inspire readers to draw their own conclusions, or perform further analyses following our approach.

We confirm that this manuscript has not been published previously and is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically, without the written consent of the copyright-holder. All persons entitled to authorship have been so included. All funding sources have been identified and there is not any conflict of interests.

Looking forward to hearing from you at your convenience.

Sincerely,

Daniel Ayllón, PhD.
Department of Zoology and Physical Anthropology
Faculty of Biology
Complutense University of Madrid (UCM)
Calle José Antonio Novais 2
28040 Madrid, Spain
mail-to: daniel.ayllon@bio.ucm.es



- We performed a survey of dynamic interdisciplinary links in environmental models
- We identified claimed missing interdisciplinary links through a literature review
- We found a strong bias towards physical processes
- Claimed research foci point to existing rather than new interdisciplinary pathways
- Environmental research does not seem to converge towards more integrated approaches

Cross-disciplinary links in environmental systems science: current state and claimed needs identified in a meta-review of process models

Authors: Daniel Ayllón^{a,b,1,*}, Volker Grimm^{a,c,d}, Sabine Attinger^e, Michael Hauhs^f, Clemens Simmer^g, Harry Vereecken^h, Gunnar Lischeid^{b,i}

Affiliations:

^a Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Department of Ecological Modelling, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany.

^b Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research, Institute of Landscape Hydrology, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Germany.

^c University of Potsdam, Institute for Biochemistry and Biology, Maulbeerallee 2, 14469 Potsdam, Germany.

^d German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, Deutscher Platz 5e, 04103 Leipzig, Germany.

^e Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Department of Computational Hydrosystems, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany.

^f University of Bayreuth, Ecological Modelling, Dr.-Hans-Frisch-Straße 1-3, 95448 Bayreuth, Germany.

^g University of Bonn, Meteorological Institute, Auf dem Huegel 20, 53121 Bonn, Germany.

^h Agrosphere Institute, IBG-3, Institute of Biogeosciences, Leo Brandt Straße, Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich, Germany.

ⁱ University of Potsdam, Institute of Earth and Environmental Science, Karl-Liebknecht-Straße 24-25, 14476 Potsdam-Golm, Germany.

¹ Present address: Complutense University of Madrid, Faculty of Biology, Department of Zoology and Physical Anthropology, José Antonio Novais 2, 28040 Madrid, Spain .

*** Corresponding author:** Daniel Ayllón. Complutense University of Madrid, Faculty of Biology, Department of Zoology and Physical Anthropology, José Antonio Novais 2, 28040 Madrid, Spain . E-mail: daniel.ayllon@bio.ucm.es

ABSTRACT

Terrestrial environmental systems are characterized by numerous feedback links between their different compartments. However, scientific research is organized into disciplines that focus on processes within the respective compartments rather than on interdisciplinary links. Major feedback mechanisms between compartments might therefore have been systematically overlooked so far. Without identifying these gaps, initiatives on future comprehensive environmental monitoring schemes and experimental platforms might fail. We performed a comprehensive overview of feedbacks between compartments currently represented in environmental sciences and explores to what degree missing links have already been acknowledged in the literature. We focused on process models as they can be regarded as repositories of scientific knowledge that compile findings of numerous single studies. In total, 118 simulation models from 23 model types were analysed. Missing processes linking different environmental compartments were identified based on a meta-review of 346 published reviews, model intercomparison studies, and model descriptions. Eight disciplines of environmental sciences were considered and 396 linking processes were identified and ascribed to the physical, chemical or biological domain. There were significant differences between model types and scientific disciplines regarding implemented interdisciplinary links. The most wide-spread interdisciplinary links were between physical processes in meteorology, hydrology and soil science that drive or set the boundary conditions for other processes (e.g., ecological processes). In contrast, most chemical and biological processes were restricted to links within the same compartment. Integration of multiple environmental compartments and interdisciplinary knowledge was scarce in most model types. There was a strong bias of suggested future research foci and model extensions towards reinforcing existing interdisciplinary knowledge rather than to open up new interdisciplinary pathways. No clear pattern across disciplines exists with respect to suggested future research efforts. There is no evidence that environmental research would clearly converge towards more integrated approaches or towards an overarching environmental systems theory.

Keywords: Review; interdisciplinary links; integrated environmental modelling; research needs

1. Introduction

Human activities continue to change the environment by altering energy, momentum, sediment and water fluxes (Vörösmarty and Sahagian 2000, Syvitski and Kettner 2011) and biogeochemical cycling (Falkowski et al. 2000, Gruber and Galloway 2008), modifying the composition of the atmosphere (IPCC 2013), degrading soils and water quality (Foley et al. 2005), and impacting the biosphere (Ellis 2011). While current global trends affect all ecosystem compartments, the reactions of individual compartments to changes in climate, land cover and land use are still uncertain (IPCC 2013). Within terrestrial systems, functional relationships and exchange take place within complex and highly heterogeneous landscapes. The numerous processes that occur within individual environmental compartments (atmosphere, land surface and subsurface, geosphere, biosphere, and freshwater systems) are coupled in multiple ways through dynamic interfaces so that changes in one compartment affect the adjacent compartments likewise (Denman et al. 2007, Ciais et al. 2013), often leading to complex patterns in system state structures and variables (Vereecken et al. 2016a).

Consequently, an integrative, cross-scale, interdisciplinary and system-oriented research approach seems to be necessary to both enable the development of general environmental systems theory that consistently describes these interlinked dynamics and to create a new generation of integrated numerical model systems (DFG 2013). Fuelled by this notion, new developments that embrace such a systemic and integrated approach are underway (e.g., Zacharias et al. 2011, DFG 2013, Simmer et al. 2015). However, most of existing research and monitoring infrastructures are largely focused on specific scientific questions addressing only partial aspects of the terrestrial environmental (eco)system within the realm of single scientific disciplines.

This is because scientific research is organized into more or less disjunct disciplines that focus on processes within the respective compartments rather than on links between different compartments. Consequently, these links are not only poorly understood, but also described in different ways according to the terminology and basic paradigms of the respective disciplines. Moreover, despite scarce attempts (e.g., Schellnhuber 1999), a general environmental or earth system theory (within the framework of the dynamic system theory and its language) that would be broadly accepted throughout the environmental science disciplines and would integrate findings from different disciplines does not exist. This comes with the risk that the blind spots at the interfaces between different disciplines could result in systematic deficiencies in environmental sciences and will substantially impede our understanding of environmental systems in the long-term

This study therefore aims at a systematic survey both of known interdisciplinary links as well as of missing links identified in review and opinion papers as a contribution to strategic planning of environmental research. Two different approaches were combined.

First, since neither an overarching environmental systems theory exists nor a common data base of environmental knowledge that could be analysed in a quantitative way, we reviewed a large set of process models of environmental systems from various disciplines, assuming that the whole set of implemented processes would reflect the state of the science. Thus models were regarded as a proxy for repositories of scientific knowledge. We scanned these models for existing links between different compartments. Secondly, a list of stated missing interdisciplinary links was compiled from the existing literature and was analysed with respect to emerging new fields of interdisciplinary environmental systems science.

Both approaches have clear restrictions. Firstly, the fact that certain links are not or only rarely implemented in existing models does not necessarily imply that they are not essential. Secondly, missing links identified in review and opinion papers have been defined from the respective view of the authors which are strongly affected by the respective disciplinary perceptions and paradigms. Thus this study does neither assess the necessity of certain missing links nor does it claim fully integrated models including all possible links irrespective of any specific modelling aim; such models are neither possible nor desirable. Nevertheless, our systematic inventory could provide a basis for identifying current biases as well as outlining a way towards a more integrated terrestrial environmental system science, including modelling as well as process studies and monitoring programs.

We reviewed a wide range of simulation model types from eight environmental scientific domains and compared them in terms of how well their modelling components are integrated across environmental compartments (cross-compartmentalization) and scientific domains (interdisciplinarity). We performed a systematic analysis of 346 published reviews, papers reporting results from model intercomparisons, and model descriptions. In total we analysed 118 simulation models from 23 model types and 1) described their representation of environmental components, processes and driving state variables, 2) assessed how well these representations hold up in the face of current understanding, and 3) set up a compilation of modelling gaps stated in the literature. The latter included both knowledge and conceptual gaps in need of focused interdisciplinary attention, and missing processes that might be important for novel applications, i.e. for purposes other than those for which the current models are being applied at present (e.g., incorporation of biogeochemistry modules in forest gap models to simulate vegetation distribution and carbon fluxes under projected global change).

Our analysis is thus focused on “process representation”, confronting what is implemented versus what is perceived as missing, with strong emphasis on processes that link different environmental compartments and, thereby potentially, scientific disciplines. *Links*, defined as processes, or environmental factors controlling a process,

that connect different aspects (physical, chemical, biological) of different disciplines (e.g., soil sciences or terrestrial ecology) are thus the *central concept* of our analysis. We also tried to quantitatively assess the extent to which reported deficiencies in process representation in certain model types and disciplines are addressed by other modelling disciplines. With this, we seek to cast light on the central question of whether current interdisciplinary modelling gaps can be filled by integrating knowledge, conceptualizations, process understanding and modelling techniques across modelling fields, or if by contrast, there are still major gaps that rule out the development of an integral understanding of the environmental system. Hence, the ultimate purpose of our analysis is to push forward a fully integrated environmental system science by providing a roadmap for future modelling and monitoring decisions to be made.

2. Methods

In our survey of cross-disciplinary links in process models of environmental sciences, we do not intent to highlight disciplinary deficiencies or to rank model types but to provide an overall picture of the state of the art of integrated environmental modelling, pinpointing *what* is missing in *which* model types and *who* (in terms of model types) can transfer scientific and technical knowledge to address it. Thus, we first compiled a database of nearly 400 implemented and missing links (process representations) for a sample of 23 model types from eight environmental scientific disciplines (section 2.1. *Data compilation*). Then, matrices were set up describing which compartments of environmental systems, or scientific disciplines, were respectively linked by these processes (section 2.2. *Data synthesis*). Three separate types of matrices were compiled: matrices of existing links and missing links for each of the 23 model types, and one matrix combining information about existing and missing links. In a third step, these matrices were analysed using cluster analysis and network modelling approaches (section 2.3. *Data analysis*). To that end some technical terms were used that might have different connotations in different disciplines. Thus Box 1 provides a glossary of key terms and concepts used in our study.

2.1. Data compilation

We focused on simulation models, and on the processes represented in these models, from eight environmental scientific disciplines (Box 1). Selected disciplines include the Atmospheric science (Meteorology and Climatology), Soil science, Geology (excluding Palaeontology), Terrestrial Ecology, Hydrology and Hydrogeology, and Freshwater science. These disciplines focus on the processes occurring in specific compartments of the terrestrial environmental system, i.e. atmosphere, pedosphere, geosphere, biosphere, and the hydrosphere with its aquatic systems. We additionally included Agricultural and

Forestry sciences, which focus on processes and human activities that transform the terrestrial landscape for the production of animals and plants for human use, or the provision of ecosystem services, thus providing a partial representation of the anthroposphere. However, social, institutional or economic environmental models were beyond the scope of this study.

Box 1. Glossary of key terms and concepts used in this article.

(Basic science) **Category:** Aspect of the natural environment in an epistemic sense, that is, referring to either the physical (P), chemical (C) or biological (B) dimensions of the environment.

(Scientific) **Discipline:** A branch of scientific knowledge within the Environmental Sciences domain. Analysed disciplines include the Atmospheric science (AT), Soil science (SO), Geology (GE), Terrestrial Ecology (TE), Hydrology and Hydrogeology (HY), Freshwater science (FW), Agricultural sciences (AG), and Forestry sciences (FO).

Discipline-category pair: Type of basic science *category* of the environment studied by a given scientific *discipline* (e.g., the chemical aspect of soil science: SO-C).

Environmental compartment: The compartments of the terrestrial environmental system covered in our review, i.e. atmosphere, pedosphere, geosphere, biosphere, and the hydrosphere with its aquatic systems, plus the anthroposphere.

Environmental tie: Directional connection between two *discipline-category pairs*, which includes all *individual links* (i.e., processes of environmental factors; see below) connecting both pairs in a specific direction (e.g., all links connecting the physical aspect of the atmosphere to the physics of the terrestrial ecology).

Individual link: a process or environmental factor controlling a process that connects two *discipline-category pairs* in a certain direction (e.g., water evapotranspiration).

Missing link: *Individual link* between two *discipline-category pairs* that is either not included or misrepresented in models from a given model type but should be included according to experts' statements in the literature.

Model type: A branch of environmental modelling focused on predicting or understanding processes and dynamics of specific systems within the terrestrial environment (e.g., hydrologic modelling targeted at simulating the behaviour of hydrologic systems).

Weighted individual link: *Individual links* are weighted by the frequency with which they are represented in the models of the respective *model type*.

Weight of an environmental tie: Strength of the directional connection between two *discipline-category pairs* measured as the sum of all the weights of the individual directional links that characterize the *environmental tie*.

In addition to ascribing processes to the above disciplines, they were also attributed to one out of three basic science categories, that is, physics, chemistry or biology, depending on the methods used to study the aspect addressed (Box 1). The latter classification takes into account whether the respective model explicitly considers respective drivers and constraints. For example, biogeochemical transformations performed by living organisms (e.g., denitrification by microbes or assimilation by aquatic plants) are considered biological processes only when the living organisms are explicitly modelled. A counter example would be to model denitrification to occur under certain physical or chemical boundary conditions (e.g., anoxia in soils), irrespective of abundance, population growth, and limitation by resources availability of microorganisms. Another counter example would be to model plant assimilation as a mere reaction to soil and atmospheric environmental states without feedback to vegetation growth. Thus every process was ascribed to a discipline-category pair (Box 1).

We analysed 118 simulation models from a total of 23 model types, whose descriptions are summarized in Appendix A, including at least two model types from each scientific domain. The selected model types have, at least to a certain extent, a multidisciplinary focus and integrate at least some of the environmental compartments of the terrestrial system through interfaces. We restricted our study to dynamic process-based models applied at spatial scales relevant for terrestrial (eco)system management, ranging from local (field, forest stand or lake) to continental and global scales. The ecological systems modelled must be represented preferably at the ecosystem but at least at the community level of ecological hierarchy, thus excluding population models. The main criteria for differentiating model types within scientific domains were modelling aim (e.g., ecohydrologic vs. ecohydrologic biogeochemistry models, terrestrial biosphere online vs. offline models) and spatial scale of application (e.g., macro-scale vs. catchment hydrologic models, forest landscape vs. forest gap models).

The objectives of the data compilation stage were to identify for each selected model type (1) processes and primary controls implemented in existing models, and (2) modelling gaps.

2.1.1. Implemented links

We first analysed which processes and primary controls of these processes (e.g., control of CO₂ concentration on leaf stomatal conductance), are currently incorporated in

models, how they are represented (level of complexity), and the frequency with which they are represented (i.e., number of models within a model type including the given processes). Human impacts addressed in models as imposed fluxes across or prescribed states at boundary conditions (e.g., water withdrawal, fishing mortality, disturbance) were accounted for in the study.

This task was performed through the analysis of representative models from each model type that reflected the state of the art in the respective discipline. Selection of models was based on knowledge from experts on the specific modelling field (see Acknowledgements), and on the status of the model in the literature (e.g., being regarded as a representative model by specialized review papers, being widely used in journal-published literature, included in model intercomparison projects, or highly cited in the literature and bibliographic searches). We carried out a comprehensive assessment of the resulting selected 80 models (“Main models” in Appendix B), extracting the information from the technical documentation (peer-reviewed journal papers or technical reports) wherein the models were comprehensively described. This analysis was complemented with the assessment of 38 additional models (“Secondary models” in Appendix B), which was focused on particular aspects, such as specific processes, representation of interfaces or of specific compartments. Great value was placed on models incorporating the most comprehensive process representation and highest degree of sophistication. Besides, the features from further 68 models (“Complementary models” in Appendix B), extracted from summary tables from model intercomparisons reported in the literature, were also taken into account to characterize the extent to which processes are represented within each model type. Overall, 184 papers and technical reports were examined for the analysis of representative models.

2.1.2. Missing links

Each model is a simplification and thus necessarily includes “gaps” in its representation of reality. However, here we focus on gaps that in the literature were considered essential for representing the feedback between compartments. We compiled the modelling gaps reported in the literature, including gaps in process representation and system conceptualization, data gaps, as well as gaps in knowledge and process understanding as perceived by the models under review. In Appendix C we provide the reported modelling gaps, their implications for prediction accuracy, and the solutions or alternative approaches suggested in the literature to overcome these problems. For this systematic review, we examined 162 review papers and publications reporting results from model intercomparisons published over the last 10 years (2007-2016). Publications were selected for inclusion from matches found on Web of Science and Google Scholar search results. Selection was not limited to papers published in high-impact factor journals, although preference was given to these papers.

Altogether, a total of 396 implemented and missing processes and primary controls were identified and provide the basis for our subsequent analyses (see Appendix D). We tried to balance the number of selected processes considered from each scientific domain and within each compartment. Selected processes were categorized by the environmental compartment wherein they take place (i.e., atmosphere, land surface, soil, freshwaters, and phytosphere and zoosphere), or by the environmental compartments they link. It has to be kept in mind that the resulting data on missing processes, or gaps, is firstly based on expert opinions, which might be biased, and secondly depends on the respective specific modelling aims. However, given the large number of models and articles from which we extracted our data, we believe that, taken together, the majority of reported gaps matters for a wide range of relevant research questions.

2.2. Data synthesis

To categorize processes and links, environmental compartments (Box 1) were defined as subjects of study of the selected environmental scientific disciplines; e.g., Geology was associated to the geosphere, Terrestrial Ecology to the biosphere, and so on. On the one hand, this approach facilitates a quantitative analytical evaluation of the level of multidisciplinary of selected model types. On the other hand, it involves a certain degree of overlap as certain processes taking place in a specific compartment might be the subject of different scientific disciplines (e.g., water transport in the soil is studied by both hydrogeology and soil science and thus considered both a hydrologic and soil process; growth of crop plants is both an ecological and an agricultural process). Therefore, processes and drivers connecting scientific disciplines refer to processes that are linking the subjects of study of those disciplines, which relate to the environmental compartments they study.

We also assessed how process representation and compartment integration vary across model types depending on the different system conceptualizations and modelling perspectives of each environmental scientific discipline. We analysed the relationship amongst the studied model types following three approaches: 1) grouping model types based on the processes they incorporate; 2) grouping model types based on the modelling gaps they share based on experts' statements in the literature; 3) analysing the degree of connection between model types depending on both the processes they incorporate and the relevant processes they miss, to assess the extent to which the modelling gaps of one model type are accurately represented in models from the rest of the studied model types. This latter analysis will provide a picture of how a model type can benefit from conceptualizations, knowledge, process understanding and modelling techniques of other model types.

To quantitatively characterize all these complex relationships, we compiled matrices of existing or missing links and then analysed these matrices using cluster analysis and network modelling.

2.2.1. Characterization of links

We first characterized the full set of processes linking environmental compartments and scientific domains that are currently implemented in selected model types or have been reported as modelling gaps in the literature (Box 1). We analyzed how physical, chemical and biological aspects were connected both within and across scientific disciplines through modelled processes. For this we developed a matrix whose rows and columns are defined by all possible discipline-category pairs (Box 1). The entries in the matrix cells are processes or controls that link two of these pairs because they represent influence, or control. Thus, if we interpret each discipline-category pair as a node in a network, each pair of nodes can be linked by one or more processes, i.e. links (Fig. 1). This representation and terminology will later allow us to use cluster and network analysis to quantify the interconnectedness of environmental sciences across compartments.

For example, “water infiltration” is a physical hydrological process that affects the physical properties of the soil and provides an input to model water movement within the soil, so there is a directional link from the physics of hydrology, HY-P, to the physics of soil science, SO-P). The “direction” of a link thus indicates influence and possibly control.

The entire set of directional links between two discipline-category pairs (nodes) defines an “environmental tie” (Box 1; e.g., the connection from the physics of the atmosphere to the physics of the soil, AT-P/SO-P). This connection is directional so that AT-P/SO-P is different from SO-P/AT-P (Fig. 1); for instance, interception of precipitation by the soil litter would be an individual process linking AT-P/SO-P, while soil evaporation would link both nodes the other way round. That means that the matrix is asymmetric, and so outflow nodes are represented as rows and inflow nodes as columns (see Appendix D).

Indirect links (interaction between compartments mediated by a third compartment; e.g., the soil-atmosphere link through plant transpiration) are represented in the matrix as if they were direct links between both compartments (Fig. 1). On the contrary, processes that are the subject of study of two disciplines (due to overlap) but are not interfacing them in any way (e.g., the description of water flows in porous media in soil science and hydrogeology), are not represented as a link between both disciplines. Each one of the processes and primary controls represents an individual directional link that contributes

to one or several environmental ties. We obtained the full matrix of processes and controls by characterizing every environmental tie (see Appendix D).

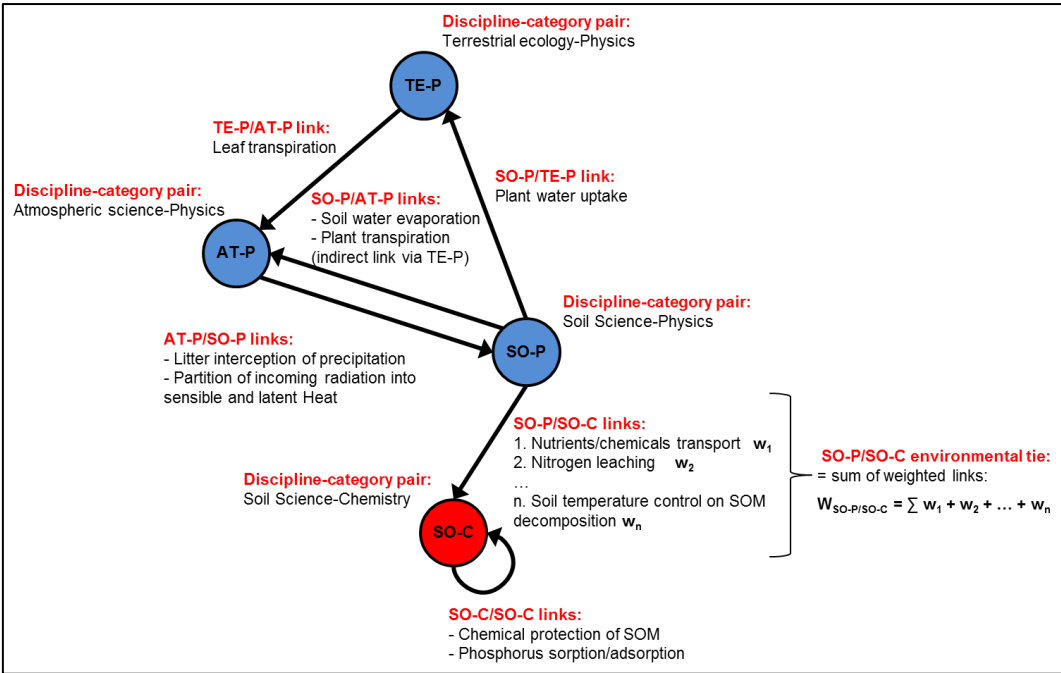


Fig 1. Examples illustrating the used terminology (in red) and concepts.

2.2.2. Matrix of existing links (MEL)

After characterizing the 396 selected processes, we developed the matrix of existing links for each model type, which represents the processes that are actually incorporated in the models of each analyzed model type. To do this, each individual directional link of the full matrix was weighted by the frequency with which it is represented in the models of the respective model type: the link would have a weight of 0 if it is never represented in the models, 1 when it is only represented in the most complex models, 2 when it is equally represented than not (some models do include the link but others do not), and 3 when it is always or almost always represented. Besides, the processes involving agricultural and forestry systems are additionally weighted by how often crop dynamics and agricultural and forestry practices are represented in the models. This procedure was based on the model assessment described in section 1.1. The sum of all the weights of the individual directional links that characterize an environmental tie defines its weight, that is, the strength of the directional connection between the two nodes.

2.2.3. Matrix of missing links (MML)

As a third step, we developed the same kind of matrix for missing links for each model type, which represents the processes that are not yet but should be incorporated in the models of each analyzed model type according to the experts' opinion. The matrix of missing links is not necessarily the opposite matrix of the matrix of existing links, as not all possible links have been considered important or necessary. This is because process representation is dictated by the purpose the model was designed for and its spatial scale of application, and constrained by data availability. For example, implementation of biogeochemistry modules to model biogeochemical fluxes are not required in model types focused on simulating hydrologic fluxes and states. Likewise, processes occurring at micro-scales are not implemented in models applied at global scales.

The identification of missing links was based on the modelling gaps reported in the published literature by experts of the different modelling fields, which were identified through the systematic literature review described in section 1.2. When the level of complexity with which missing processes should be incorporated into models was not explicitly addressed in the literature, we opted for the simplest representation and for inclusion of just the key processes considered necessary to model a particular phenomenon, the choice being constrained by model purpose and spatial scale of application as described above. As in the case of the matrix of existing links, individual missing links were weighted: a weight of 3 indicates that the necessary missing link is never implemented in models of the model type, 2 when it is only implemented in most complex models, 1 when it is equally implemented than not, and 0 when it is implemented in all or almost all models (so in this case, it would not be actually a missing link). The sum of all the weights of the individual missing links that characterize an environmental tie defines its weight (cf. Box 1).

2.2.4. Matrix of existing-missing links (MEML)

In the last step, we crossed the matrices of existing and missing links (MEL and MML, respectively), as described above, to obtain a matrix that quantifies the degree to which missing links identified for one model type are addressed by models of the remaining model types. Thus not only the unevenness of the representation of interdisciplinary links in different model types is highlighted, but possible pathways to overcome the existing restrictions are illustrated. So when the strength of the connection between two model types is high in this matrix, then there is much scope for improving process representation in the given model by integrating concepts and knowledge from the other model type. The weight or strength of the connection between two model types i and j was calculated as:

$$W_{i,j} = \frac{1}{3} * \sum_{z=1}^n (w_{i,z} * w_{j,z})$$

where $W_{i,j}$ represents the weighted number of existing links in model type i that are missing in model type j , i.e. $W_{i,j}$ is a measure that indicates “how much” knowledge model type j can borrow or integrate from model type i ; $w_{i,z}$ represents the weight of the individual link z in the MEL of model type i ; $w_{j,z}$ represents the weight of the individual link z in the MML of model type j . Division by 3 ensures that this measure scales in the $[0; 3]$ range to be comparable to the values in the other matrices.

For example, an individual link that is represented in all models of the model type i (it would have a value of 3 in the MEL) but is never represented in the models of model type j (value of 3 in the MML) would have a weight of 3; while an individual link that is roughly represented in 50% of the models of model type i (value of 2 in the MEL) but is only represented in most complex models of model type j (value of 2 in the MML) would have a weight of 1.33. The sum of the weights of all individual links defines the strength of the connection from model type i to model type j . Therefore, the higher the value of $W_{i,j}$, the better model type i could contribute to implement missing links in model type j . The matrix of existing-missing links represents the strength of the connection between each pair of the 23 studied model types.

2.3. Data analysis

We used two statistical analysis approaches to (1) typify groups of model types with similar process representation or common modelling gaps, and (2) characterize the patterns underlying such associations based on the structural properties of the network of implemented or neglected links.

2.3.1. Cluster analysis

We first used cluster analysis to identify relatedness of model types based on patterns produced by the typology of either the represented or missing processes (existing or missing weighted environmental ties). Since different results can be obtained depending on the clustering algorithm and parameter settings used in the analysis, the most appropriate clustering solution for a particular individual data set cannot be selected a priori. Therefore, we computed different clustering solutions and assessed the associated quality measures to identify the optimal one regarding the clustering algorithm and method, parameter settings, as well as expected number of clusters. We used the *WeightedCluster* R package v1.2 (Studer 2014), which compares different connectivity-based and centroid-based clustering methods through several quality statistics (Point Biserial Correlation, Hubert’s Gamma, Hubert’s Gamma-Somers’D, Average Silhouette width, Calinski-Harabasz index, R^2 , and Hubert’s C coefficient; see Studer 2014 for details). We ranked all computed clustering solutions according to each quality measure and identified the optimal solution as the one being ranked as the best solution by most

of quality measures. Further, we computed additional clustering solutions applying model-based methods by means of the *mclust* R package v5.2 (Fraley et al. 2016) to compare the optimal number of clusters and final classification. Comparisons revealed that in both analyses (clustering of model types based on either existing or missing link types) agglomerative hierarchical clustering was the optimal clustering algorithm and Ward's method the optimal linkage method, with the Euclidean distance as the distance metric to calculate the dissimilarity matrix. The optimal number of clusters and the classification of model types into clusters matched the optimal solutions provided by model-based clustering. Therefore, we computed the corresponding dendrograms running the *agnes* algorithm function within the *cluster* R package v 2.0.4 (Maechler et al. 2016), which were linked to heat maps by means of the *gplots* R package v3.0.1 (Warnes et al. 2016).

2.3.2. Network modelling

Secondly we used network modelling to analyse the complexity and topology of the network linking the physical, chemical and biological aspects of environmental compartments. Similarly to the cluster analysis, we analysed the structure of both the connections already incorporated in the models and of the missing connections. Each node of the network represents a discipline-category pair from the matrices of existing or missing links, and connections amongst them represent the corresponding weighted environmental ties. We generated the respective one-mode, directed, weighted networks for each model type by means of the *igraph* R package v 1.0.0 (Csardi and Nepusz 2006). We calculated several measures to analyse the properties of the generated networks, including metrics characterizing distance (betweenness, diameter), connectivity (density, degree, reciprocity, centrality indices), clustering or transitivity (clustering coefficient), homophily (assortativity), heterogeneity (alpha coefficient in the degree distribution power function) and modularity properties (see description of calculated metrics in Appendix E). We then compared the computed measures between model types belonging to the different clusters identified in the cluster analyses. Moreover, we generated a one-mode, directed, weighted network model for the matrix of existing-missing links to analyse the extent to which the modelling gaps of each model type are accurately addressed by models from the rest of the studied model types. All statistical analyses were performed within the R environment (R Core Team 2015).

3. Results

3.1. Implemented links

Model types are clustered into six clusters based on the typology of processes they incorporate (Fig.2; see also Table 1). The first cluster encompasses exclusively weather

and climate models, which separate from the rest of the model types because they are the only ones that explicitly model physical and chemical atmospheric processes. All other model types use atmospheric data only as forcing data and aggregate into two branches. The first branch, comprising the second and third cluster, include ecosystem and ecological models that implement a large number of environmental ties connecting the biological aspects of the terrestrial ecology domain with the rest of discipline-category pairs; model types from clusters of the second branch have, on the contrary, a poor representation of terrestrial biological processes.

The ecosystem models from the second cluster incorporate a comprehensive integration of most environmental compartments through physical and chemical processes that is lacking in the model types from the third cluster, which basically focus on biological processes. From the model types of the second branch, aquatic models (cluster six) separate from the rest because they neglect most landscape processes, and just focus on physical, chemical and biological processes within the freshwater system. The hydrologic models comprising the fourth cluster incorporate a more comprehensive representation of hydrologic (both in the surface and subsurface) and soil physical processes, and their connections to atmospheric physical properties, than the soil and geologic models from the fifth cluster. Besides, a main discrimination feature was that, despite the fact that hydrologic models neglect in general most biological processes, they highly incorporate environmental ties related to terrestrial ecological physical processes and controls; soil evolution and geologic models ignore most processes connected to terrestrial ecology.

There are significant differences between model types from the different clusters in the strength (sum of weights) of implemented environmental ties (ANOVA, $F_{5,17}=9.49$, $p < 0.001$). The post-hoc Tukey test revealed three categories: a group with most comprehensive process representation including model types from clusters 1 and 2 (520.4 ± 118.5 and 523.9 ± 70.7 average sum of weights, respectively), a second group with just hydrologic model types (cluster 4, 369.8 ± 159.2), and a third group with fewer processes represented including model types from clusters 3, 5 and 6 (207.4 ± 87.4 , 170.6 ± 78.6 and 232.0 ± 106.1 , respectively).

The role of single disciplines and categories is revealed by the vertical structures (columns) in Fig.1. Among the three categories, most of the identified links relate to physical processes, and the least to biological processes. In the physics category, links related to atmospheric science, hydrology and soil science are prevalent in many different model types. Among these three only soils science plays a pivotal role within the chemistry category as well, but none of them are relevant in the biology category. In contrast, terrestrial ecology is the only discipline with many interdisciplinary links implemented within all three categories (physics, chemistry and biology; Fig.2),

especially within cluster one and two (number of weighted links typically over 25, orange tones in Fig. 2).

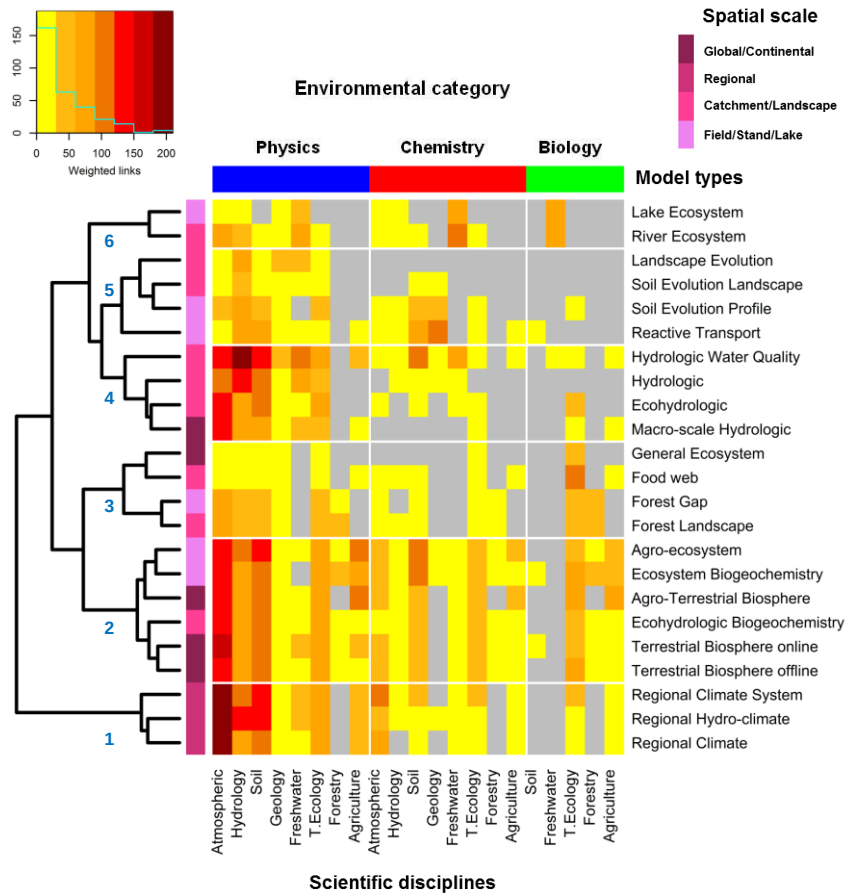


Fig 2. Number of weighted intra- and interdisciplinary links between single disciplines and categories (x-axis) to other disciplines and/or categories implemented in different model types (y-axis). The upper left inset gives the colour code for the number of weighted links (yellow to dark red) and the frequency of links per bin (cyan line). Grey cells in the main graph denote links not implemented in model types. The dendrogram at the left y-axis shows the results of a cluster analysis of model types based on number and kind of implemented interdisciplinary links. Cluster numbers are shown in the dendrogram. The purple colour code at the left y-axis denotes the approximate spatial scale of application of the respective model type (see legend to the upper right). Horizontal white lines in the main graph separate different clusters, vertical white lines separate different categories.

The network models reveal more details of the connectivity patterns for the different model types (Fig. 3). There are marked differences in network structure and complexity between model types belonging to the different clusters identified through the hierarchical cluster analysis (see Fig. E.1 and Table E.1 in the appendices). The most comprehensive ecosystem model types from the second cluster and the regional climate system model type show the highest connectivity between environmental aspects and scientific domains (higher density, mean degree and betweenness), and regularity

(clustering), which indicates a better flow of information through the network (Table E.1 and Fig. E.1). These model types are also more modular than the rest of model types (Table E.1 and Fig. E.1). High modularity (dense connections between the nodes within modules but sparse connections between nodes in different modules) is an important feature as it allows the adaptation of different functions with a small amount of interference with other functions. At the other end of the spectrum, soil evolution, geologic and aquatic models show the lowest connectivity and integration, mainly incorporating processes from a lower number of compartments. All model types show a low heterogeneity in their connectivity patterns, i.e. their networks do not tend to be characterized by a few central nodes being connected to many others (Fig. E.1). The networks do not show assortative mixing by either degree or discipline, that is, high-degree nodes do not tend to attach to other high-degree nodes, as well as nodes do not tend to attach to nodes of the same scientific discipline. Nevertheless, they all show, in general, a positive assortativity by category, so that nodes have a tendency to tie to nodes of the same category (physics, chemistry, or biology).

Strong links are established between various disciplines in the physical category, especially between atmospheric science, soil science, and hydrology. A large fraction of these links describe weather and climate effects on other compartments of environmental systems. In contrast, there are only very few links between geology or freshwater systems and other environmental disciplines implemented in models. Many chemical and biological processes are restricted to links within the same discipline-category (indicated by loops) and are neither connected to the same category in other disciplines, nor to different categories of other disciplines.

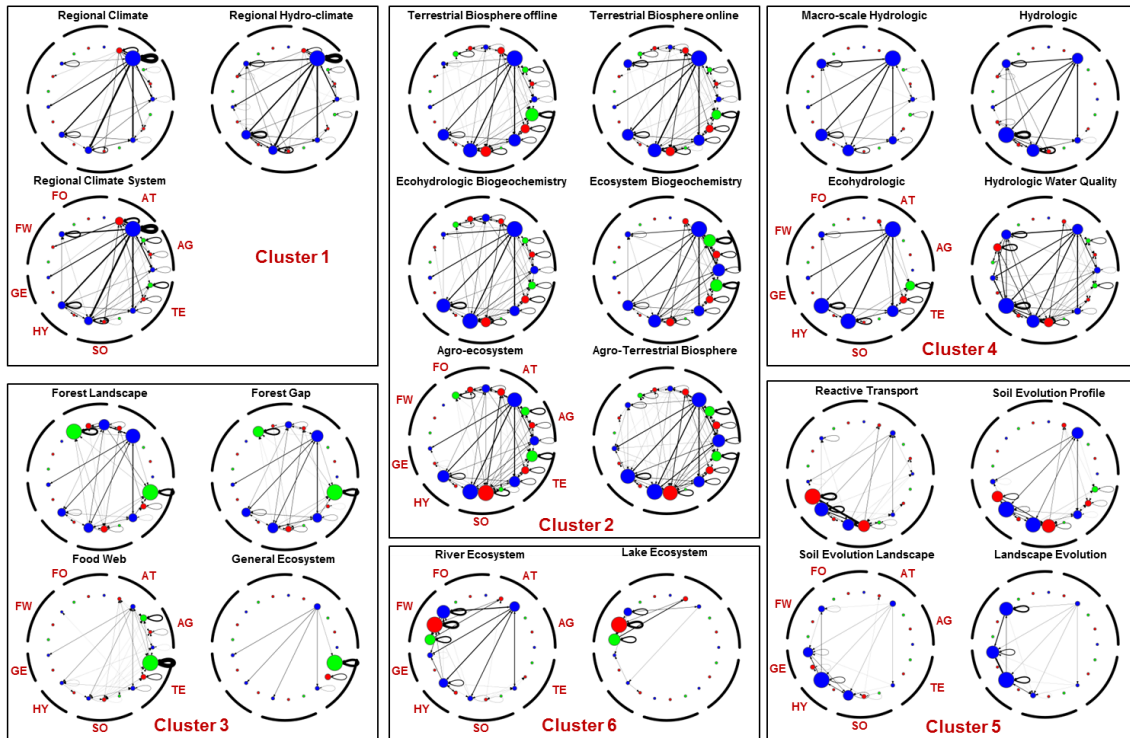


Fig 3. Network models for environmental ties in the 23 model types. Boxes delineate the six clusters of model types (cf. Fig.2). Discipline-category pairs are represented by nodes (full circles coloured according to category, same position in all networks) and environmental ties by edges (loops in case of internal links). Disciplines are coded as indicated in Box 1. Physics, chemistry and biology categories are coloured in blue, red and green, respectively. The width of the edges is scaled by the sum of weights of the individual links connecting both nodes, while node size corresponds to the sum of weights of all environmental ties flowing in and out of the node. Scaling applies within individual networks so node sizes and edge widths are not comparable across network models.

3.2. Missing links

Modelling gaps reported in the literature (see Appendix C for full description and bibliographic sources) are summarized in Table 1, differentiated according to environmental compartment.

We identified seven clusters of model types (Fig. 4; see also Table 1), exhibiting two main branches. The perceptions from expert modellers is that model types from the lower branch should incorporate a wider and more complex range of biological and biochemical processes related to disciplines from life sciences focused on terrestrial landscapes (terrestrial ecology, agricultural and forestry sciences) and processes and factors connected to soil biogeochemical cycles, compared to the model types from the upper branch. This differentiation emerges from contrasting conceptualization of the model system and the role played by the phytosphere (the zoosphere is neglected in most models) on it, which are highly dependent on model purpose.

There are significant differences in the sum of weights of missing environmental ties between model types from the different clusters (ANOVA, $F_{5,17}=6.0$, $p < 0.01$). The post-hoc Tukey test revealed that model types from the first five clusters have a significantly higher sum of weights of missing ties than model types from clusters 6 and 7. The sum of weighted missing environmental ties is higher than the sum of weighted existing environmental ties in all model types (cf. Fig. 2), and thus the mean values (686.1 ± 240.8 and 354.8 ± 177.0 , respectively) differ significantly (ANOVA, $F_{1,44}=28.3$, $p < 0.0001$). Interestingly, there is a significant positive correlation (Pearson- $r = 0.53$, $p < 0.01$) between the represented and missing weighted environmental ties, so that model types including a higher number of processes and drivers are perceived to require a yet higher number of additional processes and controls.

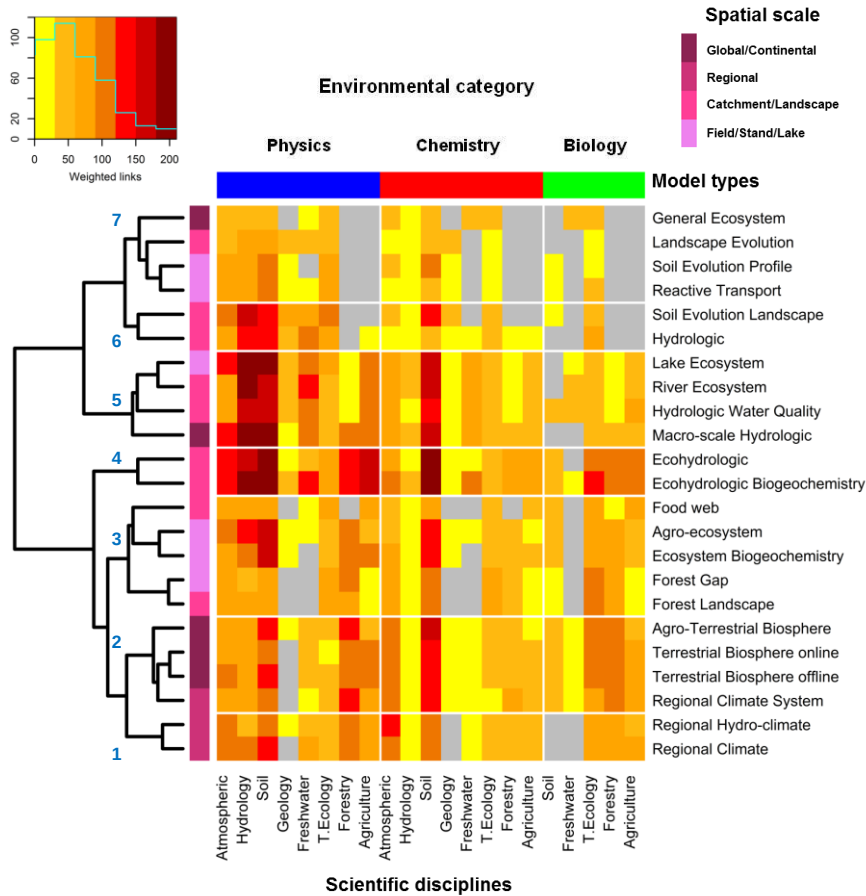


Fig 4. Number of weighted intra- and interdisciplinary missing or misrepresented links between single disciplines and categories (x-axis) to other disciplines and/or categories implemented in different model types (y-axis). Due to the different cluster structure the ordering of model types on the y-axis differs from the ordering in Fig. 2 representing the existing links. The upper left inset gives the colour code for the number of weighted links (yellow to dark red) and the frequency of links per bin (cyan line). Grey cells denote links that are either accurately represented or not considered necessary. The dendrogram at the left y-axis shows the results of a cluster analysis of model types based on number and kind of missing interdisciplinary links. Cluster numbers are shown in the dendrogram. The purple colour code at the left y-axis denotes the approximate spatial scale of application of the respective model type (see legend to the

upper right). Horizontal white lines in the main graph separate different clusters, vertical white lines separate different categories.

The networks provide detailed information about the nature of missing environmental ties (Fig. 5, Fig. E.2). The vegetation subsystem plays a central role in all model types from the lower branch of the dendrogram (clusters 1 to 4). These are models that are either targeted at simulating the dynamics of the terrestrial vegetation (forests or agricultural systems) to predict their distribution, structure, function or production, or need to incorporate it as a dynamic component to simulate fluxes and cycling of water, carbon or nutrients through the ecosystem. This requires an accurate representation of the water fluxes through the soil-vegetation-atmosphere (SVA) system, the soil biogeochemical cycles and transport of nutrients, as well as disturbance factors affecting the vegetation component. Therefore, despite a more comprehensive representation of the vegetation subsystem (see connections to TE-P; TE-C and TE-B in Figs. 2 and 3), it is perceived that these model types should still incorporate a much higher number of processes driving plant population and community dynamics, plant eco-physiological processes, and their connections to hydrological and biogeochemical fluxes and cycles, as well as to processes in the atmospheric boundary layer, than hydrologic, soil evolution and geologic model types, which actually lack or have a poor representation of the vegetation system. In consequence, biological terrestrial ecological and chemical soil processes represent dominant nodes in the networks of missing links of model types from the first four clusters resulting from hierarchical clustering based on missing links (see Fig. E.2 for representation of networks topology). In the case of regional climate and hydro-climate models, experts suggest they should naturally evolve towards regional climate system models, incorporating processes and conceptualizations from the current generation of terrestrial biosphere models, which involves a more accurate representation of the ecological system and its connections to physical and biogeochemical processes of the soil.

As a general pattern, it has often been suggested that model types from the first four clusters resulting from hierarchical clustering based on missing links (Fig. 4) should include a better representation of crop dynamics and agricultural and forestry practices (except for forest and agro-ecosystem models, of course), disturbance factors (e.g., fire or insect outbreaks), and faunal processes, due to their direct impacts on vegetation dynamics and indirect effects on carbon and nutrient cycles and emission of trace gases. As differential missing environmental ties, model types from the second cluster should improve the representation of processes driving fluxes through the SVA system (connections to AT-P node in Fig. 5 and Fig. E.2), while model types from clusters 3 and 4 lack accurate modelling of nutrient and carbon transport processes in the soil (ties from HY-P and SO-P to SO-C). Ecohydrologic models from the fourth cluster

670 additionally lack proper connections to the aquatic systems (ties from HY and SO to
671 FW nodes).

672 Model types from the upper branch of the dendrogram (clusters 5-7; Fig. 4) focus on
673 physical and chemical transformations, and/or flow of matter (water, solutes, sediments,
674 energy), except for the general ecosystem model type, so the vegetation component (and
675 life forms, in general) plays a marginal, if any, role. However, it is widely accepted that
676 its representation must be improved to model its effects on physical and chemical
677 properties of the land surface and soil compartment and on processes taking place there.
678 It requires the incorporation of, at least, a simple representation of the SVA system
679 (connections between AT-P, SO-P, HY-P and TE-P nodes). Hydrologic and aquatic
680 models from the fifth cluster should incorporate more of biogeochemical cycles and
681 nutrients and carbon transport processes in the soil, as well as proper representations of
682 water and biogeochemical exchanges between the soil and groundwater and the aquatic
683 system through the hyporheic zone, in order to properly model water quality and aquatic
684 biogeochemistry. Thus, SO-P, HY-P, SO-C, FW-P and FW-C are central nodes in the
685 networks of missing processes (Fig. 5 and Fig. E.2). In contrast, links to or from
686 geological and freshwater systems processes were hardly missed in the literature in spite
687 of the small number of established links (cf. Fig. 3). Missing links to freshwater systems
688 are considered relevant mainly in model types from clusters 4 and 5 and for the general
689 ecosystem model type. Model types from the sixth and seventh cluster require a
690 stronger incorporation of biochemical and geochemical processes related to soil forming
691 processes as well as the control of water processes on them (connections from SO-P and
692 HY-P to SO-C and GE-C). General ecosystem models need to incorporate processes
693 modelling nutrient and water fluxes and their connection to the biological components
694 through both the terrestrial and aquatic systems.

695 Comparing Fig. 5 with Fig. 3 reveals two major differences: Firstly, there are many
696 more processes restricted to single disciplines and categories in Fig. 5 compared to Fig.
697 3 (represented as loops in the network models). Secondly, missing links between
698 different disciplines and categories do not show any clear pattern for most clusters,
699 except for the fact that links to freshwater science and geology are hardly missed for
700 most model types. Thus the assumption that the comprehensive compilation of
701 respective review and opinion papers of various disciplines would reveal emerging hot
702 spots of missing links did not hold true. Rather, the pattern suggests a reinforcement of
703 already implemented links.

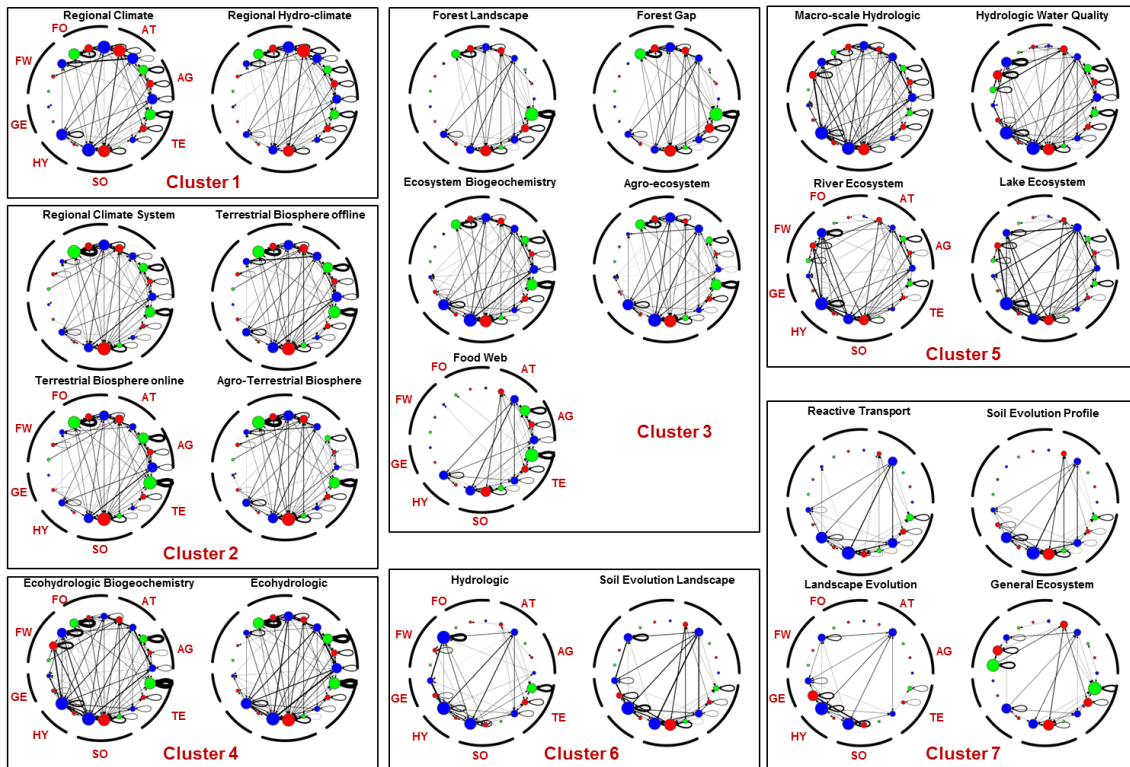


Fig 5. Network models for the 23 model types representing environmental ties missing in simulation models. Boxes delineate the seven clusters of model types (cf. Fig.4). Discipline-category pairs are represented by nodes (full circles coloured according to category, same position in all networks) and environmental ties by edges (loops in case of internal links). Disciplines are coded as indicated in Box 1. Physics, chemistry and biology categories are coloured in blue, red and green, respectively. The width of the edges is scaled by the sum of weights of the individual links connecting both nodes, while node size corresponds to the sum of weights of all environmental ties flowing in and out of the node. Scaling applies within individual networks so node sizes and edge widths are not comparable across network models.

3.3. Possible compensatory knowledge transfer between disciplines

In Fig. 6 rows denote the missing links stated in the literature for different model types, and columns denote the links that are actually implemented in the respective model types. For example, the fifth row indicates the processes that many authors recommend to consider in soil evolution landscape models. These links are actually already commonly implemented in other model types that are listed in the first nine columns, as indicated by dark raster cells. Please note that the order of model types at the x- and y-axis differs corresponding to the respective dendrograms D1 and D2, and thus the diagonal of the matrix is meaningless.

Red and dark yellow raster cells are more aligned along rows rather than along columns. That means that this analysis reveals more a lack of implementation of known processes in certain model types rather than a general lack of knowledge about and modelling of single links. However, what seems to be good news could in fact indicate a systematic

bias: Experts tend to state a need for links that are already known and implemented elsewhere, and tend not to miss links that have rarely been implemented at all.

In contrast, columns 3-9 exhibit a large number of dark raster cells. This indicates that the respective rather complex regional climate system models and models of the second cluster of the represented links (D2 in Fig. 6) are characterized by the implementation of most of the links that experts are missing in other model types. These include mainly ecological and biogeochemical processes, as well as the hydrologic controls on these processes, and an improved representation of the SVA system. Likewise, all hydrologic model types can provide conceptualizations and representations of hydrological processes that are missing in soil evolution, geologic, aquatic, and less comprehensive ecological models (clusters 5-7 in D1). The opposite holds for models in the last two clusters of the represented common processes that can contribute only little to compensate for deficiencies in other model types.

However, when we focus on “rare” processes, some specific model types acquire a higher relevance as they are the only ones that incorporate important processes that are recurrently reported as missing in most model types (Fig. 6). Given that soil processes and agricultural practices (to a lesser extent) are largely misrepresented in most model types, ecosystem biogeochemistry and agro-ecosystem models play a central role in the network of connections between model types. Hydrologic models including transport of solutes can provide conceptualizations to all disciplines that aim at incorporating lateral and vertical transport of carbon and nutrients to simulate redistribution across landscapes, and also to model flux exchange with aquatic systems. A wide range of model types can incorporate modules from reactive transport models to simulate geochemical (e.g., chemical weathering) and reactive transport of pollutants or nutrients, both in terrestrial and aquatic environments. Forest models should play a relevant role on transferring representations of specific processes related to plant community dynamics, forestry practices and forest disturbance. In the same way, most complex physical-chemical processes represented in aquatic models should be incorporated in model types aimed at predicting water quality or emission of carbon or trace gases from aquatic environments (e.g., riparian areas or wetlands). In addition, there is a wide range of missing processes that are not incorporated yet in the model types included in this study but that have been accurately addressed in other interdisciplinary models, such as microbial, bioturbation or plant-physiological models (Fig. E.3). Finally, more research is required before we can incorporate into models many relevant processes that are still missing (Fig. E.3).

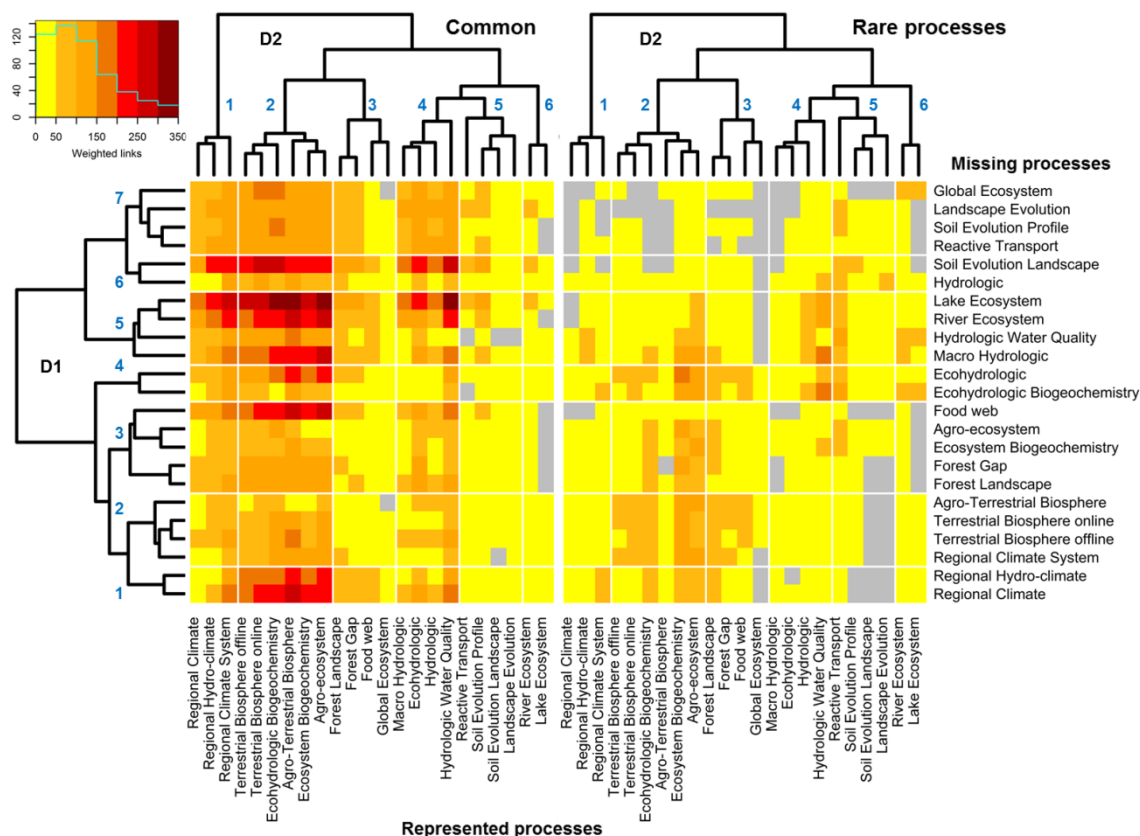


Fig 6. Relationship of the 23 analysed model types based on the processes represented and missing in the models. Model types in rows are clustered based on similarities in the typology of environmental ties misrepresented in the models (clustering in Fig. 4). Model types in columns are clustered based on similarities in the typology of environmental ties represented in the models (clustering in Fig. 2). Shading intensity in the heat maps indicates the sum of weights of all individual processes missing in model types displayed in rows that are represented in model types displayed in columns (weighted links). Grey cells indicate no connection. The graph at the top left represents the colour key for the heat map, the x-axis showing the splitting points for binning weighted links into colours, and the cyan line indicating the number of cells of the heat map within each bin. It is differentiated between common and rare missing individual processes. Common processes refer to processes that are routinely incorporated into models (weight of 2 or 3 in the matrix of existing links) of more than 10% of studied model types; rare processes refer to those that are currently represented only in most complex models (weight of 1 in the matrix of existing links) or routinely incorporated into models of less than 10% of studied model types. White lines in the heat maps separate different clusters. The dendrogram at the left y-axis (D1) shows the results of a cluster analysis of model types based on number and kind of missing interdisciplinary links, while dendrograms at the top x-axis (D2) shows the results of a cluster analysis of model types based on number and kind of implemented interdisciplinary links. Cluster numbers are shown in each dendrogram.

4. Discussion

4.1. Analysing numerical models as repositories of scientific knowledge

Our study aimed at surveying the state of current scientific knowledge about dynamical links between different compartments of terrestrial environments that are the subject of different scientific disciplines. A comprehensive survey of the literature of the

respective disciplines would have been far from feasible. Instead, we performed an analysis of a selection of comprehensive process models deemed to be representative by experts of the respective disciplines. That approach is based on the basic assumption that models can be regarded as condensed repositories of scientific knowledge, or as “collective intelligence” of the respective discipline (Beven 2001).

In general, (natural) science can be regarded as “a process of constructing predictive conceptual models” (Gilbert 1991). Here, the term “computer model” or “process model” is restricted to approaches of dynamic system theory of deterministic cause-effect relationships, being aware of the fact that a plethora of other model approaches exist, e.g., to mimic observed behaviour. However, this does not necessarily mean computer models that try to mimic the interplay of various single processes in a quantitative way. This type of modelling is more common in some disciplines of environmental sciences compared to others which surely introduced some bias in our analysis. In addition, computer models usually serve specific aims and are restricted to certain temporal and spatial scales rather than aiming at representing the complete state of science. That does not only affect the selection of single processes being modelled but also the selection of links between different compartments. For example, geological processes act at different time scales compared to biogeochemical processes in freshwater systems and thus are rarely linked in numerical models. Correspondingly, links that turned out not to be implemented in coupled environmental models are not necessarily deemed essential by experts, as has been shown in this study (cf. Appendix F: Ratio of process representation).

In addition numerous subjective decisions had to be taken that can all be questioned, e.g., with regard to the selection of models, the identification and classification of disciplines, processes, etc. They have been extensively discussed within the group of authors and with additional experts in order to minimize any bias as far as possible.

4.2. Existing and missing links in environmental sciences

Our analysis reveals strong dichotomies in system conceptualization and large differences in process representation and level of integration of environmental compartments among model types. Six main conceptualization issues stand out:

- 1) In general, the total number of processes linking different disciplines is clearly the largest for the physics category, and the least for the biology category. This has not necessarily to be interpreted in terms of shortcomings of knowledge or of modelling activities in environmental biology. Rather it might point to the fact that quantitative models are more characteristic for the aspirations in the physical categories of environmental disciplines to assess quantitative predictions from first principles whereas there are hardly any rigorous basic equations in biology due to the flexibility

and adaptability of biological systems. Thus a type of models with strict cause-effect relationships might be considered less suitable within biological sciences. On the other hand, the flexibility and adaptability of biological systems significantly hampers the implementation of the respective feedback in physics-type models, wherein they are often treated as more or less static properties. Moreover, this limited predictability might be a reason why highly-interconnected models are less common within the biology category (Figs. 3 and 5) as the uncertainty of coupled models would increase substantially.

2) On the one hand, ecological model types (forest, food web, general ecosystem) have a simplified representation of the physical and chemical environment where the biological system is embedded. On the other hand, models focused on physical and chemical transformations, and/or flow of matter (water, solutes, sediments, energy), have a simplified representation of life forms and biological processes. This pattern was consistent in all physical and chemical model types, from atmospheric and hydrologic modelling (e.g., Lyon et al. 2008) to reactive transport (Steefel et al. 2015), soil evolution and landscape evolution model types (Minasny et al. 2015). Only model types aimed at predicting carbon cycling, trace gas emissions or biogeochemical fluxes (terrestrial biosphere, ecosystem and ecohydrologic biogeochemistry models), or models for which soil biogeochemistry is pervasive for their purpose (agro-ecosystem and water quality models) have a more balanced representation of physical, chemical and biological processes, and a more comprehensive integration of environmental compartments (see Appendix F).

3) There seems to be an important mismatch in the conceptualization of the landscape-aquatic continuum between model types from freshwater sciences and the rest of scientific disciplines in which this continuum is relevant at their spatial scale of application. Aquatic models do not typically integrate landscape (both land surface and soil) and aquatic aspects, and do not explicitly model delivery and transformation processes occurring in the different terrestrial compartments, which are then included as boundary conditions (Bouwman et al. 2013). Conversely, catchment hydrologic model types, including water quality and ecohydrologic models, conceptualize rivers as delivery mechanisms of matter and nutrients to aquatic ecosystems rather than considering them as aquatic ecosystems in their own right, and hence include no or only few in-stream biogeochemical processes, assuming that landscape generation processes are dominant in determining river nutrient loads (Robson 2014). Likewise, integrated models of the terrestrial system (regional climate and terrestrial biosphere models) typically consider three stacked media - subsurface, including ground and surface water, vegetation, and atmosphere, in which freshwaters play a minor role as only physical processes and exchange fluxes of water, energy and momentum between large water bodies and the atmosphere are accounted for. In those model types, biogeochemical and ecological processes are not considered, and rivers, floodplains and wetlands are

neglected despite their role on global carbon cycling and trace gas emissions (Arneth et al. 2010, Fisher et al. 2014, Sutfin et al. 2016).

4) Vertical transport of matter is predominantly represented over lateral fluxes in most model types except for hydrological and hydrogeological models. Overall, the processes of erosion and the transport of sediments, carbon and nutrients in surface runoff and their spatial distribution across the landscape and their delivery to streams and other water bodies are hardly represented in current models from the analysed model types (Minasny et al. 2015, Doetterl et al. 2016, Vereecken et al. 2016b). Likewise, transport of matter in the soil is an issue that overall requires much improvement in many model types analysed here based on the experts' statements (see Table 1). Most model types, except hydrologic, regional climate and reactive transport models, neglect lateral flows of water, sediment, organic matter, and nutrients, and so redistribution across soils.

5) Regarding the conceptualization of the biosphere, faunal processes are hardly considered compared to plant processes, even in ecological model types (except for food web and general ecosystem models), despite their direct and indirect impacts on hydrology (Westbrook et al. 2013) and vegetation and crops dynamics (van der Putten et al. 2009, Fisher et al. 2014), their influence in soil formation and evolution (Samouëlian and Cornu 2008), and their role on mediating carbon dynamics and other biogeochemical cycles (Schmitz et al. 2010, 2014). Fluxes of water, energy, nutrients and pollutants between the atmosphere and soil compartments across the land surface interface are predominantly governed by transport and turnover processes in the soil-vegetation continuum (Grathwohl et al. 2013). In consequence, much emphasis has been put into modelling with ever increasing accuracy plant eco-physiological processes and vegetation dynamics while neglecting their above and belowground interactions with higher trophic level organisms and other life forms.

6) The naïve assumption, that the set of missing links (Fig. 4) would present a pattern inverse to that of implemented links (Fig.2), did not hold. Instead, the emerging patterns show remarkable similarities, not only with regard to a strong bias towards the physical category. This could indicate that even with respect to missing interdisciplinary links researchers tend not to think outside the box of the well-known processes and models. This is in line with another observation, that is, that no clear pattern emerged with respect to suggested future research efforts. Thus our results can hardly be used as a guideline for research strategies. In contrast, there seems to be urgent need for integrated system approaches and a corresponding theoretical basis rather than simply combining results and model approaches from different disciplines. The present study also shows that, in general, missing processes are primarily located in the soil compartment, including mainly chemical - e.g., carbon and nutrients cycles, soil-forming processes and geochemical transformations - and physical - e.g., water,

sediment, solutes and gas transport - processes. In addition, experts claim also a need to better integrate soil physical and chemical knowledge with agronomic and plant physiological knowledge. In addition, despite the importance of soil biological activity, modellers currently lack adequate tools to predict rates of biological processes in specific soil environments or link genetic diversity to soil ecosystem functioning (Vereecken et al. 2016b). Most relevant is the fact that microbial processes are still far from being well understood and accurately incorporated in models. Experts feel that there is need to explicitly consider microbial growth kinetics instead of using conceptual approaches based on first-order decay kinetics of multiple soil organic matter pools, to link specific features affecting model parameters of microbial growth, physiology and activity with spatial and temporal variation in soil physical and chemical properties, to model changes in microbial activity linked to adaptive mechanisms, or to incorporate functional groups to represent microbial diversity (Treseder et al. 2012, Wieder et al. 2013, Tang and Riley 2014).

4.3. Towards an integral understanding of environmental systems

According to the perceptions of the experts we are still far from a full quantitative understanding of environmental systems, as the number of reported missing links is much higher than the number of represented links in most model types. It is not only the fact that relevant links are still missing even in high-end more complex research models, but also that these next-generation models are perceived to be in need to incorporate a larger number of processes and drivers than more simple model types (Figs. 2 and 4). There is a self-reinforcing mechanism at play by which the more complex models get the more complex modellers believe they should evolve. There are certainly highly relevant missing processes that are acknowledged by and recurrent in the literature of most model types. However, the need to incorporate other processes is vastly dependent on the modeller's perception, and the benefits of their implementation for prediction accuracy compared to their actual constraint to model performance are decidedly uncertain. Thus our meta-analysis was not successful with respect to assessing the paths through which environmental sciences should evolve and determine where future efforts should be focused on. We were able to compile, though, a guidance for in which other discipline modellers might find suitable representations for the links claimed missing in their own discipline (Fig. 6).

According to our results, models used for regional climate systems, ecosystems (i.e., ecosystem biogeochemistry, agro-ecosystem and (agro-) terrestrial biosphere) and water quality processes exhibited the largest degree of interconnectedness (see Appendix F). The dynamic links implemented in these models could be used in other models to replace boundary conditions with simple approaches and conceptualizations borrowed from other interdisciplinary or disciplinary modelling fields (Figs. 6 and E.3), and thus

allow for representation of driving feedback interactions between compartments. In this respect, while most comprehensive ecosystem models can transfer conceptualizations and representations of a wider range of processes and factors that are missing in many analysed model types, there are key model types that incorporate rare but potentially highly relevant processes that are missing in most model types, and thus could be central nodes for the evolution of complex integrated numerical models. The transfer of knowledge, conceptualizations and modelling approaches from disciplinary model types that were not covered in this study (e.g., river ecohydrologic, microbial, root, or eco-physiological plant models) will certainly play also a key role in this evolution (Fig. E.3).

Our analysis also reveals that there are still many gaps in knowledge about potentially relevant feedback mechanisms and processes interfacing environmental compartments that preclude the development of more integrated models (Appendix B, Fig. E.3). In this respect, the pedosphere seems to be the great unknown despite its pivotal role on controlling energy and matter (water, sediment and solutes) transfer across the whole terrestrial system as it shares dynamic interfaces with all the rest of environmental compartments, and thus, it is wherein considerable research efforts should focus on to attain a full understanding of the integral environmental system.

No clear pattern emerged from our analysis of proposed dynamic links between different environmental systems' compartments that future research should focus on. This might be considered indicative of a more fundamental problem. Contrary to, e.g., physics or chemistry, environmental sciences so far lack a common sound theoretical basis that would guide research activities outside the boxes of scientific disciplines. Our findings suggest that there is little hope that environmental research would inevitably or pragmatically converge towards an integrated environmental systems theory.

In any case, there seems to be an evident need of integrated system-based terrestrial research platforms in which ecosystem-level monitoring and long-term cause/effect-based experimentation can provide data and understanding on interactions and feedbacks between physical, chemical and biological processes in such a way that novel modelling approaches and theoretical frameworks can be developed and tested. These research infrastructures should employ a cross-scale and multi-compartment approach, covering large spatial scales to allow for testing novel upscaling techniques.

5. Conclusion

Environmental systems have been proven to be subject to numerous links and feedbacks between the realms of different scientific disciplines. However, these links are neither well studied due to the disciplinary structure of environmental research, nor is there a systematic survey for possible blind spots in science. This study aimed at providing

some basic information and first evidence. To that end, an extensive review was performed, analysing 346 review papers with respect to interdisciplinary links implemented in 23 model types (118 models) from eight environmental disciplines as well as compiling missing links postulated in the scientific literature.

Key findings and their implications were:

- There were clear and significant differences between model types and disciplines with respect to implemented interdisciplinary links. The most widespread interdisciplinary links are between physical processes in meteorology, hydrology and soil science that drive or set the boundary conditions (e.g., air temperature, precipitation) for other processes. In addition, there are many interdisciplinary and/or inter-category links established from or to terrestrial ecology processes, comprising physical as well as chemical and biological processes. In contrast, freshwater and geological processes were hardly linked to processes in other environmental disciplines.
- Interdisciplinary physical processes were the most commonly implemented, and biological processes the least ones. That could be, partly at least, due to principally differing basic properties of physical versus biological systems. Including more biological processes in existing models seems to be more than just a technical challenge due to less strict cause-effect relationships of biological compared to physical processes in environmental systems.
- Many of the missing links postulated in the literature for single model types are already implemented in other model types. Thus single model types could benefit substantially from other model types.
- Missing interdisciplinary links stated in the literature tended to mimic the pattern of existing links. In addition, missing links have mostly been postulated for complex models. Thus there is a clear tendency in the scientific literature to reinforce the existing rather than at identifying new emerging fields of interdisciplinary environmental sciences as a guideline for future research strategies.

This study is a first step. We highly encourage similar studies following different approaches. We strongly feel that an inventory of the state of the science and identification of strengths and weaknesses of current research of the terrestrial environment would be worthwhile to foster scientific progress beyond disciplinary boundaries.

6. Acknowledgements

Part of the work has been funded by the German Research Foundation (DFG) (LI 802/5-1), which is highly appreciated. Additional funding by the Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ) is acknowledged. This study would not have been possible without initiation, valuable contributions and comments from members of the expert group on Environmental Systems Theory within the working group of the Alliance of Science Organisations in Germany about Infrastructures in Terrestrial Research, led by Ingrid Kögel-Knabner and Georg Teutsch.

7. References

- Arneeth, A., Sitch, S., Bondeau, A., Butterbach-Bahl, K., Foster, P., Gedney, N., de Noblet-Ducoudré, N., Prentice, I. C., Sanderson, M., Thonicke, K., Wania, R., Zaehle, S. 2010. From biota to chemistry and climate: towards a comprehensive description of trace gas exchange between the biosphere and atmosphere. *Biogeosciences* 7: 121-149.
- Beven, K. 2001. On modelling as collective intelligence. *Hydrological Processes* 15: 2205-2207.
- Bouwman, A. F., Bierkens, M. F. P., Griffioen, J., Hefting, M. M., Middelburg, J. J., Middelkoop, H., Slomp, C. P. 2013. Nutrient dynamics, transfer and retention along the aquatic continuum from land to ocean: towards integration of ecological and biogeochemical models. *Biogeosciences* 10: 1-23.
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao, S., Thornton, P. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G-K, Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Ciais, P., Dolman, A. J., Bombelli, A., Duren, R., Peregon, A., Rayner, P. J., Miller, C., Gobron, N., Kinderman, G., Marland, G., Gruber, N., Chevallier, F., Andres, R. J., Balsamo, G., Bopp, L., Bréon, F.-M., Broquet, G., Dargaville, R., Battin, T. J., Borges, A., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Butler, J., Canadell, J. G., Cook, R. B., DeFries, R., Engelen, R., Gurney, K. R., Heinze, C., Heimann, M., Held, A., Henry, M., Law, B., Luyssaert, S., Miller, J., Moriyama, T., Moulin, C., Myneni, R. B., Nussli, C., Obersteiner, M., Ojima, D., Pan, Y., Paris, J.-D., Piao, S. L., Poulter, B., Plummer, S., Quegan, S., Raymond, P., Reichstein, M., Rivier, L., Sabine, C., Schimel, D., Tarasova, O., Valentini, R., Wang, R., van der Werf, G., Wickland, D., Williams, M., Zehner, C. 2014. Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. *Biogeosciences* 11: 3547-3602.

1057 Csardi, G., Nepusz, T. 2006. The igraph software package for complex network
 1058 research. InterJournal Complex Systems 1695. <http://igraph.sf.net> (accessed 8
 1059 September 2017).

1060 Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E.,
 1061 Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S.,
 1062 da Silva Dias, P.L., Wofsy S.C., Zhang, X. 2007: Couplings Between Changes in the
 1063 Climate System and Biogeochemistry. In: Climate Change 2007: The Physical Science
 1064 Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the
 1065 Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen,
 1066 Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.)]. Cambridge University
 1067 Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

1068 DFG. 2013. Strategy paper “Long-Term Perspectives and Infrastructure in Terrestrial
 1069 Research in Germany – A Systemic Approach“, Working Group “Infrastructures in
 1070 Terrestrial Research“, Senate Commission on Agroecosystem Research, Senate
 1071 Commission on Water Research, Senate Commission on Future Directions in
 1072 Geoscience, National Committee on Global Change Research.

1073 Doetterl, S., Berhe, A.A., Nadeu, E., Wang, Z., Sommer, M., Fiener, P. 2016. Erosion,
 1074 deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and
 1075 models to address C cycling in dynamic landscapes. Earth-Science Reviews 154: 102-
 1076 122.

1077 Ellis, E.C. 2011. Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. Proceedings
 1078 of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science 369: 1010-
 1079 1035.

1080 Falkowski, P., Scholes, R.J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N.,
 1081 Hibbard, K., Hoegberg, P., Linder, S., Mackenzie, F.T., III Moore, B., Pedersen, T.,
 1082 Steffen W. 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system.
 1083 Science 290: 291-296.

1084 Fisher, J. B., Huntzinger, D. N., Schwalm, C. R., Sitch, S. 2014. Modeling the terrestrial
 1085 biosphere. Annual Review of Environment and Resources 39: 91-123.

1086 Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin,
 1087 F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard,
 1088 E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder,
 1089 P.K. 2005. Global consequences of land use. Science 309: 570-574.

1090 Fraley, C., Raftery, A.E., Scrucca, L., Murphy, T.B., Fop, M. 2016. Mclust: Gaussian
 1091 Mixture Modelling for Model-Based Clustering, Classification, and Density Estimation
 1092 R Package Version 5.2.

1093 Gilbert, S.W. 1991. Model building and a definition of science. *Journal of Research in*
1094 *Science Teaching* 28: 73-79.

1095 Grathwohl, P., Rügner, H., Wöhling, T., Osenbrück, K., Schwientek, M., Gayler, S.,
1096 Wollschlaeger, U., Benny Selle, B., Pause, M., Delfs, J.-O., Grzeschik, M., Weller, U.,
1097 Ivanov, M., Cirpka, O. A., Maier, U., Kuch, B., Nowak, W., Wulfmeyer, V., Warrach-
1098 Sagi, K., Streck, T., Attinger, S., Bilke, L., Dietrich, P., Fleckenstein, J.H., Kalbacher,
1099 T., Kolditz, O., Rink, K., Samaniego, L., Vogel, H.-J., Werban, U., Teutsch, G. 2013.
1100 Catchments as reactors - a comprehensive approach for water fluxes and solute turn-
1101 over. *Environmental Earth Sciences* 69: 317-333.

1102 Gruber, N., Galloway, J.N. 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen
1103 cycle. *Nature* 451: 293-296.

1104 IPCC. 2013. Climate change 2013: the physical science basis. A report of Working
1105 Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva,
1106 Switzerland.

1107 Lyon, S.W., Dominguez, F., Gochis, D.J., Brunsell, N.A., Castro, C.L., Chow, F.K.,
1108 Fan, Y., Fuka, D., Hong, Y., Kucera, P.A., Nesbitt, S.W., Salzmann, N., Schmidli, J.,
1109 Synder, P.K., Teuling, A.J., Twine, T.E., Levis, S., Lundquist, J.D., Salvucci, G.D.,
1110 Sealy, A.M., Walter, M.T. 2008. Coupling terrestrial and atmospheric water dynamics
1111 to improve prediction in a changing environment. *Bulletin of the American*
1112 *Meteorological Society* 89: 1275-1279.

1113 Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K., Studer, M., Roudier,
1114 P. 2016. Cluster: “Finding Groups in Data”: Cluster Analysis Extended Rousseeuw et
1115 al. R Package Version 2.0.4.

1116 Minasny, B., Finke, P., Stockmann, U., Vanwalleggem, T., McBratney, A.B. 2015.
1117 Resolving the integral connection between pedogenesis and landscape evolution. *Earth-*
1118 *Science Reviews* 150: 102-120.

1119 R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R
1120 Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
1121 (accessed 8 September 2017).

1122 Robson, B.J. 2014. State of the art in modelling of phosphorus in aquatic systems:
1123 Review, criticisms and commentary. *Environmental Modelling & Software* 61: 339-
1124 359.

1125 Samouëlian, A., Cornu, S. 2008. Modelling the formation and evolution of soils,
1126 towards an initial synthesis. *Geoderma* 145: 401-409.

1127 Schellnhuber, H. J. 1999. “Earth System“ Analysis and the Second Copernican
1128 Revolution. *Nature* 402, Millennium Supp. 2: 19-23.

1129 Schmitz, O.J., Hawlena, D., Trussell, G.C. 2010. Predator control of ecosystem nutrient
1130 dynamics. *Ecology Letters* 13: 1199-1209.

1131 Schmitz, O.J., Raymond, P.A., Estes, J.A., Kurz, W.A., Holtgrieve, G.W., Ritchie,
1132 M.E., Schindler, D.E., Spivak, A.C., Wilson, R.W., Bradford, M.A., Christensen, V.,
1133 Deegan, L., Smetacek, V., Vanni, M.J., Wilmers, C.C. 2014. Animating the Carbon
1134 Cycle. *Ecosystems* 17: 344-359.

1135 Simmer, C., Thiele-Eich, I., Masbou, M., Amelung, W., Crewell, S., Diekkruieger, B.,
1136 Ewert, F., Hendricks Franssen, H.-J., Huisman, A. J., Kemna, A., Klitzsch, S., Kollet,
1137 N., Langensiepen, M., Loehnert, U., Rahman, M., Rascher, U., Schneider, K., Schween,
1138 J., Shao, Y., Shrestha, P., Stiebler, M., Sulis, M., Vanderborght, J., Vereecken, H., van
1139 der Kruk, J., Zerenner, T., Waldhoff, G. 2015. Monitoring and modeling the terrestrial
1140 system from pores to catchments - the transregional collaborative research center on
1141 patterns in the Soil-Vegetation-Atmosphere System. *Bulletin of the American*
1142 *Meteorological Society*, 96: 1765-1787.

1143 Steefel, C., Appelo, C., Arora, B., Jacques, D., Kalbacher, T., Kolditz, O., Lagneau, V.,
1144 Lichtner, P., Mayer, K., Meeussen, J., Molins, S., Moulton, D., Shao, H., Šimunek, J.,
1145 Spycher, N., Yabusaki, S., Yeh, G. 2015. Reactive transport codes for subsurface
1146 environmental simulation. *Computational Geosciences* 19: 445-478.

1147 Studer, M. 2014. *WeightedCluster R Package Version 1.2*.

1148 Sutfin, N., Wohl, E., Dwire, K. 2016. Banking carbon: a review of organic carbon
1149 storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian
1150 ecosystems. *Earth Surface Processes and Landforms* 41: 38-60.

1151 Syvitski, J.P.M., Kettner, A. 2011. Sediment flux and the Anthropocene. *Philosophical*
1152 *Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*
1153 369: 957-975.

1154 Tang, J., Riley, W.J. 2014. Weaker soil carbon-climate feedbacks resulting from
1155 microbial and abiotic interactions. *Nature Climate Change* 5: 56-60.

1156 Treseder, K.K., Balser, T.C., Bradford, M.A., Brodie, E.L., Dubinsky, E.A., Eviner,
1157 V.T., Hofmockel, K.S., Lennon, J.T., Levine, U.Y., MacGregor, B.J., Pett-Ridge, J.,
1158 Waldrop, M.P. 2012. Integrating microbial ecology into ecosystem models: challenges
1159 and priorities. *Biogeochemistry* 109, 7-18.

1160 van der Putten, W., Bardgett, R., de Ruiter, P., Hol, W., Meyer, K., Bezemer, T.,
1161 Bradford, M., Christensen, S., Eppinga, M., Fukami, T., Hemerik, L., Molofsky, J.,
1162 Schädler, M., Scherber, C., Strauss, S., Vos, M., Wardle, D. 2009. Empirical and
1163 theoretical challenges in aboveground-belowground ecology. *Oecologia* 161: 1-14.

1164 Vereecken, H., Pachepsky, Y., Simmer, C., Rihani, J., Kunoth, A., Korres, W., Graf, A.,
1165 Hendricks Franssen, H. J., Thiele-Eich, I., Shao, Y. 2016a. On the role of patterns in

1166 understanding the functioning of soil-vegetation-atmosphere systems. *Journal of*
1167 *Hydrology* 542: 63-86.

1168 Vereecken, H., A. Schnepf, J.W. Hopmans, M. Javaux, D. Or, T. Roose, J.
1169 Vanderborght, M.H. Young, W. Amelung, M. Aitkenhead, S.D. Allison, S. Assouline,
1170 P. Baveye, M. Berli, N. Brüggemann, P. Finke, M. Flury, T. Gaiser, G. Govers, T.
1171 Ghezzehei, P. Hallett, H.J. Hendricks Franssen, J. Heppell, R. Horn, J.A. Huisman, D.
1172 Jacques, F. Jonard, S. Kollet, F. Lafolie, K. Lamorski, D. Leitner, A. McBratney, B.
1173 Minasny, C. Montzka, W. Nowak, Y. Pachepsky, J. Padarian, N. Romano, K. Roth, Y.
1174 Rothfuss, E.C. Rowe, A. Schwen, J. Šimůnek, A. Tiktak, J. Van Dam, S.E.A.T.M. van
1175 der Zee, H.J. Vogel, J.A. Vrugt, T. Wöhling I.M. Young. 2016b. Modeling soil
1176 processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose Zone Journal* 15: 1-
1177 57.

1178 Vörösmarty, C.J., Sahagian, D. 2000. Anthropogenic disturbance of the terrestrial water
1179 cycle. *BioScience* 50: 753-765.

1180 Warnes, G.R., Bolker, B., Bonebakker, L., Gentleman, R., Huber, W., Liaw, A.,
1181 Lumley, T., Maechler, M., Magnusson, A., Moeller, S., Schwartz, M., Venables, B.
1182 2016. *Gplots: Various R Programming Tools for Plotting Data* R Package Version
1183 3.0.1.

1184 Westbrook, C.J., Veatch, W., Morrison, A. 2013. Is ecohydrology missing much of the
1185 zoo? *Ecohydrology* 6: 1-7.

1186 Wieder, W.R., Bonan, G.B., Allison, S.D. 2013. Global soil carbon projections are
1187 improved by modelling microbial processes. *Nature Climate Change* 3: 909-912.

1188 Zacharias, S., Bogen, H., Samaniego, L., Mauder, M., Fuss, R., Putz, T., Frenzel, M.,
1189 Schwank, M., Baessler, C., Butterbach-Bahl, K., Bens, O., Borg, E., Brauer, A.,
1190 Dietrich, P., Hajnsek, I., Helle, G., Kiese, R., Kunstmann, H., Klotz, S., Munch, J.C.,
1191 Papen, H., Priesack, E., Schmid, H.P., Steinbrecher, R., Rosenbaum, U., Teutsch, G.,
1192 Vereecken, H. 2011. A network of terrestrial environmental observatories in Germany.
1193 *Vadose Zone J* 10: 955-973.

1194

Table 1. Degree to which analysed model types represent main categories of processes and factors from the different environmental compartments based on model purpose. Symbols indicate: ✓ accurate representation, ≈ representation should be improved, ✗ poor or lack of representation, — representation not necessary.

Scientific disciplines	Atmospheric science				Hydrology				Soil science			Geology		Terrestrial ecology				Freshwater science		Agricultural sciences		Forestry sciences	
Processes/Model types	RCM	Hydro-RCM	RCSM	Hydro	Macro-Hydro	Hydro-WQ	EcoHydro	EcoHydro-BGC	Ecosyst-BGC	Soil-Evo-prof	Soil-Evo-land	React-Trans	LEM	TBMoff	TBMon	Food-web	GEM	River	Lake	Agro-Eco	Agro-TBM	Forest-land	Forest-gap
Atmosphere																							
Atmospheric physics	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Atmospheric chemistry	✓	✗	✓	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Land surface																							
Land surface-Atmosphere water fluxes	✓	✓	✓	✓	≈	≈	✓	✓	≈	✗	✗	✗	—	✓	✓	—	—	✗	✗	≈	✓	✗	✗
Land surface-Atmosphere energy fluxes	✓	✓	✓	≈	≈	✗	≈	≈	≈	✗	✗	✗	—	✓	✓	—	—	—	—	✗	✓	—	—
Land surface hydrology	≈	✓	✓	✓	≈	✓	✓	✓	≈	✗	≈	✗	≈	≈	✓	✗	✗	✗	✗	≈	≈	✗	✗
Soil erosion	—	—	—	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	—	—	—	—	✗	✗	≈	✗	—	—
Sediment transport	—	—	—	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	—	—	—	—	✗	✗	✗	✗	—	—
Solute transport	—	—	—	✓	✗	≈	✗	✗	✗	✗	✗	✗	—	—	—	—	—	✗	✗	✗	✗	—	—
Soil																							
Surface-subsurface water flow coupling	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	—	—	—	✗	—	—	✗	—	—	—	—	—	—	—	—
Soil hydrology	✗	✓	✓	✓	≈	≈	≈	≈	≈	≈	✗	✓	✗	≈	≈	✗	✗	✗	✗	≈	≈	✗	✗
SOM cycling	✗	✗	✓	—	✗	≈	✗	✓	✓	≈	✗	—	—	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	≈	≈
N cycling	✗	✗	✗	—	✗	≈	✗	≈	✓	✗	✗	—	—	≈	≈	✗	✗	✗	✗	✓	≈	✗	✗
P cycling	✗	✗	✗	—	—	≈	✗	✗	≈	—	—	—	—	✗	✗	—	—	✗	✗	≈	✗	✗	✗
Trace gas emissions	✗	✗	≈	—	—	—	—	≈	✓	—	—	✓	—	≈	≈	—	—	—	—	≈	≈	✗	✗
Microbial processes	✗	✗	✗	—	—	✗	—	✗	≈	✗	✗	✗	—	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Chemical weathering	—	—	—	✗	—	✗	✗	✗	✗	✓	≈	✓	✗	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Heat transfer	≈	✓	✓	≈	✗	✗	≈	≈	≈	✗	✗	✓	✗	≈	✓	—	—	—	—	≈	✗	—	—
Gas transport	—	—	✗	—	—	—	—	✗	≈	≈	✗	✓	—	✗	✗	—	—	—	—	≈	✗	—	—
Solute transport	—	—	—	✓	✗	✓	✗	✗	✗	≈	✗	✓	—	✗	✗	✗	—	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Reactive transport	—	—	—	✗	—	✗	—	—	✗	—	✗	✓	✗	—	—	—	—	—	—	✗	—	—	—
Soil genesis and evolution	—	—	—	✗	—	✗	✗	✗	✗	✓	≈	✗	✗	—	—	—	—	—	—	✗	—	—	—
Vegetation																							
Soil-Plant-Atmosphere system fluxes	✓	✓	✓	✗	✗	≈	✓	✓	✓	✗	✗	✗	—	✓	✓	✗	—	✗	✗	≈	✓	≈	≈
Plant eco-physiology	✗	✗	≈	✗	✗	≈	✓	✓	≈	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	≈	✓	≈	≈
Vegetation dynamics	✗	✗	≈	✗	✗	—	≈	≈	≈	✗	✗	✗	✗	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	✓	✓
Trace gas emissions	✗	✗	≈	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≈	≈	—	—	—	—	—	≈	✗	✗
Root dynamics	✗	✗	✗	✗	✗	✗	≈	≈	≈	✗	✗	✗	—	≈	≈	—	—	✗	✗	≈	≈	≈	≈
Roots-Soil interactions	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	≈	✗	✗	✗	—	✗	✗	—	—	✗	✗	≈	✗	✗	✗
Soil-Plant biogeochemistry coupling	✗	✗	✗	—	✗	≈	✗	≈	✓	✗	✗	✗	—	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Disturbances	✗	✗	≈	✗	✗	✗	≈	≈	✗	✗	✗	—	✗	≈	≈	✗	✗	✗	✗	✗	≈	✓	✓
Forestry																							
Harvest	✗	✗	✗	—	✗	✗	✗	≈	≈	—	—	—	—	≈	≈	—	—	—	—	—	—	✓	✓
Forestry practises	—	—	—	—	—	—	✗	✗	≈	—	—	—	—	✗	✗	—	—	—	—	—	—	✓	✓
Agriculture																							
Crops dynamics	✗	✗	✗	—	✗	≈	✗	≈	≈	—	—	—	—	≈	≈	—	—	✗	✗	✓	✓	—	—
Harvest	✗	✗	✗	—	✗	≈	✗	≈	≈	—	—	—	—	≈	≈	—	—	✗	✗	✓	✓	—	—
Agricultural practises	✗	✗	✗	—	✗	≈	✗	≈	≈	—	—	—	—	✗	✗	—	—	✗	✗	✓	≈	—	—
Irrigation	✗	✗	✗	✗	✗	≈	✗	≈	≈	—	—	—	—	≈	≈	—	—	✗	✗	✓	✓	—	—
Fauna																							
Plant-hervibore interactions	—	—	—	—	—	—	✗	✗	✗	—	—	—	—	✗	✗	✓	✓	—	—	✗	✗	✗	✗
Trophic interactions	—	—	—	—	—	—	✗	✗	✗	—	—	—	—	✗	✗	✓	✓	—	—	—	—	✗	✗
Non-trophic interactions	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	≈	✗	—	—	—	—	—	—
Nutrients flux across trophic levels	—	—	—	—	—	—	✗	✗	✗	—	—	—	—	✗	✗	✗	✗	—	—	—	✗	✗	✗
Freshwaters																							

Groundwater-surface water flow/solutes fluxes	✖	≈	✖	✓	✖	≈	✖	✖	—	—	—	—	—	✖	✖	—	—	✖	✖	—	✖	—	—
Atmosphere-surface water/energy fluxes	≈	✖	≈	≈	≈	✖	✖	✖	—	—	—	—	—	✖	✓	—	—	✓	✓	—	✖	—	—
River routing	✖	≈	≈	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	✖	—	✓	✖	≈	—	✖	✓	✓	—	✖	—	—
Channel erosion/deposition	—	—	—	✖	✖	≈	✖	✖	—	—	✖	—	✓	—	—	—	—	≈	—	—	—	—	—
Solute transport	—	—	—	✓	✖	✓	—	✖	—	—	—	—	—	—	—	—	—	✓	—	—	—	—	—
Biogeochemistry	—	—	✖	—	✖	≈	—	✖	—	—	—	—	—	—	—	—	✖	✓	✓	—	—	—	—
Trophic interactions	—	—	—	—	—	✖	—	✖	—	—	—	—	—	—	—	—	✖	✓	✓	—	—	—	—
Riparian areas	—	—	✖	✖	✖	✖	✖	✖	—	—	—	—	—	✖	✖	—	—	✖	✖	—	—	—	—
Lakes/wetlands/Reservoirs	≈	≈	≈	✖	≈	≈	✖	✖	—	—	—	—	✓	✖	✓	—	✖	✓	✓	—	✖	—	—
Trace gas emissions	✖	✖	✖	—	—	—	—	✖	—	—	—	—	—	✖	✖	—	—	✓	✓	—	✖	—	—

Description of model types

[Click here to download Supplementary material for on-line publication only: Appendix A. Description of model types.doc](#)

Synthesis Modelling Gaps

[Click here to download Supplementary material for on-line publication only: Appendix C. Synthesis - Modelling gaps.xlsx](#)

Full matrix of processes
[Click here to download Supplementary material for on-line publication only: Appendix D. Full Matrix of Processes.xlsx](#)

Network models

[Click here to download Supplementary material for on-line publication only: Appendix E. Network models.doc](#)

Anhang A.5

Bericht „Datenmanagement“

Anhang A.5

Bericht Datenmanagement

1 Einleitung und Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht werden etablierte Dateninfrastrukturen der primär Fach- und Kompartiment-spezifischen Observatorien sowie von Forschungsprojekten in Deutschland zusammengestellt. Ziel dieser Bestandsaufnahme ist es, einen möglichst umfassenden Überblick der existierenden Datenbestände zu erhalten. Wegen der großen fachlichen Breite und der institutionellen Vielfalt der etablierten Dateninfrastrukturen und ihrer spezifischen Managementkonzepte kann diese Zusammenstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder Repräsentativität erheben. Dennoch kann sie die aktuelle Situation in der Umweltforschung und im Umwelt-Monitoring Deutschlands veranschaulichen. Der Fokus der Bestandsaufnahme lag auf:

- 1) der Dokumentation existierender Projekte/Infrastrukturen und
- 2) der Identifizierung der jeweils verwendeten technischen Lösungsansätze.

Aus der vorliegenden Bestandsaufnahme wird deutlich, dass

- 1) die bestehenden Datenmanagement-Strukturen überaus heterogen sind,
- 2) für die Datenhaltung und Qualitätssicherung sehr unterschiedliche Standards bestehen,
- 3) es derzeit keine Informationsplattform gibt, die einen umfassenden Überblick über die bestehenden Infrastrukturen und ihre Datenbestände ermöglicht.

Übergreifende und insbesondere systemorientierte Auswertungen der z.T. über Jahrzehnte erhobenen Umweltdaten sind deshalb nur sehr eingeschränkt möglich.

2 Dateninfrastrukturen

2.1 Agrarsysteme

Agrarsysteme stellen mit einem Flächenanteil von beinahe 50 Prozent an der Gesamtfläche einen entscheidenden Faktor für die terrestrische Forschung in Deutschland dar. Die Systeme, die sowohl räumlich als auch zeitlich kleinskalig strukturiert sind und durch die Landwirtschaft geformt und stetig verändert werden, stellen eine besondere Herausforderung für die Entwicklung geeigneter Monitoring- und Dateninfrastrukturen dar.

Die Datenlage und entsprechende Dateninfrastrukturen lassen sich generell in drei Teilbereiche untergliedern:

- 1) Daten zu Ackerbau und Nutztierbeständen, die im Rahmen z.B. des Herkunftssicherungs- und Informationssystems für Tiere auf Bundesebene oder der betriebsindividuellen Zahlungsansprüche an die zuständigen Behörden übermittelt werden. Diese Daten stellen für die terrestrische Umweltforschung im Prinzip eine sehr wertvolle Ressource dar. Jedoch bestehen generell datenschutzrechtliche Hindernisse, bestehende Datensammlungen zusammenzuführen und diese in einem nächsten Schritt der breiten Forschungsgemeinschaft verfügbar zu machen.
- 2) Daten, die mit standardisierten Verfahren meist räumlich sowie zeitlich stichpunktartig erhoben werden. Solche Erhebungen umfassen unter anderem die Wertprüfungen neuer Kulturpflanzensorten des Bundessortenamtes, die jährlich an i.d.R. 14 Orten in Deutschland angelegt werden, sowie die Erhebungen des „Farm Accountancy Data Network“ (FADN), das jährlich ca. 80.000 landwirtschaftliche Betriebe in der EU mit standardisierten Fragebögen bezüglich ihrer Produktionsdaten befragt.
- 3) Den größten Teil der Datenressourcen zu Agrarsystemen machen einzelne, spezifische Erhebungen und Datenbestände aus. Diese Daten, die zu unterschiedlichsten Fragestellungen sowie zeitlichen und räumlichen Umfängen erhoben werden, liegen bei den jeweiligen Arbeitsgruppen an Universitäten, Hochschulen, Forschungsinstituten sowie bei einzelnen Ressortforschungseinrichtungen und Behörden von Bund und Ländern. Insgesamt ist nur ein geringer Teil dieser Daten über Meta-Informationen zentral erfasst oder öffentlich zugänglich.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Projekte initiiert, um die vorhandenen Datenressourcen zu Agrarsystemen besser nutzen zu können. Bereits 2001 wurden im Rahmen des Projekts „EuroSOMNET“ Informationen zu deutschen, britischen und russischen Dauerfeldversuchen in einer Datenbank archiviert (<http://www.rothamsted.ac.uk/aen/eusomnet/>). Eine bessere Koordination der deutschen Feldversuchsinfrastrukturen ist das Anliegen der gleichnamigen Arbeitsgruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Die Ressortforschungseinrichtungen des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) wie etwa das Thünen- oder das Julius Kühn-Institut arbeiten an der Einführung umfassender Datenmanagementsysteme, um so vorhandene Daten zu Agrar- und Forstsystemen besser zu integrieren und zu harmonisieren. Neben der Entwicklung von Metadatenbanken bieten insbesondere auch Datenrepositorien wie das „CGIAR AgTrials Projekt“ (<http://www.agtrials.org/>) eine Plattform für den bi- und multilateralen Austausch von Forschungsdaten. Weiterhin sollen Daten aus Bodendauerbeobachtungen u.a. auch durch das BonaRes-Vorhaben (<http://www.bonares.de>) verfügbar gemacht werden.

2.2 Forstsysteme

Im Vergleich zu Agrarsystemen sind Forstsysteme wesentlich beständiger, was sich auch in den Monitoring-Systemen widerspiegelt. In den zurückliegenden Jahrzehnten wurde ein

Stichprobennetz für das Forst-Monitoring aufgebaut. Dabei wird flächendeckend in niedriger zeitlicher Auflösung und mit begrenztem Parameterumfang die Datengrundlage für das EU-Level-I-Programm „Bodendauerbeobachtung-Forst“ und für die bundesweiten Wald- und Boden-Zustandserhebungen durchgeführt. Zusätzlich wird auf rund 90 Intensivmessflächen (Level-II-Programm) eine Vielzahl von Waldzustands- und Umweltkenngroßen in hoher zeitlicher Auflösung ermittelt.

Die zumeist von den Ländern erhobenen und weitestgehend bundes- und europaweit vereinheitlichten Erhebungsdaten laufen auf Bundes- und EU-Ebene für weitere Auswertungen zusammen. Die Ergebnisse der Erhebungen werden regelmäßig auf Landes- und Bundesebene veröffentlicht, sind jedoch nicht räumlich verortet. Im Rahmen des FutMon-Projektes (www.futmon.org) soll das europäische Wald-Monitoring in den 24 teilnehmenden Ländern weiter ausgebaut und verbessert werden.

2.3 Boden

Für die Beurteilung des Wasser-, Luft- und Stoffhaushaltes von Böden und Landschaften werden zum einen statische bodenphysikalische Kennwerte wie Feldkapazität oder Luftkapazität und zum anderen dynamische Kenngrößen wie Temperatur, Wassergehalt oder Bodenwärmestrom benötigt.

Die statischen Kenngrößen werden im Allgemeinen auf der Basis von Bodenprofilen ermittelt oder mit Hilfe der Bodenkundlichen Kartieranleitung bzw. DIN 4220 geschätzt. Auf Bundesebene existiert mit dem staatlichen Bodeninformationssystem „BODIS“ ein Netzwerk länderübergreifender Informationssysteme, das bodenbezogene Daten und Untersuchungsmethoden zusammenführt. Als Bestandteil von „BODIS“ stellt das Fachinformationssystem Boden (FISBo) Flächen-, Labor- und Profildaten bereit, die über die entsprechenden Bundes- und Landesbehörden verfügbar sind.

Dynamische Kenngrößen werden standortbezogen im Rahmen verschiedener Untersuchungsprogramme und Observatorien erhoben:

- Bei den Bodendauerversuchsflächen (BDF) werden neben land- oder forstwirtschaftlichen Kenngrößen meist auch klimatische und bodenphysikalische Parameter erhoben. Obwohl in Deutschland die Anzahl der BDF im Vergleich zu anderen europäischen Ländern relativ groß ist, sind diese Daten auf verschiedene Institutionen (Länderbehörden, Universitäten, Forschungsanstalten) verteilt. Sie sind deshalb kaum harmonisiert, und der Datenzugriff ist oft eingeschränkt; eine umfassende Übersicht bzw. Dokumentation der vorhandenen BDF in Deutschland ist derzeit nicht verfügbar. Im Rahmen des o.g. Vorhabens „EuroSOMNET“ wurden auch thematische BDF-Datenbestände in einer SYBASE-Datenbank zusammengefasst und über ein ACCESS-Frontend zugänglich gemacht. Viele der erhobenen Daten sind bislang jedoch noch nicht öffentlich zugänglich.

- Im deutschen Netzwerk für ökologische und ökosystemare Langzeitforschung (LTER-D, <http://www.ufz.de/lter-d>) werden an etwa 28 Standorten auch bodenphysikalische Parameter erhoben. Metadaten der deutschen LTER-Gebiete sind zusammen mit denen aller europäischen LTER-Gebiete in einer zentralen Datenbank zusammengefasst. Die Metadaten sind über das Webtool „DEIMS“ (Drupal Ecological Information Management System, <http://data.lter-europe.net/deims>) abrufbar, die eigentlichen Daten sind im Allgemeinen jedoch nicht öffentlich zugänglich. Eine Lösung wird derzeit im Vorhaben eLTER H2020 (<http://www.lter-europe.net/elter>) angestrebt, in dem u.a. auch eine Infrastruktur zum Austausch von Daten geschaffen werden soll.
- Im TERENO-Netzwerk (Terrestrial Environmental Observatories, <http://www.tereno.net>) werden an vier Observatorien in Deutschland Daten zur Untersuchung langfristiger Auswirkungen des globalen Wandels erhoben. Neben Stoff- und Wärmeflüssen, gewässerkundlichen Daten und Biodiversitätsparametern werden auch bodenphysikalische Parameter erhoben. Daten und Metadaten werden innerhalb einer räumlich verteilten Dateninfrastruktur (Spatial Data Infrastructure, SDI) durch OGC-konforme Web-Dienste ausgetauscht. Geprüfte Daten sind über ein Data Discovery Portal frei verfügbar.
- Das „International Soil Moisture Network“ (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at>) ist eine internationale Kooperation verschiedener Einrichtungen, die aktuelle Bodenfeuchtedaten zur Verfügung stellen. Die Daten werden in einer zentralen Datenbank gespeichert und über ein Webportal veröffentlicht.

2.4 Geologie

Geowissenschaftliche Fachdaten werden in Deutschland überwiegend von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer erhoben. Bei den Daten handelt es sich sowohl um Punktdaten (chemische Analysen von Proben, geophysikalische Messungen an einzelnen Lokationen) als auch um Flächen- und Liniendaten, die beispielsweise geologische oder bodenkundliche Einheiten repräsentieren. Von der BGR werden Flächendaten ab dem Maßstab 1:200.000 und kleiner bearbeitet, für höher aufgelöste Kartenwerke sind die Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesländer zuständig. Diese Daten sind meist in Fachinformationssystemen organisiert. Öffentlich zugänglich über Web-Portale der Länder bzw. der BGR sind im Allgemeinen geologische oder hydrogeologische Karten, nicht jedoch die dahinter liegenden Fachdaten.

Die Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands sind untereinander vernetzt <http://www.infogeo.de/>. Durch die organisatorische Vereinigung bzw. die thematischen Berührungspunkte gibt es in den Bundesländern Kooperationen zwischen den Geologischen Diensten einerseits und den Umwelt- und Naturschutzbehörden andererseits. Monitoring-Programme und Dauerbeobachtung sind aber bei den Geologischen Diensten von

untergeordneter Bedeutung. Das Geoportal des Bundes (www.geoportal.de) greift auf die angeschlossenen Geokataloge der Länder zurück und ermöglicht so eine bundesweite Recherche nach Metadaten.

2.5 Hydrologie und Wasserwirtschaft

Hydrologische und wasserwirtschaftliche Daten umfassen zahlreiche Kenngrößen, die auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen erhoben werden. Zu den hydrologischen Kenngrößen zählen u.a. Wasserstand, Durchflussmengen, Fließzeiten, Evaporation, Transpiration, Bodenfeuchte oder auch der biologische Gewässerzustand. Ergänzend werden klimatische Daten erhoben, die vor allem für die Berechnung der Verdunstung und für die Hochwasservorhersage verwendet werden.

Zu den wasserwirtschaftlichen Kenngrößen zählen Parameter, die Aufschluss über die Bewirtschaftung des Wassers durch den Menschen geben, bspw. zur Trinkwassergewinnung und -verteilung, zur Bewirtschaftung von Abwässern oder zur regionalen Entwässerung und Bewässerung.

Der Gewässerschutz ist durch eine Vielzahl rechtlicher Vorgaben auf EU-, Bundes- und Landesebene geregelt. Dementsprechend betreiben nahezu alle Akteure auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft Messprogramme, in denen der quantitative, qualitative und biotische Zustand der Gewässer kontinuierlich überwacht wird. Die Messprogramme zur chemischen Beschaffenheit von Grund- und Oberflächengewässern unterliegen im Wesentlichen den Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Gleiches gilt für die biologischen Gewässeruntersuchungen.

Diese Daten werden in der Regel lokal bei den jeweiligen Bundes- und Landesbehörden, Wasserverbänden etc. gespeichert und verwaltet. In vielen Fällen werden wasserwirtschaftliche Daten von den jeweiligen Institutionen über Web-Portale veröffentlicht. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) betreibt im Auftrag der Wasserwirtschaftsverwaltungen des Bundes und der Länder die Internetplattform „WasserBLICK“ (<http://www.wasserblick.net>). Hier sind auch das „Nationale Berichtsportal Wasser“ und das zentrale Fachportal der zuständigen Behörden angesiedelt. Ausgewählte Inhalte sind öffentlich zugänglich. Das Geoportal der Bundesanstalt für Gewässerkunde (www.geoportal.bafg.de) bietet eine Metadaten-Recherche und stellt Download-Dienste gemäß der INSPIRE-Richtlinie der EU für Datensätze zur Verfügung. Über diesen Weg sollen alle INSPIRE-identifizierten Datensätze der Wasserwirtschaft, soweit sie bundesweit relevant sind, erreichbar sein. Die Bundesländer stellen hierfür über standardisierte Schnittstellen ihre Daten für eine homogene nationale Datenbasis zur Verfügung. Das nationale Hochwasserportal (<http://www.hochwasserzentralen.de/>) bietet bundesweit aktuelle und archivierte Hochwasserdaten mit den entsprechenden Links zu den Landesämtern.

Neben den oben beschriebenen Datenbeständen werden hydrologische und wasserwirtschaftliche Parameter für kleinere Gebiete z.T. auch in Kompartiment-übergreifenden Beobachtungs- und Forschungsnetzwerken wie z.B. LTER-D oder TERENO erhoben.

2.6 Aquatische Systeme

Seen, Flüsse, Kanäle und nahe Küstengewässer nehmen mit 2,4 Prozent (8.576 km²) zwar einen geringen Anteil der Gesamtfläche Deutschlands ein, sie haben jedoch eine große Relevanz für die Trinkwasserversorgung, sind Orte der Naherholung, dienen als Transportwege und tragen zur biologischen Vielfalt bei.

Die Datenerhebung der Seen zum Zweck der Überwachung (Trinkwasser, Badebetrieb, EU-Wasserrahmenrichtlinie) oder des Naturschutzes erfolgt primär durch das Umweltbundesamt, die länderspezifischen Seenkataster und die Talsperren-Verbünde. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Datenerhebungen im Rahmen von Forschungsprojekten an Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Die erhobenen Daten sind bislang kaum über Metadaten-Information zentral erfasst; auch sind Primärdaten kaum öffentlich zugänglich.

In dem DFG-Projekt „Database Infrastructure for Long-Term Data of German Lakes“ (LakeBase) werden derzeit Langzeitdaten deutscher Seen und Talsperren in eine gemeinsame Datenbank-Infrastruktur überführt. „LakeBase“ zielt darauf ab, diese Daten mit Metadaten-Information auszustatten und für wissenschaftliche Projekte verfügbar zu machen. Die neue Datenbank-Infrastruktur soll mit internationalen Datenbanken ähnlicher Struktur wie bspw. „LTER - North Temperate Lakes“ (Long-Term Ecological Research), „GLEON“ (Global Lake Observatory Network) oder „NetLake“ (NETworking LAKe observatories in Europe) verbunden werden. Dateninfrastrukturen wie „LakeBase“ können als Substrukturen in größere Datenportale wie das „Network for global Freshwater Biodiversity“ (Biofresh) (<http://www.freshwaterbiodiversity.eu/>) oder das Datenportal des „UNESCO Centre Water Resources and Global Change“ (http://www.ihp-germany.de/home/home_node.html) integriert werden.

2.7 Atmosphäre und Klima

Atmosphärische Prozesse umfassen ein Spektrum von Raum- und Zeitskalen von < 1 mm (z.B. Wolkenmikrophysik) bis zum Erdumfang (planetare Wellen) und Zeitskalen von < 1 s (Turbulenz) bis zu vielen Jahren (Klima). Eine entsprechende Beobachtung des dreidimensionalen Atmosphärenzustands ist derzeit prinzipiell nicht möglich, wird aber als Anfangsbedingung für die numerische Wettervorhersage benötigt. Hierzu wird vom Deutschen Wetterdienst (DWD) ein Mess- und Beobachtungsnetz betrieben, das zusammen

mit den Beobachtungen anderer Wetterdienste und Organisationen sowie Hintergrundinformation aus numerischen Modellen die Startpunkte der Vorhersagen bereitstellt.

Während für die Wettersvorhersage vor allem rasche Verfügbarkeit, Qualitätskontrolle und gute Gebietsabdeckung im Vordergrund stehen, sind für die Überwachung des Klimas insbesondere die Homogenität, Langzeitstabilität und genaue Re-Kalibration der Beobachtungen entscheidend. Im Zuge der Erhebungen der Sachstandsberichte des International Panel on Climate Change (IPCC) wurde 1992 das Global Climate Observing System (GCOS, <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos>) eingerichtet. Hier werden Standards zur globalen Klimabeobachtung gesetzt und Pläne zur Schließung von Defiziten bei den Beobachtungssystemen erarbeitet. Die global ausgerichtete Initiative GEOSS zur Entwicklung eines erdumfassenden, verteilten Erdbeobachtungssystems will über das GEOSS-Portal auch einen verbesserten Zugang zu den verteilten Erdbeobachtungsdaten schaffen.

Das Global Observing System (GOS) wird von der World Meteorological Organisation (WMO) betrieben und enthält diverse Beobachtungstypen, die sich im Wesentlichen drei Teilbereichen widmen:

- 1) Konventionelle Beobachtungen umfassen *insitu*-Sensoren, die atmosphärische Parameter wie Temperatur, Wind, Feuchte und Druck im direkten Kontakt mit der Atmosphäre messen. Dazu unterhält z.B. der DWD ein Netz von ca. 500 Wetterstationen und ca. 1800 Niederschlagsstationen. Viele weitere Wetterstationen werden von privaten Wetterdiensten, Anwendern und in Forschungsprojekten betrieben. An ca. zehn Stationen in Deutschland werden vom DWD täglich Radiosondierungen für Vertikalprofile durchgeführt. Immer wichtiger werden Beobachtungen von kommerziellen Flugzeugen, die vor allem Temperatur- und Feuchteprofile bei Start und Landung erheben, z.B. AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay). Aktuelle und historische archivierte Tagesdaten deutscher Stationen finden sich unter (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/opendata/opendata.html>).
- 2) Bodengestützte Fernerkundung nutzt die Wechselwirkung von elektromagnetischen und auch akustischen Wellen mit atmosphärischen Bestandteilen und ist daher ein indirektes Messverfahren. Durch die Möglichkeit, abtastende (scannende) Messungen durchzuführen, können zum Teil großräumige Gebiete abgedeckt werden. Mit der voranschreitenden Technologieentwicklung können diese Geräte zunehmend voll-automatisch betrieben werden. Beispiele sind:
 - Das Ceilometermessnetz des DWD mit über 100 Geräten für die Erfassung von Wolkenbasishöhe und Sichtweite.
 - Das Wetterradarnetzwerk des DWD mit 16 Geräten liefert deutschlandweit Beobachtungen der Radarreflektivität, Dopplergeschwindigkeit und polarimetrischer Größen. In Kombination mit punktuell an den Niederschlagsstationen gemessenen

stündlichen Werten wird daraus das RADOLAN Niederschlagsprodukt erstellt, das weiteren Nutzern zur Verfügung gestellt wird (<https://www.dwd.de/DE/leistungen/opendata/opendata.html>).

- Aus bodengebundenen Stationen des Global Navigation Satellite Service (GNSS) kann der integrierte Wasserdampfgehalt kontinuierlich an mehr als 100 Stationen abgeleitet werden.

3) Einige Stationen in Deutschland vereinen ein Spektrum von Fernerkundungssensoren für eine möglichst umfassende Beobachtung der Atmosphäre wie das Richard Aßmann Observatorium Lindenberg, das Jülich Observatory for Cloud Evolution (JOYCE), die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, das Leipzig Aerosol and Cloud Remote Observations System (LACROS) und der mobile KITCube.

Seit 2014 sind viele Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes über einen ftp-Zugang verfügbar (<ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>) und können frei genutzt werden. Mit Landesumweltbehörden bestehen Datenaustauschvereinbarungen zur gegenseitigen Nutzung von Daten. Zur Bestimmung der Luftqualität betreiben die Länder an definierten Mess-Stationen stündlich Messungen von Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffdioxid (NO₂), Feinstaub (PM₁₀); diese Daten werden online veröffentlicht. Im Rahmen des BMBF-Projekts „High Definition of Clouds and Precipitation for Climate Research“ wird ein Datenportal für Wolken- und Niederschlagsbeobachtungen aufgebaut (<https://icdc.zmaw.de/projekte/hdcp2.html>). Das „Integrated Climate Data Center“ (ICDC) der Universität Hamburg stellt vorwiegend Klimabeobachtungsdaten aus Satellitenbeobachtungen und Reanalysedaten bereit. Es bereitet existierende Datensätze nach einheitlichen Standards für die Nutzung auf und erhebt im Rahmen von Projekten eigene Daten bzw. harmonisiert existierende Datenbestände. Derzeit koordiniert das ICDC eine Initiative zur Harmonisierung der Datenstandards zwischen verschiedenen Klimadatenzentren.

2.8 Flussmessungen Land-Atmosphäre

Flussmessungen von Wasser- und Kohlenstoffflüssen sowie Treibhausgasen

Automatisierte Messungen der Energie- und Wasserflüsse zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre werden durch Eddykovarianz-Messungen erhoben. Der Betrieb dieser Messstationen liegt in der Regel in der Verantwortlichkeit einzelner Monitoring- und Forschungsprojekte. Ein Teil der deutschen Messungen trägt zum internationalen „Fluxnet“-Netzwerk (<http://fluxnet.ornl.gov/>) bei. Harmonisierte Daten werden z.B. durch das „FluxData“-Projekt (<http://www.fluxdata.org>) bereitgestellt.

Das deutsche „Integrated Carbon Observation System“ (ICOS-D, <http://www.icos-infrastruktur.de>), der deutsche Beitrag zur europäischen ICOS Forschungsinfrastruktur, hat zum Ziel, durch Messungen in der Atmosphäre, im Ozean und über Land Einflüsse von Landnutzung, Klimavariabilität und Änderungen im marinen System auf die Treibhausgas-

Bilanz zu bestimmen. Hier werden überwiegend klimatische Parameter und Stoffflüsse gemessen, aber auch Daten zur Bodenfeuchte, -temperatur und zum Bodenwärmestrom. Diese Daten sollen langfristig in zentralen thematischen Datenbanken zusammengeführt und zugänglich gemacht werden. Derzeit sind grundlegende Metadaten zu den jeweiligen Stationen online verfügbar.

Messtürme zur kontinuierlichen Messung von Spurengaskonzentrationen

Es existiert ein globales Netzwerk aus hohen Messtürmen (200 bis 300 m), an denen kontinuierlich Messungen klimarelevanter Spurengase durchgeführt werden. An den meisten Standorten werden Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Kohlenmonoxid (CO), Distickstoffmonoxid (N₂O, Lachgas), an einzelnen auch Schwefelhexafluorid (SF₆) gemessen. Daneben werden kontinuierlich alle relevanten meteorologischen Größen erfasst, die für begleitende Modellrechnungen sowie zur Interpretation der Konzentrationsmessungen benötigt werden.

Betreiber solcher Messeinrichtungen in Deutschland sind die Max-Planck-Institute für Biogeochemie in Jena sowie für Chemie in Mainz und die Universität Hamburg. An manchen dieser Standorte sind zusätzlich Eddykovarianz-Flussmessungen installiert. Als Messtürme werden zum Teil existierende Masten verwendet (z. B. Ochsenkopf oder Bialystok) oder es wurden neue Messtürme errichtet (u.a. ZOTTO, ATTO). Eine Übersicht der Standorten findet sich unter: <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgc-systems/index.shtml>

2.9 Mikrobiologie

Neben den internationalen Archiven für molekulare Daten (z.B. EMBL/EBI-ENA) gibt es mehrere nationale Datenbanken:

- „SILVA“ (<http://www.arb-silva.de/>) bietet Zugang zu qualitätsgeprüften Sequenzdaten der ribosomalen RNA Gene, „BacDive“ (<http://bacdive.dsmz.de/>) zu Metainformationen für Bakterien, „BRENDA“ (<http://www.brenda-enzymes.org/>) zu Enzymen und „PANGAEA“ (<http://www.pangaea.de/>) zu geowissenschaftlichen- und Umweltdaten. Gemeinsam bilden diese vier Datenbanken den Datenbankknoten der im Aufbau befindlichen „Deutschen Bioinformatik Netzwerk Infrastruktur“ (<http://www.denbi.de/>). Dieses BMBF-geförderte Netzwerk hat zum Ziel, Bioinformatikdienste für die deutsche Wissenschaftsgemeinschaft bereitzustellen sowie deren internationale Einbindung und Vernetzung zu koordinieren.
- Für die langfristige Aufbewahrung mikrobiologischer Kulturen und assoziierter Daten bietet die „Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen“ (DSMZ) eine international anerkannte Infrastruktur an.

Weitere mikrobiologische Daten, die im Rahmen von Verbundprojekten erhoben werden, sind über die unter 2.9 genannten Plattformen für Biodiversitätsdaten verfügbar. Im Unterschied zu „klassischen“ mikrobiologischen Ansätzen spielt hier die Einordnung der erhobenen Daten in das die Probenahme umgebende Ökosystem eine entscheidende Rolle. Damit einher geht der Trend zur umfangreichen Metadatenerfassung. Im Rahmen von z.B. „GFBio“ wird der Ansatz verfolgt, mittels eines „Broker-Services“ die molekularbiologischen Daten bei „EMBL/EBI-ENA“ und parallel dazu die Umweltdaten bei „PANGAEA“ zu archivieren. Die Bindung der Daten wird dabei erhalten, um den Nutzern das Auffinden der komplementären Datenpakete zu erleichtern. Diese Methodik kann auf andere Rezipienten wie bspw. „DSMZ“ ausgedehnt werden.

2.10 Biodiversität

In der deutschen Biodiversitätsforschung gibt es mehrere koordinierte Projekte, die ihre Daten verfügbar machen und einen starken Fokus auf der Synthese haben. Dazu gehören z.B. das Jena Experiment (www.the-jena-experiment.de), die Biodiversitäts-Exploratorien (<http://www.biodiversity-exploratories.de/startseite/>) sowie das Deutsche Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig (www.idiv.de). Diese Projekte haben Datenpolicies verabschiedet, über die eine öffentliche Verfügbarkeit der Metadaten sowie die Veröffentlichung der Daten nach einer Embargo-Periode gefordert wird.

Wichtige Quellen für Biodiversitätsdaten sind zudem thematisch spezialisierte Datenbanken wie z.B. die „TRY-Datenbank“ (www.try-db.org), die „German Vegetation Reference Database“ (www.biologie.uni-halle.de/bot/vegetation_db/) oder das „German Barcode of Life“ (GBOL) Projekt, das die Artenvielfalt in Deutschland mittels genetischer Fingerabdrücke (Barcodes) erfassen möchte (<https://www.bolgermany.de/gbol>).

Die DFG fördert seit 2013 die German Federation for Biological Data (GFBio, gfbio.org). Ziel dieses Projekts ist es, deutschen Biodiversitätsforschern eine Anlaufstelle zu bieten, die zum einen die langfristige Sicherung von Projektdaten der beteiligten Datenzentren vermittelt, zum anderen eine integrierte Suche über die Bestände dieser Datenzentren und weiterer Datenquellen ermöglicht. Beteiligte Datenzentren sind zurzeit: PANGAEA, ENA, Botanischer Garten und Botanisches Museum Berlin-Dahlem, Senckenberg, DSMZ, Museum für Naturkunde Berlin, Staatliche Naturwissenschaftliche Sammlungen Bayerns, Naturkundemuseum Stuttgart, Museum König. Daten der Biodiversitätsforschung in Deutschland, insbesondere Daten zum Artenvorkommen, sind international zudem über die „Global Biodiversity Information Facility“ (GBIF) (<http://www.gbif.de/>) zugänglich.

Abkürzungsverzeichnis

FADN	Farm Accountancy Data Network
EuroSOMNET	Database for long-term experiments on soil organic matter in Europe
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research
AgTrials	Global Agricultural Trial Repository and Database
BonaRes	Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie
FutMon	Further development and implementation of an EU-level forest monitoring system
BODIS	Bodeninformationssystem
FISBo	Fachinformationssystem Boden
BDF	Bodendauerversuchsflächen
LTER	long-term ecological research network
LTER-D	long-term ecological research network Deutschland
DEIMS	Drupal Ecological Information Management System
TERENO	Terrestrial Environmental Observatories
SDI	Spatial Data Infrastructure
OGC	Open Geospatial Consortium
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe
LakeBase	Database Infrastructure for Long-Term Data of German Lakes
GLEON	Global Lake Observatory Network
NetLake	NETworking LAKe observatories in Europe
Biofresh	Network for Global Freshwater Biodiversity
GCOS	Global Climate Observing System
GOS	Global Observing System
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay
RADOLAN	Radar-Online-Aneichung
GNSS	Global Navigation Satellite Service
JOYCE	Jülich Observatory for Cloud Evolution
LACROS	Leipzig Aerosol and Cloud Remote Observations System
KITCube	Advanced integrated atmospheric observation system at the Karlsruhe Institute for Technology (KIT)
ICDC	Integrated Climate Data Center
ICOS-D	Integrated Carbon Observation System Deutschland
ZOTTO	Zotino Tall Tower Observation Facility (sibirische Taiga)
ATTO	Amazonian Tall Tower Observatory
SILVA	Datenbank für qualitätsgeprüfte ribosomale RNA Sequenz Daten
BacDive	Bacterial Diversity Metadatabase
BRENDA	BRAunschweiger ENzym DATenbank
PANGAEA	Data Publisher for Earth and Environmental Science
DSMZ	Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen
GFBio	German Federation for Biological Data
EMBL/EBI-ENA	Nucleotide Sequence Database / European Bioinformatics Institute / European Nucleotide Archive
TRY-Datenbank	Plant Trait Database for Quantifying and scaling global plant trait Diversity

GBOL	German Barcode of Life
GBIF	Global Biodiversity Information Facility
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DWD	Deutscher Wetterdienst
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
WMO	World Meteorological Organisation
Sybase	ein SAP-Unternehmen