



Chancen und Herausforderungen von Bio-IT für Biodiversitätsmonitoring und Artenschutz: Von periodischen Bewertungen zu Echtzeiterfassung und -intervention

Prof. Dr. Birgitta König-Ries

Heinz-Nixdorf-Proessur für verteilte Informationssysteme
Institut für Informatik, Friedrich-Schiller-Universität Jena

Kontakt: Birgitta.Koenig-Ries@uni-jena.de

Datum: September 2020

Im Auftrag der Geschäftsstelle des

HIGHTECH FORUM

Inhaltsverzeichnis

1	Bedeutung des Biodiversitätsmonitorings	3
2	Die Umwelt wahrnehmen – Datenerfassung	3
3	Die Umwelt verstehen – Modellbildung	5
4	Die Umwelt beeinflussen – Intervention	5
5	Handlungsfelder und Herausforderungen für Politik und Gesellschaft	6
6	Danksagungen	7
7	Verwendete Referenzen	8

1 Bedeutung des Biodiversitätsmonitorings

Spätestens seit dem IPBES-Bericht¹ aus dem Jahr 2019 wissen wir, dass Biodiversität und mit ihr Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen, also die existentielle Grundlage menschlichen Lebens, weltweit stark zurückgehen. Nicht nur droht ein menschengemachtes Artensterben gigantischen Ausmaßes (IPBES spricht, ausgehend von einer Schätzung von insgesamt 8 Millionen Tier- und Pflanzenarten, von 1 Million Arten, deren Aussterben in den nächsten Jahrzehnten droht), sondern auch die genetische Diversität innerhalb einer Art sowie die Diversität von Ökosystemen und Landschaften nehmen ab. Hauptursachen für diese Verluste sind intensivierete Landnutzung und der Klimawandel, aber auch andere Faktoren, u. a. Bevölkerungswachstum, Umweltverschmutzung und die zunehmende Verbreitung invasiver Arten spielen eine Rolle. Die aktuelle Entwicklung hat zur Folge, dass nicht nur die Aichi-Ziele² verfehlt werden, sondern auch die Erreichung der meisten der UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals)³ nicht möglich sein wird. Biodiversität ist die Grundlage zahlreicher Ökosystemdienstleistungen, wie zum Beispiel die Bereitstellung von sauberem Wasser, Nahrung, Medikamenten, Grundstoffen und Klimaregulation. Sandra Díaz, eine der Hauptautorinnen des IPBES-Berichts wird in der Pressemitteilung zu seiner Veröffentlichung wie folgt zitiert: "Die Biodiversität und die Naturgaben für den Menschen sind unser gemeinsames Erbe und das wichtigste Sicherheitsnetz für das Überleben der Menschheit". Grundlegende Veränderungen im Umgang mit der Natur sind also dringend nötig, um dieses Überleben zu sichern.

Der IPBES Bericht ist das Ergebnis eines sehr aufwändigen Prozesses: Beteiligt waren 145 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als Hauptautorinnen und -autoren sowie zahllose weitere in beratender Funktion. In die Auswertung gingen Ergebnisse aus über 15.000 einzelnen Studien ein.

Ein ähnlich aufwändiger Prozess liegt den "Roten Listen" zugrunde. Auch hier erfolgt die Einschätzung des Gefährdungsgrades durch Expertinnen und Experten basierend auf wissenschaftlichen Studien, bürgerwissenschaftlichen Daten oder Expertenwissen⁴.

Diese Prozesse offenbaren eine dramatische Schwäche heutiger Ansätze zur Biodiversitätsbewertung: Wissen über den Zustand der Natur ist nicht jederzeit in Echtzeit (und damit rechtzeitig für wirkungsvolle Interventionen) verfügbar, sondern muss mühsam über Jahre hinweg zusammengesammelt werden und zwar auf Grundlage einer häufig unvollständigen und uneinheitlichen Datengrundlage. Damit besteht die Gefahr, dass Veränderungen lange Zeit unbemerkt bleiben und möglicherweise Kippunkte erreicht werden, bevor ein Eingreifen möglich ist.

Die zahlreichen existierenden Monitoringprogramme (z. B. Monitoring der Flora-Fauna-Habitat Lebensraumtypen, häufiger Brutvogelarten, Agrarflächen mit hohem Naturwert, Gewässergüte im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie oder Bundeswaldinventur) füllen diese Lücke nicht: Sie sind zu wenig einheitlich (u. a. Zeitreihen vs. Einzelmessungen, Einzelarten vs. Artengruppen), methodisch unterschiedlich und unvollständig⁵.

Es fehlt somit eine verlässliche Datengrundlage zur Bewertung der Biodiversität und ihrer Veränderung in Deutschland und insbesondere für eine realistische Modellbildung; es ist also schwierig abzuschätzen, welche Interventionsmöglichkeiten es gibt und wie erfolversprechend diese sind.

BioIT-Innovationen haben das Potential, dies fundamental zu ändern. Mit ihnen wird es möglich, in (Quasi-)Echtzeit Daten über den Zustand der Umwelt zu erheben, diese zu analysieren, Interventionsmöglichkeiten zu ermitteln und zeitnah zu realisieren.

Im Folgenden betrachten wir drei wichtige Aspekte dieser Vision: die Datenerhebung, die Modellbildung, sowie Interventionsmöglichkeiten.

2 Die Umwelt wahrnehmen – Datenerfassung

Im Zusammenhang mit dem Internet of Things wird häufig die Metapher verwendet, die Erde erhalte eine "elektronische Haut" aus Sensoren, die es ermöglichen, jederzeit ihren Zustand zu erfassen. Für das Erfassen der Biodiversität ist dies eine komplexe Herausforderung: Biodiversität ist erstens stark ortsgebunden und – im Unterschied etwa zu Klimamessungen – nicht ohne Weiteres interpolierbar, muss also mit hoher räumlicher Auflösung gemessen werden, zweitens durch zahlreiche Faktoren, die jeweils unterschiedliche Messmethoden benötigen, bestimmt und drittens tendenziell in unzugänglichen Gebieten, die nur mit großem Aufwand vor Ort beprobt werden können, besonders hoch. Dies bringt Schwierigkeiten im Design eines Messsystems mit sich und erfordert die Kombination unterschiedlicher Ansätze. Einige wichtige Aspekte werden im Folgenden diskutiert:

GEOBON hat das Konzept der Essential Biodiversity Variables (EBVs) entwickelt⁶. Es handelt sich hier um eine Reihe wichtiger Biodiversitätsindikatoren, auf deren Aufnahme sich verständigt werden sollte, sowie Workflows zur Erzeugung dieser ein-

heitlichen Datenprodukte aus heterogenen Rohdaten (etwa⁷). Damit wird die Basis für ein vereinheitlichtes und integrierbares Biodiversitätsmonitoring gelegt. Viele der unten beschriebenen Ansätze tragen Daten zu EBVs bei.

Ein wichtiger Baustein zukünftigen Biodiversitätsmonitorings werden unterschiedliche Fernerkundungsmethoden sein. Neben Satelliten spielen auch Überfliegungen, Drohnen aber auch erdgebundene Messtechniken (etwa groundbased LIDAR) eine Rolle. In den letzten Jahren wurden hier Auflösungen erreicht, die sinnvolle Anwendungen zur Erfassung von Biodiversität ermöglichen. Aus den per Fernerkundung gemessenen Spektren lassen sich beispielsweise Biomasse, aber auch Informationen zu Wachstumsformen, Phänologie und funktionalen Eigenschaften von Pflanzen (z. B. der Stickstoffgehalt in den Blättern) ableiten. Großer Vorteil der neuen fernerkundungsbasierten Methoden ist, dass sie erstmalig ein globales Monitoring in guter räumlicher und zeitlicher Auflösung ermöglichen⁸.

Grundvoraussetzung für die Nutzung von Fernerkundungsdaten ist aber das Vorhandensein umfangreicher in-situ-Daten. Nur wenn diese Daten in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung stehen, können Modelle zur Interpretation der Fernerkundungsdaten (also zur Übersetzung der Spektraldaten in Biodiversitätsrelevante Maße) erfolgreich trainiert oder parametrisiert werden.

Zudem kann Fernerkundung nicht alle Aspekte der Biodiversität erfassen. Ein weiterer wichtiger Baustein sind daher bioinformatische Methoden, die genetische Analysen ermöglichen. Besonders wichtig sind Ansätze zum Metabarcoding. Hierbei werden mittels einer Analyse die in einer Probe (einem Löffel Boden, dem Inhalt einer Insektenfalle) enthaltenen Arten anhand ihres genetischen Fingerabdrucks bestimmt. Für einige Anwendungen ebenfalls vielversprechend ist die Auswertung von Umwelt-DNA (environmental DNA, eDNA). Hier werden nicht die Organismen selber, sondern DNASpuren, die sie in der Umwelt hinterlassen haben, analysiert (siehe⁹ für eine generelle Einführung und¹⁰ für ein aktuelles Fallbeispiel aus der Schweiz). Bürgerwissenschaftlerinnen und –wissenschaftler können in die Probenahme für barcodingbasierte Monitoringaktivitäten einbezogen werden. Ein erfolgreiches Beispiel ist etwa das German Barcode of Life-Projekt¹¹. Eine weitere Option zur Erhebung der Daten kann eine zumindest teilweise Automatisierung sein, wie sie für metabarcoding Proben aber auch eine Vielzahl weiterer Daten im AMMOD-Projekt¹² entwickelt und evaluiert wird. Dieses Projekt hat das Analogon einer Wetterstation zur Erfassung der Artenvielfalt zum Ziel und betreibt umfangreiche Methodenentwicklung zur automatischen Erfassung zahlreicher Biodiversitätsdaten. Ähnliche Ansätze zur Instrumentierung von Ökosystemen werden auch andernorts verfolgt. Typische Verfahren, die dabei Verwendung finden sind Kamerafallen, Audioaufnahmen, Analyse von Chemikalien, diverse Sensoren für Umweltdaten.

Für Fernerkundung, Instrumentalisierung und (Bürger-)Wissenschaftler schwer zugängliche Gebiete müssen mit anderen Verfahren beprobt werden. In der Diskussion befindet sich beispielsweise die Nutzung von Sentinel-Arten für das Monitoring im marinen Bereich¹³. Vorstellbar ist auch der Einsatz bioinspirierter Roboter, die sich problemlos durch ein Ökosystem bewegen und dort nicht als Fremdkörper wahrgenommen werden. Erfolgreiche Beispiele zur Integration von Robotern in Ökosysteme gibt es bereits¹⁴, allerdings werden diese bislang nicht für Monitoringaufgaben genutzt.

Voraussetzung für die Beobachtung von Veränderungen ist das Vorhandensein von Vergleichsdaten. Es ist also unbedingt notwendig, in der Vergangenheit erhobene Daten für die Biodiversitätsbewertung nutzbar zu machen. Ein wichtiges Element hierzu ist die Digitalisierung der umfangreichen Sammlungen der naturhistorischen Museen, die uns Einblick in eine mehrhundertjährige Entwicklung von Biodiversität geben. Wichtig ist es hier, möglichst "tief" zu digitalisieren also über das im letzten Jahrzehnt übliche reine Abfotografieren hinausgehende Erschließung der Daten zu garantieren. Dieser sehr ressourcenintensive Prozess soll im DCOLL Projekt angegangen werden¹⁵. Anregungen kann hier auch das in den USA entwickelte Konzept der "extended specimen" liefern¹⁶.

Weitere wichtige Quellen sind bereits erhobene und zukünftige Daten aus der Wissenschaft, von Behörden und Naturgesellschaften. Existierende Arbeiten (siehe¹⁷ für ein Beispiel) zeigen, dass diese für Prognosezwecke genutzt werden können. Wertvolle weitere Quellen wären zudem bisher für die Biodiversitätsforschung unerschlossene Daten aus Präzisionslandwirtschaft und der Privatwirtschaft.

Zu guter Letzt muss sichergestellt werden, dass die erfassten Daten dauerhaft (d.h. über Jahrzehnte) verfügbar und nutzbar bleiben. Hier müssen passende Infrastrukturen geschaffen werden. Die gerade beginnende Nationale Forschungsdateninfrastruktur NFDI ist ein erster, wichtiger Schritt in diese Richtung. Mit NFDI4Biodiversity¹⁸ wird ab Herbst 2020 ein Konsortium gefördert, dessen Kernziel die Sicherung und Bereitstellung von qualitätsgesicherten biodiversitätsrelevanten Daten gemäß der FAIR Prinzipien¹⁹ ist. Allerdings ist über dieses Programm der Aufbau entsprechender Organisationsstrukturen, Expertise und Prozesse, nicht aber Beschaffung und Betrieb der dazu notwendigen Infrastruktur vorgesehen. Hier bleibt eine Lücke.

3 Die Umwelt verstehen – Modellbildung

Biodiversitätsmonitoring liefert im besten Fall umfassende Daten über die Biodiversität. Diese müssen jedoch interpretiert werden, bevor sie als Entscheidungsgrundlage dienen können. Benötigt werden Modelle für unterschiedliche Zwecke: Zum einen müssen aus Rohdaten (beispielsweise aus der Fernerkundung, aus Kamerafallen oder eDNA) für die Biodiversitätsbewertung relevante Parameter (z. B. Biomasse oder Art) abgeleitet werden. Hier werden heute häufig maschinelle Lernverfahren verwendet, die umfangreiche in-situ Daten als Trainingsgrundlage benötigen und als "black box" funktionieren, also keine für den Menschen nachvollziehbare Erklärung ihrer Ergebnisse liefern können. Es ist zu erwarten, dass Fortschritte in der Künstlichen Intelligenz, insbesondere im aktiven Forschungsfeld "Explainable AI" hier zu Verbesserungen führen werden. Auch klassische statistische Verfahren spielen zum Beispiel für Artverbreitungsmodelle eine wichtige Rolle. Damit die modellierten Daten für Biodiversitätsbewertungen genutzt werden können, ist eine Einigung auf Standards für die Modelle notwendig; ein erster Vorschlag für Best Practices findet sich in²¹.

Benötigt werden zweitens Modelle, die helfen, kausale Zusammenhänge zu erkennen und damit zum mechanistischen Verständnis von Ökosystemen und ihrer Funktion beitragen. Klassisch ist dies nur mit sehr aufwändigem, faktoriellem Experimentdesign möglich; solche Messungen sind in nichtkontrollierten Umgebungen praktisch nicht möglich. Es müssen also Methoden weiterentwickelt werden, die auf einer beschränkteren Datengrundlage kausale Zusammenhänge (statt nur Korrelationen) erkennen können. Hier handelt es sich um ein junges, aktuell auch in Deutschland sehr aktives Forschungsfeld mit ersten Anwendungen auch in der Umweltforschung^{22,23}

Benötigt werden zudem Simulationsmodelle, mit denen sich Szenarien durchspielen lassen und die diese Ergebnisse nachvollziehbar und zielgruppengerecht vermitteln. Eine Vielzahl solcher Modelle für unterschiedliche Fragestellungen und basierend auf unterschiedlichen Methoden existieren; wie oben erwähnt sind auch hier Best Practices notwendig, die bei der Auswahl geeigneter Modelle helfen und die Qualität der Ergebnisse sicherstellen.

Sollen Modelle in Echtzeit Entscheidungsgrundlagen liefern, so muss eine leistungsfähige Recheninfrastruktur und nahtloser Zugriff auf die benötigten Daten möglichst ohne Übertragung über ein Netzwerk zur Verfügung stehen. Im Rahmen der NFDI plant NFDI4Biodiversity die Entwicklung der NFDI Research Data Commons, einer cloudbasierten Umgebung, die Daten wie Programme (u. a. Modelle) beheimatet¹⁸. Wie oben bereits beschrieben, ist die dauerhafte Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur aber noch nicht gesichert.

4 Die Umwelt beeinflussen – Intervention

In der Präzisionslandwirtschaft sind Umwelt und IT-Technologie bereits zu einem weitgehend automatisierten Regelkreis verknüpft: Mittels Sensorik werden Daten erhoben, direkt ausgewertet und in Realzeit Interventionen (etwa Düngergabe) bestimmt und umgesetzt. Mittels BioIT-Innovationen ist eine ähnliche Verschmelzung auch im Bereich Biodiversitätserhalt denkbar, allerdings ungleich komplexer: Wesentliche oben bereits beschriebene Unterschiede sind die deutlich aufwändigere Datenbeschaffung sowie komplexeren Modelle mit einer größeren Zahl unbekannter Einflussfaktoren. Hinzu kommen weitere Aspekte, die die Komplexität erhöhen: Während in der Präzisionslandwirtschaft in der Regel Ertragssteigerung angestrebt wird, ist das Ziel bei der Erhaltung der Biodiversität weniger klar und teils widersprüchliche Interessen unterschiedlicher Stakeholder müssen berücksichtigt werden. Benötigt werden hier effektive Mechanismen der Kommunikation von Modellberechnungen an unterschiedliche Stakeholdergruppen und moderierte Verständigungsprozesse. Insbesondere grundlegende Änderungen mit Auswirkungen auf die Lebensgestaltung werden nur mit sehr guter Vermittlung realisierbar sein, wie sich gerade am Beispiel der COVID-Pandemie erleben lässt.

Eine weitere Schwierigkeit ist, dass die Wirksamkeit von Interventionen in vielen Fällen erst nach längerer Zeit beurteilt werden kann. So wird sich beispielsweise erst in mehreren Jahrzehnten zeigen, ob aktuelle Entscheidungen zur Artauswahl bei Neupflanzungen in Wäldern richtig waren. Auch hier sind leistungsfähige Modelle, die Ergebnisse und Unsicherheiten klar kommunizieren, unabdingbar.

Neben der Planung von Interventionen kann die BioIT perspektivisch auch zu ihrer Umsetzung beitragen: Am greifbarsten ist dies für urbane Ökosysteme, die sich durch eine hohe Bedeutung für das Wohlbefinden eines immer größer werdenden Anteils der Weltbevölkerung und eine schon vorhandene technische Infrastruktur auszeichnen. Diese kann genutzt werden, in Erweiterung des „Internet of Things“ ein „Internet of Nature“ zu schaffen, das Sensorik und Aktuatorik verbindet²⁴.

Wenn es gelingt, Roboter zu entwickeln, die als Bestandteil des Ökosystems agieren, dann können diese perspektivisch nicht nur zum Sammeln von Informationen (also zum klassischen Monitoring) eingesetzt werden: vorstellbar ist vielmehr mit Hilfe von Biorobotern aktiv in Ökosysteme einzugreifen. Erste Ansätze in dieser Richtung sind zum Beispiel die an der Queensland

Universität entwickelten COTSBots, autonome Roboter, die zum Schutz von Korallenriffen invasive Seesterne durch Giftinjektionen töten. In²⁷ werden solche Roboter, die ökologische Funktionen übernehmen und aktiv in Ökosysteme eingreifen, als *ecobots* bezeichnet. Neben den COTSBots werden in dieser Arbeit Roboterschwärme für unterschiedliche Aufgaben (u. a. gezieltes Ausbringen von Düngung oder Abbau von Schadstoffen) als bereits heute oder in naher Zukunft realisierbare Systeme genannt. Weitergehende Ansätze in dieser Richtung sind etwa Pflanzen-Roboter-Gemeinschaften²⁵, bei denen Roboter das Wachstum von Pflanzen gezielt beeinflussen²⁶. Betrachtet werden zudem hybride Gemeinschaften aus Robotern und Tieren, bei denen Roboter beispielsweise als Ersatz für fehlende Arten (etwa Minidrohnen zur künstlichen Bestäubung), als virtuelle Feinde oder als Artgenossen, die Schwarm- oder Herdenverhalten beeinflussen, wirken können¹⁴. Neben technischen Fragen sind in diesem Zusammenhang auch ethische und rechtliche Fragen offen. Diese werden detailliert in²⁷ diskutiert. Beispielhaft genannt seien hier Fragen der Sicherheit (wie kann z. B. garantiert werden, dass nur die intendierte Art angegriffen wird?), der Abschätzung möglicher „Seiteneffekte“ auf die Ökosysteme (wie ändern die *ecobots* Beziehungen und Dynamiken in den Ökosystemen, treten sie beispielsweise in Konkurrenz zu dort natürlich vorkommenden Arten?), und des Datenschutzes (insbesondere bei Einsatz in Umgebungen, die auch von Menschen bewohnt werden). Geklärt werden muss zudem, wie Ziele für den Einsatz von Robotern festgelegt werden, wie gerechte Verteilung der Risiken und Vorteile erreicht wird und wie zwischen unterschiedlichen Interessen der betroffenen Stakeholder ausgeglichen werden kann.

Ebenfalls erforscht werden zudem Pflanzen-Cyber-Hybride etwa im Projekt Cyborg Botany des MIT Media Labs²⁸. Über in die Pflanzen hineingewachsene Nanodrähte wird es möglich, diese für Sensorik, Aktuatorik und Kommunikation zu nutzen. Unter ethischen Gesichtspunkten problematischer ist die Entwicklung von Tier-Cyber-Hybriden, die – in der Regel durch direkte Signale in das Gehirn der Tiere – diese steuern können¹⁴. Noch offen ist, inwieweit diese Entwicklungen Beiträge für Ökosystemmonitoring und -management leisten können.

5 Handlungsfelder und Herausforderungen für Politik und Gesellschaft

Um die oben beschriebene Vision einer direkten Verknüpfung von Ökosystemen und IT-Technologien zu realisieren und einen Quasi-Echtzeit-Regelungskreislauf aufzubauen, ergeben sich diverse Handlungsfelder für die Politik, die teils bereits genannt wurden, hier aber nochmals zusammengefasst werden:

- Alle potenziell für die Biodiversitätsbewertung relevanten Daten sollten für diese öffentliche Aufgabe zur Verfügung stehen. Regelungsbedarf besteht hier insbesondere bei Daten, die sich im Besitz privatwirtschaftlicher Akteure befinden (insbesondere Präzisionslandwirtschaft und Umweltgutachten). Für andere existierende Daten sollten Ressourcen zu ihrer Mobilisierung bereitgestellt werden.
- Es müssen die Voraussetzungen für eine nachhaltige Infrastruktur geschaffen werden, die sicherstellt, dass Daten über Jahrzehnte hinweg verfügbar und nutzbar bleiben. Diese Infrastruktur sollte nicht nur Datenspeicherung, sondern auch -auswertung unterstützen. Denkbar wäre etwa eine leistungsfähige Cloudumgebung. Wichtig sind hier ausfinanzierte Infrastrukturen aber auch Personalmittel.
- Biodiversität und Biodiversitätsverlust können nicht national betrachtet werden. Die Einbindung entwickelter Lösungen in die internationale Landschaft ist notwendig. Wichtig ist es, Mechanismen zu finden, die ein umfassendes Biodiversitätsmonitoring in den Biodiversity Hotspots, die sich mehrheitlich im globalen Süden befinden, ermöglichen. Dies kann von den betreffenden Ländern vermutlich nicht aus eigener Kraft geleistet werden, ist aber auch im deutschen Interesse.
- Wesentlich ist in diesem Zusammenhang auch, dass die internationale, freie Verfügbarkeit von Daten sichergestellt wird. Im Rahmen der internationalen Verhandlungen zum Zugang zu Digital Sequence Information on Genetic Resources droht hier ein deutlicher Rückschritt gegenüber der seit Jahrzehnten etablierten und weltweit genutzten kostenlosen Bereitstellung von Daten in offenen von den USA, Japan und der EU finanzierten Repositorien wie NCBI, DDBJ und ENA. Deutschland sollte sich nicht nur im nationalen Interesse für eine Regelung einsetzen, die gewährleistet, dass die internationale Biodiversitätsforschung auch weiterhin ungehinderten Zugang zu diesen essenziellen Ressourcen erhält.
- Eine gute Datengrundlage und ein mechanistisches Verständnis von Ökosystemen sind notwendige, aber nicht hinreichende Bedingungen für den Erhalt der Biodiversität. Ein wichtiges Handlungsfeld ist das Co-Design von Handlungsoptionen mit einem breiten Spektrum von Stakeholdern und eine klare Verständigung über die zu erreichenden Ziele. BioIT kann hier die technische Grundlage schaffen aber einen gesellschaftlichen Dialog nicht ersetzen.
- Im Zusammenhang mit Biorobotik gibt es eine Vielzahl ungeklärter ethischer und vermutlich auch rechtlicher Fragen, zu denen ein gesellschaftlicher Dialog notwendig ist.

- Viele der oben beschriebenen Ansätze erfordern Forschungsarbeiten in der Informatik und in interdisziplinären Vorhaben. Beispielhaft genannt seien hier für die Informatik die Entwicklung mechanistischer, Kausalität einbeziehender Modelle sowie Arbeiten zur semantischen Beschreibung verwendeter Modelle zur Sicherung von Reproduzierbarkeit. Interdisziplinär muss etwa die Weiterentwicklung und Integration unterschiedlicher Monitoringmethoden betrachtet werden: Hier müssen technische Weiterentwicklung und ökologische Sinnhaftigkeit Hand in Hand gehen. Ein noch breiteres Spektrum von Disziplinen ist für Arbeiten zur Entwicklung hybrider Tier-Roboter-Gemeinschaften nötig. Hier müssen Ingenieurwissenschaften, Informatik, Ökologie und Gesellschaftswissenschaften zusammenwirken. Diese Vorhaben müssen adäquat umgesetzt werden. Problematisch ist der Mangel an qualifiziertem Nachwuchs an der Schnittstelle von Informatik und Biodiversität.

6 Danksagungen

In diesen Text gingen Anregungen von Alsayed Algergawy, Peter Dittrich, Jitendra Gaikwad, Jan Martin Keil, Frank Löffler und Jörg Overmann ein.

7 Verwendete Referenzen

- 1 IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- 2 Aichi Targets <https://www.cbd.int/sp/targets/>
- 3 UN Sustainable Development Goals <https://sdgs.un.org/goals>
- 4 Raw Data to Red List <https://www.iucnredlist.org/assessment/process>
- 5 Bonn, Bruelheide, König-Ries, Pereira, Settele, Winter, Wirth: Nationales Monitoringzentrum für Biodiversität: Notwendigkeit, Aufgaben, Organisation. Internes iDiv White Paper; https://www.idiv.de/fileadmin/content/iDiv_Files/Documents/White_paper_Monitoringzentrum_iDiv_et_al_20181218_de3.pdf
- 6 GEOBON: What are EBVs? <https://geobon.org/ebvs/what-are-ebvs/>
- 7 Kissling, W. D., Ahumada, J. A., Bowser, A., Fernandez, M., Fernández, N., García, E. A., ... & McRae, L. (2018). Building essential biodiversity variables (EBVs) of species distribution and abundance at a global scale. *Biological reviews*, 93(1), 600-625. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/brv.12359>
- 8 Cavender-Bares, J., Gamon, J. A., & Townsend, P. A. (2020). Remote Sensing of Plant Biodiversity. https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/39986/2020_Book_RemoteSensingOfPlantBiodiversi.pdf
- 9 Makiola, A., Compson, Z. G., Baird, D. J., Barnes, M. A., Boerlijst, S. P., Bouchez, A., ... & Creer, S. (2020). Key questions for next-generation biomonitoring. *Frontiers in Environmental Science*, 7. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2019.00197/full>
- 10 Die Biodiversität von Flüssen vorhersagen. Pressemitteilung der Universität Zürich vom 17.07.2020 <https://www.media.uzh.ch/de/medienmitteilungen/2020/Fluss-Biodiversitaet.html>
- 11 German Barcode of Life <https://www.bolgermany.de/>
- 12 AMMOD: Eine Wetterstation für die Artenvielfalt. <https://www.zfmk.de/de/forschung/projekte/ammod-einewetterstation-fuer-artenvielfalt>
- 13 Hazen, E. L., Abrahms, B., Brodie, S., Carroll, G., Jacox, M. G., Savoca, M. S., ... & Bograd, S. J. (2019). Marine top predators as climate and ecosystem sentinels. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(10), 565-574.
- 14 Romano, D., Donati, E., Benelli, G., & Stefanini, C. (2019). A review on animal-robot interaction: from biohybrid organisms to mixed societies. *Biological cybernetics*, 113(3), 201-225.
- 15 Deutsche Naturwissenschaftliche Sammlungen als integrierte Forschungsinfrastruktur <https://www.dcoll.de/>
- 16 Lendemer, J., Thiers, B., Monfils, A. K., Zaspel, J., Ellwood, E. R., Bentley, A., ... & Lagomarsino, L. (2020). The extended specimen network: A strategy to enhance US biodiversity collections, promote research and education. *BioScience*, 70(1), 23-30. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz140>
- 17 Bruelheide, H., Jansen, F., Jandt, U., Bernhardt-Römermann, M., Bonn, A., Bowler, D., ... & Jugelt, M. (2020). Using incomplete floristic monitoring data from habitat mapping programmes to detect species trends. *Diversity and Distributions*. <https://doi.org/10.1111/ddi.13058>
- 18 Glöckner, Frank Oliver, Diepenbroek, Michael, Felden, Janine, Güntsch, Anton, Stoye, Jens, Overmann, Jörg, ... Seeger, Bernhard. (2020, July 14). NFDI4BioDiversity – A Consortium for the National Research Data Infrastructure (NFDI). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3943645>
- 19 Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., ... & Bouwman, J. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific data*, 3(1), 1-9. <https://www.nature.com/articles/sdata201618>
- 20 Joly A. et al. (2020) LifeCLEF 2020 Teaser: Biodiversity Identification and Prediction Challenges. In: Jose J. et al. (eds) *Advances in Information Retrieval. ECIR 2020. Lecture Notes in Computer Science*, vol 12036. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-030-45442-5_70
- 21 Araújo, M. B., Anderson, R. P., Barbosa, A. M., Beale, C. M., Dormann, C. F., Early, R., ... & O'Hara, R. B. (2019). Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Science Advances*, 5(1), eaat4858. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4858>.
- 22 Larsen, A. E., Meng, K., & Kendall, B. E. (2019). Causal analysis in control-Impact ecological studies with observational data. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(7), 924-934. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13190>
- 23 Runge, J., Nowack, P., Kretschmer, M., Flaxman, S., & Sejdinovic, D. (2019). Detecting and quantifying causal associations in large nonlinear time series datasets. *Science Advances*, 5(11), eaau4996. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau4996>
- 24 Galle, N. J., Nitoslawski, S. A., & Pilla, F. (2019). The Internet of Nature: How taking nature online can shape urban ecosystems. *The Anthropocene Review*, 6(3), 279-287. <https://doi.org/10.1177/2053019619877103>
- 25 Hamann, H., Wahby, M., Schmickl, T., Zahadat, P., Hofstadler, D., Stoy, K., ... & Kuksin, I. (2015, December). Flora robotica-mixed societies of symbiotic robot-plant bio-hybrids. In 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence
- 26 Wahby, M., Heinrich, M. K., Hofstadler, D. N., Petzold, J., Kuksin, I., Zahadat, P., Schmickl, T., Ayres, P., Hamann, H. *Robotic Sensing and Stimuli Provision for Guided Plant Growth*. *Vis. Exp.* (149), e59835, <https://doi.org/10.3791/59835> (2019).
- 27 Donhauser, J., van Wynsberghe, A. & Bearden, A. *Steps Toward an Ethics of Environmental Robotics*. *Philos. Technol.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s13347-020-00399-3>
- 28 Harpreet Sareen, Jiefu Zheng, and Pattie Maes. 2019. *Cyborg Botany: Augmented Plants as Sensors, Displays and Actuators*. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper VS13, 1-2. <https://doi.org/10.1145/3290607.3311778>