

Genetische Untersuchungen zur biologischen Vielfalt mit der Umweltprobenbank - Empfehlungen

Ergebnisse des Abschluss-Workshops des TrendDNA-Projekts (2021-2025)

Hintergrund

Das Umweltbundesamt und die Universität Duisburg-Essen haben vom 26. bis 28. März 2025 einen gemeinsamen Workshop der DACHLiLux-Länder und des TrendDNA-Projektes der Umweltprobenbank zu genetischen Methoden in der Umweltbeobachtung ausgerichtet. VertreterInnen aus Deutschland, Österreich, der Schweiz und Luxemburg diskutierten den Reifegrad genetischer Methoden, Anwendungsbeispiele und die Umsetzung der Methoden in die forschende und behördliche Umweltbeobachtung. Für das TrendDNA-Projekt hat das Konsortium der Universitäten Duisburg-Essen und Trier sowie der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung und dem Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie neue genetische Methoden für die Analyse von Proben aus der Umweltprobenbank sowie exemplarische Ergebnisse vorgestellt. In anschließenden Diskussionen haben die Teilnehmenden Möglichkeiten und Bedarfe für die Ableitung historischer Zeitreihen für die Biodiversität mit der Umweltprobenbank, die Verwendung der Daten für die aktuelle Zustandsbewertung sowie sich abzeichnende Methoden und Auswertungen für die Zukunft erörtert. Die Erkenntnisse sind in diesem Bericht zusammengefasst und wiedergegeben.

Kurzfasit

Genetische Methoden können zur Analyse der Proben der Umweltprobenbank des Bundes qualitätsgesichert eingesetzt werden. Sie liefern valide Daten zur Veränderung der Biodiversität an Küsten, in Binnengewässern und terrestrischen Ökosystemen, die für Forschung, Umweltbeobachtung und Umweltpolitik von großer Bedeutung sind. Es ist der Weitsicht der deutschen Umweltpolitik zu verdanken, dass die seit Jahrzehnten gelagerten Archivproben der Umweltprobenbank jetzt mit Verfahren untersucht werden können, die i) noch gar nicht zur Verfügung standen, als ein Großteil der Proben gesammelt wurde und ii) wichtige Daten zur historischen Veränderung der biologischen Vielfalt liefern, die in der Regel fehlen. Zehn wesentliche Empfehlungen wurden abgeleitet.

10 Empfehlungen zur Nutzung der Umweltprobenbank für genetische Biodiversitätsanalysen

1. Die Umweltprobenbank des Bundes organisatorisch und finanziell befähigen, um Umweltproben weiterhin systematisch mit genetischen und digitalen Analysemethoden zu untersuchen, um die Entwicklung der biologischen Vielfalt abzubilden, von der Ebene des Ökosystems, über Artenvielfalt, bis zur genetischen Variation und Stressantworten einzelner Arten und Prognosen zu unterstützen.
2. Das Portfolio genetischer Analysen vielfältig nutzen und neue Methoden aufnehmen. Neue Indikatoren auf Basis der genetischen Daten für Umweltpolitik und die behördliche Umsetzung entwickeln, v.a. auch mit Aussagen zu funktionellen Wirkungen.
3. Die genetischen Biodiversitätsdaten der Umweltprobenbank mit weiteren für diese Proben vorliegenden Messdaten verknüpfen, z.B. chemische Belastungen oder biometrische Parameter - aber auch mit den Umweltdaten anderer behördlicher Monitoringprogramme.
4. Integration vielfältiger anderer Umweltdaten und Anwendung moderner statistischer sowie datenwissenschaftlicher Anwendungen (inkl. der künstlichen Intelligenz), um die Aussagekraft zu Trends und Treibern zu verbessern.
5. Für bestehende Probetypen kompartimentübergreifende Biodiversitätstrends (z.B. im Kontext von Klimaanpassung) als Bindeglied der vielfach fragmentierten Datensätze unterschiedlicher Zuständigkeitsbereiche (Boden, Meere, Land, Binnengewässer) ableiten.
6. Archivierte Proben für weitere Methoden (z.B. Proteomik, Lipidomik) nutzen, um zu prüfen, ob eine solche Erweiterung sinnvoll ist und um Schnittstellen zu behördlichen Monitoringprogrammen zu schaffen.
7. Gemessene biologische Antwortvariablen erweitern, um neben den klassischen Indikatorarten bislang vernachlässigte taxonomische Gruppen in die Umweltbeobachtung zu integrieren (z.B. viele funktionell wichtige wirbellose Arten, Protisten und Prokaryoten, Veränderungen von Lebensgemeinschaften insgesamt).
8. Indikatoren entwickeln, die über die Ökosystem-Gesundheit hinaus auch die menschliche Gesundheit betreffen (One Health), bspw. antimikrobielle und Fungizid-Resistenzen sowie Pathogene.
9. Gemäß den FAIR-Prinzipien die digitale Infrastruktur zur Datenhaltung, Bewertung und Visualisierung über [Umweltprobenbank.de](https://www.umweltprobenbank.de) und [umwelt-info.de](https://www.umwelt-info.de) stärken und weiterentwickeln, für behördliche Zwecke, Forschung und zur Information der Öffentlichkeit. Künftige Synergieoptionen mit weiteren Plattformen, z.B. dem Portal des Monitoringzentrums, dem Lebendigen Atlas der Natur Deutschlands, aber auch europäischen und internationalen Datenbanken wie der Global Biodiversity Information Facility (GBIF), sind zu prüfen.
10. Unterstützung der standardisierten Datenerhebung und Analyse zur biologischen Vielfalt, der Qualitätssicherung der Messung, der Entwicklung integrierter Bewertungsansätze sowie der digitalen Transformation der Umweltbeobachtung.

Das TrendDNA-Projekt – Erkenntnisse und Ausblick

1. Die Umweltprobenbank des Bundes

Die Umweltprobenbank sammelt, analysiert und archiviert seit den 1980er Jahren Proben von Küsten, Binnengewässern und aus terrestrischen Ökosystemen. Sie unterstützt die integrierte Umweltbeobachtung in Deutschland durch die Bereitstellung von Langzeitdaten und -proben, die Analyse der Wirksamkeit behördlicher Schutzmaßnahmen und die frühzeitige Erkennung neuer Umweltprobleme. Weltweit einzigartige Verfahren stellen sicher, dass die chemische und biologische Integrität der Proben für die Analyse von bekannten und noch unbekanntem Umweltproblemen über viele Jahrzehnte erhalten bleibt. Übergeordnetes Ziel ist es, den ExpertInnen von heute und morgen die erforderlichen Informationen an die Hand zu geben, um die Entwicklung der Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Ökosystemen zu analysieren - auch im Hinblick auf die Folgen für den Menschen. Bislang lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Chemikalien. Die weltweit einzigartige Probenahme und Lagerung der Proben bei ultratiefen Temperaturen über flüssigem Stickstoff garantiert aber auch eine ausgezeichnete Konservierung der assoziierten Nukleinsäuren, also der DNA und RNA. Um das Potenzial dieser "Umwelt-DNA" (eDNA) und "Umwelt-RNA" (eRNA) für Biodiversitätsanalysen und für das Monitoring zu testen, wurde 2021 das TrendDNA-Projekt initiiert.

2. Das TrendDNA-Projekt

In dem von 2021-2025 vom Umweltbundesamt geförderten F+E-Projekt "TrendDNA" arbeiten Partner der Universität Duisburg-Essen, der Universität Trier, des Fraunhofer-Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie sowie der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung / LOEWE TBG gemeinsam daran, das Potenzial genetischer Methoden für Biodiversitätsforschung und -monitoring auf Basis der Proben der Umweltprobenbank zu evaluieren. Das TrendDNA-Projekt zeigt eindrücklich, dass sich die Investitionen der Umweltprobenbank in Zukunftstechnologien auszahlen: Neue genetische Methoden wie das eDNA-Metabarcoding, die Metagenomik, die Populationsgenomik und die Transkriptomik eignen sich hervorragend, um die Entwicklung der Biodiversität zu analysieren. So können archivierte Proben als *Umwelt-DNA-Sammler* genutzt werden, etwa um assoziierte Lebensgemeinschaften zu untersuchen. Mit Materialien wie Schwebstoffen, Muscheln, Blättern oder Meeresalgen lassen sich Zeitreihen der Artenzusammensetzung von Bakterien, Pilzen, Pflanzen und Tieren erstellen. Für Bodenproben ermöglicht die Metagenomik zudem eine quantitative Erfassung der biologischen Vielfalt. Die Analyse genetischer Varianten in der eDNA oder innerhalb einzelner Probenarten liefert darüber hinaus Informationen zur genetischen Diversität innerhalb von Arten und Artengemeinschaften. Die innerartliche genetische Vielfalt ist ein wichtiger Faktor für das Anpassungspotential einzelner Arten und wird für zukünftige Monitoringaktivitäten an Bedeutung zunehmen. Über RNA-basierte Verfahren lassen sich zudem auch physiologische Stressantworten rekonstruieren. Durch die Archivproben der Umweltprobenbank werden somit einzigartige „Zeitreisen“ in die Entwicklung der biologischen Vielfalt möglich - und zwar von Genen bis zu Ökosystemen.

Der Schwerpunkt des TrendDNA-Projekts liegt insbesondere auf der zeitlichen Analyse von Artengemeinschaften. Darüber hinaus wurde das Potenzial zur Erfassung innerartlicher genetischer Diversität und Stress-Antworten sowie zur Bewertung der Diversität auf Ökosystemebene untersucht. Für den gesamten molekularbiologischen Workflow wurden

standardisierte Protokolle und Maßnahmen zur Qualitätssicherung entwickelt. Am 28. März 2025 wurden die vorläufigen Projektergebnisse in einem Workshop mit rund 100 VertreterInnen aus Forschung und Praxis präsentiert und diskutiert (**Abbildung 1**). Auch Mitglieder des Projektbeirats brachten ihre fachlichen Einschätzungen ein. Der vorliegende Bericht fasst zentrale Ergebnisse zusammen und skizziert Verwertungspotenziale, Handlungsempfehlungen und zukünftigen Forschungsbedarf.

Abbildung 1:

Teilnehmende des Workshops zu genetischen Methoden in der Umweltbeobachtung, 26.-28. März 2025 an der Universität Duisburg-Essen.



Quelle: Florian Leese, UDE

3. Ergebnisse zu den genetischen Analysen mit Proben der Umweltprobenbank

Eine zentrale Erkenntnis des TrendDNA-Projekts ist, dass die Analysen der archivierten Proben ein signifikantes Signal anthropogener Störungen erkennen lassen. Der vom Menschen verursachte Wandel der Biodiversität ist damit eindeutig statistisch nachweisbar. Im Folgenden werden die zehn wichtigsten Erkenntnisse aus den im Projekt bislang durchgeführten genetischen Analysen zusammengefasst, mögliche Verwertungsoptionen vorgestellt sowie bestehende Herausforderungen und potenzielle nächste Schritte aufgezeigt.

1. Historische Referenzdaten zur Veränderung der Biodiversität

Die Proben der Umweltprobenbank bilden wertvolle historische Referenzen zur Biodiversitätsveränderung in limnischen, marinen und terrestrischen Habitaten. Sie ermöglichen insbesondere systematische Untersuchungen zu zeitlichen Trends der Biodiversität - von mikrobiellen Lebensgemeinschaften bis hin zu Wirbeltieren - und eröffnen neue Perspektiven auf anthropogene Wirkmechanismen, z.B. die Rolle von Kipppunkten als Treiber der Veränderung von Ökosystemen.

2. Antworten auf aktuelle Fragen der Biodiversität: Forschung zum Insektensterben

In intensiv genutzten Agrarlandschaften ist das Insektensterben durch wissenschaftliche Studien gut dokumentiert. Anders als in vielen Agrarlandschaften, zeigen aber Standorte der Umweltprobenbank aus Waldökosystemen eine stabile Artenvielfalt der Insekten in den letzten Jahrzehnten. Es scheint also kein Insektensterben in Form eines generellen Artenverlustes an einzelnen Standorten der Umweltprobenbank zu geben. Waldbewohnende Insekten sind aber von einer deutschlandweiten biotischen Homogenisierung betroffen. Das bedeutet, dass heute immer mehr weitverbreitete Insektenarten in unseren Wäldern gibt als früher. Gegenwärtig wird untersucht, ob bestimmte funktionelle oder taxonomische Gruppen von dieser Homogenisierung besonders betroffen sind, oder ob der Effekt über sämtliche Insektengruppen gleichermaßen auftritt.

3. Verlust der Artenvielfalt in verschiedenen Lebensräumen und Organismengruppen

Analog zu den Untersuchungen zum Insektensterben (Punkt 2) bleiben an terrestrischen und marinen Standorten sowie einigen Flussgebieten die Artenzahlen weitgehend konstant. Es findet aber in einigen untersuchten Lebensgemeinschaften eine Homogenisierung der Artenzusammensetzung statt. Dieser Effekt zeigt sich über den Stammbaum des Lebens, vom Bakterium bis zum Tier. Spezialisierte Arten sterben (lokal) aus und werden von weit verbreiteten Arten oder Neankömmlingen ersetzt.

4. Einwanderung invasiver Arten und Verlust heimischer Arten

Die Probenbank kann als Frühwarnsystem für die Ankunft invasiver Arten und den Verlust seltener Arten fungieren. Damit kann die Probenbank bei der Umsetzung von Umwelt- und Naturschutzgesetzen helfen. Invasive Arten erobern unsere Ökosysteme und verdrängen dabei heimische, teils bedrohte Arten. Die zeitliche und räumliche Abfolge und Dynamik ihrer Einwanderung kann mit den archivierten Proben hochauflösend rekonstruiert werden. Beispiele sind das Auftreten invasiver Grundelarten oder Quaggamuscheln in den Flüssen sowie die durch den Klimawandel-begünstigte Ausbreitung einer australischen Seepockenart an unseren Küsten, die hier heimische Arten verdrängt. Gleiches gilt für die Einwanderung wärmeliebender Pilze und Bakterien in unsere Wälder, die in der klassischen Umweltbeobachtung bislang nicht beachtet werden.

5. Unterstützung der nationalen Strategie zur Klimaanpassung (DAS)

In den letzten 40 Jahren hat sich der Anteil wärmeangepasster Arten in unseren Ökosystemen erhöht (Siehe Punkt 4). Die Daten aus der Probenbank dokumentieren die Reaktionen von Ökosystemen auf den Klimawandel in räumlichen und zeitlichen Skalen. Damit unterstützen sie die Ableitung und Prüfung neuer aussagekräftiger Indikatoren zur Klimaanpassung mit Langzeitdaten und Prognosen in die Zukunft.

6. Historische Entwicklung der Bodenbiodiversität

Im Gegensatz zu Gewässern, Küsten und Wäldern haben sich die Lebensgemeinschaften der Böden kaum verändert. Zugleich zeigt die bodenassoziierte Zusammensetzung der Artengemeinschaften von Pflanzen, Arthropoden, Bakterien und Pilzen deutliche Unterschiede zwischen Standorten durch unterschiedliche Landnutzungen. Die historischen Zeitreihen sind daher wichtige Ergänzungen der räumlich höher aufgelösten Basislinie für Bodendiversität im Aktionsprogramm Nationaler Klimaschutz (ANK).

7. *Rekonstruktion der bekannten und weniger bekannten biologischen Vielfalt*

Die genetischen Daten für invasive, heimische und geschützte Arten ermöglichen eine umfassende Rekonstruktion der Veränderung der Lebensgemeinschaften. Dabei beschränken sich die Daten nicht allein auf bekannte Fisch-, Muschel- oder Pflanzenarten. Sie geben auch gänzlich neue Einsichten in die Veränderung wenig untersuchter Artengruppen, beispielsweise Pilze und Bakterien, die wichtige Funktionen in Ökosystemen übernehmen und schneller auf Umweltstressoren reagieren können als die Arten in der klassischen Biodiversitätsbeobachtung.

8. *Genetische Vielfalt und Genregulierung*

Der Biodiversitätswandel wird oft auf Ebene von Artengemeinschaften untersucht. Neue Untersuchungen zeigen aber, dass auch der Stresszustand und das Anpassungspotential individueller Arten verstanden werden müssen, um die Auswirkungen des globalen Wandels zu verstehen. Mit den Proben der Umweltprobenbank können z.B. Veränderungen der innerartlichen genetischen Variabilität sowie physiologische Stressantworten einzelner Arten erkannt werden. Verfahren wie die Populationsgenomik, Transkriptomik und Proteomik etablieren sich in der angewandten Molekularbiologie zu kosteneffizienten Anwendungen. Sie erlauben ein besseres Verständnis der Anpassungsfähigkeit der Organismen in einer sich wandelnden Umwelt sowie ihren genetischen und physiologischen Reaktionen auf Umweltstressoren.

9. *Kryoarchiv als Fundament einzigartiger Forschung*

Die Arbeitsabläufe bei ultratiefen Temperaturen (-150°C) garantieren chemisch und biologisch authentische Umweltproben in weltweit einzigartiger Qualität. Neben der Konservierung der DNA und RNA bleiben auch die Lebensfunktionen von vielen Mikroorganismen erhalten, sodass sie aus jahrzehntealten Proben wieder zum Leben erweckt werden können. Die Proben haben außerdem Potenzial für weitere Omics-Verfahren, bspw. Epigenomik, Metabolomik, Proteomik und Lipidomik. Gemeinsam können so grundlegende Prozesse der genetischen Variabilität sowie von physiologischen Anpassungen an Umweltveränderungen experimentell ermittelt werden.

10. *Qualitätssicherung, Standardisierung, Nachnutzung*

Das TrendDNA-Projekt hat Laborabläufe und Protokolle etabliert, mit denen genetische Daten qualitätsgesichert erhoben werden können. Die Daten werden nach den FAIR Prinzipien auf verschiedenen Wegen der Fach- und allgemeinen Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt, bspw. Umweltprobenbank.de und umwelt.info.de, um BürgerInnen über den Zustand der Umwelt zu informieren und die Daten Fachleuten und Entscheidungsträgern für die Nachnutzung zur Verfügung zu stellen.

4. *Verwertungsoptionen*

Neue genetische Methoden ermöglichen der Umweltprobenbank Daten zum Zustand und zur Veränderung der Biodiversität in nie dagewesener zeitlicher Auflösung zu erheben, von der genetischen Variation in Populationen bis zu Veränderungen ganzer Ökosysteme. Sie schließen wichtige historische Lücken und weisen über die Aussagekraft einzelner Indikatorarten hinaus. Aufgrund ihrer leichten und schnellen Verfügbarkeit bieten sie Entscheidungsträgern auf allen Ebenen wertvolle neue Informationen für eine Prozesssteuerung, die resiliente Ökosysteme anstrebt und auf eine sich schnell verändernde Umwelt reagieren muss. Die Schlussfolgerungen eignen sich zudem für Ziel-Allianzen, die über die Doppelnutzung von Indikatoren hinausweisen und der Komplexität der anthropogen verursachten Veränderungen besser gerecht werden.

Fünf Beispiele wichtiger Verwertungsoptionen der Daten der Umweltprobenbank

1. Allgemeines Vorsorgeprinzip und frühzeitige Gefahrenabwehr, Schutz des Naturhaushalts
2. Umweltgesetze: Wasserrahmenrichtlinie, Meeresstrategierahmenrichtlinie und regionale Meeresschutzkonventionen, neue Bodenschutzgesetze
3. Naturschutz: FFH-Richtlinie, EU-Verordnung über invasive Arten, Verordnung zur Wiederherstellung der Natur
4. Verknüpfung mit der Schadstoffbewertung und den europäischen Zielen zur Nullverschmutzung (Zero Pollution Ambition)
5. Strategien zur Klimaanpassung, Schutz der Biodiversität sowie integrierte Betrachtung der menschlichen und Ökosystem Gesundheit (*One Health*), Nationale Wasserstrategie

5. Herausforderung und offene Fragen

Das TrendDNA-Projektteam, Workshopteilnehmende und der Projektbeirat haben folgende methodische, konzeptionelle und strukturelle Empfehlungen identifiziert, um die Verwertung der Proben und Daten der Umweltprobenbank für das Biodiversitätsmonitoring und darüber hinaus gehende Fragen zur Gesundheit der Ökosysteme weiter ausbauen zu können:

5.1 Methodische Aspekte

- ▶ Metagenomik- und Metabarcoding-Methoden sollten systematisch verglichen werden, um den probentypspezifischen Mehrwert zu bestimmen.
- ▶ Für die Flüsse werden aktuell Schwebstoffproben (monatlich) genommen und mit DNA Methoden untersucht. Analysen der Umwelt-DNA aus Wasserproben liefern komplementäre Ergebnisse und werden daher als weiterer Probentyp empfohlen.
- ▶ Ebenso sollte geprüft werden, ob die Verwendung aktiver Sammler wie Miesmuscheln für die Beobachtung der biologischen Vielfalt der Küsten durch DNA von Wasser- oder Sedimentproben ergänzt wird.
- ▶ Neben der Artenvielfalt sollte auch funktionelle Diversität der untersuchten Ökosysteme und ihrer Artengemeinschaften mit den entwickelten Metabarcoding-, Metagenomik- und Transkriptomik-Verfahren - aber auch weiteren Omics-Methoden, bspw. Epigenomik, Proteomik & Lipidomik - eingehender erforscht werden.

5.2 Konzeptionelle Aspekte

- ▶ Für ein grundlegendes Verständnis der Entwicklung der Bodengesundheit fehlt noch viel Wissen. Bislang ist lediglich ein Teil der Proben der Umweltprobenbank untersucht und auch methodisch haben die Proben der Umweltprobenbank viel Potenzial. Weitere Daten sind ebenfalls wichtig, um die sich entwickelnden Bodenmonitoring-Programme zu beraten.
- ▶ Fragestellungen zur Gesundheit der Ökosysteme sollen mit Fragen zur menschlichen Gesundheit, bspw. über antimikrobielle Resistenzgene und Pathogene, aber auch Ökosystemleistungen verknüpft werden (*One Health*).

- ▶ Bislang wurden lediglich Teile des Datensatzes für Auswertungen mit vergleichsweise einfachen statistischen Methoden genutzt. Für umfassende Datenanalysen, plausible Trendableitungen und die Untersuchung des Einflusses verschiedener Umweltfaktoren sind umfassendere umweltstatistische Analysen, inklusive unterstützt mit Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) erforderlich.

5.3 Strukturelle Aspekte

- ▶ Es ist erforderlich, die Messstellen und Daten der Umweltprobenbank in bestehende und sich entwickelnde behördliche Monitoringprogramme zu integrieren, um die ausgewählten historischen Trends systematisch mit Programmen für die flächenrepräsentative Abdeckung zu verknüpfen.
- ▶ Umgekehrt ist die Integration weiterer Proben, idealerweise Rückstellproben flächenrepräsentativer Programme der behördlichen Umweltbeobachtung, für ausgewählte Zeitpunkte in die Umweltprobenbank wichtig, um die lokal begrenzten Proben der Probenbank in einen breiteren räumlichen Kontext zu stellen.
- ▶ Referenz-Datenbanken für hyperdiverse Taxa, wie Bakterien, Protisten und Pilze müssen weiter verbessert und nach FAIR Prinzipien nutzbar gemacht werden.
- ▶ Integration von Daten zur Biodiversität und anderer Umweltdaten der Umweltprobenbank sollte systematisiert werden, bspw. sollten Daten zusammengeführt werden.
- ▶ Digitale Werkzeuge, insbesondere FAIR-konforme Datenbanken und Arbeitsabläufe müssen etabliert werden.
- ▶ Es wäre wünschenswert, wenn die bisher von einem Standort gepoolten Proben der Umweltprobenbank separat eingelagert werden könnten, damit man diese später getrennt analysieren kann. Durch das Poolen von Proben (vor der Analyse) beraubt man sich wichtiger Informationen bezüglich der Variabilität der Proben. Die Kenntnis dieser Variabilität ist erforderlich, um zeitliche Trendanalysen valider zu machen.

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Autorenschaft, Institutionen

Florian Leese, Universität Duisburg-Essen
Henrik Krehenwinkel, Nico Fuhrmann, Universität Trier
Jan Koschorreck, Umweltbundesamt

Stand: September 2025