

# Monitoring Bioeconomy

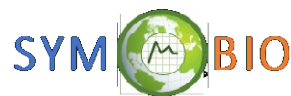
## Schlussbericht

### SYMOBIO 2.0

Konsolidierung des Systemischen Monitorings und der Modellierung der Bioökonomie

### Teilprojekt: Öko-Institut

Klaus Hennenberg, Mirjam Pfeiffer,  
Margarethe Scheffler, Kirsten Wiegmann,  
Hannes Böttcher



Gefördert durch:

**29 September 2025**



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 031B1129E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

U N I K A S S E L  
V E R S I T Ä T

**CESR** Center for  
Environmental  
Systems Research

GRASSGRASSGRASSG  
LANDLANDLANDLAND  
SCIENCESCIENCESCIE  
ANDANDANDANDANDA  
RENEWRENEWRENEW  
ABLEABLEABLEABLEA  
PLANTPLANTPLANTPL  
RESOURCESURCE

# Inhalt

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. KURZE DARSTELLUNG</b> .....                                      | <b>5</b>  |
| 1.1 AUFGABENSTELLUNG .....   | 5         |
| 1.2 VORAUSSETZUNGEN.....   | 6         |
| 1.3 PLANUNG UND ABLAUF.....  | 6         |
| 1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND.....                      | 8         |
| 1.5 ZUSAMMENARBEIT .....   | 8         |
| <b>2 EINGEHENDE DARSTELLUNG</b> .....                                  | <b>9</b>  |
| 2.1 SYMOBIO 2.0 - WICHTIGSTEN ERGEBNISSE IM TP DES ÖKO-INSTITUTS ..... | 9         |
| 2.1.1 <i>Forstwirtschaft</i> .....                                     | 10        |
| 2.1.2 <i>Landwirtschaft</i> .....                                      | 16        |
| 2.2 ZAHLENMÄßIGER NACHWEIS .....                                       | 18        |
| 2.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT.....                              | 18        |
| 2.4 VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE.....                                 | 19        |
| 2.5 FORTSCHRITT BEI ANDEREN STELLEN .....                              | 20        |
| 2.6 EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN .....                                    | 20        |
| <b>3 LITERATUR</b> .....   | <b>24</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Überblick über das systemische Monitoring- und Modellierungssystem von SYMOBIO 2.0 .....   | 6  |
| Abbildung 2: Überblick über die Projektstruktur .....   | 7  |
| Abbildung 3: Conceptual framework for indicator-based monitoring of the forest-based bioeconomy in Germany .....  | 11 |
| Abbildung 4: Dashboard für forstwirtschaftliche Indikatoren .....   | 15 |
| Abbildung 5: Simulierte Entwicklung des Holzvorrats für Laubbaumbestände mit einem Brusthöhendurchmesser >60 cm in Wäldern in Deutschland für vier verschiedenen Waldwachstumsmodelle. .... | 16 |
| Abbildung 6 Entwicklung verschiedener Indikatoren in den Szenarien zum Monitoring landwirtschaftlicher Auswirkungen der Bioökonomie.....  | 18 |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Indikatorenliste Forstwirtschaft .....                      | 12 |
| Tabelle 2: Beschreibung der verwendeten Wald- und Bodenszenarien ..... | 14 |
| Tabelle 3: Indikatoren-Liste Landwirtschaft.....                       | 17 |

# Berichtsblatt

|   |   |  |
|---|---|--|
| 1. ISBN oder ISSN   | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)<br>Schlussbericht |  |
| 3. Titel<br>SYMOBIO 2.0: Konsolidierung des systemischen Monitorings und Modellierung der Bioökonomie<br>(Teilprojekt Öko-Institut)                 |   |  |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br><br>Dr. Klaus Hennenberg, Dr. Mirjam Pfeiffer, Dr. Hannes Böttcher,<br>Margarethe Scheffler, Kirsten Wiegmann | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br>31.03.2025                           |  |
|   | 6. Veröffentlichungsdatum   |  |
|   | 7. Form der Publikation   |  |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br><br>Öko-Institut e.V. Merzhauser Str. 173<br><br>79100 Freiburg                                 | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution                                   |  |
|   | 10. Förderkennzeichen<br><br>031B1129E                                  |  |
|   | 11. Seitenzahl<br>24  |  |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br><br>Bundesministerium für<br>Bildung und Forschung (BMBF)<br><br>53170 Bonn                            | 13. Literaturangaben<br>24  |  |
|   | 14. Tabellen<br>3   |  |
|   | 15. Abbildungen<br>6  |  |
| 16. Zusätzliche Angaben   |   |  |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)   |   |  |
| 18. Kurzfassung<br><br>Siehe Kap. 1   |   |  |
| 19. Schlagwörter<br><br>Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Modellierung, Indikatoren, Bioökonomie-Monitoring  |   |  |
| 20. Verlag  | 21. Preis   |  |

# 1. Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Forschungsverbundprojekt SYMOBIO 2.0 hatte 2 Hauptziele:

- Orientierung dazu, wo die Bioökonomie hinsichtlich der UN-Nachhaltigkeitsziele der „Agenda 2030“ steht, insbesondere in den Bereichen Ernährungssicherung, klimaneutrale Produktion und Erhalt der Biodiversität.
- Weiterentwicklung der Grundlagen für ein regelmäßiges Monitoring der Bioökonomie in Deutschland, indem es einen anschaulichen Überblick gibt und die relevanten Treiber und Trends aufzeigt.

Die operationalen Ziele waren wie folgt:

- Indikatoren wie die Fußabdrücke aus SYMOBIO 1.0 weiterentwickeln,
- Datenbasis und Modellierung festigen,
- das Monitoring auf Biodiversitäts-, Wasser- und Klimawandelaspekte ausweiten,
- Beteiligung von Interessengruppen durch Workshops sowie gezielte Kommunikation zu ähnlichen Forschungsgebieten fördern und
- öffentliche Reichweite durch eine Website, ein interaktives Webtool, einen zweiten Pilotbericht und Policy Briefs steigern.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über den Umfang und die Vernetzung der Forschungsbereiche in SYMOBIO 2.0. In operativer Hinsicht hatte SYMOBIO 2.0 die Aufgaben, die Haupttreiber der Bioökonomie zu analysieren, Methoden zur Quantifizierung relevanter Fußabdrücke auf gesamtwirtschaftlicher Ebene zu entwickeln, Verknüpfungen mit anderen Modellen zu erforschen, vergleichende Ökobilanzen zu untersuchen und zu entwickeln sowie Fernerkundungsansätze zu erforschen. Gleichzeitig wurden spezifische Tätigkeiten zur Gewinnung und Integration von Stakeholdern sowie zum besseren Verständnis von und zur Verknüpfung mit parallelen Monitoringsystemen durchgeführt.

Öko-Institut war im SYMOBIO 2.0-Verbundenprojekt an den folgenden Aufgaben beteiligt:

- Federführende Arbeiten in WP 3 "Bewertung der Sektormodelle"
  - WP3.1 "Landwirtschaft" (Kap. 2.1.1)
  - WP3.2 "Forstwirtschaft" (Kap. 2.1.2)
- Unterstützende Arbeiten
  - WP2.4 "Agrarfußabdruck" (siehe Details in Bericht der Universität Kassel)
  - WP 4 "Lebenszyklusanalysen" - WP 4.2 "Fallstudien" (siehe Details im Bericht von ifeu)
  - WP 6.1 "Bioökonomie Monitoring Bericht", WP 6.2 "Web-Tool", WP 7.1 "Stakeholder Beteiligung", WP 7.4 "Verbreitung" (siehe Details im Bericht der Universität Kassel)

Die vom Öko-Institut erarbeiteten Ergebnisse haben dazu beigetragen, die übergeordneten Ziele des Verbundprojekts zu erreichen. Dabei wurden die Arbeiten zum Assessment der Sektormodelle für Land- und Forstwirtschaft federführend vom Öko-Institut durchgeführt. Zudem wurden die Arbeiten zum globalen landwirtschaftlichen Fußabdruck und zu Fallstudien im Rahmen der Lebenszyklusanalysen unterstützt. Die Projektergebnisse wurden in den Berichten zum Monitoring der deutschen Bioökonomie sowie dem Web-Tool eingearbeitet. Öko-Institut hat sich zudem an der Einbindung von Stakeholdern und der Verbreitung der Ergebnisse beteiligt.

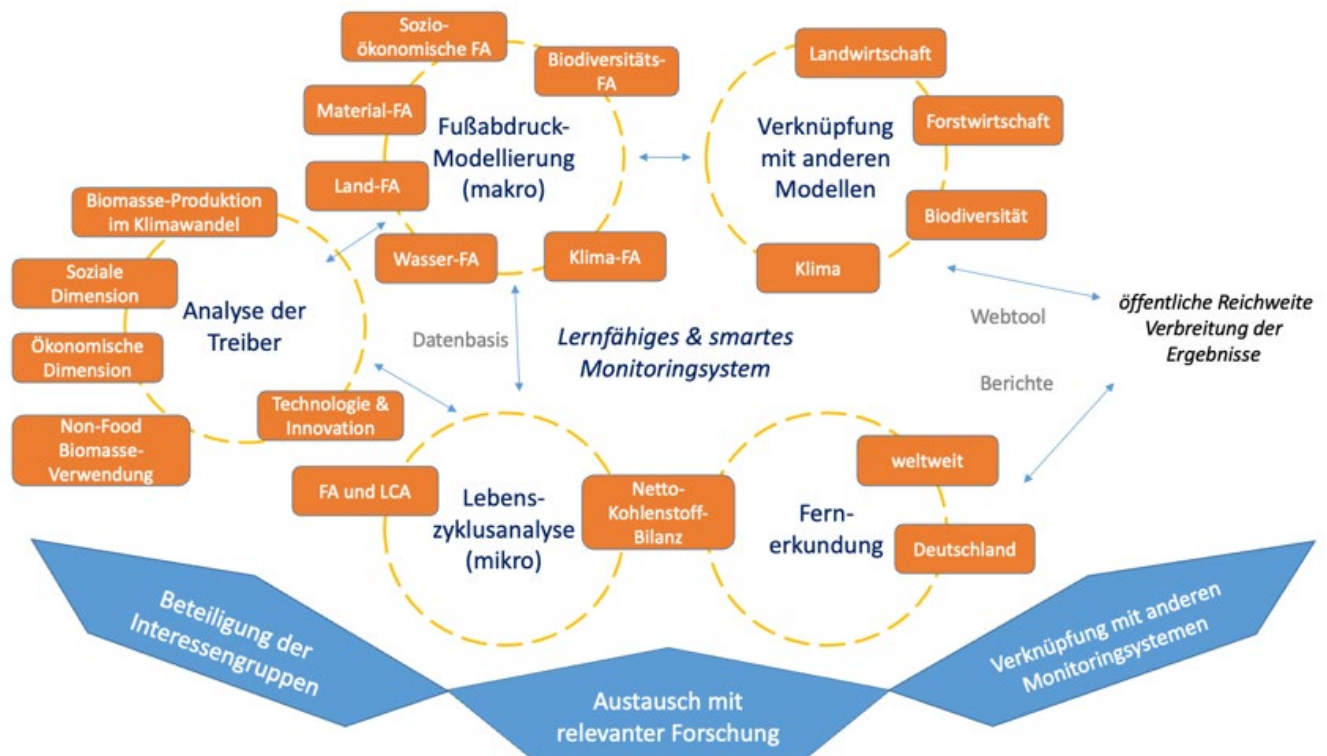


Abbildung 1: Überblick über das systemische Monitoring- und Modellierungssystem von SYMOBIO 2.0

## 1.2 Voraussetzungen

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderkennzeichen Öko-Institut: 031B1129E). Es war eine Fortsetzung des Projekts SYMOBIO 1.0 (März 2017 bis August 2021; FKZ 031B0281I).

Das Projekt wurde vom CESR an der Universität Kassel koordiniert (FKZ 031B1129). Die Bearbeitung erfolgte in Kooperation mit acht weiteren Forschungsinstitutionen und Unternehmen (vgl. 1.5 Zusammenarbeit).

Die Zuwendungsperiode umfasste den Zeitraum 1 Januar 2022 bis 31.12.2024 plus einer kostenneutralen Verlängerung (3 Monate bis 31.03.2025).

Öko-Institut war über die gesamte Projektlaufzeit beteiligt.

## 1.3 Planung und Ablauf

Für die Erreichung der o.g. Ziele wurde das Projekt SYMOBIO 2.0 in die folgenden sieben Arbeitspakete (AP) unterteilt und entsprechend bearbeitet (Abbildung 2):

- **AP1 Analyse der Treiber:** Welche relevanten Trends und Treiber beeinflussen die Leistung der Bioökonomie?
- **AP2 Modellierung der Fußabdrücke:** Welche Trends zeigen die sozioökonomischen und ökologischen Fußabdrücke und wie kann ihr Monitoring kontinuierlich weitergeführt werden?
- **AP3 Bewertung der Sektormodelle:** Wie können sektorale Modelle der Land- und Forstwirtschaft für das regelmäßige Bioökonomie-Monitoring genutzt werden?
- **AP4 Produkt-Lebenszyklusanalyse:** Was ist der Nettovorteil von biobasierten im Vergleich zu konventionellen Produkten (fossilen/auf mineralischer Basis)?
- **AP5 Fernerkundung:** Wie kann Fernerkundung für ein automatisches Monitoring der Bioökonomie-Landnutzung angewendet werden?

- **AP6 Pilotmonitoring:** Wie lassen sich alle relevanten Ergebnisse zusammenfassen, um das Pilotmonitoring weiterzuentwickeln?
- **AP7 Kommunikation und Koordination:** Wie können Beteiligung der Interessensgruppen, Vernetzung, Kooperation und Reichweite gestärkt werden?

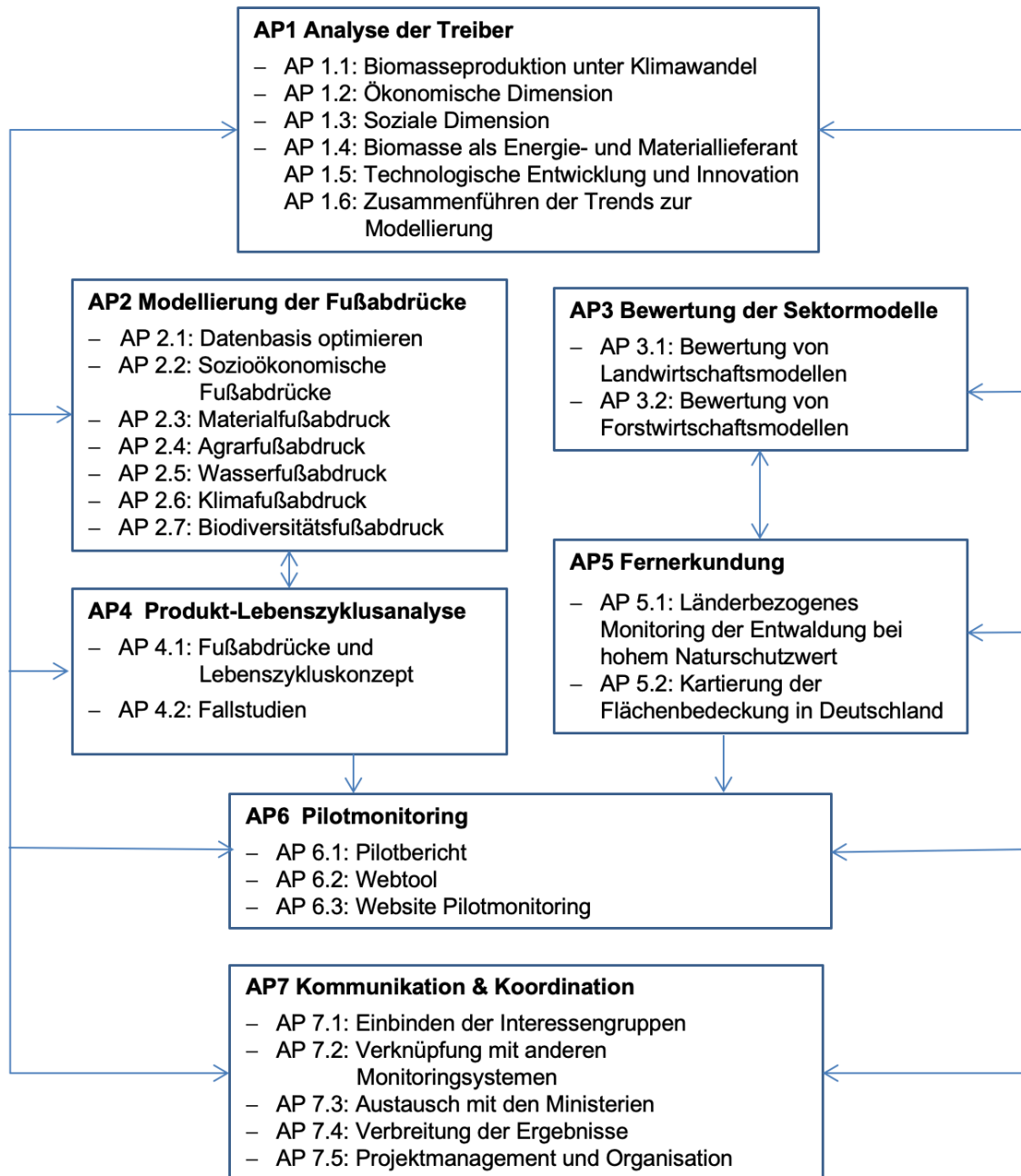


Abbildung 2: Überblick über die Projektstruktur

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Bioökonomie wird als Chance gesehen, das Zeitalter der fossilen Ressourcen und Technologien abzulösen, die Gesundheit und Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung zu fördern und eine nachhaltige Versorgung mit Energie, Wasser und Rohstoffen zu sichern und dabei Böden, Klima und Umwelt zu schonen (BMBF und BMEL 2020). Sie wird als gesellschaftlicher Transformationsprozess hin zu einer nachhaltigen, biobasierten, naturnahen, klimaneutralen und kreislauforientierten Wirtschaft verstanden. Die insgesamt zu erwartende Transformation von fossilen zu erneuerbaren Ressourcen ist ein schrittweiser, langfristiger Prozess. Daraus ergeben sich neue Chancen und Synergien, aber auch Zielkonflikte. Daher ist zuverlässiges Wissen über Trends, Auswirkungen und Zusammenhänge des gesamten Transformationsprozesses von der fossilen Ära zur Bioökonomie erforderlich.

Ein Monitoring ist notwendig, um den Status der Bioökonomie und ihren Beitrag zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele zu bewerten. Die deutsche Nationale Bioökonomiestrategie formuliert Ziele für das Monitoring: „Das Monitoring der Bioökonomie soll es ermöglichen, die Entwicklung einer nachhaltigen Bioökonomie nachzuvollziehen. Es soll als Grundlage dienen, die politische Steuerung und Priorisierung zu überprüfen“ (BMBF und BMEL 2020). Generell bedeutet dies, dass das Monitoring als Ganzes in der Lage sein sollte, sowohl eine breite (übergreifende und systemische) als auch eine tiefe (detaillierte und umfassende) Zusammenstellung von Informationen zu liefern, die für bestimmte Zwecke in angemessener Detailtiefe (über unterschiedliche Zeiträume) benötigt werden.

SYMOBIO 2.0 setzte die Arbeit von SYMOBIO 1.0 fort, um die Instrumente zu entwickeln, die erforderlich sind, um eine angemessene Systemperspektive für das Monitoring der nationalen Bioökonomie zu schaffen. Je nach Entwicklungsstand der einzelnen Instrumente konnten unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden, die von der Einführung neuer Instrumente (z.B. ein halbautomatisches System zur Identifizierung von Hot Spots der landwirtschaftlich bedingten Entwaldung im Ausland mit Hilfe der Fernerkundung) über die Verbesserung bestehender Instrumente (z.B. die Anwendung etablierter Methoden zur Berechnung wichtiger Fußabdruckindikatoren für die Bioökonomie) bis hin zur Bewertung und Überprüfung der Robustheit bestehender Modelle (z.B. für die Primärsektoren) reichten. Gleichzeitig wurden die internationalen Monitorings intensiviert, und das Team achtete darauf, von entsprechenden Aktivitäten zu lernen und auf geeignete Indikatoren zu verweisen. Während der Projektlaufzeit wurden internationale (Gomez San Juan 2024) und EU-Datenbanken (Mubareka et al. 2022) veröffentlicht, und nationale Monitoringsysteme in anderen Länder weiterentwickelt (Gardossi et al. 2023). Dazu gehören zum Beispiel Aktivitäten der EU<sup>1</sup> und der FAO<sup>2</sup>.

In SYMOBIO 1.0 fehlte eine Integration bestehender Modelle zur deutschen Land- und Forstwirtschaft. Diese Lücke wurde von Öko-Institut in SYMOBIO 2.0 geschlossen. Dazu wurden bestehende Modelle und verwendete Indikatoren in einer Literaturanalyse identifiziert. Mit anderen Modellierenden fand ein intensiver Austausch statt und es wurden abgestimmt Indikatoren für die Land- und Forstwirtschaft ausgewählt, mit denen die zukünftig zu erwartende Entwicklung der Land- und Forstwirtschaft im Zuge eines Monitorings der deutschen Bioökonomie abgebildet werden kann. Die gewählten Indikatoren können von Modellen dargestellt werden und sind an historische Indikatoren anschlussfähig.

## 1.5 Zusammenarbeit

Die Projektbearbeitung erfolgte in Kooperation der folgenden Partner:

- **Universität Kassel:** Koordination und Management sowie wichtige Beiträge zur Konzeptentwicklung, zur Analyse des ökologischen Fußabdrucks und zur integrierten Modellierung, einschließlich der Auswirkungen von Wasser- und Landnutzung (**Center for Environmental Systems Research (CESR)**). Einbringung von Know-how über landwirtschaftliche Produktionssysteme und Möglichkeiten der

---

<sup>1</sup> [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/bioeconomy/monitoring\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/bioeconomy/monitoring_en)

<sup>2</sup> <https://www.fao.org/in-action/sustainable-and-circular-bioeconomy/dashboard/en/>

Fernerkundung zum Monitoring der Landnutzungsänderungen und der biologischen Vielfalt (**Fachgebiet Grünlandwirtschaft und Nachwachsende Rohstoffe (GNR)**)).

- **Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ)**: Verknüpfung mit anderen Monitoring-systemen und der Einbeziehung von Stakeholdern.
- **Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ)**: Analyse von zukünftigen Treibern hinsichtlich die Biomassenutzung für Energie und stoffliche Zwecke.
- **Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforshung mbH (GWS)**: Sozio-ökonomische Modellierung, Fußabdruck von Treibhausgasemissionen, Integration der MRIO-Datenbank.
- **Öko-Institut**: Bewertung der Umweltauswirkungen von Landwirtschaftsmodellen und Forstwirtschaftsmodellen.
- **GRAS - Global Risk Assessment Services mit Meo Carbon Solutions GmbH**: Einsatz von Fernerkundungsinstrumenten zum Monitoring der durch die Landwirtschaft bedingten Entwaldung im Ausland und der Auswirkungen auf hochwertige Naturgebiete
- **ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (IFEU)**: Untersuchung der Rolle von Produkt-Ökobilanzen in einem prospektiven Monitoring.
- **Deutsche Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv)**: Entwicklung eines Biodiversitäts-Fußabdrucks für die deutsche Bioökonomie
- **Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISS)**: Analyse der ökonomischen Treiber und der Treiber technologischer Innovationen sowie Fallstudien zu deutschen Innovationen

Neben den Arbeiten zum Pilotmonitoring in AP 6 und der Kommunikation in AP 7, die in Kooperation mit allen Projektpartnern erfolgten, hat Öko-Institut bei den Arbeiten im AP 3 "Bewertung der Sektormodelle" Universität Kassel eingebunden. Im AP 2.4 "Agricultural land footprint" die Arbeiten der Universität Kassel unterstützt. Die Basis für die Ausarbeitung des landwirtschaftlichen Fußabdrucks waren methodische Vorarbeiten aus SYMOBIO 1, die in Hennenberg et al. (2022) veröffentlicht wurden. Zudem wurde ifeu bei der Ausgestaltung Fallstudien zu THG-Bilanzen von Holzenergie unter Berücksichtigung von THG-Bilanzen der Waldfläche unterstützt. Ergebnisse flossen in Henneberg et al. (2023) ein.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 SYMOBIO 2.0 - wichtigsten Ergebnisse im TP des Öko-Instituts

SYMOBIO 2.0 seine übergreifenden Ziele erreicht. Es wurden Leitprodukte entwickelt, die helfen zu verstehen, wie die deutsche Bioökonomie im Hinblick auf übergreifende Nachhaltigkeitsüberlegungen und -ziele derzeit abschneidet. Besonderes Augenmerk wurde auf den Aufbau einer Wissensbasis zu den wichtigsten Chancen und Risiken gelegt, indem sowohl kritische als auch positive Trends identifiziert wurden. Der wissenschaftliche Stand zu Monitoringinstrumenten wurde weiter ausgebaut. Dies bildet die Grundlage für das Nachfolgeprojekt SYMOBIO 2PLUS, das die in SYMOBIO 1.0 und 2.0 gewonnenen Erkenntnisse zur Vorbereitung eines regelmäßigen nationalen Bioökonomie-Monitorings konsolidieren soll.

In dem folgenden Abschnitt werden die vom Öko-Institut geleiteten Arbeitspakete im Vergleich zu den Zielen des jeweiligen Arbeitspakets detailliert dargestellt. Öko-Institut hat die Arbeiten in AP 3 zur Bewertung von Sektormodellen in der Land- und Forstwirtschaft federführend bearbeitet. Die Arbeiten gliederten sich in zwei Unterarbeitspakete zur Forstwirtschaft (Kap. 2.1.1) und zur Landwirtschaft (Kap. 2.1.2).

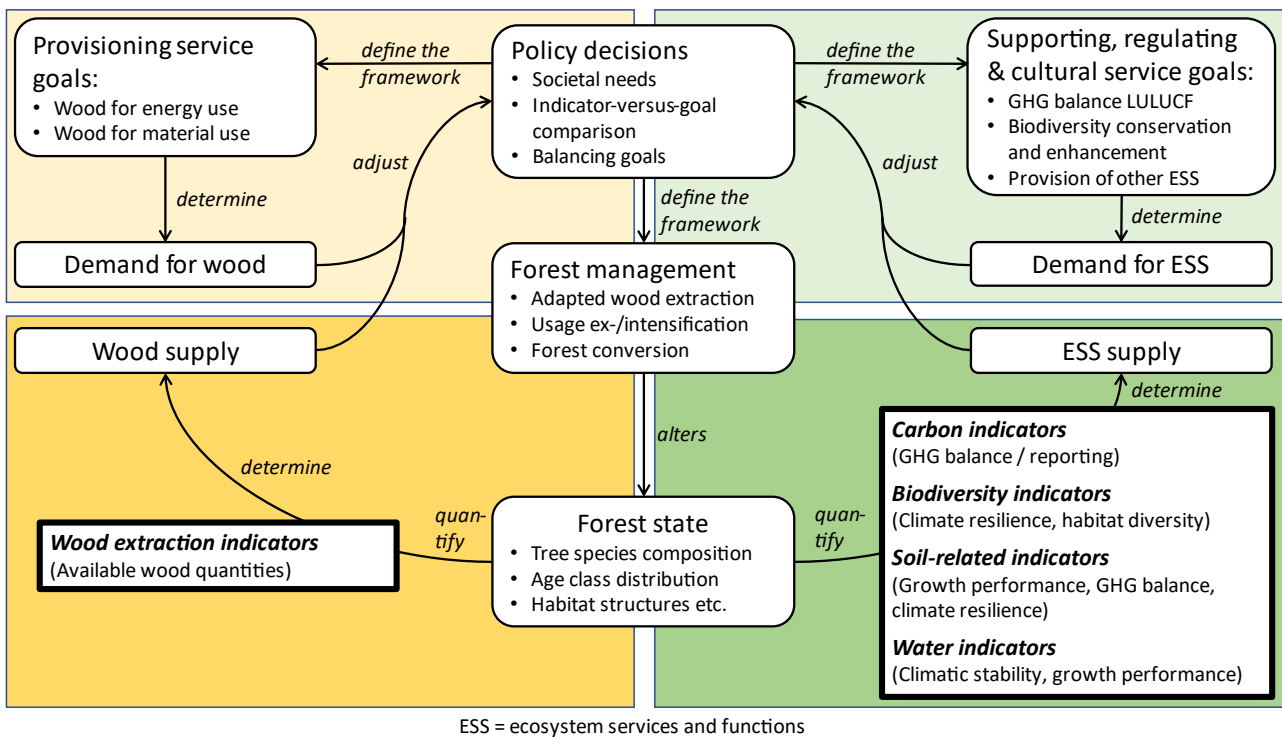
Übergreifend über diese beiden Sektoren wurde von Öko-Institut auf der European Conference on Ecologic Modelling (ECEM, 04-08.09.2023) die Session „Environmental modelling for policy support – how to build bridges between two worlds“ mit 10 Vorträgen ausgerichtet. Die Arbeiten in SYMOBIO 2.0 wurden von den Kasseler Kollegen Jan Schüngel und Rüdiger Schaldach präsentiert („Scenarios and monitoring systems: Instruments for exploring and evaluating strategies for the transition towards a sustainable bioeconomy“).

### 2.1.1 Forstwirtschaft

Wälder sind ein wichtiger Bestandteil der Bioökonomie und tragen zur Kohlenstoffbindung, zur Versorgung mit Holz und Nicht-Holzprodukten sowie zu verschiedenen Ökosystemleistungen bei, die das Wohlergehen der Menschen verbessern. In SYMOBIO 2.0 wurde ein konzeptioneller Rahmen erarbeitet, in den ein Bioökonomie Monitoring zu Holzressourcen und Umweltauswirkungen der Waldbewirtschaftung eingebunden sind (Abbildung 3). Der konzeptionelle Rahmen wurde als Synthese aus mehreren Konzepten abgeleitet, die Güter und Dienstleistungen im Zusammenhang mit gesellschaftlichen Bedürfnissen mit nachhaltiger Nutzung und Umweltschutz verbinden (Pfeiffer et al. submitted). Er integriert Informationen aus beispielsweise dem DPSIR-Rahmenkonzept (Driving forces, Pressures, State, Impacts and Responses; Kristensen 2004), der Fußabdruckanalyse (ISO 14067:2018, Bringezu et al. 2021b) und Biomasse-Zertifizierungssystemen (ISO 13065:2015, FSC, PEFC).

Es wird angenommen, dass gesellschaftliche Anforderungen die treibenden Kräfte hinter politischen Entscheidungen zur Entwicklung der Bioökonomie im Forst- und Holzsektor sind. Politische Entscheidungen legen die Rahmenbedingungen für versorgende Dienstleistungsziele und unterstützende, regulierende und kulturelle Dienstleistungsziele sowie Ziele für die Waldbewirtschaftung fest. versorgende Dienstleistungsziele werden durch die Mengen und Qualitäten von Holz definiert, die beispielsweise für Papier, Bauwesen und eine energetische Nutzung benötigt werden. Unterstützende, regulierende und kulturelle Dienstleistungsziele konzentrieren sich auf die Bereitstellung von Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen, die über die stoffliche und energetische Nutzung von Holz aus Wäldern hinausgehen. Zu diesen Ökosystemleistungen gehören die Erreichung der angestrebten Treibhausgasbilanzen im LULUCF-Sektor (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) im Rahmen der nationalen Klimaschutzziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG), die Erhaltung und Verbesserung der biologischen Vielfalt sowie die Sicherstellung der kontinuierlichen Bereitstellung von Ökosystemleistungen (z.B. Grundwasserneubildung, Wasserrückhaltung, Kühlung und Erholung) durch den Schutz der Ökosystemfunktionen, die diese Leistungen erbringen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die versorgenden Dienstleistungsziele die Nachfrage nach Holz aus Wäldern bestimmen, während die unterstützenden, regulierenden und kulturellen Dienstleistungsziele die Nachfrage nach anderen Ökosystemleistungen bestimmen.

Politische Entscheidungen beeinflussen auch die Art und Intensität der Waldbewirtschaftung, einschließlich der Umwandlung von Wäldern in klimaresistente Waldbestände. Der Vergleich von Holzangebot und -nachfrage sowie von Ökosystemdienstleistungsangebot und -nachfrage soll politische Entscheidungstragende dabei unterstützen, zu entscheiden, ob Ziele und Vorgaben für versorgende Dienstleistungen und unterstützende, regulierende und kulturelle Dienstleistungen sowie für die Waldbewirtschaftung angepasst werden sollten. Dabei sind Informationen über den Zustand der Wälder von entscheidender Bedeutung. Indikatoren zur Holzversorgung sollten Angaben darüber enthalten, wie viel Holz gewonnen werden kann, und Indikatoren zur Versorgung mit Ökosystemleistungen sollten Angaben zu Kohlenstoffflüssen, Biodiversität, Boden und Wasser enthalten.



*Abbildung 3: Conceptual framework for indicator-based monitoring of the forest-based bioeconomy in Germany. Societal needs for provisioning services (e.g., harvested wood, energy use) vs. supporting services (e.g., GHG-balance, biodiversity, water retention, recreation) drive forest sector policy, implemented via forest management strategies. Monitoring based on quantitative indicators – wood supply, carbon, biodiversity, soil and water – derived from empirical data and forest growth models (FGMs) support adaptive management by benchmarking indicators against policy targets and informing regulatory adjustments. ESS = ecosystem services; LULUCF = land use, land use change, and forestry. Source: Pfeiffer et al. (submitted).*

Der sozioökonomische, kulturelle und ökologische Wert der Ökosystemleistungen der Wälder in Deutschland sollte in Entscheidungsprozesse einfließen. Zu diesen Leistungen gehören Wasserspeicherung und -reinigung, Luftfilterung, Bodenstabilisierung und Klimaregulierung (Brockerhoff et al. 2017). Sie unterstützen die biologische Vielfalt, indem sie Lebensräume für eine vielfältige Flora und Fauna bieten. Holz, das traditionell für Energie- und Materialanwendungen genutzt wird, kann auch für innovative bioökonomische Produkte wie Chemikalien, Fasern, Textilien, Kunststoffersatzstoffe und Dämmstoffe verwendet werden.

Die Holzversorgung ist jedoch begrenzt und erfordert eine nachhaltige Bewirtschaftung, um die verschiedenen Anforderungen in Einklang zu bringen. Es können potenzielle Konflikte zwischen Ökosystemleistungen wie einer verbesserten Kohlenstoffbindung und der Notwendigkeit einer intensiveren Ressourcennutzung entstehen (Lin und Ge 2020), die durch die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Wälder gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels noch verschärft werden (Gregor et al. 2022). Andererseits könnte eine angemessene Bewirtschaftung das Wachstum der Waldbiomasse und die Holzproduktion steigern und gleichzeitig das Risiko eines klimawandelbedingten Rückgangs verringern (Collalti et al. 2018).

Von Öko-Institut wurde eine Austauschplattform für Waldmodellierende eingerichtet. Die teilnehmenden Wissenschaftler:innen betreiben in Summe 11 Waldmodelle, die grundsätzlich geeignet sind, deutschlandweit Umweltindikatoren abbilden zu können. Im Kreis der Expert:innen wurden Indikatoren ausgewählt, beschrieben bzw. entwickelt, die aus Waldmodellläufen aussagekräftige Informationen in den politischen Raum geben können (siehe [Tabelle 1](#) und Pfeiffer et al. submitted).

Tabelle 1: Indikatorenliste Forstwirtschaft

| Proposed groups and indicators               | Main reason for choice of indicators   | Level of further differentiation  | Units of indicators   | Available historical data base for Germany   | Implemented in models for Germany (11 models)*                |
|--|--|---|---|--|---|
| <b>1. Economy-related indicators</b>         |  |   |   |  |   |
| 1.1 Wood extraction                          | Quantification of wood supply; indication of forest management activities  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Harvest, thinning, salvage logging</li> <li>- species groups (e.g. needleleaf vs. broadleaf)</li> <li>- diameter classes (favourable) or assortments (stem wood, industrial wood)</li> </ul> | [m <sup>3</sup> o.b. >7cm dbh] or<br>[m <sup>3</sup> o.b. >7cm dbh ha-1]<br><br>values can also be expressed u.b. | Einschlagsrückrechnung (Jochem et al. 2023); NFI, Destatis<br>Holzeinschlagsstatistik (Code 41261)                 | Harvest: 10/1/0<br>Thinning: 10/1/0<br>salvage logging: 4/2/5 |
| 1.2 Growing stock                            | Volume of living trees   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- species groups (e.g. needleleaf vs. broadleaf)</li> <li>- diameter classes (favourable) or assortments (stem wood, industrial wood)</li> </ul>   | [m <sup>3</sup> o.b. >7cm dbh] or<br>[m <sup>3</sup> o.b. >7cm dbh ha-1]  | National forest inventories ( <a href="https://bwi.info">https://bwi.info</a> )                                    | 6/5/0   |
| 1.4 Gross increment                          | Quantification of increment of living trees  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- species groups</li> <li>- diameter classes</li> </ul>  | [m <sup>3</sup> o.b. >7cm dbh] or<br>[m <sup>3</sup> o.b. >7cm dbh ha-1]  | National forest inventories ( <a href="https://bwi.info">https://bwi.info</a> )                                    | 6/5/0   |
| 1.3 Net stock change                         | Quantification of annual net stock change (increment and establishment minus losses due to harvest, thinning and natural mortality); indicator for forest management intensity | <ul style="list-style-type: none"> <li>- species groups</li> <li>- diameter classes</li> </ul>  | [m <sup>3</sup> o.b. >7cm dbh] or<br>[m <sup>3</sup> o.b. >7cm dbh ha-1]  | National forest inventories ( <a href="https://bwi.info">https://bwi.info</a> )                                    | 6/5/0   |
| <b>2. Carbon indicators</b>                  |  |   |   |  |   |
| 2.1 Carbon stocks in different biomass pools | Quantification for GHG inventory reporting; Indicator of forest state  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- stems, branches, coarse roots, leaves, fine roots, dead wood</li> <li>- species groups</li> </ul>  | [t C] or [t C ha-1]   | National GHG Reporting (UBA 2024), National forest inventories ( <a href="https://bwi.info">https://bwi.info</a> ) | 11/0/0  |
| 2.2 Change of biomass carbon stocks          | Quantification of annual changes for GHG inventory reporting; Indicator of forest state  |   | [t C yr-1] or [t C ha-1 yr-1]   |  | 11/0/0  |
| <b>3. Biodiversity indicators</b>            |  |   |   |  |   |
| 3.1 Volume of broadleaf habitat trees        | Quantification of potential rare habitat structures; Indicator needed for threatened and endangered species  | Broadleaf trees >60cm dbh   | [m <sup>3</sup> o.b. >60cm dbh] or<br>[m <sup>3</sup> o.b. >60cm dbh ha-1]  | National forest inventories ( <a href="https://bwi.info">https://bwi.info</a> )                                    | 5/2/4   |
| 3.2 Deadwood volume                          | Quantification of deadwood habitats; Indicator of forest development stage   | Deadwood class and orientation (standing, on the ground)  | [m <sup>3</sup> o.b.] or<br>[m <sup>3</sup> o.b. ha-1]  |  | 7/1/3   |
| 3.3 Simpson diversity                        | Quantification of $\alpha$ -diversity of tree species  | Calculation based on basal area of species at   | Index   | Potentially by the analysis of   | 1/5/5   |

| Proposed groups and indicators                          | Main reason for choice of indicators  | Level of further differentiation   | Units of indicators   | Available historical data base for Germany  | Implemented in models for Germany (11 models)* |
|---|---|--|---|---|--|
| index for tree species diversity                        |   | plot-level; mean value, 10%-quantiles etc. per year; multi-panel histograms  |   | national forest inventories data ( <a href="https://bwi.info">https://bwi.info</a> )  |  |
| 3.4 Gini coefficient for structural diversity of stands | Quantification of structural diversity of stands  | Calculation based on basal area of size classes at plot-level; mean value, 10%-quantiles etc. per year; multi-panel histograms | Index   | Potentially by the analysis of national forest inventories data ( <a href="https://bwi.info">https://bwi.info</a> )                         | 3/3/5  |
| <b>4. Soil-related indicators</b>                       |   |  |   |   |  |
| 4.1 Soil carbon stocks                                  | Quantification for GHG inventory reporting;   | --   | [t C] or [t C ha <sup>-1</sup> ]                                    | National forest soil survey (Bodenzustandserhebung; FAO; IIASA; ISRIC; ISSCAS; JRC 2009); ISRIC-WISE; HWSD (Harmonized World Soil Database) | 8/1/2  |
| 4.2 Changes in soil carbon stock                        | Quantification of annual changes for GHG inventory reporting;   | --   | [t C yr <sup>-1</sup> ] or [t C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> ] | National forest soil survey (Bodenzustandserhebung), National GHG Reporting (UBA 2024)  | 8/1/2  |
| 4.3 Soil nitrogen                                       | Quantification of site productivity; nitrogen loads/deposition; N <sub>2</sub> O emission                                       | --   | [t N] or [t N ha <sup>-1</sup> ]                                    | not available (Ballabio et al. 2019; emep 2018; Schaap et al. 2018; ISRIC 2017)   | 4/0/7  |
| 4.4 Changes in soil nitrogen                            | Quantification of changes in site productivity; nutrient loads/nitrogen deposition; N <sub>2</sub> O emission, nitrate leaching | --   | [t N yr <sup>-1</sup> ] or [t N ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> ] | not available (see reference under 4.3)   | 4/0/7  |
| <b>5. Water indicators</b>                              |   |  |   |   |  |
| Annual water deficit (aET / pET)                        | Quantification of annual drought stress, combination with stand basal area and usable field capacity possible                   | Calculation at plot-level; mean value, 10%-quantile etc. per year; multi-panel histograms                                      | [mm/mm]   | Can be derived from data provided by German Weather Service (DWD)   | 3/2/6  |

Source: Pfeiffer et al. (submitted). o.b. = over bark, u.b. = under bark, aET / pET = actual to potential evapotranspiration; \*out of 11 models (4C, EFISCEN-space, EFISCEN 4.1, FABio-Forest, FORMIND, FORMIT-M, LandscapeDNDC, LPJmL-FIT, LPJ-GUESS, Thünen Matrixmodell, WEHAM), x models have available output / possible but no output yet / not possible, e.g. 8/1/2

Waldwachstumsmodelle können prognostizieren, wie Wälder auf unterschiedliche Bewirtschaftungspraktiken, Klimabedingungen und Störungen reagieren werden (Gutsch et al. 2018, Pfeiffer et al. 2025). Sie simulieren Wechselwirkungen zwischen verschiedenen ökologischen und umweltbezogenen Faktoren, die das Waldwachstum beeinflussen, darunter Baumwachstum, Konkurrenz um Ressourcen, Mortalität und Regeneration. Aufgrund dieser Komplexität ist es sinnvoll, verschiedene Szenarioannahmen für Projektionen in das Monitoring-System aufzunehmen, um einen Korridor für eine erwartete Entwicklung zu ermitteln. Für

die Indikatorengruppen in [Abbildung 3](#) und [Tabelle 1](#) wurden im Rahmen des Expertenaustauschs beispielhaft relevante Indikatoren für ein Monitoring der Waldentwicklung und Forstbioökonomie identifiziert und in einem Wald-Dashboard zusammengestellt ([Abbildung 4](#)). Im Dashboard werden alle Ergebnisse in Kubikmetern dargestellt. Die Ergebnisse stammen aus Modellierungsstudien, die mit dem Waldmodell „FABio-Forest“ durchgeführt wurden und drei Szenarien mit unterschiedlicher Intensität der Waldbewirtschaftung abdecken. Um mögliche zukünftige klimabedingte Einflüsse auf Mortalität und Wachstum zu bewerten, wurden für jedes Waldszenario drei Sensitivitäten für verändertes Wachstum und Mortalität simuliert (siehe Details in [Tabelle 2](#)). Eine Ausnahme bildet die Veränderung des Bodenkohlenstoffs. Der Indikator wird in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten dargestellt und wurde mit dem Bodenmodell „Yasso“ modelliert. Zudem werden im Dashboard empirische Daten aus Erntestatistiken und Waldinventuren modellierten Ergebnissen vorangestellt. So werden die historischen Entwicklungen der Indikatoren an die möglichen zukünftigen Entwicklungen angebunden ([Abbildung 4](#)).

*Tabelle 2: Beschreibung der verwendeten Wald- und Bodenszenarien*

| Forest scenario   | Model        | Source                                     | Harvest intensity   | Natural disturbances   |
|---|--------------|--|---|--|
| Reference scenario of the UBA BioSINK project (BioSINK)                   | FABio-Forest | Pfeiffer et al. (2023)                     | High wood demand modelled by wood use model TRAW (Total Resource Assessment of Wood)                    | Low disturbances (lowD): mortality and growth are equal to the average of the period 2013 – 2017<br><br>Mean disturbances (meanD): mortality and growth are equal to the average of the period 2002 – 2017 |
| Scenario Supreme of the UBA- CARE-project (CARESupreme)                   | FABio-Forest | Harthan et al. (2025, in Veröffentlichung) | Projection of the mean harvest rate from 2013 – 2017, followed by a reduction of harvest of broadleaves | High disturbances (highD): mortality equals the average of the period 2002 – 2021, while growth increment is set as 0.9 times the average for 2002 – 2017  |
| Recalculation of projection report 2024 “with measures scenario” (ProRep) | FABio-Forest | Hennenberg et al. (2024b)                  | Projection of the mean harvest rate from 2013 – 2017  |  |
| Projection report 2024 “with measures scenario” (ProRep)                  | YASSO        | Harthan et al. (2024)                      | Projection of the mean harvest rate from 2013 – 2017  | Low disturbances (lowD), see above   |

Source: Beck-O’Brien (2024a)

Die im Dashboard dargestellten Indikatoren geben einen guten Überblick über die Indikatorengruppen ([Abbildung 4](#))

- **Erntemengen (ökonomische Indikatorengruppe):**  
Die Holznachfrage in den gewählten Szenarien unterscheidet sich sehr stark. Im Fall einer hohen Nadelholzentnahme ist zu erwarten, dass die Nadelholznachfrage ab den 2040er Jahren nicht mehr gedeckt werden kann.
- **Vorratsentwicklung der lebenden Bäume (ökonomische Indikatorengruppe):**  
Die Entwicklung der Nadelholzvorräte hängt sehr stark von den klimabedingten Annahmen zu Baumwachstum und Mortalität ab. Unter ungünstigen Wuchsbedingungen gehen die Vorräte der Nadelbaumbestände auch bei moderater Holzentnahme zurück. Der Vorrat an Laubbäumen reagiert weniger sensitiv auf die angenommenen Wuchsbedingungen und die Vorräte steigen aufgrund der moderaten Holzentnahme in allen Szenarien an. Der Vorratsaufbau in Laubbäumen stellt zudem eine Senkenleistung im LULUCF-Sektor dar.
- **Vorrat lebender Laubbäume >60 cm (Indikatorengruppe Biodiversität):**  
Der Vorrat an stärker dimensionierten Laubbäumen steigt ebenfalls aufgrund der moderaten Laubholzentnahme kontinuierlich an. Damit nehmen heute seltene Habitatstrukturen als Lebensraum für seltene und gefährdete Arten zu.

- **Vorrat an Totholz der Laubbäume (Indikatorengruppe Biodiversität):**  
Der Vorrat an Laub-Totholz steigt in den Szenarien an und bietet ebenfalls verstärkt Habitatstrukturen, die vor den Erhalt der Biodiversität förderlich sind.
- **Bodenkohlenstoff (Indikatorengruppe Boden):**  
Der Gehalt an Bodenkohlenstoff steigt an mit positiven Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit und die Kohlenstoffeinbindung als Senke im LULUCF-Sektor.

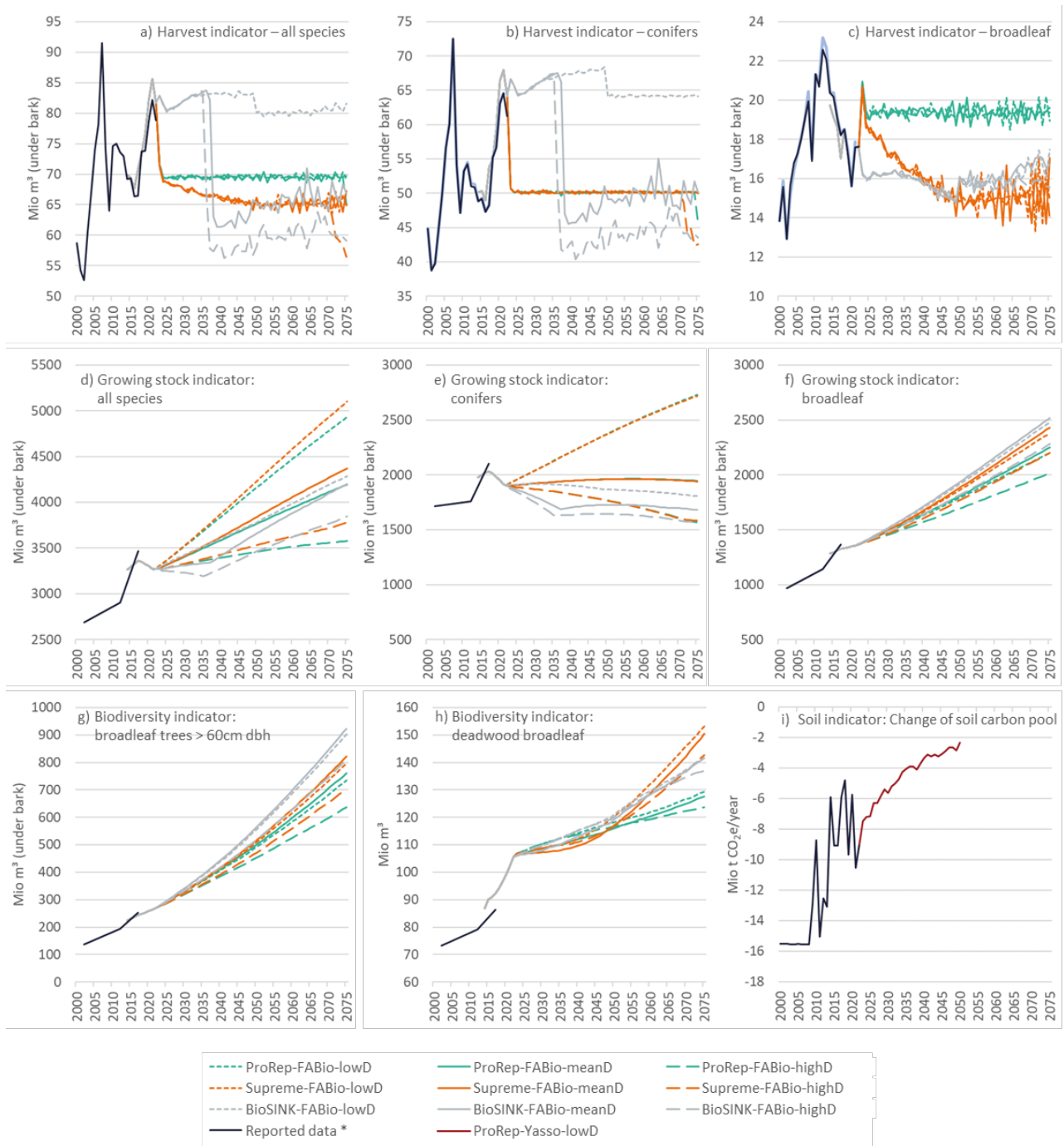
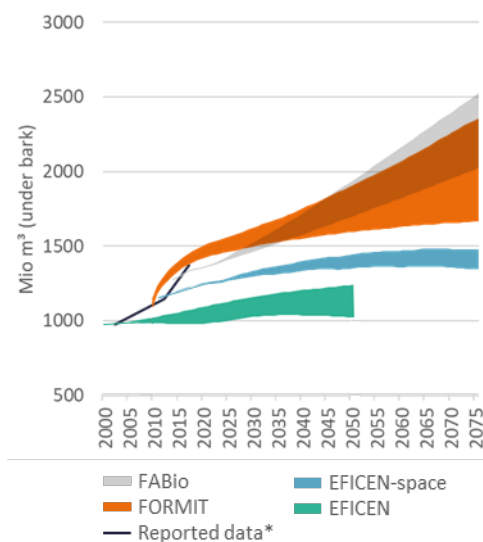


Abbildung 4: Dashboard für forstwirtschaftliche Indikatoren. Quelle: Beck-O'Brien (2024a)

Die Grundlage für die dargestellten Arbeiten bildeten eine Literaturrecherche sowie die Einbindung von Expert\*innen im Bereich der Waldmodellierung. Die Ergebnisse wurden als wissenschaftliches Paper eingereicht (Pfeiffer et al. submitted) und in den Bericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie aufgenommen (Beck O'Brien 2024).

Im Rahmen der Austauschplattform für Waldmodellierende wurde zudem Ergebnisse unterschiedlicher Waldmodelle zusammengestellt. Beispielhaft ist in [Abbildung 5](#) die Entwicklung des Vorrats von stark dimensionierten Laubbäumen für verschiedene Szenarien, die mit vier Waldmodellen simuliert wurden, dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Zeitpunkt der Parametrisierung eine sehr wichtige Rolle für die Lage des Ergebniskorridors spielt. Auch die Höhe der Holzentnahme beeinflusst das Ergebnis sehr stark.

Diese Schwierigkeiten konnten im Rahmen von SYMOBIO 2.0 nicht gelöst werden können, da keine neuen Waldmodellläufe durchgeführt wurden. Aus der Gruppe der Waldmodellierenden wurde daher das Projekt "ForestOvershoot" entwickelt und ab November 2025 durch das BMBF im Programm CDR-Terra finanziert (siehe Kap. 2.4).



*Abbildung 5: Simulierte Entwicklung des Holzvorrats für Laubbaumbestände mit einem Brusthöhendurchmesser >60 cm in Wäldern in Deutschland für vier verschiedenen Waldwachstumsmodelle. Quelle: Beck-O'Brien (2024a).*

## 2.1.2 Landwirtschaft

Zur Bewertung der Umweltauswirkungen der Bioökonomie auf die Landwirtschaft wurde ein strukturierter Ansatz entwickelt. Dieser integriert bestehende Monitoringsysteme, prüft Modellfähigkeiten und validiert Indikatoren anhand eines Praxisbeispiels. Die Methodik umfasst:

- Konzeptioneller Rahmen: Definition zentraler Begriffe und Umweltwirkungskategorien
- Indikatorensammlung: Auswahl relevanter Umweltindikatoren aus bestehenden Monitoringrahmen (z. B. EU, FAO, SDG).
- Modellbewertung: Analyse, ob Agrarmodelle Umweltwirkungen der Bioökonomie abbilden können – inklusive vorhandener und potenzieller Indikatoren.
- Indikatorsatz: Entwicklung eines spezifischen Bioökonomie-Indikatorsatzes auf Basis modellierbarer und weiterzuentwickelnder Größen.
- Validierung: Überprüfung und Weiterentwicklung innerhalb von Experten-Workshops
- Anwendungsfall: Identifizierung von Szenarienarbeiten für Deutschland mit Ergebnissen für die Umweltindikatoren

Zur Identifikation geeigneter Agrarmodelle für das Bioökonomie Monitoring in Deutschland wurden über 80 Quellen analysiert, darunter Fachliteratur und graue Literatur. Die Recherche basierte auf gezielten Schlagwörtern und wurde durch Expert:inneneinschätzungen ergänzt. Für die Auswahl wurden Modelle priorisiert, die bereits in Deutschland für politische Berichterstattung genutzt werden (z. B. Agrarpolitik,

Umweltmonitoring). Dadurch ist ihre Integration in bestehende Daten- und Entscheidungsstrukturen gewährleistet.

In einem zweiten Schritt erfolgte der Abgleich mit Indikatorsystemen, die in der Vergangenheit bereits im Rahmen des Bioökonomiemonitorings auf verschiedenen politischen Ebenen entstanden sind (international, national und auf Ebene der Länder). Dafür wurden die Indikatoren der internationaler Bioökonomie-Monitoring Systeme (EU-Bioeconomy Monitoring System, FAO-Monitoring Bioökonomie Indikatoren) und die nationalen Indikatoren der UN-Nachhaltigkeitsziele mit insgesamt mehr als 400 Indikatoren als Ausgangsbasis betrachtet. Im Rahmen des Arbeitspakets werden sie in Bezug auf ihre Eignung für die Anwendung in Modellen geprüft. Ziel dieser Arbeit ist es einerseits sicherzustellen, dass in der zukünftigen Modellierung nicht wesentliche Indikatoren fehlen, die für das Bioökonomie-Monitoring als relevant erachtet werden. Andererseits sollen aber auch nicht unnötig viele oder derzeit nicht ausreichend gut darstellbare Indikatoren im Indikatorensystem verbleiben.

Auf Basis der Auswertung der Literatur zu den Modellen und den Bioökonomie Monitoring Systemen wurde ein Set an Kernindikatoren erstellt. Zur Überprüfung und Weiterentwicklung des Indikatorensatzes wurden zwei strukturierte Expertenworkshops durchgeführt. Ziel war es, Relevanz, Umsetzbarkeit und politische Anschlussfähigkeit der Indikatoren zu bewerten sowie Lücken zu identifizieren und Konsens über den methodischen Ansatz zu erzielen. Im ersten Workshop diskutierten Fachleute aus Forschung und Politik (u. a. Mitarbeitende der Projekte SYMOBIO, MoBi II und MonBio sowie von Thünen-Institut, DBFZ, IFEU, Ecologic, UBA) den konzeptionellen Rahmen und die Indikatorenauswahl. Der zweite Workshop fokussierte auf die praktische Umsetzung: Modellexperten (u. a. Mitarbeitende von Thünen-Institut, ZALF, Uni Gießen, IFEU, UBA) bewerteten, welche Indikatoren bereits modelliert werden, in Entwicklung sind oder fehlen.

Leitfragen waren u. a.: Decken die Indikatoren Umweltaspekte ausreichend ab? Sind sie vollständig und praktikabel? Welche zeitliche und räumliche Auflösung ist sinnvoll? Können bestehende Modelle die Indikatoren abbilden oder erweitert werden?

Die folgenden Indikatoren wurden als geeignet angesehen:

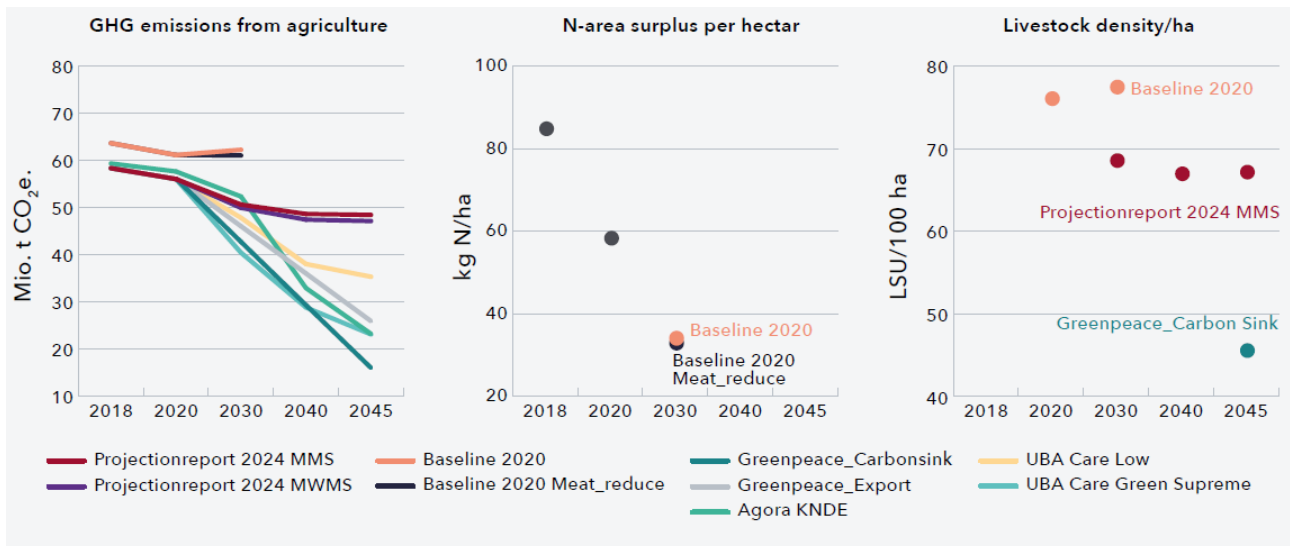
*Tabelle 3: Indikatoren-Liste Landwirtschaft*

| Indikatorengruppe         | Indikatoren   |
|---------------------------|---|
| <b>Klimaschutz</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- THG-Emissionen aus der Landwirtschaft</li> <li>- THG-Emissionen aus der Landnutzung</li> <li>- Kohlenstoffsinken aus der Landnutzung</li> </ul>                  |
| <b>Luftreinhaltung</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- NH<sub>3</sub> (Ammoniak) Emissionen</li> <li>- N-Gesamtbilanz</li> </ul>  |
| <b>Wasserqualität</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- N-Flächenbilanz</li> <li>- P-Bilanz (Phosphor)</li> </ul>  |
| <b>Wasserentnahme</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anteil der bewässerten Fläche</li> </ul>   |
| <b>Bodenfruchtbarkeit</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Organischer Kohlenstoffgehalt im Boden (Soil organic Carbon Content)</li> <li>- Bodenerosion</li> </ul>  |
| <b>Biodiversität</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tierbestandsdichte</li> <li>- Anteil HNV farmland</li> <li>- Weiterentwicklung: Pestizid Fracht, Landwirtschaftliche Nutzfläche mit Strukturelementen</li> </ul> |
| <b>Landnutzung</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fläche: Ackerland, Grünland, Agroforst, Wiedervernässte organische Böden, Agri-PV, Brachflächen</li> </ul>   |

| Indikatorengruppe                              | Indikatoren   |
|--|---|
| <b>Nachhaltige Landwirtschaftl. Produktion</b> | - Anteil Ökolandbau   |
|  | - Anteil pflanzliche und tierische Produktion                               |
|  | - Anteil an der Produktion von Nahrungsmitteln für den menschlichen Verzehr |
|  | - Weiterentwicklung: Anteil Nutzung Reststoffe                              |
|  | - Selbstversorgungsgrad (zu prüfen)   |

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Literaturrecherche und Expertenworkshops

Nur wenige der analysierten Modelle liefern Szenarioergebnisse für ganz Deutschland – bevorzugt auf NUTS-2-Ebene. Dazu zählen u. a. Modelle des Thünen-Instituts und das LISE-Modell des Öko-Instituts. Der Fokus vieler Szenarien liegt auf Treibhausgasemissionen; andere Umweltindikatoren werden oft nicht berücksichtigt oder nur in Untermodellen berechnet. Kein Szenario deckt derzeit alle identifizierten Indikatoren vollständig ab. Zudem variieren die Ausgangswerte je nach verwendetem Basisjahr. Diese Einschränkungen verdeutlichen den Bedarf an stärker integrierten Modellansätzen, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Landwirtschaft, Umwelt und Bioökonomie adäquat abzubilden. [Abbildung 6](#) veranschaulicht den Verlauf verschiedener Indikatoren über ausgewählte Szenarien hinweg und berücksichtigt historische Daten als Referenzpunkte.



*Abbildung 6 Entwicklung verschiedener Indikatoren in den Szenarien zum Monitoring landwirtschaftlicher Auswirkungen der Bioökonomie. Quelle: Beck-O'Brien (2024a).*

## 2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis wurde vom Öko-Institut ausgestellt und an PTJ versendet. Wichtigster Posten sind die Personalausgaben für das wissenschaftliche Personal.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit

Mit den entwickelten systemischen Ansätzen für die Modellierung der Bioökonomie konnte die erforderliche Basis für ein Monitoring-System geschaffen werden, das sowohl Nachhaltigkeitsaspekte auf internationaler Ebene als auch die Ziele der Agenda 2030 berücksichtigt. Hierzu wurde von Öko-Institut - aufbauend auf den Arbeiten in SYMOBIO 1.0 - ein Beitrag zum globalen landwirtschaftlichen Fußabdruck geleistet.

Von Öko-Institut wurde eine Auswahl modellgestützter Indikatoren zur Beschreibung der Land- und Forstwirtschaft im Rahmen eines Bioökonomiemonitorings geleistet. Die gewählten Indikatoren sind zudem anschlussfähig an historische Entwicklungen. Im bestehenden Bericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie (Beck O'Brien et al. 2024a) wurde die Anwendbarkeit dieses Monitoringansatzes erfolgreich

demonstriert. Die vorliegenden Arbeiten bilden eine fundierte Grundlage für die weitergehenden Arbeiten zum deutschen Bioökonomiemonitoring.

## 2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erzielten Projektergebnisse bilden die wesentliche Grundlage für das Folgeprojekt SYMOBIO 2<sup>PLUS</sup>, welches das Monitoring fortsetzt, verstärkt und erweitert. Damit kann die Beteiligung der Interessengruppen am Monitoring noch stärker gefördert und die Öffentlichkeit noch intensiver über die Leistung, Chancen und Risiken der Bioökonomie informiert werden.

Die Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur (BWI-4) decken erstmals die Periode 2018-2022 ab, die durch sehr starke Trockenheit und Käferkalamitäten gekennzeichnet waren. Diese Daten flossen in das nationale Treibhausgasinventar 2025 ein. Zuvor wurden im Treibhausgasinventar die Ergebnisse der Jahre 2012-2017 - eine Periode mit günstigen Wuchsbedingungen - fortgeschrieben. So wurde noch im THG-Inventar 2024 die THG-Bilanz der Wälder für die Jahre ab 2018 um ca. 70 Mio. t falsch eingeschätzt - und zwar 7 Jahre verspätet. In zwei Blog-Beiträgen haben wir gezeigt, dass mit dem Waldmodell FABio-Forest mit früher verfügbaren jährlichen Daten zu Baum mortalität, Witterung und Holzentnahme mit nur 1,5 bis 2 Jahre Verzögerung richtungssichere Ergebnisse bereitgestellt werden können (Hennenberg et al. 2024c, 2025). Dies unterstreicht die Bedeutung des gewählten Monitoringsansatzes.

Die Arbeiten mit Ergebnissen bestehender Szenarien haben gezeigt, dass eine vergleichende Interpretation nur eingeschränkt möglich ist (siehe [Abbildung 5](#)). Aus diesem Grund haben fünf der eingebundenen Waldmodellierer-Teams das gemeinsame Projekt "ForestOvershoot"<sup>3</sup> entwickelt, das nach aktuellem Stand im November 2025 vom BMBF im Rahmen von CDR-Terra startet. In diesem Projekt wird u.a. eine Ensemble-Modellierung zu den Wäldern in Deutschland mit engen Absprachen zu den getroffenen Annahmen und Dateninputs durchgeführt. Zu erwartende Ergebnisse können in das zukünftige deutsche Bioökonomiemonitoring einfließen.

Für das Bioökonomie-Monitoring der Landwirtschaft sind modellierbare und somit szenariofähige Indikatoren für alle übergeordneten Umweltziele der Bioökonomie identifiziert worden. Dazu gehören auch Indikatoren, die eine nachhaltige Verwendung biogener Materialien bewerten. Zusätzlich werden notwendige Datengrundlagen und Anknüpfungspunkte an bestehende Berichterstattungsprozesse benannt. Die Analyse ist ein wichtiger Baustein beim Aufbau eines zielgerichteten Monitoringsystems für die Umweltauswirkungen der Landwirtschaft als Teil der Bioökonomie. Durch den gewählten breiten Ansatz der Modellierung (Nahrung, Futtermittel, Stoff- und Energienutzung) können Szenarien verschiedene Handlungsebenen aufzeigen (z.B. Prozessoptimierung, Substitution, Nachfrageveränderungen). Die Arbeiten haben bestehende Lücken aufgezeigt und den Weiterentwicklungsbedarf für das Monitoring identifiziert – dies betrifft insbesondere neue gesetzliche und politische Anforderungen wie das EU Nature Restoration Law, die Farm-to-Fork-Strategie und das kommende Boden-Monitoring-Gesetz. Diese Regelwerke bringen neue Indikatoren mit sich oder verleihen bestehenden eine neue Relevanz, da nun klarere Zielsysteme definiert sind, anhand derer Fortschritte messbar gemacht werden müssen.

---

<sup>3</sup> Realizing Carbon Dioxide Removals from German forests and innovative wood use in construction under increasing disturbance risk and overshooting

## 2.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Im Zeitraum der Durchführung des Projekts wurde neue Fachliteratur zu den Fragestellungen in SYMOBIO 2.0 veröffentlicht, die vom Projektteam gesichtet und bei den laufenden Arbeiten berücksichtigt wurde. Dieser umfasst Arbeiten auf der globalen Ebene (Gardossi et al. 2023; FAO<sup>4</sup>; G20<sup>5</sup>; usw.), EU-Ebene<sup>6</sup> und sowie Projekte in Deutschland (MoBi II<sup>7</sup> und MonBio<sup>8</sup>).

Zum Sektor Wald und Waldmodellierung wurden im Oktober 2024 die Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur veröffentlicht. Neue Ergebnisse zur Modellierung der Wälder in Deutschland wurde vom Thünen-Institut im Zuge des THG-Inventars mit dem Matrixmodell (Rock et al. 2025) und mit WEHAM (BMLEH 2025) veröffentlicht. Das Projekt DIFENS, in dem FABio-Forest über 35 Szenarien und Szenario-Varianten zu unterschiedlichen Fragestellungen zu Klimawandel, Kalamitäten, Windwurf, Waldmanagement wie Waldumbau und Mortalitätsholzentnahme und Naturschutzmaßnahmen modellgestützt analysiert wurden. Ein wichtiges Modul ist die Klima-sensitive Zuwachsmmodellierung, die in Kooperation mit PIK (Waldmodell 4C) entwickelt wurde (FABio-Datenbank<sup>9</sup>, Pfeiffer et al. 2025, in Veröffentlichung). Diese neuen Entwicklungen der Datenlage und der Waldmodellierung sind eine wichtige Grundlage für das Folgeprojekt SYMOBIO 2<sup>PLUS</sup>.

Während der Projektbearbeitung sind für die Landwirtschaft v.a. Fortschritte im Bereich der Modellierung von Wasserqualität und -bedarf eingeleitet worden, die aktuell noch nicht abgeschlossen sind, aber deren Ergebnisse im Bereich der Modellierung auf Relevanz für das Bioökonomie-Monitoring analysiert werden sollten. Dies sind insbesondere die Arbeiten zu Nährstoffeinträge in Gewässer, wobei unter anderem ein Vergleich der beiden deutschlandweit arbeitenden Modellverbände AGRUM und MoRE vorgenommen wird. Das Projekt LAWAMAD des Thünen Instituts, das im Sommer 2025 abgeschlossen wurde, untersuchte den Wasserbedarf und Möglichkeiten des Wassermanagements für die Landwirtschaft in Deutschland. Für die Biodiversität werden für die Berichterstattung zum NECP eine Literaturanalyse im Rahmen des UBA-Vorhabens VAU-Bio erstellt. Es werden geeignete Indikatoren für den Einfluss durch die Bioenergieerzeugung entwickelt, die ein Teilbereich der Bioökonomie darstellt.

## 2.6 Eigene Veröffentlichungen

Eine Übersicht der Veröffentlichungen des gesamten Projekts ist ebenfalls online verfügbar: [www.monitoring-biooekonomie.de/de/downloads](http://www.monitoring-biooekonomie.de/de/downloads).

### **Gemeinsame Hauptberichte:**

- Beck-O'Brien, M., Bringezu, S., Banse, M., Barrelet, J., Bezama, A., Bösch, B., Brüning, S., Bühlren, B., Cabezas, A., Cyffka, K. F., Dzene, I., Fehrenbach, H., Gordillo Vera, F., Helander, H., Henke, J., Hennenberg, K., Hinz, R., Iost, S., Jordan, M., Kilian, D., Köppen, S., Kynast, E., Lutz, C., Meyer, C., Pereira, S., Pfeiffer, M., Phuntsho, Pozo Inofuentes, P., Reiss, T., Reuschel, S., Richter, S., Schaldach, R., Scheffler, M., Schomberg, A., Schüngel, J., Schweinle, J., Thrän, D., Wang, M., Weimar, H., Wiegmann, K., Wijesingha, J., Wilske, B., Wydra, S., Zeug, W., Zinke, C. (2024a). Monitoring the German Bioeconomy: Status, performance, trends and implications for sustainable development. Published by the Center for Environmental Systems Research (CESR), University of Kassel, Kassel, doi.org/10.17170/kobra-2024111510679
- Beck-O'Brien, M., Bringezu, S., Banse, M., Barrelet, J., Bezama, A., Bösch, B., Brüning, S., Bühlren, B., Cabezas, A., Cyffka, K. F., Dzene, I., Fehrenbach, H., Gordillo Vera, F., Helander, H., Henke, J.,

<sup>4</sup> <https://www.fao.org/in-action/sustainable-and-circular-bioeconomy/resources/publications/en/>

<sup>5</sup> <https://g20.gov.br/en/news/g20-bioeconomy-initiatives-second-meeting-focuses-on-dialogue-between-traditional-knowledge-and-contemporary-science>

<sup>6</sup> [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/bioeconomy/monitoring\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/bioeconomy/monitoring_en)

<sup>7</sup> <https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/biooekonomie-monitoring/biooekonomie-monitoring-ii>

<sup>8</sup> <https://www.ecologic.eu/18065>

<sup>9</sup> <https://fabio-model.de/>

- Hennenberg, K., Hinz, R., Iost, S., Jordan, M., Kilian, D., Köppen, S., Kynast, E., Lutz, C., Meyer, C., Pereira, S., Pfeiffer, M., Phuntsho, Pozo Inofuentes, P., Reiss, T., Reuschel, S., Richter, S., Schaldach, R., Scheffler, M., Schomberg, A., Schüngel, J., Schweinle, J., Thrän, D., Wang, M., Weimar, H., Wiegmann, K., Wijesingha, J., Wilske, B., Wydra, S., Zeug, W., Zinke, C. (2024b). Monitoring der deutschen Bioökonomie: Status, Leistung, Trends und Auswirkungen auf eine nachhaltige Entwicklung. Center for Environmental Systems Research (CESR), Universität Kassel, Kassel, doi:10.17170/kobra-2024111510678
- Beck-O'Brien, M., Bringezu, S., Banse, M., Barrelet, J., Bezama, A., Bösch, B., Brüning, S., Bührlen, B., Cabezas, A., Cyffka, K. F., Dzene, I., Fehrenbach, H., Gordillo Vera, F., Helander, H., Henke, J., Hennenberg, K., Hinz, R., Iost, S., Jordan, M., Kilian, D., Köppen, S., Kynast, E., Lutz, C., Meyer, C., Pereira, S., Pfeiffer, M., Phuntsho, Pozo Inofuentes, P., Reiss, T., Reuschel, S., Richter, S., Schaldach, R., Scheffler, M., Schomberg, A., Schüngel, J., Schweinle, J., Thrän, D., Wang, M., Weimar, H., Wiegmann, K., Wijesingha, J., Wilske, B., Wydra, S., Zeug, W., Zinke, C. (2024c). Monitoring the German Bioeconomy - Summary: Status, performance, trends and implications for sustainable development. Published by the Center for Environmental Systems Research (CESR), University of Kassel, Kassel, doi.org/10.17170/kobra-2024111510677

### **Wissenschaftliche Publikationen**

- Hennenberg KJ, Gebhardt S, Wimmer F, Distelkamp M, Lutz C, Böttcher H, Schaldach R (2022): Germany's agricultural land footprint and the impact of import pattern allocation. Sustainability 2022, 14, 105. Doi: 10.3390/su14010105
- Pfeiffer M, Hennenberg K, Böttcher H, Reise J, Benndorf A (2022): Nachfragegesteuerte Holzentnahme und Klimasensitivität – Weiterentwicklungen im Waldmodell FABio. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde, S. 47-60. [https://www.nw-fva.de/fileadmin/nw-fva/publikationen/pdf/nagel\\_2022\\_tagungsband\\_der\\_jahrestagung\\_der\\_sektion\\_ertragskunde\\_im.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/nw-fva/publikationen/pdf/nagel_2022_tagungsband_der_jahrestagung_der_sektion_ertragskunde_im.pdf) (zuletzt abgerufen: 22.09.2025)
- Pfeiffer M, Hennenberg K, Böttcher H, Reise J, Mantau U (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK. Öko-Institut. Berlin (Öko-Institut Working Paper, 4/2023). Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>, zuletzt geprüft am 26.09.2025.
- Hennenberg K, Bürck S, Fehrenbach H, Pfeiffer M, Köppen S (2023): Trägt die Energienutzung von Waldholz zum Klimaschutz bei? AFZ DerWALD 3/2023 S. 31-34.
- Hennenberg K, Köppen S, Banse M, Böttcher H, Brödner R, Cyffka K-F, Fehrenbach H, Iost S, Jordan J, Kilian D, Morland C, Pfeiffer M, Reise J, Richter S, Schweinle S, Schindler H, Weimar H (2024a): Hintergrundinformationen zum Status Quo der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und zukünftigen Biomassepotenzial für die Erarbeitung der NABIS. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Hintergrundinformationen-NABIS.pdf>, zuletzt geprüft am 26.09.2025
- Hennenberg K, Pfeiffer M, Benndorf A, Böttcher H, Reise J, Mantau U, Köppen S, Fehrenbach H, Bürck S (2024b): Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK). Climate Change 33/2024, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/auswirkungen-der-energetischen-nutzung-forstlicher>, zuletzt geprüft am 26.09.2025.
- Ludig S, Repenning J, Bei der Wieden M, Görz WK, Hennenberg K, Hermann H, Pfeiffer M, Scheffler M, Seibert D, Wiegmann K, Wiese F, Oei P-Y, Grünitz L, Höfer P (2024): Projektionsberichterstattung zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 in Schleswig-Holstein. Erstellt für das Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur Schleswig-Holstein. Online verfügbar unter:

<https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/E/energie/Downloads/projektionsberichtSH.pdf?blob=publicationFile&v=1> zuletzt geprüft am 22.09.2025

- Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Nieberg, M.; Böttcher, H. 2024: Auswirkungen von Wetterextremen auf die Waldentwicklung im empirischen Waldwachstumsmodell FABio-Forest. Poster auf der Kohlenstofftagung 2024, Göttingen, verfügbar unter [https://difens.de/img/results/Pfeiffer\\_etal\\_2025\\_Poster\\_Kohlenstofftagung.pdf](https://difens.de/img/results/Pfeiffer_etal_2025_Poster_Kohlenstofftagung.pdf), zuletzt geprüft am 22.09.2025.
- Steinbach J, Deurer J, Haller J, Popovski E, Decker A, Bei der Wieden M, Jansen LL, Bürger V, Flachsbarth F, Hennenberg K, Moosmann L, Ludig S, Pfeiffer M, Scheffler M, Stobbe M, Wiegmann K, Brugger H, Fleiter T, Krail M, Mandel T, Rehfeldt M, Yu S (2024). Klimaschutz- und Projektionsbericht Baden-Württemberg 2024. Erstellt für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Karlsruhe. Online verfügbar unter: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4\\_Klima/Klimaschutz/KMR/20241021-Bericht-Projektionen-BW.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/KMR/20241021-Bericht-Projektionen-BW.pdf), zuletzt geprüft am 22.09.2026
- Pfeiffer M, Nieberg M, Hennenberg K, Böttcher H, Reise J, Benndorf A (2025): Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen mit dem Modell FABio-Forest., Broschüre erstellt im Rahmen des Projekts DIFENS. Öko-Institut (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/DIFENS-Waldmodellierung.pdf>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.
- Pfeiffer M, Nieberg M, Hennenberg K, Böttcher H, Reise J, Benndorf A (2025): Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen, Sachbericht zum Teilvorhaben 1: Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen, 2220WK32A4 und Teilvorhaben 4: Klimasensitivität, 2220WK32D4. Verbundvorhaben: Waldentwicklung als Folge von Veränderung der Holznachfrage, Klimaveränderung, natürlichen Störungen und Politikanforderungen - Eine Analyse der Reaktionsmöglichkeiten von Forst- und Holzwirtschaft (DIFENS). Online verfügbar unter [https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/DIFENS\\_Sachbericht\\_Waldmodellierung.pdf](https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/DIFENS_Sachbericht_Waldmodellierung.pdf), zuletzt geprüft am 22.09.2025.
- Pfeiffer M, Grote R, Rock R, Schelhaas M-J, Huth A, Filipek S, Reyer CPO, Sakschewski B, Bereswill S, Nieberg M, Hetzer J, Anders T, Hickler T, Mäkelä A, Fischer R, Knapp N, Rammig A, Stark H, van Laar T, Vonderach V, Böttcher H, Hennenberg H (submitted): From simulation to sustainability: Using forest growth models for indicator-based bioeconomy monitoring. Regional Environmental Change. Special issue "Upon invitation only: Climate impacts on European forests and their mitigation potentials and ecosystem service provisioning"
- Scheffler M, Wiegmann K, Köppen S (in preparation): The Environmental Impact of the Bioeconomy: Indicators and Models for Monitoring in the Agricultural Sector. Sustainability.

#### **Tagungen und weitere Beiträge:**

- Ausrichtung Tagung:
  - ECEM: Es wurde eine Session auf der ECEM mit dem Titel "Environmental modelling for policy support – how to build bridges between two worlds" erfolgreich ausgerichtet (<https://ecem23.eu/wp-content/uploads/2023/09/ECEM-2023-Program.pdf>; Session 20; zuletzt geprüft am 22.09.2025).
- Teilnahme an Tagung und Workshops:
  - Deutscher Naturschutz Tag (28. Juni 2022, Hannover). Vortrag: "Laubbäume später ernten schafft Synergien zwischen Natur- und Klimaschutz"
  - Jahrestagung der Sektion Ertragskunde (12. bis 14. September 2022, Martinshaus Rendsburg). Vortrag: "Nachfragegesteuerte Holzentnahme und Klimasensitivität – Weiterentwicklungen im Waldmodell FABio" ([https://sektionertragskunde.nw-fva.de/2022/05\\_Pfeiffer.pdf](https://sektionertragskunde.nw-fva.de/2022/05_Pfeiffer.pdf); zuletzt geprüft am 22.09.2025)

- Roundtable 2023 "Perspectives of Forest Modelling" (22.-23. März 2023, UfZ, Leipzig). Vortrag: "Demand driven wood extraction and climate sensitivity in a forest model"
- Fachdialog "Bewertung der Klima-/Treibhausgaswirkung der energetischen Nutzung von Holz" (18.-19. April 2023, BMEL, Berlin)
- MonBio-Workshop: Indikatoren zum effektiven Schutz der natürlichen Systeme im Rahmen einer nachhaltigen Bioökonomie (April 2023)
- DAFA (Deutsche Agrarforschungs-Allianz) Konferenzvortrag „Agrarforschung zum Klimawandel“ in der Session 72 „Transformative Forschung“ (März 2024, Potsdam)
- European Conference “Biodiversity in Food Supply Chains” (November 2024, Berlin)
- Jahrestagung der Sektion Ertragskunde (13.-15. Mai 2024, Liepe/Barnim (Brandenburg); <https://sektionertragskunde.nw-fva.de/>). Vortrag: "Die Grenzen des Waldumbaus - Ein Modellexperiment mit einer möglichen optimalen, klimaresilienten Baumart."
- Fachdialog "Holzenergie" (06.-06. Juni 2024, BMEL, Berlin)
- European Conference for more insect protection and biodiversity at landscape level (Frankfurt/Main Mai 2025)
- Roundtable 2025 „Perspectives of Forest Modelling“ (26.-27. März 2025, UfZ, Leipzig). Vortrag: "FABio-Forest and weather extremes".
- Anhörung im Deutschen Bundestag zum Antrag der Fraktion der CDU/CSU "Bioenergie eine klare Zukunftsperspektive geben und bestehende Hemmnisse beseitigen", BT-Drucksache 20/9739, 15. Mai 2024, Teilnahme als Sachverständiger  
Hennenberg K (2024): Stellungnahme zum Antrag der Fraktion der CDU/CSU "Bioenergie eine klare Zukunftsperspektive geben und bestehende Hemmnisse beseitigen."
- Anhörung im Landtag Mecklenburg-Vorpommern zum Antrag der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen, Drucksache 8/253 „Erstellung eines jährlichen Klima- und Treibhausgasberichtes“ 11.06.2025, Teilnahme als Sachverständige  
Wiegmann, K et al. (2025). Erstellung eines jährlichen Klima- und Treibhausgasberichts
- Teilnahme an der projektbegleitenden Arbeitsgruppe des vom UBA geförderten F&E-Vorhabens „Entwicklung eines Modells zur Bewertung von THG-Minderungsmaßnahmen im Sektor Landwirtschaft (E-MoLL)“
- Blog-Beiträge
  - Hennenberg K, Böttcher H, Reise J, Bürck S, Fehrenbach H (2022): RED III-Methodik: In der Treibhausgasbilanz für Energieholz fehlt ein wichtiger Aspekt der IPCC-Regeln <https://www.oeko.de/blog/red-iii-methodik-in-der-treibhausgasbilanz-fuer-energieholz-fehlt-ein-wichtiger-aspekt-der-ipcc-regeln/>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.
  - Hennenberg K, Böttcher H, Reise J, Pfeiffer M (2024c): Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Speicherleistung des Waldes frühzeitiger abschätzen – Einordnung der Ergebnisse der Bundeswaldinventur. <https://www.oeko.de/blog/entwicklungen-der-co2-speicherleistung-des-waldes-fruehzeitiger-abschaetzen-einordnung-der-ergebnisse-der-bundeswaldinventur/>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.
  - Hennenberg K, Böttcher H, Pfeiffer M (2025): Komplexe Datenlage: Herausforderungen bei der THG-Bilanzierung im LULUCF-Sektor <https://www.oeko.de/blog/komplexe-datenlage-herausforderungen-bei-der-thg-bilanzierung-im-lulucf-sektor/>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.

### 3 Literatur

- BMBF and BMEL (2020): National Bioeconomy Strategy. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) and Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin.
- BMLEH (2025): Waldentwicklung und Rohholzaufkommen. Modellierung für die Jahre 2023 bis 2062. [https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/Projekte/2025/Bundeswaldinventur/Weham\\_2025/WEHAM-2025\\_Broschuere\\_bf.pdf](https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/Projekte/2025/Bundeswaldinventur/Weham_2025/WEHAM-2025_Broschuere_bf.pdf), zuletzt geprüft am 22.09.2025.
- Bringezu S, Distelkamp M, Lutz C, Wimmer F, Schaldach R, Hennenberg KJ, Böttcher H, Egenolf V (2021b): Environmental and socioeconomic footprints of the German bioeconomy. *Nature Sustainability*. 7: 10461. DOI: 10.1038/s41893-021-00725-3.
- Brockerhoff EG, Barbaro L, Castagneyrol B, Forrester DI, Gardiner B et al. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. In: *Biodivers Conserv* 26 (13): 3005–3035. DOI: 10.1007/s10531-017-1453-2.
- Collalti A, Trotta C, Keenan TF, Ibrom A, Bond-Lamberty B et al. (2018). Thinning can reduce losses in carbon use efficiency and carbon stocks in managed forests under warmer climate. *Journal of advances in modeling earth systems*, 10(10), pp.2427 – 2452.
- Gardossi L, et al. (2023): Bioeconomy national strategies in the G20 and OECD countries: Sharing experiences and comparing existing policies. *EFB Bioeconomy Journal*, 3: doi.org/10.1016/j.bioeco.2023.100053.
- Gomez San Juan M (2024): The bioeconomy toolbox: A guide to support the development of sustainable bioeconomy strategies and policies. FAO. ISBN: 2664-6137. <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1696225/>, zuletzt geprüft am 22.09.2025.
- Gregor K, Knoke T, Krause A, Reyer CPO, Lindeskog M et al. (2022): Trade-Offs for Climate-Smart Forestry in Europe Under Uncertain Future Climate. In: *Earth's Future* 10 (9). DOI: 10.1029/2022EF002796.
- Gutsch M, Lasch-Born P, Kollas C, Suckow F, Reyer CPO (2018). Balancing trade-offs between ecosystem services in Germany's forests under climate change. *Environ. Res. Lett.* 13 (4), p. 45012. DOI: 10.1088/1748-9326/aab4e5.
- Harthan RO, Förster H, Borkowski K, Braungardt S, Bürger V, et al. (2024). Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Umweltbundesamt (Hg.). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen\\_technischer\\_anhang\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf), zuletzt geprüft am 22.09.2025.
- Harthan R, Repenning J, Hennenberg K, Kasten P, Ludig S, et al. (2025, in Veröffentlichung). CARESupreme und CARELow. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE). Abschlussbericht (FKZ: 3720 41 506). CLIMATE CHANGE, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Kristensen P (2004): The DPSIR framework. European Topic Centre on Water, European Environment Agency. In Paper presented at the 27–29 September 2004 workshop on a comprehensive/detailed assessment of the vulnerability of water resources to environmental change in Africa using river basin approach. Nairobi, Kenya: UNEP Headquarters.
- Lin B, Ge J (2020). To harvest or not to harvest? Forest management as a trade-off between bioenergy production and carbon sink. *Journal of cleaner production*, 268, 122219.
- Mubareka S, Giuntoli J, Sanchez Lopez J, Lasarte Lopez J, M`barek R, Ronzon T, Renner A, Avraamides M (2023): Trends in the EU bioeconomy. EUR 31434 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg:10.2760/835046