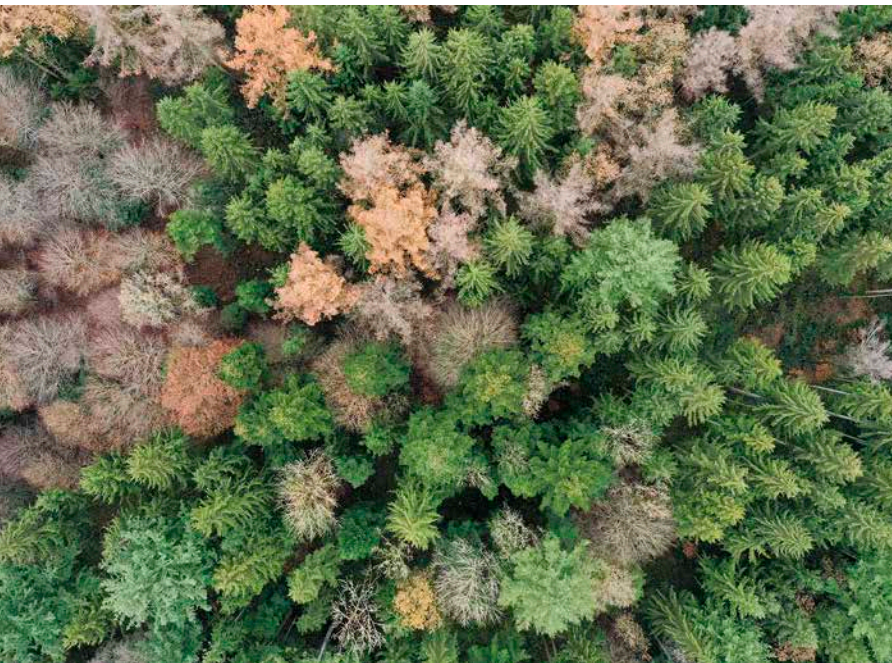


FeNEU – Flexible und transparente Auswertung von Waldinventuren



**Peter Biber, Astor Torano
Caicoya, Hans-Joachim Klemmt**

Forstinventuren werden in der Praxis zunehmend vielfältiger. Unterschiedliche Stichprobendesigns, bestandesweise Aufnahmen und neue Erhebungsmethoden treffen auf einen wachsenden Bedarf an vergleichbaren, transparenten und reproduzierbaren Auswertungen. Gleichzeitig steigt der Anspruch, neben klassischen ertragskundlichen Kenngrößen auch Informationen zu Struktur und Diversität zu berücksichtigen. Hier setzt die Entwicklung FeNEU an und schafft einen einheitlichen, flexiblen Rahmen zur Auswertung forstlicher Inventurdaten aus unterschiedlichen Quellen.

1 Die klassischen Verfahren der Waldinventur und Forsteinrichtung werden der zunehmenden Strukturvielfalt in den bayerischen Wäldern immer weniger gerecht. Foto: Tobias Hase

Forstinventuren können in der Praxis sehr verschieden konzipiert sein. Das Spektrum reicht von summarischen Aufnahmen auf Bestandesebene bis hin zu Rasterstichproben mit komplexem Stichprobendesign. Waren Forstinventuren traditionell an terrestrische Aufnahmeverfahren gebunden, bieten sich zunehmend moderne Methoden – besonders der Einsatz von drohnengetragener Technologie – als Ergänzung oder Alternative an. Gleichzeitig benötigt die Forstplanung in zunehmenden Maß Informationen zum Waldzustand und seiner Entwicklung, die über die klassischen ertragskundlichen Variablen hinausgehen. Zudem müssen die Informationen zeitnäher und effizienter als bisher zur Verfügung gestellt werden können. Dies wiederum geht einher mit einer zunehmenden strukturellen Vielfalt in Bayerns Wäldern in Verbindung mit der Zunahme von Störereignissen. Eine Forstplanung mit klassischen Methoden kann dem kaum gerecht werden. Diese Entwicklungen bergen die Gefahr, dass die Auswertung von Waldinventuren in methodischer Hinsicht zersplittert und Auswertungsergeb-

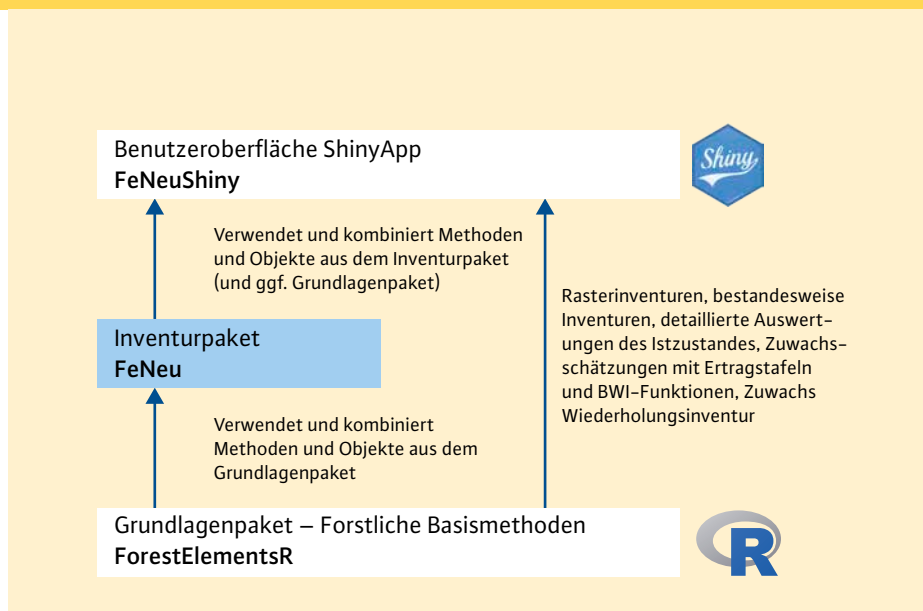
nisse immer weniger vergleichbar und damit schlechter beurteilbar werden.

Die Software FeNEU, deren Entwicklung von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) getragen wird, soll langfristig eine einheitliche Plattform bieten, die Forstinventurdaten aus verschiedensten Quellen übernehmen und nach einheitlichen Standards auswerten kann. Die Offenheit des Ansatzes für ein erweitertes Spektrum an Ausgabevariablen, das auch alternative Planungsverfahren unterstützt, ist dabei ein zentrales Designprinzip.

Gesamtkonzept

FeNEU ist als freie Open-Source Software konzipiert (GPL-3-Lizenz). Das bedeutet, dass sie zukünftig kostenlos zur Verfügung steht und der Sourcecode von jeder interessierten Person eingesehen werden kann. Damit ist die Einhaltung der methodischen Standards von FeNEU, z.B. durch forstliche Gutachter, nicht an eine finanzielle Hürde geknüpft und es besteht jederzeit Transparenz im Hinblick auf die Auswertungsmethoden. FeNEU wird in der frei verfügbaren Programmiersprache

R entwickelt, die sich mittlerweile zu einem Quasistandard in der professionellen Auswertung und Visualisierung von Daten entwickelt hat und nicht an ein bestimmtes Betriebssystem gebunden ist. Heutige Absolventinnen und Absolventen einer forstlichen Ausbildung an einer Universität oder Hochschule verfügen zumindest über Grundkenntnisse in R, so dass der Einstieg in FeNEU zunehmend niedrigschwelliger werden wird. In technischer Hinsicht besteht die Software aus drei hierarchischen Ebenen (Abbildung 2). Das Grundlagenpaket `ForestElementsR` bildet das Fundament der Entwicklung. `ForestElementsR` verfügt über eine Familie von Objekten der Klasse `fe_stand`, mithilfe derer ganze Waldbestände, Probestflächen sowie Stichprobeneinheiten – etwa Winkelzählproben oder konzentrische Probekreise – repräsentiert und ausgewertet werden können. `ForestElementsR` stellt darüber hinaus ein breites Arsenal von dendrometrischen Methoden zur Verfügung, wie beispielsweise Volumenfunktionen, Einheitshöhenkurven, Zuwachsfunktionen der Bundeswaldinventur, elektronische Ertragstafeln



2 Hierarchischer Aufbau der Software FeNEU: *ForestElementsR* bildet die methodische Grundlage, *FeNEU* das darauf aufbauende Inventurpaket sowie *FeNeuShiny* als optionale grafische Benutzeroberfläche.

Im Folgenden beschreiben wir den typischen Ablauf einer Inventurauswertung mit FeNeu – von der Dateneingabe bis zur Zuwachsermittlung. Schematisch ist dieser Ablauf in Abbildung 4 skizziert.

und Geoverortung von *fe_stand*-Objekten. *ForestElementsR* bildet damit die Basis für viele mögliche Anwendungen. Am besten kann man sich dieses Paket als eine Sammlung von Bausteinen vorstellen, die je nach Bedarf unterschiedlich kombiniert werden können. Die Anwendung für Inventurauswertungen im Rahmen von FeNEU ist nur eine von etlichen Möglichkeiten. So lässt sich *ForestElementsR* auch als »forstlicher Ad-hoc-Taschenrechner« einsetzen oder ideal mit modernen Wachstumssimulatoren kombinieren. Auch wissenschaftliche Datenauswertungen lassen sich damit vorbereiten. *ForestElementsR* ist bereits seit Ende 2024 öffentlich verfügbar (s. »Entwicklungsstand«).

Das eigentliche Inventurpaket FeNEU greift intensiv auf die von *ForestElementsR* angebotenen Methoden und Objekte zurück und verwendet diese in eigenen Objekten und Funktionen, die Anwendern zur Verfügung gestellt werden. Zentral ist hier die Klasse *fe_inventory*, die im Prinzip eine Sammlung von – typischerweise vielen – Objekten der *fe_stand*-Familie darstellt. Wenn es, unabhängig von der verwendeten Datenart, einmal gelungen ist, ein *fe_inventory*-Objekt zu erstellen, dann ist auch sichergestellt, dass ein Mindestsatz von Auswertungen funktionieren wird. FeNEU konzentriert sich derzeit auf die Bereitstellung von klassisch-dendrometrischer Information in unterschiedlichen Detailgraden (s. »Workflow einer Inventurauswertung«). Eine erste Basisversion wird 2026 veröffentlicht (s. »Entwicklungsstand«).

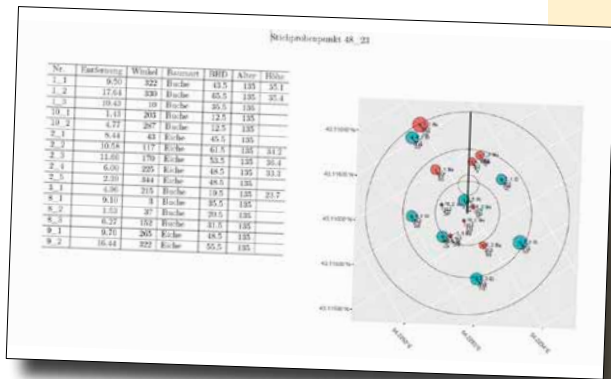
Während die beiden Pakete *ForestElementsR* und FeNEU für sich voll funktionsfähig sind und bei entsprechender Erfahrung mit R eine Vielzahl von Möglichkeiten zur eigenen Gestaltung von Arbeitsabläufen bieten, dürfte eine grafische Benutzeroberfläche den Zugang zu der Software stark vereinfachen. Aus diesem Grund entwickeln wir parallel eine browserbasierte Benutzeroberfläche FeNeuShiny, die zukünftig als eigenes R-Paket zur Verfügung stehen wird.

Entwicklungsstand

Das Grundlagenpaket *ForestElementsR* wurde in der ersten Version Ende 2024 veröffentlicht und hat seitdem mehrere Erweiterungen erfahren (aktuelle Version: 2.2.0, Mitte März 2026 über 6000 Downloads). Die Veröffentlichung erfolgte auf CRAN, der Plattform für offizielle R-Pakete, was die Einhaltung strenger technischer Standards und eine vollständige Dokumentation erfordert. R-Pakete, die auf CRAN bereitgestellt werden, werden täglich auf Windows-, MacOS- und Linux-Systemen getestet. Das Inventurpaket FeNEU existiert als stabile Betaversion, die bereits mehrere Probeanwendungen in der Praxis durchlaufen hat. Sie wird aktuell auf die Veröffentlichung einer ersten Version im Lauf des Jahres 2026 vorbereitet. Diese Version wird nicht das gesamte Spektrum an Möglichkeiten, die oben genannt wurden, abdecken, sondern eine solide Basisfunktionalität bieten, die stetig im Dialog mit der Praxis weiterentwickelt wird. Parallel wurde ein Grundgerüst für die Benutzeroberfläche FeNeuShiny entwickelt, in das derzeit die Hauptarbeitsabläufe von FeNEU Schritt für Schritt übernommen werden.

Dateneingabe und Plausibilitätsprüfung

Die Auswertung einer Forstinventur mit FeNEU beginnt mit der Dateneingabe. Hierbei können verschiedene Standardformate für unterschiedliche Arten von Inventuren (Rasterstichprobe, bestandesweise Inventur) verwendet werden. Die Verantwortung, die Daten in eines der Formate zu bringen, die FeNEU anbietet, liegt beim Anwender. Als Hilfestellung bei Wiederaufnahmen von Stichprobeninventuren kann mit FeNEU für jeden Stichprobenpunkt ein Informationsblatt mit grafischen und tabellarischen Informationen erzeugt werden (Abbildung 3). FeNEU unterstützt dabei sowohl standardisierte Formate für Rasterstichproben als auch für bestandesweise Inventuren. Bereits beim Einlesen werden grundlegende Plausibilitätsprüfungen durchgeführt, etwa zur Vollständigkeit der Daten, zu gültigen Wertebereichen oder zur Konsistenz von Schlüsselvariablen. Offensichtliche Fehler werden frühzeitig erkannt und mit aussagekräftigen Fehlermeldungen dokumentiert, wodurch sich nachgelagerte Auswertungsfehler vermeiden lassen. Gleichzeitig bleibt die Verantwortung für inhaltliche Entscheidungen – etwa zur Datenaufbereitung oder Klasseneinteilung – bewusst bei den Anwenderinnen und Anwendern. Beim Einlesen der Daten werden diese in eine interne, einheitliche Inventurstruktur (*fe_inventory*) überführt, die den Ausgangspunkt aller weiteren Verarbeitungsschritte bildet (Abbildung 4). Diese kann man sich als eine strukturierte Sammlung von Inventurpunkten mit allen zugehörigen Metadaten und Bauminformationen vorstellen, die plausibilisiert und konsistent vorliegen. Nur wenn diese Struktur fehlerfrei erzeugt werden kann, stehen die Daten für weitere Auswertungen zur Ver-



3 Zur Unterstützung der Datenerfassung und Wiederaufnahme kann für jeden Stichprobenpunkt ein übersichtliches Punktprotokoll mit tabellarischer und grafischer Darstellung der aufgenommenen Bäume erzeugt werden.

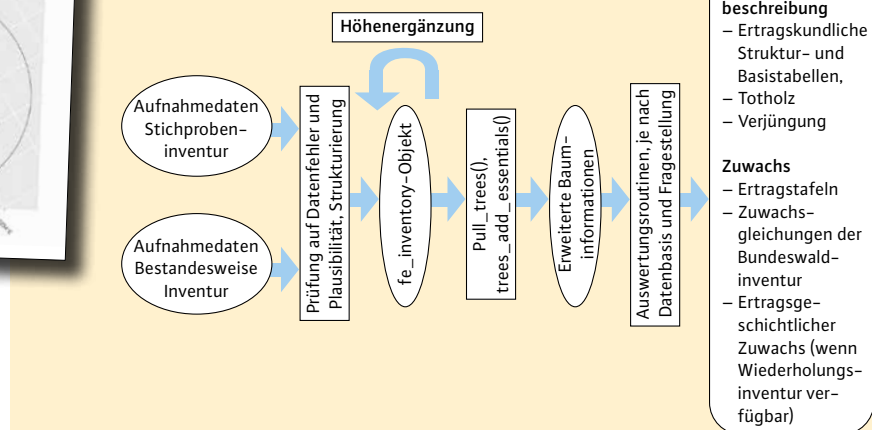
fügung; andernfalls weist FeNEU gezielt auf die vorhandenen Probleme hin.

Datenergänzung als Vorbereitung für die Auswertungen

Typischerweise werden bei Forstinventuren Baumhöhen nur an einem Teil der erfassten Bäume gemessen. Da diese zur Berechnung der Holzvolumina benötigt werden, können die fehlenden Höhen mithilfe der von ForestElementsR bereitgestellten Einheitshöhenkurvensysteme im *fe_inventory*-Objekt ergänzt werden (Abbildung 4). Das so erhaltene *fe_inventory*-Objekt ist der Ausgangspunkt aller folgenden Auswertungen. Alle weiteren Schritte können mit verschiedenen Optionen durchgeführt und dann verglichen werden, aber der gemeinsame Ausgangspunkt bleibt so stets erhalten.

Erzeugung von Struktur- und Basistabellen aus der Inventurauswertung

Das *fe_inventory*-Objekt spiegelt die Struktur einer Forstinventur – also die Aufteilung in Inventureinheiten wie etwa Stichprobenpunkte – direkt wider. Aus Gründen des Rechenaufwandes und der Vermeidung redundanter Berechnungen ist es jedoch sinnvoll, aus diesem Objekt eine Tabelle abzuleiten, in der alle Bäume auf gleicher Ebene und nach Schlüsselvariablen gruppierbar geführt werden können. Dies leisten die Funktionen *pull_trees()* und *trees_add_essentials()*, die jedem Baum einen Satz von Informationen hinzufügen, die für die folgenden Auswertungen grundlegend sind (Abbildung 4). Dazu gehören u. a. das Holzvolumen und die Einordnung in Durchmesser- und Altersklassen, deren Auflösung ausgewählt werden kann. Daraus wiederum können



4 Typischer Workflow einer Inventurauswertung mit FeNEU. Rechtecke kennzeichnen Arbeitsschritte der Software FeNEU, Ovale bzw. Symbole mit gerundeten Kanten stellen Daten in verschiedenen Verarbeitungszuständen dar (ausführliche Erklärung im Text).

sogenannte detaillierte Struktur- und Basistabellen erzeugt werden, die grundlegende ertragskundliche Variablen in unterschiedlicher Auflösung bereitstellen (Abbildung 4). Zu diesem Zweck bietet FeNEU eine Sammlung von Funktionen an, die eine Vielzahl von Möglichkeiten bieten, die Auswertung je nach Bedarf zuzuschneiden. So kann z. B. das auszuwertende Kollektiv beliebig gefiltert werden z. B. nach Bestandesschichten, Baumdimensionen, bestimmten Arten oder Kombinationen hiervon. Das Ergebnis dieser Auswertungen wird zunächst in EDV-gängiger Form erzeugt, um beispielsweise tiefergehende Sonderauswertungen zu unterstützen. Im typischen Fall werden darauf aufbauend standardisierte Ausgabetabellen erzeugt – darunter Struktur- und Basistabellen zur Bestandesbeschreibung – die gut lesbar sind und als PDF-Dateien darstell- und exportierbar sind. In Abbildung 4 werden diese Tabel-

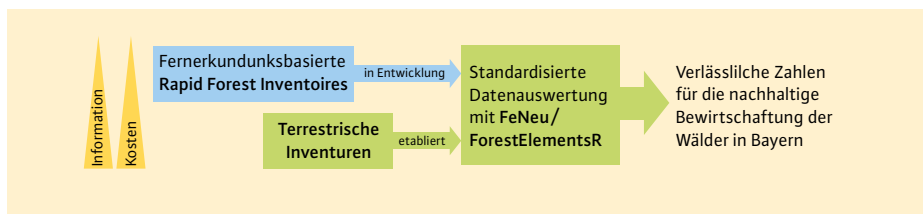
len erwähnt, in Abbildung 5 ist eine beispielhaft dargestellt. Für bestimmte Datenformate können zudem strukturierte Tabellen zum vorhandenen Totholz und zur Verjüngung erzeugt werden.

Ermittlung von Zuwächsen

Die oben beschriebenen Schritte führen zu einer Darstellung der Waldverhältnisse zum Zeitpunkt der Inventur. Wird eine Abschätzung des Zuwachses gewünscht, bietet FeNEU verschiedene Möglichkeiten (Abbildung 4). Sofern für einen Betrieb nur eine einzige Inventur vorliegt, kann der Zuwachs nur mit Hilfe von Modellen geschätzt werden. Die klassische Möglichkeit besteht in der Anwendung von Ertragstafeln. Hierbei greift FeNEU auf die mit ForestElementsR bereitgestellten Ertragstafeln zurück. Wenn mehrere Ertragstafeln für eine Baumart zur Verfügung stehen, kann eine Auswahl getroffen werden. Eine alternative Me-

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt aus einer Basistabelle der Inventurauswertung mit FeNEU. Die Tabelle enthält folgende Spalten: Baumartengruppe, Alterklasse, Vorrat, Grundfläche, Stammschlankheit, etc. Die Tabelle ist in mehrere Abschnitte unterteilt, die verschiedene Kenngrößen und Berechnungen darstellen.

5 Ausschnitt aus einer Basistabelle der Inventurauswertung mit FeNEU. Dargestellt sind ertragskundliche Kenngrößen getrennt nach Baumartengruppe und Altersklassen, einschließlich Vorrats-, Grundflächen- und Stammschlankheitsangaben sowie abgeleiteter Strukturkennwerte. Die Tabelle bildet die Grundlage für weiterführende Auswertungen und aggregierte Darstellungen auf Bestandes- oder Betriebsebene.



6 Anvisierte Prozesskette und Bearbeitungsstand der Entwicklung FeNEU für den Einsatz zur Auswertung dendroemtrischer Daten als Grundlage für die nachhaltige Waldbewirtschaftung in Bayern.

thode, die sich zunehmend bewährt, ist die Anwendung der Einzelbaumzuwachs-gleichungen der Bundeswaldinventur. Diese sind ebenfalls in ForestElementsR implementiert und in FeNEU gebündelt auf eine ganze Inventur anwendbar. Für den Fall, dass eine Wiederholungsinventur vorliegt, kann diese zur Zuwachsschätzung herangezogen werden. Der so ermittelte ertragsgeschichtliche Zuwachs spiegelt naturgemäß den wirklichen Zuwachs am besten wider. Derzeit steht dies nur für Rasterstichproben mit konzentrischem Probekreisdesign zur Verfügung. Hierbei werden beide Inventuren zunächst auf Stichprobenpunkt- und Baumebene miteinander verknüpft und die Zuwächse auf Baumebene berechnet und ggf. durch Modellannahmen ergänzt. Von dort ausgehend kann der Zuwachs auf größere Einheiten bis hin zum Gesamtbetrieb aggregiert werden.

Ausblick: Neue Inventurmethode und Indikatoren

Zum derzeitigen Stand sind die mit FeNEU möglichen Auswertungen auf ertragskundliche Variablen fokussiert. Mit dem gerade anlaufenden Projekt »DendroBiom« wird das Aussagespektrum deutlich im Bereich von Indikatoren für Struktur und Diversität erweitert, die dadurch der Praxis in operationaler Form zur Verfügung stehen werden. Damit eröffnen sich neue Perspektiven für die Einschätzungen von Waldeleistungen und darauf aufbauende Planungsansätze. Parallel arbeitet eine Arbeitsgruppe an der LWF an der Entwicklung von sogenannten Rapid Forest Inventories (RFI). Hierbei handelt es sich um einen Ansatz, um virtuell Inventurpunktinformationen aus hoch aufgelösten Drohnendaten abzuleiten. Der zu erwartende Informationsgewinn wird hierbei geringer sein als bei Anwendung terrestrischer Daten, allerdings sind hierbei die Kosten für grundlegende steuerungsrelevante Informationen auf Forstbetriebs- und Bestandesebene nach aktuellen Erfahrungen deutlich niedriger als bei terrestrischen Inventuren. Ein weiterer Vor-

teil der RFIs wird in der raschen Reproduzierbarkeit gesehen, was insbesondere im Zusammenhang mit häufiger auftretenden Störereignissen an Bedeutung gewinnen dürfte. Die Auswertung dieser virtuellen Inventurdaten erfolgt ebenso mit Hilfe der vorgestellten Softwarelösung FeNEU. Hiermit wird ein anschlussfähiges, fernerkundungs-basiertes Inventurverfahren entwickelt, welches kostengünstig und zeitnah grundlegende Informationen zum Zustand eines Forstbetriebs oder Forstbetriebsteilen als Grundlage für weitere Planungen ermöglicht. Abbildung 6 zeigt die beschriebene anvisierte Prozesskette noch einmal grafisch.

Wie bereits erwähnt, soll FeNEU bis Jahresmitte 2026 über das CRAN-Netzwerk frei zugänglich und kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Um potenziellen Anwenderinnen und Anwendern eine zu-

sätzliche Einstiegshürde zu nehmen, ist zum Jahresanfang 2027 eine Schulung für forstliche Sachverständige sowie für Mitarbeiter der AELF geplant.

Danksagung

Die Entwicklung von FeNEU beruht nicht zuletzt auf einem fortlaufenden Austausch mit engagierten Praktikern. Stellvertretend und besonders bedanken wir uns bei Rainer Dürr †, Daniel Kraus, Stefan Esser und Sabine Andersen. Dank gebührt den Bayerischen Staatsforsten für die Bereitstellung von Inventurdaten für vergleichende Auswertungen sowie dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus für die Förderung der Projekte FeNEU, DendroBiom und des Langfristigen Ertragskundlichen Versuchswesens in Bayern.

Zusammenfassung

FeNEU ist eine Open-Source-Software zur flexiblen und transparenten Auswertung von Forstinventuren, die an der LWF entwickelt wird. Sie reagiert auf die zunehmende Vielfalt an Inventurmethode, Datenquellen und Informationsanforderungen in der Forstplanung. Ziel ist es, Daten aus unterschiedlichen Inventurformen – von bestandesweisen Aufnahmen bis zu Rasterstichproben oder drohnenbasierten Verfahren – in einer einheitlichen Struktur auszuwerten und vergleichbare Ergebnisse zu ermöglichen. Die Software basiert auf der Programmiersprache R und baut auf dem bereits frei verfügbaren Basispaket ForestElementsR auf. Inventurdaten werden in eine standardisierte Struktur überführt, geprüft und anschließend für vielfältige Analysen genutzt. Parallel zur inhaltlichen Entwicklung wird eine grafische Benutzeroberfläche implementiert. Die Veröffentlichung von FeNEU ist für Mitte 2026 geplant.

Projekte

Die Projekte FeNEU (01.11.2022–31.10.2025) und DendroBiom (01.01.2026–31.12.2028) werden bzw. wurden durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus gefördert. FeNEU wird in eine Daueraufgabe an der LWF übergehen.

Autoren

Dr. Peter Biber ist wissenschaftlicher Leiter des Ertragskundlichen Versuchswesens in Bayern. Dr. Astor Toraño Caicoya bearbeitet das Projekt DendroBiom. Alle Autoren sind in der Abteilung »Waldbau, Waldwachstum und Inventuren« an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft tätig. Dr. Hans-Joachim Klemmt leitet diese Abteilung.

Literatur

Das Literaturverzeichnis finden Sie unter www.lwf.bayern.de in der Rubrik »Publikationen«.