universität freiburg

Inside WEHAM

Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung: Für belastbarere Projektionen als Grundlage für gesellschaftliche Diskussionen und Entscheidungen

Wachstum, Verjüngung und Baumartenwechsel

Waldstrategie Baden-Württemberg
Baden-Württemberg
Ministerium für Ländlichen Raum,
Landwirtschaft und Heimat



FVA
Forstliche Versuchs-
und Forschungsanstalt
Baden-Württemberg

THÜNEN

NW-FVA
Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt

Roadmap Inside WEHAM-Veranstaltungen

Heute: 22. September 2026

Wachstum & Baumartenwechsel

27. Oktober 2026

Mortalität & Durchforstungen

24. November 2026

Kohlenstoff & erste Ergebnisse für Baden-Württemberg



Agenda

14:00 – 14:10 | Eröffnung

→ Fragen bitte via Chat.

14:10 – 14:40 | Block A: Klimasensitives Wachstum + F&A

14:40 – 15:10 | Block B: Klimasensitive Abbildung von Verjüngung und Baumartenwechsel + F&A

15:10 – 15:30 | Block C: Diskussion, Fragen & Feedback (online Umfrage)

Warum gibt es Inside WEHAM?

„Inside WEHAM“: Transparenz, Austausch und gemeinsame Entwicklung fördern

Ziel: Weiterentwicklung stärker öffnen und gemeinsam diskutieren

Gesellschaftliche Anforderungen entwickeln sich ständig weiter.

WEHAM: Projektionen mit hoher gesellschaftlicher Relevanz zu Waldentwicklung, Holzaufkommen, Kohlenstoff, …



generiert mit ChatGPT

WEHAM MBK – Mortalität, Baumartenwechsel und Erweiterung der Kohlenstoffmodellierung (2025 - 2026)



- FVA-BW und WWD-Uni Freiburg (mit TI)
- Finanziert durch MLR-BW
- Pilot für Verbesserung der Belastbarkeit zukünftiger Projektionen
- aktuell begrenzt auf Baden-Württemberg

WEHAM Code

Klima- & standortsensitives Wachstum

Mortalität: Dürre, Hitze & Sturm

Verjüngung & Baumartenwechsel

Kohlenstoff in Boden, Totholz & Holzprodukten

Recap Inside WEHAM 23. Juni 2026

WEHAM im Kontext, strategische Relevanz & aktuelle Arbeiten

- Grundlagen von BWI und WEHAM; Simulator, Modelle und Szenarien, Prognosen und Projektionen, Nutzergruppen und Projektlandschaft

Historische Entwicklung und Grundlagen des Simulators

- Grundlogik von WEHAM; Einzelbaumwachstum und Übertragung auf den Bestand; Durchforstungen, Vorrat und Entnahmen

Neuste Entwicklungen, Open Source & Nutzbarkeit

- WEHAM Version 5.0: bessere Erweiterbarkeit durch höhere Code-Sicherheit, Lesbarkeit und Effizienz; Open Source auf GitLab; R-Paket WEHAM Utils und WEHAM GUI

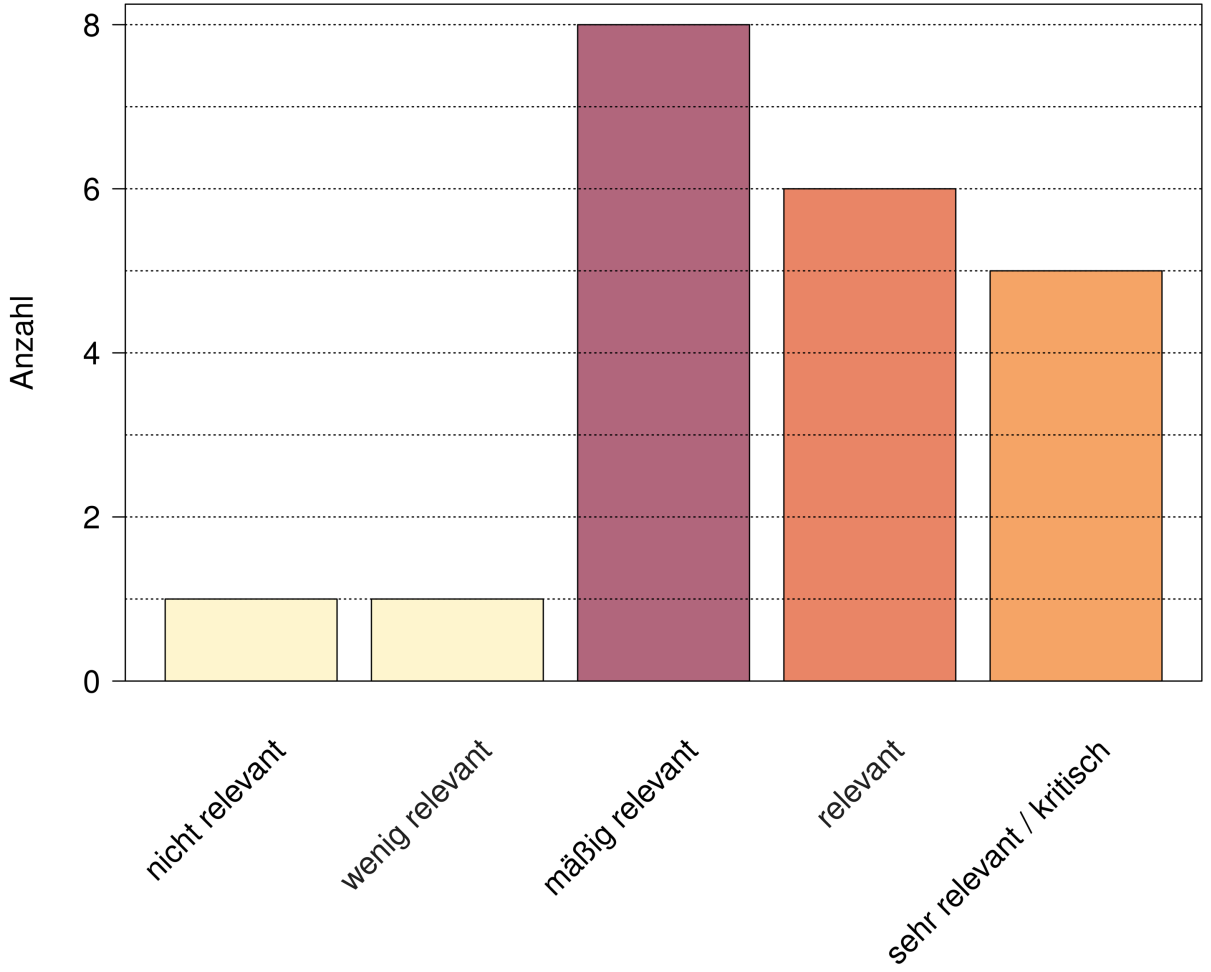
Ausblick & Abschluss

- geplante und potentiell nötige weitere Entwicklungschritte und -felder

Umfrageauswertung: Wie relevant sind die WEHAM Projektionen für Ihre Arbeit / Organisation?

N = 21

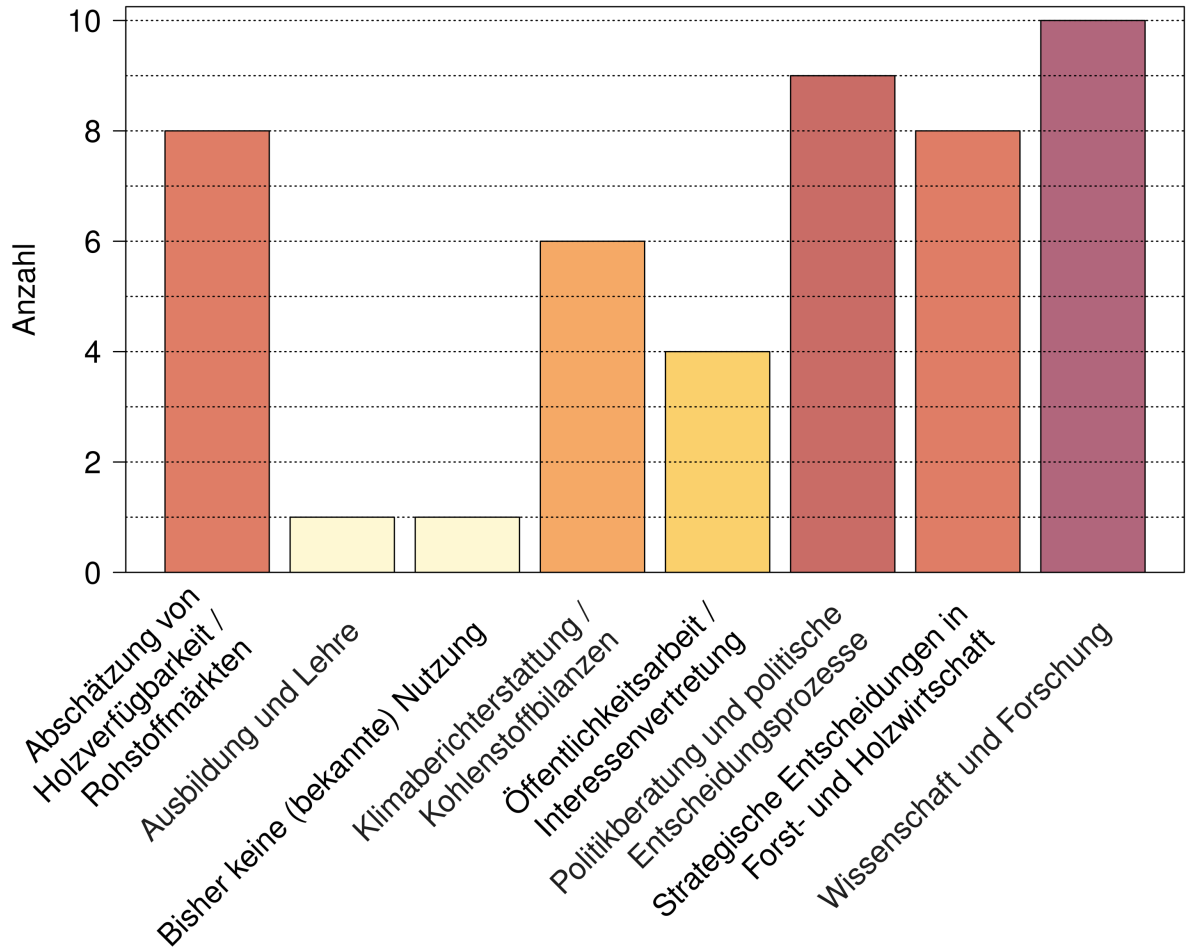
Stand 22. Juni 2026



Umfrageauswertung: Wofür nutzen oder benötigen sie Informationen aus WEHAM hauptsächlich?

N = 21

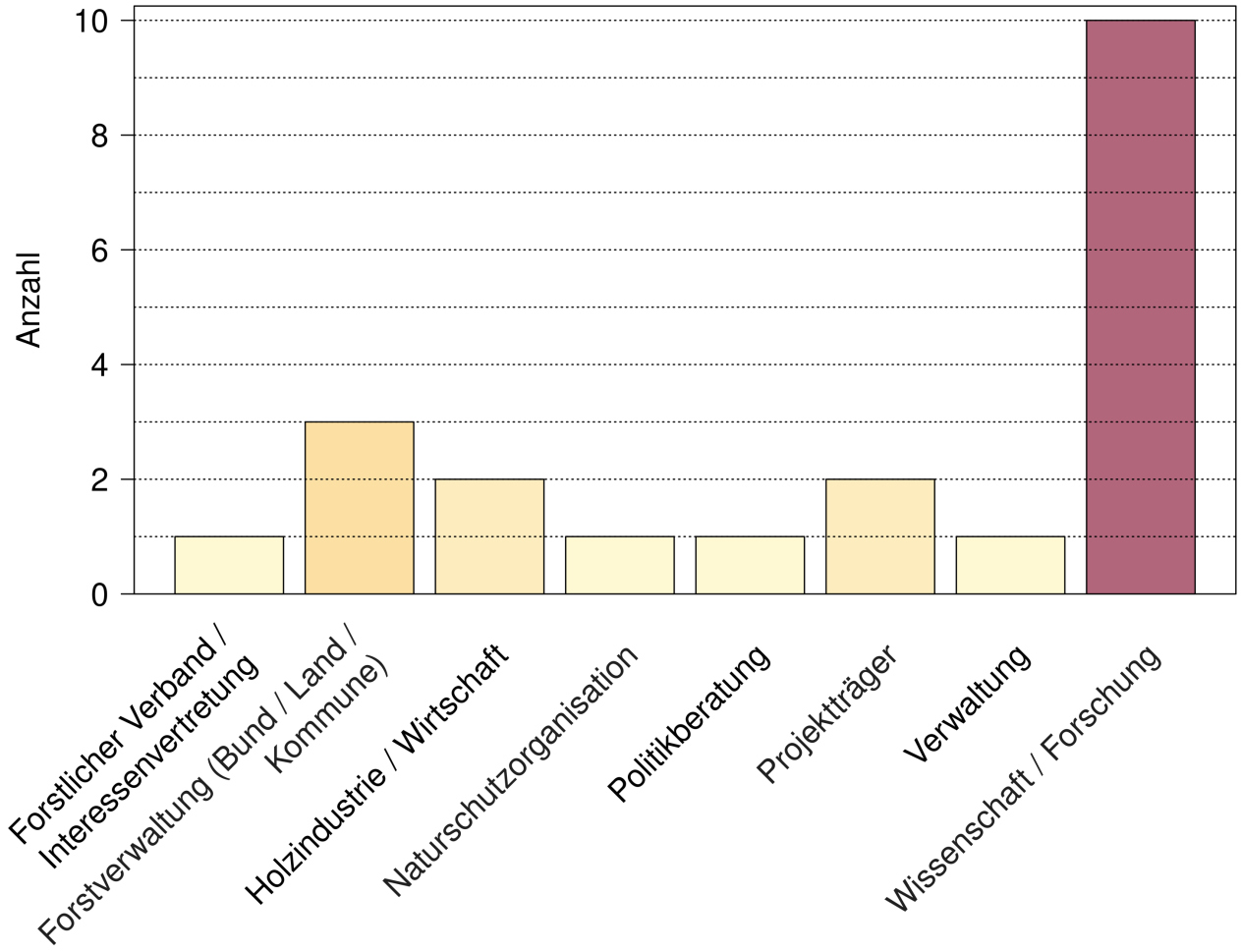
Stand 22. Juni 2026



Umfrageauswertung: In welchem Bereich sind Sie tätig?

N = 21

Stand 22. Juni 2026



Take Home Messages von Inside WEHAM 22. Juni 2026

1

Zukunftsfragen brauchen belastbare Projektionen

2

Projektionen sind Referenzpunkt für Diskurs

3

Anforderungen und Erwartungen verändern sich

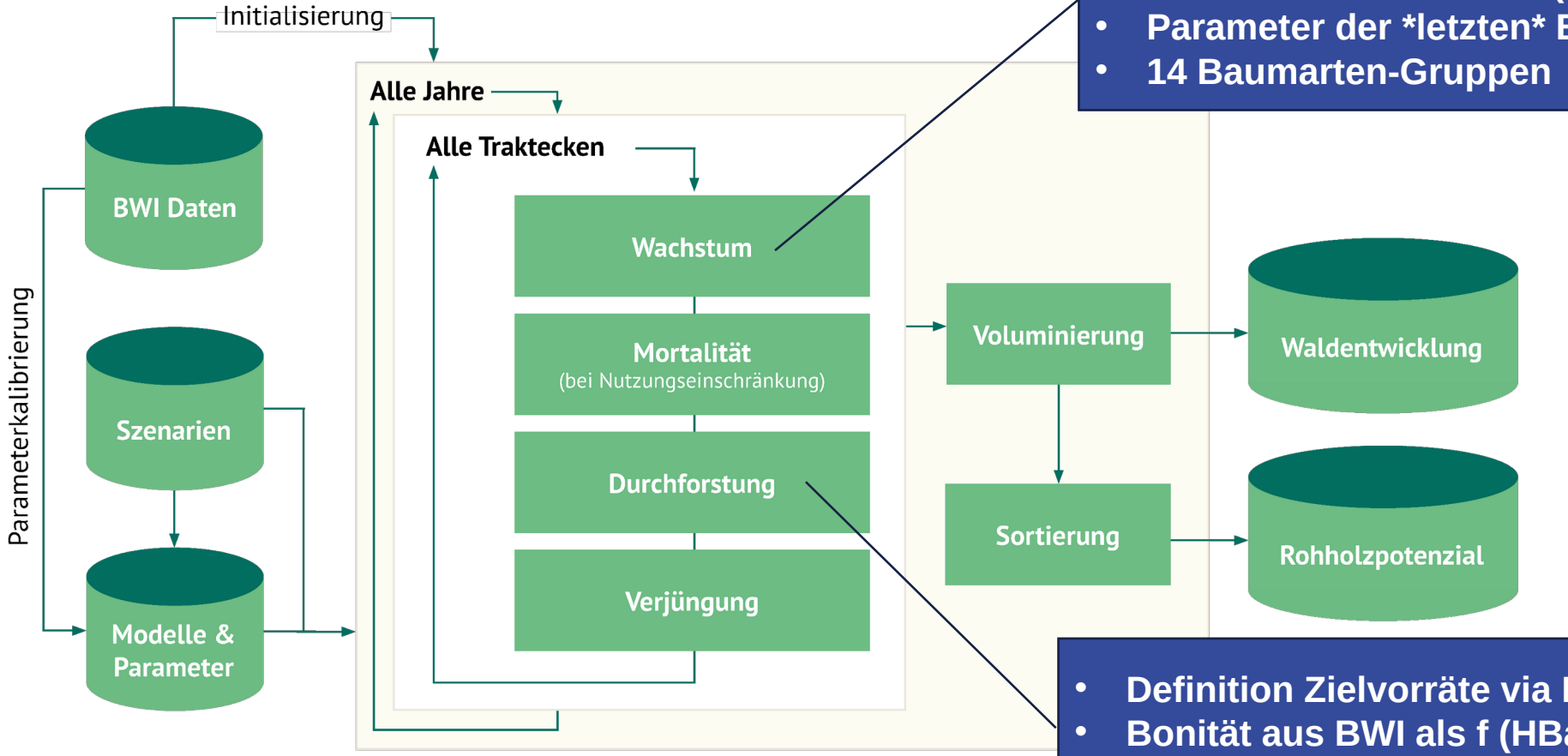
4

steter Kompetenzaufbau, Entwicklung & Austausch nötig

Block A: klimasensitives Waldwachstum in WEHAM

Christian Vonderach, Amanda Enriquez, Wilfried Kuissi-Kamdem, Florian Keppeler, Jan Schick

Aktueller Stand WEHAM 2012

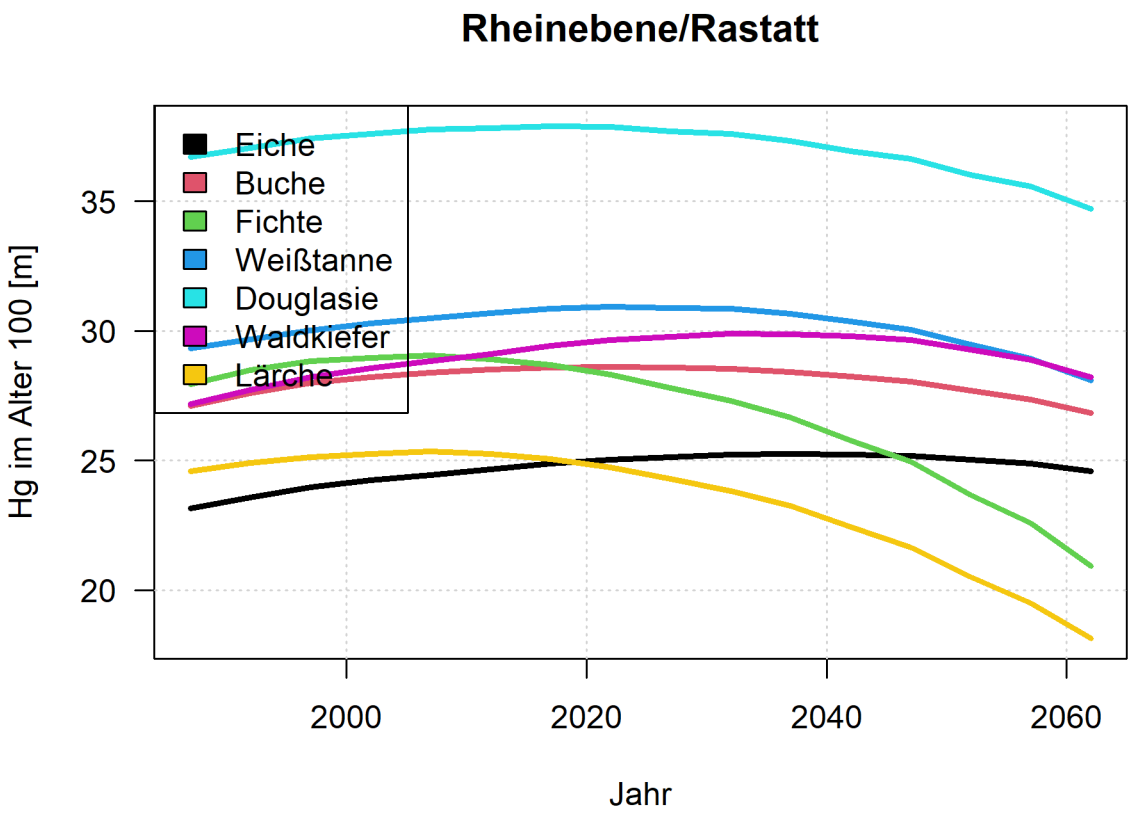


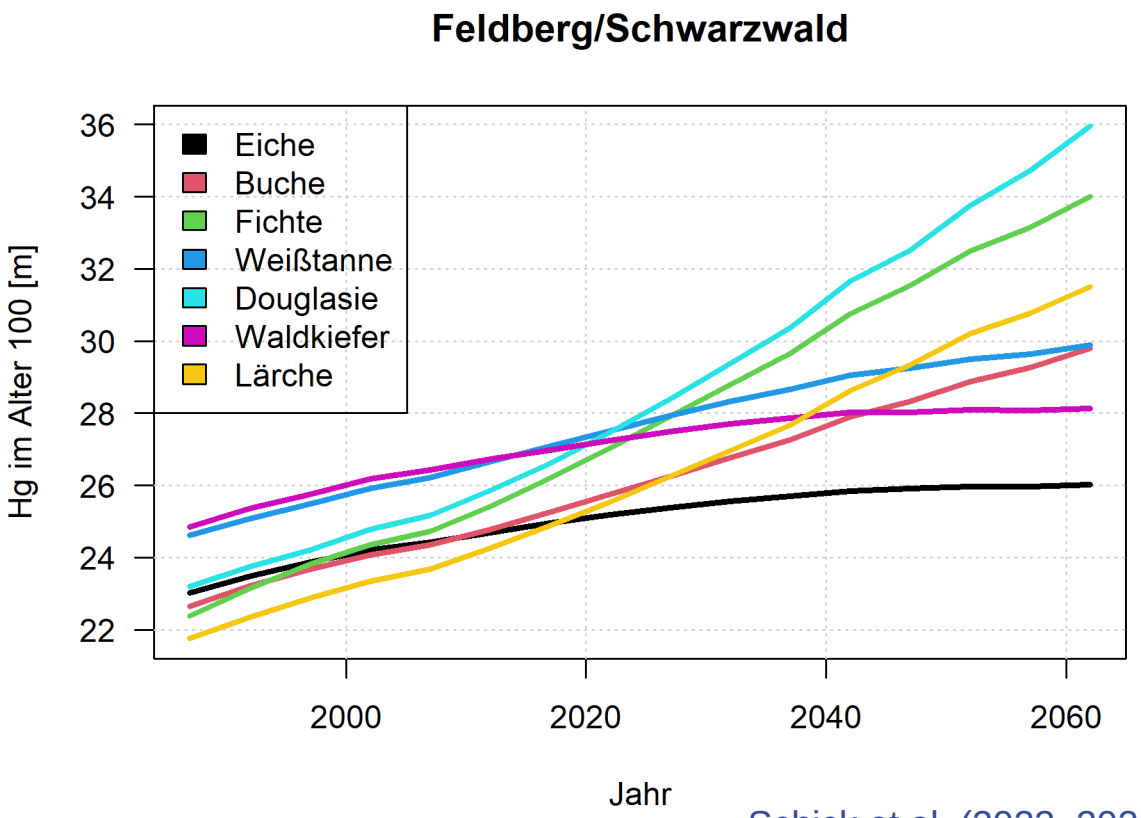
- Bhd: Sloboda-Wachstumsfunktion
- H: Petterson-Tarif H = f (Bhd, Ba)
- Parameter der *letzten* BWI-Periode
- 14 Baumarten-Gruppen

- Definition Zielvorräte via Bonität
- Bonität aus BWI als f (HBa, Alter, Hg)
- konstant über Laufzeit

Weiterentwicklung WEHAM: klimasensitive Bonitäten

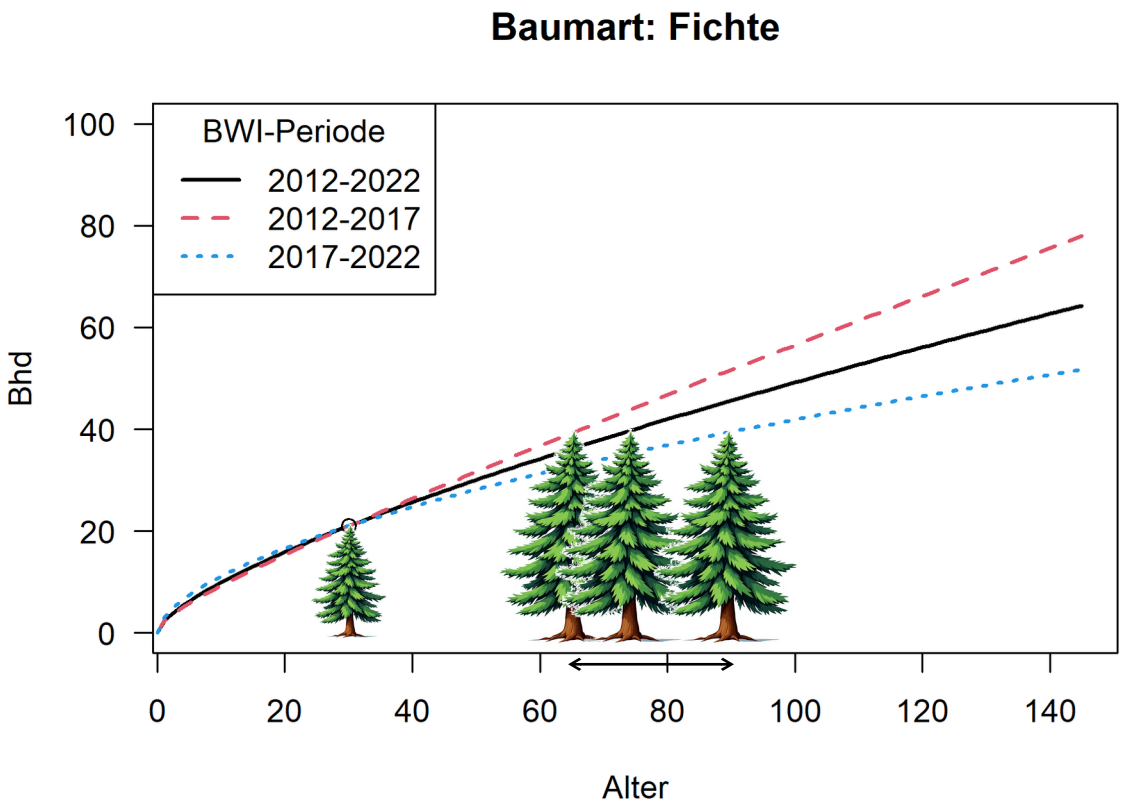
Bonitätsmodelle basierend auf Schick et al. (2026)

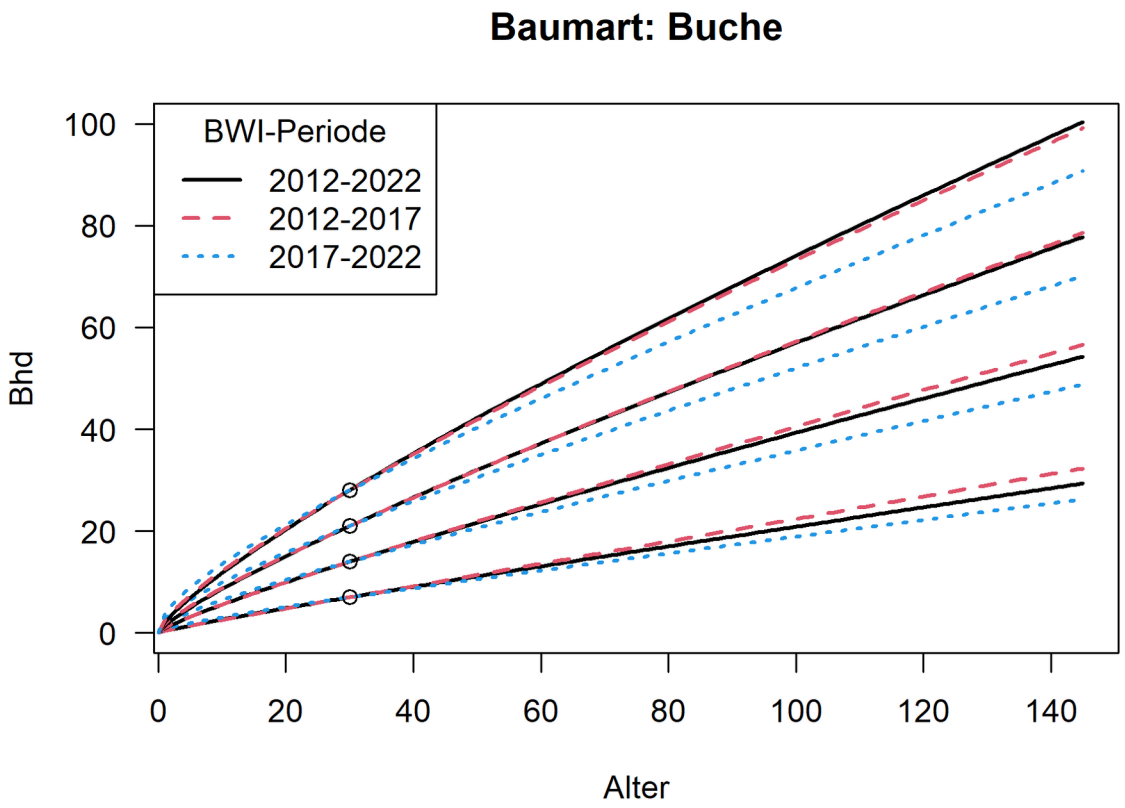




Schick et al. (2023, 2026)

Sloboda Parameter Stand BWI 2022





Aktualisierung des Bhd-Wachstums in WEHAM

von implizit bis explizit

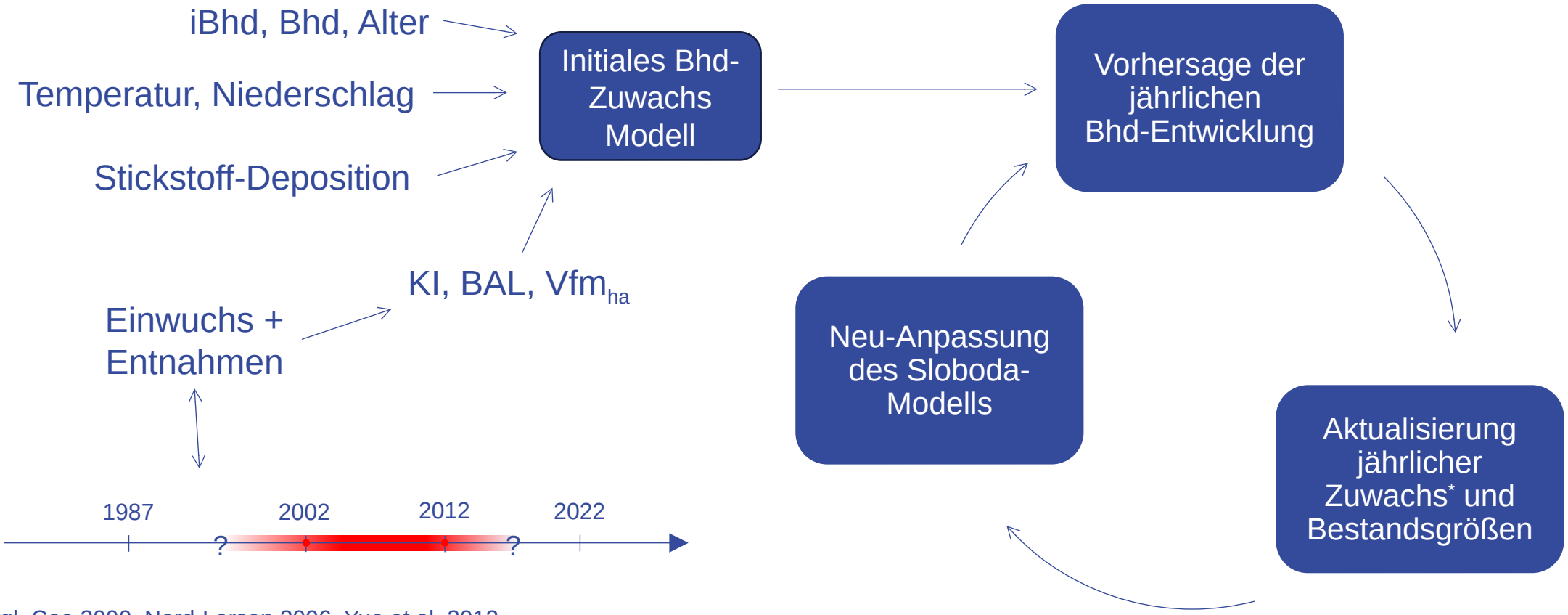
Randbedingungen

- weiterhin „Sloboda“
- weiterhin BWI-Daten 1987-2002-2012-2022
- nur Baden-Württemberg
- nur 4x4-Netz
- WEHAM-Baumartengruppen

Referenz	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
BWI 2012-2022	BWI 1987-2022	BWI 1987-2022	BWI 1987-2022 annualisiert	BWI 1987-2022 nur Fichte
		Klima (periodisch)	Klima (jährlich)	Jahrring-daten
		Bestand (beobachtet)	Bestand (jährlich)	Bestand (jährlich)
		Boden (konstant)	Boden (konstant)	Klima (jährlich)

Neuentwicklung Sloboda: Expectation-Maximization (Variante 3)

Modellentwicklung inkl. Annualisierung



vgl. Cao 2000, Nord-Larsen 2006, Yue et al. 2012

Neuentwicklung Sloboda: Expectation-Maximization (Variante 3)

Modellformulierung

Das (vorläufige) Modell:

$$iBhd = b\,\frac{Bhd}{Alter^{a}}\,log\left(\frac{c}{Bhd}\right)$$

Sloboda (1971)

$$a = f(T_{Sommer})$$
$$b = f(T_{Sommer}, P_{Sommer}, KI, Vfm_{ha}, N_{Dep})$$
$$c = f(T_{Sommer})$$

sowie BA-Zufallseffekt

T=Temperatur, P=Niederschlag

Überprüfung:

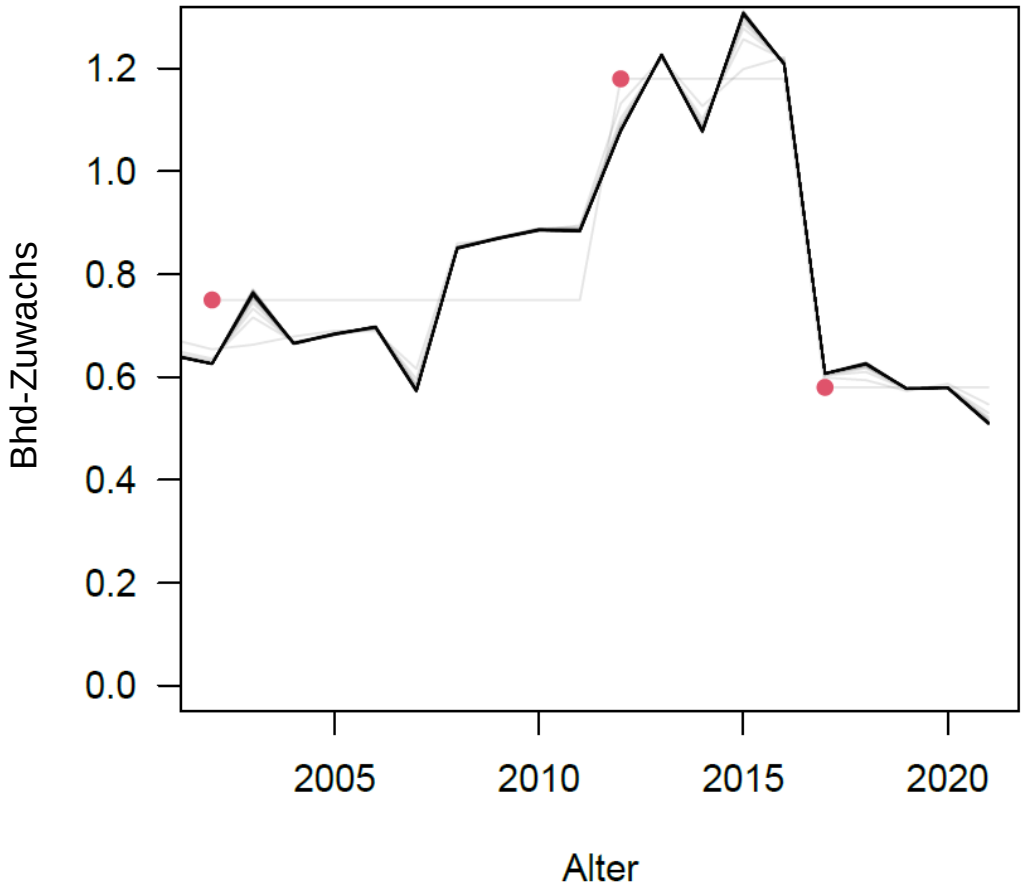
one-step ahead prediction error:

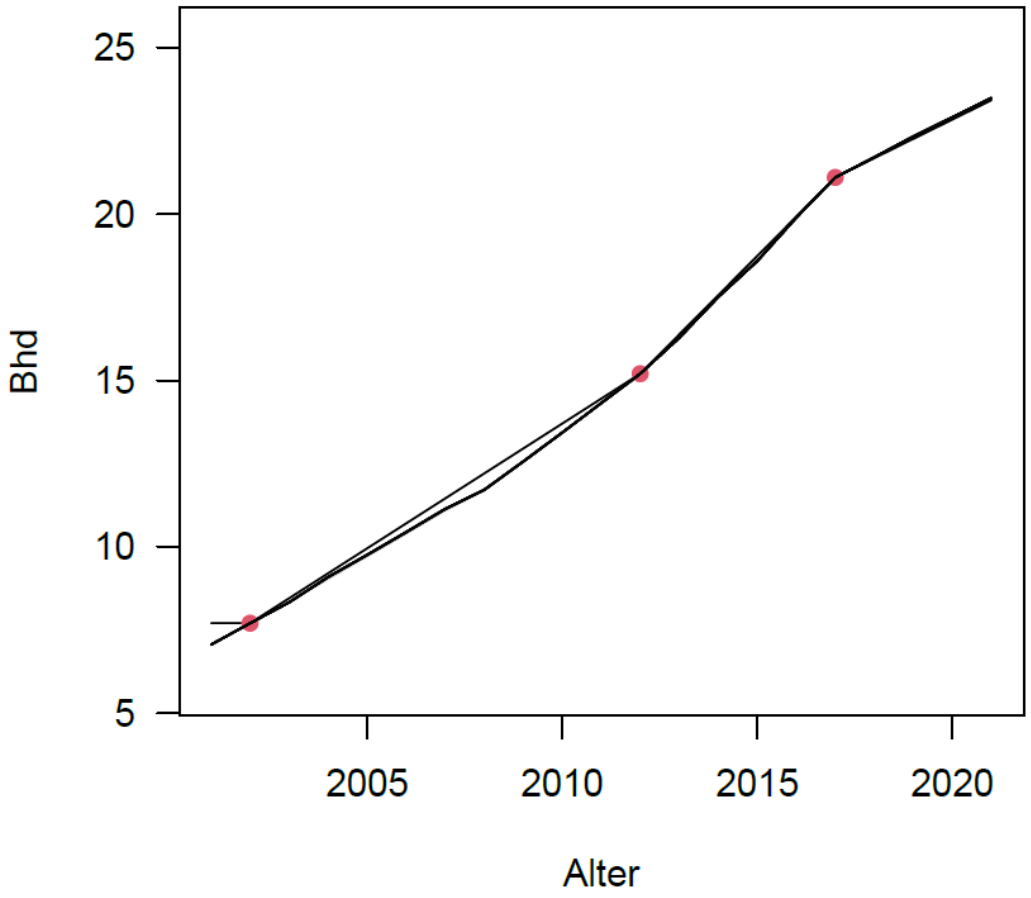
$$\varepsilon = Bhd_t - \left(Bhd_{t-PL} + \sum_{i=1}^{PL} \widehat{iBhd_i}\right)$$

mit PL=Periodenlänge (i.d.R. = 10)

Neuentwicklung Sloboda: Expectation-Maximization (Variante 3)

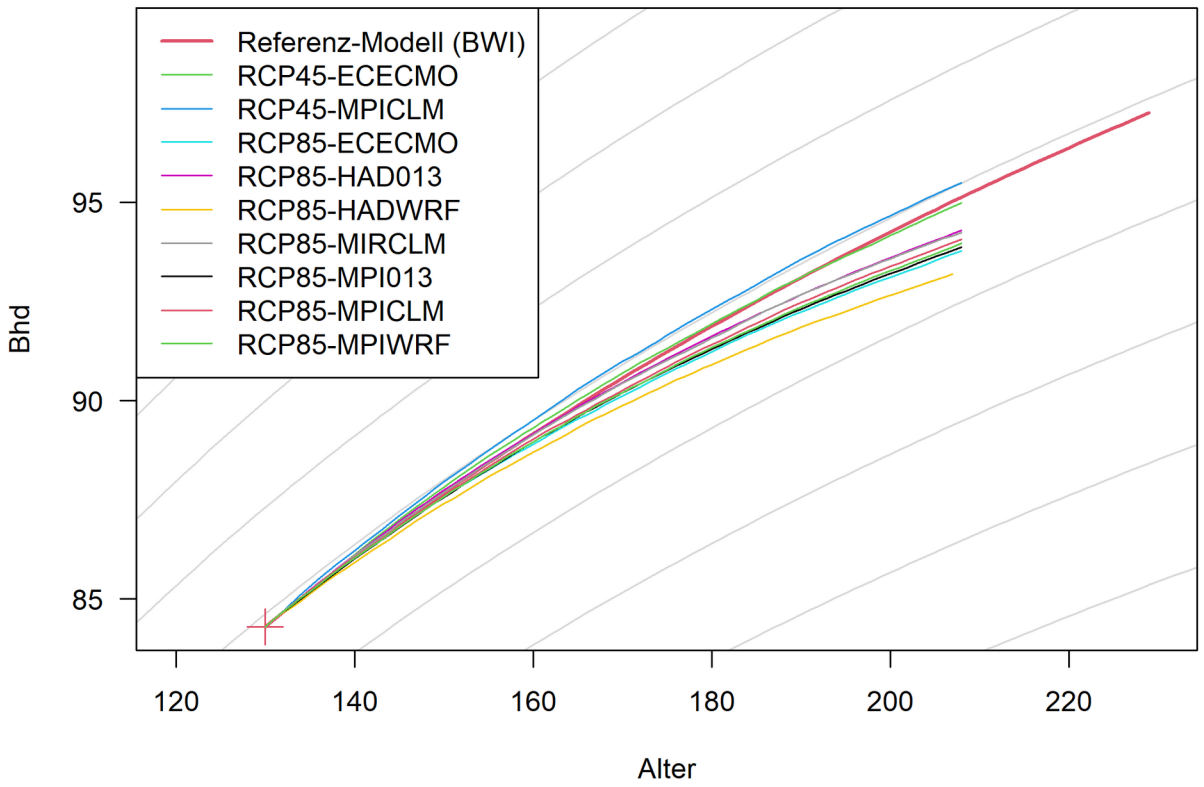
Visualisierung





Neuentwicklung Sloboda: Expectation-Maximization (Variante 3)

Anwendung



Ergebnis:

jährlicher Effekt (noch) gering

leichter Effekt nach Klimaszenarien

Variante 3 vs. Referenz:

Bias: -80% (0.44cm >> 0.09cm)

RMSE: -6%

MAE: -4%

Erinnerung: vorläufiges Modell

Wie geht’s weiter…

- **Weiterentwicklung Bhd-Zuwachsmodell**
- **Modell prüfen und gegen Referenz / Varianten 1+2 vergleichen**
- **Implementieren in WEHAM**
- **Überprüfen und Plausibilisieren der Projektionen**

Zusammenfassung

Ziel: klimasensitives WEHAM

klimasensitiver Bhd-Zuwachs nach Sloboda

- von implizit → explizit:

  => Einbindung Klimaszenarien möglich
- Annualisierung/Methodenentwicklung
- Wirkung auf

  * Vörrate

  * Zuwächse

klimasensitive Bonitäten

- explizite Abhängigkeit von Klima
- basierend auf Schick et al. (2023/2026)
- 7 Baumarten
- Wirkung auf

  * Zielvorräte und

  * Nutzungshöhe

Herzlichen Dank für die Aufmerksamkeit

Literatur

Cao, Q. V. (2000). Prediction of Annual Diameter Growth and Survival for Individual Trees from Periodic Measurements. *Forest Science*, *46*(1), 127–131. https://doi.org/10.1093/forestscience/46.1.127

Nord-Larsen, T., 2006. Modeling individual-tree growth from data with highly irregular measurements intervals. Forest Science 52, 198–208.

Schick, J., Albert, M., & Schmidt, M. (2023). A new approach for modeling stand height development of German forests under climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*, *6*, 1201636. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1201636

Schick, J., Albert, M., & Schmidt, M. (2026). Stand Height Modeling Revisited—Combining Strengths of Different Data Sources via Hierarchical Models. *Ecological Modelling*, *522*, 111796. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2026.111796

Sloboda, B. (1971). *Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung* (Veröffentlichungen der Abteilung Biometrie und Informatik). Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.

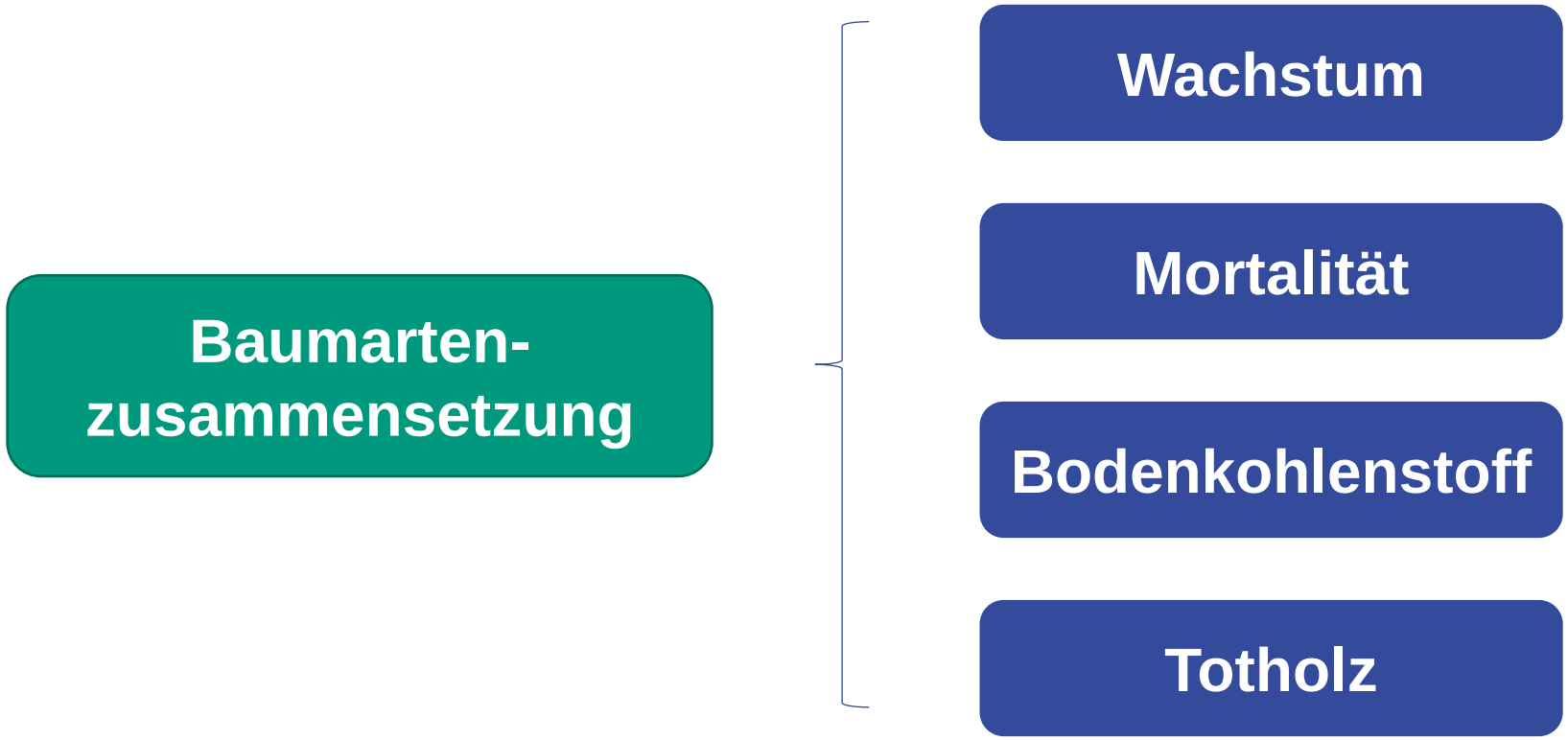
Yue, C., Kohnle, U., Kahle, H.-P., & Klädtke, J. (2012). Exploiting irregular measurement intervals for the analysis of growth trends of stand basal area increments: A composite model approach. *Forest Ecology and Management*, *263*, 216–228. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.007

universität freiburg

Verjüngung und Baumartenwechsel in WEHAM

Klaus Kremer
ALUFR – Professur für Waldwachstum und Dendroökologie
FVA BW – Abteilung Waldwachstum
klaus.kremer@forst.bw.de





Welche Baumarten bilden den Bestand?

Verjüngung: Aktueller Stand (WEHAM 2012)

- **Zusammensetzung**: wird zufällig aus dem Altbestand und/oder der Natürlichen Waldgesellschaft (NatWg) gezogen.

  → Natürliche Veränderungen aufgrund von **Klimawandel** und **Steuerung** werden nicht berücksichtigt.

- **Alter**: Zufällig aus einer Weibullverteilung gezogen. Höhe und BHD werden über Bonität abgeleitet.

- Die Verjüngung ist an die **Endnutzung („Kahlschlag“) gekoppelt**.

  → Eine kontinuierliche Rekrutierung wird nicht berücksichtigt.

Ziel

Die Zusammensetzung der Bestände realistischer zu projizieren, indem Veränderungen infolge von **Bewirtschaftungsentscheidungen** und der erwarteten **Klimaänderungen** berücksichtigt werden.

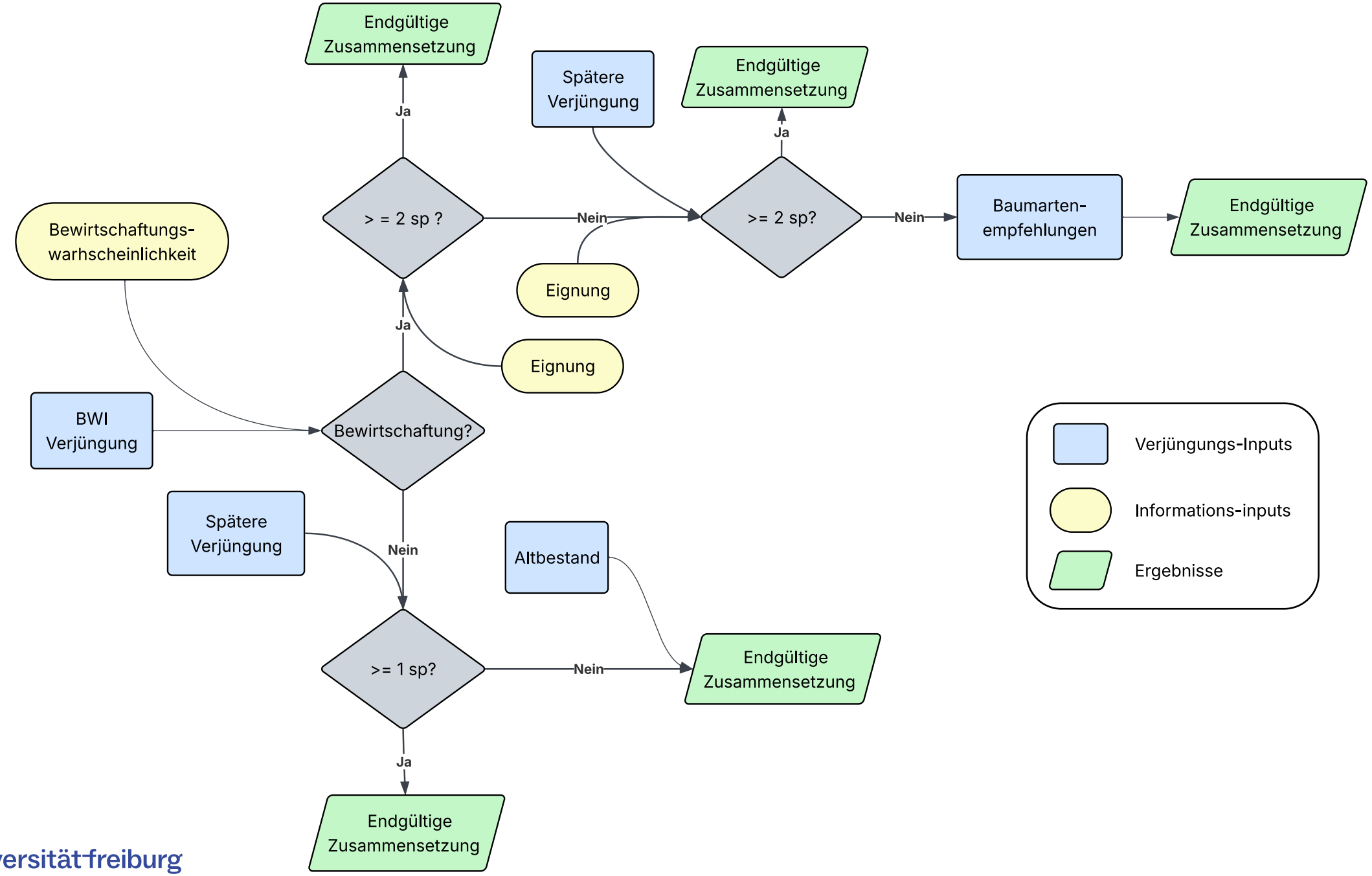
Durchgeführte Anpassungen

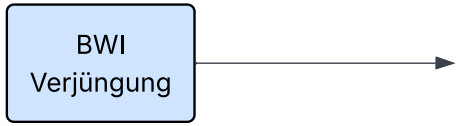
1. Verfügbare Verjüngung laut BWI

2. Naturverjüngungs-modelle
(basierend auf Klima, Standort, usw.)

3. Baumarteneignung
(Karten)

4. Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
(basierend auf Besitzart)


Endgültige Zusammensetzung
Ja
Spätere Verjüngung
Endgültige Zusammensetzung
Ja
Bewirtschaftungs-warhscheinlichkeit
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Nein
Baumarten-empfehlungen
Endgültige Zusammensetzung
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?
Spätere Verjüngung
Nein
Altbestand
>= 1 sp?
Nein
Endgültige Zusammensetzung
Ja
Endgültige Zusammensetzung
Verjüngungs-Inputs
Informations-inputs
Ergebnisse

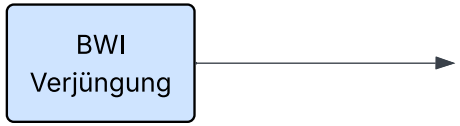

BWI
Verjüngung

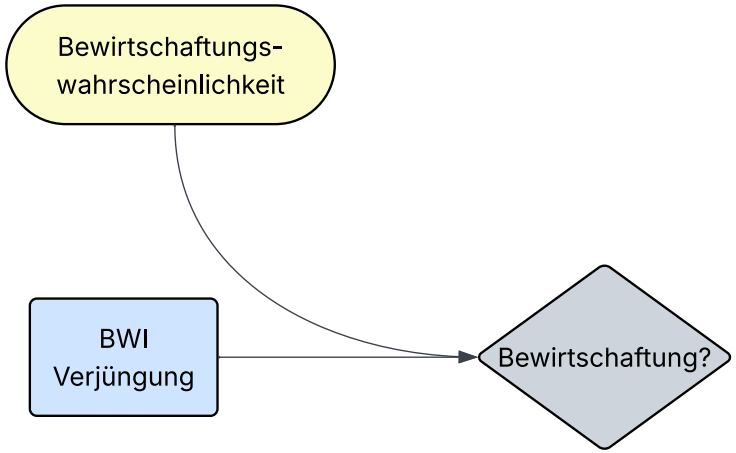
Naturverjüngung aus der BWI

Die **in der BWI erfasste Zusammensetzung der Verjüngung** (BHD < 7 cm) wird **als Input verwendet** (anstelle der Zusammensetzung des Altbestandes).



BMEL; Thünen-Institut

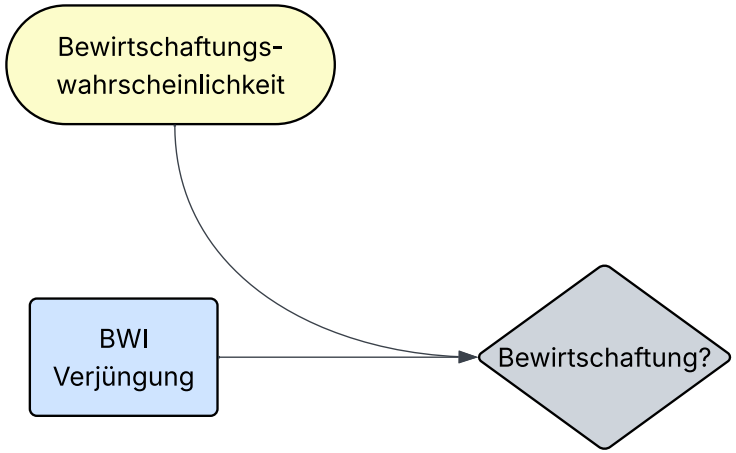

BWI
Verjüngung

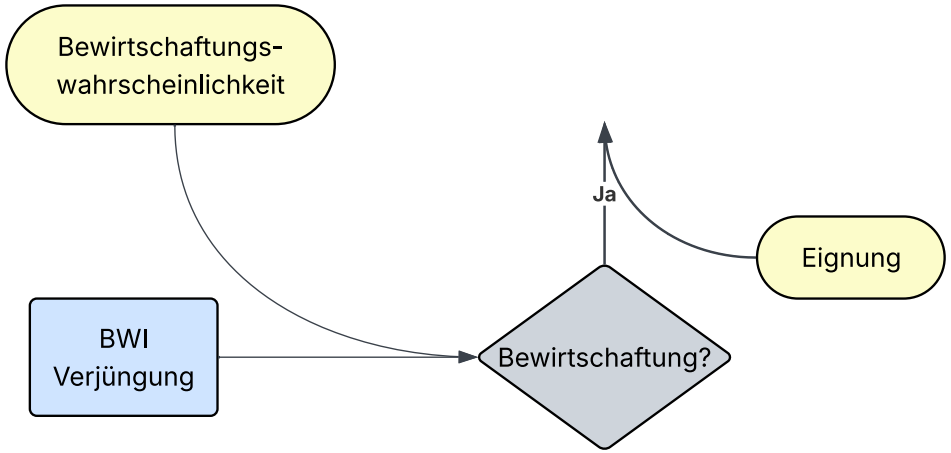

Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?

Bewirtschaftungswahrscheinlichkeit

Aus den in der BWI angegebenen Besitzartklassen wird eine Bewirtschaftungswahrscheinlichkeit abgeleitet.

Besitzart	Bewirtschaftungswahrscheinlichkeit	Referenzen
Staatswald (Bund)	0.95	https://wald.fnr.de/wissen/themendossiers/waldbau-im-klimawandel/details/baumartenwahl-im-klimawandel; https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/leitlinien_wiederbewaldung_bf.pdf; https://www.bundesumweltministerium.de/themen/naturschutz/waelder/nationale-waldschutzpolitik
Staatswald (Land)	0.95	https://www.landesrecht-bw.de/bsbw/document/jlr-WaldGBWpG10
Körperschaftwald	0.90	https://www.landesrecht-bw.de/bsbw/document/jlr-WaldGBWpG10
Privatwald, > 1000ha	0.90	https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/nfap_germany_bf.pdf
Privatwald, >20; <1000 ha	0.65	https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-004-0042-6; https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/nfap_germany_bf.pdf; https://wald.fnr.de/wissen/wissenswertes/artikel/privatwald-in-deutschland
Privatwald, < 20ha	0.35	https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-004-0042-6; https://wald.fnr.de/wissen/wissenswertes/artikel/privatwald-in-deutschland; https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2023/Veranstaltung/Statusseminar_Kleinprivatwald/Vortr%C3%A4ge/15_KLEIBER_Moelder_Hansen.pdf

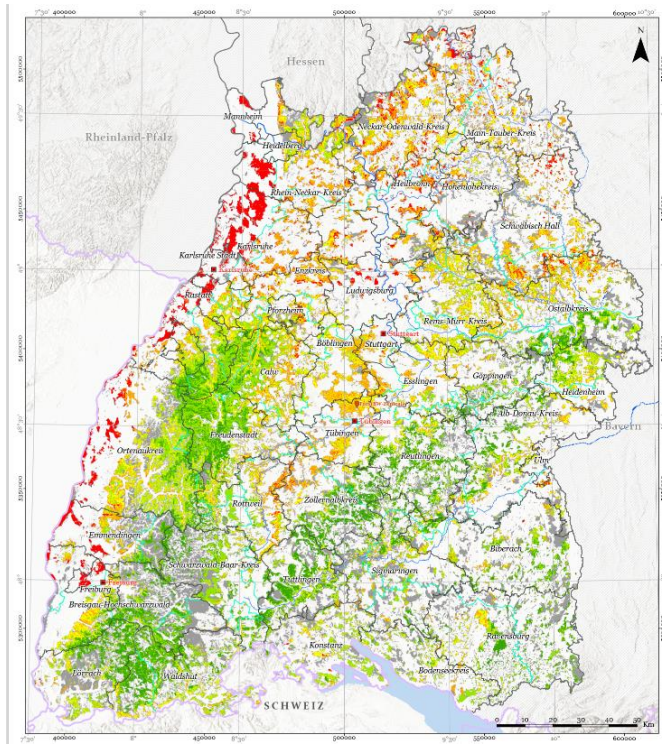

Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?


Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
Ja
Eignung
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?

Baumarteneignung

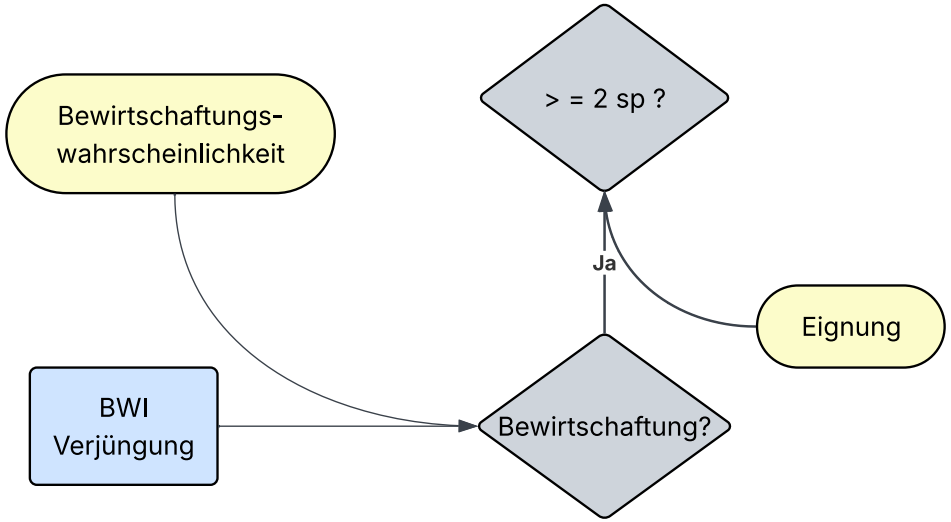
In bewirtschafteten Beständen sollen **geeignete Baumarten häufiger in der Verjüngung fortgeführt werden als ungeeignete**.

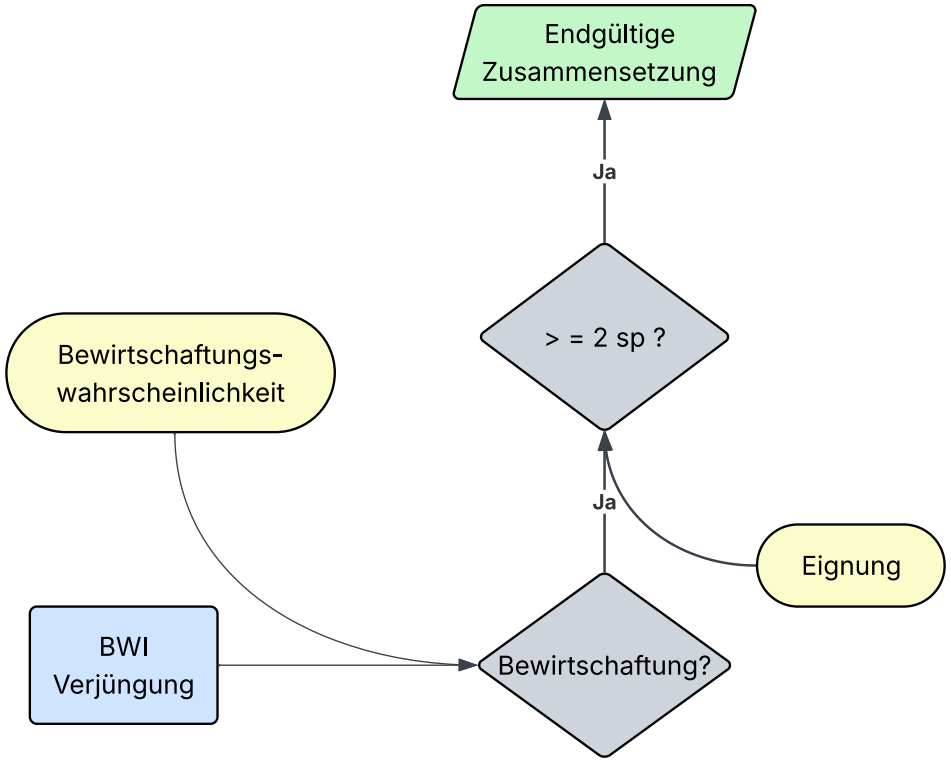
- Konkurrenz
- Pfleglichkeit
- Stabilität (Klima)
- Leistung

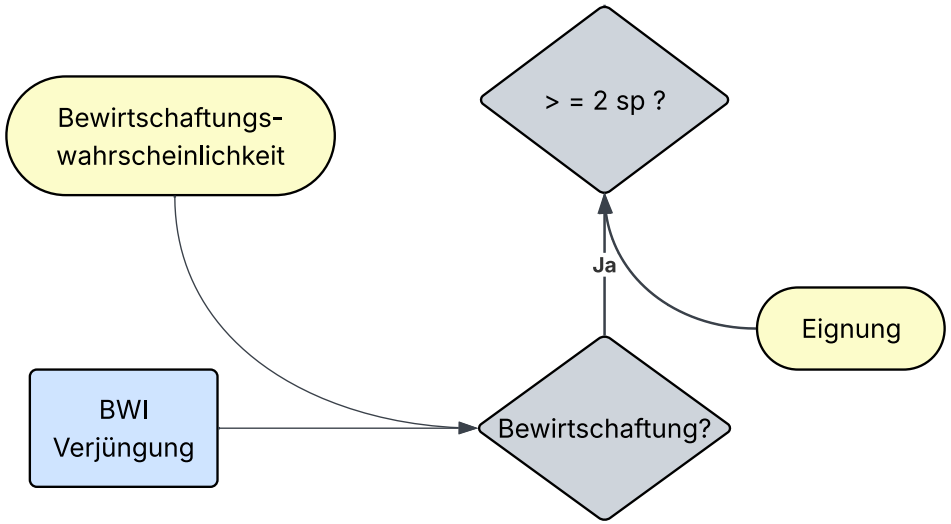


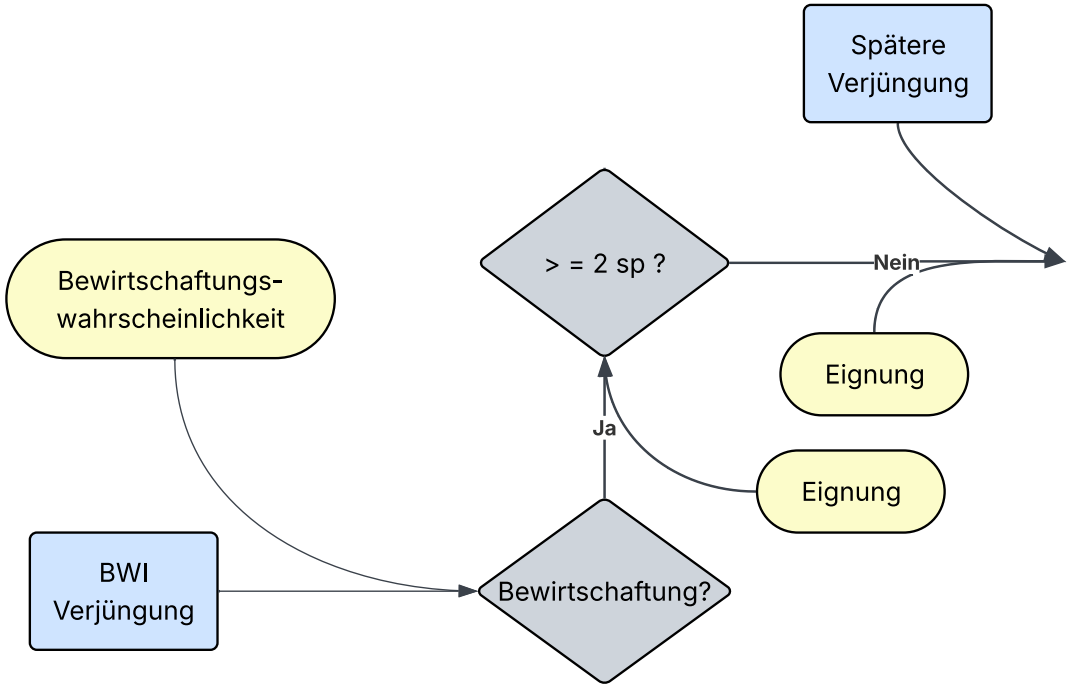
Eignung	Etablierungswahr-scheinlichkeit (%)
1. Geeignet	100
2. Geeignet bis möglich	90
3. Möglich	80
4. Möglich bis wenig geeignet	60
5. Wenig geeignet	40
6. Wenig geeignet bis ungeeignet	20
7. Ungeeignet	10

FVA 2025


Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
> = 2 sp ?
Ja
Eignung
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?


Endgültige Zusammensetzung
Ja
> = 2 sp ?
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?


Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
> = 2 sp ?
Ja
Eignung
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?

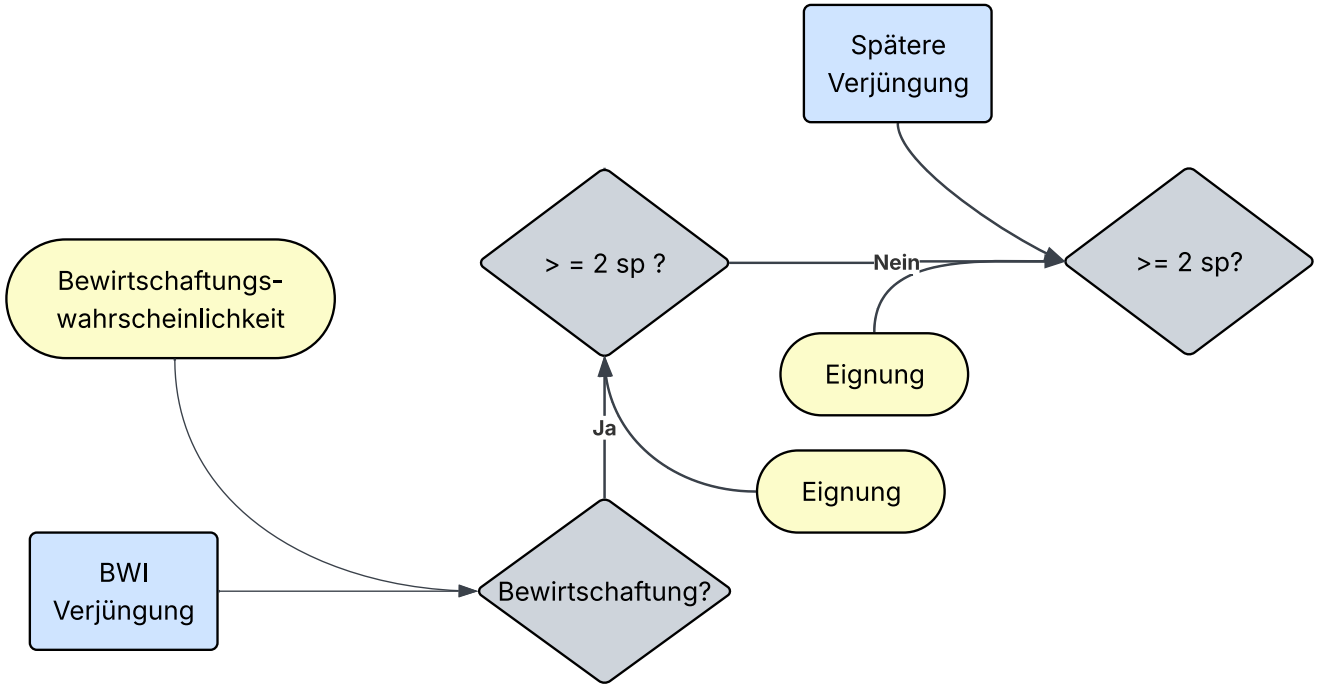

Spätere Verjüngung
> = 2 sp ?
Nein
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?

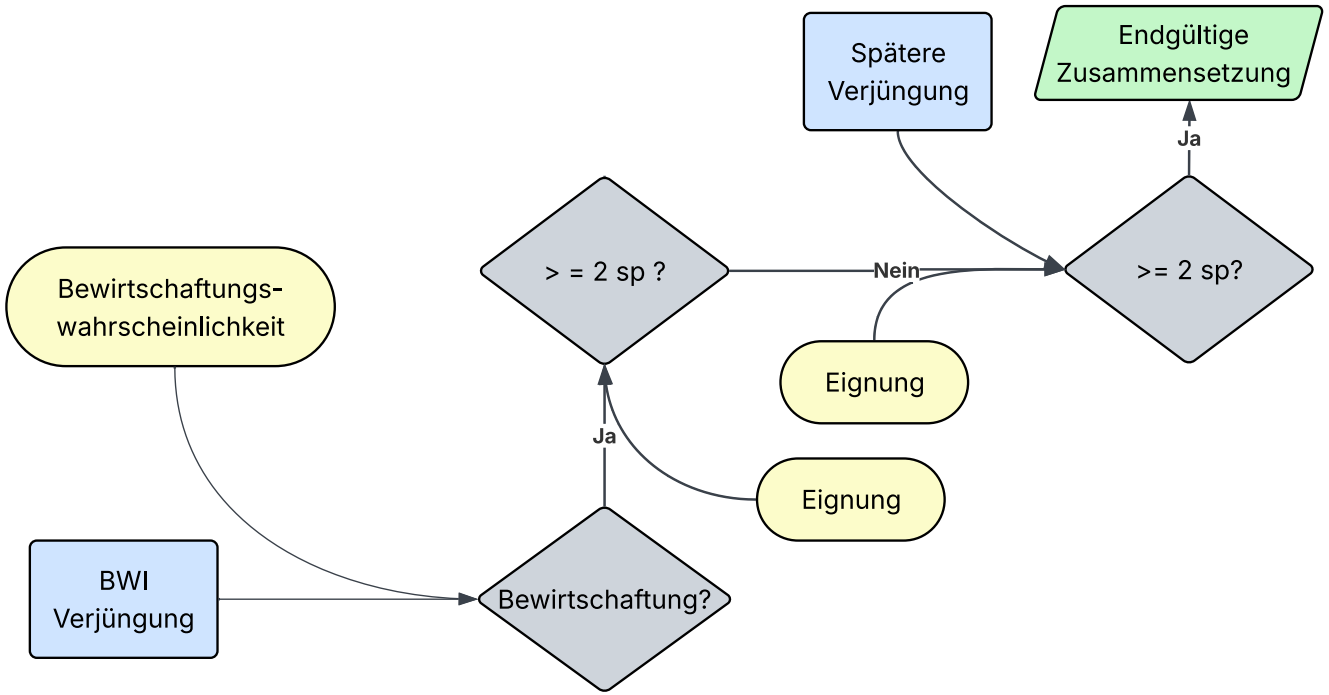
Naturverjüngungsmodelle

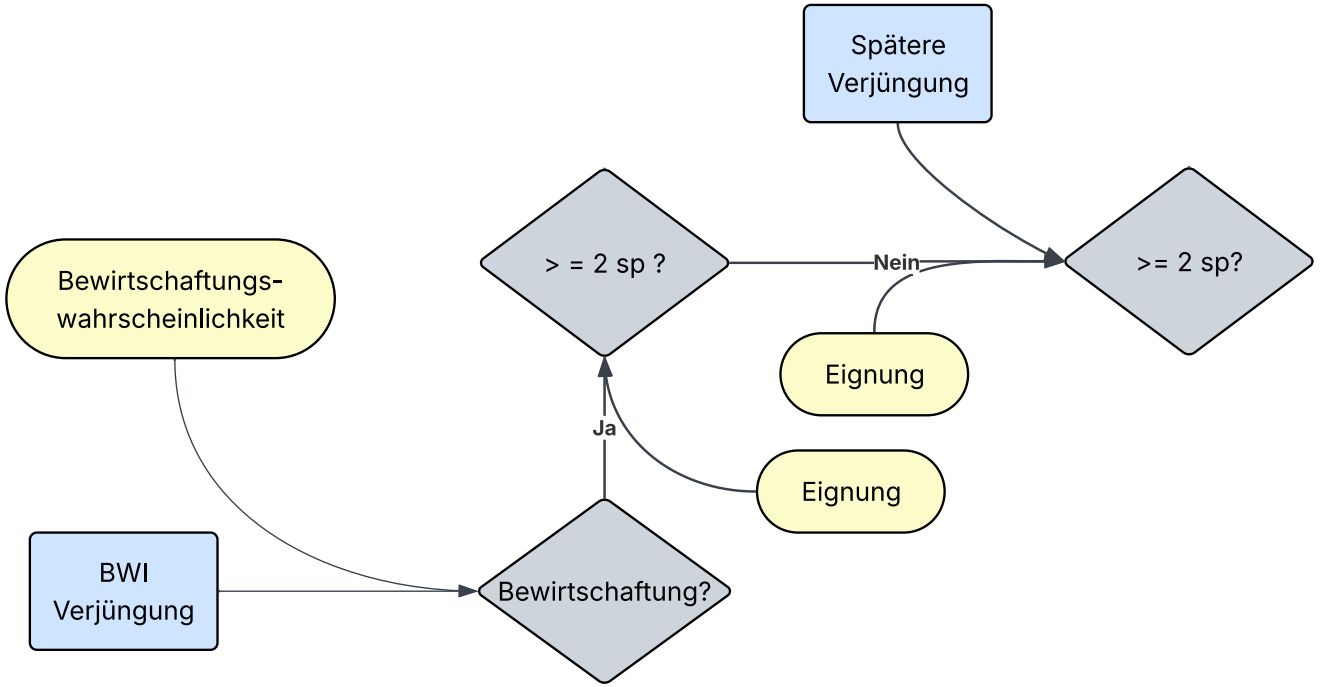
Ergänzung um zusätzliche Baumarten nach artenspezifischen Verjüngungsmodellen aus Kolo et al. (2017)

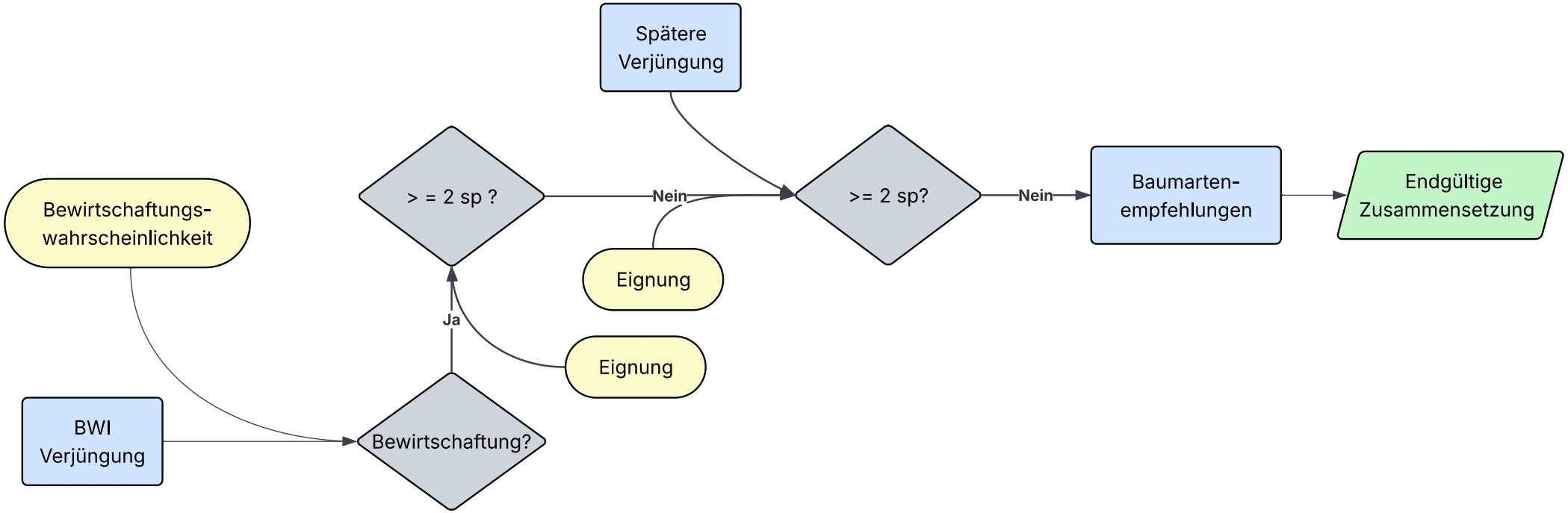
- Standortsbedingungen
- Bodeneigenschaften
- Klima (RCP 2.6, 4.5, 8.5)
- Bestandestruktur

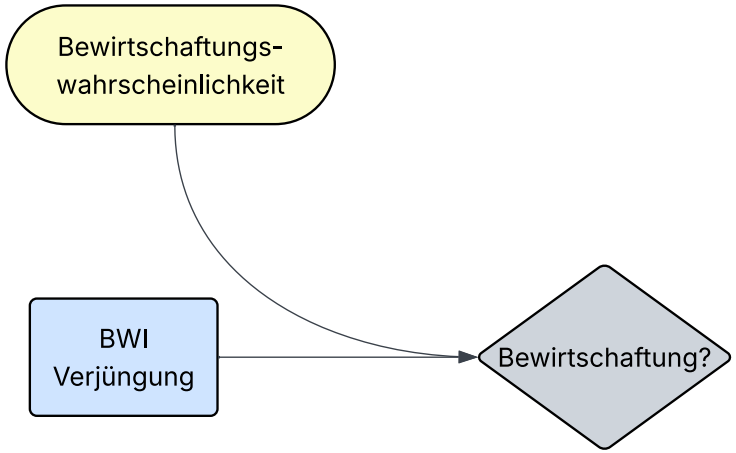
→ **Aufkommenswahrscheinlichkeit** einzelner Baumarten

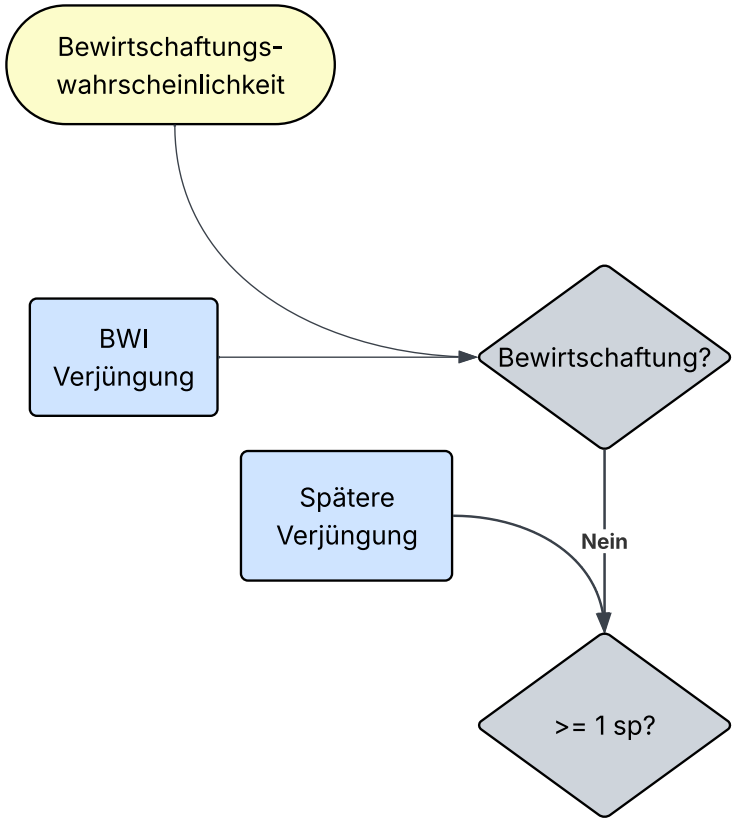

Spätere Verjüngung
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?

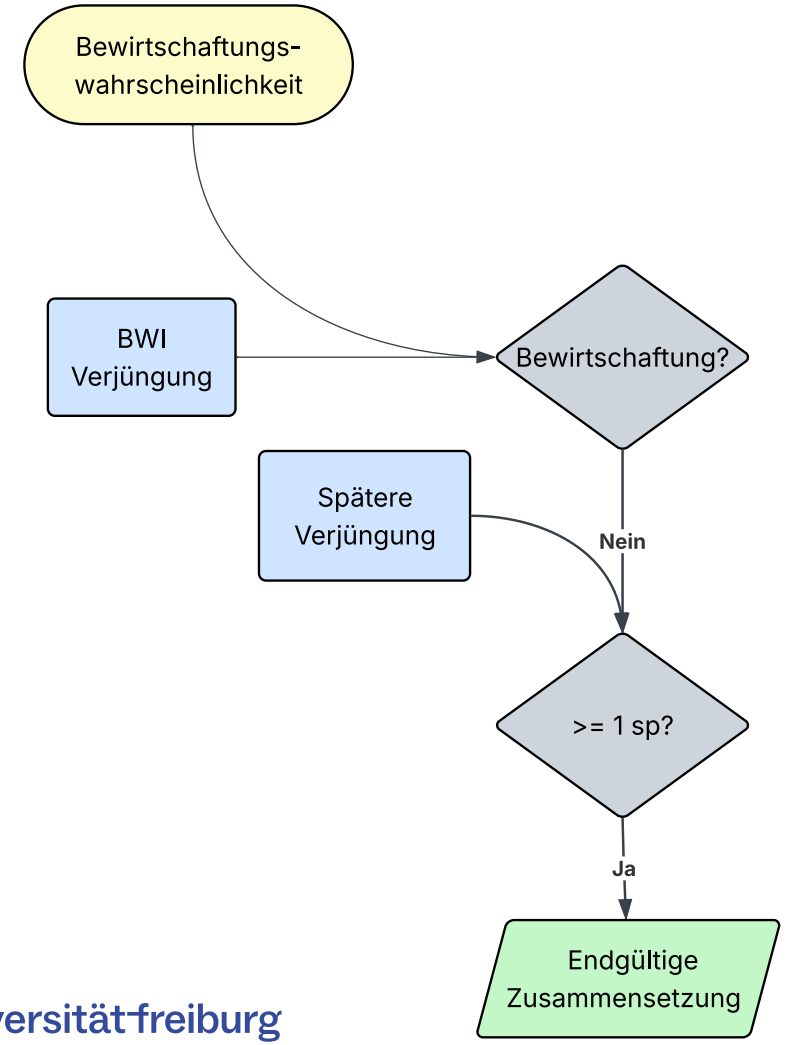

Spätere Verjüngung
Endgültige Zusammensetzung
Ja
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?

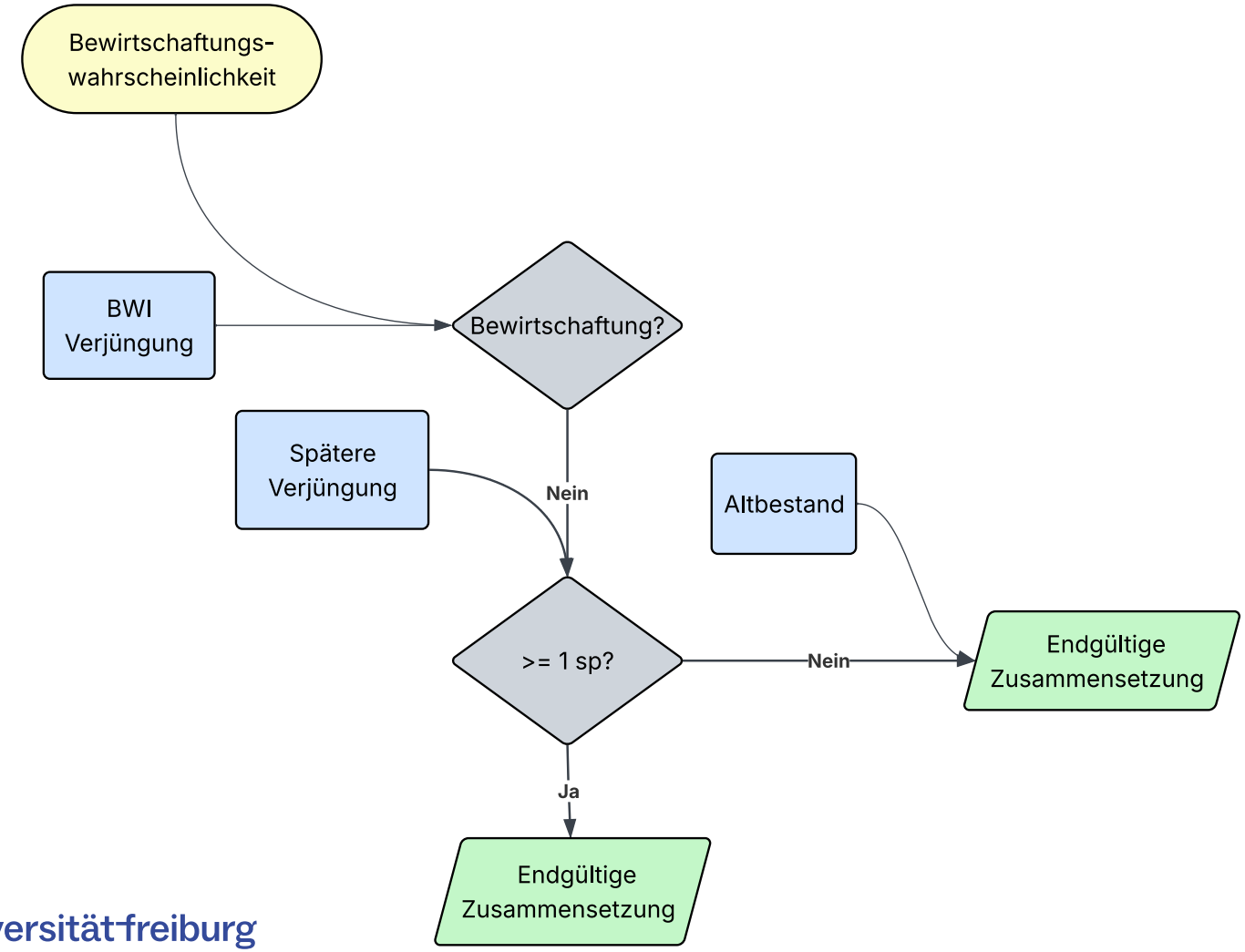

Spätere Verjüngung
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?


Spätere Verjüngung
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Nein
Baumarten-empfehlungen
Endgültige Zusammensetzung
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?


Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?


Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?
Spätere
Verjüngung
Nein
>= 1 sp?


Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?
Spätere
Verjüngung
Nein
>= 1 sp?
Ja
Endgültige
Zusammensetzung


Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?
Spätere
Verjüngung
Nein
Altbestand
>= 1 sp?
Nein
Endgültige
Zusammensetzung
Ja
Endgültige
Zusammensetzung

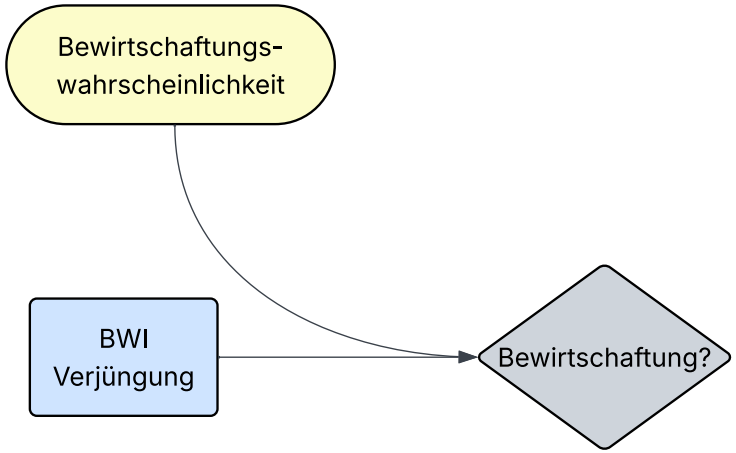
Beispiel

BWI
Verjüngung

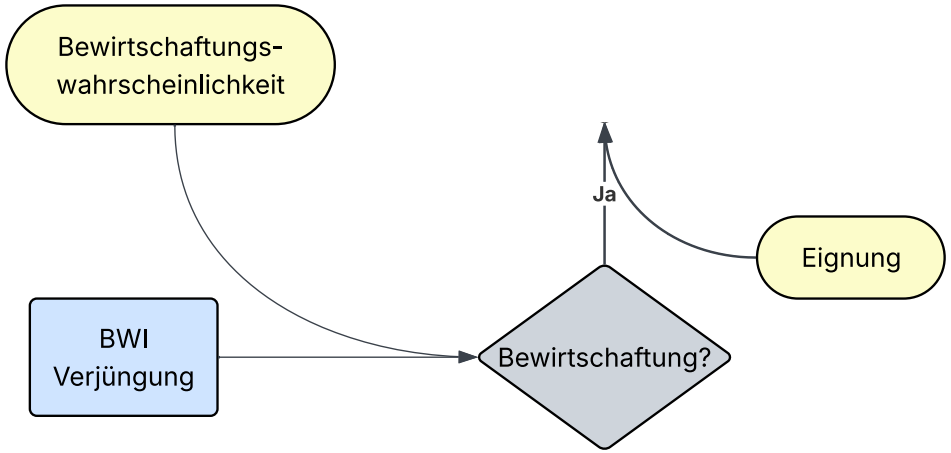




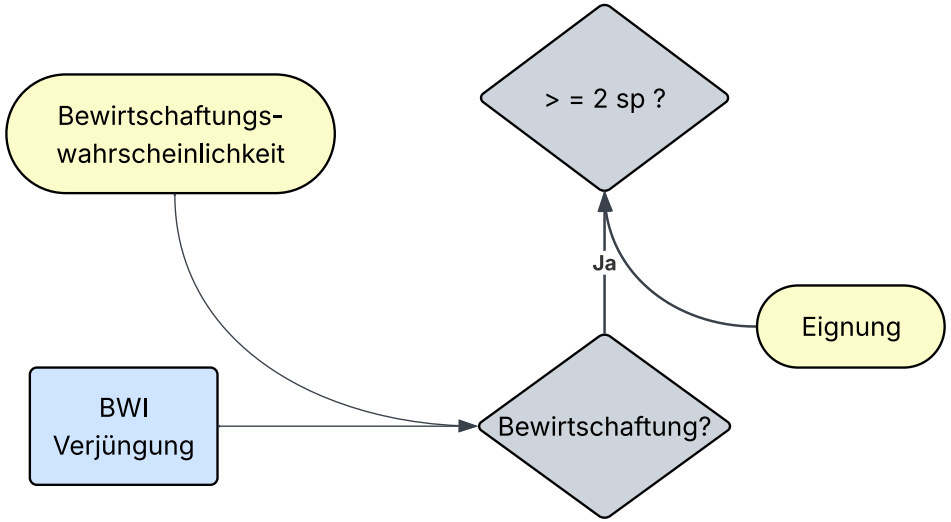
universität freiburg


Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?

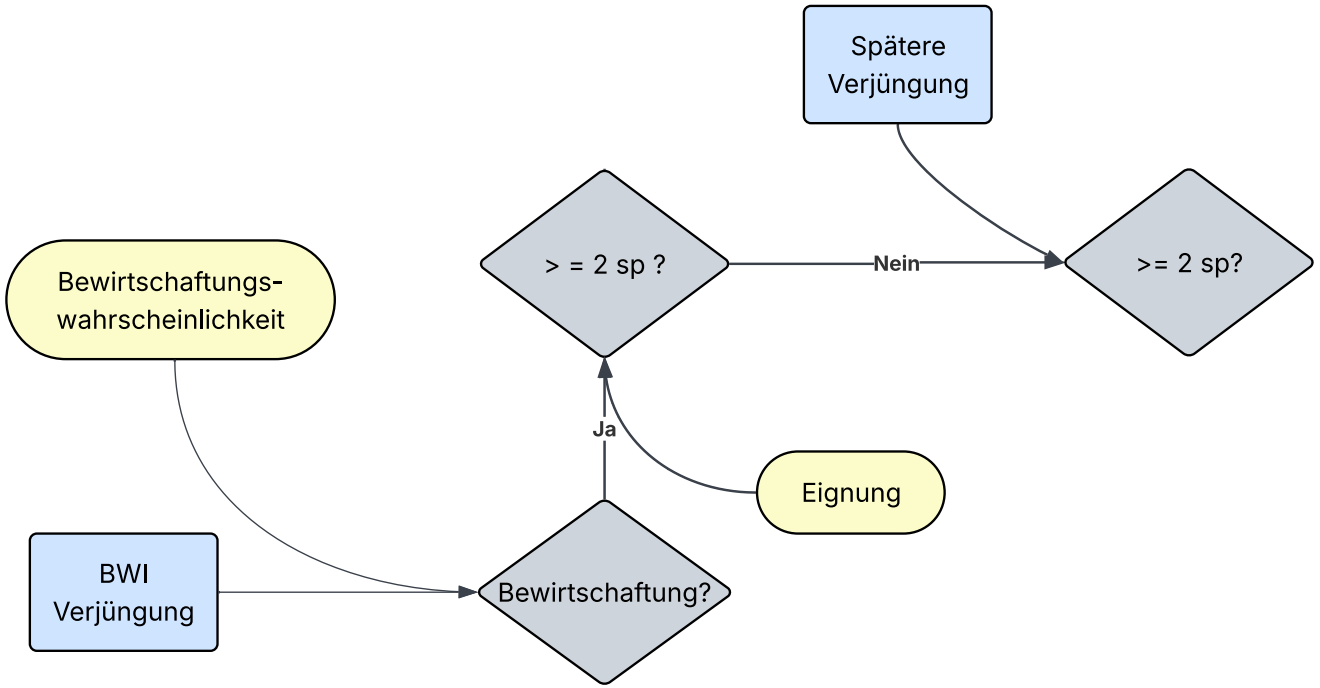



Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
Ja
Eignung
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?

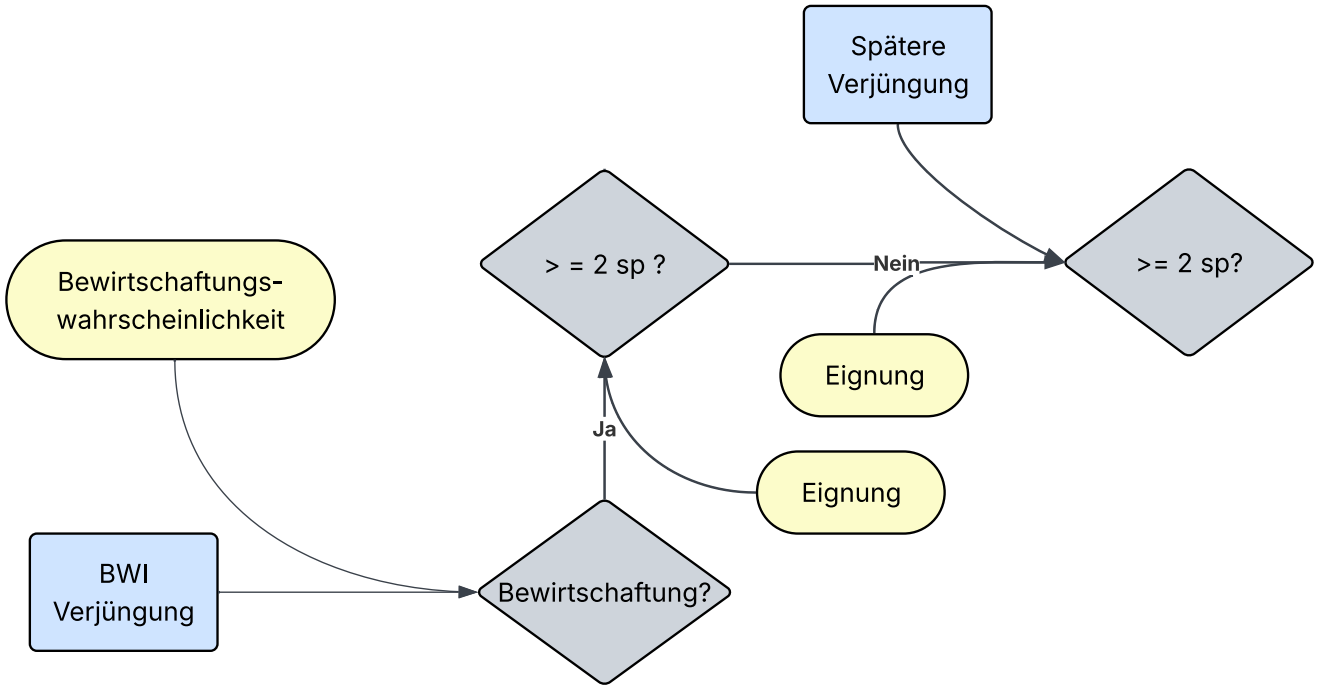


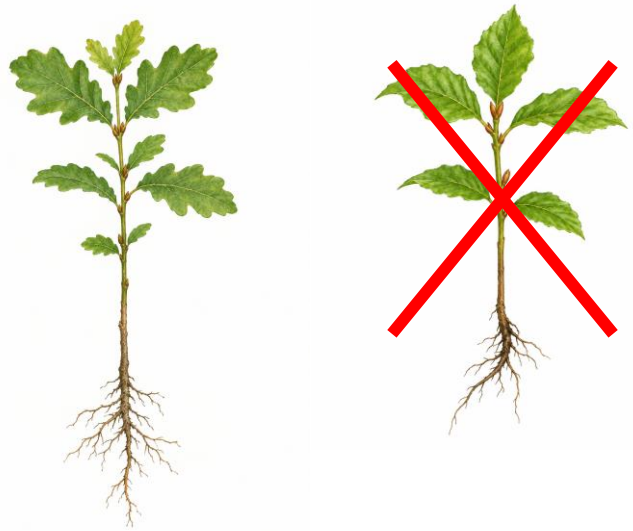

Bewirtschaftungs-
wahrscheinlichkeit
> = 2 sp ?
Ja
Eignung
BWI
Verjüngung
Bewirtschaftung?

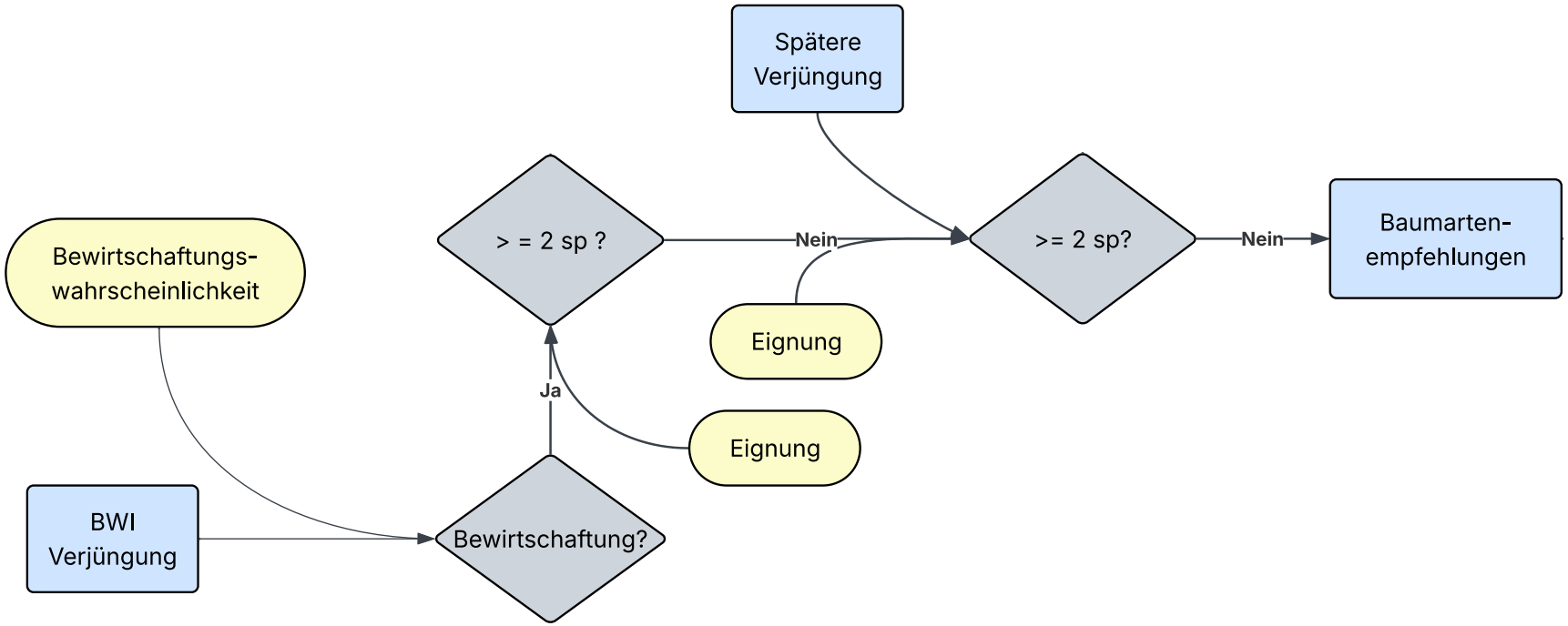



Spätere Verjüngung
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?

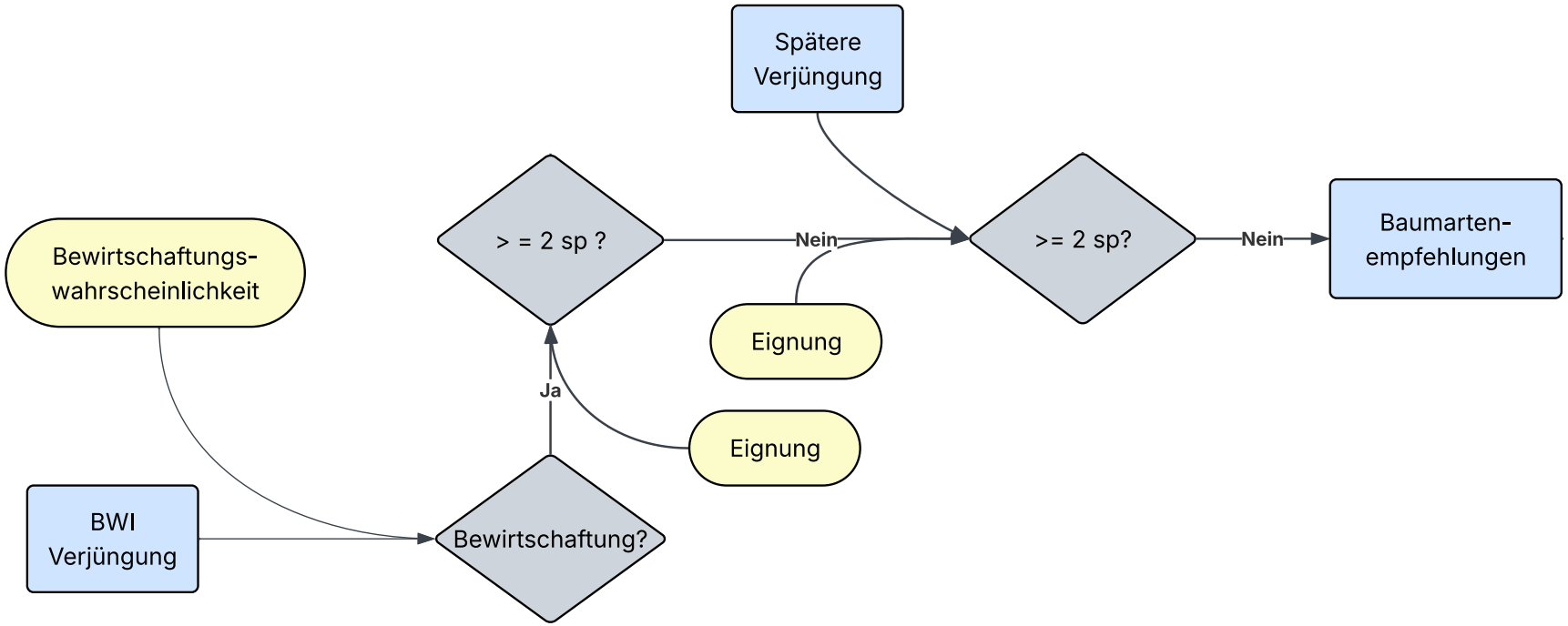



Spätere Verjüngung
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?



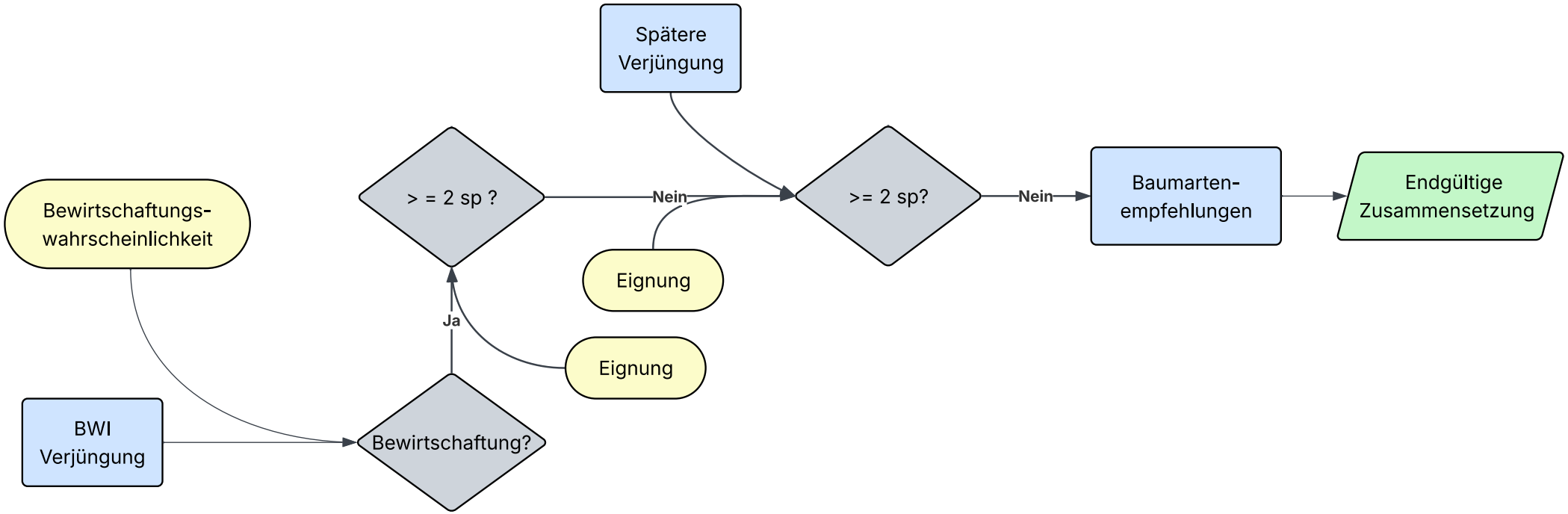

Spätere Verjüngung
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Nein
Baumarten-empfehlungen
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?




Spätere Verjüngung
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Nein
Baumarten-empfehlungen
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?






Spätere Verjüngung
> = 2 sp ?
Nein
>= 2 sp?
Nein
Baumarten-empfehlungen
Endgültige Zusammensetzung
Bewirtschaftungs-wahrscheinlichkeit
Eignung
Ja
Eignung
BWI Verjüngung
Bewirtschaftung?



Herausforderungen und Weiterentwicklungsbedarf

- Die **Bewirtschaftungswahrscheinlichkeiten** basieren derzeit auf Experteneinschätzungen und Literaturangaben und **könnten empirisch/mit zunehmender Evidenz weiter verfeinert werden**.

- **Verjüngung weiterhin an Ernteereignisse gekoppelt**

  → Potenzielle zeitliche Verzerrung der prognostizierten Bestandesentwicklung und -leistung

- **Validierung anhand empirischer Daten**

Gemeinsam weiterentwickeln

- Das Modul wird derzeit weiterentwickelt.
- **Feedback willkommen:** weitere Perspektiven, insbesondere aus der Praxis, sind sehr wertvoll.
- **Falls Sie interesse haben, sich daran zu beteiligen**:



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



Gemeinsam WEHAM weiterentwickeln
5 Minuten Umfrage – Ihre Perspektive zählt



generiert mit ChatGPT

Bitte helfen Sie uns mit Ihrem Feedback!

Plus: Möglichkeit für E-Mail Updates

!! Siehe auch Link zum Anklicken im Zoom-Chat !!

Roadmap Inside WEHAM-Veranstaltungen

Als nächstes: 27. Oktober 2026

Mortalität & Durchforstungen

24. November 2026:

Kohlenstoff & erste Ergebnisse für Baden-Württemberg

