

Entwurf

Grundlagenstudie

Waldwachstums-Tool - Wissenschaftlich basierte Modellierung der Speicherung von Kohlenstoff in “Wald-Wiederaufbau” Projekten des Wald-Klimastandard (WKS)

Hinweise

-

Entwicklung

Nachfolgende Inhalte wurden von Pina Technologies GmbH in enger Kollaboration mit dem Wald-Klimastandard erarbeitet. Fragen und Anregungen können an das Sekretariat des Wald-Klima-standards gerichtet werden: sekretariat@waldklimastandard.de

Autoren

F. Finke (Pina), F. Hildebrand (EVA), M. Vohrer (EVA)

Version

Versions-Nr.	Datum	Dokumentname	WKS-Version
0.3.00	01.10.2022	04-0103-REP-0.3.00	0.3 ff.

Änderungen der Versionen können durch das Document-Centre nachvollzogen werden.

Haftung & Copyright

Dieses Dokument kann Aussagen, Annahmen und Prognosen enthalten, die auf Informationen basieren, wie sie den Autoren zum Zeitpunkt der Erstellung des Dokumentes zur Verfügung stehen. Die Autoren und die EVA Service GmbH übernehmen keine Verpflichtung, diese Aussagen angesichts neuer Informationen oder künftiger Ereignisse zu aktualisieren. Zukunftsgerichtete Aussagen sind naturgemäß mit Risiken und Ungewissheiten verbunden.

Die Autoren und die EVA Service GmbH übernehmen trotz sorgfältiger Ausgestaltung des Dokumentes keine Gewähr für deren Vollständigkeit, Richtigkeit und Aktualität. Die in dem Dokument dargestellten Sachverhalte dienen ausschließlich der Illustration und lassen keine Aussagen über zukünftige Entwicklungen zu. Die Autoren und die EVA Service GmbH übernehmen keine Verantwortung für Maßnahmen und Entscheidungen, die auf der Grundlage der bereitgestellten Informationen ergriffen werden.

Eine Vervielfältigung, Verbreitung, Veröffentlichung oder Bearbeitung des Dokumentes, insbesondere in elektronischen oder anderen gedruckten Publikationen, auch auszugsweise, ist ohne vorherige schriftliche Zustimmung der EVA Service GmbH nicht gestattet.

Die EVA Service GmbH ist eine 100%ige Tochtergesellschaft der Ecosystem Value Association (EVA) e.V. - mit dem Vereinszweck der Förderung von Ökosystemleistungen zur Wiederherstellung und Erhalt natürlicher Ressourcen und zum Erhalt und Ausbau der Leistungsfähigkeit und Klimaresilienz von Ökosystemen.

Bildrechte

N/A



ecosystem institute
association

Entwurf

Waldwachstums Tool
Wissenschaftlich basierte
Modellierung der Speicherung
von Kohlenstoff in
“Wald-Wiederaufbau” Projekten
des Wald-Klimastandard (WKS)

Grundlagenstudie



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
1.1 Hintergrund	3
1.2 Ansatz & Konzeption	4
1.3 Anwendbarkeit	5
2 Schätzung des oberirdischen Biomassevolumens	6
2.1 Basisdaten	6
2.2 Wachstumsmodell	7
2.3 Wuchsgebiet-bezogene Bonitierung	11
3. Konversion in die THG-Bilanz der ober- und unterirdischen Biomasse	12
3.1 Ober- und unterirdische Biomasse	12
3.2 Kohlenstoffvorräte in der Biomasse und CO ₂ -Äquivalente	12
Literaturverzeichnis	15
Anhang	16



1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die ober- und unterirdische Biomasse sind zentrale Kohlenstoffpools zur Quantifizierung der THG-Bilanz von Wald-Klimaprojekten. Diese bilden die Grundlage dafür, dass Klimaprojekte mit Klimazertifikaten finanziert werden können.

Projekte unter dem Scope Wald-Wiederaufbau sehen sich im Vergleich zu vielen anderen Klimaprojekten mit zwei Herausforderungen konfrontiert: Neben eines hohen initialen Investitionsbedarfs für die Maßnahmen der Wieder-Aufforstungen besteht wachstumsbedingt eine zeitliche Entkopplung zwischen Investitions- und Ertragszeitpunkt, wenn Erlöse erst mit der erbrachten Senkenleistung erzielt werden können (Finanzierung über ex-post Zertifikate). Daher verfolgt der Wald-Klimastandard (WKS) den Ansatz, mit sogenannten validierten Zertifikaten eine ex-ante Finanzierung zu ermöglichen.

Validierte Zertifikate repräsentieren eine Senkenleistung, die noch erbracht wird. Für eine validierte Senkenleistung gilt es demnach, mit möglichst hoher Genauigkeit festzustellen, welche Senkenleistung am Standort während der Crediting Period überhaupt erbracht werden kann.

Für die Projektion des potenziellen Waldwachstums werden zumeist die Ergebnisse aus Erhebungen der Bundes-Waldinventur (BWI) oder aus Ertragstafeln als Informationsgrundlage hinzugezogen. In beiden Quellen sind Grundlagendaten für Jungbestände (0-30 Jahre) nur in grober Auflösung verfügbar, sodass deren direkte Verwendung für den Standard nicht zweckmäßig ist. Aufgrund dessen bedarf es eines Modells, welches das Waldwachstum und die THG-Bilanz entlang der Zeitachse der Crediting Period entsprechend den standörtlichen Gegebenheiten abbilden kann.

Die Pina Technologies GmbH wurde damit beauftragt, in Zusammenarbeit mit dem WKS ein Wald-Wachstumsmodell zu entwickeln, das es ermöglicht, Volumina und THG-Bilanz von Mischbeständen entlang der Zeitachse der Crediting Period abzuschätzen.



1.2 Ansatz & Konzeption

Die in Deutschland bisher angewandten Schätzverfahren für die Biomasse von Wäldern können im Allgemeinen in direkte und indirekte unterschieden werden (Riedel & Kändler 2017): Bei direkten Verfahren wird die oberirdische Biomasse (Trockenmasse) auf Basis direkt erhobener Einzelbaumparameter (Durchmesser und Höhe) und mit Hilfe allometrischer Biomassenfunktionen abgeschätzt. Demgegenüber stützen indirekte Verfahren auf aggregierte Holzvorratsdaten in Volumeneinheiten, welche anschließend auf das Gesamtvolumen der Biomasse expandiert und schließlich mit Raumdichtefaktoren in Biomasse umgerechnet werden.

Riedel & Kändler (2017) zu Folge bietet sich das direkte Verfahren vor allem dann an, wenn die Einzelbaumparameter im Rahmen eines Monitorings bzw. einer Waldinventur auf Stichprobenbasis ohnehin erfasst werden. Damit kann die Biomasse von Einzelbäumen entsprechend des Inventurdesigns analog wie bei der Volumenschätzung auf ein Gebiet, Region oder Land hochgerechnet werden. Ohne den Umweg über die Volumenschätzung können direkte Verfahren gegenüber indirekten zu einer systematisch tieferen Biomassenschätzung führen, während diesen mitunter eine höhere Genauigkeit attestiert wird (Pettersson et al. 2012). Ein solches vom IPCC anerkanntes Verfahren kommt beispielsweise bei der Kohlenstoff-Inventur des Thünen-Instituts für die CO₂-Berichterstattung Deutschlands zur Anwendung (Riedel & Kändler 2017).

Im Unterschied zu Zustandserhebungen, wie sie im Prinzip Waldinventuren darstellen, müssen bei Projektionen zwangsläufig aggregierte Daten verwendet werden, zumal Projektionen keine realen, sondern aus Annahmen und Erfahrungswerten erwartbare Zustände darstellen.

Folglich müssten für eine altersabhängige Projektion der oberirdischen Biomasse auch bei Verwendung eines direkten Verfahrens aggregierte Referenzdaten zur Stammzahl-, Durchmesser- und Baumhöhenentwicklung herangezogen werden, für die jeweils altersabhängige Modelle hergeleitet werden müssten und ihrerseits eigene Unschärfen mit sich bringen. Dadurch ist eine höhere Genauigkeit oder Konservativität gegenüber dem indirekten Verfahren nicht zwingend gegeben.

Ein indirektes Verfahren bedarf zur altersabhängigen Projektion der oberirdischen Biomasse eines einzigen Modells basierend auf Holzvorratsdaten. Häufig gelten Holzvorratsdaten als robusteste Schätzer in Waldinventuren (Pettersson et al. 2012). Wenngleich die Faktoren zur Expansion auf die gesamte oberirdische Biomasse wie Biomassen-Expansionsfaktoren (BEF) und Dichte (WD) auch Quellen von Verzerrungen sein können, dürften diese mit Alters-, Region- und weitgehend baumartenspezifischen Umrechnungsfaktoren beherrschbar sein (Pettersson et al. 2012). Für Deutschland bestehen solche spezifischen

Faktoren bereits (vgl. Wirth et al. 2004). Aus diesen Gründen und Gründen der Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Konformität mit den IPCC (2019) Leitlinien baut die Schätzung der Treibhausgasbilanz im Scope Wald-Wiederaufbau des WKS auf den indirekten Ansatz. Nachfolgend wird in Kapitel 2 auf die Schätzung des oberirdischen Biomassevolumens eingegangen, während in Kapitel 3 die Umrechnung in die Gesamtbiomasse (RTSR; BEF; WD), Kohlenstoffgehalt (CF) und CO₂-Äquivalente (CO₂F) behandelt werden (Abbildung 1).

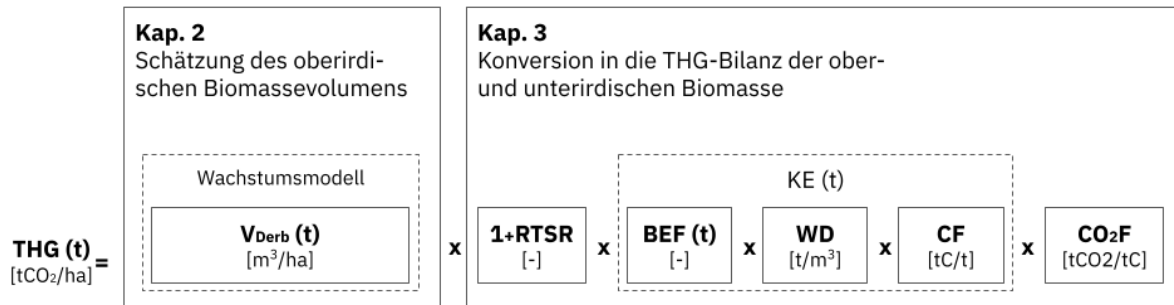


Abbildung 1: Schematische Darstellung des indirekten Verfahrens zur Abschätzung der Treibhausgasbilanz (THG) der ober- und unterirdischen Biomasse, wie sie beim WKS im Scope Wald-Wiederaufbau zur Anwendung kommt (nach IPCC 2019). V_{derb} = oberirdisches Biomassevolumen; RTSR = Wurzel-Spross-Verhältnis; BEF = Biomassen-Expansionsfaktor (in Abhängigkeit des Alters t); KE = Konversions-Expansionsfaktor (in Abhängigkeit des Alters t); WD = Raumdichte der Holt-Trockenmasse; CF = Kohlenstoffkonzentration; CO₂F = Konversion Kohlenstoff zu CO₂-Äquivalente.

1.3 Anwendbarkeit

Die Aussagekraft des Wald-Wachstumsmodells und THG-Bilanz des Projektes beschränkt sich auf den Scope Wald-Wiederaufbau und auf eine die Crediting Period zwischen 20 bis 30 Jahren. Es ist ausschliesslich unter den Voraussetzungen der im Wald-Klimastandard beschriebenen Projektaktivitäten anwendbar, welche im Rahmen einer ordnungsgemäßen Forstwirtschaft folgende potenzielle Risiken adressiert:

- Wildschäden → Wildschadensverhütung
- Konkurrenzvegetation → Pflegeeingriffe
- Baumarten → Waldbau
- Kalamitäten → Diversität
- Waldbrand → Schutzmaßnahmen
- Trockenstress → Baumartenwahl
- Projektmanagement → Professionalisierung



Nähere Erläuterungen und Begriffsdefinitionen finden sich in den Anforderungen und im Glossar des WKS.

2 Schätzung des oberirdischen Biomassevolumens

2.1 Basisdaten

Für die Herleitung des erwartbaren oberirdischen Biomassevolumens kann in Deutschland auf Ertragstabeln oder Wald-Inventurdaten zurückgegriffen werden. Dabei sind Ertragstabeln regionalisierte, auf bestimmte Baumartengruppen beschränkte Wachstums-Modelle, die auf empirischen Daten aus Versuchsflächen beruhen und einem definierten waldbaulichen Regime unterliegen (Albert et al. 2021).

Generell ist anzumerken, dass die dünne Datengrundlage für Jungbestände, insbesondere für Bestände der Altersklasse 1 bis 20 Jahre, eine Herausforderung für die Modellierung darstellt. Dies ist im Wesentlichen auf die Inventur- bzw. Versuchsdesigns zurückzuführen, die sich auf Derbholz-Volumina mit Mindest-Durchmesser > 7cm (mit Rinde) beschränken. In Folge dessen werden Bäume der entsprechenden Altersspanne ausgeschlossen und die Volumenentwicklung entlang der Zeitachse nicht ohne weiteren Annahmen möglich.

Während für Inventurdaten der Bundes-Waldinventur (BWI; Riedel et al. 2017) Altersklassenbreiten von 20 Jahren als altersabhängige Referenzwerte zu Grunde gelegt werden und damit mindestens zwei Drittel einer Crediting Periode abdecken, haben die verfügbaren Ertragstabeln einen explizit regionalen Bezug, sodass deren Anwendungsbereich entsprechend eingeschränkt ist.

Für ein deutschlandweit vereinheitlichtes und nutzbares Modell wird daher der Altersklassen-spezifische Derbholz-Vorrat (mit Rinde) aus der dritten Bundeswaldinventur (BWI3) als Grundlage genutzt. Die genutzten Vorratsdaten beziehen sich auf die ideellen Reinbestände der folgenden von der BWI angegebenen Baumartengruppen (vgl. Riedel et al. 2017):

- Buche
- Eiche: alle Eichenarten (einschließlich Rot-Eiche)
- Andere Laubbäume mit hoher Lebensdauer (aLh): Ahornarten, Ahornblättrige Platane, Edelkastanie, Esche, Hainbuche, Lindenarten, Nussbaumarten, Robinie, Rosskastanie, Speierling, Stechpalme, Ulme, Weißesche



- Andere Laubbäume mit niedriger Lebensdauer (aLn): Birkenarten, Elsbeere, Erlenarten, Pappelarten, Traubenkirsche-Arten, Vogelkirsche, Wildobst, alle weiteren Laubbaumarten, soweit sie nicht gesondert genannt sind
- Fichte: alle Fichtenarten und sonstige Nadelbäume außer Douglasie, Kiefer, Lärche, Tanne
- Tanne: Weißtanne, Küstentanne und sonstige Tannen
- Douglasie
- Kiefer: alle Kiefernarten
- Lärche: alle Lärchenarten

Die BWI-Mittelwerte widerspiegeln implizit auch die “durchschnittlichen” Walbau-Regimes (bspw. Jungebestandspflege und Durchforstungen) der jeweiligen Baumartengruppen in Deutschland.

2.2 Wachstumsmodell

BWI-Mittelwerte für die Altersklassen 1-20 (AKL I) und 21-40 (AKL II) Jahre lassen die Volumenentwicklung der oberirdischen Biomasse während der Projektlaufzeit nicht als Kontinuum darstellen und sorgen an den Klassenrändern für sprunghafte Anstiege. Um diese als Funktion des Alters projizieren zu können und die “Sprünge” an den Klassengrenzen aufzufangen, werden daher konservative Annahmen getroffen.

Insgesamt wird der oberirdischen Volumenentwicklung der Biomasse während einer Baumgeneration eine sigmoide Wachstumskurve unterstellt. Charakteristisch für sigmoide Wachstumskurven ist das zunächst das nahezu lineare Wachstum, bevor es nach einer Exponentiellen und anschließend linearen Phase wieder im Sinne einer Sättigung asymptotisch abflacht. Angedeutet ist dieser Wachstumsverlauf zum Beispiel auch in den zeitlich höher aufgelösten Ertragstabeln (Albert et al. 2021). In diesen geht hervor, dass die Derbholzvolumina insbesondere innerhalb der AKL II nahezu linear zunehmen. Allerdings lässt sich auch die Linearität der Ertragstabeln in die AKL I in das Bestandesalter unter 20 Jahre fortschreiben, da bald negative Volumina erreicht würden. Deswegen und weil die BWI-Mittelwerte der AKL I gegenüber Mittelwerten anderer Altersklassen überproportional tiefer liegen, wird für den Übergang der AKL I und II eine Zunahme der Wachstumsraten angenommen. Zunehmende Wachstumsraten bedeuten konsequenterweise eine exponentielle Zunahme der Volumina. Daraus ergibt sich ein dreistufiges Wachstumsmodell, bei dem die Volumina zunächst linear, beim Übergang der Klassen



vorübergehend exponentiell und schließlich auf höherem Niveau wieder linear fortgeschrieben werden (Tabelle 1).

Bei einer durch Ertragstafeln nahe gelegten linearen Volumenentwicklung innerhalb der Altersklasse II kann davon ausgegangen werden, dass die angegebenen BWI-Mittelwerte in der Hälfte der Klassenbreite erreicht werden. Folglich werden die BWI-Mittelwerte der AKL II dem Jahr 30 zugeordnet. Analog dazu wurde dieselbe Annahme mangels hinreichender Anhaltspunkte für die AKL I getroffen (Zuweisung des Klassen-Mittelwerts zum Jahr 10). Mit Hilfe der zwei rekonstruierten Referenzwerte wurde eine einfache Exponentialfunktion für die Jahre 10-30 regressiert (Abbildung 3).

Tabelle 1: Abstufung des Wachstumsmodells bezogen auf eine Baumartengruppe. \hat{V}_{Derb} = mittleres Derbholzvolumen; $ALK I$ = Altersklasse 1 (0-20 Jahre); $ALK II$ = Altersklasse 2 (20-40 Jahre); $V_{t=x}$ = Derbholzvolumen zum Zeitpunkt x (Jahre).

Abschnitt Alter t_{Jahre}	Zunahme Derbholz-Vorrat	Umsetzung	Referenzwerte
t_{1-11}	Linear	Lineare Funktion $V_{Derb}(t) = \frac{\hat{V}_{Derb, ALK I}}{10} \cdot t$	$\hat{V}_{Derb, ALK I} = V_{Derb, t=10}$
t_{12-31}	Exponentiell	Nicht-lineare Regression Exponentialfunktion der Grundform $V_{Derb}(t) = b \cdot m^x$	$\hat{V}_{Derb, ALK I} = V_{Derb, t=10}$ $\hat{V}_{Derb, ALK II} = V_{Derb, t=30}$
t_{32-41}	Linear	$V_{Derb}(t) = V_{Derb, t-1} + (V_{Derb, t=30} - V_{Derb, t=29})$	

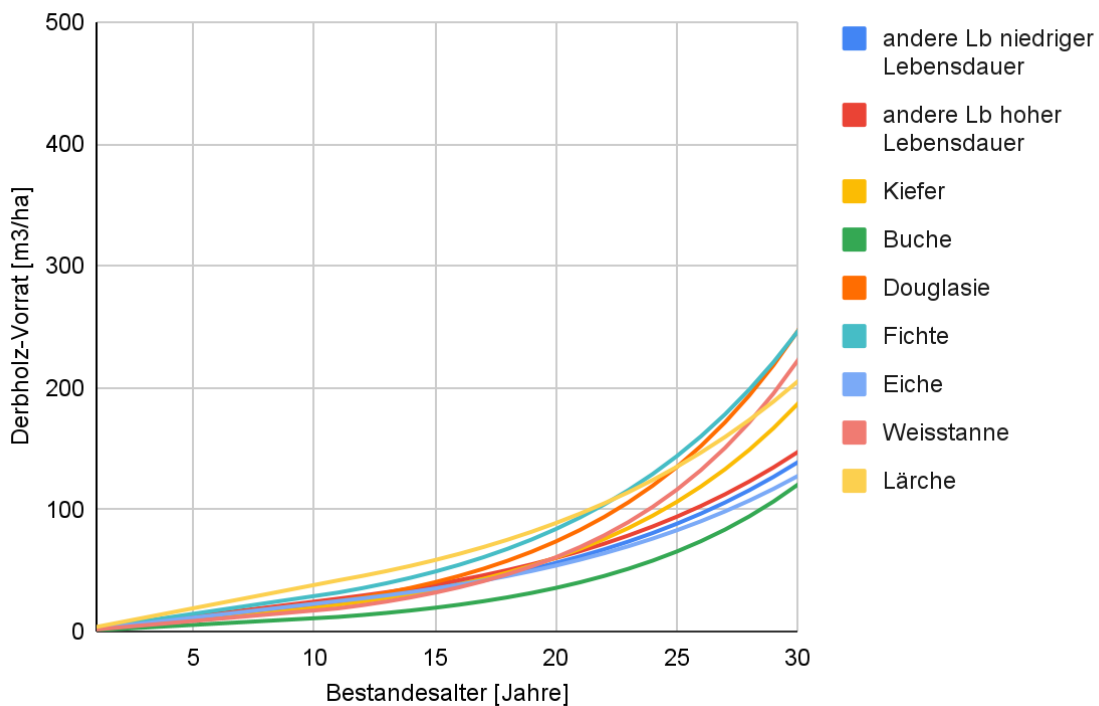


Abbildung 2: Entwicklung des Derbholz-Vorrates als Funktion des Bestandesalters nach dem dreistufigen Wachstum-Modell.

Um sicherzustellen, dass das Modell konservativ genug ist, wurde die Abweichung der Mittelwerte der AKL I und II des Modells von denjenigen der BWI eruiert (Tabelle 2). In der für den Wald-Klimastandard bedeutendsten Klasse 20-40 Jahre liegen die Mittelwerte des Modells mit Ausnahme der Weisstanne 0-0.9 % unter derjenigen der BWI. Bezüglich dieser Gruppen darf davon ausgegangen werden, dass der Modell-Ansatz in der AKL II zu keiner systematischen Überschätzung führt.

Tabelle 2: Die vom BWI2 (Thünen-Institut 2012) angegebenen und vom Modell errechneten Mittelwerte für Derbholz-Vorräte nach Altersklassen und Baumartengruppen

	Mittelwert	andere Lb niedriger Lebensdauer	andere Lb hoher Lebensdauer	Kiefer	Buche	Douglasie	Fichte	Eiche	Weisstanne	Lärche
AKL I	Modell	25.6	27.6	24.7	14.0	29.1	35.2	25.2	23.0	42.0
	BWI	25	27	22	12	25	32	25	19	42
	Abweichung	2.6%	2.2%	12.4%	16.7%	16.2%	10.0%	0.8%	20.8%	-0.1%
AKL II	Modell	150.8	159.7	208.5	136.0	278.0	272.9	137.8	253.7	221.0
	BWI	152	161	209	136	278	274	139	253	223
	Abweichung	-0.8%	-0.8%	-0.2%	0.0%	0.0%	-0.4%	-0.9%	0.3%	-0.9%



2.3 Wuchsgebiet-bezogene Bonitierung

Wuchsbedingungen können standörtlich stark variieren, sodass deutschlandweite Mittelwerte auf Projektebene grundsätzlich nicht akkurat genug sind. Regionale Ertragstafeln werden in der Regel nach Ertragsklassen differenziert, um die Wuchsbedingungen / Standortgüte für die erwartbaren Derbholzvolumina mitzubersichtigen. Im Gegensatz dazu ist bei der BWI für die ideellen Reinbestände der funktionalen Baumartengruppen der AKL I und II keine standörtliche, regionale oder meereshöhenbezogene Differenzierung der zu erwartenden Derbholzvolumina abrufbar, die eine entsprechende Berücksichtigung der Standortgüte zuließe.

Um dennoch zumindest die regionalen Wuchsbedingungen anzunähern, werden für die funktionalen Baumartengruppen jeweils die die mittleren Bestandeshöhen im Alter 100 (Loreyhöhe H_{100} ; vgl. Riedel et al. 2021) der Wuchsgebiete (vgl. Gauer & Kroihner 2012) aus der BWI miteinbezogen. Die Bestandeshöhe gilt im Allgemeinen als ein gutes Mass für die Gesamtproduktivität und damit der Güte eines Standortes (Eichhorn'sches Gesetz; Eichhorn 1904). Noch zuverlässiger als die mittlere Bestandeshöhe ist die Höhe der stärksten Individuen (Weise'sche Oberhöhe). Allerdings wird diese vom BWI nicht ausgewiesen. Für die funktionalen Baumartengruppen werden die mittleren Derbholzvolumina mit dem Verhältnis der Loreyhöhe zum bundesweiten Durchschnitt als Bonitätsfaktor (BF) Wuchsgebiet-spezifisch gewichtet. Eine weitere Differenzierung z.B. nach Höhenlage ist damit noch nicht berücksichtigt.

$$BF_{BG, Wuchsgebiet} = \frac{H_{100, Wuchsgebiet}}{\widehat{H_{100, Deutschland}}}$$

wobei

$$BF_{BG, Wuchsgebiet} = \text{Bonitätsfaktor der Baumartengruppe nach Wuchsgebiet [-]}$$

$$H_{100, Wuchsgebiet} = \text{Loreyhöhe der Baumartengruppe (Alter 100) im Wuchsgebiet [m]}$$

$$\widehat{H_{100, Deutschland}} = \text{Loreyhöhe der Baumartengruppe (Alter 100) in Deutschland [m]}$$

Die auf diese Weise hergeleiteten Bonitätsfaktoren sind in der Tabelle 4 im Anhang aufgeführt.



3. Konversion in die THG-Bilanz der ober- und unterirdischen Biomasse

3.1 Ober- und unterirdische Biomasse

Da sich das erhobene oberirdische Volumen üblicherweise auf das Schaft- oder auf das Derbholz beschränkt, muss es mit sogenannten Biomassen-Expansionsfaktoren (BEF) entsprechend der Kronenbeschaffenheit auf das gesamte oberirdische Volumen erweitert werden ($BEF = \text{Gesamt-Volumen des Baumes} / \text{Masse des erhobenen Volumens}$). International ist häufig nicht klar, ob und inwieweit sich die verwendeten Faktoren auf das Schaft oder Derbholz beziehen und/oder auch die Raumdichte des Holzes schon mit enthalten ist. In Deutschland wurde in der Studie von Wirth et al. (2004) für die funktionalen Baumartengruppen bereits ein entsprechendes Set an Kennzahlen mit explizitem Bezug zum Derbholzvolumen erarbeitet. Mit den spezifischen Raumdichten der Holzarten (engl. Wood Density; WD) kann schließlich auf die gesamte Dendromasse geschlossen werden (Holz-Trockenmasse).

Klassischerweise wird die oberirdische Biomasse mit spezifischen Wurzel-Sprossverhältnissen (engl. Root-to-Shoot-Ratio; RTSR) um die unterirdische Biomasse erweitert. RTSR hängen nicht nur von Baumart, Alter und Wuchsbedingungen ab, sondern auch von ihrer sozialen Stellung im Verband mit anderen Baumarten. RTSR werden nicht immer nach denselben Methoden hergeleitet (z.B. Grob- / Feinwurzeln), zumal die Erhebung kostspielig ist (Feldversuche) und teilweise eine erhebliche Streuung aufweisen kann. Damit dürfte die RTSR in erheblichem Masse zur Unschärfe der THG-Bilanz beitragen. Vor diesem Hintergrund und im Sinne der Glaubwürdigkeit und Konservativität verzichtet der WKS bis auf Weiteres darauf, sich in Fragen der RTSR zu exponieren und verwendet daher statische, d.h. keine altersabhängige, RTSR des IPCC (2019) für ausgewachsene Bäume. Damit werden Bäume jüngeren Alters unterschätzt.

Hinweis: Eine Zusammenstellung der sämtlicher aktuell verwendeten Faktoren und Kennwerte sowie ihrer Quellen ist in der Konversionstabelle des WKS zu entnehmen (Indikator 4.10.3).

3.2 Kohlenstoffvorräte in der Biomasse und CO₂-Äquivalente

Statt mit Biomassen-Expansionsfaktoren (BEF) zu arbeiten, stützt sich das Waldwachstums-Tool des WKS auf die Konversions-Expansionsfaktoren (KE) von Wirth et al. (2004), mit denen Derbholzvolumina direkt in den Kohlenstoffgehalt konvertiert werden. Diese wurden in ihrer Studie direkt hergeleitet bzw. überarbeitet und stellen implizit ein Aggregat aus Biomassen-Expansionsfaktor (BEF), spezifischer Holzdichte (WD) und Kohlenstoff-Konzentration (CF) dar:



$$KE = BEF \cdot WD \cdot CF$$

wobei

KE = Konversions Expansionsfaktor [tC/m^3]; nach Wirth et. al (2004)

BEF = Biomassen Expansionsfaktor [-]; in Wirth et al. (2004)

WD = Spezifische Raumdichte der Holztrockenmasse [t/m^3]; nach Wirth et al. (2004)

CF = Kohlenstoffkonzentration [t / t Holz Trockenmasse]

In Anlehnung an Wirth et al. (2004) wird für die Trocken-Biomasse eine Kohlenstoff-Konzentration von 0.5 t C / t Trockengewicht angenommen.

Die KE verändern sich im Laufe der Bestandesentwicklung aufgrund der sich ändernden Kompartimentierung der Einzelbäume erheblich. Wirth et al. (2004) geben nach BWI-Altersklassen differenzierte Mittelwerte an. Um Sprünge an den Klassenrändern aufzufangen, werden die KE-Werte für das Tool als Funktion des Alters mit einer Exponentialfunktion regressiert bzw. interpoliert, sodass die Mittelwerte der Altersklassen mit den Literaturangaben übereinstimmen (Abbildung 3 & Tabelle 5 u.a. mit Angaben zu den Altersklassen-Mittelwerten im Anhang).

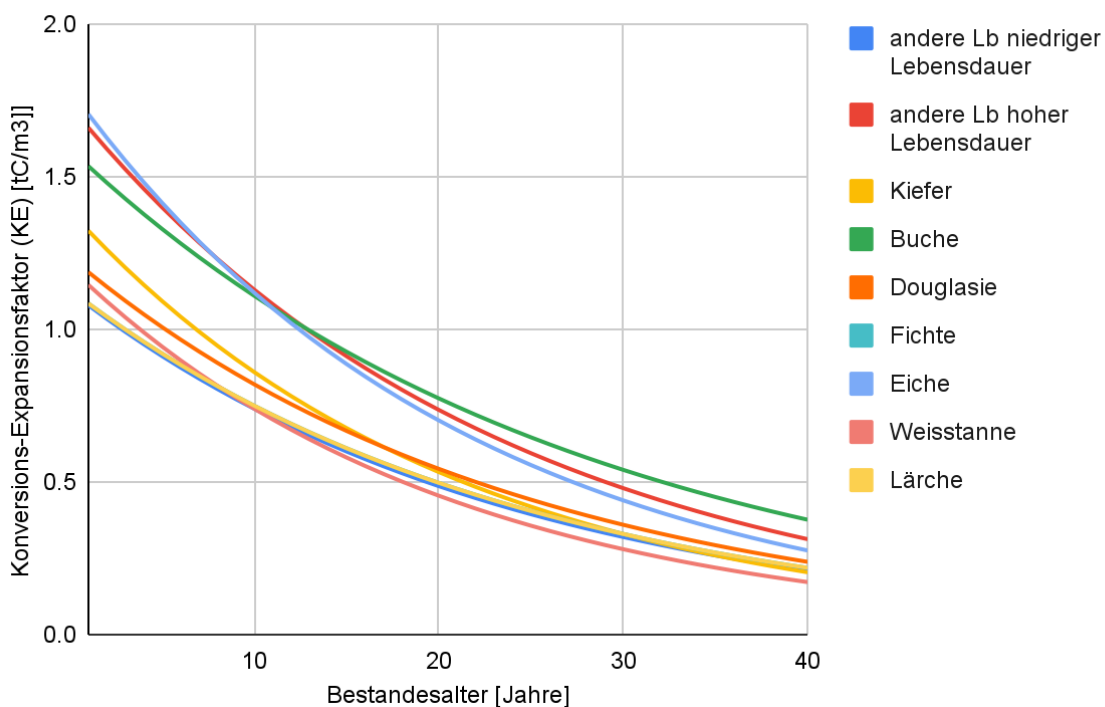


Abbildung 3: KE-Werte zur Umrechnung des Derbholz-Volumens in den Kohlenstoffgehalt von Wirth et al. (2004) als Funktion des Bestandesalters für die jeweiligen Baumartengruppen (Detaillierte Tabelle im Anhang).

Aus der Kohlenstoffkonzentration werden mit dem Verhältnis der molaren Masse von CO₂ (44 g/ mol) zum C (12g/mol) als konservativen Faktor von 3.66 die CO₂-Äquivalente berechnet.

Hinweis: Eine Zusammenstellung der sämtlicher aktuell verwendeten Faktoren und Kennwerte sowie ihren Quellen ist in der Konversionstabelle des WKS zu entnehmen (Indikator 4.10.3).

Zusammenfassend lässt sich der methodische Rahmen des hier vorgestellten WKS-Ansatzes zur Schätzung der THG-Bilanz der Dendromasse wie in Abbildung 4 dargestellt schematisch abbilden.

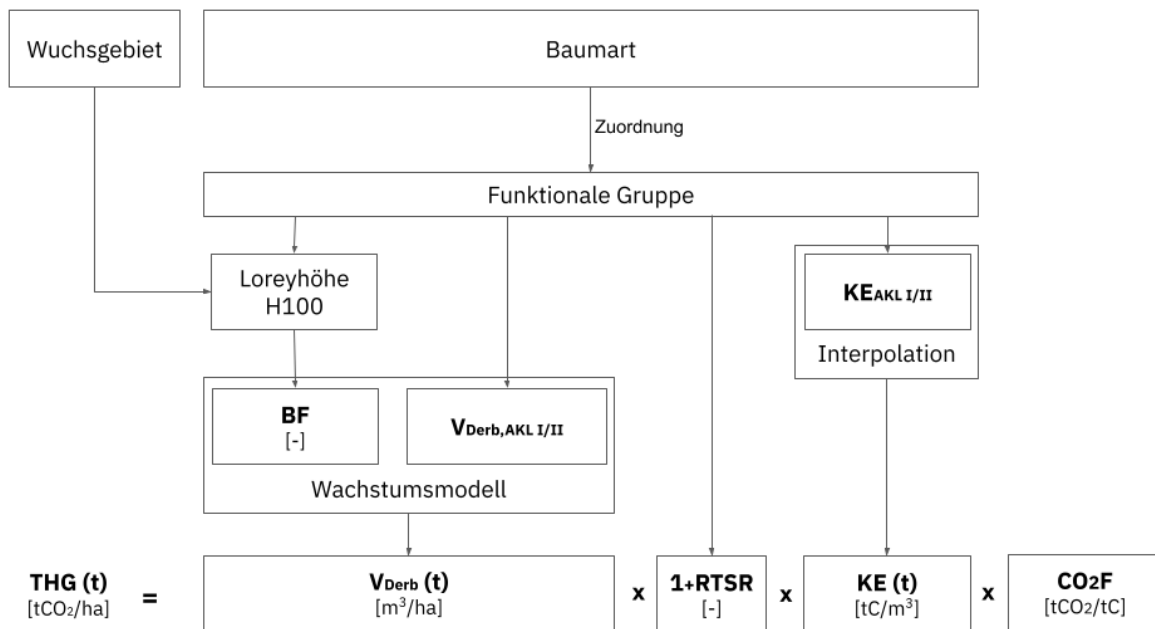


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Methode des WKS zur Quantifizierung der projizierten THG-Bilanz für den Scope Wald-Wiederaufbau. Bei mehreren Baumarten werden die Bilanzen anteilig gewichtet. THG = Treibhausgas-Bilanz; V_{derb}= Derbholzvorrat nach der Bundeswald-Inventur (Thünen-Institut 2012); KE = Konversions-Expansionsfaktor nach Wirth et al. (2004); RTSR = Wurzel-Spross-Verhältnis nach IPCC (2003); CO₂F = Verhältnis der molaren Masse von CO₂ zu Kohlenstoff = 3.66 tCO₂/tC; Loreyhöhe H100 = Höhe im Alter 100 nach Riedel et al. (2021); AKL I/II = Altersklasse 0-20 Jahre bzw. 20-40 Jahre.



Literaturverzeichnis

- Albert, M., Nagel, J., Schmidt, M., Nagel, R.-V., Spellmann, H. (2021). Eine neue Generation von Ertragstafeln für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer [Datensatz]. Version 1.0. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6343907>
- Burschel, P., Kürsten, E., & Larson, B. C. (1993). Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt-Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. Forstliche Forschungsberichte München, (126), 135-S.
- Eichhorn, F., (1904). Beziehung zwischen Bestandeshöhe und Bestandesmasse. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 80: 45-49.
- Gauer, J., Kroiher, F., (Hrsg, 2012). Waldökologische Naturräume Deutschlands – Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke – Digitale Topographische Grundlagen – Neubearbeitung Stand 2011. Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research, Sonderheft Nr. 359. 39 Seiten
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., ... & Wagner, F. (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry.
- Riedel T., Hennig P., Kroiher F., Polley H., Schmitz F., Schwitzgebel F. (2017). Die dritte Bundeswaldinventur (BWI 2012). Inventur- und Auswertemethoden, 124 S.
- Riedel, T., & Kändler, G. E. R. A. L. D. (2017). Nationale Treibhausgasberichterstattung: Neue Funktionen zur Schätzung der oberirdischen Biomasse am Einzelbaum. Forstarchiv, 88(2), 31-38.
- Thünen-Institut (2012). Dritte Bundeswaldinventur (2012). Abgerufen am Oktober 2021 auf <https://bwi.info/?lang=de>
- Wirth, Christian & Ernst Detlef, Schulze & Schwalbe, G. & Tomczyk, I & Weber, G. & Weller, E.. (2004). Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens : Abschlussbericht zur 1. Phase des BMBF-Projektes "Modelluntersuchung zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls". Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, Mitteilungen der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, v.23 (2004).305 S.

Anhang

Tabelle 3: Mittlere Vorratsentwicklung von 1-30 Jahren auf Basis der mittleren Derbholz-Vorräte der Altersklassen 0-20 und 20-40 Jahren aus der zweiten Bundes-Waldinventur (ohne die im Text erwähnte Wuchsgebiets-bezogene Bonitierung).

Jahr	andere Lb niedriger Lebensdauer	andere Lb hoher Lebensdauer	Kiefer	Buche	Douglasie	Fichte	Eiche	Weisstanne	Lärche
1	2.3	2.5	2.0	1.1	2.3	2.9	2.3	1.7	3.8
2	4.5	4.9	4.0	2.2	4.5	5.8	4.5	3.5	7.6
3	6.8	7.4	6.0	3.3	6.8	8.7	6.8	5.2	11.5
4	9.1	9.8	8.0	4.4	9.1	11.6	9.1	6.9	15.3
5	11.4	12.3	10.0	5.5	11.4	14.5	11.4	8.6	19.1
6	13.6	14.7	12.0	6.5	13.6	17.5	13.6	10.4	22.9
7	15.9	17.2	14.0	7.6	15.9	20.4	15.9	12.1	26.7
8	18.2	19.6	16.0	8.7	18.2	23.3	18.2	13.8	30.5
9	20.5	22.1	18.0	9.8	20.5	26.2	20.5	15.5	34.4
10	22.7	24.5	20.0	10.9	22.7	29.1	22.7	17.3	38.2
11	25.0	27.0	22.0	12.0	25.0	32.0	25.0	19.0	42.0
12	27.4	29.5	24.6	13.5	28.2	35.6	27.2	21.6	45.7
13	29.9	32.3	27.6	15.3	31.8	39.7	29.7	24.6	49.6
14	32.8	35.3	30.8	17.3	35.9	44.2	32.3	28.0	54.0
15	35.9	38.6	34.5	19.5	40.5	49.2	35.2	31.9	58.6
16	39.3	42.2	38.6	22.0	45.7	54.7	38.4	36.3	63.8



17	43.0	46.1	43.2	24.9	51.5	60.9	41.8	41.3	69.3
18	47.0	50.4	48.4	28.1	58.1	67.9	45.6	47.0	75.3
19	51.5	55.2	54.1	31.7	65.5	75.5	49.7	53.5	81.9
20	56.3	60.3	60.6	35.8	73.9	84.1	54.1	60.9	89.0
21	61.6	65.9	67.8	40.4	83.4	93.6	58.9	69.3	96.8
22	67.5	72.1	75.9	45.6	94.0	104.3	64.2	78.9	105.2
23	73.8	78.8	84.9	51.5	106.1	116.1	70.0	89.8	114.4
24	80.8	86.2	95.0	58.1	119.6	129.2	76.2	102.2	124.3
25	88.4	94.2	106.4	65.6	135.0	143.9	83.1	116.4	135.1
26	96.8	103.0	119.0	74.1	152.2	160.2	90.5	132.4	146.9
27	105.9	112.7	133.2	83.7	171.7	178.3	98.6	150.7	159.7
28	115.9	123.2	149.1	94.5	193.7	198.5	107.5	171.6	173.6
29	126.9	134.7	166.9	106.7	218.5	221.0	117.1	195.3	188.7
30	138.9	147.2	186.7	120.5	246.5	246.1	127.6	222.3	205.1

Tabelle 4: Bonitätsfaktoren auf Basis der mittleren Bestandeshöhe nach Lorey und der Abweichung des jeweiligen Wuchsgebietes (vgl. Gauer & Kroiher 2012) zum deutschlandweiten Durchschnitt (Datenquelle BWI 3, Thünen-Institut 2012)

Wuchsgebiet	Eiche	Buche	andere Lb hoher Lebensdauer r	andere Lb niedriger Lebensdauer r	Fichte	Weisstanne	Douglasie	Kiefer	Lärche
Schleswig-Holstein Nordwest	0.81	1.07	0.76	0.67	0.94	0.77	0.84	0.85	0.99
Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holstein Ost / Nordwest-Mecklenburg	1.05	1.20	0.96	0.88	1.04	1.05	1.21	1.02	1.16
Schleswig-Holstein Südwest	0.98	1.15	0.96	0.76	1.00	0.89	0.96	0.95	1.01
Mecklenburg-Westvorpomme rsches Küstenland	1.02	1.08	0.99	0.91	0.98	0.44	1.23	0.90	1.03
Ostholsteinisch-Westmecklen burger Jungmoränenland	0.99	1.13	1.07	0.88	0.97	1.15	1.11	1.02	1.08
(Mittel-) Mecklenburger Jungmoränenland	0.99	1.13	1.03	0.93	0.88	1.16	1.03	1.00	1.08
Ostmecklenburg-Vorpommer sches Jungmoränenland	1.04	1.15	1.07	0.91	1.02	-	1.16	1.02	1.10
Ostvorpommersches Küstenland	0.98	1.13	0.99	0.92	0.95	-	0.97	0.95	1.05



Nordostbrandenburger Jungmoränenland (Mittelbrandenburger Jungmoränenland)	1.03	1.12	0.85	0.98	1.05	-	1.02	0.93	0.94
Ostmecklenburg-Nordbrande nburger Jungmoränenland (Nordbrandenburger Jungmoränenland)	1.04	1.17	0.96	0.91	0.82	-	1.03	0.98	1.02
Ostniedersächsisch-altmärkis ches Altmoränenland (Westprignitz-Altmärkisches Altmoränenland)	0.98	1.15	0.97	0.92	0.84	0.49	1.13	0.87	0.96
Südost-Holsteinisch-Südwest mecklenburger Altmoränenland	0.99	1.13	0.94	0.90	0.97	0.72	1.10	0.94	1.10
Ostniedersächsisches Tiefeland	1.02	1.16	0.91	0.89	0.96	1.01	0.95	0.91	1.00
Niedersächsischer Küstenraum	0.96	1.14	0.93	0.71	0.91	0.93	1.07	0.87	1.05
Mittelwestniedersächsisches Tiefeland	0.96	1.13	0.90	0.84	0.90	0.67	1.00	0.87	0.97
Westfälische Bucht	1.05	1.11	0.90	0.95	1.03	0.50	1.19	0.90	1.06
Mittleres nordostdeutsches Altmoränenland	0.96	1.14	0.83	0.90	0.84	-	0.75	0.86	0.95
Hoher Fläming	1.04	1.22	0.85	1.00	1.09	-	1.28	0.92	1.03



Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	1.03	1.18	0.86	0.93	0.82	0.32	1.02	0.85	0.99
Düben-Niederlausitzer Altmoränenland	0.88	1.13	0.76	0.81	0.85	-	0.85	0.81	0.90
Niederrheinisches Tiefland	0.96	1.03	0.84	0.98	0.96	1.11	0.97	0.84	1.08
Niederrheinische Bucht	1.02	1.10	0.90	1.07	0.96	-	-	0.98	1.25
Nordwestdeutsche Berglandschwelle	1.01	1.18	0.81	1.18	0.93	1.11	0.53	0.99	1.14
Nordwestliches Harzvorland	1.10	1.20	0.94	0.89	0.99	-	1.25	0.92	1.04
Nordöstliche Harzvorländer	0.90	1.28	0.72	0.88	0.87	-	-	0.82	0.80
Sachsen-Anhaltinische Löss-Ebene	0.89	0.93	0.79	1.00	-	-	-	0.50	0.99
Lausitzer Löss-Hügelland	0.98	1.22	1.00	0.91	0.98	-	-	0.97	0.93
Westlausitzer Platte und Elbtalzone	0.93	1.16	0.85	0.98	0.98	-	-	0.95	0.96
Sächsisch-Thüringisches Löss-Hügelland	1.03	1.31	1.02	0.99	1.10	-	-	0.94	1.10
Leipziger Sandlöss-Ebene	1.05	-	0.90	0.90	-	-	-	1.08	1.10
Ostthüringisches Trias-Hügelland	1.03	1.15	0.90	0.80	1.06	-	0.93	0.97	0.98



Thüringer Becken	1.14	1.30	0.99	0.90	0.98	-	-	0.55	1.27
Nordthüringisches Trias-Hügelland	1.02	1.18	0.96	0.82	0.95	-	1.43	0.86	1.03
Erzgebirgsvorland	1.03	1.16	0.96	1.00	1.06	-	-	1.06	1.13
Zittauer Gebirge	-	1.27	-	0.69	1.03	-	0.78	0.93	0.95
Oberlausitzer Bergland	0.94	1.12	0.90	0.82	1.06	-	0.84	0.95	1.14
Elbsandsteingebirge	1.10	1.13	0.97	0.84	1.08	-	-	0.96	1.01
Thüringer Gebirge	0.75	1.10	0.94	0.80	1.03	1.30	0.98	0.88	0.98
Vogtland	0.89	1.11	0.83	0.81	1.00	0.69	0.35	0.97	1.08
Erzgebirge	0.90	1.17	0.85	0.81	1.07	0.43	1.14	0.96	0.98
Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald	0.65	0.95	0.95	0.85	1.08	0.78	1.04	1.08	1.18
Oberpfälzer Wald	1.03	1.20	0.80	1.00	1.10	1.33	0.88	1.09	1.10
Bayerischer Wald	0.98	1.14	0.98	0.90	1.15	1.20	1.00	1.07	1.09
Weserbergland	1.09	1.22	0.98	0.83	1.05	0.25	1.15	0.85	1.18



Harz	0.91	1.02	0.93	0.83	1.01	-	0.94	0.85	1.03
Mitteldeutsches Trias-Berg- und Hügelland	1.01	1.16	0.96	0.85	1.08	-	1.17	1.08	1.20
Nordwesthessisches Bergland	1.05	1.14	0.94	0.81	1.03	-	1.17	1.08	1.24
Nördliches hessisches Schiefergebirge	1.02	1.10	0.73	0.73	0.99	0.85	0.93	0.99	1.21
Sauerland	0.96	1.06	0.90	0.81	1.05	0.38	0.94	1.02	1.15
Bergisches Land	0.99	1.14	0.88	0.95	1.04	1.27	0.80	1.04	1.00
Nordwesteifel	0.89	1.05	0.78	0.70	1.03	0.99	1.10	0.98	0.99
Osteifel	0.85	1.03	0.77	0.73	1.03	0.95	1.10	0.94	1.05
Mittelrheintal	0.82	1.15	0.76	0.87	1.07	1.08	1.02	0.86	1.05
Westerwald	1.00	1.23	1.00	0.79	1.07	1.02	1.15	1.08	1.22
Taunus	1.06	1.15	0.83	0.86	1.14	1.54	1.08	1.00	1.14
Wetterau und Giessener Becken	1.08	1.27	0.95	0.77	1.25	-	1.35	1.00	1.01
Vogelsberg und östlich angrenzende Sandsteingebiete	1.07	1.13	0.87	0.75	0.91	1.00	0.90	1.01	1.13



Rhön	1.03	1.13	0.85	0.90	1.09	1.21	1.07	1.03	1.15
Hunsrück	0.85	1.03	0.73	0.73	1.03	0.99	1.10	0.98	1.11
Moseltal	0.96	1.03	0.79	0.76	1.08	0.73	1.13	1.15	1.20
Saar-Nahe Bergland	0.95	1.04	0.78	0.81	1.05	0.97	1.10	1.03	1.09
Westricher Moorniederung	0.62	0.87	-	0.87	1.01	1.13	1.15	1.07	-
Südthüringisches-Oberfränkisches Trias-Hügelland	1.01	1.13	0.95	0.98	1.06	1.32	1.14	1.08	1.15
Oberpfälzer Becken- und Hügelland	0.90	1.23	0.79	0.98	0.97	1.03	0.90	1.06	1.14
Frankenalb und Oberpfälzer Jura	1.03	1.14	0.94	0.94	1.09	1.15	1.06	1.07	1.08
Fränkischer Keuper und Albvorland	1.01	1.13	0.86	0.91	1.03	0.98	1.35	1.09	1.09
Fränkische Platte	1.00	1.15	0.85	0.83	1.08	1.00	1.13	0.94	1.21
Spessart	1.08	1.17	0.95	1.10	1.20	0.82	1.31	1.13	1.30
Odenwald	1.05	1.23	0.95	0.91	1.11	1.11	1.33	1.13	1.20
Oberrheinisches Tiefland und Rhein-Main-Ebene	1.01	1.15	1.01	1.14	0.96	1.11	1.01	1.03	1.21



Gutland		1.10	1.19	0.87	0.81	1.09	0.76	1.31	1.10	1.13
Saarländisch-Pfälzisches Muschelkalkgebiet		1.14	1.14	0.94	0.86	1.18	1.24	0.96	1.10	1.13
Pfälzerwald		1.11	1.13	0.99	0.89	1.20	1.34	1.21	1.01	1.11
Schwarzwald		1.00	1.08	0.97	0.76	1.16	1.22	1.29	1.08	1.13
Baar-Wutach		1.05	1.13	0.95	0.76	1.17	1.21	0.97	1.14	1.08
Neckarland		1.10	1.17	0.97	0.87	1.10	1.22	1.21	1.08	1.22
Schwäbische Alb		0.95	1.13	0.98	0.70	1.05	1.18	1.08	0.94	1.07
Südwestdeutsches Alpenvorland		1.06	1.20	1.07	1.01	1.15	1.10	1.24	1.11	1.30
Tertiäres Hügelland		1.00	1.09	0.93	0.90	1.11	1.10	0.93	1.14	1.19
Schwäbisch-Bayerische Schotterplatten- und Altmoränenlandschaft		0.98	1.06	0.91	0.89	1.10	0.96	1.11	1.07	1.16
Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne und Molassevorberge		1.01	1.15	1.05	0.86	1.12	1.19	1.65	0.72	1.02
Bayerische Alpen		0.52	1.04	0.92	0.65	1.15	1.20	-	0.80	1.18

Tabelle 5: Baumartengruppen-spezifische Konversions-Expansionsfaktoren (KE-Werte) der Jahre 1-30, interpoliert aus den Altersklassen-Mittelwerten hergeleitet von Wirth et al. (2004). Die Werte der Jahre 10 und 30 (fett hervorgehoben) entsprechen den von Wirth et al. (2004) angegebenen Mittelwerte für die Altersklasse I (1-20 Jahre) bzw. II (21-40 Jahre)

Jahr	Buche	Eiche	andere Lb niedriger Lebensdauer	andere Lb hoher Lebensdauer	Fichte	Weisstanne	Kiefer	Lärche	Douglasie
1	1.54	1.71	1.08	1.66	1.09	1.15	1.32	1.09	1.19
2	1.48	1.63	1.03	1.59	1.04	1.09	1.26	1.04	1.14
3	1.43	1.55	0.99	1.52	1.00	1.04	1.20	1.00	1.09
4	1.38	1.48	0.95	1.46	0.96	0.99	1.15	0.96	1.05
5	1.33	1.41	0.91	1.40	0.92	0.94	1.09	0.92	1.01
6	1.28	1.35	0.88	1.34	0.88	0.90	1.04	0.88	0.97
7	1.24	1.29	0.84	1.28	0.85	0.86	0.99	0.85	0.93
8	1.19	1.23	0.80	1.23	0.81	0.82	0.95	0.81	0.89
9	1.15	1.17	0.77	1.18	0.78	0.78	0.90	0.78	0.85
10	1.11	1.12	0.74	1.13	0.75	0.74	0.86	0.75	0.82
11	1.07	1.07	0.71	1.08	0.72	0.70	0.82	0.72	0.79
12	1.03	1.02	0.68	1.04	0.69	0.67	0.78	0.69	0.76
13	1.00	0.97	0.65	0.99	0.66	0.64	0.74	0.66	0.72
14	0.96	0.93	0.63	0.95	0.64	0.61	0.71	0.64	0.70



15	0.93	0.89	0.60	0.91	0.61	0.58	0.68	0.61	0.67
16	0.89	0.85	0.58	0.87	0.59	0.55	0.65	0.59	0.64
17	0.86	0.81	0.55	0.84	0.56	0.53	0.62	0.56	0.61
18	0.83	0.77	0.53	0.80	0.54	0.50	0.59	0.54	0.59
19	0.80	0.74	0.51	0.77	0.52	0.48	0.56	0.52	0.57
20	0.77	0.70	0.49	0.74	0.50	0.46	0.53	0.50	0.54
21	0.75	0.67	0.47	0.71	0.48	0.43	0.51	0.48	0.52
22	0.72	0.64	0.45	0.68	0.46	0.41	0.48	0.46	0.50
23	0.69	0.61	0.43	0.65	0.44	0.39	0.46	0.44	0.48
24	0.67	0.58	0.41	0.62	0.42	0.37	0.44	0.42	0.46
25	0.65	0.56	0.39	0.59	0.41	0.36	0.42	0.41	0.44
26	0.62	0.53	0.38	0.57	0.39	0.34	0.40	0.39	0.42
27	0.60	0.51	0.36	0.55	0.37	0.32	0.38	0.37	0.41
28	0.58	0.48	0.35	0.52	0.36	0.31	0.36	0.36	0.39
29	0.56	0.46	0.33	0.50	0.34	0.29	0.35	0.34	0.38
30	0.54	0.44	0.32	0.48	0.33	0.28	0.33	0.33	0.36