

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Produktivitätsvergleich von Fichte, Kiefer und Douglasie entlang eines großräumigen, deutschlandweiten Standortgradienten; Teilvorhaben 2: Produktivitätsvergleich von Kiefer und Douglasie.

Zuwendungsempfänger

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)

Förderkennzeichen

Teilvorhaben 2: 2221NR008B

Laufzeit

01.07.2021 bis 30.06.2024 (kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2024; Berichtspflicht bis 30.04.2025)

Monat der Erstellung:

04/2025

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzbericht	2
1. Aufgabenstellung	2
2. Planung und Ablauf des Vorhabens	2
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse	3
a) Arbeitspakete und Meilensteine	3
b) Zusammenfassung	9
II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	10
1. Erzielte Ergebnisse	10
Arbeitspaket 1: Datenzusammenstellung, Konsolidierung und Plausibilisierung	10
Arbeitspaket 2: Reparametrisierung standortsensitiver Bonitätsfächer für Kiefer und Douglasie	14
Arbeitspaket 3: Entwicklung, Parametrisierung und Validierung von standortsensitiven Zu-	
wachstmodellen	25
Arbeitspaket 4: Entwicklung umweltsensitiver, verallgemeinerter Wachstumsfunktionen für	
Kiefer, Douglasie (und Fichte) für die Anwendung in Wachstumssimulationen: Modell-	
validierung und Szenarienbildung	32
2. Verwertung	38
a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	38
b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	38
c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	38
d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	38
3. Erkenntnisse von Dritten	38
4. Veröffentlichungen	38
5. Literatur	39
6. Anhänge	41
Anhang 1: Detaillierte Grafiken des laufenden periodischen Zuwachses (1PZ) über Kovariablen	41
Anhang 2: Burggraef und Schmidt. 2024. Zum Zusammenhang von Oberhöhenbonität und	
Volumenzuwachs: ein Ansatz zur Verallgemeinerung des Ertragsniveau-Konzeptes. . .	45

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Die Waldkiefer (*Pinus silvestris*) erlangte nach dem zweiten Weltkrieg auf Kahlflächen infolge von Reparationshieben eine führende forstwirtschaftliche Rolle. Besonders auf sandigen Standorten im norddeutschen Tiefland ist sie der Fichte (*Picea abies*) bei nachlassenden Niederschlägen überlegen. Sie ist in der Lage, Trockenperioden gut zu verkraften und verfügt durch ihr großes, bis nach Sibirien reichendes Verbreitungsgebiet über eine hohe genetische Differenzierung. Durch ihren breiten Standortsgradienten und ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenperioden ist sie als auch zukünftig vergleichsweise robuste Wirtschaftsbaumart weiter in den Fokus der Klimafolgenforschung gerückt. Durch die vergleichsweise hohe Wuchsleistung auf extremeren Standorten ist sie in diesen Standortsbereichen eine Baumart mit einer relativ hohen Kohlenstoff-Bindungsleistung und damit interessant für den Klimaschutz. Allerdings weist die Kiefer Risiken gegenüber einer hohen Anzahl an biotischen und abiotischen Schadfaktoren auf. So gehören der Befall durch die Fraßgesellschaft der Kieferngrößschädlinge, Pilzerkrankungen wie das Diplodia-Triebsterben, Mistelbefall sowie eine gesteigerte Waldbrandgefahr zu den Problemen, die durch die fortschreitende Klimaerwärmung noch verstärkt werden können. So wurden beispielsweise in der Waldzustandserfassung bereits erhöhte Mortalitätsraten als Folge der ab 2018 aufgetretenen Extremjahre beobachtet.

Aufgrund dieser sich in Zukunft möglicherweise verschärfenden Problemlage besteht der wirtschaftliche und klimaschutztechnische Bedarf nach einer alternativen, zuwachsstärkeren Baumart, welche gleichzeitig extremeren Klimabedingungen standhält. Hier ist die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) häufiger Gegenstand der Diskussion. Die nordamerikanische Baumart besticht nicht nur durch eine ausgesprochen hohe Produktivität, sondern hat auch den Ruf, widerstandsfähiger gegenüber Trockenphasen und hohen Temperaturen zu sein. Die hohe Produktivität bietet einen weiteren Vorteil unter dem Gesichtspunkt der CO₂-Bindung. Sie verfügt zudem über eine besondere Anpassung gegenüber Waldbränden, die in ihrem Herkunftsgebiet häufig auftreten. Jedoch ist nicht bekannt, ob und inwieweit die Douglasie der Kiefer über einen breiten standörtlichen Gradienten und unter extremen Bedingungen tatsächlich überlegen ist. Diese Frage sollte mit standorts- bzw. witterungssensitiven Bonitäts- und Zuwachsmodellen auf der Grundlage von Versuchsflächendaten beantwortet werden.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in Kooperation mit der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW) durchgeführt, die für das Gesamtprojekt federführend verantwortlich zeichnete. An der FVA-BW wurde außerdem das Teilprojekt „Produktivitätsanalyse Fichte-Douglasie“ bearbeitet. Beide Forschungsanstalten griffen dabei auf einen vereinheitlichten und zusammengeführten Datensatz der jeweils von ihnen betreuten forstlichen Versuchsflächen zurück. Dadurch waren nicht nur echte Langzeitbeobachtungen verfügbar, die bei z.B. inventurbasierten Studien häufig fehlen, sondern auch ein Standortsgradient, der weite Teile von Nord- und Südwestdeutschland abdeckt. Dabei wurden von der NW-FVA auch zusätzliche Daten aus Sachsen und Brandenburg in Kooperation mit dem Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) und dem Staatsbetrieb Sachsenforst akquiriert. Ein wesentlicher Teil des Projektes bestand in der genannten Datenkonsolidierung, welche durch die unterschiedlichen Aufnahme- und Datenhaltungsmethoden der beteiligten Institutionen einige Herausforderungen mit sich brachte. Ein weiterer Punkt bestand in der Auswahl von geeigneten mathematischen Funktionen, die die zu erforschenden Wachstumsprozesse korrekt abbilden können. So konnten letztendlich alle Arbeitspakete erarbeitet werden, auch wenn die geplanten Szenariosimulationen stark vereinfacht werden mussten. Im Rahmen des Teilprojektes 2 gelang dabei eine kausale Modellierung des forstwissenschaftlich wegweisenden, aber bisher nur empirisch beobachteten Untergliederten Speziellen Ertragsniveaus (Assmann und Franz 1963; Pretzsch 2019).

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP)	Bearbeitungszeitraum	Zielerreichung
AP 1 Datenzusammenstellung, Konsolidierung & Plausibilisierung	07/2021 bis 02/2022	Die Datenzusammenstellung und Konsolidierung des Gesamtdatensatzes erwies sich als größte Herausforderung neben der Parametrisierung der Zuwachsmodelle (Ap 4). Das Hinzuziehen und Vereinheitlichen der Daten aus Brandenburg und Sachsen konnte erst gegen Ende des Projektes finalisiert werden, wobei die Vereinheitlichung der Bodendaten für Wasserhaushalt und Nährstoffversorgung nicht komplett abgeschlossen werden konnte. Letztendlich ergab sich jedoch ein Datensatz mit etwas über 3600 Versuchsflächen mit 28.805 Aufnahmen und Beobachtungszeiträumen von z.T. Ende des 19. Jhd. bis 2023. Für AP 2 wurden außerdem Inventurdaten aus der Bundeswaldinventur für die gesamte Bundesrepublik und der Kohlenstoffinventur 2017 für die Trägerländer der NW-FVA hinzugezogen. Daten für Temperatur und Niederschlag wurden für AP 2 dynamisch als Klimaparameter über das Bestandesleben aggregiert. Für AP 3 wurden sie von Aufnahme zu Aufnahme gemittelt um Witterungsparameter zu erhalten. Die Stickstoffdeposition wurde für Ap 2 ebenfalls dynamisch, für AP 3 ab 25 Jahre vor dem jeweils ersten Messzeitpunkt aggregiert.

AP 2 Reparametrisierung standort-sensitiver Bonitätsfächer für Kiefer und Douglasie	03/2022 bis 12/2022	Hier wurde zusätzlich zur in AP 1 konsolidierten Datenbasis dendrometrische Daten der Budneswaldinventuren I-III, sowie aus der Kohlenstoffinventur für Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein hinzugezogen. Zusätzlich dazu wurde auf Daten der Betriebsinventuren der Landesforstbetriebe Hessen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein zurückgegriffen. Die Inventurdatensätze wurden mit den konsolidierten Versuchsflächen-daten kombiniert. Mittels zusätzlicher Klima- und Bodendaten wurden klimasensitive Modelle auf Basis einer linearisierten Form der Korf-Funktion entwickelt.
AP 3 Entwicklung, Parametrisierung und Validierung von standort-sensitiven Zuwachsmodellen	01/2023 bis 02/2024	Die besondere Herausforderung bei der Entwicklung von Zuwachsmo-dellen bestand zunächst darin, eine mathematische Gleichung zu finden, die nicht nur den Zuwachs abbilden kann, sondern auch das Hinzufügen von klimatischen Kovariableneffekten ermöglicht. Bisher wurden klimasensitive Produktivitätsmodelle an der NW-FVA vor allem für statische Zielgrößen wie Baumhöhe, Bestandeshöhe oder Bonität entwickelt, wofür bereits robuste, gut anwendbare Modellgleichungen bekannt sind. Für den Zuwachs als dynamische Größe musste zunächst eine entsprechende Gleichung identifiziert und eine Möglichkeit der Erweiterung um klimasensitive Kovariablen gefunden werden. Letztendlich entschied man sich für eine Ableitung der algebraischen Differenzenform der SLOBODA-Funktion, deren Zuwachsschätzungen auf Basis einer gegebenen Bestandeshöhe und Bonität mit Kovariablen für Witterung und Stickstoffdeposition multipliziert werden können. Dabei ergibt sich zudem eine bisher nicht vorhandene Möglichkeit der kausalen Beschreibung des untergliederten speziellen Ertragsniveaus, was einen ertragskundlichen Fortschritt darstellt.

AP 4 Entwicklung umweltsensitiver, verallgemeinerter Wachstumsfunktionen für Kiefer, Douglasie (und Fichte) für die Anwendung in Wachstumssimulationen: Modellvalidierung und Szenarienbildung	03/2024 bis 06/2024	Mittels der in AP 2 und AP 3 entwickelten Modelle wurden in diesem Arbeitspaket Projektionen der Klima-, Witterungs und Stickstoffdepositionsparameter durchgeführt. Zusätzlich zu Kiefer und Douglasie konnten Projektionen für die Fichte durchgeführt werden, womit ein Vergleich mit TP 1 ermöglicht wird. Für die Projektionen wurden acht exemplarische, von Südwest nach Nordostdeutschland verteilte Waldstandorte ausgewählt. Es wurden jeweils Projektionen ausgehend von den Keimjahren 1925 und 2025 durchgeführt.
--	----------------------------	---

3a: Entwicklung, Parametrisierung und Validierung von standortsensitiven Zuwachsmodellen in der algebraischen Differenzenform zur standort-, behandlungs- und witterungssensitiven Projektion der H_g - bzw. H_o und H_{100} -Veränderung sowie des 1PZ.	10/2023	Hier verzögerte sich die Erreichung des Meilensteins durch die Schwierigkeiten bei der Identifizierung einer verwendbaren Zuwachsfunktion. Eine linearisierte Form der Ableitung der algebraischen Differenzenform der SLOBODA-Funktion wirkte zunächst unbrauchbar, da die Funktion auf das Hinzufügen klimatischer Kovariablen instabil reagierte. Dadurch stand die Suche nach einer alternativen Zuwachsfunktion im Raum. Durch die Verzögerung wurde in Abstimmung mit der FVA-BW eine kostenneutrale Verlängerung beantragt. Letztendlich wurde doch ein geeigneter Lösungsweg auf Basis der SLOBODA-Funktion gefunden. Ein erstes Modell für die Fichte auf Basis eines Teildatensatzes ohne Versuchsflächendaten für Sachsen und Brandenburg wurde im Mai 2024 auf der Tagung der Sektion Waldwachstum (vormals Ertragskunde) des Deutschen Verbandes Forstlicher Versuchsanstalten (DVFFA) vorgestellt. Die Modelle konnten für Kiefer und Douglasie sowie zusätzlich die Fichte Ende 2024 finalisiert werden.
3b: Regionalisierung der Ergebnisse und Erstellung einer kartenmäßigen Übersicht über die derzeitige Produktivität (1PZ, ΔH_g , ΔH_o , ΔH_{100}) von Kiefer und Douglasie für unterschiedliche Alter und Grundflächenhaltungen in den Beispielregionen und entlang von Transekten sowie in Sensitivitätsanalysen über den gesamten Datenraum durch Modellkoppelung des standortsensitiven Bonitätsfächers mit den standortsensitiven Zuwachsmodellen.	02/2024	Fertigstellung: 12/2024 Anstelle der flächenhaften Projektion wurden hier die exemplarischen Waldstandorte aus M4a verwendet.
M4		

4a: Szenarienbildung unter Klimawandel für verschiedene Szenariosimulationen des Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) des RCP 8.5 Emissionsszenarios sowie für verschiedene Behandlungsvarianten in den Pilotregionen.	06/2024	Im Rahmen der Projektionen für die exemplarischen Waldstandorte zeigten sich mögliche Produktivitätssteigerungen an kühleren und Abnahmen an wärmeren Standorten. Desweiteren zeigte sich eine geringere Produktivität der Douglasie gegenüber der Fichte im Alter unter 40 Jahren, bevor die Douglasie einen Vorsprung gewinnt. Dieser Schnittpunkt kann sich besonders an kühleren Standorten in Zukunft weiter nach vorne verlagern. Gegenüber der Kiefer zeigt die Douglasie immer eine höhere Produktivität. Die Kiefer weist an besonders ungünstigen Standorten jedoch einen Vorsprung gegenüber der Fichte auf.
4b: Parallel zu M4a: Kartenmäßige Darstellung der Ergebnisse.	06/2024	Hier konnten nur die Projektionen für die unter M4a genannten exemplarischen Waldstandorte erarbeitet werden.

b) Zusammenfassung

Aktuelles Leistungsniveau:

Die Douglasie ist der Fichte und der Kiefer in ihrer Produktionsleistung zunächst auf allen untersuchten Standorten überlegen. Dies bezieht sich sowohl auf die Höhenentwicklung (AP 2), als auch auf die Wuchsleistung (1PZ, AP 3). Einschränkend ist allerdings anzumerken, dass die Fichte der Douglasie unter einem Alter von ca 40 Jahren überlegen ist.

Wachstumsreaktion auf Umweltfaktoren

Hier zeigen sich z.T. Unterschiede in den Modelltypen, wobei bei der Entwicklung klimasensitiver Bonitätsfächer Optimumverläufe für die Kovariableneffekte identifiziert wurden. Bei den Zuwachsmodellen zeigten sich zwar auch Optimumeffekte für die Temperatursumme, für die Stickstoffdeposition und Aridität (Temperatur/Niederschlag) aber eher monoton steigende oder an einem artspezifischen Limit auslaufende Effekte. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Entwicklung des Zuwachsmodells auf einer bereits vorgegebenen Bonität aufsetzt. Die Untersuchungen zeigen jedoch deutlich, dass auch bei einer bereits gegebenen Bonität noch eine witterungs- und depositionsbedingte Variation im Volumenzuwachs vorhanden ist.

Entwicklung des Wuchspotentials im Klimawandel

Im Klimawandel zeigen die drei untersuchten Baumarten deutliche Unterschiede in ihrer Produktivitätsentwicklung. Die Douglasie reagiert am stärksten positiv auf veränderte Klima- und Stickstoffbedingungen. Sie weist an nahezu allen Standorten und über alle Altersphasen hinweg höhere Zuwächse auf als Fichte und Kiefer. Besonders ab einem Alter von etwa 40 Jahren steigt ihr Zuwachs deutlich an, wobei dieser Vorsprung im Klimaszenario mit Keimjahr 2025 tendenziell früher einsetzt. Die Fichte zeigt ebenfalls überwiegend höhere Produktivität als die Kiefer, verliert jedoch mit steigendem Alter an Vorsprung. Ihr Zuwachs profitiert insbesondere an höher gelegenen, klimatisch günstigeren Standorten. Die Kiefer kann an klimatisch ungünstigen Standorten wie Schmerz oder Oranienburg im hohen Alter in einzelnen Szenarien einen leichten Produktivitätsvorteil gegenüber der Fichte erzielen. Insgesamt verschieben sich die Phasen des höchsten Wachstums bei allen drei Arten zu früheren Altersstufen, was auf eine beschleunigte Entwicklung unter veränderten Klimabedingungen hinweist.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Datenzusammenstellung, Konsolidierung und Plausibilisierung

Der konsolidierte Gesamtdatensatz umfasst insgesamt 3665 Versuchsflächen, von denen 1598 auf die NW-FVA, 1926 auf die FVA-BW, 113 auf das Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) und 27 auf den Staatsbetrieb Sachsenforst entfallen. Insgesamt ergeben sich dabei 28.805 Aufnahmen, wobei pro Versuchsfläche und Aufnahme im Schnitt 143 Bäume beprobt wurden.

Für die Analysen wurden aus diesem Datensatz ausschließlich Flächen ausgewählt, bei denen die Kronenschirmfläche der jeweiligen Art mindestens 80% beträgt.

Nach der Berechnung der Zuwächse und weiteren Plausibilitätskontrollen verbleiben noch 2.785 Versuchsflächen. Dabei entfallen 1054 auf die NW-FVA, 1630 auf die FVA-BW, 74 auf das LFE und 27 auf den Staatsbetrieb Sachsenforst. Es verbleiben 12.380 Zuwachswerte auf Bestandesebene. Darin enthalten sind 4598 Beobachtungen für die Fichte, 5019 für die Douglasie und 1875 für die Kiefer. Im Mittel wurden die Versuchsflächen alle fünf Jahre beprobt. Die Hälfte der Flächen wurde vor 1980 das erste Mal aufgenommen. Die älteste Fläche im Datensatz ist eine Fichtenfläche aus Baden-Württemberg, die 1872 das erste Mal beprobt wurde.

Die von Aufnahme zu Aufnahme berechneten Zuwächse wurden durch die Periodenlänge zwischen den Aufnahmen geteilt und repräsentieren damit einen mittleren laufenden periodischen Zuwachs (IPZ), bzw. modellierten Jahreszuwachs.

Er beträgt im Mittel für die Fichte $13,98 \text{ m}^3 \text{ Ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$, für Douglasie $20,96 \text{ m}^3 \text{ Ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ und Kiefer $8,70 \text{ m}^3 \text{ Ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ (Tabelle 3).

Für die spätere dichteabhängige Modellierung der Zuwächse wurde für jede Aufnahme der Bestockungsgrad B° berechnet (Tabelle 3 und Abbildung 2; siehe Anhang für Grafiken mit Auflösung nach Alters- und Ertragsklassen). Dazu wurden die Versuchsflächen für jede Aufnahme mit der jeweiligen Ertragstafel für mäßige Durchforstung bonitiert und die der Bonität entsprechende Grundfläche ermittelt. Die beobachtete Grundfläche wurde dann durch die ertragstafelbasierte Grundfläche geteilt. Der B° liegt bei der Fichte im Mittel bei 0,97, bei der Douglasie bei 0,93 und bei der Kiefer bei 0,94. Für die Bonitierung wurde eine hausinterne Version des R-Paketes `et.nwfva` verwendet (Nuske, Staupendahl und Albert 2022).

Temperatur- und Niederschlagssummen lagen jeweils für die Vegetationsperiode vor, die dynamisch mittels des R-Paketes `vegperiod` berechnet wurde (Nuske 2017). Sie wurden ebenfalls jeweils für die Periode von Aufnahme zu Aufnahme berechnet, um die Witterung während der Zuwachsperiode abzubilden. Die Stickstoffdeposition wurde für die Periode 25 Jahre vor der jeweils ersten Aufnahme bis zur zweiten Aufnahme gemittelt. So ergaben sich für die Temperatur ein Mittelwert von 2142°C für die Fichte, 2287°C für die Douglasie und 2466°C für die Kiefer. Für den Niederschlag ergaben sich 461 mm im Mittel für die Fichte, 422 mm für die Douglasie und 358 mm für die Kiefer. Die Aggregation der Stickstoffdeposition ergab $1161 \text{ Eq Ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ für die Fichte, $1656 \text{ Eq Ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ für die Douglasie und $1176 \text{ Eq Ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ für die Kiefer.

Table 3: Statistiken des konsolidierten Gesamtdatensatzes der Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW), des Landeskompetenzzentrums Forst Eberswalde (LFE) und des Staatsbetriebes Sachsenforst; mit laufendem periodischen Zuwachs (IPZ), Bestockungsgrad B° , Temperatursumme (T) und Niederschlag (P) für die Vegetationsperiode (Mittelwert von Aufnahme zu Aufnahme) Summe der Stickstoffdeposition (Mittelwert ab 25 Jahre vor der ersten bis zur nächsten Aufnahme).

Baumart	Wert	IPZ [$\text{m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$]	B°	T [$^\circ\text{C}$]	P [mm]	N [$\text{Eq Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$]
Fichte	Minimum	1.00	0.06	1411.00	226.00	308.00
Fichte	5% Quantil	8.65	0.82	2013.00	395.00	616.00
Fichte	Median	13.43	0.97	2162.00	453.00	1152.00
Fichte	Mittelwert	13.98	0.97	2142.00	461.00	1161.00
Fichte	95% Quantil	18.86	1.12	2300.00	524.00	1542.00
Fichte	Maximum	39.43	2.01	2902.00	783.00	2945.00
Douglasie	Minimum	1.01	0.07	1645.00	233.00	339.00
Douglasie	5% Quantil	15.12	0.82	2147.00	370.00	1252.00
Douglasie	Median	22.15	0.92	2318.00	404.00	1455.00
Douglasie	Mittelwert	20.96	0.93	2287.00	422.00	1646.00
Douglasie	95% Quantil	27.21	1.04	2428.00	462.00	2070.00
Douglasie	Maximum	39.63	1.88	2983.00	707.00	3178.00
Kiefer	Minimum	1.03	0.09	1931.00	201.00	334.00
Kiefer	5% Quantil	5.66	0.75	2305.00	316.00	718.00
Kiefer	Median	8.44	0.92	2471.00	347.00	1274.00
Kiefer	Mittelwert	8.70	0.94	2466.00	357.00	1176.00
Kiefer	95% Quantil	11.42	1.11	2624.00	387.00	1507.00
Kiefer	Maximum	30.86	2.15	2971.00	687.00	3123.00

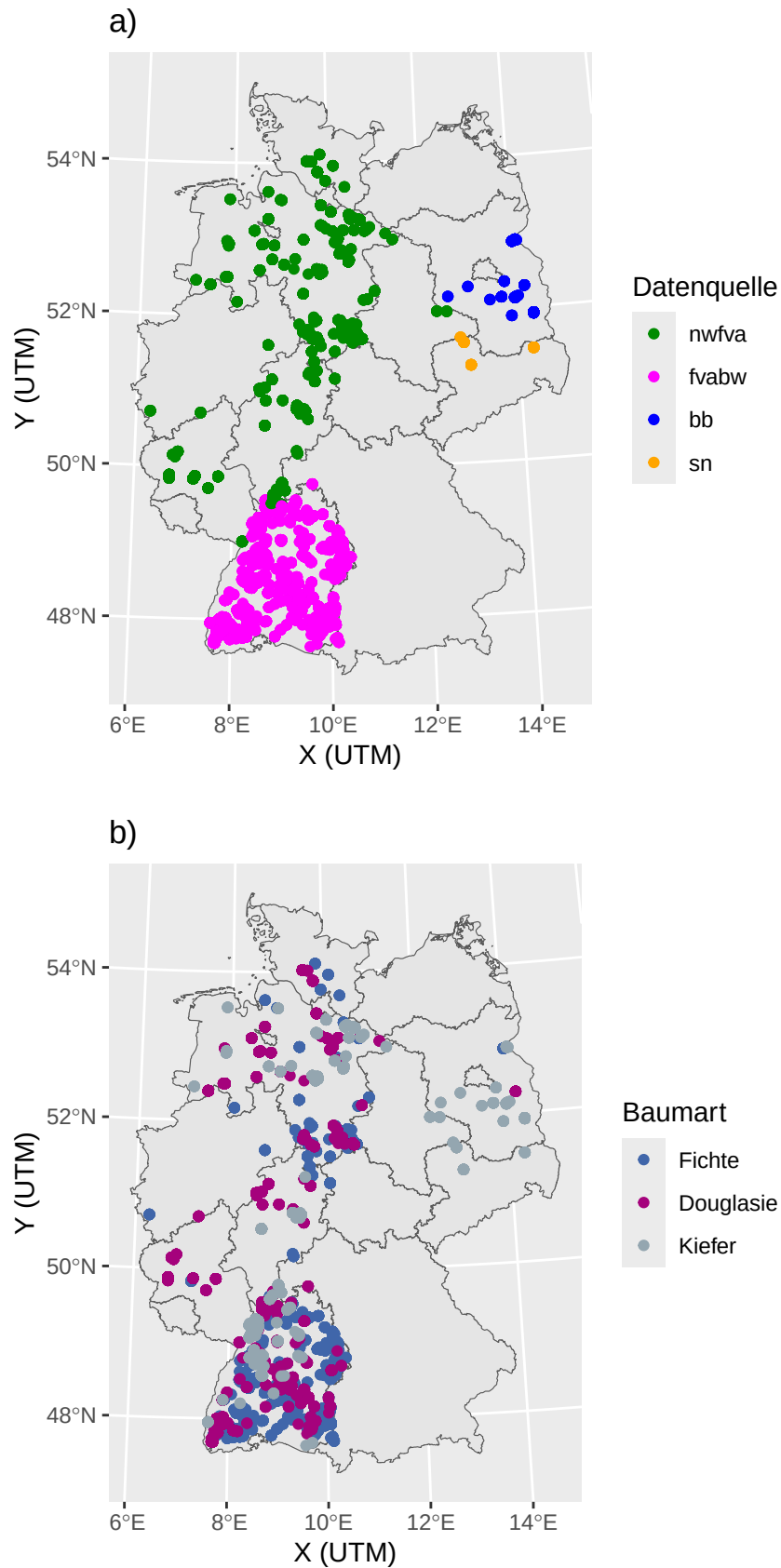


Abb. 1: **a)** Karte der Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (nwfva), der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (fvabw), des Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (bb) und des Staatsbetriebes Sachsenforst (sn). **b)** Versuchsflächen eingefärbt nach vorherrschender Baumart.

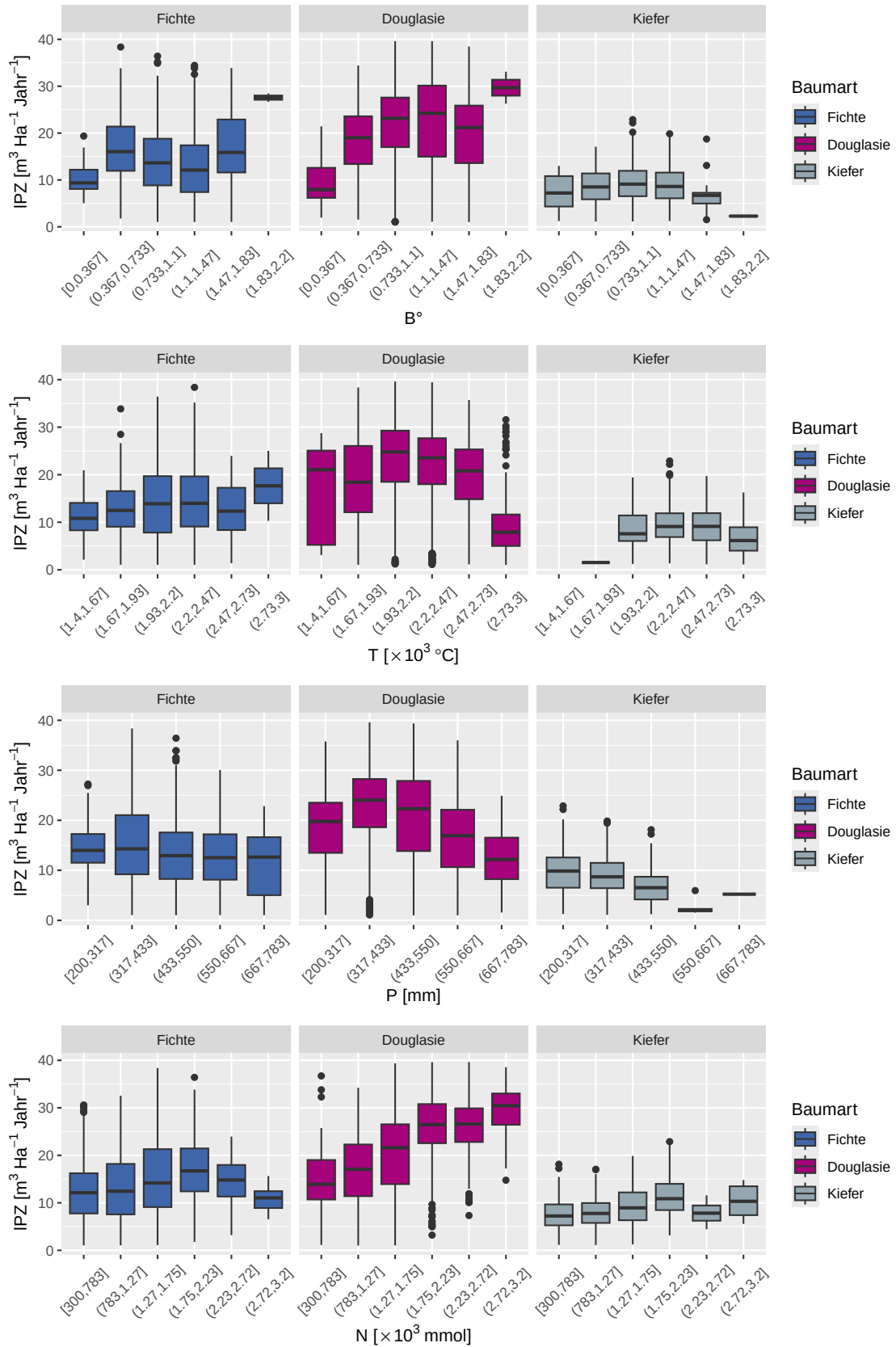


Abb. 2: Laufender periodischer Zuwachs (1PZ) über Bestockungsgrad B° , Temperatur- (T) und Niederschlags-summe (P) sowie Stickstoffdeposition (N) für die Vegetationsperiode, gemittelt über die zeitliche Differenz (in Jahren) zwischen jeweils zwei Aufnahmen.

Arbeitspaket 2: Reparametrisierung standortsensitiver Bonitätsfächer für Kiefer und Douglasie

Zielsetzung der Standort-Leistungs-Modellierung im Teilprojekt 2 (TP 2) war es, die Wuchsleistung der Baumarten Kiefer und Douglasie unter sich ändernden Standortbedingungen zu projizieren und zu bewerten sowie Modellgrundlagen für die Entscheidungsunterstützung der Forstlichen Praxis zu entwickeln. Ergänzend zur ursprünglichen Projektplanung war es möglich, zusätzlich die Fichte zu bearbeiten. Somit stehen die entwickelten Ansätze nicht nur für eine weitere Baumart zur Verfügung sondern der Baumartenvergleich konnte deutlich erweitert werden. Für die Baumartenwahl ist es zwingend erforderlich, dass Projektionen von Risiken und der Wuchsleistung auch für bisher auf einem Standort nicht vorkommende Baumarten möglich sind. Daher war es erforderlich, dass die Standort-Leistungs-Modelle ohne Vormessungen, wie z.B. Höhenmessungen zur Kalibrierung, angewendet werden können. Eine weitere Anforderung war es, die Wuchsleistung nicht nur zu einem Zeitpunkt im Sinne einer Bonität zu modellieren sondern für beliebige Alter sowohl die Höhenwuchsleistung als darauf aufbauend den periodischen Volumenzuwachs standortssensitiv projizieren zu können. Somit erlauben die Modellansätze sowohl kurz- als auch mittel- und langfristige Projektionen der Wuchsleistung, um z.B. die Effekte unterschiedlicher Umtriebszeiten oder Zielstärken abschätzen zu können.

Die Projektion der Höhenwuchsleistung ist die Basis für die Ableitung unterschiedlichster Indikatoren zur Entscheidungsunterstützung der Waldbewirtschaftung im Klimawandel. Durch die Unabhängigkeit von Vormessungen können alle Baumarten auf jedem Standort und zu jedem Alter und Zeitpunkt bzgl. ihrer Wuchsleistung verglichen werden. Standortssensitive Höhen-Alter-Entwicklungen lassen sich mit Hilfe der Ertragstafeln zu jedem Zeitpunkt bonitieren, so dass die zukünftige Bonitätsdynamik projiziert werden kann. Standortssensitive Höhen-Alters-Entwicklungen (Bonitätsfächer) werden zudem zukünftig eine Kernkomponente bei der Entwicklung klimasensitiver Einzelbaumwachstumssimulatoren sein. Im TP2 liefern die standortssensitiven Bonitätsfächer die Eingangsdaten (Höhen-Alters-Paare) für die dichte- und witterungs-sensitive Projektion mittlerer periodischer Volumenzuwächse mit Hilfe von ebenfalls im Projekt entwickelten Modellen. Diese Schätzungen können zu einer Gesamtwuchsleistung für beliebige Zeitpunkte aggregiert werden. Derartige langfristige Projektion sind ein Kriterium für die Baumartenwahl und die Grundlage für langfristige Abschätzungen der Kohlenstoffspeicherleistung und des Rohholzaufkommens. Somit kann eine differenzierte, den Zielen entsprechende langfristige Planung unter sich ändernden Umweltbedingungen erfolgen. Die Abschätzung des laufenden periodischen Zuwachses unter Berücksichtigung von Klimaprojektionen für die nächsten 5-10 Jahre liefert dagegen eine Grundlage für mögliche Szenarien innerhalb der nächsten Forsteinrichtungsperiode.

Datengrundlage Die Datengrundlage der Modelle kann in zwei Hauptgruppen unterteilt werden: Zum einen dendrometrische Daten, also Höhe, Durchmesser, Alter und Baumart. Zum anderen Umweltvariablen, einerseits die dynamischen, atmosphärischen Variablen Temperatur, Niederschlag und Stickstoffdeposition, andererseits statische Bodenkennwerte und als Proxyvariable Koordinaten zur Erfassung der räumlichen Lage.

Dendrometrie Die dendrometrischen Daten lassen sich wiederum in zwei Gruppen mit unterschiedlichen Charakteristiken einteilen. Die zahlenmäßig größere Gruppe stellen Inventurdaten dar. Hierunter fallen Daten der Bundeswaldinventuren I-III für die komplette Bundesrepublik inklusive von Verdichtungsgebieten und zusätzlich die Kohlenstoffinventur von 2017 für die Länder Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Zusätzlich wurden die Betriebsinventuren der Landesforstbetriebe von Hessen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein berücksichtigt. Generell zeichnen sich die Inventurdaten durch die Abdeckung eines breiten Standortgradienten aus, wobei die Anzahl an Wiederholungsmessungen aktuell noch relativ gering ist.

Die zweite Gruppe umfasst die waldwachstumskundlichen Versuchsflächen. Hier standen im Projekt Daten der NW-FVA (Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein), der FVA-BW (Baden-Württemberg), des Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Brandenburg) sowie von Sachsenforst (Sachsen) zur Verfügung. Die Anzahl der individuellen Versuchsflächen ist zwar insgesamt geringer, die Anzahl an Messwiederholungen jedoch erheblich höher (Tabelle 4).

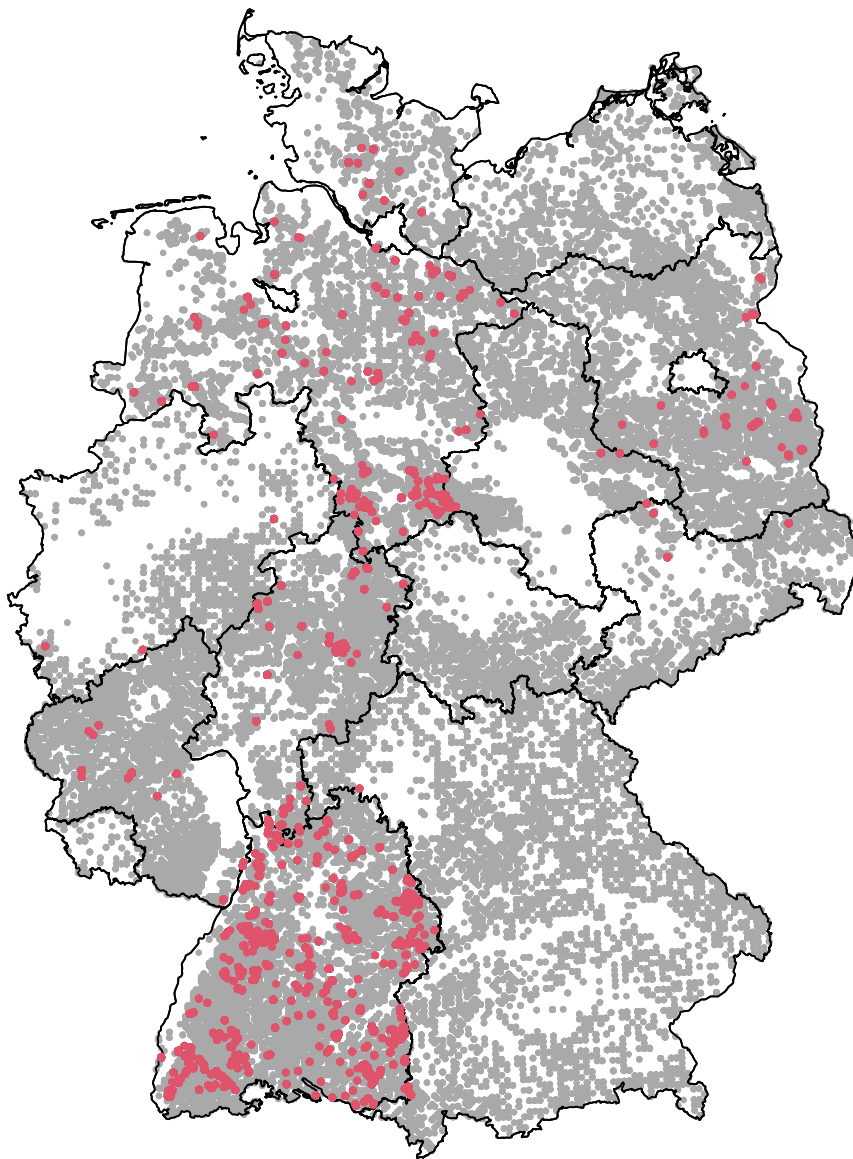


Abb. 3: Lage der zur Parametrisierung verwendeten Plots, getrennt nach Inventuren (grau) und Versuchsflächen (rot).

	Fichte (Plots)	Fichte (Aufnahmen)	Douglasie (Plots)	Douglasie (Aufnahmen)	Kiefer (Plots)	Kiefer (Aufnahmen)
BWI	22.368	44.863	2.461	4.723	22.400	39.512
BI	38.124	55.185	4.479	6.422	27.035	39.925
CI	1.058	1.058	129	129	2.615	2.615
NW-FVA	282	1.414	845	5.044	227	1.175
FVA-BW	917	5.234	437	3.012	264	1.461
BB	4	40	18	54	83	479
SN					27	109
Gesamt	62.753	107.794	8.369	19.384	52.651	85.276

Table 4: Anzahl an Aufnahmen, getrennt nach Baumart, Plot und Aufnahme. BWI: Bundeswaldinventur, BI: Betriebsinventur, CI: Kohlenstoffinventur, NW-FVA & FVA-BW: Versuchsflächen, BB: Versuchsflächen Brandenburg, SN: Versuchsflächen Sachsen

Atmosphärische Variablen Die atmosphärischen Variablen umfassen Temperatur, Niederschlag und Stickstoffdeposition. Die Primärquelle für die Temperatur und den Niederschlag ist der Deutsche Wetterdienst (DWD). An dessen Stationen werden die Tagesmitteltemperatur sowie die tägliche Niederschlagssumme erhoben. Anhand der Temperaturwerte wurde die Vegetationsperiode für jedes Jahr dynamisch bestimmt und anschließend wurden die Temperaturtagesmittel und Niederschlagstagesummen für die entsprechende Periode aufsummiert. Diese jährlichen Temperatur- und Niederschlagssummen für die Vegetationsperiode wurden unter Verwendung eines digitalen Geländemodells auf ein 50 m x 50 m Raster interpoliert. Um der Topographie Rechnung zu tragen, wurde für die Temperatur zusätzliche eine Hang- bzw. Strahlungskorrektur basierend auf der in WASIM-ETH implementierten Methodik integriert. Die entsprechenden Daten liegen von 1900 bis 2021 vor. Für Projektionen bis 2100 wurden Klimäläufe des ReKliEs Kernensembles (RCP 8.5) genutzt, diese liegen in gleicher zeitlicher und räumlicher Auflösung vor.

Die atmosphärische Stickstoffdeposition wurde aus PINETI-3-Daten des Umweltbundesamtes hergeleitet. Die originären Daten sind für den Zeitraum von 2000 bis 2015 auf einem 1 km x 1 km Raster verfügbar. Auf Basis historischer Rekonstruktionen der Stickstoffdeposition wurde diese Zeitreihe von 1800 bis 2100 extrapoliert. Aufgrund der hohen Unsicherheit bei der Quantifizierung von Stickstoffdepositionen wurden die Werte zweier Modelle (MATCH und EMEP MSC-W) gemittelt. Um die Auflösungen anzugleichen, wurden auch diese Daten auf ein 50 m x 50 m Raster interpoliert.

Bodendaten Der Boden wurde in der Modellbildung durch die Wasserhaushaltsziffer (WHZ) und Nährstoffziffer (NZ) der forstlichen Standortkartierung charakterisiert. Daten der Standortkartierung lagen für die Länder Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, Bayern und Baden-Württemberg mit allerdings unterschiedlicher räumlicher Abdeckung vor. Zusätzlich wurde für das 4 km x 4 km Raster der BWI auf die harmonisierten Standortkartierungen aus dem Projekt WP-KS-KW (WP-KS-KW-Synopse) zurückgegriffen. In Hessen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein wurden allerdings die originären Ziffern der jeweiligen Standortkartierung beibehalten sofern diese vorlagen. Die Kategorien der Standortkartierung in Bayern und Baden-Württemberg wurden auch in die WP-KS-KW Synopse überführt. Zur weiteren Ausdifferenzierung wurden die WP-KS-KW-Kategorien anhand der Forstlichen Großlandschaften des Thünen-Institutes in Berg- und Tiefland unterteilt. Insgesamt decken die Standortkartierungen 89% der Stichprobenpunkte bzw. waldwachstumskundlichen Versuchsflächen ab. Um die Daten ohne Standortkartierung bei der Modellbildung verwenden zu können, wurden diese bzgl. der WHZ und NZ mit einer Dummy-Variable versehen, welche lediglich nach Berg- und Tiefland differenziert. Dabei werden letztlich mittlere Bedingungen unterstellt.

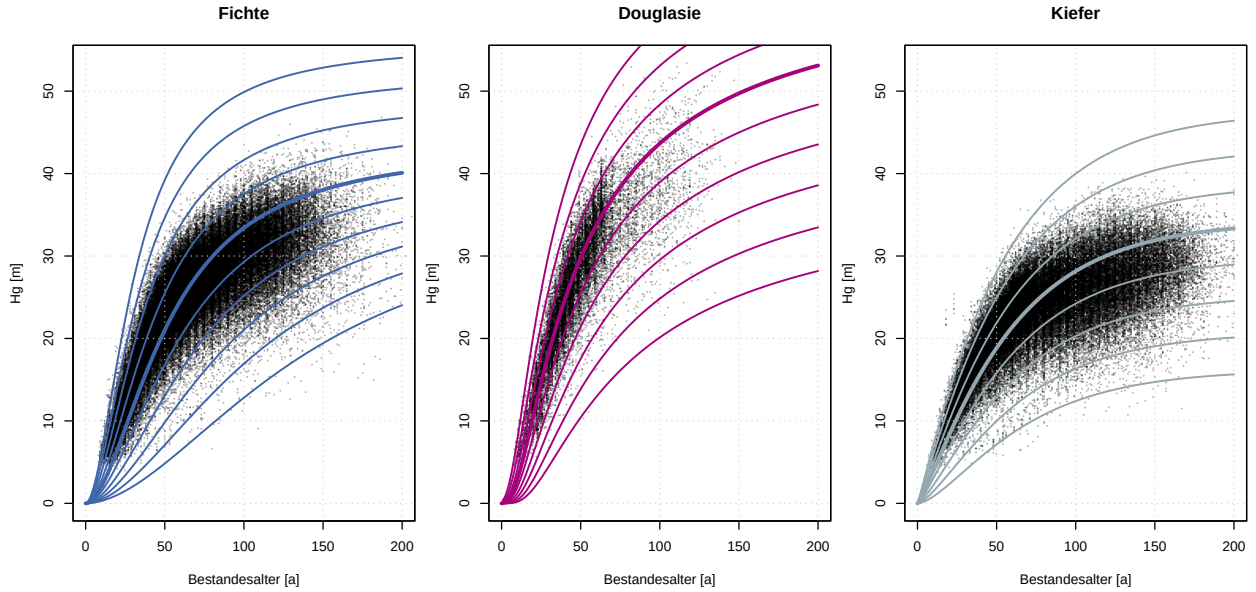


Abb. 4: Hg über dem Alter, getrennt nach Baumarten. Im Vordergrund sind Ertragstafelverläufe für ganzzahlige, relative Bonitäten dargestellt. Die Linie der ersten Bonität ist hervorgehoben.

Modelle Ziel der Modellentwicklung ist die standorts- und damit klimasensitive Projektion der Hg in Abhängigkeit des Alters für die Baumarten Fichte, Kiefer und Douglasie. Um biologisch plausible Wachstumsgänge zu gewährleisten, basieren die Modelle auf einer theoretischen Wachstumsfunktion. Als Wachstumsfunktion wurde eine modifizierte, linearisierte Variante der Korf-Funktion gewählt:

$$\log(Hg_{kt}) = A_{kt} + B * x_{kt} + \epsilon_{kt}$$

mit x_{kt} als einer Transformation des Alters

$$x_{kt} = -\frac{(Alter_{kt} + \lambda)^{-c} - (100 + \lambda)^{-c}}{(25 + \lambda)^{-c} - (100 + \lambda)^{-c}}$$

Diese Variante der Korf-Funktion wurde von Lappi (1997) ursprünglich für Höhen-Durchmesser-Kurven entwickelt und wurde hier für die Beschreibung von Höhen-Alters-Beziehungen adaptiert. Die Linearisierung ermöglicht eine Parametrisierung als GAM und damit direkt die etwaige Erfassung von nicht-linearen Effekten der Prädiktorvariablen. Ein weiterer großer Vorteil ist die biologische Interpretierbarkeit der Kovariablen, so dass die Modelleffekte direkt auf ihre Plausibilität hin überprüft werden können. Der Parameter A ist als die logarithmierte Höhe im Alter 100 zu interpretieren. B stellt die Differenz zwischen den logarithmierten Höhen im Alter 25 und 100 dar. c und λ sind Formparameter und wurden vorab über eine Gittersuche festgelegt. Nach der Fixierung von c und λ ist das Modell linear. Die Modellierung erfolgt über eine Modellkette aus generalisierten, additiven Modellen (GAM) sowie gemischten GAM (MGAM). Die Modelle wurden dabei auf Teildatensätzen parametrisiert, um die Vorteile der verschiedenen Datenquellen optimal nutzen zu können. An dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass die Modelle reine Wachstumsmodelle sind und keinerlei Risiko beinhalten. Alle Projektionen setzen voraus, dass der Bestand bis in das jeweilige Alter überlebt.

Modellentwicklung Sämtliche Effekte der Prädiktoren wirken auf den Parameter A , also die logarithmierte Hg im Alter 100. Die Parameter B , c und λ wurden vorab baumartenspezifisch anhand der langfristigen Versuchsflächendaten hergeleitet. Hierbei ist zu beachten, dass die atmosphärischen Kovariablen Temperatur, Niederschlag und Stickstoffdeposition für jedes Bestandesalter dynamisch berechnet werden. Hierdurch passt

sich die resultierende Kurve dynamisch über das Bestandesleben an die sich verändernden Standortbedingungen an.

Die Effekte der atmosphärischen Variablen wurden mittels eines MGAMs geschätzt (Abbildung 5). Um auch bei Schätzungen über den vom Parametrisierungsdatensatz abgedeckten Bereich hinaus plausible Werte zu erhalten, wurden die Effekte im Extrapolationsbereich modifiziert. Hierzu wurden mit Hilfe europaweiter Artverbreitungskarten Grenzwerte für die Temperatur und den Niederschlag für das Vorkommen der jeweiligen Art bestimmt. Die Modelleffekte werden gegen diese Grenzwerte gegen minus Unendlich gezwungen, (vgl. Abbildung 5). Jenseits der Grenzwerte ist keine Schätzung möglich. Für die Fichte ergab sich bei der Temperatursumme in der Vegetationsperiode ein Bereich von 1012 °C bis 3611 °C, der Niederschlag in der Vegetationsperiode musste 62 mm überschreiten. Für die Kiefer lagen die Werte bei 930°C - 3804 °C und 82 mm. Aufgrund mangelnder europäischer Karten wurden für die Douglasie 1000 °C - 4000 °C bzw. 50 mm gesetzt. Zusätzlich wurden unplausible Muster des Stickstoffeffektes bei Fichte und Douglasie mit Hilfe linearer Funktionen gutachtlich korrigiert.

Es zeigt sich hinsichtlich der Temperatursumme eine klare Staffelung der Optima, mit der Fichte um 2200°C, der Douglasie um 2500°C und der Kiefer um 2800°C. Durch die oben gesetzten Grenzwerte wird das Wachstum der Douglasie jedoch als am robustesten gegenüber steigenden Temperaturen eingestuft, gefolgt von Kiefer und Fichte. Bei den Temperaturen unterhalb des Optimums zeigt die Kiefer die schwächste Reaktion, bei Fichte und Douglasie ist ein stärkerer Abfall zu beobachten. Bezüglich der Wirkung des Niederschlags ähneln sich die Reaktionen der Baumarten, bei der Kiefer ist jedoch auch hier eine geringere Reaktion auf sinkende Werte zu beobachten. Beim Stickstoff zeigen Kiefer und Douglasie ein Optimum. Bei der Fichte war kein solches erkennbar, sie reagiert jedoch stärker auf sinkende Depositionen.

Die Standortskomponente Boden ging über kategoriale Variable der verschiedenen Standortkartierungsverfahren in die Modelle ein (Abbildung 6). Hinsichtlich der WHZ zeigt sich im Bergland bei Fichte und Douglasie eine stetige Zunahme des Wachstums von schwach wasserversorgten (T1) zu gut wasserversorgten (T5) Böden. Die Kiefer hingegen zeigt ein Optimum bei T4, T5 war hier jedoch relativ schwach abgedeckt, sodass das der zugehörige Effekt statistisch nur schwach abgesichert ist. Im Tiefland weist die Kiefer hingegen kein Optimum auf, jedoch war die Kategorie T5 auch hier nur schwach im Parametrisierungsdatensatz vertreten. Im Tiefland ist die Anzahl von Beobachtungen im Douglasiendatensatz gering, die anhand der WP-KS-KW-Synopse kartiert wurde. Das resultiert in den breiten Konfidenzintervallen der Effekte bzw. der geringen statistischen Belastbarkeit von Unterscheiden bzgl. der WHZ. Bei der Fichte zeigt sich im Tiefland ein schwacher Anstieg mit zunehmender Wasserversorgung.

Bei der Nährstoffversorgung verbessert sich das Wachstum von Fichte und Douglasie von armen (6) zu reichen (1) Standorten. Die Kiefer zeigt ein Optimum bei 3 (mesotroph). Der hohe Wert bei 6 ist als Ausreißer aufgrund der schwachen Datenlage zu werten. Insgesamt ist die Wirkung der NZ baumartenübergreifend um einiges geringer als die der WHZ.

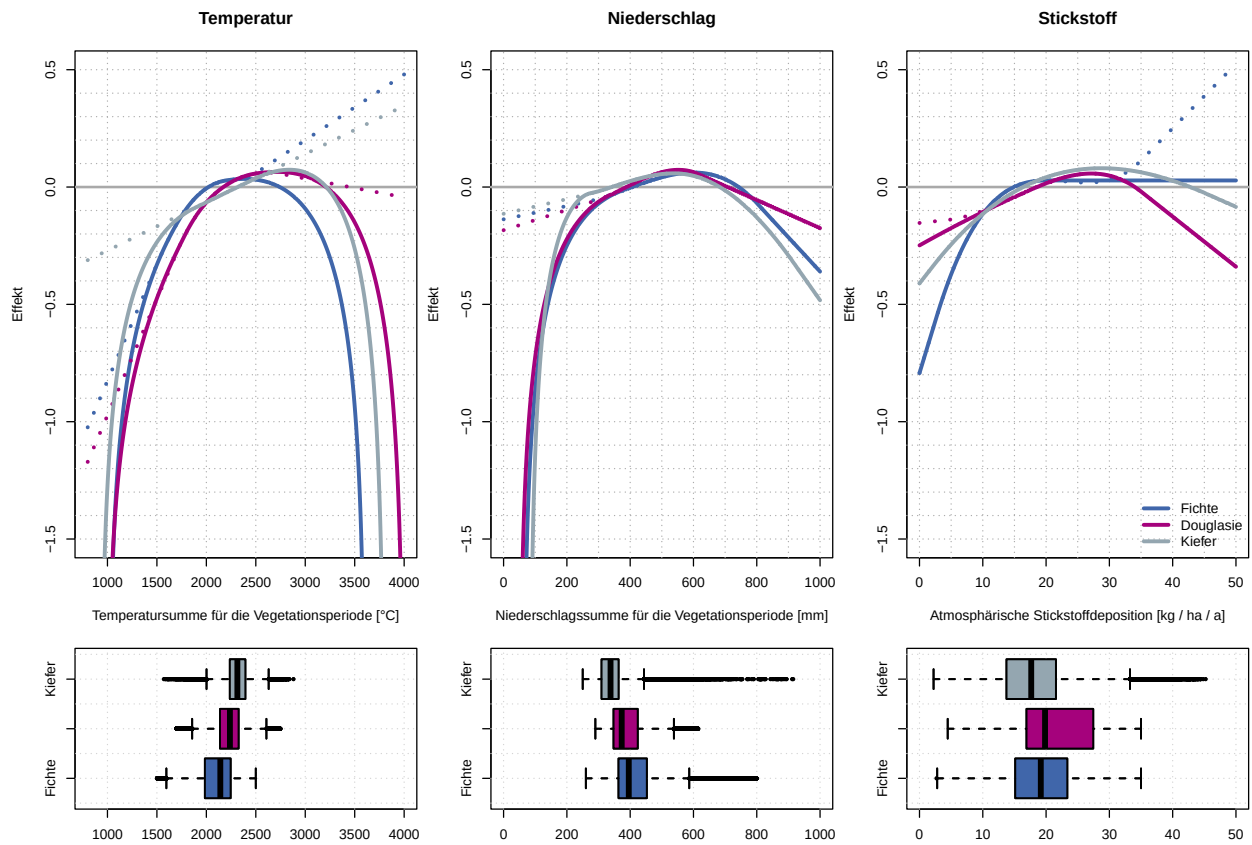


Abb. 5: Modelleffekte der atmosphärischen Kovariablen der standortssensitiven Bonitätsfächer für Fichte, Douglasie und Kiefer. Die durchgezogenen Linien beschreiben die final abgeleiteten Effekte, die gestrichelten die originären ausschließlich anhand der waldwachstumskundlichen Daten parametrisierten Effekte. Die unterhalb dargestellten Boxplots zeigen den durch den Parametrisierungsdatensatz abgedeckten Bereich an.

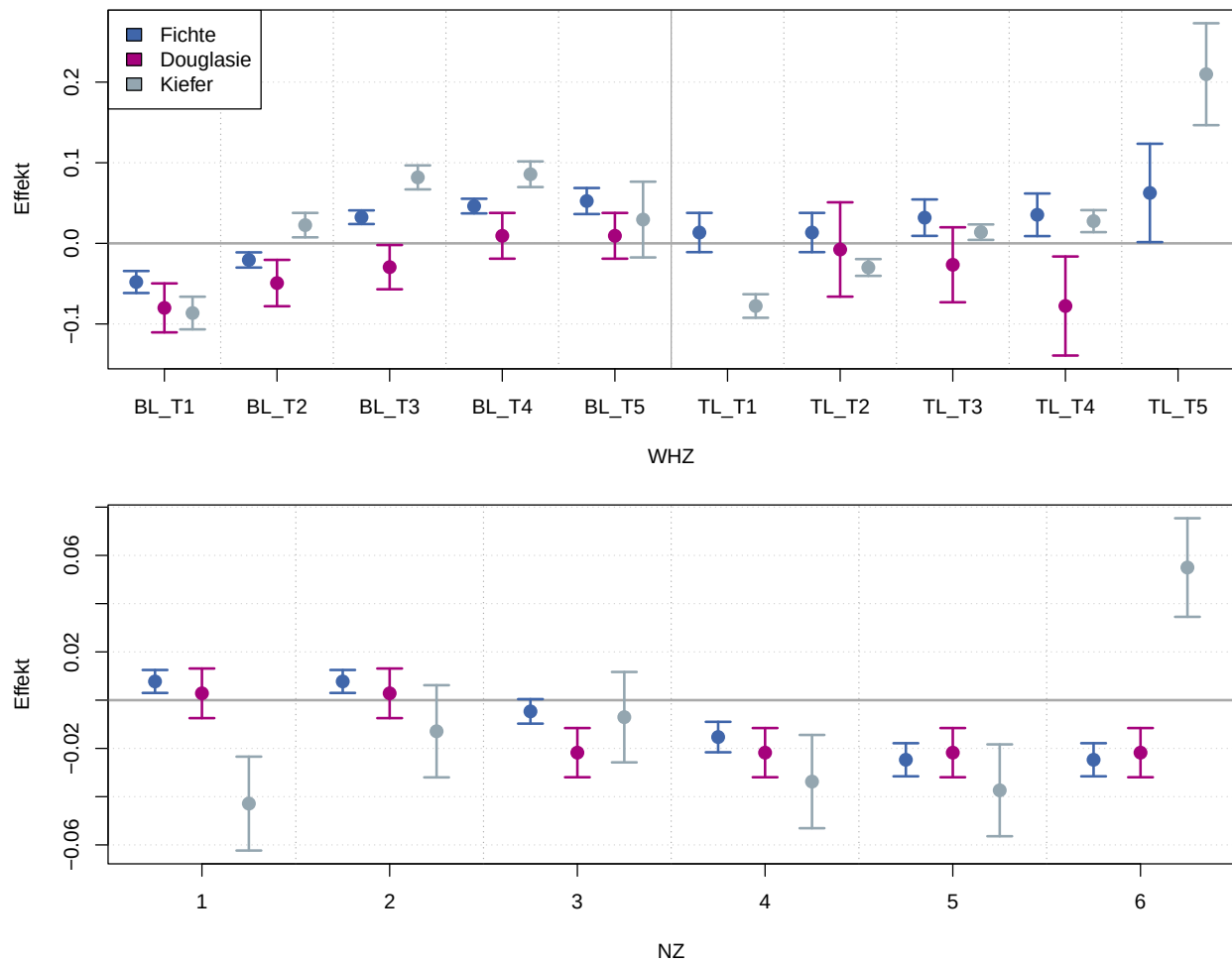


Abb. 6: Modelleffekte der Standortskategorien Wasserhaushaltsziffer (WHZ, oben) und Nährstoffziffer (NZ, unten) entsprechend der WP-KS-KW Synopse in den standortssensitiven Bonitätsfächer für Fichte, Douglasie und Kiefer. Dargestellt sind die Effekte inklusive 2-fachem Standardfehler.

Sensitivitätsanalyse Für eine qualitative und quantitative Interpretation und Beurteilung der Wirkung der Standorteffekte wurde eine Sensitivitätsanalyse im direkten Baumartenvergleich durchgeführt (Abbildung 7). Hierbei sollte darauf hingewiesen werden, dass sich speziell die Temperatursummen stark in den Extrapolationsbereich entwickeln, wenn Bedingungen berücksichtigt werden, wie sie gegen Ende des 21-ten Jahrhunderts projiziert werden. Die maximalen Werte im Parametrisierungsdatensatz waren 2500 °C (Fichte), 2750 °C (Douglasie) und 2880°C (Kiefer), wohingegen die Sensitivitätsanalyse bis 3500 °C reicht (Abbildung 5).

Die Fichte reagiert sehr viel deutlicher auf die steigenden Temperaturen, bei 3500 °C ist kaum noch Wachstum möglich (vgl. Effekte). Die Wuchsleistung von Douglasie und Kiefer ist in diesem Bereich noch erheblich höher. Auch die verschiedenen Optima der Baumarten zeichnen sich klar ab. Die Kiefer weist insgesamt die geringste Amplitude auf. Der Niederschlag in der Vegetationsperiode wird von 200 mm bis 600 mm variiert. In diesem Bereich zeigt sich bei allen drei Baumarten zunehmendes Wachstum mit zunehmendem Niederschlag bis 550 mm. Bei Kiefer und Douglasie folgen lediglich marginale nicht signifikante Wachstumsdepressionen im Bereich von 550 mm bis 600 mm, die Fichte profitiert auch hier weiterhin, da ihr Optimum erst jenseits der 600mm liegt. Auch hier reagiert die Kiefer am schwächsten auf sich ändernde Bedingungen. Beim Stickstoff zeigt sich bei der Fichte klar die Sättigung ab 20 kg Ha⁻¹ Jahr⁻¹, allerdings reagiert diese stärker auf verminderte Stickstoffdeposition als die anderen Baumarten. Bei Douglasie und Kiefer zeigt sich jeweils ein Optimum um 30 kg Ha⁻¹ Jahr⁻¹, wobei der projizierte Wachstumsrückgang bei der Douglasie mit weiter steigenden Depositionsraten deutlich stärker ist als bei Kiefer. Beide Baumarten reagieren deutlich schwächer auf verringerte Depositionen als die Fichte.

Für eine vertiefte Beurteilung des Modellverhaltens anhand von konkreten Standorten wurde die Höhenwuchsleistung entlang eines Standortgradienten an acht, quer durch Deutschland verteilten Punkten (vgl. Abbildung 8) für die zwei Keimjahre 1925 und 2025 jeweils bis zum Alter von 100 projiziert. Der Boden wurde hierbei vernachlässigt, bzw. es wurden einheitlich mittlere Bedingungen bzgl. des Geländewasser- und Nährstoffhaushaltes unterstellt, um speziell die Wirkung der dynamischen atmosphärischen Variablen abzubilden. An dieser Stelle sei nochmals betont, dass die Standort-Leistungs-Modelle keinerlei Risiko berücksichtigen.

In den Ergebnissen zeigen sich durchaus unterschiedliche Auswirkungen des Klimawandels. Vergleicht man die Wachstumsgänge, die durch die 2 Keimjahre spezifiziert werden, für die höheren, kühlen Lagen (Feldberg und Zeterklippen), so profitieren alle Baumarten von den steigenden Temperaturen, ihr Wachstum erhöht sich deutlich. In aktuell schon warmen Gegenden hingegen (Lorsch und Lörrach) wirkt sich der Klimawandel durchweg negativ auf die Höhenwuchsleistung aus. Alle 3 Baumarten verzeichnen Einbußen in der Wuchsleistung. Für die aktuell mittleren Standorte ergibt sich ein differenziertes Bild. Bei Ulrichstein bspw. ergeben sich im Alter 100 nur marginale Unterschiede in der erwarteten Höhenwuchsleistung in Abhängigkeit der beiden Keimjahre. An den aktuell bzgl. der Niederschläge schon limitierten Standorten Dübener Heide und Oranienburg zeigt die Fichte zukünftig stärkere klimawandelbedingte Einbußen, wohingegen Kiefer und Douglasie keine großen Unterschiede im Vergleich der Wuchsleistung in Abhängigkeit der beiden Keimjahre aufweisen. Ergänzend ist anzumerken, dass die steigenden Stickstoffdepositionen der letzten Dekaden das Wachstum insgesamt begünstigt haben und sich leicht verschlechternde, klimatische Bedingungen kompensieren können.

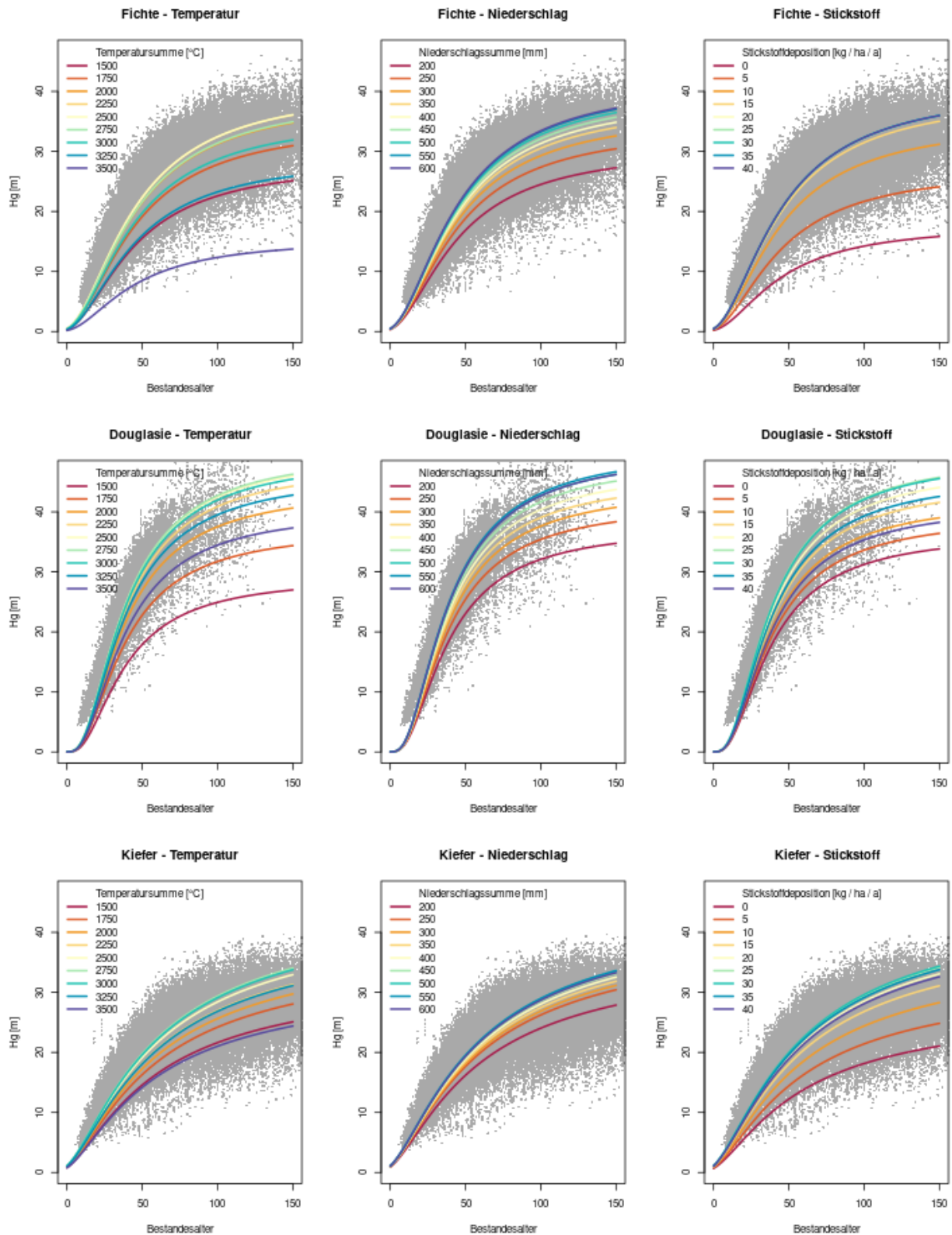


Abb. 7: Sensitivitätsanalyse der verwendeten Modelle hinsichtlich der atmosphärischen Variablen. Je Plot wurde eine Variable schrittweise erhöht, für die übrigen Variablen wurde der Erwartungswert verwendet, ergo ‘mittlere Bedingungen’.

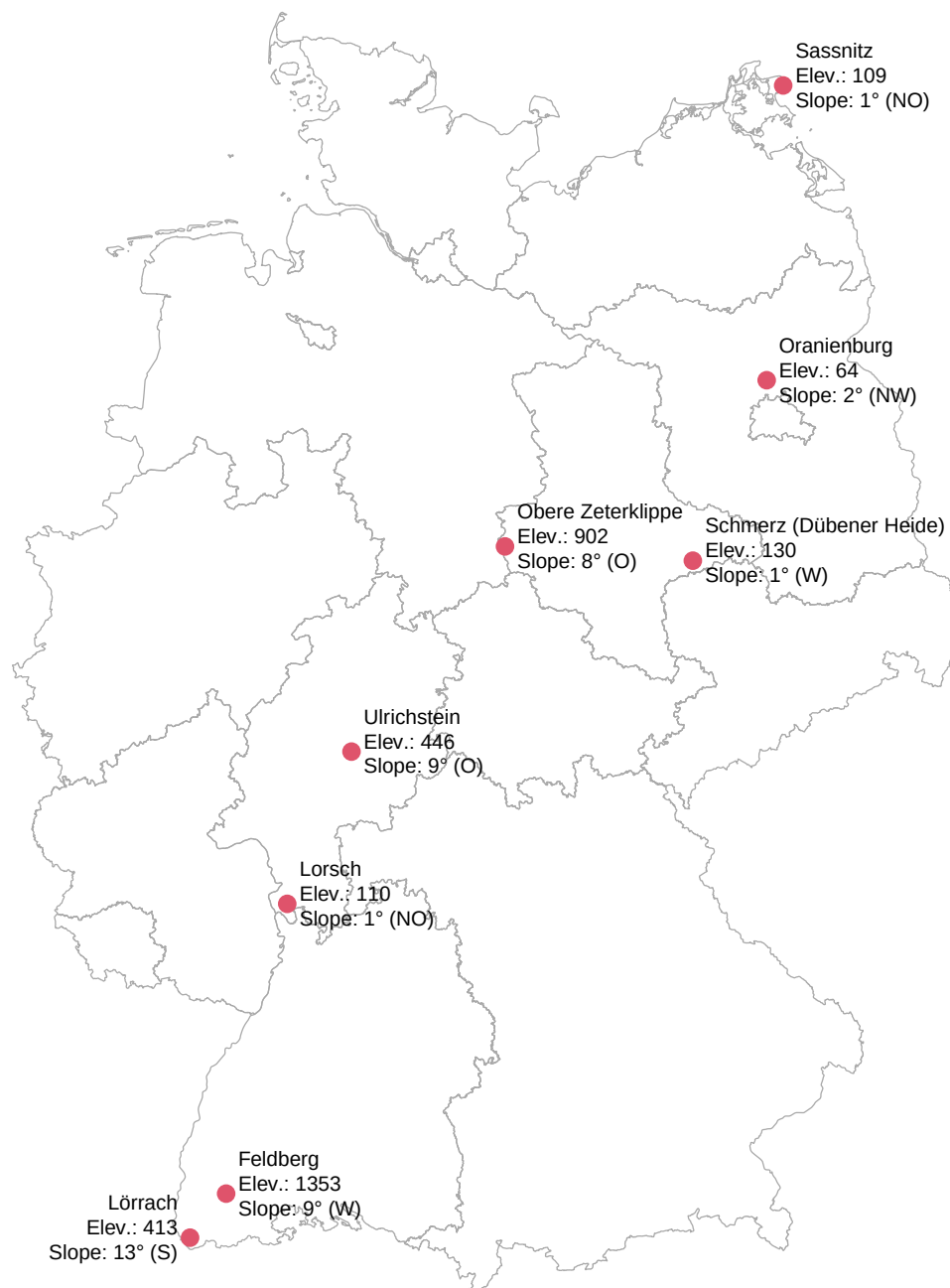


Abb. 8: Verortung und topographische Grunddaten der exemplarischen Waldflächen, deren atmosphärische Standortparameter für die Sensitivitätsanalyse verwendet wurden.

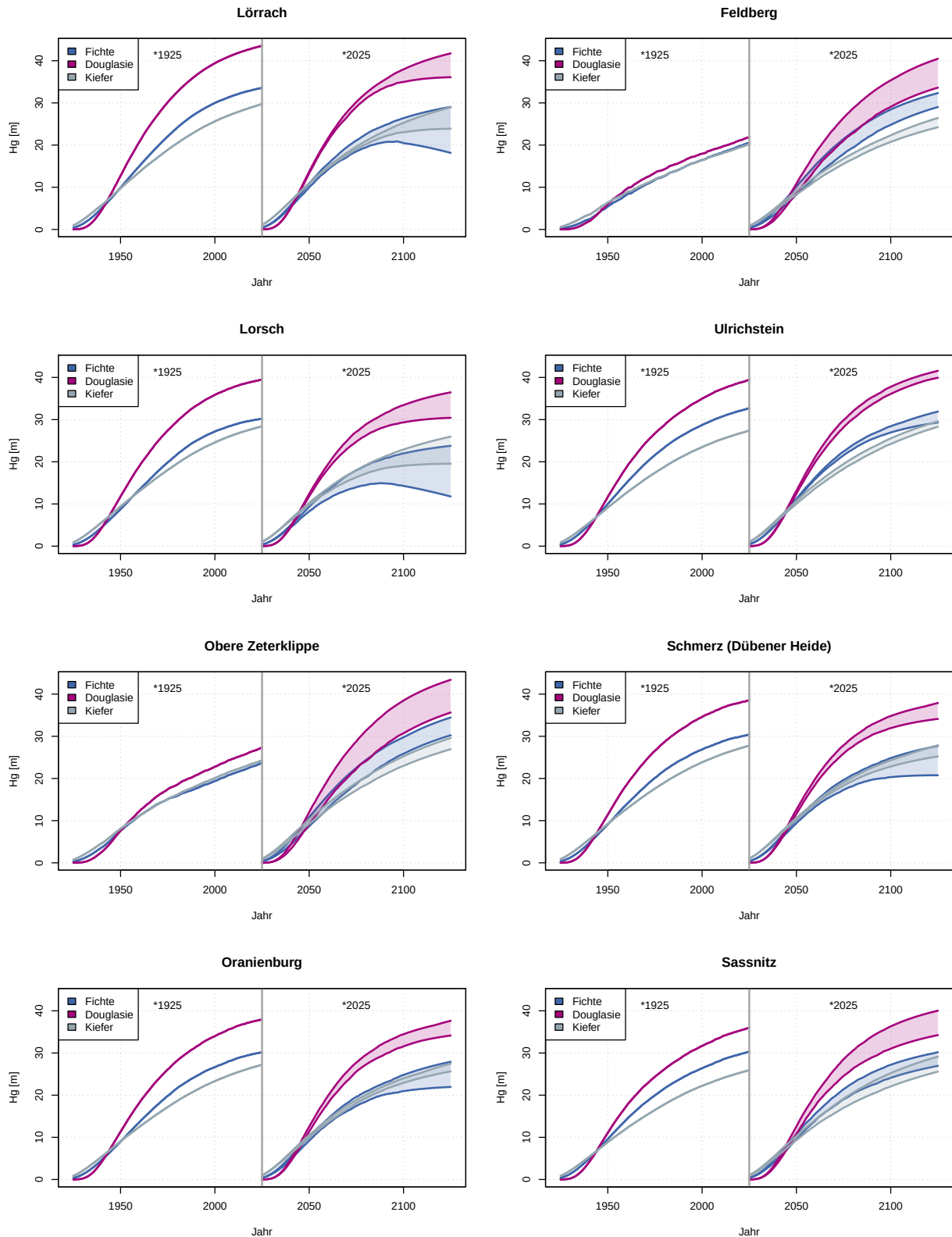


Abb. 9: Hg-Alters-Entwicklungen für exemplarische Waldflächen für Fichte, Douglasie und Kiefer und für die Keimjahre 1925 und 2025 bis zum Alter 100. Ab 2022 wurden 7 Klimaprojektionen des ReKliEs-Kernensembles (RCP 8.5) verwendet, die Schattierungen zeigen die aus dem Ensemble resultierende Spannweite der Projektionen.

Arbeitspaket 3: Entwicklung, Parametrisierung und Validierung von standortsensitiven Zuwachsmodellen

Das vorliegende Teilprojekt sollte Einschätzungen für die Produktivitätsentwicklung der Baumarten Kiefer und Douglasie liefern. Die Produktivität von Waldbeständen wurde in der Waldwachstumskunde historisch in Form von verschiedenen Konzepten quantifiziert, die mit der Erlangung neuer Erkenntnisse erweitert wurden. Im Rahmen des Teilprojektes wurde eine zusätzliche Erweiterung der bisher bekannten Konzepte vorgenommen.

Das bedeutsamste Ausgangskonzept ist das der *Höhenbonität*, welches seinerseits auf der als *Grundbeziehung* bezeichneten Beziehung zwischen dem Alter und der Höhe eines Waldbestandes beruht. Diese Beziehung bildet noch heute die Grundlage forstlicher Ertragstafeln. Sie wurde Ende des 19. Jhd. erstmalig beschrieben, nachdem beobachtet wurde, dass die Beziehung zwischen Bestandesalter und -Höhe der Beziehung zwischen dem Vorrat und dem Bestandesalter gleicht (Baur 1881; Skovsgaard und Vanclay 2008). Bei der Entwicklung des Konzeptes der Grundbeziehung ging man davon aus, dass das Gesamtvolumen zweier Bestände bei gleicher Bestandeshöhe ebenfalls gleich ist (Eichhorn 1902). Die Annahme war zur damaligen Zeit plausibel, da Bestände kaum durchforstet wurden und davon ausgegangen werden konnte, dass die Gesamtwuchsleistung (GWL) eines Bestandes zu jedem Zeitpunkt ungefähr dem Vorrat entsprach. Später wurden die Durchforstungen jedoch intensiviert, so dass die Gesamtwuchsleistung stärker vom Vorrat abweichen konnte. Um die intensivere Vornutzung in die Beschreibung der Produktivität einzubeziehen, wurde die Beziehung Vorrat-Höhe durch GWL-Höhe ersetzt (Gehrhardt 1923). Diese als *Hilfsbeziehung* bezeichnete Beziehung ist auch als *allgemeines Ertragsniveau* bekannt. Ist die Grundbeziehung bekannt, kann über die Hilfsbeziehung die Endbeziehung GWL-Alter formuliert werden. Eine zusätzliche Erweiterung zum *speziellen Ertragsniveau* erfolgte als deutlich wurde, dass die Beziehung GWL-Höhe sich je nach Standortsgüte unterscheidet. Dabei wird die GWL über Höhe und Bonität beschrieben (Wiedemann 1943). Schließlich zeigte sich, dass auch bei gegebener Höhe und Bonität noch standörtliche Variationen in der GWL zu beobachten sind, was zur Entwicklung des *untergliederten speziellen Ertragsniveaus* führte (Assmann 1943).

Sämtliche hier beschriebenen Beziehungen sind lange Zeit rein empirisch hergeleitet und in regional spezifischen Ertragstafeln für verschiedene Baumarten festgehalten worden. Damit gehören Ertragstafeln zu den phytozentrischen Modellen (Bontemps und Bouriaud 2013). Angesichts der sich ändernden Klimabedingungen wurden in der Waldwachstumsmodellierung allerdings bereits zahlreiche phyto-geozentrische Modelle entwickelt, welche beispielsweise die Einzelbaumhöhe, Bestandeshöhen oder die Bonität abhängig von Kovariablen für Klima und Standort schätzen (Albert und Schmidt 2010; Brandl u. a. 2018; Bergès u. a. 2005; Sharma, Brunner und Eid 2012; Brandl u. a. 2014; Burggraef 2024; Pya und Schmidt 2016; Schick, Albert und Schmidt 2023). Während somit für die Erweiterung der Grundbeziehung zu einem phytozentrischen Ansatz erste Modellansätze vorliegen, fehlte bisher eine derartige Erweiterung für die Endbeziehung. Auf der Grundlage eines im Rahmen des Projektes konsolidierten Datensatz aus Langzeitbeobachtungen bestand die Möglichkeit, das untergliederte spezielle Ertragsniveau erstmalig mit kausalen Kovariablen für Klima bzw. Witterung und Standort zu beschreiben. Für die Erfassung von Witterungseffekten war es jedoch sinnvoll die GWL nicht direkt zu modellieren, sondern stattdessen den laufenden periodischen Zuwachs (1PZ). Die GWL lässt sich dann durch Summation aller Zuwächse bis zu einem beliebigen Alter berechnen. Diese Vorgehensweise orientiert sich an Schober (1960) bzw. Schmidt (1972), die das spezielle Ertragsniveau über die Beziehung durchschnittlicher Gesamtwuchs (dGZ) in Funktion der Höhen beschreiben, auch wenn hier abweichend der 1PZ in Funktion von Höhe und Alter modelliert wird. Dazu musste zunächst eine geeignete theoretische Zuwachsfunktion gefunden werden, die einerseits plausible Zuwachsverläufe gewährleistet und die sich andererseits als lineares Modell formulieren lässt. Die zweite Bedingung war notwendig, um das Modell als Generalisiertes Additives Modelle (GAM) parametrisieren zu können, um potentiell nicht-lineare Effekte der Prädiktorvariablen erfassen zu können. Als Zuwachsfunktion wurde eine linearisierte Form einer Ableitung der algebraischen Differenzenform der Sloboda-Funktion verwendet (Schönfelder, mündliche Mitteilung, vergl Sloboda 1972; Sprauer und Schmidt 2016). Die nichtlineare Ableitung der algebraischen Differenzenform beschreibt den 1PZ auf Basis von Bestandeshöhe und Alter zu Beginn einer Zuwachsperiode, was eine bereits eine Erweiterung des speziellen Ertragsniveaus darstellt (Gleichung 1). Neben der sich anschließenden Modellierung von Klimaeffekten war es zusätzlich notwendig, den Effekt der Bestandesdichte und der Stickstoffdeposition zu berücksichtigen, da der Bestandeszuwachs von der Bestandesdichte abhängt (Assmann) und Wachstumstrends aufgrund der Stickstoffdeposition zu einer tlw. deutlichen Erhöhung des Zuwachsniveaus geführt haben.

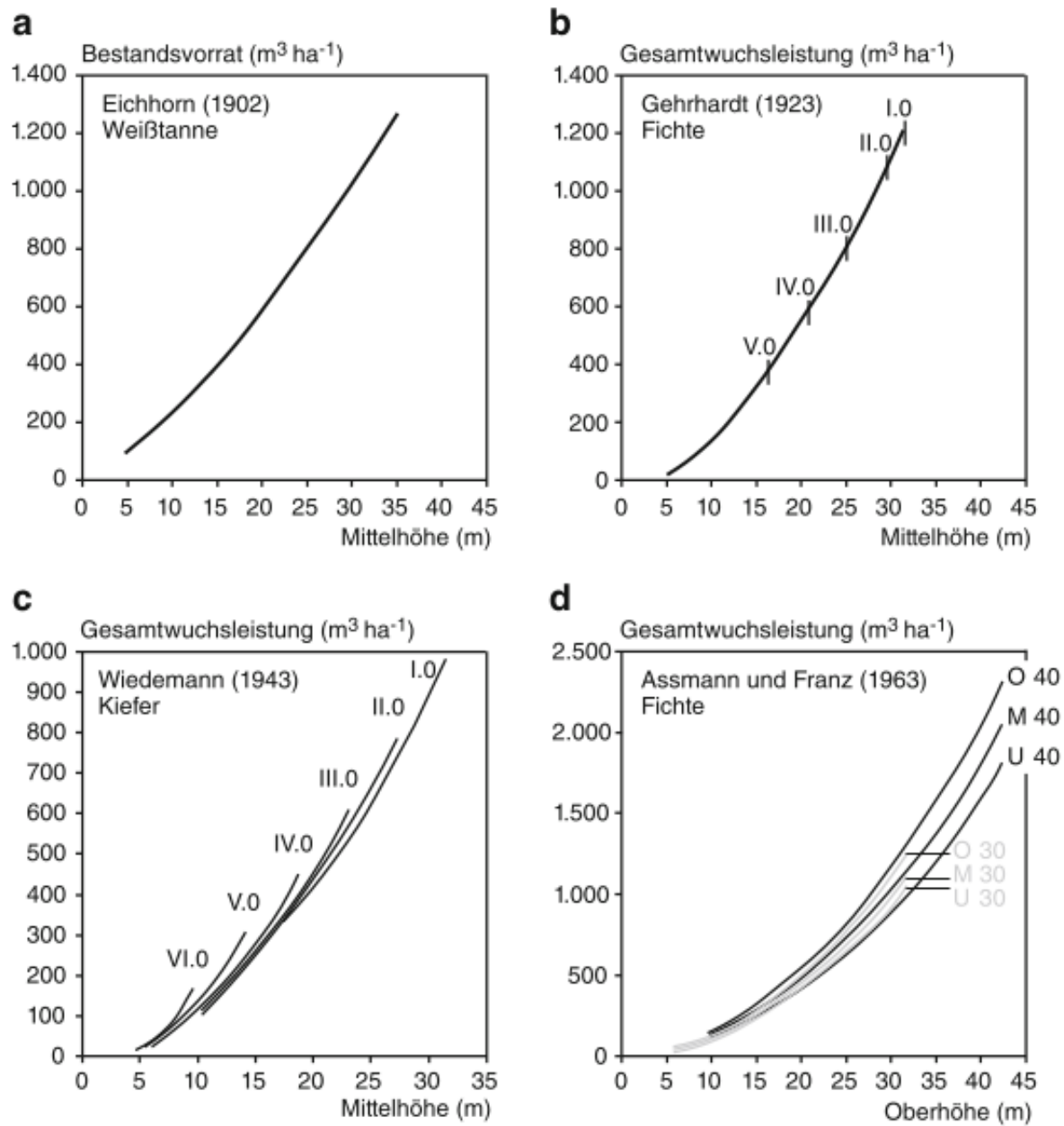


Abb. 10: Darstellung des Eichhornschen Gesetzes (a), des allgemeinen Ertragsniveaus (b), des speziellen Ertragsniveaus (c) und des untergliederten speziellen Ertragsniveaus (d). Aus Pretzsch (2019), Wiederverwendung mit freundlicher Genehmigung des Autors.

Die Modellentwicklung vom Grundmodell, das ein spezielles Ertragsniveau beschreibt, zum dichte- und klimasensitiven Modell und somit einer umfassenden standortssensitiven Erweiterung der Modellierung des Bestandeszuwachses bzw. Ertragsniveaus erfolgte über mehrere Zwischenschritte, wobei zunächst ein Ausgangsmodell für den Bestockungsgradbereich 0,9-1,1 angepasst und das Modell danach als Generalisiertes Additives Modell (GAM) beschrieben wurde (für Details, siehe Burggraef und Schmidt (2024)). Die Analysen wurden in der Statistiksoftware R mit dem Paket `mgcv` durchgeführt (Wood 2017).

$$1PZ = \frac{\beta_1 H}{\text{Alter}^{\beta_2}} - \frac{\beta_3 H}{\text{Alter}^{\beta_2}} \ln H \quad (1)$$

mit:

- **1PZ** : laufender periodischer Zuwachs in $\text{m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$
- **H** : dominante Höhe (hier: Weise'sche Oberhöhe `how`) in m
- **Alter** : Alter in Jahren
- β : Koeffizienten

Die finalen Modelle für Fichte, Douglasie und Kiefer bestehen jeweils aus einer Kaskade von drei bis vier Modellstufen. Die erste Stufe enthält den Effekt für den B° , die zweite Stufe den Effekt für die Temperatursumme (T) und die dritte Stufe den Effekt für die Stickstoffdeposition (N) (Abbildung 11 bis Abbildung 13). Bei allen Effekten ist zu beachten, dass sie nicht direkt auf den Zuwachs wirken, sondern auf den Zuwachs bei einer bereits gegebenen Bonität. Damit stellt die Beziehung 1PZ-Alter eine alternative Beschreibung des speziellen Ertragsniveaus dar.

Bei Fichte und Douglasie konnte als weitere Stufe ein Effekt für einen Ariditätsindex als signifikant identifiziert und im Modell integriert werden. Der einfache Ariditätsindex wurde als Quotient von Niederschlags- und Temperatursumme berechnet (Abbildung 14).

Die B° -Effekte zeigen für alle Baumarten einen starken Anstieg bis zu einem Art-spezifischen Wert, ab dem sich der weitere Zuwachsanstieg mit steigender Dichte stark abschwächt. Dieser Wert liegt bei Fichte und Kiefer bei ca 0,7, und bei Douglasie bei 0,9. Die Stärke des Effektes unterscheidet sich zwischen den Arten und führt im Bereich der Kulmination des 1PZ zwischen B° von 0,1 und 2,0 bei Fichte und Douglasie zu Unterschieden von ca $20 \text{ m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$. Bei der Kiefer beträgt die Differenz im Bereich der Zuwachskulmination nur etwas über über $10 \text{ m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$.

Bei den Effekten von T zeigen sich zum Teil Optimumverläufe mit einer Verschiebung der 1PZ-Kurven nach oben bzw. einer Zunahme des 1PZ vom kalten in den mittleren Temperaturbereich bis zu einem spezifischen Maximum. In Richtung höherer Temperaturen verschieben sich die Zuwachsverläufe wieder nach unten bzw. sinken die Zuwächse wieder ab (Fichte, Douglasie, Kiefer). Die T-Effekte führen zwischen den Extremwerten von 1400°C und 3000°C bei allen Baumarten im Bereich der Kulmination des 1PZ zu Verschiebungen der Zuwachskurven um ca. 5 bis $10 \text{ m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$.

Die Stickstoffdeposition N zeigt für alle drei Arten einen monoton steigenden Effekt, der bei der Douglasie eine abnehmende Steigung aufweist. Die Effekte führen bei Fichte im Bereich der Kulmination des 1PZ zu Unterschieden von ca $7 \text{ m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$, bei der Douglasie über $15 \text{ m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ und bei der Kiefer ca $10 \text{ m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$. Die Datenbasis deckt bei Fichte, Douglasie und Kiefer einen Depositionsbereich von ca $300 \text{ Eq Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ bis $3000 \text{ Eq Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ ab.

Der Ariditätsindex zeigt nur für Fichte und Douglasie plausible Effekte. Sie zeigen den Verlauf einer Sättigungskurve mit steigenden Werten unter ca. $0.18 \text{ mm}^\circ\text{C}^{-1}$ bei der Fichte und $0.14 \text{ mm}^\circ\text{C}^{-1}$ bei der Douglasie. Die Amplitude zwischen 0.1 und $0.5 \text{ mm}^\circ\text{C}^{-1}$ ist im Bereich der Kulmination des 1PZ bei der Fichte mit etwa $5 \text{ m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ etwas höher als bei der Douglasie mit ca $3 \text{ m}^3 \text{Ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$. Prinzipiell kann auch für die Kiefer ein entsprechender Effekt erwartet werden. Hier lagen jedoch zu wenige Daten insbesondere im warm-feuchten Bereich vor. Dies ist selbst bei inventurbasierten Standort-Leistungsmodellen, die i.d.R. größere Umweltgradienten abdecken, ein häufig auftretendes Problem. Hier bietet prinzipiell nur die Anlage weiterer Versuchsflächen auf Extremstandorten eine Lösung.

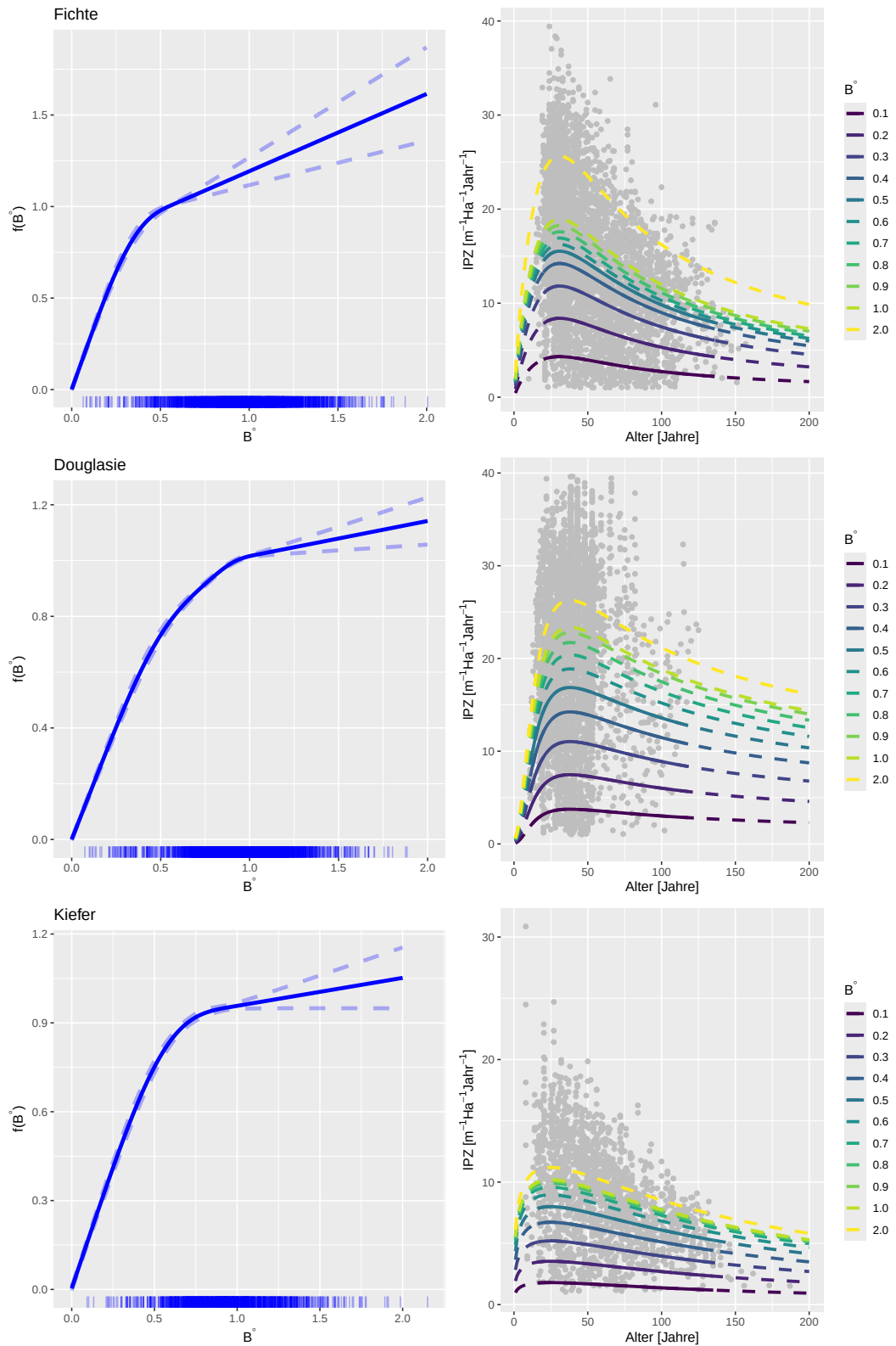


Abb. 11: Effekte des Bestockungsgrades B° (linke Spalte) auf den laufenden periodischen Zuwachs (1PZ, rechte Spalte) für Fichte, Douglasie und Kiefer. Striche (rugs) auf der X-Achse der Effekt-Plots zeigen die Verteilung der Daten an. Durchgezogene Liniensegmente in den 1PZ-Plots zeigen den durch Daten abgedeckten Bereich an, gestrichelte Segmente den Extrapolationsbereich. Graue Punkte in den 1PZ-Plots zeigen die empirischen 1PZ-Alterspaare an. Für die Projektion der 1PZ-Kurven wurde jeweils eine Weise'sche Oberhöhe (*how*) eingesteuert, die der ersten Ertragsklasse entspricht.

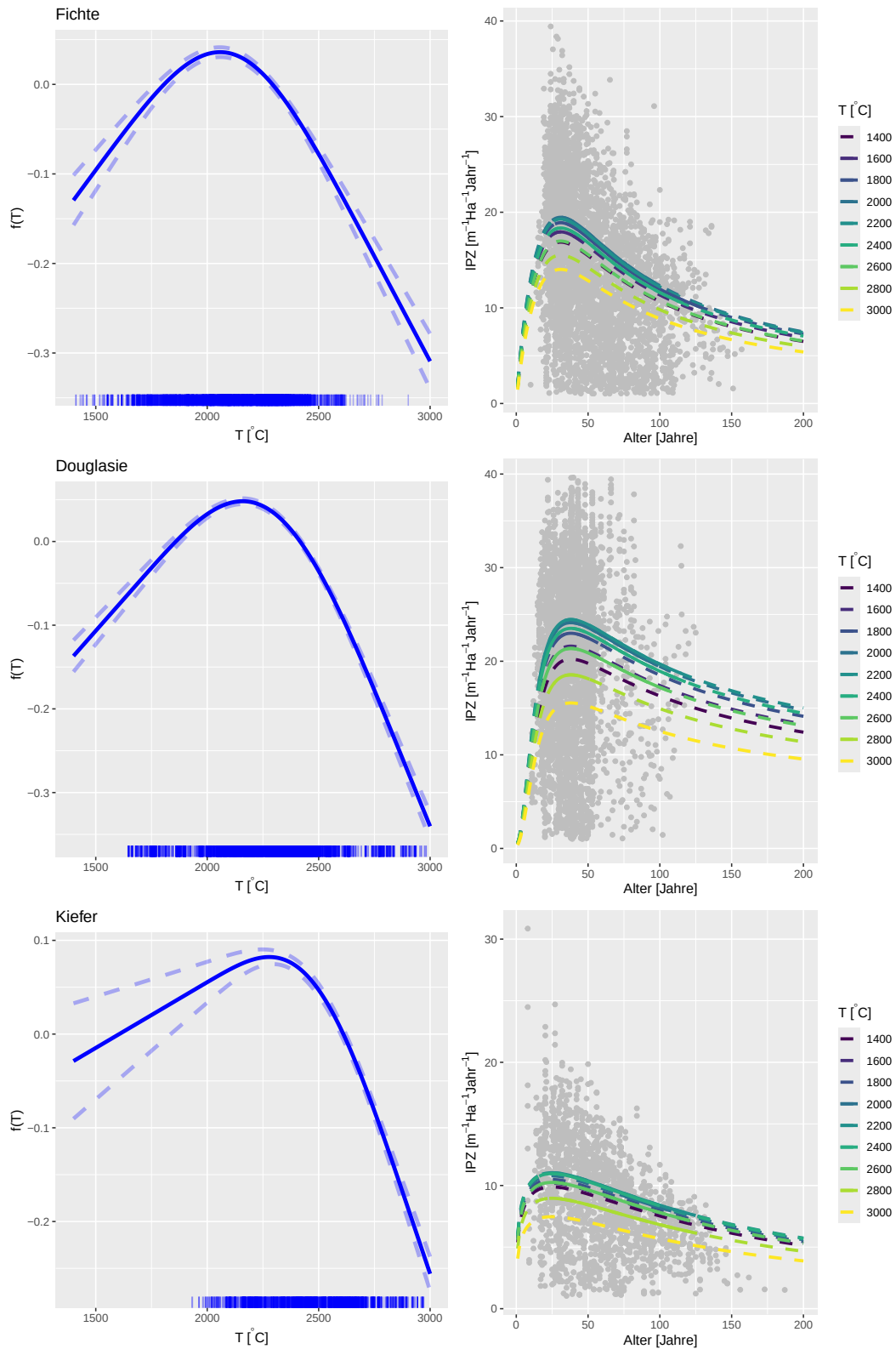


Abb. 12: Effekte der mittleren Temperatursumme (T) für die Vegetationsperiode von Aufnahme zu Aufnahme T (linke Spalte) auf den laufenden periodischen Zuwachs (1PZ, rechte Spalte) für Fichte, Douglasie und Kiefer. Striche (rugs) auf der X-Achse der Effekt-Plots zeigen die Verteilung der Daten an. Durchgezogene Liniensegmente in den 1PZ-Plots zeigen den durch Daten abgedeckten Bereich an, gestrichelte Segmente den Extrapolationsbereich. Graue Punkte in den 1PZ-Plots zeigen die empirischen 1PZ-Alterspaare an. Für die 1PZ-Kurven wurde jeweils eine Weise'sche Oberhöhe (**how**) eingesteuert, die der ersten Ertragsklasse entspricht.

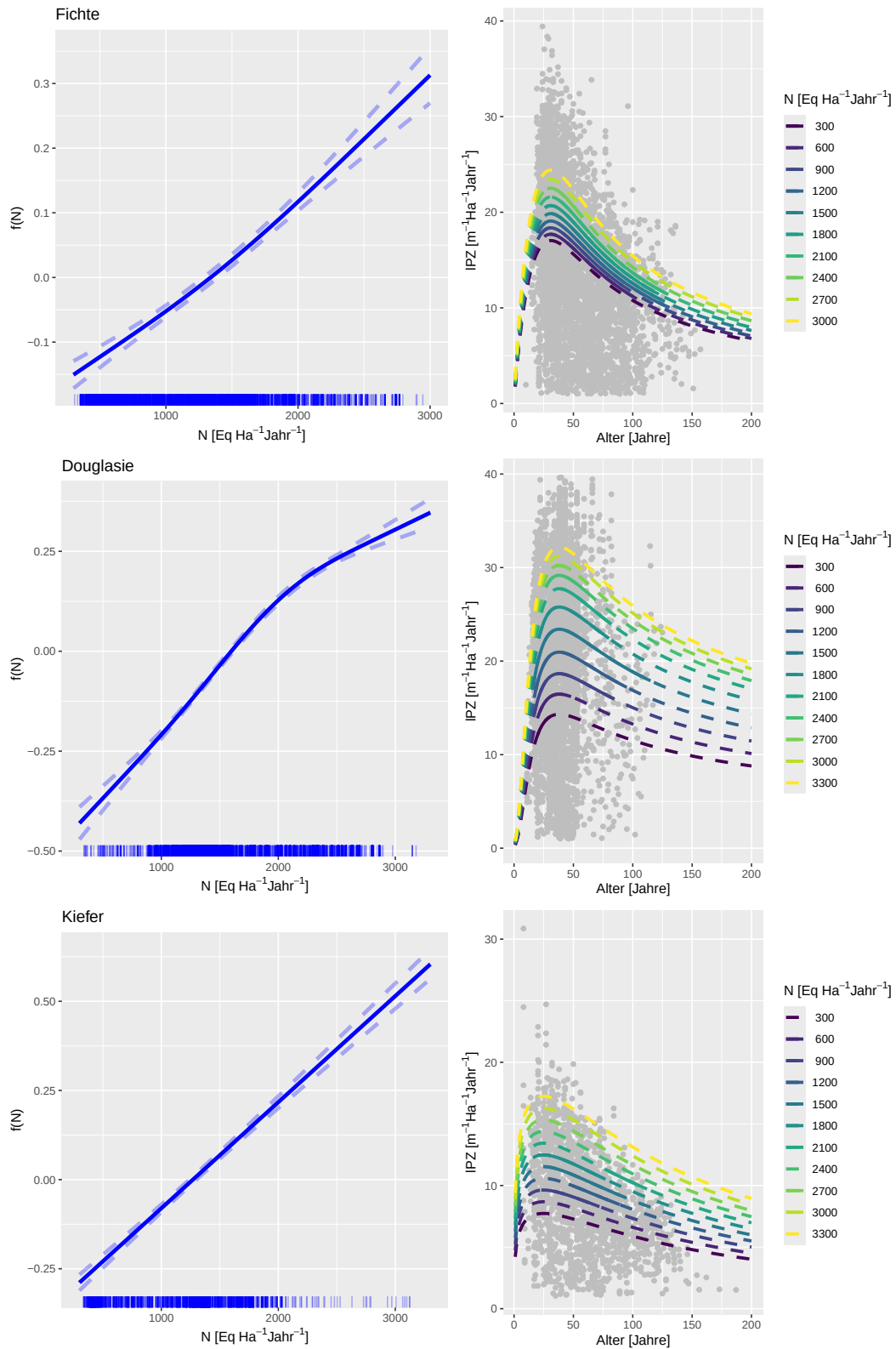


Abb. 13: Effekte der gemittelten Stickstoffdeposition (N) für die Vegetationsperiode von Aufnahme zu Aufnahme (linke Spalte) auf den laufenden periodischen Zuwachs (1PZ, rechte Spalte) für Fichte, Douglasie und Kiefer. Striche (rugs) auf der X-Achse der Effekt-Plots zeigen die Verteilung der Daten an. Durchgezogene Liniensegmente in den 1PZ-Plots zeigen den durch Daten abgedeckten Bereich an, gestrichelte Segmente den Extrapolationsbereich. Graue Punkte in den 1PZ-Plots zeigen die empirischen 1PZ-Alterspaare an. Für die Projektionen der 1PZ-Kurven wurde jeweils eine Weise'sche Oberhöhe (how) eingesteuert, die der ersten Ertragsklasse entspricht.

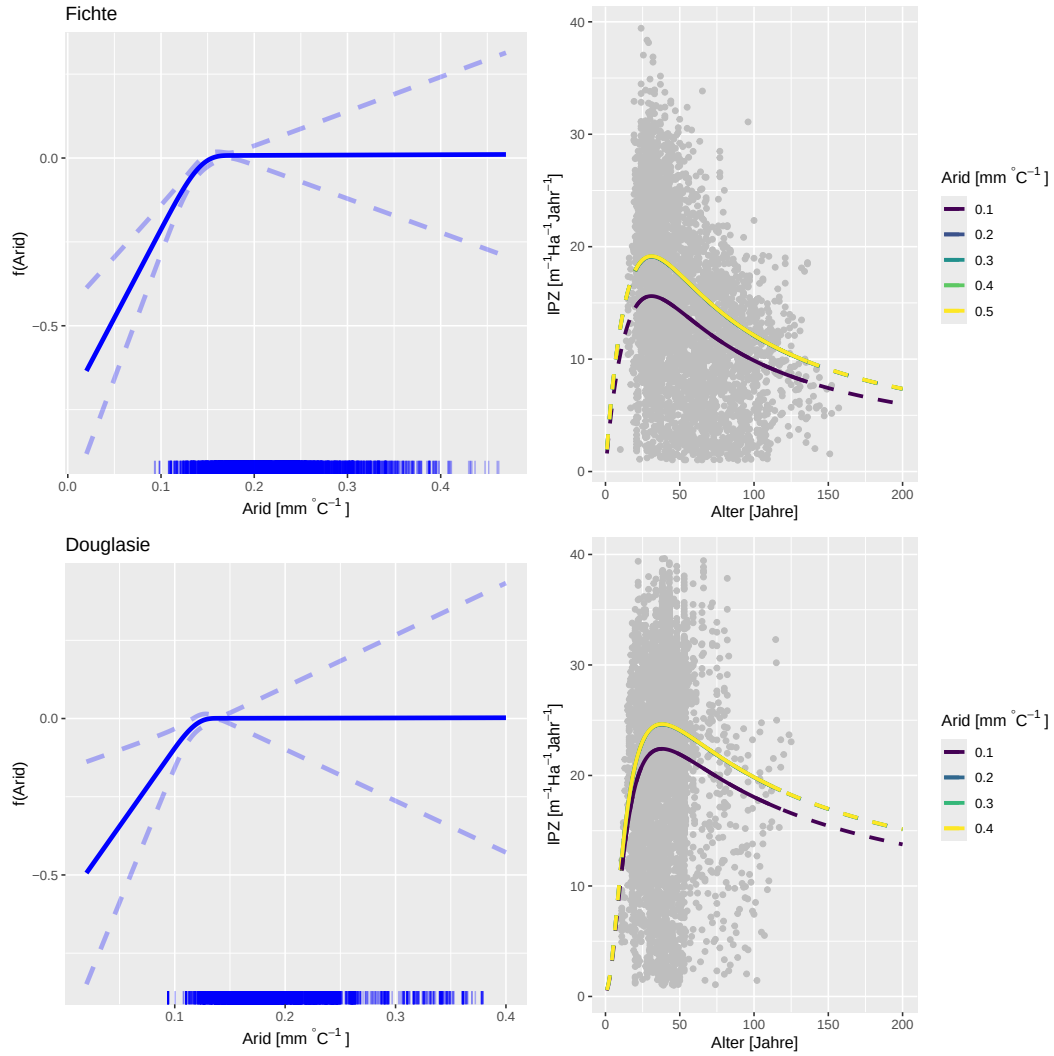


Abb. 14: Effekte des Ariditätsindex (P/T) von Aufnahme zu Aufnahme (linke Spalte) auf den laufenden periodischen Zuwachs (1PZ, rechte Spalte) für Fichte und Douglasie. Striche (rugs) auf der X-Achse der Effekt-Plots zeigen die Verteilung der Daten an. Durchgezogene Liniensegmente in den 1PZ-Plots zeigen den durch Daten abgedeckten Bereich an, gestrichelte Segmente den Extrapolationsbereich. Graue Punkte in den 1PZ-Plots zeigen die empirischen 1PZ-Alterspaare an. Für die Projektionen der 1PZ-Kurven wurde jeweils eine Weise'sche Oberhöhe (**how**) eingesteuert, die der ersten Ertragsklasse entspricht.

Arbeitspaket 4: Entwicklung umweltsensitiver, verallgemeinerter Wachstumsfunktionen für Kiefer, Douglasie (und Fichte) für die Anwendung in Wachstumssimulationen: Modellvalidierung und Szenarienbildung

In diesem Arbeitspaket wurden Sensitivitätsanalysen mit Hilfe der in AP 2 und 3 entwickelten Modelle auf Basis von Projektionen der Klima-, Witterungs- sowie Stickstoffdepositionsparameter durchgeführt. Anhand der Sensitivitätsanalyse wird exemplarisch die Relation zwischen der Produktivität der Kiefer und der Douglasie in der Vergangenheit und im Klimawandel dargestellt. Die Beantwortung dieser Fragestellung ist die übergeordnete Zielsetzung des Teilprojektes 2 innerhalb von ProFiKiD. Zusätzlich zu den beiden innerhalb von TP2 untersuchten Baumarten war es möglich, die Fichte zu bearbeiten. Damit ist ein Vergleich aller drei im Gesamtprojekt untersuchten Baumarten auf Basis eines einheitlichen methodischen Vorgehens und im Ausblick ein Vergleich mit den Ergebnissen aus TP 1 für Fichte und Douglasie möglich.

In den Sensitivitätsanalysen werden Zuwachsgänge des mittleren laufenden periodischen Zuwachs (1PZ) über dem Alter exemplarisch für die bereits in AP 2 für Sensitivitätsanalysen ausgewählten Waldstandorte durchgeführt (vergl. Abbildung 1). Als Eingangsparameter gehen die mit den standortssensitiven Bonitätsfächern (AP 2) projizierten Höhen-Alters-Entwicklungen in die Zuwachsmodele ein. Die zusätzlich benötigten Witterungs- und Depositionsparameter wurden auf Basis von Projektionen des Regionalen Klimaprojektionen Ensemble ReKliEs-De für das Emissionszenario RCP 8.5 bzw. der Stickstoffdepositionszenarien an den Waldstandorten entsprechend der in AP 3 beschriebenen Modellentwicklung aggregiert. Für alle drei Baumarten wird ein B° von 1 unterstellt.

Es wurden zwei Projektionen über 150 Jahre ausgehend von den Keimjahren 1925 und 2025 durchgeführt (Abbildung 15). Zusätzlich wurden Differenzen der projizierten 1PZ-Werte für Douglasie versus Fichte, Douglasie versus Kiefer und Fichte versus Kiefer gebildet um die Entwicklung der Produktivität von Douglasie gegenüber Fichte und Kiefer, bzw. von Fichte gegenüber Kiefer qualitativ und quantitativ analysieren und interpretieren zu können (Abbildung 16 bis Abbildung 18).

Die Verläufe der mittleren laufenden periodischen Zuwächse (1PZ) von Fichte, Douglasie und Kiefer über dem Alter zeigen zwischen den Baumarten, Standorten aber auch ausgehend von den beiden Keimjahren deutliche Unterschiede. So kulminiert der 1PZ von Fichte vor dem von Douglasie und Kiefer. Douglasie weist wie zu erwarten abgesehen vom geringeren Altersbereich die höchsten 1PZ auf, gefolgt von Fichte und Kiefer. Für die Standorte Lörrach, Feldberg, Ulrichstein, Obere Zeterklippe und Sassnitz zeigen in der Tendenz systematische Verschiebungen hin zu höheren Zuwächsen. Allerdings sind diese an den Hochlagenstandorten Feldberg und Zeterklippen viel ausgeprägter, während das Muster in Lörrach und Ulrichstein für den jungen bis mittleren Altersbereiche gilt und sich der Trend im höheren Alter tendenziell umkehrt. Dabei unterscheiden sich die Muster dbzgl. auch zwischen den Klimäläufen. In Lorsch, Schmerz und Oranienburg sind einheitlich Zuwachsverluste zu beobachten, die an den beiden letztgenannten Standorten besonders deutlich ausfallen.

Die quantitative Staffelung der Baumarten zwischen den Standorten und Klimäläufen ist ebenfalls sehr unterschiedlich. An den Hochlagenstandorten Feldberg und Zeterklippen vergrößern sich die absoluten Abstände von Fichte und Douglasie zur Kiefer, während der Abstand für Lörrach und Ulrichstein in etwa gleich bleibt. Für die Standorte Lörrach, Lorsch, Schmerz, Sassnitz und Oranienburg verringert sich der Abstand der Kiefer zu den beiden andern Baumarten. Dieses Muster ist an den klimatisch besonders ungünstigen Standorten Schmerz und Oranienburg besonders ausgeprägt. Auffällig ist die einheitlich für alle drei Baumarten und Standorte zu beobachtende Verschiebung der Kulminationszeitpunkte hin zu jüngeren Altern.

Für die Verläufe mit Keimjahr 1925 wird deutlich, dass die Douglasie im Vergleich zur Fichte bis zu einem Alter von ca. 40 Jahren an den meisten Standorten eher geringere 1PZ aufweist. Ab diesem Alter weist dann die Douglasie höhere 1PZ auf und der Abstand vergrößert sich mit zunehmendem Alter weiter, wobei der Gradient der Zunahme ab ca. 80 Jahren immer stärker nachlässt. Dieses grundlegende Muster ist erstaunlich einheitlich, wobei sich aber die absoluten Zuwachsdifferenzen zwischen den Standorten deutlicher unterscheiden. Im Vergleich der Verläufe mit Keimjahr 2025 variiert der Zeitpunkt stärker, ab dem der 1PZ der Douglasie den der Fichte überholt, wobei die Unsicherheit der Projektionen deutlich zunimmt. Dabei liegt der Zeitpunkt an den drei südlichsten Standorten eher höher, an den übrigen Standorten eher früher als Alter 40. Grundsätzlich werden die jeweiligen Muster nicht nur durch die Klima- und Witterungsparameter bestimmt, sondern auch durch die artspezifischen Effekte der Stickstoffdeposition überlagert. Die Differenz der 1PZ nimmt zukünftig

(Keimjahr 1925 versus 2025) und differenziert nach Alter tendenziell eher leicht ab. Hier stehen weitergehende Analysen auf Basis der Gesamtwuchsleistungen noch aus.

Gegenüber der Kiefer weist die Douglasie an allen Standorten über den gesamten Altersbereich einen deutlich höheren 1PZ auf. Dabei nimmt die Differenz der 1PZ mit zunehmenden Alter stark zu, um dann je nach Standort zwischen ca. 40 und 80 Jahren konstant auf dem erreichten Niveau zu verbleiben und erst mit noch höherem Alter wieder leicht abzunehmen. Dieses grundsätzliche Muster ist unabhängig von den Keimjahren 1925 und 2025. Allerdings verlagert sich der Zeitpunkt, ab dem die Differenz zwischen dem 1PZ von Fichte und Kiefer ein ungefähr konstantes Niveau erreicht, tendenziell hin zu jüngeren Altern. Die Differenzen der 1PZ nehmen für die Verläufe mit Keimjahr 1925 tendenziell ab, was besonders im Bereich der konstanten 1PZ-Differenzen und für die Standorte Sassnitz und Oranienburg deutlich wird.

Auch die Fichte weist gegenüber der Kiefer über den gesamten Altersbereich für alle Standorte und beide Ausgangskeimjahre, von Ausnahmen im hohen Altersbereich abgesehen, höhere 1PZ als die Kiefer auf. Das Muster unterscheidet sich allerdings deutlich von der Relation Douglasie versus Kiefer. So wird die größte positive Differenz bereits relativ einheitlich unterhalb von 40 Jahren erreicht. Anschließend nimmt der Vorsprung der Fichte mit steigendem Alter kontinuierlich ab. An den klimatisch besonders ungünstigen Standorten Schmerz und Oranienburg weist die Kiefer im hohen Alter in Abhängigkeit des Klimalaufs dann sogar einen leichten Vorsprung vor der Fichte auf. Der Vorsprung der Fichte nimmt im Klimawandel (Keimjahr 1925 versus 2025) an den höher gelegenen Standorten Feldberg und Zeterklippen deutlich zu. Dagegen nimmt der Vorsprung der Fichte an den klimatischen Standorten Schmerz und besonders Oranienburg deutlich ab. Je nach Klimalauf weist die Kiefer an diesen Standorten im höheren Alter auch einen Vorsprung im 1PZ vor Fichte auf. An den übrigen Standorten unterscheiden sich die Verläufe in Anhängigkeit der Keimjahre weniger, wobei auch hier die Variabilität zwischen den Klimäläufen auffällt.

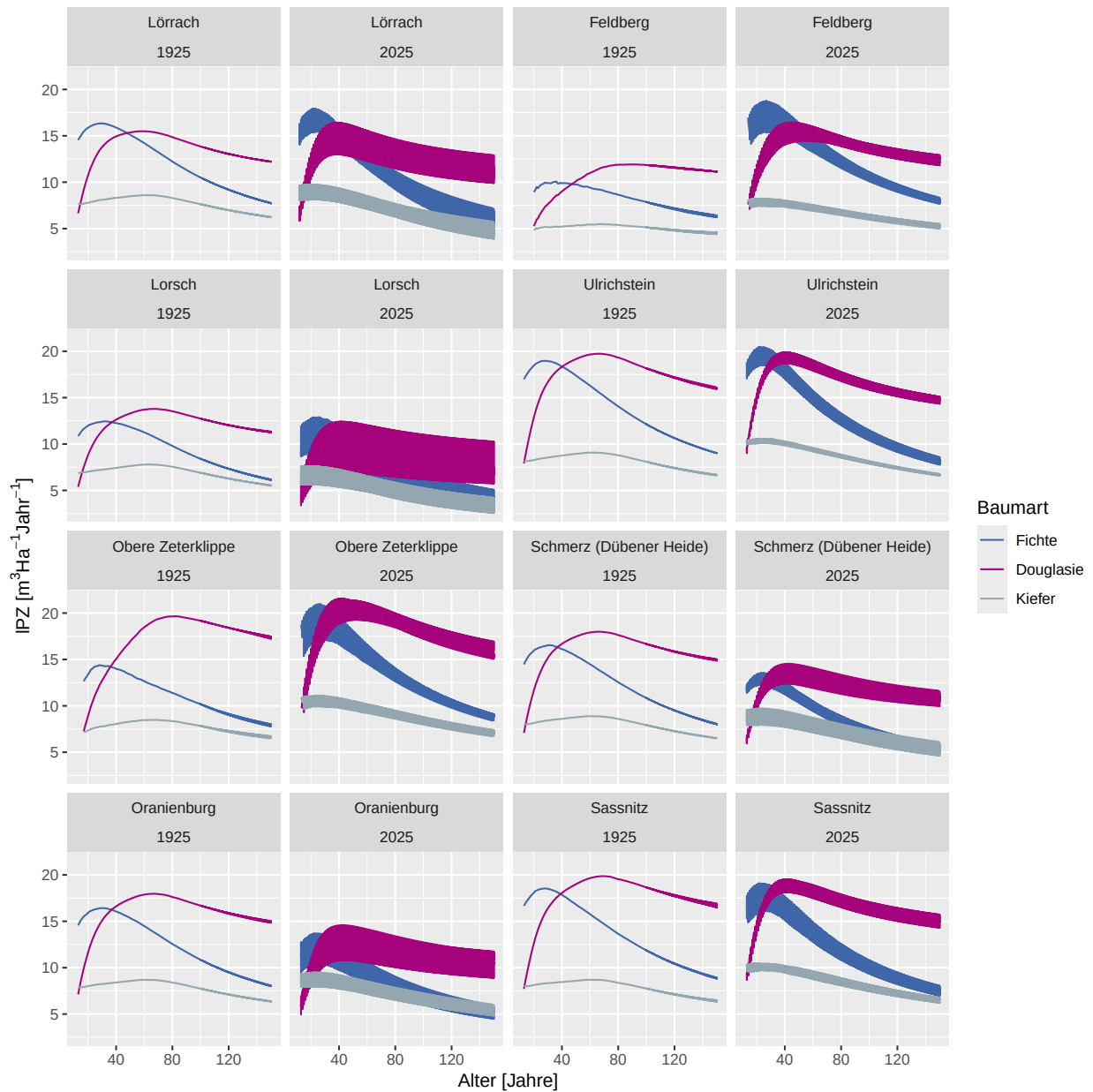


Abb. 15: Vorhersagen des laufende periodischen Gesamtwuchs 1PZ für die Fichte, basierend auf der AP 3 beschriebenen Modellkaskade, wobei Bestandesalter und Weise'sche Oberhöhe (**how**) entsprechend AP 2 verwendet wurden. Als Kovariablen gingen die projizierte Temperatursumme (**T**), Stickstoffdeposition (**N**) und der Ariditätsindex (**T/P**) ein. Die Kovariablen wurden wie in AP 3 beschrieben aggregiert. Der Bestockungsgrad (**B°**) wurde für die Projektionen auf **I** gesetzt. Die Bestände wurden für die beispielhafte Keimjahre 1925 und 2025 jeweils 150 Jahre projiziert. Die Unsicherheitskorridore für die Projektionen ab Keimjahr 2025 basieren auf dem Regionalen Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) des RCP 8.5 Emissionsszenarios.

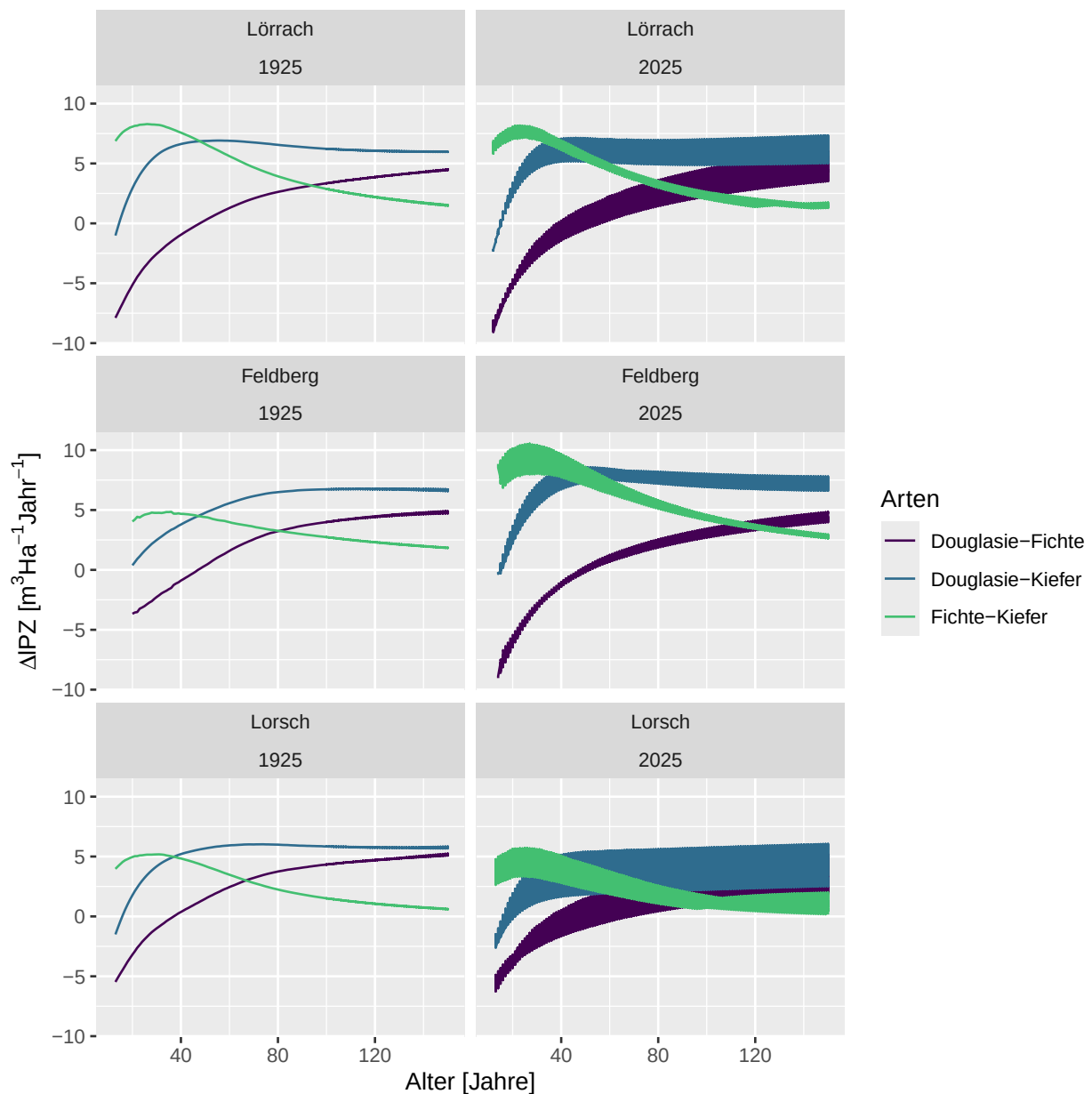


Abb. 16: Differenzen zwischen dem projizierten mittleren laufenden periodischen Zuwachs (1PZ) von Douglasie, Fichte und Kiefer für die beispielhaften Waldstandorte Lörrach, Feldberg und Lorsch (vergl. Abbildung 1).

Als Kovariablen gingen die rezenten bzw. projizierten periodischen Parameter Temperatursumme (T), Stickstoffdeposition (N) und bei Fichte und Douglasie der Ariditätsindex (T/P) und zusätzlich die Weise'sche Oberhöhe *how* für das jeweilige Alter aus den Projektionen mit Hilfe der standortsensitiven Bonitätsfächer (Abbildung 9) ein. Der Bestockungsgrad (B°) wurde für die Projektionen auf 1.0 gesetzt. Die Bestände wurden ausgehend von den beispielhaften Keimjahren 1925 und 2025 jeweils bis zum Alter 150 projiziert. Die Unsicherheitskorridore für die Projektionen ab Keimjahr 2025 resultieren aus den Regionalen Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De) des RCP 8.5 Emissionsszenarios.

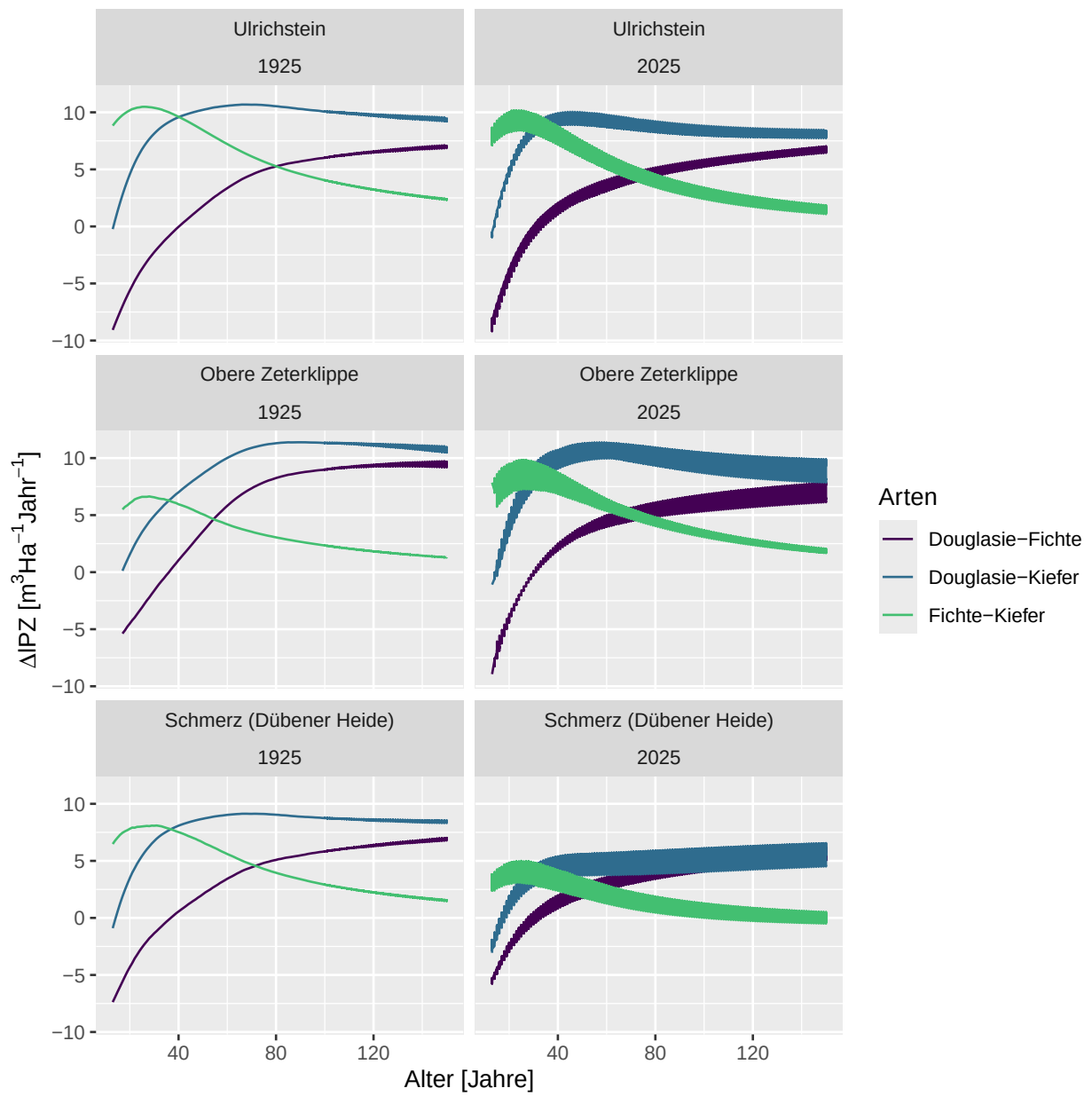


Abb. 17: Differenzen zwischen dem projizierten mittleren laufenden periodischen Zuwachs (IPZ) von Douglasie, Fichte und Kiefer für die beispielhaften Waldstandorte Ulrichstein, Obere Zeterklippe und Schmerz (Abbildung 1) (Details siehe Abbildung ??).

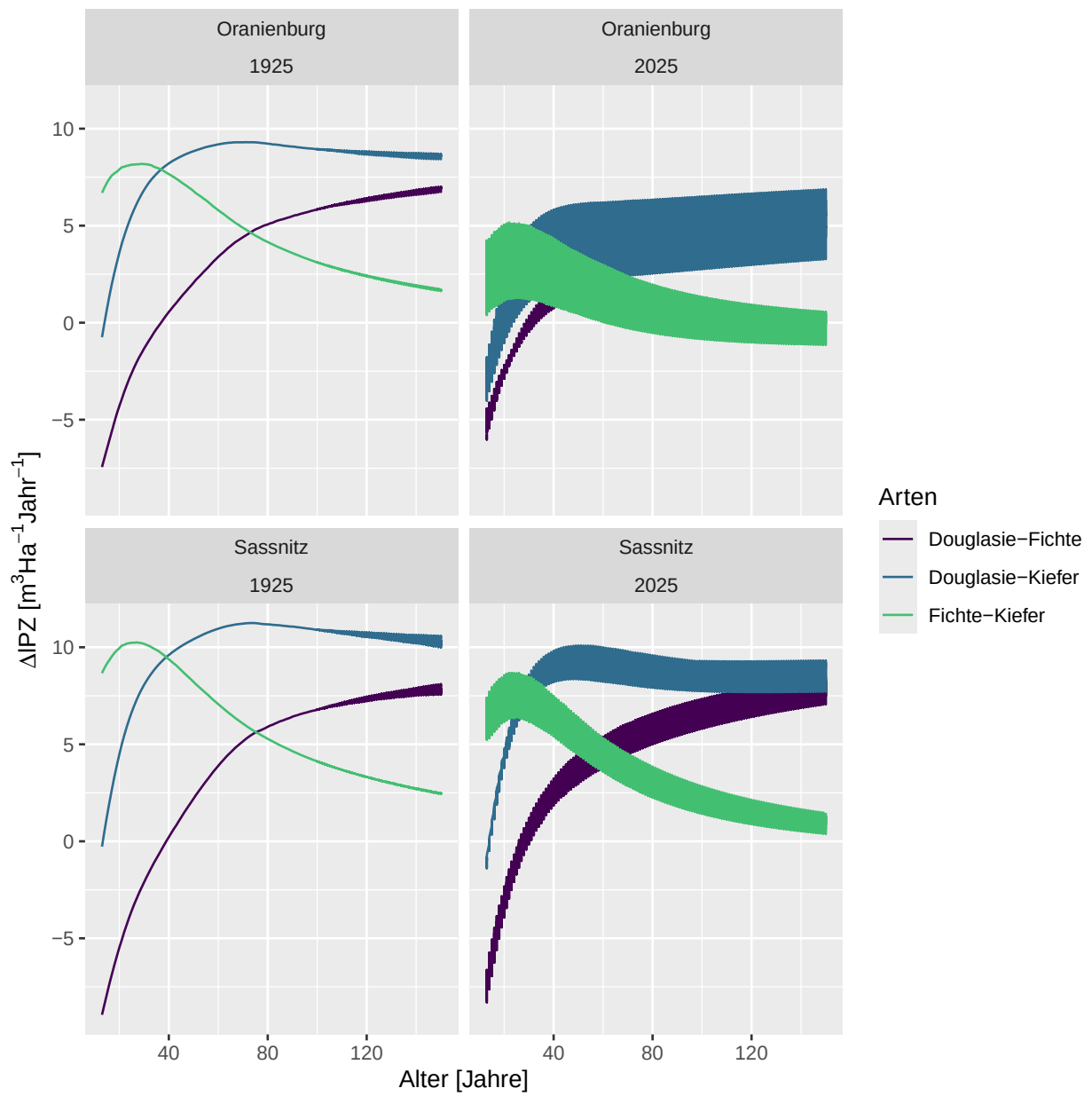


Abb. 18: Differenzen zwischen dem projizierten mittleren laufenden periodischen Zuwachs (1PZ) von Douglasie, Fichte und Kiefer für die beispielhaften Waldstandorte Oranienburg und Sassnitz (Abbildung 1) (Details siehe Abbildung ??).

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

keine

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

- Die entwickelten Modelle können nach weiteren Analysen bezüglich der identifizierten Modelleffekte eine mächtige Erweiterung für ebenfalls an der NW-FVA entwickelte Entscheidungsunterstützungsmodelle bieten. Diese werden heute bereits von Teilen der forstlichen Praxis zur Unterstützung waldbaulicher und damit auch wirtschaftlicher Entscheidungen herangezogen. Besonders die Analysen bezüglich des wirtschaftlich interessanten Baumart Douglasie sind hier von Interesse.
- Desweiteren ist eine Erweiterung von ebenfalls an der NW-FVA entwickelten dynamischen und in der Forstpraxis nutzbaren Ertragstafeln möglich. Insbesondere werden hier Vorhersagen von praktisch anwendbaren dGZ-Bonitäten angestrebt.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

- Ein Folgeprojekt, in dem die entwickelten Modelle um Daten in bisher fehlenden Extrembereiche erweitert werden und zusätzliche Modelle für die Baumarten Weißtanne, Buche, Eiche und Roteiche entwickelt werden sollen, ist in Planung. Für die Weißtanne liegen zu diesem Zeitpunkt bereits erste Modelle vor, mit denen sinnvolle Projektionen aufgrund der begrenzten Datenbasis jedoch noch nicht möglich waren.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Siehe c)

3. Erkenntnisse von Dritten

- Keine

4. Veröffentlichungen

- Burggraef, Levent S und Matthias Schmidt. 2024. Zum Zusammenhang von Oberhöhenbonität und Volumenzuwachs: ein Ansatz zur Verallgemeinerung des Ertragsniveau-Konzeptes. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA: 31-40

5. Literatur

- Albert, M und M Schmidt. 2010. Climate-Sensitive Modelling of Site-Productivity Relationships for Norway Spruce (*Picea Abies* (L.) Karst.) and Common Beech (*Fagus Sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management* 259, Nr. 4: 739–749.
- Assmann, Ernst. 1943. Untersuchungen über die Höhenkurven von Fichtenbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Nr. 119: 77–88, 105–123, 133–151.
- Assmann, Ernst und F Franz. 1963. Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Forstliche Forschungsanstalten München, Institut Ertragskunde.
- Baur, Franz. 1881. *Die Rothbuche in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form: unter Zugrundlegung der an der Kgl. Württemberg'schen Forstlichen Versuchsanstalt angestellten Untersuchungen bearbeitet*. P. Parey.
- Bergès, Laurent, Richard Chevalier, Yann Dumas, Alain Franc und Jean-Michel Gilbert. 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Annals of Forest Science* 62, Nr. 5: 391–402.
- Bontemps, Jean-Daniel und Olivier Bouriaud. 2013. Predictive Approaches to Forest Site Productivity: Recent Trends, Challenges and Future Perspectives. *Forestry* 87, Nr. 1: 109–128.
- Brandl, Susanne, Wolfgang Falk, Hans-Joachim Klemmt, Georg Stricker, Andreas Bender, Thomas Rötzer und Hans Pretzsch. 2014. Possibilities and Limitations of Spatially Explicit Site Index Modelling for Spruce Based on National Forest Inventory Data and Digital Maps of Soil and Climate in Bavaria (SE Germany). *Forests* 5, Nr. 11: 2626–2646.
- Brandl, Susanne, Tobias Mette, Wolfgang Falk, Patrick Vallet, Thomas Rötzer und Hans Pretzsch. 2018. Static Site Indices from Different National Forest Inventories: Harmonization and Prediction from Site Conditions. *Annals of Forest Science* 75, Nr. 2: 56.
- Burggraef, Levent Sebastian. 2024. Sensitivity of phyto-geocentric site productivity models to spatial extent and climate data aggregation – Dissertation to attain the doctoral degree Dr. forest of the Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology, Georg-August-Universität Göttingen. eDiss Office, Göttingen State and University Library.
- Burggraef, Levent S und Matthias Schmidt. 2024. Zum Zusammenhang von Oberhöhenbonität und Volumenzuwachs: ein Ansatz zur Verallgemeinerung des Ertragsniveau-Konzeptes. *Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA*: 31–40.
- Eichhorn, Fritz. 1902. *Ertragstafeln für die Weißtanne*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Gehrhardt, Ernst. 1923. *Ertragstafeln für Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer*. J. Springer.
- Lappi, Juha. 1997. A longitudinal analysis of height/diameter curves. *Forest Science* 43, Nr. 4 (November): 555–570.
- Nuske, Robert. 2017. vegperiod: determine thermal vegetation periods [software]. *Zenodo*. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.7272438>,.
- Nuske, Robert, Kai Staupendahl und Matthias Albert. 2022. et.nwfv: Forest Yield Tables for Northwest Germany and their Application. *R package version 0.1.1*. <https://CRAN.R-project.org/package=et.nwfv>.
- Pretzsch, Hans. 2019. *Grundlagen der waldwachstumsforschung*. Springer-Verlag.
- Pyä, Natalya und Matthias Schmidt. 2016. Incorporating Shape Constraints in Generalized Additive Modelling of the Height-Diameter Relationship for Norway Spruce. *Forest Ecosystems* 3, Nr. 1: 1–14. doi:10.1186/s40663-016-0061-z,.
- Schick, Jan, Matthias Albert und Matthias Schmidt. 2023. A new approach for modeling stand height development of German forests under climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*.
- Sharma, Ram P., Andreas Brunner und Tron Eid. 2012. Site Index Prediction from Site and Climate Variables for Norway Spruce and Scots Pine in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27, Nr. 7 (Oktober): 619–636. doi:10.1080/02827581.2012.685749,.
- Skovsgaard, J. P. und J. K. Vanclay. 2008. Forest Site Productivity: A Review of the Evolution of Dendrometric Concepts for Even-Aged Stands. *Forestry* 81, Nr. 1 (Januar): 13–31. doi:10.1093/forestry/cpm041,.
- Sloboda, Branislav. 1972. *Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung*. Baden-Württembergische Forstl. Versuchs- und Forschungsanst.
- Sprauer, Susanne und Matthias Schmidt. 2016. Modellierung des Durchmesserzuwachses von Fichten in Nordwest-Deutschland: ein Vergleich von Modellen auf Basis der Sloboda-Funktion und „empirischen“ Modellen. *Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA*: 81–88.

- Wiedemann, E. 1943. Kiefern-Ertragstafel für mäßige Durchforstung, starke Durchforstung und Lichtung.
Die Kiefer, 1948, Verlag M & H Schaper, Hannover: 337 pp.
- Wood, S. N. 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. 2. Aufl. Chapman; Hall/CRC.

6. Anhänge

Anhang 1: Detaillierte Grafiken des laufenden periodischen Zuwachses (1PZ) über Kovariablen

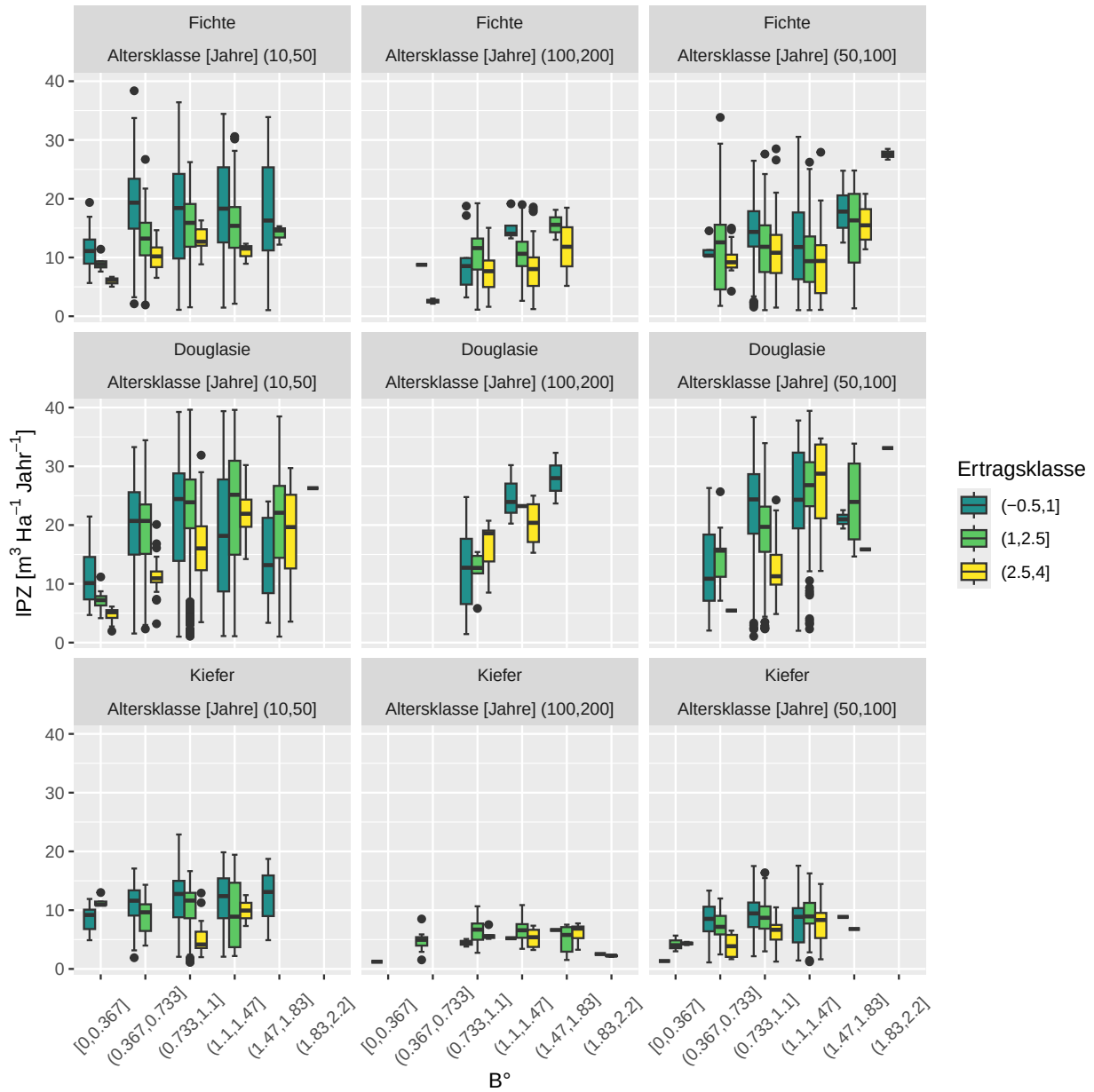


Abb. 19: Laufender periodischer Zuwachs (1PZ) über Klassen des Bestockungsgrades B° , stratifiziert nach Ertragsklasse und Bestandesalter getrennt nach Baumarten.

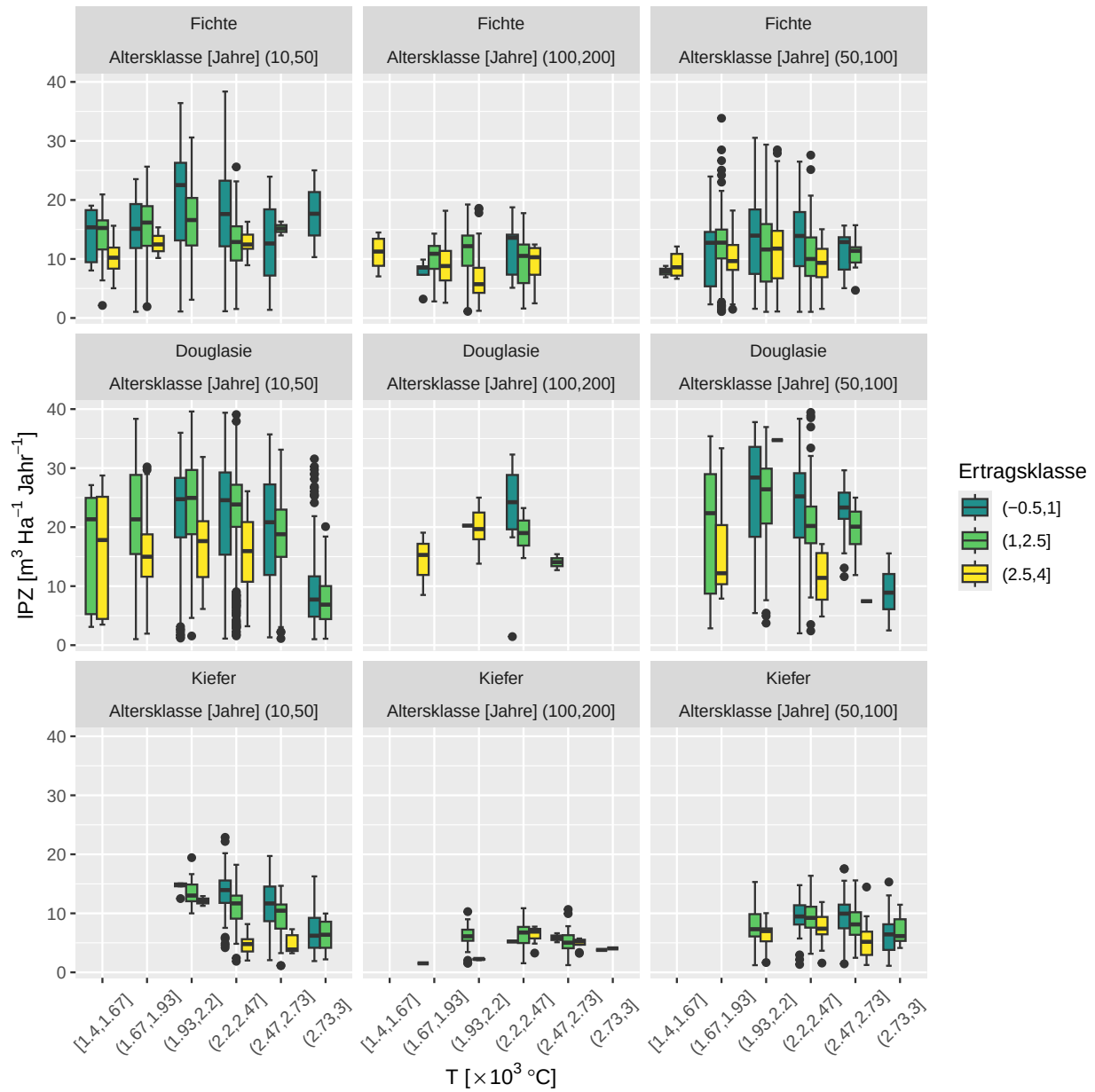


Abb. 20: Laufender periodischer Zuwachs (IPZ) über Klassen der Temperatursumme T in der Vegetationsperiode, stratifiziert nach Ertragsklasse und Bestandesalter getrennt nach Baumarten.

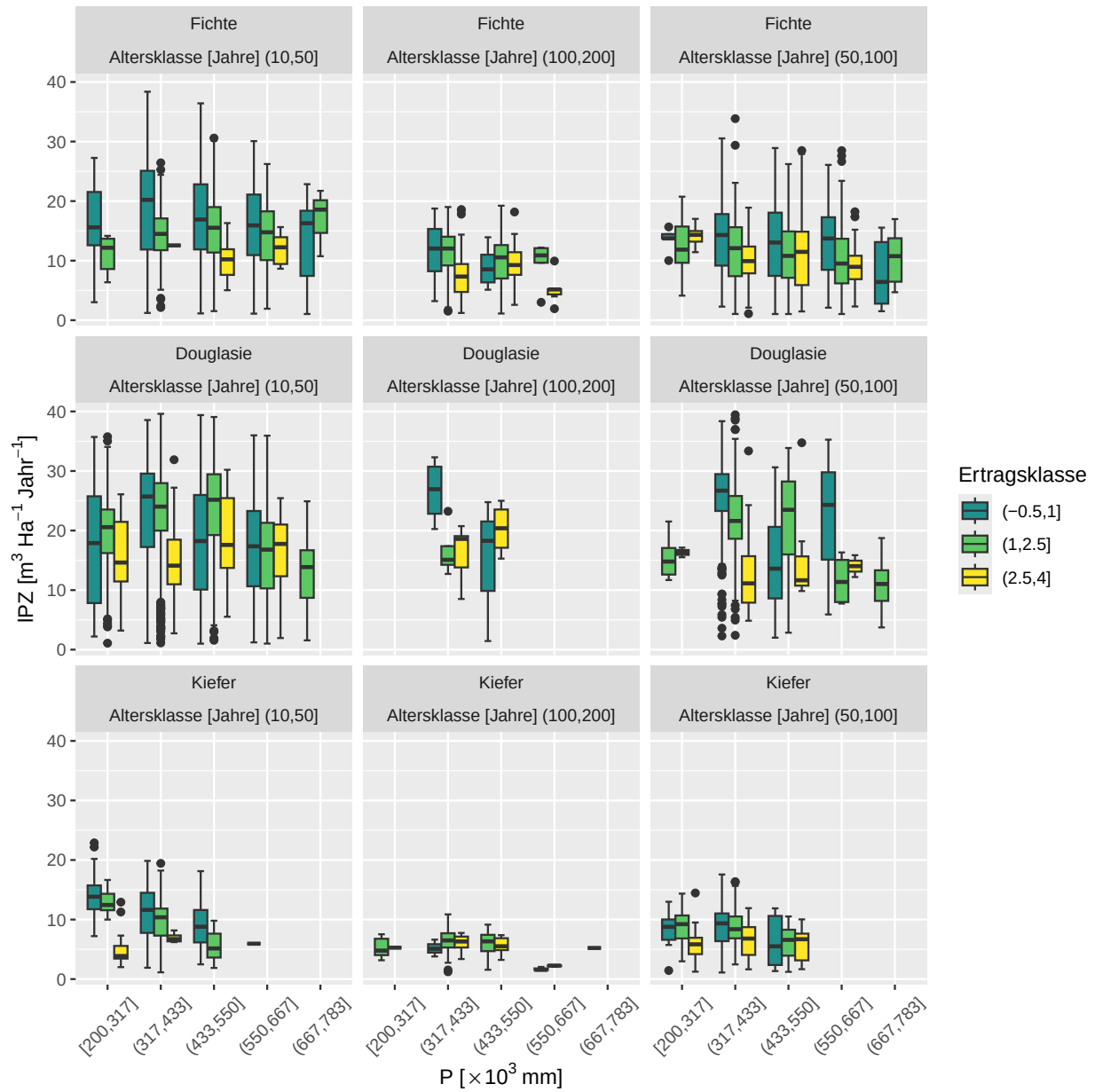


Abb. 21: Laufender periodischer Zuwachs (1PZ) über Klassen der Niederschlagssumme P in der Vegetationsperiode, stratifiziert nach Ertragsklasse und Bestandesalter getrennt nach Baumarten.

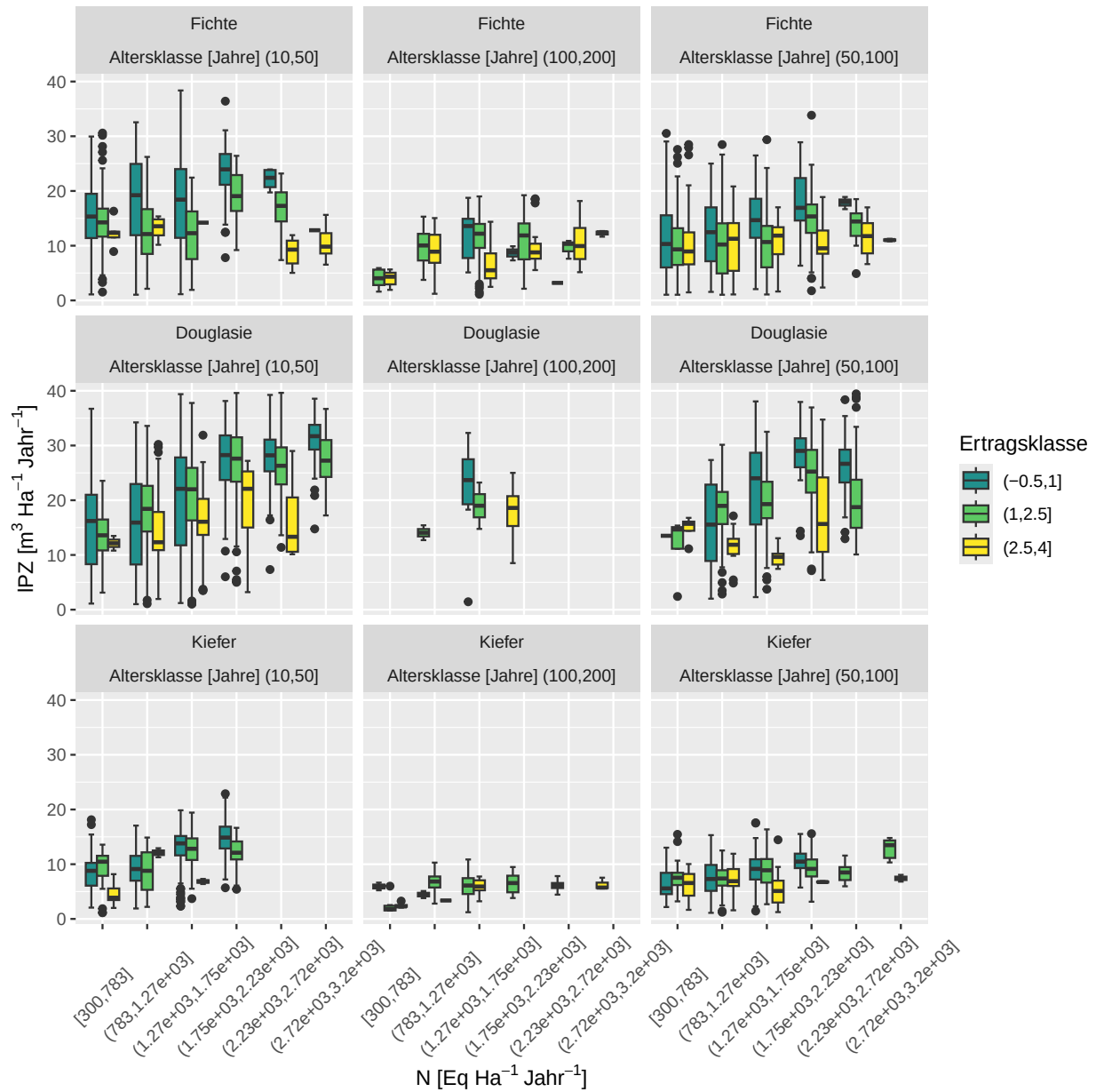


Abb. 22: Laufender periodischer Zuwachs (1PZ) über Klassen der Stickstoffdeposition N, stratifiziert nach Ertragsklasse und Bestandesalter getrennt nach Baumarten.

Anhang 2: Burggraef und Schmidt. 2024. Zum Zusammenhang von Oberhöhenbonität und Volumenzuwachs: ein Ansatz zur Verallgemeinerung des Ertragsniveau-Konzeptes.

Zum Zusammenhang von Oberhöhenbonität und Volumenzuwachs: ein Ansatz zur Verallgemeinerung des Ertragsniveau-Konzeptes

Levent S. Burggraef¹, Matthias Schmidt¹

Zusammenfassung

Die Wuchsleistung von Waldbeständen wird in der forstlichen Praxis in der Regel über die so genannte Höhenbonität geschätzt, die auch in der Waldwachstumsmodellierung häufig als Zielvariable Verwendung findet. Die Höhenbonität basiert auf der Grundbeziehung zwischen Bestandesalter- und -höhe. Deren Verwendung basiert wiederum auf der Annahme, dass es eine gleichbleibende Beziehung zwischen Bestandesvolumen und -höhe gibt. Aufgrund von beobachteten regionalen Variationen in der Volumen-Höhenbeziehung wurde diese über mehrere Zwischenschritte bis zum Konzept des untergliederten speziellen Ertragsniveaus erweitert. Dieses beschreibt empirisch die Variationen der Gesamtwuchsleistung bei gegebener Bonität und Bestandeshöhe. Die vorliegende Studie zeigt, dass sich die Variationen im speziellen Ertragsniveau teilweise durch klimatische Kovariablen erklären lassen, wodurch eine weitere Differenzierung und Spezialisierung des speziellen Ertragsniveaus erfolgen kann.

Abstract

In forestry practice, the productivity of forest stands is mostly estimated using site index or similar productivity measures based on the relation of stand age and height. These are also often used as response variables in forest growth modeling. The traditional use of the height-age relation is based on the assumption that there is a stable relationship between stand height and volume. Due to observed regional variations in this relationship, it has been extended several times, up to the concept of the subdivided special yield level. It describes the variation of the total volume production of a stand at a given site index and stand height at an empirical level. The presented study shows that variations in the special yield level can partly be described using climate covariates, which enables a further differentiation and specialization of the special yield level.

Keywords: forest growth, site index, special yield level, generalized additive model.

1 Einleitung

Die erwartbaren drastischen Veränderungen der Wuchsleistung unserer Wälder betreffen unsere Gesellschaft einerseits bezüglich ihrer wirtschaftlichen Produktionsleistung als Holzlieferant. Gleichzeitig sind sie in ihrer Rolle für den Klimaschutz als potenzielle Kohlenstoffsenke zuletzt wieder ins Zentrum der medialen Aufmerksamkeit gerückt (Ahne 2024; FNR 2024).

Die Wuchsleistung von Waldbeständen wird sowohl in der Forstpraxis als auch in der Waldwachstumsmodellierung i.d.R. indirekt über verschiedene Maße für die so genannte *Standort-*

leistung geschätzt. Der *Standort* bezeichnet dabei eine physikalisch und biologisch homogene räumliche Einheit. Die *Leistung* bezeichnet das Potenzial des Standortes, pflanzliche Biomasse zu produzieren (Skovsgaard und Vanclay 2008).

Die Standortleistung wird in der Forstpraxis über die *Höhenbonität* geschätzt. Sie basiert auf der als *Grundbeziehung* bekannten Beziehung zwischen Bestandesalter- und Höhe.

Die Höhenbonität als Bestandeshöhe zu einem bestimmten Referenzalter bildet noch heute Grundlage der forstlichen Quantifizierung und Klassifizierung der Standortleistung und damit forstlicher Ertragstabellen. Diese lösten am Ende des 19. Jahrhunderts sog. Erfahrungstabellen ab (Cotta 1821; Paulsen 1795). Die Grundbeziehung zur Beschreibung der Standortleistung etablierte sich durch die Beobachtung, dass sie der Beziehung zwischen Bestandesvolumen und Alter gleicht (Baur 1881).

¹ Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Abteilung Waldwachstum
Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen
levent.burggraef@nw-fva.de

Grundbeziehung und Höhenbonität bilden auch häufig die Grundlage von Standortleistungsmodellen in der Waldwachstumsmodellierung. Während die klassischen Ertragstafeln als Untergruppe der *phytozentrischen* Standortleistungsmodelle betrachtet werden können, sind moderne Standortleistungsmodelle häufig *geozentrisch* oder *phyto-geozentrisch*. Phytozentrische Modelle bedienen sich lediglich pflanzenbasierten Ziel- und Kovariablen, wie z. B. Alter, Höhe oder Durchmesser auf Einzelbaum- oder Bestandesbasis. Geozentrische Modelle hingegen beziehen statische oder veränderliche Standortvariablen ein, wie z. B. Temperatur, Niederschlag oder nutzbare Feldkapazität (Bontemps und Bouriaud 2013). Dabei lassen sich zwei Modellansätze beobachten, die jeweils auf der Höhenbonität oder der Grundbeziehung basieren. Im ersten Fall wird die Höhenbonität direkt abhängig von Standortvariablen geschätzt (Albert und Schmidt 2010; Brandl u. a. 2018; Bergès u. a. 2005; Sharma, Brunner und Eid 2012). Die zweite Modellgruppe verwendet die Grundbeziehung als Basis des Modells, wobei die Bestandeshöhe als Zielvariable auf Basis des Alters und zusätzlichen Standortvariablen geschätzt wird (Brandl u. a. 2014; Burggraef 2024; Pya und Schmidt 2016; Schick, Albert und Schmidt 2023).

Historisch wurden die Konzepte von Grundbeziehung und Höhenbonität mehrfach erweitert, um neuen Erkenntnissen über die zugrunde liegenden Annahmen Rechnung zu tragen. So basierte die Grundbeziehung zunächst auf der Annahme, dass es einen gleichbleibenden Zusammenhang zwischen der geschätzten Bestandeshöhe und dem Gesamtvolumen eines Bestandes gibt (Eichhorn 1902). Die Annahme war naheliegend, da Bestände zu dieser Zeit kaum durchforstet und nur tote Bäume entnommen wurden. Mit zunehmenden Durchforstungsstärken wurde das Gesamtvolumen des Bestandes durch die Gesamtwuchsleistung (GWL) ersetzt, um die Vornutzung mit einzubeziehen (Gehrhardt 1923). Die Beziehung zwischen GWL und Bestandeshöhe wird auch als *allgemeines Ertragsniveau* bezeichnet. Später stellte man fest, dass die Beziehung zwischen GWL und Bestandeshöhe standörtlichen Variationen unterliegt. Dies führte zur Entwicklung des Konzeptes des *speziellen Ertragsniveaus*, bei dem die GWL über Bestandeshöhe und Bonität beschrieben wird (Wiedemann 1943). Daran anschließend wurden weitere regionale Variationen der GWL auch bei gegebener Höhe und

Bonität festgestellt, was zur weiteren Untergliederung des speziellen Ertragsniveaus in *oberes*, *mittleres* und *unteres* Ertragsniveau führte (Assmann 1943).

Die Untergliederung des speziellen Ertragsniveaus basiert dabei auf rein empirischen, phytozentrischen Analysen. Die kausalen Zusammenhänge mit regionalen Unterschieden in der Bestandesbegründung, Bewirtschaftung sowie Einflüsse von Klima, Boden und Genetik konnten dabei bisher nicht quantifiziert werden.

Die vorliegenden Analysen zeigen, dass Teile der Variabilität des speziellen Ertragsniveaus teilweise durch klimatische Kovariablen erklärt werden kann. Somit kann eine weitere Differenzierung und Spezialisierung des speziellen Ertragsniveaus erfolgen.

2 Material und Methoden

Als Grundlage der im Folgenden beschriebenen Modellanalysen dienten Aufnahmen auf 210 Fichten-Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) und 765 weiteren Flächen der Forstlichen Versuchs- und Versuchsanstalt Baden-Württemberg (Tabelle 1). Flächen beider Versuchsanstalten wurden im Mittel jeweils vier Mal aufgenommen (mindestens zweimal, maximal 18 mal (Abbildung 1)), was insgesamt 904 Messungen für die Flächen der NW-FVA und 3109 Messungen für die Flächen der FVA-BW ergibt.

Für die Analysen wurden Flächen ausgewählt, deren Kronenschirmfläche für die Fichte anteilig mindestens 80% oder mehr beträgt.

Der erste Schritt zur Analyse des speziellen Ertragsniveaus bestand in der Modellierung des laufenden periodischen Zuwachses IPZ mithilfe einer linearisierten Form der Sloboda-Funktion in der algebraischen Differenzenform (Schönfelder, mündliche Mitteilung, vergl. Sloboda (1972), Sprauer und Schmidt (2016), Gleichung 1). Der IPZ wurde verwendet, da die GWL nicht direkt messbar ist.

Die Modellierung des IPZ erfolgte zunächst für einen Teildatensatz mit $B^{\circ} 0.9$ bis 1.1 durch Anpassen der Sloboda-Funktion mittels Nonlinear Least Squares (NLS) zur standortspezifischen und dichteabhängigen Verallgemeinerung der ersten Modellstufe.

Tabelle 1: Statistiken über 210 Fichten-Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) und 765 Flächen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW).

	Alter ^a	Alter ^b	Dg ^a [cm ²]	Dg ^b [cm ²]	N/Ha ^a	N/Ha ^b	G ^a [m ² /Ha]	G ^b [m ² /Ha]	V ^a [m ³ /Ha]	V ^b [m ³ /Ha]	Fläche Par- zelle ^a [ha]	Fläche Par- zelle ^b [ha]	IPZ ^a [m ³ /Ha]	IPZ ^b [m ³ /Ha]
Minimum	15	16	8	8	68	57	9,02	5,68	20,38	13,79	0,03	0,02	1,06	0,43
5% Quantil	26	27	12	11	236	316	20,12	21,48	111,51	141,41	0,05	0,1	5,99	5,65
Median	53	56	26	22	718	905	35,2	37,66	340,85	387,56	0,18	0,21	14,9	16,44
95% Quantil	116	106	43	38	2217	2802	50,53	53,24	633,92	701,28	0,3	0,33	27,7	27,77
Maximum	152	182	51	56	3086	4852	61,83	69,87	829,1	1034,77	1,79	1,1	39,41	39,85

^a NW-FVA
^b FVA-BW

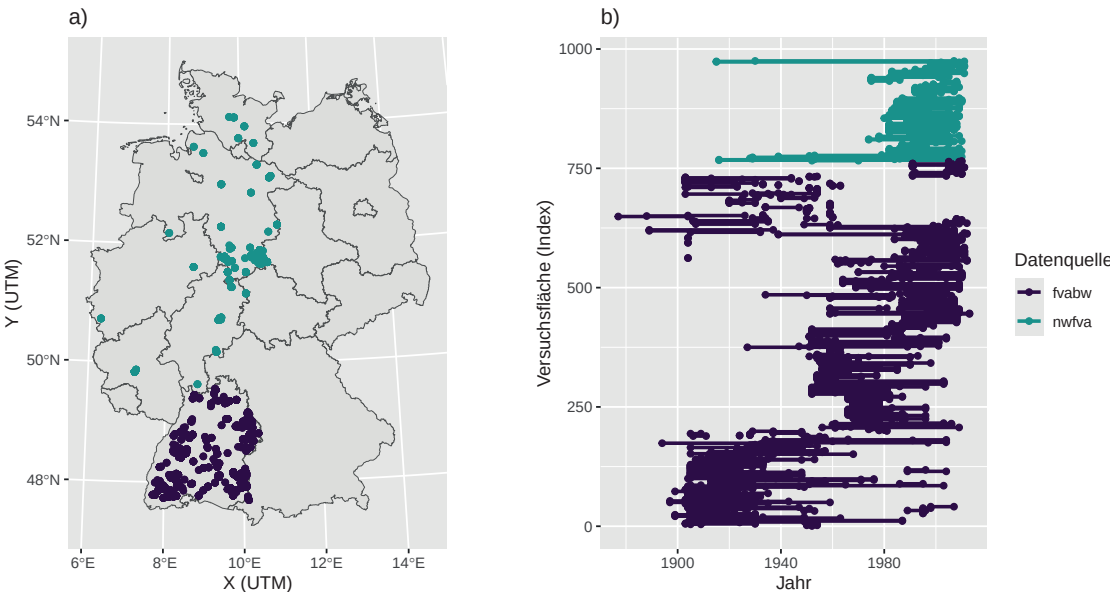


Abbildung 1: a) Karte der Fichten-Versuchsflächen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW). b) Beobachtungszeiträume der Versuchsflächen.

Anschließend wurde der IPZ in einer zweiten Stufe als Generalisiertes Additives Modell (GAM) modelliert, um das Hinzufügen weiterer Kovariableneffekte und Testen auf nichtlineare Verläufe zu ermöglichen.

Bei der Beschreibung als GAM wurde zunächst die Aufteilung der NLS-Vorhersage in zwei Terme x_1 und x_2 im Anhalt an die Ausgangsfunktion verwendet (Gleichung 3). Desweiteren wurde auch die Verwendung des vorhergesagten IPZ als einzelner Term x auf die Eignung zur klimasensitiven IPZ-Modellierung überprüft.

Der jeweilige Kovariableneffekt wurde als penalisierter Regressionsspline mit Thin-Plate Basis (im Folgenden Spline genannt) beschrieben (Wood 2017). Der Wert des Splines für die jeweilige Kovariablen-Ausprägung wurde je nach Mo-

dellbeschreibung entweder auf die NLS-basierten Terme multipliziert (Gleichungen 2a, 2b) oder addiert (Gleichung 2c).

Die Splines wurden anschließend visuell überprüft. Zum einen wurden dazu die Effektverläufe über der jeweiligen Kovariablen untersucht. Zum anderen wurden IPZ-Kurven für verschiedene Kovariablenausprägungen geplottet, um die Sensitivität des IPZ auf den jeweiligen Effekt zu beurteilen.

Aufgrund der Dichteabhängigkeit des IPZ wurde zunächst ein Effekt für den Bestockungsgrad B° zum Modell hinzugefügt (siehe Abbildung 2 für die Verteilung in den Ausgangsdaten). Anschließend wurden Effekte für Temperatur- und Niederschlagssummen für die Vegetationsperiode (T , P) (Nuske 2017) überprüft. Jahresspezifische Retrodiktionen auf Basis von DWD-Daten lagen

für T und P als Raster mit Auflösung 50×50 m für T und 100×100 m für P vor. Die Werte wurden für jede Versuchsfläche über dem Alter zum Beobachtungszeitpunkt gemittelt.

$$IPZ = \frac{\beta_1 H}{Alter^{\beta_2}} - \frac{\beta_3 H}{Alter^{\beta_2}} - \ln H \quad (1)$$

Mit:

- IPZ : laufender periodischer Zuwachs in m^3 /Ha
- H : dominante Höhe (z. B. H100) in m
- Alter : Alter in Jahren
- β : Koeffizienten

IPZ

$$= f_{11}(kv_1)x_1 + f_{12}(kv_1)x_2 + f_{21}(kv_2)x_1 + f_{22}(kv_2)x_2 + \dots + f_{n1}(kv_n)x_1 + f_{n2}(kv_n)x_2 \quad (2a)$$

$$lpz = f_1(kv_1)x + f_2(kv_2)x + \dots + f_n(kv_n)x \quad (2b)$$

$$lpz = x + f_1(kv_1) + f_2(kv_2) + \dots + f_n(kv_n) \quad (2c)$$

Mit:

- x_1 : Vorschätzung $\frac{H100}{Alter^{\beta_2}}$ aus NLS-Schätzung
- x_2 : Vorschätzung $\frac{H100}{Alter^{\beta_2}} \ln(H100)$ aus NLS-Schätzung
- x : Vorhersage IPZ aus NLS-Schätzung
- $f(\cdot)$: nichtlinearer Funktionsterm (penalisierter Regressions-Spline mit Thin-Plate Basis)
- kv : Kovariable für Dichte und/oder Klima (B°, T, P)

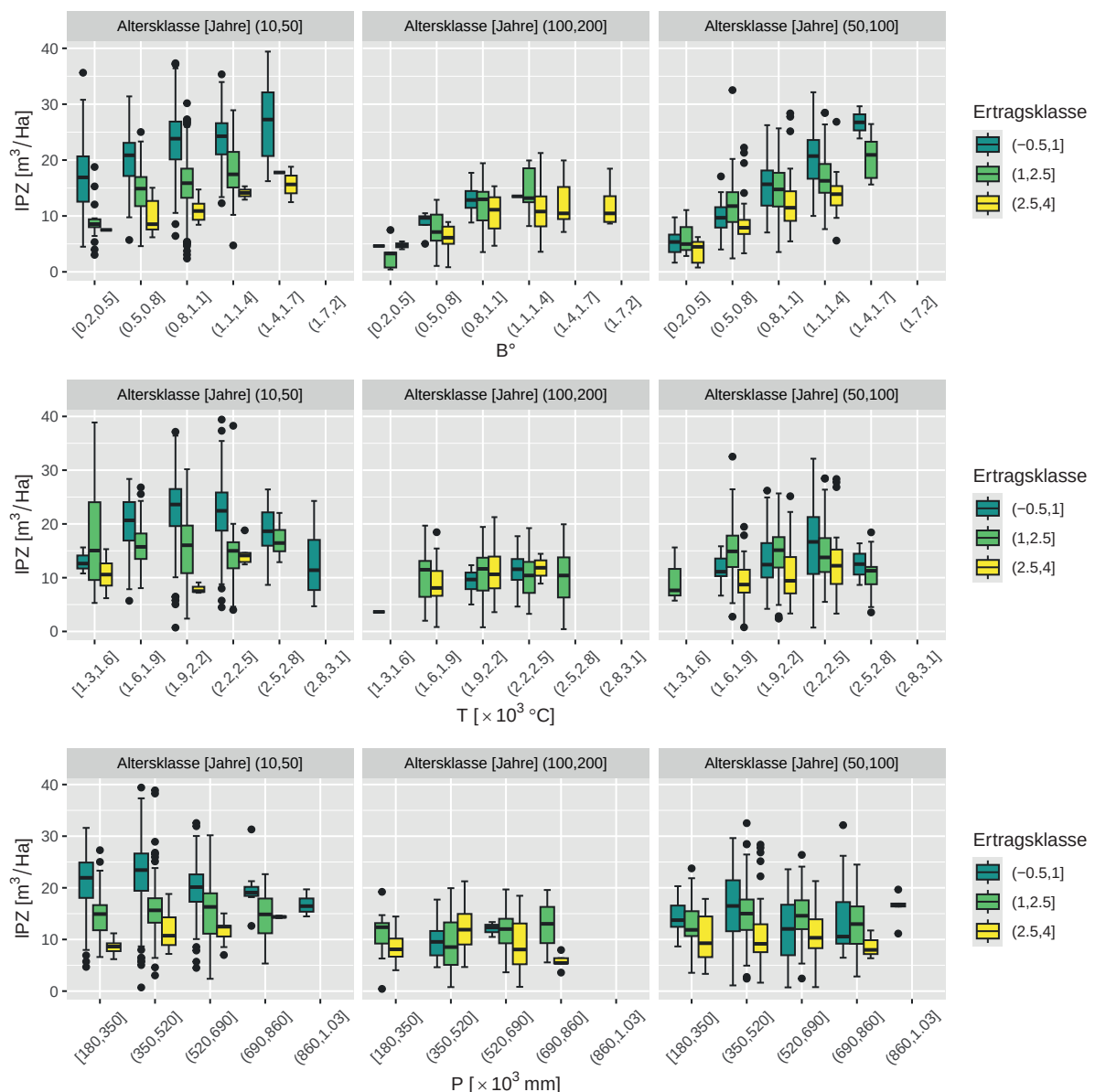


Abbildung 2: Laufender periodischer Zuwachs (IPZ) der Fichte über steigendem klassifizierten Bestockungsgrad B° sowie klassifizierte Temperatur- (T) und Niederschlagssummen (P) in der Vegetationsperiode für drei Altersklassen. Die Boxplots sind jeweils nach Gruppen von Ertragsklassen unterteilt.

3 Ergebnisse

Die NLS-Schätzung der Sloboda-Funktion für die Fichte ergab hohe Signifikanzen für alle drei Koeffizienten (p -Wert $< 1 \cdot 10^{-15}$) mit einer Residuen-Standardabweichung (Standardfehler) von 5.271 m³/Ha (Gleichung 3). Durch die in der zweiten Stufe verwendeten GAMs stellt der Standardfehler ein besseres Maß für die Modellgüte dar als r^2 oder Explained Deviance, die zwischen den Modellarchitekturen nicht zu vergleichen sind.

$$LPZ = \frac{48.71471H100}{Alter^{0.96353}} - \frac{5.09490H100}{Alter^{0.96353}} - \ln H100 \quad (3)$$

$$LPZ = f_1(B^\circ)x_1 + f_2(B^\circ)x_2 \quad (4a)$$

$$LPZ = f_1(B^\circ)x \quad (4b)$$

$$LPZ = -1.47791 + 1.00138x + f_1(B^\circ) \quad (4c)$$

$$LPZ = -2.0080 + 1.0321x + f_1(B^\circ) + f_2(T) + f_3(P) \quad (5)$$

Mit (vergl. Gleichung 3):

- $x_1 = H \frac{100}{Alter^{0.96353}}$
- $x_2 = H \frac{100}{Alter^{0.96353}} \ln H100$
- x : Vorhersage IPZ aus NLS-Schätzung

Die drei unterschiedlichen Modellbeschreibungen, welche B° als zusätzliche Kovariable enthielten, wiesen jeweils Standardfehler von 4.246 m³/Ha, 4.368 m³/Ha und 4.318 m³/Ha auf (Gleichung 4a - Gleichung 4c). Dies stellt eine Verbesserung von 1.025 m³/Ha, 0.903 m³/Ha bzw. 0.953 m³/Ha im Vergleich zum NLS dar.

Die Effekte des B° auf die aus dem NLS geschätzten Modellterme unterschieden sich stark zwischen den Modellbeschreibungen. Bei der Multiplikation zweier getrennter Effekte auf zwei Modellterme ergaben sich beim Effekt auf x_1 etwas breitere Konfidenzintervalle als beim Effekt auf x_2 (Gleichung 4a, Abbildung 3a.1, a.2). Die Effektverläufe waren dabei gegenläufig und ökologisch nicht interpretierbar. Wurde ein Effekt auf einen einzelnen Term x aufmultipliziert oder zu ihm addiert zeigte sich jeweils ein plausibler, positiver

Effekt mit steigendem B° (Gleichungen 4b, 4c Abbildung 3b, c). Bei der multiplikativen Modellbeschreibung ergab sich ein monoton steigender, asymptotischer Effekt. Bei der additiven Modellbeschreibung zeigte sich ebenfalls ein plausibler, annähernd asymptotischer, bei extrem hohem B° leicht absinkender Effekt. Bei der additiven Modellbeschreibung ist der Effekt als Verschiebung der IPZ-Kurve entlang der Y-Achse interpretierbar. Die Residuenabweichung sank bei allen drei Modellen leicht mit dem IPZ, die Residuenverteilung insgesamt war aber weitgehend verzerrungsfrei (Abbildung 4).

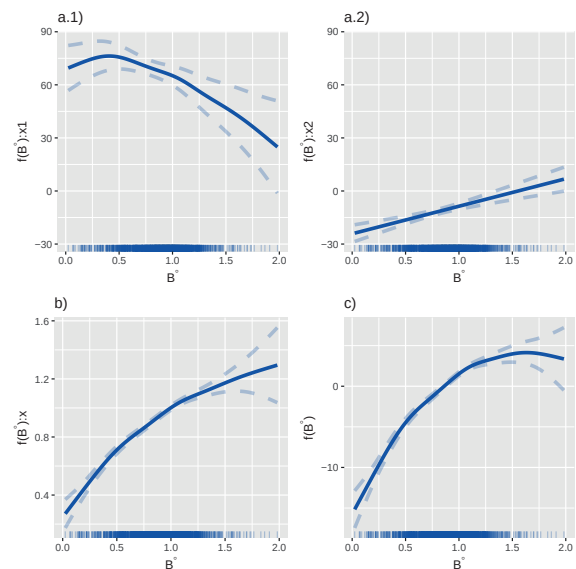


Abbildung 3: Effekte (Splines) des Bestockungsgrades B° auf die Terme x_1 und x_2 (a.1 und a.2, Gleichung 4a) bzw. auf x (b und c, Gleichungen 4b und 4c).

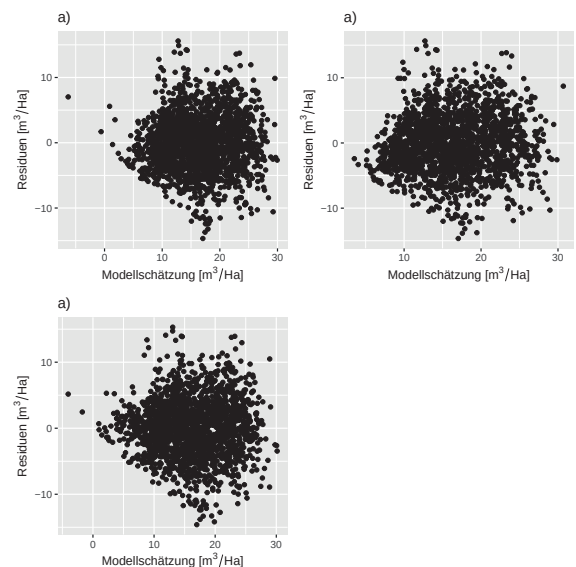


Abbildung 4: Residuen über gefitteten Werten für die drei Bestockungsgrad (B°)-basierten Modelle (Abbildungen a-c entsprechen Gleichungen 4a - 4c).

Lage und Verlauf der resultierenden IPZ-Kurven in Abhängigkeit der Kovariableneffekte zeigten ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den drei Modellbeschreibungen. Für die Analysen wurde jeweils eine Kovariable variiert, während die anderen Kovariablen auf den Mittelwert gesetzt wurden. Beim multiplikativen Modell mit zwei Termen x_1 und x_2 zeigten sich zum einen deutliche Überschneidungen der IPZ-Kurven, sowie im negativen IPZ-Bereich liegende Werte bei extrem niedrigen B° (Gleichung 4a, Abbildung 5a). Beim multiplikativen Modell mit einem Term x gab es weder Überschneidungen noch negative IPZ-Werte (Gleichung 4b, Abbildung 5b). Beim additiven Modell waren negative IPZ-Werte, aber keine Überschneidungen der Kurven zu beobachten (Gleichung 4c, Abbildung 5c).

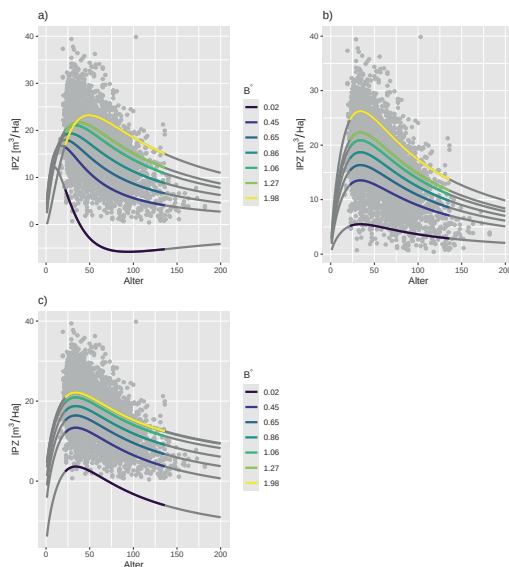


Abbildung 5: Kurven für den laufenden periodischen Zuwachs IPZ, basierend auf den drei Bestockungsgrad (B°)-basierten Modellen mit variierendem B° (Gleichungen 4a - 4c). Farbige Liniensegmente zeigen den zugrundeliegenden Alters-Datenbereich an, während ausgegraute Linien den Extrapolationsbereich anzeigen. Graue Punkte bezeichnen die Messwerte. Die extremen Werte ($B^\circ=0.02$ und $B^\circ=1.98$) zeigen Minimum und Maximum des B° -Datenbereiches an und dienen der Beurteilung des Verhaltens der Kurven im Extrapolationsbereich. Die restlichen Werte stellen äquidistante Schritte zwischen dem 5% und 95% Quantil dar.

Das multiplikative Modell mit zwei Termen x_1 und x_2 wies neben negativen Zuwächsen auch das Problem auf, dass das Hinzufügen weiterer Kovariableneffekte aufgrund der doppelten Einbeziehung jeder Kovariablen zu fehlenden Signifikanzen führte (vergl. Gleichung 2a). Zwar erschien das multiplikative Modell mit einem Term x aufgrund der ausschließlich positiven Vorhersagewerte und sich nicht überschneidenden Kurven

als das sinnvollste Modell für die weiteren Analysen (Gleichung 4b, Abbildungen 3b, 5b). Allerdings zeigte dieses Modell beim Hinzufügen weiterer Kovariableneffekte für T und P extrem breite Konfidenzintervalle (Abbildung 6).

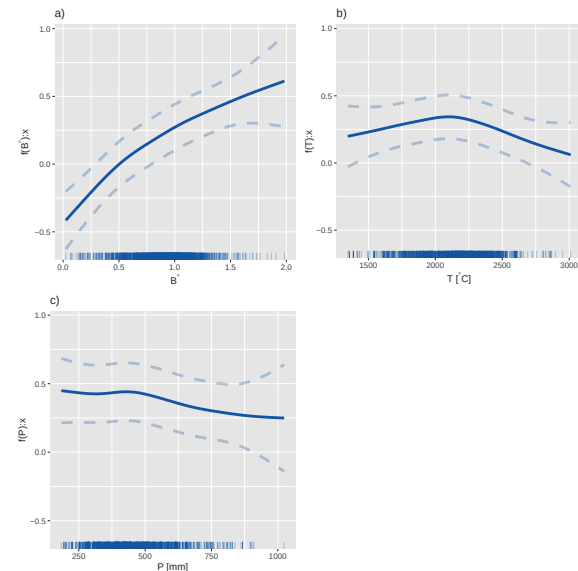


Abbildung 6: Effekte von Bestockungsgrad B° (a), sowie Temperatursumme (T , b) und Niederschlagssumme (P , c) während der Vegetationsperiode auf Niveau und Steigung der Zuwachskurven, basierend auf dem Multiplikativen Modell mit einem Term (Gleichung 4b).

Daher wurden auf Basis des additiven Modells Kovariableneffekte für T und P hinzugefügt. Der Standardfehler reduzierte sich dadurch auf 4.170 m^3/Ha , also um 0.148 m^3/Ha gegenüber dem B° -basierten, additiven Modell. Dabei folgte der Effekt für den B° weiterhin einem annähernd symptotischen Verlauf, mit einem geringeren Absinken bei extrem hohem B° (Abbildung 7, vergl. Abbildung 3c). Die Zuwachskurven verschoben sich entsprechend mit steigendem B° nach oben. T zeigte einen parabolischen Verlauf mit einem leichten Anstieg bis zu einem Maximum bei ca 2200 $^\circ\text{C}$ und einem folgenden starken Abfall (Abbildung 8). Infolgedessen verschoben sich die Zuwachskurven unter 2200 $^\circ\text{C}$ mit steigender T hin zu höheren Zuwachswerten, darüber zu niedrigeren. P zeigte einen nahezu konstanten Verlauf nahe an 0 bis zu einem Wert von ca 500 mm und einem abnehmenden Trend darüber hinaus (Abbildung 9). Infolgedessen verschob sich das Niveau der Zuwachskurve bis zu 500 mm kaum und sank danach stark ab. Auf Basis des IPZ wurden auch Sensitivitätsgrafiken mit GWL- und dGZ-Kurven zur Darstellung der Effekte auf das spezielle Ertragsniveaus erzeugt (Abbildung 10).

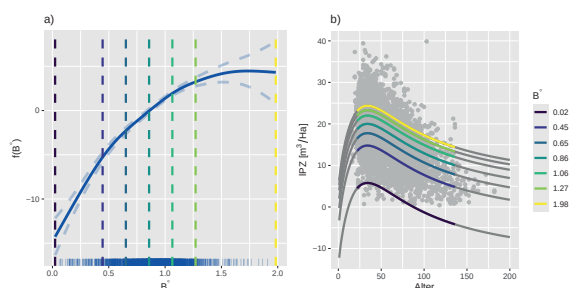


Abbildung 7: Effekte des Bestockungsgrades B° (a), auf das Niveau der Zuwachskurven (b). Für die Vorhersage der Zuwachskurvenflächen wurden Minimum und Maximum der jeweiligen Kovariablen, sowie äquidistante Werte vom 5% bis zum 95%-Quantil verwendet. Diese sind auch farblich durch die senkrechten, gestrichelten Linien in den Effektgrafiken abgetragen. Die jeweils anderen beiden Kovariablen wurden auf den Mittelwert gesetzt. Farbige Liniensegmente in den Zuwachskurven zeigen den abgedeckten Datenbereich an, während dunkelgraue Liniensegmente den Extrapolationsbereich anzeigen. Hellgraue Punkte im Hintergrund zeigen die Messdaten an.

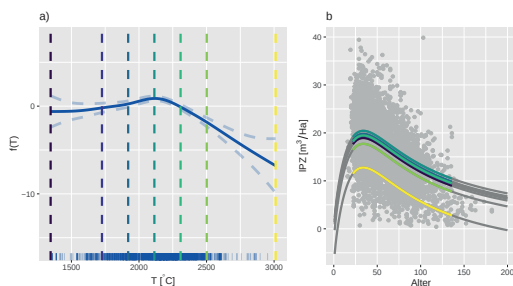


Abbildung 8: Effekte der Temperatursumme T (a) auf das Niveau der Zuwachskurven (b). Siehe Abbildung 7 für Details.

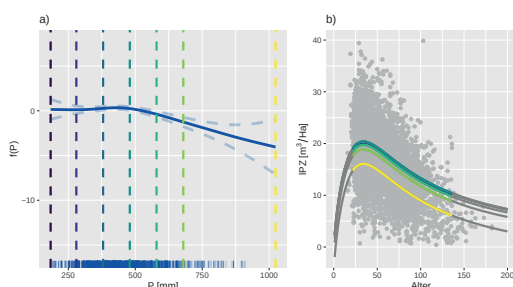


Abbildung 9: Effekte der Niederschlagssumme P (a) auf das Niveau der Zuwachskurven (b). Siehe Abbildung 7 für Details.

4 Diskussion

Die beschriebenen Analysen dienen zur Überprüfung der Hypothese, dass das spezielle Ertragsniveau auf Basis von Klimakovariablen weiter differenziert werden kann. Vor der Anpassung eines klimasensitiven Modells wurden verschiedene Modellbeschreibungen getestet, basierend auf einer Ableitung der algebraischen Differenzenform der Sloboda-Funktion (Sloboda, 1972, Sprauer und Schmidt, 2016) (Gleichung 1). Diese

wurde zunächst mittels Non Linear Least Squares (NLS) angepasst und in einem zweiten Schritt der Kovariableneffekt hinzugefügt. Der Kovariableneffekt für den Bestockungsgrad B° führte dabei bei allen Modellformulierungen zu einer Verschiebung der Zuwachskurve hin zu höheren Zuwachswerten. In den zugrundeliegenden Daten ist bei schlechteren Bonitäten (Ertragsklassen II.5-IV) ein Absinken des Zuwachses mit B° über 1.4 zu erkennen (Abbildung 2). Hier deutet sich der Effekt einer Überschreitung der optimalen Grundflächenhaltung an (Assmann 1954; Assmann 1968). Die Beobachtung, dass die Fichte über einem B° von 1 bei schlechten Bonitäten leicht von einer Dichtereduktion zu profitieren scheint, deckt sich außerdem mit Forschungsergebnissen zum Site Density Index (SDI) (Pretzsch 2005). Die Beobachtung basiert allerdings auf nur vier Versuchsflächen und hat keinen sichtbaren Einfluss auf den Kovariableneffekt (Abbildung 3).

Im Vergleich der Modellbeschreibungen zeigte sich, dass multiplikative Ansätze (Gleichungen 4a, 4b), bei denen Kovariableneffekte auf die Terme der Wachstumsfunktion aufmultipliziert wurden, zu sehr breiten Konfidenzintervallen führten (Abbildung 6). Das Problem wird derzeit noch analysiert. Ein weiterer Nachteil des multiplikativen Ansatzes mit zwei Termen ist, dass die Effekte auf die beiden Terme (Gleichung 4a) visuell bzw. ökologisch nicht zu interpretieren sind. Beim Ansatz mit einem Term ist die Interpretation einfacher: beim multiplikativen Ansatz mit zwei Termen wirkt der Kovariableneffekt auf Niveau und Form der Zuwachskurve. Beim additiven Ansatz lediglich auf das Niveau. In den Sensitivitätsanalysen zeigte sich, dass die erste multiplikative Modellbeschreibung mit zwei Termen, besonders im Extrapolationsbereich, zu sich überschneidenden Kurven führt (Abbildung 5). Ansätze mit nur einem Term ergaben keine Überschneidungen. Dies ist wahrscheinlich dadurch zu Begründen, dass sich der grundsätzliche Kurvenverlauf durch die Fixierung in einem vorge-schätzten Zuwachswert nicht mehr ändert. Der multiplikative Ansatz mit einem Term scheint einen deutlichen Vorteil gegenüber dem additiven Ansatz zu haben: durch die höhere Flexibilität der Kurvenform gibt es bei extrem niedrigen B° keine Zuwächse im negativen Bereich. Außerdem sind polymorphe Flächen, bei denen jede Kurve eine eigene Form haben kann, prinzipiell wünschenswert, da sie unterschiedliche Verläufe für ver-

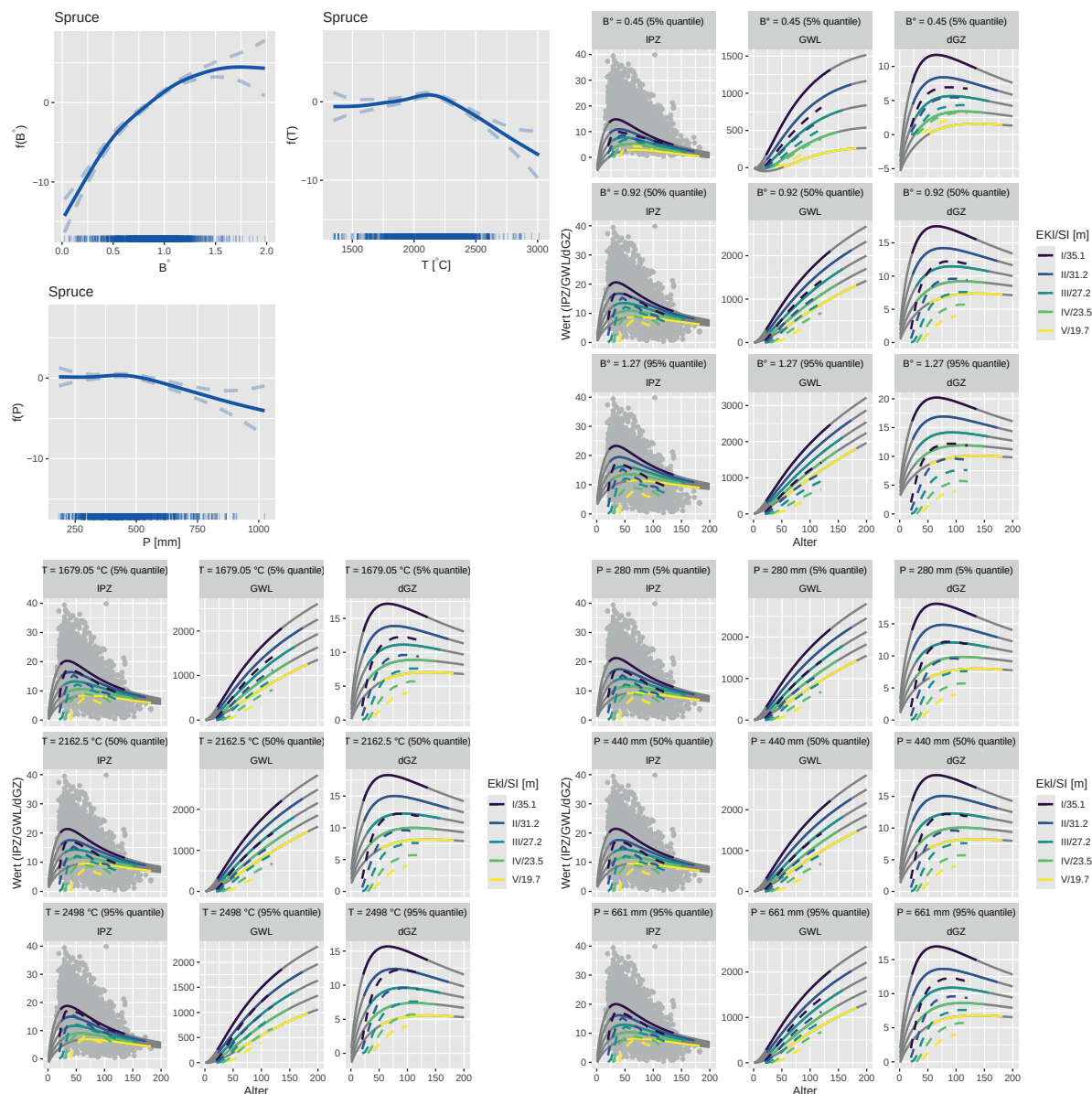


Abbildung 10: Effekte von Bestockungsgrad B° und Temperatur- sowie Niederschlagssumme für die Vegetationsperiode (T , P) auf IPZ, GWL und dGZ für das finale klimasensitive Modell für die Fichte (Gleichung 5). Die GWL wurde als kumulative Summe des IPZ berechnet, der dGZ als $GWL/Alter$. Die Kurven sind jeweils für die Ertragsklassen I–V dargestellt, wobei die H100 aus der Ertragstafel für mäßige Durchforstung (Wiedemann 1942) in das Modell eingesteuert wurde. Die Fächer wurden jeweils für das 5%, 50% und 95% Quantil der jeweiligen Kovariable modelliert. Die jeweils andere klimatische Kovariable wurde auf den Mittelwert gesetzt, der B° auf 1. Die Ertragstafelwerte für Abbildung b) wurden mit Reduktionsfaktoren korrigiert, die den Bestockungsgraden für die Modellwerte entsprechen (Kramer und Akça 2008). Farbige Liniensegmente in den Zuwachskurven zeigen den abgedeckten Alters-Datenbereich an, während dunkelgraue Liniensegmente den Extrapolationsbereich anzeigen. Gestrichelte Linien zeigen die Ertragstafelwerte. Hellgraue Punkte im Hintergrund zeigen die Messdaten an.

schiedene Bonitäten zulassen (vergl. Staupendahl 2023; Cieszewski und Bailey 2000)]. Dies erlaubt wiederum unterschiedliche Kulminationszeitpunkte, die biologisch plausibler sind. Beim additiven Ansatz kann nur die fixierte Kurve vertikal verschoben werden, was, bezogen auf den Kovariableneffekt, einen anamorphen Fächer ergibt, wodurch einzelne Kurven teilweise im negativen Bereich zu liegen kommen. Dem kann im vorliegenden Fall jedoch durch eine einfache

Kappung der Kurve entgegen gewirkt werden, wodurch sich der Kurvenursprung bei extrem ungünstigen Kovariablenwerten bzw. schlechten Bonitäten zu höheren Altern verschieben würde. Dies entspricht den Kurvenverläufen der klassischen Ertragstafeln. Gleichzeitig ist die Polymorphie aber noch durch eine eingesteuerte, veränderliche H100 bei unterschiedlichen Bonitäten gegeben (Abbildung 10).

Aufgrund der extrem breiten Konfidenzintervalle wurde letztendlich der additive Ansatz (Gleichung 4c) für das finale klimasensitive Modell ausgewählt. Dabei wurden zusätzlich zum B° Kovariableneffekte für Temperatur- und Niederschlagssumme für die Vegetationsperiode (T, P) hinzugefügt (Gleichung 3).

Der Effekt des B° zeigte dabei wie beim rein B° -abhängigen Modell einen annähernd asymptotischen Verlauf mit einer geringer werdenden Verschiebung der Zuwachskurve nach oben mit steigendem B° wie oben beschrieben. Im Vergleich zu T und P zeigte der B° die meiste Erklärungskraft, was an der deutlich stärkeren Amplitude der Verschiebungen der Zuwachskurven ersichtlich ist (Abbildungen 7, 9).

T zeigte einen annähernd parabolischen Verlauf. Dies entspricht der Erwartung eines Temperaturoptimums, in dem die Wuchsbedingungen für die Fichte optimal sind. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Kovariableneffekte nicht direkt auf die Zuwächse wirken, sondern auf Zuwächse bei einer vorgegebenen Bonität. Es kann also festgestellt werden, dass es eine Temperaturabhängige Variation des Volumens bei gegebener Höhenbonität gibt. In der Datengrundlage (Abbildung 2) zeigte sich der parabolische Verlauf bei guten und mittleren Bonitäten, während es bei schlechten Bonitäten vor allem im heißen Bereich an Daten fehlt.

Mit den vorliegenden Analysen haben wir gezeigt, dass das spezielle Ertragsniveau nach Assmann durch Klima-Kovariablen weiter spezifiziert werden kann. Das Konzept des untergliederten speziellen Ertragsniveaus besagt, dass auch bei einer gegebenen Höhenbonität regionale Unterschiede in der Beziehung zwischen Wuchsleistung und Bestandeshöhe zu erwarten sind. Die vorliegende Studie befürwortet die Hypothese einer deutlichen Auswirkung des Klimas auf die Unterschiede zwischen den Wuchsleistungen von Beständen der selben Bonität. Die gezeigten Modelle stellen einen Proof of Concept dar, der durch eine Erweiterung der Datengrundlage und der Einbeziehung von Witterungsdaten in der zeitlichen Auflösung der IPZ-Werte verbessert werden soll. Zudem sollen auch Kovariableneffekte für Stickstoff sowie Kovariableneffekte für Wasser- und Nährstoffversorgung aus der Standortkartierung mit einbezogen werden.

Die Analysen erfolgten im Rahmen des Projektes Produktivitätsvergleich von Fichte, Kiefer und

Douglasie entlang eines großräumigen, deutschlandweiten Standortgradienten (ProFiKiD) an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Das Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL, Förderkennzeichen: 2221NR008B) und erfolgt in Kooperation mit der Forstlichen Forschungs- und Versuchsanstalt Baden-Württemberg.

5 Literatur

- Ahne, Petra. 2024. Voreilig eingeplante Bäume. Frankfurter Allgemeine Zeitung (8. Oktober). <https://www.faz.net/aktuell/feuilleton/bundeswaldinventur-warum-der-wald-keine-co2-senke-mehr-ist-110034171.html> (zugegriffen: 14. Oktober 2024).
- Albert, M und M Schmidt. 2010. Climate-Sensitive Modelling of Site-Productivity Relationships for Norway Spruce (*Picea Abies* (L.) Karst.) and Common Beech (*Fagus Sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management* 259, Nr. 4: 739-749.
- Assmann, Ernst. 1943. Untersuchungen über die Höhenkurven von Fichtenbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, Nr. 119: 77–88, 105–123, 133–151.
- . 1954. Grundflächenhaltung und Zuwachsleistung Bayerischer Fichten-Durchforstungsreihen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 73, Nr. 9: 257–271.
- . 1968. Zur Theorie der Grundflächenhaltung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 87, Nr. 1: 321–330.
- . 1975. Systems of determination of site class and yield forecasts. *Communications of the Federal Forest Research Institute, Vienna* 1: 40.
- Baur, Franz. 1881. Die Rothbuche in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form: unter Zugrundlegung der an der Kgl. Württemberg'schen Forstlichen Versuchsanstalt angestellten Untersuchungen bearbeitet. P. Parey.
- Bergès, Laurent, Richard Chevalier, Yann Dumas, Alain Franc und Jean-Michel Gilbert. 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Annals of Forest Science* 62, Nr. 5: 391–402.
- Bontemps, Jean-Daniel und Olivier Bouriaud. 2013. Predictive Approaches to Forest Site Productivity: Recent Trends, Challenges and Future Perspectives. *Forestry* 87, Nr. 1: 109–128.
- Brandl, Susanne, Wolfgang Falk, Hans-Joachim Klemmt, Georg Stricker, Andreas Bender, Thomas Rötzer und Hans Pretzsch. 2014. Possibilities and Limitations of Spatially Explicit Site Index Modelling for Spruce Based on National Forest Inventory Data and Digital Maps of Soil and Climate in Bavaria (SE Germany). *Forests* 5, Nr. 11: 2626–2646.
- Brandl, Susanne, Tobias Mette, Wolfgang Falk, Patrick Vallet, Thomas Rötzer und Hans Pretzsch. 2018.

- Static Site Indices from Different National Forest Inventories: Harmonization and Prediction from Site Conditions. *Annals of Forest Science* 75, Nr. 2: 56.
- Burggraef, Levent Sebastian. 2024. Sensitivity of phyto-geocentric site productivity models to spatial extent and climate data aggregation – Dissertation to attain the doctoral degree Dr. forest of the Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology, Georg-August-Universität Göttingen. eDiss Office, Göttingen State and University Library.
- Cieszewski, Chris J und RL Bailey. 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science* 46, Nr. 1: 116–126.
- Cotta, Heinrich. 1821. Hülftafeln für Forstwirte und Forsttaxatoren. Arnoldische Buchhandlung, Dresden.
- Eichhorn, Fritz. 1902. Ertragstafeln für die Weißtanne. Springer, Berlin Heidelberg.
- FNR. 2024. FNR Pressemitteilung: Bundeswaldinventur: Deutscher Wald durch Klimakrise erheblich geschädigt. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.v. (FNR), 8. Oktober. <https://news.fnr.de/fnrpressemittteilung/bundeswaldinventur-deutscher-wald-durch-klimakrise-erheblich-geschaedigt> (zugegriffen: 14. Oktober 2024).
- Gehrhardt, Ernst. 1923. Ertragstafeln für Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer. J. Springer.
- Kramer, Horst und Alparslan Akça. 2008. Leitfaden Zur Waldmesslehre. Frankfurt a.M.: Sauerländer.
- Nuske, Robert. 2017. vegperiod: determine thermal vegetation periods [software]. Zenodo. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.7272438>.
- Paulsen, Johann Christian. 1795. Kurze praktische Anleitung zum Forstwesen. Verfasst von einem Forstmanne. Zu haben bey dem Herausgeber, Detmold.
- Pretzsch, Hans. 2005. Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long-term experimental plots. *European Journal of Forest Research* 124: 193–205.
- Pyä, Natalya und Matthias Schmidt. 2016. Incorporating Shape Constraints in Generalized Additive Modelling of the Height-Diameter Relationship for Norway Spruce. *Forest Ecosystems* 3, Nr. 1: 1–14. doi:[10.1186/s40663-016-0061-z](https://doi.org/10.1186/s40663-016-0061-z).
- Schick, Jan, Matthias Albert und Matthias Schmidt. 2023. A new approach for modeling stand height development of German forests under climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*.
- Sharma, Ram P., Andreas Brunner und Tron Eid. 2012. Site Index Prediction from Site and Climate Variables for Norway Spruce and Scots Pine in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27, Nr. 7 (Oktober): 619–636. doi:[10.1080/02827581.2012.685749](https://doi.org/10.1080/02827581.2012.685749).
- Skovsgaard, J. P. und J. K. Vanclay. 2008. Forest Site Productivity: A Review of the Evolution of Dendrometric Concepts for Even-Aged Stands. *Forestry* 81, Nr. 1 (Januar): 13–31. doi:[10.1093/forestry/cpm041](https://doi.org/10.1093/forestry/cpm041).
- Sloboda, Branislav. 1972. Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung. Baden-Württembergische Forstl. Versuchs- und Forschungsanst.
- Sprauer, Susanne und Matthias Schmidt. 2016. Modellierung des Durchmesserzuwachses von Fichten in Nordwest-Deutschland: ein Vergleich von Modellen auf Basis der Sloboda-Funktion und „empirischen“ Modellen. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA: 81–88.
- Staupendahl, Kai. 2023. et. bon: Ein R-Package zur Bonitierung anhand funktionalisierter Bestandeshöhenfächer ausgewählter Ertragstafeln. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA: 116–121.
- Wiedemann, E. 1939. Untersuchungen der Preußischen Versuchsanstalt über Ertragstafelfragen. Sonderdruck aus „Mitteilungen aus Forstwissenschaft u. Forstwirtschaft“. Herausgegeben von der Preußischen Landesforstverwaltung. Schaper Verlag Hannover.
- . 1942. Ertragstafel Fichte – mäßige Durchforstung. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- . 1943. Kiefern-Ertragstafel für mäßige Durchforstung, starke Durchforstung und Lichtung. Die Kiefer, 1948, Verlag M & H Schaper, Hannover: 337 pp.
- Wood, S. N. 2017. Generalized Additive Models: An Introduction with R. 2. Aufl. Chapman; Hall/CRC.