11 Kronenzustand – Steuergrößen und Raum-Zeit-Entwicklung von 1989-2015

N. Eickenscheidt[1], N. Augustin[22], N. Wellbrock[1], P. Dühnelt[1], L. Hilbrig[1]

11.1 Einleitung

Die Waldzustandserhebung (WZE) stellt neben der BZE und dem Intensiven Forstlichen Monitoring einen fundamentalen Bestandteil des Forstlichen Umweltmonitorings dar. Die WZE wurde in Folge der Diskussion um die neuartigen Waldschäden in den 1980er Jahren ins Leben gerufen. Als Ursache für die neuartigen Waldschäden wurden im Wesentlichen anthropogene Stoffeinträge in die Waldökosysteme, insbesondere von Schwefel- und Stickstoff (N)-Verbindungen, diskutiert (Schöpfer & Hradetzky 1984, Schütt *et al.* 1983, Ulrich 1984, 1987b). Eine detailliertere Beschreibung der Folgen dieser versauernd bzw. eutrophierend wirkenden Einträge auf die Waldbäume und ihren Kronenzustand sowie möglicher Wechselwirkungen mit biotischen und klimatischen Einflussgrößen lässt sich bereits in den Kapiteln 1, 3 und 4 nachlesen (de Vries *et al.* 2014). Während die Schwefeldioxidemissionen aufgrund von Maßnahmen zur Luftreinhaltung (z.B. Rauchgasentschwefelungsanlagen) eine drastische Reduzierung erfahren haben, bleiben die N-Emissionen, die zum einen aus der intensiven Landwirtschaft und zum anderen aus Verbrennungsprozessen stammen, weiterhin auf einem hohen Level (de Vries *et al.* 2014, Waldner *et al.* 2014). Die WZE erfolgte erstmalig im Jahr 1984 und wird seit 1990 jährlich im gesamten Bundesgebiet durchgeführt. Sie basiert im Wesentlichen auf der Kronenverlichtung, die den gebräuchlichsten Indikator für die Vitalität der Bäume darstellt (Ferretti 1997, Ghosh *et al.* 1995, Innes *et al.* 1994). Zusätzlich erfolgt eine Ansprache von biotischen und abiotischen Schäden. Die Bewertung der Kronenverlichtung erfolgt visuell mit Hilfe von Ferngläsern und seit 1989 in 5 %-Stufen von 0 % (keine Kronenverlichtung) bis 100 % (Baum ist abgestorben). Die Aufnahme wird verpflichtend auf den Level I-Flächen (europaweites 16 × 16 km Raster) durchgeführt und erfolgt europaweit nach einem einheitlichen Verfahren, welches im Kapitel IV des ICP Forests Handbuchs beschrieben wird (Eichhorn *et al.* 2010). Zusätzlich liegen Modifikationen für Deutschland vor, die in Wellbrock *et al.* (2016) dokumentiert sind. Neben dem europaweiten 16 × 16 km Raster (im Folgenden als EU-Raster bezeichnet) kommen vom Bundesland abhängige Rasterverdichtungen vor. Im Laufe der Jahre gab es außerdem Veränderungen des Rasters wie z.B. Rasterverschiebungen. Von 2006 bis 2008 erfolgte die WZE bundesweit auf dem verdichteten Raster der BZE (zumeist 8 x 8 km). Unregelmäßige Raster stellen nur eine der verschiedenen Eigenschaften der Kronenverlichtungsdaten dar, aufgrund derer die Raum-Zeit-Auswertung zu einer statistischen Herausforderung wird. Im Allgemeinen wird daher meist ausschließlich auf deskriptive Statistik zurückgegriffen (BMEL 2016). Für die Raum-Zeit-Modellierung dieser Daten und entsprechende schließende Statistik sind Generalisierte Additive Gemischte Modelle (GAMMs) vielversprechend

(Augustin *et al.* 2009, Wood 2006a). Generalisierte Additive Gemischte Modelle können des Weiteren dazu benutzt werden, die Eignung von Rasterdichten zu prüfen und Schwachstellen zu erkennen. Auch für die Bestimmung von Einflussgrößen, die auf die Kronenverlichtung wirken, können GAMMs verwendet werden. Neben den kontinuierlich erfassten Einflussgrößen wie Insektenbefall und Fruktifikation stehen für den BZE-Zeitraum eine große Menge potenzieller Einflussgrößen für die Kronenverlichtung zur Verfügung, zu denen Bodeneigenschaften und der Ernährungszustand der Bäume zählen. Witterungsdaten sowie Stoffeinträge liegen ebenfalls von 1990 bis 2010 für die BZE-Stichprobenpunkte vor. Ziele der vorliegenden Studie sind daher, (1) die Raum-Zeit-Modellierung der bundesweiten Kronenverlichtungsdaten von 1989 bis 2015 mit Hilfe von GAMMs für die vier Hauptbaumarten Gemeine Fichte (*Picea abies*), Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Eiche (*Quercus robur* und *Q. petraea*), (2) die Untersuchung des Vorhersagefehlers für das 16 x 16 km EU-Raster sowie für das 8 x 8 km Raster mittels einer Simulationsstudie, um eine Aussage über die generelle Eignung und mögliche Schwachstellen des EU-Rasters für die Raum-Zeit-Auswertung der bundesweiten Waldzustandserhebung treffen zu können und (3) die Bestimmung von Einflussgrößen für die Kronenverlichtung unter Berücksichtigung der BZE-Daten. Diese Studie soll Regionen mit hohem Risiko für Kronenverlichtungen bestimmen, Ursachen hierfür ermitteln und somit dazu beitragen, Maßnahmen für ein nachhaltiges Forstmanagement treffen zu können.

11.2 Daten und Methoden

11.2.1 Waldzustandserhebung

Im Kapitel Methodenüberblick und Qualitätssicherung (Kap. 2.8) werden die wichtigsten Aspekte der WZE kurz aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der WZE (u.a. Ziele, Anlage von WZE-Stichprobenpunkten, Vorgehen für die Erhebung und Codierung von obligatorischen oder fakultativen Parametern, Qualitätssicherung und -kontrolle) findet sich in „Leitfaden und Dokumentation zur Waldzustandserhebung in Deutschland“ (Wellbrock *et al.* 2016).

11.2.2 Datengrundlage und -aufbereitung

In die Auswertung fließen Einzelbaumdaten aus allen Bundesländern und allen Rasterdichten ein, welche im Zeitraum von 1989 bis 2015 erhoben wurden und eine Kronenverlichtung zwischen 0 % und 100 % aufweisen. Auf Basis dieses Datensatzes (als Gesamtdatensatz bezeichnet) werden die Baumartenverteilung, die Baumanzahl sowie die Baumartenanzahl pro Stichprobenpunkt betrachtet (16 x 16 km EU-Raster bzw. alle Rasterdichten). Die im Folgenden beschriebenen auf den GAMMs beruhenden Auswertungen werden ausschließlich für die vier Hauptbaumarten Gemeine Fichte (*Picea abies*), Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Eiche (*Quercus robur* und *Q. petraea*) durchgeführt (Hauptbaumarten-Gesamtdatensatz), da die

Eignung der GAMMs an diesen häufig vorkommenden Arten getestet wird. Zu beachten ist jedoch, dass ca. 16 % der Bäume des 16 x 16 km EU-Rasters nicht zu den Hauptbaumarten zählen und somit für diese Auswertungen nicht berücksichtigt werden. Die Trauben- und die Stieleiche werden zusammengefasst, da häufig keine eindeutige Zuordnung möglich ist. Die Einzelbaumdaten werden nach Baumart für jeden Stichprobenpunkt aggregiert. Die Koordinaten stammen, wenn vorhanden, aus der BZE und werden mit Koordinaten aus der WZE aufgefüllt. Das Bestandsalter errechnet sich aus den Einzelbaumaltern. Falls der jüngste oder älteste Baum um mehr als 20 Jahre vom Mittelwert abweicht, wird der Stichprobenpunkt als „unregelmäßig“ eingestuft. Für Stichprobenpunkte, für die keine Einzelbaumalter angegeben sind (25 % der Stichprobenpunkte; fehlt z.B. systematisch für Bayern von 1989-2005), wird das in der Datenbank vorliegende Bestandsalter (welches nicht artenspezifisch ist) verwendet. Somit konnte 98 % der Stichprobenpunkte des Hauptbaumarten-Gesamtdatensatzes ein Alter (anders als „unregelmäßig“) zugeordnet werden. Der Datensatz für die vier Hauptbaumarten, für den ein Alter vorliegt und dieses nicht „unregelmäßig“ lautet, wird als Maximaldatensatz bezeichnet. Der Maximaldatensatz wird für die Raum-Zeit-Modellierung verwendet.

Für den Hauptbaumarten-Gesamtdatensatz ist die Anzahl an Stichprobenpunkten pro Jahr und Bundesland im Anhang in Tab. A-11-1 dargestellt und die räumliche Lage der Punkte (16 x 16 km EU-Raster sowie Rasterverdichtungen) nach Baumart ist im Kartenband (Karte II-11-1 bis II-11-16) für ausgewählte Jahre ersichtlich. In Bayern fand 2006 eine Rasterverschiebung auf die Traktecke 1 des Rasters der Bundeswaldinventur (BWI) statt. In Brandenburg erfolgte 2009 eine Rasterverschiebung ebenfalls auf das BWI-Raster. Neben dem 16 x 16 km Grundraster gibt es Rasterverdichtungen (Abb. I-11-1). Von 2006 bis 2008 (BZE-Zeitraum) liegt für alle Bundesländer mit Ausnahme von Schleswig-Holstein (8 x 4 km), Rheinland-Pfalz (4 x 12 km + 16 x 16 km) und dem Saarland (2 x 4 km) ein 8 x 8 km Raster vor. Das 8 x 8 km Raster steht zusätzlich für Baden-Württemberg, Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt für den gesamten Zeitraum 2005 bis 2015 zur Verfügung sowie für Mecklenburg-Vorpommern von 1991 bis 2015. In Mecklenburg-Vorpommern wurden 2014 einige Punkte neu eingerichtet bzw. Raster für die Eiche und Buche verdichtet. Ein Teildatensatz aus dem verdichteten Raster liegt außerdem für Bayern von 2009 bis 2015 vor. Aus Rheinland-Pfalz liegen Daten aus dem 4 x 12 km + 16 x 16 km Raster zusätzlich zum BZE-Zeitraum für die Jahre 2009 und 2010 vor und aus dem Saarland Daten aus dem 2 x 4 km Raster zusätzlich für die Jahre 2009 bis 2015.

11.2.3 Statistik

Die Auswertungen erfolgen mit dem Statistik-Programm R 3.2.2 (R Development Core Team 2015).

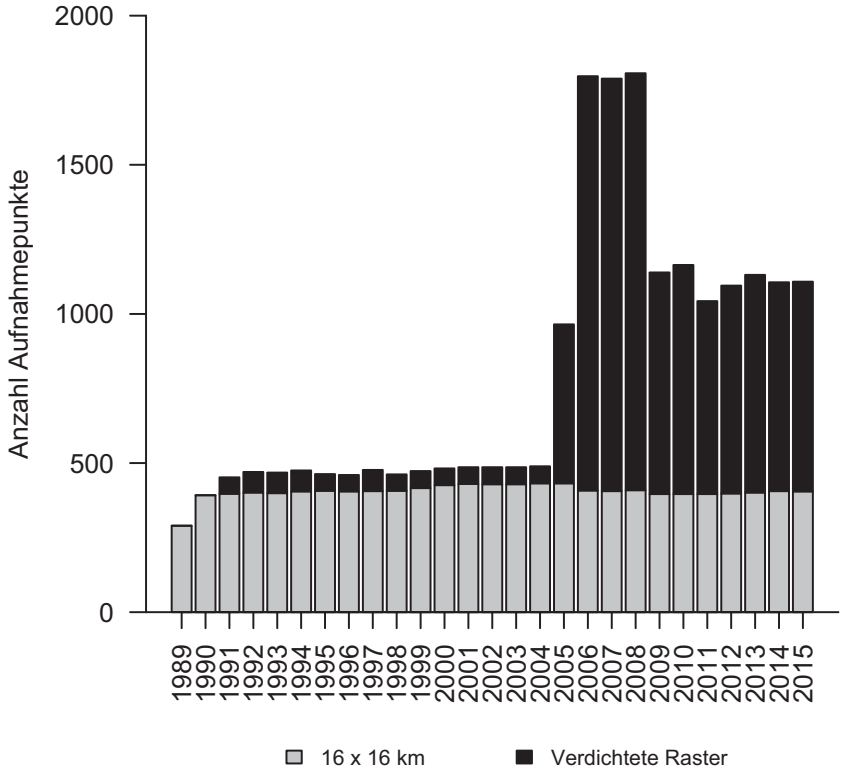

Abb. I-11-1: Anzahl Stichprobenpunkte pro Jahr des 16 x 16 km EU-Rasters und Anzahl Punkte auf verdichteten Rastern für den Hauptbaumarten-Gesamtdatensatz.

11.2.3.1 Explorative Datensichtung

Die explorative Sichtung der Daten beinhaltet neben den in Kapitel 11.2.2 (Datengrundlage) und Kapitel 11.3.1 (Basisauswertung) dargestellten Ergebnissen auch die Betrachtung der Variabilität der Kronenverlichtung innerhalb und zwischen Stichprobenpunkten. Ziel ist die Überprüfung, ob eine Raum-Zeit-Modellierung auf Stichprobenpunktebene sinnvoll ist. Hierzu wurde ein Modell mit zufälligen Effekten angepasst, in dem der Stichprobenpunkt als Zufalls-Parameter angenommen wurde (Augustin *et al.* 2009). Betrachtet wird das 95 %-Konfidenzintervall der Standardabweichung zwischen und innerhalb der Stichprobenpunkte für jedes Jahr. Für die Fichte ist die Variabilität zwischen den Punkten deutlich höher als innerhalb der Punkte. Von den vier Hauptbaumarten weist die Fichte auch die höchste Variabilität zwischen den Punkten auf. Für die Buche und Eiche gilt im Wesentlichen ebenfalls, dass die Variabilität zwischen den Punkten höher ist als innerhalb der Punkte, nur in den ersten Beobachtungsjahren gibt es gelegentlich Überscheidungen der Konfidenzintervalle. Für die Kiefer liegen häufiger Überschneidungen zwischen den Konfidenzintervallen vor, vor allem bis 2004. Die Jahre 2003-2004 weisen für die Kiefer eine sehr niedrige Variabilität zwischen den Stichprobenpunkten auf. Für die Kiefer wurde daher zusätzlich ein Modell, das auf Einzelbaumdaten beruht, getestet (Ergebnisse werden nicht

dargestellt). Das Ziel der vorliegenden Studie ist jedoch nicht die Raum-Zeit-Modellierung der Einzelbäume, daher erfolgt die Modellierung für die vier Hauptbaumarten auf der Stichprobenpunktebene.

11.2.3.2 Generalisierte Additive Gemischte Modelle

Für die Raum-Zeit-Modellierung werden Generalisierte Additive Gemischte Modelle (GAMM) verwendet (Lin & Zhang 1999, Wood 2006a). Die Vorteile dieser Modelle sind vielfältig (Augustin *et al.* 2009). Ein wichtiger Aspekt ist, dass das Modell den Raum-Zeit-Trend und die Raum-Zeit-Wechselwirkung handhaben können muss. Dies kann bei Verwendung von GAMMs durch eine Glättung der Raum-Zeit-Dimension (3-D) mit Hilfe des skaleninvarianten Tensorprodukts („tensor product“) erfolgen (Wood 2006a, b). GAMMs benötigen daher keine regelmäßigen Raster bzw. kontinuierliche Zeitreihen. Sie können für jede Zielgröße angewendet werden, die einer Verteilung aus der exponentiellen Familie folgt, und sie erlauben eine weite Spanne an Korrelationsstrukturen. Im vorliegenden Fall der Kronenverlichtungsdaten gibt es zum einen den zeitlichen Trend in Abhängigkeit von Eigenschaften am Stichprobenpunkt (z.B. Boden, Niederschlag, Luftschadstoffe), der durch die Raum-Zeit-Glättung berücksichtigt wird, zum anderen gibt es die zufällige Variabilität auf Baum- bzw. Punktebene, die zeitlich korreliert ist und der Messwiederholung entstammt. Zum Beispiel bleiben die Nadeln von Nadelbäumen normalerweise mehrere Jahre am Baum und es kann davon ausgegangen werden, dass ein stark geschädigter Baum auch im Folgejahr davon beeinträchtigt sein wird. Diese zeitliche Korrelation muss im Modell berücksichtigt werden. Des Weiteren können nicht-lineare Effekte von Einflussgrößen mit Hilfe von Glättungsfunktionen modelliert werden. Das Baum-/Bestandsalter gilt als eine der relevantesten Einflussgrößen für die Kronenverlichtung (Klap *et al.* 2000, Seidling 2007). Trends, die ausschließlich durch das Alter hervorgerufen werden, können somit von den zeitlichen Trends der Kronenverlichtung, die durch andere Größen bestimmt werden (z.B. Luftschadstoffe, Witterung), separiert werden.

Ein GAMM entspricht einem Generalisierten Linearen Gemischten Modell (GLMM), in dem ein Teil des linearen Prädiktors als Glättungsfunktionen von Kovariaten berechnet wird. Ein GAMM kann wie folgt definiert werden (Formel 11-1):

$$y_i = \mathbf{X}_i \, ß + f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}, x_{3i}) + \cdots + \mathbf{Z}_i \, \mathbf{b} + \epsilon_i \qquad (11\text{-}1)$$

y_i stellt die eindimensionale Responsevariable dar; der Vektor **ß** enthält die fixen Parameter; $\mathbf{X}_i$ repräsentiert eine Reihe der Modellmatrix der fixen Effekte; f_j sind Glättungsfunktionen der Kovariaten x_k; $\mathbf{Z}_i$ repräsentiert eine Reihe der Modellmatrix der zufälligen Effekte; der Vektor **b** enthält die Koeffizienten der zufälligen Effekte und ist $N(0,\boldsymbol{\psi})$ verteilt mit unbekannter positiv-definiter Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\psi}$; $\epsilon \sim N(\mathbf{0},\boldsymbol{\Lambda})$ ist der residuale Fehlerterm mit Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Lambda}$, die die angenommene Fehlerstruktur widerspiegelt.

Für die Parameterschätzung ist eine Reparametrisierung notwendig, so dass jede Glättung eine geringe Anzahl an festen Effekten und eine große Anzahl an zufälligen Effekten benutzt (Augustin *et al.* 2009, Wood 2006b). Hieraus ergibt sich (Formel 11-2):

$$y_i = \mathbf{X}_i \, ß + \mathbf{X}_{fi} \, ß_f + \mathbf{Z}_i \, \mathbf{b} + \mathbf{Z}_{fi} \, \mathbf{b}_f + \epsilon_i = \mathbf{X}_i^* ß^* + \mathbf{Z}_i^* \mathbf{b}^* + \epsilon_i \quad (11\text{-}2)$$

Die Terme $\mathbf{X}_{fit}\mathbf{ß}_f$ und $\mathbf{Z}_{fit}\mathbf{b}_f$ stellen reparametrisierte Formen der festen und zufälligen Effekte in Bezug auf die Glättung dar. Die Komponenten der festen Effekte von f_1, …, f_j (unpenalized coefficients with improper priors) werden in den Term $\mathbf{X}_i^*\mathbf{ß}^*$ aufgenommen, während die Komponenten der zufälligen Effekte von f_1, …, f_j (penalized coefficients with proper priors) in den Term $\mathbf{Z}_i^*\mathbf{b}^*$ aufgenommen werden. Neben den üblichen festen und zufälligen Komponenten kommen somit in der reparametrisierten Form des Modells Glättungskomponenten hinzu.

Im vorliegenden Fall der Kronenverlichtungsdaten wird folgendes Grundmodell für die Raum-Zeit-Modellierung verwendet (Formel 11-3 und 11-4) (Augustin *et al.* 2009):

$$logit\, E(y_{it}) = logit(\mu_{it}) = f_1(Bestandesalter_{it}) + f_2(Rechtswert_i, Hochwert_i, Jahr_t) \quad (11\text{-}3)$$

$$logit(\mu_{it}) = \mathbf{X}_{fit} ß_f + \mathbf{Z}_{fit}\mathbf{b}_f = \mathbf{X}_{it}^* ß^* + \mathbf{Z}_{it}^* \mathbf{b}^* \quad (11\text{-}4)$$

Mit mittlerer Kronenverlichtung als Responsevariable (Formel 11-5):

$$y_{it} = E(y_{it}) + \epsilon_{it} = \mu_{it} + \epsilon_{it} \quad (11\text{-}5)$$

für Stichprobenpunkt $i = 1, \ldots, n$ und für Jahr $t = 1, \ldots, 27$. Der logit-Link wird verwendet, da die Kronenverlichtung einen geschätzten, prozentualen Anteil darstellt. Somit wird sichergestellt, dass sich die gefitteten Werte auf den Bereich (0,1) beschränken. Die Funktion f_1 ist eine eindimensionale Glättungsfunktion des $Bestandsalters_{it}$. Als Glättungsfunktion wird eine kubische Spline-Regression mit Strafterm („penalized cubic regression spline“) verwendet. Die Funktion f_2 ist eine dreidimensionale Glättungsfunktion der Koordinaten (Rechtswert und Hochwert im Gauß-Krüger-Koordinatensystem, Meridianstreifen 4) und des Jahrs. Die Glättung der Raum-Zeit-Dimension erfolgt mit Hilfe des skaleninvarianten Tensorprodukts (Wood 2006a, b). Der Grund für die Verwendung diese Glättungsfunktion liegt in den verschiedenen Einheiten von Raum (Meter) und Zeit (Jahre), welche eine von den verschiedenen Skalen der Kovariaten unabhängige Auswahl der Glättungsparameter erfordert. Für die Glättung mit Hilfe des Tensorprodukts werden verschiedene Strafterme genutzt: für die Koordinaten handelt es sich um eine isotrope „thin plate regression spline“-Basisfunktion und für die Zeitdimension handelt es sich um eine „cubic regression spline“-Basisfunktion (Augustin *et al.* 2009). Im Fall der Buche erfolgt die Raum-Zeit-Modellierung (1999-2015) zusätzlich unter Hinzunahme des Faktors Fruktifikation als festen Effekt. Für den Fehlerterm ϵ wird eine Normalverteilung angenommen, es gilt $N(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{\Lambda})$. Hierbei ist die Kovarianzmatrix $\mathbf{\Lambda}$ eine Blockdiagonalmatrix und der *i*-te Subvektor ϵ_i hat die Kovarianzmatrix $\mathbf{\Lambda}_i$, welche sich auf die Residuen an einem Stichprobenpunkt

i über die Zeit bezieht. Die Kovarianzmatrix $\mathbf{\Lambda}_i$ beinhaltet des Weiteren die Gewichtung α_{it}, wobei α_{it} die Anzahl an Bäumen am Stichprobenpunkt *i* im Jahr *t* repräsentiert. Die zeitliche Korrelation wird als „autoregressiv-moving average"-Prozess erster Ordnung (ARMA(1,1)) modelliert (Pinheiro & Bates 2000), d.h. $\epsilon_{it} = \phi\epsilon_{it\text{-}1} + pc_{it}\text{-}1 + c_{it}$ wobei ϕ und p die Korrelationsparameter darstellen und c_{it} weißes Rauschen mit einem Erwartungswert von Null. Dieser Prozess erster Ordnung wird für alle vier Hauptbaumarten gewählt (nach Modellselektion am geeignetsten). Die zusammengefasste Beschreibung des Modells befindet sich im Anhang in Tab. A-11-2.

Die Parameterschätzung erfolgt wie für die GLMMs mittels „penalized quasi-likelihood" (PQL)-Funktion (Wood 2006a). Für die Schätzung der Varianzkomponenten wird auf den Bayessche Ansatz zurückgegriffen. Da die posterior-Verteilung der Modellparameter bekannt ist, lassen sich mit diesem Ansatz die Vertrauensbereiche erstellen (Silverman 1985, Wahba 1983, Wood 2006c). Das genaue Vorgehen bei den Schätzungen wird in Augustin *et al.* (2009) beschrieben. Die Raum-Zeit-Modellierung erfolgt mit Hilfe der gamm()-Funktion des R-Pakets mgcv (Version 1.8-10; Wood (2015)).

Die Überprüfung des Modells geschieht mit Hilfe von diagnostischen Abbildungen, in denen die Residuen räumlich und zeitlich betrachtet werden (näheres siehe Augustin *et al.* (2009)). Hierzu zählen u.a. empirische Semi-Variogramme (variogram()-Funktion aus dem R-Paket geoR von Ribeiro & Diggle (2015)) sowie empirische (partielle) Autokorrelationsfunktionen (acf()- und pacf()-Funktion aus dem R-Paket nlme von Pinheiro *et al.* (2015)). Es werden die normalisierten Residuen verwendet. Die Parameter Bestandsalter und Jahr wurden auf das Vorliegen von Kollinearität geprüft, was nicht der Fall war.

Für den Modellvergleich bzw. die Modellselektion wird das „Bayesian Information Criterion" (BIC) benutzt (Schwarz 1978), das sich für eine große Stichprobenanzahl im Vergleich zu den Modellparametern besser eignet als das „Akaike Information Criterion" (AIC) (Akaike 1973).

11.2.3.3 Berechnung des Zeittrends

Der Zeittrend kann auf zwei Wege errechnet werden. Zum einen ergeben sich durch Anwendung der geschätzten Parameter auf die beobachteten Daten die gefitteten Werte $\hat{\mu}_{it}$, aus denen sich durch Mittelwertbildung der Zeittrend berechnen lässt (Augustin *et al.* 2009). Zum anderen kann der Bayessche Ansatz genutzt werden, da sich das GAMM auch als Bayessches Modell darstellen lässt. Bei diesem Ansatz werden aus der posterior-Verteilung der Schätzer Daten generiert (Augustin *et al.* 2009, Wood 2006a). Dieser zweite Ansatz wird in der vorliegenden Studie aus folgenden Gründen gewählt. Die mit dem Bayesschen Ansatz generierten Vertrauensbereiche haben in diesem Kontext eine bessere nominale Abdeckung und sind somit verlässlicher als die üblich verwendeten Konfidenzintervalle. Wir erhalten eine posterior-Stichprobe von der posterior-Verteilung der Schätzer. Diese Verteilung ist eine multivariate Normal-Verteilung (Formel 11-6):

$$\left(ß_p^{*T}, \boldsymbol{b}_p^{*T}\right) \sim MVN\left(\left(\widehat{ß}^*, \widehat{\boldsymbol{b}}^*\right), \widehat{Cov}(ß^*, b^*)\right) \quad (11\text{-}6)$$

Hiermit können Daten aus der Vorhersage-Verteilung („predictive distribution“) der Responsevariable generiert werden (Formel 11-7):

$$\hat{y}_{itp} = logit^{-1}\left(\boldsymbol{X}_{it}^{*}\widehat{ß}_p^{*} + \boldsymbol{Z}_{fit}\widehat{\boldsymbol{b}}_{fp}\right) \quad (11\text{-}7)$$

Mittelwertbildung über *i* ergibt die Vorhersage-Verteilung von $\hat{\bar{y}}_t$ (Formel 11-8):

$$\hat{\bar{y}}_{tp} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_{itp}) \quad (11\text{-}8)$$

Hieraus werden der Median und das 2,5. und 97,5. Perzentil (Vertrauensbereich) für den räumlichen $(\hat{y}_{itp})$ und zeitlichen Trend $(\hat{\bar{y}}_{tp})$ berechnet. Für die dargestellte Trendberechnung erfolgt keine Gewichtung nach Baumanzahl am Stichprobenpunkt. Eine Gewichtung würde eine Aussage über die gesamten Bäume in Deutschland ermöglichen. Ziel ist jedoch, eine Aussage über die gesamte Fläche von Deutschland zu treffen (d.h. räumliche Vernetzung). Die Gewichtung würde das Gewicht bestimmter Stichprobenpunkte, an denen keine Reinbestände wachsen, reduzieren, was eine unerwünschte Eigenschaft des Schätzers wäre (Augustin *et al.* 2009). Die Zeittrends wurden vergleichshalber für den gewichteten und ungewichteten Fall geschätzt, es liegen jedoch keine größeren Unterschiede vor.

Während für die Modellierung Daten aus allen Jahren und allen Rasterdichten verwendet werden (Maximaldatensatz mit 16 x 16 km EU-Raster sowie Rasterverdichtungen), erfolgt die Zeittrendberechnung für Deutschland auf Grundlage eines repräsentativen Rasters (Anhang Tab. A-11-3). Folgende Raster werden gewählt: (1) 16 x 16 km EU-Punkte des entsprechenden Jahrs (Raster 1), (2) 16 x 16 km EU-Raster von 2014 (Raster 2) und (3) 4 x 4 km Raster der Bundeswaldinventur (BWI) von 2012 (Raster 3). Für das Raster 1 fließt das im vorliegenden Jahr am Stichprobenpunkt ermittelte Bestandsalter (bzw. gegebenenfalls zusätzlich die ermittelte Fruktifikationsklasse) in die Zeittrendberechnung ein. Das Raster 1 beinhaltet somit Rasterverschiebungen und einzelne Ausfälle/Hinzunahmen von Stichprobenpunkten über die Jahre. Eine Auswertung nach Bestandsalter (≤ und > 60 Jahre) ist möglich. Das Raster 2 wird für die Zeittrendberechnung auf die Jahre 1989 bis 2015 übertragen, d.h. es wird davon ausgegangen, dass es keine Änderung in der Baumartenverteilung gibt. Als mittleres Bestandsalter wird der gewichtete Median der 16 x 16 km EU-Punkte für alle Jahre angenommen. Da sich das mittlere Alter von 1989 bis 2015 wenig verändert hat, wurde das Alter nicht um die 27 Beobachtungsjahre variiert. Zusätzlich zum mittleren Bestandsalter wird das Alter des 25. und 75. Perzentils verwendet. Mit Hilfe von Raster 2 kann somit der Raster- und Alterseffekt herausgenommen werden. Das 16 x 16 km EU-Raster der WZE besitzt keine bundesweit einheitliche Aufhängung, außerdem weichen das Bestandsalter sowie der Anteil an Hauptbaumarten im Mittel von dem bundesweiten Durchschnitt ab. Zum Vergleich wird daher das flächenrepräsentative Raster der Bundeswaldinventur gewählt (BMEL 2014) (Raster 3). Verwendung findet die Traktecke 1 des bundesweiten 4 x 4 km Rasters (Kartenband

Karte II-11-17). Auf diesem Raster liegen auch die WZE-Stichprobenpunkte von Bayern seit der Rasterverschiebung 2006. Es werden nur die Rasterpunkte gewählt, an denen mindestens eine der vier Hauptbaumarten stockt. An 31,9 % der Punkte stockt die Fichte, an 23,8 % der Punkte die Kiefer, an 15,1 % der Punkte die Buche und an 8,8 % der Punkte die Eiche. Das Raster von 2012 wird auf die Jahre 1989 bis 2015 übertragen. Für das Bestandsalter wird das Jahr 2012 pro Rasterpunkt vorliegende Bestandsalter der Hauptbaumarten verwendet. Zum Vergleich wird außerdem der gewichtete Median des Alters im Jahr 2012 genutzt. Das jeweilige Alter wird auf die Jahre 1989 bis 2015 übertragen. Da an einem Teil der Rasterpunkte kein Bestandsalter vorliegt, werden im ersten Fall weniger Rasterpunkte berücksichtigt als bei Verwendung des Medians. Zum Vergleich wird außerdem das mittlere Alter von Raster 2 für das Raster 3 verwendet, um eventuelle Unterschiede, die allein auf Altersunterschieden basieren, zu erkennen. Für die Kiefer liegen keine Unterschiede in den Zeitreihen der drei Varianten des Rasters 3 vor (Anhang Tab. A-11-5). Für die Buche liegt die Kronenverlichtung bei Verwendung des Median-Alters der BWI mit 1,0 % Kronenverlichtung etwas über der Kronenverlichtung der beiden anderen Varianten (Anhang Tab. A-11-6). Für die Fichte liegt die Kronenverlichtung des Median-Alters des EU-Rasters (70 Jahre statt 64 Jahre auf dem BWI-Raster) um 1,3 % über der Kronenverlichtung der beiden anderen Varianten, hier liegt ein klarer Alterseffekt vor (Anhang Tab. A-11-4). Für die Eiche ist die Kronenverlichtung bei Verwendung des tatsächlichen Alters am Punkt 1,85 % Kronenverlichtung niedriger als für die beiden anderen Varianten (Anhang Tab. A-11-7). Für den Vergleich des Zeittrends der Kronenverlichtung auf dem WZE-EU-Raster mit dem BWI-Raster wird im Ergebnisteil nur das BWI-Raster mit dem am Stichprobenpunkt vorliegenden Bestandsalter verwendet (als Raster 3 bezeichnet).

11.2.3.4 Simulationsstudie zum Rastervergleich

Die Bundesländer sind verpflichtet, jährlich die WZE-Daten für das 16 x 16 km EU-Rasters für die Bundesauswertung zu liefern. Es stellt sich jedoch die Frage, ob dieses Raster ausreicht, um Aussagen über räumliche und zeitliche Trends der Kronenverlichtung mit Hilfe von GAMMs für das gesamte Bundesgebiet treffen zu können. Deshalb schätzen wir den mittleren Vorhersagefehler (MPE) der Kronenverlichtungsschätzwerte mit Hilfe von Simulationen für das 16 x 16 km sowie für das 8 x 8 km Raster (Augustin 2006). Verwendet wird das zuvor beschriebene GAMM (alle Bundesländer und Rasterdichten werden berücksichtigt). Des Weiteren wird angenommen, dass die gefitteten Werte $\hat{\mu}_{it}$ den wahren Werten entsprechen. Die Daten werden dann aus der posterior-Verteilung der Schätzer generiert (Formel 11-6 und 11-7). Es gilt (Formel 11-9):

$$logit\ E(y_{it}^{s}) = \eta_{it}^{s} = \boldsymbol{X}_{it}^{*}\widehat{ß}_{p}^{*} + \boldsymbol{Z}_{it}^{*}\widehat{\boldsymbol{b}}_{p}^{*} \qquad (11\text{-}9)$$

mit η_{it}^{s} als linearer Predictor und (Formel 11-10):

$$y_{it}^{s} = \frac{\exp(\eta_{it}^{s})}{1+\exp(\eta_{it}^{s})} + \varepsilon_{it}^{s} \quad (11\text{-}10)$$

Für die Generierung des Fehlerterms werden die Parameterschätzer des ARMA-Fehler-Modells $\varepsilon_i^s \sim N(\mathbf{0}, \hat{\sigma}^2 \widehat{\mathbf{\Lambda}}_i)$ verwendet. Neben der ARMA-Korrelationsstruktur sind ebenfalls die Gewichte $1/\alpha_{it}$ berücksichtigt. Bei Verwendung dieses Simulationsschemas können Kronenverlichtungswerte < 0 und > 1 entstehen, die auf 0 bzw. 1 gesetzt werden. Als Stichprobenpunkte für die Simulationsstudie werden alle bundesweit vorliegenden Punkte aus dem Jahr 2008 genutzt (inklusive Verdichtungen; die Bundesländer Schleswig-Holstein, Rheinland-Pfalz und Saarland werden aufgrund der vom 8 x 8 km Raster abweichenden höheren Rasterdichte nicht berücksichtigt). Für das Bestandsalter wird das 2008 am Stichprobenpunkt vorliegende Alter auf alle Jahre übertragen. Im nächsten Schritt wird eine Stichprobe entnommen und das GAMM an diesen Datensatz angepasst. Bei der entnommenen Stichprobe handelt es sich entweder um die Stichprobe aus dem 16 x 16 km Raster (EU-Raster von 2008, ohne die Bundesländer Schleswig-Holstein, Rheinland-Pfalz und Saarland) oder aus dem 8 x 8 km Raster (Raster von 2008 ohne die erwähnten Bundesländer). Anschließend wird der Raum-Zeit- und Zeittrend geschätzt. Der Zeittrend wird für jedes Bundesland aus den simulierten Daten geschätzt (Formel 11-11):

$$\hat{\mu}_{ta}^{s} = \frac{1}{n}\sum_{i \in a}(\hat{\mu}_{it}^{s}) \quad (11\text{-}11)$$

und dann mit dem wahren Wert, $\hat{\mu}_{ta}$, verglichen, um den mittleren Vorhersagefehler pro Jahr *t* und Bundesland *a* zu schätzen (Formel 11-12):

$$MPE_{ta} = \frac{1}{nsim}\sum_{s=1}^{nsim}(\hat{\mu}_{ta}^{s} - \hat{\mu}_{ta})^2 \quad (11\text{-}12)$$

Der Zeittrend wird außerdem für das gesamte Bundesgebiet aus den simulierten Daten geschätzt (Formel 11-13):

$$\hat{\mu}_{t}^{s} = \frac{1}{n}\sum_{i}(\hat{\mu}_{it}^{s}) \quad (11\text{-}13)$$

und dann mit dem wahren Wert, $\hat{\mu}_t$, verglichen, um den mittleren Vorhersagefehler pro Jahr *t* zu schätzen (Formel 11-14):

$$MPE_{t} = \frac{1}{nsim}\sum_{s=1}^{nsim}(\hat{\mu}_{t}^{s} - \hat{\mu}_{t})^2 \quad (11\text{-}14)$$

Der mittlere Vorhersagefehler pro Stichprobenpunkt *i* und Jahr *t* wird wie folgt geschätzt (Formel 11-15):

$$MPE_{ti} = \frac{1}{nsim}\sum_{s=1}^{nsim}(\hat{\mu}_{it}^{s} - \hat{\mu}_{it})^2 \qquad (11\text{-}15)$$

Im Folgenden wird der Vorhersagefehler als Wurzel aus dem Vorhersagefehler (RMPE) verwendet. Die Aussage beruht auf 40 Simulationen.

11.2.3.5 Einflussgrößen

Ziel dieser Studie ist neben der Raum-Zeit-Modellierung und der Untersuchung der Eignung des Rasternetzes die Bestimmung von Einflussgrößen für die Responsevariable Kronenverlichtung. Die Betrachtung erfolgt getrennt für die vier Hauptbaumarten und (1) für den Zeitraum der BZE (BZE-Zeitraum) sowie (2) für den Zeitraum 1990 bis 2010 (Zeitreihe). Im ersten Fall des BZE-Zeitraums wird ein Mittelwert für die Kronenverlichtung über die drei Jahre 2006 bis 2008 pro Stichprobenpunkt und Baumart berechnet. Die Kronenverlichtung der Stichprobenpunkte ist über die drei Jahre relativ gleichbleibend mit Ausnahme von den Kronenverlichtungen der Buche, die 2006 aufgrund der starken Fruktifikation höher sind. Sämtliche Rasterdichten werden einbezogen. Im zweiten Fall der Zeitreihe werden die Jahresmittelwerte der Stichprobenpunkte des 16 x 16 km EU-Rasters verwendet. Für diese Zeitreihe stehen maximal die Jahre 1990 bis 2010 zur Verfügung.

Für den BZE-Zeitraum liegt eine große Anzahl an potenziellen Einflussgrößen vor. Hierzu zählen Informationen über den Baum (Bestandsalter, Fruktifikation, Insekten-/Pilz- und Wildschäden), die Lage (Exposition, Höhe ü.N.N.), die Witterung (Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, Ariditätsindex über das gesamte Jahr und in der Vegetationsperiode), die Deposition (Ca, Cl, K, Mg, Na, N_{ges}, NH_x, NO_y, SO_z; ggf. seesalzkorrigiert) gemittelt über den Zeitraum 1990-2007 bzw. 2004-2007, Kalkung, Nadel-Blattspiegelwerte (Makro- und Mikronährelement sowie Schwermetalle und Verhältnisse z.B. N/K-Verhältnis) sowie Informationen über den Boden (Bodengroßlandschaft, Bodensubstratgruppen, Bodenausgangsgestein, Humusformen, Bodenart bzw. Sand-/Tongehalt, Versauerungstyp, Wasserkapazität, Makro- und Mikronährelement sowie Schwermetalle (austauschbare Vorräte, Gesamtvorräte, Verhältnisse), Kohlenstoffvorrat, pH-Wert und Basensättigung). Für Bodeninformationen, die für mehrere Tiefenstufen vorliegen, wird eine repräsentative Tiefe gewählt. Für die Zeitreihe stehen weniger potenzielle Einflussgrößen zur Verfügung. Diese sind: Bestandsalter, Fruktifikation (steht erst ab 1999 in der Bundesdatenbank zur Verfügung), Insekten-/Pilz- und Wildschäden (auch des Vorjahrs), Deposition, sich wenig ändernde Bodeninformationen (Bodengroßlandschaft, Bodensubstrat-gruppen, Wasserkapazität, Bodenart), Exposition, Höhe ü.N.N. und Witterungsinformationen (Niederschlag, Temperatur, Verdunstung jeweils für das aktuelle und vorherige Jahr als Jahreswerte).

Für die Untersuchung der Einflussgrößen finden wiederum GAMMs Anwendung. Somit ist es möglich, Faktoren sowie kontinuierliche Variablen einzubeziehen, lineare und nicht-lineare Effekte zu erfassen, die Gewichtung α_{it} zu berücksichtigen und im Fall der Zeitreihe die zeitliche

Korrelation als „autoregressiv-moving average“-Prozess erster Ordnung zu modellieren. Die Beschreibung der Modelle findet sich im Anhang in Tab. A-11-2. In Formel 11-16 ist das finale Modell der Buche beispielhaft als ein Modell des BZE-Zeitraums dargestellt:

$$E(y_i) = \mu_i = f_1(Bestandesalter_i) + f_2(N - Blattgehalt_i) + Fruktifikation_i \qquad (11\text{-}16)$$

für Stichprobenpunkt $i = 1, \ldots, n$. Die Funktionen f_1 und f_2 sind eindimensionale Glättungsfunktionen („penalized cubic regression spline“) des Bestandsalters bzw. des N-Gehalts im Blatt am Stichprobenpunkt *i*. Der Faktor Fruktifikation geht als fester Effekt in das Modell ein. In Formel 11-17 ist das finale Modell der Eiche beispielhaft als ein Modell der Zeitreihe abgebildet:

$$E(y_{it}) = \mu_{it} = f_1(Bestandesalter_{it}) + f_2(K - Deposition_{it}) + Insektenbefall_{it} \qquad (11\text{-}17)$$

für Stichprobenpunkt $i = 1, \ldots, n$ und für Jahr $t = 1, \ldots, m$. Bei den Funktionen f_1 und f_2 handelt es sich um eindimensionale Glättungsfunktionen („penalized cubic regression spline“) des Bestandsalters bzw. Kaliumdeposition am Stichprobenpunkt *i* im Jahr *t*. Der Faktor Insektenbefall geht als fester Effekt in das Modell ein.

Das Bestandsalter stellt für die vier Hauptbaumarten mit Abstand die wichtigste Einflussgröße für die Kronenverlichtung dar. Daher erfolgt eine Vorselektion von Variablen, bei der ein Modell mit dem Bestandsalter und der zu testenden Variable gegen ein Modell nur mit dem Bestandsalter bei gleichem Stichprobenumfang getestet wird. Für die Modellselektion wird das BIC verwendet. Nach der Vorauswahl werden die wenigen Variablen, die übrig bleiben, auf Kollinearität geprüft. Bei starker Abhängigkeit zwischen Variablen wird die Variable gewählt, die in Bezug auf die Kronenverlichtung den höchsten Erklärungswert besitzt. Das finale Modell wird mit Hilfe der Vorwärtsselektion, der Berücksichtigung des BIC und der Prüfung der Residuen ermittelt.

11.3 Ergebnisse und Diskussion

11.3.1 Basisauswertung

Die Gemeine Fichte stellt die am häufigsten untersuchte Baumart im Rahmen der WZE dar (Gesamtdatensatz). Auf dem 16 x 16 km EU-Raster macht sie 32 % aller Bäume aus, gefolgt von der Gemeinen Kiefer mit 29 %, der Rotbuche mit 16 % und den Eichen mit 6 % (Tab. I-11-1). Im Vergleich dazu ergibt die Bundeswaldinventur Flächenanteile von 25 % (Fichte), 22 % (Kiefer), 15 % (Buche) und 10 % Eiche in Bezug auf die bundesweite Waldfläche (BMEL 2014). Die Nadelbäume sind somit bei der WZE überrepräsentiert, während die Eichen unterrepräsentiert sind. Die Fichte findet man häufig in Höhenlagen (z.B. Harz, Thüringer Wald, Erzgebirge, Schwarzwald, Alpenvorland) und kaum in Nordostdeutschland (Kartenband Karte II-11-1 bis 4).

Die Kiefer dagegen wächst schwerpunktmäßig im nordostdeutschen Tiefland, aber auch in Mittel- und Süddeutschland meist außerhalb der Höhenlagen (Kartenband Karte II-11-5 bis 8). Die Buche findet man vor allem in den Mittelgebirgen, aber auch in weiten Bereichen Süddeutschlands, jedoch wenig in Nord- und Nordostdeutschland (Kartenband Karte II-11-9 bis 12). Die Eiche wächst im gesamten Bundesgebiet, jedoch weniger in Höhenlagen (Kartenband Karte II-11-13 bis 16).

Tab. I-11-1: Baumartenverteilung für die Stichprobenpunkte des 16 x 16 km EU-Rasters der WZE (EU) und für die Stichprobenpunkte aller Rasterdichten (alle; 16 x 16 km Raster sowie Rasterverdichtungen). Grundlage bildet der Gesamtdatensatz. Anteil an allen untersuchten Bäumen in Prozent [%].

	GFi	GKi	RBu	Ei	WTa	GEs	SEr	SBi	Dgl	ELa	BAh	Sonstige
EU	32,0	29,1	16,2	6,2	2,1	1,6	1,6	1,4	1,4	1,3	0,9	6,2
alle	28,1	26,7	17,8	8,4	2,7	2,0	1,4	1,5	1,3	1,7	1,1	7,2

GFi = Gemeine Fichte; GKi = Gemeine Kiefer; RBu = Rotbuche; Ei = Stiel- und Traubeneiche; WTa = Weißtanne; GEs = Gemeine Esche; SEr = Schwarzerle; SBi = Sandbirke, Dgl = Douglasie; ELa = Europäische Lärche; BAh = Bergahorn.

Die Anzahl an Bäumen pro Stichprobenpunkt variiert. An 78,5 % der Stichprobenpunkte (16 x 16 km EU-Raster sowie Rasterverdichtungen) des Gesamtdatensatzes werden 24 Bäume untersucht (Kap. 11.2.2). In Nordrhein-Westfalen findet der Linientrakt Anwendung; hier befinden sich 25 Bäume (5,2 % aller Punkte) bzw. 15 Bäume pro Punkt (1,5 %). In Hessen werden seit 2012 24 Bäume pro Punkt angesprochen; zuvor stehen i.d.R. Bewertungen für 30 Bäume in der Bundesdatenbank zur Verfügung. In Bayern wurden vor 1997 ebenfalls 30 Bäume pro Punkt untersucht. Somit liegen an 5,3 % aller Stichprobenpunkte 30 Bäume vor. Von 1997 bis 2005 wurden in Bayern häufig mehr als 30 Bäume pro Punkt bewertet und von 2005 bis 2009 in Hessen bis 78 Bäume (0,4 %). Die Anzahl der angesprochenen Bäume einer Hauptbaumart (nur Kraft'sche Klasse 1-3) pro Stichprobenpunkt variierten ebenfalls (Abb. I-11-2; Hauptbaumarten-Gesamtdatensatz). Bei den beiden Nadelbaumarten stehen oft 24 Bäume einer Art an einem Punkt, während i.d.R. weniger als 24 Bäume einer Laubbaumart an einem Punkt vorkommen.

Hieraus wird deutlich, dass auch die Anzahl an Baumarten pro Stichprobenpunkt schwankt (in Bezug auf die angesprochenen Bäume; Unter- und Zwischenstand sind hierbei nicht berücksichtigt). Auf dem 16 x 16 km EU-Raster befindet sich an 34 % der Stichprobenpunkte des Gesamtdatensatzes nur eine Baumart, an 25 % der Punkte befinden sich zwei Baumarten, an 19 % drei Baumarten, an 12 % vier Baumarten und an 7 % der Punkte fünf Arten. Die Artanzahl hängt in erster Linie von der Waldgeschichte und den gegebenen Standortsverhältnissen ab. Während in Brandenburg und Sachsen-Anhalt eine Baumart bei den angesprochenen Bäumen dominiert, befinden sich in Baden-Württemberg und Bayern meist zwei bis vier Arten, oft sogar sechs Arten, an einem Stichprobenpunkt. In Schleswig-Holstein, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland kommen Stichprobenpunkte mit ein, zwei oder drei Baumarten zu gleichen Anteilen vor.

In den übrigen Bundesländern befindet sich meist eine Art am Stichprobenpunkt, gefolgt von zwei und dann drei Arten.

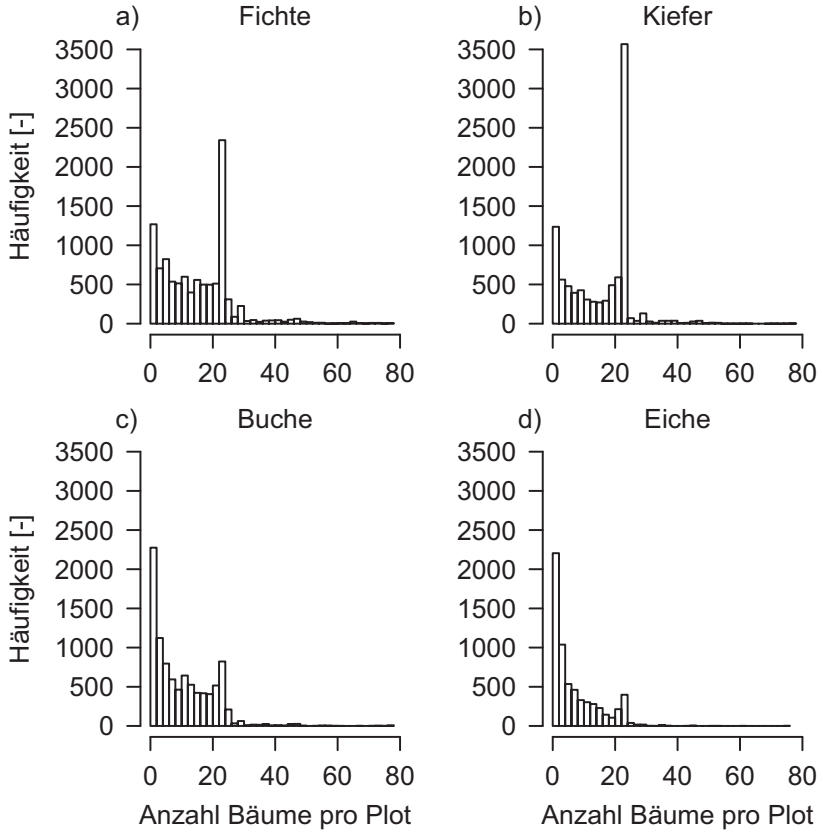

Abb. I-11-2: Häufigkeit der Anzahl von Bäumen einer Hauptbaumart pro Stichprobenpunkt für die Fichte a), Kiefer b), Buche c) und die Eiche d) (16 x 16 km EU-Raster sowie Rasterverdichtungen).

Über den gesamten Zeitraum betrachtet gibt es im Mittel über alle Baumarten auf dem 16 x 16 km EU-Raster des Gesamtdatensatzes 36 tote Bäume (100 % Kronenverlichtung) in der Stichprobe pro Jahr. Diese Anzahl ist seit 1994 recht konstant, davor variierten die Werte jedoch stärker mit einer Spanne zwischen fünf toten Bäumen 1992 und 82 toten Bäumen 1993 (vor allem Bäume von jeweils einem Stichprobenpunkt in Bayern und Hessen; unbekannte Todesursache). Seit 1993 bleiben tote Bäume im Stichprobenkollektiv, solange sie noch Feinreisig tragen.

Für die Zeitreihenauswertung ist es von Interesse, über wie viele Jahre Plots beobachtet wurden. Die Betrachtung des 16 x 16 km EU-Rasters in Bezug auf die Hauptbaumarten (Hauptbaumarten-Gesamtdatensatz) zeigt, dass Stichprobenpunkte am häufigsten die gesamten 27 Jahre von 1989 bis 2015 untersucht wurden (Abb. I-11-3b). Am zweithäufigsten wurden Punkte 17 Jahre beobachtet (Bayern vor der Rasterverschiebung), am dritthäufigsten 10 Jahre (Bayern nach der Rasterverschiebung), am vierthäufigsten 26 Jahre (neue Bundesländer), gefolgt von 19 Jahren

(Brandenburg vor der Rasterverschiebung) und sieben Jahren (Brandenburg nach der Rasterverschiebung). Bei Betrachtung der Stichprobenpunkte von allen Rasterdichten stechen die drei Jahre BZE-Zeitraum hervor (Abb. I-11-3a).

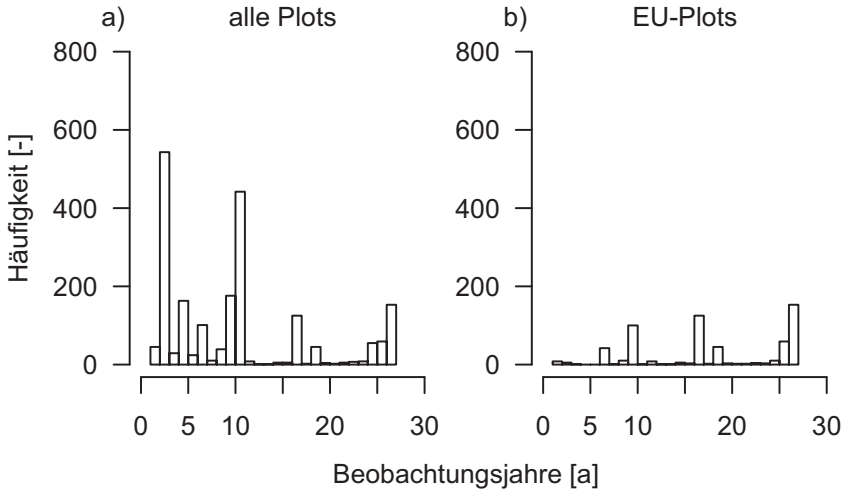

Abb. I-11-3: Häufigkeit der Beobachtungsjahre pro Stichprobenpunkt für alle Rasterdichten a) und für das 16 x 16 km EU-Raster b) (Hauptbaumarten-Gesamtdatensatz).

Das mittlere Bestandsalter unterscheidet sich zwischen den vier Hauptbaumarten (Anhang Abb. A-11-1 und Abb. I-11-4) und zwischen den Bundesländern (Anhang Abb. A-11-2) (Maximaldatensatz). Die beiden Nadelbaumarten sind die im Mittel jüngsten Baumarten. Der nach Baumanzahl am Stichprobenpunkt gewichtete Median für das 16 x 16 km EU-Raster liegt für die Fichte und für die Kiefer bei 70 Jahren (25. Perzentil: 50 Jahre (Fichte) bzw. 49 Jahre (Kiefer) und 75. Perzentil: 90 Jahre bzw. 91 Jahre). Altersschwankungen liegen für beide Baumarten für das EU-Raster von 1989 bis 2015 kaum vor. Bei Betrachtung aller Rasterdichten kann für die Fichte 2005 ein Altersspung beobachtet werden (Anhang Abb. A-11-1a und Abb. I-11-4a), der aus der Rasterverdichtung in Baden-Württemberg resultiert. Von 2009 bis 2015 kann ein leichter Anstieg im Bestandsalter der Fichte verzeichnet werden, der wiederum auf Verdichtungen zurückgeführt werden kann. Die Bundesländer Baden-Württemberg (hier vor allem der Schwarzwald) und Bayern (hier vor allem der Alpenraum) weisen die im Mittel ältesten Fichtenbestände auf (Anhang Abb. A-11-2a und Kartenband Karte II-11-18). Bei Betrachtung aller Rasterdichten steigt das mittlere Bestandsalter der Kiefer ab 2005 an (Anhang Abb. A-11-1b und Abb. I-11-4b). Auch hier spielt die Hinzunahme der Rasterverdichtungen in Mittel- und Süddeutschland die wesentliche Rolle. Die Altersverteilung der Kiefer weist deutliche großräumige Unterschiede auf. Im Norddeutschen Tiefland dominieren jüngere Kiefern um die 50-60 Jahre, während in Mittel- und Süddeutschland ältere Kiefern um die 90 Jahre dominieren (Anhang Abb. A-11-2b; Kartenband Karte II-11-19).

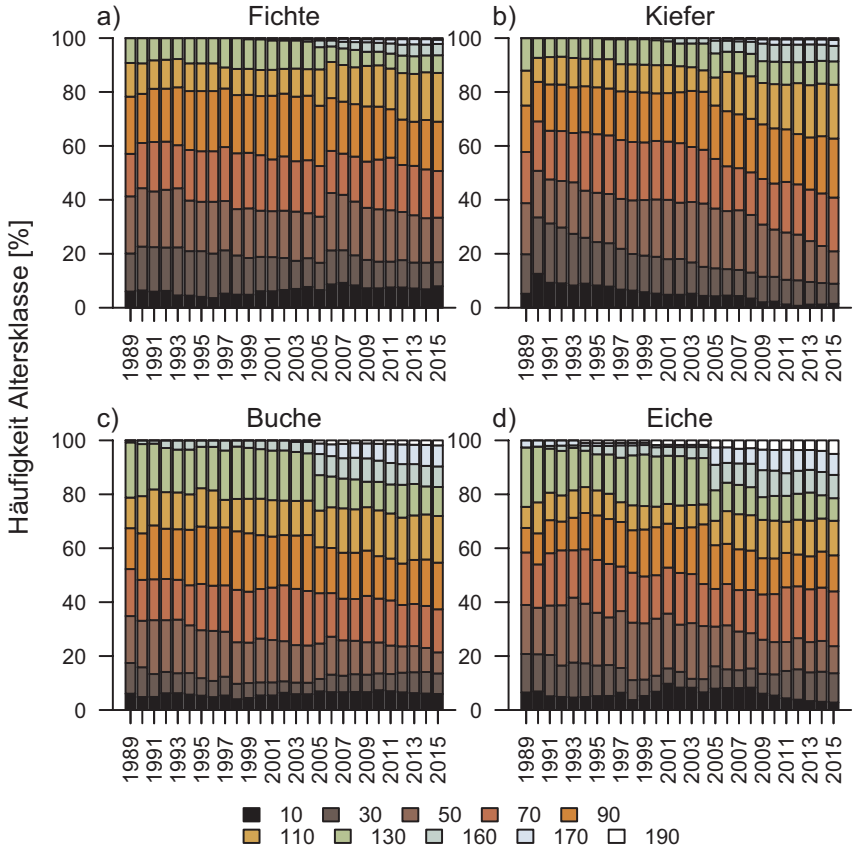

Abb. I-11-4: Häufigkeit der Altersklassen von 1989 bis 2015 für die vier Hauptbaumarten und alle Rasterdichten des Maximaldatensatzes (16 x 16 km EU-Raster sowie Rasterverdichtungen). Die Einteilung nach Altersklassen aus dem Bestandsalter erfolgt wie folgend: Altersklasse 10: 0-≤ 20 Jahre, Altersklasse 30: > 20-≤ 40 Jahre usw., Altersklasse 190: > 180 Jahre.

Die Buche stellt mit 90 Jahren (EU-Raster; 25. Perzentil: 62 Jahre und 75. Perzentil: 130 Jahre) die zweitälteste Baumart dar und auch hier liegen kaum Veränderungen im Median über den Zeitraum vor. Dies ist ebenfalls bei Betrachtung der gesamten Rasterdichten der Fall (Anhang Abb. A-11-1c). Die Einteilung nach Altersklassen zeigt, dass die Altersklasse 130 (> 120-≤ 140 Jahre) seit 2005 (Rasterverdichtungen sind hinzugekommen) abnimmt, gleichzeitig aber die Altersklassen über 130 zunehmen (Abb. I-11-4c). Deutliche Unterschiede in der Altersverteilung und dem mittleren Bestandsalter der Buche zwischen den Bundesländern liegen nicht vor, die ältesten Bestände befinden sich jedoch in Mitteldeutschland (Anhang Abb. A-11-2c; Kartenband Karte II-11-20). Die Eiche stellt die im Mittel älteste Baumart dar. Der gewichtete Median liegt für das EU-Raster bei 103 Jahren (25. Perzentil: 66 Jahre und 75. Perzentil: 130 Jahre). Dieses mittlere Alter weist über den Zeitraum von 1989 bis 2015 kaum Schwankungen auf, auch nicht bei Hinzunahme aller Rasterdichten (Anhang Abb. A-11-1d). Ähnlich wie bei der Buche nehmen die Bestände der Altersklasse 130 seit 2005 ab, während die Altersklassen über 130 zunehmen (Abb. I-11-4d). In den jüngeren Altersklassen gibt es nur wenige Veränderungen über die Zeit. Die im Mittel jüngsten Eichenbestände befinden sich im Osten von Deutschland

(Sachsen, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg) (Anhang Abb. A-11-2d; Kartenband Karte II-11-21).

Im Folgenden werden die für die Raum-Zeit-Modellierung verwendeten Kronenverlichtungsdaten präsentiert. Die Daten stammen von sämtlichen Rasterdichten des Maximaldatensatzes. Die Kronenverlichtungen variieren nach Baumart und Jahr (Anhang Abb. A-11-3) sowie nach Bundesland (Anhang Abb. A-11-4). Die Fichte weist im Mittel relativ gleich bleibende Kronenverlichtungen von 1989 bis 2015 auf (Anhang Abb. A-11-3a). Eine Ausnahme bilden die Jahre 2004 und 2005 mit höherer mittlerer Kronenverlichtung. Die Kronenverlichtung der Kiefer ist im Mittel am niedrigsten und ist ebenfalls recht konstant über die Jahre (Anhang Abb. A-11-3b). Nur das Jahr 1991 zeigt höhere Kronenverlichtungen. Die Bundesländer unterscheiden sich deutlich voneinander (Anhang Abb. A-11-4b). Wie für die Altersverteilung ist auch für die Kronenverlichtung der Kiefer eine deutliche räumliche Teilung zwischen dem norddeutschen Tiefland (niedrigere Kronenverlichtung) und Mittel-/Süddeutschland (höhere Kronenverlichtung) zu erkennen. Die Kronenverlichtung der Buche nimmt von 1989 bis 2015 im Mittel zu (Anhang Abb. A-11-3c). Höchste mittlere Kronenverlichtungen liegen in Mastjahren vor (z.B. 2004, 2009, 2011, 2014). Unterschiede zwischen den Bundesländern kommen wenig vor (Anhang Abb. A-11-4c). Die Eiche zeigt im Mittel die höchste Kronenverlichtung (Anhang Abb. A-11-3d). Ähnlich wie bei der Buche steigt die Kronenverlichtung über die Jahre an, es ist jedoch ein abnehmender Trend in den letzten Jahren zu erkennen. Bundeslandunterschiede sind vorhanden (Anhang Abb. A-11-4d).

Im Rahmen der WZE wird die Fruktifikation der Bäume erhoben. Sie liegt ab 1999 in der Bundesdatenbank vor. Während die Fichte und die Buche ausgesprochene Mastjahre aufzeigen (z.B. 2009, 2011, 2014), ist die Fruktifikation der Eiche zum Zeitpunkt der Aufnahme aufgrund der kleinen Früchte unzureichend abschätzbar (Abb. I-11-5). Die Kiefer fruktifiziert jährlich in etwa in gleichem Ausmaß (Abb. I-11-5), eine Auswirkung auf die Kronenverlichtung der Kiefer ist nicht feststellbar. Die Buche ist die einzige Baumart, bei der sich die Fruktifikation deutlich sichtbar in der Kronenverlichtung widerspiegelt (Anhang Abb. A-11-3c). Für die Fichte liegt ebenfalls ein Einfluss vor, der jedoch weniger ausgeprägt ist als bei der Buche. Räumlich kann die Fruktifikation stark variieren wie z.B. 2014. In diesem Jahr ist eine mittlere und starke Fruktifikation der Fichte fast ausschließlich im Schwarzwald zu verzeichnen (Kartenband Karte II-11-22). Im gleichen Jahr liegt für die Buche deutschlandweit eine mittlere oder starke Fruktifikation vor (Kartenband Karte II-11-23).

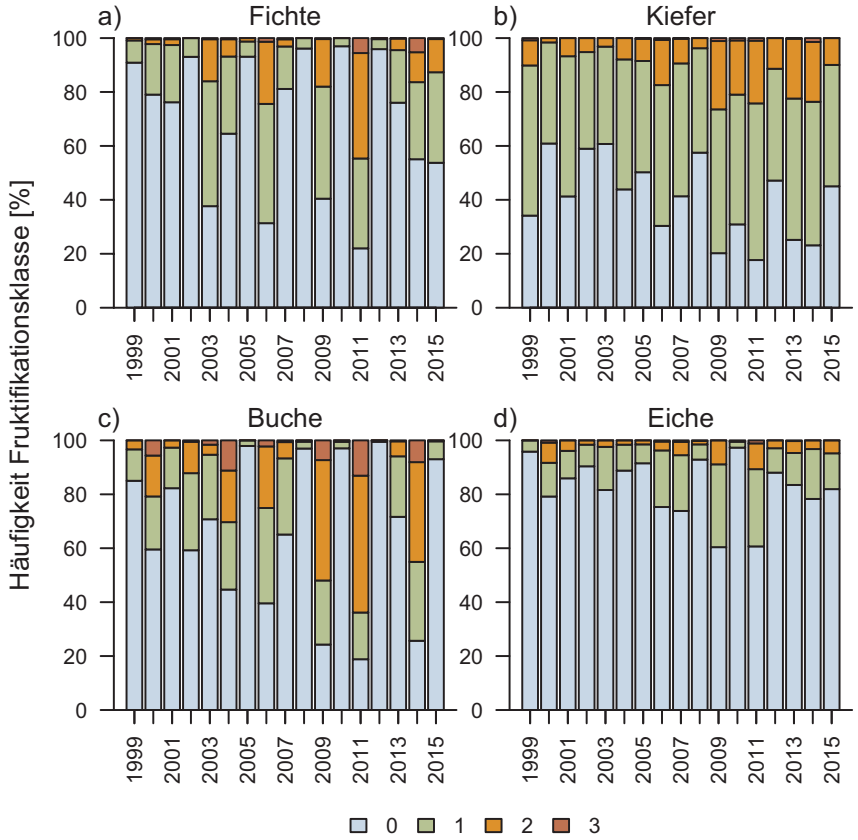

Abb. I-11-5: Häufigkeit der Fruktifikationsklassen von 1999 bis 2015 für die vier Hauptbaumarten. Berücksichtigt wurden alle Rasterdichten. Erläuterung zur Fruktifikationsklasse: 0: keine Fruktifikation, 1: spärliche Fruktifikation, 2: mittlere Fruktifikation, 3: starke Fruktifikation.

11.3.2 Raum-Zeit-Trends

Fichte

Das Raum-Zeit-Modell beschreibt die Kronenverlichtungsdaten der Fichte gut (adjustiertes R^2 von 0,55; Anhang Tab. A-11-8). Sowohl das Bestandsalter als auch die Raum-Zeit-Komponente haben einen hochsignifikanten Effekt auf die Kronenverlichtung ($p < 0{,}0001$). Mit zunehmendem Bestandsalter nimmt auch die Kronenverlichtung zu. Bis zu einem Bestandsalter von rund 60 Jahren nimmt die Kronenverlichtung jedoch etwas stärker zu als in älteren Beständen (Abb. I-11-6).

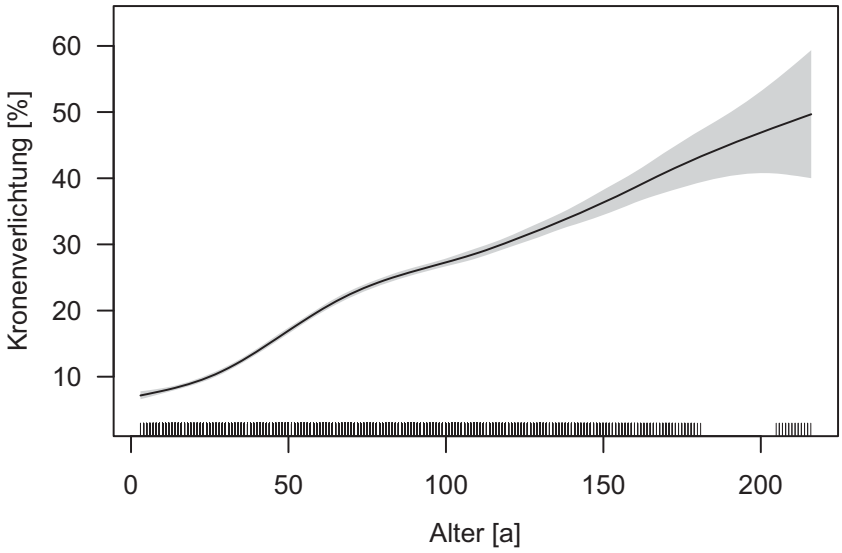

Abb. I-11-6: Effekt des Bestandsalters auf die Kronenverlichtung der Fichte. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Zu Beginn der 1990er Jahre zeigt die Fichte in Nordostdeutschland mittlere Kronenverlichtungen von 25-45 % bis hohe Kronenverlichtungen > 45 % (Abb. I-11-7 und Abb. I-11-8; mit Altersbereinigung). Hierbei handelt es sich vermutlich um eine Folge des Trockenjahrs 1989, welches vor allem in Nordostdeutschland zu Wassermangel geführt hat (Kap. 10). Die Fichte ist jedoch in dieser Region wenig vertreten. Für das Trockenjahr 1992, welches insbesondere die Osthälfte Deutschlands getroffen hat, liegen außerdem im Vergleich zu den Vorjahren etwas erhöhte Kronenverlichtungen in Südostdeutschland (Bayern) vor. Ab dem Extrem-Trockenjahr 2003 kommen in Süd- und Südwestdeutschland vermehrt Kronenverlichtungen im Übergangsbereich zwischen < 25 % und 25-45 % vor (Meining *et al.* 2015). Erhöhte Kronenverlichtungen von 25-45 % wurden vor allem in Baden-Württemberg in dem Jahr 2007 ausgemacht. Die erhöhten Kronenverlichtungen sind vermutlich eine Folge des Trockenjahrs 2006. Insgesamt zeigen die Vegetationszeiten nahezu aller Jahre der untersuchten Zeitreihe positive Abweichungen vom langjährigen Mittel in Bezug auf die Wärme und Trockenheit (Kap. 10).

Im Zeittrend (ohne Altersbereinigung) sind die beiden Zeiträume mit erhöhter Kronenverlichtung nach den Trockenjahren 1992 und 2003 deutlich zu erkennen (Abb. I-11-9). Die mittlere Kronenverlichtung der Fichte liegt bei 21,1 % und schwankt in einem relativ engen Bereich von 18,4 % im Jahr 1989 bis 24,3 % im Jahr 2004. Die relativ hohe Kronenverlichtung 2004 resultiert aus der extremen Trockenheit im Vorjahr. Junge Bestände mit einem Bestandsalter ≤ 60 Jahre weisen mit im Mittel 13,2 % geringere mittlere Kronenverlichtungen auf als alte Bestände (> 60 Jahre) mit im Mittel 26,2 % (Abb. I-11-9). Zusätzlich gibt es im Zeittrend der jungen Bestände weniger Schwankungen.

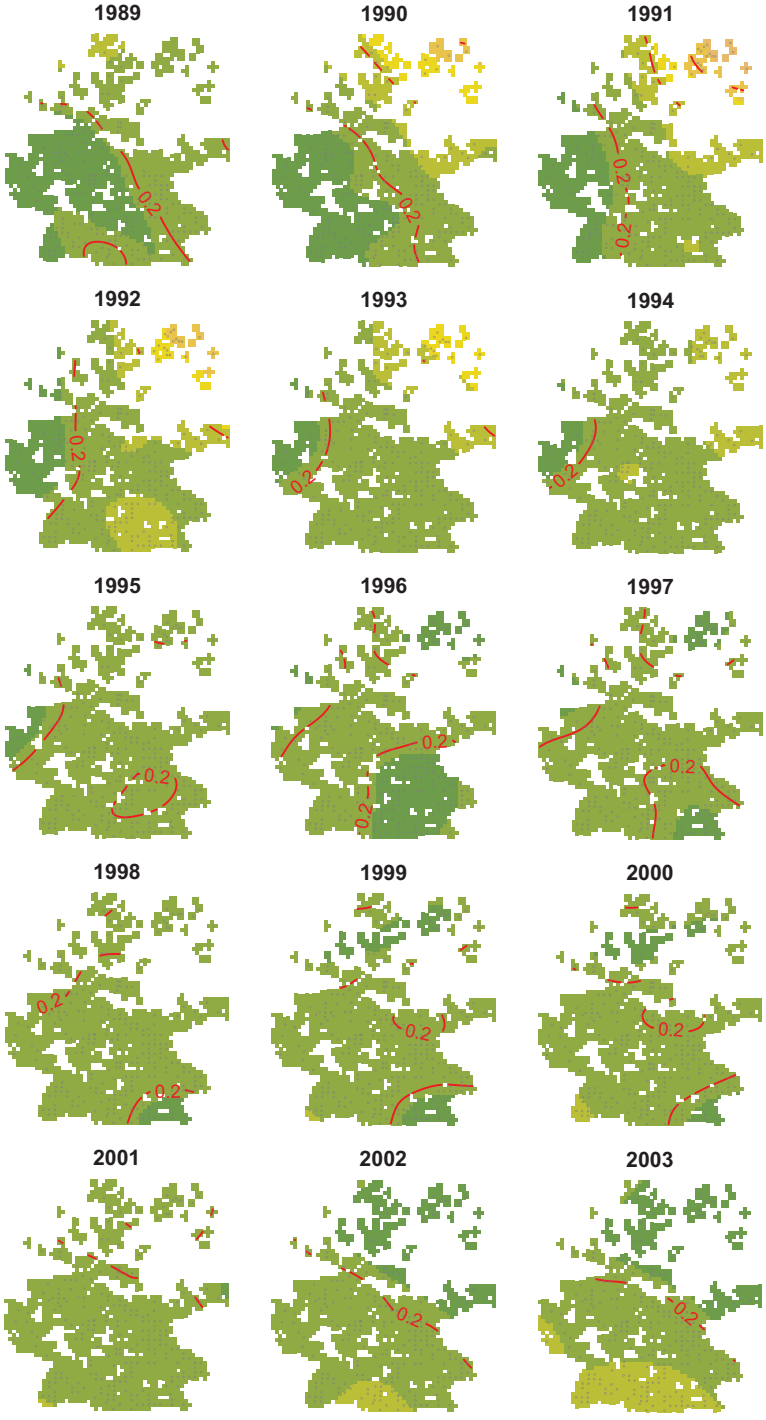

Abb. I-11-7: Räumliche Darstellung der Kronenverlichtung für die Fichte von 1989 bis 2003 bei Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalter von 70 Jahren. Kronenverlichtungsklassen sind farblich gekennzeichnet (Abb. I-11-8). Die Isolinien geben die Kronenverlichtungen wieder (z.B. 0,2 bedeutet 20 %). Die Stichprobenpunkte des jeweiligen Jahrs werden als schwarze Punkte dargestellt.

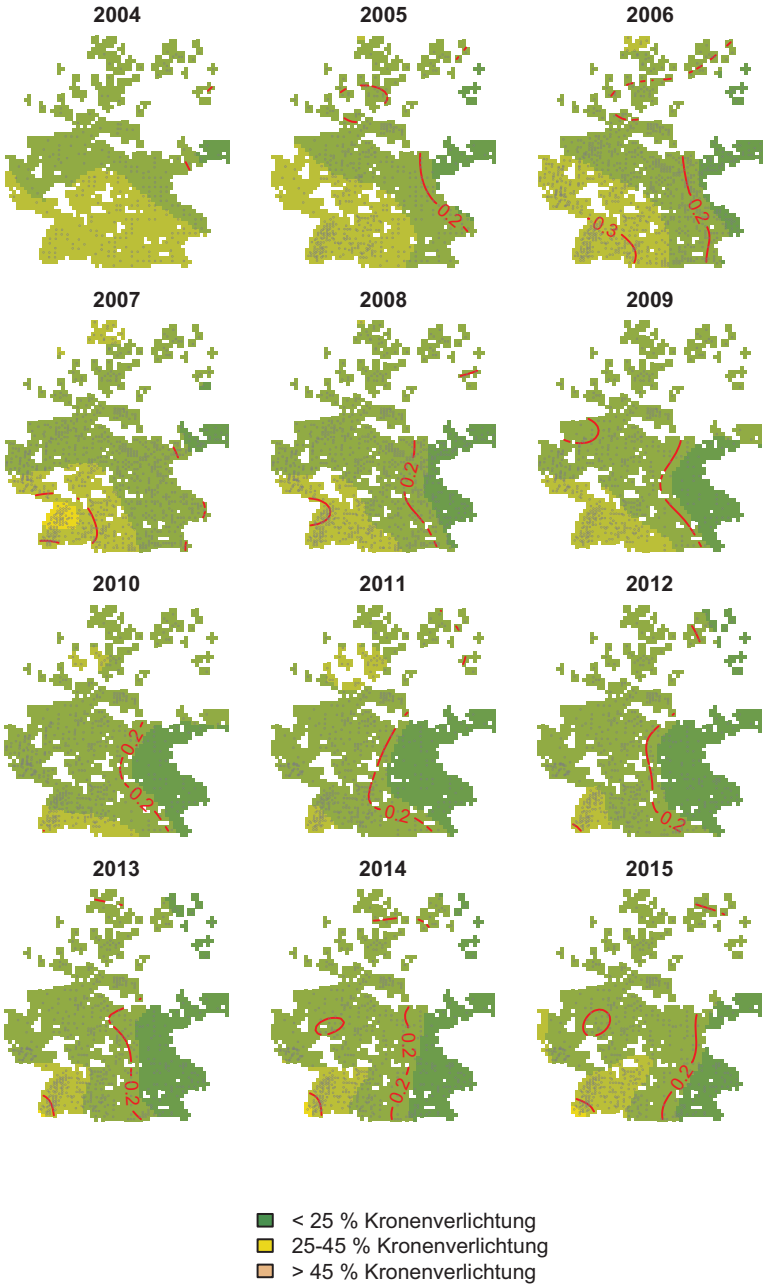

Abb. I-11-8: Räumliche Darstellung der Kronenverlichtung für die Fichte von 2004 bis 2015 bei Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalter von 70 Jahren. Kronenverlichtungsklassen sind farblich gekennzeichnet. Die Isolinien geben die Kronenverlichtungen wieder (z.B. 0,2 bedeutet 20 %). Die Stichprobenpunkte des jeweiligen Jahrs werden als schwarze Punkte dargestellt.

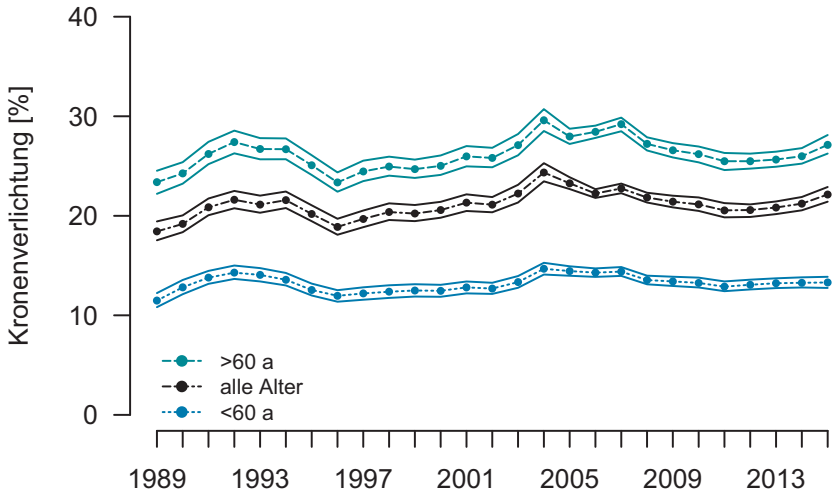

Abb. I-11-9: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Fichte von 1989 bis 2015 unter Verwendung von Raster 1. Das Raster 1 entspricht dem pro Jahr vorliegenden 16 x 16 km EU-Raster. Berücksichtigt werden die tatsächlich pro Jahr am Stichprobenpunkt vorliegenden Bestandsalter. Der Zeittrend für Bestände ≤ 60 Jahre und > 60 Jahre ist ebenfalls dargestellt.

Die Verwendung eines einheitlichen Rasters über alle Jahre (Raster 2, d.h. 16 x 16 km EU-Raster von 2014) sowie die Verwendung des mittleren Fichtenalters der EU-Punkte von 70 Jahren (d.h. mit Altersbereinigung) führt zu rund 1 % höheren mittleren Kronenverlichtungen (Mittel: 22,0 %, Spanne: 19,7-25,1 %) (Abb. I-11-10, Anhang Tab. A-11-4). Unter Verwendung des flächenrepräsentativen BWI-Rasters von 2012 (Raster 3) wird ein sehr ähnlicher Zeittrend geschätzt wie bei Verwendung des 16 x 16 km EU-Rasters (Mittel: 20,5 %, Spanne: 18,7-23,4 %) (Abb. I-11-11, Anhang Tab. A-11-4). Die Schätzung der Modellparameter beruht in den oben genannten Fällen auf sämtlichen Daten des Maximaldatensatzes (16 x 16 km EU-Raster sowie Rasterverdichtungen). Der Vergleich des Zeittrends basierend auf dem Modell sämtlicher Daten mit dem Zeittrend basierend auf dem Modell ausschließlich der 16 x 16 km EU-Daten zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung (Anhang Tab. A-11-4). Somit kann eine repräsentative Aussage bzgl. des Zeittrends der Kronenverlichtung für die gesamte Bundesrepublik auf Basis des 16 x 16 km EU-Rasters der WZE für die Fichte getroffen werden.

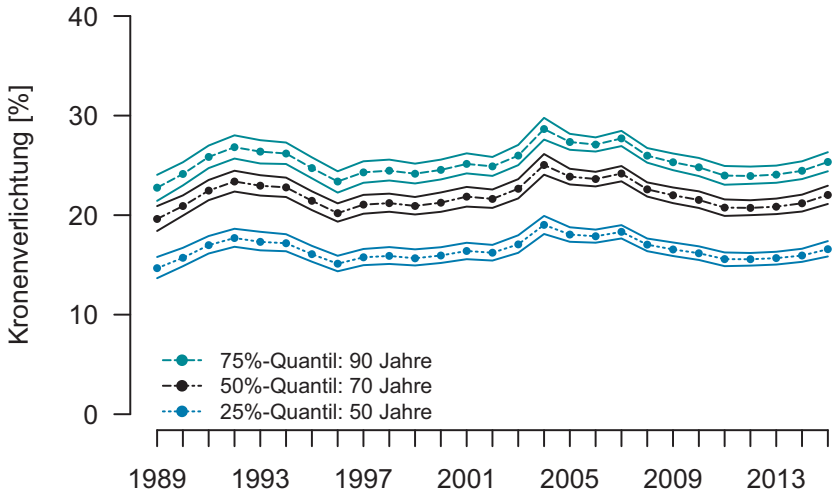

Abb. I-11-10: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Fichte von 1989 bis 2015 unter Verwendung von Raster 2. Das Raster 2 entspricht dem 16 x 16 km EU-Raster von 2014. Für das Bestandsalter wird der gewichtete Median des 16 x 16 km EU-Raster (1989-2015) bzw. das 25. und 75. Perzentil verwendet.

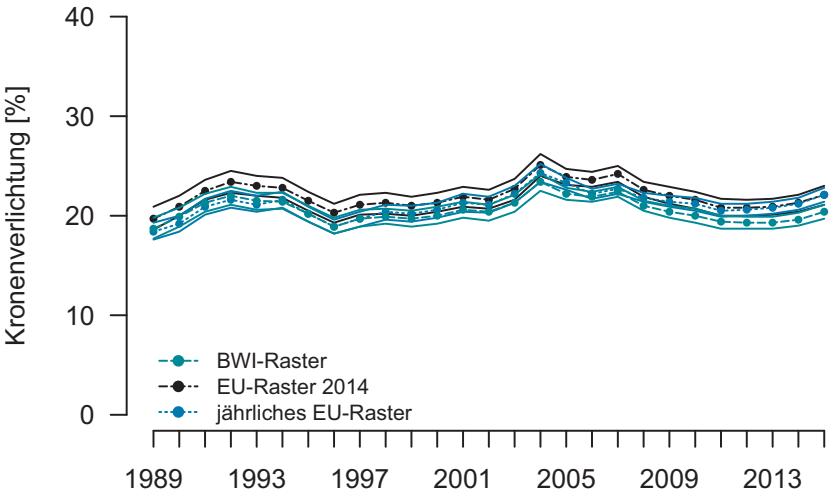

Abb. I-11-11: Vergleich der geschätzten mittleren Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Fichte von 1989 bis 2015 bei Verwendung des Rasters 1, 2 und 3. Das Raster 1 entspricht dem pro Jahr vorliegenden 16 x 16 km EU-Raster (jährliches EU-Raster). Für das Bestandsalter wird das jährliche Alter am Punkt verwendet. Das Raster 2 entspricht dem 16 x 16 km EU-Raster von 2014 (EU-Raster 2014). Für das Bestandsalter wird der gewichtete Median des 16 x 16 km EU-Raster (1989-2015) verwendet. Das Raster 3 entspricht dem flächenrepräsentativen 4 x 4 km BWI-Raster von 2012 (das Bestandsalter der Stichprobenpunkte von 2012 wurde für alle Jahre übernommen).

Kiefer

Das Raum-Zeit-Modell beschreibt die Kronenverlichtungsdaten der Kiefer mit einem adjustierten R^2 von 0,41 etwas schlechter als die der Fichte (Anhang Tab. A-11-8). Sowohl das Bestandsalter als auch die Raum-Zeit-Komponente haben einen hochsignifikanten Effekt auf die Kronenverlichtung der Kiefer ($p < 0{,}0001$). Bis zu einem Bestandsalter von rund 40 Jahren nimmt die Kronenverlichtung zu, während in älteren Beständen kaum eine Abhängigkeit der Kronenverlichtung vom Bestandsalter zu erkennen ist (Abb. I-11-12).

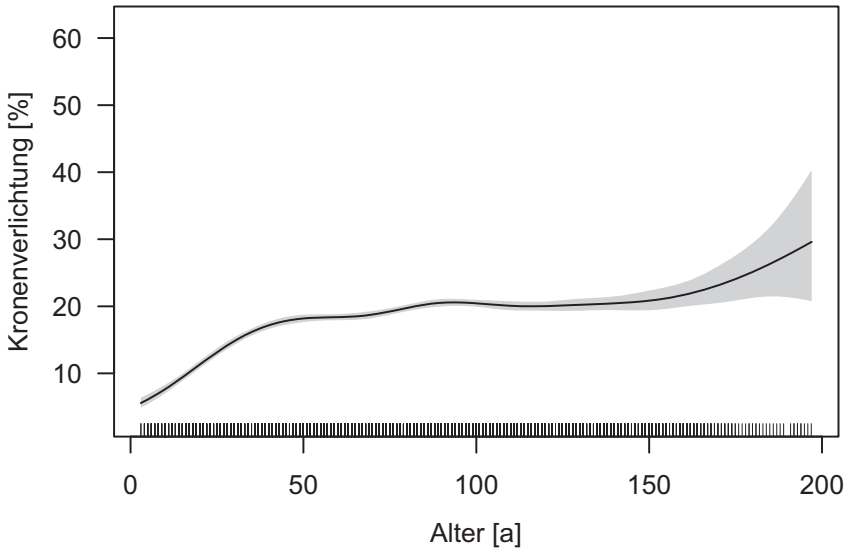

Abb. I-11-12: Effekt des Bestandsalters auf die Kronenverlichtung der Kiefer. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Zu Beginn der 1990er Jahre zeigte die Kiefer in Nordostdeutschland sowie am südlichen Rand Deutschlands, vermutlich als Folge des Trockenjahrs 1989, das insbesondere den Nordosten von Deutschland betraf, und den folgenden ebenfalls vergleichsweise trockenen Jahren, mittlere Kronenverlichtungen von 25-45 % (Abb. I-11-13 und Abb. I-11-14; mit Altersbereinigung). Ab Ende der 1990er Jahre prägt sich ein klarer Unterschied zwischen den Kiefern im Norddeutschen Tiefland und den Kiefern im Mittelgebirge und Süddeutschland aus. Erstere zeichnen sich durch sehr geringe Kronenverlichtungen aus, während letztere etwas höhere Kronenverlichtungen aufweisen. Als Folge des Trockenjahrs 2003 werden in den Folgejahren erhöhte Kronenverlichtungen in Mittel- und Süddeutschland (vor allem in Baden-Württemberg) beobachtet. Ab 2010 liegen auch außerhalb des Norddeutschen Tieflands zum Teil wieder niedrige Kronenverlichtungen vor (z.B. Südostdeutschland); nicht jedoch im Südwesten von Baden-Württemberg.

Abb. I-11-13: Räumliche Darstellung der Kronenverlichtung für die Kiefer von 1989 bis 2003 bei Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalter von 70 Jahren. Kronenverlichtungsklassen sind farblich gekennzeichnet (Abb. I-11-14). Die Isolinien geben die Kronenverlichtungen wieder (z.B. 0,2 bedeutet 20 %). Die Stichprobenpunkte des jeweiligen Jahrs werden als schwarze Punkte dargestellt.

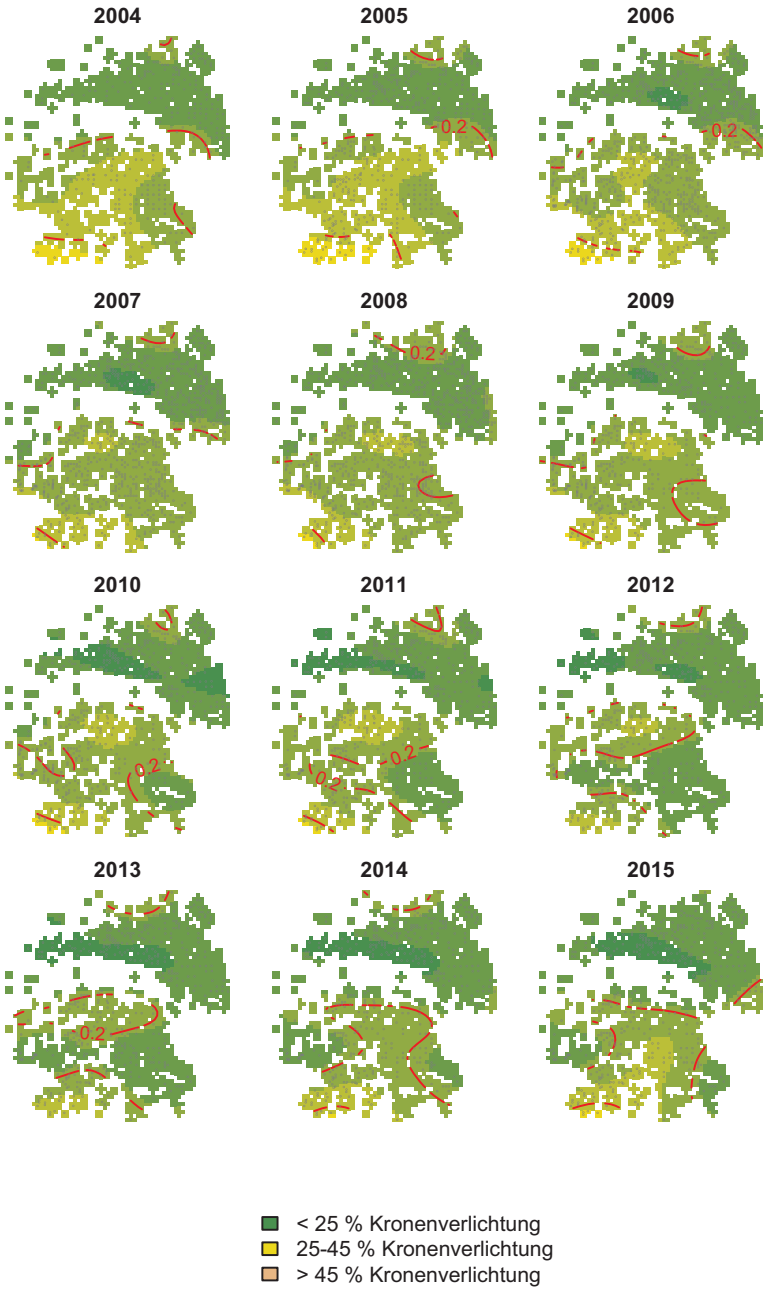

Abb. I-11-14: Räumliche Darstellung der Kronenverlichtung für die Kiefer von 2004 bis 2015 bei Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalter von 70 Jahren. Kronenverlichtungsklassen sind farblich gekennzeichnet. Die Isolinien geben die Kronenverlichtungen wieder (z.B. 0,2 bedeutet 20 %). Die Stichprobenpunkte des jeweiligen Jahrs werden als schwarze Punkte dargestellt.

Im Zeittrend sind bei der Kiefer wie bei der Fichte die beiden Zeiträume mit erhöhter Kronenverlichtung zu Beginn der 1990er Jahre sowie Mitte der 2000er Jahre deutlich zu erkennen (Abb. I-11-15; ohne Altersbereinigung). Die Kiefer weist mit 18,8 % die niedrigste mittlere

Kronenverlichtung der Hauptbaumarten auf (Spanne: 16,8 % (1996)-23,0 % (1991)). Seit Mitte der 1990er Jahren gibt es wenige Veränderungen in der mittleren Kronenverlichtung. Junge Bestände mit einem Bestandsalter ≤ 60 Jahre weisen mit im Mittel 15,1 % geringere mittlere Kronenverlichtungen auf als alte Bestände (> 60 Jahre) mit im Mittel 21,1 % (Abb. I-11-15).

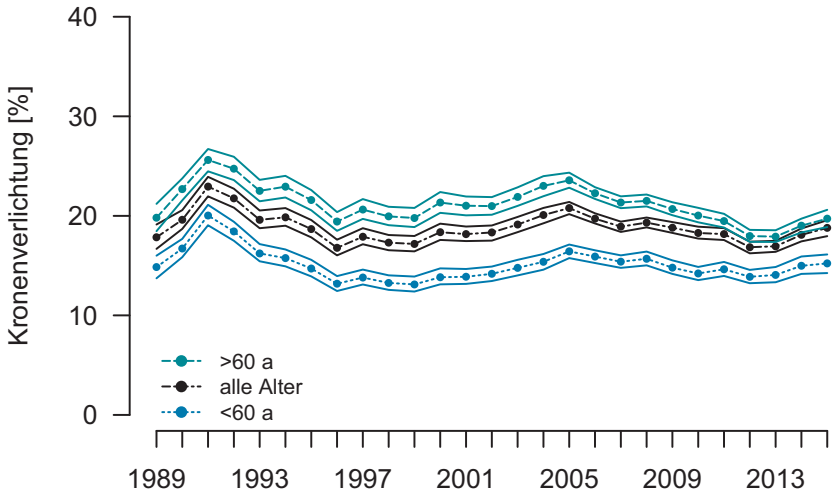

Abb. I-11-15: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Kiefer von 1989 bis 2015 unter Verwendung von Raster 1. Das Raster 1 entspricht dem pro Jahr vorliegenden 16 x 16 km EU-Raster. Berücksichtigt werden die tatsächlich pro Jahr am Stichprobenpunkt vorliegenden Bestandsalter. Der Zeittrend für Bestände ≤ 60 Jahre und > 60 Jahre ist ebenfalls dargestellt.

Die Verwendung eines einheitlichen Rasters über alle Jahre (Raster 2, d.h. 16 x 16 km EU-Raster von 2014) sowie die Verwendung des mittleren Kiefernalters der EU-Punkte von 70 Jahren (d.h. mit Altersbereinigung) führt im Mittel zu ähnlichen mittleren Kronenverlichtungen (Mittel: 19,1 %, Spanne: 16,3-25,6 %) (Abb. I-11-16, Anhang Tab. A-11-5). Auch die Verwendung des flächenrepräsentativen BWI-Rasters von 2012 (Raster 3) resultiert in einem sehr ähnlichen Zeittrend wie bei Verwendung des 16 x 16 km EU-Rasters (Mittel: 18,9 %, Spanne: 16,1-25,2 %) (Abb. I-11-17, Anhang Tab. A-11-5). Des Weiteren liegen kaum Unterschiede zwischen dem Zeittrend basierend auf dem Modell sämtlicher Daten und dem Zeittrend basierend auf dem Modell ausschließlich der 16 x 16 km EU-Daten vor (Anhang Tab. A-11-5). Für den bundesweiten Zeittrend der Kronenverlichtung kann daher eine repräsentative Aussage basierend auf dem 16 x 16 km EU Rasters der WZE im Fall der Kiefer getroffen werden.

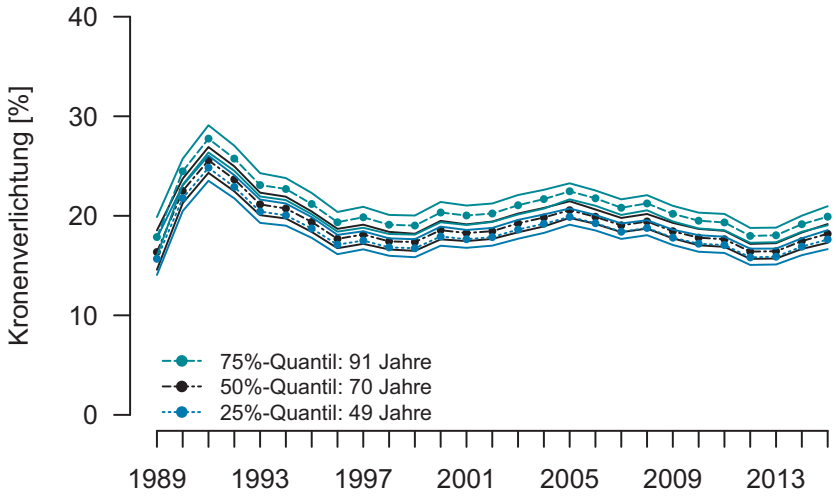

Abb. I-11-16: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Kiefer von 1989 bis 2015 unter Verwendung von Raster 2. Das Raster 2 entspricht dem 16 x 16 km EU-Raster von 2014. Für das Bestandsalter wird der gewichtete Median des 16 x 16 km EU-Rasters (1989-2015) bzw. das 25. und 75. Perzentil verwendet.

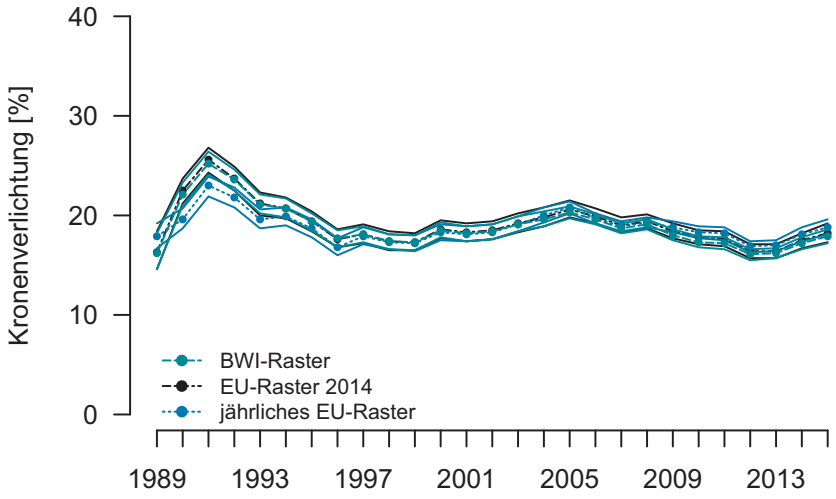

Abb. I-11-17: Vergleich der geschätzten mittleren Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Kiefer von 1989 bis 2015 bei Verwendung des Rasters 1, 2 und 3. Das Raster 1 entspricht dem pro Jahr vorliegenden 16 x 16 km EU-Raster (jährliches EU-Raster). Für das Bestandsalter wird das jährliche Alter am Punkt verwendet. Das Raster 2 entspricht dem 16 x 16 km EU-Raster von 2014 (EU-Raster 2014). Für das Bestandsalter wird der gewichtete Median des 16 x 16 km EU-Raster (1989-2015) verwendet. Das Raster 3 entspricht dem flächenrepräsentativen 4 x 4 km BWI-Raster von 2012 (das Bestandsalter der Stichprobenpunkte von 2012 wurde für alle Jahre übernommen).

Buche

Für die Buche liegt eine gute Anpassung des Raum-Zeit-Modells an die Daten mit einem adjustierten R^2 von 0,47 vor (Anhang Tab. A-11-8). Auch in diesem Modell haben das Bestandsalter wie die Raum-Zeit-Komponente einen hochsignifikanten Effekt auf die Kronenverlichtung der Buche ($p < 0{,}0001$). Anders als bei den beiden Nadelbaumarten nimmt die Kronenverlichtung nahezu linear mit zunehmendem Bestandsalter zu (Abb. I-11-18).

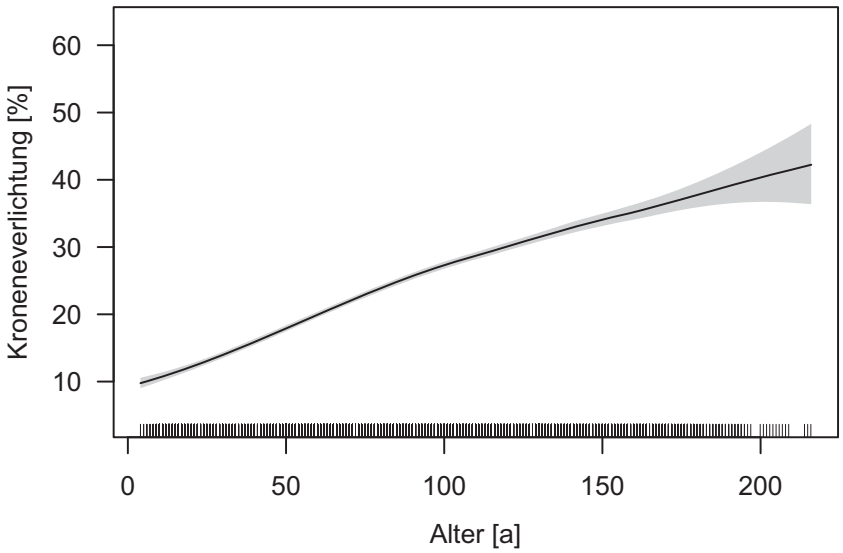

Abb. I-11-18: Effekt des Bestandsalters auf die Kronenverlichtung der Buche. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Zu Beginn der Kronenverlichtungsaufnahmen 1989 bis 1991 zeichnen sich mittlere Kronenverlichtungen von 25-45 % bis hohe Kronenverlichtungen > 45 % in Nordostdeutschland ab (Abb. I-11-19 und Abb. I-11-20; mit Altersbereinigung). Es handelt sich vermutlich um die Folge des insbesondere in Nordostdeutschland aufgetretenen Trockenjahrs 1989 sowie den folgenden vergleichsweise trockenen Jahren. Im Trockenjahr 1992, das vor allem in der Osthälfte Deutschlands stark ausgeprägt war, liegen mittlere Kronenverlichtungen in Mitteldeutschland sowie am Südrand vor. Die mittleren Kronenverlichtungen am südlichen Rand von Deutschland sind ebenfalls im Jahr 1993 zu verzeichnen. Im Jahr 2000 liegen mittlere Kronenverlichtungen in Nordwestdeutschland vor. Vermutlich als Folge des Trockenjahrs 2003 werden in den beiden Folgejahren mittlere Kronenverlichtungen in Südwest- und Mitteldeutschland (vor allem in Baden-Württemberg, aber auch in Saarland, Rheinland-Pfalz, Thüringen und Bayern) beobachtet. Auch das Trockenjahr 2006 führt in Südwestdeutschland zu mittleren Kronenverlichtungen von 25-45 %. Erhöhte Kronenverlichtungen liegen außerdem in den Jahren 2009-2011 und 2013-2015 in Südwestdeutschland vor (Meining *et al.* (2015). In den Jahren 2004, 2006, 2009, 2011 und 2014 sind außerdem ausgesprochene Mastjahre zu beobachten (Abb. I-11-5). Die Fruktifikation weist einen engen Zusammenhang zur Witterung auf und führt in Mastjahren zu vergleichsweise hohen Kronenverlichtungen der Buche.

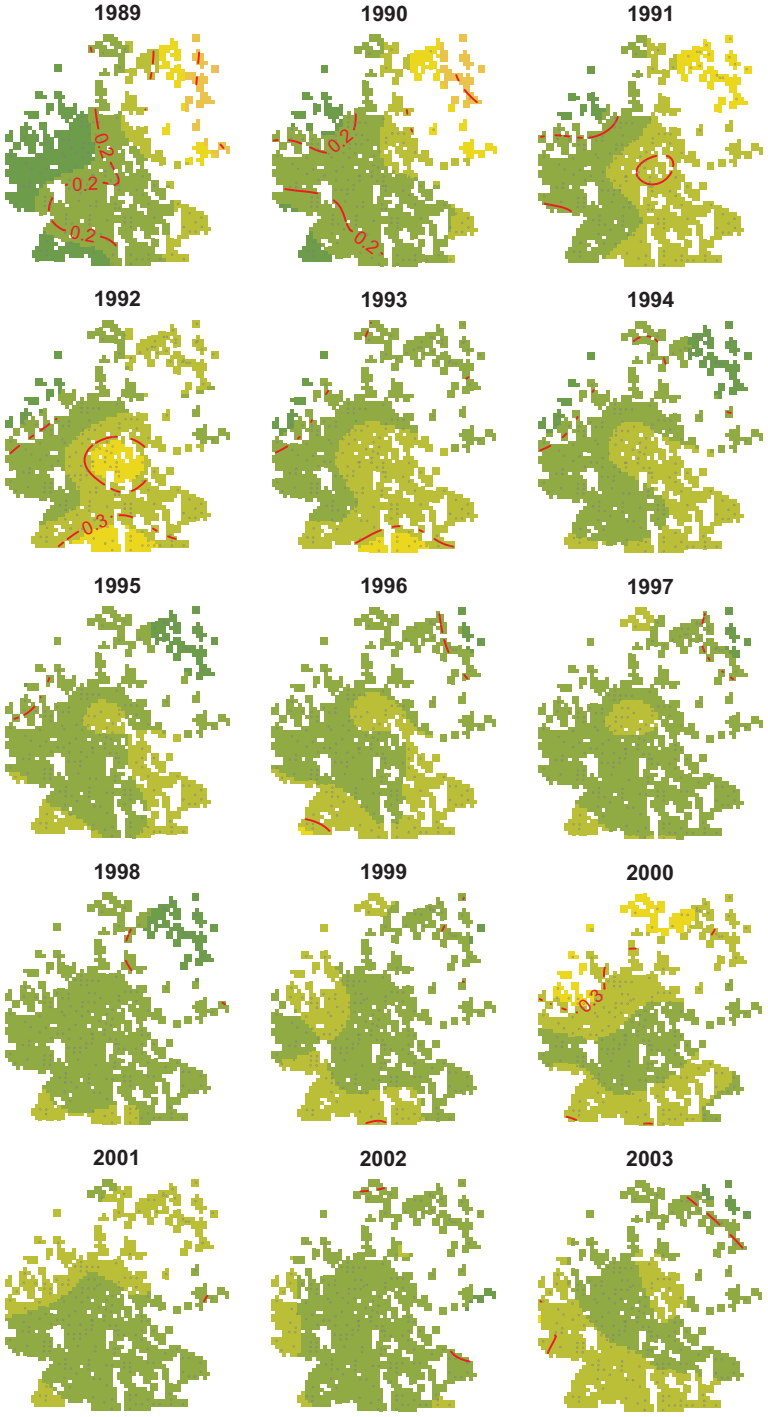

Abb. I-11-19: Räumliche Darstellung der Kronenverlichtung für die Buche von 1989 bis 2003 bei Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalter von 90 Jahren. Kronenverlichtungsklassen sind farblich gekennzeichnet (Abb. I-11-20). Die Isolinien geben die Kronenverlichtungen wieder (z.B. 0,2 bedeutet 20 %). Die Stichprobenpunkte des jeweiligen Jahrs werden als schwarze Punkte dargestellt.

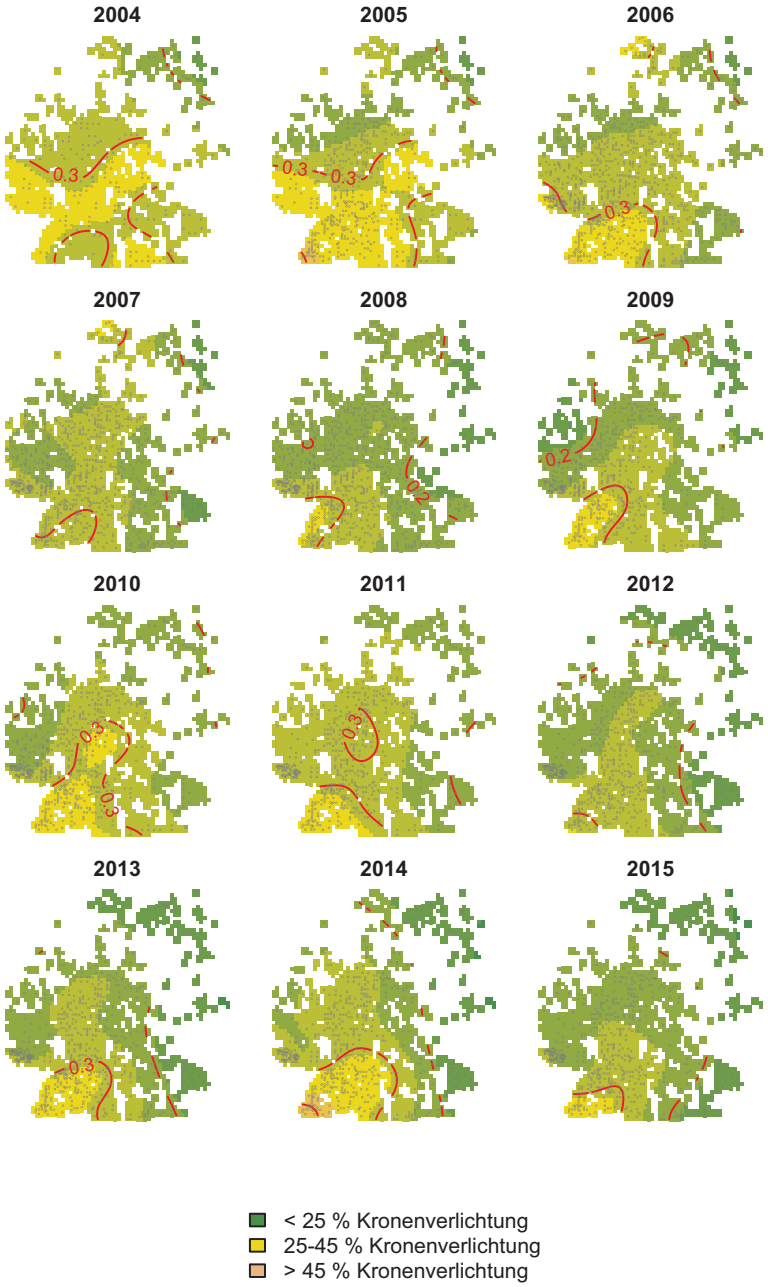

Abb. I-11-20: Räumliche Darstellung der Kronenverlichtung für die Buche von 2004 bis 2015 bei Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalter von 90 Jahren. Kronenverlichtungsklassen sind farblich gekennzeichnet. Die Isolinien geben die Kronenverlichtungen wieder (z.B. 0,2 bedeutet 20 %). Die Stichprobenpunkte des jeweiligen Jahrs werden als schwarze Punkte dargestellt.

Im Zeittrend der Buche ist insgesamt eine Zunahme der mittleren Kronenverlichtung zu erkennen, die jedoch durch starke Schwankungen in Einzeljahren (Mastjahre) gekennzeichnet ist (Abb. I-11-21; ohne Altersbereinigung). Die niedrigsten Kronenverlichtungen ≤ 20 % werden zu

Beginn der Aufnahmen beobachtet (1989: 18,0 %), die höchsten mit 28,2 % in den Jahren 2004 und 2005. Im Mittel liegt die Kronenverlichtung der Buche bei 23,7 %. Junge Bestände mit einem Bestandsalter ≤ 60 Jahre weisen mit im Mittel 15,4 % geringere mittlere Kronenverlichtungen auf als alte Bestände (> 60 Jahre) mit im Mittel 26,7 % (Abb. I-11-21).

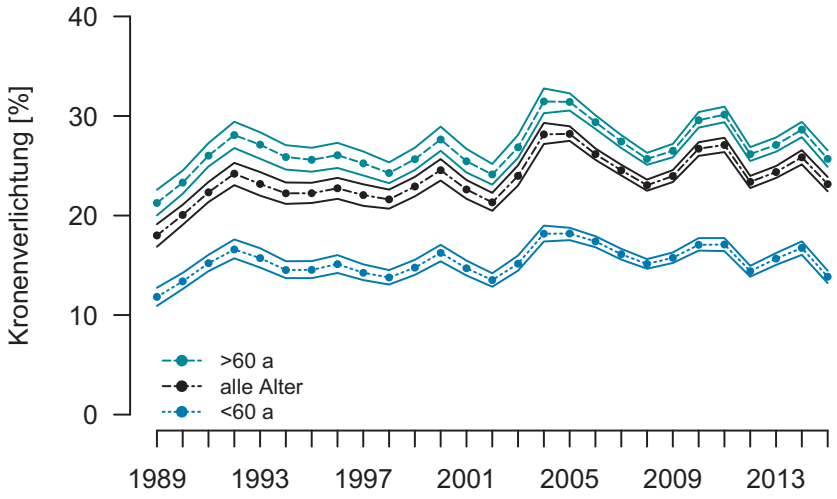

Abb. I-11-21: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Buche von 1989 bis 2015 unter Verwendung von Raster 1. Das Raster 1 entspricht dem pro Jahr vorliegenden 16 x 16 km EU-Raster. Berücksichtigt werden die tatsächlich pro Jahr am Stichprobenpunkt vorliegenden Bestandsalter. Der Zeittrend für Bestände ≤ 60 Jahre und > 60 Jahre ist ebenfalls dargestellt.

Die Verwendung eines einheitlichen Rasters über alle Jahre (Raster 2, d.h. 16 x 16 km EU-Raster von 2014) sowie die Verwendung des mittleren Buchenalters der EU-Punkte von 90 Jahren (d.h. mit Altersbereinigung) führt im Mittel zu 1,2 % höheren mittleren Kronenverlichtungen (Mittel: 24,9 %, Spanne: 21,3-29,2 %), wobei Abweichungen nur bis Anfang der 2000er Jahre zu beobachten sind (Abb. I-11-22, Anhang Tab. A-11-6). Auch die Verwendung des flächenrepräsentativen BWI-Rasters von 2012 (Raster 3) resultiert in einem sehr ähnlichen Zeittrend wie bei Verwendung des 16 x 16 km EU-Rasters (Mittel: 24,9 %, Spanne: 21,5-29,0 %) (Abb. I-11-23, Anhang Tab. A-11-6). Die Zeittrends basierend auf dem Modell sämtlicher Daten und dem Modell der 16 x 16 km EU-Daten weisen kaum Unterschiede auf (Anhang Tab. A-11-6). Die gute Übereinstimmung der Zeittrends zeigt, dass auch für die Buche eine repräsentative Aussage bzgl. des bundesweiten Zeittrends der Kronenverlichtung auf Basis des 16 x 16 km EU-Rasters der WZE getroffen werden kann.

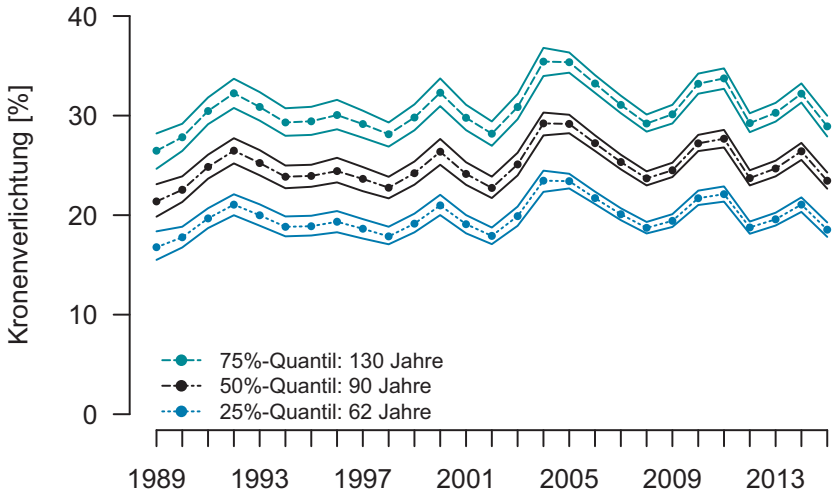

Abb. I-11-22: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Buche von 1989 bis 2015 unter Verwendung von Raster 2. Das Raster 2 entspricht dem 16 x 16 km EU-Raster von 2014. Für das Bestandsalter wird der gewichtete Median des 16 x 16 km EU-Raster (1989-2015) bzw. das 25. und 75. Perzentil verwendet.

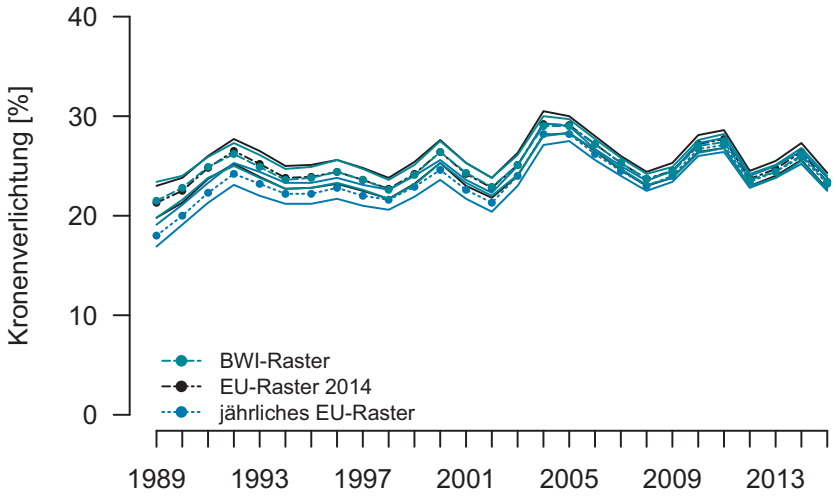

Abb. I-11-23: Vergleich der geschätzten mittleren Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Buche von 1989 bis 2015 bei Verwendung des Rasters 1, 2 und 3. Das Raster 1 entspricht dem pro Jahr vorliegenden 16 x 16 km EU-Raster (jährliches EU-Raster). Für das Bestandsalter wird das jährliche Alter am Punkt verwendet. Das Raster 2 entspricht dem 16 x 16 km EU-Raster von 2014 (EU-Raster 2014). Für das Bestandsalter wird der gewichtete Median des 16 x 16 km EU-Raster (1989-2015) verwendet. Das Raster 3 entspricht dem flächen-repräsentativen 4 x 4 km BWI-Raster von 2012 (das Bestandsalter der Stichprobenpunkte von 2012 wurde für alle Jahre übernommen).

Für die Höhe der Kronenverlichtung der Buche spielt die Fruktifikation eine entscheidende Rolle. Mit zunehmender Fruktifikation nimmt auch die Kronenverlichtung zu (Abb. I-11-24). Die Hinzunahme der Fruktifikation in das Raum-Zeit-Modell ($p < 0{,}0001$) spiegelt den starken Einfluss wider (Abb. I-11-25). Da die Fruktifikation selbst eine Responsevariable darstellt, die z.B. von der Witterung abhängt, wird sie für die Trendschätzung jedoch nicht berücksichtigt.

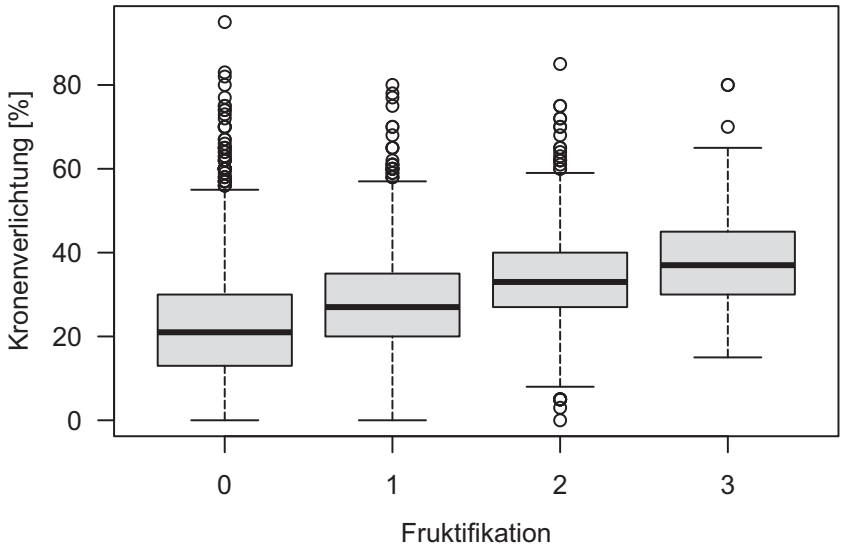

Abb. I-11-24: Kronenverlichtung der Buche nach Fruktifikationsklasse. Berücksichtigt werden alle Rasterdichten. Erläuterung zur Fruktifikationsklasse: 0: keine Fruktifikation, 1: spärliche Fruktifikation, 2: mittlere Fruktifikation, 3: starke Fruktifikation.

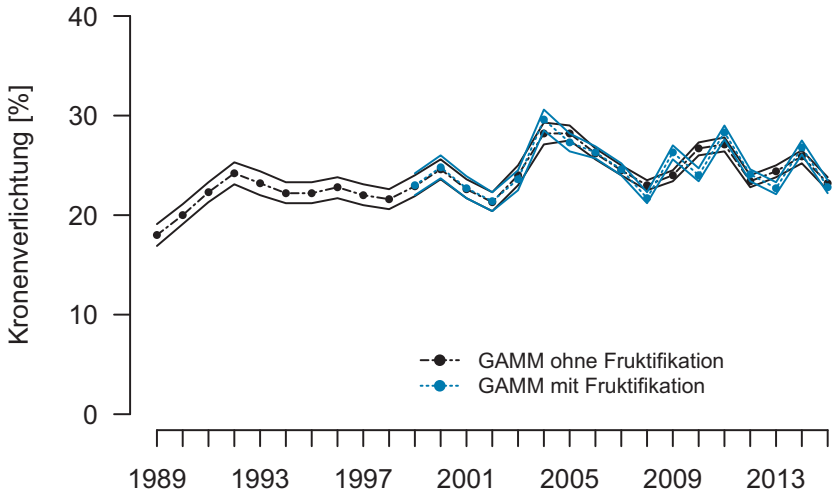

Abb. I-11-25: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Buche unter Verwendung von Raster 1 a) von 1989 bis 2015 ohne Berücksichtigung des Faktors Fruktifikation und b) von 1999 bis 2015 mit Berücksichtigung des Faktors Fruktifikation.

Eiche

Für die Eiche liefert das Raum-Zeit-Modell eine ähnlich gute Anpassung wie für die Buche (adjustiertes R^2 von 0,48; Anhang Tab. A-11-8). Auch in diesem Modell haben das Bestandsalter wie die Raum-Zeit-Komponente einen hochsignifikanten Effekt auf die Kronenverlichtung der Eiche ($p < 0{,}0001$). Die Kronenverlichtung nimmt in jungen Beständen (ca. 60 Jahre) zunächst deutlich zu, während sie in Beständen > 60 Jahren nur wenig weiter ansteigt (Abb. I-11-26). In Altbeständen > 200 Jahren ist wiederum eine Abnahme der Kronenverlichtung zu beobachten.

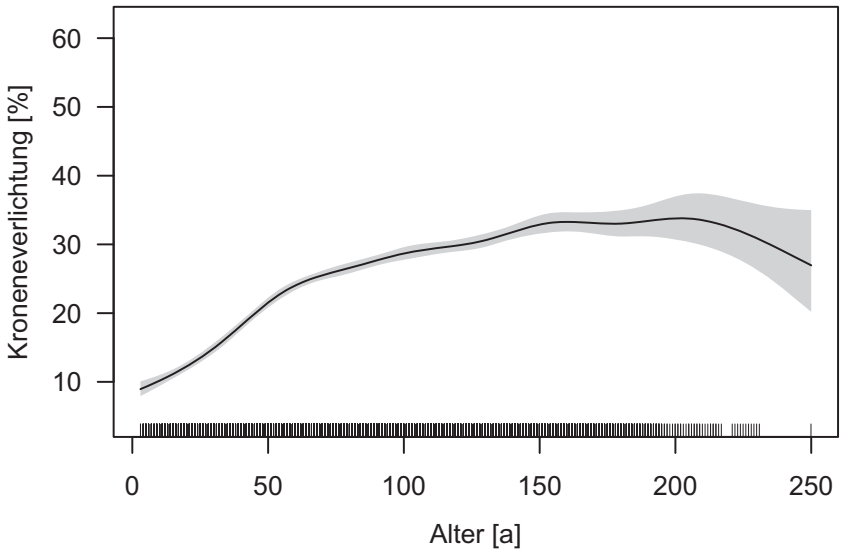

Abb. I-11-26: Effekt des Bestandsalters auf die Kronenverlichtung der Eiche. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Im Gegensatz zu den anderen Hauptbaumarten findet man bei der Eiche in jedem Jahr über größere Gebiete mittlere Kronenverlichtungen von 25-45 % (Abb. I-11-27 und Abb. I-11-28; mit Altersbereinigung). Zu Beginn 1989 liegen bundesweit die niedrigsten Kronenverlichtungen vor. Zu diesem Zeitpunkt findet man nur im Südosten von Deutschland erhöhte Kronenverlichtungen. In den Folgejahren steigt die Kronenverlichtung auch in den anderen Teilen Deutschlands. Sehr hohe Kronenverlichtungen > 45 % kommen vermutlich als Folge des Trockenjahrs 1989 in Nordostdeutschland vor. Ab Mitte der 1990er ist das Gebiet nördlich der Mittelgebirge (vor allem in Nordrhein-Westfalen) von mittleren und teils hohen Kronenverlichtungen betroffen. Nach dem Trockenjahr 2003 nimmt die Kronenverlichtung auch in Südwestdeutschland deutlich zu. In den Jahren 2005 bis 2009 ist ein Unterschied zwischen Nord- und Süddeutschland zu erkennen, mit erhöhten Kronenverlichtungen im Süden (vor allem Südwesten) und (sehr) geringen Kronenverlichtungen im Norden. Von 2010 bis 2013 sind wiederum bundesweit Gebiete mit erhöhten Kronenverlichtungen auszumachen (Nordrhein-Westfalen, Süd(west)deutschland, Ostdeutschland). In den Jahren 2014 und 2015 liegen vergleichsweise niedrige Kronenverlichtungen vor (Ausnahme Südwestdeutschland). Neben hohen Verlichtungen in Süddeutschland stellt die Westfälische Bucht einen Hotspot langfristiger hoher Kronenverlichtungen dar.

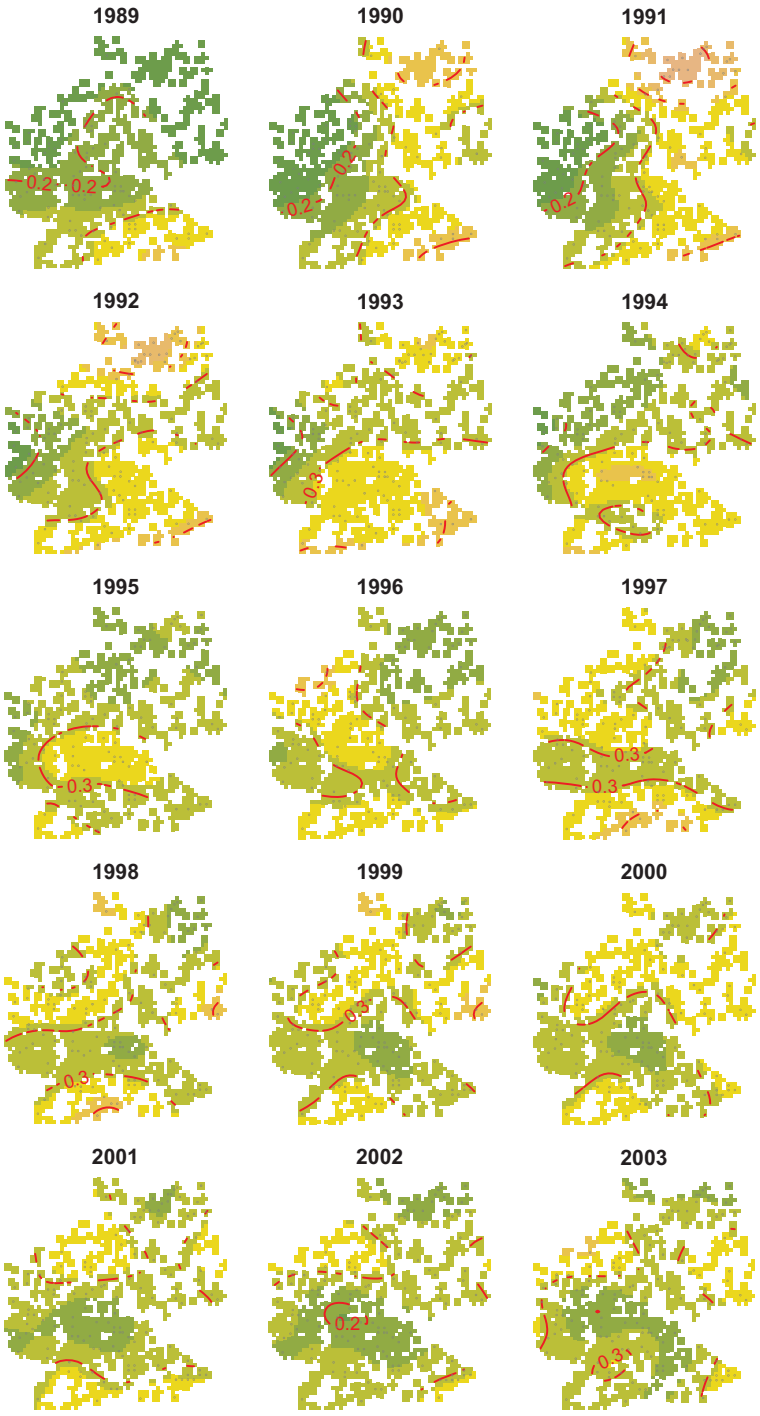

Abb. I-11-27: Räumliche Darstellung der Kronenverlichtung für die Eiche von 1989 bis 2003 bei Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalter von 103 Jahren. Kronenverlichtungsklassen sind farblich gekennzeichnet (Abb. I-11-28). Die Isolinien geben die Kronenverlichtungen wieder (z.B. 0,2 bedeutet 20 %). Die Stichprobenpunkte des jeweiligen Jahrs werden als schwarze Punkte dargestellt.

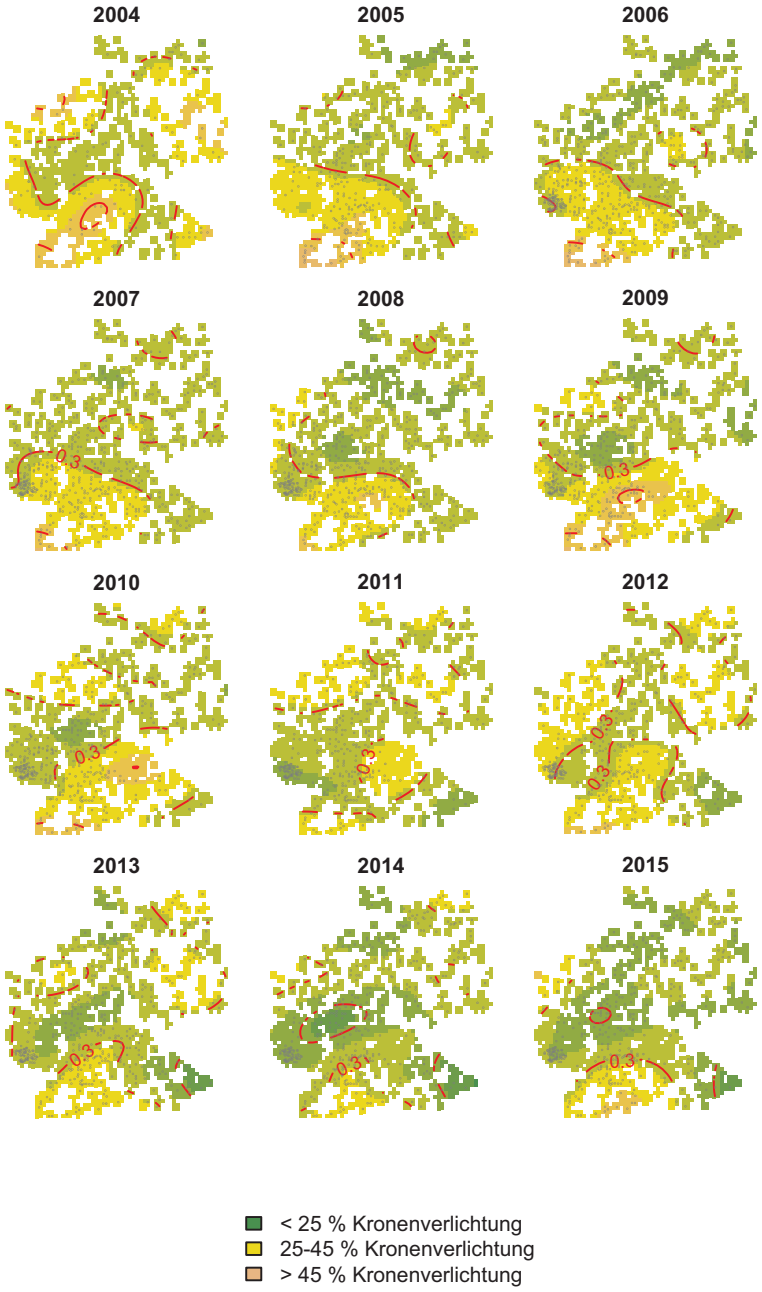

Abb. I-11-28: Räumliche Darstellung der Kronenverlichtung für die Eiche von 2004 bis 2015 bei Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalter von 103 Jahren. Kronenverlichtungsklassen sind farblich gekennzeichnet. Die Isolinien geben die Kronenverlichtungen wieder (z.B. 0,2 bedeutet 20 %). Die Stichprobenpunkte des jeweiligen Jahrs werden als schwarze Punkte dargestellt.

Die Eiche weist die im Mittel höchste Kronenverlichtung auf (25,3 %) (Abb. I-11-29; ohne Altersbereinigung). Bis Mitte der 1990er Jahre ist ein Anstieg zu verzeichnen, von da an schwankt

die Kronenverlichtung. Die niedrigste Kronenverlichtung von 19,9 % wird 1989 beobachtet, die höchsten 2004 (28,7 %). Junge Bestände mit einem Bestandsalter ≤ 60 Jahre weisen mit im Mittel 17,9 % geringere mittlere Kronenverlichtungen auf als alte Bestände (> 60 Jahre) mit im Mittel 28,6 % (Abb. I-11-29). In den jüngeren Beständen lässt sich außerdem eine Abnahme der Kronenverlichtung seit Mitte der 2000er Jahre ausmachen. Die Eiche stellt die im Mittel älteste Hauptbaumart dar.

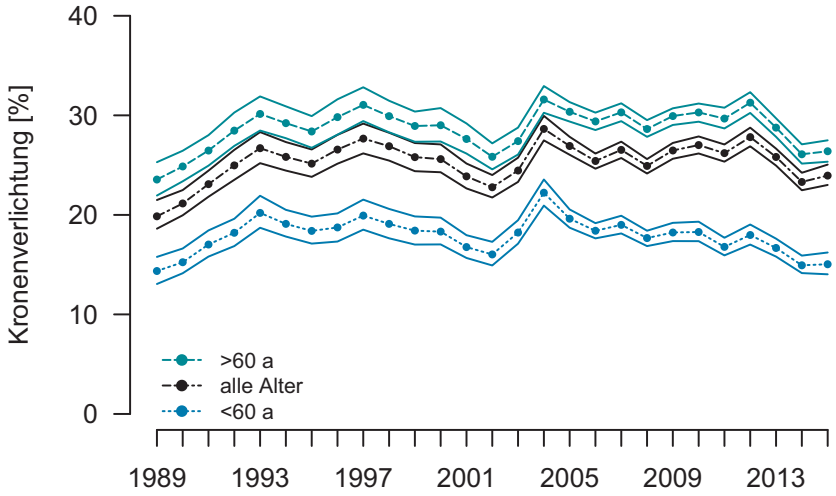

Abb. I-11-29: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Eiche von 1989 bis 2015 unter Verwendung von Raster 1. Das Raster 1 entspricht dem pro Jahr vorliegenden 16 x 16 km EU-Raster. Berücksichtigt werden die tatsächlich pro Jahr am Stichprobenpunkt vorliegenden Bestandsalter. Der Zeittrend für Bestände ≤ 60 Jahre und > 60 Jahre ist ebenfalls dargestellt.

Die Verwendung eines einheitlichen Rasters über alle Jahre (Raster 2, d.h. 16 x 16 km EU-Raster von 2014) sowie die Verwendung des mittleren Eichenalters der EU-Punkte von 103 Jahren (d.h. mit Altersbereinigung) führt im Mittel zu 3,6 % höheren mittleren Kronenverlichtungen (Mittel: 28,9 %, Spanne: 21,9-32,4 %) (Abb. I-11-30, Anhang Tab. A-11-7). Der Zeittrend, der sich unter Verwendung des flächenrepräsentativen BWI-Rasters von 2012 (Raster 3) ergibt, liegt zwischen den Zeittrends der beiden 16 x 16 km EU-Raster (Mittel: 26,9 %, Spanne: 20,0-30,2 %) (Abb. I-11-31, Anhang Tab. A-11-7). Die Zeittrends basierend auf dem Modell sämtlicher Daten und dem Modell der 16 x 16 km EU-Daten weisen von 1989 bis 2007 nur geringe Unterschiede auf (Anhang Tab. A-11-7). Unterschiede von ca. 2 % Kronenverlichtung bestehen jedoch ab 2008. Für die Eiche liegen insgesamt größere Unterschiede zwischen den Zeittrends im Vergleich zu den anderen Hauptbaumarten vor. Die Aussage bzgl. des bundesweiten Zeittrends der Kronenverlichtung auf Basis des 16 x 16 km EU-Rasters der WZE weist somit größere Unsicherheiten auf als für die drei anderen Hauptbaumarten.

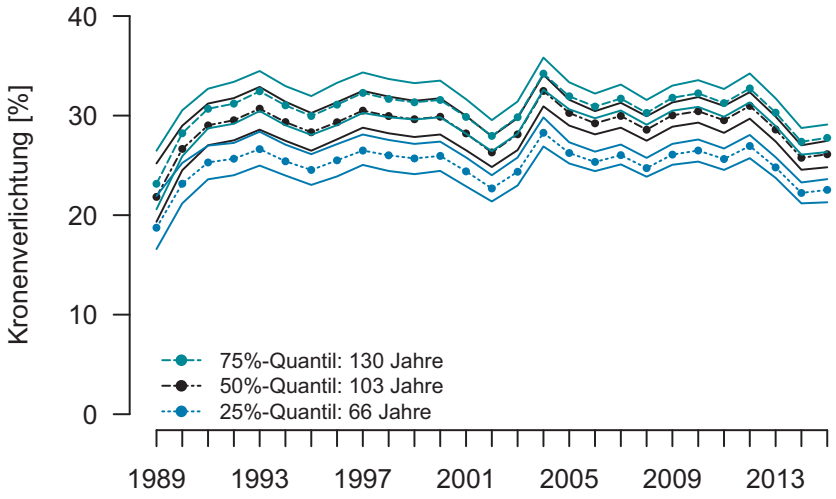

Abb. I-11-30: Geschätzte mittlere Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Eiche von 1989 bis 2015 unter Verwendung von Raster 2. Das Raster 2 entspricht dem 16 x 16 km EU-Raster von 2014. Für das Bestandsalter wird der gewichtete Median des 16 x 16 km EU-Raster (1989-2015) bzw. das 25. und 75. Perzentil verwendet.

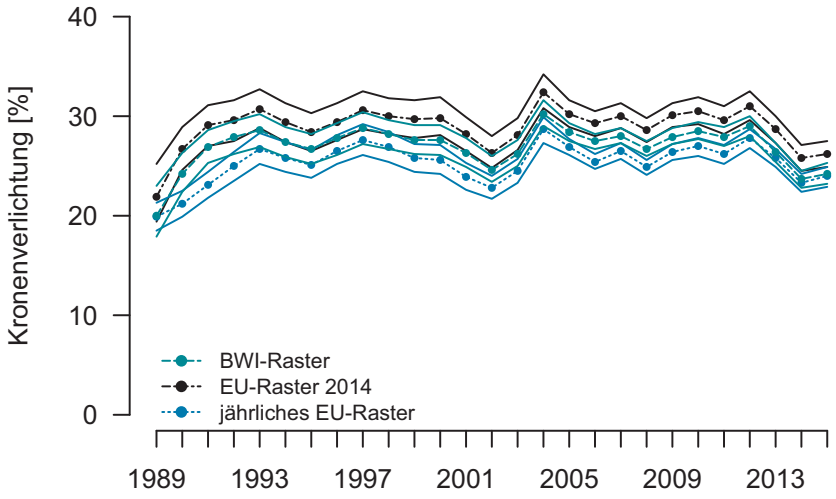

Abb. I-11-31: Vergleich der geschätzten mittleren Kronenverlichtung mit Vertrauensbereich für die Eiche von 1989 bis 2015 bei Verwendung des Rasters 1, 2 und 3. Das Raster 1 entspricht dem pro Jahr vorliegenden 16 x 16 km EU-Raster (jährliches EU-Raster). Für das Bestandsalter wird das jährliche Alter am Punkt verwendet. Das Raster 2 entspricht dem 16 x 16 km EU-Raster von 2014 (EU-Raster 2014). Für das Bestandsalter wird der gewichtete Median des 16 x 16 km EU-Raster (1989-2015) verwendet. Das Raster 3 entspricht dem flächenrepräsentativen 4 x 4 km BWI-Raster von 2012 (das Bestandsalter der Stichprobenpunkte von 2012 wurde für alle Jahre übernommen).

11.3.3 Rastervergleich

In diesem Teilkapitel wird der Frage nachgegangen, ob das 16 x 16 km EU-Raster, für das jährlich verpflichtend WZE-Daten für die Bundesauswertung von den Bundesländern geliefert werden, ausreicht, um Aussagen über räumliche und zeitliche Trends der Kronenverlichtung mit Hilfe von GAMMs für das gesamte Bundesgebiet treffen zu können.

Für die Fichte beträgt der mittlere Vorhersagefehler pro Jahr und Stichprobenpunkt für die Kronenverlichtung des 8 x 8 km Rasters nur 1,4 % Kronenverlichtung (Median von $RMPE_{ti}$; Spanne: 0,5-6,4 %), während der Vorhersagefehler des 16 x 16 km Rasters mit 1,8 % (Median von $RMPE_{ti}$; Spanne: 0,6-8,7 %) etwas höher ist (Abb. I-11-32, Anhang Tab. A-11-8). Die Fichte ist die häufigste Baumart in Deutschland und der Vorhersagefehler $RMPE_{ti}$ ist für beide Raster geringer als für die drei weiteren Hauptbaumarten. Der Vorhersagefehler pro Jahr ($RMPE_t$) des 8 x 8 km Rasters der Fichte liegt für alle Jahre ab 1990 unter dem Vorhersagefehler des 16 x 16 km Rasters (Abb. I-11-33, Anhang Tab. A-11-8).

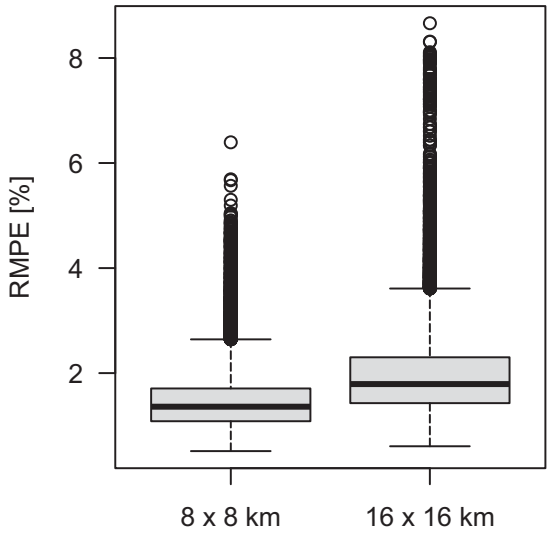

Abb. I-11-32: Vorhersagefehler pro Jahr und Stichprobenpunkt ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Fichte in Deutschland für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster.

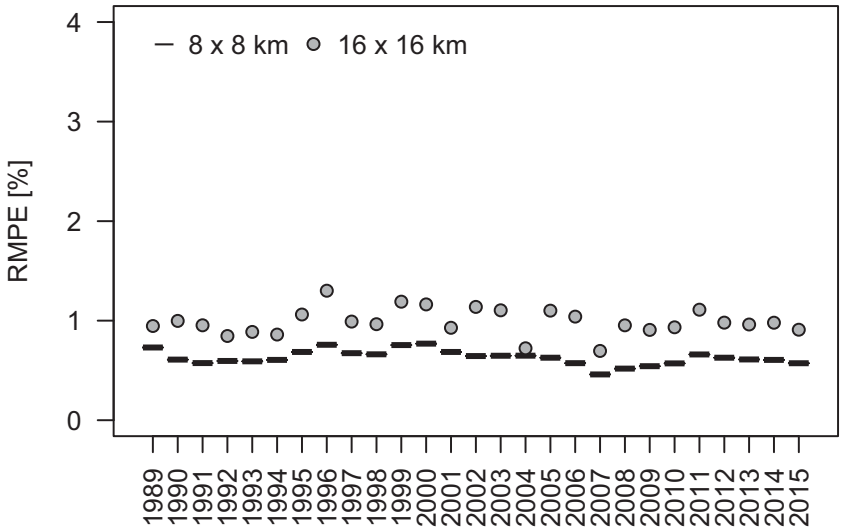

Abb. I-11-33: Mittlerer Vorhersagefehler pro Jahr ($RMPE_t$) für die Kronenverlichtung der Fichte in Deutschland von 1989 bis 2015 für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster.

Über den gesamten Zeitraum betrachtet gibt es wenige Schwankungen des Vorhersagefehlers. Trotz des insgesamt niedrigen Vorhersagefehlers für beide Raster für das gesamte Bundesgebiet lassen sich regionale Unterschiede feststellen (Abb. I-11-34). Bei Betrachtung des 8 x 8 km Rasters 2006 bis 2015 liegen an keinem Stichprobenpunkten in Deutschland Vorhersagefehler ($RMPE_{ti}$) > 5 % Kronenverlichtung vor. Die regionale Betrachtung basiert auf den Vorhersagefehlern von 2006 bis 2015, da Verbesserungen des aktuellen Rasters im Vordergrund stehen. Vorhersagefehler > 5 % Kronenverlichtung für das 16 x 16 km Raster findet man vereinzelt im Schwarzwald, im bayerischen Alpenraum, im Harz, bei Wilhelmshaven und in Mecklenburg-Vorpommern sowie gehäuft an der Landesgrenze von Rheinland-Pfalz mit Nordrhein-Westfalen (Eifel) bzw. Hessen. Unter Einbezug der Bundesländer mit einer vom 8 x 8 km abweichenden Verdichtung (Rheinland-Pfalz, Saarland, Schleswig-Holstein) bleiben die Vorhersagefehler > 5 % Kronenverlichtung im Südwesten von Nordrhein-Westfalen bestehen und liegen zusätzlich im gesamten Bereich der Eifel vor, während die erhöhten Vorhersagefehler in Hessen nicht bestehen bleiben (ohne Abbildung).

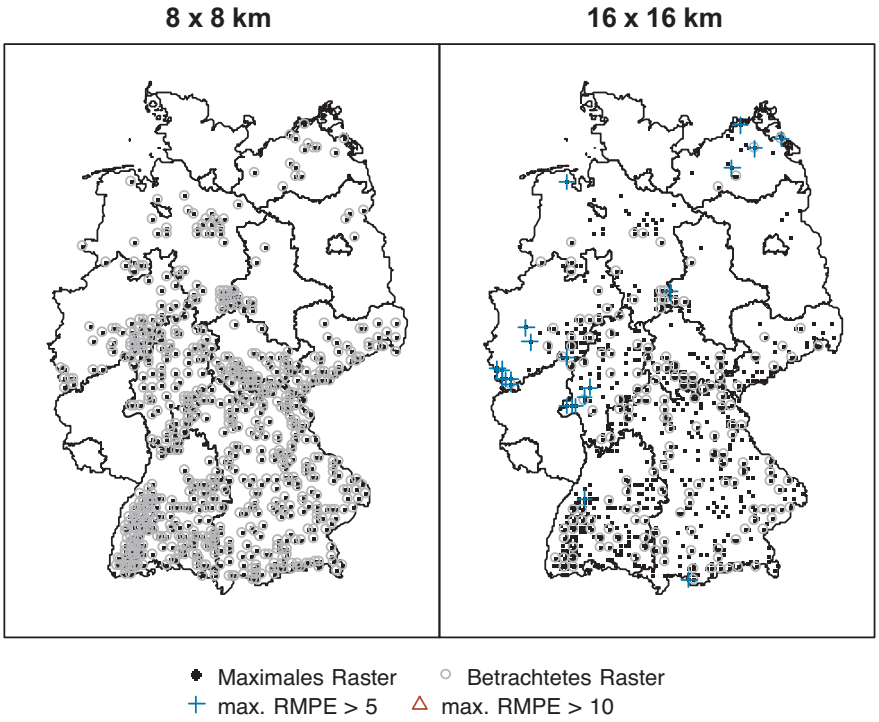

Abb. I-11-34: Höchster geschätzter Vorhersagefehler ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Fichte in den Jahren 2006 bis 2015 für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster. Die schwarzen Punkte signalisieren sämtliche Stichprobenpunkte (entspricht dem 8 x 8 km Raster). Die grauen Kreise zeigen die für die Schätzung des Vorhersagefehlers berücksichtigten Punkte (8 x 8 km bzw. 16 x 16 km Raster). Blaue Kreuze kennzeichnen Vorhersagefehler > 5 % und rote Dreiecke Vorhersagefehler > 10 % Kronenverlichtung. Die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Saarland und Schleswig-Holstein wurden aufgrund vom 8 x 8 km Raster abweichenden Rastern nicht berücksichtigt.

Bei der Kiefer ist der mittlere Vorhersagefehler pro Jahr und Stichprobenpunkt (Median von $RMPE_{ti}$) ebenfalls gering mit 1,7 % Kronenverlichtung für das 8 x 8 km Raster (Spanne: 0,5-6,1 %) und 2,2 % für das 16 x 16 km Raster (Spanne: 0,7-9,4 %; Abb. I-11-35, Anhang Tab. A-11-8). Der Vorhersagefehler pro Jahr ($RMPE_t$) des 16 x 16 km Rasters ist stets größer als der Fehler des 8 x 8 km Rasters (Abb. I-11-36, Anhang Tab. A-11-8). Insgesamt ist eine leichte Abnahme der Vorhersagefehler für beide Raster zu erkennen und die Kiefer weist den niedrigsten Vorhersagefehler pro Jahr auf. Bei Betrachtung des 8 x 8 km Rasters 2006 bis 2015 zeigt sich, dass keine erhöhten Vorhersagefehler ($RMPE_{ti}$) vorkommen (Abb. I-11-37). Im Gegensatz dazu findet man für das 16 x 16 km Raster großflächig Vorhersagefehler > 5 % Kronenverlichtung für große Bereiche Süddeutschlands (Süden von Bayern und Baden-Württemberg), für das Grenzgebiet Nordrhein-Westfalen bzw. Hessen zu Rheinland-Pfalz sowie für Gebiete in Mecklenburg-Vorpommern. Unter Hinzunahme der Bundesländer Rheinland-Pfalz, Saarland und Schleswig-Holstein kommen zusätzlich Vorhersagefehler > 5 % (bzw. sogar > 10 %) Kronenverlichtung im Pfälzer Wald und in Schleswig-Holstein vor (Abb. I-11-38).

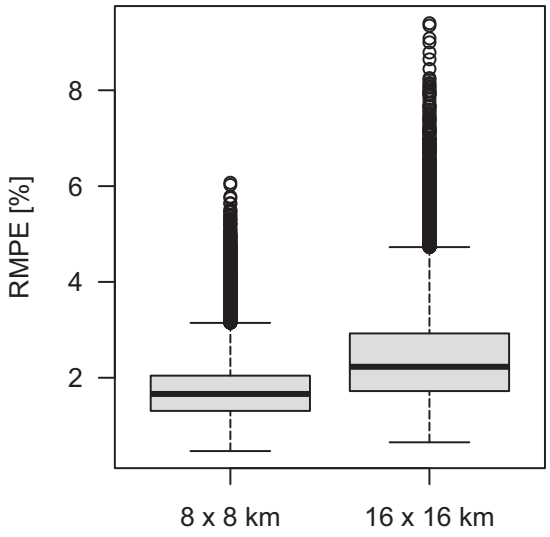

Abb. I-11-35: Vorhersagefehler pro Jahr und Stichprobenpunkt ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Kiefer in Deutschland für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster.

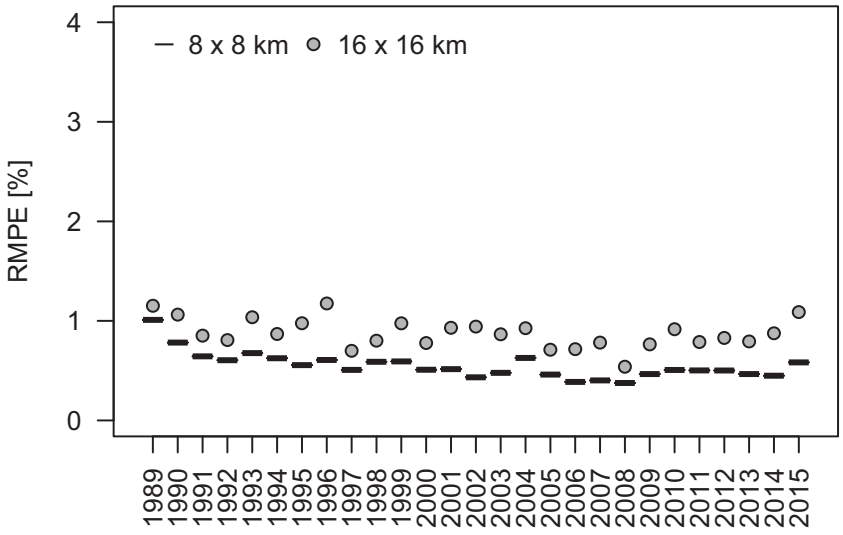

Abb. I-11-36: Mittlerer Vorhersagefehler pro Jahr ($RMPE_t$) für die Kronenverlichtung der Kiefer in Deutschland von 1989 bis 2015 für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster.

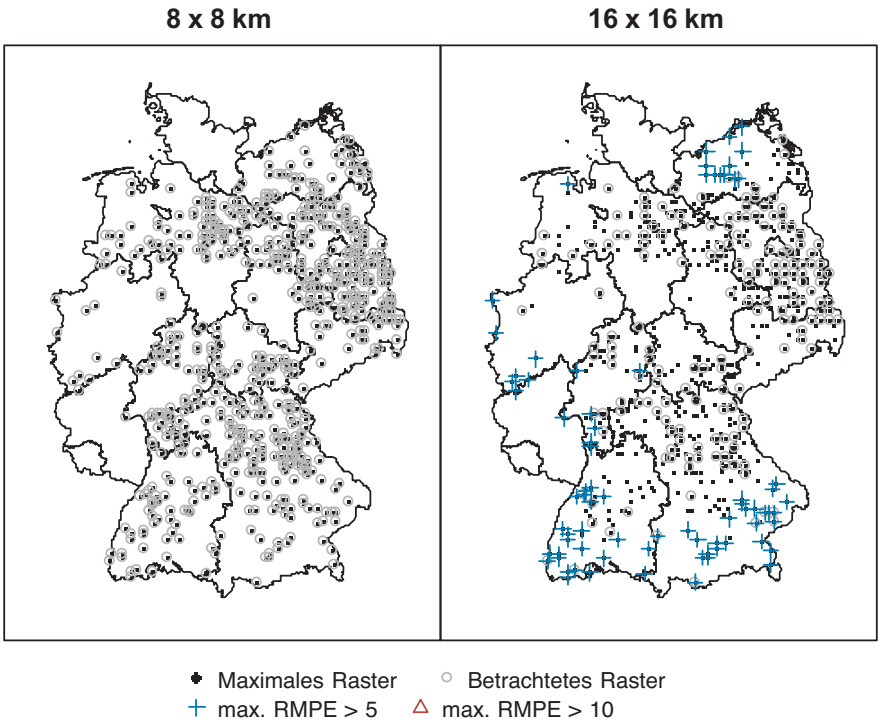

Abb. I-11-37: Höchster geschätzter Vorhersagefehler ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Kiefer in den Jahren 2006 bis 2015 für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster. Die schwarzen Punkte signalisieren sämtliche Stichprobenpunkte (entspricht dem 8 x 8 km Raster). Die grauen Kreise zeigen die für die Schätzung des Vorhersagefehlers berücksichtigten Punkte (8 x 8 km bzw. 16 x 16 km Raster). Blaue Kreuze kennzeichnen Vorhersagefehler > 5 % und rote Dreiecke Vorhersagefehler > 10 % Kronenverlichtung. Die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Saarland und Schleswig-Holstein wurden aufgrund vom 8 x 8 km Raster abweichenden Rastern nicht berücksichtigt.

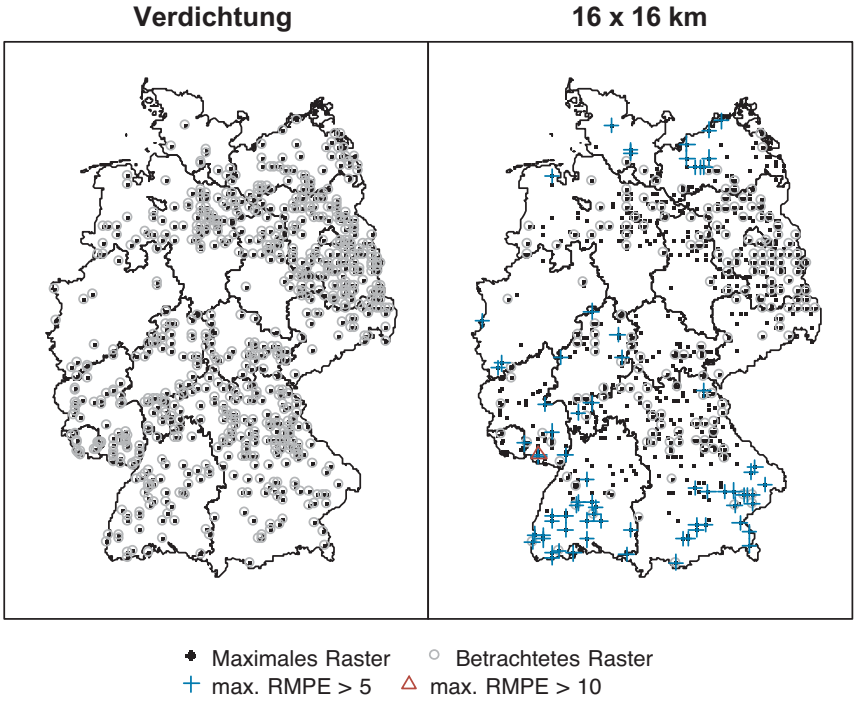

Abb. I-11-38: Höchster geschätzter Vorhersagefehler ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Kiefer in den Jahren 2006 bis 2015 für das verdichtete Raster und das 16 x 16 km EU-Raster. Die schwarzen Punkte signalisieren sämtliche Stichprobenpunkte. Die grauen Kreise zeigen die für die Schätzung des Vorhersagefehlers berücksichtigten Punkte (Verdichtung bzw. 16 x 16 km Raster). Blaue Kreuze kennzeichnen Vorhersagefehler > 5 % und rote Dreiecke Vorhersagefehler > 10 % Kronenverlichtung. Die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Saarland und Schleswig-Holstein besitzen vom 8 x 8 km Raster abweichende Rasterverdichtungen.

Die Buche weist einen mittleren Vorhersagefehler pro Jahr und Stichprobenpunkt für die Kronenverlichtung des 8 x 8 km Rasters von 1,7 % Kronenverlichtung (Median von $RMPE_{ti}$; Spanne: 0,6-10,3 %) auf (Abb. I-11-39, Anhang Tab. A-11-8). Der mittleren Vorhersagefehler des 16 x 16 km Rasters ist etwas höher und beträgt wie für die Kiefer 2,5 % (Spanne: 0,9-11,7 %). Die Betrachtung des mittleren Vorhersagefehlers pro Jahr ($RMPE_t$) zeigt, dass der Vorhersagefehler des 16 x 16 km Rasters größer ist als der des 8 x 8 km Rasters (Abb. I-11-40, Anhang Tab. A-11-8). Für das 8 x 8 km Raster der Buche 2006 bis 2015 liegen bundesweit zwei erhöhte Vorhersagefehler im Norden Niedersachsens vor ($RMPE_{ti}$, Abb. I-11-41). Für das 16 x 16 km Raster findet man großflächig Vorhersagefehler > 5 % Kronenverlichtung in den Randlagen des Bundesgebiets bzw. an der Bundeslandgrenze zu Schleswig-Holstein oder Rheinland-Pfalz (z.B. Bayerischen Wald, Alpenraum, im Norden der Eifel). Unter Hinzunahme von Rheinland-Pfalz, Saarland und Schleswig-Holstein liegen für das verdichtete Raster keine Vorhersagefehler > 5 % Kronenverlichtung vor und für das 16 x 16 km Raster kommen anders als ohne Berücksichtigung dieser Bundesländer keine Vorhersagefehler > 5 % Kronenverlichtung in Nordrhein-Westfalen vor, jedoch zusätzlich zu den bereits erwähnten Regionen in Schleswig-Holstein und im Saarland sowie in Rheinland-Pfalz im an das Saarland angrenzende Gebiet (ohne Abbildung).

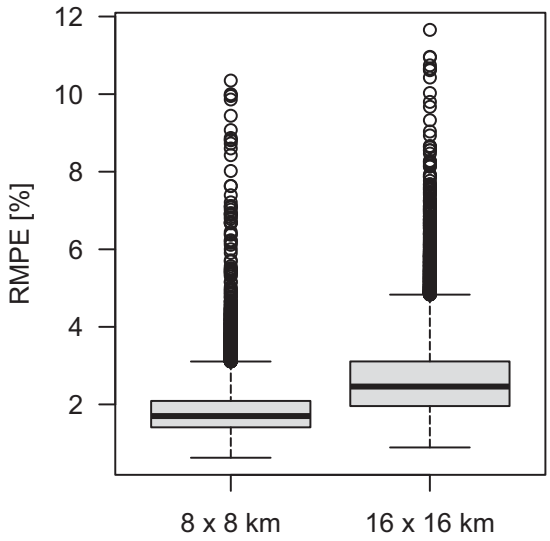

Abb. I-11-39: Vorhersagefehler pro Jahr und Stichprobenpunkt ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Buche in Deutschland für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster.

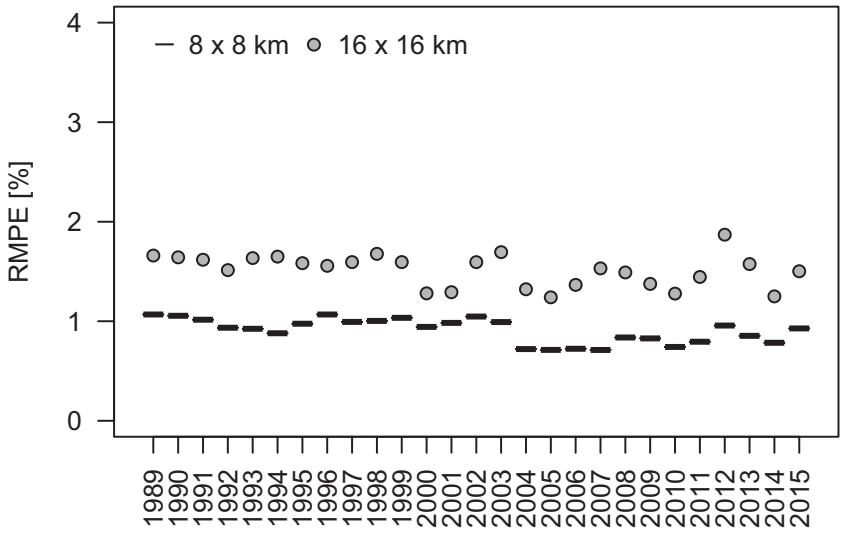

Abb. I-11-40: Mittlerer Vorhersagefehler pro Jahr ($RMPE_t$) für die Kronenverlichtung der Buche in Deutschland von 1989 bis 2015 für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster.

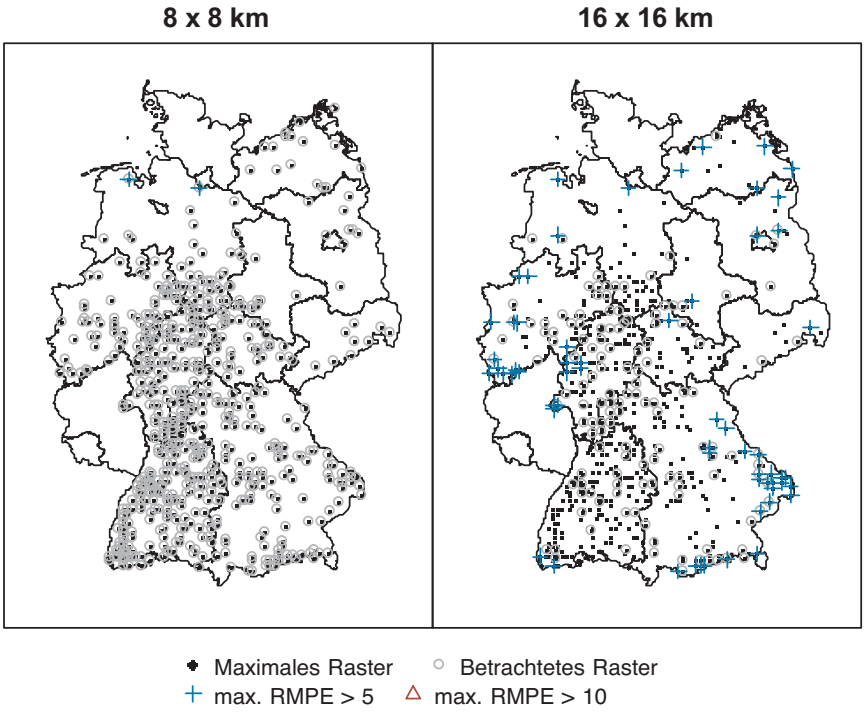

Abb. I-11-41: Höchster geschätzter Vorhersagefehler ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Buche in den Jahren 2006 bis 2015 für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster. Die schwarzen Punkte signalisieren sämtliche Stichprobenpunkte (entspricht dem 8 x 8 km Raster). Die grauen Kreise zeigen die für die Schätzung des Vorhersagefehlers berücksichtigten Punkte (8 x 8 km bzw. 16 x 16 km Raster). Blaue Kreuze kennzeichnen Vorhersagefehler > 5 % und rote Dreiecke Vorhersagefehler > 10 % Kronenverlichtung. Die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Saarland und Schleswig-Holstein wurden aufgrund vom 8 x 8 km Raster abweichenden Rastern nicht berücksichtigt.

Die Eiche repräsentiert die Hauptbaumart mit dem geringsten Vorkommen in Deutschland. Sie weist die höchsten mittleren Vorhersagefehler pro Jahr und Stichprobenpunkt für die Kronenverlichtung sowohl für das 8 x 8 km Raster (2,5 % (Median von $RMPE_{ti}$); Spanne: 1,0-9,7 %) als auch für das 16 x 16 km Raster (3,3 %; Spanne: 1,3-14,7 %) auf (Abb. I-11-42, Anhang Tab. A-11-8). Der Vorhersagefehler pro Jahr ($RMPE_t$) des 16 x 16 km Rasters liegt in allen Jahren über dem des 8 x 8 km Rasters (Abb. I-11-43, Anhang Tab. A-11-8). Für das 16 x 16 km Raster 2006 bis 2015 liegen fast bundesweit hohe Vorhersagefehler ($RMPE_{ti}$) > 5 % bzw. z.T. > 10 % Kronenverlichtung (z.B. Bayerischer Wald) vor (Abb. I-11-44). Für diese Baumart sollte ein 8 x 8 km Raster in Betracht gezogen werden, um eine sicherere Aussage über räumliche und zeitliche Trends der Kronenverlichtung mit Hilfe von GAMMs für das gesamte Bundesgebiet treffen zu können. Auch in den Bundesländern Rheinland-Pfalz, Saarland (gesamtes Bundesland) sowie Schleswig-Holstein (gesamtes Bundesland) finden sich Vorhersagefehler > 5 % bzw. > 10 %, wenn diese Bundesländer mit einbezogen werden (ohne Abbildung).

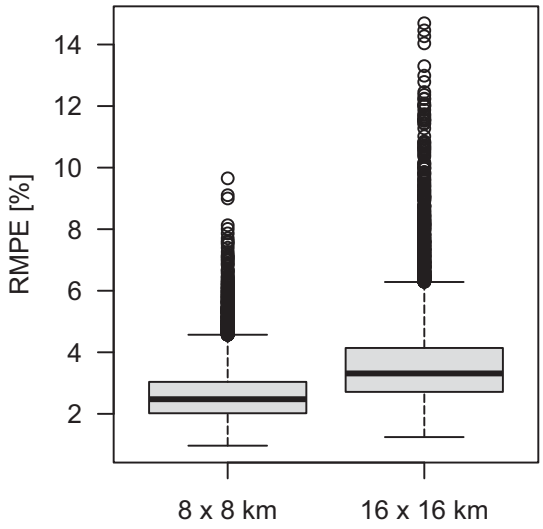

Abb. I-11-42: Vorhersagefehler pro Jahr und Stichprobenpunkt ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Eiche in Deutschland für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster.

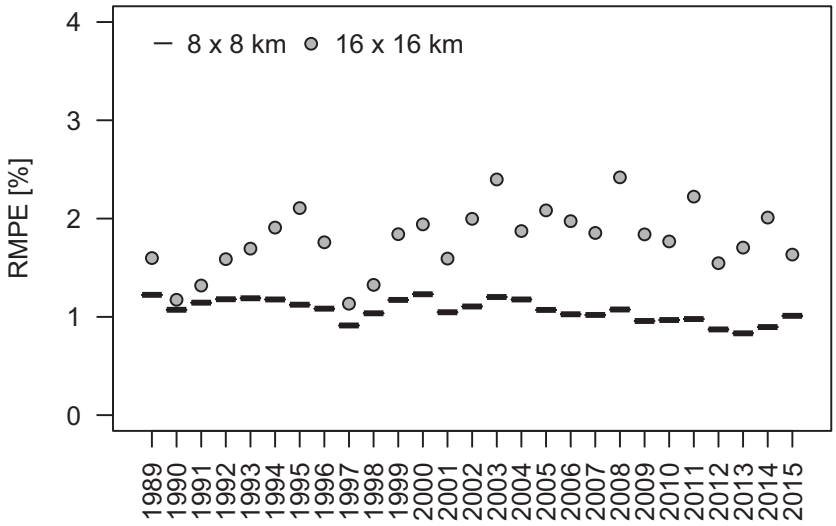

Abb. I-11-43: Mittlerer Vorhersagefehler pro Jahr ($RMPE_t$) für die Kronenverlichtung der Eiche in Deutschland von 1989 bis 2015 für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster.

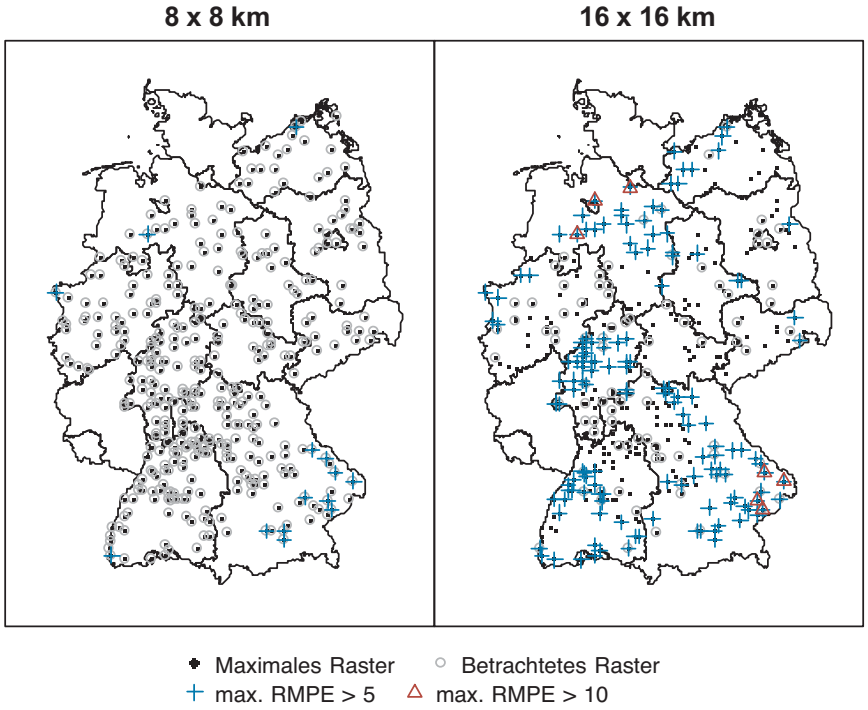

Abb. I-11-44: Höchster geschätzter Vorhersagefehler ($RMPE_{ti}$) für die Kronenverlichtung der Eiche in den Jahren 2006 bis 2015 für das 8 x 8 km Raster und das 16 x 16 km EU-Raster. Die schwarzen Punkte signalisieren sämtliche Stichprobenpunkte (entspricht dem 8 x 8 km Raster). Die grauen Kreise zeigen die für die Schätzung des Vorhersagefehlers berücksichtigten Punkte (8 x 8 km bzw. 16 x 16 km Raster). Blaue Kreuze kennzeichnen Vorhersagefehler > 5 % und rote Dreiecke Vorhersagefehler > 10 % Kronenverlichtung. Die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Saarland und Schleswig-Holstein wurden aufgrund vom 8 x 8 km Raster abweichenden Rastern nicht berücksichtigt.

Der geschätzte Vorhersagefehler wird den tatsächlichen Fehler eher unterschätzen als überschätzen, da die Simulation der Daten und die Vorhersage anhand der simulierten Daten auf demselben Modell beruhen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das 16 x 16 km Raster im Allgemeinen ausreicht, um eine bundesweite Aussage über zeitliche Trends der Kronenverlichtung treffen zu können. Dies wird zusätzlich durch den Vergleich der Zeitreihen auf Basis der BWI-Daten und der WZE-Daten sowie durch den Vergleich des Modells basierend auf Daten sämtlicher Rasterdichten mit dem Modell basierend auf den 16 x 16 km EU-Daten bekräftigt (Anhang Tab. A-11-4 bis Tab. A-11-7). Für die Eiche liegen jedoch höhere Unsicherheiten für den Zeittrend vor. Für eine bundesweite Aussage über zeitliche und räumliche Trends der Kronenverlichtung mit Hilfe von GAMMs, die z.B. notwendig ist, um Risikogebiete frühzeitig zu erkennen, sollten je nach Baumart Anpassungen vorgenommen werden. Die Fichte weist für beide Rasterdichten die niedrigsten Vorhersagefehler auf, die Eiche dagegen die höchsten. Im Detail betrachtet liegen für jede der vier Hauptbaumart jedoch regionale Schwachpunkte vor. Für die Kiefer wäre für den Süden von Baden-Württemberg und Bayern sowie für Mecklenburg-Vorpommern ein 8 x 8 km Raster und für Schleswig-Holstein und den

Pfälzer Wald ebenfalls ein verdichtetes Raster wünschenswert. Diese Bundesländer haben diese Daten zum Teil in den letzten Jahren bereits an den Bund geliefert. Für die Buche wäre ein 8 x 8 km Raster für die Bundesrandlage im Osten von Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg, sowie für den Bayerischen Wald, den Alpenraum und die Südwestspitze von Baden-Württemberg angebracht. Die Daten des 8 x 8 km Rasters wurden in den letzten Jahren z.T. schon von den entsprechenden Ländern geliefert. Auch für das Saarland und Schleswig-Holstein wären Verdichtungsdaten erforderlich. Für die Fichte wären 8 x 8 km Verdichtungen ggf. in Mecklenburg-Vorpommern, im Bereich der Eifel und im Alpenraum wünschenswert. Auch diese Verdichtungen wurden z.T. bereits in den letzten Jahren an den Bund geliefert. Im Fall der Eiche sollte eine bundesweite Verdichtung auf das 8 x 8 km Raster in Erwägung gezogen werden. Zu beachten ist, dass sich die Ergebnisse für die Rasterdichten ausschließlich auf die vier Hauptbaumarten beziehen.

11.3.4 Einflussgrößen

11.3.4.1 BZE-Zeitraum 2006-2008

Fichte

Für die Fichte können insgesamt 58 % der Variabilität der Kronenverlichtung erklärt werden (N = 544). Das Bestandsalter erklärt fast 56 % der gesamten Variabilität und stellt somit die wichtigste Einflussgröße dar ($p < 0{,}0001$), gefolgt von der N-Deposition (Mittel 2004-2007; $p < 0{,}0001$) und dem Sandanteil im Boden (10-30 cm Tiefe; $p = 0{,}002$) (Anhang Tab. A-11-9). Die Kronenverlichtung nimmt mit zunehmendem Bestandsalter nicht-linear (Abb. I-11-6) und mit zunehmendem Sandanteil linear zu (Abb. I-11-45). Mit steigender N-Deposition nimmt sie jedoch nicht-linear ab (Abb. I-11-46).

Die höchsten flächendeckenden Kronenverlichtungen im BZE-Zeitraum liegen in Baden-Württemberg (vor allem im Schwarzwald), im bayerischen Alpenraum, sowie im Süden von Schleswig-Holstein vor. Vereinzelt treten hohe Kronenverlichtungen in Saarland, Rheinland-Pfalz, Hessen, Nordwestbayern (Spessart) bis zum Harz und Teutoburger Wald auf. In diesen Regionen findet man auch gehäuft ein hohes Bestandsalter von über 120 Jahren. In Schleswig-Holstein dominieren des Weiteren Böden mit hohen Sandanteilen (> 60 % Sand). Im Schwarzwald findet man ebenfalls häufig Böden mit hohen Sandanteilen. Der bayerische Alpenraum ist durch geringe N-Depositionen (< 15 kg N ha^{-1} a^{-1}) geprägt. In Schleswig-Holstein findet man dagegen hohe N-Deposition zwischen 17 und 26 kg N ha^{-1} a^{-1}. Niedrige Kronenverlichtungen können im gesamten Bundesgebiet beobachtet werden, es handelt sich hierbei i.d.R. um junge Bestände.

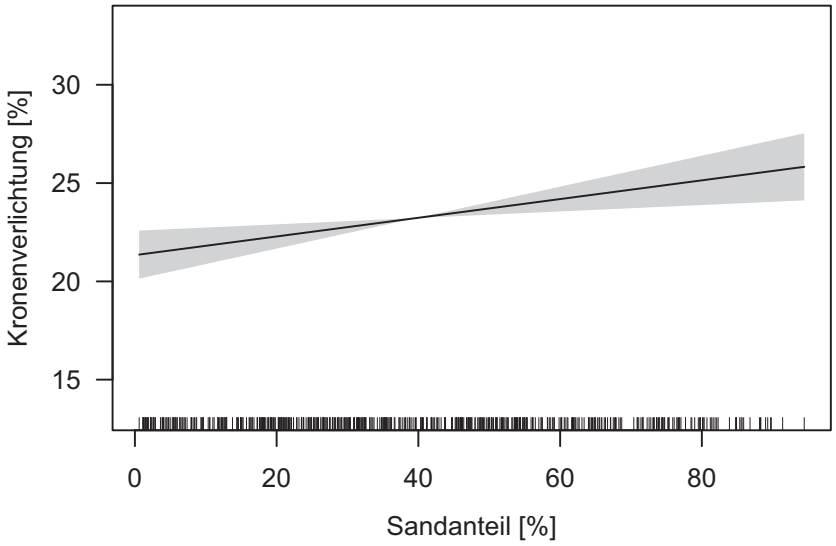

Abb. I-11-45: Effekt des Sandanteils im Boden (10-30 cm Tiefe) auf die Kronenverlichtung der Fichte. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

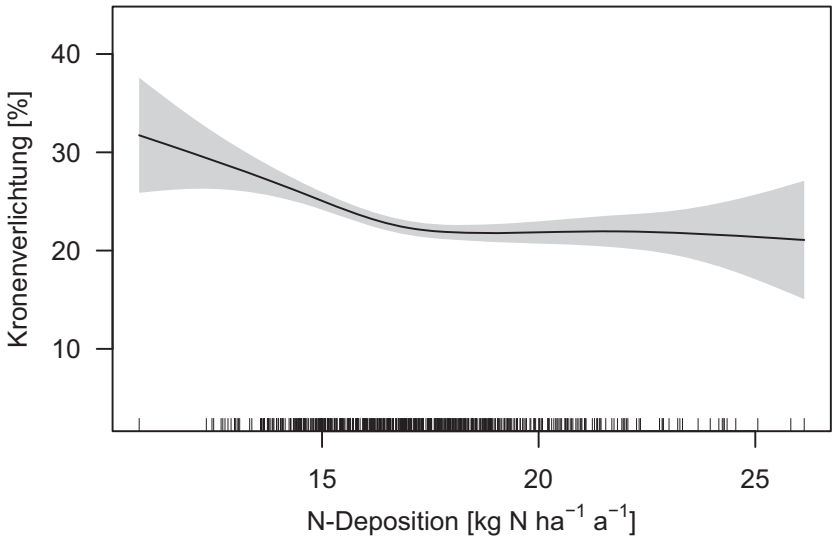

Abb. I-11-46: Effekt der Stickstoffdeposition (Mittel 2004-2007) auf die Kronenverlichtung der Fichte. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Kiefer

Das Modell für die Kiefer erklärt mit 42 % weniger Variabilität der Kronenverlichtung (N = 522; ohne Baden-Württemberg) als das Modell für die Fichte (Anhang Tab. A-11-9). Eine noch vorhandene Autokorrelation der Residuen legt nahe, dass in dem Modell mindestens eine relevante Einflussgröße fehlt, die jedoch in dem vorhandenen Datensatz nicht zur Verfügung

steht. Das Bestandsalter erklärt die Hälfte der erklärten Gesamtvariabilität (adjustiertes R^2 = 0,21; p < 0,0001). Die zweitwichtigste Einflussgröße ist die Höhe ü.N.N. (p < 0,0001), wobei die Höhe durch andere Einflussgrößen wie organischer Kohlenstoff im Auflagehumus, das C/N-Verhältnis, den Niederschlag oder die Natriumdeposition ersetzt werden könnte, da diese in einer engen Korrelation mit der Höhe stehen und ebenfalls einen signifikanten Zusammenhang zur Kronenverlichtung aufweisen. Die drittwichtigste Einflussgröße ist der Bleigehalt im aktuellen Nadeljahrgang (p < 0,0001) und die viertwichtigste das austauschbare Calcium im Boden (5-10 cm Tiefe; p < 0,0001). Das austauschbare Calcium im Boden ist wiederum ersetzbar mit anderen Einflussgrößen, die den Aciditätsstatus widerspiegeln wie die Basensättigung und der pH-Wert, aber vor allem die Calciumdeposition, Calcium im aktuellen Nadeljahrgang und die Calciumsättigung. Die Kronenverlichtung nimmt bis zu einem Bestandsalter von rund 40 Jahren zu, während in älteren Beständen keine Abhängigkeit der Kronenverlichtung vom Bestandsalter zu erkennen ist (Abb. I-11-12). Das Tiefland weist niedrige Kronenverlichtungen auf, während die höchsten Kronenverlichtungen bei ca. 350 m ü.N.N vorliegen (Abb. I-11-47). Zwischen der Kronenverlichtung und dem Bleigehalt besteht ebenfalls ein nicht-linearer Zusammenhang (Abb. I-11-48). Kiefern mit Bleigehalten zwischen 1,0 und 1,5 mg kg^{-1} im aktuellen Nadeljahrgang zeigen die niedrigsten Kronenverlichtungen, während für niedrigere Bleigehalte (vor allem < 0,5 mg kg^{-1}) höhere Kronenverlichtungen vorliegen. Hohe Kronenverlichtungen werden jedoch auch bei sehr hohen Bleigehalten beobachtet, hier liegt jedoch eine geringe Stichprobenanzahl vor. Die Kronenverlichtung steigt überdies linear mit steigendem austauschbarem Calcium im Boden (Abb. I-11-49).

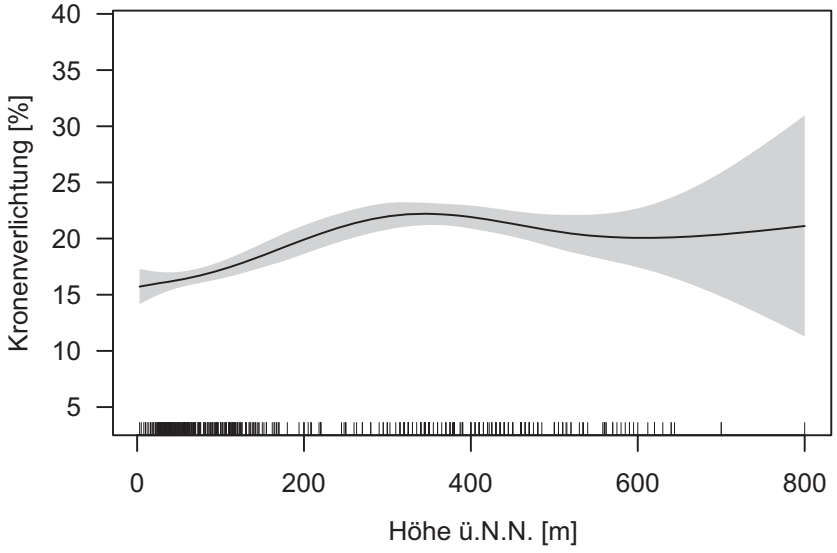

Abb. I-11-47: Effekt der Höhe ü.N.N. auf die Kronenverlichtung der Kiefer. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

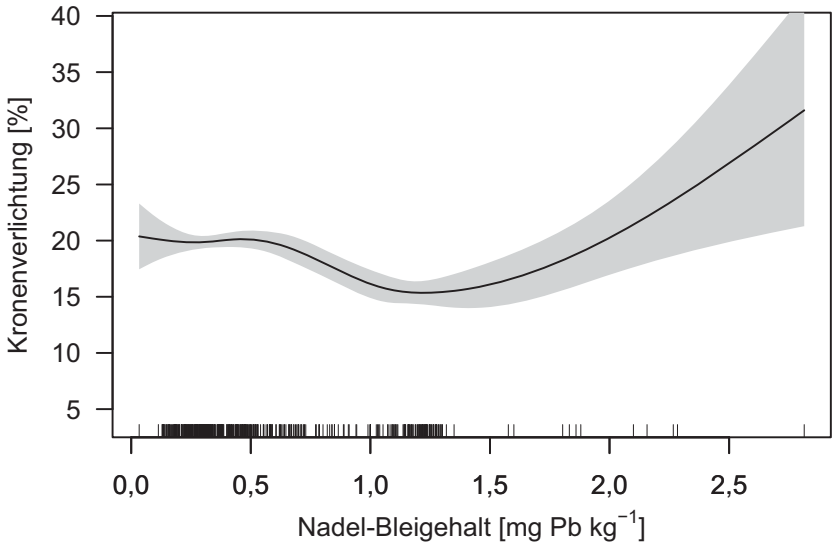

Abb. I-11-48: Effekt des Bleigehalts im aktuellen Nadeljahrgang auf die Kronenverlichtung der Kiefer. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

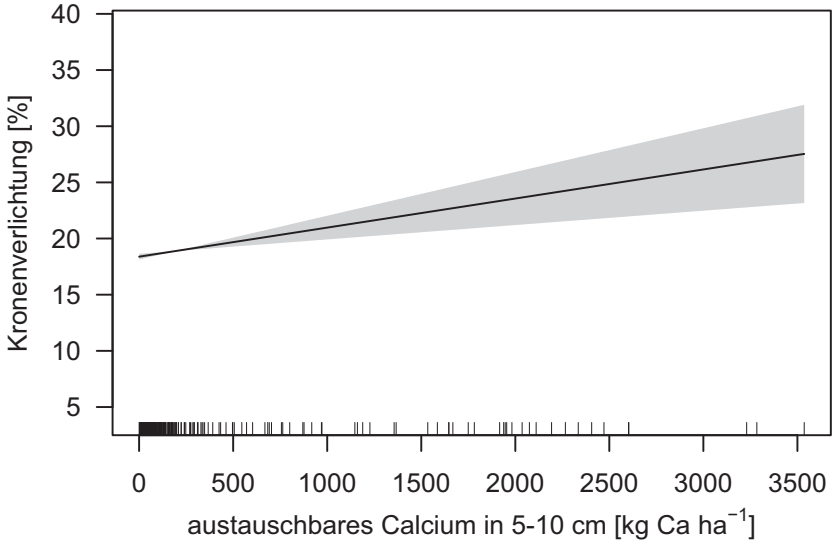

Abb. I-11-49: Effekt des austauschbaren Calciums im Boden (5-10 cm Tiefe) auf die Kronenverlichtung der Kiefer. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Das Norddeutsche Tiefland weist i.d.R. Kiefernbestände mit geringen Kronenverlichtungen auf, während Kiefernbestände in Mitteldeutschland (insbesondere in Thüringen) und auch in Süddeutschland höhere Kronenverlichtungen zeigen. Die Höhe ü.N.N. nimmt mit wenigen Ausnahmen (z.B. der Rhein-Main-Ebene) von Nord nach Süd zu. In beiden Regionen (Nord vs Mittel/Süd) kommen Alt- wie Jungbestände vor, wobei letztere häufiger im Norden zu finden

sind. Hier liegt auch ein niedrigeres mittleres Alter vor. Hohe Vorräte an austauschbarem Calcium kommen zum Teil in den Mittelgebirgen und im Alpenraum vor, sind jedoch selten im Norddeutschen Tiefland. Die höchsten Bleigehalte in den Nadeln werden im Saarland und in Nordrhein-Westfalen beobachtet sowie vereinzelt in Süd-Brandenburg, die großflächig niedrigsten in Nordostdeutschland, Thüringen, Bayern und dem Pfälzer Wald. Im Gegensatz zum Nordostdeutschen Tiefland weist das Nordwestdeutsche Tiefland höhere Bleigehalte und auch niedrigere Kronenverlichtungen auf.

Buche

Das Modell für die Buche erklärt 51 % der Variabilität der Kronenverlichtung (N = 463; ohne Saarland) (Anhang Tab. A-11-9). Das Bestandsalter erklärt mit 45 % den größten Teil der Gesamtvariabilität ($p < 0{,}0001$). Die zweitwichtigste Einflussgrößen ist der N-Gehalt im Blatt ($p < 0{,}0001$), gefolgt von der Fruktifikation ($p = 0{,}002$). Die Kronenverlichtung steigt nicht-linear mit zunehmendem Bestandsalter an (Abb. I-11-18). Des Weiteren nimmt die Kronenverlichtung mit zunehmendem N-Gehalt im Blatt linear ab (Abb. I-11-50). Der N-Gehalt im Blatt könnte durch die NH_x-Deposition oder die gesamte N-Deposition als Einflussgröße ersetzt werden. Buchen die fruktifizieren weisen im Mittel 2,4 ± 0,8 % höhere Kronenverlichtungen auf als Buchen, die nicht fruktifizieren (Abb. I-11-24). Zu beachten ist, dass die Fruktifikation über die drei BZE Jahre gemittelt wurde.

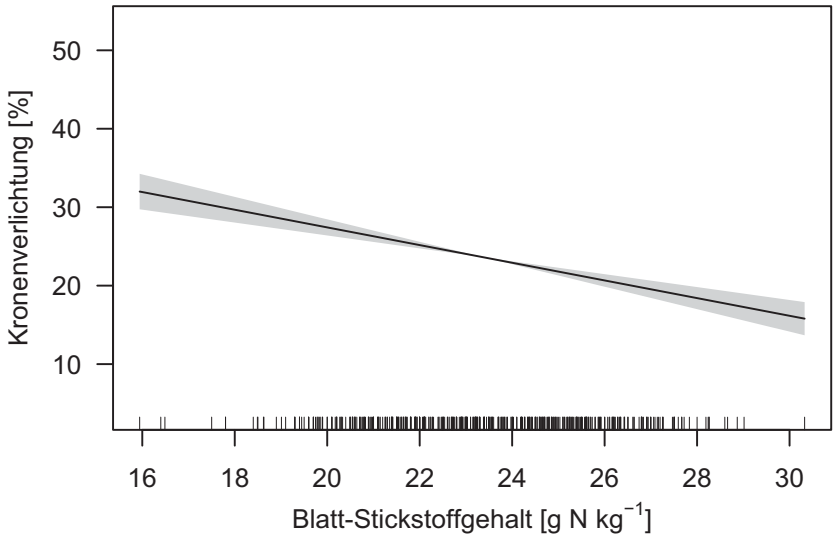

Abb. I-11-50: Effekt des Stickstoffgehalts im Blatt auf die Kronenverlichtung der Buche. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Hohe Kronenverlichtungen werden mit Ausnahme von Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg/Berlin vereinzelt in allen Bundesländern beobachtet. Schwerpunktmäßig kommen hohe Kronenverlichtungen in Mitteldeutschland (Ländereck Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Hessen, Thüringen) sowie in Baden-Württemberg (Nord-,

Südschwarzwald, Neckarland) im bayerischen Alpenraum und im Nordosten Schleswig-Holsteins vor. Häufig handelt es sich um alte Buchenbestände. Alte Buchenbestände findet man jedoch im gesamten Bundesgebiet. Fruktifikation kann ebenfalls im gesamten Bundesgebiet beobachtet werden. In Mitteldeutschland (Ländereck Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Hessen) und Baden-Württemberg (vor allem Schwarzwald) tritt die Fruktifikation jedoch im BZE-Zeitraum im Mittel besonders gehäuft auf. In Baden-Württemberg, aber auch in Rheinland-Pfalz, dem Saarland und Hessen sowie dem bayerischen Alpenraum liegen vermehrt niedrige Blatt-N-Gehalte vor. Hier finden wir auch die bundesweit niedrigsten NH_x-Depositionen.

Eiche

Die Eiche stellt die Hauptbaumart dar, für die der größte Anteil der Variabilität (67 %) mit Hilfe der vorhandenen Einflussgrößen erklärt werden kann (N = 285; ohne Bayern und Saarland) (Anhang Tab. A-11-9). Das Bestandsalter erklärt 49 % der Variabilität und stellt somit die wichtigste Einflussgröße dar ($p < 0{,}0001$), gefolgt von der Kaliumdeposition (Mittel 2004-2007; $p < 0{,}0001$), dem Kupfervorrat im Boden (5-10 cm Tiefe; $p < 0{,}0001$) und dem Insektenbefall ($p = 0{,}004$). Die Kronenverlichtung nimmt mit zunehmendem Bestandsalter nicht-linear zu (Abb. I-11-26). In jungen Beständen (bis ca. 70 Jahre) nimmt die Kronenverlichtung zunächst deutlich zu, während sie in Beständen > 70 Jahren nur wenig ansteigt. Mit steigender Kaliumdeposition nimmt die Kronenverlichtung nicht-linear ab (Abb. I-11-55, hier lineare Abnahme). Zum Kupfervorrat besteht ein nicht-linearer Zusammenhang (Abb. I-11-51). Die höchsten Kronenverlichtungen liegen bei ca. 6 kg Cu ha^{-1} vor, während sowohl bei niedrigeren als auch bei höheren Vorräten niedrigere Kronenverlichtungen beobachtet werden. Der Kupfervorrat lässt sich statistisch durch den Chrom-, Nickel- oder Zinkvorrat ersetzen. Eichen, die Insektenbefall aufweisen, besitzen zudem 2,4 ± 0,8 % höhere Kronenverlichtungen als gesunde Bäume. Zu beachten ist, dass der Insektenbefall über die drei Jahre der BZE gemittelt wurde.

Bundesweit können sowohl Eichenbestände mit niedriger als auch mit hoher Kronenverlichtung beobachtet werden, ebenfalls finden sich bundesweit unterschiedliche Bestandsalter. Gehäuft treten hohe Kronenverlichtungen in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz auf sowie nördlich der Mittelgebirge von Nordrhein-Westfalen über Niedersachsen, Sachsen-Anhalt bis ins Thüringer Becken. In diesen Regionen wird im BZE-Zeitraum gehäuft Insektenbefall beobachtet. Mittlere Kupfergehalte um die 6 kg Cu ha^{-1} treten in vielen Mittelgebirgen auf. Im Norddeutschen Tiefland liegen dagegen im Allgemeinen niedrige Kupfervorräte vor. Eine Ausnahme bildet insbesondere das Tiefland in Nordrhein-Westfalen (z.B. Westfälische Bucht bis nach Niedersachsen) und Sachsen-Anhalt (z.B. südöstlich des Harzes bis nach Thüringen). Die höchsten Kaliumdepositionen findet man in erster Linie in Regionen intensiver Landwirtschaft und somit großflächig in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Teilen von Nordrhein-Westfalen. Die niedrigsten Depositionen liegen im BZE-Zeitraum großflächig in Rheinland-Pfalz, Südhessen, Baden-Württemberg und Bayern vor.

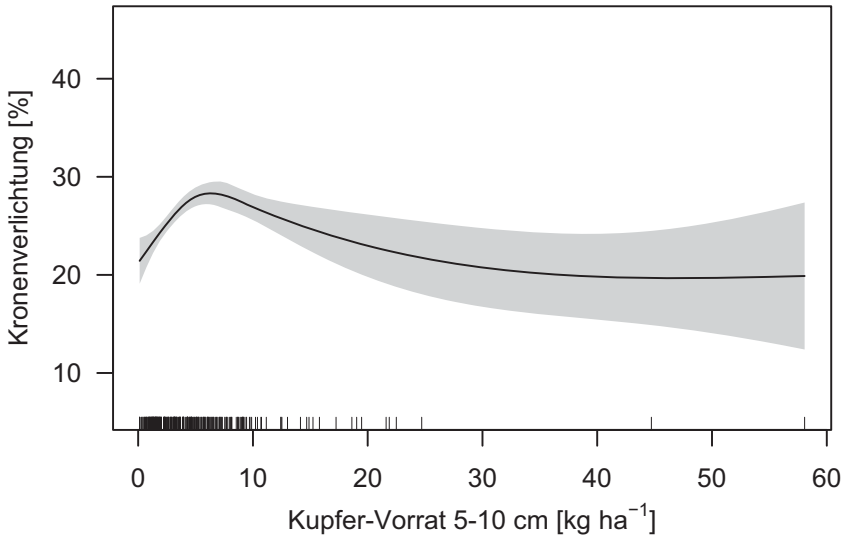

Abb. I-11-51: Effekt des Kupfervorrats in 5-10 cm Bodentiefe auf die Kronenverlichtung der Eiche. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

11.3.4.2 Zeitreihe 1990-2010

Fichte

Die Betrachtung der Einflussgrößen für die Zeitreihe resultiert bei der Fichte in einem ähnlichen Ergebnis wie für den BZE-Zeitraum. Mit 58 % kann der gleiche Anteil der Variabilität der Kronenverlichtung erklärt werden (N = 2503; Zeitreihe von 1991-2010; ohne Brandenburg und Bayern erst ab 2006) (Anhang Tab. A-11-9). Das Bestandsalter stellt wiederum die wichtigste Einflussgröße dar ($p < 0{,}0001$, adjustierten R^2 von 0,57), gefolgt von der Bodenart (10-30 cm Tiefe; $p < 0{,}0001$), der Verdunstung des Vorjahrs ($p = 0{,}0004$) und der NH_x-Deposition ($p = 0{,}0095$). Die Kronenverlichtung nimmt mit zunehmendem Bestandsalter nicht-linear zu (Abb. I-11-6). Bestände auf Sandböden weisen mit im Mittel 22,1 % die höchsten Kronenverlichtungen auf, Bestände auf Schluffböden dagegen mit im Mittel 16,9 % die niedrigsten (Tab. I-11-2). Die Kronenverlichtung steigt linear an mit zunehmender Verdunstung des Vorjahrs (Abb. I-11-52). Des Weiteren zeigt die Kronenverlichtung einen nicht-linearen Zusammenhang mit der NH_x-Deposition (Abb. I-11-53). Höchste Kronenverlichtungen treten bei NH_x-Deposition < 7 kg N ha^{-1} a^{-1} auf, während niedrigste Kronenverlichtungen bei Kronenverlichtungen um 11 kg N ha^{-1} a^{-1} beobachtet werden. Bei höherer NH_x-Deposition steigt die Kronenverlichtung wiederum etwas an.

Tab. I-11-2: Gleichungsparameter der festen Effekte für das Modell, das die Einflussgrößen für die Kronenverlichtung der Fichte in der Zeitreihe 1991-2010 betrachtet. Die Parameter beziehen sich auf die Kronenverlichtung in Prozent. Im Fall von kategorialen Parametern wird die erste Kategorie als Referenz verwendet (hier Lehm).

Parameter	Mittelwert	Standardfehler
Interzept	20,6	0,6
Bodenart Sand	1,5	0,9
Bodenart Ton	−2,4	1,2
Bodenart Schluff	−3,8	0,9

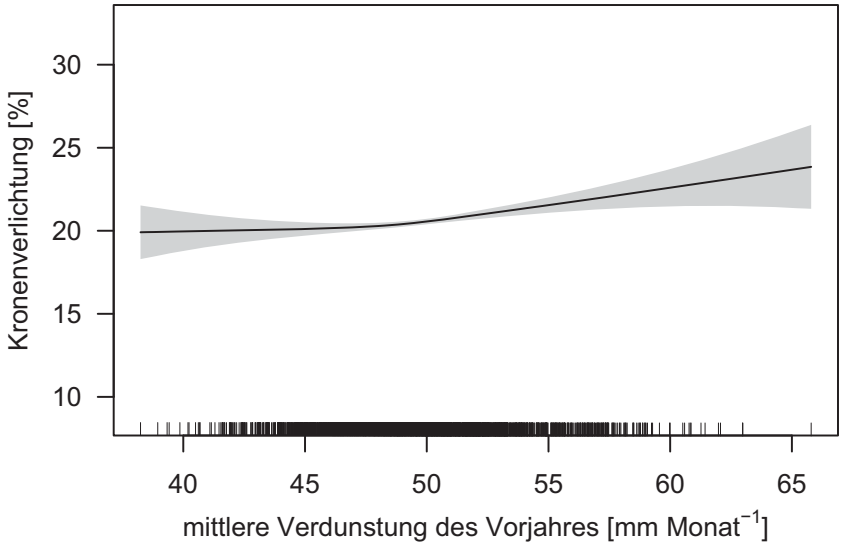

Abb. I-11-52: Effekt der mittleren Monatsverdunstung des Vorjahrs auf die Kronenverlichtung der Fichte. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Zu Beginn der 1990er Jahre werden gehäuft in Ost-, Mittel- und Süddeutschland erhöhte Kronenverlichtungen beobachtet. Zur gleichen Zeit liegen teilweise hohe Verdunstungen des Vorjahrs vor. In den Gebirgen von Mitteldeutschland spielt außerdem der Alterseffekt eine Rolle. Im Laufe der Zeit kristallisiert sich Süddeutschland und dort vor allem das Gebiet vom Pfälzer Wald über den Schwarzwald, das Neckarland, Schwäbische Alb bis hin zum bayerischen Alpenraum als besonders betroffen von erhöhten Kronenverlichtungen heraus. In diesem Gebiet treffen, anders als im Großteil von Bayern, hohe Verdunstungsraten des Vorjahrs mit sandigen oder tonigen Böden zusammen. Gleichzeitig finden wir in dieser Region (Süd-Südwest-deutschland und Alpenraum) seit den 2000er Jahren auch die bundesweit niedrigsten NH_x-Depositionen. Im bayerischen Alpenraum, aber auch in Teilen des Schwarzwalds stehen überdies sehr alte Fichtenbestände. Die Altersbereinigung (Abb. I-11-7 und Abb. I-11-8) zeigt jedoch, dass das Gebiet der erhöhten Kronenverlichtungen auch unabhängig vom Alter besteht.

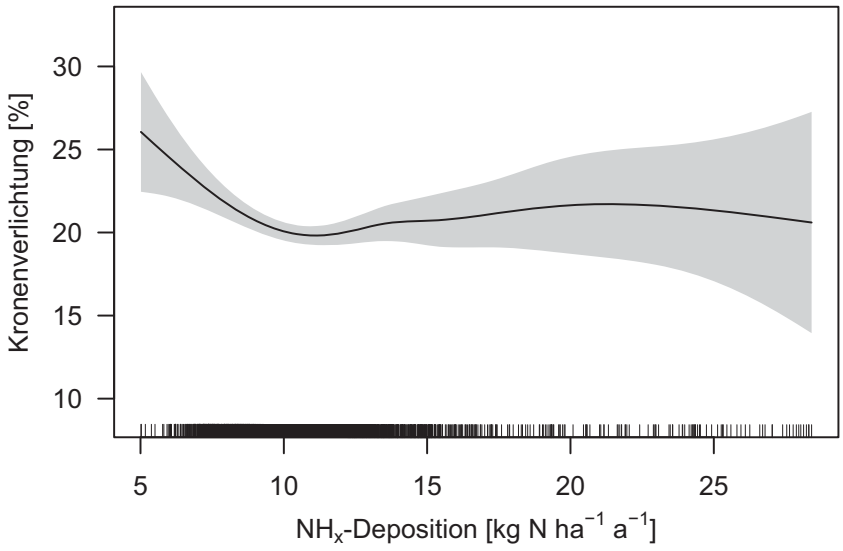

Abb. I-11-53: Effekt der NH_x-Deposition auf die Kronenverlichtung der Fichte. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Kiefer

Für die Kiefer führt die Betrachtung der Einflussgrößen für die Zeitreihe zu einem Modell, das nur 24 % der Variabilität erklärt (N = 2772; Zeitreihe von 1990-2010) (Anhang Tab. A-11-9). Anders als im BZE-Zeitraum spielt neben dem Bestandsalter ($p < 0{,}0001$, adjustierten R^2 von 0,20; Abb. I-11-12) und der Höhe ü.N.N. ($p < 0{,}0001$; Abb. I-11-47) der aktuelle Insektenbefall eine Rolle ($p < 0{,}0001$). Mit Insekten befallene Kiefern weisen im Mittel 3,3 ± 0,5 % höhere Kronenverlichtungen auf als gesunde Kiefern.

Zu Beginn der 1990er Jahre ist die Kronenverlichtung der Kiefer in Ostdeutschland und Bayern am höchsten. Vermutlich spielt hier die direkte oder indirekte Folge der Trockenjahre 1989 und 1992 eine Rolle. Ab Mitte der 1990er Jahre kommen vor allem in Thüringen, Hessen, Bayern und Baden-Württemberg erhöhte Kronenverlichtungen bei der Kiefer vor. Insektenbefall der Kiefer wird bundesweit beobachtet und kann die Kronenverlichtung des Einzelstichprobenpunkts erklären. Die deutlichen geographischen Unterschiede in der Kronenverlichtung spiegeln zum Teil die Altersunterschiede der Kiefern im Norddeutschen Tiefland (im Mittel jüngere Bestände) und dem restlichen Bundesgebiet (im Mittel ältere Bestände als im Tiefland) wider. Die Verwendung eines bundesweit einheitlichen Bestandsalters für die Kiefer über alle Jahre zeigt jedoch, dass der Hauptgrund für den Unterschied Norddeutsches Tiefland und restliches Bundesgebiet nicht im Alter begründet liegt (Abb. I-11-13 und Abb. I-11-14).

Buche

Das Modell der Einflussgrößen für die Zeitreihe bei der Buche erklärt mit 39 % etwas weniger Variabilität als das Modell für den BZE-Zeitraum (N = 1924; Zeitreihe nur von 1999 bis 2010, da

die Fruktifikation erst ab 1999 erfasst wird) (Anhang Tab. A-11-9). Das Bestandsalter stellt wiederum die wichtigste Einflussgröße dar ($p < 0{,}0001$, adjustierten R^2 von 0,38), gefolgt von der Fruktifikation ($p < 0{,}0001$) und dem Niederschlag des Vorjahrs ($p < 0{,}0001$). Die Kronenverlichtung steigt nicht-linear mit zunehmendem Bestandsalter an (Abb. I-11-18). Die Kronenverlichtung nimmt außerdem mit steigender Fruktifikation zu (Tab. I-11-3 und Abb. I-11-24). Buchen mit starker Fruktifikation zeigen 7,2 ± 1,0 % höhere Kronenverlichtungen als Buchen ohne Fruktifikation. Mit der Niederschlagsumme des Vorjahrs besteht ein nicht-linearer Zusammenhang (Abb. I-11-54). Die niedrigste Kronenverlichtungen findet man bei etwa 1500 mm Niederschlag des Vorjahrs und die höchsten Kronenverlichtungen bei niedrigen (< 750 mm) sowie bei sehr hohen Niederschlagssummen (> 2300 mm).

Tab. I-11-3: Gleichungsparameter der festen Effekte für das Modell, das die Einflussgrößen für die Kronenverlichtung der Buche in der Zeitreihe 1999-2010 betrachtet. Die Angaben beziehen sich auf die Kronenverlichtung [%]. Im Fall von kategorialen Parametern wird die erste Kategorie als Referenz verwendet (hier 0: keine Fruktifikation).

Parameter	Mittelwert	Standardfehler
Interzept	23,0	0,4
1: spärliche Fruktifikation	1,7	0,4
2: mittlere Fruktifikation	4,2	0,5
3: starke Fruktifikation	7,2	1,0

Von 1999 bis zum Jahr 2004 können vereinzelt im gesamten Bundesgebiet hohe wie niedrige Kronenverlichtungen beobachtet werden. Hohe Kronenverlichtungen treten dabei gehäuft in Mitteldeutschland (Ländereck Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Hessen, Thüringen, Sachsen-Anhalt) sowie im bayerischen Alpenraum auf. Als Folge des Trockenjahrs 2003 werden mit Ausnahme des Norddeutschen Tieflands im Jahr 2004 bundesweit hohe Kronenverlichtungen beobachtet. Auch in den Folgejahren treten wiederkehrend hohe Kronenverlichtungen vor allem in Baden-Württemberg und Mitteldeutschland auf. Insgesamt liegen für weite Teile Mittel- und Süddeutschland ab 2003 niedrigere Niederschlagssummen vor als zuvor. Die Jahre 2004, 2006 und 2009 sind außerdem deutliche Mastjahre. Über alle Jahre betrachtet, wird die großräumig stärkste Fruktifikation von Nordwest-, West- über Mittel- bis Südwestdeutschland beobachtet.

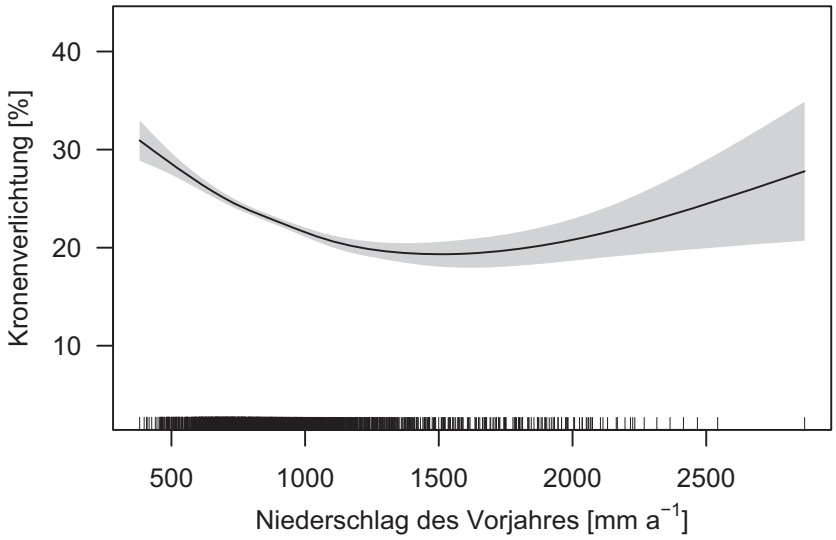

Abb. I-11-54: Effekt der Niederschlagsumme des Vorjahrs auf die Kronenverlichtung der Buche. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

Eiche

Die Betrachtung der Einflussgrößen für die Zeitreihe resultiert bei der Eiche in einem Modell (N = 1745; Zeitreihe von 1990-2010), das mit 35 % deutlich weniger Variabilität erklärt als das Modell des BZE-Zeitraums (Anhang Tab. A-11-9). Das Bestandsalter stellt wiederum die wichtigste Einflussgröße dar ($p < 0{,}0001$, adjustierten R^2 von 0,32), gefolgt von dem Insektenbefall ($p < 0{,}0001$) und der Kaliumdeposition ($p < 0{,}0001$). Die Kronenverlichtung nimmt mit zunehmendem Bestandsalter nicht-linear zu (Abb. I-11-26). Ein vorhandener Insektenbefall erhöht die Kronenverlichtung um 3,4 ± 0,4 % und die Kronenverlichtung nimmt linear ab mit zunehmender Kaliumdeposition (Abb. I-11-55).

Bis Mitte der 1990er Jahre werden hohe Kronenverlichtungen vor allem im südlichen Bereich Deutschlands (inklusiv Rheinland-Pfalz bis Thüringen) beobachtet. Seit Mitte der 1990er treten auch in dieser Region immer wieder Bestände mit hohen Kronenverlichtungen auf, zusätzlich weisen aber auch Eichenbestände nördlich der Mittelgebirge von Nordrhein-Westfalen über Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, das Thüringer Becken bis Brandenburg und Sachsen hohe Kronenverlichtungen auf. Dieser „Streifen“ der sich von West nach Ost durch Deutschland zieht, dehnt sich im Laufe der Jahre tendenziell weiter nach Norden aus. Hierbei handelt es sich häufig um Bestände, die im Laufe der Zeit ein Alter von 120 Jahren überschreiten bzw. um Altbestände, die neu in der Stichprobe auftauchen. Die beobachteten erhöhten Kronenverlichtungen dieses Gebiets bestehen jedoch auch nach Altersbereinigung (Abb. I-11-27 und Abb. I-11-28). Bestände mit hohen Kronenverlichtungen weisen häufig Insektenbefall auf. Während zu Beginn der 1990er Jahre in vielen Regionen Deutschlands hohe Kaliumdepositionen (> 1,5 kg K ha^{-1} a^{-1}) vorlagen, sind diese zunehmend gesunken, so dass in den Jahren 2009 und 2010 nur noch in Niedersachsen

und Schleswig-Holstein hohe Kaliumdepositionen beobachtet wurden und vor allem in Süd- und Südwestdeutschland niedrige Kaliumdepositionen dominieren.

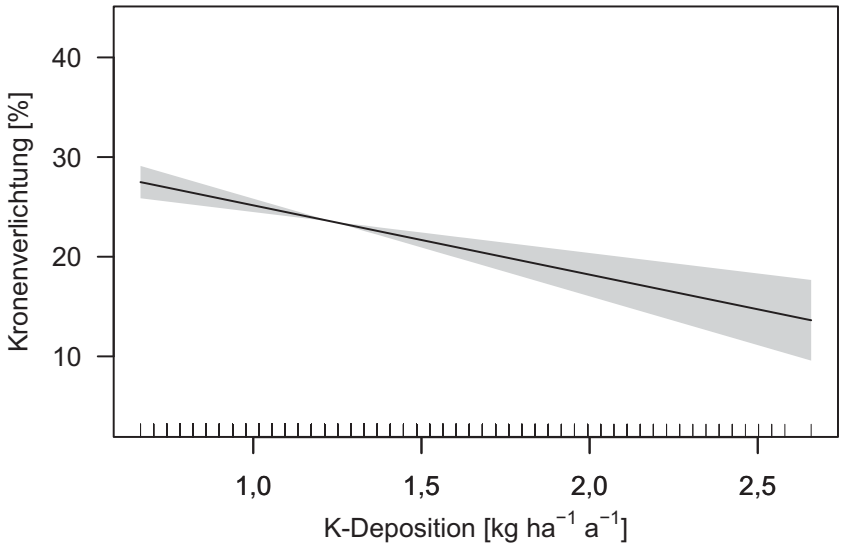

Abb. I-11-55: Effekt der Kaliumdeposition auf die Kronenverlichtung der Eiche. In der Abbildung wird das Interzept nicht berücksichtigt. Die Striche an der x-Achse spiegeln die Stichprobenbelegung wider. Der grau schattierte Bereich kennzeichnet den Vertrauensbereich.

11.3.4.3 Resümee zu den Einflussgrößen

Für die Fichte lässt sich ein großer Anteil der Variabilität der Kronenverlichtung erklären, da das Alter die entscheidende Einflussgröße darstellt. Mit zunehmendem Alter steigt die Kronenverlichtung nicht-linear an. Bis zu einem Bestandsalter von rund 60 Jahren nimmt die Kronenverlichtung jedoch stärker zu als in älteren Beständen. Der starke Einfluss des Bestandsalters wurde bereits mehrfach in der Literatur erwähnt (Engels 2014, Klap *et al.* 2000, Musio *et al.* 2007, Seidling 2007, Vitale *et al.* 2014). Für die Fichte spielt des Weiteren die Versorgung mit N eine wesentliche Rolle. Stickstoff stellt ein Hauptnährelement der Pflanzen dar, das essentieller Bestandteil vieler primärer Pflanzeninhaltsstoffe ist (Marschner & Marschner 2012). Natürlicherweise wird das Pflanzenwachstum in Europa durch N limitiert (Marschner & Marschner 2012). Der Großteil der im Rahmen der BZE II untersuchten Fichten wies allerdings eine gute bis luxuriöse Versorgung mit N auf (Kap. 8). Die Nadelwerte spiegeln die hohen N-Einträge in die Waldökosysteme wider, die nur eine geringe Reduzierung in den letzten Jahren erfahren haben (de Vries *et al.* 2014, Waldner *et al.* 2014). Die Folgen einer N-Überversorgung, zu der sowohl Wachstumszunahmen als auch Wachstumseinbußen durch z.B. Nährstoffungleichgewichte zählen, werden aufgrund der komplexen Zusammenhänge (z.B. im Zusammenhang mit einer Klimaveränderung) viel diskutiert (de Marco *et al.* 2014, de Vries *et al.* 2014, Etzold *et al.* 2014, Kandler & Innes 1995). Ein negativer Effekt einer N-Überversorgung kann anhand der Kronenverlichtung in dieser Studie nachgewiesen werden. Fichten mit N-Gehalten oberhalb des Normal-

bereichs (Göttlein (2015), Kap. 8) zeigen höhere Kronenverlichtungen, während Fichten mit Gehalten im Normalbereich (13,2-17,0 g kg^{-1}) niedrigere Kronenverlichtungen aufweisen. Hinweise auf Effekte durch z.B. disharmonischen N/K-Verhältnissen als Folge von Nährstoffungleichgewichten (Augustin *et al.* 2007, Ferretti *et al.* 2015, Musio *et al.* 2007) liegen nicht vor. Mit N mangelversorgte Fichten haben ebenfalls hohe Kronenverlichtungen. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen Deposition und Nadelgehalten an N sind Fichten in Gebieten mit niedrigen Depositionen (z.B. dem bayerischen Alpenraum) vermehrt von höheren Kronenverlichtungen betroffen, da N hier wachstumslimitierend wird (Kap. 8). Ein ähnlicher Effekt der N-Depositionen auf die Kronenverlichtungen (negative Korrelation) wurden z.B. auch von Seidling *et al.* (2015) gefunden. Neben dem Alter und der Nährstoffversorgung hat die Wasserversorgung einen deutlichen Einfluss auf die Kronenverlichtung der Fichte. Indikatoren hierfür sind die Verdunstung (vor allem des Vorjahrs) und der Sandanteil des Bodens. In dem Modell des BZE-Zeitraums ist die mittlere Verdunstung der drei Jahre ebenfalls hoch signifikant, ist jedoch im finalen Modell nicht mehr berücksichtigt. Die Fichte, die eine Baumart der kälteren Regionen ist, gilt im Allgemeinen als wenig resistent bezüglich Trockenstress. Im Kapitel 10 wird von einem engen Zusammenhang zwischen Indikatoren der Wasserversorgung und den Jahresringbreiten berichtet. In den letzten Jahren lassen sich bundesweit vermehrt hohe Temperaturen (positive Abweichung vom langjährigen Mittel) sowie auf der einen Seite ausgedehnte Trockenperioden und auf der anderen Seite eine Zunahme von Starkregenereignissen in den Sommermonaten beobachten (Dammann *et al.* 2015, Meining *et al.* 2015, MLUL 2015), welche als Folge des Klimawandels interpretiert werden. Im Jahr 2003 lag ein ausgesprochenes Trockenjahr vor. Fichtenbestände in Regionen, die von hohen Verdunstungen betroffen sind (Kap. 8) und gleichzeitig auf sandigen (häufig zusätzlich von chronischer Versauerung belasteten) Böden stocken, sind somit besonders von hohen Kronenverlichtungen betroffen (z.B. in Teilen des Schwarzwalds) (Meining *et al.* 2015). Im Gegensatz zu Untersuchungen in den 1980er und 1990er Jahren, die von einem deutlichen Einfluss anthropogener Einträge von Schwefeldioxid (direkt sowie gelöst), auf die Kronenverlichtung der Fichte berichteten (Kap. 1), lässt sich dieser Einfluss kaum mehr nachweisen. Dies zeigt sich zum Beispiel an dem heutzutage ausgesprochen guten Kronenzustand der Fichte im Erzgebirge, das hinsichtlich der Belastungsdauer und -intensität durch Luftschadstoffe insbesondere durch Schwefeldioxid eine Sonderstellung einnimmt (Liebold & Drechsler 1991, SMUL 2015). Die drastischen Reduzierungen der Schwefeldioxidemissionen im Rahmen der Luftreinhaltemaßnahmen (de Vries *et al.* 2014, Waldner *et al.* 2014) haben bundesweit betrachtet zu einer allmählichen Erholung der Waldböden beigetragen (Kap. 4 und 8). Zusätzliche Maßnahmen gegen die Bodenversauerung und Nährstoffmängel wie die Bodenschutzkalkung haben regional ebenfalls zu einem besseren Bodenzustand geführt. Von Magnesiummangel der Fichte als Folge der Bodenversauerung wurde in den 1980er und 1990er Jahren vermehrt berichtet (Musio *et al.* 2007, Riek & Wolff 1999), dieser spielt für die Kronenverlichtung der Fichte heutzutage bundesweit keine wesentliche Rolle. Zu beachten ist jedoch, dass deponierte Säuren im Boden lange nachwirken und Säureeinträge heutzutage vor allem aus der N-Deposition stammen. Die reduzierte Nährstoff- und Wasserversorgung von Bäumen, die auf die langjährige Schädigung von Feinwurzeln zurückzuführen ist, stellt z.B. eine Folge der chronischen Bodenversauerung dar (Meining *et al.* 2015). Es lässt sich somit feststellen, dass die Herausforderung für die Fichte und

ihre Bewirtschaftung heutzutage Trockenstress unter den vorhandenen Vorbelastungen ist sowie dessen Folgen wie z.B. Borkenkäferbefall, der vermutlich im Rahmen des Klimawandels zunehmend an Bedeutung gewinnen wird. Dies wird ebenfalls von de Marco *et al.* (2014) bekräftigt. Auch dem chronisch hohen N-Eintrag in die Waldökosysteme sollte aufgrund seines Beitrags zur Eutrophierung und Bodenversauerung weiterhin Beachtung geschenkt werden. Eine N-Überversorgung kann wiederum zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Trockenstress und biotischem Schädlingsbefall führen (de Vries *et al.* 2014).

Die Kronenverlichtung der Kiefer lässt sich, anders als bei der Fichte, deutlich schlechter erklären. Das Bestandsalter spielt in älteren Beständen kaum eine Rolle und somit hat das Alter im Vergleich zu den anderen Hauptbaumarten eine vergleichsweise geringe Erklärungskraft. Dies wird ebenfalls von anderen Studien berichtet (MULEWF 2015, Seidling 2007). Seit Mitte der 1990er Jahre lässt sich ein Unterschied in der Kronenverlichtung der Kiefer im Norddeutschen Tiefland (niedrige Kronenverlichtungen) und im restlichen Bundesgebiet (höhere Kronenverlichtung) ausmachen. Die Höhe ü.N.N. erklärt daher einen deutlichen Anteil der Variabilität der Kronenverlichtung (Seidling 2007). Die Höhe steht jedoch wiederum für verschiedene Einflussgrößen wie Niederschlag, Deposition und Temperatur. Auch das Alter ist im Fall der Kiefer zum Teil mit in der Höhe erfasst, da im Mittel jüngere Kiefern um die 50-60 Jahre im Tiefland und im Mittel ältere Kiefern in höheren Lagen wachsen (Kap. 11.3.1). Des Weiteren besteht ein statistischer Zusammenhang zwischen den Bleigehalten in den Kiefernnadeln und der Kronenverlichtung. Vermutlich handelt es sich nicht um einen kausalen Zusammenhang. In Westdeutschland (Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hessen, Rheinland-Pfalz bis Saarland) sowie im Tiefland nördlich der Mittelgebirge in Sachsen-Anhalt und Sachsen werden höhere Bleigehalte beobachtet als in Nordostdeutschland, Thüringen und Süddeutschland. Obwohl die Kronenverlichtung der Kiefer im gesamten Norddeutschen Tiefland niedriger ist als im restlichen Bundesgebiet, ist sie im Nordwestdeutschen Tiefland und im Ostdeutschen Tiefland nördlich der Mittelgebirge noch etwas niedriger als im restlichen Nordostdeutschen Tiefland. Der Bleigehalt spiegelt wahrscheinlich diesen Unterschied des Kronenzustands im Norddeutschen Tiefland wider. Der tatsächliche Grund für diesen Unterschied kann anhand der vorliegenden Daten nicht bestimmt werden. Die Kiefer stellt eine relativ anspruchslose Baumart in Bezug auf die Wasser- aber auch Nährstoffversorgung dar und wächst daher häufig auf trockenen und nährstoffarmen Standorten. Es zeigt sich jedoch, dass Kiefernbestände mit hohen austauschbaren Calciumvorräten höhere Kronenverlichtungen aufweisen als Kiefernbestände, deren Böden niedrige Vorräte zeigen. In der Literatur wird von geringem Wachstum der Kiefer sowie Chlorosen auf kalkreichen Böden berichtet (Zech 1970) (Kap. 9). Der Grund liegt in einem Mangel an Kalium, Mangan oder Eisen, deren Aufnahme in kalkreichen Böden erschwert wird (Antagonismus). In der vorliegenden Studie liegt eine negative Korrelation zwischen dem austauschbaren Calcium im Boden und dem Nadel-/Blattgehalt an Kalium, Mangan und Eisen vor. Kiefernnadeln mit niedrigen Kaliumgehalten haben außerdem signifikant höhere Kronenverlichtungen als solche mit hohen Kaliumgehalten. Signifikante Zusammenhänge zwischen dem Mangan- oder Eisengehalt und der Kronenverlichtung können im vorliegenden Datensatz nicht beobachtet werden. Der signifikante Einfluss des austauschbaren Calciums auf die Kronenverlichtung spiegelt somit vermutlich den

Kalium-Calcium-Antagonismus wider (Evers & Hüttl 1992). Die Kaliumaufnahme wird außerdem durch Austrocknung von Böden erschwert (Evers & Hüttl 1992). Bei den kalkreichen Standorten handelt es sich häufig um flachgründige Böden, die zur Austrocknung neigen, und somit wird die Kaliumaufnahme der Kiefer durch den Kalium-Calcium-Antagonismus bei Trockenheit besonders erschwert. Auch der Insektenbefall spielt für die Kronenverlichtung am Stichprobenpunkt eine wesentliche Rolle. Neben der Witterung spielen suboptimale Standortseigenschaften und eine unausgewogene Nährstoffsituation eine Rolle in Bezug auf die Anfälligkeit gegenüber Insekten (Kap. 8). Im Kapitel 8 wird auf eine Überversorgung der Kiefer mit N an vielen Stichprobenpunkten und von potenziellen Nährstoffungleichgewichten berichtet. Die Relevanz des Insektenbefalls für die Kronenverlichtung der Kiefer wurde bereits in anderen Studien erwähnt (Wenk & Apel 2007). Zu den wichtigsten Schadinsekten zählen Waldgärtner, Nonne, Kiefernspinner, Kiefernspanner, Forleule, Kiefernprachtkäfer und Kieferbuschhornblattwespe. Insbesondere das Nordostdeutsche Tiefland, das von Kiefern-Reinbeständen geprägt ist, ist von teilweise großflächigem Insektenbefall betroffen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Kiefer bundesweit betrachtet die Hauptbaumart mit den geringsten Kronenverlichtungen im letzten Jahrzehnt darstellt. Trockenstress spielt eine geringere Rolle als z.B. bei der Fichte. Die Extremsituation, die zum einen Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre vorlag (sehr trockenes Jahr 1989 (Nordostdeutschland) sowie vergleichsweise trockene Jahre 1988, 1990-1992) und zum anderen 2003 (Extremtrockenjahr) führte jedoch auch bei der Kiefer zu erhöhten Kronenverlichtungen. Die Gründe für den seit Mitte der 1990er Jahre bestehende Unterschied zwischen den Kiefern des Norddeutschen Tieflands und den Kiefern des restlichen Bundesgebiets konnten nicht abschließend ausfindig gemacht werden. Der Unterschied wird wahrscheinlich in den kommenden Jahren wieder verschwinden wie die Ergebnisse der Raum-Zeit-Modellierung andeuten.

Für die Kronenverlichtung der Buche spielen ähnliche Einflussgrößen eine Rolle wie für die Fichte. Ein relativ großer Anteil (rund 40 %) lässt sich durch das Bestandsalter erklären. Hier liegt eine relativ stetige Zunahme der Kronenverlichtung mit zunehmendem Alter vor. Der Einfluss des Alters wurde bereits mehrfach in der Literatur berichtet (Eichhorn *et al.* 2005, Klap *et al.* 2000, Seidling 2007). Zusätzlich ist die Versorgung mit N ein wesentlicher Faktor. Anders als bei der Fichte besteht ein negativer, linearer Zusammenhang zwischen der Kronenverlichtung und dem Blatt-N-Gehalt der Buche. Dies bedeutet, dass auch oberhalb des Normalbereichs (Normalbereich: 19,0-25,0 g kg^{-1}; Göttlein (2015) und Kap. 8) die Kronenverlichtung weiter abnimmt und kein negativer Effekt einer Überschussversorgung im Bereich der vorliegenden Werte zu erkennen ist. Stickstofflimitierte Bestände kommen zwar nur selten vor, hier finden sich aber die höchsten Kronenverlichtungen. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen dem N-Gehalt der Blätter und der N-Deposition lässt sich die Aussage übertragen. Ein negativer Zusammenhang zwischen der Kronenverlichtung der Buche und der N-Deposition wurde auch von Seidling *et al.* (2015) für die europäischen Level-I-Standorte berichtet. Im Gegensatz dazu zeigten Ferretti *et al.* (2015) eine positive Korrelation für die Buchenbestände des europäischen Level II-Monitorings. In der Literatur finden sich vermehrt Hinweise auf eine Mangelernährung der Buchen mit Phosphor (Kap. 8, Talkner *et al.* (2015)). Der Phosphorgehalt der Blätter wurde nicht als Einflussgröße des finalen Modells gewählt, es liegt jedoch eine signifikante negative, lineare Abhängigkeit vor (Riek

& Wolff 1998), d.h. Buchen mit Phosphorgehalten unterhalb des Normalbereichs (Normalbereich: 1,2-1,7 g kg^{-1}; Göttlein (2015) und Kap. 8) weisen erhöhte Kronenverlichtungen auf, während überversorgte Buchen (dieser Bereich ist jedoch wenig abgedeckt) die niedrigsten Kronenverlichtungen aufweisen. Wie in Kapitel 8 dargelegt, stellt die Buche die am schlechtesten mit Nährelementen versorgte Hauptbaumart dar. Zusätzlich zur Nährstoffversorgung spielt die Witterung eine wesentliche Rolle für die Kronenverlichtung der Buche. Eine nicht-lineare Abhängigkeit zu dem Niederschlag (des Vorjahrs) besteht mit hohen Kronenverlichtungen sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Niederschlägen. Der Empfindlichkeit der Buche in Bezug auf Trockenstress wurde bereits in der Literatur Beachtung geschenkt (Kap. 10, Ferretti *et al.* (2015), Seidling (2007)). Erhöhte Kronenverlichtungen der Buche bei sehr hohen Niederschlägen wurde ebenfalls von Seidling (2007) berichtet. Zum einen liegt eine mögliche Ursache in der reduzierten Sauerstoffversorgung der Wurzeln in sehr feuchten bzw. nassen Böden. Zum anderen befinden sich die Gebiete mit sehr hohen Niederschlägen oft in großer Höhe in der schlechtere Wuchsbedingungen aufgrund niedriger Temperaturen vorliegen (z.B. Alpenraum). Im finalen Modell des BZE-Zeitraums wurden keine Witterungsvariablen ausgewählt, die Verdunstung zeigte jedoch einen signifikanten positiven linearen Zusammenhang. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Fruktifikation, die ihrerseits wiederum von der Witterung gesteuert wird (MULEWF 2011, Seidling 2007). Bei zunehmender Fruktifikation liegt auch eine zunehmende Kronenverlichtung vor. Häufig wiederkehrende Fruktifikation führt zu einer veränderten Kronenstruktur (MULEWF 2011). Die Buchen bilden außerdem häufig kleine Blätter, da viel Energie und Nährstoffe in die Bildung der Blüten und Früchte investiert wird (MULEWF 2011). In den letzten beiden Jahrzehnten wurden vermutlich als Folge der zunehmenden warmen und trockenen Sommer außerordentlich viele Mastjahre beobachtet (z.B. 2004, 2006, 2009, 2011, 2014). Die Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Knospenanlage (Frühsommer des Vorjahrs) entscheiden maßgeblich über die Entwicklung von Blüten- oder Triebknospen. Ein Einfluss der ausgesprochen guten N-Versorgung sowie allgemein verbesserten Nährstoffversorgung im Zuge der Erholung der Böden auf die Zunahme der Mastjahre ist ebenfalls denkbar (MULEWF 2011). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die Buche insbesondere direkte und indirekte Effekte der Klimaveränderung zukünftig eine Herausforderung darstellen.

Die Eiche ist die Hauptbaumart mit den bundesweit höchsten Kronenverlichtungen. Das Alter hat einen signifikanten Einfluss, der auch von anderen Studien berichtet wird (Eichhorn *et al.* 2005, Klap *et al.* 2000, Seidling 2007). Im Gegensatz zur Fichte und Buche scheint ein direkter Witterungseinfluss (Niederschlag, Temperatur, Verdunstung) weniger relevant zu sein. Obwohl ein hoch signifikanter nicht-linearer Zusammenhang zwischen der Verdunstung und der Kronenverlichtung besteht, taucht die Verdunstung nicht im finalen Modell auf. Seit dem Trockenjahr 2003 werden jedoch wie auch für die anderen Baumarten erhöhte Kronenverlichtungen in Südwestdeutschland (aber auch in anderen Regionen Deutschlands) beobachtet. Es muss jedoch erwähnt werden, dass unter dem Begriff Eiche die Trauben- und Stieleiche zusammengefasst werden. Verschiedene Autoren berichten über unterschiedliche Standortsansprüche und Trockentoleranzen (de Marco *et al.* 2014, Sanders *et al.* 2014). Im Allgemeinen gilt die Eiche aufgrund ihres ausgeprägten Pfahlwurzelsystems als relativ trockenheitsresistent. Die Witterung

ist jedoch indirekt im Modell vertreten, da der Insektenbefall eine entscheidende Rolle für die Kronenverlichtung der Eiche spielt (Eichhorn *et al.* 2005, Meining *et al.* 2015). Nach dem Trockenjahr 2003 konnte bundesweit ein starker Insektenbefall beobachtet werden insbesondere in Westdeutschland. Als Hauptschadinsekten gelten folgende Arten: Eichenwickler, Kleiner und Großer Frostspanner, Schwammspinner und Eichenprozessionsspinner (die genannten Arten zählen zu der sogenannten Eichenfraßgesellschaft) sowie der Eichenprachtkäfer und Frühjahrseulen. Die Johannistriebe und Regenerationsbelaubung werden zudem häufig durch den Eichenmehltau (Blattpilz) befallen. Zusätzlich zum Alter und zum Insektenbefall besteht ein statistischer Zusammenhang zwischen der Kronenverlichtung der Eiche und der Kaliumdeposition. Es handelt sich hierbei wahrscheinlich nicht um einen kausalen Zusammenhang. Der Kaliumgehalt des Blatts hat z.B. keinen signifikanten Einfluss auf die Kronenverlichtung. Erhöhte Kaliumdepositionen treten insbesondere in Regionen intensiver landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf (Staubaufwirbelung, Düngung) und zeigen generell einen engen Zusammenhang mit den Ammoniumdepositionen. Während in den 1990er Jahren noch verbreitet höhere Kaliumdepositionen bundesweit vorlagen, findet man diese heute vor allem in Nordwestdeutschland, eine Region mit vergleichsweise niedrigen Kronenverlichtungen. Niedrige Kaliumdepositionen kommen in Südwest- und Süddeutschland vor, d.h. in Regionen mit häufig erhöhten Kronenverlichtungen der Eiche. Auch zu den Bodenvorräten von Kupfer (bzw. Zink, Nickel, Chrom) besteht ein statistischer Zusammenhang. Die Kronenverlichtung nimmt mit zunehmendem Kupfervorrat zu (im Bereich sehr hoher Vorräte sinkt die Kronenverlichtung, hier steht allerdings eine niedrige Stichprobenanzahl zur Verfügung). Die Blattspiegelwerte von Kupfer und Zink weisen eine negative Korrelation zur Kronenverlichtung auf, d.h. hohe Blattspiegelwerte gehen mit einer niedrigen Kronenverlichtung einher. Die Blattspiegelwerte befinden sich außerdem fast ausschließlich im Normalbereich (Kap. 8). Somit handelt es sich vermutlich nicht um einen direkten Effekt der Schwermetallvorräte auf die Kronenverlichtung der Eiche. Geogene Bodenvorräte dieser Schwermetalle kommen insbesondere im Rheinischen Schiefergebirge und Harz vor (Kap. 7). Im angrenzenden Tiefland finden sich ebenfalls hohe Vorräte. In diesem Tieflandgebiet („Streifen“ von West nach Ost) werden seit Mitte der 1990er Jahre vermehrt hohe Kronenverlichtungen beobachtet – neben seit längerem bestehenden hohen Verlichtungen in den Mittelgebirgen. Der Kupfervorrat spiegelt somit das Ausgangsgestein wider. Aus Nordrhein-Westfalen wird berichtet, dass insbesondere Eichen auf sauren, trockenen Standorten des Tieflands von hohen Kronenverlichtungen betroffen sind (Gehrmann 2015, mündliche Mitteilung). Die Kombination verschiedener Stressfaktoren (z.B. erhöhter Trockenstress auf chronisch versauerten Böden) führt vermutlich zu einer Anfälligkeit gegenüber Insektenbefall. Auch das sachsen-anhaltinische Bördenland sowie das Thüringer Becken repräsentieren aufgrund ihrer Lage im Regenschatten des Harzes eher trockene Standorte (Kap. 3). In dem bundesweiten Modell spielen die Einflussgrößen Witterung und Versauerung jedoch keine direkte Rolle. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im BZE-Zeitraum ein Großteil der Variabilität der Kronenverlichtung der Eiche erklärt werden kann, die im Modell gewählten Einflussgrößen jedoch zum Teil schwer interpretierbare Indikatoren darstellen und vermutlich keine kausale Erklärung liefern.

Den vier Hauptbaumarten ist ein starker Zusammenhang zwischen der Kronenverlichtungen und dem Bestandsalter gemein. Neben dem physiologischen Alterungsprozess spielt eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Schädigungen eine Rolle wie z.B. eine mit dem Alter zunehmende Schädigung der Feinwurzeln auf versauerten Böden, die eine reduzierte Wasser- und Nährstoffaufnahme zur Folge haben kann (Meining *et al.* 2015). Die Höhe der mittleren Kronenverlichtung ist somit in erster Linie von dem Bestandsalter und der Beziehung zwischen Alter und Kronenverlichtung abhängig. Die bundesweite Gleichsetzung der Bestandsalter über sämtliche Jahre für die vier Hauptbaumarten zeigt, dass auch Kiefernbestände, die alt sind (hier 120 Jahre) niedrigere Kronenverlichtungen aufweisen als gleich alte Fichten-, Buchen- oder Eichenbestände (Anhang Abb. A-11-5 bis Abb. A-11-13). Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, muss das Bestandsalter Grundlage jedes Modells sein, welches Raum-Zeit-Trends oder Einflussgrößen analysiert. Erwähnt werden muss jedoch, dass die Einflussgröße Bestandsalter auch die Bestandssituation beinhaltet und somit die forstwirtschaftliche Behandlung. Eine Studie in Rheinland-Pfalz und dem Saarland zeigt, dass alte Bäume in einem geschlossenen Bestand niedrigere Kronenverlichtungen aufweisen als alte Bäume, die plötzlich durch Nutzung oder Absterben der Nachbarbäume freigestellt wurden (MULEWF 2015). Überdies kann auch bei alten Bäumen zumindest in begrenztem Maße eine Regeneration beobachtet werden, wenn keine zusätzlichen Stressfaktoren hinzukommen (MULEWF 2015). Die vorliegende Auswertung zeigt des Weiteren, dass die BZE-Parameter nur wenig zur Erklärung der Kronenverlichtung beitragen. Neben Parametern, die den Baum direkt betreffen wie Alter, Fruktifikation und Befall mit Schaderregern, spielen Witterungsparameter die Hauptrolle. Diesen Parameter werden bereits seit Jahren im Rahmen der jährlichen Waldzustandsberichte der Bundesländer Beachtung geschenkt. Einen klaren Mehrwert der BZE für die WZE stellt sicherlich die umfangreiche Aufnahme der Bodenphysik dar, die die Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen ermöglicht (Kap. 10). Für zukünftige Auswertungen sollen diese Wasserhaushaltsgrößen mit in die Modellierung der Kronenverlichtung einbezogen werden, da die vorliegende Auswertung die Bedeutung der Wasserversorgung unterstreicht.

11.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der vorliegenden Studie liegen drei Auswertungsziele zugrunde. Das erste Ziel war die Raum-Zeit-Modellierung der bundesweiten Kronenverlichtungsdaten von 1989 bis 2015 getrennt nach den vier Hauptbaumarten mit Hilfe von Generalisierten Additiven Gemischten Modellen (GAMM). Das zweite Ziel war die Untersuchung des 16 x 16 km Rasters der Waldzustandserhebung mit Hilfe einer Simulationsstudie auf generelle Eignung und Schwachstellen. Das dritte Ziel war die Bestimmung der Einflussgrößen für die Kronenverlichtung der vier Hauptbaumarten unter Hinzunahme der BZE-Daten.

Die GAMMs erwiesen sich als hervorragend geeignet für die Raum-Zeit-Auswertung der Kronenverlichtungsdaten der vier Hauptbaumarten, die aufgrund von verschiedenen Eigenschaften eine statistische Herausforderung darstellen. Ein wesentlicher Aspekt ist die Handhabung des

Raum-Zeit-Trends und der Raum-Zeit-Wechselwirkung, welche mit Hilfe einer dreidimensionalen Glättungsfunktion erfolgt. Dies bedeutet auch, dass der Raum- und Zeit-Effekt nicht wie bisher für die GAMM-Anwendung üblich additiv ins Modell aufgenommen werden muss (Kneib & Fahrmeir 2006, MacNab & Dean 2001). Das Modell besitzt somit eine hohe Flexibilität bezüglich Veränderungen des Aufnahmerasters. Vorliegende Unterschiede in den Rasterdichten der Einzeljahre wie auch Rasterverschiebungen sind handhabbar. Positiv ist außerdem, dass sich der Alterseffekt herausrechnen lässt.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde der Fokus auf die vier Hauptbaumarten gelegt. Die Gemeine Fichte stellt mit 32 % die häufigste Baumart auf dem 16 x 16 km Raster der Waldzustandserhebung dar, gefolgt von der Gemeinen Kiefer mit 29 %, der Rotbuche mit 16 % und den Eichen (Trauben- und Stieleiche) mit 6 %. Das 16 x 16 km Raster reicht im Allgemeinen aus, um eine bundesweit repräsentative Aussage über zeitliche Trends der Kronenverlichtung der Hauptbaumarten treffen zu können. Für die Eiche liegen jedoch aufgrund der geringeren Anzahl an Stichprobenpunkten höhere Unsicherheiten für den Zeittrend vor. Für eine bundesweite Aussage über zeitliche und räumliche Trends der Kronenverlichtung mit Hilfe von GAMMs, die z.B. notwendig ist, um Risikogebiete frühzeitig zu erkennen, liegen jedoch Schwachstellen für alle vier Hauptbaumarten und insbesondere der Eiche vor. Hier sollten je nach Baumart Anpassungen vorgenommen werden. Die meisten betroffenen Bundesländer haben in den letzten Jahren bereits 8 x 8 km Verdichtungen für diese Schwachstellen an das Thünen-Institut geliefert. Im Fall der Eiche sollte eine bundesweite Verdichtung auf das 8 x 8 km Raster in Erwägung gezogen werden.

Buche und Eiche weisen im bundesweiten Mittel höhere Kronenverlichtungen auf als die Fichte und Kiefer. Fichte und Kiefer sind mit im Mittel 70 Jahren außerdem jünger als die Buche (90 Jahre) und Eiche (103 Jahre). Das Bestandsalter repräsentiert unter den untersuchten Einflussgrößen die relevanteste Einflussgröße für die Kronenverlichtung der vier Hauptbaumarten. Bis etwa die Hälfte der beobachteten Variabilität der Kronenverlichtung kann durch das Bestandsalter erklärt werden. Der Zusammenhang ist nicht-linear. In jungen Bestände (i.d.R. < 60 Jahre) nimmt die Kronenverlichtung bei allen vier Hauptbaumarten mit dem Alter stetig und deutlich zu, während in Beständen ab ca. 60 Jahren eine schwächere Zunahme der Kronenverlichtung (Fichte, Buche) oder eine sogar annähernd gleichbleibende Kronenverlichtung (Kiefer, Eiche) vorliegt. Dieser enge Zusammenhang zwischen Bestandsalter und Kronenverlichtung liefert somit einen Großteil der Erklärung für die beobachteten mittleren Kronenverlichtungen. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Einflussgröße Bestandsalter z.T. auch die Bestandssituation beinhaltet. Die Kiefer weist mit im Mittel 18,8 % die niedrigste Kronenverlichtung im Zeitraum 1989 bis 2015 auf. Die höchsten Kronenverlichtungen traten Anfang der 1990er Jahre auf (1991: 23,0 %). Betroffen war insbesondere der Nordosten von Deutschland. Seit Mitte der 1990er Jahre ist ein Unterschied zwischen den Kiefern im Norddeutschen Tiefland (niedrigere Kronenverlichtungen) und den Kiefern im restlichen Bundesgebiet (höhere Kronenverlichtungen) zu erkennen. Die Ursache für diesen Unterschied konnte nicht abschließend geklärt werden. Im Vergleich zu den anderen Hauptbaumarten konnten für die relativ trocken-resistente Kiefer wenig Anzeichen von Trockenstress beobachtet werden. Eine Ausnahme bildet der Zeitraum zu Beginn

der Zeitreihe (mehrere Trockenjahre infolge) und das Extremtrockenjahr 2003. Eventuell spielte zu Beginn der 1990er Jahre die Vorbelastung durch die Luftverschmutzung in Ostdeutschland ebenfalls eine Rolle. Im Jahr 2004 und in den Folgejahren wurden als Folge des Trockenstresses in Südwestdeutschland erhöhte Kronenverlichtungen beobachtet. Der Insektenbefall, der wiederum zum Teil von der Witterung gesteuert wird, spielt eine entscheidende Rolle für die Höhe der Kronenverlichtung der Kiefer. Insbesondere das Nordostdeutsche Tiefland, in dem Reinbestände von Kiefern vorherrschen, ist von Insektenbefall betroffen. In der vorliegenden Studie konnte außerdem ein negativer Effekt von hohen austauschbaren Calciumvorräten im Boden auf die Kronenverlichtung der Kiefer gezeigt werden, der als erschwerte Kaliumaufnahme in Folge des Kalium-Calcium-Antagonismus insbesondere bei Trockenheit auf kalkreichen Standorten interpretiert wird. Die Fichte weist im Mittel über die Zeitreihe ebenfalls relativ niedrige Kronenverlichtungen mit 21,1 % auf. Von 2003-2007 (2004: 24,3 %) liegen die bundesweit höchsten Kronenverlichtungen für die Fichte vor. Einen deutlichen Einfluss haben die Trockenjahre 1989, 1992 und insbesondere 2003. Während zu Beginn vor allem Nordostdeutschland betroffen war, bildet sich Südwestdeutschland (insbesondere Teile des Schwarzwalds) seit dem Trockenjahr 2003 als Schwerpunktgebiet erhöhter Kronenverlichtungen heraus. Die Beobachtung verdeutlicht die Empfindlichkeit der Fichte gegenüber Trockenstress insbesondere unter den gegebenen Vorbelastungen der Böden. Vermutlich als Folge des Klimawandels wurden in den letzten Jahren bundesweit vermehrt positive Temperaturabweichungen vom langjährigen Mittel sowie eine Zunahme an Extremereignissen wie Trockenperioden und Starkregen beobachtet. Fichtenbestände in Regionen, die von hohen Verdunstungen betroffen sind und gleichzeitig auf sandigen Böden stocken, sind somit besonders von hohen Kronenverlichtungen betroffen wie z.B. in Teilen des Schwarzwalds. Des Weiteren spielt die N-Deposition und N-Versorgung der Fichte eine Rolle. Negative Effekte auf die Kronenverlichtung lassen sich sowohl bei Mangel als auch bei Überschuss nachweisen. Die Kronenverlichtung der Buche (im Mittel 23,7 %) zeigt ein ähnliches Bild wie das der Fichte mit höheren Kronenverlichtungen in Nordostdeutschland zu Beginn der Zeitreihe 1989 (Trockenjahr) und 1990, in Mittel- und Süddeutschland (hier vor allem die östlichen Gebiete) im Trockenjahr 1992 sowie im Folgejahr und weiträumig, jedoch von Jahr zu Jahr deutlich schwankend, in Südwestdeutschland seit dem Trockenjahr 2003. Seit Anfang der 1990er Jahre und insbesondere in den 2000er Jahren werden gehäuft Mastjahre beobachtet (2004, 2006, 2009, 2011, 2014). Aufgrund des engen negativen Zusammenhangs zwischen Fruktifikation und Kronenverlichtung liegen in den Mastjahren besonders erhöhte Kronenverlichtungen vor (höchste mittlere Kronenverlichtung von > 27 % in den Jahren 2004, 2005, 2011). Für die Buche lässt sich ein deutlicher Witterungseinfluss feststellen, der sich zum einen indirekt über die Fruktifikation zeigt und zum anderen direkt in Form von Trockenstress. Die N-Versorgung der Buche spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. Anders als bei der Fichte konnten für die Buche keine negativen Effekte einer N-Überversorgung, sondern nur einer Mangelernährung festgestellt werden. Nur wenige Buchen weisen jedoch eine unzureichende N-Versorgung auf. Die Eiche stellt die Hauptbaumart mit der höchsten mittleren Kronenverlichtung dar (25,3 %). Hohe Verlichtungen finden sich über die Jahre im gesamten Bundesgebiet. Schwerpunktmäßig liegen hohe Kronenverlichtungen in Süd- und Mitteldeutschland vor, seit Mitte der 1990er Jahre jedoch auch im an die Mittelgebirge

angrenzenden Tiefland. Besonders betroffen ist das Tiefland in Nordrhein-Westfalen (Westfälische Bucht) und das Umland des Harzes. In den letzten Jahren (seit 2003) kristallisiert sich neben diesen beiden Gebieten auch wieder Südwestdeutschland als besonders betroffen von hohen Kronenverlichtungen heraus. Die Eiche zeigt jedoch weniger Trockenstress im Vergleich zur Fichte und Buche. Der Insektenbefall spielt hier eine wichtige Rolle in Bezug auf die Kronenverlichtung und ist weit verbreitet im Bundesgebiet. In den beiden Tieflandgebieten, bei denen es sich auch um alte Bestände handelt, tritt Insektenbefall vermehrt auf.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kronenverlichtungen der Fichte und Kiefer seit den 1980er Jahren niedriger geworden sind, während die Kronenverlichtungen der Buche und Eiche zugenommen haben. Im Fall der beiden Laubbäume spielt u.a. der Alterseffekt eine Rolle. Im Laufe der WZE-Zeitreihe sind die direkten Wirkungen der Schwefeleinträge, die vor ihrer Reduzierung im Rahmen des Luftreinhalteprogramms in den 1980er Jahren erheblich zu hohen Kronenverlichtungen vor allem der Nadelbäume in den Mittelgebirgen beigetragen haben, zurückgetreten. In den Vordergrund rücken nun unter den gegebenen Vorbelastungen der Waldböden die Folgen des Klimawandels, der sich in der untersuchten Region durch positive Abweichungen vom langjährigen Temperaturmittel sowie durch Witterungsextreme wie Hitze- und Trockenheitswellen, Starkregenereignisse oder Stürme auszeichnet. Besonders auf das Extremtrockenjahr 2003 reagierten alle vier Hauptbaumarten mit unterschiedlicher Intensität und Dauer mit erhöhten Kronenverlichtungen. Neben dem direkten Effekt von Trockenstress spielen auch indirekte Effekte über zunehmende Fruktifikation und Insektenmassenvermehrung bzw. die Ausbreitung wärmeliebender Insekten und Pilze eine entscheidende Rolle. In dem untersuchten Zeitraum sind negative Effekte der Witterungsveränderung auf die Kronenverlichtung insbesondere in Südwest- und Mitteldeutschland zu beobachten. Anders als im niederschlagsarmen Nordosten, in dem vor allem trockenheitsresistentere Kiefern stocken, findet man z.B. im Südwesten auf sandigen oder auch tonigen Böden die deutlich gegenüber Trockenstress empfindlichere Fichte und Buche. Alle vier Hauptbaumarten zeigen jedoch zu Beginn der Zeitreihe erhöhte Kronenverlichtungen in Nordostdeutschland, die vermutlich ebenfalls eine Folge des vorausgehenden Trockenjahrs (1989) sind. Vorbelastungen durch Luftverschmutzungen im Osten Deutschlands spielen hier eventuell ebenfalls eine Rolle. Im Rahmen des zukünftigen Waldmanagements sollten trockenheitsresistentere und wärmeliebende Baumarten mehr Beachtung finden und die Verbreitung und Vermehrung von Insekten und Pilzen insbesondere in Regionen mit großflächigen Reinbeständen im Auge behalten werden. Eine höhere Diversität an standortsangepassten Baumarten, Mischwälder und die Regulierung des Wasserbedarfs als Maßnahmen des Waldumbaus sollte im Allgemeinen angestrebt werden. Auch den chronisch hohen N-Einträgen in die Waldökosysteme und möglichen Wechselwirkungen mit Klimaänderungen sollten weiterhin Beachtung geschenkt werden. Ziel sollten ein weiterer Rückgang der Bodenversauerung und eine weitere Reduzierung von Schadstoffeinträgen sein, um Stressfaktoren für die Waldbäume zu verringern und somit eine bessere Regenerationsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel zu fördern.

THÜNEN

Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland

Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008

Nicole Wellbrock, Andreas Bolte, Heinz Flessa (eds)

Thünen Report 43