

INTERZEPTION IN WÄLDERN – EINFLUSS DER BESTANDESSTRUKTUR

Bernd Ahrends, Henning Meesenburg, Markus Wagner, Birte Scheler, Stefan Fleck
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen

1 EINLEITUNG

Die Niederschlagsinterzeption ist eine wichtige Komponente der Gesamtverdunstung von Waldökosystemen (MULDER 1983) und bestimmt deshalb maßgeblich die Wasserverfügbarkeit und die Tiefenversickerung (MÜLLER & ANDERS 1996). Zahlreiche Untersuchungen weisen auf große Variationen der Interzeptionsverluste hin (AHRENDS & PENNE 2010; MOHR et al. 2005; PECK & MAYER 1996). Generell ist die Höhe der Interzeption von den atmosphärischen Bedingungen und von der Vegetationsart und -struktur abhängig (LIU 1997). Auf der regionalen Maßstabsebene ist die Interzeption eng mit klimatischen Faktoren (LOUSTAU et al. 1992) wie Freilandniederschlagsmenge, Niederschlagsintensität und -dauer (DVWK 1986), Windgeschwindigkeit (WEIHE 1982), Energieangebot und Nebelhäufigkeit (BALÁZS 1983) verknüpft. Auf der lokalen Maßstabsebene kommt der Landnutzungsform und den Baumarten (PECK & MAYER 1996; ZINKE 1967) eine große Bedeutung zu. Zwischen den Baumarten haben die Bestandesstruktur (HERBST & THAMM 1994; PYPKER et al. 2005), die Bestandesdichte (ABOAL et al. 2000; FLEISCHBEIN et al. 2005; VAN DIJK & BRUIJNZEEL 2001) und andere Bestandesparameter, die die temporäre Wasserspeicherfähigkeit des Bestandes beschreiben, einen wesentlichen Einfluss auf die Interzeptionsverluste. Dennoch zeigte der Versuch von PECK & MAYER (1996), die Interzeption von Waldbeständen zu systematisieren und generelle Abhängigkeiten von Bestandesparametern aufzuzeigen, keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Dies ist wahrscheinlich auf die unterschiedlichen klimatischen Rahmenbedingungen der Untersuchungsbestände zurückzuführen, die in die Literaturzusammenstellung eingeflossen sind.

Um die Höhe der Interzeption in Abhängigkeit von unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und Eigenschaften der Vegetation abzuschätzen, sind zahlreiche empirische, physikalisch basierte oder stochastische Modelle entwickelt worden (LIU 1997). Die Modelle von RUTTER et al. (1972) und GASH (1979) beschreiben den Prozess der Interzeptionsverdunstung hinreichend genau und wurden entsprechend in zahlreichen angepassten oder modifizierten Versionen in diverse Wasserhaushaltsmodelle implementiert (z.B. FEDERER et al. 2003). Beide Modelle benötigen jedoch eine große Anzahl an Eingangsdaten, da sie mit der Zielsetzung entwickelt wurden, die an der Interzeptionsverdunstung beteiligen Prozesse möglichst detailliert zu beschreiben. Für die allgemeine Anwendbarkeit und Übertragbarkeit eines Modells ist aber das Vorhandensein von übermäßig vielen, sensitiven und kalibrierungsbedürftigen Parametern nachteilig. Entsprechend besteht insbesondere für die forstliche Praxis ein Bedarf an einfachen und belastbaren Schätzmodellen, um den Interzeptionsverlust für unterschiedliche Baumarten

und Bestandesstrukturen zu quantifizieren. Aus dem dargelegten Stand der Forschung lassen sich folgende Zielsetzungen für diese Untersuchung zusammenfassen:

1. Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Interzeptionsverlust und standardmäßig verfügbaren Bestandesparametern, wie Derbholzvorrat, Bestandesgrundfläche, Bestandeshöhe und -dichte.
2. Entwicklung eines einfachen Regressionsmodells zur Abschätzung der Interzeption anhand von leicht verfügbaren klimatischen Parametern und Forsteinrichtungsdaten mit deren Hilfe sich die Auswirkungen von forstlicher Bewirtschaftung auf die Interzeption und somit auf den Bestandesniederschlag beschreiben lassen.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 METHODISCHER ANSATZ

Aus dem Stand der Forschung und den Zielsetzungen dieser Arbeit ergibt sich das in der Abb. 1 schematisch dargestellte methodische Vorgehen. Die Arbeit lässt sich somit in drei Hauptteile gliedern. Die Modellentwicklung, die Validierung und die beispielhafte Anwendung des Schätzmodells anhand von Forsteinrichtungsdaten.

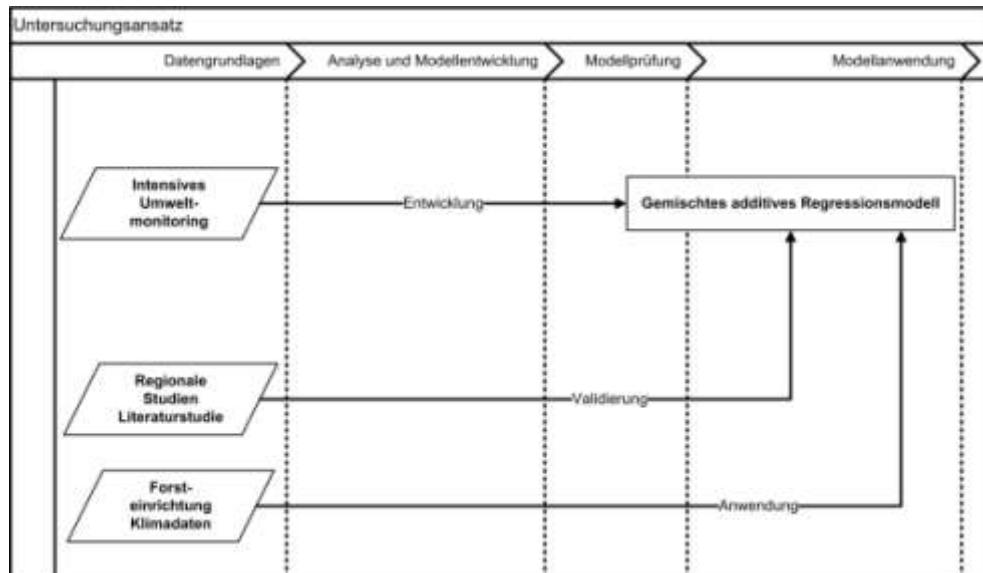


Abb.1: Schematische Darstellung des methodischen Ansatzes.

2.2 BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

Der Interzeptionsverlust kann anhand der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$I = FN - (KT + ST) = FN - BN \quad (1)$$

wobei I, FN, KT, ST, BN für Interzeption, Freilandniederschlag, Kronentraufe, Stammabfluss und Bestandesniederschlag stehen. Die Kronentraufe schließt sowohl den Anteil des Niederschlages ein, der von den Blättern zum Boden tropft, als auch den Niederschlag, der direkt durch die Kronen fällt. Da der Stammabfluss insbesondere in Nadel- aber auch in Eichenwäldern nur einen geringen Anteil vom Freilandniederschlag einnimmt (GASH & STEWART 1977; SILVA & RODRÍGUEZ 2001), wurde dieser nur bei der Baumart Buche berücksichtigt. Hierdurch können jedoch geringe Unsicherheiten insbesondere in sehr jungen Beständen entstehen, da in diesen häufig der Stammabfluss einen größeren Anteil ausmachen kann (LOUSTAU et al. 1992; MITSCHERLICH 1981). Als Parameter zu Beschreibung der Bestandesstruktur wurden der Durchmesser des Kreisflächenmittelstammes (d_g), die Höhe des Kreisflächenmittelstammes (h_g), die Stammzahl (S), die Bestandesgrundfläche (G) und das Bestandesvolumen (V) verwendet und aus Ihnen mit Hilfe von allometrischen Funktionen und Schätzmodellen (HAMMEL & KENNEL 2001; WUTZLER et al. 2008; WIRTH et al. 2004; CIENCIALA et al. 2006; AHRENDS et al. 2010; AHRENDS & PENNE 2010) weitere Parameter wie der Blattflächenindex (LAI), die Blatt-/Nadelmasse und der Kronenschlussindex (KI) abgeleitet.

2.3 DATENZUSAMMENSTELLUNG UND -AUFBEREITUNG

Auf Grundlage der Intensivmonitoringflächen in Nordwestdeutschland (Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt) wurde eine Datenbank mit Angaben zum Freiland- und Bestandesniederschlag zusammengestellt (Abb. 2).

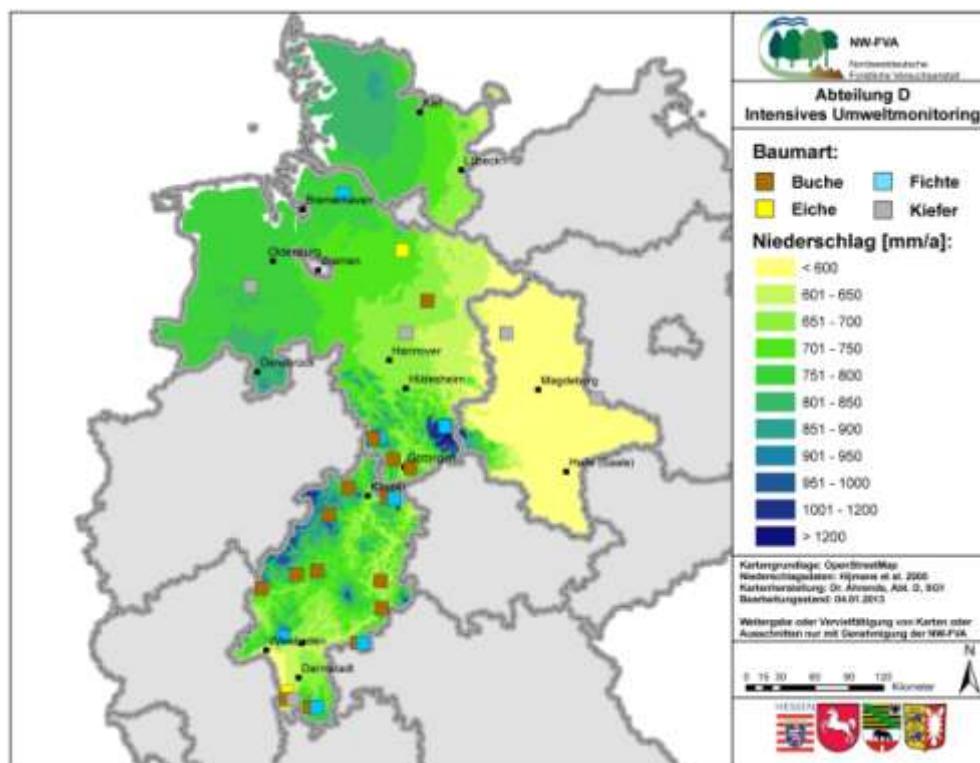


Abb. 2: Geographische Lage der berücksichtigten Intensivmonitoringflächen in Nordwestdeutschland. Niederschlagsdaten (1950-2000) nach HIJMANS et al. (2005).

Freiland- und Bestandesniederschlag wurden mit ständig offenem Niederschlags-sammeln, bestehend aus jeweils einem Trichter als Auffangfläche und einer Sammelflasche, gewonnen. Dabei kamen im Freiland drei oder mehr, im Bestand 15 oder mehr Einzelsammler zum Einsatz. Stammablauf wurde mittels um den Stamm angebrachten Manschetten gewonnen, über die das Stammablaufwasser in Sammelgefäß geleitet wurde.

Die Mengenerfassung erfolgte über geeichte Messbehälter, über Kippschalenzähler oder über geeichte Wasseruhren. Die Daten der einzelnen Sammelperioden wurden jeweils zu Jahresflüssen aggregiert. Niederschlagsdaten aus Sammelperioden von unter einem Jahr wurden nicht mit in die Datenbank aufgenommen. Der Datensatz umfasst 34 Bestände mit insgesamt 655 jährlichen Niederschlagsdatensätzen, die sich wie folgt auf die vier Hauptbaumarten verteilen: Buche (308 Datensätze = 47%), Eiche (42, 6%), Fichte (232, 35%) und Kiefer (73, 11%). Den jährlichen Niederschlagssummen wurden die bestandesspezifischen Variablen (d_g , h_g , Stammzahl, G, V, usw.) der verschiedenen Bestandesinventuren auf den Monitoringflächen zugeordnet (Tab. 1).

Dem Ansatz von GUCKLAND et al. (2012) folgend erfolgt die Abschätzung der potenziellen Evapotranspiration für die jeweiligen Stationen als Mittel für den Zeitraum von 1950 bis 2000 auf Grundlage der regionalisierten Klimadaten von HIJMANS et al. (2005) mit einem monatlichen Wasserbilanzmodell (MCCABE & MARKSTROM 2007).

Tab. 1: Liste der Variablen, ihre Abkürzungen, Mittelwerte (X), Mediane (X_M), Extremwerte (Min & Max) und Anzahl Datensätze (n) für die Untersuchungsbestände.

Variable	Einheit	X	X_M	Min	Max	n
Freilandniederschlag (FN)	mm a ⁻¹	937	893	420	2019	655
Bestandesniederschlag (BN)	mm a ⁻¹	712	661	303	1765	655
Interzeption (I)	mm a ⁻¹	224	207	-17	502	655
Messjahr (J)	a	1999	2000	1981	2011	655
Geographische Breite (GB)	°N	51,3	51,4	49,6	53,7	655
Geographische Länge (GL)	°E	9,5	9,6	7,9	12,3	655
Meereshöhe (Höhe)	m ü. NN	379	440	33	660	655
Bestandesalter (A)	a	100	103	47	170	598
Derbholzvolumen (V)	m ³ ha ⁻¹	452	476	187	775	598
Bestandesgrundfläche (G)	m ²	34,0	33,1	17,3	58,3	598
Brusthöhendurchmesser (d _g)	cm	36,0	36,0	17,0	56,7	598
Bestandesmittelhöhe (h _g)	m	27,4	28,6	14,7	39,8	598
Stammzahl (S)	N ha ⁻¹	463	374	87	1732	598
Blattflächenindex (LAI)	m ² m ⁻²	5,3	5,6	1,7	7,9	598
Blatt-/Nadelmasse (NM)	kg ha ⁻¹	9543	3939	1911	21524	598
Pot. Evapotranspiration (PET)	mm a ⁻¹	535	547	468	617	598
Kronenschlussindex (KI)	m ² m ⁻²	1,0	1,0	0,56	1,59	598

2.4 MODELLIERUNGSANSATZ UND STATISTISCHE METHODEN

Zur zusammenfassenden Darstellung der Verteilung der Interzeption werden das arithmetische Mittel (X) und der Median (X_M) verwendet. Zur Beschreibung der Streuung wurden Spannweiten, Standardabweichungen (Std) und Variationskoeffizienten (VK) berechnet. Um die Zusammenhänge zwischen den Variablen zu beschreiben wurde der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient (r_{Spear}) ermittelt (SACHS 1999), da nicht generell von linearen Zusammenhängen ausgegangen werden kann. Zur Abschätzung der Interzeptionsverdunstung wurden additive gemischte Regressionsmodelle verwendet, die im Statistikpaket R 2.15.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2006) unter Verwendung der R-Bibliothek mgcv 1.7-16 (WOOD 2006) durch einen Aufruf der R-Bibliothek nlme (PINHEIRO et al. 2008) direkt als gemischte Modelle parametrisiert wurden. Additive Modelle erlauben es, nichtlineare Effekte der Prädiktorvariablen (FN, PET, G, V etc.) auf die Zielvariable (Interzeptionsverdunstung) zu identifizieren, ohne dass Annahmen über eine bestimmte Funktionsform vorgegeben werden müssen. Die Anwendung eines gemischten Modells (mixed model) ist notwendig, da die Zeitreihen von

Interzeptionsmessungen stammen, die in gleichen Beständen durchgeführt wurden und somit nicht unabhängig von einander sind. Die allgemeine Form eines verallgemeinerten additiven gemischten Modells (GAMM) lautet für normal und homogen verteilte Beobachtungen wie folgt:

$$y_{ij} = b_0 + f_1(x_{1,ij}) + \dots + f_n(x_{n,ij}) + Z_j b_j + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

mit:

b_0 : konstantes Glied (Intercept)

y : Zielvariable (Interzeption)

x_n : erklärende Variablen

f_n : glättende Funktion

j : Bestandesindex

Z_j : Modellmatrix der Zufallseffekte auf Bestandesebene, mit $j = 1, \dots, 34$.

b_j : Vektor mit bestandesspezifischen Zufallseffekten mit $b_j \sim N(0, G)$

ε : ein unabhängig und identisch verteilter Fehlerterm mit $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$

Zur Aufdeckung von Modellverletzungen und der Beurteilung der Modellgüte wurden graphische und numerische Residualanalysen durchgeführt. Die Bewertung der Modelle erfolgte anhand der folgenden statistischen Kenngrößen:

- Akaike's Informationskriterium [AIC] (KUHA 2004), wobei das Modell mit dem geringsten AIC gewählt werden sollte.
- Korrigiertes Bestimmtheitsmaß (r^2_{adj})
- Standardabweichung der Residuen (Std)
- Systematische Abweichungen des Modells von Messwerten (Bias)

Besonders bei multivariaten Modellen ist die Überprüfung der Gültigkeit ebenso wichtig wie die Modellentwicklung. Auf die Durchführung einer Kreuzvalidierung wurde an dieser Stelle verzichtet, da aufgrund einer Literaturoauswertung (ANDREAE 1993; BLOCK & BARTELS 1985; BREDEMEIER 1997; EMBACHER 2000; KUES 1984; MOHR et al. 2005; WENZEL 1989) 49 Bestände mit insgesamt 84 jährlichen Niederschlagsdatensätzen zusammengestellt werden konnten. Die Daten zur Validierung verteilen sich auf die vier Hauptbaumarten wie folgt: Buche (21, 25%), Eiche (11, 13%), Fichte (35, 42%) und Kiefer (17, 20%).

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 VARIABILITÄTEN UND KORRELATIONEN

Der auf Grundlage aller Bestände und Jahre berechnete Variationskoeffizient der Interzeption beträgt 44 % und die Standardabweichung 98 mm. Die Häufigkeitsverteilung der Interzeption folgt für alle Baumarten annähernd einer Normalverteilung (Abb. 3).

Tab. 2: Deskriptive Statistik der Interzeptionsverdunstung (mm) für die 4 Hauptbaumarten auf den Intensivmonitoringflächen in Nordwestdeutschland. X: Mittelwert; X_M : Median, Std: Standardabweichung; VK: Variationskoeffizient.

Baumart	n	X	X_M	Min	Max	Std	VK(%)
Fichte	232	304	312	92	502	89	29,1
Buche	308	188	181	-17	404	77	40,9
Kiefer	73	167	160	65	328	57	34,0
Eiche	42	149	149	26	257	51	34,4

Tab. 2 zeigt die statistischen Kenngrößen getrennt nach den vier Hauptbaumarten. Ahrends & Penne (2010) fanden bei ihrer Auswertung von 78 Kiefernbeständen einen Variationskoeffizienten in einer vergleichbaren Größenordnung (36 %). Die Unterschiede der baumartenspezifischen Mittelwerte sollten jedoch mit Vorsicht interpretiert werden, da die Verteilung der Baumarten nicht homogen über vergleichbare Niederschlagsverhältnisse vorliegt (vgl. Abb. 2) und die Niederschlagsmenge einen entscheidenden Einfluss auf die Interzeptionsverluste hat (Tab. 3).

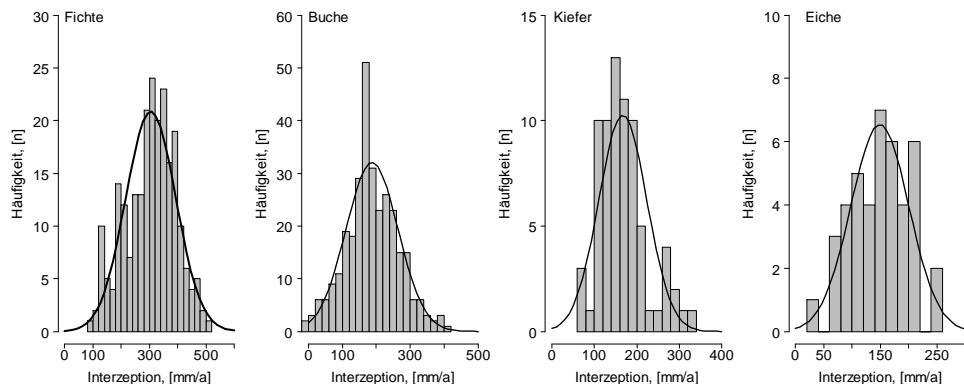


Abb. 3: Häufigkeitsverteilungen der Interzeptionsverdunstung auf den Intensivmonitoringflächen in Nordwestdeutschland für die Baumarten Fichte, Buche, Kiefer und Eiche.

Die Korrelationsanalysen (Tab. 3) zeigen signifikante Zusammenhänge zu vielen Variablen, die in diese Untersuchung eingeflossen sind. Hervorzuheben ist hier insbesondere die Korrelation zum Freilandniederschlag. Entsprechend gilt es, den Einfluss des Freilandniederschlages zu berücksichtigen, um die Bestände hinsichtlich ihrer bestandespezifischen Eigenschaften vergleichbarer zu machen.

Die Korrelationen der anderer Variablen sind jedoch häufig überprägt von Korrelationen der jeweiligen Variablen untereinander. Entsprechend verbirgt sich hinter der positiven Beziehung der Interzeption zur Höhe der Bestände über NN die starke Korrelation zwischen der Niederschlagsmenge und der Meereshöhe (0,66***). Die unplausible Beziehung zwischen der potenziellen Evapotranspiration und der Interzeption resultiert ebenfalls aus der starken negativen Beziehung zwischen der Niederschlagsmenge und der PET (-0,59 ***).

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten (Rangkorrelation nach Spearman) zwischen der Interzeption und verschiedenen standorts- und bestandesspezifischen Variablen.

Variable	Einheit	r_{Spear}	Sig.	n
Freilandniederschlag (FN)	mm a^{-1}	0,68	***	655
Geographische Breite (GB)	°N	-0,05	n.s.	655
Geographische Länge (GL)	°E	-0,05	n.s.	655
Meereshöhe (Höhe)	m ü. NN	0,48	***	655
Pot. Evapotranspiration (PET)	mm a^{-1}	-0,4	***	655
Bestandesalter (A)	a	-0,12	**	598
Brusthöhendurchmesser (d_g)	cm	-0,13	**	598
Bestandesmittelhöhe (h_g)	m	-0,06	n.s.	598
Stammzahl (S)	N ha^{-1}	0,29	***	598
Derbholzvolumen (DH)	$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	0,28	***	598
Bestandesgrundfläche (G)	m^2	0,56	***	598
Blattflächenindex (LAI)	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	0,19	***	598
Blatt-/Nadelmasse (NM)	kg ha^{-1}	0,55	***	598
Kronenschlussindex (KI)	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	0,08	.	598

Signif. Schlüssel: 0 ‘***’ 0,001 ‘**’ 0,01 ‘*’ 0,05 ‘.’ 0,1

3.2 INTERZEPTIONSMODELLE UND ANWENDUNG

Die einfachen Korrelationen geben Hinweise auf die wichtigsten Einflussfaktoren der Interzeption. Entsprechend können einfache Regressionsmodelle eingesetzt werden, um z.B. die Interzeption anhand des Freilandniederschlages abzuschätzen. Zur Verbesserung der Modellqualität ist es notwendig, mehrere Parameter in die Regressionsmodelle aufzunehmen. Grundlage für die dargestellten Modelle sind umfangreiche Regressionsanalysen. Neben der Einhaltung der Modellvoraussetzungen wurde insbesondere Wert darauf gelegt, dass die Modelle nicht übermäßig viele sowie flächenhaft verfügbare und gut zu interpretierende Variablen enthalten. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die spätere Anwendbarkeit in der forstlichen Praxis. Die ausgewählten Modelle zeigen neben dem signifikanten Einfluss der klimatischen Bedingungen und der Baumart (zumindest für Buche und Fichte) auch signifikante Effekte der bestandesspezifischen Parameter wie Bestandesgrundfläche, Volumen, Blattflächenindex und Nadelmasse. Da die ausgewählten Bestandesvariablen sehr stark untereinander korreliert sind, unterscheiden sich die dargestellten Modelle nur sehr geringfügig in ihrer Modellgüte (Tab. 4).

Die durch die multiplen Regressionsmodelle nicht erklärte Restvarianz wird in Abb. 4 durch die Streuung der Datenpunkte um die 1:1-Line deutlich. Fast alle Modelle zeigen bis auf eine leichte Tendenz zu einer Überschätzung geringer und Unterschätzung hoher gemessener Interzeptionswerte mehr oder weniger unsystematische Abweichungen um die

1:1 Linie. Systematische Abweichungen können damit begründet werden, dass zur Modellparametrisierung nur langjährige Mittelwerte der potenziellen Evapotranspiration verwendet wurden und somit die besonderen klimatischen Bedingungen in Jahren mit besonders hohen oder geringen Interzeptionsverlusten eventuell nicht hinreichend abgebildet werden können.

Tab. 4: Kurzübersicht der Struktur und der statistischen Kenngrößen (AIC: Akaiques Informationskriterium, r^2_{adj} : korrigiertes Bestimmtheitsmaß, Std: Standardabweichung der Residuen [mm], Bias: Systematische Abweichungen des Modells von Messwerten [mm], n: Anzahl Messwerte) der ausgewählten Modelle zur Abschätzung der Interzeption. I = Interzeption, FN = Freilandniederschlag, PET = Potenzielle Evapotranspiration, BA = Baumart, G = Bestandesgrundfläche, V = Derbholzvolumen, LAI: Blattflächenindex, NM = Nadel-/Blattmasse, KI = Kronenschlussindex.

Model	Parameter	AIC	r^2_{adj}	Std	Bias	n
1	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + \text{Faktor}(BA)$	7077	0,64	58,7	-1,8	655
2	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + \text{Faktor}(BA) + f_3(G)$	6444	0,67	55,3	-2,1	598
3	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + \text{Faktor}(BA) + f_3(V)$	6456	0,65	56,6	-2,1	598
4	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + \text{Faktor}(BA) + f_3(LAI)$	6447	0,66	56,3	-2,4	598
5	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + \text{Faktor}(BA) + f_3(NM)$	6444	0,68	54,8	-1,6	598
6	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + \text{Faktor}(BA) + f_3(KI)$	6441	0,66	56,3	-1,9	598

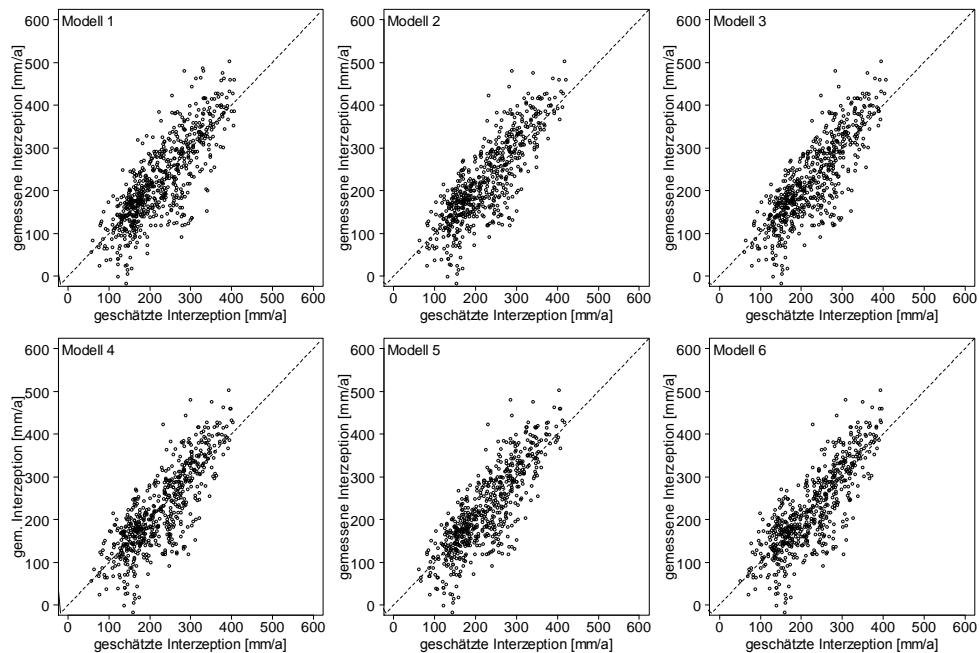


Abb. 4: Beziehung zwischen geschätzter und gemessener Interzeption (vgl. Tab. 4).

Entsprechend ist die Restvarianz noch relativ groß und die einzelnen Punkte streuen stark (Abb. 4). Der Bias ist jedoch bei allen Modellen mit etwa -2 mm als gering einzustufen (Tab. 4). Weiterhin können systematische Messfehler diese Abweichungen hervorrufen, etwa durch nicht repräsentativ angelegte Freilandniederschlagsmessstellen.

Neben der unsystematischen Verteilung sind auch die räumliche und die zeitliche Unabhängigkeit eine wesentliche Voraussetzung für die Gültigkeit der Modelle. Da sich hinter einer Intensivmonitoringfläche mehrere Messjahre und entsprechend eine Vielzahl von Residuen verbergen, wurde zur zweidimensionalen Darstellung der räumlichen Residualverteilung der Mittelwert aus allen Residuen eines Bestandes berechnet (Abb. 5). Die Größenordnung der dargestellten gemittelten Residuen ist deutlich reduziert worden. Für die meisten Bestände liegen sie zwischen -25 bis 25 mm. Dieses spricht für die Hypothese, dass die hohe Restvarianz (vgl. Abb. 4) vorwiegend durch unterschiedliche klimatische Bedingungen in den jeweiligen Messjahren hervorgerufen wird und sich somit die Modellgüte im langjährigen Mittel deutlich verbessert. Dass die in den Modellen berücksichtigten Bestandesvariablen miteinander korreliert sind, wird dadurch bekräftigt, dass i. d. R. die gleichen Bestände durch hohe positive oder negative Residuen gekennzeichnet sind. Bei einigen Beständen (z.B. Göttinger Wald), die durchgehend über sehr hohe Residuen verfügen, können die Abweichungen jedoch auch ein Hinweis auf systematische Messfehler sein. Insgesamt geben die Residuen jedoch keine Hinweise auf räumliche Autokorrelation. Auch die unterschiedlichen Baumarten sind gleichermaßen von den Modellabweichungen betroffen.

Demgegenüber treten bei allen Modellen zeitliche Autokorrelationen auf. Um deren Ausmaß zu untersuchen, wurde in Anlehnung an ZUUR et al. (2008) das Messjahr in die Regressionsgleichungen aufgenommen und dessen Einfluss auf das Bestimmtheitsmaß (r^2_{adj}) und das AIC untersucht.



Abb. 5: Räumliche Verteilung der gemittelten Residuen auf den Intensivmonitoringflächen für die Modelle der Tab. 4.

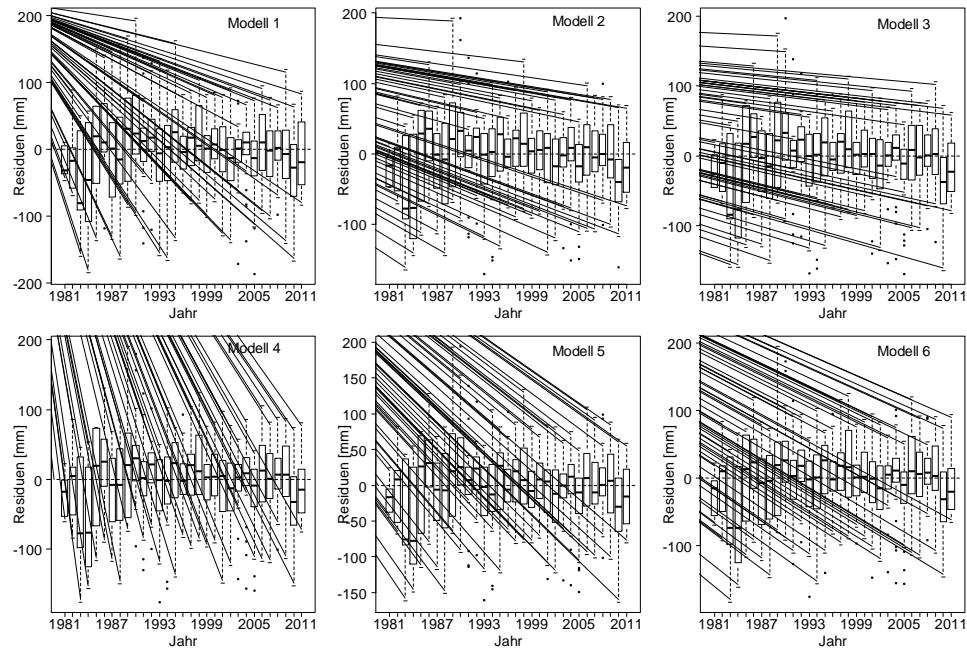


Abb. 6: Residuen der Modelle in Abhängigkeit vom jeweiligen Messjahr der Interzeptionsverdunstung.

Durch die Berücksichtigung des Messjahres verändert sich sowohl das r^2_{adj} als auch das AIC nur geringfügig, so dass die gefundenen Modelleffekte als gültig anzusehen sind. Diese Aussage wird auch durch die Boxplots in Abb. 6 gestützt. Sie zeigen, dass die Modellresiduen in den jeweiligen Messjahren relativ homogen verteilt und im Mittel annähernd Null sind. Im Wesentlichen verhalten sich alle Modelle über die Zeitreihe relativ stabil, auch wenn sich anhand der Mediane in den Boxplots ein leicht negativer Trend abzeichnet. Bei einer Weiterentwicklung sollte daher die Variable der potenziellen Evapotranspiration durch jährliche Werte ersetzt werden, da zu vermuten ist, dass ein zeitlicher Trend durch die Verwendung von langjährigen Mittelwerten nicht hinreichend abgebildet werden kann. Des Weiteren ist zu überlegen, ob der Freilandniederschlag saisonal aufgeteilt werden sollte. Um den Einfluss des nicht berücksichtigten zeitlichen Trends weiter zu untersuchen, wurden die Modelle an einem unabhängigen Datensatz geprüft (Abb. 7).

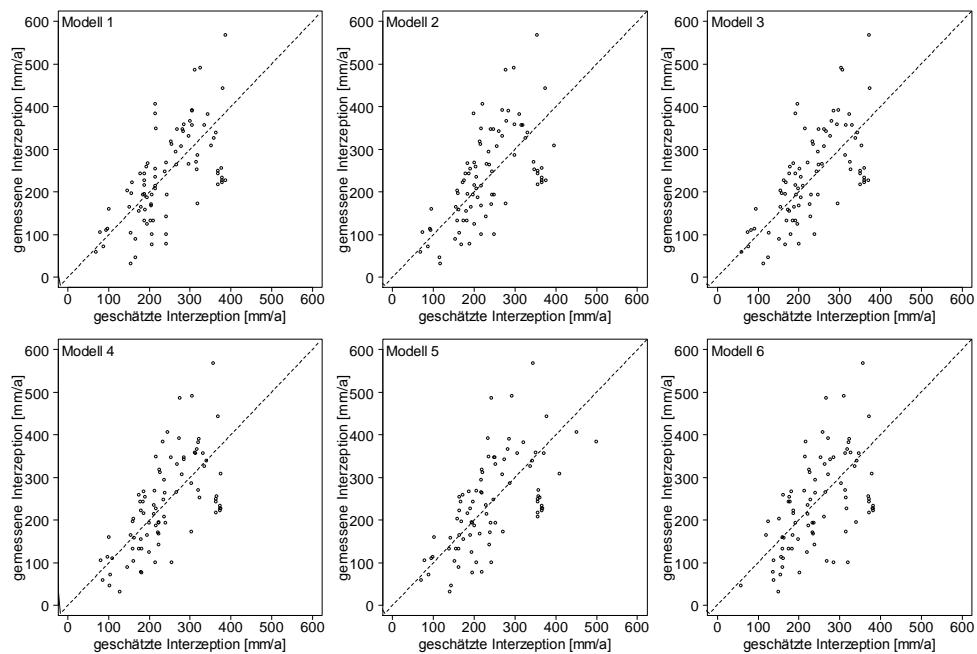


Abb. 7: Beziehung zwischen geschätzten und in den Validierungsbeständen gemessenen jährlichen Interzeptionsverlusten für die Modelle der Tab. 4.

Tab. 5: Statistische Kenngrößen der Validierung der verschiedenen Interzeptionsmodelle (Tab. 4) gegen unabhängige Interzeptionsdaten. r^2 = Bestimmtheitsmaß, Bias = Systematische Abweichungen des Modells von Messwerten, Std = Standardabweichung der Residuen, n = Anzahl Messwerte.

Kenngröße	Modell					
	1	2	3	4	5	6
r^2	0,40	0,37	0,43	0,42	0,39	0,29
Bias (mm)	-4,1	6,3	7,1	1,1	-2,5	-9,0
Std (mm)	85	88	83	84	88	94
n	84	84	84	84	84	84

Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit Ausnahme des Modells 6 alle Modelle auch gegenüber dem Validierungsdatensatz relativ robust verhalten (Tab. 5). Die Streuungen und leichten Abweichungen der ausgewählten Modelle bewegen sich in einer Größenordnung, die auch vorab schon diskutiert und angesprochen wurde. Auch für Abb. 7 gilt, dass sich keine starken systematischen Abweichungen um die 1:1 Line ergeben. Dieses spricht zum einen für die Qualität und die Übertragbarkeit des verwendeten Modellansatzes. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Modelle 4 und 5, bei denen noch mit Hilfe von allometrischen Funktionen der Blattflächenindex und die Nadel-/Blattmasse ermittelt werden müssen, keine deutlichen Vorteile gegenüber den Modellen 2 und 3 aufweisen (vgl. Tab. 4). Letztgenannte Modelle greifen auf in der Forsteinrichtung verfügbare Bestandesparameter wie Derbholzvolumen und Bestandesgrundfläche zurück, und sind somit

besonders für die Praxis geeignet. Entsprechend und aufgrund des AIC und r^2_{adj} (Tab. 4) wird im Zuge der Modellselektion das Modell 2 als bestgeeignetes Modell ausgewählt.

Tab. 6: Schätzungen der Modellparameter (Koeff.), Standardfehler (Std.E.) und Signifikanzniveaus (p) des ausgewählten Modells (Modell 2 aus Tab. 4) zur Schätzung der Interzeptionsverdunstung von Wäldern. FN: Freilandniederschlag (mm), PET: potenzielle Evapotranspiration (mm), G: Bestandesgrundfläche (m^2/ha).

Parameter	Koeff.	Std.E.	p	p
Intercept(Buche)	204,9	9,9	<2e-16	***
Eiche	10,4	25,0	0,678	
Fichte	47,8	19,8	0,016	*
Kiefer	18,3	19,1	0,338	
f(FN)		3,4	< 2e-16	***
f(PET)		2,6	0,000730	***
f(G)		1,6	0,000957	***
$r^2_{\text{adj}} = 0,669$				n = 598

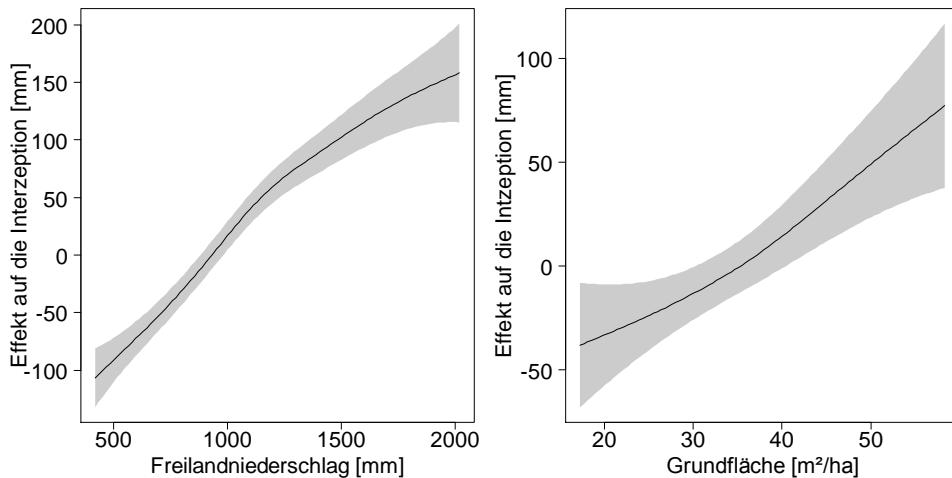


Abb. 8: Nichtlinearere Effekte des Freilandniederschlages (FN) und der Bestandesgrundfläche (G) auf die Interzeptionsverdunstung in Wäldern. Die grau hinterlegten Flächen kennzeichnen das 95% Prognoseintervall.

Mit Ausnahme der Baumarten Eiche und Kiefer zeigen sich für alle Prädiktoren signifikante Effekte auf den Interzeptionsverlust (Tab. 6). Obwohl die Effekte bei den Baumarten Eichen und Kiefer aufgrund des vergleichsweise geringen Stichprobenumfangs (vgl. Kap. 2.3) nicht signifikant sind, können sie aus forsthydrologischer Sicht als plausibel angesehen werden. Wird das Derbholzvolumen als Bestandesparameter verwendet, so ergibt sich z.B. zwischen Buche und Fichte ein Unterschied von ca. 90 mm. Der Rückgang des Baumarteneinflusses bei der Verwendung der Bestandesgrundfläche (G) als Schätzer für den Interzeptionsverlust wird auch durch die Untersuchungen von Mohr et al. (2005) bestätigt.

Beim Freilandniederschlag deutet sich mit zunehmender Niederschlagsmenge eine leichte Sättigung der Interzeption an (Abb. 8). Bei der Interpretation der Effekte der Prädiktoren ist weiterhin zu beachten, dass die Effektkurven in den Randbereichen nicht überinterpretiert werden sollten, da sie nur mit verhältnismäßig wenigen Daten belegt sind. Entsprechend wirken sich hier Messfehler und Effekte nicht berücksichtigter Variablen besonders stark aus.

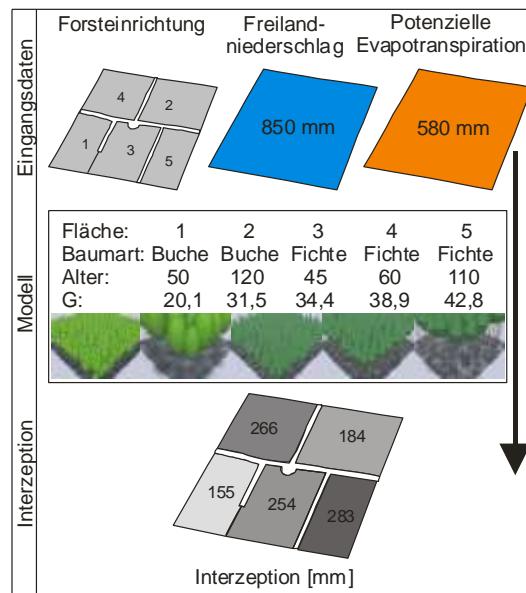


Abb. 9: Beispielhafte Modellanwendung zur Regionalisierung der Interzeption mit Forsteinrichtungsdaten. G: Bestandesgrundfläche (m^2/ha).

Der Mehrwert dieser Modellierung ist es, dass die Interzeption für Waldbestände mit einer gewissen Unsicherheit auf Grundlage von leicht verfügbaren Klima- und Forsteinrichtungsdaten quantifiziert und in Beziehung zu der Bestandesstruktur gesetzt werden kann, wie es in Abb. 9 schematisch anhand eines Beispieldatensatzes veranschaulicht ist.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die entwickelten Modelle dienen zur Schätzung der Interzeptionsverdunstung für Waldstandorte in Nordwestdeutschland (Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt). Eine Übertragung auf andere Gebiete in Deutschland erscheint prinzipiell möglich. Wie bei allen Regressionsmodellen ist die Anwendung jedoch auf die Bedingungen beschränkt, die durch den Entwicklungsdatensatz vorgegeben sind. Entsprechend können sich insbesondere in sehr jungen Beständen, die durch geringe Bestandesgrundflächen und Derbholzvorräte gekennzeichnet sind, Probleme ergeben. Insgesamt bilden die hoch signifikanten Effekte des Freilandniederschlages, der potenziellen Evapotranspiration, der Baumarten und der Bestandesstruktur eine plausible Grundlage, um die Interzeption mit Hilfe von Klima- und Forsteinrichtungsdaten zu regionalisieren. Hierbei bestimmt die Niederschlagsmenge maßgeblich die interannuelle Varianz. Ein signifikanter Effekt der Baumarten zeigt sich zumindest im Vergleich von Buche und Fichte. Dennoch erscheint für zukünftige Entwicklungen eine breitere Datenbasis insbesondere für Jung-, mehrschichtige und ungleichaltrige Bestände und eine Verbesserung der Modellparametrisierung durch räumlich und zeitlich höher aufgelöste Klimadaten zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration unbedingt erforderlich, um die Modellgüte weiter zu verbessern.

5 LITERATUR

- ABOAL, J.R.; JIMÉNEZ, M.S.; MORALES, D.; GIL, P. (2000): Effects of thinning on throughfall in Canary Islands pine forest - the role of fog. *J. Hydrol.*, 238, 218-230.
- AHRENDS, B.; PENNE, C. (2010): Modeling the impact of canopy structure on the spatial variability of net forest precipitation and interception loss in Scots pine stands. *The Open Geography J.* 3, 115-124.
- AHRENDS, B.; MEESENBURG, H.; DÖRING, C.; JANSEN, M. (2010): A spatio-temporal modelling approach for assessment of management effects in forest catchments. *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins*, IAHS Publ. 336, 32-37.
- ANDREAE, H. (1993): Verteilung von Schwermetallen in einem forstlich genutzten Wassereinzugsgebiet unter dem Einfluß saurer Deposition am Beispiel der Sösemulde (Westharz). *Ber. Forsch.zent. Waldökosyst.*, A99, 161 S.
- BALÁZS, A. (1983): Ein kausanalytischer Beitrag zur Quantifizierung des Bestands- und Nettoniederschlages von Waldbeständen. *Verl. Beitr. Hydrol.*, Kirchzarten, 180 S.
- BLOCK, J.; BARTELS, U. (1985): Ergebnisse der Schadstoffdepositionsmessungen in Waldökosystemen in den Meßjahren 1981/82 und 1982/83. *Forsch. Beratung, Reihe C*, Düsseldorf, 296 S.
- BREDEMEIER, M. (1987): Stoffbilanzen, interne Protonenproduktion und Gesamtsäurebelastung des Bodens in verschiedenen Waldökosystemen Norddeutschlands. *Ber. Forsch.zent. Waldökosyst./Waldsterben*, A33, 192 S.

- CIENCIALA, E.; CERNY, M.; TATARINOV, F.; APLTAUER, J.; EXNEROVÁ, Z. (2006): Biomass functions applicable to Scots pine. *Trees*, 20, 483-495.
- DWK (1986): Ermittlung des Interzeptionsverlustes in Waldbeständen bei Regen. *Merkbl. Wasserwirtsch.*, 211, Parey, Hamburg, 11 S.
- EMBACHER, A. (2000): Wasser- und Stoffhaushalt einer Eichenchronosequenz auf kohle- und schwefelhaltigen Kippsubstraten der Niederlausitz. *Cottbuser Schr. Bodenschutz Rekultivierung*, 10, 178 S.
- FEDERER, C.A.; VÖRÖSMARTY, C.; FEKETA, B. (2003): Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J. Hydrometeorol.*, 4, 1276-1290.
- FLEISCHBEIN, K.; WILCKE, W.; GOLLER, R.; BOY, J.; VALAREZO, C.; ZECH, W.; KNOBLICH, K. (2005): Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrol. Process.*, 19, 1355-1371.
- GASH, J.H.C.; STEWART, J.W.B. (1977): The evaporation from Thetford Forest during 1975. *J. Hydrol.*, 35, (3/4), 385-396.
- GASH, J.H.C. (1979): An analytical model of rainfall interception by forests. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 105, 43-55.
- GUCKLAND, A.; AHRENDS, B.; PAAR, U.; DAMMANN, I.; EVERE, J.; MEIWES, K.J.; SCHÖNFELDER, E.; ULRICH, T.; MINDRUP, M.; KÖNIG, N.; EICHHORN, J. (2012): Predicting depth translocation of base cations after forest liming – results from long-term experiments. *Eur. J. For. Res.*, 131, (6), 1869-1887.
- HAMMEL, K.; KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstl. Forsch.ber. Münch.*, 185, Heinrich Frank, München, 148 S.
- HERBST, M.; THAMM, F. (1994): Interzeptionsverlust eines norddeutschen Buchenwaldes - Eine Anwendung des Interzeptionsmodells von Gash. *Z. Kulturtechn. Landentw.*, 35, 311-319.
- HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. (<http://www.worldclim.org>). *Int. J. Climatology*, 25, 1965-1978.
- KUES, J. (1984): Untersuchungen zum Stoffeintrag in den Göttinger Wald. *Ber. Forsch.zent. Waldökosyst./Waldsterben*, 6, 206 S.
- KUHA, J. (2004): AIC and BIC: Comparisons of Assumptions and Performance. *Sociological Methods & Research*, 33, (2), 188-229.
- LIU, S. (1997): A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling*, 99, 151-159.

- LOUSTAU, D.; BERBIGGER, P.; GRANIER, A.; MOUSSA, F.E.H. (1992): Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *J. Hydrol.*, 138, 449-467.
- MCCABE, G.J.; MARKSTROM, S.L. (2007): A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface. Open-File report 2007-1088, U.S. Geological Survey, 6 S.
- MITSCHERLICH, G. (1981): Wald, Wachstum und Umwelt, I und II. Sauerländer, Frankf. a.M. 144 und 402 S.
- MOHR, K.; SCHAAF, S.; HORVATH, B.; MEESENBURG, H.; DÄMMGEN, U. (2005): Stoff- und Energieflüsse der im ANSWER-Projekt untersuchten Waldbestände. Dämmgen, U. (Hrsg): Bestimmung von Ammoniak-Einträgen aus der Luft und deren Wirkungen auf Waldökosysteme (ANSWER-Projekt). Landbauforschung Völkenrode Sonderheft, 279. Bundesforsch.anst. Landwirtsch. (FAL), Braunschweig, 69-94.
- MULDER, J.P.M. (1983): A simulation of rainfall interception in a pine forest. Groningen, Rijksuniv., Diss., 109 S.
- MÜLLER, J.; ANDERS, S. (1996): Vergleichende Untersuchungen zum Stoff- und Wasserhaushalt von Laub- und Nadelwaldökosystemen im nordostdeutschen Tiefland. *Beitr. Forstwirtsch. Landschaftsökol.*, 30, (1), 29-30.
- PECK, A.; MAYER, H. (1996): Einfluß von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern. *Forstw. Cbl.*, 115, 1-9.
- PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D.; R. DEVELOPMENT CORE TEAM (2008): nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-103
- PYPKER, T.G.; BOND, B.J.; LINK, T.E.; MARKS, D.; UNSWORTH, M.H. (2005): The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agric. Forest Meteorol.*, 130, 113-129.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2009): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- RUTTER, A.J.; KERSHAW, K.A.; ROBINS, P.C.; MORTON, A.J. (1972): A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.*, 9, 367-384.
- SACHS, L. (1999): *Angewandte Statistik*. 9. Auflage, Springer, Berlin. 881 S.
- SILVA, I.C.; RODRÍGUEZ, H.G. (2001): Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiol.*, 21, 1009-1013.
- VAN DIJK, A.I.J.M.; BRUIJNZEEL, L.A. (2001): Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. *J. Hydrol.*, 247, 230-238.

- WEIHE, J. (1982): Die Ermittlung des Regenverlustes durch die Interzeption des Waldes. Beitr. Hydrologie - Kirchzarten, Sonderh. 4, 49-59.
- WENZEL, B. (1989): Kalkungs- und Meliorationsexperimente im Solling: Initialeffekte auf Boden, Sickerwasser und Vegetation. Ber. Forsch.zent. Waldökosyst., A51, 276 S.
- WIRTH, C.; SCHUMACHER, J.; SCHULZE, E.D. (2004): Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiol.*, 24, 121-139.
- WOOD, S.N. (2006): Generalized additive models: an introduction with R. *Texts in Statistical Science*, Chapman & Hall. Boca Raton, 410 S.
- WUTZLER, T.; WIRTH, C.; SCHUMACHER, J. (2008): Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. *Can. J. For. Res.*, 38, 1661-1675.
- ZINKE, P.J. (1967): Forest interception studies in the United States. In: Supper, W.E. & H.W. Lull: *Forest hydrology: proceedings of a national science foundation advanced science seminar*. Pergamon Press, Oxford, 137-161.
- ZUUR, A.F.; IENO, E.N.; WALKER, N.J.; SAVELIEV, A.A.; SMITH, G.M. (2009): *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer, 574 S.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem LIFE+-Projekt FutMon „Further Development and Implementation of an EU-level Forest Monitoring System“ und den Projekten NaLaMa-nT „Nachhaltiges Landmanagement im norddeutschen Tiefland“, gefördert vom BMBF und „Untersuchungen zur Anpassungsfähigkeit hessischer Buchenwälder an veränderte Klimabedingungen“, gefördert vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel Hessen im Rahmen des Förderschwerpunktes INKLIM-A für die finanzielle Förderung.