

Interzeption in Wäldern: eine (zu) wenig beachtete Größe des Wasserkreislaufs

Henning Meesenburg, Bernd Ahrends, Reinhard Kallweit, Birte Scheler, Markus Wagner,
Stefan Fleck

Zusammenfassung

Zur Schätzung der jährlichen Interzeption für Waldstandorte der Baumarten Fichte, Buche, Kiefer und Eiche in Nordwestdeutschland wurden verallgemeinerte additive gemischte Modelle (GAMM) entwickelt. Als Prädiktoren wurden verschiedene klimatische Steuergrößen sowie flächenhaft verfügbare Bestandesstrukturparameter getestet. Die „besten“ Modelle können bis zu 71 % der Varianz erklären und enthalten jeweils Freilandniederschlag und potenzielle Evapotranspiration sowie den Bestandestyp und/oder einen Parameter, welcher die temporäre Wasserspeicherfähigkeit des Waldbestandes beschreibt, als Prädiktoren. Insgesamt bilden die signifikanten Effekte eine plausible Basis, um die Interzeption mit Hilfe von Klima- und Forstinventurdaten zu regionalisieren und damit Entscheidungen für forstliche Maßnahmen, beispielsweise zur Erhöhung der Grundwasserneubildung oder zur Reduktion des Trockenstressrisikos, zu unterstützen.

1. Einführung

Die Interzeptionsverdunstung ist eine bedeutende Komponente der Gesamtverdunstung und steuert maßgeblich den Wasserkreislauf von Wäldern. Dabei kann sowohl räumlich wie zeitlich eine große Variation der Interzeptionsverluste beobachtet werden (AHREND & PENNE 2010, PECK & MAYER 1996). Die Höhe der Interzeption ist einerseits von klimatischen Faktoren wie Freilandniederschlagsmenge, -intensität und -dauer, Windgeschwindigkeit, Energieangebot und Nebelhäufigkeit abhängig, andererseits kommt der Vegetationsstruktur eine große Bedeutung zu (WEIHE 1982, BALÁZS 1983, DVWK 1986, LOUSTAU et al. 1992). In Waldbeständen haben der Bestandestyp, die Bestandesdichte und andere Parameter, die die temporäre Wasserspeicherfähigkeit des Bestandes beschreiben, einen wesentlichen Einfluss auf die Interzeption (HERBST & THAMM 1994, VAN DIJK & BRUIJNZEEL 2001, PYPKER et al. 2005).

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. Die analytischen Modelle von RUTTER et al. (1972) und GASH (1979) wurden in zahlreichen angepassten oder modifizierten Versionen in 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 beteiligten Prozesse möglichst detailliert zu beschreiben. Für die allgemeine Anwendbarkeit und Übertragbarkeit eines Modells ist aber die Berücksichtigung von übermäßig vielen und kalibrierungsbedürftigen Parametern problematisch. Daher besteht insbesondere für die wasserwirtschaftliche und forstliche Praxis ein Bedarf an einfachen und belastbaren Schätzmodellen zur Quantifizierung der Interzeption für unterschiedliche Baumarten und Bestandesstrukturen. Dementsprechend lassen sich folgende Zielsetzungen für diese Untersuchung ableiten:

1. Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Interzeptionsverlust und flächenhaft verfügbaren Bestandesparametern wie Derbholzvorrat, Bestandesgrundfläche, -höhe und -dichte.

2. Entwicklung eines einfachen Regressionsmodells zur Ermittlung der Interzeption anhand leicht verfügbarer klimatischer Größen und Bestandesdaten, mit deren Hilfe sich die Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftung auf die Interzeption abschätzen lassen.

2. Datengrundlage und Methoden

Auf Grundlage von forstlichen Intensivmonitoringflächen in Norddeutschland (Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg) wurden Angaben zum Freiland- (FN) und Bestandesniederschlag zusammengestellt. Freiland- und Bestandesniederschlag wurden mit ständig offenen Niederschlagssammlern, 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 in Buchenbeständen mittels am Stamm angebrachter Manschetten gewonnen, über die das Stammablaufwasser in Sammelgefäße geleitet wurde. Die Daten der einzelnen Sammelperioden wurden jeweils zu Jahresflüssen aggregiert (AHRENDTS et al. 2013). Monitoringzeiträume von unter einem Jahr wurden nicht berücksichtigt. Der Datensatz umfasst 49 Bestände mit 552 jährlichen Niederschlagsdatensätzen, die sich auf vier Hauptbaumarten verteilen: Buche (212 Datensätze = 38%), Eiche (32, 6%), Fichte (152, 28%) und Kiefer (156, 28%). Den jährlichen Niederschlagssummen wurden Bestandesstrukturparameter zugeordnet, die aus Bestandesinventuren gewonnen wurden.

Zur Beschreibung der Bestandesstruktur wurden der Durchmesser des Kreisflächenmittelstammes (dg), die Höhe des Kreisflächenmittelstammes (hg), die Bestandesdichte (S), die Bestandesgrundfläche (G) und das Bestandesvolumen (V) verwendet und aus Ihnen mittels allometrischer Funktionen (HAMMEL & KENNEL 2001, WUTZLER et al. 2008, WIRTH et al. 2004, CIENCIALA et al. 2006, AHRENDTS et al. 2010, AHRENDTS & PENNE 2010) weitere Parameter wie der Blattflächenindex (LAI), die Blatt-/Nadelmasse, der Kronenschlussindex (KI) und der Stand Density Index (SDI – PRETZSCH & BIBER 2005) abgeleitet.

Die jährliche potenzielle Evapotranspiration (PET) wurde nach ALLEN et al. (1998) für die Klimastationen des DWD berechnet (homogenisierter Datensatz des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Anschließend wurden die jährlichen Werte unter Berücksichtigung der Höhenlage mit einem External-Drift-Kriging regionalisiert (R package ‚hydroTSM‘).

Zur Abschätzung der Interzeptionsverdunstung wurden additive gemischte Regressionsmodelle verwendet, die im Statistikpaket R 3.01.0 (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 auf die Zielvariable (Interzeptionsverdunstung), ohne vorgegebene Annahmen über die Funktionsform zu identifizieren. 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:

$$ITZ_{jb} = b_0 + f_1(x_{1,jb}) + \dots + f_n(x_{n,jb}) + Z_b b_b + \varepsilon_{jb} \quad (1)$$

wobei ITZ die Interzeptionsverdunstung im Jahr j des Bestandes b , b_0 die Regressionskonstante, f_1, f_2, \dots, f_n : eindimensionale glättende Funktion, $x_{1jb}, x_{2jb}, \dots, x_{njb}$: 1... n erklärende Variablen des Jahres j und des Bestandes b , Z_b : Modellmatrix der Zufallseffekte auf Bestandesebene, mit $j = 1, \dots, 49$, b_b : Vektor mit bestandesspezifischen Zufallseffekten und ε ein unabhängig und identisch verteilter Fehlerterm mit ε_{ij} .

Zur Aufdeckung von Modellverletzungen und zur Beurteilung der Modellgüte wurden graphische und numerische Residualanalysen durchgeführt. Die Bewertung der Modelle erfolgte anhand der statistischen Kenngrößen Akaikes Informationskriterium [AIC] (KUHA 2004), korrigiertes Bestimmtheitsmaß (r^2_{adj}), mittlerer Quadratwurzelfehler (RMSR) und Bias. Da Ausreißer einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Regressionsanalyse haben können, wurden die Residuen der Regressionsfunktionen mit Hilfe des Grubbs-Tests auf Ausreißer untersucht und die ermittelten Ausreißer aus dem Datensatz eliminiert (R-Bibliothek outliers).

3. Ergebnisse

Der auf Grundlage des gesamten Datensatzes berechnete Variationskoeffizient der Interzeption beträgt 39 % und die Standardabweichung 88 mm. Die Häufigkeitsverteilung der Interzeption folgt für alle Baumarten annähernd einer Normalverteilung (Abbildung 1). Tabelle 1 gibt die statistischen Kenngrößen für die vier Hauptbaumarten wieder. Da die Verteilung der Baumarten über das Niederschlagsspektrum nicht homogen ist (Abbildung 1) und die Niederschlagsmenge einen entscheidenden Einfluss auf die Interzeption hat, geben die Differenzen der baumartenspezifischen Mittelwerte nicht direkt die Unterschiede der Interzeption zwischen den Baumarten wieder.

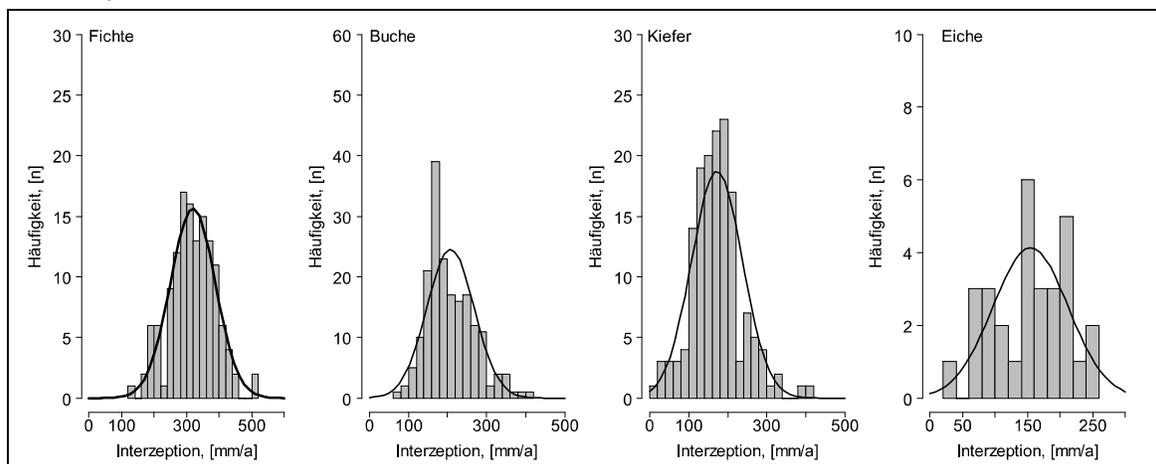


Abb. 1: Häufigkeitsverteilungen der Interzeptionsverdunstung auf den Intensivmonitoringflächen in Nordwestdeutschland für die Baumarten Fichte, Buche, Kiefer und Eiche.

Nahezu alle betrachteten klimatischen Größen wie auch Bestandesstrukturparameter zeigen signifikante Zusammenhänge mit dem Interzeptionsverlust. Insbesondere liegt eine enge Beziehung zum Freilandniederschlag vor, weshalb dieser berücksichtigt werden muss, um die Effekte der bestandesspezifischen Eigenschaften vergleichbar zu machen. Bei der Entwicklung der multiplen Modelle wurde neben der Einhaltung der Modellvoraussetzungen ins-

besondere Wert darauf gelegt, dass die Modelle nicht übermäßig viele sowie flächenhaft verfügbare und gut zu interpretierende Variablen enthalten. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für eine Anwendbarkeit für wasserwirtschaftliche oder forstliche Fragen. 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, Derbholzvolumen, Blattflächenindex und Nadelmasse. Da die ausgewählten Bestandesvariablen stark untereinander korreliert sind, unterscheiden sich die dargestellten Modelle nur geringfügig in ihrer Modellgüte (Tabelle 2).

Tab. 1: Deskriptive Statistik der Interzeptionsverdunstung (mm) für die 4 Hauptbaumarten auf Intensivmonitoringflächen in Norddeutschland. n: Anzahl; X: Mittelwert; X_M : Median, Std: Standardabweichung; VK: Variationskoeffizient.

Baumart	n	X	X_M	Min	Max	Std	VK (%)
Fichte	138	319	318	121	502	69	21,6
Buche	187	207	194	77	401	61	29,3
Kiefer	153	172	173	7	407	65	37,8
Eiche	31	156	159	26	257	58	37,0

Die durch die multiplen Regressionsmodelle nicht erklärte Restvarianz wird in Abbildung 2 durch die Streuung der Datenpunkte um die 1:1-Linie deutlich. Mit Ausnahme des Modells 1, das nur die Waldtypen berücksichtigt, zeigen alle Modelle mehr oder weniger unsystematische Abweichungen um die 1:1 Linie. Der Bias liegt mit Ausnahme der Modelle 2 und 3, die einen Bias von knapp 10 mm aufweisen, unter 6 mm. Hervorzuheben ist jedoch, dass alle Modelle einen negativen Bias aufweisen.

Tab. 2: Kurzübersicht der Struktur und der statistischen Kenngrößen (AIC: Akaikes Informationskriterium, r^2_{adj} : korrigiertes Bestimmtheitsmaß, RMSR: mittlerer Quadratwurzelfehler der Residuen [mm], Bias: Systematische Abweichungen des Modells von Messwerten [mm], n: Anzahl Messwerte) der ausgewählten Modelle. I = Interzeption, FN = Freilandniederschlag, PET = Potenzielle Evapotranspiration, BT = Waldtyp (Laubwald, Nadelwald), G = Bestandesgrundfläche, V = Derbholzvolumen, LAI: Blattflächenindex, NM = Nadel-/Blattmasse, KI = Kronenschlussindex, SDI: Stand Density Index)

Modell	Parameter	AIC	r^2_{adj}	RMSE	Bias	n
1	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + Faktor(BT)$	5295	0,64	53	-3,6	509
2	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + Faktor(BT) + b_1(G)$	5273	0,70	49	-9,2	509
3	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + Faktor(BT) + b_1(V)$	5288	0,69	49	-8,0	509
4	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + Faktor(BT) + b_1(SDI)$	5272	0,69	49	-4,8	509
5	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + Faktor(BT) + b_1(LAI)$	5270	0,70	48	-5,8	509
6	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + b_1(NM)$	5258	0,71	47	-2,4	509
7	$I = b_0 + f_1(FN) + f_2(PET) + Faktor(BT) + b_1(KI)$	5283	0,65	51	-3,5	509

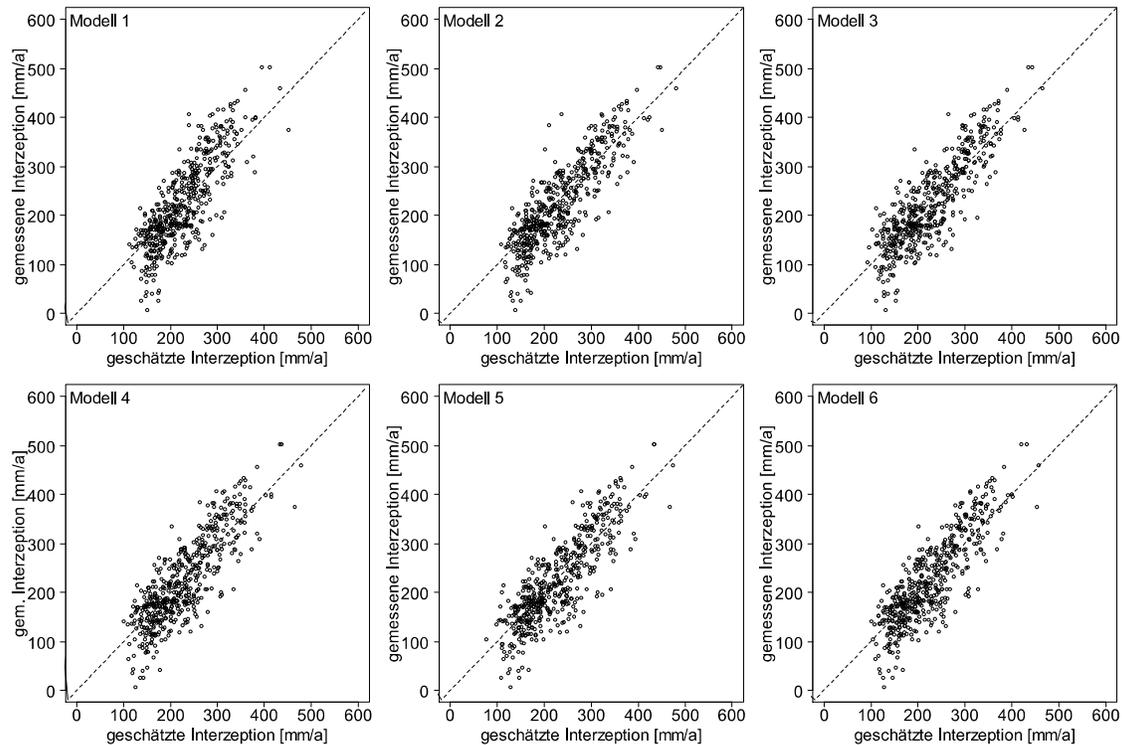


Abb. 2: Beziehung zwischen geschätzter und gemessener Interzeption.

Neben der unsystematischen Verteilung sind auch die räumliche und die zeitliche Unabhängigkeit eine wesentliche Voraussetzung für die Gültigkeit der Modelle. Die für die Bestände gemittelten Residuen liegen meist zwischen -25 bis 25 mm (nicht dargestellt). Dieses spricht für die Hypothese, dass die hohe Restvarianz vorwiegend durch unterschiedliche klimatische Bedingungen (z.B. Niederschlagsintensitäten- und Häufigkeiten) in den jeweiligen Messjahren hervorgerufen wird und sich somit die Modellgüte im langjährigen Mittel deutlich verbessert. Insgesamt geben die Residuen keine Hinweise auf räumliche Autokorrelation. Auch die untersuchten Baumarten sind gleichermaßen von den Modellabweichungen betroffen. Die Modellresiduen sind in den jeweiligen Messjahren relativ homogen um Null verteilt (nicht dargestellt).

Abweichend zur Studie von AHRENDTS et al. (2013), bei der die potenzielle Evapotranspiration nicht in jährlicher Auflösung vorlag, zeigen die Ergebnisse, dass die Modelle 5 und 6, bei denen der Blattflächenindex und die Nadel-/Blattmasse aufgenommen wurde, leichte Vorteile in der Modellgüte gegenüber den Modellen 2 und 3 haben (Tabelle 2). Alle Modelle greifen jedoch auf in der Forsteinrichtung verfügbare Bestandesparameter zurück, und sind somit besonders für flächenhafte Anwendungen geeignet. Da der Blattflächenindex als Eingangsparameter in viele hydrologische Modelle eingeht, sind in Abbildung 3 die Effekte der Prädiktoren auf den Interzeptionsverlust für das Modell 5 dargestellt. Der verhältnismäßig schwache Effekt der potenziellen Evapotranspiration ist auf eine starke Korrelation zwischen Niederschlag und Verdunstung zurückzuführen, wodurch sich diese beiden Effekte nur schwer separieren lassen. Zwischen Nadel- und Laubwald zeigen sich signifikante Unterschiede bei gleichen Werten des Blattflächenindex der Bestände von 80 mm. Diese Grö-

Benennung kann aus forsthydrologischer Sicht als plausibel angesehen werden. Bei der Interpretation der Effekte der Prädiktoren ist weiterhin zu beachten, dass die Effektkurven in den Randbereichen nur mit verhältnismäßig wenigen Daten belegt sind. Entsprechend wirken sich hier Messfehler und Effekte nicht berücksichtigter Variablen besonders stark aus.

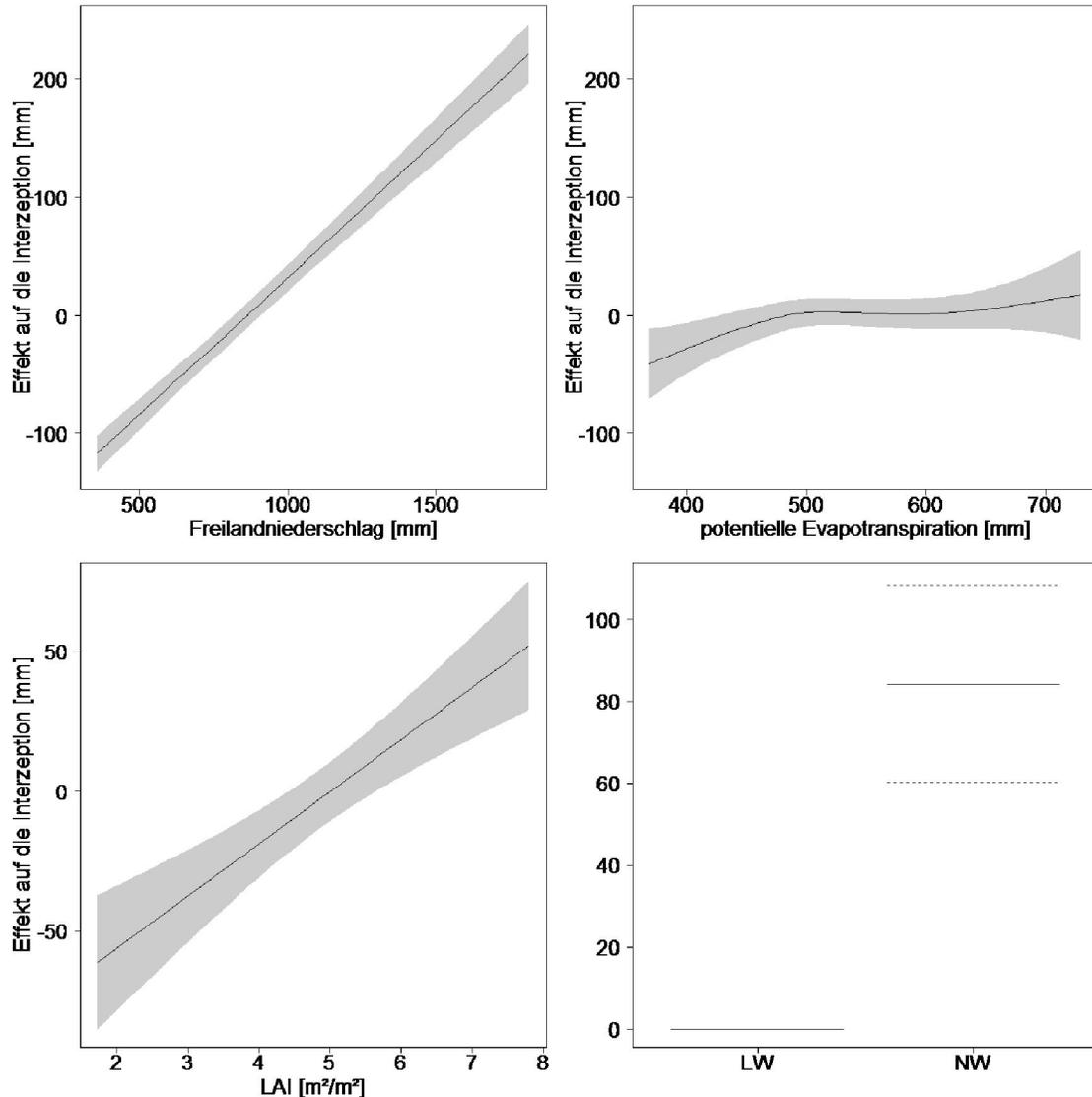


Abb. 3: Effekte des Freilandniederschlags, der potenziellen Evapotranspiration, des Blattflächenindex (LAI) und des Waldtyps (Laubwald, Nadelwald) auf die Interzeption in Wäldern (Modell 5). Die grau hinterlegten Flächen kennzeichnen das 95%-Prognoseintervall.

Die entwickelten Modelle bilden eine Basis, um die jährliche Interzeptionsverdunstung von Wäldern der Hauptbaumarten auf der Basis von Klima- und Bestandesdaten zu regionalisieren. Modell 1, welches nur den Bestandestyp als Bestandesinformation beinhaltet, könnte z.B. mit CORINE-Landnutzungsinformationen parametrisiert werden. Jedoch scheinen die Modelle, die auf Informationen, welche Forsteinrichtungswerken entnommen werden können, zurückgreifen, gegenüber Modell 1 im Vorteil zu sein. Die Modelle können

genutzt werden, um die Wirksamkeit forstlicher Managementoptionen, beispielsweise zur Erhöhung der Grundwasserneubildung oder zur Reduktion des Trockenstressrisikos abzuschätzen. Jedoch müssen die Rückkopplungen zwischen den Verdunstungskomponenten Interzeption, Transpiration und Evaporation beachtet werden.

Danksagung

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

Literatur

- PRETZSCH, H. & P. BIBER (2005): A Re-Evaluation of Reineke's Rule and Stand Density Index. -*Forest Science* 51: 304-320.
- AHRENDT, B. & C. PENNE (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.
- AHRENDT, B., MEESENBURG, H., DÖRING, C. & M. JANSEN (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.
- AHRENDT, B., MEESENBURG, H., WAGNER, M., SCHELER, B. & S. FLECK (2013): Interzeption in Waldbeständen – Einfluss der Bestandesstruktur. In: Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Stoff- und Wasserkreislauf. -*Ber. Freiburger Forstl. Forschung* 96: 37-55.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. & M. SMITH (1998): Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- CIENCIALA, E., CERNY, M., TATARINOV, F., APLTAUER, J. & Z. EXNEROVÁ (2006): Biomass functions applicable to Scots pine. -*Trees* 20: 483-495.
- DVWK (1986): Ermittlung des Interzeptionsverlustes in Waldbeständen bei Regen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 211, Paul Parey, Hamburg und Berlin, 11 S.
- FEDERER, C. A., VÖRÖSMARTY, C. & B. FEKETA (2003): Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. -*J. Hydrometeorol.* 4: 1276-1290.
- GASH, J.H.C. (1979): An analytical model of rainfall interception by forests. -*Q.J.R. Meteorol. Soc.* 105: 43-55.
- HAMMEL, K. & M. KENNEL (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. -*Forstliche Forschungsberichte München* 185, München, 148 S.

- HERBST, M. & F. THAMM (1994): Interzeptionsverlust eines norddeutschen Buchenwaldes - Eine Anwendung des Interzeptionsmodells von Gash. -Z. Kulturtechn. Landentw., 35, 311-319.
- KUHA, J. (2004): AIC and BIC: Comparisons of Assumptions and Performance. -Sociological Methods & Research 33: 188-229.
- LOUSTAU, D., BERBIGIER, P., GRANIER, A. & F.E.H. MOUSSA (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.
- PECK, A. & H. MAYER (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. & M.H. UNSWORTH (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. & A.J. MORTON (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.
- VAN DIJK, A.I.J.M. & L.A. BRUIJNZEEL (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. -Beiträge zur Hydrologie - Kirchzarten, Sonderheft, 4, 49-59.
- WIRTH, C., SCHUMACHER, J. & E.D. SCHULZE (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. & J. SCHUMACHER (2008): Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. -Can. J. For. Res. 38: 1661-1675.