

5 Evaluierung artspezifischer Unterschiede in LWF-Brook90 mit Xylemflussmessungen

Stefan Fleck, Bernd Ahrends, Wendelin Weis, Wolfgang Falk, Raphael Habel, Henning Meesenburg

5.1 Einleitung

Die Verdunstung von Wäldern besteht aus den Komponenten Interzeption, Transpiration und Bodenevaporation. Von diesen Raten hat die Transpiration mit 40-81% in temperaten Wäldern oft den größten Anteil an der Gesamtverdunstung (Schlesinger & Jasechko, 2014). Auch wenn die Interzeptionsverdunstung meist einen etwas kleineren Anteil an der Gesamtverdunstung aufweist (Peck & Meyer 1996) wurde ihr aufgrund der einfacheren messtechnischen Erfassung in der Vergangenheit wesentlich mehr Aufmerksamkeit geschenkt (Ahrends et al., 2013; Ahrends & Penne, 2010; Meesenburg et al., 2014). Die möglichst genaue Quantifizierung der Transpirationsverdunstung von Wäldern ist jedoch entscheidend für die in Hinblick auf den Klimawandel sehr wichtige Bestimmung des Bodenwasser verbrauchs und des Trockenstressrisikos der Baumarten. Eine verlässliche Einschätzung der Baumarten hinsichtlich dieser Eigenschaften ist dringend notwendig, weil schon heute aufgrund der zunehmenden biotischen und abiotischen Schäden eine verstärkte Neubegründung von Waldbeständen erfolgt (Hammond et al., 2022). Von der Eignung der Baumarten für zukünftig wärmere und dadurch trockenere Klimabedingungen kann in dieser Situation der Erfolg der Forstwirtschaft direkt abhängen. Daher ist eine Baumartenwahl, die höhere Resilienz gegen veränderte Umweltbedingungen bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Ökosystemdienstleistungen der Wälder gewährleistet, eine der wichtigsten Herausforderungen der aktuellen Forstplanung (Ahrends et al., 2023).

Die Bestandstranspiration ist allerdings nur mit sehr großem Aufwand separat von der Gesamtverdunstung messbar (Schlesinger & Jasechko, 2014), so dass in der Regel Xylemsaftflussmessungen an einzelnen Bäumen auf die Bestandstranspiration hochgerechnet werden müssen, was mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist. Ein großer Teil dieser Unsicherheit beruht dabei auf den Techniken der Saftflussmessung selbst: Eine Auswertung der publizierten gravimetrischen Kalibrierungen von Saftflussmessungen an Einzelpflanzen zeigt, dass die verschiedenen Messtechniken mehr oder weniger große methodentypische Abweichungen von der gravimetrisch (also durch Wägen von getopften Pflanzen oder Stammsegmenten und der verbrauchten Wassermenge vor und nach dem Wassertransport) bestimmten Transpiration erzeugen: Zum Vergleich der Messergebnisse verschiedener Saftflussmessmethoden werden daher Korrekturfaktoren zwischen -41 % und +14 % empfohlen (Flo Sierra, 2021). Hinzu kommen Unsicherheiten hinsichtlich der Repräsentativität der für die Saftflussmessungen ausgewählten Bäume für den Gesamtbestand, die Art der Hochrechnung von Einzelbaummessungen auf den Gesamtbestand (Baumgarten et al., 2014) und die häufigen Messausfälle, die zu Lücken in den Messreihen führen. Die Verfügbarkeit von Xylemsaftflussmessungen und daraus ableitbaren Transpirationsraten hat sich durch die kürzlich veröffentlichten Messdaten des SAPFLUXNET-Netzwerks, erheblich verbessert (Poyatos et al., 2021). Fast 200 Datensätze von Saftflussmessungen an verschiedenen Waldbeständen aus der ganzen Welt wurden hier nach denselben Prinzipien aufbereitet, qualitätskontrolliert, strukturiert und mit notwendigen Zusatzinformationen versehen. Zu diesen zählen insbesondere tägliche meteorologische Daten der Messkampagnen und weitere Parameter, die es ermöglichen, Wasserhaushaltsmodellierungen durchzuführen.

Als Alternative zu Saftflussmessungen gibt es für Wälder häufig nur die Möglichkeit, die Transpiration mit prozessorientierten Wasserhaushaltsmodellen wie z.B. LWF-Brook90 (Hammel & Kennel, 2001) zu berechnen. Hierzu muss das Modell die Baumartenunterschiede in der Transpiration möglichst belastbar reproduzieren können, wenn daraus Baumartempfehlungen abgeleitet werden sollen. Bei prozessorientierten Modellen bedeutet dies, dass die Art-eigenschaften, die für die Transpiration entscheidend sind, im Modell adäquat als Parameter abgebildet sein müssen, denn sie entscheiden über das Abschneiden der Baumarten im Modell und damit auch über die darauf aufbauenden Baumartempfehlungen. Das gilt besonders, wenn artspezifische Parameter sehr sensitiv für das Simulationsergebnis sind. Hierbei kommt in LWF-Brook90 besonders der maximalen Blattleitfähigkeit (GLMAX) eine große Bedeutung zu, da sie artspezifisch variiert und – neben dem art- und bestandsabhängigen Blattoberflächenindex (LAI) – zugleich einer der sensitivsten Parameter des Modells ist (Groh et al., 2013; Wellpott et al., 2005). Trotz der großen Parametersensitivität wird die maximale Blattleitfähigkeit in vielen Studien (Federer et al., 2003; Panferov et al., 2009; Peters et al., 2011) baumartenübergreifend mit dem Standardwert von $0,0053 \text{ m s}^{-1}$ parametrisiert. Dies wird oft damit begründet, dass die mit Porometermessungen an Einzelblättern feststellbaren Maximalraten eine große Variabilität innerhalb der Artengruppen aufweisen (Körner, 1995). Die von der Modellstruktur her bestehende

Möglichkeit einer artspezifischen Parameteranpassung auf der Basis von Leitfähigkeitsmessungen oder zur Approximation an Transpirationsmessungen wird aber von Federer (2021) bei der Beschreibung von GLMAX ausdrücklich erwähnt. In (Weis et al., 2023) wird die seit 1994 enorm angewachsene Zahl an Blattleitfähigkeitsmessungen aus dem Freiland (Hoshika et al., 2018) genutzt, um für die wichtigsten Baumarten in Deutschland artspezifische Werte für GLMAX in LWF-Brook90 herzuleiten. Unterschiede zwischen den Baumarten wirken sich hauptsächlich auf die simulierten Transpirationsraten aus, die nahezu linear von GLMAX abhängen.

Im Folgenden sollen die mit LWF-Brook90 berechneten Transpirationsraten an geeigneten SAPFLUXNET-Beständen mit saftflussbasierten Transpirationsraten verglichen werden, um die baumartenspezifische Parameterfestlegung im Wasserhaushaltsmodell nach Weis et al. (2023) mit bei der Erstellung der Parametersätze nicht verwendeten Messdaten zu überprüfen. Die auf der Basis von blattphysiologischen Messungen/Schätzungen und Modellergebnissen zu Bodenfeuchte und Bestandesniederschlag von anderen Beständen entstandene Parametrisierung ist dabei gänzlich unabhängig von den SAPFLUXNET-Messdaten, so dass die artspezifische Parameterwahl auf diese Weise evaluiert werden kann. Wenn verfügbare Daten vorlagen, wurde neben der Transpiration auch die vom Modell berechnete Bodenfeuchte mit Messdaten evaluiert. Bei der Bewertung dieser Daten sollten jedoch immer auch die messtechnischen Unsicherheiten bei der Erfassung von Bodenwassergehalten beachtet werden (Jackisch et al., 2020).

Nach der Modell-Evaluation wurde LWF-Brook90 eingesetzt, um die Messdaten auf ganzjährige Transpirationsraten der Bestände zu extrapolieren. Durch den Vergleich der extrapolierten Messdaten der SAPFLUXNET-Bestände mit dem lokalen Klima und Bestandeseigenschaften wurden Baumartunterschiede zusätzlich charakterisiert.

5.2 Methoden

5.2.1 Verwendete Saftflussmessungen

Von den SAPFLUXNET-Beständen (Poyatos et al., 2021) wurden diejenigen ausgewählt, deren Hauptbaumart den bei Weis et al. (2023) betrachteten Baumarten entsprechen (*Fagus sylvatica*, *Quercus robur/Quercus petraea*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii*) und für die eine hinreichende Datenverfügbarkeit für die Parametrisierung und Durchführung der Wasserhaushaltsmodellierung vorlag (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1 Bestandeseigenschaften, Messverfahren und Klimadaten der Messjahre. Dargestellt sind Baumart, Artanteil an der Grundfläche des Bestandes, Bestandesalter, Bestandeshöhe, Stammzahl pro Hektar, Blattflächenindex (LAI), Messmethode (HB = Heat Balance, TD = Thermal Dissipation), durchschnittlicher Jahresniederschlag (NI Jahr) und Jahresdurchschnittstemperatur (TE Jahr) der Messjahre.

Name	Baumart	Anteil [%]	Alter [a]	Höhe [m]	Stammzahl [N/ha]	LAI [m ² /m ²]	Messmethode	NI Jahr [mm/a]	TE Jahr [°C]
Bilovice	Eiche	100	39	14	2800	5,0	HB	630	9,7
Lanzhot**	Eiche	29**	110	36	240	3,6	HB	503	10,9
Fontainebleau 2006	Eiche	79	150	28	1104	1,3	TD	711	11,5
Fontainebleau 2014	Eiche	79	158	28	1104	1,3	TD	772	12,8
Merzalben Buche	Buche	100	53	23	1176	5,0	TD	934	8,8
Stechlin 2002	Buche	100	113	27,2	216	4,9	TD	662	8,4
Stechlin 2004	Buche	100	115	27,2	216	5,3	TD	665	8,2
Stitna nad Vlari	Buche	100	114	31	281	6,1	HB	669	8,9
Hesse 1997	Buche	90	29	12,8	4452	5,3	TD	981	10
Hesse 2000	Buche	90	32	13	3297	5,2	TD	957	10,3
Loobos	Kiefer	100	104	18	434	2,2	TD	661	9,9
Norunda Kiefer ST3 2002*	Kiefer	79	110	27,2	680	2,6	HB	328*	6,5
Norunda Kiefer ST3 2007	Kiefer	79	115	27,2	680	2,6	HB	522	6,6
Norunda Kiefer ST1	Kiefer	82	104	28,7	429	2,7	HB	655	5,3
Bik	Fichte	100	39	16,7	1228	6,0	HB	1118	7
Krtiny	Fichte	100	34	17	2025	5,0	HB	631	9,8
Norunda Fichte ST2*	Fichte	54	97	27,7	789	3,5	HB	301*	6
Fyodorovskoye 1999	Fichte	86	178	23,5	678	2,7	TD	486	5,1
Davos	Fichte	95	240	28	830	3,1	TD	716	2,9
Merzalben Douglasie 2010	Douglasie	100	38	29	444	3,5	TD	934	8,8
Merzalben Douglasie 2013	Douglasie	100	41	30	372	3,4	TD	938	9,4
Merzalben Mischbestand 2010	Douglasie	67	48	30	696	2,6	TD	934	8,8
Merzalben Mischbestand 2013	Douglasie	68	51	31	520	2,3	TD	938	9,4

*kein Niederschlag zwischen dem 1.1. und 15.4. des Jahres angegeben; **Transpiration von anderen Baumarten überwiegt

Die verwendeten Messkampagnen bzw. Untersuchungsflächen stammen aus unterschiedlichen Jahren und Ländern und sind neben der zusammenführenden Veröffentlichung durch Poyatos et al. (2021) zum Teil auch separat dokumentiert (Delpierre et al., 2016; Elbers et al., 2011; Etzold et al., 2011; Granier et al., 2000; Granier et al., 2008; Jochheim et al., 2004; Lundin et al., 1999; Lüttschwager & Remus, 2007; Milyukova et al., 2002; Stojanović et al., 2017; Thomas et al., 2015). Zusätzlich zu der veröffentlichten Datenbank konnten mit Unterstützung der bearbeitenden Wissenschaftler wichtige Datenlücken geschlossen werden.

Wie fast alle Xylemsaftflussmessungen nutzen auch die hier betrachteten Verfahren „heat balance“ (Čermák et al., 1973, 2004) und „thermal dissipation“ (Granier, 1985) die Kühlungswirkung des Xylemsaftflusses auf eine Energiezufuhr, die entweder als Hitzepuls oder als kontinuierliche Erwärmung auf das Xylem einwirkt. Die Kühlungswirkung des Saftflusses wird dabei anhand von Temperaturmessungen im Splintholz bestimmt. Grundsätzlich sind diese Messungen daher auf gute thermische Verbindung angewiesen und können bei eingeschränktem Kontakt, etwa durch die Variabilität der Holzeigenschaften, Ungenauigkeiten bei der Sensorinstallation oder Wundreaktionen, die tatsächliche Saftflussrate unterschätzen (Clearwater et al., 1999). Eine Überschätzung der Saftflussrate kommt dagegen nur in Ausnahmefällen vor, z.B. durch das Unterlassen einer Abschirmung gegen strahlungsbedingte Temperaturgradienten. Die aus solchen Faktoren resultierende Unterschätzung der tatsächlichen Saftflussrate ist erheblich und wird von Flo Sierra (2021) mit -40% (thermal dissipation) bzw. -21% (heat balance) angegeben.

5.2.2 Modellanwendung an SAPFLUXNET-Flächen

Die LWF-Brook90-Simulationen wurden mit dem R-Paket LWFBrook90R durchgeführt (Schmidt-Walter et al., 2020). In Einzelfällen begannen die flächen- und jahresspezifischen Klimadaten der SAPFLUXNET-Datenbank erst mit Beginn der Xylemsaftflussmessungen. Um eine für die Wasserhaushaltsmodellierung adäquate initiale Bodenfeuchte zu gewährleisten, wurden hier die Klimadaten ab Jahresbeginn von einem anderen Jahr übernommen oder (Fläche Stechlin) mit zusätzlichen Klimadaten der Messdatenerheber ergänzt. Der Laubaustrieb wurde deshalb auch nicht nach Menzel (1997) berechnet, da hier Klimadaten ab dem 1. November des Vorjahres benötigt werden, sondern nach dem in LWFBrook90R enthaltenen *Ribes uva-crispa*-Modell des Deutschen Wetterdienstes (Janssen, 2009). Hangneigung und Exposition konnten dem SAPFLUXNET Datensatz immer entnommen werden. Für die Bodendaten standen meistens nur über das gesamte Bodenprofil aggregierte Texturangaben zur Verfügung. Um diese Information wieder in eine vertikale Schichtung aufzulösen, wurden ersatzweise Bodenprofile der gut charakterisierten nordwestdeutschen Level II-Flächen ausgewählt, die hinsichtlich Sandanteil und Tonanteil ähnlich zu den Angaben im Datensatz waren. Als Ähnlichkeitsmaß wurde der Root Mean Square Error der bis zur jeweils relevanten Bodentiefe aggregierten Sand-, Schluff- und Tonanteile verwendet. Dieses Verfahren wurde an einzelnen Beständen über den Vergleich modellierter und gemessener Bodenfeuchten in verschiedenen Tiefen getestet und lieferte in diesen Fällen zufriedenstellende Ergebnisse in unterschiedlichen Tiefen (Abbildung 5.1) oder zumindest im für die Wasseraufnahme wichtigen Oberboden (Abbildung 5.2). Die Bewertung berücksichtigte auch, dass Niveaueverschiebungen bei Bodenfeuchtemessungen aufgrund von Bodenstörungen bei der Sondeninstallation oder einer unzureichenden Sondenkalibrierung nicht ungewöhnlich sind. So wurde auch ein paralleler Verlauf mit ca. 20 % Niveaueverschiebung in der gemessenen und simulierten Bodenfeuchte wie bei Lanžhot als akzeptabel eingestuft.

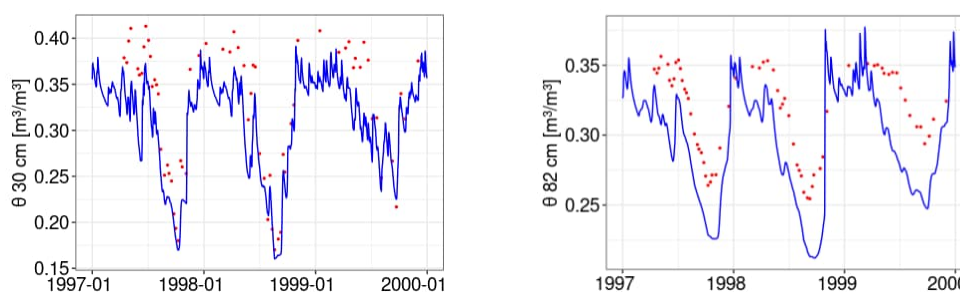


Abbildung 5.1: Modellierte (blau) im Vergleich zu beobachteten (rot) Bodenwassergehalten (Θ) für den Buchenstandort Hesse (Frankreich).

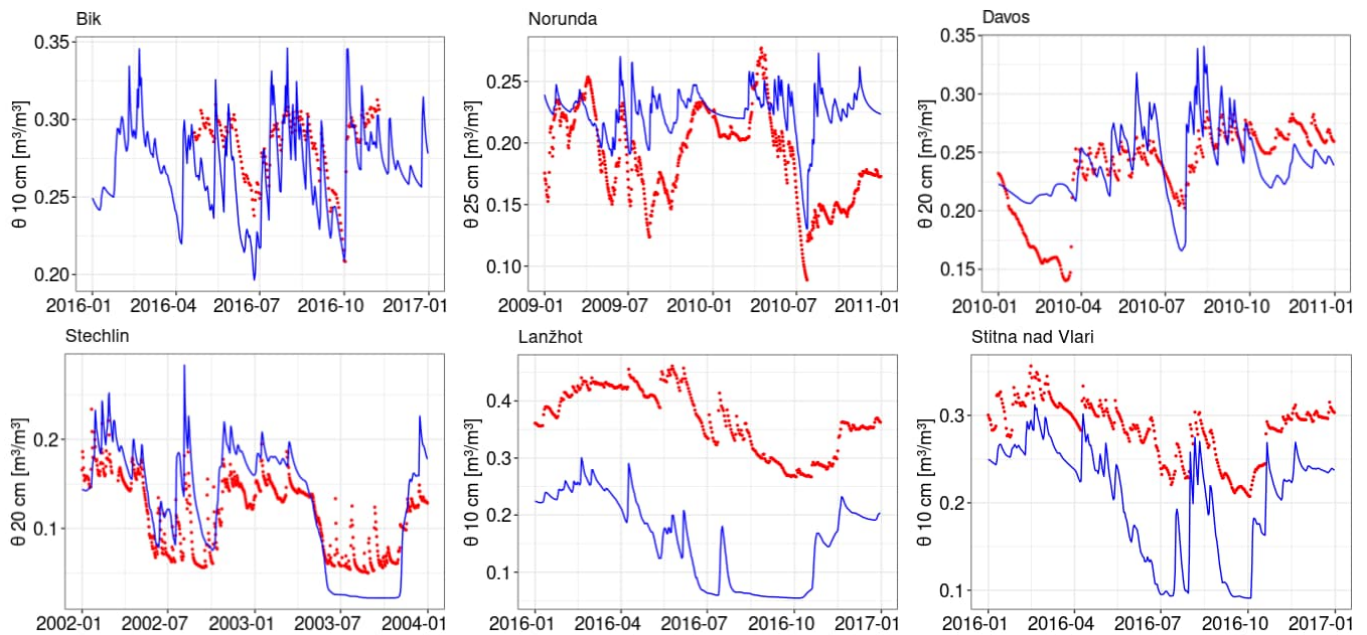


Abbildung 5.2: Modellierter (blau) im Vergleich zu beobachteten (rot) Bodenwassergehalten (Θ) für den Oberboden in Bik (CZ, Fichte), Davos (CH, Fichte), Lanzhot (CZ, Eiche), Norunda (S, Kiefer), Stechlin (D, Buche) und Stitna nad Vlari (CZ, Buche).

Als Bestandeseigenschaften lagen jährliche Daten von Grundfläche, Bestandesdichte, -alter und -höhe vor, auch der Anteil verschiedener Baumarten an der Bestandesgrundfläche. Aus diesen Daten wurden mit allometrischen Schätzmodellen (Weis et al., 2023) der Stammflächen- und Blattflächenindex ermittelt. Wenn gemessene LAI-Werte vorlagen, wurden diese verwendet. Die verwendeten GLMAX-Parameter sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Um die Wirkung der maximalen Blatteleitfähigkeit GLMAX im Modell zu veranschaulichen und die Parameterwahl je Baumart genauer beurteilen zu können, wurde außerdem der Parameter GLMAX so variiert, dass er um -33 % gegenüber der abgestimmten Parametrisierung reduziert bzw. um +33 % erhöht wurde. Die angenommenen GLMAX-Werte in der Parametervariation variierten also bei Eiche zwischen 0,00467 und 0,00931 m s^{-1} , bei Buche zwischen 0,004 und 0,008 m s^{-1} , bei Fichte zwischen 0,00233 und 0,00467 m s^{-1} , bei Kiefer zwischen 0,003 und 0,006 m s^{-1} und bei Douglasie zwischen 0,00167 und 0,003325 m s^{-1} . Insgesamt wurden 23 kontinuierliche Saftflussmesskampagnen mit ein bis sechs Jahren Dauer aus der SAPFLUXNET-Datenbank parametrisiert, wobei Jahre mit nicht ausreichender Datenlage ausgeschlossen wurden.

Tabelle 5.2: Für die Baumarten aus Leitfähigkeitsdaten abgeleitete GLMAX-Parameter.

Baumart	Eiche	Buche	Kiefer	Fichte	Douglasie
GLMAX [m s^{-1}]	0,0070	0,0060	0,0045	0,0035	0,0025

5.2.3 Hochrechnung auf die Bestandestranspiration des Messzeitraums und Extrapolation auf Jahresraten

Die Saftflussdaten an zumeist 3 bis 10 Bäumen wurden nach dem von Poyatos et al. (2021) vorgeschlagenen Verfahren zur unkorrigierten gemessenen Bestandestranspiration ($T_{\text{MESS, ROH}}$, im Text auch: Rohmessergebnisse) hochgerechnet, indem ein konstantes Verhältnis zwischen Saftfluss und Grundfläche angenommen wurde. Etwaige Begleitbaumarten wurden dabei behandelt, als wären sie von derselben Baumart. Bei Nichtvorliegen der Bestandesgrundfläche wurde alternativ über die Blattfläche der Messbäume auf die Gesamtblattfläche des Bestandes hochgerechnet, wenn diese aus LAI-Messungen vorlag. Die bekannte methodenabhängige Unterschätzung des Saftflusses durch die verwendeten Messverfahren (Flo Sierra 2021) wurde für den quantitativen Vergleich mit den Simulationen pauschal um -21% (Heat Balance) bzw. -40% (Thermal Dissipation) korrigiert (korrigierte gemessene Bestandestranspiration: $T_{\text{MESS, KORR}}$).

Sowohl $T_{\text{MESS, ROH}}$ als auch $T_{\text{MESS, KORR}}$ beinhalten nur die Tage, von denen auch Messungen vorlagen. Die Saftflussmessungen deckten im Durchschnitt aller Messkampagnen jedoch nur 82 % der Vegetationsperiode ab, so dass gemessene jährliche Transpirationsraten in der Regel nicht vollständig vorlagen. Um trotzdem einen Vergleich mit den Jahresniederschlägen zu ermöglichen, erfolgte deshalb die Berechnung der gemessenen Jahrestranspiration

$T_{MESS, KORR}$ JAHR (bzw. auch $T_{MESS, ROH}$ JAHR) durch Extrapolation auf Basis eines Messlückenersatzes mit modellierten Transpirationsraten aus LWF-Brook90. Für den zuvor ermittelten Bias der modellierten Transpirationsraten (T_{MOD}) an Tagen mit Xylemsaftflussmessung im Vergleich zu den korrigierten Messdaten $T_{MESS, KORR}$ wurde dabei eine Biaskorrektur vorgenommen. Der Modellbias wurde einzeln für jede zeitlich zusammenhängende Messkampagne aus der Differenz der modellierten und der korrigierten gemessenen Transpirationsraten ermittelt:

$$Bias = \frac{T_{MOD} - T_{MESS, KORR}}{T_{MESS, KORR}}$$

Zur Validierung der artspezifischen Parametrisierungen von LWF-Brook90 wurde der artspezifisch gemittelte relative Vorhersagefehler $VF_{Baumart}$ für alle n modellierten Messkampagnen einer Baumart aus den jeweiligen Bias berechnet:

$$VF_{Baumart} = \frac{\sum_{i=1}^n Bias_i}{n_{Baumart}}$$

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Vergleich der Transpiration aus Wasserhaushaltmodellierung und Xylemsaftflussmessung

Die modellierte Transpiration T_{MOD} gab den zeitlichen Verlauf der Rohmessergebnisse $T_{MESS, ROH}$ in den meisten Fällen gut wieder. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) lag im Durchschnitt aller Messkampagnen bei 0,63 (Tabelle 5.3). Quantitativ war der Unterschied zwischen der Modellierung und den auf den Bestand hochgerechneten aber nicht um den Methodenfehler korrigierten Messdaten oft groß, wobei die Rohmessergebnisse erwartungsgemäß in den meisten Fällen unter den modellierten Transpirationsraten lagen.

Bei den Eichenflächen (Abbildung 5.3) lagen die Rohmessergebnisse in Fontainebleau-Barbeau (2006) und Bilovice relativ nah an den modellierten Transpirationsraten (-14% bzw. +19%). Zwei Messkampagnen (Fontainebleau-Barbeau 2014 und Lanžhot) zeigten aber auch um 44 % bzw. 43 % unter den simulierten Transpirationsraten liegende Werte. Bei der Fläche Bilovice (2016) fiel auf, dass der Beginn der Vegetationsperiode im Modell früher angesetzt wurde als durch die Messdaten belegt. Zumindest gab es einen Zeitversatz zwischen dem modellierten Beginn der Transpiration und dem im Jahr 2016 zwar frühzeitig startenden, aber zunächst sehr geringem Xylemsaftfluss. Am Ende der Vegetationsperiode 2016 sank dagegen die modellierte Transpiration früher ab als die Messungen. Die Rohmessergebnisse der Eichenflächen lagen im Mittel 21 % niedriger als die Modellergebnisse.

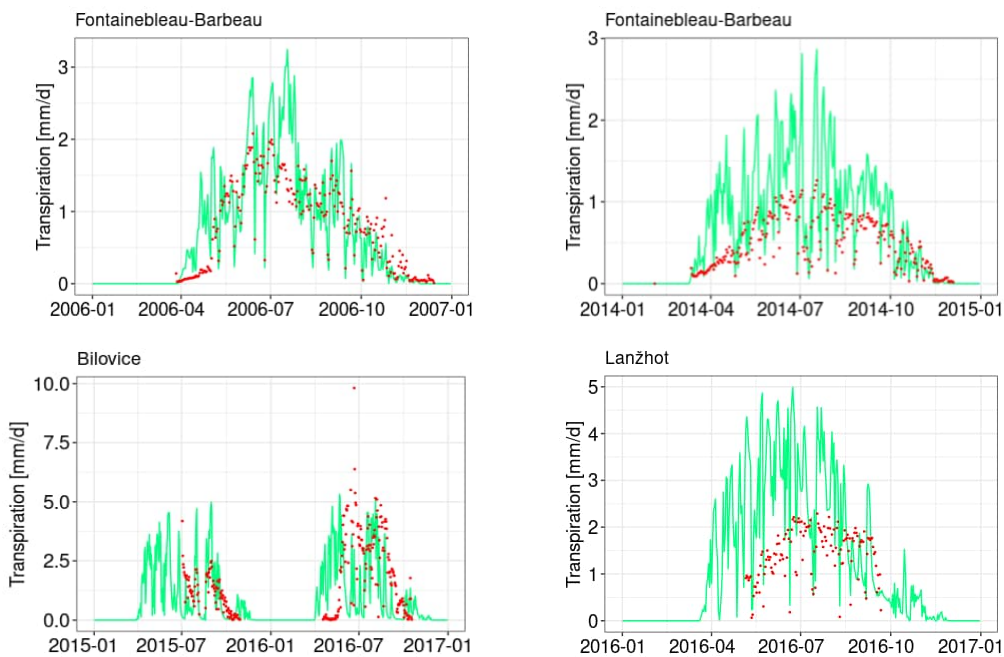


Abbildung 5.3: Modellierte (grün) und gemessene (rot) Bestandestranspiration ausgewählter Eichenflächen im SAPFLUXNET-Netzwerk.

Bei den Buchenflächen (Abbildung 5.4) war besonders auffällig, wie gut die saftflussbasierten Transpirationsraten

des Buchenstandorts Hesse in Frankreich mit den Simulationen übereinstimmten. Die Rohmessergebnisse lagen nur um 8 % bzw. 6 % unter den modellierten Transpirationsraten. An den Messungen aus Hesse für die Jahre 2000 bis 2005 war aber auch eine methodisch bedingte Einschränkung der Saftflussmessungen zu erkennen: Wenn an denselben Bäumen über mehrere Jahre mit Saftfluss-Sensoren gemessen wird, lässt sich über die Jahre oft eine Abnahme der Gesamtraten beobachten, die mit Wundreaktionen des Holzes durch die Messung zusammenhängen kann. Die klimagetriebenen Wasserhaushaltsmodellierungen zeigten diese Abnahme nicht. Bei der Fläche Stitna nad Vlari startete die simulierte Vegetationsperiode früher und endete später als durch die Messungen belegt. Insgesamt gab es bei der Modellierung der Buchenflächen, bei denen die Rohmesswerte in der Größenordnung gut mit der Simulation übereinstimmten, aber auch solche, deren Rohmessergebnisse mehr oder weniger weit unter den modellierten Transpirationsraten lagen (insbesondere Stechlin). Nur im Bestand Hesse lag die modellierte Transpiration in den ersten beiden Jahren der zweiten Messkampagne (2000 und 2001) teilweise niedriger als die Rohmessergebnisse. Im Durchschnitt lagen die Rohmessergebnisse um 29 % unter den Ergebnissen der Modellierung.

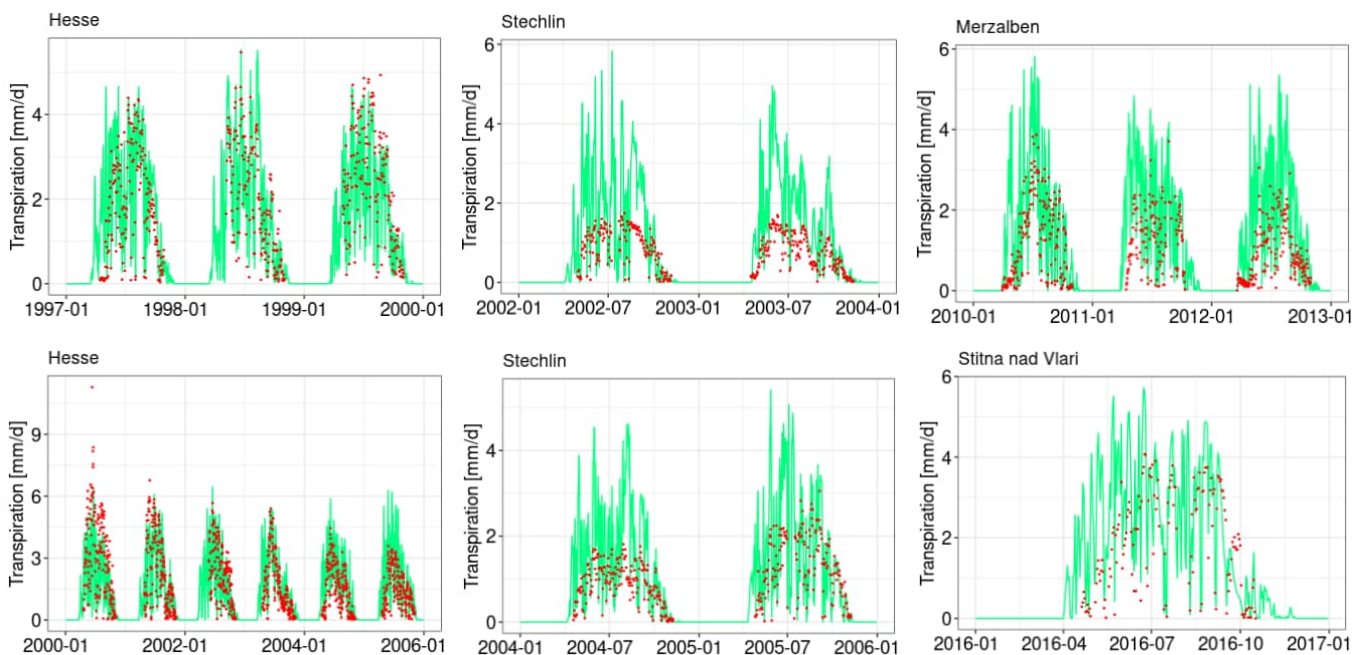


Abbildung 5.4: Modellerte (grün) und saftflussbasierte (rot) Bestandestranspiration ausgewählter Buchenflächen im SAPFLUXNET-Netzwerk.

Für die Baumart Kiefer erlaubte die Datenlage nur für drei Untersuchungsflächen aus dem SAPFLUXNET-Netzwerk eine Wasserhaushaltsmodellierung (Abbildung 5.5). Auch die ersten Messkampagnen des Norunda-ST3-Kiefernbestands wiesen in manchen Jahren Lücken in den Klimadaten auf, so dass nur die Jahre 2002 und 2007 ausgewertet wurden. Bei allen drei Kiefernbeständen (2009 wurde im Norunda Kiefernbestand ST1 gemessen) blieben die Rohmessergebnisse weit unter den modellierten Transpirationsraten. Ausnahmen waren lediglich an einigen Tagen auf der Fläche Loobos zu erkennen. Allerdings handelte es sich bei den extrem hohen Raten am Sommerende 2012 und im Januar 2013 wahrscheinlich um singuläre Messartefakte. Grundsätzlich auffällig war dort jedoch, dass auch im Winterhalbjahr (2013/2014 und 2014/2015) Saftfluss festgestellt wurde, während die Wasserhaushaltsmodellierung im selben Zeitraum eine Transpiration nahe null ergab. Aufgrund der insgesamt niedrigen Transpirationsraten im Winter war die Auswirkung der Abweichungen bei Betrachtung der gesamten Messperiode aber gering. Im Durchschnitt lagen die Rohmessergebnisse für alle ausgewerteten Kiefernbestände um 52 % unter den modellierten Transpirationsraten.

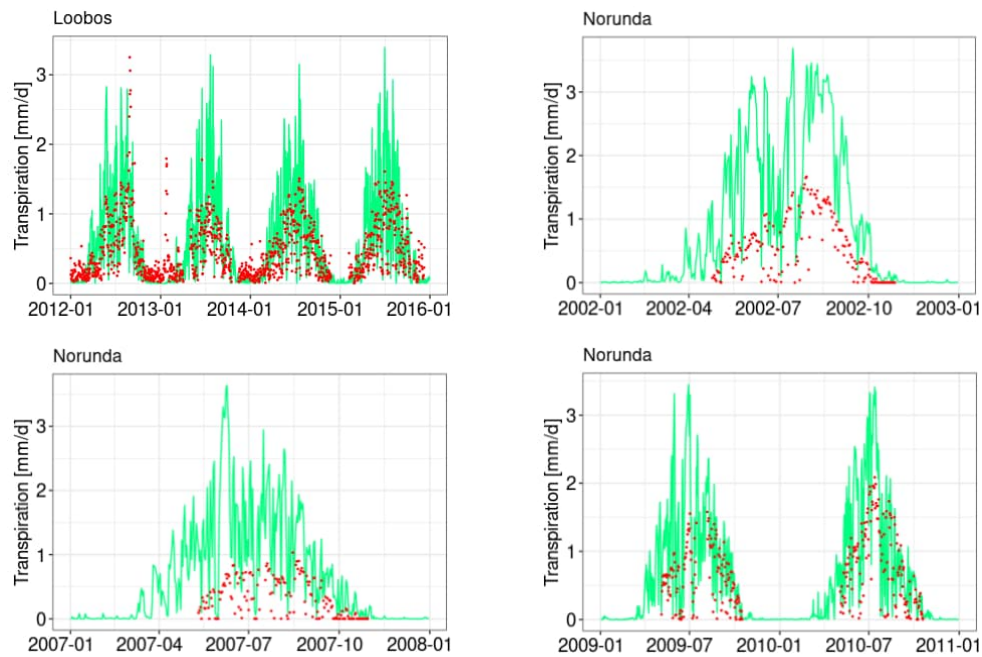


Abbildung 5.5: Modellerte (grün) und saftflussbasierte (rot) Bestandestranspiration ausgewählter Kiefernflächen im SAPFLUXNET-Netzwerk.

Bei den Fichtenbeständen (Abbildung 5.6) gab es mit Norunda ST2 und Krtiny zwei Bestände, deren Rohmessergebnisse aus den Jahren 2001 bzw. 2015 in der Größenordnung und im Verlauf gut mit den modellierten Transpirationsraten übereinstimmten. Allerdings lagen sie in Krtiny im zweiten Jahr der Messungen wahrscheinlich methodenbedingt sowohl niedriger als die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung als auch deutlich unter den Vorjahreswerten. Auf den Flächen Bik, Davos und Fyodorovskoye ergaben die Rohmessergebnisse auffällig niedrige Transpirationsraten im Vergleich zur Modellierung und im Vergleich zu den Rohmessergebnissen der beiden anderen Fichtenflächen. Insbesondere die maximale Tagestranspiration in Davos und Fyodorovskoye zeichnete sich durch sehr niedrige Werte aus. Im Durchschnitt aller Fichtenbestände lagen die Rohmessdaten um 33 % unter den modellierten Transpirationsraten.

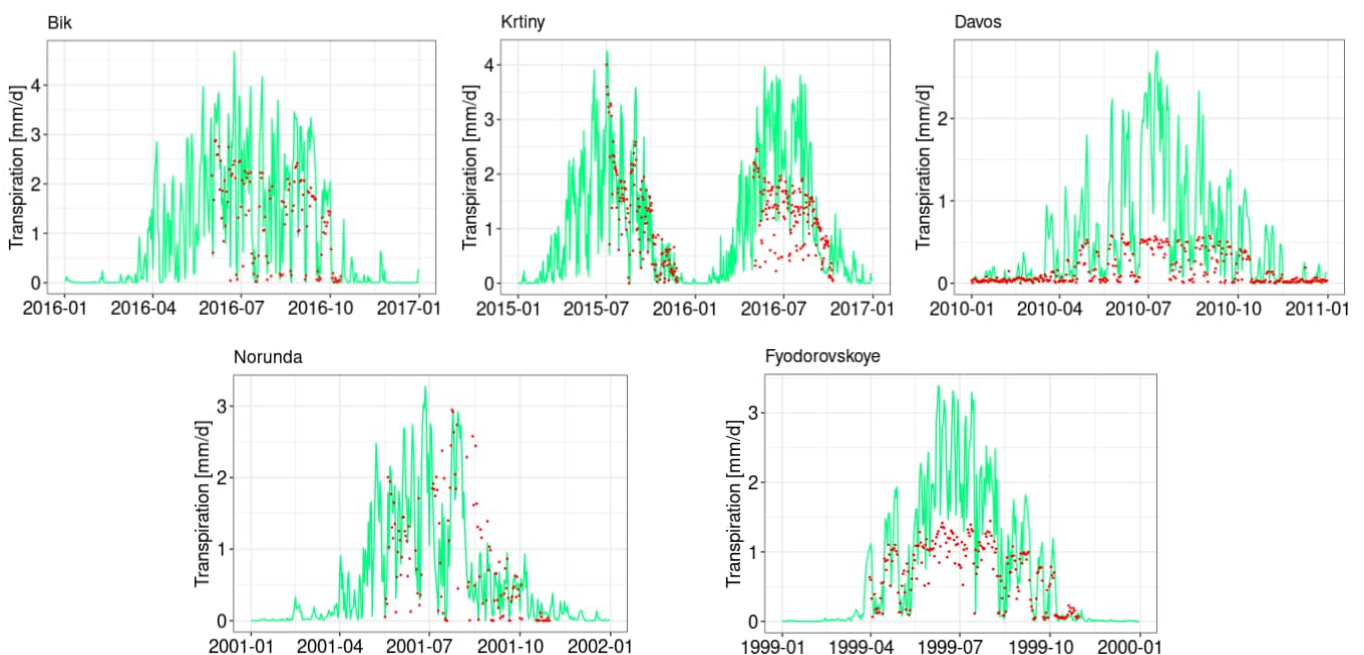


Abbildung 5.6: Modellerte (grün) und saftflussbasierte (rot) Bestandestranspiration ausgewählter Fichtenflächen im SAPFLUXNET-Netzwerk.

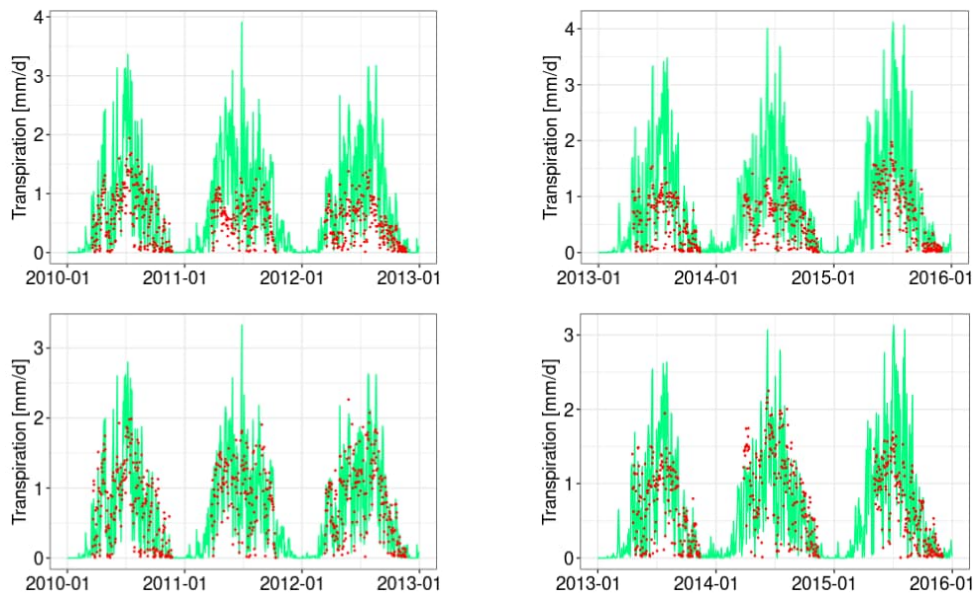


Abbildung 5.7: Modellierte (grün) und saftflussbasierte Bestandestranspiration (rot) für die zwei Douglasienflächen bei Merzalben im SAPFLUXNET-Netzwerk (oben: Reinbestandung; unten: Mischbestand mit ca. 68 % Douglasie).

Von den vier Messkampagnen auf den beiden Douglasienflächen bei Merzalben (Abbildung 5.7) stimmten die Rohmessergebnisse der Mischbestandsfläche sehr gut mit der modellierten Transpiration überein und lagen nur um 8 % bzw. 15 % unter den Modellergebnissen. Im Vergleich dazu war der Unterschied im Reinbestand mit einer Abweichung von -47 % deutlich höher. Im Durchschnitt aller Flächen und Messkampanien lagen die Rohmessergebnisse bei Douglasie um 29 % unter den modellierten Werten.

5.3.2 Validierung der Transpirationsmodellierung

Beim Vergleich der Saftfluss basierten Rohmessergebnisse $T_{\text{MESS, ROH}}$ auf Bestandesebene mit der modellierten Bestandestranspiration T_{MOD} lagen die Messwert basierten Daten bei allen Baumarten erheblich unter den modellierten Werten, und zwar trotz der baumartenspezifisch sehr unterschiedlich gewählten GLMAX-Werte auch in etwa in derselben Größenordnung (-21 % bei Eiche, -29 % bei Buche, -29 % bei Douglasie, -33 % bei Fichte und -52 % bei Kiefer). Fast nie (nur in Bilovice, Eiche) lag die modellierte Transpiration dagegen unter den Rohmessergebnissen. Dieser erhebliche Niveauunterschied der Rohmessergebnisse aller Baumarten wurde dagegen weitgehend ausgeglichen, wenn die von Flo Sierra (2021) festgestellte methodentypische Unterschätzung des Saftflusses korrigiert wurde ($T_{\text{MESS, KORR}}$, Tabelle 5.3). Der mittlere Vorhersagefehler für die Baumarten betrug: $VF_{\text{Eiche}} -4\% (\pm 31)$, $VF_{\text{Buche}} -6\% (\pm 23)$, $VF_{\text{Kiefer}} +78\% (\pm 72)$, $VF_{\text{Fichte}} +19\% (\pm 40)$ und $VF_{\text{Douglasie}} -10\% (\pm 22)$. Der Vorhersagefehler ist also nur bei Kiefer eindeutig gerichtet (und zwar positiv), während bei den anderen baumartenspezifischen Modellparametrisierungen die Standardabweichung zwischen den Flächen größer als der Betrag des mittleren Vorhersagefehlers ist. Die Auswirkungen der Parameterwahl für GLMAX auf den je Baumart gemittelten Vorhersagefehler und die Standardabweichung zeigt Tabelle 5.4.

Hieraus wird deutlich, dass bei einem um ein Drittel niedrigeren GLMAX-Wert nur der mittlere Vorhersagefehler der Fichtenbestände unter 10 % läge. Nur bei der Douglasie wäre in diesem Fall die Richtung des Vorhersagefehlers eindeutig bestimmbar (negativ). Würde dagegen GLMAX um ein Drittel höher als die Standardparametrisierung gewählt, wäre nur bei Kiefer ein eindeutig gerichteter (positiver) Vorhersagefehler festzustellen, während die Richtung bei den anderen Baumarten nicht bestimmbar wäre. Der bei Eiche, Buche und Douglasie in der Standardparametrisierung im Mittel leicht negative Vorhersagefehler würde durch den höheren GLMAX-Wert leicht positiv, würde im Betrag aber weiterhin unter 10 % liegen.

Tabelle 5.3: Jahresdurchschnittswerte der Bestandstranspiration des Messzeitraums und des ganzen Jahres. Dargestellt sind die jährlichen Summen der im Messzeitraum erhobenen Rohmessergebnisse ($T_{MESS, ROH}$), der korrigierten Messwerte ($T_{MESS, KORR}$) und der für den Messzeitraum modellierten Werte (T_{MOD}) der Bestandstranspiration, das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Rohmessergebnisse und täglichen modellierten Werte, und der Modellbias. Die letzten beiden Spalten zeigen die aufs Jahr extrapolierten und aufsummierten Messwerte ($T_{MESS, KORRJAHR}$) und modellierten Werte ($T_{MODJAHR}$) der Bestandstranspiration.

Name	Baumart	$T_{MESS, ROH}$ [mm/a*]	$T_{MESS, KORR}$ [mm/a*]	T_{MOD} [mm/a*]	R^2	Bias [%]	$T_{MESS, KORRJAHR}$ [mm/a]	$T_{MODJAHR}$ [mm/a]
Bilovice	Eiche	247	315	208	0,05	-34	474	313
Lanzhot	Eiche	200	255	359	0,21	41	320	451
Fontainebleau 2006	Eiche	213	358	247	0,71	-31	358	247
Fontainebleau 2014	Eiche	133	224	235	0,80	5	224	235
Merzalben Buche	Buche	206	346	373	0,60	8	402	433
Stechlin 2002	Buche	154	259	321	0,70	24	276	342
Stechlin 2004	Buche	205	345	312	0,52	-10	376	341
Stitna nad Vlari	Buche	294	375	401	0,58	7	455	487
Hesse 1997	Buche	387	650	422	0,58	-35	719	467
Hesse 2000	Buche	378	635	401	0,74	-37	706	446
Loobos	Kiefer	148	249	209	0,62	-16	255	215
Norunda Kiefer ST3 2002	Kiefer	101	129	296	0,78	129	138	316
Norunda Kiefer ST3 2007	Kiefer	54	69	180	0,67	161	89	233
Norunda Kiefer ST1	Kiefer	108	138	182	0,76	32	167	221
Bik	Fichte	165	210	228	0,87	9	318	346
Krtiny	Fichte	187	238	258	0,57	8	350	380
Norunda Fichte ST2	Fichte	105	134	105	0,5	-22	260	204
Fyodorovskoye	Fichte	150	252	256	0,61	2	259	263
Davos	Fichte	60	101	195	0,84	93	101	195
Merzalben Douglasie 2010	Douglasie	120	202	225	0,6	11	234	261
Merzalben Douglasie 2013	Douglasie	124	208	233	0,73	12	249	278
Merzalben Mischbestand 2010	Douglasie	172	289	187	0,76	-35	334	216
Merzalben Mischbestand 2013	Douglasie	153	257	180	0,67	-30	303	212

*berücksichtigt wurden nur Tage mit Xylemsaftflussmessungen

Tabelle 5.4: Mittlerer relativer Vorhersagefehler für die Baumarten ($VF_{Baumart} \pm$ Standardabweichung in %-Punkten) in Abhängigkeit von der Größenwahl für GLMAX. GLMAX Standard entspricht den Werten in Tabelle 5.2, GLMAX minimal und GLMAX maximal liegen um 33% darunter bzw. darüber.

	Eiche	Buche	Kiefer	Fichte	Douglasie
GLMAX minimal	-18 % \pm 31	-20 % \pm 22	+35 % \pm 55	-1 % \pm 28	-29 % \pm 18
GLMAX Standard	-4 % \pm 31	-6 % \pm 23	+78 % \pm 72	+19 % \pm 40	-10 % \pm 22
GLMAX maximal	+7 % \pm 32	+3 % \pm 24	+107 % \pm 82	+34 % \pm 54	+7 % \pm 26

5.3.3 Baumartunterschiede in der jährlichen Transpirationsrate

Die Daten der Xylemsaftflussmessungen stammten aus Klimabereichen mit Jahresniederschlägen von 486 mm bis 1118 mm und Jahresmitteltemperaturen von 2,9°C bis 12,8°C (Tabelle 5.1). Die jährlichen Transpirationssummen der betrachteten Baumarten ermöglichten es, die Transpiration relativ zum Jahresniederschlag auszudrücken (vgl. Peck & Mayer 1996) und machten dadurch Bestandstranspirationsraten und Modellabweichungen trotz der großen klimatischen und strukturellen Unterschiede zwischen den Beständen artspezifisch vergleichbar.

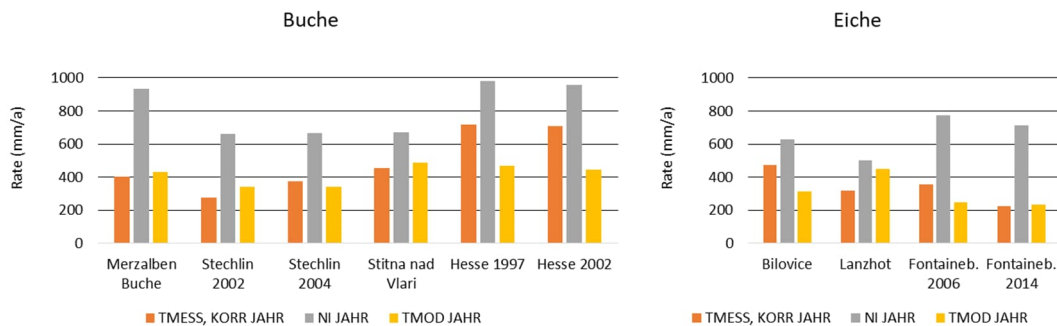


Abbildung 5.8: Gemessene ($T_{MESS, KORRJAHR}$) und modellierte ($T_{MODJAHR}$) Jahrestranspirationssummen im Vergleich zu den jährlichen Niederschlagssummen (NI JAHR) der Messkampagnen an Buchen- und Eichenstandorten.

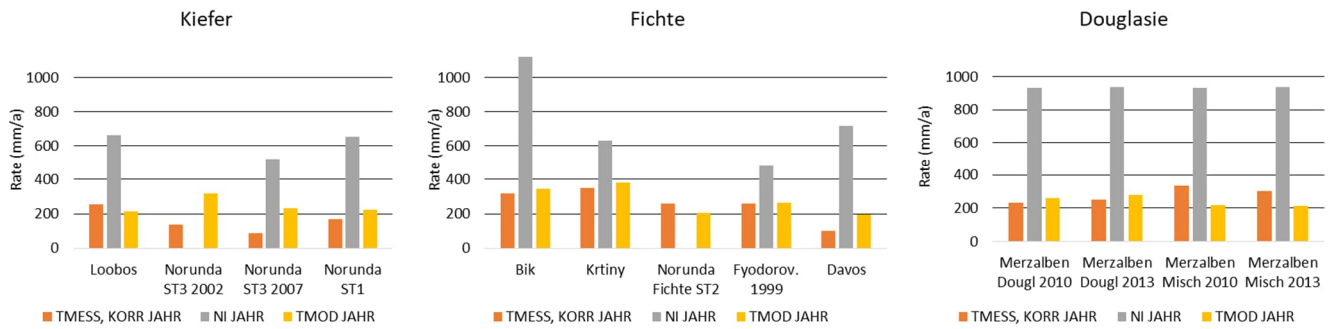


Abbildung 5.9: Gemessene (T_{MESS, KORRJAHR}) und modellierte (T_{MODJAHR}) Jahrestranspirationssummen im Vergleich zu den jährlichen Niederschlagssummen (NI JAHR) der Messkampagnen an Kiefern-, Fichten- und Douglasienstandorten.

Die Abweichung von gemessenen (T_{MESS, KORRJAHR}) und modellierten (T_{MODJAHR}) Jahrestranspirationsraten betrug bei den sechs Buchenbeständen in vier Fällen weniger als 10 % des Jahresniederschlags, bei den beiden Messkampagnen des Bestands Hesse war sie dagegen mit einer Unterschätzung von 25 % und 27 % des Jahresniederschlags deutlich größer (Abbildung 5.8). Auch bei den anderen Baumarten betrugen die Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Jahrestranspirationsraten in den meisten Fällen weniger als 15 % des Jahresniederschlags, nur bei den Eichenbeständen Bilovice (25 %) und Lanzhot (26 %) und dem Kiefernbestand Norunda ST3 2007 (28 %) war die Abweichung erheblich größer (Abbildung 5.9). Die genannten Bestände mit Abweichungsbeträgen über 15% des Jahresniederschlags erscheinen in der Häufigkeitsverteilung der Modellabweichungen (Abbildung 5.10) als Ausreißer. Die Modellabweichungen sind insgesamt ausgewogen und zeigen weder eine Tendenz zur Unterschätzung noch zur Überschätzung.

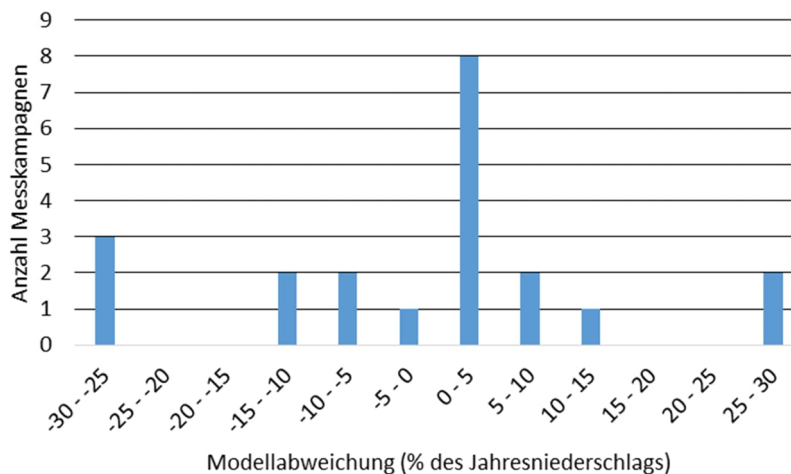


Abbildung 5.10: Häufigkeitsverteilung der Modellabweichung, ausgedrückt in % des Jahresniederschlags.

Die korrigierten gemessenen Jahrestranspirationsraten (T_{MESS, KORRJAHR}) variieren zwischen 14 % und 75 % des Jahresniederschlags, während die modellierten Transpirationsraten zwischen 23% und 90% des Jahresniederschlags ausmachen. Ausgenommen wurden bei dieser Betrachtung die Messkampagnen in Norunda Fichte ST2 und Norunda Kiefer ST3 2002, weil hier für die ersten 3,5 Monate des Jahres jeweils der Freilandniederschlag mit 0 mm angegeben war, so dass er vermutlich nicht vollständig vorliegt.

Vor dem Hintergrund des gerichteten methodentypischen Messfehlers und der geringen Anzahl von Messkampagnen wurden für eine relative Einordnung der Baumarten die maximalen je Baumart beobachteten Jahresraten (in mm) herangezogen. Die höchste absolute Jahrestranspiration der Baumarten wurde auf Basis der Messdaten (korrigiert oder unkorrigiert) bei Buchen beobachtet (Bestand Hesse, Messkampagne ab 1997), danach folgten Eichen (Bilovice) und mit einigem Abstand die Nadelbaumbestände (Tabelle 5.5). Unter den Nadelbaumbeständen wiesen Fichten (Krtiny) im Baumartenvergleich die größten Jahrestranspirationsraten auf, bei Douglasienbeständen (Merzalben Mischbestand 2010) waren die größten jährlichen Transpirationsraten etwas geringer und bei Kiefern waren die maximal gemessenen jährlichen Transpirationsraten am geringsten (Loobos).

Die Rangfolge der Baumarten auf Basis der maximalen modellierten Jahrestranspirationsraten (Tabelle 5.5) war ähnlich: Die höchste modellierte Jahrestranspiration wurde bei einem Buchenbestand erreicht (Stitna nad Vlari), danach folgten Eichen (Lanzhot) und dann Fichten (Krtiny). Bei den modellierten Transpirationsraten erreichte ein Kiefernbestand (Norunda ST3 2002) höhere jährliche Transpirationsraten als die Douglasienbestände.

Tabelle 5.5: Baumartunterschiede der maximalen je Baumart festgestellten jährlichen Transpirationssumme der SAPFLUXNET-Bestände. Die maximale Transpirationssumme wird als Absolutwert für jedes der drei Verfahren (korrigierte Messwerte $T_{MESS, KORRJAHR}$; unkorrigierte Messwerte $T_{MESS, ROHJAHR}$; modellierte Werte $T_{MODJAHR}$) in mm angegeben und darunter als Anteil am jeweiligen Jahresniederschlag (NI JAHR).

maximale Jahrestranspiration	Eiche	Buche	Kiefer	Fichte	Douglasie
$T_{MESS, KORRJAHR}$ (mm)	474	719	255	350	334
$T_{MESS, ROHJAHR}$ (mm)	372	428	152	275	199
$T_{MODJAHR}$ (mm)	451	487	316	380	278
$T_{MESS, KORRJAHR} / NI JAHR$ (mm/mm)	0,75	0,74	0,39	0,55	0,36
$T_{MESS, ROHJAHR} / NI JAHR$ (mm/mm)	0,59	0,53	0,23	0,44	0,21
$T_{MODJAHR} / NI JAHR$ (mm/mm)	0,9	0,73	0,45	0,6	0,3

Für die Beurteilung der Transpirationsleistung der Baumarten war aber auch entscheidend, welcher Anteil des jährlichen Niederschlags durch die Transpiration verdunstet wurde (Tabelle 5.5). Der Baumartenvergleich der maximalen Jahrestranspiration auf Basis des Anteils am Jahresniederschlag ergab bei den gemessenen Transpirationsraten (korrigiert oder unkorrigiert) folgende Reihenfolge:

Eiche > Buche > Fichte > Kiefer > Douglasie

Derselbe Vergleich bei den modellierten Transpirationsraten führte zur selben Rangfolge.

5.3.4 Jahrestranspirationsraten im Vergleich zu Klima und Bestandeseigenschaften

Die relative Beurteilung der Baumarten-Transpiration auf Basis der aufs Jahr extrapolierten Messdaten wurde durch die klimatischen Unterschiede beeinflusst. So stammten z.B. die betrachteten Eichenbestände von besonders warmen und trockenen Standorten, während die Buchenbestände aus niederschlagsreicheren warmen Regionen stammten und die Kiefernbestände von besonders trockenen und kühleren Standorten (Abbildung 5.12). Über alle Baumarten hinweg betrachtet nahm die gemessene Jahrestranspiration der Bestände mit dem jährlichen Niederschlag tendenziell eher zu, wobei vor allem warme und niederschlagsreiche Bedingungen zu hoher Transpiration führten (Abbildung 5.11). Eine lineare Regression zum Niederschlag ergab, dass die Transpirationsraten der Laubbaumbestände überwiegend oberhalb der Regressionsgeraden lagen, während die Transpirationsraten von Kiefern und Douglasien unterhalb der Regressionsgeraden lagen.

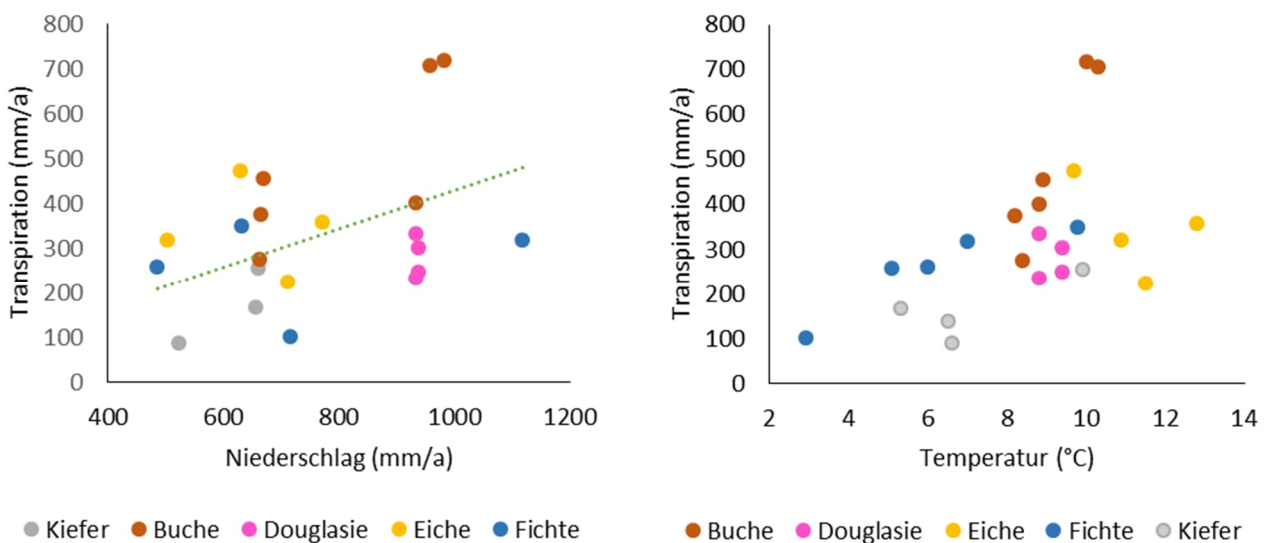


Abbildung 5.11: Abhängigkeit der korrigierten gemessenen jährlichen Transpirationssumme ($T_{MESS, KORRJAHR}$) von Jahresniederschlag und Mitteltemperatur der Messjahre. Die Regressionsgerade links entspricht $T_{MESS, KORRJAHR} = 0.43 NI JAHR$.

Die lineare Approximation entsprach einem durchschnittlichen Transpirationsanteil von 43 % am Niederschlag, dabei variierte der Anteil in einem weiten Bereich von 14% bis 74 %. Auch mit steigender Temperatur ergab sich eine tendenzielle Zunahme der Jahrestranspiration.

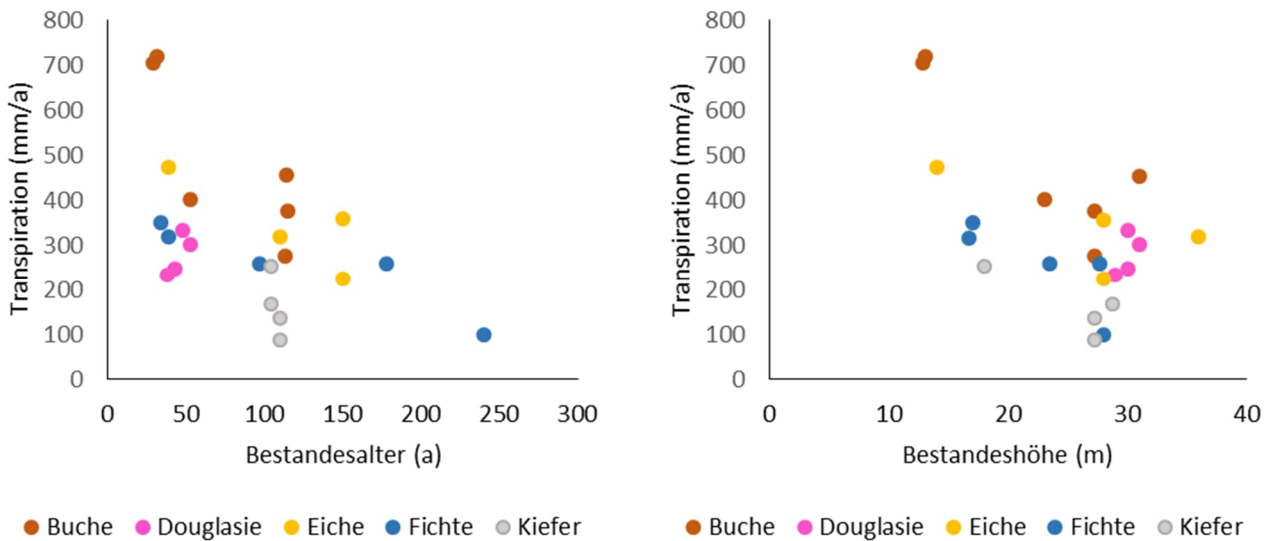


Abbildung 5.12: Abhängigkeit der aus Saftflussdaten abgeleiteten mittleren jährlichen Transpirationssumme ($T_{\text{mess, korrr Jahr}}$) von Bestandesalter und Bestandeshöhe

Bei den beiden miteinander korrelierten Bestandesvariablen Alter und Höhe zeigte sich eine Abnahme der Transpirationssumme mit zunehmendem Alter bzw. Höhe (Abbildung 5.12). Die abnehmende Gesamttendenz für alle Baumarten und Bestände ergab sich dabei in der Regel auch bei separater Betrachtung der einzelnen Baumarten.

5.4 Diskussion

Sowohl die gemessenen als auch die modellierten Transpirationssummen liegen für die berücksichtigten Flächen des SAPFLUXNET-Netzwerks in einer vergleichbaren Größenordnung (im Mittel zwischen 330-370 mm/a) zu den Angaben bei Lyr et al. (1967) und Peck & Mayer (1996). Die Größenordnung der Jahrestranspiration $T_{\text{MESS, KORRJAHR}}$ entspricht mit 43% des Jahresniederschlags fast genau dem von Schlesinger und Jasechko (2014) für Wälder publizierten durchschnittlichen Anteil (43% für temperate Laubwälder und 44% für boreale Nadelwälder). Die ebenfalls dort genannten Transpirationsanteile auf Basis von Daten der FAO liegen mit 40% (temperate Laubwälder) bzw. 41% (boreale Nadelwälder) etwas niedriger.

Für die mit vielen Fehlerquellen behafteten Messverfahren Thermal Dissipation und Heat Balance ist das eine recht gute Übereinstimmung mit externen Daten. Die Hauptfehlerquellen dieser Messverfahren werden bei der Messung am Einzelbaum selbst gesehen, während Hochrechnungsfehler als weniger ausschlaggebend gelten (Lu et al., 2004). Die Transpiration unterständiger Bäume und des Unterwuchses wird durch die Messungen meist nicht erfasst. Weil der Xylemsaftfluss im Baumstamm nicht immer homogen ist, hängt das Messergebnis auch von der Messposition ab – so werden auf der Südseite des Stammes in der Regel die höchsten Saftflussraten gemessen (Burgess & Downey, 2018). Innerhalb des Stammes gibt es eine artspezifische und baumindividuelle radiale Abnahme der Saftflussdichte, die bei der Übertragung des Messergebnisses an einer Messposition auf den Stammquerschnitt adäquat berücksichtigt werden muss (Gebauer et al., 2012). Inhomogenitäten des Gewebes und Wundreaktionen können dazu führen, dass die Messung an einer Messposition keinen guten Kontakt zu den wasserleitenden Gefäßen hat, so dass der tatsächliche Fluss in diesen Fällen unterschätzt wird (Wullschleger et al., 2011). Insbesondere bei ringporigen Arten kann dies dazu führen, dass ein Teil der Messung in nicht-leitendem Gewebe ausgeführt wird, so dass die Messungen entsprechend korrigiert werden müssen (Clearwater et al., 1999).

Vor dem Hintergrund der ebenfalls bestehenden Unsicherheiten bei der Parametrisierung des Wasserhaushaltsmodells ist die qualitative Übereinstimmung des Modells mit den geschätzten Transpirationsraten in den allermeisten Fällen recht gut (R^2 zwischen 0,5 und 0,87, Tabelle 5.3), insbesondere, wenn man bedenkt, wie unterschiedlich die aus einem großen geographischen Gebiet stammenden Bestände und Baumarten klimatisch, bodenkundlich

und genetisch sein können. Nur bei zwei Beständen, den relativ nah beieinander liegenden Eichenbeständen Lanzhot und Bilovice, liegt das Bestimmtheitsmaß unter 0,5. Bei beiden Flächen spielt eine Rolle, dass das verwendete Phänologiemodell den Beginn der Vegetationsperiode offenbar früher voraussagt als er an den kontinentaleren Standorten mit kalten Wintern und besonders warmen, trockenen Sommern tatsächlich eintritt. Bei Bilovice kommt zusätzlich im Juni 2017 eine Phase mit auch für Eiche außerordentlich hohen Transpirationsmessungen vor, bei denen es sich möglicherweise um einen Sensordefekt handelt. Zumindest wäre von den das Modell antreibenden Klimadaten her eher mit einer gegenläufigen Entwicklung, also einer Abnahme der Transpirationsrate zu rechnen gewesen. Unabhängig von diesen Sonderfällen beschreibt das mechanistische Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 den Prozess der Transpiration aber in angemessener Weise, so dass mehr als die Hälfte der beobachteten Varianz in den Transpirationsmessungen erklärt werden kann. Das spricht sowohl für die Qualität der Messungen als auch für die Strukturvalidität des Modells und ermöglichte deshalb auch den modellbasierten Lückenersatz der Messungen, um Jahresraten der Bestandestranspiration aus den Messungen abzuleiten.

Im Mittel ergab sich für die Baumarten Eiche, Buche und Douglasie eine gute Übereinstimmung zwischen der Modell und Messdaten basierten Bestandestranspiration. Auch die durch die Standardabweichung erfassten Qualitätsunterschiede zwischen den Einzelflächen lagen in einem vertretbaren Rahmen, vor allem vor dem Hintergrund hoher Unsicherheiten aufgrund unterschiedlicher Messmethodik, Ungenauigkeiten bei der Sensorinstallation und flächenspezifischen Aspekten der Modellparametrisierung. Für Fichte waren die Ergebnisse zwar etwas schlechter aber dennoch zufriedenstellend. Bei Kiefer lagen die modellierten Werte dagegen sehr hoch, was aber vornehmlich an den zwei Messkampagnen 2002 und 2007 in Norunda lag.

Ob es auf dieser Basis gerechtfertigt ist, gemessene artspezifische Unterschiede in der maximalen Blattleitfähigkeit als Parameter (GLMAX) zu verwenden, die im Modell eine direkte Auswirkung auf die Transpiration haben, lässt sich nur anhand der baumartenspezifischen quantitativen Auswertung von Messungen und Modell prüfen. Dabei ist die aus dem Messprinzip resultierende Erwartung, dass die Rohmessdaten die tatsächliche Transpiration eher unterschätzen, weil der thermische Kontakt nicht immer optimal ist (Clearwater et al., 1999; Wullschlegel et al., 2011), bei allen Messkampagnen außer Bilovice erfüllt worden. Der dabei beobachtete, baumartenspezifische Niveau-Unterschied der Messungen ist mit -21% bis -52% im Verhältnis zu den simulierten Daten erheblich. Ebenso erheblich ist aber auch die von Flo Sierra (2021) vorgeschlagene Korrektur der Saftflussmessungen um den typischerweise auftretenden Fehler der beiden verwendeten Saftflussmethoden, durch den die in Kalibrierungsexperimenten mit den beiden Methoden gefundene Unterschätzung des Saftflusses pauschal ausgeglichen wird. Das generelle Vorhandensein eines Niveauunterschieds über alle Baumarten hinweg bestätigt die von Flo Sierra (2021) postulierte Notwendigkeit einer methodenspezifischen Korrektur anhand der gravimetrischen Kalibrierungen. Durch die damit bewirkten großen Zuschläge von +27% (heat balance) und +67% (thermal dissipation) zur Rohmessung hat die Korrektur einen großen Einfluss auf die Größenordnung der korrigierten Messwerte.

Wird der Vorhersagefehler auf Basis der korrigierten Transpirationsmessungen betrachtet, so lässt sich feststellen, dass sein Betrag bei Eiche, Buche und Douglasie im Mittel der Messkampagnen mit der verwendeten Parametrisierung bis zu 10 % beträgt. Er würde bei diesen Baumarten aber auch mit einem um 33 % höheren GLMAX-Wert unter 10 % liegen. Bei Kiefer und Fichte wird der geringste Vorhersagefehler dagegen bei einem mindestens um 33 % niedrigeren GLMAX erreicht, wobei er bei Kiefer dann immer noch bei +35% liegt. Aufgrund der geringen Anzahl an Messkampagnen, die je Baumart zur Verfügung stehen, sind die Standardabweichungen des Vorhersagefehlers sehr groß, so dass der mittlere artspezifische Vorhersagefehler des Modells nicht signifikant von 0% abweicht, es also keinerlei artspezifische Über- oder Unterschätzung gibt. Damit ergibt sich hieraus noch kaum ein Ausschlusskriterium für eine der Parametrisierungsvarianten.

Bei den Beständen Lanzhot und Norunda Kiefer ST3 gibt es eine große Überschätzung der korrigierten Bestandestranspiration durch das Modell. Bei Lanzhot macht die Nominalbaumart (Eiche) nur 29 % der Bestandesgrundfläche aus - hier könnte die dominante Baumart Esche die Transpiration der Eichen so einschränken, dass die gemessene Transpiration der Eichen niedriger sein könnte als die von dominanten Eichen in Reinbeständen. Da das Modell aber von sehr hohen Leitfähigkeiten bei Eiche ausgeht, wäre das eine Ursache für eine erheblichen Überschätzung. Die sehr niedrigen gemessenen Bestandestranspirationsraten bei Norunda Kiefer ST3 dagegen könnten darauf zurückzuführen sein, dass die Waldkiefer in klimatisch geprägten Provenienzen vorkommt, die unterschiedliche Eigenschaften haben. So hat die skandinavische Herkunft von *Pinus sylvestris* (früher als eigene Varietät *lapponica* beschrieben) in Anpassung an das Klima kürzere, steil stehende Äste, kürzere Nadeln und spitze Kronen und wächst

langsamer als mitteleuropäische Herkünfte (Schütt et al., 2013). Die maximale Kronenleitfähigkeit von skandinavischen Kiefern wurde von Wang et al. (2004) mit $0,003 \text{ m s}^{-1}$ ein Drittel niedriger angegeben als der hier verwendete GLMAX-Parameter. Auch im Ausgangsdatensatz für die Parameterfestlegung (Hoshika et al., 2018) steuern die Porometermessungen an skandinavischen Kiefern mit $0,0027 \text{ m s}^{-1}$ die niedrigsten Blattleitfähigkeiten bei.

Die auch von Hoshika et al. (2018) nahegelegte Verwendung artspezifischer GLMAX-Werte erscheint grundsätzlich richtig. Zum einen zeigten sich auch bei der geringen Zahl untersuchter Bestände schon deutliche Unterschiede zwischen den Transpirationsraten der Baumarten, die sich nach den durchschnittlichen Transpirationsraten (simuliert wie gemessen) in derselben Rangfolge (Buche und Eiche) > Fichte > (Douglasie und Kiefer) darstellten. Berücksichtigt man darüber hinaus die Transpirationsleistung, also den Anteil der jährlichen Transpiration am Jahresniederschlag, bleibt die Rangfolge (simuliert wie gemessen) gleich, nur dass sich innerhalb der Gruppen (Buche und Eiche) und (Douglasie und Kiefer) die Reihenfolge umkehrt. Das Modell verhält sich in Bezug auf die Rangfolge der Baumarten in etwa so wie die Messungen – dies ist ein Indiz dafür, dass die Verwendung artspezifischer GLMAX-Werte gerechtfertigt ist.

Diese Reihenfolge der Baumarten-Transpiration wird auch deutlich, wenn man die korrigierten Transpirationssmessdaten direkt gegen den Jahresniederschlag aufträgt (Abbildung 5.11). Im Mittel liegt hier die Transpiration bei 43% des Jahresniederschlags, aber besonders bei Eichen und Buchen liegt sie meist höher, während sie bei Kiefern und Douglasien immer unter diesem Wert liegt. Die Einordnung der Fichtenbestände ist hier am unklarsten, weil sie zum Teil deutlich oberhalb oder unterhalb der 43%-Marke liegen.

Neben der Zunahme der Transpiration mit den Niederschlägen zeigt ein Vergleich der gemessenen Jahrestranspirationsraten auch eine Zunahme mit der Jahresmitteltemperatur. Wegen der bekannten Zusammenhänge zur Luftfeuchte ist hier aber nicht mit einem einfachen linearen Zusammenhang zu rechnen: So können extrem hohe Niederschläge aufgrund von luftfeuchtebedingt geringen Wasserpotenzialgradienten auch zu einer Einschränkung der Transpiration führen und extrem hohe Temperaturen wegen des zu starken Wasserpotenzialgradienten zum Stomatenschluss.

Eine Abnahme der Transpirationsraten mit der Höhe und dem Alter der Bestände ist über alle Messkampagnen hinweg und auch innerhalb der jeweiligen Baumart erkennbar. In Bezug auf das Alter wurde eine abnehmende Tendenz auch bei Alsheimer et al. (1998) und Delzon & Loustau (2005) beobachtet, zum Teil war diese auch auf geringere Blattflächenindizes der älteren Bestände zurückzuführen. Die Abnahme der Jahrestranspirationsrate mit der Bestandeshöhe könnte dagegen auch auf die geringere mittlere Blattleitfähigkeit höherer Bäume zurückzuführen sein, die auf dem höheren Kavitationsrisiko sehr hoher Bäume beruht (Schäfer et al., 2000).

Insgesamt kann dies nur eine erste Auswertung der artspezifischen Unterschiede sein, die durch weitere Messkampagnen ergänzt werden sollte. Mit einer größeren Anzahl an Messungen von verschiedenen Beständen könnten die artspezifischen Unterschiede besser abgesichert werden und GLMAX-Werte (Tabelle 5.4) könnten genauer justiert werden. (Lyr et al., 1967) fanden demgegenüber keine wesentlichen Unterschiede zwischen Baumarten, während bei (Peck & Mayer, 1996) Unterschiede in der Transpiration verschiedener Baumgattungen festgestellt werden konnten. Das Ranking der Baumarten ist jedoch nicht mit dem in der vorliegenden Studie vergleichbar.

5.5 Schlussfolgerungen

Schon bei der geringen Anzahl untersuchter Bestände zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Transpirationsraten der Baumarten, die sich modelliert wie gemessen in derselben Rangfolge darstellen. Die Auswertungen haben jedoch aufgezeigt, dass nicht nur die Ermittlung von Transpirationssummen mit Wasserhaushaltsmodellen mit hohen Unsicherheiten verbunden ist, sondern auch die messtechnische Erfassung der Transpiration mit Saftflussmessungen nur eine sehr grobe Schätzung der tatsächlichen Transpirationssummen darstellt und erforderliche Korrekturfaktoren für die Messmethoden noch einer weiteren, möglicherweise artspezifischen Optimierung bedürfen. Dennoch sind Xylemsaftflussmessungen wertvolle Datengrundlagen zur Validierung von Wasserhaushaltsberechnungen. Die Verwendung artspezifischer Parametrisierungen insbesondere bei den GLMAX-Werten im Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 für die untersuchten Baumarten erscheint dabei grundsätzlich gerechtfertigt.

5.6 Literatur

- Ahrends, B., Heitkamp, Felix, Buresch, Martin, Evers, J., Hentschel, Sven, Bialozyt, R., & Meesenburg, H. (2023). Neue Herausforderungen an das Waldmanagement: Möglichkeiten und Grenzen des „Digital Soil Mapping“ bei der Bereitstellung flächenhafter Datensätze für die Forstplanung am Beispiel von Hessen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitschrift*, 192, 192–218.
- Ahrends, B., Meesenburg, H., Wagner, M., Scheler, B., & Fleck, S. (2013). Interzeption in Wäldern—Einfluss der Bestandesstruktur. Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Stoff- und Wasserkreislauf, *Ber. Freiburger Forstl. Forschung*, 96, 37–55.
- 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 Journal*, 3(1). <https://benthamopen.com/ABSTRACT/TOGEOGJ-3-115>
- Alsheimer, M., Köstner, B., Falge, E., & Tenhunen, J. D. (1998). Temporal and spatial variation in transpiration of Norway spruce stands within a forested catchment of the Fichtelgebirge, Germany. *Annales des Sciences Forestières*, 55(1–2), 103–123. <https://doi.org/10.1051/forest:19980107>
- Baumgarten, M., Weis, W., Kühn, A., May, K., & Matyssek, R. (2014). Forest transpiration—Targeted through xylem sap flux assessment versus hydrological modeling. *European Journal of Forest Research*, 133(4), 677–690. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0796-4>
- Burgess, S., & Downey, A. (2018). SFM1 Sap Flow Meter Manual Version 5.1 (S. 130). University of Western Australia / ICT International Pty Ltd.
- Čermák, J., Deml, M., & Penka, M. (1973). A new method of sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum*, 15(3), 171–178. <https://doi.org/10.1007/BF02922390>
- Čermák, J., Kučera, J., & Nadezhdina, N. (2004). Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*, 18(5), 529–546. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0339-6>
- Clearwater, M. J., Meinzer, F. C., Andrade, J. L., Goldstein, G., & Holbrook, N. M. (1999). Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 19(10), 681–687. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.10.681>
- Delzon, S., & Loustau, D. (2005). Age-related decline in stand water use: Sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(3–4), 105–119. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.01.002>
- Federer, C. A., Vörösmarty, C., & Fekete, B. (2003). Sensitivity of Annual Evaporation to Soil and Root Properties in Two Models of Contrasting Complexity. *Journal of Hydrometeorology*, 4(6), 1276–1290. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1276:SOAETS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1276:SOAETS>2.0.CO;2)
- Flo Sierra, V. (2021). Global ecological drivers of transpiration regulation in trees [Ph.D. Thesis, Universitat Autònoma de Barcelona]. In TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). <http://www.tdx.cat/handle/10803/671909>
- Gebauer, T., Horna, V., & Leuschner, C. (2012). Canopy transpiration of pure and mixed forest stands with variable abundance of European beech. *Journal of Hydrology*, 442–443, 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.009>
- Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42(2), 193–200. <https://doi.org/10.1051/forest:19850204>
- Granier, A., Biron, P., & Lemoine, D. (2000). Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(4), 291–308. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00151-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00151-3)
- Groh, J., Puhmann, H., & von Wilpert, K. (2013). Kalibrierung eines Bodenwasserhaushaltsmodells mit einer kombinierten Zielfunktion für die Optimierung der Wasserretentionskurve. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 57, 152–163. https://doi.org/10.5675/HyWa_2013,4_1
- Hammel, K., & Kennel, M. (2001). Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. *Forstliche Forschungsberichte München*, 185, 117 S.
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- Hoshika, Y., Osada, Y., de Marco, A., Peñuelas, J., & Paoletti, E. (2018). Global diurnal and nocturnal parameters of stomatal conductance in woody plants and major crops. *Global Ecology and Biogeography*, 27(2), 257–275. <https://doi.org/10.1111/geb.12681>
- Jackisch, C., Germer, K., Graeff, T., Andrä, I., Schulz, K., Schiedung, M., Haller-Jans, J., Schneider, J., Jaquemotte, J., Helmer, P., Lotz, L., Bauer, A., Hahn, I., Šanda, M., Kumpan, M., Dorner, J., de Rooij, G., Wessel-Bothe, S., Kottmann, L., ... Durner, W. (2020). Soil moisture and matric potential – an open field comparison of sensor systems. *Earth System Science Data*, 12(1), 683–697. <https://doi.org/10.5194/essd-12-683-2020>
- Janssen, W. (2009). Definition des Vegetationsanfangs. Deutscher Wetterdienst, interner Bericht.
- Körner, Ch. (1995). Leaf Diffusive Conductances in the Major Vegetation Types of the Globe. In E.-D. Schulze & M. M. Caldwell (Hrsg.), *Ecophysiology of Photosynthesis* (S. 463–490). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79354-7_22
- Lu, P., Urban, L., & Zhao, P. (2004). Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, 46, 631–646.
- Lyr, H., Polster, H., Fiedler, H.-J., & Hoffmann, G. (1967). Gehölzphysiologie. In *Gehölzphysiologie*. Fischer.
- Meesenburg, H., Ahrends, B., Kallweit, R., Scheler, B., Wagner, M., & Fleck, S. (2014). Interzeption in Wäldern: Eine (zu) wenig beachtete Größe des Wasserkreislaufs. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 34.14.
- Menzel, A. (1997). Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen: Auswertung der Beobachtungen in den internationalen phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten. Lehrstuhl für Bioklimatologie und Immissionsforschung der Univ. München.

- Panferov, O., Doering, C., Rauch, E., Sogachev, A., & Ahrends, B. (2009). Feedbacks of windthrow for Norway spruce and Scots pine stands under changing climate. *Environmental Research Letters*, 4(4), 045019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045019>
- Peck, A., & Mayer, H. (1996). Einfluß von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern. *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch*, 115(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/BF02738580>
- Peters, R., Clausnitzer, F., Köstner, B., Bernhofer, C., Feger, K.-H., & Schwärzel, K. (2011). Einfluss von Boden und Bestockung auf den Standortwasserhaushalt. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz = Forest ecology, landscape research and nature conservation*, 12, 101–109.
- Poyatos, R., Granda, V., Flo, V., Adams, M. A., Adorján, B., Aguadé, D., Aidar, M. P. M., Allen, S., Alvarado-Barrientos, M. S., Anderson-Teixeira, K. J., Aparecido, L. M., Arain, M. A., Aranda, I., Asbjornsen, H., Baxter, R., Beamesderfer, E., Berry, Z. C., Berveiller, D., Blakely, B., ... Martínez-Vilalta, J. (2021). Global transpiration data from sap flow measurements: The SAPFLUXNET database. *Earth System Science Data*, 13(6), 2607–2649. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2607-2021>
- Schäfer, K. V. R., Oren, R., & Tenhunen, J. D. (2000). The effect of tree height on crown level stomatal conductance. *Plant, Cell & Environment*, 23(4), 365–375. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00553.x>
- Schlesinger, W. H., & Jasechko, S. (2014). Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 115–117. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.011>
- Schmidt-Walter, P., Trotsiuk, V., Meusburger, K., Zacios, M., & Meesenburg, H. (2020). Advancing simulations of water fluxes, soil moisture and drought stress by using the LWF-Brook90 hydrological model in R. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108023. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108023>
- Schütt, P., Schuck, H. J., & Stimm, B. (2013). *Lexikon der Baum- und Straucharten: Das Standardwerk der Forstbotanik*. Nikol.
- Wang, K.-Y., Kellomäki, S., Zha, T., & Peltola, H. (2004). Annual and seasonal variation of sap flow and conductance of pine trees grown in elevated carbon dioxide and temperature. *Journal of Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri013>
- Weis, W., Ahrends, B., Fleck, S., Raphael, H., & Axel, W. (2023). Modellparametrisierung zur Abbildung des Standortwasserhaushalts mit LWF-Brook90. *Forstliche Forschungsberichte München*, 224, 22-52.
- Wellpott, A., Imbery, F., Schindler, D., & Mayer, H. (2005). Simulation of drought for a Scots pine forest (*Pinus sylvestris* L.) in the southern upper Rhine plain. *Meteorologische Zeitschrift*, 143–150. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0015>
- Wullschleger, S., Childs, K., King, A., & Hanson, P. (2011). A model of heat transfer in sapwood and implications for sap flux density measurements using thermal dissipation probes. *Tree physiology*, 31, 669–679. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr051>