

Beitrag von Waldflächen zur Sickerwasserbildung in Niedersachsen

Bernd Ahrends, Johannes Suttmöller, Paul Schmidt-Walter, Henning Meeseburg

Zusammenfassung

Mittels des TUB-BGR-Verfahrens wurden für die flächenhaft wichtigsten Landnutzungen Ackerland, Grünland und Wald die jährlichen Sickerwasserraten in den Zeiträumen 1981-2010 und 2041-2070 für Niedersachsen geschätzt. Die forstliche Nutzung wird nach Laub- und Nadelwald unterschieden. Unter den aktuellen klimatischen Bedingungen ergibt sich für Wald gegenüber Grünland eine um ca. 60 mm, gegenüber Ackerland um ca. 120 mm geringere Sickerwasserrate. Unter den zukünftigen klimatischen Bedingungen wird ein signifikanter Anstieg der Differenz um 6 bis 7 mm erwartet. Die Ergebnisse können genutzt werden, um die zukünftige Verfügbarkeit von Wasserressourcen und die hydrologische Wirksamkeit von Landnutzungsänderungen (z.B. Aufforstung von landwirtschaftlich genutzten Flächen, Waldumbau) abzuschätzen. Darüber hinaus wurde der empirische TUB-BGR-Ansatz für die Waldflächen bundesweit an den Traktecken der Bundeswaldinventur (BWI) mit dem prozessorientierten hydrologischen Modell LWF-Brook90 verglichen. Trotz einer insgesamt guten Übereinstimmung zeigen sich größere Abweichungen mit steigender nutzbarer Feldkapazität des betrachteten Standortes.

1. Einleitung

Wälder üben einen ausgleichenden Einfluss auf den Gebietswasserhaushalt aus und tragen mehr als andere Landnutzungsformen zu einer guten Qualität von Gewässern bei. Gleichzeitig sind Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung unter Wald aufgrund der höheren Verdunstung von Wäldern geringer als unter anderen Landnutzungen. Für die Planung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen (z.B. Wassergewinnung, Gewässerschutz, Verlagerung von Nähr- und Schadstoffen) ist daher eine möglichst präzise Schätzung des Beitrags von Waldflächen zur Sickerwasser- und Grundwasserneubildung wünschenswert. Ein praktisches Beispiel ist die in den §§ 61 ff NWG geregelte Gewässerunterhaltung in Niedersachsen. Die Gewässer zweiter Ordnung sind nach §§ 64 NWG von Wasser- und Bodenverbänden (Unterhaltungsverbänden) zu unterhalten. Gemäß § 64 Abs. 1 Satz 1 NWG wird die Beitragspflicht nach dem Verhältnis bestimmt, in dem die Mitglieder am Verbandsgebiet beteiligt sind (sog. Flächenmaßstab). Für Waldbesitzer wirkt sich die derzeit praktizierte pauschalierte Form der Beitragsbemessung nachteilig aus, weil hierbei nicht zwischen den verschiedenen Landnutzungsformen differenziert wird und Waldflächen somit gemessen an der mittleren Abflussmenge überproportional zu den Kosten der Gewässerunterhaltung beitragen. Für die Anwendung eines Vorteilsmaßstabes müsste eine Differenzierung zwischen Waldflächen und anders genutzten Flächen anhand der jeweiligen Abflusshöhe (Abflussmenge bezogen auf die Einzugsgebietsgröße nach DIN 4049) erfolgen. Dabei kommt der Speicherfähigkeit des Waldes (Boden und Bestand) für das Niederschlagswasser sowie seinem erhöhten Verdunstungsanspruch im Vergleich zu anderen Landnutzungen eine wesentliche Rolle zu. Im Zuge von Landnutzungs- und/oder Bestockungsänderungen (z.B. Laub-/Nadel-/Mischwald) sind neben den absoluten Größenordnungen auch die Differenzen zwischen den betrachteten Szenarien von Bedeutung.

Mit welchen Methoden und/oder Modellen die vorab beschriebenen Fragestellungen bearbeitet werden, hängt von vielfältigen Faktoren wie der Datenverfügbarkeit oder den Anforderungen an die Genauigkeit der jeweiligen Ergebnisse ab. Insbesondere bei der Betrachtung von

mehreren klimatischen und landnutzungsabhängigen Varianten für einen großen Flächenausschnitt mit hohen standortsbezogenen Variationen bietet sich die Verwendung von Regressionsverfahren an, z.B. das TUB-BGR-Verfahren (WESSOLEK et al. 2008) oder das BAGLUVA-Verfahren (GLUGLA et al. 2003). Das TUB-BGR-Verfahren wurde in der Vergangenheit in verschiedenen Studien erfolgreich eingesetzt (HAUNERT 2017, JANKIEWICZ et al. 2005, RIEK & RUSS 2015) und die Simulationsergebnisse mit anderen statistischen und prozessorientierten Modellen verglichen (BAGLUVA: JANKIEWICS et al. 2005; HYDRUS-1D: KRIESE et al. 2015; WaSiM-ETH: FLECK et al. 2016; SWAT: FLECK et al. 2016). Entsprechend bietet es sich an, einen derartigen Ansatz für eine niedersachsenweite Studie zu verwenden. Da der Focus dieser Auswertung verstärkt auf der Landnutzungsform Wald liegt und im TUB-BGR-Verfahren nur zwischen den Waldtypen Laub- und Nadelwald unterschieden wird, stellt sich die Frage nach den Unsicherheiten durch diese Generalisierung auf zwei Waldtypen. Untersuchungen zur Interzeptionsverdunstung von Wäldern (AHRENDTS et al. 2013, MEESENBURG et al. 2014, PECK & MAYER 1996) zeigen, dass sowohl zwischen den Nadelbaumarten (Fichte, Kiefer) als auch zwischen den Laubbaumarten (Buche, Eiche) große Unterschiede hinsichtlich der Interzeptionsverluste auftreten. Aber auch während einer forstlichen Umtriebszeit bestehen zum Beispiel bei der Kiefer erhebliche Differenzen in den verschiedenen Altersklassen (AHRENDTS & PENNE 2010). Vor dem dargelegten Hintergrund lassen sich folgende Zielsetzungen für diese Untersuchung zusammenfassen:

1. die nutzungsspezifischen Differenzen der Abflussbeiträge flächendeckend für Niedersachsen zu bestimmen.
2. die Stationarität der Landnutzungsdifferenzen hinsichtlich des prognostizierten Klimawandels zu quantifizieren.
3. den Einfluss der Parametrisierung von Waldtypen mit Hilfe eines prozessorientierten Wasserhaushaltsmodells zu untersuchen.

2. Datengrundlage und Methoden

2.1 Untersuchungsansätze

Zur Bearbeitung der beschriebenen Zielsetzungen wurde zunächst der Wasserhaushalt flächendeckend für Niedersachsen im Referenzzeitraum 1981-2010 für die Landnutzungsformen Wald, Ackerland und Grünland ermittelt. Mittels Klimaprojektionen wurde geprüft, inwieweit sich der Wasserhaushalt unter zukünftigen klimatischen Bedingungen verändern würde. Weiterhin wurde bundesweit für die terrestrischen Standorte der Bundeswaldinventur (BWI, BMEL 2016) der langjährige Sickerwasserfluss sowohl mit dem TUB-BGR-Verfahren als auch mit dem forsthydrologischen Modell LWF-Brook90 (HAMMEL & KENNEL 2001) berechnet, um mögliche Differenzen aufgrund der Vereinfachung von Waldtypen im TUB-BGR-Verfahren zu bewerten. Die Auswahl eines bundesweiten Datensatzes für den Modellvergleich bot sich insbesondere vor dem Hintergrund eines wesentlich breiteren klimatischen Spektrums an, das auch mögliche zukünftige klimatische Entwicklungen abdeckt.

2.2 Klima- und Bodendaten

Grundlage für die klimatischen Antriebsdaten der Modellanwendung in Niedersachsen sind die Messdaten des DWD (252 Klima- und 1204 Niederschlagsstationen). Die beobachteten Niederschläge wurden mit einem abstands- und höhenabhängigen Regionalisierungsverfahren (DGM 12,5 m) auf ein 200 m-Raster interpoliert (SCHULLA & JASPER 2007) und gemäß der Anforderungen des TUB-BGR-Verfahrens windabhängig korrigiert. Die Gras-Referenzverdunstung wurde nach einem Ansatz von Penman-Monteith (MONTEITH 1975, PENMAN 1948) berechnet. Als Klimaprojektion für den Zeitraum von 2041 bis 2070 wurde das Szenario RCP8.5 (IPCC 2013), berechnet mit dem Regionalmodell STARS II (LUTZ et al. 2013, ORLOWSKY et al. 2008), verwendet und hieraus anhand der klimatischen Wasserbilanz eine mittlere Realisierung ausgewählt (vgl. ALBERT et al. 2016). Um nicht einen Bias zwischen Referenz- und Projektionszeitraum zu erzeugen, wurden für die entsprechenden Modellläufe die mit dem Regionalmodell STARS II berechneten Klimadaten für den Zeitraum von 1981 und 2010 verwendet. Für die 18256 terrestrischen Traktecken des 4 x 4 km BWI-Grundrasters konnte auf regionalisierte Klimadaten in täglicher Auflösung vom Institut für Geographie der Universität Hamburg zurückgegriffen werden (KAWOHL et al. 2017).

Als Grundlage für flächenhafte Bodeninformationen in Niedersachsen wurde die BÜK50 (LBEG 2015) verwendet. Für die Traktecken der BWI wurden Bodeninformationen aus bundesweit abgeleiteten Bodenprofilen verwendet (vgl. AHRENDTS et al. 2017; HAFNER et al. 2017; PETZOLD & BENNING 2017).

2.3 TUB-BGR-Verfahren

Die Abschätzung der Sickerwasserrate wurde mit dem TUB-BGR-Verfahren (WESSOLEK et al. 2008, 2009) durchgeführt. Der ursprünglich von RENGGER & STREBEL (1980) entwickelte und von RENGGER & WESSOLEK (1990) modifizierte regressionsanalytische Ansatz ist bundesweit einsetzbar (s. Hydrologischer Atlas von Deutschland, BMU 2003). Das TUB-BGR-Verfahren benötigt langjährige Daten der mittleren Niederschlagshöhe und der Gras-Referenzverdunstung. Ferner werden Informationen zur nutzbaren Feldkapazität (nFK), zur effektiven Durchwurzelungstiefe, zur Landnutzung und zu Geländeeigenschaften verwendet. Die praktische Umsetzung folgt in Anlehnung an die Methodenbeschreibung des Niedersächsischen Bodeninformationssystem (NIBIS®) (MÜLLER & WALDECK 2011). Folgende Modifikationen wurden durchgeführt:

- nFK nach DEHNER et al. (2015)
- Effektive Durchwurzelungstiefe für Wälder auf Festgesteinen, modifiziert nach MÜLLER & WALDECK (2011)
- Berücksichtigung von Hangneigung und Exposition bei der Berechnung der potenziellen Verdunstung (vgl. WESSOLEK et al. 2009)
- Keine Berücksichtigung von Oberflächenabfluss für Ackerstandorte

Das TUB-BGR-Verfahren ist nur bei Hangneigungen < 3,5% (bis einschließlich Neigungsstufe 1) anwendbar. Auf Standorten mit höheren Hangneigungen kann Oberflächenabfluss auftreten, wodurch Teile des Niederschlags nicht der Verdunstung zur Verfügung stehen (WESSOLEK et al. 2009). Bei der Anwendung des TUB-BGR-Verfahrens wird Oberflächenabfluss nur

für ackerbaulich genutzte Standorte berechnet, da davon ausgegangen wird, dass bei Grünland und Wald ein dauerhaft ausgebildetes Makroporensystem vorhanden ist, das eine nahezu vollständige Infiltration des Niederschlags ermöglicht (JANKIEWICZ et al. 2005). In dieser Studie wurde aufgrund der geringen Bedeutung von stark geneigten Ackerstandorten in Niedersachsen auf eine Berechnung des Oberflächenabflusses verzichtet (s. JANKIEWICZ et al. 2005, Abb. 7). Die Nichtberücksichtigung des Oberflächenabflusses für Ackerstandorte führt auf Standorten mit Reliefeinfluss zu einer systematischen Unterschätzung der Abflusshöhen für diese Landnutzungsform. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

2.4 LWF-Brook90

Für eine detailliertere Betrachtung des Wasserhaushaltes von Waldstandorten wurde das prozessorientierte forsthydrologische Simulationsmodell Brook90 (FEDERER et al. 2003) verwendet. In der Version LWF-Brook90 3.4 ist das Modell an mitteleuropäische Fragestellungen angepasst (SCHULTZE et al. 2005, HAMMEL & KENNEL 2001) und wird für zahlreiche forstliche Untersuchungen eingesetzt (AHRENDTS et al. 2010, BAUMGARTEN et al. 2014, MEESENBURG et al. 2016, PANFEROV et al. 2009, SCHWÄRZEL et al. 2009, THIELE et al. 2017). Der Wasserfluss im Boden basiert auf der numerischen Lösung der Richards-Gleichung. Laub- bzw. Nadelwald wurde in dieser Anwendung mit Standardparametersätzen nach VON WILPERT et al. (2016) für Buche (Laubwald) und Fichte (Nadelwald) parametrisiert.

2.5 Statistische Methoden

Um die Zusammenhänge zwischen Variablen zu beschreiben, wurde der Spearmansche Rang-Korrelationskoeffizient (r_{Spear}) ermittelt (SACHS 1999), da nicht von einer Normalverteilung der Datensätze ausgegangen werden kann. Verwendet wurde hierzu die R-Bibliothek „Hmisc“ (HARRELL 2016). Unterschiede zwischen Klima- und Modellvarianten wurden mit einem Mann-Whitney U-Test für gepaarte Stichproben untersucht. Alle statistischen Analysen wurden mit R, Version 3.3.3 (R CORE TEAM 2017) durchgeführt.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Landnutzungsabhängige Sickerwasserberechnungen

In Niedersachsen wird über 40% der Landesfläche (Stand 2015 - ATKIS-Datensatz) von Ackerland eingenommen. Weitere 20% werden als Grünland genutzt, so dass über 60% des Landes Niedersachsen einer landwirtschaftlichen Nutzung unterliegen. Rund 22% sind Wald, wobei es sich bei zwei Drittel der Bestände um Nadelwald (Fichte, Kiefer) handelt. Knapp 10% der Fläche in Niedersachsen sind Siedlungs- und Verkehrsflächen. Ein geringer Anteil entfällt auf Heide-, Moor- und Wasserflächen.

Die Berechnung der mittleren Sickerwasserrate nach dem TUB-BGR-Verfahren für den Zeitraum 1981 bis 2010 erfolgte für die Nutzungsformen Wald, Ackerland und Grünland. Dabei wurde jeweils die Sickerwasserrate für die gesamte Landesfläche mit einer Nutzungsform ermittelt, so dass die nutzungsspezifischen Sickerwasserraten als landesweiter Mittelwert berechnet werden konnten. Die Sickerwasserrate für Wald wurde jeweils mit den mittleren landesspezifischen Flächenanteilen der Waldtypen Laubwald, Mischwald und Nadelwald berechnet. In Tabelle 1 sind die langjährigen Mittelwerte der berechneten Sickerwasserraten für

Wald, Grünland und Ackerland sowie deren Abweichung für Grün- und Ackerland im Vergleich zum Wald aufgelistet. Für den Wald wird mit 262 mm/a die geringste Sickerwasserrate berechnet. Es folgt das Grünland mit einer mittleren Sickerwasserrate von 319 mm/a. Dies sind 58 mm/a bzw. 22% mehr als unter Wald. Auf Ackerflächen versickern bei einer Sickerwasserrate von 382 mm/a jährlich 120 mm bzw. 46% mehr als unter Wald.

Tab. 1: Mittlere berechnete Sickerwassermenge für Niedersachsen sowie deren Differenz (Δ) zwischen Grünland bzw. Ackerland und Wald für den Zeitraum 1981 bis 2010.

Landnutzung	Sickerwasserfluss [mm/a]	Δ Sickerwasser Wald – Grünland/Ackerland [mm/a]	Δ Sickerwasser Wald – Grünland/Ackerland [%]
Wald	262	-	-
Grünland	319	+ 58	+ 22
Ackerland	382	+ 120	+ 46

Die größten relativen Differenzen der Sickerwasserraten zwischen den landwirtschaftlich genutzten Flächen und Wäldern werden in Niedersachsen für das Ostniedersächsische Tiefland und die Lößböden der Börde berechnet (Abbildung 1). Hier liegt die Sickerwasserrate bei Grünland- und Ackernutzung im Vergleich zum Wald teilweise um über 100% höher. Die höchsten absoluten Differenzen werden im Westniedersächsischen Tiefland erreicht, da hier das Niederschlagsangebot deutlich höher als im Osten des Landes ist und somit der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre (ausgedrückt durch die Gras-Referenzverdunstung) besser erfüllt werden kann. Regional werden über 200 mm/a mehr an Sickerwassermenge auf landwirtschaftlichen Flächen im Vergleich zu Waldflächen generiert.

Tab. 2: Mittlere berechnete Sickerwassermenge für Niedersachsen sowie deren Differenzen (Δ) zwischen Grünland bzw. Ackerland und Wald unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5 und des regionalen Klimamodells STARS II (Medianlauf) für die Zeiträume 1981 bis 2010 und 2041 bis 2070.

Landnutzung		Sickerwasserfluss [mm/a]	Δ Sickerwasser Wald – Grünland/Ackerland [mm/a]	Δ Sickerwasser Wald – Grünland/Ackerland [%]
Wald	1981-2010	224	-	-
	2041-2070	179	-	-
Grünland	1981-2010	284	+ 60	+ 27
	2041-2070	246	+ 66	+ 37
Ackerland	1981-2010	343	+ 119	+ 37
	2041-2070	306	+ 126	+ 70

Für die Referenzperiode 1981-2010 zeigt sich, dass die STARS-basierten Ergebnisse geringfügig unter denen mit den beobachteten Klimadaten berechneten Sickerwasserraten liegen. Im Zuge einer möglichen klimatischen Entwicklung, wie sie vom STARS-Modell für das Klimaszenario RCP8.5 vorgegeben wird, werden Erhöhungen der Differenzen der Sickerwassermenge zwischen den Landnutzungsformen von 6 mm/a (Wald vs. Grünland) bzw. 7 mm/a (Wald vs. Ackerland) erwartet (Tabelle 2). Obwohl diese Erhöhungen signifikant ($p \leq 0,001$)

sind, sollte die Aussage mit einer gewissen Vorsicht bewertet werden, da hier nur eine Realisierung von Klimamodell und Emissionsszenario verwendet wurde. Die hier vorgestellten Ergebnisse werden wesentlich von den Klimaprojektionen des regionalen Klimamodells STARS II (ORLOWSKY et al., 2008) getrieben. WECHSUNG & WECHSUNG (2015 und 2016) weisen für dieses Klimamodell einen negativen Bias des Niederschlags von ca. 5% je 1 K Temperaturerhöhung nach. Die hier dargestellte Entwicklung basiert jedoch fast ausschließlich auf einer Erhöhung der potenziellen Evapotranspiration um über 100 mm/a infolge des Temperaturanstieges. Entsprechend ist davon auszugehen, dass auch andere Klimaszenarien zu vergleichbaren Ergebnissen kommen.

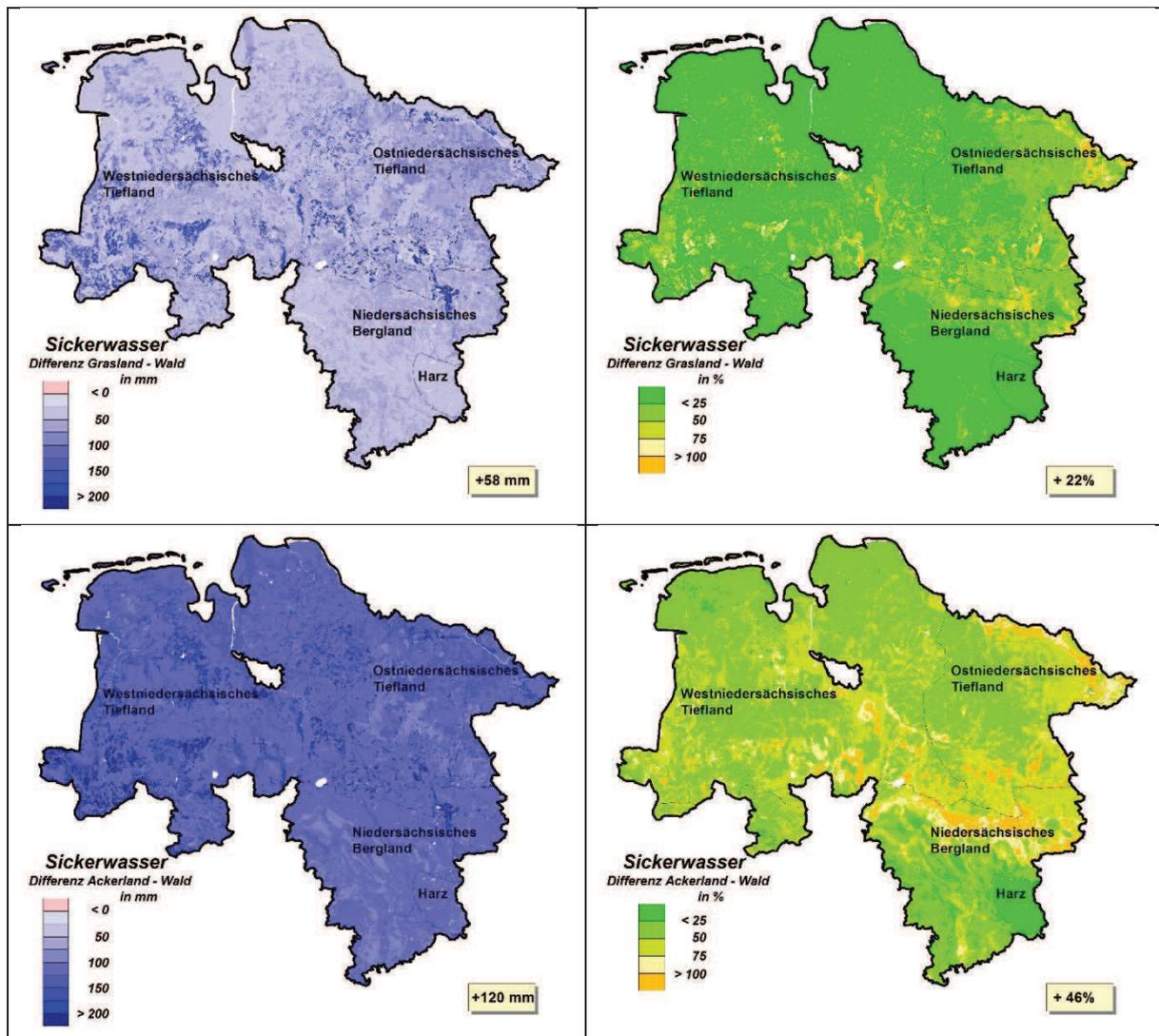


Abb. 1: Differenzen der Sickerwasserrate Grünland bzw. Ackerland und Wald in Niedersachsen absolut (links, mm/m²) und relativ (rechts, %) für den Zeitraum 1981-2010, berechnet mit dem TUB-BGR-Verfahren.

3.2 Modellvergleich TUB-BGR-Verfahren / LWF-Brook90

Das TUB-BGR-Verfahren wurde mit den gleichen Eingangsdaten (Klima, Boden) wie die LWF-Brook90-Simulationen von SCHMIDT-WALTER et al. (2017) für die BWI-Traktecken terrestrischer Standorte angewendet und anhand der berechneten Sickerwasserraten für den Zeitraum 1981 bis 2010 verglichen. Für die mittels TUB-BGR berechneten Sickerwasserraten der Waldtypen Laub- und Nadelwald ergaben sich nur relativ geringe, jedoch signifikante ($p \leq 0,001$) Unterschiede zu Simulationen mit LWF-Brook90 für Modellbestände von Buche und Fichte. Entsprechend zeigen sich auch ähnliche Häufigkeitsverteilungen der Sickerwasserraten (Abbildung 2).

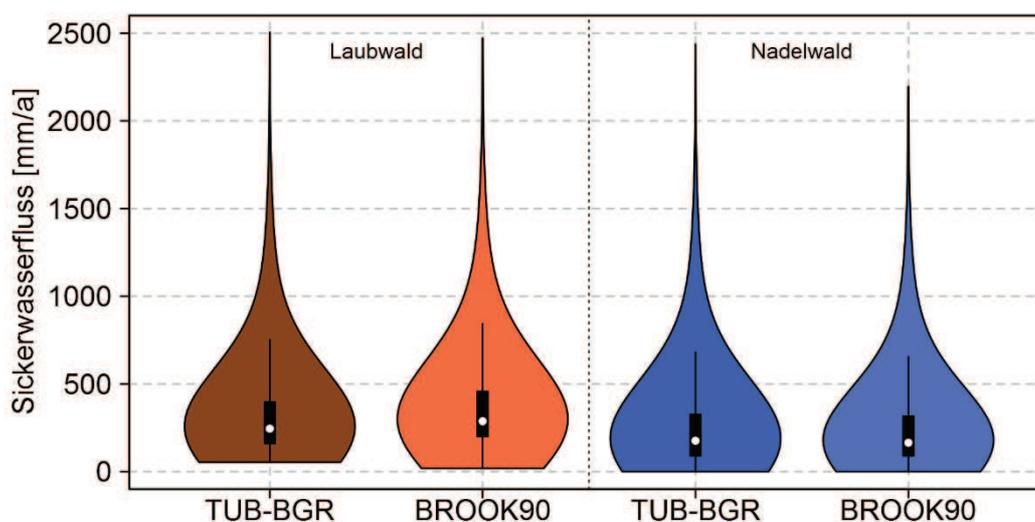


Abb. 2: Vergleich der mittleren jährlichen Sickerwassermenge (1981-2010) für Buche (links) und Fichte (rechts), berechnet für 18256 Traktecken der BWI mit dem TUB-BGR-Verfahren und LWF-BROOK90.

Die Differenzen zwischen den beiden Verfahren fallen je nach Waldtyp unterschiedlich hoch aus. Während bei den Nadelwäldern die Sickerwassermenge nach den TUB-BGR-Simulationen im Durchschnitt etwa 7 mm/a über denen der LWF-Brook90-Simulationen liegen, ist der Unterschied bei den Laubwäldern mit etwa -48 mm/a deutlich höher, d.h. Brook90 liefert etwas größere Abflussspenden. Die Korrelationsanalysen zwischen den Methodendifferenzen und möglichen Einflussgrößen zeigen, dass bei beiden Waldtypen bei höheren nFK-Werten (und entsprechend größeren Durchwurzelungstiefen) die Differenzen größer werden (Tabelle 3). Bei nFK-Werten von 200 bis 300 mm liefert Brook90 systematisch höhere Sickerwasserflüsse als das TUB-BGR-Verfahren. Ob diese Unterschiede darauf zurückzuführen sind, dass das TUB-BGR Verfahren ursprünglich auf speicherarmen Sandstandorten in Norddeutschland (RENGER & STREBEL 1980; RENGER & WESSOLEK 1990) entwickelt wurde oder ob die Parametrisierung von LWF-Brook90 noch optimiert werden muss, bedarf weiterer Untersuchungen. Neben den Korrelationen zur nFK zeigt sich nur bei Laubwald, dass die Differenzen mit steigender Niederschlagsmenge (sowohl im Sommerhalbjahr als auch im Gesamtjahr) ebenfalls deutlich ansteigen. Dieses könnte mit dem Verlauf des Blattflächenindex (LAI) der Buche zusammenhängen. Insgesamt zeigt sich, mit größeren Differenzen bei der Buche, eine relativ gute Übereinstimmung der beiden Verfahren. Für die vorab angeführte Fragestellung

würden die Ergebnisse des Modellvergleichs bedeuten, dass die Differenzen zwischen den Landnutzungsformen für Nadelbäume eher unterschätzt und die für Laubbäume eher überschätzt werden.

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten (Spearman) zwischen den Differenzen der Sickerwassermenge (TUB-BGR vs.LWF-Brook90) und verschiedenen klimatischen und standortsspezifischen Variablen an 18256 BWI-Traktecken. Alle Korrelationen sind zweiseitig signifikant auf dem Niveau $p \leq 0,001$.

Variable	Einheit	Buche (r_{Spear})	Fichte (r_{Spear})
Längengrad	dez°	-0.06	-0.09
Breitengrad	dez°	-0.04	-0.01
Höhe über NN	m	-0.26	-0.07
Hangneigung	°	-0.10	0.01
Niederschlag im Gesamtjahr	mm	-0.38	-0.07
Niederschlag im Sommerhalbjahr	mm	-0.37	-0.11
Pot. Evapotranspiration (ET_{pot}) nach FAO	mm/a	0.34	-0.10
Effektive Durchwurzelungstiefe	dm	-0.37	-0.37
Nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum	mm	-0.43	-0.48

4. Schlussfolgerungen

Das TUB-BGR-Verfahren ist eine anerkannte und häufig angewendete Methode zur Berechnung der Sickerwasserrate (BMU 2003). Für Niedersachsen ergeben die Berechnungen mit dem TUB-BGR-Verfahren für den Zeitraum von 1981 bis 2010 eine um 22% bis 46% erhöhte Sickerwasserrate auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im Vergleich zum Wald. Unter den prognostizierten klimatischen Veränderungen ergibt sich eine signifikante Erhöhung der Differenz der Sickerwassermenge zwischen den Landnutzungsformen. Aufgrund der Nichtberücksichtigung der Oberflächenabflusskomponente ist von einer Unterschätzung des Gesamtabflusses bei Ackerstandorten im stärker geneigten Gelände auszugehen, die aber in Niedersachsen nur relativ geringe Flächenanteile einnehmen. Die hier vorgelegten Ergebnisse der Wasserhaushaltsuntersuchung für Niedersachsen belegen, dass Wälder im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Flächen deutlich weniger zur Gesamtabflussmenge in Gewässern beitragen und entsprechend eine pauschalisierte Form der Beitragsbemessung geprüft werden sollte. Ein Modellvergleich mit standardisierten Buchen- und Fichtenbeständen zeigt für die Traktecken der Bundeswaldinventur vergleichbare Ergebnisse der Berechnungen mit TUB-BGR und LWF-Brook90. Hervorzuheben ist jedoch, dass die Differenzen zwischen den methodischen Ansätzen bei höheren nutzbaren Feldkapazitäten signifikant zunehmen.

Danksagung

Dem Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz sei an dieser Stelle für die finanzielle Förderung der Untersuchungen gedankt. Klima- und Bodeninformationen für die BWI-Traktecken wurden im Waldklimafonds-Projekt WP-KS-KW („Waldproduktivität-Kohlenstoffspeicherung-Klimawandel“), gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags, ermittelt.

Literatur

- Ahrends, 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 Journal*, 3: S. 115-124.
- Ahrends, B., C. Penne & O. Panferov, 2010. Impact of target diameter harvesting on spatial and temporal pattern of drought risk in forest ecosystems under climate change conditions. *The Open Geography Journal*, 3: S. 91-102.
- Ahrends, B., H. Meesenburg, M. Wagner, B. Scheler & S. Fleck, 2013. Interzeption in Wäldern - Einfluss der Bestandesstruktur. *Freiburger Forstliche Forschung*, 96: S. 37-56.
- Ahrends, B., P. Schmidt-Walter & H. Meesenburg, 2017. Standortsinformationen für die Bundeswaldinventur in Sachsen-Anhalt. *Waldzustandsbericht 2017 Sachsen-Anhalt, NW-FVA*: S. 22-25.
- Albert, M., G. Leefken, R. Nuske, B. Ahrends, J. Suttmöller & H. Spellmann, 2016. Auswirkungen von klimatischer Unsicherheit auf die Forstplanung am Beispiel von vier Regionen im norddeutschen Tiefland. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 187, (9/10): S. 161-185.
- Baumgarten, M., Weis, W., Kühn, A., May, K. & R. Matyssek, 2014. Forest transpiration-targeted through xylem sap flux assessment versus hydrological modeling. *European Journal of Forest Research* 133: S. 677-690.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Hrsg.), 2016. Der Wald in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Downloads/BMEL_Wald_Broschuere.pdf.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hrsg.), 2003. Hydrologischer Atlas von Deutschland. Lieferung 1-3 mit 51 Kartentafeln - Bonn/Berlin 2000/2001/2003.
- Dehner, U., M. Renger, A. Bräunig, A. Lamparter, A. Bauriegel, B. Burbaum, K.-J. Hartmann, V. Hennings, F. Idler, K. F., W. Martin, K. Meyer & F. Waldmann, 2015. Neue Kennwert für die Wasserbindung in Böden - Ergebnisse der Abstimmung zwischen dem Personenkreis Wasserhaushaltstabellen der der Ad-hoc-AG Boden und dem DWA. *Berichte der DBG*, 2015, (online Publikation <http://www.dbges.de>).
- DIN 4049-1: 1992 Hydrologie – Grundbegriffe
- Federer, C. A., C. Vörösmarty & B. Feketa, 2003. Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J. Hydrometeorology*, 4: S. 1276-1290.
- Fleck, S., B. Ahrends, J. Suttmöller, H. Messal, R. Meissner & H. Meesenburg, 2016. Zukünftiger Anstieg der Nitratkonzentrationen unter Wald im norddeutschen Tiefland: droht Stickstoff-Eutrophierung durch Klimawandel? In: Wernecke, G., A.-D. Ebner von Eschenbach, Y. Strunck, L. Kirschbauer & A. Müller (Hrsg.): *Wasserressourcen: Wissen im Flussgebieten vernetzen*. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 37: S. 71-81.
- Glugla, G., P. Jankiewicz, C. Rachimow, K. Lojek, K. Richter, G. Fürtig & P. Krahe, 2003. Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. *BfG-Bericht*, 1342: S. 1-106.

- Hafner, S., B. Ahrends, B. Köhler, J. Evers & H. Meesenburg, 2017. Ableitung von bodenphysikalischen Parametern für Waldstandorte in Schleswig-Holstein. Jahrestagung der DBG "Horizonte des Bodens", 2.-7. Sep. 2017. Berichte der DBG 2017: S. 1-8
- Hammel, K. & M. Kennel, 2001. Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Forstl. Forschungsberichte München, 185. Heinrich Frank. München. 148 S.
- Harrell Jr, F. E., 2016. Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 4. 0-2. <http://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>.
- Hauert, G. H., 2017. Messtechnische und modellgestützte Untersuchungen zum Boden- und Landschaftswasserhaushalt im Westfläming. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung - UFZ - Department Bodenphysik. 187 S.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 S.
- Jankiewicz, P., J. Neumann, W. Duijnsveld, G. Wessolek, P. Wycisk & V. Hennings, 2005. Abflusshöhe - Sickerwasserrate - Grundwasserneubildung - Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 49, (1): S. 2-13.
- Kawohl, T., Dietrich, H., Wehberg, J., Böhner, J., Wolf, T. & A. Röder, 2017. Das Klima in 80 Jahren - Wein- statt Waldbau? AFZ-DerWald, 72 Jg., (15): S. 32-35.
- Kriese, T., G. Paul, F. Reinstorf & R. Meißner, 2015. Simulation des Bodenwasserhaushaltes an ausgewählten Standorten in Fläming. Gumpensteiner Lysimetertagung, 16: S. 147 – 152.
- LBEG, 2015. Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 50 000 (BÜK50). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.
- Lutz, J., J. Volkholz & F.-W. Gerstengarbe, 2013. Climate projections for Southern Africa using complementary methods. Intern. J. of Climate Change Strategies and management, 5, (2): S. 30-151.
- Meesenburg, H., B. Ahrends, R. Kallweit, B. Scheler, M. Wagner & S. Fleck, 2014. Interzeption in Wäldern: eine (zu) wenig beachtete Größe des Wasserkreislaufs. Forum für Hydrologie u. Wasserbewirtschaftung, 34: S. 199-206.
- Meesenburg, H., B. Ahrends, S. Fleck, M. Wagner, H. Fortmann, B. Scheler, U. Klinck, I. Dammann, J. Eichhorn, M. Mindrup & K. J. Meiwes, 2016. Long-term changes of ecosystem services at Solling, Germany: Recovery from acidification, but increasing nitrogen saturation? Ecological Indicators, 65: S. 103-112.
- Monteith, J.L., 1975. Vegetation and the atmosphere, vol. 1: Principles. Academic Press, London.
- Müller, U. & A. Waldeck, 2011. Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). GeoBerichte, 19, 415 S.
- Orlowsky, B., F.-W. Gerstengarbe & P. C. Werner, 2008. A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. Theor. Appl. Climatol., 92, (3-4): S. 209-223.

- Panferov, O., C. Doering, E. Rauch, A. Sogachev & B. Ahrends, 2009. Feedbacks of windthrow for Norway spruce and Scots pine stands under changing climate. *Environ. Res. Lett.*, 4, (doi:10.1088/1748-9326/4/4/045019).
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bar soils and grass. *Proc. Royal Meteorologic Society, London*, 193 (A): S. 120-145.
- Petzold, R. & R. Benning, 2017. Standortskartierung – Wissen von gestern? *AFZ-Der Wald*, 15/2017: S. 25-28.
- Peck, A. & H. Mayer, 1996. Einfluss von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern. *Forstw. Cbl.*, 115: S. 1-9.
- R Core Team, 2017. 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>.
- Renger, M., & O. Strebel, 1980. Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. *Wasser und Boden*, 32, (8): S. 362-366.
- Renger, M. & G. Wessolek, 1990. Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung. *Mitt. des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München*, 386: S. 295-307.
- Riek, W. & A. Russ, 2015. Schließen von Stoffkreisläufen zur Verhinderung von Bodendegradation. *Beiträge Forum Boden – Gewässer – Altlasten*, 15: S. 75-94.
- Sachs, L., 1999. *Angewandte Statistik*. 9. Auflage. Springer Verlag. Berlin. 881 S.
- Schmidt-Walter, P., B. Ahrends & H. Meesenburg, 2017. Wasserhaushalt und Trockenstress für die BWI quantifiziert. *AFZ-DerWald*, 72, (15): S. 36-39.
- Schulla, J. & K. Jasper, 2007. Model Description WaSiM-ETH. Technical Report, 181 S.
- Schultze, B., C. Kölling, C. Dittmar, T. Rötzer & W. Elling, 2005. Konzept für ein neues quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Wasserhaushalts von Waldböden in Bayern: Modellierung - Regression - Regionalisierung. *Forstarchiv*, 76: S. 155-163.
- Schwärzel, K., K. H. Feger, J. Häntzschel, A. Menzer, U. Spank, F. Clausnitzer, B. Köstner & C. Bernhofer, 2009. A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites. *Forest Ecology and Management*, 258:S. 2163-2174.
- Thiele, J. C., R. Nuske, B. Ahrends, O. Panferov, M. Albert, K. Staupendahl, U. Junghans, M. Jansen & J. Saborowski, 2017. Climate change impact assessment - A simulation experiment with Norway spruce for a forest district in Central Europe. *Ecological Modelling*, 346: S. 30-47.
- von Wilpert, K., Hartmann, P., Puhmann, H., Schmidt-Walter, P., Meesenburg, H., Müller, J. & J. Evers, 2016. Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: Wellbrock, N., Bolte, A. & H. Flessa (Hrsg.): *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*, Thünen Report 43: S. 343-386.
- Wechsung, F. & M. Wechsung, 2015. Dryer year and brighter sky - the predictable simulation outcomes for Germany's warmer climate from the weather resampling model STARS. *Int. J. Climatol.*, 35, (12): S. 3691–3700.
- Wechsung, F. & M. Wechsung, 2016. A methodological critique on using temperature-conditioned resampling for climate projections as in the paper of Gerstengarbe et al. (2013)

- winter storm- and summer thunderstorm-related loss events in *Theoretical and Applied Climatology (TAC)*. *Theoretical and Applied Climatology*, 126, (3): S. 611–615.
- Wessolek, G., W. H. M. Duijnisveld & S. Trinks, 2008. Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. *Journal of Hydrology*, 356: S. 17-27.
- Wessolek, G., M. Kaupenjohann & M. Renger, 2009. Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. *Bodenökologie und Bodengenese*, Technische Universität Berlin, Berlin. 80 S.

HEFT **39.18**



M³ – Messen, Modellieren, Managen
in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018
an der Technischen Universität Dresden

Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Grundmann (Herausgeber)



Hydrologische Wissenschaften

Fachgemeinschaft in der DWA

HEFT **39.18**

M³ – Messen, Modellieren, Managen
in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018
an der Technischen Universität Dresden

Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Grundmann (Herausgeber)

Veranstalter:

- ≈ Technische Universität Dresden, Professur für Hydrologie
- ≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), Hennef
- ≈ Hauptausschuss Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der DWA
- ≈ Deutsche Hydrologische Gesellschaft

Mitveranstalter:

- ≈ Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie



**Niels Schütze, Uwe Müller, Robert Schwarze, Thomas Wöhling, Jens Grundmann
(Herausgeber)**

M³ - Messen, Modellieren, Managen in Hydrologie und Wasserressourcenbewirtschaftung

**Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2018 an der Technischen Universität
Dresden**

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 39.18

ISBN: 978-3-88721-606-1

DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.39.18

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2018

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Herausgeber:

Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA
Geschäftsstelle
Theodor-Heuss-Allee 17
D – 53773 Hennef
Tel.: 02242/872 – 161
Fax: 02242/872 – 184
info@fghw.de
www.fghw.de

Schriftleitung:

Dr. Christian Reinhardt-Imjela

Umschlaggestaltung:

Dorit Steinberger, Ohlstadt

Univ.-Prof. Dr. Markus Disse
Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA

Dr.-Ing. Uwe Müller
Hauptausschuss Hydrologie und
Wasserbewirtschaftung der DWA

© FgHW – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2018

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeber in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Die wissenschaftliche Richtigkeit der Texte, Abbildungen und Tabellen unterliegt nicht der Verantwortung der Herausgeber.