Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz	Heft 19 (2020)	S. 5–19	10 Fig., 2 Tab. + Anh.	urn:nbn:de:0041-afsv-01910

Scopus Indexed Journal

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – *Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*

www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz

Hydrologische Eigenschaften von Waldhumusformen: Wasserspeicherpotenziale, Wiederbefeuchtungs- und Versickerungsverhalten

Hydrological Properties of forest humus layers: Water storage potential, rewetting and infiltration behaviour

Thomas Heinkele, Dirk Knoche, Rainer Gemballa & Rainer Petzold

Abstract

As periods of drought will increase because of climate change, humus layers on top of mineral soils might provide additional soil water storage capacity especially at sites with limited available soil water capacity in mineral soils. However, information about hydraulic properties of humus layers of forest soils is scarce.

Therefore, humus layers of 41 typical forest stands of the northeastern lowland and adjacent hilly and mountain areas in Saxonia, Germany were investigated. The results show that the Of and Oh layers have very high total pore volumes (> 80 % by volume), are characterized by high field capacity (> 40 % by volume) and high available water capacity (15–30 % by volume). Due to their limited thickness, their contribution to the available water storage capacity in the root area is low. The water storage potentials of humus layers derived from sessile or red oak (Quercus petrea, Quercus rubra) *litter are slightly higher than those from Scots pine* (Pinus sylvestris) *and Norway spruce* (Picea abies).

In addition, humus layers react strongly hydrophobic when dry. We measured the relation of water content versus hydrophobicity of Of and Oh layers systematically and found that pronounced hydrophobic features already occur at water contents far above the permanent wilting point. Of and Oh layers differ only slightly, as well as humus forms from different needle and leaf litter.

The water-repellent properties of the humus layers strongly influence the process of rewetting and infiltration. Continuous water content measurements at five experimental plots show that precipitation events in summer do not rewet humus layers that were dried out and thus developed hydrophobic conditions during dry and warm periods. Nevertheless, the rainwater infiltrates unhindered and seeps into the upper mineral soil without delay. Dry humus deposits are not an infiltration inhibitor due to their extremely high coarse pore contents, at least not on flat sites. Their rewetting often requires longer periods of at least 4 weeks and persistent, evenly distributed rainfall. Therefore, especially during summer dry periods, they do not provide a buffer for precipitation, i.e. just when the greatest need for water exists.

Keywords: *humus layer, water storage, hydrophobic properties, water infiltration*

Zusamenfassung

Angesichts zunehmender Trockenheit im Klimawandel könnten Humusauflagen einen zusätzlichen Bodenwasserspeicher zur Verfügung stellen, insbesondere auf bereits jetzt wasserlimitierten Waldstandorten mit geringer Speicherfähigkeit des Mineralbodens. Über hydrologische Eigenschaften von Humusauflagen ist bisher jedoch noch wenig bekannt.

Deshalb wurden in der vorliegenden Studie die Humusauflagen auf 41 typischen Standorten des nordostsächsischen Tieflandes und des angrenzenden Hügel- und Berglandes experimentell untersucht. Die studierten Of- und Oh-Lagen zeichnen sich durch sehr hohe Gesamtporenvolumen (> 80 Vol.-%), hohe Feldkapazitäten (> 40 Vol.-%) und nutzbare Feldkapazitäten (15–30 Vol.-%) aus. Aufgrund recht geringer Auflagemächtigkeiten ist ihr Beitrag an der nutzbaren Wasserspeicherkapazität des Wurzelraums insgesamt gering. Dabei sind die Wasserspeicherpotenziale von Humusauflagen aus Trauben- bzw. Roteichenstreu geringfügig höher als solche unter Gemeiner Kiefer und Gemeiner Fichte.

Zudem reagieren Humusauflagen bei Austrocknung stark wasserabweisend. So offenbaren die gemessenen Wassergehalts-Hydrophobie-Beziehungen, dass ausgeprägt hydrophobe Merkmale bereits bei Wassergehalten weit oberhalb des permanenten Welkepunktes eintreten. Of- und

Oh-Horizonte unterscheiden sich diesbezüglich nur geringfügig, ebenso Humusformen aus unterschiedlicher Nadel- und Blattstreu.

Die wasserabweisenden Eigenschaften des Auflagehumus haben starken Einfluss auf Wiederbefeuchtungs- und Infiltrationsprozesse. Kontinuierliche Wassergehaltsmessungen an fünf Standorten zeigen, dass Niederschlagsereignisse nach sommerlichen Austrocknungsphasen keine Wiederbefeuchtung der zuvor entwässerten Humusauflagen bewirken. Dennoch infiltriert das Niederschlagswasser ungehindert und sickert ohne Verzögerung in den oberen Mineralboden. Trockene Humusauflagen stellen aufgrund ihrer extrem hohen Grobporengehalte kein Versickerungshemmnis dar, zumindest nicht auf ebenen Standorten. Ihre Wiederbefeuchtung benötigt oft längere Zeiträume von mindestens 4 Wochen und anhaltende, möglichst gleichmäßig verteilte Niederschläge. Daher stellen sie auch während sommerlicher Trockenphasen keinen Zwischenspeicher für Niederschläge dar, also gerade dann, wenn der größte Wasserbedarf besteht.

Schlüsselwörter: Auflagehumus, Wasserhaushalt, Wasserspeicherung, Hydrophobie, Infiltrationseigenschaften

1 Einleitung

Die künftige Anbauwürdigkeit von Gehölzen wird u. a. durch das Wasserdargebot für die Transpiration bestimmt (Knoche et al. 2012). Nach dem seit 1960 beobachteten Temperaturanstieg (Bernhofer et al. 2015) und einschlägigen Klimaszenarien ist davon auszugehen, dass die pflanzenverfügbare Wassermenge in der Vegetationsperiode zurückgeht, während die unproduktiven Verdunstungsverluste durch Interzeption und Evaporation angesichts höherer Temperaturen und geringerer Niederschlagsintensitäten im Sommerhalbjahr zunehmen (Eisenhauer et al. 2016).

Die Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers im Wurzelraum gewinnt angesichts dieser Entwicklung an Bedeutung. Das gilt insbesondere für Standorte des sächsischen Tieflands, die bereits heute eine negative klimatische Wasserbilanz während der Vegetationsperiode aufweisen. Aber auch auf Standorten des sächsischen Hügellandes und des Mittelgebirges treten insbesondere im Frühjahr zunehmend negative Wasserbilanzen auf (Bernhofer et al. 2015). Dadurch wird es auch hier wichtiger, ob der Wurzelraum ausreichend Wasser speichert, um in Trockenperioden die klimabedingten Wasserdefizite auszugleichen.

Hydrologische Eigenschaften von Mineralböden, insbesondere die Höhe der pflanzenverfügbaren Wasserspeicherung, werden auf Grundlage der forstlichen Standortskartierung abgeleitet oder aus Daten des bodenkundlichen und forstlichen Umweltmonitorings über Pedotransferfunktionen berechnet und gegebenenfalls unter waldbaulichen Gesichtspunkten weiter klassifiziert (z. B. Puhlmann & von Wilpert 2011, Petzold et al. 2016). Nur selten werden bisher die Wasserspeicherpotenziale von Humusauflagen berücksichtigt (Konopatzky 2012). Das hat verschiedene Ursachen. Einerseits fehlen aktuelle, hochauflösende Informationen zur Ausprägung von Humusauflagen. Zum anderen sind die Kenntnisse über die Wasserspeicherpotenziale und das Infiltrationsverhalten von Humusauflagen noch lückenhaft. Die Ableitung der Wasserspeicherpotenziale von Humusauflagen erfordert, ähnlich wie im Boden, die Bemessung ihrer Porengrößenverteilungen. Systematische Untersuchungen dazu liegen, auch aufgrund methodischer Schwierigkeiten bei der Probennahme und den laboranalytischen Arbeiten erst seit den letzten Jahrzehnten vor. Greiffenhagen et al. (2006) ermittelten für die überwiegend in oft vergrasten Kiefernforsten gebildeten Moder- und Graswurzelfilzmoder-Humusformen des norddeutschen Tieflandes eine durchschnittliche nFK von 22 Vol.-% (Of) und 26 Vol.-% (Oh). Für stark versauerte Fichtenstandorte im Fichtelgebirge hat Zuber (2007) eine nutzbare Feldkapazität von 32 Vol.-% ermittelt. In flugaschebeeinflussten Standorten der Oberlausitz liegt nach Hartmann et al. (2009) eine nFK von 24 bis 32 Vol.-% vor. Aus diesen in unterschiedlichen Laboruntersuchungen ermittelten Ergebnissen lassen sich für die verschiedenen Humuslagen und für unterschiedliche Humusformen lediglich recht weite Spannen an Schätzwerten ableiten.

Noch weniger ist zur Dynamik der Infiltration und Wiederbefeuchtung von Humusauflagen bekannt. Für diese so bedeutsamen funktionalen Eigenschaften bedarf es einer Kenntnis der hydrophoben Merkmale. Solche Informationen sind nach Ritsema & Decker (1995), Imeson et al. (1992) und Gerke et al. (2001) wichtig, um die Versickerungsprozesse im Auflagehumus zu kennzeichnen. Allerdings hängt die Hydrophobie des Humus stark vom aktuellen Befeuchtungszustand ab und schwankt im Jahresverlauf. Deshalb müssen die hydrophoben Eigenschaften entlang unterschiedlicher Feuchtezustände gekennzeichnet werden (Greiffenhagen 2005).

Schließlich ist es notwendig zu prüfen, ob die unter kontrollierten Laborbedingungen ermittelten hydrologischen Eigenschaften einfach ins Feld übertragen werden können oder weitere Prozesse berücksichtigt werden müssen. Weiterführende Untersuchungen durch Keith (2008), Keith et al. (2010), Schaap et al. (1997), Johnson et al. (2013), Raaflaub & Veleo (2009), Rasoulzadeh & Ghoorabjiri (2014), Laurén & Mannerkoski (2001), Guevera-Escobar et al. (2007) sowie Li et al. (2013) belegen: Streuauflagen weisen im Jahresverlauf sehr unterschiedliche Wassergehalte auf, sie spielen beim Versickerungsprozess eine wichtige Rolle und sie können für den lateralen Wassertransport bedeutsam sein. Allen genannten Beiträgen ist gemein, dass sie die Feuchte von Humusauflagen zwar kontinuierlich aufzeichnen, allerdings nur für maximal eine Vegetationsperiode. Untersuchungen über mehrere Vegetationsperioden fehlen bisher.

Die vorliegende Studie fasst die Ergebnisse mehrjähriger Labor- und Felduntersuchungen zusammen und orientiert sich an folgenden Fragen:

1. Welche Wasserspeicherpotenziale besitzen typische Humusauflagen in mittelalten Kiefern- (*Pinus sylvestris* L.), Eichen- (*Quercus petraea* Liebl., *Quercus rubra* L.) und Fichtenbeständen (*Picea abies* L.) unter sächsischen Standortsbedingungen?

2. Wie beeinflusst die Hydrophobizität die Wasserspeicherpotenziale unter verschiedenen Standorts- und Bestandessituationen?

3. Können die in den Laborversuchen ermittelten hydrologischen Eigenschaften von Waldhumusformen auch unter Feldbedingungen nachvollzogen und somit für praktische Anwendungen empfohlen werden?

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiete und Standorte

Insgesamt wurden die hydrologischen Humuseigenschaften von 41 Standorten in den sächsischen Standortsregionen Tiefland (n = 29) und Mittelgebirge/Hügelland (n = 12) untersucht. Abbildung 1 fasst die unterschiedlichen Standorts- und Bestandeseigenschaften zusammen. Die teils podsolierten Braunerden des Tieflandes bestehen überwiegend aus sandigem Substrat. Die Braunerden im Mittelgebirge/Hügelland, ebenfalls teilweise podsoliert, haben sich überwiegend aus den Verwitterungssubstraten saurer bis intermediärer Gesteine (Gneis, Granit, Porphyr) entwickelt. Die 12 Kippenböden befinden sich auf Rekultivierungsflächen des Lausitzer Braunkohlebergbaus.

Während von allen 41 Standorten Humusproben für die laboranalytische Bearbeitung entnommen wurden, erfolgte die kontinuierliche Beobachtung der Wassergehalte im

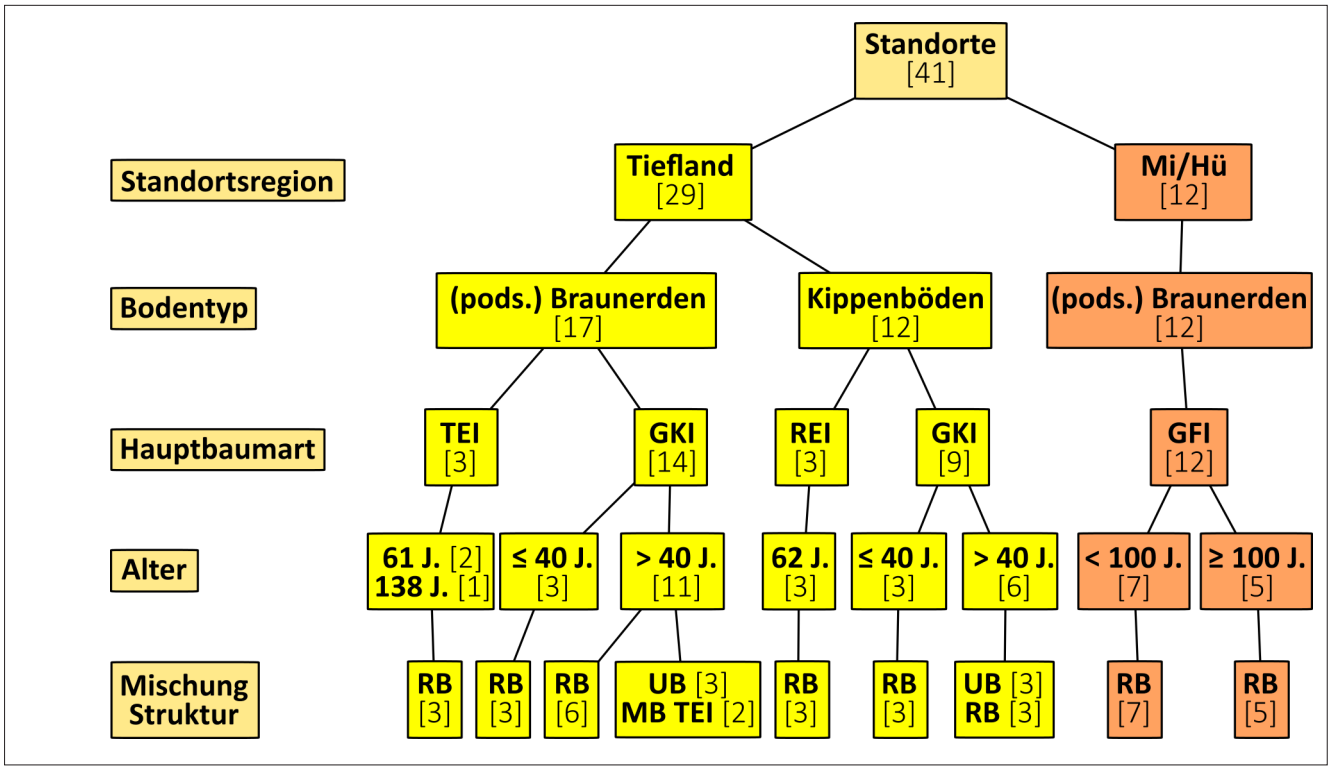

Abb. 1: Gruppierung der Untersuchungsflächen nach Standorts- und Bestandeseigenschaften [Anzahl] (Mi/Hü = Mittelgebirge/Hügelland, GKI = *Pinus sylvestris*, TEI = *Quercus petraea*, REI = *Quercus rubra*, GFI = *Picea abies*, RB = Reinbestand, UB = Umbaubestand mit Voranbau aus Laubgehölzen, MB = Mischbestand).

Fig. 1: *Sites of investigation, grouped according to areas (Tiefland = Lowland; Mi/Hü = lower mountain range/hilly region), soil conditions (pods. Braunerden = podzolic cambisols; Kippenböden = soils on dumps), tree species, age and tree species mixture (RB = pure stands; UB, MB TEI = mixed broadleaved/coniferous stands).*

Tab. 1: Standorte für die kontinuierliche Beobachtung der Wassergehaltsentwicklung in der Humusauflage.

Tab. 1: *Site description of measurement plots.*

Standort	Rechts-/Hochwert, Standortsregion, Bodenform, Bestand (Alter), Humusform
Mockrehna	4554362/5710114, Tiefland, Sand-Braunerde, lockerer GKI-Reinbestand (75 Jahre), Graswurzelfilz-Moder
Roitzsch	4555032/5716477, Tiefland, Sand-Braunerde, TEI-Reinbestand (61 Jahre), feinhumusreicher rohhumusartiger Moder
Laubusch	4651023/5706979, Tiefland, Kippsand-Regosol, GKI-Reinbestand (62 Jahre), feinhumusreicher rohhumusartiger Moder
Bautzen	4678671/5667980, Hügelland, lössbeeinflusste Braunerde aus Granitverwitterung, GFI-Reinbestand (90 Jahre), feinhumusreicher Moder
Cunnersdorf	4647682/5634928, Hügelland, lössbeeinflusste Braunerde aus Sandsteinverwitterung, GFI-Reinbestand (90 Jahre), feinhumusreicher rohhumusartiger Moder

Jahresverlauf an fünf verschiedenen Standorten (Tab. 1). Die Reliefposition der Messfelder dieser Untersuchungsflächen war eben bis sehr schwach geneigt.

2.2 Probennahme und Felduntersuchungen

Die Humusansprache und -beprobung zur Vorratsermittlung erfolgte auf allen Flächen mittels Murach´schem Wurzelbohrer auf 50 cm² Beprobungsfläche. Das Probennahmedesign folgte den methodischen Vorgaben der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (Ansprache und Beprobung von 8 Satelliten auf einem Umkreis von 10 m Durchmesser um einen Zentralpunkt = Bodenprofil). Es wurden jeweils nur die Of- und Oh-Horizonte beprobt.

Die Proben für die bodenphysikalischen Untersuchungen wurden an flachgründigen Profilgruben entnommen. Die ungestörten Humusproben wurden mittels 2 cm hoher Stechzylinder (50 cm³ Inhalt) getrennt nach Of- und Oh-Horizont in jeweils 6-facher Wiederholung entnommen. Dazu wurden die geschärften Stechzylinder von oben vorsichtig durch Drehbewegung in den Humuskörper eingeschnitten. An einigen Standorten mit Blaubeere verhinderten Grobwurzeln diese Art der Beprobung. Dort wurde ein größerer Ausschnitt des Humusprofils und des oberen Mineralbodens vorsichtig mit dem Spaten gelöst und in ungestörter Lagerung in einen Container (30 x 45 cm) überführt, anschließend im Labor angefeuchtet und eingefroren. Aus dem gefrorenen Humuskörper wurden dann mittels einer Lochsäge passende Proben geschnitten und in Stechzylinder überführt.

Die kontinuierliche Messung der Wassergehalte in der Humusauflage und im Mineralboden der 5 ausgewählten Flächen erfolgte jeweils in einem Messfeld von 2 m x 3 m. In diesen Messfeldern wurden FDR-Sonden (SM 150, Delta-T-Devices) in der Of- und Oh-Lage in jeweils dreifacher Wiederholung installiert. Die Sensoren wurden jeweils vertikal und mittig positioniert. Im oberen Mineralboden (A-Horizont) befanden sich die Messfühler 5 cm tief in horizontaler Einbaulage. Das Messintervall betrug 5 Minuten. In Vorversuchen wurden die FDR-Sonden im Labor für die Messung im Auflagehumus kalibriert. Unmittelbar neben den Messfeldern wurde ein Niederschlagsmesser installiert (RG 2, Delta-T-Devices).

Die Feldmessungen erfolgten in den Jahren 2014 bis 2017 (Standorte Mockrehna und Roitzsch), 2014 bis 2015 (Laubusch) und 2016 bis 2017 (Bautzen, Cunnersdorf).

2.3 Labormethoden

Die Bestimmung der wichtigsten bodenphysikalischen Kennwerte der gewonnenen Proben erfolgte nach Standardmethoden im Labor oder wurde über Pedotransferfunktionen abgeleitet (Tab. 2).

Die Hydrophobizität der Humusauflagen und des oberen Mineralbodens wurden an ungestörten Proben mittels Messung der Wassertropfen-Eindringzeit (Water-Drop-Penetration-Time; WDPT-Test) nach Letey et al. (2000) untersucht. Hierzu wurden jeweils drei Tropfen demineralisiertes Wasser mittels einer Pipette auf jede Probe getröpfelt und die Zeit gemessen, die jeder einzelne Tropfen benötigt, um in die Probe zu versickern. Die gemessene Eindringzeit diente der Einteilung in Hydrophobizitäts-Klassen (Dekker et al. 2009). Um die sehr verschiedenen im Freiland auftretenden Feuchtezustände nachbilden zu können, wurde der WDPT-Test ebenfalls unter

Tab. 2: Untersuchungsmethoden zur Kennzeichnung physikalischer Bodeneigenschaften des Humus und des oberen Mineralbodens.

Tab. 2: *Methods of soil physical investigations of humus layers and mineral topsoils.*

Untersuchungs-parameter	Untersuchungsmethode	Modifikation, Methodenanpassung
Humusmasse	DIN ISO 11465	Trocknung 60 °C, Berechnung des Humusvorrates
C-Vorrat	Bestimmung von C_{org} DIN ISO 10694	Berechnung des C_{org}-Vorrates aus Humusmasse und C_{org}-Gehalt
pF/WG-Funktion der Humusauflagen	DIN ISO 11274, pF 0–2, im Sandbad, Unterdruck; pF 2,5; 3,0 und 4,2 auf keramischen Platten, Überdruck	Bestimmung von GPV mittels WG bei pF 0, Verwendung von 50 cm³ Stechzylindern
GPV, FK, nFK, PWP Mineralboden 0–30 cm	DIN ISO 11274, Berechnung von GPV aus TRD und d_F, pF 1,8 im Sandbad, Unterdruck; pF 4,2 keramische Platten, Überdruck	Berechnung von d_F aus Dichte der min. Substanz (2,65 g/cm³), Dichte der org. Substanz (1,30 g /cm³) und Gehalt an org. Substanz; Einbeziehung von Grobbodengehalten in die Ermittlung der hydrologischen Kenngrößen
Korngrößenverteilung 7 Fraktionen	DIN 19683-2	Ableitung von Kenngrößen des Wasserhaushalts (Renger et al. 2009) in den Mineralböden [0–30 cm] Untersuchungsstandorte, an denen keine Gewinnung von Stechzylinderproben möglich war

GPV = Gesamtporenvolumen, FK = Feldkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, TRD = Trockenrohdichte, d_F = Dichte der Festsubstanz, pF = $\log_{10}$ der Bodensaugspannung (hPa), WG = Wassergehalt

unterschiedlichen Feuchtebedingungen durchgeführt. Dabei erfolgte zunächst die schrittweise Entwässerung der Proben auf Sandbädern und in den Überdrucktöpfen der pF/WG-Anlage. Dabei wurde mit den üblichen pF-Stufen 1,0; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5 und 3,0 entwässert. Anschließend wurden die ungestörten Proben bei 25 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % über fünf Tage zur Lufttrocknung gebracht, danach bei 105 °C zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach jedem Entwässerungsschritt erfolgte eine Massebestimmung für die Rückrechnung des Wassergehalts (Vol.-%) und der WDPT-Test. Aus diesen Daten wurden Wassergehalts-Hydrophobie-Funktionen hergeleitet.

3 Ergebnisse & Diskussion

3.1 Humusformen, Mächtigkeit der Humusauflagen und Humusvorräte

Trotz unterschiedlicher Ausgangsbedingungen wurden auf den untersuchten Standorten mit typischem und rohhumusartigem Moder insgesamt ähnliche Humusformen angetroffen. Auch die Humusmächtigkeiten unterscheiden sich nur wenig. Die Humusvorräte der organischen Auflagen (ohne Streuschicht) liegen mit rund 100 bis 180 t/ha bzw. umgerechnet in organische Kohlenstoffvorräte zwischen 30 und 60 t/ha (elektronischer Anhang, Tab A1). Damit werden die aktuellen Ergebnisse der Bodenzustandserhebung II auf ähnlichen Standorten in Nordostdeutschland bzw. im sächsischen Hügel- und Bergland bestätigt (vgl. Jacob & Andreae 2018, Grüneberg et al. 2014).

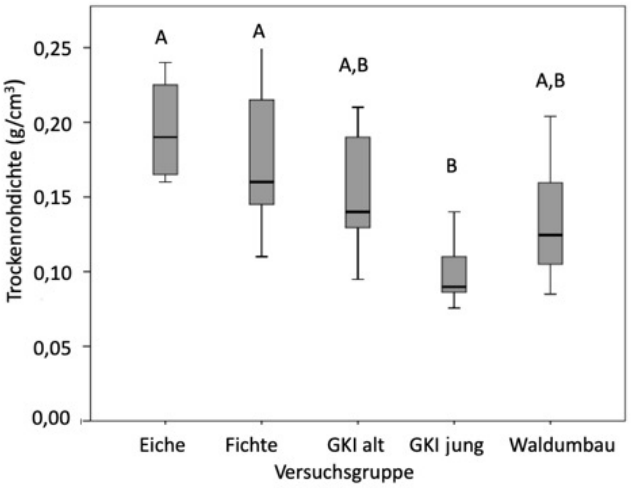

Abb. 2: Trockenrohdichte der Of-Lagen unterschiedlicher Versuchsgruppen.

Fig. 2: *Oven-dry densities of Of layers in different experimental groups.*

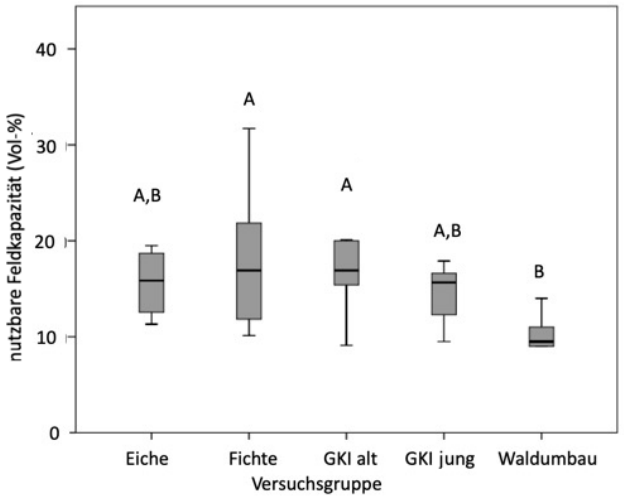

Abb. 3: Nutzbare Feldkapazität in Of-Lagen unterschiedlicher Versuchsgruppen.

Fig. 3: *Available water capacity (% by volume) of Of layers in different experimental groups.*

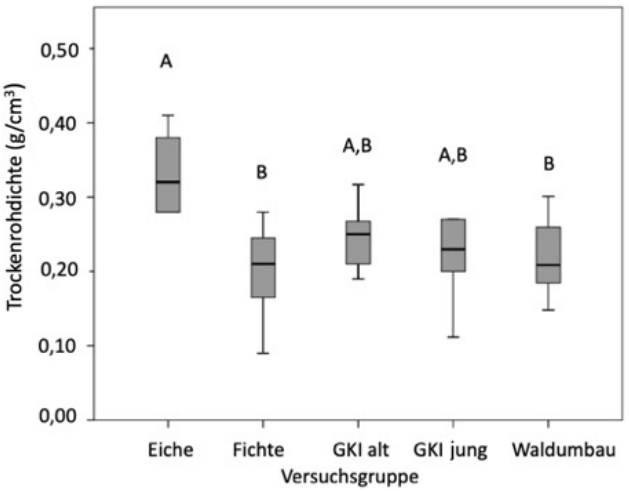

Abb. 4: Trockenrohdichte in Oh-Lagen unterschiedlicher Versuchsgruppen.

Fig. 4: *Oven-dry density of Oh layers in different experimental groups.*

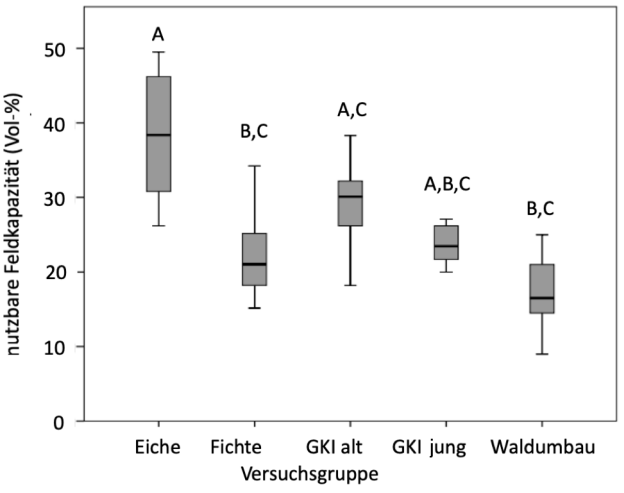

Abb. 5: Nutzbare Feldkapazität in Oh-Lagen unterschiedlicher Versuchsgruppen.

Fig. 5: *Available water capacity (% by volume) of Oh layers in different experimental groups.*

3.2 Bodenhydrologische Kennwerte der Humusauflagen

Die Trockenrohdichten der Of-Horizonte sind mit häufigen Werten zwischen knapp unter 0,1 g/cm³ und rund 0,2 g/cm³ signifikant geringer als im Oh-Horizont (Abb. 2, 4). In den Oh-Horizonten sind die Trockenrohdichten der Versuchsgruppe „Eiche“ signifikant höher als die Fichten- und die Waldumbaubestände, während zwischen den anderen Versuchsgruppen kaum Unterschiede bestehen (Abb. 4).

Das Gesamtporenvolumen (GPV) ist auf allen Standorten hoch, häufig über 80 Vol.-%. Die Größenordnungen zwischen Of- und Oh-Lagen ähneln sich. Lediglich die Versuchsgruppe Misch-/Umbaubestände weist mit etwas mehr als 60 Vol.-% signifikant geringere Grobporengehalte auf. Darüber hinaus wurden zwischen unterschiedlichen Versuchsgruppen kaum Unterschiede beim GPV festgestellt (vgl. Anhang Tab. A2 bis A4). Die Feldkapazitäten (FK) sind in den Oh-Lagen mit rund 40 Vol.-% signifikant höher als in den Of-Lagen mit 29 Vol.-% bis maximal 36 Vol.-%. Auch die nutzbare Feldkapazität (nFK) der Oh-Lage ist im Mittel rund 10 Vol.-% höher als in der Of-Lage (Abb. 3, 5). Weitere Unterschiede sind zwischen den unterschiedlichen Bestandestypen festzustellen. So ist die nFK in Oh-Horizonten von Eichenbeständen höher als in Fichten- bzw. Umbau-/Mischbeständen (Abb. 5). Of-Horizonte in Waldumbaubeständen weisen im Vergleich zu den anderen Versuchsgruppen die geringste nFK auf (Abb. 4).

Die den Abbildungen 2–5 zugrunde liegenden Messergebnisse, weitere Untersuchungsergebnisse sowie statistische Kennwerte (Mediane, Spannweiten, Aussagen zur Signifikanz) sind im Anhang aufgeführt (Anhang, Tab. A2 bis A4).

Höhere Trockenrohdichten der Oh- im Vergleich zu den Of-Horizonten werden u. a. von Greiffenhagen (2005), Bergmann (1998) und Weissdorfer (1999) dargestellt. Die Trockenrohdichten der Versuchsgruppe der Kiefern liegen dabei in dem Wertebereich, wie er auch von Greiffenhagen et al. (2006) als charakteristisch angesehen wird.

Die Versuchsgruppe der Kiefernbestände weist insgesamt ähnliche Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilungen und damit auch ähnliche nutzbare Feldkapazitäten auf, wie in den Studien von Greiffenhagen (2005) und Greiffenhagen at al. (2006) für vergleichbare Standorte beschrieben wird. Auch die nFK der untersuchten Fichtenstandorte ähneln den Vergleichswerten aus der Literatur (Zuber 2007).

In Abbildung 6 ist der Beitrag der Humusauflage zur nutzbaren Wasserspeicherkapazität (nWSK) des Wurzelraums (hier bis 80 cm Mineralbodentiefe) als integrierende Größe für die forstliche Bewertung dargestellt. So weist der Kipp-Regosol am Standort Laubusch mit einer nWSK von nur 45 mm ein erheblich geringeres Wasserspeichervermögen auf als die podsolierte Braunerde am Standort Mockrehna (Geschiebedecksand über Schmelzwassersand) mit 79 mm nWSK und die Braunerde (Lösslehm-Granitgrus-Fließerde) am Standort Bautzen mit einer nWSK von 105 mm (siehe Abb. 4). In gleicher Richtung nimmt die nWSK der Humusauflage von ca. 15 mm am Standort Laubusch bis auf 8 mm am Standort Bautzen ab. Einen relevanten Beitrag zur nWSK liefern die Humusauflagen lediglich auf locker gelagerten, kiesigen Reinsanden auf Rekultivierungsflächen des Lausitzer Braunkohlenbergbaus (Standort Laubusch).

3.3 Hydrophobe Merkmale des Auflagehumus

Die hydrophoben Eigenschaften des Auflagehumus sind in Abbildung 7 dargestellt. Zwischen Of- und Oh-Lagen bestehen hinsichtlich der Ausbildung von Hydrophobizität mit zunehmender Austrocknung kaum Unterschiede. Im Feuchtebereich zwischen rund 30 und 20 Vol.-% weisen die Humusauflagen moderat wasserabweisende Eigenschaften auf. Aber noch bevor die Humusauflagen trocken sind (ab < 15 Vol.-% Wassergehalt, entsprechend dem Wassergehalt am PWP), steigt die Hydrophobie deutlich an und die Auflage wird stark wasserabweisend. Danach sind Humusauflagen bereits ausgeprägt hydrophob, auch wenn sie nach der Klassifikation der KA5 (AG Bodenkunde (2005) Tabelle 17) noch als schwach feucht gelten.

In den Humusauflagen der Kiefern-Standorte Mockrehna und Roitzsch wurden im Bereich des permanenten Welkepunktes bei 10 bis 12 Vol.-% Versickerungszeiten um 2.000 bis 3.000 Sekunden festgestellt. Auf den Fichtenstandorten liegen

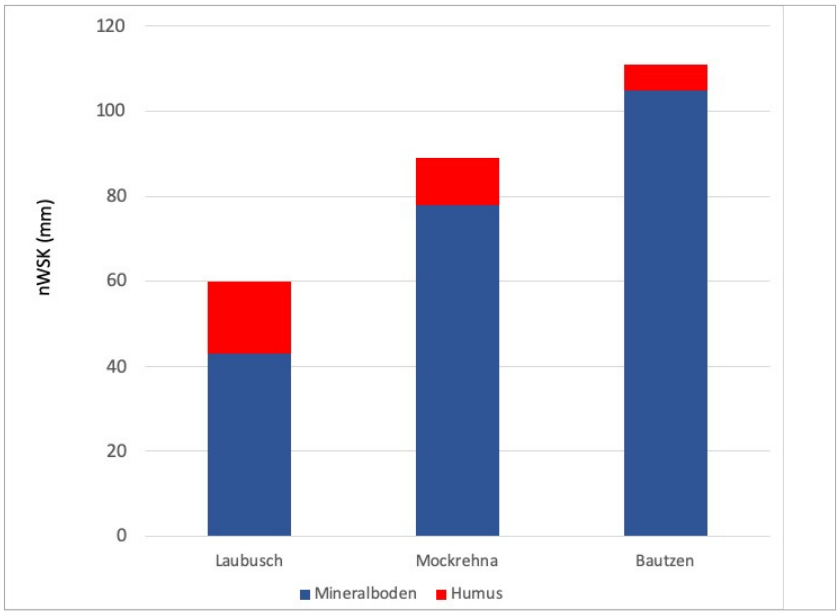

Abb. 6: Nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK in mm) in der Humusauflage und im Mineralboden bezogen auf 80 cm Profiltiefe an den drei Untersuchungsstandorten Laubusch, Mockrehna und Bautzen.

Fig. 6: *Available water capacity (nWSK in mm) of humus layers and mineral soil (80 cm soil depth) at the investigated plots at Laubusch, Mockrehna and Bautzen.*

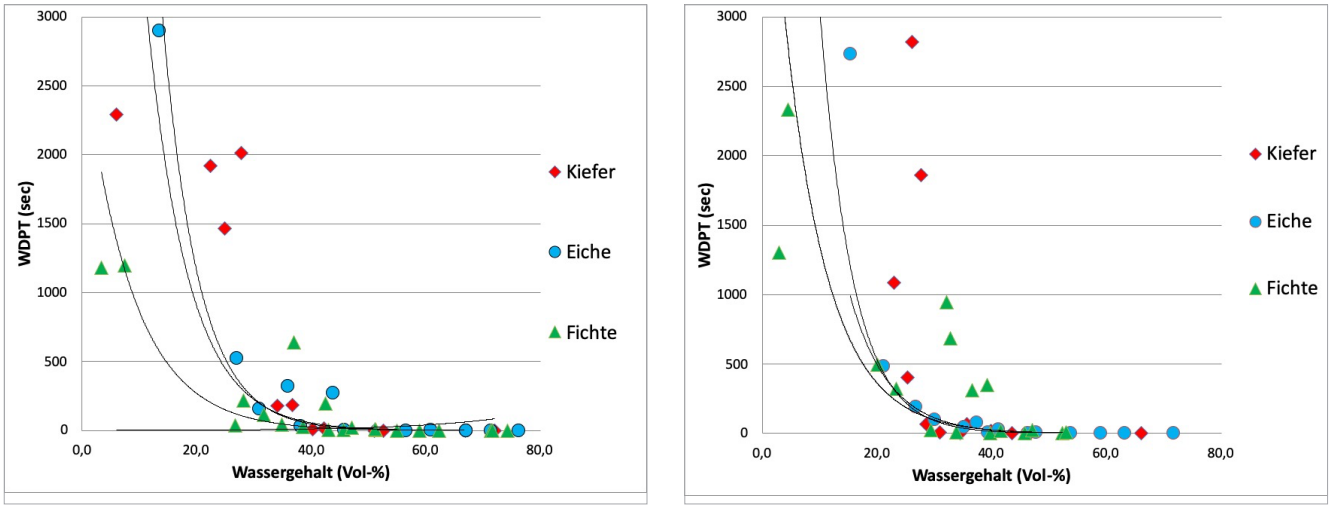

Abb. 7: Beziehungen zwischen Wassergehalt und Wassertropfen-Eindringzeit (WDPT) von Of-Lagen (links) und Oh-Lagen (rechts) von Kiefer (Standort Mockrehna), Eiche (Roitzsch) und Fichte (Bautzen).

Fig. 7: *Relation water content and Water Drop Penetration Time (WDPT) of Of layers (left) and Oh layers (right) of pine (site Mockrehna), oak (Roitzsch) and spruce (Bautzen).*

diese hingegen überwiegend unter 1.500 Sekunden. Damit steigt die Hydrophobizität mit zunehmender Austrocknung der Oh-Lagen von Kiefern- und Traubeneichenstreu stärker als in den Oh-Lagen unter Gemeiner Fichte.

Die bestehenden Zusammenhänge zwischen Wassergehalten und eintretender Hydrophobie wurden durch Exponentialfunktionen ausgeglichen (Abb. 7), mit Bestimmtheitsmaßen (r^2) von > 0,8 in den Oh-Horizonten und zwischen 0,58 (Fichte) und 0,89 (Eiche) in den Of-Horizonten.

Die hier beobachteten Wassergehalts-Hydrophobie-Beziehungen ordnen sich gut in die wenigen, vorliegenden Literaturdaten ein. Die Beobachtung von Greiffenhagen (2005), dass bei Wassergehalten oberhalb der Feldkapazität keine oder allenfalls schwache Hydrophobie besteht, wird hier bestätigt. Nach Greiffenhagen (2005) erfolgt ein scharfer Anstieg der Hydrophobie nach Unterschreiten eines Wassergehaltes von ca. 20–30 Vol.-%. In diesem Bereich liegt auch bei den hier untersuchten Humusproben der Umschlag von allenfalls moderat hydrophob zu stark hydrophob.

3.4 Verlauf von Wassergehalten auf den Versuchsflächen

Die kontinuierlich gemessenen Wassergehalte im Auflagehumus und im oberen Mineralboden auf den Versuchsflächen lassen Rückschlüsse auf die Funktionen von Humusauflagen im Standortwasserhaushalt zu:

An den beiden Standorten Mockrehna (Abb. 8) und Bautzen (Abb. 9) erreichen die Wassergehalte während der Aufsättigungsphasen im Messjahr 2017 in den Oh-Horizonten mit knapp über ca. 30 Vol.-% (Mockrehna, Dezember 2017) bzw. knapp unter 30 Vol.-% (Bautzen, April 2017) Werte, die deutlich unterhalb der unter Laborbedingungen gemessenen FK (42 Vol.-% am Standort Mockrehna, 39 Vol.-% am Standort Bautzen) liegen. Während der sommerlichen Austrocknungsphase werden Wassergehalte erreicht, die die im Labor gemessenen Totwassergehalte unterschreiten. Ähnlich abweichende Verhältnisse liegen auch in den Of-Horizonten vor. Dieses impliziert, dass in dem Messzeitraum 2017 die tatsächlich im Bestand verfügbare Wasserspeicherung in den Humusauflagen unter den im Labor ermittelten Wasserspeicherpotenzialen (nFK-Werte) liegt.

Am Standort Cunnersdorf (Abb. 10) hingegen überschreiten die Wassergehalte im Oh-Horizont während der Aufsättigungsphasen die im Labor ermittelten Wasserspeicherpotenziale für die Fichtenstandorte erheblich. Bis in den Frühsommer hinein ist der Oh-Horizont aufgrund höherer Niederschläge und der geringeren hydraulischen Leitfähigkeit des Mineralbodens wassergesättigt. Selbst im Hochsommer werden an diesem Standort im Oh-Horizont zu keiner Zeit Wassergehalte unterhalb des im Labor ermittelten PWP gemessen. Der Verlauf des Oh-Wassergehaltes an diesem Standort verdeutlicht noch stärker als an den beiden anderen Standorten, dass die an Stechzylindern ermittelten Bodenwasserhaushaltsparameter der Humusauflagen die tatsächlich im Bestand anzutreffenden hydrologischen Merkmale und Dynamiken kaum wiedergeben.

Abhängig von den Versuchsflächen ist die Wiederbefeuchtungsdynamik während feuchter und trockener Phasen jeweils unterschiedlich. Im Frühjahr bei Wassergehalten über 15 bzw. 20 Vol.-% kann aufgrund der ermittelten Wassergehalts/Hydrophobiefunktionen von einer weitgehend hydrophilen Humusauflage ausgegangen werden (vgl. Abb. 7). Entsprechend steigen die Wassergehalte in den Humusauflagen und auch in den Mineralböden nach Niederschlägen sofort an (siehe Abb. 8, 9 und 10, jeweils unten links). Nach starker sommerlicher Austrocknung an den Standorten Mockrehna und Bautzen ist hingegen von stark wasserabweisenden Bedingungen in den Humusauflagen auszugehen. In diesen Phasen durchsickern die Niederschläge die Humusauflagen, ohne diese zu befeuchten (siehe Abb. 8 und 9, unten rechts). Am niederschlagsreicheren Standort Cunnersdorf trocknet während des Frühsommers lediglich der Of-Horizont bis in den hydrophoben Bereich ab, der Oh-Horizont verbleibt mit sommerlichen Wassergehalten um 30 Vol.-% immer im hydrophilen Bereich. Entsprechend durchsickern sommerliche Niederschläge den hydrophoben Of-Horizont, befeuchten hingegen den nicht wasserabweisenden Oh-Horizont (siehe Abb. 10, unten rechts).

Die Wasserinfiltration in den Mineralboden wird durch trockene, hydrophobe Humusauflagen nicht behindert. Nach Niederschlägen steigen die Wassergehalte im Mineralboden auf allen drei Versuchsstandorten an. Offensichtlich enthalten die Humusauflagen ausreichend Grobporen (bis zu 40 %, siehe Tab. A2), in denen der Sickerwasserfluss trotz wasserabweisender Eigenschaften der Matrix erfolgen kann.

Bei ähnlichen hydrophoben Eigenschaften und ähnlichen Austrocknungsbedingungen verhalten sich auch die Auflagen unter Kiefern- und Fichtenstreu (sowie unter Eichenstreu, hier nicht dargestellt) sehr ähnlich. Die einmal ausgetrockneten Humusauflagen zeigen aufgrund hydrophober Eigenschaften keine oder eine nur stark verzögerte Wiederbefeuchtung. Sie stellen jedoch kein Hindernis für die Versickerung dar. Damit werden die im Labor festgestellten hydrologischen Eigenschaften (Wasserspeicherpotenziale, hydrophobe Merkmale) prinzipiell bestätigt. Eine Übernahme von absoluten im Labor bestimmten Kennwerten in praktische Anwendungen, um Wasserspeicherpotenziale und hydrologische Prozesse besser zu beschreiben, ist derzeit nur mit Einschränkungen möglich. Für Fragen des Bestandeswasserhaushaltes,

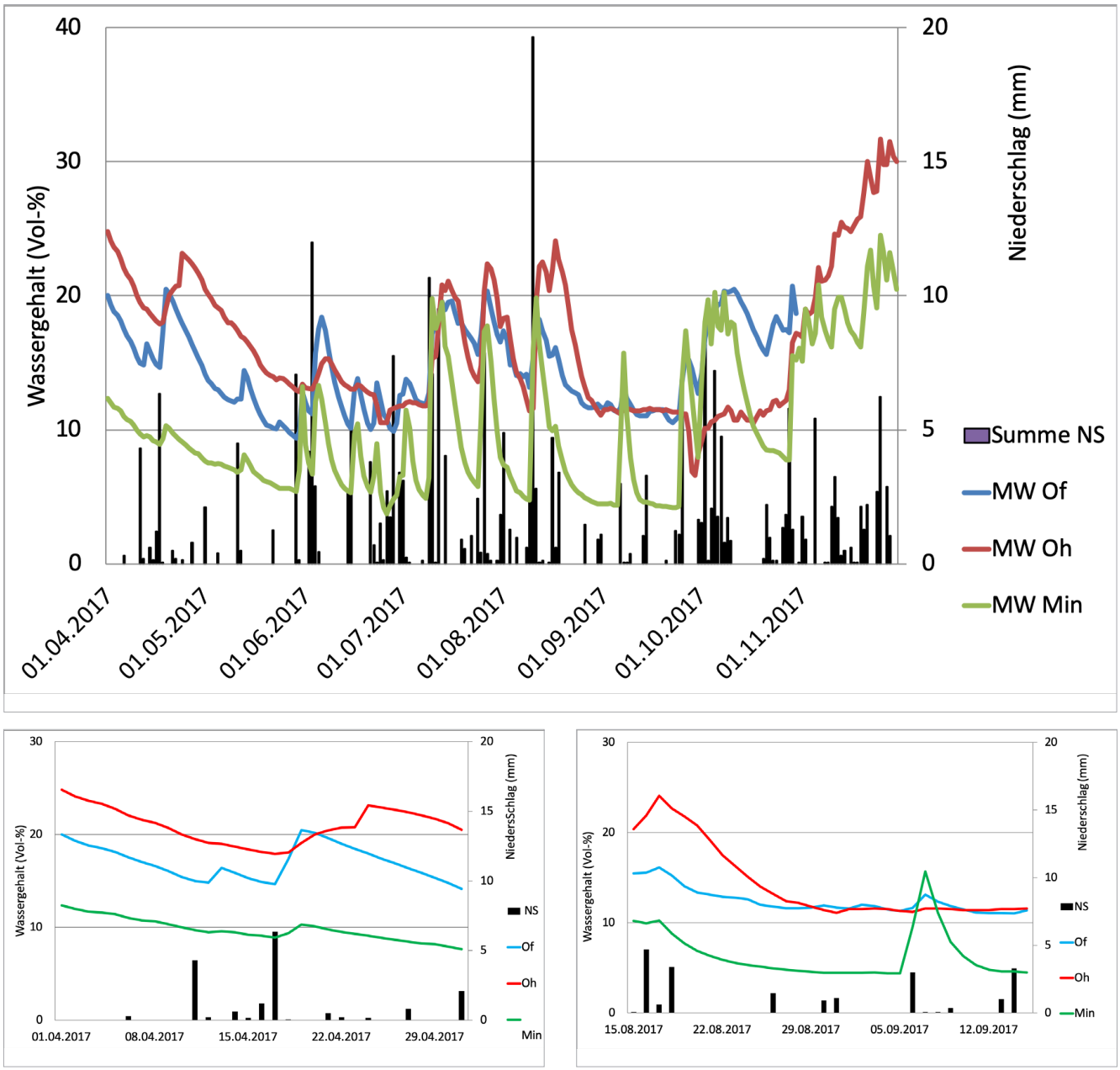

Abb. 8: Verlauf der Wassergehalte im Of- und Oh-Horizont, im Oberboden sowie Bestandesniederschlag am Standort Mockrehna vom 01.04. bis 30.11.2017 (obere Abbildung).

Die Detailabbildungen zeigen unten links den Beginn der Vegetationsperiode bei frischen Feuchtezuständen sowie unten rechts die Austrocknung im Spätsommer.

Fig. 8: *Water content in the Of and Oh horizon and in the mineral topsoil and precipitation at the site Mockrehna from 01.04. until 30.11.2017 (top picture).*

The pictures below show in detail the moist conditions in the early vegetation period (left) and the dry conditions in late summer (right).

beispielsweise für die Berücksichtigung der Speicherleistung von Humusauflagen in Wasserhaushaltsmodellen, sind unterschiedliche Szenarien zu berücksichtigen: Zu Beginn einer Vegetationsperiode kann im Auflagehumus von Wassergehalten nahe der Feldkapazität ausgegangen werden. Das gespeicherte Wasser steht also auch für die Transpiration zur Verfügung. Ob und wie die Speicherkapazität nach Austrocknung modellseitig zu berücksichtigen ist, hängt jedoch von der erreichten Austrocknung ab. Die Feldmessungen zeigen, dass ab einer längeren Unterschreitung des Wassergehalts von etwa 15 Vol.-% nach einzelnen Niederschlagsereignissen keine oder fast keine Wiederbefeuchtung des Auflagehumus stattfindet. Anhand der Laboruntersuchungen zur Hydrophobie lässt sich dieser Kipppunkt bei einem Wassergehalt um 20 Vol.-% verorten. Das organische Material büßt also unterhalb dieser Kipppunkte sein Wasserspeichervermögen ein. Diese Schwelle liegt nahe am permanenten Welkepunkt bzw. bei pF 4,2. Demnach sollte die Humusauflage dann als potenzieller Wasserspeicher für Niederschläge modellseitig nicht berücksichtigt werden. Nur bei Wassergehalten oberhalb des PWP wäre die Humusauflage darin zu beachten. Damit wird das von Greiffenhagen (2005) gezeigte, durch den

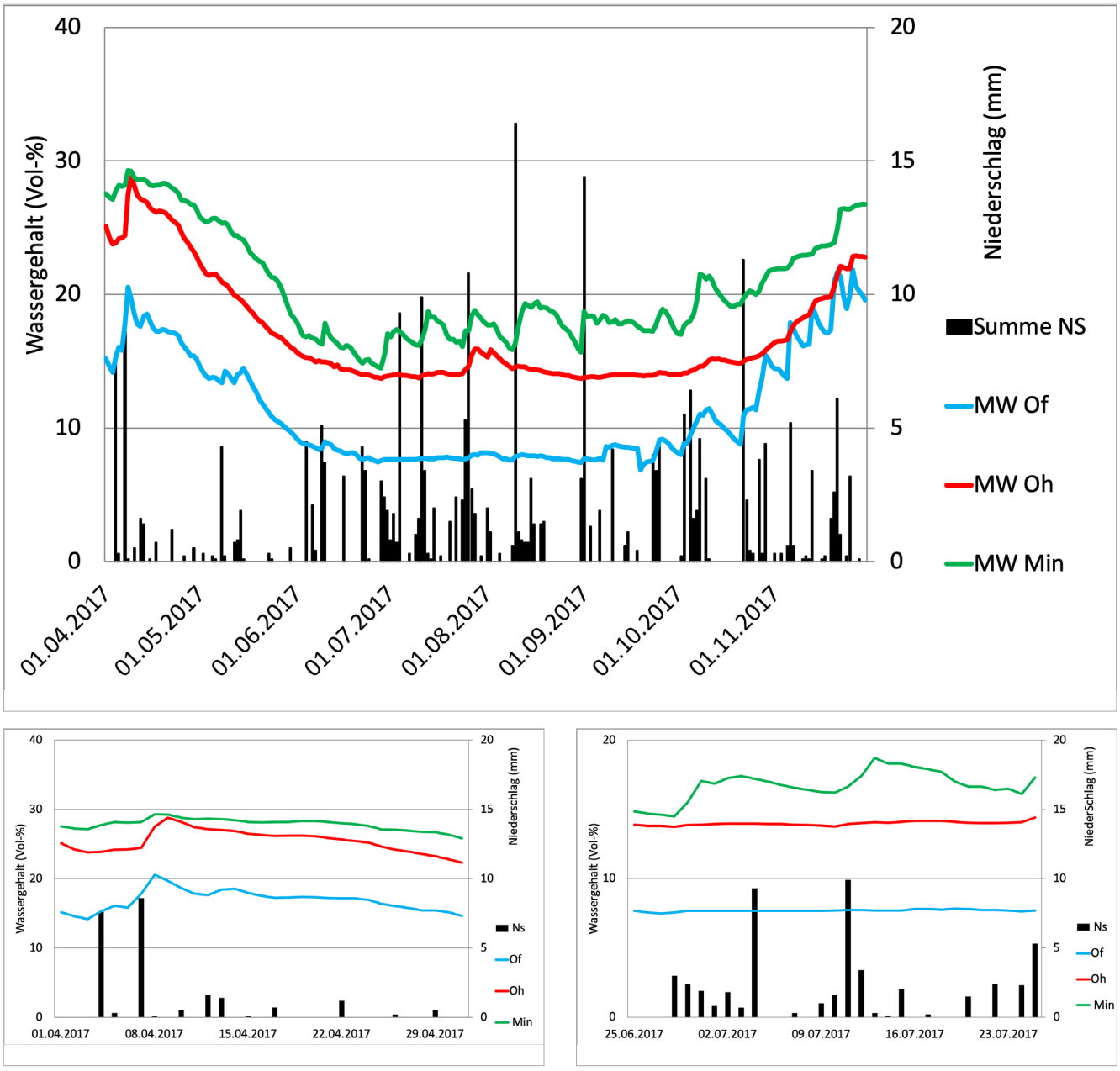

Abb. 9: Verlauf der Wassergehalte im Of- und Oh-Horizont, im Oberboden sowie Bestandesniederschlag am Standort Bautzen (vom 01.04. bis 30.11.2017).

Die Detailabbildungen zeigen unten links den Beginn der Vegetationsperiode bei frischen Feuchtezuständen und unten rechts eine Trockenperiode im Hochsommer.

Fig. 9: *Water content in the Of and Oh horizon and in the mineral topsoil and precipitation at the site Bautzen from 01.04. until 30.11.2017 (top picture).*

The pictures below show in detail the early vegetation period with moist conditions (left) and a dry period in summer (right).

Jahresgang der hydrophoben Eigenschaften bestimmte hydrologische Verhalten von Humusauflagen aus Kiefernstreu bestätigt und kann auch auf Humusauflagen aus anderer Streuzusammensetzung übertragen werden. Wessolek et al. (2007) demonstrierten, dass die gezeigten Effekte auch in die dynamische Betrachtung des Wasserhaushalts einbezogen werden können, indem präferenzielles Fließverhalten in Abhängigkeit vom Wassergehalt in ein physikalisch basiertes Wasserhaushaltsmodell integriert wurde. Allerdings wurde auch gezeigt, dass diese Prozesse sehr stark durch Hystereseeffekte beeinflusst werden (Naasz et al. 2008). Außerdem muss das Schwell- und Schwindverhalten organischer Substrate in Abhängigkeit vom Wassergehalt berücksichtigt werden (Schindler & Müller 2016).

In geneigtem Gelände bewirken die hydrophoben Eigenschaften des Auflagehumus mitunter einen verstärkten Oberflächenabfluss (z. B. Burch et al. 1989, Butzen et al.

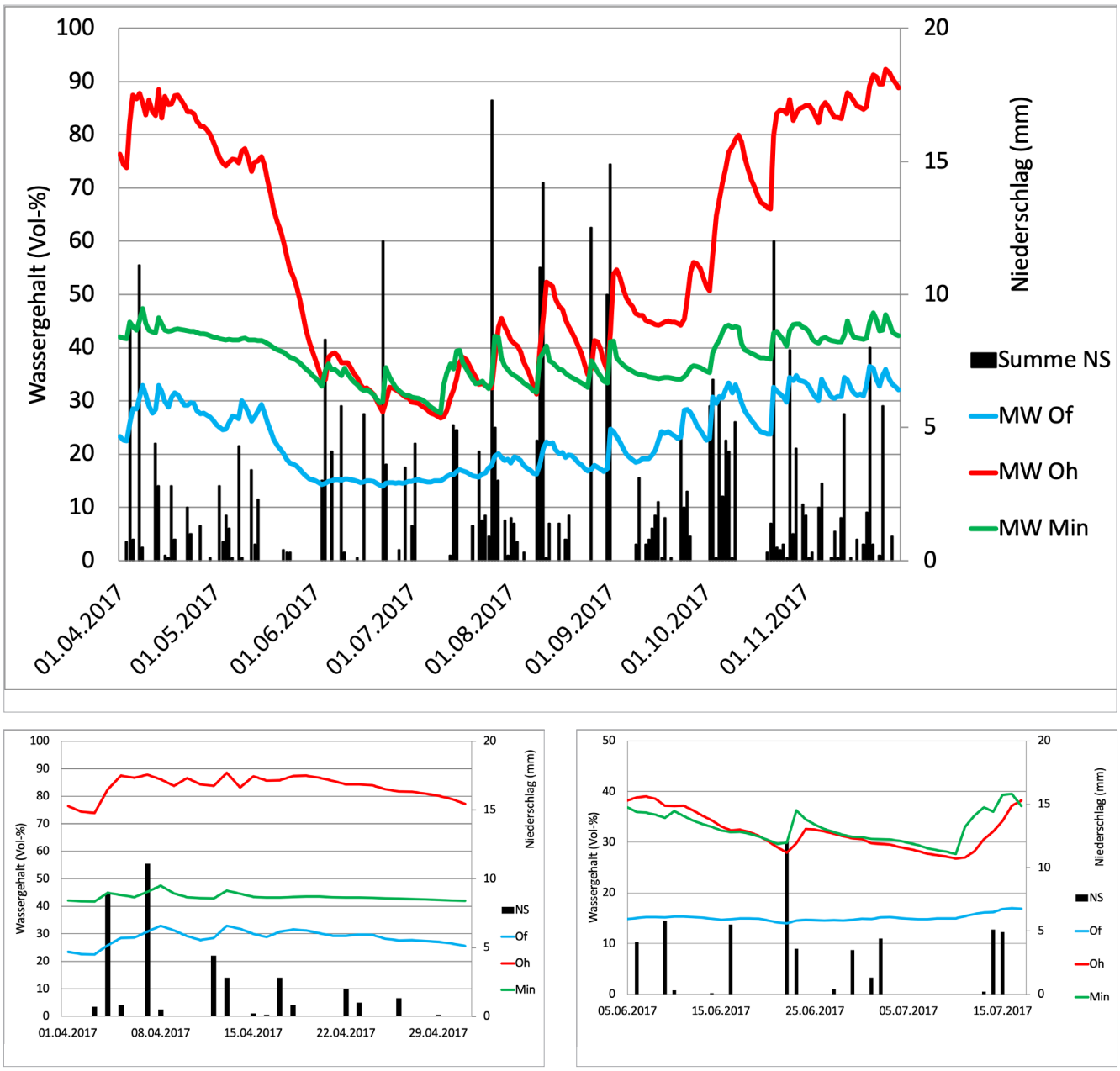

Abb. 10: Verlauf der Wassergehalte im Of- und Oh-Horizont, im Oberboden sowie Bestandesniederschlag am Standort Cunnersdorf vom 01.04. bis 30.11.2017.

Die Detailabbildungen zeigen unten links den Beginn der Vegetationsperiode mit frischen Feuchtezuständen und unten rechts den Frühsommer (05.06. bis 07.07.2017) mit einem weitgehend trockenen Of-Horizont, jedoch jeweils feuchter Oh-Lage und feuchtem oberen Mineralboden.

Fig. 10: *Water content in the Of and Oh horizon and in the mineral topsoil and precipitation at the site Cunnersdorf from 01.04. until 30.11.2017 (top picture).*

The picture below show in detail the early vegetation period with moist conditions in the humus layer (left) and a period in early summer with dry Of layer, but moist conditions in the Oh-layer and the mineral topsoil (right).

2014, 2015, Kuhnert 2008, Witter et al. 1991) und damit eine deutliche Verringerung der Versickerung. Im ebenen Gelände stellen hingegen auch stark ausgetrocknete Humusauflagen keinerlei Versickerungshemmnis dar (Wessolek et al. 2007). Dagegen schützen insbesondere ausgetrocknete Humusauflagen den darunter liegenden Mineralboden effektiv vor Verdunstung.

Die hydrologischen Eigenschaften der Humusauflage stellen auch einen wichtigen Faktor bei der Verjüngungsökologie dar. Mirschel et al. (2011) zeigten, dass die oft hydrophoben Bedingungen unter Kiefernbeständen im nordostdeutschen Tiefland die natürliche Verjüngung von Eiche (*Quercus petreae* Liebl.) gegenüber Buche (*Fagus sylvatica* L.) begünstigen, während Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) aufgrund ihrer Trockenheitsanfälligkeit im Keimungsprozess auf Mineralboden bzw. entsprechende Bodenvorbereitung angewiesen ist. Baumarten- und standortsspezifischen Verjüngungsverfahren sind deshalb auch vor dem Hintergrund sich verändernder Witterungsbedingungen und Humuszustände sorgfältig auszuwählen oder zu modifizieren (vgl. auch Burschel & Huss 1997).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Humusauflagen typischer Standorte und Waldbestockungen im nordostsächsischen Tiefland und im angrenzenden Hügel- und Bergland unterscheiden sich hinsichtlich der Wasserspeichereigenschaften sowie Porengrößenverteilungen kaum. Die unter Laborbedingungen ermittelten bodenhydrologischen Kennwerte zur Wasserbindung in den Humusauflagen erlauben allenfalls Schätzungen zu ihren hydrologischen Eigenschaften und ihrem hydrologischen Verhalten im Bestand.

Trotz vergleichsweise hoher, im Labor ermittelter nutzbarer Feldkapazitäten, ist ihr Beitrag zur nutzbaren Wasserspeicherkapazität des Forststandortes überwiegend gering. Lediglich auf Böden mit geringem Speicherpotenzial, wie etwa kiesigen Grobsanden, liefern sie potenziell einen relevanten Beitrag an der nutzbaren Wasserspeicherkapazität im Wurzelraum. Da aber aufgrund hydrophober Eigenschaften insbesondere in den Sommermonaten nur eine sehr eingeschränkte Wiederbefeuchtung von Humusauflage eintritt, ist ihr Beitrag für die Wasserversorgung der Bestände gering.

Ausgetrocknete Humusauflagen wirken durch die Hydrophobizität nur unmittelbar an der Oberfläche als Interzeptionsspeicher, stellen aber selbst bei geringen Niederschlagsereignissen kein Versickerungshemmnis dar. Dagegen wirken sie als Verdunstungsschutz für das in den Mineralboden infiltrierte und dort gespeicherte Niederschlagswasser.

Die anhaltend sommertrockenen und hydrophoben Zustände, die sich unter den vorliegenden Standortbedingungen in den Humusauflagen einstellen, können den Anwuchserfolg von Forstpflanzungen aber auch den Keimerfolg von Naturverjüngung behindern. Daher ist es notwendig, Pflanzungen so durchzuführen, dass die Wurzeln des Pflanzgutes einen unmittelbaren Kontakt zum Mineralboden erhalten. Bei Saatverfahren oder für die Unterstützung von Naturverjüngung in Samenjahren ist ebenfalls der Anschluss an den Mineralboden zu gewährleisten.

Literatur

AG Bodenkunde (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. Auflage, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 438 S.

Bergmann, C. (1998): Stickstoff-Umsätze in der Humusauflage unterschiedlich immissionsbelasteter Kiefernbestände (*Pinus sylvestris* L.) im nordostdeutschen Tiefland. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, Bd. **1.**

Bernhofer, C., Franke, J., Fischer, S., Kirsten, L., Körner, P., Kostrowski, D., Prasse, H., Schaller, A., Donix, T. (2015): Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen. Schriftenreihe des LfULG Heft **3**: 86.

Burch, G.J., Moore, I.D., Burns, J. (1989): Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. Hydrological Processes **3**: 211-222. DOI: 10.1002/hyp.3360030302

Burschel, P., Huss, J. (1997): Grundriß des Waldbaus. 2. Auflage, Parey Buchverlag Berlin: 191-234.

Butzen, V., Seeger, M., Wirtz, S., Huemann, M., Mueller, C., Casper, M., Ries, J.B. (2014): Quantification of Hortonian overland flow generation and soil erosion in a Central European low mountain range using rainfall experiments. Catena **113**: 202-212. DOI: 10.1016/j.catena.2013.07.008

Butzen, V., Seeger, M., Marruedo, A., de Jonge, L., Wengel, R., Ries, J.B., Casper, M.C. (2015): Water repellency under coniferous and deciduous forest – Experimental assessment and impact on overland flow. Catena **133**: 255-265. DOI: 10.1016/j.catena.2015.05.022

Dekker, L.W., Ritsema, C.J., Oostindie, K., Moore, D., Wesseling, J.G. (2009): Methods for determining soil water repellency on field-moist samples. Water Resources Research **45**: W00D33. DOI: 10.1029/2008WR007070

Eisenhauer, D. - R., Gemballa, R., Petzold, R., Wolf, H., Schlutow, A., Otto, L.-F., Baier, P. (2016): Klimarisiken und Anpassungsmöglichkeiten für Fichten- und Kiefernforste in Sachsen. In: Eichhorn, J., Guericke, M., Eisenhauer D. - R. (Hrsg.): Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus – Sind unsere Wälder fit für den Klimawandel. Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten. Band **10**: 103-179.

Gerke, H.H., Hangen, E., Schaaf, W., Hüttl, R.F. (2001): Spatial variability of potential water repellency in a lignitic mine soil afforested with *Pinus nigra*. Geoderma **102**: 255-274. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00036-2

Greiffenhagen, A. (2005): Einfluss der Humusauflage auf das Benetzungsverhalten und den Wasserhaushalt von Kiefernstandorten. TU Berlin, Dissertation, 131 S.

Greiffenhagen, A., Wessolek, G., Facklam, M., Renger, M., Stoffregen, H. (2006): Hydraulic functions and water repellency of forest floor horizons on sandy soils. Geoderma **132**: 182-195. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.05.006

Grüneberg E., Ziche, D., Wellbrock, N. (2014): Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. Global Change Biology **20**: 2644-2662. DOI: 10.1111/gcb.12558

Guevara-Escobar, A., Gonzalez-Sosa, E., Ramos-Salinas, M., G. D. Hernandez-Delgado, G.D. (2007): Experimental analysis of drainage and water storage of litter layers. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, 2007, **11** (5): 1703-1716. hal-00305104.

Hartmann, P., Fleige, H., Horn, R. (2009): Veränderung bodenphysikalischer Eigenschaften von Humusauflagen auf ehemals flugaschebeeinflussten Waldstandorten der Oberlausitz. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz **8**: 41-52.

Imeson, A.C., Verstraten, J.M., van Mulligen, E.J., Sevink J. (1992): The effects of forest and water repellency in infiltration and runoff under mediterranean type forest. Catena **19**: 345–361. DOI: 10.1016/0341-8162(92)90008-Y

Jacob, F., Andreae, H. (2018): Sächsischer Waldbodenbericht – Aktueller Waldbodenzustand und dessen Veränderung. Staatsbetrieb Sachsenforst (Hrsg.), Schriftenreihe Heft **30**: 27-35.

Johnson, E.A., Keith, D.M., Martin, Y.E. (2013): Comparing measured duff moisture with a water budget model and the duff and drought codes of the Canadian fire weather index. Forest Science **59**: 78-92. DOI: 10.5849/forsci.11-037

Keith, D.M. (2008): Temporal and spatial processes controlling the duff water budget: Experimental and model evidence. MSc. Thesis, Dep. of Biol. Sci., Univ. of Calgary, Calgary, Alberta, Canada. 189 S.

Keith, D.M., Johnson, E.A., Valeo, C. (2010): Moisture cycles of the forest floor organic layer (F and H layers) during drying. Water Resources Research **46**: W07529. DOI: 10.1029/2009WR007984

Kuhnert, M. (2008): Quantifizierung von Oberflächenabfluss und Erosion auf Böden mit hydrophoben Eigenschaften. Dissertation, Mathematisch Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Potsdam. 175 S.

Knoche, D., Ertle, C., Scherzer, J., Schultze, B. (2012): Kippenwälder des Lausitzer Braunkohlenreviers im Klimawandel. Teil I: Klimaszenarien der fernen Zukunft und Baumarteneignung. Archiv f. Forstwesen u. Landsch.ökol. **46**: 145-151.

Konopatzky, A. (2012): Das Wasser macht´s – Substratfeuchte in der forstlichen Standortsgliederung. – Erste Skalierungs- und Bewertungsansätze in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe **49**: 73-82.

Laurén, A., Mannerkoski, H. (2001): Hydraulic properties of mor layers in Finland. Scand. J. For. Res. **16**: 5, 429-441. DOI: 10.1080/02827580152632829

Letey, J., Carillo, M.L.K., Pang, X.P. (2000): Approaches to characterize the degree of water repellency. Journal of Hydrology **231-232**: 61-65. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00183-9

Li, X., Niu, J., Xie, B. (2013): Study on functions of layers in North China. PLOS ONE 8: e70328. DOI: 10.1371/journal.pone.0070328

Mirschel, F., Zerbe, S., Jansen, F. (2011): Driving factors for natural tree rejuvenation in anthropogenic pine (*Pinus sylvestris* L.) forests of NE Germany. Forest Ecology and Management **261**: 683-694.

Naasz, R., Michel, J.C., Charpentier, S. (2008): water repellency of organic growing media related to hysteretic water retention properties. European Journal of Soil Science **59**: 156-165.

Petzold, R., Danigel, J., Benning, R., Mayer, S., Burse, K., Karas, F., Andreae, H., Gemballa, R. (2016): Aus Alt mach Neu – Altdaten der Standortskartierung für die räumlich differenzierte Ableitung der Bodenwasserspeicherung. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz **16**: 19-33.

Puhlmann, H., von Wilpert, K. (2011): Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen für Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit von Waldböden. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz **12**: 61-71.

Raaflaub, L., Veleo, C. (2009): Hydrological properties of duff. Water Resources Research 45: W05502. DOI: 10.1029/2008WR007396

Rasoulzadeh, A., Ghoorabjiri, M.H. (2014): Comparing hydraulic properties of different forest floors. Hydrological Processes **28**: 5122-5130. DOI: 10.1002/hyp.10006

Renger, M., Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., Wessolek, G., Zacharias,S., (2009): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. In: Wessoleck, G., Kaupenjohann, M., Renger, M. (Hrg.): Bodenökologie und Bodengenese Heft **40**: „Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis“. Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie, Fachgebiete Bodenkunde/Standortkunde und Bodenschutz

Ritsema, C.J., Dekker, L.W. (1995): Distribution flow: a general process in the top layer of water repellant soils. Water Resources Research **31**: 1187-1200. DOI: 10.1029/94WR02979

Schaap, M.G., de Lange, L., Heimovaara, T.J. (1997): TDR calibration of organic forest floor media. Soil Technology **11**: 205-217. DOI: 10.1016/S0933-3630(96)00128-6

Schindler, U., Müller L. (2016): Hydraulic performance of horticultural substrates – 2. Development of an evaluation framework. DOI: 10.3390/horticulturae3010006

Weisdorfer, M. (1999): Einfluss unterschiedlicher Schwefel- und Staubemissionen in der Vergangenheit auf die chemische Entwicklung von Humusauflagen und Mineralböden in Kiefernwaldökosystemen im nordwestdeutschen Tiefland. Cottbuser Schriften zu Bodenschautz und Rekultivierung, Bd. **4**.

Wessolek, G., Schwärzel, K., Greiffenhagen, A., Stoffregen, H. (2007): Percolation characteristics of water-repellent sandy forest soil. European Journal of Soil Science **59**: 14-23.

Witter, J.V., Jungerius, P.D., Ten-Harkel, M. (1991): Modelling water erosion and the impact of water repellency. Catena **18**: 115-124. DOI: 10.1016/0341-8162(91)90011-L

Zuber, T., (2007): Untersuchungen zum Wasserhaushalt eines Fichtenwaldstandorts unter Berücksichtigung der Humusauflage. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.) an der Fakultät Biogie/Chemie/-Geowissenschaften der Universität Bayreuth, Bayreuth, Dezember 2007.

submitted: 15.1.2020
reviewed: 24.4.2020
accepted: 24.4.2020

Autorenanschrift

Dr. Thomas Heinkele
Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB)
Brauhausweg 2
03238 Finsterwalde

Dr. Dirk Knoche
Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB)
Brauhausweg 2
03238 Finsterwalde

Rainer Gemballa
Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS)
Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft
Bonnewitzer Straße 34
01796 Pirna

Dr. Rainer Petzold
Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS)
Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft
Bonnewitzer Straße 34
01796 Pirna

Anhang

Tab. A1: Mittelwerte und Spannweiten der Humusmächtigkeiten sowie der Humus- und organischen Kohlenstoffvorräte.

Tab. A1: *Means and spans of humus layer thickness and stocks of humus and organic carbon.*

Versuchsgruppe		Mächtigkeit Of (cm)	Mächtigkeit Oh (cm)	Humusvorrat aus Of und Oh (t/ha)	C-Vorrat aus Of und Oh (t/ha)
alle Standorte	Mittelwert	2,5	2,9	127	41
	obere Spanne	5,5	4,6	233	86
	untere Spanne	0,5	0,8	29	12
Kippenstandorte	Mittelwert	1,9	2,7	112	32
	obere Spanne	3,6	4,0	187	62
	untere Spanne	0,5	1,4	60	14
unverritzte Standorte	Mittelwert	2,8	2,9	127	42
	obere Spanne	5,5	4,6	233	86
	untere Spanne	1,3	0,8	29	12
Kiefernreinbestände	Mittelwert	2,5	2,7	102	34
	obere Spanne	3,9	4,0	160	56
	untere Spanne	1,3	1,4	53	14
Rot- und Trauben-eichenreinbestände	Mittelwert	1,3	2,9	135	37
	obere Spanne	2,3	3,5	154	45
	untere Spanne	0,5	2,1	115	25
Umbau und Mischbestände	Mittelwert	3,5	3,5	184	62
	obere Spanne	5,5	4,6	233	86
	untere Spanne	1,4	2,3	146	45
Fichtenreinbestände	Mittelwert	2,5	2,7	114	36
	obere Spanne	3,9	4,1	177	62
	untere Spanne	1,3	0,8	29	12

Tab. A2: Mediane und Spannweiten der Trockenrohdichten sowie der Porengrößenverteilungen von Of- und Oh-Horizonten.

Tab. A2: *Median and span of Of and Oh horizons of different trial groups. Dry density (TRD), total pore volume (GPV), air capacity (LK), field capacity (FK), available field capacity (nFK), and water content at the permanent wilting point (PWP).*

Versuchsgruppe		TRD		GPV		LK		FK		nFK		PWP	
		Of	Oh	Of	Oh	Of	Oh	Of	Oh	Of	Oh	Of	Oh
		g/cm³		Vol.-%									
alle (n = 41)	Median	0,14	0,22	77	76	45	34	32	41	15	24	17	18
	obere Spanne	0,25	0,41	92	95	61	50	48	66	32	50	25	30
	untere Spanne	0,08	0,09	53	53	28	15	20	27	9	9	8	6
Kippenstandorte (n = 12)	Median	0,09	0,29	76	72	46	34	29	38	18	27	13	11
	obere Spanne	0,21	0,41	86	83	53	41	33	51	20	35	19	22
	untere Spanne	0,08	0,11	53	58	28	20	20	27	9	9	9	6
Unverritzte Standorte (n = 29)	Median	0,16	0,22	80	83	46	34	33	42	14	23	18	19
	obere Spanne	0,25	0,39	92	95	61	50	48	66	32	50	25	30
	untere Spanne	0,09	0,09	61	53	29	15	22	31	9	14	8	10
Rot- und Traubeneichen (n = 6)	Median	0,19	0,32	72	82	39	28	36	56	16	38	19	15
	obere Spanne	0,24	0,41	84	88	46	34	40	64	20	50	22	20
	untere Spanne	0,16	0,28	68	71	29	20	31	37	11	26	13	11
Fichtenreinbestände (n = 12)	Median	0,16	0,21	81	86	45	38	36	41	17	21	19	20
	obere Spanne	0,25	0,28	92	91	57	50	48	66	32	34	25	30
	untere Spanne	0,11	0,09	70	70	29	24	27	31	10	15	14	10
Kiefernbestände (jung, < 40 Jahre) (n = 6)	Median	0,09	0,23	70	71	40	34	29	39	16	23	13	12
	obere Spanne	0,14	0,39	77	78	47	41	35	44	18	27	23	24
	untere Spanne	0,08	0,11	61	68	32	30	25	31	10	20	9	6
Kiefernbestände (alt, > 60 Jahre) (n = 9)	Median	0,14	0,25	82	83	47	34	33	42	17	30	15	14
	obere Spanne	0,21	0,32	87	95	53	48	43	58	28	42	23	18
	untere Spanne	0,09	0,19	70	72	43	31	26	37	9	18	8	8
Umbau- und Mischbestände (n = 8)	Median	0,12	0,21	74	63	48	24	29	38	10	17	17	20
	obere Spanne	0,20	0,30	88	73	61	39	33	47	14	25	19	23
	untere Spanne	0,09	0,15	53	53	28	15	20	27	9	9	11	14

TRD = Trockenraumdichte, GPV = Grobporenvolumen, LK = Luftkapazität, FK = Feldkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, PWP = permanenter Welkepunkt

Tab. A3: Signifikanz-Matrix der Stichproben-Paare Of-/Oh-Horizonte und Kippenstandorte/unverritzte Standorte.

Tab. A3: *Significance matrix of samples pairs Of/Oh- horizons and dump soils / natural soils.*

Paarweise Vergleiche	**TRD**		**GPV**		**LK**		**FK**		**nFK**		**PWP**	
Of-Horizont/Oh-Horizont, alle Standorte (n = 41)	*		-		*		*		*		-	
Kippenstandorte/ unverritzte Standorte	Of	Oh	Of	Oh	Of	Oh	Of	Oh	Of	Oh	Of	Oh
	*	-	*	*	-	-	*	*	-	-	*	*

* = Verteilungen signifikant verschieden (Man-Whitney U-test, p = 0,05)

- = Verteilungen nicht signifikant verschieden

Tab. A4: Signifikanz-Matrix der Stichproben von Versuchsgruppen.

Tab. A4: *Sigificance matrix of samples on different trial groups.*

Parameter	**TRD**		**GPV**		**LK**		**FK**		**nFK**		**PWP**	
Horizont	**Of**	**Oh**	**Of**	**Oh**	**Of**	**Oh**	**Of**	**Oh**	**Of**	**Oh**	**Of**	**Oh**
Versuchsgruppe												
Eichenbestände	A	A	A	A	A	A,B	A,B	A	A,B	A	A	A
Fichtenbestände	A	B	A	A	A	A	A	A	A	B,C	A	A
Kiefernjungbestände	A,B	A,B	A	A	A	A,B	A,B	A	A	A,C	A	A
Kiefernaltbestände	A,B	A,B	A	A,B	A	A,B	A,B	A	A,B	A,B,C	A	A
Umbau- und Mischbestände	B	B	A	B	A	B	B	A	B	B	A	A

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikant verschiedene Verteilungen (einfaktorieller ANOVA, p = 0,05)

TRD = Trockenraumdichte, GPV = Grobporenvolumen, LK = Luftkapazität, FK = Feldkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, PWP = permanenter Welkepunkt