

Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands

The use of lysimeters to determine the water balance in forests in northeastern Germany

Jürgen Müller

Abstract

*The region of Eberswalde in northeastern Germany is amongst the driest and also most densely wooded regions in Germany. Low annual precipitation between 500 and 600 mm and the light sandy soils lead to limited water availability. Therefore the hydrological functions of forests play an important role in the regional water budget, water supply and water distribution. The aim of forest hydrologic research is to investigate the influence of the different types of forest structures on the water balance of the landscape and on the partial parameters of the water balance equation. Lysimeters are suitable measuring instruments to investigate evaporation and groundwater production in areas with granular soils and loose rocks. The use of lysimeters of different construction has a tradition of more than 100 years in this region. To investigate the water consumption of different tree species, lysimeters were installed in the lowlands at Britz near Eberswalde under comparable site conditions. In 1972 nine lysimeters with a surface of 100 m² and a depth of 5 m were built. The stand development of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), common beech (*Fagus sylvatica* L.), larch (*Larix decidua* L.) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) have been observed and recorded since planting with regard to growth course, net primary production and water fluxes.*

The choice of tree species is of critical importance for determining the amount of groundwater production below forests. The structural properties of the ground vegetation in terms of composition and coverage influence the soil available water content considerably with effects on tree growth of Scots pine forests during the vegetative period. These results were obtained with the use of specially developed weighable lysimeters.

Keywords: *Climate change, lysimeter type, landscape water budget, tree species, ground vegetation*

Zusammenfassung

Die Waldregion Eberswalde als Teil des nordostdeutschen Tieflands ist durch geringe Niederschläge, Sommer-trockenheit und verbreitet leichte Sandböden geprägt. Die jährlichen Niederschläge betragen 500 bis 600 mm. Schwerpunkt der forsthydrologischen Forschung ist die Klärung des Einflusses unterschiedlich strukturierter Wälder auf den Landschaftswasserhaushalt und auf die Teiglieder der Wasserhaushaltsgleichung. Im Lockergesteinsbereich sind Lysimeter eine geeignete Methode zur Erforschung des Wasserhaushaltes von Pflanzen. 1972 wurden in Britz bei Eberswalde neun

Großlysimeter mit einer Tiefe von 5 m und einer Oberfläche von 100 m² unter vergleichbaren Standortbedingungen angelegt. 1974 wurden diese Lysimeter mit den Baumarten Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Buche (*Fagus sylvatica* L.), Lärche (*Larix decidua* L.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) bepflanzt. Das Versuchsziel war die Klärung des Baumarten- und Alterseinflusses der Bestockungen auf Grundwasserneubildung und Verdunstung. Die Lysimeterforschung hat in dieser Region eine über hundertjährige Tradition.

Die Großlysimeteruntersuchungen zeigten, dass für die Tiefenversickerung unter Wald die Baumart von herausragender Bedeutung ist. In Kiefernbeständen wurde mit Hilfe speziell entwickelter wägbare Lysimeter der Wasserverbrauch typischer Bodenvegetationsdecken ermittelt. Erst durch die Berücksichtigung der Besonderheiten des strukturellen Aufbaus des Waldes wird eine treffende Beurteilung der hydrologischen Wirkungen möglich.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Lysimetertypen, Landschaftswasserhaushalt, Baumarten, Bodenvegetation

1 Einleitung

Zur Erforschung des Wasserhaushaltes von Wäldern gibt es international und national eine Vielzahl von Untersuchungen. Die Forschungen stehen einerseits im Zeichen des Versuchs einer räumlichen und zeitlichen Übertragung von Prozessen des Wasserhaushalts auf die Ebene ganzer Wassereinzugsgebiete. Andererseits werden Untersuchungen auf Bestandesebene in Abhängigkeit von der Vegetationsstruktur zur Ermittlung von Struktur- und Prozessbeziehungen, zur Indikation von Stressreaktionen der Waldbäume in Wassermangelphasen und zur Parametrisierung von Wasserhaushaltsmodellen betrieben.

Der verbreitete Forschungsansatz sind Studien in Einzugsgebieten. Beispielhaft dafür stehen das ARINUS-Projekt (BRAHMER 1990), das Höglwald-Projekt (KREUTZER & GÖTTLEIN 1985), der Krofdorfer Forst (FÜHRER 1990), die Lange Bramke (HAUHS 1985), der Solling (MANDERSCHIED 1992). Des Weiteren wurden in unterschiedlichen Regionen Deutschlands baumartenspezifische Untersuchungen zum Wasserhaushalt durchgeführt. Beispielhaft dafür stehen die Wasserhaushaltsuntersuchungen auf den Flächen des Forstlichen Umweltmonitorings (GRIMMEISEN 1994, PREUSHLER et al. 1994), die Untersuchungen in den Berliner Forsten und im nordostdeutschen Tiefland (RAKEI 1991, RIEK & RENGER 1994, LÜTZKE & SIMON 1972, LÜTZKE & SIMON 1975, MÜLLER 2001, MÜLLER et al. 2002).

Dieser Artikel gibt eine Übersicht zum Einsatz von Lysimetern unterschiedlicher Bauart in Wäldern im Großraum Eberswalde (BL Brandenburg). Es werden die Anwendung unterschiedlicher

Lysimeterarten besprochen und die mit ihnen erzielten Ergebnisse beispielhaft dargestellt. Der Einsatz von Lysimetern hat in diesem Naturraum eine lange Tradition. Ursache dafür sind die standortspezifischen Bedingungen der Region. So hat Eberswalde auf Grund des kontinental beeinflussten Klimas im bundesweiten Vergleich weit unterdurchschnittliche Niederschläge und damit ein geringes Wasserdargebot. Die jährlichen Niederschläge liegen im langjährigen Mittel bei 580 mm. In den Wäldern um Eberswalde dominiert die Baumart Kiefer und die Waldböden sind vorherrschend sandig mit geringer Wasserspeicherkapazität und hoher Durchlässigkeit. Diese Standortbedingungen sind repräsentativ für weite Teile Brandenburgs, dessen Waldfläche 36 Prozent beträgt mit der Dominanz der Kiefer auf über 70 % der Waldfläche.

Deshalb hat die Forschung hier der Untersuchung des Wasserhaushaltes der Wälder schon frühzeitig eine vertiefte Aufmerksamkeit gewidmet. Vorherrschendes Ziel war die Ermittlung des Baumarten- und Alterseinflusses auf Grundwasserneubildung und Verdunstung. Wenn für Standorte des Lockergesteinsbereiches speziell der Bewuchseinfluss auf den Gesamtwasserhaushalt zu klären ist, sind Messungen mit Lysimetern eine sichere Methode. Die über 35-jährigen Ergebnisse der Großlysimeter geben die Möglichkeit, Aussagen zur Veränderung des Wasserhaushaltes aufwachsender Bestände unterschiedlicher Baumarten zu treffen.

2 Der Einsatz von Lysimetern für Wasserhaushaltsuntersuchungen

Lysimeter sind mit Erde gefüllte Kästen, die das durch den Boden nach unten sickende Wasser in Menge und Qualität messbar machen. Sie dienen der Ermittlung des Stoff- und Wasserhaushaltes von Vegetation, Vegetationsdecken und anderen Bedeckungen. Es wird zwischen gestörten (geschützten) und ungestörten (monolithisch gewonnenen) sowie wägbaren und nicht wägbaren Lysimetern unterschieden, die oberflächengleich in den Boden eingebaut werden.

Der Sickerwasserausfluss aus dem Lysimeter wird in der Regel direkt gemessen. Bei gegebenem Niederschlag und

vorhandener Bodenfeuchtedifferenz kann die Evapotranspiration (ET) für unterschiedliche Zeiträume nach der Wasserhaushaltsgleichung ermittelt werden.

$$ET = N - D - \Delta W$$

(N = Niederschlag; D = Sickerung; ΔW = Wassergehaltsänderung im Boden)

Der Einsatz von Lysimetern für Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen ist gängige Praxis. Gegenwärtig erfährt der Lysimeteinsatz durch die Anwendung neuer Entnahme- und Einbautechnologien sowie innovativer Messtechnik einen Anwendungsschub in Wissenschaft und Praxis (RUPP et al. 2005, BETHGE-STEFFENS et al. 2005, HERNDL et al. 2009, PRASUHN et al. 2009). Eine Übersicht über vorhandene Lysimeterstationen geben LANTHALER & FANK 2005 und LANTHALER 2007. Des Weiteren wird auf der Internetseite der Arbeitsgruppe Lysimeter eine aktuelle Übersicht über die in Europa vorhandenen Stationen und ihre Einsatzgebiete gegeben.

Die Tabelle 1 zeigt die Anwendung unterschiedlicher Lysimeterarten in der forsthydrologischen Forschung im Umfeld von Eberswalde.

Bereits im Jahr 1907 wurden in Eberswalde auf dem „Drachenkopf“ Untersuchungen zum Wasserhaushalt von kleinen Waldbäumen mit Kleinstlysimetern durchgeführt. Diese Kleinstlysimeter wurden 1929 durch eine größere wägbare Anlage mit drei Lysimetern ersetzt, die 1954 um vier weitere ergänzt wurde (Tab. 1). Die Versuchsstation ist nach unserem Kenntnisstand die älteste Lysimeterstation der Welt für forsthydrologische Zwecke (MÜLLER 2008). Die wägbaren Lysimeter werden zur Bestimmung von Verdunstung und Sickerung unter definierten Witterungs- und Bodenverhältnissen sowie wechselndem Bewuchs genutzt. Ein wesentliches Ergebnis der „Drachkopflysimeter“ ist, dass die Pflanzenart und der Deckungsgrad der Vegetation maßgeblich die Höhe und den zeitlichen Verlauf von Sickerung und Verdunstung beeinflussen (MÜLLER 2008). So sickerte unter 6-jährigen Kiefern weniger Wasser in die Tiefe als unter Feldgras. Diese ersten Ergebnisse

Tab. 1: Einsatz unterschiedlicher Lysimeterarten in der forsthydrologischen Forschung.

Tab. 1: Use of different types of lysimeters in forest hydrology research.

Jahr	1907	1929	1966	1972	1994	2005	2009
Standort	Eberswalde „Drachenkopf“	Eberswalde „Drachenkopf“	Liepe	Britz	Versuchsflächen	Britz „Postluch“	Eberswalde Freilandlabor „Drylab“
Lysimeter-typ	Kleinstlysimeter	Kleinlysimeter	Unterflurlysimeter	Großlysimeter	Kleinlysimeter	Grundwasserlysimeter	Kleinlysimeter
Wägbarkeit	nicht wägbar	wägbar	nicht wägbar	nicht wägbar	wägbar	wägbar	nicht wägbar
Boden Bodenart	gestört Sand	gestört Sand	ungestört Sand	gestört Sand	ungestört Sand	ungestört Torf über Sand	gestört Sand
Bedeckung	diverse	diverse	Kiefern	Bäume	Bäume Bodenveg.	Bäume	Bäume
Oberfläche	500 cm ²	1 m ²	500 cm ² 1500 cm ²	100 m ²	1 m ²	1 m ²	2 m ²
Tiefe	1,0 m	1,5 m	5 m	5 m	1,8 m	2,0 m	1,5 m

Tab. 2: Strukturelevante Parameter der Lysimeterbestände im Jahr 1999 vor dem Waldumbau (Alter der Bäume 27 Jahre).

Tab. 2: *Structural parameters of the lysimeter stands in 1999 before forest conversion (age of trees: 27 years).*

	Kiefer	Buche	Lärche	Douglasie
Höhe des Grundflächenmittelstammes (HG) [m]	12,8	8,6	13,2	11,0
Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (DG) [cm]	10,9	5,5	13,9	12,2
Grundfläche [m ² /ha]	28,0	21,1	29,5	32,3
Bestockungsgrad (B°) [o.D.]	1,21	1,40	1,20	1,05

waren u. a. Anlass für den Bau weiterer größerer Lysimeter.

2.1 Die Großlysimeteranlage in Britz

Andere Lysimetererfahrungen nutzend wurden 1972 neun Großlysimeter mit einer für Waldlysimeter notwendigen Tiefe von 5 m und einer Oberfläche von 100 m² (10 x 10 m) angelegt (Abb. 1). Die „Britzter Großlysimeter“ sind daher im europäischen Maßstab einmalig, da andere mit Bäumen bewachsene Lysimeter zwar die nötige Oberfläche haben, aber mit einer Tiefe von 2,5 m, 3 m bzw. 3,5 m zu flach sind. So in Castricum in den Niederlanden (HOEVEN 2005), in St. Arnold in Niedersachsen (SCHROEDER 1990) und in der Letzlinger Heide in Sachsen-Anhalt (HELBIG 1988).

Die Station liegt 5,5 km nordöstlich von Eberswalde auf der großflächig ebenen Hauptterrasse des Eberswalder Urstromtales (Bodenform: Cambic Podzol). Die Höhe über N.N. beträgt 40 m. Die Bodenart ist ein mittelkräftiger Sand im gesamten Lysimeterprofil bis 5 m Tiefe (etwa 75 % Mittel- und 17–19 % Feinsand, Anteil Ton und Schluff 4 %). Der langjährige mittlere Jahresniederschlag beträgt 570 mm und die Jahresmitteltemperatur liegt bei 8,2 °C. Der Standort ist für weite Teile des nordostdeutschen Tieflands repräsentativ.

Die Großlysimeter sind unwägbar und gestört (MÜLLER 2003). Die Umgebungswände bestehen aus 0,8 mm dicker Polyethylenfolie. 1974 wurden diese Lysimeter zusammen mit einer 0,3 ha großen Umgebungsfläche mit den Baumarten Buche (2 Lysimeter), Kiefer (3 Lysimeter), Lärche und Douglasie (je 2 Lysimeter) in praxisüblichen Verbänden bepflanzt (Abb. 2). In der Tabelle 2 sind die strukturelevanten Parameter der Lysimeterbestände vor Beginn der forstlichen Eingriffe im Zuge der Unterbaumaßnahmen im Jahre 1999 enthalten.

Das sich über der Lysimetergrundfläche ansammelnde Sickerwasser läuft zu einem Messschacht neben dem Lysimeter ab und wird mit einem Wasserzähler mechanisch und elektronisch gemessen. Die Bodenfeuchte wird mit Sonden bis zu einer Tiefe von 4,6 m in insgesamt 10 Tiefenstufen gemessen. Die Erfassung des Niederschlages erfolgt mit Niederschlags-sammlern nach Hellman im Freiland und im Bestand. Aus der Differenz von Freiland- und Bestandesniederschlag wird die Interzeptionsverdunstung berechnet.

Das anfängliche Forschungsziel bestand in der Untersuchung des Baumarten- und Alterseinflusses der unter vergleichbaren Witterungs- und Bodenbedingungen aufwachsenden Lysimeterbestände auf Grundwasserneubildung und Verdunstung.

Das zukünftige Waldbild im nordostdeutschen Tiefland soll durch möglichst vielfältig strukturierte Mischbestände geprägt sein. Dieses Ziel verfolgt auch der Waldumbau im Land Brandenburg. Das Waldumbauprogramm bedarf der wissenschaftlichen Begleitung und Fundierung; insbesondere ist zu prüfen, wie

sich die im hiesigen Raum für das Waldwachstum häufig als limitierend erweisenden hydroökologischen Bedingungen bei Unterbau von Buche und Eiche in Kiefernbeständen verändern und wie diese Bedingungen über bestandesstrukturell-waldbauliche Maßnahmen positiv beeinflusst werden können. Des Weiteren kommt für das nordostdeutsche Tiefland der Eiche aus standortklimatischen Gründen eine höhere Bedeutung zu. Die hydrologischen Bedingungen von sich entwickelnden Eichenökosystemen sind noch weitgehend unbekannt. Vor diesem Hintergrund wurden einzelne Lysimeterbestände im Jahre 2000 wie folgt strukturell verändert:

- Lärche mit Buche unterbaut,
- Kiefer mit Buche unterbaut,
- Kiefer mit Eiche unterbaut,
- Eichenneuanpflanzung.

Die Abbildung 3 zeigt einen mit Eiche unterbauten Kiefernbestand auf der Großlysimeteranlage.

Mit der Erweiterung der Zielstellung für die Lysimeteranlage werden wichtige ökologische Grundlagen für einen erfolgreichen Waldumbau erarbeitet. Gleichzeitig wird es möglich, die langfristigen Konsequenzen des Umbaus für den Landschaftswasserhaushalt realistisch einzuschätzen.

2.2 Die wägbaren Lysimeter in Waldbeständen

Neben der Fragestellung zum Beitrag des Waldes zum Landschaftswasserhaushalt sind die Untersuchungen zum Wasserverbrauch und Wachstum der Wälder bei weniger werdenden Wasserressourcen innerhalb der Vegetationsperiode ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt. Vor dem Hintergrund des Klimawandels mit zunehmender Sommer-trockenheit

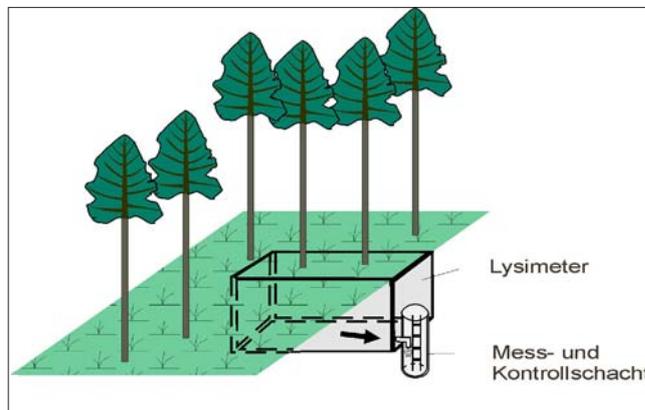


Abb. 1: Prinzipskizze eines mit Bäumen bewachsenen Großlysimeters.

Fig. 1: *Schematic diagram of a large-scale lysimeter planted with trees.*

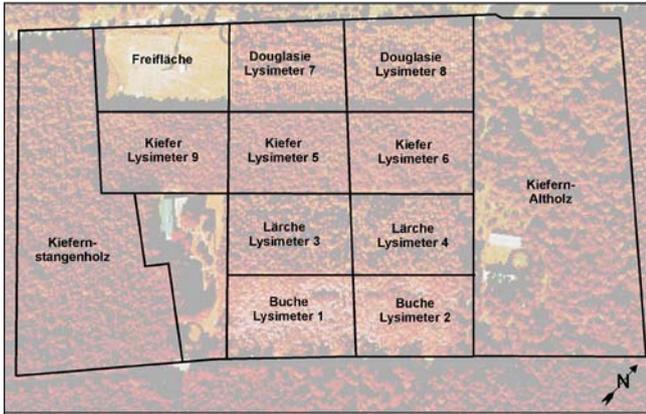


Abb. 2: Luftbild der ökologischen Versuchsstation Britz mit Lage der einzelnen Großlysimeter (Stand 1998).

Fig. 2: Aerial photograph of the Britz Ecological Research Station showing the location of the large-scale lysimeters (as of 1998).



Abb. 5: Wägbares Lysimeter mit Bodenvegetation in einem Kiefernreinbestand.

Fig. 5: Small-scale lysimeter with ground vegetation in a pure Scots pine stand.



Abb. 3: Ein mit Eiche unterbauter Kiefernbestand im Jahr 2010.

Fig. 3: A Scots pine stand with oak understory in the year 2010.



Abb. 6: (links) Wägbares Lysimeter in einem Kiefern-Buchen-Mischbestand.

Fig. 6: (left) Weighable lysimeter in a pine-beech mixed stand.



Abb. 7: (rechts) Wägbares Lysimeter mit jungen Eichen zur Erfassung unterschiedlicher Trockenheitswirkung.

Fig. 7: (right) Small-scale lysimeter with young oaks to evaluate drought risk.

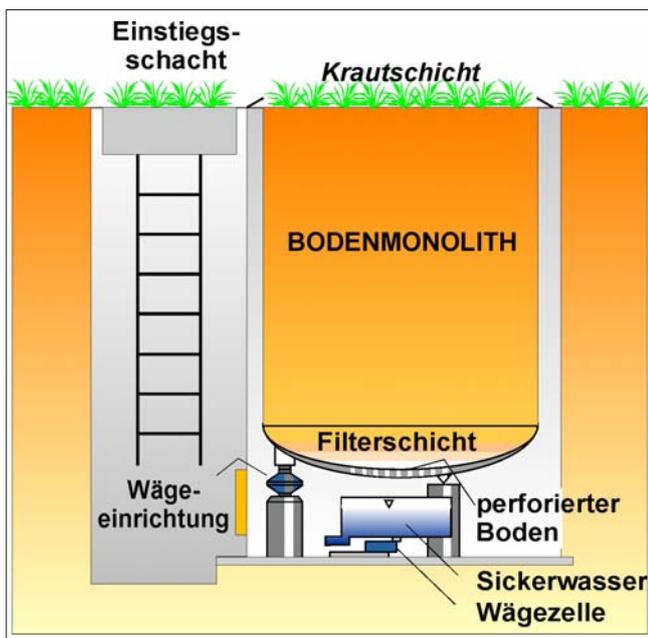


Abb. 4: Prinzipskizze eines wägbaren Lysimeters.

Fig. 4: Schematic diagram of a weighable lysimeter.

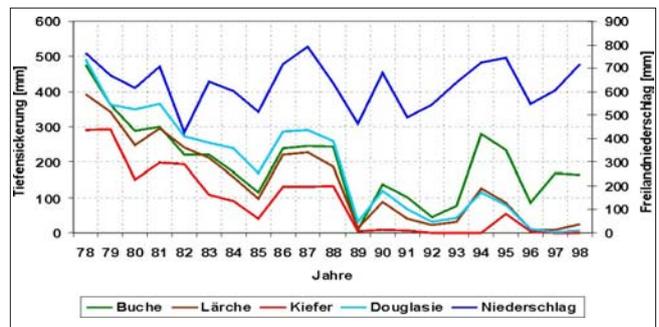


Abb. 8: Jahresniederschlag und -sickerung 1978 bis 1998 der Baumarten auf der Lysimeterstation Britz.

Fig. 8: Annual precipitation and annual deep infiltration for the period 1978–1998 for each of the tree species at the lysimeter station Britz.

gewinnt diese Fragestellung zunehmend an Bedeutung (MÜLLER 2009).

In den dominierenden Kiefernbeständen des nordostdeutschen Tieflandes ist der Wasserverbrauch der Bodenvegetation eine wesentliche, doch noch weitgehend unbekannt GröÙe. Bei gegebener Niederschlagsarmut ist sie jedoch eine SteuergröÙe im Wasserhaushalt der Wälder. Seine Bestimmung ist methodisch schwierig. Um die Evapotranspiration der Bodenvegetation und ihren spezifischen Wasserverbrauch getrennt von der Transpiration des Baumbestandes zu ermitteln, wurden spezielle wägbare Kleinlysimeter (WKL) entwickelt und ab 1994 in unterschiedliche Kiefernökosysteme eingebaut (Abb. 4). Dabei waren folgende Anforderungen an die Lysimeterkonstruktion zu erfüllen (MÜLLER & SEYFARTH 1999):

- Kreisförmige Lysimeteroberfläche von 1 m², das entspricht etwa dem 1,5-fachen der Höhe der Bodenvegetation,
- Lysimetertiefe von 1,8 m, so dass ein sich eventuell ausbildender Stauwasserhorizont am Lysimeterboden nicht auf die Transpirationshöhe auswirken kann,
- Entnahme eines ungestörten Bodenmonoliths mit aufwachsender Bodenvegetation,
- kontinuierliche Messung von Bodenfeuchteänderungen und Sickerwassermenge durch Wägung mit hoher Präzision,
- Mobilität der WKL, d. h. mehrfacher Einsatz der Lysimeter für unterschiedliche Anwendungsgebiete.

Die entwickelte Messeinrichtung, eine Kombination von ungestörtem Bodenkörper ausreichender Dimension und Wägbbarkeit bei Verzicht auf einen Lysimeterkeller sowie mobiler Einsatzmöglichkeit war zu diesem Zeitpunkt neu. Damit wurde die Bilanzierung des Wasserhaushaltes für unterschiedliche Anwendungsfälle unter Freilandbedingungen mit vergleichsweise geringen Kosten möglich. Der Wasserverbrauch der Vegetation wird durch den Einsatz spezieller Wägezellen für die Erfassung der Bodenfeuchteänderung im Monolith und der ausfließenden Sickerwassermengen mit einer Genauigkeit von 0,1 mm gemessen.

Seit 1995 werden die wägbaren Lysimeter für nachfolgende forsthydrologische Fragestellungen eingesetzt:

- Messung des Wasserverbrauchs und möglicher Konkurrenzwirkung der Bodenvegetation in Kiefernbeständen mit unterschiedlicher Artenzusammensetzung (Abb. 5)
- Messung des Wasserverbrauchs unterständiger Bäume im Mischbestand (Abb. 6)
- Einsatz der Lysimeter auf grundwassernahen Standorten zur Ermittlung des Einflusses der Grundwasserstandsänderung auf den Wasserhaushalt und das Wachstum junger Schwarzerlen
- Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Trockenheit auf das Wachstum und den Wasserhaushalt junger Eichen. Die wägbaren Lysimeter sind mit einem fahrbaren sensorgesteuerten Dach abgedeckt, das, wenn es regnet, über die Lysimeter fährt (Abb. 7). Der Niederschlag für unterschiedliche Szenarien (Trocken- und Normalszenario) wird durch Bewässerung gegeben.

3 Ergebnisse

Unter Nutzung der im Kapitel 2 dargestellten Methoden werden nachfolgend zu den beiden wesentlichen Forschungsschwerpunkten der Region:

- Der Beitrag des Waldes zum Landschaftswasserhaushalt
- Der Wasserverbrauch und das Wachstum der Wälder bei weniger werdenden Wasserressourcen innerhalb der Vegetationsperiode

beispielhaft wesentliche anwendungsorientierte Ergebnisse der Wasserhaushaltsforschung präsentiert.

3.1 Der Beitrag des Waldes zum Landschaftswasserhaushalt – Ergebnisse der Großlysimeter

Für die Höhe der Grundwasserneubildung unter Wald ist die Baumart von maßgeblicher Bedeutung. Dies ist ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen auf den Großlysimetern.

Die Abbildung 8 zeigt die Veränderung der Tiefensickerung der Baumarten im Zeitraum 1978 bis 1998. Bezüglich der jährlichen Sickerungshöhe zeigen sich deutliche baumartenspezifische Unterschiede. Bis 1984 ist bei allen Baumarten eine deutliche Abnahme der Sickerung erkennbar. Der starke Abnahmetrend der Sickerung beim Aufwachsen der Junggehölze hat seine Ursachen in der zunehmenden Gesamtverdunstung V. Die Höhe der Sickerung wird im Wesentlichen durch die vegetationsstrukturellen Unterschiede der Baumarten beeinflusst. Der Einfluss der Vegetation dominiert, die jährliche Niederschlagshöhe hat einen untergeordneten Einfluss. In den Jahren danach wurde dieser Vegetationseinfluss teilweise durch den Niederschlagseinfluss überprägt. Die Sickerungsunterschiede zwischen den Baumarten bleiben erhalten. Ab 1990 dominiert bei den Baumarten Kiefer, Douglasie und Lärche wieder der Einfluss des aufwachsenden Bestandes. In der Buche wird ab 1990 der Jahresniederschlag zur dominierenden SteuergröÙe für die zeitliche Veränderung der Grundwasserneubildung (MÜLLER 2002, 2005). Innerhalb der Vegetationsperiode findet in der Regel bei allen Baumarten keine Grundwasserneubildung statt.

Zur Erklärung der baumartenspezifischen Sickerungsunterschiede ist es notwendig, die einzelnen Verdunstungskomponenten Interzeption, Transpiration und Verdunstung am Waldboden zu analysieren. Abbildung 9 zeigt die Wasserbilanz beispielhaft für die Baumarten Buche und Kiefer. Bei vergleichbarer Evapotranspiration der Bestände ist die Interzeptionsverdunstung Hauptursache für die Sickerungsunterschiede, die in den Buchenbeständen 22 % und in den Kiefernbeständen 32 % des jährlichen Niederschlagsdargebotes beträgt. Die Buche zeigt saisonale Belaubungsunterschiede (sommergrün, winterkahl), dem Stamm trichterförmig Wasser zuleitende Äste und Zweige, eine glatte Rinde mit geringer Stamminterzeption, die zu Stammabflussmengen von bis zu 8 % des Freilandniederschlages und geringer Interzeptionsverdunstung führen. Die Ursachen für die gegenüber den Buchenbeständen erhöhte Interzeptionsverdunstung der Kiefernbestände liegen in der immergrünen, das ganze Jahr interzeptionswirksamen Nadeltracht der Kiefer, ihrer offenen sperrigen Krone (Auffangtrichter) und dem infolge der raueren Borke geringeren bis vernachlässigbaren Stammabfluss.

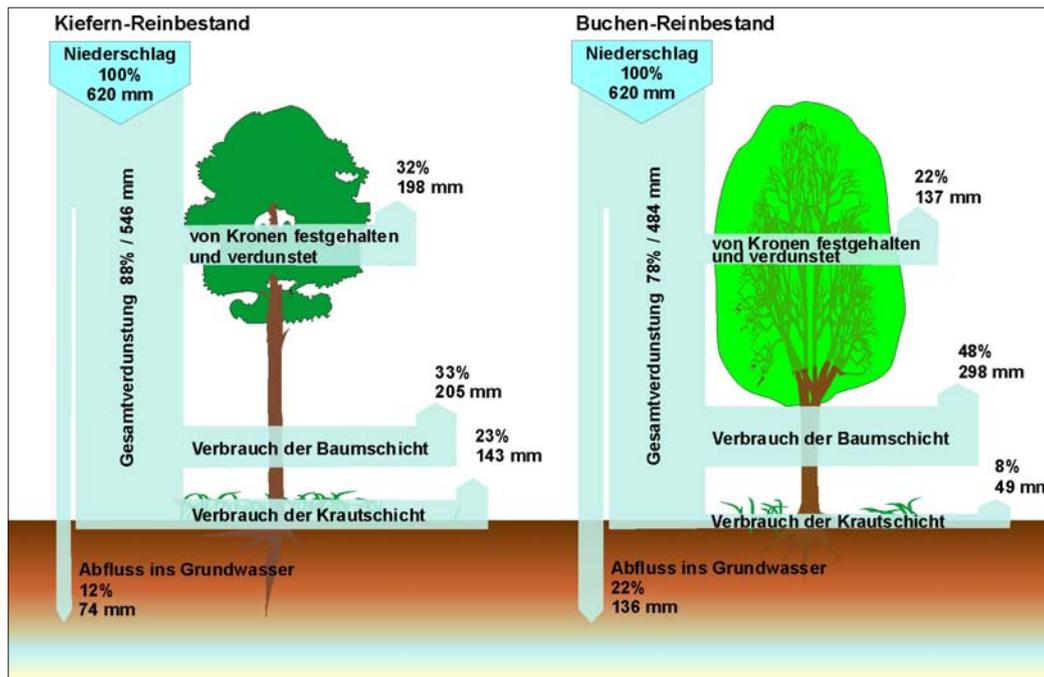


Abb. 9: Wasserbilanz eines Kiefern- und Buchenbestandes im Baumholzstadium auf grundwasserfernem Sand.

Fig. 9: Water balance of mature pine and beech stands on sandy soil with deep groundwater.

Von wasserwirtschaftlicher Bedeutung ist die Höhe der Grundwasserneubildung in den einzelnen Wuchsphasen der aufwachsenden Kiefern- und Buchenbeständen. Hierzu konnten durch die Untersuchungen mit den Großlysimetern und außerhalb der Lysimeter in gewachsenen Kiefern- und Buchenrein- und Mischbeständen wertvolle Ergebnisse erzielt werden. Die Auswirkung vegetationsstruktureller Differenzierungen in unterschiedlichen Wuchsstadien eines Kiefern- und Buchenbestandes und eines aufwachsenden Kiefern-Buchen-Mischbestandes auf die Sickerungshöhe und Verdunstung zeigt die Abbildung 10.

Im Kiefernbestand steigt die Gesamtverdunstung mit dem Aufwachsen schnell an und die Sickerung geht zurück. Sie liegt im Stangenholzstadium bei 100 %. Die Kiefern haben in diesem Alter Zuwachskulmination, dementsprechend hohe Transpiration und infolge dichter Kronendächer hohe Interzeptionsverluste mit über 40 % der jährlichen Niederschlagsmenge (MÜLLER 2002, 2005). Die Sickerung geht in diesem Stadium gegen Null. Durch natürliche Baumzahlreduzierung und planmäßige Durchforstungen gehen Transpiration und Interzeption stetig zurück und der Sickerungsanteil steigt an. Durch die Auflichtung des Kronendaches nimmt der Anteil der Evapotranspiration der Bodenpflanzendecke verhältnismäßig stark zu (MÜLLER et al. 1998).

Im Buchenbestand steigt die Verdunstung mit dem Aufwachsen der Bestände ebenfalls schnell an und erreicht im Stangenholz Werte von knapp 80 % des Jahresniederschlages. Diese Größe bleibt über einen langen Zeitraum bis ins Baumholzstadium in etwa gleich, so dass auch für die Tiefensickerung mit stabilen Mengen von über 20 % des Jahresniederschlages kalkuliert werden kann. Die Transpiration steigt mit Aufwachsen der Bestände leicht an und die Interzeption geht infolge zunehmender Stammabflüsse zurück. Die Verdunstung am Waldboden hat aufgrund der Ausdunkelung durch die Buche eine untergeordnete Bedeutung. Die Buche hat in allen Altersphasen höhere Tiefensickerung als die Kiefer. So sickern unter vergleichbaren Boden- und Witterungsbedingungen

z. B. im Buchenbaumholz jährlich 50 mm mehr Niederschlag in die Tiefe als im Kiefernbaumholz (MÜLLER 2002, 2005). Die Untersuchungen in unterschiedlich alten Kiefern-Buchen-Mischbeständen auf Sandboden zeigen, dass sich die Höhe der Tiefensickerung in Abhängigkeit von den forstlichen Eingriffen und der Stammzahlhaltung sowie der Entwicklung der Baumdimensionen der Buchen zwischen dem Kiefern- und Buchen-Reinbestand einordnet (MÜLLER 2006, 2007).

3.2 Zur Rolle der Bodenvegetation in Kiefernbeständen – Ergebnisse der wägbaren Lysimeter

Um die Evapotranspiration der Bodenvegetation und damit ihren spezifischen Wasserverbrauch und somit ihre Konkurrenzwirkung getrennt von der Transpiration des Baumbestandes zu ermitteln, wurden die entwickelten wägbaren Lysimeter in unterschiedliche Vegetationsformen der Kiefer eingebaut.

Die untersuchten Bodenvegetationsdecken (Tab. 3) repräsentierten die charakteristische Artenzusammensetzung der Bodenpflanzenarten verbreiteter Kiefern-Ökosysteme auf den grundwasserfernen Sandstandorten des nordostdeutschen Tieflandes (HOFMANN 1995).

Die Evapotranspiration der Bodenvegetation wird stark von ihrer Artenzusammensetzung bestimmt. So verbraucht die geschlossene Sandrohrdecke in der Jahressumme über ein Drittel, die Drahtschmielendecke knapp 30 % der jährlichen Niederschlagsmenge von 620 mm. Bei Decken mit Kleinstrauchanteilen verdunsteten Himbeer-Drahtschmielendecken mit wenig mehr als 25 % und Blaubeer-Drahtschmielendecken mit knapp 20 % der Jahresniederschläge z. T. deutlich geringere Mengen als reine Grasdecken (Abb. 11). Diese Reihenfolge des Verbrauches ist im gesamten Untersuchungszeitraum gegeben. Nach Untersuchungen mit den wägbaren Lysimetern werden von der Waldbodenoberfläche eines noch bodenvegetationsfreien Bestandes mit dichtem Kronenschluss nur ca. 12 % der jährlichen Niederschlagsmenge

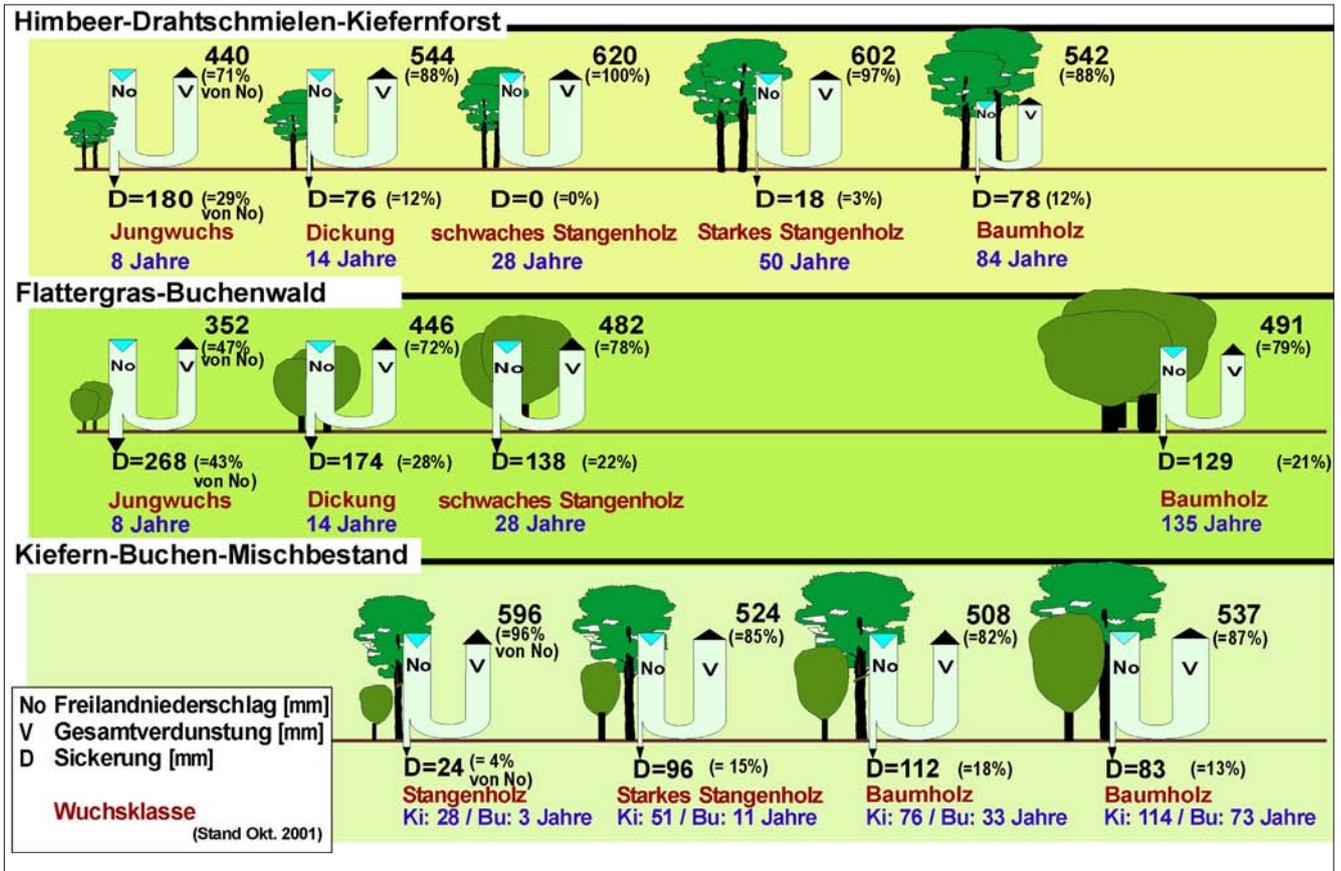


Abb. 10: Wasserhaushalt von Kiefern und Buchen im Rein- und Mischbestand in unterschiedlichen Wuchsstadien (Finowtaler Sandbraunerde, 620 mm Jahresniederschlag).

Fig. 10: Water balance of pine and beech in pure and mixed stands at different stand ages (620 mm annual precipitation, sandy soil with deep groundwater).

verdunstet. Im Baumholzstadium liegt bei voller Entfaltung der Grasdecke der Anteil der Evapotranspiration mit 30 % des Jahresniederschlags in der Größenordnung der Interzeptionsverdunstung des Baumbestandes. Die Phytomasseproduktion der Bodenvegetationsdecken in den einzelnen Wuchsstadien von Kiefernbeständen und ihr Anteil am Gesamtwasserverbrauch der Bestände wird neben Trophie und Feuchte in starkem Maße von der Bodenbelichtung beeinflusst (BOLTE

1996, BOLTE & BILKE 1998, BOLTE et al. 2001).

Neben der in der Jahressumme unterschiedlichen Verdunstung der Bodenvegetationsdecken ist die saisonale Entwicklung der Evapotranspiration innerhalb der Vegetationsperiode ökologisch bedeutungsvoll. Sie ist neben den Standortbedingungen maßgeblich vom Witterungsverlauf des jeweiligen Jahres abhängig. Bei den Grasvegetationsdecken wird die Wirkung

Tab. 3: Ökologische Kenndaten der mit wägbaren Lysimetern (WKL) untersuchten Vegetationsformen der Kiefer.

Tab. 3: Ecological data of the forest ecosystems examined with weighable lysimeters.

Vegetationsform	Blaubeer-Kiefernforst	Himbeer-Drahtschm.-Kiefernforst	Drahtschm.-Kiefernforst	Sandrohr-Kiefernforst
Humusform	Rohhumus	rohhumusartiger Moder bis Moder	rohhumusartiger Moder	rohhumusartiger Moder
Bodentyp	Sand- Eisen-podsol	pod. Sand-Braunerde	pod. Sand-Braunerde	pod. Sand-Braunerde
Bestandesalter [Jahre]	70	77	125	81
Artenzusammensetzung der Bodenvegetation	<i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Avenella flexuosa</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Scleropodium purum</i>	<i>Rubus idaeus</i> , <i>Avenella flexuosa</i> , <i>Scleropodium purum</i>	<i>Avenella flexuosa</i> , <i>Pleurozium schreberi</i>	<i>Calamagrostis epigejos</i> , <i>Brachythecium salebrosum</i>
Mittlere Evapotranspiration [mm] (März-Okt. 1996-1998)	138	154	180	236

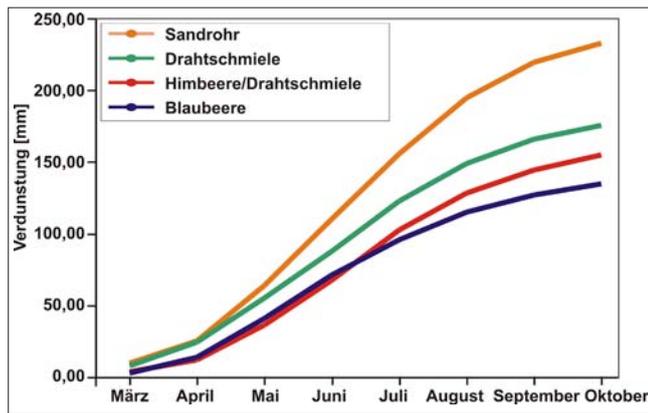


Abb. 11: Kumulative Verdunstung unterschiedlicher Bodenvegetationsdecken in Kiefernbeständen im Zeitraum März bis Oktober im Mittel der Jahre 1996–98.

Fig. 11: *Cumulative evapotranspiration of different species of ground vegetation in Scots pine stands on average for March through October in the years 1996–98.*

von Niederschlagsmangel und hoher Verdunstung besonders deutlich. In der Hauptwachstumszeit geht in trockenen Perioden mit sinkender Bodenwassermenge der relative Anteil der Baumtranspiration mit zunehmender Vergrasung der Kiefernbestände zurück. Das lässt auf eine Konkurrenzwirkung der Bodenvegetation bei der Bodenwasserentnahme schließen, was wiederum zu einer unterschiedlich starken Wachstumsreduktion des Baumbestandes führt. Zusammensetzung und Bodenbedeckung der Bodenvegetation beeinflussen maßgeblich die Höhe des Wasserverbrauchs der Baumvegetation. In Trockenperioden innerhalb der Vegetationsperiode reduziert sich in den Grasforsten im Vergleich zu den Zwergstrauchforsten die aktuelle Transpiration der Bäume infolge geringerer Bodenwasserverfügbarkeit (< 40 % der nutzbaren Feldkapazität) ca. eine Woche früher.

Die Bodenvegetation wird zu einem führenden Faktor im Wasserhaushalt in den Kiefernforsten (MÜLLER et al. 1998, MÜLLER 2002).

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Wälder haben durch ihre räumliche Ausdehnung und vegetationsstrukturellen Besonderheiten Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt.

Durch die Anwendung unterschiedlicher Methoden bei der Erfassung von Struktur- und Prozessparametern in den Waldökosystemen ist es möglich, die einzelnen Komponenten des Wasserhaushaltes vom Kultur- bis zum Baumholzstadium zu bestimmen und somit die Wechselbeziehungen zwischen den Strukturparametern der Vegetation und den in ihnen ablaufenden Prozessen des Wasserflusses zu quantifizieren.

Für Böden des Lockergesteinsbereiches sind zur Klärung des Bewuchseinflusses auf den Wasserhaushalt Messungen mit Lysimetern eine geeignete Methode. Unter der Voraussetzung einer richtigen Konstruktion und ausreichenden Größe der Lysimeter gilt das auch für Waldökosysteme. Neben der Lysimeteranwendung sind für die Überprüfung der Ergebnisse Wasserhaushaltsuntersuchungen in unterschiedlich strukturierten Waldbeständen unverzichtbar, da die Lysimeter durch spezielle „Randeffekte“ wie z.B. die gestörten

Bodenverhältnisse im Lysimeterkörper der Großlysimeter, die „Kleinräumigkeit“ der Lysimeterbestände (mögliche Oaseneffekte) oder die fehlenden Wurzeln der Hauptbaumschicht bei den Untersuchungen mit den wägbaren Lysimetern „Artefakte“ darstellen. Deshalb wurden in unterschiedlich strukturierten Waldbeständen (Kiefern- und Buchenbestände, Kiefern-Eichen- und Kiefern-Buchen-Mischbestände) außerhalb der Lysimeter zusätzliche Wasserflussmessungen durchgeführt. Die Ausrüstung der Intensivversuchsflächen mit Geräten zur meteorologisch-hydrologischen Messung ist bei MÜLLER 2002 näher beschrieben. Nachfolgend nur eine Übersicht zum Messprogramm (Abb. 12).

Mit Hilfe der Großlysimeter konnte der Einfluss der Baumart auf Tiefenversickerung und Verdunstung aufwachsender Bestände quantifiziert werden. Es zeigte sich, dass die Kronendachstrukturen maßgeblich die Höhe der Tiefenversickerung und die Verteilung des Niederschlages im Bestand mit Wirkung auf die Bodenwasserverfügbarkeit beeinflussen. Die in weiten Teilen des nordostdeutschen Tieflands geplante und praktizierte Umwandlung von umbauwürdigen Kiefernforsten in Kiefern-Buchen-Mischbestände führt durch Veränderung der Kronendachstrukturen im Zuge der Bestandesbehandlung langfristig zu einem positiven Effekt auf den Landschaftswasserhaushalt. Im Verlaufe des Umbauprozesses wirkt sich die zunehmende Dominanz der Buche positiv auf den Bestandeswasserhaushalt und das Feuchteregime in der Hauptwurzelzone aus. So führt der einsetzende Stammabfluss der Buchen im Winterhalbjahr zur zusätzlichen Tiefenversickerung im Stammfußbereich. Im Sommerhalbjahr erhöht die an Baumzahl sowie -durchmesser gebundene Stammabflussmenge die Oberbodenfeuchte im Bestand. Dieser Effekt wirkt sich positiv auf das Wachstum beider Baumarten aus (MÜLLER et al. 2002). Dies ist ebenfalls ein bedeutendes Ergebnis der forsthydrologischen Forschung.

Die Gesamtverdunstung gibt nur einen groben Überblick über den Wasserhaushalt der Waldbestände. Bedeutsamer für die Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen den Kompartimenten ist die Aufteilung der Gesamtverdunstung in die einzelnen Verdunstungskomponenten. In der Vegetationsperiode sind die Wasserverbräuche der einzelnen Vegetationsschichten für die Beurteilung von möglichem auftretendem Wasserstress von Bedeutung. Durch den Einsatz von wägbaren Lysimetern in Kiefernreinbeständen konnte nachgewiesen werden, dass die Höhe und die innerjährliche Entwicklung des Wasserverbrauches unterschiedlicher Bodenvegetationsdecken die Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenwassers mit Konsequenzen für den Wasserverbrauch der Baumschicht bestimmen.

Der große Vorteil der Lysimetertechnik besteht in der Möglichkeit der Bilanzierung von Verdunstung und Sickerung sowie möglicher Stoffausträge in hoher zeitlicher Auflösung unter genau zu differenzierenden Bedingungen. Dies macht die Lysimeter für die verschiedensten Einsatzfelder in Wissenschaft und Praxis immer interessanter. Lysimeter sind aufgrund innovativer Messtechniken (Wägezellen zur Bestimmung von Feuchteänderungen und Sickerwasserflüssen, Bodenfeuchtesensoren und Messgeräte zur Beobachtung der Sickerwasserbewegung) für die Parametrisierung von Prozessmodellen ein wichtiges Instrument. Vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung sind Lysimeter zur Untersuchung des Wasserverbrauches von Waldbäumen unterschiedlicher Herkunft bei knapper werdenden Wasserressourcen in Kombination mit Messungen in gewachsenen Waldbeständen unverzichtbar.

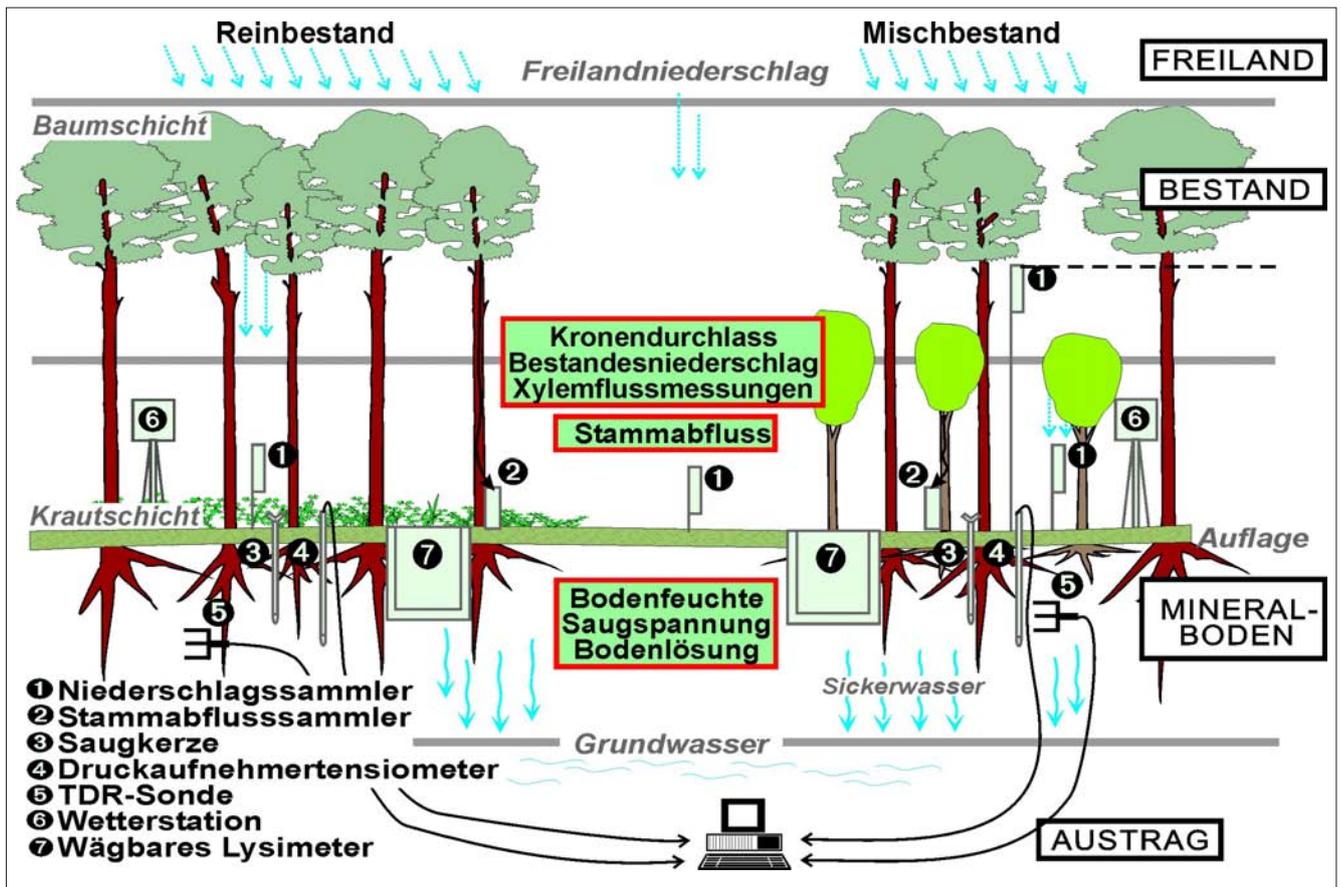


Abb. 12: Messgeräte zur Erfassung des Wasserflusses in Waldbeständen.

Fig. 12: Instruments for the measurement of water fluxes in forest stands.

Literatur

- BETHGE-STEFFENS, D., MEISSNER, R., RUPP, H. (2005): Ein wägbares Grundwasserlysimeter zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung von Flussauenstandorten. In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 11. Gumpensteiner Lysimetertagung: 147-148.
- BOLTE, A. (1996): Die Bodenvegetation in Kiefernökosystemen – eine Steuergröße für den Wasser- und Stoffhaushalt. In: Wald im Wandel 9. Hamburger Forst- und Holztagung, 06.-09. Mai 1996. Hamburg: Max Wiedebusch Kommiss. Verl., 97-111. = Mitt. Bundesforschungsanstalt Forst- Holzwirtschaft **185**.
- BOLTE, A., BILKE, G. (1998): Wirkung der Bodenbelichtung auf die Ausbreitung von *Calamagrostis epigejos* in den Kiefernforsten Nordostdeutschlands. Forst und Holz **53**: 232-236.
- BOLTE, A., LESSNER, C., MÜLLER, J., KALLWEIT, R. (2001): Zur Rolle der Bodenvegetation im Stoff- und Wasserhaushalt von Kiefernökosystemen – Level II-Untersuchungen in Brandenburg. Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie **35** (1): 26-29.
- BRAHMER, G. (1990): Wasser- und Stoffbilanzen bewaldeter Einzugsgebiete im Schwarzwald unter besonderer Berücksichtigung naturräumlicher Ausstattung und atmosphärischer Einträge. Freiburger Bodenkundl. Abhandl. **25**.
- FÜHRER, H-W. (1990): Einflüsse des Waldes und waldbaulicher Maßnahmen auf Höhe, zeitliche Verteilung und Qualität des Abflusses aus kleinen Einzugsgebieten. Forstl. Forschungsber. München **106**.
- GRIMMEISEN, W. (1994): Bodenfeuchtemessungen an Waldklimastationen. Allg. Forstztschr. **49**: 73-74.
- HAUHS, M. (1985): Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Langen Bramke (Harz). Ber. d. Forsch. Waldökosysteme / Waldsterben A, Bd. **17**.
- HELBIG, A. (1988): Vergleich der Wasserhaushaltskomponenten eines Kiefernbestandes und einer Waldgrasfläche nach Lysimetermessungen. Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR **140**: 123-128.
- HERNDL, M., BOHNER, A., KANDOLF, M. (2009): Gebirgslsimeter am Stoderzinken – Erste Ergebnisse. In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 13. Gumpensteiner Lysimetertagung: 111-116.
- HOFMANN, G. (1995): Wald, Klima, Fremdstoffeintrag – ökologischer Wandel mit Konsequenzen für Waldbau und Naturschutz, dargestellt am Gebiet der neuen Bundesländer Deutschlands. Angew. Landschaftsökol. **4**: 165-189.
- KREUTZER, K., GÖTTLEIN, A. (1991): Ökosystemforschung Höglwald. Hamburg, Berlin.
- LANTHALER, CH., FANK, J. (2005): Lysimeter Stations and Soil Hydrology Measuring Sites in Europe – Results of a 2004 Survey. In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 11. Gumpensteiner Lysimetertagung: 19-24.
- LANTHALER, CH. (2007): Lysimeter in Europa: Messinstrumente für Land- und Forstwirtschaft sowie Ökologie; neue Stationen auf der "European Lysimeter Platform". In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 12. Gumpensteiner Lysimetertagung: 159-161.
- LÜTZKE, R., SIMON, K.-H. (1972): Hydrologische Untersuchungen zur Bilanzierung des Wasserhaushaltes von Kiefernbeständen im nordostdeutschen Flachland. Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch. **12** (1): 13-36.

- LÜTZKE, R., SIMON K.-H. (1975): Zur Bilanzierung des Wasserhaushalts von Waldbeständen auf Sandstandorten der DDR. Beiträge für Forstwirtschaft **9** (1): 5-12.
- MANDERSCHIED, B. (1992): Modellentwicklung zum Wasser- und Stoffhaushalt am Beispiel von vier Monitoringflächen. Diss. d. Univ. Göttingen.
- MÜLLER, J. (1993): Die Großlysimeteranlage Britz (bei Eberswalde). Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft **71**: 18-19.
- MÜLLER, J., SEYFARTH, M. (1999): Methode zur Ermittlung des Wasserverbrauches unterschiedlicher Waldbodenvegetationsdecken mit Hilfe von wägbaren Lysimetern. In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 8. Gumpensteiner Lysimetertagung: 177-178.
- MÜLLER, J. (2001): Ermittlung von Kennwerten des Wasserhaushaltes in Kiefern- und Buchenbeständen des nordostdeutschen Tieflands. Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie **35** (1): 14-18.
- MÜLLER, J. (2002): Wirkungszusammenhänge zwischen Vegetationsstrukturen und hydrologischen Prozessen in Wäldern und Forsten. In: ANDERS, S. (ed.): Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Verlag Dr. Kessel, Oberwinter: 99-122.
- MÜLLER, J., BECK, W., HORNSCHUCH, F., STEINER, A. (2002): Quantifizierung der ökologischen Wirkungen aufwachsender Kiefern-Buchen-Mischbestände im nordostdeutschen Tiefland. Beitr. f. Forstwirtschaft Landschaftsökologie **36** (3): 125-131.
- MÜLLER, J. (2005): 30 Jahre forsthydrologische Forschung auf der Großlysimeteranlage in Britz – Zielstellung und Ergebnisse. Tagungsband der 11. Gumpensteiner Lysimetertagung „Lysimetrie im Netzwerk der Dynamik von Ökosystemen“: 29-32.
- MÜLLER, J. (2006): Veränderung hydroökologischer Parameter im Prozess des Waldumbaus von Kiefernforsten über Kiefern-Buchen-Mischbestände zu Buchenwäldern im nordostdeutschen Tiefland. In: DWA, Wasser- und Bodentage. Feuchtwangen: 1-17.
- MÜLLER, J. (2007): Forestry and limited water budget in the Northeast German Lowlands – consequences for the choice of tree species and forest management. Progress in Hydro Science and Engineering, the Role of Forests and Forest Management in the Water Cycle, Contributions to the Sino-German Symposium 27-30 November 2006, Dresden. Dresden Water Center. Volume **3**: 355-364.
- MÜLLER, J. (2007): Verdunstung und Wasserhaushalt unterschiedlich strukturierter Kiefern-Buchen-Mischbestände auf grundwasserfernen Sandstandorten. In: MIEGEL, K., KLEEBERG, H.-B. (eds): Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Verdunstung – Beiträge zum Seminar Verdunstung am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam. Hydrologische Wissenschaften Fachgemeinschaft in der DWA 21/07: 97-112.
- MÜLLER, J. (2008): Die Versuchsstation auf dem „Drachenkopf“ in Eberswalde. Eberswalder Jahrbuch für Heimat-, Kultur- und Naturgeschichte 2007/2008: 248-253.
- MÜLLER, J. (2009): Auswirkung von Trockenheit auf den Waldzustand – Ansätze zur Bewertung der potentiellen Trockenheitsgefährdung von Waldstandorten. Forum Hydrol. Wasserbewirtschaftung **26**: 31-38.
- MÜLLER, J., BOLTE, A., BECK, W., ANDERS, S. (1998): Bodenvegetation und Wasserhaushalt von Kiefernforstökosystemen (*Pinus sylvestris* L.). Verh. Ges. Ökol. **28**: 407-414.
- PRASUHN, V., SPIESS, E., SEYFARTH, M. (2009): Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 13. Gumpensteiner Lysimetertagung: 11-16.
- PREUHSLER, T., GIETL, G., GRIMMEISEN, W., KENNEL, M., LECHLER, H.H. (1994): Forschungsprojekt Waldklimastationen in Bayern. Allg. Forstzeitschrift **47**: 529-533.
- RAKEI, A. (1991): Wasserhaushalt eines Alt- und Jungkiefernbestandes auf Rostbraunerde des Grunewaldes (Berlin). Schrift aus der TU Berlin, Inst. f. Ökologie, Fachgebiet Bodenkunde und Regionale Bodenkunde Heft **4**.
- RIEK, W., RENGER, M. (1994): Der Wasserhaushalt der Kiefer als Funktion von Boden- und Klimaparametern in den Berliner Forsten. Forstarchiv **65**: 167-171.
- RUPP, H., MEISSNER, R., LEINWEBER, B., LENNARTZ, B., SEYFARTH, M. (2005): Ein neues Lysimeter zur Messung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Niedermoorstandorten (einschließlich lateraler Komponenten). In: Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 11. Gumpensteiner Lysimetertagung: 67-69.
- SCHROEDER, M. (1990): Verdunstung von Land- und Wasseroberflächen in St. Arnold bei Rheine in den Jahren 1980 bis 1987. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen **34** (4).
- VAN DER HOEVEN, P.C.T. (2005): Lysimeters Castricum. Report 1.

submitted: 13.11.10

reviewed: 21.12.10

accepted: 20.01.11

Autorenanschrift:

Dr. Jürgen Müller
 Johann Heinrich v. Thünen-Institut,
 Institut für Waldökologie und Waldinventuren
 A.-Möller-Str. 1
 16225 Eberswalde
 E-Mail: juergen.mueller@vti.bund.de