

# Die forstökologische Forschung mit Lysimetern: Möglichkeiten und Grenzen ihres Einsatzes

Jürgen Müller<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Die Nutzung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Pflanzen ist seit Ende des 18. Jahrhunderts bekannt. Sie dienen heute weltweit der Erforschung von Ursachen-Wirkungsbeziehungen in den unterschiedlichsten Ökosystemen. Der Einsatz von Waldlysimetern ist wegen der besonderen Anforderungen an Tiefe und Oberfläche auf wenige Anlagen beschränkt.

Die Nutzung von Lysimetern unterschiedlicher Bauart hat im Raum Eberswalde eine über hundertjährige Tradition.

Mit den 1972 am Standort Britz bei Eberswalde erbauten neun Großlysimetern mit einer Tiefe von 5 m und einer Oberfläche von 100 m<sup>2</sup> wurden Kennwerte des Wasserhaushaltes für die Baumarten Kiefer, Buche, Lärche und Douglasie ermittelt. Ein wesentliches Ergebnis ist, dass die Baumart im hohen Maße die Höhe von Verdunstung und Grundwasserneubildung bestimmt.

Ergänzt werden diese Untersuchungen durch Messungen des Wasserflusses unterschiedlicher Baumarten in Waldbeständen außerhalb der Lysimeter zur Ableitung von Transferfunktionen zur Übertragung der Ergebnisse auf die Bestandes- und Landschaftsebene.

*Schlagwörter:* Waldlysimeter, Baumarten, Wasserverbrauch, Landschaftswasserhaushalt

## Summary

Lysimeters have been used for the investigation of the water balance and substance cycles of plants since the end of the 18th century. They are now used worldwide to investigate causal relationships in a wide variety of ecosystems. Forest lysimeters are less common in view of the special demands in terms of depth and surface area.

For more than a century, various types of lysimeters have been used to study trees in the Eberswalde region, near Berlin. Using the nine large-scale lysimeters built in 1972, with a depth of 5 m and a surface area of 100 m<sup>2</sup>, water balance parameters have been determined for pine, beech, larch and Douglas fir trees. A key finding has been that the tree species determine to very different extents the rate of evaporation and groundwater recharge.

These experiments are augmented by measuring water fluxes of various tree species in adjacent forest stands in order to derive transfer functions for applying the lysimeter results at the stock and landscape levels.

*Keywords:* Forest lysimeter, tree species, water consumption, landscape water balance

## Einleitung

Lysimeter sind geeignete Messeinrichtungen zur Erfassung des Wasser- und Stoffhaushaltes von einzelnen Pflanzen und Pflanzenbeständen.

Die Nutzung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Pflanzen ist seit Ende des 18. Jahrhunderts bekannt. Bei diesen Versuchen wurden bereits wägbare Lysimeter verwendet. Allerdings waren sie mit Oberflächen bis zu 0,1m<sup>2</sup> und Tiefen bis zu 0,5m relativ klein.

Der Einsatz von Lysimetern für Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen ist gängige Praxis. Gegenwärtig erfährt der Lysimeter Einsatz durch die Anwendung neuer Entnahme- und Einbautechnologien sowie innovativer Messtechnik einen Anwendungsschub in Wissenschaft und Praxis (Rupp et al. 2005, Herndl et al. 2009, Prasuhn et al. 2009). Eine Übersicht über vorhandene Lysimeterstationen geben Lanthaler und 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.

Von Anbeginn waren die Vor- und Nachteile der Lysimeteranwendung Gegenstand einer regen wissenschaftlichen Diskussion. Zu den Kritikern der Lysimeteranwendung gehörte Olbertz 1957. Die Übertragung der Lysimeterergebnisse über den Wasserhaushalt von Vegetationen auf die Landschaftsebene wird oft in Frage gestellt. Das ist insofern richtig als, dass ein Einzugsgebiet bezüglich Boden, Relief, Bewuchs inhomogen ist und neben den Lysimetern Untersuchungen und Übertragungsfunktionen auf die Landschaftsebene notwendig sind.

Der Einsatz von Lysimetern in der waldökologischen Forschung war und ist wenig verbreitet. Die Ursachen dafür liegen in den Besonderheiten des Ökosystems Wald wie deren Höhe und Oberfläche, die ausgeprägte vertikale Bestandesstruktur mit Baum-, Strauch- und Krautschicht und die räumliche Ausdehnung des Waldes in der Landschaft.

<sup>1</sup> Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme, Alfred-Möller-Straße 1, D-16225 EBERSWALDE

\* Ansprechpartner: Dr. Jürgen Müller, juergen.mueller@ti.bund.de



Dies erfordert Lysimeter mit ausreichender Größe und Tiefe. Lysimeteranlagen entsprechender Größe gibt es in Deutschland in der Letzlinger Heide, Sachsen-Anhalt (Glugla et al. 1982), in St. Arnold, Nordrhein-Westfalen (Schroeder 1989) in Britz, Brandenburg (Lützkund Simon 1975), in Castricum in den Niederlanden (Hoeven van der 2005).

Dieser Artikel zeigt an einem Beispiel die Möglichkeit der Übertragung der Ergebnisse zum Wasserhaushalt von Baumarten von den Lysimetern auf die Bestandes- und Landschaftsebene.

## Anforderungen an Lysimeter

Die Nutzung von Lysimetern für die Untersuchung des Wasserhaushaltes von Vegetationen und die Verallgemeinerung der Ergebnisse ist abhängig von der Lysimeterkonstruktion, der Oberfläche und Tiefe der Lysimeter. Dabei sind nachfolgende Bedingungen zu beachten.

### *Lysimetertiefe*

Die Lysimetertiefe muss so sein, dass sich die Wurzeln nach unten frei entwickeln können. Dabei muss beachtet werden, dass der sich über der Lysimetersohle bildende Sickerwasserstau nicht durch die Wurzeln erreicht werden kann. Dieser mögliche Störeinfluss auf Abfluss und Verdunstung war in den Anfangsjahren der Lysimeteranwendung Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion (Kohnke et al. 1940, Kortüm 1959). Nach Lützke 1965 sollen Lysimeter mindestens so tief sein, dass die wechselfeuchte Zone die gleiche Mächtigkeit wie im unbeeinflussten Boden hat und dass sich unter ihr eine noch nicht durchwurzelte Haftwasserzone befindet. In den meisten Fällen ist bei grundwasserfernen Sandböden eine Tiefe von 2m ausreichend, sofern keine tieferen Wurzeln vorhanden sind. Bei lehmigen Böden müssen die Lysimeter wegen größerer Durchwurzelungstiefen der Pflanzen tiefer sein.

### *Lysimeteroberfläche*

Ein Vergleich unterschiedlich großer (Oberfläche) und tiefer Lysimeter auf die Höhe von Verdunstung und Abfluss war in den Jahren 1960/61 Gegenstand der Forschung auf der Lysimeterstation auf dem Drachenkopf. Mit den vorhandenen wägbaren Lysimetern und mit Lysimetern des Typs GGI 500 wurden Untersuchungen zu Verdunstung und Sickerung von Brache und Heidekraut (*Calluna vulgaris*) durchgeführt (Lützke 1965). Der Boden in beiden Lysimetertypen war bezüglich Lagerungsdichte und Bodentextur vergleichbar. Die Lysimeter GGI 500 haben eine kreisrunde Oberfläche von 500 cm<sup>2</sup> und eine Tiefe von 50cm. Die Bodenmonolithe sind ungestört. Die Ergebnisse zeigten, dass die GGI 500-Lysimeter verfälschte Wasserhaushaltskennwerte bringen. Die Verdunstung wurde zu hoch, die Sickerung zu niedrig bestimmt (Lützke 1965). Die Hauptursache dafür war der entstehende Sickerwasserstau über der Lysimetersohle. Fazit des Vergleichs ist, dass plausible Wasserhaushaltsbilanzen nur mit einer der Vegetation entsprechenden großen Oberfläche und Tiefe erzielt werden können.

### *Lysimeterumgebung*

Die Lysimeter sollten bodengleich eingebaut werden und in der Umgebung gleichartig umwachsen sein. Diese For-

derung ergibt sich aus der Notwendigkeit, vergleichbare mikroklimatische Bedingungen zwischen der Lysimeterbedeckung und der in der Umgebung wachsenden Vegetation zu haben.

### *Bodenverhältnisse*

Der Idealfall ist, im Lysimeter einen ungestörten Bodenmonolith untersuchen zu können. Das ist häufig nicht der Fall. Die Lysimeter sind maschinell befüllt und somit in der Bodenstruktur gestört. Dies führt zur Veränderung des Fließverhaltens des Wassers im Boden. Das trifft vorrangig auf schluff- und lehmreiche Böden zu. Es ist deshalb notwendig, die bodenphysikalischen Kennwerte des gestörten Bodens zu bestimmen und es ist zu empfehlen, Vergleichsmessungen der bodenhydrologischen Kennwerte wie z.B. der gesättigten und ungesättigten Leitfähigkeit im gestörten und ungestörten Boden durchzuführen, um daraus Korrekturfaktoren für das veränderte Fließverhalten des Sickerwassers im Boden abzuleiten. Aus den unterschiedlichen Bodenverhältnissen können sich auch Unterschiede im Pflanzenwuchs ergeben. Deshalb sind die Lysimeteruntersuchungen durch regelmäßige Aufnahmen der Pflanzenentwicklung zu begleiten.

### *Übertragbarkeit der Lysimeterergebnisse*

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse hängt maßgeblich von der Aufgabenstellung der Untersuchungen ab. In der Grundlagenforschung sind Lysimeter für die Untersuchung von Ursachen-Wirkungsbeziehungen hervorragend geeignet (siehe nachfolgende Fallbeispiele). Für die Übertragung der Ergebnisse auf Ökosysteme und die Landschaftsebene sind weiterführende Untersuchungen für die Ermittlung von Übertragungsfunktionen zwingend erforderlich.

## Die Anwendung von Lysimetern in der Forsthydrologie

Der Einsatz von Lysimetern hat in diesem Naturraum eine lange Tradition. Ursache dafür sind die standortspezifischen Bedingungen der Region wie Niederschlagsarmut, hoher Waldanteil und sandiger Boden (Müller 2009).

### *Die Lysimeterstation „Drachenkopf“*

Bereits 1907 wurden auf dem „Drachenkopf“ in Eberswalde erste Wasserhaushaltsuntersuchungen mit wägbaren Kleinstlysimetern durchgeführt (Müller 2008). Diese Kleinstlysimeter wurden 1929 durch eine größere wägbare Anlage mit drei Lysimetern ersetzt. Initiator des Lysimeterbaus war der damalige Direktor des physikalisch - meteorologischen Institutes der Forstlichen Hochschule Julius Bartels in Zusammenarbeit mit W. Friedrich von der Landesanstalt für Gewässerkunde. In den Vordergrund rückten Untersuchungen zum Wasserhaushalt. Schwerpunkt waren Grundlagenuntersuchungen zu Verdunstung, Tiefensickerung und Bodenfeuchtigkeit von Pflanzendecken. Neben Feldgras wurde von 1933 bis 1937 der Wasserhaushalt kleiner Kiefern untersucht, von 1949 bis 1954 die Verdunstung und die Sickerung kleiner Eichen ermittelt. Die wägbaren Lysimeter haben eine quadratische Oberfläche von einem Quadratmeter und sind 1,5 m tief. Detailliert wurde die Anlage bei Müller 2009 beschrieben.

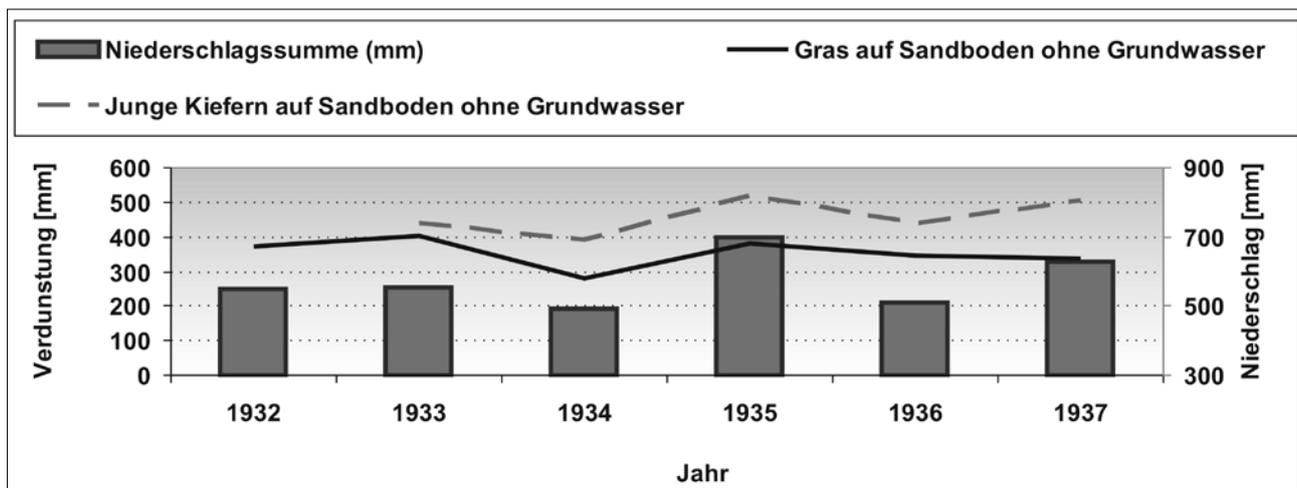


Abbildung 1: Verdunstung junger Kiefern im Vergleich zum Feldgras auf Sandboden.

Die Versuchsstation „Drachenkopf“ ist nach unserem Kenntnisstand die älteste Lysimeterstation der Welt für forsthydrologische Zwecke.

Im Jahr 1954 wurde die Station um vier weitere Lysimeter ergänzt. Mit nun insgesamt sieben Lysimetern wurde der Einfluss unterschiedlicher Pflanzendecken auf den Wasserhaushalt untersucht. Der Schwerpunkt der Untersuchungen bestand in der Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten Evaporation, Transpiration und Sickerung unter definierten Witterungs- und Bodenverhältnissen sowie wechselndem Bewuchs. In den Jahren von 1955 bis 1958 stand die Ermittlung des Wasserhaushalts kleiner Bäume (Douglasie, Eiche, Buche, Kiefer) im Mittelpunkt. Unter den niederschlagsarmen Bedingungen der Region war die Ermittlung der Sickerwassermengen von besonderem Interesse, denn nur dieser Teil des Niederschlages, der dem Grundwasser zufließt, ist wasserwirtschaftlich nutzbar. So verdunstete das mehrjährige Feldgras 106 mm weniger als die Kiefern (Abbildung 1).

Natürlich waren die Ergebnisse nur auf kleine Kiefern (Zwei- bis Sechsjährige) anwendbar, da für Untersuchungen mit älteren Bäumen die begrenzte Tiefe und Oberfläche der Lysimeter nicht sinnvoll waren.

Mit diesen Lysimetern wurde eine Vielzahl von Ergebnissen erzielt, die Grundlage für weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Landnutzung auf den Wasserhaushalt waren.

Ein wesentliches Ergebnis war jedoch, dass unter vergleichbaren Witterungs- und Bodenbedingungen die Pflanzenart und der Deckungsgrad der Vegetation maßgeblich die Höhe und den zeitlichen Verlauf von Sickerung und Verdunstung beeinflussen. Weitere Untersuchungen erfolgten deshalb in Waldbeständen mit Unterflurlysimetern.

### Die Großlysimeteranlage in Britz

Die forsthydrologische Forschung am Standort Eberswalde erfolgte in weiten Teilen im Auftrag der Wasserwirtschaft, da die Höhe der Grundwasserneubildung unter Wald noch weitestgehend unbekannt war. So wurden die „Drachenkopflysimeter“ durch das Reichsministerium für Wasserwirtschaft finanziert.

Nachdem die Untersuchungen mit den Unterflurlysimetern nicht erfolgreich waren, wurde Mitte der Sechziger Jahre mit Experten von Forst- und Wasserwirtschaft über den Bau einer Großlysimeteranlage mit mehreren Baumarten diskutiert und im Jahr 1968 beschlossen, am Standort Britz bei Eberswalde eine Anlage mit neun Lysimetern zu errichten. Finanziert wurde sie durch das Ministerium für Wasserwirtschaft.

Andere Lysimetererfahrungen nutzend erfolgte 1972 der Bau von Großlysimetern mit einer für Waldlysimeter notwendigen Tiefe von 5 m und einer Oberfläche von 100 m<sup>2</sup> (10x10 m). Die „Britzer 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. 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 unwägbare und gestört. 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. In Müller 2009, 2011 sind detaillierte Informationen zur Lysimeterkonstruktion und den Bestockungen enthalten.

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 soll deutschlandweit durch möglichst vielfältig strukturierte Mischbestände geprägt sein. 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. Vor diesem Hintergrund wurden einzelne Lysimeterbestände im Jahre 2000 strukturell wie folgt verändert: Lärche mit Buche unterbaut, Kiefer mit Buche unterbaut, Kiefer mit Eiche unterbaut, Eichenneuanpflanzung.

Mit der Erweiterung der Zielstellung für die Lysimeteranlage werden wichtige ökologische Grundlagen für einen erfolgreichen Waldumbau erarbeitet.

Hinsichtlich Lysimetertiefe, -oberfläche und -umgebung erfüllen die Waldlysimeter die im Abschnitt 2 genannten Anforderungen. Bei den Bodenverhältnissen haben wir gestörte Verhältnisse und auch nach 45 Jahren bezüglich der Lagerungsdichte die Bedingungen in „gewachsenen“ Waldbeständen nicht erreicht. Die Umgebung jedes Lysimeters ist mit gleicher Art und Alter umwachsen (0,3ha). Die Zahl der Bäume auf den Lysimetern liegt zwischen 8 bis 15 Stück und reduziert sich weiter.

### *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 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 Größe. Bei gegebener Niederschlagsarmut ist sie jedoch mit ihrer Konkurrenz um die Ressource Wasser eine Steuergröße 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 (Müller und Seyfarth 1999, Müller 2009, Müller 2015).

Die Lysimeter sind wägbare mit einem ungestörtem Bodenkörper und mobiler Einsatzmöglichkeit in Waldbeständen. Sie haben eine Oberfläche von 1m<sup>2</sup> und sind 2m tief.

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

- Messung des Wasserverbrauchs und möglicher Konkurrenzwirkung der Bodenvegetation in Kiefernbeständen mit unterschiedlicher Artenzusammensetzung
- Messung des Wasserverbrauchs unterständiger Bäume im Mischbestand)
- 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.

### *Messungen des Wasserflusses in Waldbeständen*

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 Messung des Bodenwasserflusses in hydrologischen Messfeldern, zur Ermittlung der Baumtranspiration von Kiefern über Saftflussmessungen nach Granier und zur Bestimmung der Evapotranspiration von Bodenvegetationsdecken mit Hilfe von wägbaren Lysimetern in Waldbeständen ist bei Müller 2002 näher beschrieben.

## Ergebnisse

### *Auswirkungen von waldstrukturellen Veränderungen auf den Wasserhaushalt auf Bestandes- und Landschaftsebene*

Die Ergebnisse zum Wasserhaushalt von Waldbeständen unterschiedlicher Baumarten konnten nur durch die Zusammenführung der Ergebnisse der Großlysimeter, der wägbaren Lysimeter in Kombination mit Untersuchungen in Waldbeständen außerhalb der Lysimeter beantwortet werden. Ein wesentliches Ergebnis der Langzeitmessungen mit den Lysimetern war, dass es zur Erklärung der baumartenspezifischen Sickerungsunterschiede notwendig ist, die einzelnen Verdunstungskomponenten Interzeption, Transpiration und Verdunstung am Waldboden zu analysieren. So führen die waldstrukturellen Veränderungen des Kronendaches im Verlauf der Bestandesentwicklung zu Unterschieden in der Höhe der Verdunstungskomponenten und der Grundwasserneubildung.

Beispielhaft ist dies für die Nadelbaumart Kiefer und die Buche als Laubbaum in der *Abbildung 2a, b* dargestellt. Die Kiefer (immergrün, raue Rinde, offene sperrige Krone) hat gegenüber der Buche (winterkahl, glatte Rinde mit Stammabfluss) höhere Interzeptionsverluste im Kronendach. Bei der Kiefer liegt die Gesamtverdunstung im Alter von 30 Jahren bei 100 %. Die Kiefern haben in diesem Alter bereits Zuwachskulmination, dementsprechend hohe Transpiration und infolge hoher Stammzahlen und dichter Kronendächer eine hohe Interzeption mit über 40 % der jährlichen Niederschlagsmenge. Die Sickerung geht in diesem Stadium gegen Null. Durch natürliche Baumzahlreduzierung und planmäßige Durchforstungen gehen Transpiration und Interzeption

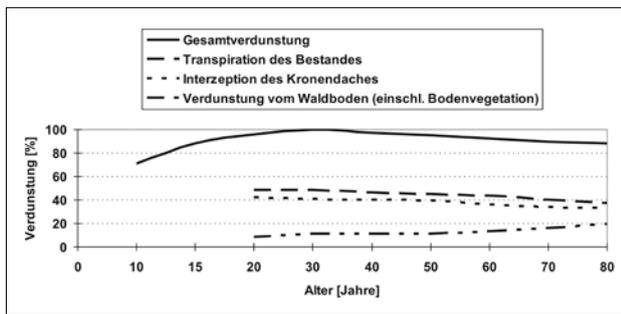


Abbildung 2a: Verlauf der Verdunstungskomponenten im Kiefern-Reinbestand im Zuge der Bestandesentwicklung.

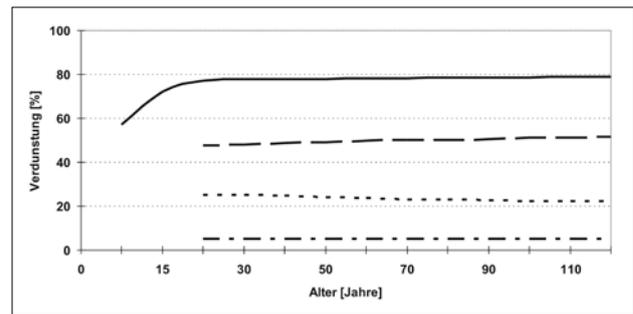


Abbildung 2b: Verlauf der Verdunstungskomponenten im Buchen-Reinbestand im Zuge der Bestandesentwicklung.

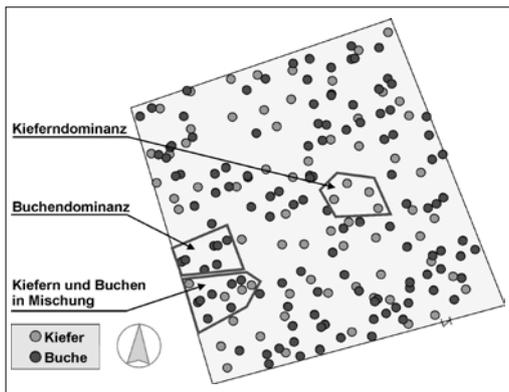


Abbildung 3a: Strukturdifferenzierungen im Kiefern – Buchen-Mischbestand (Kiefer 114 und Buche 53 Jahre).

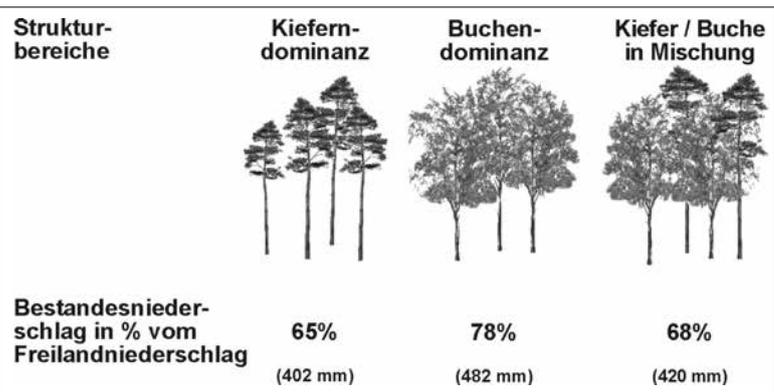


Abbildung 3b: Differenzierung des Bestandesniederschlages im Kiefern- und Buchen-Mischbestand.

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. 2002). Im Buchenbestand steigt die Verdunstung mit dem Aufwachsen der Bestände ebenfalls 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.

Für die Untersuchungen auf Bestandesebene und die Einrichtung von Messplots in Mischbeständen waren die Ergebnisse von wesentlicher Bedeutung. So wurden die Messplots gezielt in Bereiche mit Nadelholz- und Laubholzdominanz sowie in Bereiche mit Mischung von Laub- und Nadelholz installiert (Abbildung 3a). Die sich mit dem Buchenunterbau veränderte Kronenarchitektur wirkt sich über die Höhe der Bestandesniederschläge und ihrer Verteilung im Bestand direkt auf die Tiefensickerung aus (Abbildung 3b).

Durch die Anwendung der Kenntnisse zu den Wechselbeziehungen zwischen den Strukturparametern der Vegetation und den in ihnen ablaufenden Prozessen des Wasserflusses ist es zum einen möglich, die einzelnen Komponenten des Wasserhaushaltes durch die Bewirtschaftung zu steuern und

zum anderen Funktionen für Übertragung der Ergebnisse auf die Landschaftsebene abzuleiten.

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 4.

Die aus der Analyse von Struktur-Prozess-Beziehungen gewonnenen Untersuchungsergebnisse und das daraus abgeleitete Wassermodell erlaubt auf dem Wege der Synthese die Übertragung punktueller Ergebnisse und Erkenntnisse auf beliebige Befundeinheiten innerhalb des nordostdeutschen Tieflandes. Voraussetzung dafür ist, dass diese Befundeinheiten keine anderen als die untersuchten Standortmerkmale aufweisen. Für letztere ist innerhalb des Bereiches der untersuchten Merkmalsausprägungen beliebige Konstellation und Verteilung zulässig. Am Beispiel der Tiefensickerung unter Wald wurde dies für ein zusammenhängendes Waldgebiet mit einer Gesamtgröße von 674 ha exemplarisch dargestellt. Da das Standortspektrum typisch für den Nordbrandenburger Raum ist, wurde die Sickerungsmodellierung anhand von Bewaldungsszenarien vorgenommen. Der Modellierung lagen bei gegebener Standortverteilung drei unterschiedliche Bewaldungsszenarien zugrunde: Buchenwald (natürliche Baumartenzusammensetzung), Kiefernforst (Ersatzvegetation) und Kiefern- Buchen-Mischbestand (Flächenmischung im Sinne eines ökologisch-ökonomischen Kompromisses).

Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien (Müller et al. 2001). Nach den Ergebnissen der Mo-

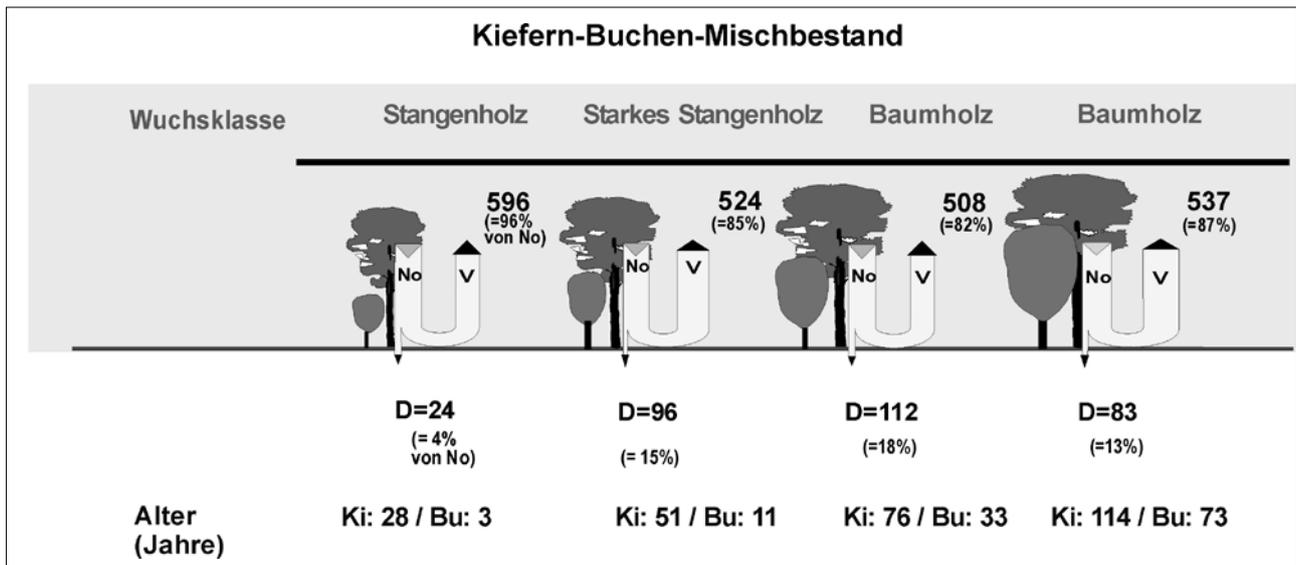


Abbildung 4: Wasserhaushalt von Kiefern-Buchen-Mischbeständen in unterschiedlichen Wuchsstadien (No = 620 mm Jahresfreilandniederschlag, V = Gesamtverdunstung in mm, D = Sickerung in mm; Sandbraunerde).

Tabelle 1: Tiefensickerung für drei Bewaldungsszenarien des Reviers Kahlenberg (620 mm Jahresniederschlag).

Szenario	Sickerung		
	m <sup>3</sup> /a	mm/a	% vom Freilandniederschlag
Buchenwälder	898.752	140	23
Kiefernforsten	298.762	47	8
Derzeitige Bestandestypenverteilung	494.883	77	12

dellierungen der drei Anbauszenarien beträgt die potentielle Grundwasserspende unter Buche mit ca. 900.000 m<sup>3</sup> pro Jahr (= 141 mm/a) das Dreifache der Kiefer. Die Variante mit Kiefer und Buche ordnet sich mit rund 400.000 m<sup>3</sup> (= 63 mm/a) möglicher Grundwasserspende zwischen der Kiefern- und Buchenvariante ein (Tabelle 1).

In einem weiteren Schritt wurde unter Anwendung eines Landschaftswasserhaushaltsmodells und unter Nutzung der ermittelten Struktur-Prozessbeziehung untersucht, wie sich der Wasserhaushalt im Waldgebiet der Schorfheide im Zeitraum 2005 – 2055 unter Einfluss des Klimawandels entwickelt. Dazu wurden zwei Szenarien angenommen: Die derzeitige Bestandestypenverteilung und ein nach potenziell natürlicher Vegetation umgebauter Wald (Goral und Müller 2010).

Die Simulationen ergaben, dass bei Beibehaltung der derzeitigen Bestandestypen mit einem weiteren Rückgang der Grundwasserstände zu rechnen ist. Demgegenüber kann der Waldumbau im Vergleich zum aktuellen Zustand bis etwa zum Jahr 2035 einen Anstieg des Grundwasserspiegels bewirken. (Goral und Müller 2010).

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Wälder besitzen eine wichtige Funktion im regionalen Wasserhaushalt; durch ihre Regulationswirkung beeinflussen sie maßgeblich den Landschaftswasserhaushalt. Die Bäume zeigen durch ihre artenspezifische Formen Unterschiede in der Umverteilung und im Verbrauch des Niederschlags. Diese Prozesse des Wasserflusses von der Atmosphäre durch die Bestände und den Boden gilt es zu untersuchen. Ein

oft großes Problem von Wasserhaushaltsuntersuchungen in verschiedenartigen Ökosystemen sind ungleiche oder nicht genügend kontrollierbare Randbedingungen auf den einzelnen Versuchsflächen. Dadurch kann im Ergebnis die Wirkung der eigentlich interessierenden Einflussgröße verwischt und verfälscht werden.

Wenn für Böden des Lockergesteinsbereiches die Wirkung des Bewuchses auf den Wasserhaushalt zu klären ist, sind zur Ausschaltung störender Randbedingungen Messungen mit Lysimetern eine geeignete Methode. Unter der Voraussetzung einer richtigen Konstruktion und ausreichenden Größe sowie Tiefe der Lysimeter gilt das auch für Bäume.

Lysimeter haben Randeffekte, die die erzielten Ergebnisse zum Stoff- und Wasserhaushalt beeinflussen können. Vereinzelt werden die mit Lysimetern erzielten Ergebnisse mehr oder weniger unkommentiert verallgemeinert und auf die Ökosystemebene übertragen. Deshalb sind besonders auf Grund der strukturellen Besonderheiten der Wälder neben der Lysimeteranwendung 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 Rein- und Mischbeständen außerhalb der Lysimeter zusätzliche Wasserflussmessungen durchgeführt, um Funktionen zur Übertragung der Lysimeterergebnisse auf Waldbestände abzuleiten.

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 Tiefensickerung und die Verteilung des Niederschlages im Bestand mit Wirkung auf die Bodenwasserverfügbarkeit beeinflussen. Diese baumartenspezifischen Muster des Wasserflusses waren die Grundlage für die Instrumentierung in den unterschiedlichen Beständen.

Im Ergebnis einer hochauflösenden kleinstrukturellen Analyse der untersuchten Bestände wurden, die in Abhängigkeit von der Bestandesstruktur entstehenden Muster der Umverteilung des Niederschlags in Bestand und Boden mit Auswirkungen auf die Anteile der einzelnen Verdunstungskomponenten und die Sickerung ermittelt. Die tiefenabhängige Ermittlung von Bodenwasserentnahme und -verfügbarkeit ermöglicht gleichzeitig die kausale Interpretation von Wachstumsverläufen der Bäume. Durch die integrative Verknüpfung der von der Bestandesstruktur abhängigen hydroökologischen, humusmorphologischen, wurzelökologischen sowie der vegetations- und wachstumskundlichen Erhebungen konnten Funktionen zur Übertragung der Struktur-Prozessbeziehung auf unterschiedlich strukturierte Waldbestände abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung der standörtlichen Gegebenheiten kann durch geeignete Baumartenwahl das wasserwirtschaftlich verfügbare und nutzbare Wasserdargebot erhöht werden.

So führt die in weiten Teilen des nordostdeutschen Tieflands praktizierte Umwandlung von umbauwürdigen Kiefernforsten in Kiefern-Laubholz-Mischbestände zu einer Veränderung der Kronendachstrukturen im Zuge der Bestandesbehandlung und langfristig zu einem positiven Effekt auf den Landschaftswasserhaushalt. Dies konnte unter Nutzung eines Wasserhaushaltsmodells im Waldgebiet der „Schorfheide“ unter Berücksichtigung der Standortbedingungen überzeugend nachgewiesen werden.

## Literatur

- Glugla G., Fischer D., Höhne U., Kortüm F. (1982) Lysimeteruntersuchungen in der Letzlinger Heide – wichtiger Beitrag zur Bestimmung der Wasserressourcen bewaldeter Gebiete. *Wasserwirtschaft/Wassertechnik*, 9, 319-322.
- Goral F., Müller J. (2010) Auswirkungen des Waldumbaus im Waldgebiet der Schorfheide auf die Entwicklung der Grundwasserhöhen und den Zustand der Waldmoore. *Naturschutz Landschaftspflege Brandenburg* 19(3-4):158-166.
- Helbig A. (1988) Vergleich der Wasserhaushaltskomponenten eines Kiefernbestandes und einer Waldgrasfläche nach Lysimetermessungen. *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR*, Nr. 140, 123-128.
- Herndl M., Bohner A., Kandolf, M. (2009) Gebirgslsimeter am Stoderzinken – Erste Ergebnisse. In: 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL), 111-116.
- Hoeven van der P.C.T. (2005) Lysimeters Castricum. Report 1.
- 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.
- Kohnke H., Dreibelbis F.R., Davidson J.M. (1940) A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance. *Misc. Publ. U.S. Dep. Agric.* Nr. 372, 1-68.
- Kortüm F. (1959) Über den Wasservorrat in wägbaren Lysimetern und in vergleichbaren grundwasserfernen Sandstandorten des norddeutschen Diluviums. *Publ. Ass. Int. Hydrol. scient.* 49, 38-42.
- 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.
- Lütke R. (1965) Über die Tauglichkeit der Lysimetermethode für Wasserhaushaltsuntersuchungen und Vergleichsmessungen mit Groß- und Kleinlysimetern. *Besondere Mitteilungen zum Gewässerkundlichen Jahrbuch*, 43, 37 S.
- Lütke R., Simon K.-H. (1975) Zur Bilanzierung des Wasserhaushalts von Waldbeständen auf Sandstandorten der DDR. - *Beiträge für Forstwirtschaft* 9, 1, 5-12.
- Müller J., Seyfarth M. (1999) Methode zur Ermittlung des Wasserverbrauches unterschiedlicher Waldbodenvegetationsdecken mit Hilfe von wägbaren Lysimetern. In: 8. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 177-178.
- Müller J., Bolte A., Beck W., Anders S., Scharfen P. (2001) Modellierung des Sickerwasserabflusses in einem zusammenhängenden Waldgebiet des nordostdeutschen Tieflands. In: 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft, 24.-25.4.2001, 111-115.
- Müller J. (2002) Wirkungszusammenhänge zwischen Vegetationsstrukturen und hydrologischen Prozessen in Wäldern und Forsten. In: Anders S. (ed.): *Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands*. Oberwinter: Verlag Dr. Kessel: 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*, Berlin 36, 3, 125-131.
- Müller J. (2008) Die Versuchstation auf dem "Drachenkopf" in Eberswalde. *Eberswalder Jahrbuch für Heimat-, Kultur- und Naturgeschichte* 2007/2008. 248-253.
- Müller J. (2009) Der Einsatz von Lysimetern in der forsthydrologischen Forschung im nordostdeutschen Tiefland. In: 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, 21.-22.4.2009, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 47-53.
- Müller J. (2009) Auswirkung von Trockenheit auf den Waldzustand - Ansätze zur Bewertung der potentiellen Trockenheitsgefährdung von Waldstandorten. *Forum Hydrol. Wasserbewirtschaft* 26.09: 31-38.
- Müller J. (2011) Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands. *Waldökol Landschaftsforsch Natursch.* (12):37-46.
- Müller J. (2015) Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung der Trockenstresswirkung auf den Wasserverbrauch und das Wachstumsverhalten junger Bäume. In: 16. Gumpensteiner Lysimetertagung, 21.-22.4.2015, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 13-19.
- Olbertz M.H. (1957) Über die am Standort des Kulturbodens erfassbaren Größen des Wasserhaushalts. *Wiss. Abhandlung Dt. Akademie Landw. Wiss.*, Nr. 23, 23-32.
- Prasuhn V., Spiess E., Seyfarth M. (2009) Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. In: 13. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL), 11-16.
- Rupp H., Meissner R., Leinweber P., Lennartz B., Seyfarth M. (2005) Ein neues Lysimeter zur Messung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Niedermoorstandorten (einschließlich lateraler Komponenten). In: 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft (BAL) 67-69.

- Zunker F. (1930) Das Verhalten des Wassers im Boden. In: Blank, E.: Handbuch der Bodenlehre, Bd. 6, 66-220.
- Schroeder M. (1989) Die Großlysimeteranlage St. Arnold bei Rheine. Mitt. der Dt. Bodenkundlichen Gesellschaft, 58, 323-326.