

Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung der Trockenstresswirkung auf den Wasserverbrauch und das Wachstumsverhalten junger Bäume

Jürgen Müller^{1*}

Zusammenfassung

Die Fähigkeit zur Adaption von Baumarten an den prognostizierten Klimawandel ist noch weitgehend ungeklärt. Die Untersuchung ihrer Ertragsfähigkeit bei Trockenheit und Hitze ist dabei ein erklärtes Forschungsziel. Die Anwendung von Lysimetern ist eine innovative und bewährte Methode. Die Eberswalder Lysimeter sind wegen ihrer Größe (100m² Oberfläche und 5m Tiefe) für die komplexen Untersuchungen hervorragend geeignet. Die Forschungen werden durch die Anwendung speziell entwickelter wägbarer Lysimeter und eines Freilandlabors ergänzt. Schwerpunkt der Forschung ist die Untersuchung des Ursachen-Wirkungsgefüges von unterschiedlicher Trockenheit auf Wasserverbrauch, Radialzuwachs und Feinwurzeldynamik der Bäume. Im Fokus der Untersuchungen stehen junge Bäume, die besonders empfindlich gegen Trockenheit sind, weil sie mit ihren Wurzeln noch nicht die tieferen Bodenwasservorräte erreichen können.

Es werden die Zusammenhänge zwischen zunehmender Bodenaustrocknung und dem Wasserverbrauch junger Buchen und Eichen dargestellt. Der Rückgang der Evapotranspiration ist verbunden mit der Reduzierung des Radialzuwachses.

Schlagwörter: Baumarten, Wassermangel, Wasserverbrauch, Radialzuwachs

Summary

The ability of trees to adapt to climate change is still unexplained in the main. The investigation of their yield capacity under the conditions of drought and heat is a declared research objective. The use of lysimeter is an innovative and approved method. The Eberswalde lysimeters are excellently suitable for the complex investigations because of her size (100m² of surface and 5m of depth). The investigations are completed by the use of especially developed weighable lysimeters and an open field laboratory. Main emphasis of the research consists in the investigation of cause and effect relationships under the conditions of different levels of drought on water consumption, radial growth and fine root dynamics of the trees. Young trees are in the focal point of the measurements. They are more sensitive to dryness because their roots cannot reach the water content in deeper soil layers. The relationships between increasing soil water drying and evapotranspiration of young beeches and oaks are represented. The decrease of evapotranspiration is followed by the reduction of radial growth.

Keywords: tree species, water shortage, water consumption, radial growth

Einleitung

Der Wald bedeckt ca. ein Drittel der Fläche Deutschlands und wird zum Großteil wirtschaftlich genutzt. Die Produktivität ist neben der Bewirtschaftung und den Standortbedingungen wesentlich von Witterung und Klima abhängig. Ertragsausfälle und damit einhergehende wirtschaftliche Schäden treten unter anderem durch Trockenheit und Hitze wie zum Beispiel im Jahr 2003 in Deutschland auf. Viele Szenarien zur Klimaentwicklung lassen eine weitere Zunahme von Trockenheit erwarten, die für die forstliche Produktion nachteilige, teils existenzbedrohende Auswirkungen haben könnten.

Vor diesem Hintergrund erfolgte die Auswertung der Entwicklung der sommerlichen Mitteltemperaturen und Niederschlagssummen von 1900 bis 2010 für die Wetterstation Angermünde 15km nordöstlich der Ly-

simeterstation (*Abbildungen 1 und 2*). Danach ist der Sommer in den mehr als 100 Jahren um 3,5°C wärmer geworden und die niederschlagsarmen Jahre häufen sich in der 2. Jahrhunderthälfte (MÜLLER 2002). Dieser Witterungsentwicklung muss der Wald von morgen Rechnung tragen.

Diese Klimaprognosen bedeuten für den Wasserhaushalt der Wälder des nordostdeutschen Tieflands eine:

- Erhöhung der potentiellen Verdunstung
- Verringerung der Bodenwasserverfügbarkeit
- Zunahme der Perioden mit „Wasserstress“
- Verlängerung der Vegetationszeit mit längerer Bodenwasserzehrung
- Zunahme der Evapotranspiration außerhalb der Vegetationszeit.

¹ Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme, A.-Möller-Straße 1, D-16225 EBERSWALDE

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



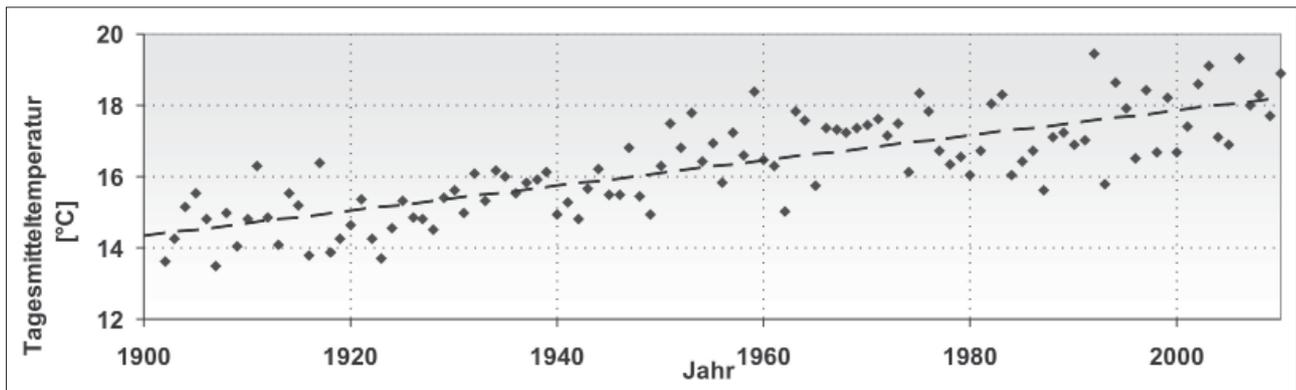


Abbildung 1: Mitteltemperaturen der Monate Juni, Juli und August von 1900 bis 2010 der DWD-Station Angermünde.

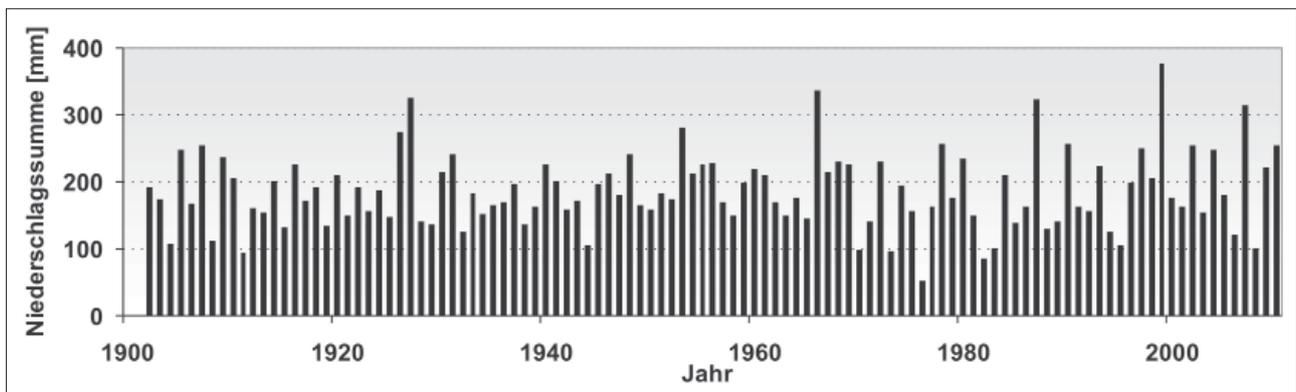


Abbildung 2: Niederschlagssummen der Monate Juni, Juli und August von 1900 bis 2010 der DWD-Station Angermünde.

Aufgabe der Forschung ist es, trockenheitsbedingte Risiken in der Forstwirtschaft zu identifizieren und mögliche Handlungsoptionen aufzuzeigen, um Empfehlungen zur Anpassung von Produktionssystemen, wie die Baumarten- und Herkunftswahl abzuleiten. Wassermangel entsteht, wenn der Wasserbedarf der Pflanzen größer als die Wasserverfügbarkeit ist. Damit ergibt sich das Risiko aus den Wechselwirkungen zwischen der Pflanze, dem Boden und den meteorologischen Bedingungen.

Dabei entscheiden der Zeitpunkt, die Dauer und die Intensität der Trockenheit über den entstehenden Wasserstress für die Pflanzen.

Besonders empfindlich gegen Trockenheit sind junge Bäume, die mit ihren Wurzeln noch nicht die tieferen Bodenwasservorräte erreichen können. Deshalb stehen sie im Fokus unserer Experimente.

Methode – die Anwendung von Lysimetern

Die Anwendung von Lysimetern hat in der forsthydrologischen Forschung der Region Eberswalde eine über hundertjährige Tradition. Die ökologische Versuchsstation Britz bei Eberswalde ist mit den neun Großlysimetern vom Standort her für weite Teile des nordostdeutschen Tieflands repräsentativ. Die Lysimeterstation wird seit 1974 betrieben, um den Wasserverbrauch von aufwachsenden Hauptbaumarten (Kiefer, Buche, Lärche, Douglasie) und deren Einfluss auf Grundwasserneubildung und Landschaftswasserhaushalt zu

quantifizieren (MÜLLER 2011). Das zukünftige Waldbild in Deutschland soll 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 Kiefer verändern und wie diese Bedingungen über bestandesstrukturell-waldbauliche Maßnahmen positiv beeinflusst werden können. Vor diesem Hintergrund wurden zwei Lysimeterbestände der Kiefer mit Buche und Eiche und ein Lärchenlysimeter mit Buche unterbaut. Gleichzeitig mit den vegetationsstrukturellen Veränderungen wurde die messtechnische Ausrüstung der Lysimeter erweitert. Es wurden bodenhydrologische Messplätze zur Bestimmung des Bodenwasserflusses eingerichtet. Zur getrennten Ermittlung des Wasserverbrauchs der jungen Bäume im Unterstand wurden im Umfeld der Großlysimeter wägbare Lysimeter eingebaut. Somit besitzt die Versuchsstation die notwendige innovative messtechnische Ausstattung, um die sich mit den vegetationsstrukturellen Änderungen ergebenden modifizierten Prozesse des Wasserflusses erfassen zu können.

Die wägbaren Lysimeter

Um den spezifischen Wasserverbrauch unterschiedlicher Vegetation unter definierten Bedingungen zu ermitteln, wurden spezielle wägbare Lysimeter (WKL), (Abbildung 3) entwickelt (MÜLLER et al. 1998, MÜLLER und

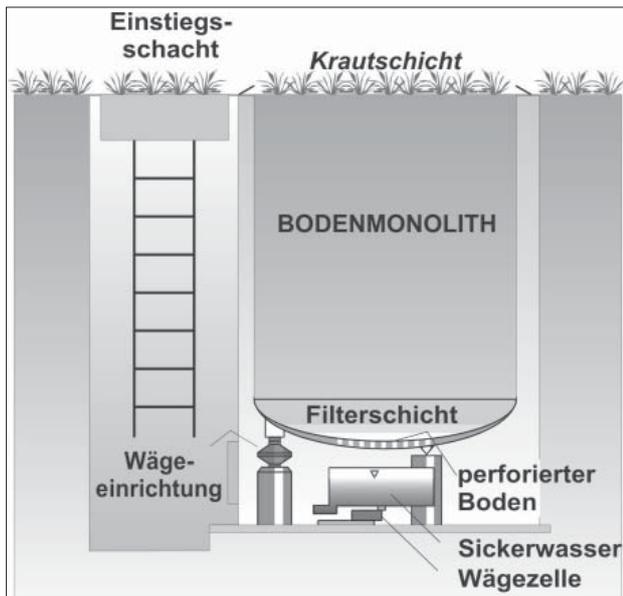


Abbildung 3: Wägbares Lysimeter mit ungestörtem Bodenmonolithen zur Ermittlung des Wasserverbrauches der Vegetation.

SEYFARTH 1999). Die Innovation dieser Konstruktion liegt in der Umsetzung der für die Aussagefähigkeit der Ergebnisse notwendigen Verknüpfung von Lysimetergröße, einer speziellen, die Ungestörtheit von Bodenmonolith und Lysimeterumfeld sichernde Einbautechnologie sowie in Wägbareit und in der mobilen Einsatzmöglichkeit.

Die WKL haben eine Oberfläche von 1m² und sind 1,8m tief. Der Wasserverbrauch der Vegetation kann durch den Einsatz spezieller Wägezellen für die Erfassung der Bodenfeuchteänderung im Monolith und der ausfließenden Sickerwassermengen mit einer Genauigkeit von 0,1mm erfolgen.

Nachfolgend steht die Anwendung der Lysimeter in Trockenversuchen unterschiedlicher Intensität im Fokus.

Das Trockenexperiment

Die WKL wurden zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Trockenheit auf das Wachstum und den Wasserhaushalt junger Eichen eingesetzt. Die wägbaren Lysimeter sind mit einem fahrbaren sensorgesteuerten Dach abgedeckt, das, wenn es regnet, über die Lysimeter fährt (Abbildung 4). Der Niederschlag für unterschiedliche Szenarien (Trocken- und Normalszenario) wird durch Bewässerung gegeben. Die Evapotranspiration der Eichen wird nach der Wasserhaushaltsgleichung ermittelt. Der auffallende Regen, die Feuchteänderung im Monolith und die Sickerwassermenge werden durch Wägung bestimmt. Zusätzlich wird die Bodenfeuchte im Boden in acht Tiefen gemessen. Die Dynamik des Dickenwachstums wurde mit Mikrodendrometer gemessen.

Für die Regengaben wurden zwei Szenarien ausgewählt. Das normale Szenario mit 330mm von April-Oktober entspricht in etwa dem langjährigen Mittel der Region. Die Bodenwasservorräte im gesamten Tiefenbereich der Lysimeter lagen dabei immer zwischen 80 bis 100% Feldkapazität.



Abbildung 4: WKL mit fahrbarem Dach zur Ermittlung des Wasserverbrauches kleiner Eichen.

Beim trockenen Szenario beträgt die Niederschlagssumme im gleichen Zeitraum 180mm. Grundlage für dieses Szenario sind Auswertungen der Trockenjahre der letzten 30 Jahre im Untersuchungsraum.

Der Austrocknungsversuch

In einem weiteren Experiment wurde ein WKL vor dem Blattaustrieb der jungen Buchen Mitte April mit einer Haube abgedeckt (Abbildung 5). Mitte August reagierten die Buchen auf die Austrocknung mit dem Abwerfen der Blätter (Abbildung 6). Messtechnisch wurde die zunehmende Austrocknung begleitet durch die Messung der Bodenwasservorräte in acht Tiefen, die Erfassung der Dynamik des Dickenwachstums mit Mikrodendrometern und die Messung des pre dawn Blattwasserpotentials mit der „Scholanderbombe“.

Das Freilandlabor Drylab

Das Freilandlabor (Drylab) ist eine Anlage von acht Lysimetern mit jeweils zwei Quadratmetern Oberfläche und einer Tiefe von 1,5m (Abbildung 7). Alle Lysimeter sind mit einheitlichem Bodensubstrat befüllt und ebenerdig in das Freiland eingesetzt. In jede Bodensäule wurden ca. 20 junge Buchen gepflanzt. Mithilfe eines verschiebbaren, lichtdurchlässigen Daches lassen sich kontrollierte Trockenheitsbedingungen herstellen. Die Bewässerung erfolgt mit einer Niederdruck-Tropfenbewässerung. Mit Hilfe von Rohrsonden wird die Bodenfeuchtigkeit



Abbildung 5: WKL mit Abdeckhaube zur Ermittlung der Trockenstresswirkung auf das Wachstum junger Buchen.



Abbildung 6: WKL nach der Austrocknung.



Abbildung 7: Drylab mit acht Lysimetern, fahrbarem Dach und installierter Tropfenbewässerung.



Abbildung 8: Drylab mit Wurzelbrücke und Wurzelkamera zur Erfassung der Feinwurzeldynamik im Boden.

in unterschiedlichen Bodentiefen gemessen. Das ablaufende Sickerwasser wird mit Kippzählern unterhalb des Lysimeterbodens erfasst. Aus den Messdaten werden die genaue Ermittlung der Evapotranspiration sowie die Beobachtung der Bodenwasservorräte in der Bodensäule möglich.

Das Drylab wurde mit jungen Rotbuchen aus Deutschland und Polen bepflanzt, die an unterschiedliche klimatische Verhältnisse angepasst sind. Mit dem Versuch wollen wir

untersuchen, welche Buchenherkünfte am besten mit den Klimaverhältnissen der Zukunft zurecht kommen. Die Rotbuche ist in Deutschland die wichtigste Baumart in naturnahen Wäldern und spielt für die künftige Waldwirtschaft eine zentrale Rolle.

Schwerpunkt der Arbeiten ist die Untersuchung des Ursachen-Wirkungsgefüges von unterschiedlicher Trockenheit auf Wasserverbrauch, Radialzuwachs und Feinwurzeldynamik der Bäume.

Tabelle 1: Regengaben von Normal- und Trockenszenario.

Monat	Regengabe [mm]	
	Normalszenario	Trockenszenario
April	30	15
Mai	57	28
Juni	66	39
Juli	50	25
August	54	24
September	41	32
Oktober	32	17
Gesamt	330	180

Die Untersuchung der Dynamik der Feinwurzelentwicklung mit Hilfe von Mini-Rhizotronen stellt einen Schwerpunkt der Forschungen dar, weil die Reaktion der Feinwurzeln auf Trockenheit bisher wenig erforscht ist (*Abbildung 8*). Dazu werden in acht vertikalen Glasröhren pro Lysimeter mit einer endoskopischen Kamera zu mehreren Messterminen die umgebende Feinwurzelschicht abgebildet und mit Bildverarbeitung analysiert. Hierdurch sind hochaufgelöste Informationen zum Umsatz an Feinwurzeln und zum Wurzelwachstum möglich.

Ergebnisse

Das Trockenexperiment

Die *Tabelle 1* zeigt die Regengaben von Normal- und Trockenszenario in den Monaten April bis Oktober.

Die *Abbildung 9* zeigt die kumulative Evapotranspiration für beide Niederschlagsszenarien von Mai bis Oktober. Infolge der größeren Niederschlagsreduzierung beim Trockenszenario (55% des Normalszenarios) kommt es zur Transpirationseinschränkung. Die Evapotranspiration beträgt im Betrachtungszeitraum nur 40% des Normalszenarios. Bei vergleichbaren Temperatur- und Strahlungsverhältnissen bestimmen die verfügbaren Bodenwassermengen

die Transpirationshöhe und somit die Wachstumsaktivität. Der Rückgang der Evapotranspiration ist verbunden mit der Reduzierung des Radialzuwachses (*Abbildung 10*).

Die *Abbildung 10* zeigt den innerjährlichen Gang der Durchmesseränderung in Abhängigkeit von der Bodenwasserverfügbarkeit (bis 30cm Bodentiefe) für beide Niederschlagsszenarien. Die unterschiedliche Trockenheit führte zum differenzierten Verlauf der verfügbaren Bodenwassermengen in den Lysimetern. Beim Normalszenario liegen die Bodenwassermengen im Untersuchungszeitraum im Bereich von 80 bis 100% der Feldkapazität. Beim Trockenszenario haben wir bis auf einen kleinen Zeitraum Juni/Juli eine stetige Bodenwasserabnahme. Am Ende des Experiments liegt die relative Bodenwasserverfügbarkeit unter 30%.

Die Bodenaustrocknung beeinflusst signifikant die Wachstumsaktivität. Beim Normalszenario mit nur geringer Austrocknung zeigt die Kurve einen typischen Verlauf, d.h. einen intensiven Radialzuwachs im Mai/Juni, danach geringeres, jedoch stetiges Radialwachstum bis Mitte August.

Beim Trockenszenario verläuft die intensive Zuwachsphase im Juni flacher, steigt infolge Niederschlagszufuhr an, um danach nach Bodenaustrocknung unter 40% Verfügbarkeit abzufallen. Bereits Anfang Juli wird der Wachstumsendwert erreicht. Es kommt zur Einstellung und Reduktion des Wachstums. Bei Unterschreiten eines Schwellenwertes von 50% Bodenwasserverfügbarkeit ist eine stärkere Reduzierung des Radialzuwachses zu erwarten.

Das Austrocknungsexperiment

Mit dem Abdecken des Lysimeters und der Blattentfaltung an den Buchen Anfang Mai reduzierten sich die Bodenwassermengen im Lysimeter stetig. Die Bodenfeuchtesensoren konnten allerdings erst Ende Mai installiert werden. Zu diesem Zeitpunkt lag die relative Bodenwasserverfügbarkeit bereits unter 50%. Die *Abbildung 11* zeigt den Verlauf der Durchmesserentwicklung in Abhängigkeit von der Boden-

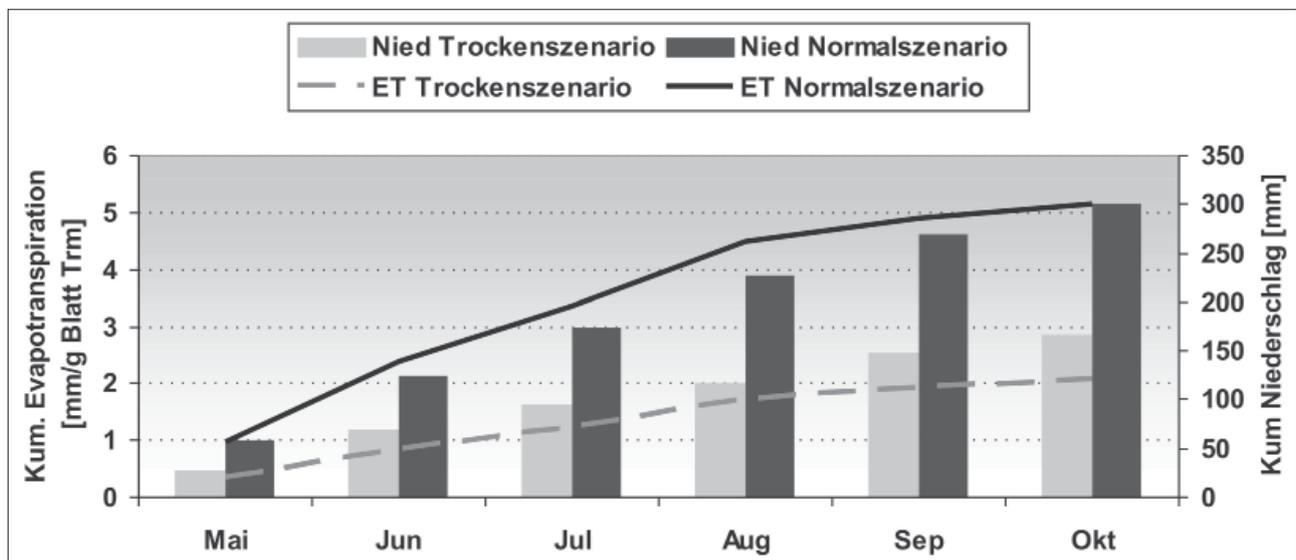


Abbildung 9: Kumulative Evapotranspiration für beide Niederschlagsszenarien von Mai bis Oktober.

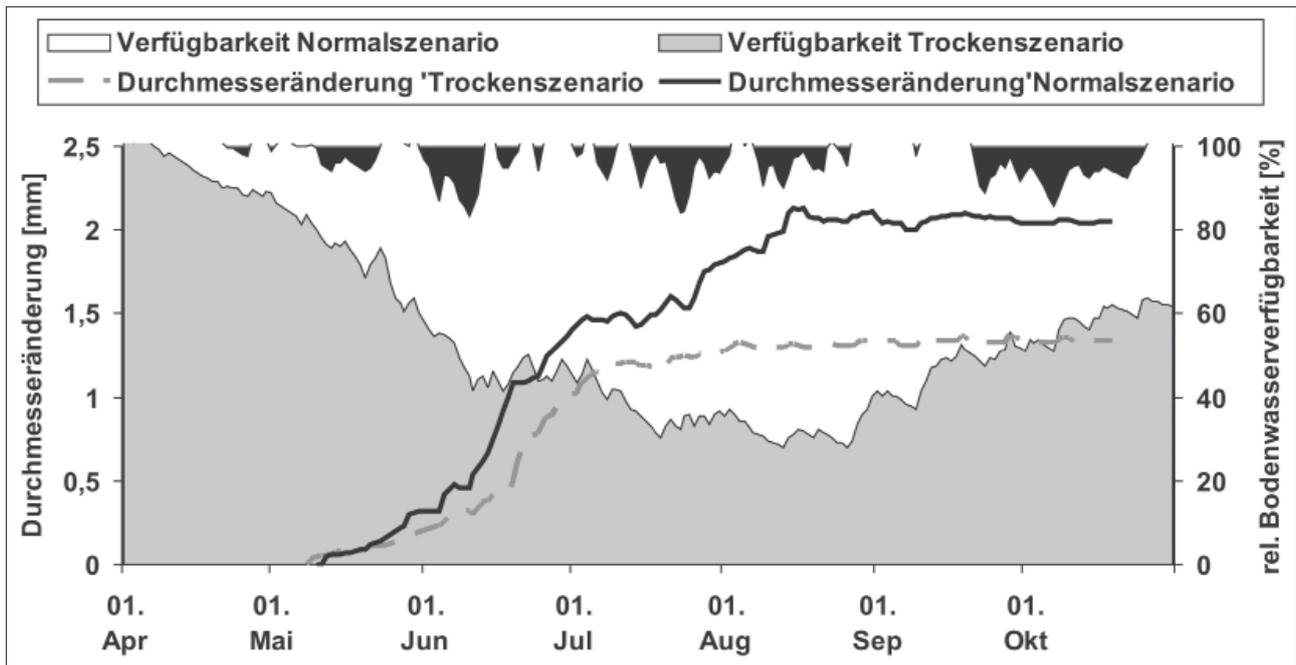


Abbildung 10: Innerjähriger Gang der Durchmesseränderung in Abhängigkeit von der Bodenwasserverfügbarkeit (bis 30cm Bodentiefe) für beide Niederschlagsszenarien.

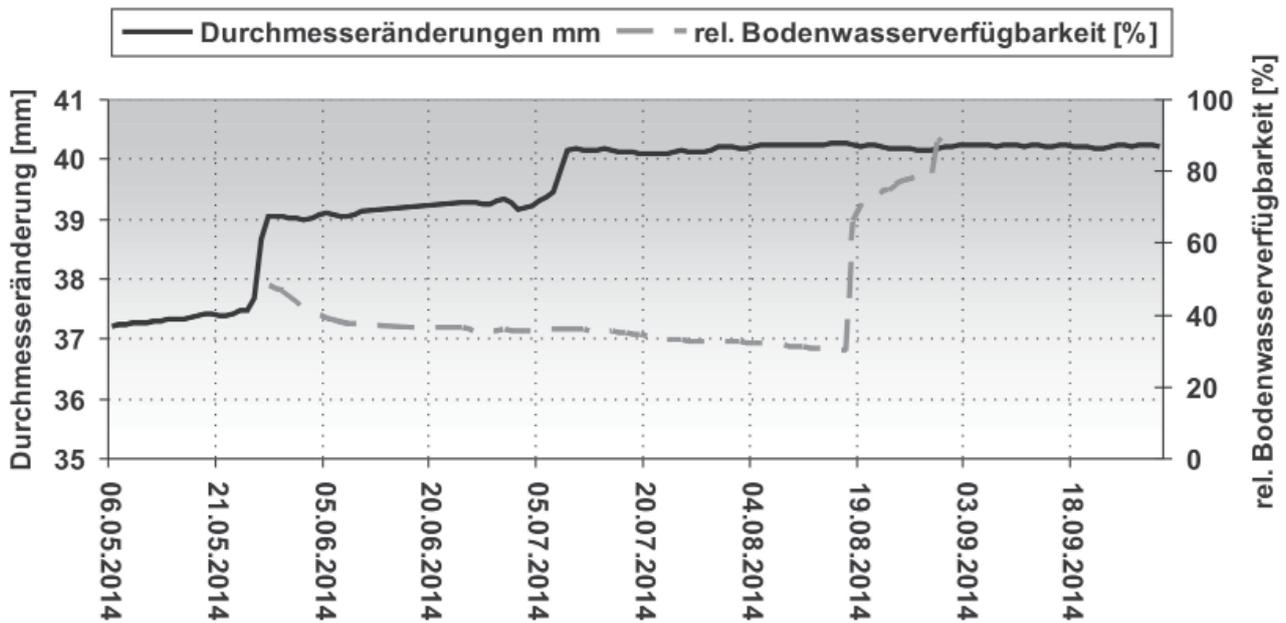


Abbildung 11: Innerjähriger Gang der Durchmesseränderung in Abhängigkeit von der Bodenwasserverfügbarkeit (bis 30cm Bodentiefe).

wasserverfügbarkeit. Durch äußere Fremdeinflüsse kam es am Mikrodendrometer zur Beeinflussung des gemessenen Widerstandswertes. So verschoben sich die Werte am 27./28.05. und am 07./08.07. um ein Widerstandslevel nach oben. Alle anderen Werte sind plausibel. Es wird deutlich, dass oberhalb von 50% Bodenwasserverfügbarkeit noch ein Dickenzuwachs erkennbar ist, der sich unterhalb 50% verlangsamt und bei einer weiteren Abnahme der Bodenwassermengen stagniert.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Für die Beurteilung der Auswirkungen von Trockenheit auf den Waldzustand ist außer der Höhe des Wasserdefizits der Zeitpunkt entscheidend, bis zu dem dieses Defizit entstanden ist. Bei gleicher Witterung ist neben der Baumart in erster Linie der Boden mit seiner Speicherkapazität ausschlaggebend für das Ausmaß der Trockenheitswirkung (MÜLLER 2006, MÜLLER 2009). Ein Unterschreiten von

60% Bodenwasserverfügbarkeit stellt beim Sandboden einen Schwellenwert für das Einsetzen von ersten Zuwachsreduktionen dar. Unterhalb von 50% kommt es zur starken Zuwachsreduktion und beim weiteren Absinken der Bodenwasserverfügbarkeit stagniert der Zuwachs (BECK und MÜLLER 2007).

Die wägbaren Lysimeter sind eine geeignete innovative Methode zur Untersuchung der Ursachen- Wirkungsbeziehungen zur Auswirkung von Trockenheit auf die Wasserhaushaltskennwerte und das Wachstum der Bäume. Dass man für diese Dimension von Lysimetern nur junge Bäume verwenden kann, schränkt einerseits die Verallgemeinerung der Ergebnisse ein, aber andererseits sind gerade die jungen Bäume empfindlich gegen Trockenheit und somit wertvolle Untersuchungsobjekte.

Deshalb sind weiterhin vertiefende Untersuchungen zu den Ursachen-Wirkungsbeziehungen zwischen Niederschlagsmangel, Bodenaustrocknung und Pflanzenreaktion in Baumholzbeständen durchzuführen, um daraus Grenzwerte für die Bewertung der potentiellen Trockenheitsgefährdung von Baumarten ableiten zu können. Ziel ist es, für die Holzaufkommensmodellierung der Vorrats- und Zuwachsentwicklung Korrekturfaktoren infolge Trockenheit bereitzustellen.

Mit den erzielten Ergebnissen lassen sich realitätsnahe Aussagen zur zukünftigen Gefährdung heutiger Wälder machen und Strategien zur Anpassung an die erwarteten Klimaänderungen entwickeln.

Literatur

- BECK, W. and J. MÜLLER, 2007: Impact of heat and drought on tree and stand vitality - dendroecological methods and first results from level 2-plots in southern Germany. *Schr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen Nordwestdt. Forstl. Versuchsanst.* 142:120-127.
- MÜLLER, J., A. BOLTE, W. BECK und S. ANDERS, 1998: Bodenvegetation und Wasserhaushalt von Kiefernforstökosystemen (*Pinus sylvestris* L.). *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie*, Berlin 28, S. 407-414.
- MÜLLER, J. und M. SEYFAHRT, 1999: Methode zur Ermittlung des Wasserverbrauches unterschiedlicher Waldbodenvegetationsdecken mit Hilfe von wägbaren Lysimetern. In: 8. Lysimetertagung der Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft in Gumpenstein am 13. und 14.4.1999. *BAL Bericht*, 1999, S. 177-178.
- MÜLLER, J., 2002: Verdunstung der Baumvegetation und die Tiefenversickerung in Kiefern-, Buchen- und Eichenökosystemen in Abhängigkeit von Boden- und Bestandesstruktur und von der Witterung. In: *Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands*, Verlag Dr. Kessel, Oberwinter 2002, S. 99-122.
- MÜLLER, J., 2006: The effect of dryness on the water balance of selected forest sites and the ascertainment of a potential risk of dryness. In: Eichhorn J. (ed) *Tagungsbeiträge zur internationalen Tagung des ICP Forests*, Göttingen, 25.-28.10.2006. *Hessen-Forst*, pp 58-59.
- MÜLLER, J., 2009: Auswirkung von Trockenheit auf den Waldzustand - Ansätze zur Bewertung der potentiellen Trockenheitsgefährdung von Waldstandorten. *Forum Hydrol. Wasserbewirtsch.* 26.09:31-38.
- MÜLLER, J., 2011: Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands. *Wald-ökol. Landschaftsforsch. Natursch.* (12):37-46.