

# Wasserhaushaltsuntersuchungen an den wägbaren Lysimeteranlagen der Stationen Grünewalde (südliches Brandenburg) und Colbitz (Sachsen-Anhalt) als Datenbasis für die Validierung agrometeorologischer Wasserhaushaltsmodelle

Carina Schuhmann<sup>2</sup>, Falk Böttcher<sup>1\*</sup>, Christiana Mühlner<sup>3</sup>, Wolfgang Wiermann<sup>4</sup>  
und Michael Haubold-Rosar<sup>5</sup>

## Zusammenfassung

Die parallelen Untersuchungen der Wasserhaushaltsgrößen, die an den Lysimeteranlagen Grünewalde und Colbitz durchgeführt werden, umfassen die Jahre 2012 bis 2017 und dienen neben anderen Zwecken dazu, agrometeorologische Wasserhaushaltsmodelle zu prüfen. Dazu ist es zunächst nötig, dass die Hauptzielgröße, die aktuelle Verdunstung in größtmöglicher Genauigkeit bestimmt wird. Hier werden die Schritte dargestellt, wie dies am Beispiel der beiden Lysimeteranlagen erfolgt. Das Besondere der beiden Standorte ist dabei der nur extensiv genutzte Dauerbewuchs. Die Ergebnisse zeigen, dass die Modellverbesserungen essentiell auf die Ergebnisse des Langzeitmonitorings an den Lysimeteranlagen angewiesen sind. Dabei treten charakteristische Unterschiede zwischen dem Sommer- und dem Winterhalbjahr auf. Im Winterhalbjahr sind die Schneedeckenverhältnisse und Bodentemperaturwerte im Frostbereich sowohl in räumlicher als auch zeitlicher Verteilung maßgebend, während im Sommerhalbjahr die phänologische Entwicklung entscheidend ist.

*Schlagwörter:* Bodenwasserhaushalt, Langzeitmonitoring, Anpassung an den Klimawandel, Lysimetrie, Agrometeorologie

## Summary

The parallel investigations of the water balance parameters, which are carried out at the lysimeter systems Grünewalde and Colbitz, cover the years 2012 to 2017 and serve, among other purposes, to test agrometeorological water balance models. First the main target size real evaporation has to be determined in the highest possible accuracy. Here the steps are shown by example of the two lysimeter systems. The special feature of the two locations is an extensively used permanent plant cover. The results show that model improvements are essentially dependent on the results of long-term monitoring with the lysimeter systems. There are characteristic differences between the summer and winter months. In the winter half-year, the snow cover conditions and soil temperature values in the frost area are decisive, while in the summer half-year the phenological development is crucial.

*Keywords:* soil water monitoring, long-term monitoring, adaptation to climate change, lysimetry, agricultural meteorology

## Einleitung

Die Lysimeterstation Colbitz des Landesbetriebes für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), in der Colbitz-Letzlinger-Heide gelegen, liefert seit dem Jahr 1970 Langzeitmessungen der Bodenwasserhaushaltskomponenten. Sie ist eine von ganz wenigen Stationen, die einen solchen Fundus von Langzeitdaten bereitstellen. Diese Daten bieten einerseits die Möglichkeit, die Frage zu klären, ob es langjährige Veränderungen der Messwerte gibt. Andererseits können die Daten sehr gut zur Modellvalidierung und -anpassung genutzt werden, so dass diese Modelle für

ähnlich klimatisch beeinflusste Regionen angewendet werden können. Die wägbaren Lysimeter der Station Grünewalde des Forschungsinstituts für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB) in Südbrandenburg wurden im Jahr 2011 eingerichtet. Die Unterschiedlichkeit der Umgebungsbedingungen und verwendeten Bodenarten der beiden Lysimeterstationen macht einen Vergleich mit Modellrechnungen für die beiden relativ niederschlagsarmen Standorte sehr interessant. Zusätzlich zeigte das Jahr 2018 im Kontext mit den in den unterschiedlichen Klimamodellen erwarteten Niederschlagsänderungen, dass Wasserhaushaltsmodelle auf diese Bedingungen hin überarbeitet werden müssen.

<sup>1</sup> Deutscher Wetterdienst, Abt. Agrometeorologie, Kärnerstraße 68, D-04288 LEIPZIG

<sup>2</sup> Technische Universität Bergakademie, IÖZ, Brennhausgasse 14, D-09599 FREIBERG

<sup>3</sup> Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LWH), Willi-Brundert-Straße 14, D-06132 HALLE

<sup>4</sup> Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LWH), Otto-von-Guericke Straße 5, D-39104 MAGDEBURG

<sup>5</sup> Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. Finsterwalde, Brauhausweg 2, D-03238 FINSTERWALDE

\* Ansprechpartner: Falk Böttcher, falk.boettcher@dwd.de



## Material und Methoden

### Lysimeterstation Colbitz

Die Anlage der wägbaren Lysimeter Colbitz befindet sich auf einer Lichtung im Wald (Hagenau 2014) (*Abbildung 1*). Dadurch sind am Lysimeterstandort mikroklimatische Besonderheiten möglich, die sich von den großflächigen klimatischen Bedingungen, die vom Übergang des maritimen Klimas in eher kontinental beeinflusste Klimaregionen gekennzeichnet sind, unterscheiden (Helbig 1988). Diese können zum Beispiel darin bestehen, dass es kühler bleibt als außerhalb des Waldes u.a. aufgrund der Beschattung, welche die Bäume bieten.

Die Lysimeterstation umfasst eine Fläche von 200 m<sup>2</sup>, auf der sich neben den Niederschlagsmessgeräten 12 wägbare, mit der Bodenoberfläche abschließende, Lysimetergefäße befinden. Die Gefäße wurden in zwei Reihen von Nord nach Süd angeordnet, wobei in der Breite zwischen den Mittelpunkten der Töpfe 4,3 m und in der Länge 4,2 m liegen (Kortüm und Helbig 1980). Die Lysimetertöpfe weisen eine Oberfläche von 1 m<sup>2</sup> und eine nutzbare Tiefe von 2 m auf. Die Lysimetergefäße stehen auf Schalgewichtswaagen, die von einem großen Kellerraum aus bedient werden können. Der Sickerwasserablauf wurde 1996 umgebaut, so dass das anfallende Sickerwasser allein gravimetrisch am Lysimeterboden austritt und die Sickerwassermenge von Kippwaagen erfasst wird (UFZ 1996). Mit Hilfe des Abflusses kann die Versickerung des Niederschlags im Bodenmonolith verfolgt werden (Kortüm und Helbig 1980).

Die in den Gefäßen befindlichen Böden wurden monolithisch an drei verschiedenen Standorten gewonnen (Hagenau 2014). Es handelt sich um typische Böden der Colbitz-Letzlinger-Heide:

- Lysimeter Nr. 1–6: (podsolige) Braunerde auf Geschiebedecksand über Hochflächensand,
- Lysimeter Nr. 7–9: Braunerde auf Sand,
- Lysimeter Nr. 10–12: Parabraunerde/lessivierte Braunerde auf Sand mit lehmigen Bändern (Hagenau 2014).

Die Lysimeter wurden zu Beginn mit Drahtschmiele bepflanzt (*Deschampsia flexuosa*) und danach sich selbst überlassen (Helbig 1988). Durch die natürliche Sukzession sollte sich ein repräsentativer Zustand für eine Waldlichtung ausbilden, wobei pro Jahr nur ein bis zwei Mal durch eine Mahd eingegriffen wird (Hagenau 2014). Der aktuelle Bewuchs spiegelt typische Vegetationsformen der Colbitz-Letzlinger



**Abbildung 1: Ansicht der Lysimeteranlage Colbitz (Foto: LHW 21.12.2015).**



**Abbildung 2: Ansicht der Lysimeteranlage Grünewalde (Foto: Carina Schuhmann 01.06.2017).**

Heide wider; auf den Lysimeter 1 bis 9 ist hauptsächlich Besenheide (*Calluna vulgaris*) vertreten, auf den Lysimetern 10 bis 12 Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos*).

Aufgrund der hohen Anzahl an negativen Verdunstungswerten, wurde das Lysimeter 8 aus der weiteren Betrachtung ausgeklammert.

### Lysimeterstation Grünewalde

Die Lysimeterstation Grünewalde wird seit 1955 auf Rekultivierungsflächen des ehemaligen Tagebaus Koyne betrieben. An den Lysimeteranlagen befindet sich eine automatische Wetterstation. Die vier wägbaren Edelstahl-Lysimeter wurden im Jahr 2011 in einem unterirdischen HDPE - Container installiert (*Abbildung 2*). Die einzelnen Lysimetersäulen sind 2,5 m hoch und haben eine nutzbare Oberfläche von 1 m<sup>2</sup>. Kontinuierlich werden die folgenden Parameter gemessen: Wassergehalt und Saugspannung in 50, 100 und 150 cm Tiefe, Lysimetergewicht und Sickerwassermenge.

Die Lysimeter enthalten folgende Böden:

- Lysimeter 1 und 2: Braunerde aus Sand als ungestört gestochener Bodenmonolith,
- Lysimeter 3 und 4: schichtenweise eingefüllte Kippsubstrate (Lys. 3: Ss, Lys. 4: Sl2).

Während Lysimeter 2 bewuchsfrei gehalten wird, tragen die Lysimeter 1, 3 und 4 eine Grasdecke mit der winterharten Weidelgrassorte *Arvicola* (dt. Weidelgras). Die Braunerdemonolithe wurden direkt nebeneinander von einer natürlichen Ackerfläche gewonnen. Die typischen Kippsubstrate stammen aus dem Tagebau Welzow. Auf Grund der Ausnahmestellung des Lysimeters 2 (ohne Bewuchs), wird dieses in der weiteren Betrachtung nicht näher betrachtet.

Zur klimatischen Einordnung wurden die den Lysimeterstandorten nächstgelegenen DWD-Stationen herangezogen. Hier zeigen die langjährigen Klimawerte 1961-1990 eine erstaunliche Übereinstimmung, sowohl hinsichtlich Jahresmitteltemperatur (beide 8,5 °C), als auch Jahresniederschlagssumme (Gardelegen 562,8 mm, Doberlug-Kirchhain 559,8 mm). Für den Zeitraum 1981 bis 2010 sind an beiden Standorten die Jahresmitteltemperaturen auf 9,2 °C gestiegen, allerdings zeigt sich beim Niederschlag eine Differenz

von ca. 34 mm (Gardelegen 546 mm; Doberlug-Kirchhain 580 mm).

Bei den verwendeten Daten handelt es sich um Tageswerte der Wiegedifferenz, des Sickerwassers und des Niederschlages aus dem Zeitraum vom 01.01.2012 bis zum 31.12.2017 von beiden Stationen.

Die Wasserhaushaltsmodellierungen für Grünewalde und Colbitz erfolgten mit dem Modell METVER auf Grundlage der am Standort gemessenen meteorologischen Daten.

Das Modell METVER zur Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete wurde von Müller und Müller (1988a, 1988b, 1989) ab Ende der 1980er Jahre entwickelt und seitdem immer wieder an aktuelle agrarmeteorologische Fragestellungen angepasst. Es ist ein Einschichtmodell, bei dem die Bestimmung der realen beziehungsweise potentiellen Evapotranspiration auf dem Verfahren von Turc (1961) und dessen Modifikation nach Wendling et al. (1991) basiert. In diesem Modell sind die Ausschöpfungsschicht ZG, aus der Pflanzen Wasser beziehen, und die Durchwurzelungsschicht variabel. Sie sind Funktionen der Zeit aber auch abhängig von der Entwicklung der jeweiligen Pflanzenkultur. METVER besitzt einen Entzugssektor, der dem Raum der Hauptdurchwurzelungszone ZD entspricht und 60% der nutzbaren Feldkapazität (nFK) der Ausschöpfungsschicht ausmacht. Die restlichen 40% der nFK entfallen auf den darunter liegenden Nachlieferungssektor. Ausschöpfungsschichtdicke und Dicke des Entzugssektors stehen also im Verhältnis 5:3.

Es gilt:  $Z_G = \frac{5}{3} * Z_D$

Das Modell besitzt eine räumliche Auflösung von maximal 20 Dezimeterschichten. METVER nutzt als Eingangsdaten die Tagesmitteltemperatur in 2m Höhe, die Tagesniederschlagssumme in 1m Höhe sowie die Tagessumme der

Globalstrahlung. Prinzipiell können also auch hier die Routinemessungen des DWD verwendet werden. Im Dialog mit dem Modellprogramm müssen noch Angaben zur geographischen Lage, zur Anzahl der 10 cm-Schichten und zur Oberflächennutzung gemacht werden. Für einen Modelllauf kann aber nur eine Kultur als Nutzungsparameter verwendet werden. Eine Steuerdatei verweist dabei auf einen biologisch-pflanzenphysiologischen Faktor, die effektiv wirksame Durchwurzelungstiefe und die Interzeptionskapazität für jeden Tag im Jahr. Intern erfolgt eine Korrektur des Niederschlags basierend auf Richter (1995). Vereinfacht wird bei einer Tagesmitteltemperatur kleiner 0 °C um +30%, anderweitig um +10% korrigiert. Die Anpassung an die bodenhydrologischen Bedingungen vor Ort wird über eine weitere Steuerdatei realisiert, die auch im Vorfeld der Modellrechnung erstellt wurde. METVER errechnet Werte für die potenzielle und reale Evapotranspiration, das Sickerwasser aus der tiefsten Bodenschicht zum Grundwasser, den gesamten Bodenwassergehalt, die Ausschöpfungsschichtdicke und die Bodenfeuchte in %nFK, bezogen auf die Ausschöpfungsschichtdicke. Die Ausgabe der Ergebnisse kann tages-, halbdekaden-, dekaden- oder monatsweise erfolgen. Nach Kayser (2002) liegen die Stärken des Modells bei der Berechnung für Grünland beziehungsweise für kurzes Gras. Aber auch für die Berechnung mit Wintergetreide ist es gut geeignet.

### Ergebnisse der aktuellen (realen) Verdunstung (AET)

#### Lysimeterstation Colbitz

In *Abbildung 3* sind die mittleren täglichen realen Verdunstungen (AET) über die Dekade gemittelt dargestellt. Wie vorher bereits erwähnt, wurde hierbei das Lysimeter 8 nicht betrachtet. Die mit METVER modellierten Werte

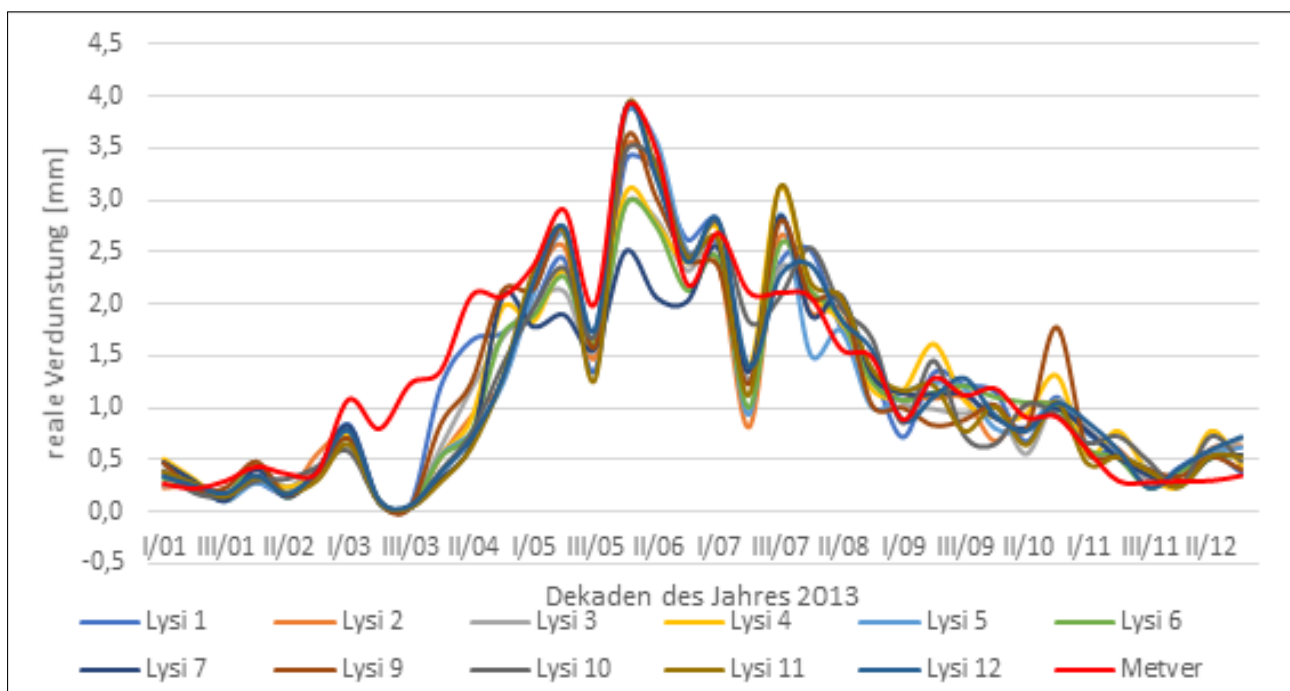


Abbildung 3: Jahresverlauf der mittleren täglichen Verdunstung in den Dekaden des Jahres 2013 der Lysimeterstation Colbitz.

sind in der Abbildung in der roten Kurve „Metver“ dargestellt. Sehr auffällig ist im Jahr 2013, dass in den Dekaden I/01 bis III/02 der Verlauf der realen Verdunstung bei den unterschiedlichen Lysimetern fast identisch ist und auch die mit METVER modellierte Kurve annähernd gleich ist. Dies ist eine Folge der nicht plausiblen Ergebnisse der Verdunstungsberechnung auf der Basis der Lysimeterwägungen, die vor allem im Winter bei Lysimeterstationen auftreten. Auf den langjährigen Erfahrungen an anderen Lysimeterstationen (bspw. Brandis) aufbauend und aufgrund der Vegetationsruhe im Winter, fiel die Entscheidung, negative Verdunstungswerte durch die potentielle Evapotranspiration (PET) zu ersetzen. Dies verhält sich in allen betrachteten Jahren 2012 bis 2017 gleichartig. Der deutliche und gleichmäßige Abfall in den Dekaden II/03 und III/03 ist dadurch zu erklären, dass in diesen Tagen des Jahres 2013 eine geschlossene Schneedecke zu verzeichnen war bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes. Für diese Tage wurde eine Schneedeckenverdunstung von 0,01 mm pro Tag gesetzt. In den Dekaden I/05 bis II/07 passen die modellierten Werte exzellent zu den Messwerten und zeigen den gleichen Verlauf, wobei die modellierten Werte im Bereich I/05 bis etwa II/06 leicht oberhalb oder im oberen Bereich der vorhandenen Werte liegen.

### Lysimeterstation Grünewalde

In *Abbildung 4* ist die mittlere tägliche reale Verdunstung in den Dekaden des Jahres 2013 für die Lysimeter 1, 3 und 4 der Station Grünewalde dargestellt. Zuerst einmal ist sehr gut ersichtlich, dass die Ergebnisse der Lysimeter in ihren Verläufen gut zueinander passen. Vor allem in den Dekaden I/01 bis II/07 verlaufen die Werte der Lysimeter 3 und 4 fast identisch. Dass der Verlauf des Lysimeters 1 leicht abweicht, lässt sich mit den unterschiedlichen Bodenarten begründen.

Im Gegensatz zu Colbitz, liegt die mit METVER modellierte AET in den Monaten Januar bis März deutlich über den Werten aus den Lysimetermessungen. Der Messwertverlauf ist auch hier geprägt durch die Korrekturen der negativen oder wirklichkeitsfernen Messwerte der Lysimeter.

### Fehlerbetrachtung

Die Fehlerbetrachtung muss zwei wichtige Aspekte bedenken. Der erste Gesichtspunkt ist, dass Fehlerquellen in den Rohdaten liegen können. Die fehlerhaften Daten – negative Verdunstungswerte oder unrealistisch hohe Werte – treten vor allem in den Wintermonaten von Oktober bis März auf. Dies kann unterschiedliche Ursachen haben, bspw. eine vorhandene Schneedecke. Diese sorgt je nach Temperatur zu einer Erhöhung des Gewichts des Lysimeters (bei Temperaturen über 0°C und Regen wird der Schnee deutlich schwerer, als bei negativen Temperaturen und Trockenheit). Außerdem können sogenannte Brückenkräfte entstehen, die ebenfalls zu einer Erhöhung des Gewichts führen. Auch Frost kann aufgrund von Schrumpfungsprozessen zu falschen Werten führen, da so zwischen Bodenmonolith und Lysimetertopf ein Spalt entsteht, der dazu führt, dass Wasser an der Innenwand herunterlaufen kann.

Die Vegetation spielt bei der realen Verdunstung eine entscheidende Rolle. Obwohl die Lysimeter der beiden Stationen mit Gräsern bewachsen sind, entwickelt sich die Vegetation jeder Station, gar jedes Lysimeters unterschiedlich. So unterscheidet sich der Bewuchs am Standort Colbitz auf einer Lichtung im Wald deutlich von der Vegetation am Standort Grünewalde auf einer freien Fläche. In *Abbildung 2* ist der Unterschied im Bewuchs zwischen den einzelnen Lysimetern in Grünewalde gut zu sehen. Die Lysimeter 1 bis 9 der Station Colbitz sind mit *Calluna vulgaris* bewachsen,

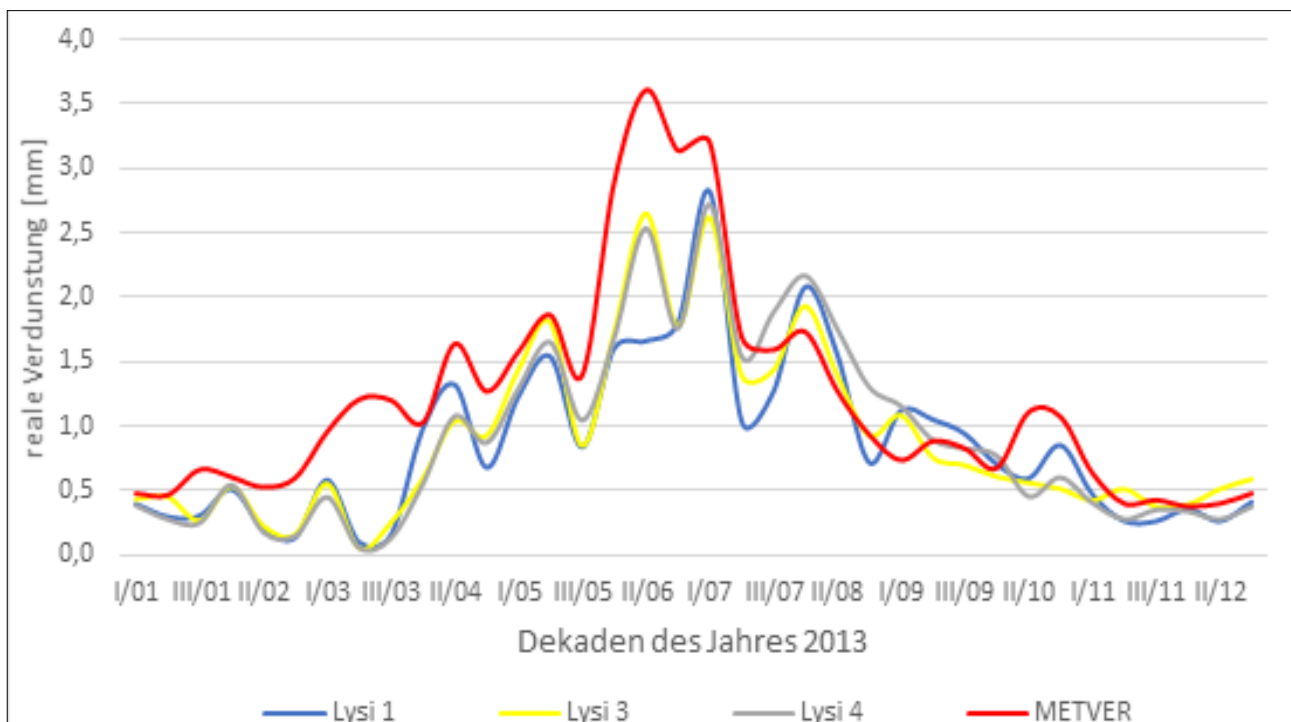


Abbildung 4: Jahresverlauf der mittleren täglichen Verdunstung in den Dekaden des Jahres 2013 der Lysimeterstation Grünewalde.



zeigen aber ein ähnliches Verdunstungsverhalten wie die Graslysimeter an diesem Standort.

Die Zusammensetzung und Dichte des Bewuchses wird insbesondere durch die Eigenschaften der Böden in den Lysimetern beeinflusst. Insgesamt sind auf beiden Stationen fünf unterschiedliche Böden eingesetzt worden, wobei hier besonders die beiden Lysimeter der Station Grünewalde hervorzuheben sind, die mit einem geschütteten Haldenboden gefüllt sind. Die gewachsenen Böden, die als ungestörte Bodenmonolithe eingebaut wurden, weisen einen anderen Wasserhaushalt auf als die künstlich angelegten, geschütteten Böden. Zum anderen muss der Hintergrund des Modells hier berücksichtigt werden. Das Modell wurde entwickelt, um die Verdunstung in landwirtschaftlichen Nutzgebieten zu errechnen, und ihm liegt eine mittlere Phänologie zugrunde. Die beiden letzten Punkte werden im folgenden Abschnitt näher beleuchtet.

## Diskussion

Der Vergleich beider Stationen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Lage – Colbitz auf einer Lichtung im Wald, Grünewalde frei auf einer Halde – sehr interessant, weil dadurch mikroklimatische Unterschiede in den Messwerten durchschlagen, die durch das verwendete Modell nicht abbildbar sind. Des Weiteren weisen beide Stationen unterschiedliche Bodentypen auf. In den dargestellten Ergebnissen zeigt sich deutlich, dass die Messwerte solcher Stationen weiterhin zur Verbesserung von Modellwerten hilfreich sein werden. Besonders das Bodengefüge ist hierbei zu beachten. Das Modell mit seinen Konstanten ist für gewachsene, landwirtschaftlich genutzte Flächen konzipiert worden. Um auch andere Bodenarten, -strukturen und -nutzungen vollumfänglich abbilden zu können, müsste darüber nachgedacht werden, ob in METVER Konstanten so verändert werden können, dass sie die wasserhaushaltlichen Zusammenhänge besser abbilden können. Außerdem ist beim Modell METVER zu bedenken, dass die Wachstumsphase der Pflanzen auf eine mittlere Phänologie ausgelegt ist. Die langjährigen Beobachtungen des Klimas zeigen, dass sich die phänologischen Phasen insbesondere in der ersten Hälfte der Vegetationszeit deutlich verfrühen. Dies führt dazu, dass das Modell METVER die Wachstumszeit der Pflanzen etwas zu spät ansetzt.

Es sei auch angemerkt, dass die Messdaten kritisch betrachtet werden müssen. In den Monaten von Dezember bis März liefern die Lysimeter aus verschiedenen Gründen oft schwierig zu interpretierende Messwerte, die sehr oft durch potenzielle Verdunstungswerte ersetzt werden müssen. Für die vegetationsbezogene Auswertung der Lysimeterergebnisse ist dies aber nur von geringer Relevanz, da das Hauptaugenmerk auf den Lysimetermesswerten in der Vegetationszeit liegt. Auch die Sorgfalt spielt bei Lysimeterstationen

eine wesentliche Rolle. So ist eine tägliche Betreuung der Anlage für eine reibungslose Messung und Aufzeichnung der Werte sehr wichtig. Nicht plausible Messwerte oder fehlende Messwerte der Lysimeter und der meteorologischen Stationen werden bei einer nicht kontinuierlichen Betreuung wahrscheinlich nicht rechtzeitig erkannt.

## Schlussfolgerungen

Es sollte sichergestellt werden, dass die Messungen langfristig stabil mit einem gleichbleibenden Qualitätsniveau fortgesetzt werden, denn langjährige Messungen sind selten und stellen schon deshalb einen besonderen Wert dar. Wichtig ist bei dem Vergleich mit Modellen, dass die Hintergründe der Modelle beachtet werden. Gerade beim Modell METVER ist die Phänologie zu berücksichtigen und so wäre hier zu überlegen, das Modell mit einem Ontogenesemodell zu koppeln, um die Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten zu kompensieren.

## Literatur

- Hagenau J. (2014) Wasser- und Stoffhaushalt der wägbaren Lysimeterstation Colbitz. Ein Referenzstandort zur Umsetzung der Erfordernisse der EU-WRRL, im Auftrag des LHW 16.09.2014.
- Helbig A. (1988) Vergleich der Wasserhaushaltskomponenten eines Kieferbestandes und einer Waldgrasfläche nach Lysimetermessungen. Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik (140).
- Kayser M. (2002) Aspekte zum Wasserhaushalt von Sandlössen im Mitteldeutschen Trockengebiet, Dissertation an der TU Berlin.
- Kortüm F., Helbig A. (1980) Zur Auswertung von Lysimeterbeobachtungen, Zeitschrift für Meteorologie, 107-111.
- Müller J., Müller G. (1988a) Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, 1. Mitteilung, Z. Meteorol., 38, 332-336.
- Müller J., Müller G. (1988b) Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, 2. Mitteilung, Z. Meteorol., 38, 361-365.
- Müller J., Müller G. (1989) Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete, 3. Mitteilung, Z. Meteorol., 39, 142-149.
- Richter (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194.
- Turc (1961) Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. – Ann Agron. Paris 12: 13-49.
- Wendling U.H., Schellin H.-G., Thoma M. (1991) Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. – Z. Meteorol., 34: 82-85.
- UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (1996) Erfassung des Wasserhaushalts bewaldeter Areale und Heidevegetation. Jahresbericht über Lysimetermessungen in der Colbitz-Letzlinger Heide. Unveröffentlicht.

