

# Langzeituntersuchungen zum Sickerwasser- und Stickstoffaustrag in Abhängigkeit von Bodenart, Nutzung und Mineraldüngung

Janine Köhn<sup>1\*</sup>, Ralph Meißner<sup>2,3</sup>, Holger Rupp<sup>3</sup> und Frido Reinstorf<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Ein Wandel des Klimas ist schon heute zu beobachten. Besonders Veränderungen von Temperatur und Niederschlag können sich auf den Bodenwasser- und Boden-nährstoffhaushalt auswirken. Mithilfe der langjährigen Messungen des Sickerwasser- und des Stickstoffaustrags an der UFZ-Lysimeterstation Falkenberg wurden Analysen zum Trendverhalten dieser Größen durchgeführt. Durch einen speziellen Versuchsaufbau wurde zudem untersucht, ob sich die Trends hinsichtlich der Landnutzung, Bodenarten oder Düngemenge unterscheiden.

Die Trendanalysen zeigten, dass die Sickerwasserrate stark von der Beregnung im Versuchszeitraum abhängig und tendenziell -jedoch noch nicht signifikant- ansteigend war. Sandböden reagierten eindeutiger auf die Änderung der klimatischen Parameter als die anderen Bodenarten. Die Menge an Dünger hatte keinen nachweisbaren Effekt auf die Größe des Sickerwassertrends. Zum Teil konnten gegensätzliche Trends bei den unterschiedlichen Landnutzungen festgestellt werden, die jedoch auf eine unterschiedliche Beregnungshöhe zurückzuführen waren. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für den Stickstoffaustrag herausgearbeitet; jedoch konnten hier häufiger Signifikanzen nachgewiesen werden. Auch wiesen die Stickstoffausträge der Grünlandlysimeter mit einer höheren Düngestufe häufiger einen signifikanten Trend auf.

*Schlagwörter:* Klimawandel, Langzeittrends, Lysimeter, Düngung, Bewässerung

## Summary

Climate change can already be observed. In particular, changes in temperature and precipitation can influence soil water and soil nutrient balance. By using long-term measurements of seepage water and nitrogen leaching at the UFZ Falkenberg lysimeter station, the trend of these parameters was analysed. With a special experimental set-up was also investigated whether the trends differ regarding to land use, soil types or fertiliser quantity.

The trend analyses showed that the seepage water rate was strongly affected by irrigation during the study period. In total, the seepage water tends to increase (but not significantly). Sandy soils were more sensitive to changes in climatic parameters than other soil types. The amount of fertilizer had no noticeable effect on the seepage water trend. In some cases contradictory trends were observed for different types of land use, but these were caused by different amounts of irrigation. Similar results were also noticed for nitrogen leaching, whereby changes in nitrogen leaching were more often significant. Nitrogen leaching of Grassland lysimeters with a higher fertilisation level also showed a significant trend more frequently.

*Keywords:* climate change, long term trend analysis, lysimeter, fertilization, irrigation

## Einleitung

Um die Folgewirkungen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt zu erfassen, wurden langjährig vorliegende meteorologische Messreihen ausgewertet (Kreienkamp et al. 2012) und mithilfe von Klimamodellen zukünftige Entwicklungsszenarien simuliert (Kropp & Roithmeier et al. 2009). Die Änderung von Temperatur und Niederschlag wirken sich auch auf den Bodenwasserhaushalt aus. Studien deuten darauf hin, dass die Entwicklung der Grundwasserneubildung in starkem Maße von der Niederschlagsänderung und -verteilung abhängig ist (Pfützner et al. 2012). Kropp et al. (2009) vermuten eine Zunahme der Sickerwasserrate im

Winterhalbjahr, wobei die Phasen in denen Sickerwasser gebildet wird, sich verkürzen werden. Gleichzeitig wird angenommen, dass durch die Zunahme der Temperatur und dem Abbau organischer Substanz Nährstoffe, insbesondere die Stickstoffverbindungen, verstärkt ausgetragen werden (Davidson & Janssens 2006, Kirschbaum 2006, Labo 2010). Generell sind die Veränderungen im Bodenwasser- und Stoffhaushalt jedoch schwer abschätzbar und häufig nur spekulativ. Untersuchungen an Grünlandlysimetern an der Lysimeterstation Falkenberg (Köhn et al. 2017) zeigten ein deutliches Änderungsverhalten der Sickerwasserrate im Frühjahr. Durch die signifikant abnehmenden Temperaturen und sinkenden Niederschläge konnte hier ein

<sup>1</sup> Hochschule Magdeburg Stendal, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit, Lehrgebiet Hydrologie und Geographische Informationssysteme, Breitscheidstraße 2, D-39114 MAGDEBURG

<sup>2</sup> Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Naturwissenschaftliche Fakultät III, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Julius-Kühn-Straße 23, D-06112 HALLE (SAALE)

<sup>3</sup> Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Lysimeterstation, Falkenberg 55, D-39615 ALTMÄRKISCHE WISCHE

\* Ansprechpartner: M.Eng. Janine Köhn, janine.koehn@hs-magdeburg.de



Rückgang der Rate beobachtet werden, welche sich auf das Pflanzenwachstum auswirkte. In den Wintermonaten nahm die Sickerwasserrate dagegen zu. Untersuchungen im Fläming (östlicher Teil Sachsen-Anhalts), die mithilfe von Klimamodellen durchgeführt wurden, deuteten demgegenüber auf einen generellen Rückgang der Sickerwasserrate hin (Paul 2014).

Mithilfe der seit mehr als 30 Jahren durchgeführten Messungen an 24 Lysimetern der vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ am Standort Falkenberg betriebenen Lysimeterstation, im folgenden Lysimeterstation Falkenberg genannt, wurde eine Trendanalyse durchgeführt. Die Lysimeter wurden dabei unter verschiedenen Aspekten betrieben und unterschieden sich hinsichtlich Bodenart, Nutzung und Düngung. Mithilfe der Auswertung der Lysimeterdaten sollte sowohl der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich Sickerwasser- und Stickstoffaustrag durch den beobachteten Klimawandel verändern, als auch geprüft werden, ob sich diese Trends hinsichtlich Bodenart, Landnutzung und Düngung unterscheiden.

## Material und Methoden

Für die Auswertung und Trendanalyse wurden die Daten der Lysimeterstation Falkenberg in Sachsen-Anhalt (52°51'N, 11°48'E) verwendet. Hier werden seit 1982 Versuche an 24 nicht wägbaren Vollmantel-Lysimetern (Oberfläche = 1 m<sup>2</sup>; Tiefe = 1,25 m) durchgeführt (Abbildung 1). Davon wurden jeweils 6 Lysimeter zweischichtig mit einer der Hauptbodenarten Sand (S), Sandiger Lehm (IS), Lehm (L) und Tonigem Schluff aus Löss (SIL) gefüllt. Die Bodenarten sind dabei repräsentativ für landwirtschaftliche genutzte Böden im Flachlandbereich des Elbeinzugsgebietes der neuen Bundesländer (Meißner et al. 1995, Godlinski 2005). Für jede Bodenartgruppe werden noch einmal je 3 Lysimeter in einer Grünlandnutzung (GL) und 3 Lysimeter in einer Ackernutzung (AL) bewirtschaftet, welche wiederum jeweils mit einer von drei Düngevarianten angelegt worden sind. Die ackerbaulich genutzten Lysimeter werden in einer Getreide-Feldfutter-Fruchtfolge (Klee gras – Winterweizen – Wintergerste – Hafer mit einer Mais/Sonnenblumen-Zwischenfrucht) genutzt. Die mineralische Düngung staffelt sich

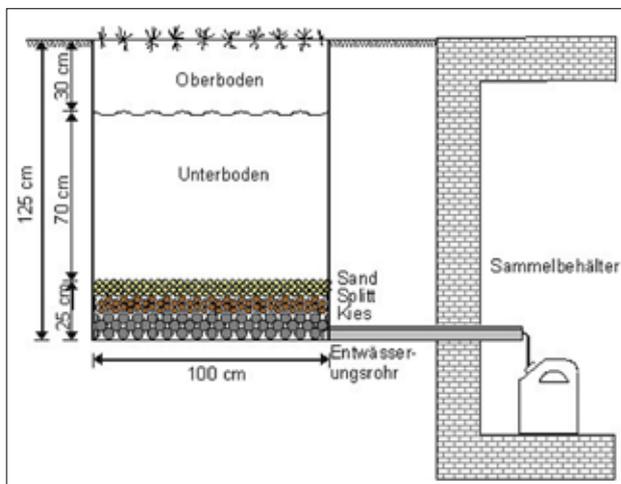


Abbildung 1: Schema eines Grünlandlysimeters (Godlinski 2005).

in 3 Varianten, wobei die 100%-Variante der fruchtartspezifisch empfohlenen Menge entspricht (angelehnt an die in der frühen DDR genutzten Beratungssysteme) und die Varianten 50% und 150% jeweils durch Zu- bzw. Abschläge erhalten werden. Die GL-Lysimeter werden einer Vierschnittnutzung unterzogen und seit 1982 bedarfsgerecht beregnet (seit 1982 im Durchschnitt 202 mm/a, Beregnung erfolgte i.d.R. von April bis September). Bei den AL-Lysimetern setzte eine Beregnung 1987 ein (seit 1987 durchschnittlich 153 mm/a, Beregnung erfolgte i.d.R. von April bis September). Nach 2003 wurde die Beregnung bei beiden Nutzungsvarianten eingestellt (Notbewässerung im Mittel ca. 3 mm/a). Bewirtschaftungsdaten können Meißner et al (1995) oder Godlinski (2005) entnommen werden.

Für die Sickerwasser- und Stickstoffausträge lagen monatliche Daten seit 1982 vor, die Auswertung wurde jedoch für den Zeitraum von 1984 bis 2015 vorgenommen, um störende Effekte der Bodenkonsolidierung in den ersten beiden Jahren nach der Befüllung der Lysimeter auszuschließen. Die aufgeführten Jahre stellen jeweils ein Lysimeterjahr dar, das sich von Mai bis April des Folgejahres erstreckt. Als Parameter für die statistischen Untersuchungen wurden die Sickerwassermenge und der Austrag von Gesamtstickstoff ( $N_{ges}$  = Summe aus Nitrat- ( $NO_3$ -N), Nitrit- ( $NO_2$ -N), Ammonium- ( $NH_4$ -N)) ausgewertet. Parallel dazu wurden die meteorologischen Daten der nahegelegenen DWD-Wetterstation Seehausen hinzugezogen, welche als Tageswerte von 1977 bis 2018 vorliegen. Aufgrund der systematischen Messfehler, wurden die Niederschlagshöhen von der DWD-Wetterstation Seehausen nach dem Verfahren nach Richter (1995) bzw. nach ATV-DVWK-M 504 korrigiert (Annahme einer leicht geschützten Lage). Die potenzielle Verdunstung ist als FAO-Gras-Referenzverdunstung ( $ET_0$ ) gemäß ATV-DVWK-M 504 berechnet worden.

Um zu gewährleisten, dass die Effekte der Beregnung sich nicht auf die Ergebnisse der Trendanalyse auswirken,

Tabelle 1: Mittelwerte und Trends ausgewählter Klimaparameter an der DWD-Wetterstation Seehausen (tägliche Zeitreihe von 1977 bis 2017).

DWD-Wetterstation Seehausen (1977-2017)			
	Lufttemp. [°C]	Niederschlag [mm]	Verdunstung [mm]
Jahr	9,3 (++++)	641 (+)	654 (+++)
SommerHJ	15,1 (++++)	352 (+)	510 (+++)
WinterHJ	3,9 (+++)	289 (+/-)	144 (+++)
Frühjahr	5,1 (++++)	125 (-)	193 (+++)
Sommer	16,3 (++++)	189 (+)	321 (+++)
Herbst	13,9 (+++)	162 (+)	106 (+)
Winter	2,7 (+)	164 (+)	35 (+)

**Frühjahr** – März, April, Mai; **Sommer** – Juni, Juli, August; **Herbst** – September, Oktober, November; **Winter** – Dezember, Januar, Februar

- nicht signifikant sinkend (Trend)
- signifikant sinkend
- hoch signifikant sinkend
- höchst signifikant sinkend
- + nicht signifikant steigend (Trend)
- ++ signifikant steigend
- +++ hoch signifikant steigend
- ++++ höchst signifikant steigend

wurden die Zeiträume mit und ohne Beregnung für die Sickerwasserrate und den Stickstoffaustrag getrennt ausgewertet. Der Zeitraum mit Beregnung lag zwischen 1984 bis 2003, der Zeitraum ohne Beregnung ist von 2006 bis 2018 definiert worden. Die Jahre 2004 und 2005 (2 Jahre) blieben im Zeitraum ohne Beregnung unberücksichtigt, um rückwirkende Effekte (wie ein erhöhter Bodenwasservorrat) ausschließen zu können. 2 Jahre wurden als ausreichend eingeschätzt, da Tracerexperimente gezeigt haben, dass die mittlere Verweilzeit von Sickerwasser im Lysimeter ca. 1,5 Jahre beträgt (Meißner & Ollesch et al. 2010).

Für die Trendanalyse wurde der Mann-Kendall-Signifikanztest mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  von 0,05 verwendet. Die Ergebnisse wurden in Signifikanzbereiche unterteilt: Eine berechnete Überschreitungswahrscheinlichkeit  $p \geq 0,05$  wurde mit „nicht signifikant“,  $0,05 > p > 0,01$  mit „signifikant“,  $0,01 > p > 0,001$  mit „hoch signifikant“ und  $p < 0,001$  mit „höchst signifikant“ bezeichnet (nach Kropp & Roithmeier et al. 2009).

## Ergebnisse und Diskussion

### Meteorologische Trends

Ergebnis: *Tabelle 1* zeigt Mittelwerte und Trends von ausgewählten Klimaparametern an der DWD-Wetterstation

Seehausen. Besonders für die Temperatur, welche im Jahresmittel bei 9,3°C lag, waren in fast allen untersuchten Zeitschritten bis zu höchst signifikante positive Trends zu beobachten. Auch für die Verdunstung (im Mittel 654 mm/a) ist ein hoch signifikanter Trend festgestellt worden. Weniger deutlich waren die Veränderung der Temperatur und Verdunstung im Winter. Im Gegensatz dazu konnte für den Niederschlag kein signifikanter Trend nachgewiesen werden. Der Niederschlag, welcher im Jahresmittel 641 mm betrug, war generell zunehmend, mit Ausnahme des Frühjahrs.

Diskussion: Grundsätzlich deutet die Trendanalyse darauf hin, dass sich Temperatur und Verdunstung in den untersuchten 41 Jahren deutlich verändert haben. Für den Niederschlag konnte zwar kein signifikanter Trend ermittelt werden, da dieser i.d.R. auch deutlich stärkeren Schwankungen unterliegt als die Temperatur. Die generelle Zunahme beider Parameter hat jedoch insgesamt zu einem zunehmend heißeren und feuchteren Klima geführt.

### Trends der Sickerwasserrate

Ergebnis: Vergleicht man die mittleren Sickerwasserraten aus *Tabelle 2*, so wird deutlich, dass sich die Messungen der Lysimeter zum Teil deutlich voneinander unterscheiden. Vor allem zwischen den GL und den AL-Lysimetern lagen Diffe-

**Tabelle 2: Mittelwerte und Trends der Sickerwassermenge im Beregnungszeitraum (1984-2003) und im Zeitraum ohne Beregnung (2006-2018) sowie Monate mit signifikanten Trends und Grad der Signifikanz im Beregnungszeitraum.**

Lysimeterstation Falkenberg (1984-2018)						
Bodenart	Nutzung	Düngung	Nr. Lys.	SW (Jahr) mit Bereg. [mm]	SW (Jahr) ohne Bereg. [mm]	Monat mit sig. Trend und Grad der Signifikanz (1984-2003)
Lehmiger Sand (LS)	GL	50%	L 70	190 (+)	176 (-)	-
		100%	L 71	180 (-)	159 (-)	-
		150%	L 72	155 (+)	141 (-)	-
	AL	50%	L 73	90 (+)	109 (+)	-
		100%	L 74	105 (+)	134 (+)	Juli (++) / Nov. (++)
		150%	L 75	101 (+)	122 (+)	Nov. (++)
Sand (S)	GL	50%	L 76	232 (-)	210 (+)	Juni (---) / Dez. (--)
		100%	L 77	211 (-)	213 (-)	Juni (---) / Dez. (--)
		150%	L 78	194 (-)	214 (-)	Juni (---) / Dez. (--)
	AL	50%	L 79	157 (+)	175 (+)	Okt. (++)
		100%	L 80	138 (+)	160 (+)	Sep. (++) / Okt. (++)
		150%	L 81	134 (+)	147 (+)	Okt. (++)
Lehm (L)	GL	50%	L 82	225 (+)	174 (-)	-
		100%	L 83	204 (+)	167 (-)	Juni (---)
		150%	L 84	200 (-)	173 (-)	Juni (--)
	AL	50%	L 85	127 (+)	119 (+)	-
		100%	L 86	98 (+)	114 (+)	Nov. (++)
		150%	L 87	85 (+)	87 (+)	-
Toniger Schluff aus Löss (SIL)	GL	50%	L 88	230 (+)	196 (-)	-
		100%	L 89	199 (-)	160 (-)	-
		150%	L 90	200 (+)	162 (-)	-
	AL	50%	L 91	79 (+)	121 (-)	-
		100%	L 92	66 (+)	102 (+)	-
		150%	L 93	49 (+)	62 (o)	Dez. (++)

o	keine Tendenz erkennbar (Steigung der linearen Trendgeraden $\sim 0$ mm)		
-	nicht signifikant sinkend (sink. Tendenz)	+	nicht signifikant steigend (Trend)
--	signifikant sinkend	++	signifikant steigend
---	hoch signifikant sinkend	+++	hoch signifikant steigend
----	höchst signifikant sinkend	++++	höchst signifikant steigend

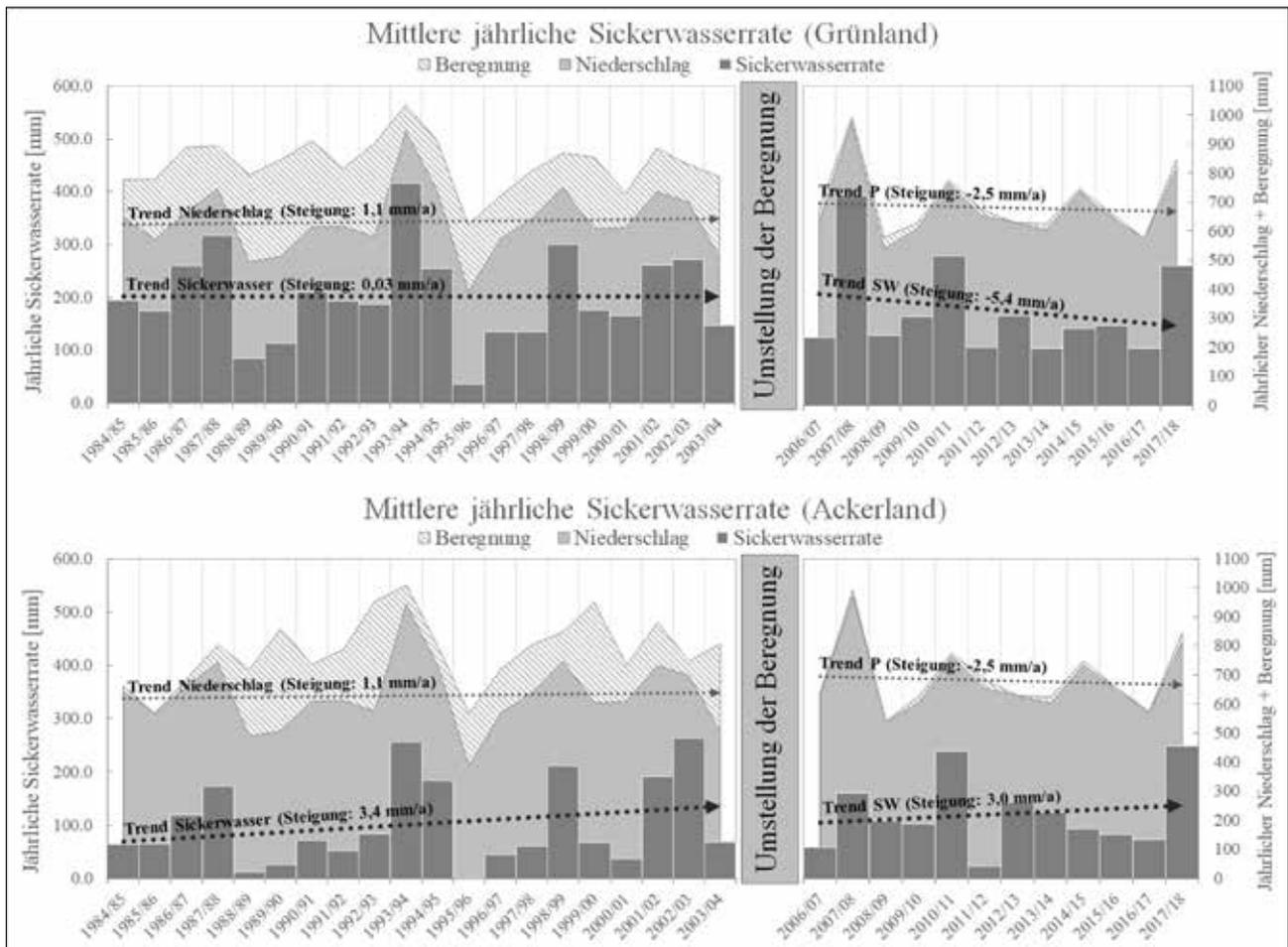


Abbildung 2: Mittlere jährliche Sickerwasserrate aller Grünlandlysimeter (oben) und aller Ackerlandlysimeter (unten) sowie mittlerer jährlicher Niederschlag (mit Beregnung) im Untersuchungszeitraum mit Trendgeraden und Steigung der Trendgeraden.

renzen von bis zu 100 mm vor (vgl. Lys. 70 und 73), wobei die Sickerwasserrate bei den GL-Lysimetern häufig höher war. Mit zunehmender Düngestufe war die Sickerwasserrate abnehmend. Dagegen war zwischen dem Zeitraum mit und ohne Beregnung kein eindeutiger Unterschied festzustellen.

Für die jährliche Sickerwasserrate konnte in keinem Zeitraum und für kein Lysimeter ein signifikanter Trend festgestellt werden. Hinsichtlich der Trendrichtung waren jedoch deutliche Unterschiede zu erkennen. Dabei war die Sickerwasserrate für AL-Lysimeter grundsätzlich ansteigend. Bei den GL-Lysimetern war diese dagegen häufiger sinkend (Abbildung 2). Besonders bei den GL-Lysimetern fielen die teilweise gegensätzlichen Tendenzen zwischen den Zeiträumen mit und ohne Beregnung auf. In der Regel waren hier die Sickerwasserraten im Beregnungszeitraum ansteigend, im Zeitraum ohne Beregnung abnehmend. Ausgenommen davon waren die Lysimeter mit Sandböden (S), bei denen ein umgekehrtes Verhalten zu beobachten war. Für die verschiedenen Düngestufen konnte kein Unterschied hinsichtlich der Trendrichtung herausgearbeitet werden.

Bei Betrachtung der monatlichen Sickerwasserraten konnten zum Teil signifikante Trends ermittelt werden. Die Sickerwasserraten waren im April, Juni und Juli sinkend (zum Teil auch signifikant, vgl. Tabelle 2). Im Oktober, November und Februar waren die Sickerwasserraten dagegen tendenziell

steigend. Des Weiteren ist aus Tabelle 2 ersichtlich, dass am häufigsten signifikante Veränderungen der Sickerwasserrate für die S-Lysimeter ermittelt wurden. GL-Lysimeter wiesen grundsätzlich seltener signifikante Trends auf als AL-Lysimeter. Zudem war die Trendrichtung bei GL-Lysimetern meist sinkend, bei AL-Lysimetern dagegen steigend. Generell waren die Änderungen im Sommer (Juni/ Juli) und im Winter (November/Dezember) am deutlichsten (bzw. im Oktober bei S-Lysimetern). Der nicht beregnete Zeitraum war für eine Trenduntersuchung mit 12 Jahren zu kurz, die Ergebnisse werden für eine Auswertung als nicht robust genug eingeschätzt.

Diskussion: Die Auswertung hat gezeigt, dass bei den Sickerwasserraten je nach Bodenart und Bewirtschaftung deutliche Differenzierungen bestanden. Zum Großteil waren diese Unterschiede auf natürliche Ursachen (wie den Feinkornanteil, klimatische Bedingungen, Pflanzenwachstum) zurückzuführen (Meißner & Schonert et al. 1995). Die deutlich größere Sickerwasserrate bei den GL-Lysimetern wurde durch die höhere Beregnung begründet. Zusätzlich begannen die jährlichen Sickerwasserperioden bei GL-Lysimetern früher (Godlinski 2005). Bei der Auswertung der Trends konnten die Lysimeter daher nicht zusammengefasst werden, sondern mussten einzeln betrachtet werden. Somit wurden die Zeiträume mit und ohne Beregnung sowie GL- und AL-Lysimeter gesondert betrachtet.

Der Trend der Sickerwasserrate war trotz eindeutig steigender Temperaturen bzw. Verdunstung nicht signifikant. Auffällig waren jedoch die teilweise gegensätzlichen Trendrichtungen einzelner Lysimeter, die auf den Einfluss Beregnung zurückzuführen waren. So hatte für GL die Beregnungsmenge bis 2003 abgenommen (zwischen 1984 bis 1992 ca. 104 mm/a, zwischen 1993 bis 2003 ca. 66 mm/a). Dies war der Grund für die teilweise abnehmenden Trends der Sickerwasserrate, z.B. der S-Lysimeter. Gleichzeitig war der Niederschlag zunehmend (*Abbildung 2*), sodass für die GL-Lysimeter insgesamt ein nicht eindeutiges Bild entstand. Die Beregnungsmenge bei AL hatte im Gegensatz dazu zugenommen, da die Beregnung erst nach 1987 einsetzte. Zusammen mit den tendenziell zunehmenden Niederschlägen konnte ein zunehmender Trend bei fast allen Lysimetern beobachtet werden. Die Auswertung hat somit gezeigt, dass die Beregnung die klimatisch verursachten Veränderungen des Sickerwassers beeinflussen konnte. Trends im Zeitraum ohne Bewässerung waren dagegen aufgrund der geringen Anzahl an Jahren (insgesamt 12) wenig robust. Die sinkenden Trends einiger GL-Lysimeter ließen sich z.B. auf ein Extremwert-Jahr 2007/08 zurückführen, der Anstieg der AL-Lysimeter dagegen auf einen hohen Austrag im Jahr 2017/18 (vgl. *Abbildung 2*).

Die vier untersuchten Bodenarten zeigten hinsichtlich des jährlichen Sickerwassertrends keine eindeutigen Unterschiede. Monatlich betrachtet fiel jedoch auf, dass vor allem Sandböden häufiger einen signifikanten Trend

aufwiesen, als andere Bodenarten. Sandböden reagieren aufgrund der hohen Durchlässigkeit schneller bzw. sensibler auf Änderungen als andere Bodenarten. So war im Juni und Dezember ein Rückgang der Sickerwassermenge aufgrund der stark rückgängigen Niederschläge in denselben Monaten zu beobachten. Es wurde jedoch auch deutlich, dass die GL-Lysimeter und AL-Lysimeter bei denselben Monaten ein unterschiedliches Verhalten aufzeigten. Ein Zusammenhang mit dem Bewuchs sowie dem Schnitt bzw. die Erntezeitpunkte waren hier wahrscheinlich. Bei den 3 Düngegraden war kein eindeutiger Unterschied hinsichtlich der Trendentwicklung erkennbar. Bei den monatlichen Trends konnte man jedoch erkennen, dass Lysimeter mit einer 100%- und 150%-Düngegrad häufiger signifikante Trends zeigten, als die 50%-Variante; Ursache hierfür sind erhöhte Ernteerträge, was wiederum auf das unterschiedliche Pflanzenwachstum zurückzuführen war.

Im Vergleich zur Langzeitanalyse zweier GL-Lysimeter (Köhn et al. 2017), waren ähnliche Ergebnisse festzustellen. Auch in dieser Untersuchung konnten sinkende Sickerwasserausträge im Frühjahr und steigende Raten im Winter beobachtet werden. Die Veränderung des Niederschlags wirkte sich damit, trotz Beregnung, in gleicher Weise auf die monatliche Sickerwasserrate aus.

### Trends des Stickstoffaustrags

Ergebnis: Die Stickstoff(N-)austragsmengen (*Tabelle 3*) der einzelnen Lysimeter unterschieden sich zum Teil stark

**Tabelle 3: Mittelwerte und Trends des jährlichen Stickstoffaustrags im Beregnungszeitraum (1984-2003) und im Zeitraum ohne Beregnung (2006-2018) sowie Monate mit signifikanten Trends und Grad der Signifikanz im Beregnungszeitraum.**

Lysimeterstation Falkenberg (1984-2018)						
Bodenart	Nutzung	Düngung	Nr. Lys.	N (Jahr) mit Bereg. [kg/ha]	N (Jahr) ohne Bereg. [kg/ha]	Monat mit sig. Trend und Grad der Signifikanz (1984-2003)
Lehmiger Sand (LS)	GL	50%	L 70	5,2 (-)	3,6 (-)	-
		100%	L 71	11,2 (+)	42,5 (-)	-
		150%	L 72	8,5 (o)	116,5 (-)	März (-)
	AL	50%	L 73	35,6 (+)	33,5 (+)	-
		100%	L 74	<b>45,2</b> (++)	51,4 (-)	Juli (++) / Nov. (++)
		150%	L 75	43,2 (+)	65,6 (-)	Feb. (++) / Nov. (++)
Sand (S)	GL	50%	L 76	11,1 (-)	<b>20,4</b> (++)	Juni (----)
		100%	L 77	11,0 (-)	84,40 (-)	Juni (----)
		150%	L 78	<b>30,7</b> (+++)	186,9 (-)	Feb. (++) / Juni (---)
	AL	50%	L 79	47,4 (+)	42,6 (-)	Okt. (++)
		100%	L 80	47,7 (+)	51,8 (-)	Sep. (++) / Okt. (++)
		150%	L 81	42,8 (+)	63,9 (+)	-
Lehm (L)	GL	50%	L 82	<b>8,5</b> (---)	2,2 (o)	Jan. (--) / Feb. (---) / März. (--) / Apr. (---) / Jun. (--) / Dez. (---)
		100%	L 83	8,9 (+)	25,8 (-)	Jun. (---)
		150%	L 84	14,9 (+)	110,0 (-)	Feb. (++)
	AL	50%	L 85	40,5 (+)	15,1 (-)	-
		100%	L 86	33,9 (+)	14,6 (-)	Nov. (++)
		150%	L 87	30,1 (+)	23,0 (-)	Feb. (++)
Toniger Schluff aus Löss (SIL)	GL	50%	L 88	<b>20,7</b> (++++)	<b>16,9</b> (--)	Jan. (++) / Feb. (++) / Sep. (++)
		100%	L 89	<b>27,7</b> (++++)	58,0 (-)	Jan. (++)
		150%	L 90	<b>70,7</b> (++++)	143,5 (-)	Jan. (+++) / Feb. (+++) / März (++) / Mai (++)
	AL	50%	L 91	25,6 (+)	22,2 (-)	-
		100%	L 92	26,8 (-)	33,8 (-)	Feb. (++)
		150%	L 93	21,6 (+)	19,7 (-)	Dez. (++)

Legende siehe Tabelle 2

voneinander. Vor allem im nicht berechneten Zeitraum waren deutliche größere N-Austragsmengen zu beobachten, als im berechneten Zeitraum (z.B. L 72 und 78). Grundsätzlich wurde in der Betrachtung monatlicher Werte (hier nicht dargestellt) ein vermehrtes Auftreten von Extremwerten im nicht berechneten Zeitraum deutlich. Diese Extremwerte lagen hierbei häufig in den Wintermonaten (z.B. Dezember, Januar, Februar) und stiegen mit jeder Düngestufe an. Weiterhin fiel auf, dass die N-Austragsmengen der GL-Lysimeter im Berechnungszeitraum häufig kleiner waren als bei AL-Lysimetern (Tabelle 3).

Der Trend der N-Austragsmengen war zum Teil unterschiedlich. Im Berechnungszeitraum war der Trend generell zunehmend. Einige Lysimeter zeigten zudem eine signifikante Zunahme (L 74, L 78, L 88, L 89, L 90). Im Gegensatz dazu war im nicht berechneten Zeitraum die N-Austragsmenge im Mittel aller Lysimeter sinkend. In der Trendauswertung fielen besonders die SIL-Lysimeter auf, welche am häufigsten signifikante Trends aufwiesen. Hinsichtlich der Landnutzung und Düngestufe waren keine deutlichen Unterschiede im Trendverhalten zu erkennen. Signifikante Monate im Berechnungszeitraum lagen häufig im Juni und Anfang des Jahres (Januar, Februar). Grundsätzlich konnte eine Tendenz zu sinkenden monatlichen N-Austrägen bei den GL-Lysimetern sowie eine Tendenz zu steigenden N-Austrägen bei den AL-Lysimetern beobachtet werden. Ausnahme bildeten hier die Lysimeter mit den SIL-Böden, die insgesamt einen zunehmenden monatlichen N-Austrag aufwiesen.

Diskussion: Die teilweise stark abweichenden Stickstoffaustragsmengen zwischen dem berechneten und nicht berechneten Zeitraum waren auf einen Rückgang des Pflanzenertrags nach Einstellung der Beregnung zurückzuführen (mit Beregnung: 1342 g/m<sup>2</sup>; ohne Beregnung: 950 g/m<sup>2</sup>; hier nicht dargestellt). Hinzu kamen hohe Niederschlagsmengen in den Wintermonaten 2010, welche ursächlich für das Auftreten von extremen N-Austrägen war.

Der Trend des N-Austrags wies Ähnlichkeiten zum Trend des Sickerwassers auf. So konnten die zunehmenden N-Austragsmengen bei den AL-Lysimetern auf eine Zunahme der Sickerwasserrate zurückgeführt werden. Im Gegensatz zum Sickerwasser sind jedoch für einige Lysimeter signifikante Trends des N-Austrags festgestellt worden, vor allem bei GL-Lysimetern sowie Lysimeter mit einem SIL-Boden. Dies war zum Teil auf größere Beregnungsmenge sowie auf eine Zunahme der Düngemenge nach 1990 zurückzuführen. Besonders aber die hoch signifikanten Zunahmen der N-Austragsmengen bei den SIL-Lysimetern konnten nicht hinreichend geklärt werden. Für die übrigen Bodenarten sowie auch für die Düngestufen kann jedoch kein eindeutiger Unterschied hinsichtlich des Trendverhaltens festgestellt werden.

## Schlussfolgerungen

Die Auswertung langjähriger Messreihen verschiedenartiger Lysimeter zeigte, dass sich trotz erhöhter Verdunstung die Sickerwasserrate nur in bedingtem Maß und nicht signifikant verändert hat. Vielmehr war die Änderung des Niederschlags bestimmend für die Entwicklung der Sickerwasserrate. Bedeutend für die Tendenzen des Sickerwassers war neben der Niederschlagsveränderung auch die Beregnung. Hinsichtlich der Bodenart konnte eine höhere Sensibilität der S-Böden festgestellt werden. Verschiedene

Landnutzungen und Düngemengen hatten dagegen keinen eindeutigen Effekt auf den Trend der Sickerwasserrate.

Der Trend der N-Austragsmenge war ähnlich wie der Trend der Sickerwasserrate von der Veränderung der klimatischen Verhältnisse sowie von der Beregnung abhängig. Hierbei traten jedoch deutlich häufiger signifikante Trends einzelner Lysimeter und in einzelnen Monaten auf. Zum Teil war dies auf eine größere Beregnungsmenge zurückzuführen (bei GL-Lysimetern), die eine Verlagerung des Stickstoffs in tiefere Schichten verursachten. Zum anderen waren jedoch auch die Erntemenge und damit der Nährstoffentzug (bzw. der Entzug der Pflanzen) ein nicht zu vernachlässigender Faktor. Hinsichtlich der Bodenarten zeigten die SIL-Lysimeter das eindeutigste Änderungsverhalten. Die Veränderungen können jedoch nicht hinreichend auf eine klimatische Ursache zurückgeführt werden. Auch die anderen Bodenarten zeigen zum Teil signifikante Veränderungen. Grundsätzlich war eine eindeutigere Reaktion des N-Austrags auf die Änderungen der klimatischen Parameter zu beobachten.

Zusammenfassend hatten die Bodenart, die Landnutzung und die Düngung nur geringen und höchstens indirekten (z.B. durch die Ernteerträge) Einfluss auf den Trend des Sickerwasser- und N-Austrags. Im Gegensatz dazu hatte die Beregnung eine sehr große Auswirkung auf die Größe und Ausrichtung des jeweiligen Trends. Die Beregnung wäre damit ein mögliches Mittel, zukünftig sinkende Sickerwasserraten bzw. Trockenheit zu vermindern.

Die in den Lysimetern gemessenen Sickerwassermengen und Stickstoffausträge wurden stark von der Beregnung geprägt. Die Ergebnisse des nicht berechneten Zeitraums waren dagegen aufgrund der wenigen Jahre nicht robust. Um genauere Aussagen zum Trendverhalten, insbesondere zwischen den zwei Landnutzungen treffen zu können, soll die Auswertung in einigen Jahren wiederholt und mit den jetzigen Ergebnissen verglichen werden.

## Literatur

- Arbeitsblatt ATV-DVWK-M 504 (2002) Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden, S. 45.
- Davidson E.A., Janssens I.A. (2006) Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*. 2006 Mar 9;440(7081):165-73.
- Godlinski F. (2005) Abschätzung der Phosphorausträge aus der ungesättigten Bodenzone anhand numerischer Interpretationen von Lysimeterversuchen. Dissertation. Universität Rostock.
- Kirschbaum, M. (2006) The temperature dependence of organic-matter decomposition - still a topic of debate. *Soil Biology and Biochemistry* 38 (9), 2510-2518.
- Köhn J., Meißner R., Rupp H., Reinstorf F. (2017) Sind die Wirkungen des Klimawandels auf den Boden anhand von Langzeit-Lysimeteruntersuchungen nachweisbar? 17. Gumpensteiner Lysimetertagung, 09.-10.05.2017, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein 2017.
- Kreienkamp F., Spekat A., Enke W. (2012) Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Teilbericht Los 1.1 und 1.2: Klima und Extreme. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Kropp J., Roithmeier O., Hattermann F., Rachimow C., Lüttger A., Wechsung F., Lasch P., Christiansen E.S., Reyer C., Suckow F., Gutsch M.,

- Holsten A., Kartschall T., Wodinski M., Hauf Y., Conrad T., Österle H., Walther C., Lissner T., Lux N., Tekken V., Ritchie S., Kossak J., Klaus M., Costa L., Vetter T., Klose M. (2009) Klimawandel in Sachsen-Anhalt - Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK).
- Meißner R., Rupp H., Seeger J., Schonert P. (1995) Langjährige Lysimeteruntersuchungen über den Einfluss einer gestaffelten Mineraldüngung auf den Nährstoffhaushalt. Arch. Acker-Pfl. Boden., Vol. 39 pp. 197-219.
- Meißner R., Rupp H., Seeger J., Ollesch G., Gee G.W. (2010) A comparison of water flux measurements: passive wick-samplers versus drainage lysimeters. European Journal of Soil Science 61.4.
- Paul G., Meißner R., Ollesch G. (2014) Abschätzung von Auswirkungen des Klimawandels auf den Landschaftswasserhaushalt im Fläming. WasserWirtschaft 10/2014: 23-28.
- Positionspapier der LABO (2010) Klimawandel - Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes. Zur Kenntnis genommen zur 74. Umweltministerkonferenz am 11. Juni 2010 in Bad Schandau; URL: [https://www.labo-deutsch-land.de/documents/LABO\\_Positionspapier\\_Boden\\_und\\_Klimawandel\\_090610\\_aa8\\_bf5.pdf](https://www.labo-deutsch-land.de/documents/LABO_Positionspapier_Boden_und_Klimawandel_090610_aa8_bf5.pdf); Letzter Zugriff: 06.04.2018.
- Pfützner B., Klöcking B., Schumann A., Hesse P. (2012) Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Teilbericht Los 1.3: Wasser. Büro für Angewandte Hydrologie im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Richter D. (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zu Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.

