

Veränderungen des Stickstoff-Haushaltes eines Waldwiesen-Standortes durch den Klimawandel

N. Knauer¹, Jannis Groh¹, Harry Vereecken¹ und Thomas Pütz^{1*}

Zusammenfassung

Im Rahmen des „Space-for-Time“ Versuches TERENO-SOILCan wurden neun wägbare monolithische Lysimeter mit Waldwiesenboden aus dem Nationalpark Eifel befüllt. Sechs dieser monolithischen Lysimeter wurden am Ursprungsort Wüstebach und drei am wärmeren und trockeneren Standort Selhausen in der Niederrheinischen Bördelandschaft installiert. Für die Beobachtungsjahre 2013 und 2014 wurde eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um ca. 3,4 °C und eine um ca. 350 mm geringere Niederschlagsjahresmenge am Standort Selhausen zum Referenzort beobachtet. Die Unterschiede entsprachen dem prognostizierten Klimawandel für den Standort Wüstebach. In den versetzten Lysimetern kam es zur Veränderung der Wasserhaushaltskomponenten. Durch die geringeren Niederschläge und der höheren Temperatur in Selhausen lag der Anteil der Evapotranspiration am gesamten Wasserhaushalt bei ca. 40 %, entsprechend dem Doppelten des Standortes Wüstebach. Die geringeren Niederschlagsmengen resultierten eine um ca. 10 % geringere Perkolatmenge, dies entsprach $\frac{1}{3}$ der Versickerungsrate des Referenzstandortes. Durch das geringere Wasserdargebot im Boden des Lysimeters kam es zu stärkerem kapillarem Aufstieg im Boden und dadurch verursachter Rückführung des Perkolats aus dem Vorratstank in die Lysimeter. Somit wurde Nitrat-Stickstoff auch aufwärtsgerichtet transportiert. Die durch den Transfer veränderten Klimaparameter hatten zur Folge, dass sich die mobilen Stickstoffkonzentrationen in den untersuchten Bodentiefen wesentlich erhöhten und es zu deutlich größeren Nitratauswaschungen kam. Dieser Effekt des Klimawandels trat vier Jahre nach Versuchsbeginn (Dezember 2010) ein.

Schlagwörter: DOC, Nitrat, Klimawandel, Grünland, Perkolat

Einleitung

Durch menschliches Handeln werden unsere Biogeosysteme nachhaltig verändert (Klotz 2005). Der Anstieg klimarelevanter Spurengase und Veränderung der Regen- und Trockenperioden sowie der Niederschlagsintensität bedingen in Summe eine globale Erwärmung um 1,8 - 4,0 °C der langjährigen Durchschnittstemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Das Klima mit seinen Einflussgrößen Strahlungsintensität, Niederschlag, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Art und Stärke der Bewölkung, Windrichtung und Windstärke ist maßgebend für das Wasserdargebot im

Boden und die vorherrschenden Verwitterungsprozesse. Infolgedessen wird es durch den Klimawandel zu Veränderungen der organischen Substanz, der Mineralisation und dem Nährstoffkreislauf kommen. Die Wirkung des Klimawandels auf die Elemente Kohlenstoff und Stickstoff ist erheblich (Gutiñas et al. 2012). Stickstoff als ein wesentlicher Pflanzennährstoff kann in Abhängigkeit seiner Verfügbarkeit den Kohlenstoff-Haushalt limitieren oder fördern (Stocker et al. 2013).

Der ausgewählte Waldwiesenstandort im Nationalpark Eifel liegt im Wassereinzugsgebiet der Rur. Das Ziel des Nationalparks ist der Erhalt des natürlichen Zustandes, somit ist das Gebiet besonders interessant für die Grundwasserneubildung und zukünftige klimainduzierte Nitratauswaschung. In den Mittelgebirgsregionen in Mitteleuropa, zu denen auch die Eifel gehört, werden häufigere Frostwechselperioden im Winter und längere Trockenperioden im Sommer mit nachfolgenden Starkregenereignissen erwartet (Solomon et al. 2007).

Um die Umweltproblematik des Stickstoffs unter Einfluss des vorhergesagten Klimawandels abzuschätzen, wurde ein Lysimeterversuch nach dem „Space-for-Time“-Konzept für einen Waldwiesenstandort durchgeführt (Pütz et al. 2016). In dem Lysimeterversuch wird der Einfluss des Klimawandels auf den Stickstoffhaushalt und den Wasserhaushalt einer Waldwiese untersucht werden.

Material und Methodik

Lysimeternetzwerk

Im Dezember 2010 begann der Routinebetrieb der SOIL-Can Lysimeter. Die technischen Details der monolithisch befüllten Lysimeter und Informationen zum SOILCan Lysimeternetzwerk sind in Pütz et al. (2016) zusammengestellt.

In vier Regionen Deutschlands, die negativ vom Klimawandel betroffen sein werden, wurden Lysimeter nicht nur an ihrer ursprünglichen Entnahmestelle installiert, sondern auch an mehreren Standorten mit trockeneren und wärmeren Wetterbedingungen im Vergleich zur Entnahmestelle. Dies simuliert die zukünftigen klimatischen Bedingungen nach dem Prinzip „Space-for-Time“ (Pütz et al. 2013). Dieser Ansatz wurde bereits zur Untersuchung des Klimaeinflusses auf Nährstoffkreisläufe, Pflanzensukzession und Mineralisierungsprozesse eingesetzt (Blois et al. 2013). Zur Untersuchung des Stickstoffhaushaltes eines Waldwiesenstandortes wurden neun Lysimeter des TERENO-Observatoriums Eifel/Niederrheinische Bucht ausgewählt. Sechs Lysimeter

¹ Institut für Bio- und Geowissenschaften (IBG): Agrosphäre - IBG-3, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 JÜLICH

* Ansprechpartner: Dr. Thomas Pütz, t.puetz@fz-juelich.de



befanden sich am Ursprungsort Wüstebach im Nationalpark Eifel und drei wurden an den Standort Selhausen in der Jülicher Börde versetzt.

Gewinnung der Bodenlösung und Perkolat

Die stoffliche Zusammensetzung der Bodenlösung und des Perkolats wurde durch die Beprobung mit Saugkerzen in 10 cm, 30 cm, 50 cm und dem Saugrechen in 140 cm Bodentiefe möglich. Zur Gewinnung der Bodenlösung wurde eine konstante Saugspannung von 100 hPa angelegt und die Bodenlösung in Duran-Flaschen gesammelt. Die Steuerung der unteren Randbedingung der Lysimeter erfolgte über das gemessene Matrixpotential im Bereich des Saugrechens und in der vergleichbaren Tiefe des ungestörten Bodens im Umfeld des jeweiligen Lysimeterhexagons. Bidirektionale Pumpen förderten das Perkolat in den Tank bzw. pumpten es aus dem Perkolattank zurück in das Lysimeter. Somit entsprach das Matrixpotential im Lysimeter dem Potential im ungestörten umgebenden Feld. Die Perkolatliquote wurden im Zustrom des jeweiligen Perkolattanks genommen und in 2 L Duran-Flasche aufgefangen. Die Probennahmen erfolgten alle 14 Tage, falls ein Probenvolumen von 100 mL vorhanden war. Weitere Details sind bei Pütz et al. (2016) erklärt.

Bodenrespiration

Seit September 2013 wurde die Bodenrespiration von jeweils zwei Lysimetern eines Standortes gemessen. Die Messungen fanden im 14-tägigen Rhythmus bzw. in den wärmeren Monaten wöchentlich statt. Das Messfenster lag morgens zwischen 09:00 - 12:00 Uhr, da zu dieser Zeit die Bodentemperaturen ungefähr dem Tagesmittelwert entsprachen und damit die Messwerte der N₂O-Emissionen in etwa dem Tagesmittelwert entsprachen (Collier et al. 2014, Reeves et al. 2016). Zur Messung wurden zylindrische Kammern auf die Lysimeter gesetzt. Die verwendeten Kammern waren am Boden offen und schlossen mit einem Dichtungsring das Lysimeter gasdicht zur Atmosphäre ab. Bei höherem Pflanzenbewuchs wurden Distanzstücke eingesetzt. Mit Hilfe eines Ventilators wurde die Kammerluft gemischt. Zur Probenahme wurden mit einer Spritze über eine mit einem Septum verschlossene Öffnung im Deckel jeweils 30 mL Luftproben nach 2 min, 12 min, 22 min und 32 min entnommen. Die Gasproben wurden in evakuierte Glasfläschchen überführt und im Gaschromatographen (GC) analysiert.

Depositionssammler

Zur Erfassung der über den atmosphärischen Pfad in die Lysimeter eingetragenen Stoffe und Stoffmengen wurden Depositionssammler (ecoTech GmbH, Bonn) eingesetzt, der zwischen Gesamtdeposition- (DT) und Nassdeposition (DW) differenzierte. Der Nassdepositionssammler wurde mit einer sensorgesteuerten Abdeckung bei Beginn des Niederschlags geöffnet und nach dem Ende wieder verschlossen. Die Sammler waren jeweils temperiert, um auch Graupel und Schnee, etc. zu erfassen. Die aufgefangenen Niederschlagsproben wurden in eine gekühlte Duran-Glasflasche überführt. Das Niederschlagswasser wurde wöchentlich beprobt. Die Depositionssammler in Wüstebach waren nicht direkt neben der Lysimeterstation, sondern ca.

3,5 km entfernt aufgestellt. In Selhausen befanden sich die Depositionssammler neben der Lysimeteranlage.

Klimastation

Neben den Lysimeterstationen erfasste jeweils eine meteorologische Station die lokalen Wetterereignisse. Die Klimastationen umfassten einen Meteo-Multisensor (WXT520, Vaisala Inc.) zur Messung der Windgeschwindigkeit und -richtung, der Lufttemperatur und der Luftfeuchte sowie des Niederschlags.

Datenaufbereitung

Die Wägedaten der Lysimeter wurden in drei Schritten aufbereitet, um aus den sensiblen, hochfrequenten Gewichtsmessungen Tageswerte des Niederschlags und der Evapotranspiration zu ermitteln. Messfehler waren bedingt durch starke Winde, Starkregenereignissen, Tiere, Stromausfällen und durch die Probenahme. Zunächst wurden aus den Daten manuell Ausreißer herausgefiltert und dann mit dem Glättungsfilter AWAT (Adaptive Window and Adaptive Threshold filter) (Peters et al. 2014, Peters et al. 2016) auf einer minutlichen Basis mit einer Durchschnitzeit von 1 – 61 min mit minimalen und maximalen Schwellenwerten von 0,012 kg beziehungsweise 3,5 kg gefiltert. Die adaptiven Schwellenwerte lagen unter dem Minimum- und über dem Maximalwert der Auflösung der Lysimeterwaage. Die limitierenden Schwellenwerte sollten sicherstellen, dass Gewichtserfassung kleiner der Gewichtsauflösung und hohe Messsignale durch Wettereinflüsse eliminiert wurden. Dann erst wurden die täglichen Flüsse aus den Minutenwerten berechnet (Groh et al. 2015).

Standorte

Die beiden Versuchsstandorte Wüstebach und Selhausen liegen im TERENO-Observatorium Eifel/Niederrheinische Bucht, dass das Rur-Wassereinzugsgebiet mit einer Fläche von 2354 km² (Bogena et al. 2015). Der Waldwiesenstandort wird nicht bewirtschaftet.

Versuchsstandorte

Der naturbelassene Waldwiesenstandort Wüstebach befindet sich im Nationalpark Eifel in der Nähe von Monschau an der belgischen Grenze. Auf diesem Standort wächst ein etwa 65-Jahre alter Fichtenwald (*Picea abies*) (Bogena et al. 2015, TERENO 2011). Die sechs Lysimeter befinden sich auf einer Lichtung in 630 m üNN. Der Lysimeterbewuchs setzte sich aus Farnen, Moosen, Gräsern und Wurzelfilz mit sehr unterschiedlichen Anteilen zusammen (Pätzold & Pütz 2010). Der Jahresmittelwert der Lufttemperatur (1979-1999) beträgt 7,5 °C und der des Niederschlags (1979-1999) 1200 mm (Pütz et al. 2011). Das Klima ist gemäßigt maritim (Bogena et al. 2015).

Die Merkmale der Braunerde dominieren, dennoch sind Anzeichen von Podsolierung und Pseudovergleyung vorhanden. Der niedrige pH-Wert und das Ausgangssubstrat weisen auf eine mäßig nährstoffreiche (mesotrophe) Braunerde hin (*Tabelle 1*). Dies spiegelt sich in der Humusform mullartiger Moder und in der mäßigen bis hohen Humusqualität (C/N-Verhältnis) im Oberboden wieder (Pätzold & Pütz 2010).

Tabelle 1: Horizonte und Eigenschaften des Bodens Wüstebach (Pätzold & Pütz 2010) der versetzten Lysimeter.

Tiefe (cm)	Horizont	S	Textur d. Feinbodens			pH CaCl ₂	C _{org} %	N _t %	C/N Humus- qualität	KAK mmol _c /100g
			U %	T	Bodenart					
2-0	Of, Oh									
0-8	Ah, Aeh	35	26	41	Lts	4,3 stark sauer	5,66 h4	0,46	12 hoch	33 extrem hoch
8-15	Sew-Ah	46	21	33	Lts	4,6 stark sauer	3,23 h4	0,18	18 mittel	19 hoch
15-31	sSsw-Bv	47	19	34	Lts	4,7 mäßig sauer	2,61 h3	0,21		17 hoch
31-59	II Bv1	22	70	9	Ut3	4,8 mäßig sauer	1,47 h3	0,20		16 hoch
59-95	II Bv2	23	71	6	Ut2	4,7 mäßig sauer	0,74 h2	0,11		12 mittel-hoch
95-110	II Bv3	23	68	9	Ut3	4,6 stark sauer	0,70 h2	0,08		10 mittel
110-150	III Cv	65	17	18	Ls4	4,6 stark sauer	0,47 h1	0,07		8 gering-mittel

Der Standort Selhausen liegt im nördlichen Teil der Niederrheinischen Bördelandschaft auf 104 m üNN. Das Klima ist gemäßigt maritim mit einem Jahresmittel der Lufttemperatur (1979-1999) von 10 °C und des Niederschlages von 720 mm (Bogena et al. 2015). Dieser Standort war also trockener und wärmer als der Ausgangsstandort Wüstebach. Auf diesem Standort wurden drei Lysimeter aus Wüstebach installiert.

Analytik

Aufgrund der unterschiedlichen Bestimmungsmethoden und Nachweisgrenzen für N_p, NO₃⁻ und NH₄⁺, sowie Messfehlern wurden bei der Bilanzierung negative Werte für den Reststickstoff gleich Null gesetzt. Der Reststickstoff des Depositionssammlers wurde aus der Differenz von N_p, NO₃⁻ und NH₄⁺ berechnet, bei der Bodenlösung der Saugkerzen und des Perkolats aus N_t und NO₃⁻.

In den Bodenlösungs-, Niederschlags- und Perkolatproben wurden die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert gemessen. Aliquote der wässrigen Proben wurden über einen 0,45 µm Filter (Sartorius, SM 165 11) filtriert und danach in einem Kohlenstoff-Stickstoff-Analysator (Shimadzu TOC-VCPH) der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) und der Gesamtstickstoff (N_t) analysiert. Die Nachweisgrenze von N_t liegt bei 0,02 mg L⁻¹. Die NO₃⁻-Bestimmung erfolgt mittels Ionenchromatographie (Dionex, ICS-4000) mit einer Nachweisgrenze von 0,03 mg L⁻¹. Ammonium (NH₄⁺) wurde mittels Massenspektrometrie mit induktivgekoppelter Plasmaionisation (ICP-MS) (Perkin-Elmer SCIEX - ELAN 6000) mit einer Nachweisgrenze von 0,06 mg L⁻¹ analysiert.

Die Gasproben der Kammermessung wurden mit einem Headspace-Gaschromatograph (HS-GC) mit Backflush analysiert. Ein Elektroneneinfangdetektor (ECD) diente zum Nachweis von N₂O bei einer angegebenen Nachweisgrenze von 50 ppb N₂O.

Bilanzierung

Wasserbilanz

Die Wasserbilanz eines wägbaren Lysimeters setzte sich aus dem Niederschlag (P), der Evapotranspiration (ET), dem Perkolat (S), den Saugkerzenproben in 10 cm (SK10),

30 cm (SK30) und 50 cm (SK50) Bodentiefe und der Änderung des Wasserspeichers im Boden (ΔWS) zusammen. Über die Erfassung der Lysimetergewichte und der Perkolatgewichtete konnten die vertikalen Zu- und Abflüsse wie Niederschlag, Perkolatmenge, kapillarer Aufstieg, simuliert durch Zurückpumpen aus dem Perkolattank in das Lysimeter und Evapotranspiration ermittelt werden. Die *Abbildung 1* zeigt die einzelnen Größen der Wasserbilanz eines Lysimeters. Über die Saugkerzen wurden kontinuierlich Bodenwasserproben entnommen. Diese wässrigen Proben wurden in Glasflaschen alle 14 Tage und analysiert. Die Wasserbilanz wurde um diese Entnahmen korrigiert, da dies sonst als Verdunstung erfasst würde. Der Wasserfluss in niederschlagsarmen Perioden kann aufwärtsgerichtet sein. Dem zu Folge konnte der Zahlenwert für das Perkolat S auch positiv sein. Die Änderung des Wasserspeichers wurde berechnet nach (mit SK=Summe aller Sk, i= Tiefenstufen):

$$\Delta WS = P - (ET_o - SK) - S \quad \text{Formel 1}$$

Stickstoffbilanz

Die N-Flüsse im Boden des Waldwiesenstandortes bestanden aus N-Zufuhr und N-Austrag (*Abbildung 1*). In das System wurde über die Deposition N in den Boden eingebracht. Die Konzentration der Gesamtdosition (DT) wurde mit einem offenen Depositionssammler und die Nassdeposition (DW) mit einem Depositionssammler mit sensorgesteuerten Deckel erfasst. Die Ermittlung der N₂O-N-Emissionen und -Aufnahme erfolgte mit der Kammerbeprobung. Über die Saugkerzen wurde N aus dem System entnommen. Dieser wurde dem Stickstoffspeicher hinzugerechnet. Da es durch den kapillaren Aufstieg zu einem Rückfluss des Perkolats mit der entsprechenden N-Fracht in das Lysimeter kam, wurde NA positiv. Aus den N-Frachten wurde die Änderung des Stickstoffspeichers berechnet:

$$\Delta NS = DW + DD - V - NSK - NA \quad \text{Formel 2}$$

Die Stickstofffracht der Nassdeposition berechnet sich aus der gemessenen Konzentration der Niederschlagsproben und der täglichen Niederschlagsmenge. Die Stickstoffkonzentrationen des gesammelten Niederschlagswassers wurden als Mischprobe einmal wöchentlich bestimmt. Diese Konzentration wird für diese Woche als Tageswert angenommen und mit dem entsprechenden Tageswert von

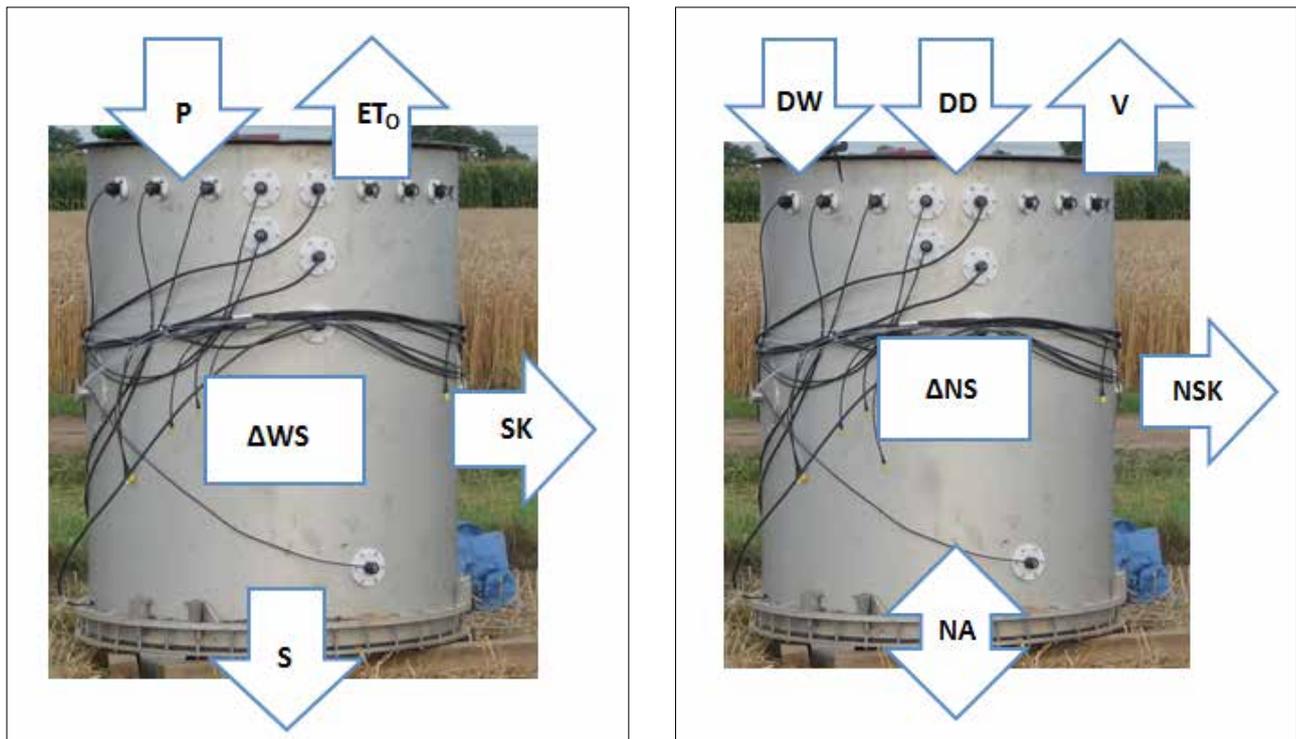


Abbildung 1: Glieder der Wasserbilanz (links) und der N-Bilanz mit den einzelnen N-Frachten (rechts) eines Lysimeters. P = Niederschlag; ET_0 = Evapotranspiration vor der Korrektur; ET = Evapotranspiration korrigiert; S = Perkolat; SK = Summe der Saugkerzenproben in 10, 30 und 50 cm; ΔWS = Änderung des Wasserspeichers im Boden; DW = Stickstoffdeposition, nass; DD = Stickstoffdeposition, trocken; V = Volatilisation; NSK = Summe der Saugkerzenproben; NA = Stickstoffaustrag bzw. -eintrag; ΔNS = Änderung des Stickstoffspeichers im Boden.

Tabelle 2: Jahresmittelwerte des Niederschlags, der Lufttemperatur, der Nettostrahlung und der Bodentemperatur sowie der -feuchte in den Tiefen 10 cm, 30 cm und 50 cm in Wüstebach für 2013 und 2014.

Wüstebach	Nieder- schlag [mm]	Luft- temperatur [°C]	Netto- strahlung [W m ⁻²]	Bodentemperatur [°C]				Bodenfeuchte [%]		
				10 cm	30 cm	50 cm	140 cm	10 cm	30 cm	50 cm
2013	996,0	6,5	33,1	9,3	8,4	8,7	8,0	36,4	35,1	29,7
2014	1218,0	8,4	34,5	6,0	9,6	9,6	9,0	k. A.	k. A.	k. A.

P multipliziert. Die Klimadaten Temperatur, Nettostrahlung, Bodentemperatur und -feuchte werden zunächst manuell geflaggt. Danach wurde die Plausibilität der Werte mit Minimal- und Maximalwerten geprüft. Jede Probenahme bestand aus vier Gasproben pro Lysimeter, die aus den statischen Kammern genommen wurden und mit der HMR-Methode in Halbstundenflüsse umgerechnet wurden (Pedersen et al. 2010). Da die Messungen nur 30 Minuten eines Tages repräsentierten, wurde dieser Wert als Tageswert angenommen (Collier et al. 2014).

Ergebnisse

Wetterverlauf für 2013/2014

Die am Standort Wüstebach für 2013 und 2014 ermittelte Niederschlagsmenge, Lufttemperatur, Nettostrahlung, Bodentemperatur und Bodenfeuchte sind in der Tabelle 2 und für den Standort Selhausen in der Tabelle 3 zusammengestellt. Die Bodentemperatur der Jahre 2013/14 war im Mittel in Selhausen höher als am Standort Wüstebach und zwar

2013 um 3,5 °C und 2014 um 3,3 °C (Tabelle 2 und Tabelle 3). In beiden Jahren war der Niederschlag in Selhausen um ca. 295 mm (2013) bzw. 391 mm (2014) geringer als am Herkunftsstandort.

Wasserbilanz der beiden Versuchsstandorte

Wüstebach

Der Niederschlag machte in beiden Jahren etwa 50 % der Wasserbilanz der Lysimeter aus und die ET entsprach 2013 knapp 20 % und 2014 16 %. Trotz der höheren Temperaturen im Jahr 2014 wurde aufgrund der häufigeren Niederschlagsereignisse (Annahme: keine Verdunstung bei Niederschlag) weniger Wasser verdunstet als 2013 (Abbildung 2). Dies äußerte sich in einem durchgehend abwärts gerichteten Wasserfluss. S entsprach mehr als 30 % der Wasserbilanz. Ein geringerer P und höhere ET im Jahr 2013 bedingten einen geringeren Bodenwassergehalt, somit in weniger S und einen negativen Wasserspeicher von -135,6 mm (Tabelle 4). 2014 kam es zu einer Zunahme des Wasserspeichers um

Tabelle 3: Jahresmittelwerte des Niederschlags, der Lufttemperatur, der Nettostrahlung und der Bodentemperatur sowie der -feuchte in den Tiefen 10 cm, 30 cm und 50 cm in Selhausen für 2013 und 2014.

Selhausen	Niederschlag [mm]	Lufttemperatur [°C]	Nettostrahlung [W m ⁻²]	Bodentemperatur [°C] in				Bodenfeuchte [%] in		
				10 cm	30 cm	50 cm	140 cm	10 cm	30 cm	50 cm
2013	700,1	10,0	46,1	11,0	11,3	11,3	10,8	25,2	30,2	32,4
2014	826,7	11,7	50,2	11,4	12,6	12,5	11,9	26,0	30,8	33,0

Tabelle 4: Übersicht der gemittelten Jahresmengen und Standardabweichungen der Wasserbilanzglieder für 2013 und 2014 in Wüstabach.

Wüstabach	Niederschlag P [mm]		Evapotranspiration ET [mm]		Saugkerzenproben SK [mm]		Perkolat S [mm]		Änderung des Wasserspeichers im Boden Δ WS [mm]	
		\pm		\pm		\pm		\pm		\pm
2013	996,0	$\pm 5,2$	-427,5	$\pm 31,3$	-17,3	$\pm 8,6$	-704,1	$\pm 30,8$	-135,6	$\pm 24,4$
2014	1218,0	$\pm 17,0$	-379,3	$\pm 28,8$	-23,5	$\pm 7,3$	-804,7	$\pm 37,2$	33,9	$\pm 11,0$

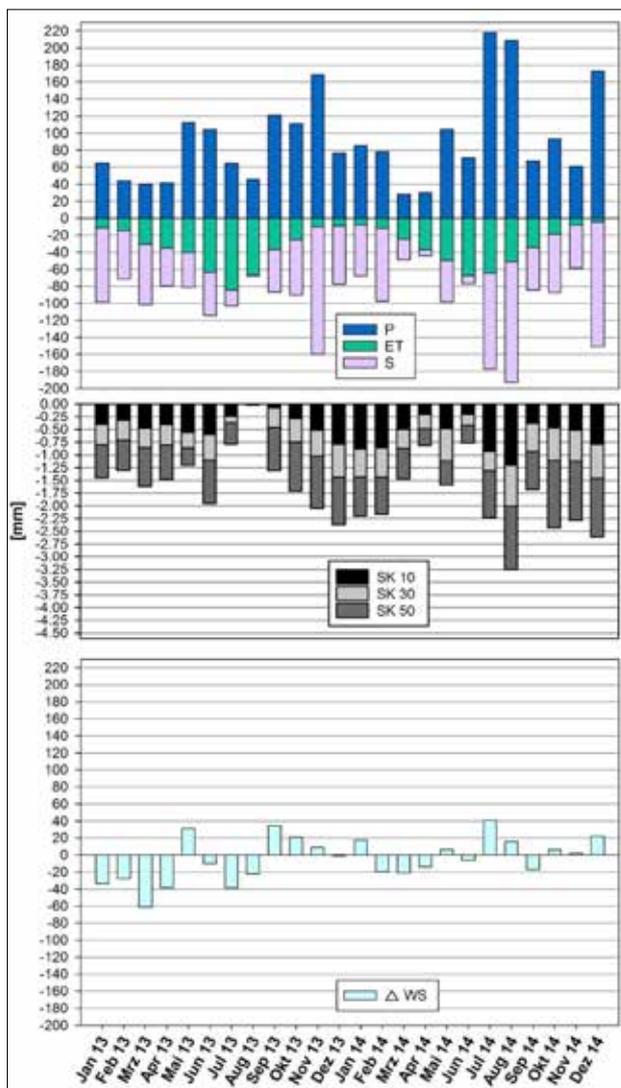


Abbildung 2: Monatsmittelwerte der Wasserflüsse, der Saugkerzenprobenvolumina und der Änderung des Wasserspeichers in Wüstabach für 2013 und 2014 (Mittelwerte für sechs Lysimeter).

33,9 mm. Bei der Betrachtung der monatlichen Bilanz ist ersichtlich, dass lediglich in den Monaten Juli und August des Jahres 2013 ET größer war als P. Noch im Juli 2013 erfolgte noch ein Austrag (S) des im Boden gespeicherten Wassers und kam dann im August mit 1,8 mm fast zum Stillstand. Die gesamte entnommene Bodenlösung mittels Saugkerzen (SK) beläuft sich auf 0,8 % in 2013 und 1,0 % in 2014 von der Summe aus P, ET, SK und S (Tabelle 4).

Die Wasserbilanzen der verschiedenen Lysimeter in Wüstabach weisen nur geringfügige Unterschiede auf. Die prozentuale Standardabweichung von P belief sich 2013 (2014) auf 0,5 % (1,4 %), der ET auf 7,3 % (7,6 %) und des S auf 4,4 % (4,6 %). Die Δ WS hat 2013 mit 18,0 % und vor allem 2014 mit 32,4 % eine hohe Standardabweichung.

Die gewonnenen Probenvolumina der Saugkerzen wiesen eine hohe Variabilität auf. In den Monaten Juli bis einschließlich Oktober 2013 und Juni 2014 wurden fast keine Proben gewonnen.

Die Änderungen des Wasserspeichers waren in den sechs Lysimetern vom Verlauf annähernd gleich. Dennoch hat Δ WS im Vergleich zu den restlichen Bilanzgliedern die größte relative Standardabweichung mit 2013 (2014) 18 % (32,4 %), entsprechend 24,4 mm (11,0 mm).

Selhausen

In Selhausen entsprach P etwa 50 %, ET etwa 40 % und S weniger als 10 % der Wasserbilanz (Summe aus P, ET, SK und S). In der monatlichen Betrachtung der Wasserbilanz (Abbildung 3) ist die temperaturabhängige Evapotranspiration in den Monaten April und Juni bis August 2013 größer als das Niederschlagsvolumen. In den Monaten Mai und August 2013 erfolgte der aufwärtsgerichteten Wasserfluss auch aus dem Tank zurück in das Lysimeter. In den Monaten März, April, Juni und September im Jahr 2014 war ET größer als P. Durch den regnerischen Sommer war der Boden gesättigt und es fand nur ein kapillarer Wasseraufstieg in den Monaten Mai und Dezember 2014 statt (Tabelle 5). Im Jahr 2013 betrug Δ WS -55,1 mm. Im Folgejahr war Δ WS mit 62,9 mm positiv. Die gesamte entnommene Bodenlösung mittels Saugkerzen belief sich auf 0,2 % in 2013 und 0,6 % in 2014 der Summe aus P, ET, SK und S. Erst ab Dezember

Tabelle 5: Übersicht der gemittelten Jahresmengen und Standardabweichungen der Wasserbilanzglieder für 2013 und 2014 in Selhausen.

Selhausen	P [mm]	ET [mm]	SK [mm]	S [mm]	ΔWS [mm]
2013	700,1 ± 22,6	-612,5 ± 38,4	-3,0 ± 2,0	-143,3 ± 79,0	-55,1 ± 24,0
2014	826,7 ± 29,2	-632,6 ± 31,4	-9,5 ± 3,5	-131,2 ± 21,9	62,9 ± 4,4

Tabelle 6: Übersicht der gemittelten Jahresmengen und Standardabweichungen der N-Frachten für 2013 und 2014 in Wüstebach (DD lag deutlich unter 0,01 kg N ha⁻¹ und wurde folglich nicht angegeben).

Wüstebach	DW [kg N ha ⁻¹]	V (N-N ₂ O) [kg N ha ⁻¹]	NSK [kg N ha ⁻¹]	NA [kg N ha ⁻¹]	ΔNS [kg N ha ⁻¹]
2013	9,0 ± 0,1	k. A. k. A.	-0,04 ± 0,02	-2,1 ± 0,4	6,9 ± 0,3
2014	10,1 ± 0,3	-0,20 k. A.	-0,04 ± 0,01	-2,3 ± 0,4	7,6 ± 0,5

2013 konnten größere Saugkerzenproben gewonnen werden und ab Juli 2014 gab es aufgrund der hohen Niederschlagsereignisse größere Probenvolumina.

Beim Vergleich der drei Lysimeter unterschieden sie sich vor allem in der Höhe der Sickerwassermenge. Die prozentuale Standardabweichung entsprach 2013 (2014) für P 3,2 % (3,5 %), ET 6,3 % (5,0 %), S 55,2 % (16,7%) und für ΔWS 43,5 % (7,0 %).

Stickstoffbilanz der beiden Versuchsstandorte

Wüstebach

Die Stickstoffbilanz setzt sich aus der Nassdeposition (DW), der Volatilisation (V), dem Stickstoffaustrag bzw. -eintrag aus dem Bodenvorrat (NA), den Saugkerzenproben (NSK) und der Änderung des Stickstoffspeichers (ΔNS) zusammen. Am Standort Wüstebach wurden die Stickstoffbilanzen aus den Ergebnissen von sechs Lysimetern berechnet (Tabelle 6). Da erst seit September 2013 Kammermessungen erfolgten, wurde kein Mittelwert für 2013 errechnet. Hierzu wurden keine Standardabweichungen angegeben, da die Bodengasemissionen nur auf drei Lysimetern gemessen wurden. Die N-Verteilung auf die verschiedenen Fraktionen DW, NSK, NA und ΔNS war in den zwei Jahren weitestgehend gleich. Im Jahr 2013 entsprach DW etwa 81 % und NA 19 % der Summe aus DW, NA, V und NSK. 2014 waren es für DW 80 %, für NA 18 % und für V 2 %. Die Änderung des Stickstoffspeichers war in beiden Jahren positiv. So kam es zu einer Zunahme von 6,9 kg N ha⁻¹ 2013 und im nächsten Jahr von 7,6 kg N ha⁻¹.

In Wüstebach wurde die N-Zufuhr über die Nassdeposition nicht nur von der Niederschlagsmenge bestimmt, sondern auch von der DW-Konzentration. So fielen 2013 die höchsten Stickstofffrachten DW in Mai und Juli an. Im Gegensatz dazu traten die größten Niederschlagsmengen im September und November auf, April und Juli waren die Monate mit den größten N_t-Konzentrationen. Im Jahr 2014 gab es die maximalen Nassdepositionsfrachten und Niederschlagsvolumen im Juli und August, die Stickstoffkonzentration der Deposition war hingegen in den Monaten März und April am höchsten. Die Mengen des im Boden gespeicherten Stickstoffs nahmen während des Betrachtungszeitraumes durchgehend zu, da im Jahr 2013 auf die Lysimeter 900 mg N eingetragen wurden und 1000 mg N in 2014.

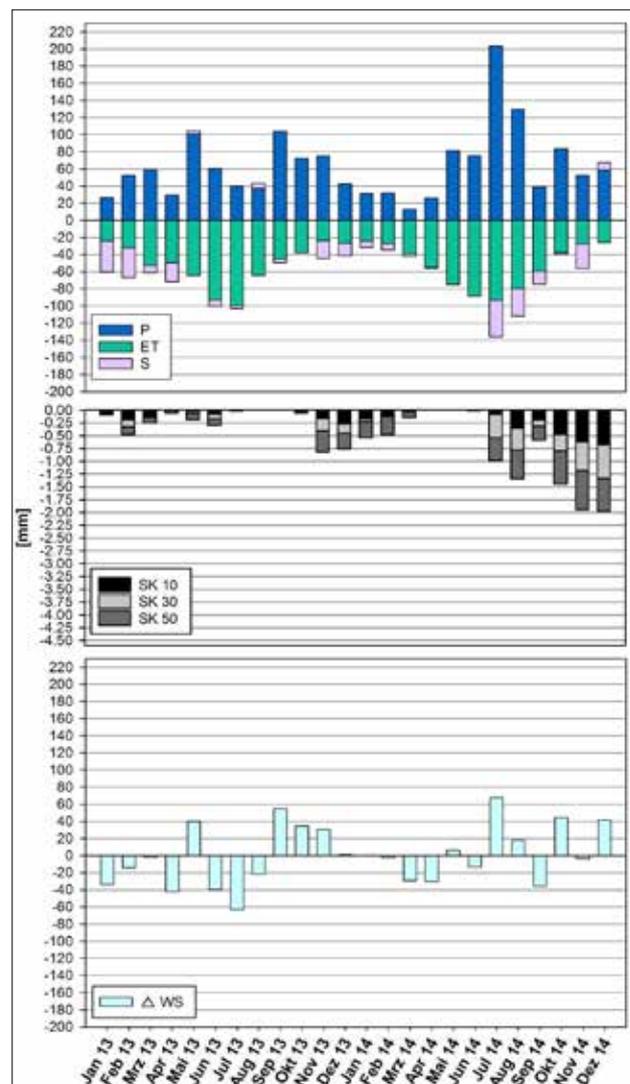


Abbildung 3: Monatsmittelwerte der Wasserflüsse, der Saugkerzenprobenvolumina und der Änderung des Wasserspeichers in Selhausen für 2013 und 2014 (Mittelwerte von drei Lysimetern).

In *Abbildung 4* wird der geringe Anteil der volatilisierten N-Menge im Verhältnis zu den restlichen Bilanzgliedern deutlich. Die Nassdeposition in Wüstebach setzte sich zu

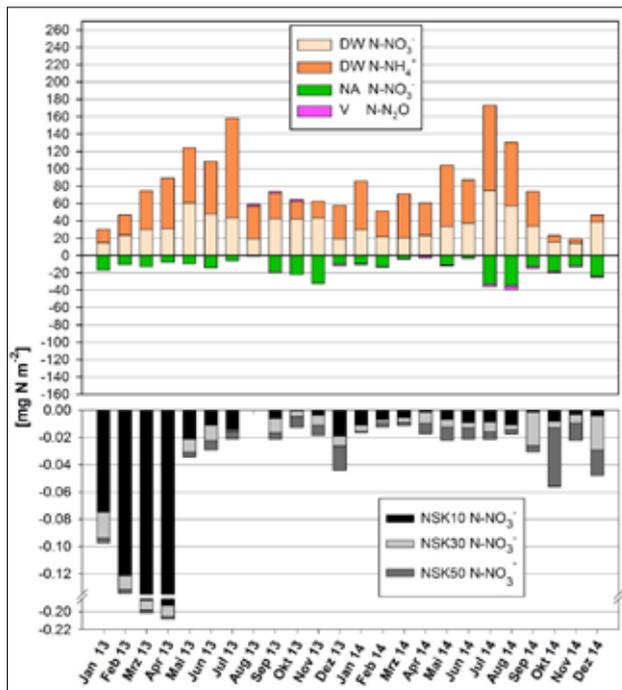


Abbildung 4: Verlauf der N-Frachten am oberen und unteren Rand und der N-Frachten in Saugkerzenproben unter besonderer Berücksichtigung der NO_3^- -N-, NH_4^+ -N- und N_2O -N-Fractionen der sechs Lysimeter in *Wüstebach* für 2013 und 2014.

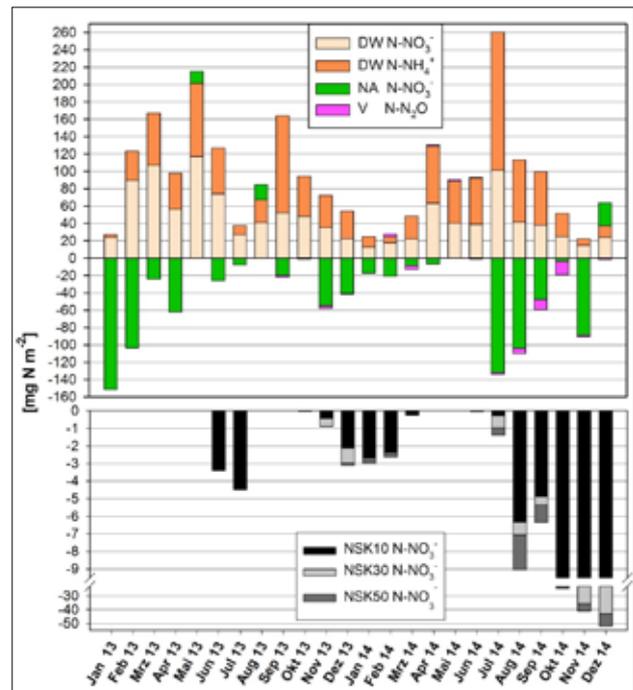


Abbildung 5: Verlauf der N-Frachten am oberen und unteren Rand und der N-Frachten in Saugkerzenproben unter besonderer Berücksichtigung der NO_3^- -N-, NH_4^+ -N- und N_2O -N-Fractionen der drei *Wüstebach*-Lysimeter in *Selhausen* für 2013 und 2014.

je 50 % aus NO_3^- -N und NH_4^+ -N zusammen. Vor allem die NH_4^+ -N-Konzentration stieg jeweils zur Jahresmitte an.

Die mit den Saugkerzen in 10 cm Bodentiefe entnommene Stickstoffmenge unterlag den größten Schwankungen. Der Anteil der Saugkerzenproben lag bei weniger als 0,4 % der Summe DW, NSK, NA und ΔNS in beiden Jahren. Die N-Konzentrationen der Bodenlösungen in den Tiefen 10 bis 50 cm waren größtenteils kleiner als $0,1 \text{ mg N L}^{-1}$. Nur in den Monaten Januar bis April 2013 stiegen die NO_3^- -N-Konzentrationen in der Bodenlösung aus 10 cm Tiefe auf über $1,0 \text{ mg N L}^{-1}$ an. Die Bodenlösungen in 10 cm, 30 cm, 50 cm und das Sickerwasser aus 140 cm bestanden hauptsächlich aus NO_3^- -N. Die NH_4^+ -N-Menge in der Bodenlösung lag unterhalb der Nachweisgrenze (Abbildung 4).

Bei allen Lysimetern wurden höhere Stickstoffkonzentrationen in NA ermittelt nach Perioden mit geringeren Niederschlägen. Die Sickerwässer aus 140 cm der Lysimeter wiesen N-Konzentrationen mit einem Mittelwert von $0,35 \text{ mg N L}^{-1}$ ($0,30 \text{ mg N L}^{-1}$) im Jahr 2013 (2014) auf, die überwiegend höher waren als in den darüber liegenden Tiefen. Die N-Konzentrationen in 140 cm hatten in allen Lysimetern einen ähnlichen Verlauf. In den beiden Versuchsjahren wurde kein Stickstoff in den Bodenkörper durch Kapillaraufstieg zurückgeführt. Im Mittel der beiden Versuchsjahre wurden jeweils 200 mg N aus den Lysimetern ausgetragen.

Selhausen

Für Selhausen wurden die Stickstoffbilanzen aus den Ergebnissen von drei versetzten Lysimetern des Standortes *Wüstebach* berechnet. In Tabelle 7 sind die gemittelten Stickstoffmengen der Bilanzglieder mit den jeweiligen Standardabweichungen am Standort Selhausen zusammengestellt. Da erst seit September 2013 Kammermessungen erfolgten, wurde kein Mittelwert für 2013 bestimmt. Die Kammermessungen fanden nur auf zwei Lysimetern statt. In den beiden untersuchten Jahren wurde nur für NSK ein wesentlicher Unterschied der Stickstoffmengen beobachtet. Im Jahr 2013 entsprach DW etwa 73 % und NA 27% der Summe aus DW, NA, V und NSK. Im nächsten Jahr war es für DW 65 %, für NA 25 % und für V 2 %. Die Bodenlösungen hatten einen Anteil von 0,3 % im Jahr 2013 und 8 % für 2014. Die Änderung des Stickstoffspeichers war in beiden Jahren positiv. 2013 stieg der N-Gehalt des Stickstoffspeichers um $7,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ und 2014 um weitere $7,0 \text{ kg N ha}^{-1}$.

Die DW-Konzentrationen lagen in den beiden Jahren, mit Ausnahme auf Juli 2013, unter $3,0 \text{ mg N L}^{-1}$. Die durch die Nassdeposition eingetragene Stickstoffmenge war im Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge. Die Nassdeposition in Selhausen bestand im Mittel aus 54 % NO_3^- -N und 46 % NH_4^+ -N, wobei die Zusammensetzung im Beobachtungszeitraum variierte. Der NO_3^- -N-Anteil überwog im ersten

Tabelle 7: Übersicht der gemittelten Jahresmengen und Standardabweichungen der N-Frachten für 2013 und 2014 in *Selhausen*.

Selhausen	DW		V (N_2O -N)		NSK		NA		ΔNS	
	[kg N ha ⁻¹]		[kg N ha ⁻¹]		[kg N ha ⁻¹]		[kg N ha ⁻¹]		[kg N ha ⁻¹]	
2013	12,0	± 0,3	k. A.	k. A.	- 0,04	± 0,05	- 4,4	± 3,0	7,7	± 3,0
2014	10,1	± 0,4	- 0,34	k. A.	- 1,3	± 1,3	- 4,0	± 2,4	7,0	± 1,8

Untersuchungsjahr bis August sowie im Februar, November und Dezember 2014 (*Abbildung 5*). In den Monaten Oktober und November 2013 sowie Januar, April und Oktober 2014 war die Verteilung ausgeglichen. In den restlichen Monaten überwog der NH_4^+ -N-Anteil. Der Stickstoffspeicher des Bodens nahm während des Betrachtungszeitraumes zu, da im Jahr 2013 auf die Lysimeter 1,2 g N über den Luftpfad eingetragen wurden und 1,01 g N in 2014.

Im ersten Untersuchungsjahr erfolgte die Bodengasmessung erst ab Anfang August. Im August 2013 war die Stickstofffracht durch den Bodengasaustausch mit der Atmosphäre positiv (=Eintrag). Ab September bis zum Ende des Jahres entwich N_2O -N aus dem Boden. Januar und Februar sowie April bis Juni 2014 nahm der Bodenkörper N_2O -N aus der Atmosphäre auf. Im März 2014 und ab Juli 2014 war der Boden eine Quelle für N_2O (*Abbildung 5*). Das Maximum war mit 15 mg N_2O -N m^{-2} im Oktober 2014.

Zu Beginn des Beobachtungszeitraumes variierten die N-Konzentrationen um 2,5 mg N L^{-1} in den Bodenlösungen. Von November 2013 bis Februar 2014 stiegen in den Bodenlösungen aus 10 cm Bodentiefe im Gegensatz zum Standort Wüstebach die N-Konzentrationen bis etwa 14 mg N L^{-1} , danach sanken diese auf etwa 5 mg N L^{-1} wieder ab und blieben bis einschließlich Juli 2014 nahezu konstant. Ab Juli 2014 stiegen die N-Konzentrationen aus 10 und 30 cm Bodentiefe bis auf 30 mg N L^{-1} an und zeitversetzt wurde auch in der Bodenlösung aus 50 cm ein Anstieg auf 12 mg N L^{-1} gemessen (*Abbildung 5*). In den letzten drei Monaten des Untersuchungszeitraumes wurden besonders hohe Stickstoffmengen mittels Saugkerzen gewonnen. Die Bodenlösungen in 10 cm, 30 cm und 50 cm wiesen hauptsächlich NO_3^- -N auf. Die NH_4^+ -N-Menge lag unterhalb der Nachweisgrenze der aus der Bodenlösungen entnommenen Proben.

Im Versuchsjahr 2013 verliefen die N-Konzentrationen des Perkolates relativ konstant um bzw. etwas höher als 2,5 mg N L^{-1} . Im folgenden Jahr 2014 stiegen die N-Konzentrationen bis März 2014 auf 4,1 mg N L^{-1} an und danach sanken sie ab auf Konzentrationen um 2,5 mg N L^{-1} .

Die drei Lysimeter am Standort Selhausen wiesen eine erhebliche Variation hinsichtlich des durch das Perkolat ausgetragenen Stickstoffs auf. In den Monaten Januar, Februar und April wurden die größten N-Mengen in 2013 aus dem Lysimeter ausgetragen. Im Mittel der beiden Versuchsjahre wurden jeweils 420 mg N aus den Lysimetern ausgetragen. Ein kapillarer Rückfluss fand in den Monaten Mai, August und Oktober 2013 sowie Oktober und Dezember 2014 statt. Hier wurde mit dem aufsteigenden Wasser aus dem Perkolattank wieder N in die Lysimeter zurückgeführt.

Die Stickstoffspeicherung war im Januar 2013 und November 2014 negativ, weil der Stickstoffaustrag wesentlich den Stickstoffeintrag überstieg. In den übrigen Monaten kam es zu einer Stickstoffanreicherung im Boden (*Abbildung 5*).

Schlussfolgerungen

Mit dem „Space-for-Time“ Experiment sollte der Einfluss des Klimawandels auf den Stickstoffhaushalt eines Waldwiesenstandortes in der Eifel untersucht werden. Die Beobachtungsperiode 2013 bis 2014 zeigte, dass durch die Veränderung von Klimavariablen der Wasser- und der

Stickstoffhaushalt verändert wurden. Der Wasserhaushalt wurde aufgrund des Temperaturanstiegs und der geringeren Niederschlagsmengen deutlich stärker von der Evapotranspiration geprägt. Dies äußerte sich in verlangsamteten Transportvorgängen und im häufigeren kapillaren Wasseraufstieg. In Selhausen erhöhten sich nach einer Vorlaufzeit die Stickstoffkonzentrationen in den Bodenlösungen rapide. Es stand somit den Pflanzen durch die erhöhte N-Mineralisierung und Nitrifikation mehr NO_3^- zur Verfügung. Das NO_3^- konnten die Pflanzen jedoch nicht vollständig ausschöpfen. Es kam trotz des geringeren Fließvolumens zu höheren NO_3^- -Verlagerungen in tiefere Bodenschichten. Bei den Kammernmessungen wurde deutlich, dass der Boden sowohl Lachgasquelle als auch -senke war. In Selhausen variierten die Lachgasmengen stärker als in Wüstebach. Aufgrund der hohen Variabilität der Lachgasemissionen, der kurzen Beobachtungsdauer und der Anzahl an Messungen können zurzeit noch keine langfristigen Prognosen aufgestellt werden. Um die Aussagekraft des Versuchs zu erhöhen, ist die Auswertung der Folgejahre unabdingbar. Zusammenfassend ergibt sich, dass durch das Zusammenspiel der durch den Klimawandel beeinflussten Wettervariablen, Veränderungen des Wasserhaushaltes und der N-Flüsse des Waldwiesenstandortes Wüstebach bedingt wurden.

Danksagung

Für die Unterstützung des Projektes TERENO-SoilCan bedanken wir uns ganz besonders beim BMBF und bei TERENO (Terrestrial Environmental Observatories) finanziert durch die HGF (Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren).

Literatur

- Blois J., Williams J., Fitzpatrick M., Jackson S., Ferrier S. (2013) Space can substitute for time in predicting climate-change effects on biodiversity. - PNAS 110 (23), 9374-9379.
- Bogena H.R., Bol R., Borchard N., Brüggemann N., Diekkrüger B., Drüe C., Groh J., Gottselig N., Huisman J.A., Lücke A., Missong A., Neuwirth B., Pütz T., Schmidt M., Stockinger M., Tappe W., Weihermüller L., Wiekenkamp I., Vereecken H. (2015) A terrestrial observatory approach to the integrated investigation of the effects of deforestation on water, energy, and matter fluxes. - Science China Earth Sciences 58 (1), 61-75.
- Collier S., Ruark M., Oates L., Jokela W., Dell C. (2014) Measurement of greenhouse gas flux from agricultural soils using static chambers. - J Vis Exp 90, e52110.
- Groh J., Pütz T., Vanderborght J., Vereecken H. (2015) Estimation of evapotranspiration and crop coefficient of an intensively managed grassland ecosystem with lysimeter measurements. - 16. Gumpensteiner Lysimetertagung - Lysimeter: Research in the System Soil - Plant - Atmosphere, 107-112.
- Guntinas M.E., Leirós M.C., Trasar-Cepeda, C., Gil-Sotres F. (2012) Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study. - European Journal of Soil Biology 48, 73-80.
- Klotz D. (2005) Änderung des Wasserhaushaltes von Böden durch den prognostizierten globalen Wandel. - 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, 33-36.
- Pätzold S., Pütz T. (2010) Standort- und Profilbeschreibung sowie Analysergebnisse des TERENO-SOILCan Standortes Wüstebachtal. -, 10.

- Pedersen A.R., Petersen S.O., Schelde K. (2010) A comprehensive approach to soil-atmosphere trace-gas flux estimation with static chambers. - *European Journal of Soil Science* 61 (6), 888-902.
- Peters A., Nehls T., Schonsky H., Wessolek G. (2014) Separating precipitation and evapotranspiration from noise – a new filter routine for high-resolution lysimeter data. - *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18 (3), 1189-1198.
- Peters A., Nehls T., Wessolek G. (2016) Technical note: Improving the AWAT filter with interpolation schemes for advanced processing of high resolution data. - *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (6), 2309-2315.
- Pütz T., Kiese R., Wollschläger U., Groh, J., Rupp H., Zacharias S., Priesack E., Gerke H.H., Gasche R., Bens O., Borg E., Bäessler C., Kaiser K., Herbrich M., Munch J.-C., Sommer M., Vogel H.-J., Vanderborgh J., Vereecken H. (2016) TERENO-SOILCan: a lysimeter-network in Germany observing soil processes and plant diversity influenced by climate change. - *Environmental Earth Sciences* 75 (18), 1-14.
- Pütz, T., Kiese R., Wollschläger U., Priesack E., Borg E., Gerke H., Papen H., Vereecken H. (2013) TERENO - SOILCan - Ein Lysimeternetzwerk zur Untersuchung des Klimawandels. - 15. Gumpensteiner Lysimetertagung „Lysimeterforschung als Bestandteil der Entscheidungsfindung“, 57-62.
- Pütz T., Kiese R., Zacharias S., Bogena H., Priesack E., Wollschläger U., Schwank M., Papen H., Unold G., Vereecken H. (2011) TERENO-SOILCan - Ein Lysimeter Netzwerk in Deutschland. - 14. Gumpensteiner Lysimetertagung.
- Reeves S., Wang W., Salter B., Halpin N. (2016) Quantifying nitrous oxide emissions from sugarcane cropping systems: Optimum sampling time and frequency. - *Atmospheric Environment* 136, 123-133.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H., & (Eds.) (2007) IPCC - Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Stocker T., Qin D., Plattner G., Tignor M., Allen S., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. & (Eds.) (2013) IPCC - Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- TERENO (2011) Observatorium Eifel/Niederrheinische Bucht (ed)^(eds), Helmholtz Gemeinschaft, 2016, p.^pp.

