



Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Agrarwirtschaft

„Lysimeterversuch zum Einfluss einer differenzierten Kaliumdüngung von
Niedermoorgrünland auf die Ausnutzung des aus der Mineralisation
hervorgehenden Stickstoffs“

MASTER-THESIS

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science (M. Sc.)

vorgelegt von
Dominic Richter, B. Sc.

Erstbetreuer: Prof. Dr. Bernhard Seggewiß
Zweitbetreuer: Dr. Axel Behrendt

Vorbemerkung

So weit ich zurück denken kann, hat mich die Landwirtschaft durch mein Leben begleitet und dabei stets fasziniert. Erste Kenntnisse und praktische Erfahrungen im Pflanzenbau und in der Tierproduktion festigten daher mein Ziel, nach dem Abitur ein Agrarstudium zu absolvieren. Zur landwirtschaftlichen Forschung hingegen hatte ich bis dahin keinen Bezug. Praktische Versuche durchzuführen, persönliche Erkenntnisse daraus zu ziehen und Ergebnisse darzustellen, hat mir einen neuen Bereich der Landwirtschaft offenbart, in dem ich mich ebenfalls sehr wohl fühlte.

Die Verbindung der Praxis mit der Forschung hat mich dazu gebracht, das Thema für die Master-Thesis in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) zu formulieren. Da die Landschaft, in der ich heimisch bin, durch Niedermoorgebiete geprägt ist, entschied ich mich für ein Thema, welches sich mit der Nutzung von Niedermoorgrünland befasst.

Mögen die in dieser Arbeit dargestellten und beschriebenen Erkenntnisse den Lesenden ebenso aufschlussreich und informativ sein, wie mir während der Erarbeitung.

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank meinem Erstbetreuer Prof. Dr. Bernhard Seggewiß aussprechen. Er hat diese Arbeit durch Anmerkungen und Hinweise inhaltlich mitgestaltet und abgerundet.

Ebenso gilt mein tiefer Dank meinem Zweitbetreuer Dr. Axel Behrendt für die Bereitstellung der Daten der Versuchsreihe, interner Materialien sowie für die Möglichkeit, bei Unklarheiten jederzeit nachfragen zu dürfen. Danke für die Unterstützung und das in mich gesetzte Vertrauen, diese Arbeit zu einer lesenswerten Arbeit zu gestalten.

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Fragestellung/Zielsetzung	2
3 Moore – Grundlegende Zusammenhänge und Erkenntnisse	3
3.1 Niedermoore – Charakteristik und Entstehung	4
3.2 Entstehung des Niedermoors im Havelländischen Luch	5
3.2.1 Charakteristik des Havelluch- und Rhinluchgebiets	5
3.3 Niedermoorgrünland	7
4 Bedeutung der Lysimeterversuche	9
5 Der Pflanzennährstoff Kalium	11
5.1 Kalium im Boden	11
5.2 Kalium in der Pflanze	12
5.3 Kalium im Wasser	14
6 Der Pflanzennährstoff Stickstoff	14
6.1 Stickstoff im Boden	14
6.2 Stickstoff in der Pflanze	16
6.3 Stickstoff im Wasser	17
7 Material und Methoden	18
7.1 Versuchsstandort ZALF Forschungsstation Paulinenaue	18
7.2 Versuchsbeschreibung	19
7.3 Lysimeter	20
8 Versuchsergebnisse	22
8.1 Kaliumeintrag	22
8.2 Kaliumaustrag	24
8.3 Trockenmasseertrag und Kalumentzug	26
8.4 Kalumbilanz	30
8.5 Stickstoffeintrag	31

8.6	Stickstoffaustrag.....	33
8.7	Trockenmasseertrag und Stickstoffentzug	35
8.8	Stickstoffbilanz	37
8.9	Nährstoffgehalt im Sickerwasser.....	38
9	Diskussion	39
10	Fazit.....	49
	Quellenverzeichnis	50
	Anhang	55
	Eidesstattliche Erklärung	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage in Paulinenaue, 2001, 30 Jahre Paulinenauer Grundwasserlysimeter-Eine Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse: S. 54	21
Abbildung 2: Jährlicher Kaliumeintrag aus Düngung und Zuflusswasser der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g/m ² in den Boden (Versuchszeitraum 2003 bis 2008).....	22
Abbildung 3: Jährlicher Kaliumeintrag aus dem Zuflusswasser in g/m ² in den Boden (Versuchszeitraum 2003 bis 2008).....	23
Abbildung 4: Jährlicher Kaliumabfluss der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g/m ² in das Grundwasser (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)	24
Abbildung 5: Mittel des Kaliumabflusses der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten in das Grundwasser aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g/m ²	25
Abbildung 6: Mittel des Trockenmasseertrags der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g TM/m ²	26
Abbildung 7: Jährlicher Trockenmasseertrag der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g TM/m ² (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)	27
Abbildung 8: Mittel des Kaliumgehalts der von 1 m ² geernteten Trockenmasse der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g	29
Abbildung 9: Jährlicher Kaliumgehalt der von 1 m ² geernteten Trockenmasse der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)	30
Abbildung 10: Kalumbilanz der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten im Mittel aus den Jahren 2003 bis 2008.....	30
Abbildung 11: Mittel des Stickstoffeintrags aus dem Zuflusswasser der drei Varianten in g/m ² in den Boden (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)	32
Abbildung 12: Jährlicher Stickstoffabfluss der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g/m ² in das Grundwasser (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)	33
Abbildung 13: Mittel des Stickstoffabflusses der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten in das Grundwasser aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g/m ²	33
Abbildung 14: Jährlicher Stickstoffgehalt der von 1 m ² geernteten Trockenmasse der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)	35
Abbildung 15: Mittel des Stickstoffgehalts der von 1 m ² geernteten Trockenmasse der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g	36
Abbildung 16: Stickstoffbilanz der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten im Mittel aus den Jahren 2003 bis 2008.....	37
Abbildung 17: Stickstoff- und Kaliumgehalt im Sickerwasser der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten in mg/l (Mittel der Jahre 2003 bis 2008)	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gehaltsklassen für K-Düngung (mg K ₂ O/100 g Boden).....	12
--	----

1 Einleitung

In Brandenburg werden etwa 285.000 ha Grünland bewirtschaftet, was einem Anteil an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche von 22 % entspricht. In welcher Größenordnung es sich dabei um Niedermoorgrünland handelt, ist aus keiner aktuellen Quelle zu entnehmen. Jedoch weisen frühere Angaben darauf hin, dass das Grünland zu über zwei Dritteln auf Niedermoor- und Flussauenstandorten liegt.¹ Um Niedermoorflächen als Grünland- oder Ackerstandort landwirtschaftlich nutzen zu können, war eine Entwässerung dieser zuvor unumgänglich. Die Nutzbarmachung der großflächigen Niedermoorgebiete des Havelländischen Luchs begann bereits im Jahr 1718 durch erste Trockenlegungsvorgänge, die von dem damaligen preußischen König Friedrich Wilhelm I. angeordnet wurden.² Eine sehr intensive Trockenlegung (Melioration) erfolgte später in der DDR. Hierzu wurde ein ausgedehntes Entwässerungsnetz aus Gräben errichtet, das zusammen mit tief ausgehobenen Vorflutern und verlegten Dränagerohren zur kontrollierten Entwässerung diente.³ In Folge der Melioration werden jedoch aerobe Bedingungen im Boden geschaffen, die unter anderem zur Freisetzung von Stickstoff führen, welcher aus der Mineralisation der Torfsubstanz hervor geht.⁴

Aus diesem Zusammenhang ergeben sich vielseitige Folgen und Probleme, zu denen auch die Fragestellungen dieser Arbeit gehören. Zum einen sind die Landwirte aus ökonomischer Sicht bestrebt, den freigesetzten Stickstoff möglichst vollständig zu nutzen. Zum anderen ist aus ökologischer Sicht eine Beeinträchtigung der Grundwasserqualität durch den Austrag des Stickstoffs sowie anderer Nährstoffe zu vermeiden. Mit Hilfe von Lysimetern, welche monolytisch entnommene Niedermoorböden aus dem Havelländischen Luch beinhalten, wurden in Paulinenaue vom ZALF (Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V.) Versuche zur Klärung dieser Zusammenhänge durchgeführt. Untersucht wurde, ob eine differenzierte Kaliumdüngung von Niedermoorgrünland die Ausnutzung des aus der Torfmineralisation freigesetzten Stickstoffs durch die Pflanzen beeinflusst. Außerdem wurde auf eine mögliche Beeinträchtigung der Gewässerqualität durch die Kaliumdüngung sowie durch den freigesetzten Stickstoff geachtet.

¹Lüthardt, V. et al. (2014): Moore in Brandenburg und Berlin. Verlag Natur+Text GmbH, Rangsdorf: S. 157

²Succow, M., Jeschke, L. (1990): Moore in der Landschaft, Entstehung, Haushalt, Lebewelt, Verbreitung, Nutzung und Erhaltung der Moore. 2. Auflage. Urania-Verlag, Leipzig: S. 235

³Lüthardt, V. et al. (2014): Moore in Brandenburg und Berlin. Verlag Natur+Text GmbH, Rangsdorf: S. 93ff

⁴Käding, H. (1999): Langfristige Grünlandversuche auf Niedemoor – ein fester Bestandteil der Futterbauforschung. In: 50 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue – Ergebnisse der Grünland- und Futterforschung. Hrsg: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue. S. 183

2 Fragestellung/Zielsetzung

Die nachfolgende Arbeit befasst sich mit zwei grundlegenden Fragen:

1. Beeinflusst die unterschiedlich hohe Kaliumdüngung von Niedermoorgrünland die Ausnutzung des aus der Torfmineralisation freigesetzten Stickstoffs?
2. Inwiefern kommt es dabei zur Beeinträchtigung der Gewässerqualität aufgrund des Eintrags des gedüngten Kaliums und des freigesetzten Stickstoffs?

Das Ziel der Arbeit besteht darin, auf diese beiden Fragestellungen eine detaillierte und informative Antwort zu geben. Durch die in der Arbeit dargestellten grundlegenden Kenntnisse und Zusammenhänge zum Themenkomplex sowie durch die aufgezeigten und ausgewerteten Versuchsergebnisse aus sechs Versuchsjahren soll die Beantwortung umfassend und aufschlussreich erfolgen.

3 Moore – Grundlegende Zusammenhänge und Erkenntnisse

In der Bodenkunde werden Moore, wie folgt, definiert: „Moore sind Böden aus Torfen von mindestens 3 dm Mächtigkeit, wobei mineralische Schichten und Mudden mit einem Flächenanteil von weniger als 30 % eingelagert sein können.“⁵ Die Lebensgrundlage aller auf der Erde vorkommender Moore, ist das Wasser. Ist dies nicht in ausreichender Menge vorhanden, so ist eine Moorbildung unmöglich. Auf welchem Weg ein Moor mit Wasser gespeist wird, ist verschieden, jedoch maßgeblich für seine Entstehung und für seine Beschaffenheit. Die verschiedenen Moortypen, welche sich in ihrer Entstehung grundlegend unterscheiden, werden durch ihre unterschiedliche Art der Wasserversorgung sowie ihren unterschiedlichen Wasserhaushalt charakterisiert und definiert. Betrachtet man das Ökosystem „Moor“, so wird ersichtlich, dass es sich in besonderem Maße von anderen Ökosystemen unterscheidet. Aufgrund ihrer positiven Stoffbilanz besitzen Moore die Eigenschaft, permanent mehr oder weniger schnell zu wachsen. Ermöglicht wird das Moorwachstum durch die in Mooren heimischen Pflanzengesellschaften, welche durch eine enorme Biomasseproduktion gekennzeichnet sind. Die Produktion von organischer Substanz in Mooren ist höher als deren Zersetzung. Ein Überschuss an Wasser führt dazu, dass organische Substanz überschwemmt und als Torf abgelagert wird. Somit ist ein kontinuierliches Wachstum des Torfkörpers gegeben. Der Zuwachs des Torfes beschränkt sich hauptsächlich auf die organische Substanz der Pflanzenwurzeln, da diese meist von Wasser umgeben sind und somit nicht oder nur im geringen Maße von Mikroorganismen zersetzt werden. Das durchschnittliche Moorwachstum in Europa liegt bei ca. 0,5 mm bis 1,5 mm pro Jahr. Jedoch sei zu bemerken, dass bis heute fast die gesamten Moore Mitteleuropas entwässert wurden. Eine Entwässerung führt in jedem Fall dazu, dass bestimmte Zersetzungsbzw. Umsetzungsprozesse im Moorkörper aktiviert werden. Durch die unter Sauerstoffeinfluss ermöglichte Mineralisation wird die organische Substanz, welche als Torfkörper vorliegt, fortlaufend zersetzt und Stickstoff wird freigesetzt. Dieser Vorgang hält in einem vollständig meliorierten Moor unter intensiver Nutzung an, bis der gesamte Torf mineralisiert ist.⁶

⁵Arbeitskreis für Bodensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (1998): Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland, Kurzfassung. Mitteilung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 86

⁶Succow, M., Jeschke, L. (1990): Moore in der Landschaft, Entstehung, Haushalt, Lebewelt, Verbreitung, Nutzung und Erhaltung der Moore. 2. Auflage. Urania-Verlag, Leipzig: S. 20ff

3.1 Niedermoore – Charakteristik und Entstehung

Charakteristisch für Niedermoorböden ist die unverkennbare Färbung, die sich von tief dunkelbraun bis hin zu schwarz erstreckt. Außerdem sind Niedermoorböden an ihrem hohen Anteil an organischer Substanz in Form von Torf zu erkennen. Die Pflanzenbestandteile, aus denen sich der Torf zusammensetzt, sind in Abhängigkeit des Zustandes des Moores gut bis weniger gut identifizierbar. Unterlagert sind die meisten Niedermoore von Sand, Schluff, Lehm oder Ton. Es können sich aber auch Mudden am Grund der Niedermoore befinden. Diese gehen aus den Ablagerungen am Grund von Seen hervor und sind je nach Art der Entstehung unterschiedlich gefärbt. Je nach Färbung kann unterschieden werden in: Kalkmudden (weiß), Lebermudden (oliv) sowie Tonmudden (dunkelbraun). Niedermoore entstehen hauptsächlich in Senken, die durch einen hohen Grundwasserstand geprägt sind, in der Nähe von Flüssen oder an Seen. In Deutschland sind sie besonders in den Urstromtälern Norddeutschlands zu finden. Am Anfang der Niedermoorbildung steht in der Regel die Versumpfung in Folge eines Grundwasseranstiegs oder die natürliche Verlandung eines stehenden Gewässers. Es wird demnach aufgrund der unterschiedlichen Entstehung zwischen einem Verlandungsmoor und einem Versumpfungsmaar unterschieden. Allgemein ist zu sagen, dass bei einem Verlandungsmaar die Torfe aus dem abgestorbenen Pflanzenmaterial gebildet und nach und nach am Gewässergrund auf den dort vorhandenen Mudden abgelagert werden. Bei einem Versumpfungsmaar hingegen wird der Torfkörper in Folge des Wasserüberschusses durch den erhöhten Grundwasserstand, und des daraus resultierenden Luftabschlusses, aus den abgestorbenen Pflanzenteilen gebildet. Die Zusammensetzung des Niedermoortorfes besteht zumeist aus abgestorbenen Wurzeln, Ästen, Blättern und Sprossen von Seggen, Schilf, Moosen, Erlen, Weiden oder anderen Pflanzen, die im Moor gedeihen.⁷ Das Wachstum von Niedermooren wird maßgeblich vom Stand des Grundwassers beeinflusst. Dabei wächst das Moor nur geringfügig über den Grundwasserstand hinaus und ist somit ohne größere Erhebungen immer in Berührung mit dem nährstoffreichen Grundwasser. Je nach Art und Standort des Niedermoors liegt der pH-Wert zwischen 3,5 und 7. Im Gegensatz zum Hochmoor ist das Niedemoor durch eine große Biodiversität gekennzeichnet, was auf den relativ hohen Nährstoffgehalt zurückzuführen ist. Der Artenreichtum wird entscheidend vom Kalkgehalt des jeweiligen Moores bestimmt.⁸

⁷ Zeitz, Jutta et al (2012): Boden des Jahres 2012 – Niedemoor [https://www.dbges.de/wb/media/Steckbrief_2012.pdf (05.11.2014; 12:02 Uhr)]

⁸http://www.bund.net/themen_und_projekte/naturschutz/moore/moortypen/ (06.11.2014; 08:51 Uhr)

3.2 Entstehung des Niedermoors im Havelländischen Luch

Da die in diesem Versuch verwendeten Lysimeter ausschließlich Niedermoorboden aus dem Havelländischen Luch enthalten, wird die Entstehung an dieser Stelle verkürzt dargestellt. Die Entstehung der Niedermoore im Havelland erfolgte in zwei Schritten. Grundlegend war dafür die Bildung einer Niederung, die als Ergebnis des Rückzugs des Inlandeises aus der Weichselkaltzeit⁹ hervor ging. Das dabei abfließende Schmelzwasser beförderte fein- bis mittelkörnigen Sand und führte gleichzeitig zu dessen Ablagerung am Boden der entstandenen Niederung. Unterhalb dieser wird das oberste Grundwasserstockwerk von Geschiebemergeln großer Mächtigkeit getragen. Der fein- bis mittelkörnige Sand hingegen leitet das Grundwasser. In Folge der natürlichen Sukzession bildete sich eine Parktundra, wodurch es erstmals zu Ablagerungen organischer Substanz kam. Dadurch entstanden in den Senken die ersten organischen Mudden. Innerhalb der nächsten zweihundert Jahre fiel der Grundwasserspiegel rapide ab, wodurch eine mächtige Waldvegetation entstand. Durch den darauf folgenden Wiederanstieg des Grundwassers nahm die Sukzession ihren Lauf, die Waldvegetation verschwand allmählich und riesige Röhrichtgebiete breiteten sich aus. Das Resultat entspricht einer vollflächigen Vermoorung, die mittelmächtige Verlandungs- und Versumpfungsmoore sowie geringmächtige Versumpfungsmoore entstehen ließ.¹⁰

3.2.1 Charakteristik des Havelluch- und Rhinluchgebiets

Nachfolgend soll die havelländische Luchlandschaft kurz charakterisiert werden. Hierbei soll ebenfalls darauf aufmerksam gemacht werden, wie wertvoll diese Landschaft für Mensch und Natur ist und wie wichtig es demzufolge sei, den Wissensstand über diese einzigartige Landschaft zu erweitern.

Havelluchgebiet

Das Havelluch ist eine acker- und grünlandgeprägte offene Kulturlandschaft, welche sich im norddeutschen Tiefland befindet und eine Fläche von insgesamt 869 km² umfasst. Gekennzeichnet ist dieses Gebiet durch eine einzigartige Landschaft. Zahlreiche Gräben und Kanäle, zu deren bedeutendsten Kanäle die Dosse, der Rhinkanal, der kleine Haupt- und Grenzkanal und auch der Große Havelländische Hauptkanal zählen, durchfließen das Havelluch zum Zwecke der Melioration von Grünland- und Ackerflächen. All diese großen und kleinen Gräben sowie Kanäle befördern das Wasser aus der Luchlandschaft auf direktem oder indirektem Weg in die Havel. Von besonderer Bedeutung ist das Havelluchgebiet, da sich hier der mächtigste zusammenhängende Niedermoorkomplex im

⁹Jüngste in Nordeuropa aufgetretene Vereisung nach Elster- und Saaleeiszeit, datiert um 120.000 bis 10.000 Jahre vor heute (<http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Weichsel-Eiszeit.html> (09.02.2015; 07:55 Uhr))

¹⁰Lehr- und Versuchsanstalt für Grünland und Futterwirtschaft Paulinenaue e.V. (1993): Jahresbericht 1993. Paulinenaue: LVGF

Land Brandenburg befindet. Genau genommen befindet sich diese Niedermoorlandschaft in dem einstigen Berliner Urstromtal und verläuft in Richtung Osten und Westen. Inmitten dieser Niederung befinden sich ebenso auch Talsandgebiete von geringerer Größe, wie es bei Paulinenau oder Zootzen der Fall ist. Geprägt sind diese Gebiete durch geringe, meist mit Kiefernbeständen bewaldete Erhebungen, welche aus der umliegenden Landschaft herausragen. Auch kleinere Auenlaubwälder sind vereinzelt in den Niederungen zu finden. Begrenzt sind die Niederungen häufig durch Sander- und Moränenplatten.¹¹ Das Havelluch ist aufgrund des Reichtums an unterschiedlichen Lebensräumen trotz der Melioration sehr artenreich. Die Vielzahl differierender Ökosystemtypen ist ausschlaggebend für die enorme Biodiversität dieses Landschaftsgebietes. Einst zählte dieses Gebiet noch viele weitere Arten zu seinen heimischen, doch in Folge der Trockenlegung und landwirtschaftlich geprägten Umgestaltung großflächiger Feuchtgebiete in der Vergangenheit, kam es zu deutlichen Beeinträchtigungen bezüglich der Lebensraumqualität und somit auch zur Abnahme der Artenvielfalt. Dennoch ist die Havelluchlandschaft auch mit der landwirtschaftlichen Nutzung immer noch durch eine große Artenvielfalt gekennzeichnet.¹² Besonders bekannt ist das Luch als bedeutsames Brut- und Rastgebiet vieler Vogelarten. So sind beispielsweise jährlich tausende Kraniche und Wildgänse im Herbst auf den Acker- und Grünlandflächen zu beobachten. Viele Bereiche, die besonders wertvoll sind, besitzen den Status FFH (Flora-Fauna-Habitat), SPA (Special Protection Area – EU-Vogelschutzgebiet), NSG (Naturschutzgebiet) oder LSG (Landschaftsschutzgebiet) und sind somit unter Schutz gestellt.¹³

Rhinluchgebiet

Das Rhinluch liegt in unmittelbarer Nähe zum Havelluch und befindet sich im Eberswalder Urstromtal, welches sich in Ost-West-Ausdehnung über das Land erstreckt. Das Niederungsgebiet umfasst eine Fläche von 240 km² und ist durch Sander- und Moränengebiete eingegrenzt. Die in dem nur sehr selten von Talsandinseln unterbrochenem Luchgebiet bedeutendsten Gewässer sind der Kremmener Rhin, der Alte Rhin und der Rhinkanal. Im Vergleich aller Niederungen des Havellandes ist im Rhinluch der mächtigste Moorkörper mit der stärksten Moorbedeckung zu finden. Die Landschaft des Niederungsgebietes ist durch Grünland und baumkarge Flächen geprägt. Einzig einige Bruchwälder sind vorzufinden. Die landwirtschaftliche Nutzung des Luches beschränkt sich bedingt durch den hohen Grundwasserstand fast ausschließlich auf Grünland. Vereinzelt sind auch Ackerflächen vorhanden, die im Vergleich allerdings nur einen geringen Teil der

¹¹http://www.bfn.de/0311_landschaft.html?&no_cache=1&tx_lsprofile_pi1%5Blandschaft%5D=788&tx_lsprofile_pi1%5Bbundesland%5D=3&tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&tx_lsprofile_pi1%5Baction%5D=show&tx_lsprofile_pi1%5Bcontroller%5D=Landschaft&cHash=2e8dc1804630aa39ca286c2791e0461a (Stand: 22.10.14; 12:07 Uhr)

¹²Lüthardt, V. et al. (2014): Moore in Brandenburg und Berlin. Verlag Natur+Text GmbH, Rangsdorf: S. 51ff

¹³<http://www.oberes-rhinluch.de/naturschutz> (Stand: 22.10.14; 13:25 Uhr)

gesamten Fläche einnehmen, auf denen eine Bewirtschaftung durch Melioration möglich wurde. Vor Beginn des 20. Jahrhunderts diente das Rhinluch dem Torfabbau, wodurch einige der noch heute vorhandenen Kanäle entstanden. Ähnlich wie das Havelluch ist auch das Rhinluch für seine Artenvielfalt bekannt. Ein großer Teil der Niederung befindet sich im EU-Vogelschutzgebiet, ebenso ist ein Teil als FFH-Gebiet und NSG-Gebiet ausgewiesen.¹⁴

3.3 Niedermoorgrünland

Niedermoore sind in Deutschland auf einer Fläche von rund einer Million Hektar vertreten. Dabei sind die meisten und größten zusammenhängenden Moorkomplexe in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Bayern sowie in Baden-Württemberg zu finden.¹⁵ In Brandenburg betrug die Moorfläche noch vor zweihundert Jahren etwa 300.000 Hektar, doch in Folge der Melioration der Niedermoorgebiete in der DDR verringerte sich die Fläche bis heute auf ca. 210.000 Hektar. Insgesamt werden 75 % der Moorflächen in Brandenburg landwirtschaftlich genutzt, wobei zu bemerken sei, dass sich auf diesen Flächen ungefähr 65 % des brandenburgischen Grünlands befinden.¹⁶ Aufgrund der Melioration und der landwirtschaftlichen Nutzung unterliegen Niedermoore einer sogenannten Moordegradierung. Diese zeigt sich in Form von Sackung, Schrumpfung und Mineralisierung des Moorkörpers. Aus den einst sehr ebenen Niedermoorflächen entwickeln sich durch die unterschiedliche Moormächtigkeit und die unterschiedliche Untergrundausprägung kleinere Erhebungen sowie Senken, die das Relief des Untergrunds widerspiegeln. Das starke Austrocknen führt in der Regel zur Vermullung¹⁷ des Oberbodens, das wiederum die Wasserbewegung sowie den Kapillaraufstieg stark beeinflusst. Eine eingeschränkte Befahrbarkeit und Trittfestigkeit kennzeichnen diesen Standort sowie Probleme in der Bestandsführung des Grünlandes. Verunkrautung und schlechte Etablierung der Ansaatgräser erschweren häufig die Bewirtschaftung. Außerdem werden durch die Mineralisation sehr hohe Mengen an Stickstoff freigesetzt, die nicht selten von den Pflanzen in ungenügendem Maße aufgenommen werden können und somit ins Oberflächenwasser gelangen. Allein die oberen 20 Zentimeter des Niedermoorbodens können einen Stickstoffvorrat von bis zu 30.000 kg pro Hektar beinhalten.¹⁸ Lysimeteruntersuchungen von

¹⁴http://www.bfn.de/0311_landschaft.html?&no_cache=1&tx_lsprofile_pi1%5Blandschaft%5D=787&tx_lsprofile_pi1%5Bbundesland%5D=3&tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&tx_lsprofile_pi1%5Baction%5D=show&tx_lsprofile_pi1%5Bcontroller%5D=Landschaft&cHash=2b0acb320e6b800d97ad0849fe290958 (Stand: 23.10.14; 09:09 Uhr)

¹⁵Zeitz, Jutta et al (2012): Boden des Jahres 2012 – Niedemoor [https://www.dbges.de/wb/media/Steckbrief_2012.pdf (06.11.2014; 10:00 Uhr)]

¹⁶Moore in Brandenburg. In: Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg, 19. Jhrg., Heft 3, 4 aus 2010. Hrsg.: LUA Landesumweltamt Brandenburg. S. 126

¹⁷Als Vermullung wird die irreversible Strukturveränderung im stark ausgetrockneten Torfboden bezeichnet. Ausbildung eines Vermullungshorizont im Oberboden (vgl. Succow, M., Jeschke, L. (1990))

¹⁸Succow, M., Jeschke, L. (1990): Moore in der Landschaft, Entstehung, Haushalt, Lebewelt, Verbreitung, Nutzung und Erhaltung der Moore. 2. Auflage. Urania-Verlag, Leipzig: S. 23ff

Mundel, G. zeigen mit Hilfe von Kohlendioxidmessungen jährliche Mineralisationsraten von 286 g/m² bis 669 g/m² Kohlenstoff. Dies entspricht im Mittel etwa einer Menge von 8 t/ha organischer Substanz, die durch Mineralisationsvorgänge jährlich vom bestehenden Moorkörper abgehen.¹⁹ Im Havelländischen Luch ist das Ausmaß der Melioration anhand des Moorschwundes deutlich ersichtlich. So ist hier die Mächtigkeit des Moorkörpers von ursprünglich 2,2 m auf nun mehr 0,7 m geschrumpft. Dabei sind etwa 0,8 m der Sackung und Schrumpfung zuzuschreiben und 0,7 m der Zersetzung.²⁰ Versuchsergebnisse aus der Forschungsstation Paulinenaue des ZALF zeigten, dass die oxidative mikrobielle Zersetzung der organischen Substanz maßgeblich vom Grundwasserstand abhängt. Langjährige Moorschwundmessungen in Grundwasserlysimetern mit einem noch relativ hohen Grundwasserstand von 50 cm unter Flur weisen bereits auf einen jährlichen Verlust von 0,5 cm hin.²¹ Ist dieser Verlust allein auf die Zersetzung zurückzuführen, so würden je nach Trockenrohdichte und Gesamtstickstoffgehalt Stickstoffmengen von bis zu 500 kg pro Hektar freigesetzt werden.²² Allgemein betrachtet schwankt das Ausmaß der jährlichen Stickstofffreisetzung auf Niedermoorgrünland zwischen 100 kg pro Hektar und 3200 kg pro Hektar, wobei solch hohe Freisetzungsraten als Extremfall angesehen werden.²³

Kalium hingegen liegt nur in sehr geringer Konzentration vor, worauf Versuchsergebnisse der ZALF Forschungsstation Paulinenaue als auch Literaturhinweise hindeuten.

Wohingegen mehrjährige Versuchsergebnisse aus der ZALF Forschungsstation Paulinenaue als auch Literaturhinweise²⁴ darauf hindeuten, dass Kalium nur in sehr geringer Konzentration vorliegt. In Paulinenaue wurden Werte zwischen 0,03% und 0,1% Kalium in der organischen Substanz ermittelt, was in gewisser Zeit ohne Kaliumdüngung zu Mangelerscheinungen und einem deutlichen Ertragsrückgang führte.²⁵ Die Vegetation der auf Niedermoor gelegenen Grünlandstandorte gestaltet sich recht vielseitig und ist in bemerkenswerter Weise von der Nutzungsintensität sowie von den jeweiligen abiotischen Umweltfaktoren abhängig. Dies geht unter anderem aus Untersuchungen des ZALF Münsberg zur Grünlandvegetation eines Niedermoorgebietes (Rhinluch) hervor. Auf intensiv genutzten Grünlandflächen ist die Vegetation jedoch meist auf die unterschiedlichen Gräser einer auf diesen Standort abgestimmten Ansaatmischung beschränkt.

¹⁹Mundel, G. (1976): Untersuchungen zur Torfmineralisation in Niedermooren. Archiv Acker-Pflanzenbau Bodenkunde Berlin 20: S. 669ff

²⁰Scheller, Peter (2008): Untersuchungen zum Stickstoff-Überschuss und den Möglichkeiten seiner Verminderung in Futterbaubetrieben mit hohem Grünlandanteil auf Niedermoor. Diss. Gießen, S. 13

²¹Behrendt, Axel et al (2009): Die Paulinenauer Grundwasserlysimeteranlage Entstehung, Funktion und Ergebnisse. In: Symposium 60 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue. Hrsg.: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue, S. 66

²²Behrendt, A., G. Schalitz, L. Müller und U. Schindler (2003): Nährstoffdynamik auf extensiv genutzten Niedermoorenweiden – Weide- und Lysimeterversuche-, 10. Gumpenstein Lysimetertagung. Hrsg.: Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, S. 129ff

²³Kuntze, H. (1984): Bewirtschaftung und Düngung von Moorböden. –Berichte des Bodentechnologischen Instituts Nds. Landesamt für Bodenforschung 80 S.

²⁴Schachtschabel, Paul et al (1976): Scheffer / Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 9. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, S. 222

²⁵Behrendt, A., G. Schalitz, L. Müller und U. Schindler (2003): Nährstoffdynamik auf extensiv genutzten Niedermoorenweiden – Weide- und Lysimeterversuche-, 10. Gumpenstein Lysimetertagung. Hrsg.: Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, S. 129ff

Wohingegen unter einer extensiven Nutzung, wie es seit Beginn der 90er Jahre fast ausschließlich der Fall ist, besonders die Grundwassernähe des Standorts die Ausbildung der Vegetation beeinflusst und diese somit recht unterschiedlich ausgeprägt ist. Die Untersuchungen zeigen, dass auf den heutigen extensiv genutzten Grünlandflächen nur noch wenige Arten aus den damaligen Ansaatmischungen wiederzufinden sind. Allein Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) und Wiesenrispe (*Poa pratensis*) konnten sich langfristig ohne Nachsaat etablieren. Die Vegetationsformen auf den extensiv genutzten Niedermoorflächen erstrecken sich unter anderem von Schilf-Seggen-Röhricht über Rohrglanzgras-Röhricht bis hin zu Quecken-Flutrasen oder Rohrglanzgras-Brennessel-Röhricht.²⁶ Typische für das Niedermoorgrünland geeignete Artenzusammensetzungen in Ansaatmischungen enthalten meist Arten wie Wiesenlieschgras (*Phleum pratense*), Wiesenrispe (*Poa pratensis*), Weißes Straußgras (*Agrostis alba gigantea*), Wiesenschweidel (*Festulolium: Festuca spec. x Lolium spec.*) sowie Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) oder auch Wiesenfuchsschwanz (*Alopecurus pratensis*).

4 Bedeutung der Lysimeterversuche

Soll der Wasserhaushalt eines bestimmten Bodens oder der Gehalt an gelösten Stoffen in seinem Bodenwasser ermittelt und mengenmäßig abgeschätzt werden, so wird prinzipiell zwischen zwei Verfahrensweisen in der Forschung unterschieden. Zum einen gibt es die Methode, bei der Saugkerzen verwendet werden und zum anderen die, bei der Lysimeter genutzt werden. Da in dieser Arbeit ausschließlich Versuchsergebnisse ausgewertet werden, die mit Hilfe von Lysimetern ermittelt wurden, wird die Bedeutung der Lysimeterversuche für die Agrarlandschaftsforschung nachfolgend zusammengefasst dargestellt.

Die Bedeutung der Lysimeterversuche wurde von G. Schalitz²⁷ und A. Behrendt dargestellt und von A. Behrendt wie folgt zusammengefasst: „Lysimeteruntersuchungen sind unentbehrliche Bestandteile in der ganzheitlichen Betrachtungsweise von Agrarlandschaften, die Prozesse, die hier mit dem Raum-Zeit-Bezug erforscht werden, sind zwischen der Laborebene und dem landschaftsökologischen Experimentalgebiet einzuordnen. Wenn nur Laborergebnisse oder punktuelle Felduntersuchungen auf große Flächen umgerechnet werden, ergeben sich häufig falsche Bilder, weil wesentliche Zusammenhänge unerkannt bleiben. Ohne Lysimeterdaten wären Validierungen von Modellen, die zum Beispiel die Nährstoffauswaschung, Evapotranspiration oder Grundwasserneubildung von Landschaften

²⁶ Kaiser, Th. et al (1999): Die räumliche Herleitung der Grünlandvegetation eines Niedermoorgebietes anhand abiotischer Standortkarten unter Berücksichtigung der Nutzungs faktoren. In: 50 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue – Ergebnisse der Grünland- und Futterforschung. Hrsg.: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue. S. 191ff

²⁷ Schalitz, Gisbert et al (1996): Zum Stellenwert der Lysimeteruntersuchungen in der Agrarlandschaftsforschung. In: ZALF-Bericht Nr. 26 Stoffhaushalt von Niedermooren und hydromorphen Mineralböden des nordostdeutschen Tieflandes. Hrsg.: Schalitz et al. Müncheberg S. 3

errechnen, nicht denkbar.²⁸ „Lysimeter bilden Prozesse der Stoff- und Gefügedynamik im Mikrobereich ab, aber bereits in umfassenderer Weise als Labor- und Gefäßversuche. Insbesondere vertikale Stoffbewegungen sind mit hoher Präzision nachzuweisen.“²⁹ Die Lysimeter eignen sich besonders zur Erstellung von Stoffbilanzen unterschiedlichster Standorte mit ihren vielfältigen Nutzungsbedingungen, da die aus den Versuchen hervorgehenden Ergebnisse mit größerer Sicherheit als Ergebnisse zu erstellten Wasserbilanzen direkt in die Landschaft übertragen werden können. Der Grund dafür liegt bei den Lysimeterfehlern, welche an der Bodenoberfläche unter Umständen agieren können und auf die Wasserbilanzen im größeren Maße einwirken als auf die Stoffbilanzen. Wiederum können erosionsbedingte Stoffflüsse bei der Erstellung von Stoffbilanzen nicht mit einbezogen werden, jedoch sei zu bemerken, dass Erosion auf Grünlandstandorten sehr selten auftritt. Mögliche Faktoren, die Einfluss auf die Erstellung von Wasserbilanzen ausüben können, sind Oaseneffekte sowie Randeffekte.³⁰ Bedingt durch eine zu starke Differenz der Oberflächenbeschaffenheit der Lysimeter zum Umfeld in dem diese positioniert sind, kann es zu Abweichungen vom gewöhnlichen Standort des Bodens bezüglich der Verdunstung und des gesamten Wasserhaushalts kommen. Dieses Phänomen wird in der Literatur als Oaseneffekt bezeichnet. Randeffekte hingegen entstehen, weil sich der Boden in einem Gefäß befindet und die Pflanzen somit in ihrem lateralen Wachstum begrenzt sind. Außerdem können Dehnungsscheinungen speziell bei Tonböden dazu führen, dass ein Bodenschluss zur Wand des Behälters nicht gegeben sei und somit Wasser von der Oberfläche ungehindert abfließt. In welchem Maß diese Effekte die Lysimeteruntersuchungen beeinflussen, hängt unter anderem von der Bodenart, von der Einbringungsart des Bodens, vom Pflanzenwachstum sowie u.a. von der Beschaffenheit der Umgebung ab.³¹ Trotz der Fehlerquellen, welche unter bestimmten Umständen auftreten, sind Lysimeterversuche ein wichtiger Bestandteil der Agrarlandschaftsforschung. Mit ihnen können zum Beispiel unterschiedliche Bewirtschaftungsformen von Acker- oder Grünland auf ihre Grundwasserqualitätsbeeinflussung geprüft werden. Somit wird ein Aufschluss über den potentiellen Stoffeintrag in das Grundwasser unter bestimmten Nutzungsbedingungen ermöglicht. Des Weiteren dienen sie der Ermittlung grundsätzlicher Daten zur Erstellung von Simulationsmodellen sowie von Gebietsbilanzen. Auch als Lernobjekt sind Lysimeter von besonderer Bedeutung, da durch sie bestimmte hydrologische und stoffliche Aspekte

²⁸ Behrendt, Axel et al (1999): 30 Jahre Paulinenauer Grundwasserlysimeter – eine Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse. Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Forschungsstation Paulinenau. S. 74

²⁹ Schalitz, Gisbert et al (1996): Zum Stellenwert der Lysimeteruntersuchungen in der Agrarlandschaftsforschung. In: ZALF-Bericht Nr. 26 Stoffhaushalt von Niedermooren und hydromorphen Mineralböden des nordostdeutschen Tieflandes. Hrsg.: Schalitz et al. Müncheberg S. 3

³⁰ Schalitz, Gisbert et al (1996): Wasserverbrauch, Stoffaustrag, Ertrag und Qualitätsparameter nachwachsreicher Rohstoffpflanzen. In: ZALF-Bericht Nr. 26 Stoffhaushalt von Niedermooren und hydromorphen Mineralböden des nordostdeutschen Tieflandes. Hrsg.: Schalitz et al. Müncheberg S. 45

³¹ Klaghofer, Eduard (1991): Bodenphysikalische Aspekte bei der Erfassung von gelösten Stoffen mit Hilfe von Lysimetern. In: Bericht über die Gumpensteiner Lysimetertagung, Gumpenstein S. 19f

bzw. Abläufe im Boden veranschaulicht werden können.³² Im Bereich der Pflanzenschutzmittelzulassung werden Lysimeterversuche ebenfalls herangezogen und dienen dabei dem Schutz des Grundwassers. Dazu werden häufig Lysimeter mit einem intakten Bodenprofil eingesetzt, um die Versickerungsneigung verschiedener Pflanzenschutzmittel festzustellen. Bei Überschreitung der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte im Sickerwasser ist eine Zulassung des jeweiligen Mittels nicht möglich.³³

5 Der Pflanzennährstoff Kalium

Nachfolgend wird der Pflanzennährstoff Kalium ausführlich charakterisiert. Dabei wird exakt auf das Vorkommen sowie auf das Verhalten im Boden, im Wasser und in der Pflanze eingegangen.

5.1 Kalium im Boden

Chemisch betrachtet, zählt das Kalium zu den Alkalimetallen und kommt im Boden sowie in der Pflanze einzig als einwertiges Kation (K^+) vor. In Düngemitteln wird der Kaliumgehalt meist in Form von Kaliumoxid (K_2O) angegeben, wobei das Kalium in der Natur in dieser Form nicht vorkommt. Die Angabe als K_2O erfolgt, da auf diese Art und Weise der reine Kaliumgehalt in dem jeweiligen Dünger dargestellt werden kann. Kaliumsalze gelten als leicht löslich.³⁴ Die Kaliumvorräte unserer landwirtschaftlich genutzten Böden bewegen sich im Bereich zwischen 0,2 % und 3 %, was ca. 6.000 kg bis 90.000 kg Kalium pro Hektar in der obersten Bodenschicht entsprechen. Böden, die durch pH-Werte im alkalischen Bereich gekennzeichnet sind, können durchaus Kaliumgehalte von bis zu 7 % aufweisen.³⁵ Allgemein betrachtet, variiert der Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bodenart. In humiden Böden, besonders in Moorböden, ist das Kalium oft aufgrund der geringen Nachlieferung und der häufig starken Auswaschung nicht in genügendem Maße vorliegend. Wohingegen in ariden Böden der Nährstoff häufig ausreichend vorhanden ist.³⁶ Das sich im Boden befindliche Kalium stammt, ausgenommen von dem, was durch die verschiedenen Düngemittel der Landwirtschaft zugeführt wird, aus der Verwitterung primärer Minerale und Gesteine sowie aus der Verwitterung sekundärer Tonminerale. Bei der sehr langfristigen und im geringen Maße ablaufenden Verwitterung dieser Minerale wird

³²Murer, Erwin (2004): Feldlysimeter-Erfahrungen in den Pilotprojektgebieten in Oberösterreich. In: Landwirtschaft und Grundwasserschutz, Gumpenstein S. 20

³³http://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/psm_metaboliten/doc/fachtagungskurzfassung_psm_metaboliten.pdf (29.10.14; 09:43 Uhr)

³⁴Finck, Arnold (2007): Pflanzennährung und Düngung in Stichworten. 6. Auflage. Gebrüder Borntraeger Verlag, Berlin, Stuttgart: S 109

³⁵Amberger, Anton (1996): Pflanzennährung. 4. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 233

³⁶Finck, Arnold (2007): Pflanzennährung und Düngung in Stichworten. 6. Auflage. Gebrüder Borntraeger Verlag, Berlin, Stuttgart: S 109ff

das Kalium als Kation (K^+), in welcher Form es ebenso von den Pflanzen aufgenommen wird, freigesetzt. Der größere Teil der Kaliumreserve im Boden liegt dabei in den primären Mineralen und Gesteinen vor. So enthalten zum Beispiel bestimmte Feldspäte bis zu 14 % oder Glimmer bis zu 9 % Kalium. Der weitaus kleinere Teil (2 % bis 3 %) liegt in den Tonmineralen wie Illite oder Vermiculite vor. Da das Kalium aus der organischen Substanz des Bodens sehr leicht herausgelöst werden kann und es nur schwach sorbiert wird, sind organische Kaliumreserven im Boden nur in sehr geringem Maß vorhanden (weniger als 0,1 % im Humus). Böden, die einen hohen Anteil an organischer Substanz aufweisen (z.B. Niedermoorböden), gelten in der Regel als Kaliummangelböden. Im Boden liegt das Kalium in unterschiedlichen Bindungsformen vor. So sind in etwa 80 % des Gesamtkaliums im Kristallgitter verschiedener Silicate eingebaut. Außerdem ist Kalium fest in den Zwischenschichten aufweitbarer Tonminerale gebunden. Des Weiteren ist das sogenannte austauschbare Kalium im Boden vorhanden. Dieses ist an den Oberflächen und Eckpositionen der Tonminerale sorbiert und unterliegt einer schwachen Bindung, wodurch es in die Bodenlösung abgegeben werden kann. Über 10 % des austauschbaren Kaliums ist in der Bodenlösung verfügbar.³⁷

Tabelle 1: Gehaltsklassen für K-Düngung (mg $K_2O/100\text{ g Boden}$)³⁸

% Ton	A	B	C	D	E
0-12	< 4	5-11	12-20	21-29	>29
13-25	< 6	7-14	15-25	26-39	>39
>25	< 8	9-19	20-30	34-49	>49
Gehaltsklassen: A = niedrig, B = mittel, C = hoch, D = sehr hoch, E = extrem hoch					

5.2 Kalium in der Pflanze

Werden die für die Pflanzenernährung notwendigen Nährstoffe anders als üblich nach ihren physiologischen Eigenschaften sowie Funktionen und nicht nach ihrem mengenmäßigen Vorkommen in den unterschiedlichen Pflanzen unterschieden, so können diese, allgemein betrachtet, in vier Gruppen eingeteilt werden. Es wird unterschieden zwischen assimilierte Nährstoffe, esterbildende Nährstoffe, freie und sorbierte Nährstoffe und Nährstoffe in prosthetischen Gruppen. Das Kalium muss dabei der Gruppe der freien und sorbierten Nährstoffe zugeteilt werden. Weitere Nährstoffe in dieser Gruppe sind Natrium, Chlor, Kalzium und Magnesium. All diese Nährstoffe werden im Gegensatz zu den anderen in der Pflanze nicht homöopolar gebunden (Elektronenpaarbindung) und liegen somit frei

³⁷Amberger, Anton (1996): Pflanzenernährung. 4. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 233ff

³⁸Amberger, Anton (1996): Pflanzenernährung. 4. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 235

im Zellsaft als Ionen vor. Allein durch die Oberflächenladung (sorptive Bindung) werden sie elektrostatisch angezogen. Es besteht eine gewisse Konkurrenz zwischen den Ionen um die jeweiligen Ladungsstellen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Wertigkeit verdrängen sich die unterschiedlichen Ionen unter bestimmten Umständen. Magnesium (Mg^{2+}) ist in der Lage Natrium (Na^+) zu verdrängen und Kalzium (Ca^{2+}) verdrängt das Kalium (K^+). Das Kalium ist der wichtigste Nährstoff aus dieser Gruppe und wird in den Pflanzen im Zellsaft auf bis zu 200 Millimol angereichert. Die Funktionen des Nährstoffes erstrecken sich über insgesamt drei physiologische Aufgaben: Osmotische Funktionen, Enzymaktivierung sowie elektrostatischer Ausgleich.³⁹ So dienen beispielsweise die K^+ -Ionen in der pflanzlichen Zelle durch die Regulierung des Wassereinstroms als unentbehrlicher Bestandteil zur Steuerung des Zellinnendrucks sowie des Zellwachstums. Außerdem ist eine Vielzahl wichtiger Enzyme auf das Dasein des Kaliums angewiesen. Unter anderem zählen die Stärkesynthase und auch Enzyme der Proteinsynthese hierzu.⁴⁰ Besonders wichtig, vor allem für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen, ist der Einfluss des Kaliums auf die Stickstoffaufnahme. Durch seine bestimmende Wirkung auf die ATP-Synthese⁴¹ begünstigt das Kalium die unter Energieverbrauch ablaufende Stickstoffaufnahme der Pflanzen. Da Kalium die Bildung von Nitratreduktase maßgeblich beeinflusst und diese wiederum für die Eiweißsynthese notwendig ist, hat der Nährstoff eine regulierende Wirkung auf den Stickstoffhaushalt der Pflanzen. Durch Kaliummangel geprägte Pflanzen weisen deshalb auch niedrige Gesamtstickstoff- und Proteingehalte auf. Bei der Stickstoffdüngung ist daher gleichzeitig immer auf eine ausreichende Kaliumversorgung zu achten, da es sonst aufgrund der beschränkten Aufnahme zu erheblichen Stickstoffverlusten kommen kann. Das Verhältnis von Stickstoff zu Kalium in Düngergaben sollte bei Kartoffeln und Getreide etwa bei 1:1 liegen und bei anderen Pflanzen das Verhältnis von 2:1 nicht überschreiten. Die Aufnahme des Kaliums durch die Pflanzen erfolgt ausschließlich als Kaliumion (K^+). Dabei wird zunächst nur das Kalium aufgenommen, was in unmittelbarer Nähe der feinen Wurzelhaare im Boden in verfügbarer Form vorliegt. Der weitaus größere Teil hingegen wird durch Diffusion und Massenfluss in den Wurzelbereich der Pflanzen nachgeliefert. Ein zu starkes Austrocknen des Bodens kann demzufolge in relativ kurzer Zeit auch bei gutem Versorgungsgrad zu Kaliummangel in den Pflanzen führen. Dieser ist meist durch Welkeerscheinungen der Pflanzen gut zu erkennen, die sich in Form von herabhängenden und gewellten Blättern widerspiegeln. Allerdings wirkt sich eine Kaliumunterversorgung noch

³⁹Schubert, Sven (2006): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. 2. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S 23, 30

⁴⁰Schilling, Günther (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart: S 148f

⁴¹ATP Abk. für Adenosintriphosphat, Speicherform von Energie in der Zelle (<http://www.wissen.de/lexikon/adenosintriphosphat> (10.02.2015; 07:02 Uhr))

bevor sie durch Mänglerscheinungen an der Pflanze sichtbar wird, negativ auf den Ertrag aus.⁴²

5.3 Kalium im Wasser

Kalium gilt als einer der natürlichen Inhaltsstoffe des Wassers und kommt sowohl in Meeren und Binnengewässern als auch im Grundwasser sowie im Trinkwasser in unterschiedlichen Größenordnungen vor. So liegt die Konzentration im Meerwasser etwa bei 400 mg/l und in Flüssen beispielsweise bei etwa 2 mg/l bis 3 mg/l. Das Element liegt im gelösten Zustand fast ausschließlich als Kaliumion (K^+) vor.⁴³ Im Grundwasser werden laut Trinkwasserverordnung Werte bis zu 12 mg/l und höhere Werte (bis 50 mg/l), wenn diese auf eine geologische Ursache zurückzuführen sind, akzeptiert.⁴⁴ Im Trinkwasser schwanken die Kaliumkonzentrationen regional zwischen 0,5 mg/l und 4 mg/l (Werte aus dem Osthavelland). In Paulinenaue (Versuchsstandort) liegt der Kaliumgehalt im Trinkwasser im Jahr 2014 durchschnittlich bei etwa 1,1 mg/l.⁴⁵ Allgemein betrachtet, gelangt das Kalium auf natürlichem Weg in die Oberflächengewässer und in das Grundwasser, da es in verschiedenen Mineralien enthalten ist und daraus durch Verwitterungsprozesse gelöst werden kann. Des Weiteren kann der Nährstoff jedoch auch unter bestimmten Bedingungen durch Düngemittel aus der Landwirtschaft oder auch durch Industrieabfälle in die Gewässer gelangen.⁴⁶

6 Der Pflanzennährstoff Stickstoff

Nachfolgend wird auch der Pflanzennährstoff Stickstoff ausführlich charakterisiert. Dabei wird ebenso exakt auf das Vorkommen sowie auf das Verhalten im Boden, im Wasser und in der Pflanze eingegangen.

6.1 Stickstoff im Boden

Stickstoff zählt als Nährstoff zu den Nichtmetallen und wird aus Sicht der Pflanzenernährung der Gruppe der Makronährstoffe zugeordnet. Wie groß das Ausmaß des Gesamtstickstoffgehaltes eines Bodens ist, ist stark vom Standort, von der jeweiligen Vegetation sowie von der Art und Weise der Bewirtschaftung abhängig.

⁴²Bergmann, Werner (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart: S. 135f

⁴³<http://www.lenntech.de/pse/wasser/kalium/kalium-und-wasser.htm> (25.11.2014; 13:00 Uhr)

⁴⁴http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/grundwasser/grundwasserbeschaffenheit/messergebnisse_landesweit/kaliumgehalte/38552.html (25.11.2014; 13:08 Uhr)

⁴⁵<http://www.owa-falkensee.de/trinkwasserqualitaet.html> (25.11.2014; 13:17 Uhr)

⁴⁶<http://www.lenntech.de/pse/wasser/kalium/kalium-und-wasser.htm> (25.11.2014; 13:42 Uhr)

Aufgrund dessen variieren die Gesamtstickstoffgehalte der landwirtschaftlich geprägten Böden zwischen 0,02 % und 0,4 %, was etwa 900 kg N/ha bis 9.000 kg N/ha in der Bodenkrume entspricht.⁴⁷ Eine Sonderstellung nehmen hier die Moorböden ein. So können beispielsweise Niedermoorböden allein in den oberen zwanzig Zentimetern einen Stickstoffvorrat von bis zu 30.000 kg N/ha enthalten.⁴⁸ Der größte Anteil (90%) des Stickstoffs im Boden liegt in Form von organisch gebundenem Stickstoff vor. Den bedeutsamsten Stickstoffvorrat enthält dabei der Humus, der zu 1 % bis 6 % aus Stickstoff besteht. Nicht mehr als ca. 5 % des Stickstoffs liegt in anorganischer Form im Boden vor.⁴⁹ Anders als viele andere Pflanzennährstoffe stammt der Stickstoff im Boden nur in einem sehr geringen Maß aus Mineralen. Er gelangt auf natürlichem Weg vorwiegend aus der Luft durch die biologische Stickstofffixierung in den Boden und ist dort hauptsächlich in organischer Substanz gebunden. Böden, die zu einem großen Anteil aus organischer Substanz bestehen, enthalten daher die größeren Stickstoffvorräte. Für die Pflanzen direkt verfügbar ist er überwiegend in Form von Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-). Das Ammonium entsteht durch die Ammonifikation von organischen Stickstoffformen mit Hilfe von Mikroben und das Nitrat wiederum entsteht aus der Nitrifikation von Ammonium, die ebenfalls mikrobiell gesteuert ist. Beide Vorgänge werden als Mineralisation bezeichnet und werden durch die Temperatur, die Wasserversorgung und den pH-Wert des Bodens beeinflusst. Auch durch elektrische Entladungen und durch Abgase kommt es in der Luft zur Bildung von Nitrat, welches durch Niederschlag in den Boden gelangt.⁵⁰ Die beiden unterschiedlichen Formen des Stickstoffs, die für die Pflanzenernährung in erster Linie von Bedeutung sind, unterscheiden sich auch hinsichtlich ihrer Dynamik im Boden. Das Nitrat wird aufgrund seiner negativen Ladung nicht im Boden gebunden und ist in der Bodenlösung somit frei beweglich. Durch die fehlende Bindung im Boden unterliegt Nitrat unter begünstigenden Umständen einer relativ hohen Auswaschung. Die dabei entstehenden Nitratverlagerungen sind in diesem Zusammenhang als natürlicher Prozess anzusehen, der sowohl auf landwirtschaftlich genutzten Flächen als auch auf nichtlandwirtschaftlich genutzten Flächen auftritt. Die Verlagerung des Nitrats verläuft jedoch umso stärker, je mehr Stickstoff im Boden zum Zeitpunkt einer eingestellten oder beschränkten Stickstoffaufnahme der Pflanzen vorhanden ist. Besonders in der vegetationslosen niederschlagsreichen Zeit im Herbst und Winter ist die Gefahr der Nitraauswaschung erhöht. Wohingegen es in der Vegetationszeit sehr selten zu erhöhten Austrägen kommt. Das Ammonium wiederum unterliegt im Normalfall keiner hohen Auswaschung, da es durch seine positive Ladung in den Zwischenschichten von Tonmineralen ähnlich wie das Kalium gebunden oder meist

⁴⁷Amberger, Anton (1996): Pflanzenernährung. 4. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 155f

⁴⁸Succow, M., Jeschke, L. (1990): Moore in der Landschaft, Entstehung, Haushalt, Lebewelt, Verbreitung, Nutzung und Erhaltung der Moore. 2. Auflage. Urania-Verlag, Leipzig: S. 25

⁴⁹Amberger, Anton (1996): Pflanzenernährung. 4. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 156f

⁵⁰Schilling, Günther (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart: S 256f

sehr schnell zu Nitrat umgewandelt wird. Eine Ausnahme bilden jedoch die organischen Böden und die Sandböden. Da diese meist sehr arm an Tonmineralen sind, ist das Nährstoffbindungsvermögen in diesen Böden stark eingeschränkt.⁵¹ Ammonium, welches in den Zwischenschichten der Tonminerale fixiert ist, kann unter den Bedingungen eines starken Pflanzenwachstums und eines daraus resultierenden hohen Stickstoffverbrauchs im gewissen Maße mobilisiert werden.⁵²

6.2 Stickstoff in der Pflanze

Der Stickstoff zählt zur Gruppe der assimilierten Nährstoffe, sofern auch hier eine Einteilung nach den physiologischen Eigenschaften und Funktionen der Pflanzennährstoffe durchgeführt wird. Weitere Nährstoffe der Pflanze, die dieser Gruppe zugewiesen werden können, sind Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Schwefel. All diese Nährstoffe einschließlich des Stickstoffs müssen, wenn sie aus dem Boden oder der Atmosphäre aufgenommen werden, assimiliert werden. Für die Assimilation (Angleichung) der Nährstoffe ist ein chemischer Umbau dieser notwendig. Die Umformung der Nährstoffe geschieht unter enzymatischem Einfluss und ist direkt oder indirekt mit einer Oxidation oder Reduktion gekoppelt.⁵³ Pflanzen nehmen den Stickstoff hauptsächlich über die Wurzel in Form von Nitrat und Ammonium auf. Das aufgenommene Nitrat wird dabei zum Teil direkt über das Xylem aus der Wurzel in den Spross transportiert; übrig gebliebenes Nitrat wird meist direkt in der Wurzel zu Ammonium umgewandelt. Wie viel von dem aufgenommenen Nitrat unmittelbar im Wurzelapparat zu Ammonium reduziert wird, ist maßgeblich von der Pflanzenart abhängig. Der mengenmäßige Anteil bewegt sich etwa im Bereich zwischen 10 % und 50 %. Aus dem direkt aufgenommenen sowie aus dem aus Nitrat reduzierten Ammonium werden bereits in der Wurzel die ersten Aminosäuren gebildet, welche über die Leitbündel in die wachsenden Pflanzenteile transportiert werden. Dort werden weitere Aminosäuren gebildet, welche mit dem hier reduzierten Nitrat Eiweiße aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Aminosäuren bilden. Pflanzen sind in der Lage, die in den älteren Pflanzenteilen vorhandenen Proteine am Ende der Vegetationszeit abzubauen, um diese in die Fruchtkörper zu verlagern. Dort dienen sie, ebenso wie der noch über die Wurzel aufgenommene Stickstoff, der Bildung der Samenproteine.⁵⁴ Bei der Aufnahme des Pflanzennährstoffs besteht ein enger Zusammenhang zur Kaliumversorgung der Pflanze. Da das Kalium die Bildung der Nitratreduktase, die für die Reduktion von Nitrat benötigt wird, positiv beeinflusst. Somit kann durch eine ausreichende Kaliumversorgung gleichzeitig auch die unter Energieverbrauch ablaufende Stickstoffaufnahme verbessert

⁵¹ Schubert, Sven (2006): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. 2. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 109ff

⁵² Amberger, Anton (1996): Pflanzenernährung. 4. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 156

⁵³ Schubert, Sven (2006): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. 2. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart: S. 23

⁵⁴ Schilling, Günther (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart: S. 116f

werden (vgl. Kapitel 5.2).⁵⁵ Umfassend betrachtet ist der Stickstoff in der Pflanze ein essentieller Nährstoff, der für die Bildung der Amino- und Nukleinsäuren, der Proteine, Proteide und Nukleotide sowie des Chlorophylls und anderer sekundärer Pflanzennährstoffe notwendig ist. Somit beeinflusst der Stickstoff maßgeblich den Stoffwechsel der Pflanzen und ist demzufolge durch keinen anderen Nährstoff ersetzbar. In der Regel ist er mit ca. 1 % bis 5 % in der Trockensubstanz der Pflanzen enthalten. Tritt ein Mangel an Stickstoff auf, so wirkt sich dies negativ auf die Proteinbildung aus und beeinträchtigt damit das Wachstum der Pflanzen im großen Maß. Ist der Nährstoff in ausreichender Menge vorhanden, hat dies bis zu einem bestimmten Punkt und unter optimaler Versorgung mit den anderen Pflanzennährstoffen einen positiven Einfluss auf das Wachstum. Ein Mangel an Stickstoff spiegelt sich in Form einer starken Ertragsreduzierung wider. Grund dafür ist die Beeinträchtigung des vegetativen Wachstums und das Vorantreiben der reproduktiven Entwicklung. Visuell ist der Mangel durch das Grün- bis Gelbverfärbten bis hin zum Absterben der vorerst älteren Blätter zu erkennen.⁵⁶

6.3 Stickstoff im Wasser

Der Gehalt an Stickstoff in Gewässern bezieht sich auf anorganische Stickstoffverbindungen und kann in recht unterschiedlichen Größenordnungen vertreten sein. So liegen die Konzentrationen im Meerwasser bei bis zu 0,5 mg/l und in Flüssen bei etwa 0,25 mg/l, wobei diese Werte stark variieren können. Der größte Teil des Stickstoffs gelangt durch landwirtschaftliche Produktionsabläufe in das Oberflächenwasser sowie ins Grundwasser. Besonders das Nitrat gelangt aufgrund seiner sehr guten Wasserlöslichkeit häufig in die Gewässer. In erster Linie bereiten die Stickstoffverbindungen (Nitrat, Nitrit, Ammonium) im Wasser keine Probleme, da sie auch hier als wichtiger Nährstoff von den Pflanzen an und in Gewässern aufgenommen werden. In zu hoher Konzentration bewirken sie allerdings eine Eutrophierung der Gewässer, das sich wiederum negativ auf das vorhandene Ökosystem auswirkt. Im Trinkwasser hingegen sollten besonders die Nitratkonzentrationen nicht zu hoch sein. Zwar ist das Nitrat an sich für den menschlichen Körper recht ungefährlich, jedoch wird es unter bestimmten Bedingungen zu Nitrit reduziert und ist in dieser Form besonders für Säuglinge in höheren Konzentrationen von großer Gefahr.⁵⁷ Laut Trinkwasserverordnung gilt für das Nitrat im Nutzwasser ein Grenzwert von 50 mg/l und für das weniger gefährliche Ammonium ein Grenzwert von 0,5 mg/l.⁵⁸ Die tatsächlichen Konzentrationen im Trinkwasser

⁵⁵Bergmann, Werner (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart: S. 136

⁵⁶Bergmann, Werner (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart: S. 100ff

⁵⁷<http://www.lenntech.de/pse/wasser/stickstoff/stickstoff-und-wasser.htm> (03.12.2014; 12:48 Uhr)

⁵⁸<http://warl.de/index.php?modul=ModulService&action=HandleWasserlexikon#nitrat> (05.01.2015; 07:17 Uhr)

liegen meist weit unterhalb dieser Grenzwerte. Dabei ist das Ammonium in der Regel mit unter 0,05 mg/l und das Nitrat mit einer noch geringeren Konzentration von unter 0,01 mg/l im Trinkwasser enthalten (Werte aus dem Osthavelland). Diese Werte gelten ebenso für das Trinkwasser am Versuchsstandort Paulinenaue.⁵⁹

7 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden genaue Angaben zum durchgeführten Versuch gegeben. Dazu wird der Versuchsstandort der Forschungsstation Paulinenaue sowie der Versuchsaufbau detailliert beschrieben. Ebenso werden genaue Angaben zu der Lysimeteranlage gegeben, in der der gesamte Versuch durchgeführt wurde.

7.1 Versuchsstandort ZALF Forschungsstation Paulinenaue

Die Forschungsstation Paulinenaue befindet sich im Westen des Bundeslandes Brandenburg und liegt direkt am Rande des 87.000 ha großen Havelluchgebietes. Das Havelluchgebiet ist durch seine flach- bis mitteltiefgründige Niedermoorlandschaft gekennzeichnet und wird vorwiegend als Grünland genutzt. Das ZALF nutzt hier einige dieser Grünlandflächen zu Versuchszwecken, um Fragestellungen, die sich mit Grünland befassen, bearbeiten zu können. Durch die besondere Lage ist es möglich hier Forschung auf Niedermoor, hydromorphen Mineralböden und auf Flussauengrünland zu betreiben. Zu Versuchszwecken werden in Paulinenaue mehrere Herden an Nutztierrassen gehalten; unter anderem verschiedene Rinder- und Schafrassen, sowie landwirtschaftlich nutzbare Wildtiere, zu denen Rotwild, Damwild und Muffelwild gehören. Außerdem gehört eine der größten Grundwasserlysimeteranlagen Europas mit 103 Einzellysimetern zu der Forschungsstation.⁶⁰ Die Lysimeteranlage wurde im Jahr 1968 mit etwa der Hälfte der heutigen Anzahl an Einzellysimetern in Betrieb genommen. In den Lysimetern befinden sich Bodenprofile aus 65 Niedermoorböden- und 38 Mineralböden, die hauptsächlich monolithisch entnommen wurden. Die Niedermoorböden weisen verschiedene Eigenschaften auf und finden ihren Ursprung im Havelländischen Luch, Rhinluch, in der Friedländer Großen Wiese und dem Peenehaffmoor. Die Mineralböden hingegen stammen aus der unteren Havelniederung und dem Elbstromtal bei Wittenberg.⁶¹ Der Schwerpunkt der Lysimeteruntersuchungen in Paulinenaue liegt seit der Umstrukturierung im Jahr 1992 vorrangig bei der Renaturierung der Niedermoore und dem Stoffaustausch belasteter Grünlandböden. Die Kulturen, die in

⁵⁹ <http://www.owa-falkensee.de/trinkwasserqualitaet.html> (05.01.2015; 07:38 Uhr)

⁶⁰ <http://www.zalf.de/de/forschung/services/fos/bereiche/Seiten/paulinenaue.aspx> (01.08.13; 15:00 Uhr)

⁶¹ Behrendt, Axel et al (2009): Die Paulinenauer Grundwasserlysimeteranlage Entstehung, Funktion und Ergebnisse. In: Symposium 60 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue. Hrsg.: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue. S. 62

den Lysimetern angebaut werden sind Futterpflanzen, torfbildende Pflanzen und Pflanzen, die der Energiegewinnung dienen.⁶²

Der Standort ist durch eine Jahresniederschlagsmenge von 536 mm und eine Jahresmitteltemperatur von 9,2°C im langjährigen Mittel (1981-2010) gekennzeichnet. In der Vegetationsperiode (April-Oktober) lag die durchschnittliche Niederschlagsmenge bei 325 mm.⁶³

7.2 Versuchsbeschreibung

Der Lysimeterversuch zum Einfluss einer differenzierten Kaliumdüngung auf die Torfmineralisation und die Ausnutzung des daraus freigesetzten Stickstoffs auf Niedermoorgrünland wird in Paulinenaue bereits seit vielen Jahren durchgeführt. Insgesamt stehen für die Auswertung des Lysimeterversuchs die Daten aus sechs Versuchsjahren (2003-2008), welche in sechs Lysimetern erhoben wurden, zur Verfügung. Für eine bessere Versuchsauswertung sind alle Lysimeter in der Anlage mit Nummern versehen. In diesem Versuch wurden die Lysimeter 2, 8, 40, 43 sowie 46 und 50 genauer betrachtet. Um den für das Havelland typischen Grünlandstandort zu simulieren, befindet sich in den Lysimetern Niedermoorboden, ein hydromorpher Boden, welcher im Jahr 1968 monolithisch aus dem Havelländischen Luch entnommen wurde. In Brandenburg befinden sich ca. 90% des Grünlandes auf hydromorphen Böden, welche durch eine permanente Stickstofffreisetzung aus der Torfmineralisation und durch eine Kaliumarmut aufgrund des fehlenden Speichervermögens gekennzeichnet sind. Die Zusammensetzung des Bodens in den Lysimetergefäßen besteht aus Niedermoortorf, welcher von einem Mittel- bis Feinsand unterlagert ist. Die Trockenrohdichte liegt in Abhängigkeit von der Tiefe zwischen 0,43 g/cm³ und 0,38 g/cm³, der pH-Wert beträgt 6,6 und der Gehalt an organischer Substanz liegt in einer Bodentiefe von 0 cm bis 20 cm bei 59,5 % und in einer Bodentiefe von 20 cm bis 50 cm bei 64,2 %. Der Grundwasserstand in den sechs Lysimetern wurde über den gesamten Versuchszeitraum hinweg auf 80 cm unter Flur eingestellt, um so gleiche Bedingungen in den Gefäßen zu schaffen. In allen sechs Gefäßen wurde im Jahr 2002 eine Gräsermischung ausgesät, welche pro Gefäß aus Wiesenlieschgras (4,5 g), Wiesenrispe (4,5 g), Wiesenschweidel (3 g) und Weißes Straußgras (3 g) bestand. Die Düngung der Lysimeter erfolgte einmal jährlich im Frühjahr zum Vegetationsbeginn mit dem Kaliumdünger Kamex (33 % Kalium). Dabei wurden die Lysimeter 8 und 43 über den gesamten Versuchszeitraum ohne Düngung belassen. Die Lysimeter 2 und 46 hingegen wurden mit jeweils 15 g Kalium pro Jahr gedüngt und die Lysimeter 40 und 50 mit jeweils 30 g Kalium pro Jahr.

⁶² Behrendt, Axel et al (1999): 30 Jahre Paulinenauer Grundwasserlysimeter – eine Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse. Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Forschungsstation Paulinenaue. S. 76f

⁶³ Siehe Tabelle Witterung im Anhang

Mit der Erfassung der Daten wurde im Jahr 2003 begonnen, wobei der Ertrag sowie die Nährstoffgehalte im Grundwasser und in der geernteten Substanz im Vordergrund standen. Der Frischmasseertrag (ohne Wurzelmasse) ist jeweils zu vier bis fünf Schnittzeitpunkten in der Vegetationsperiode ermittelt worden. Nach der Bestimmung der Trockensubstanz wurden die Pflanzenproben gemahlen und anschließend auf die Inhaltsstoffe Stickstoff, Phosphor, Kalium und Kalzium durch bestimmte Aufschlussprozesse untersucht. Das abfließende Grundwasser, welches nach Niederschlägen entstand und durch den Boden floss, wurde aufgefangen und nach der Entnahme bis zum Zeitpunkt der Analyse tiefgefroren, um stoffliche Umsetzungsprozesse zu vermeiden. Mit Hilfe eines speziellen Analyseautomaten konnten die Wasserproben ebenfalls auf die Inhaltsstoffe Stickstoff, Phosphor, Kalium und Kalzium untersucht werden. Allerdings wurden in dieser Arbeit ausschließlich Stickstoff und Kalium betrachtet, was durch den thematischen Schwerpunkt zu begründen ist. Neben den Pflanzen- und Wasseruntersuchungen wurden täglich die Zufluss- und Abflusswassermengen der Lysimetergefäße dokumentiert. Außerdem befindet sich in unmittelbarer Nähe der Lysimeteranlage eine Wetterstation, welche ebenfalls Daten liefert, die zur Versuchsauswertung herangezogen werden können.

7.3 Lysimeter

„Lysimeter sind ummantelte Ausschnitte aus der Bodendecke. Es sind Messeinrichtungen, mit deren Hilfe Größen des Wasserhaushaltes, Vorgänge der Verdunstung, der Versickerung und der vorübergehenden Speicherung im Boden untersucht und quantifiziert werden können. Lysimeter dienen der Messung der Prozesse des Wasser-Stoffhaushaltes von Pflanzendecken und Boden.“⁶⁴ Die sich in der Forschungsstation Paulinenaue befindlichen Lysimeter sind zur Oberseite offene Zylinder, die durch eine Oberflächengröße von 1m² und einer Tiefe von 150 cm gekennzeichnet sind. Für die Befüllung der Lysimeter wurden verschiedene Niedermoor- und Gleyböden verwendet, die vorrangig in einem Stück entnommen wurden, ohne das Bodenprofil zu zerstören. In dem Lysimetergefäß können während der Vegetationsperiode durch Einspeisung von Zusatzwasser unterschiedliche Grundwasserstände simuliert werden. Zur Einspeisung werden Glasballons zur Hilfe herangezogen, die oberhalb des Versuchsgefäßes aufgestellt sind und einen Zufluss in den Bereich des Grundwassers besitzen (siehe Abb. Lysimeter). Um den vorgesehenen Grundwasserstand auf dem gleichen Niveau zu halten, müssen diese je nach Bedarf täglich mit Zusatzwasser befüllt werden. Niederschlagswasser, das den Boden durchfließt, lässt den Grundwasserpegel ansteigen, woraufhin das erhöhte Grundwasser abfließt,

⁶⁴ Behrendt, Axel et al (2009): Die Paulinenauer Grundwasserlysimeteranlage Entstehung, Funktion und Ergebnisse. In: Symposium 60 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue. Hrsg.: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue. S. 62

aufgefangen wird und auf seine Inhaltsstoffe analysiert werden kann. Anfallende Mengen an Zufluss- und Abflusswasser werden täglich dokumentiert. Zu der Lysimeteranlage gehört eine in unmittelbarer Nähe errichtete Wetterstation, in der: Niederschlag, Lufttemperatur (in 2 m Höhe und 5 cm über dem Boden), relative Luftfeuchte, Bodentemperatur, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und Kesselverdunstung gemessen werden.⁶⁵

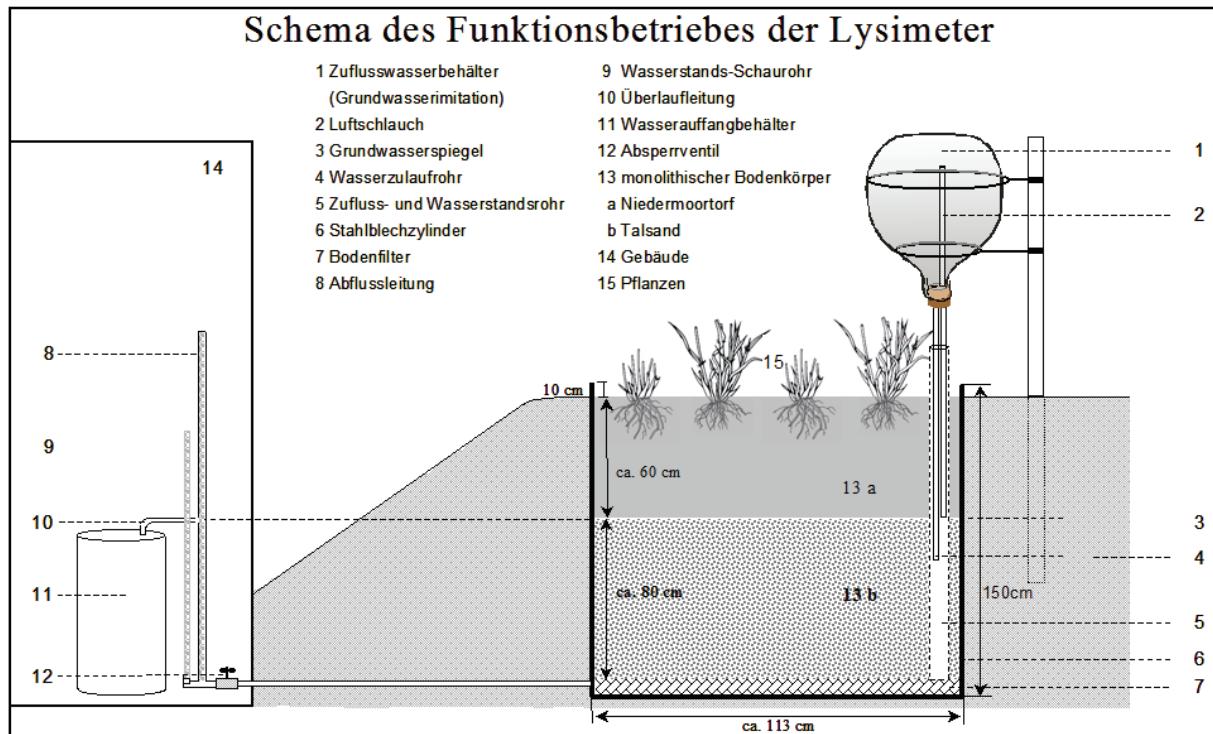


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lysimeteranlage in Paulinenau, 2001, 30 Jahre Paulinenauer Grundwasserlysimeter-Eine Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse: S. 54

⁶⁵ Schalitz, Gisbert et al (1996): 25 Jahre Lysimeterforschung in Paulinenau und Neukonzipierung der Untersuchungen 1992. In: ZALF-Bericht Nr. 26 Stoffhaushalt von Niedermooren und hydromorphen Mineralböden des nordostdeutschen Tieflandes. Hrsg.: Schalitz et al. Müncheberg S. 6

8 Versuchsergebnisse

Ausgangspunkt für den Versuch ist die Hypothese, dass es auf Niedermoorgrünland aufgrund des Mangels an Kalium zu einer suboptimalen Ausnutzung des aus der Mineralisation des Torfes freigesetzten Stickstoffs kommt und des Weiteren dadurch auch der Eintrag des Stickstoffs in das Grundwasser begünstigt wird. Um diese Vermutung darzustellen und zu begründen, wurden verschiedene Daten über den Versuchszeitraum von sechs Jahren ermittelt und anschließend ausgewertet. Im Mittelpunkt standen dabei die unter den verschiedenen Düngungsstrategien (Variante 1: 0 g Kalium/m², Variante 2: 15 g Kalium/m², Variante 3: 30 g Kalium/m²) erzielten Erträge sowie Pflanzeninhaltsstoffe. Ebenso konnte der Eintrag der Nährstoffe in das Grundwasser sowie die Nährstoffkonzentration des Sickerwassers betrachtet werden, um auch den Aspekt des Grundwasserschutzes berücksichtigen zu können. In den nachfolgenden Kapiteln (8.1 bis 8.9) werden die Versuchsergebnisse dargestellt, welche innerhalb des Versuchszeitraums (2003 bis 2008) mit Hilfe der Lysimeteruntersuchungen ermittelt wurden.

8.1 Kaliumeintrag

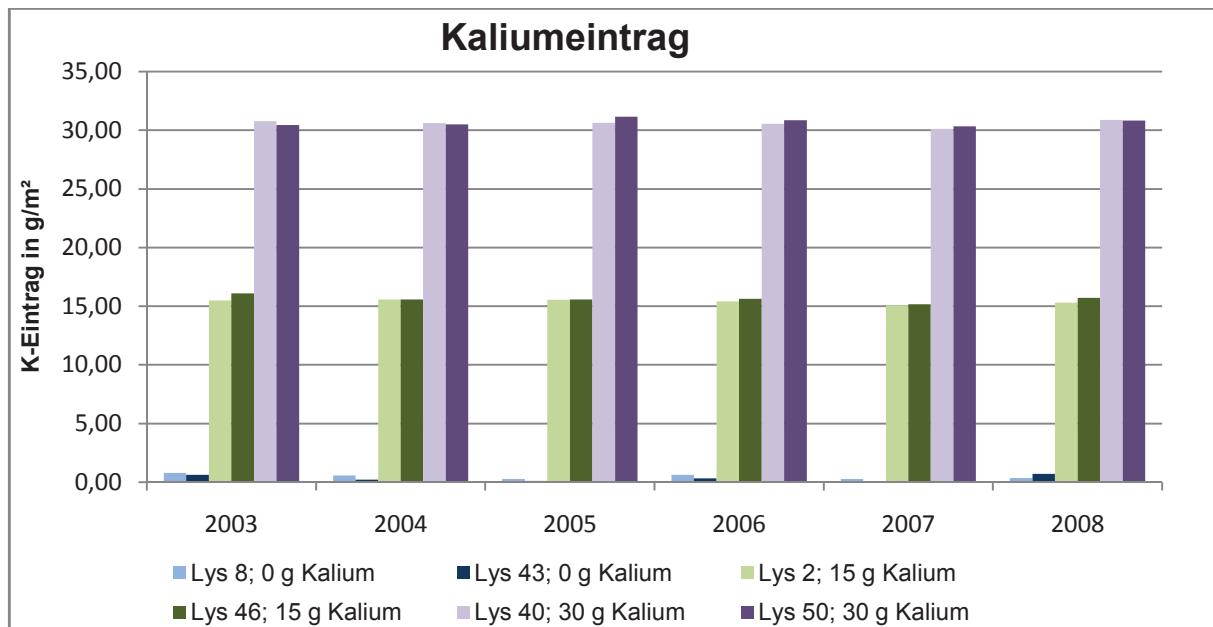


Abbildung 2: Jährlicher Kaliumeintrag aus Düngung und Zuflusswasser der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g/m² in den Boden (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)

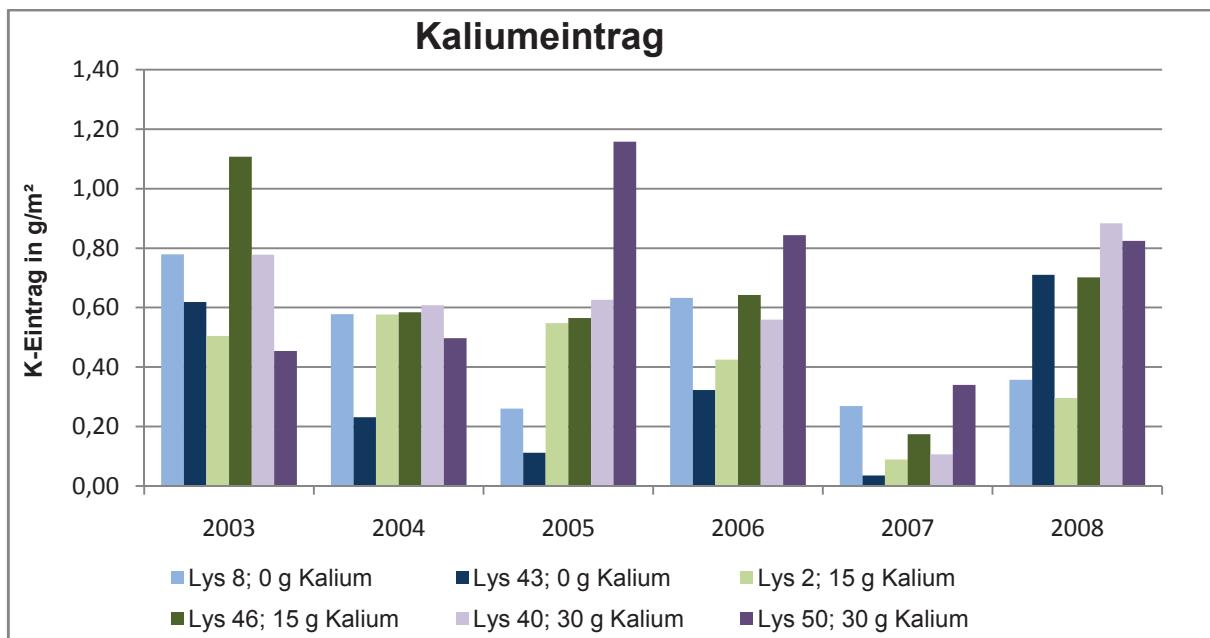


Abbildung 3: Jährlicher Kalumeintrag aus dem Zuflusswasser in g/m² in den Boden (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)

In den Abbildungen 2 und 3 wird der Kalumeintrag in die einzelnen Lysimeter für die jeweiligen Versuchsjahre dargestellt. Dabei wurden in der Abbildung 2 die gesamten Kaliummengen dargestellt und in der Abbildung 3 die Mengen an Kalium, welche allein aus dem Zuflusswasser (Leitungswasser) stammen. Diese Unterteilung wurde durchgeführt, um zu verdeutlichen, in welcher Größenordnung Kalium neben dem Eintrag über den Dünger auch über das Zuflusswasser in die Lysimeter gelangt. Wird zunächst einmal nur die Abbildung 2 betrachtet, so sind die unterschiedlichen Kalium-Düngungsvarianten anhand der differenzierten Größenordnungen gut erkennbar. Variante 1: Lysimeter 8 und 43 wurden mit 0 g Kalium pro m² gedüngt, Variante 2: Lysimeter 2 und 46 mit 15 g Kalium pro m² und Variante 3: Lysimeter 40 und 50 mit 30 g Kalium pro m². Werden die Eintragsmengen jedoch genauer betrachtet, wird schnell ersichtlich, dass die Mengen nicht mit den jeweiligen Dünge Mengen an Kalium übereinstimmen. So wurden bei den beiden Lysimetern (Variante 1), die ohne Düngung blieben trotzdem geringe Mengen an Kalium eingetragen. Der Kalumeintrag bewegte sich hier jedoch in jedem Fall im Bereich von unter 1 g Kalium pro m². Schaut man nun auf die Werte der Variante 2, so ist auch hier ein geringer Unterschied zwischen der gedüngten Menge an Kalium und der tatsächlich eingetragenen Menge an Kalium festzustellen. Über die gesamten sechs Versuchsjahre hinweg liegen die Kalumeinträge bei etwa 15,5 bis 16 g pro m². Auch die Variante 3 weist einen minimalen Unterschied zwischen gedüngter und tatsächlich eingetragener Menge an Kalium auf. In beiden Lysimetern befinden sich die Einträge an Kalium in jedem Versuchsjahr im Bereich von etwa 31 g pro m² und liegen damit 1 g pro m² über der angestrebten Dünge menge. Diese Gegebenheit verdeutlicht, dass der Gesamtkalumeintrag nicht mit der Kaliumdünge menge gleichzusetzen ist, sondern auch der Anteil, der über

das Zuflusswasser hinzukommt, mit einberechnet werden muss. Aus diesem Grund wird der Kaliumeintrag durch das Zuflusswasser gesondert dargestellt. Betrachtet man die Abbildung 3, in der allein der Kaliumeintrag über das zugeführte Leitungswasser aufgezeigt ist, wird schnell klar, in welcher Größenordnung das Zuflusswasser Kalium in die Lysimeter einträgt. Bei der Variante 1 liegt der Kaliumeintrag durch das Zuflusswasser über den gesamten Versuchszeitraum hinweg bei etwa 0,1 g bis 0,7 g pro m². Die Kaliumeinträge der Variante 2 und der Variante 3 erreichen Werte, die in Einzelfällen bei über 1 g pro m² liegen. Die geringen Differenzen im Kaliumeintrag über das Zuflusswasser entstehen durch die häufig verschiedenen Mengen an Zuflusswasser, die in den Lysimetern der unterschiedlichen Varianten benötigt werden. Rechnet man die Gesamteinträge des Kaliums pro m² in kg pro ha um, so würden bei der Variante 1 bis zu 7 kg/ha zur Verfügung stehen und bei der Variante 2 etwa 160 kg/ha sowie bei der dritten Variante ungefähr 310 kg/ha.

8.2 Kaliumaustrag

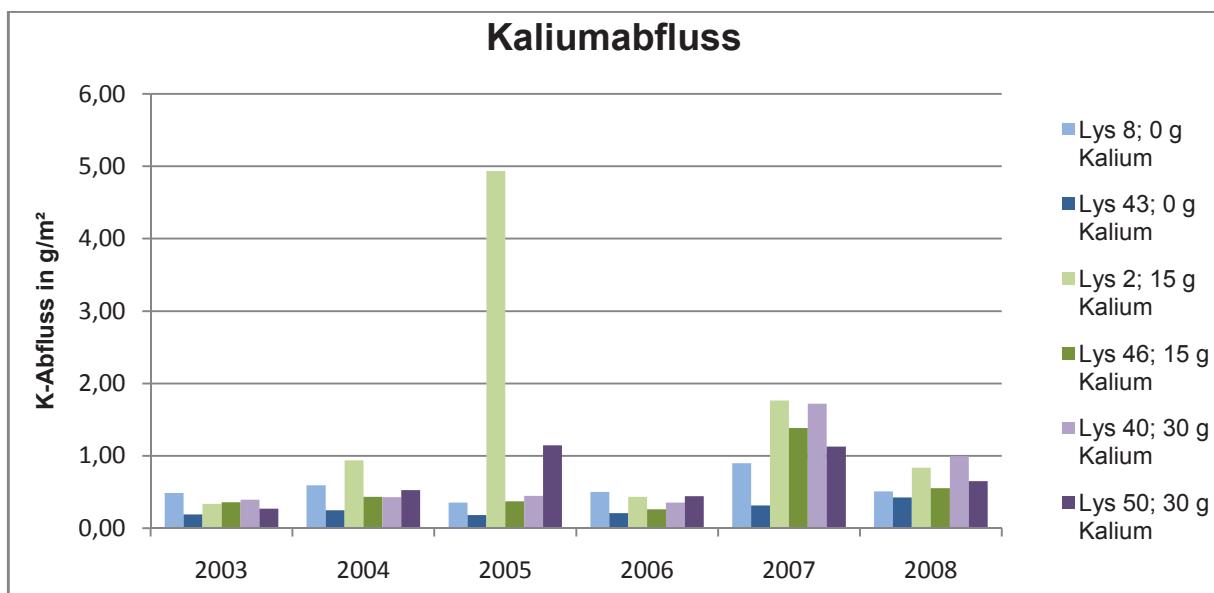


Abbildung 4: Jährlicher Kaliumabfluss der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g/m² in das Grundwasser (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)

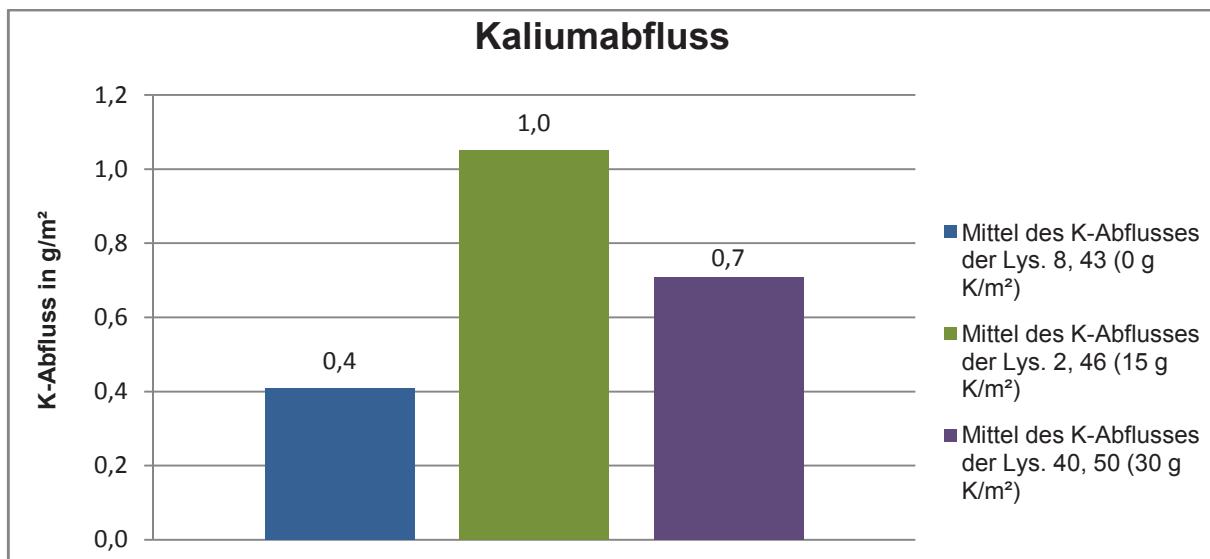


Abbildung 5: Mittel des Kaliumabflusses der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten in das Grundwasser aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g/m²

Nachfolgend wird der Kaliumaustrag in das Grundwasser anhand der oben aufgeführten Diagramme dargestellt und beschrieben. In der Abbildung 4 ist der jährliche Kaliumabfluss der drei unterschiedlichen Düngevarianten für jeden Lysimeter aufgezeigt. Werden die dort vorhandenen einzelnen Werte miteinander verglichen, ist ein eindeutiges Ergebnis zu erkennen. Mit Ausnahme von zwei Versuchsjahren liegen die Kaliumausträge in jedem Jahr in allen Lysimetern in einer Größenordnung, die das Ausmaß von 1 g Kalium/m² nicht überschreiten. Allein in den Jahren 2005 und 2007 kam es zu Kaliumausträgen, die über 1 g/m² lagen. Diese höheren Werte wurden allerdings ausschließlich in den Lysimetern ermittelt, die mit einer Düngung von Kalium versehen wurden (Lys.: 2, 46, 40, 50). Aber auch hier waren die Austräge von geringer Größe und überschritten die 2 g/m² nur in einem Lysimeter. Im Lysimeter 2 wurde im Jahr 2005 ein Kaliumaustrag von fast 5 g/m² ermittelt. Dieser, im Vergleich zu den anderen Lysimetern relativ hohe Wert, ist vermutlich auf äußere Einflüsse (Exkreme, verendete Kleintiere etc.) zurückzuführen. Ein bemerkenswerter Unterschied im Kaliumaustrag zwischen den unterschiedlich hoch gedüngten Varianten ist jedoch nicht zu erkennen. Die Werte der Auswaschung in den Lysimetern ohne Düngung liegen meist nur gering unter oder auf dem etwa gleichen Niveau wie die Werte aus den gedüngten Lysimetern, wenn berücksichtigt wird, dass der außergewöhnlich hohe Wert von Lysimeter 2 aus dem Jahr 2005 vermutlich durch äußere Umwelteinflüsse zustande kam. Lediglich minimale Schwankungen über die einzelnen Versuchsjahre hinweg sind sowohl innerhalb der einzelnen Varianten zu verzeichnen als auch zwischen den verschiedenen Varianten. Festzuhalten sei nur, dass ausschließlich die gedüngten Varianten Auswaschungsergebnisse von über 1 g Kalium/m² erreichen. Ein ähnliches Ergebnis wird auch ersichtlich, wenn das Diagramm in der Abbildung 5 betrachtet wird. In diesem Diagramm ist ein Mittelwert des Kaliumaustrags der drei verschiedenen

Varianten aufgezeigt. Dieser wurde für jede Variante jeweils aus den jährlich ermittelten Werten aus den beiden zugehörigen Lysimetern gebildet. Im Mittel liegt der Kaliumaustrag demzufolge bei keiner Düngungsvariante über einem Wert von 1 g Kalium/m². Auch hier ist der Unterschied zwischen den beiden gedüngten Varianten und der ungedüngten Variante nur gering, dennoch deutlich zu erkennen. Der Kaliumaustrag liegt bei der ungedüngten Variante im Mittel bei 0,4 g/m² und bei der Variante 2 (15 g Kalium) bei 1 g/m² sowie bei der Variante 3 (30 g Kalium) bei 0,7 g/m². Ungewöhnlich erscheint dabei die Tatsache, dass der Kaliumaustrag der Variante 2 höher liegt, als der der Variante 1. Dies ist jedoch vermutlich auf den sehr hohen Wert aus dem Jahr 2005 von Lysimeter 2 zurückzuführen, der durch äußere Einflüsse bedingt wurde und für eine Erhöhung des Mittelwertes verantwortlich ist. Grundsätzlich sei zu erwähnen, dass die Kaliumausträge in den gedüngten Lysimetern im Mittel nur um 0,3 g/m² (Variante 3) bzw. 0,6 g/m² (Variante 2) höher liegen, als die Kaliumausträge in den ungedüngten Lysimetern. Betrachtet man die extrem unterschiedlich hohen Kaliumeinträge durch die Düngung und das Zuflusswasser (vgl. Abb. 2), so sind die Kaliumausträge zwar höher in den gedüngten Lysimetern, jedoch im Verhältnis zur Größenordnung der Düngung, die in diesen Lysimetern stattfand, nur unwesentlich höher.

8.3 Trockenmasseertrag und Kalumentzug

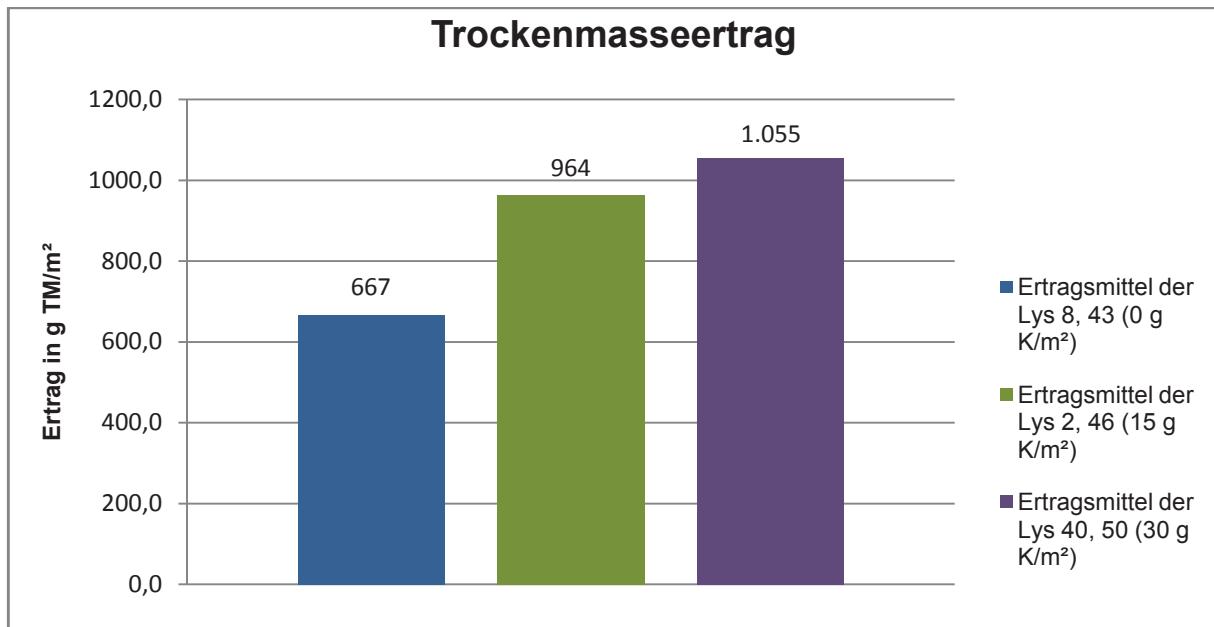


Abbildung 6: Mittel des Trockenmasseertrags der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g TM/m²

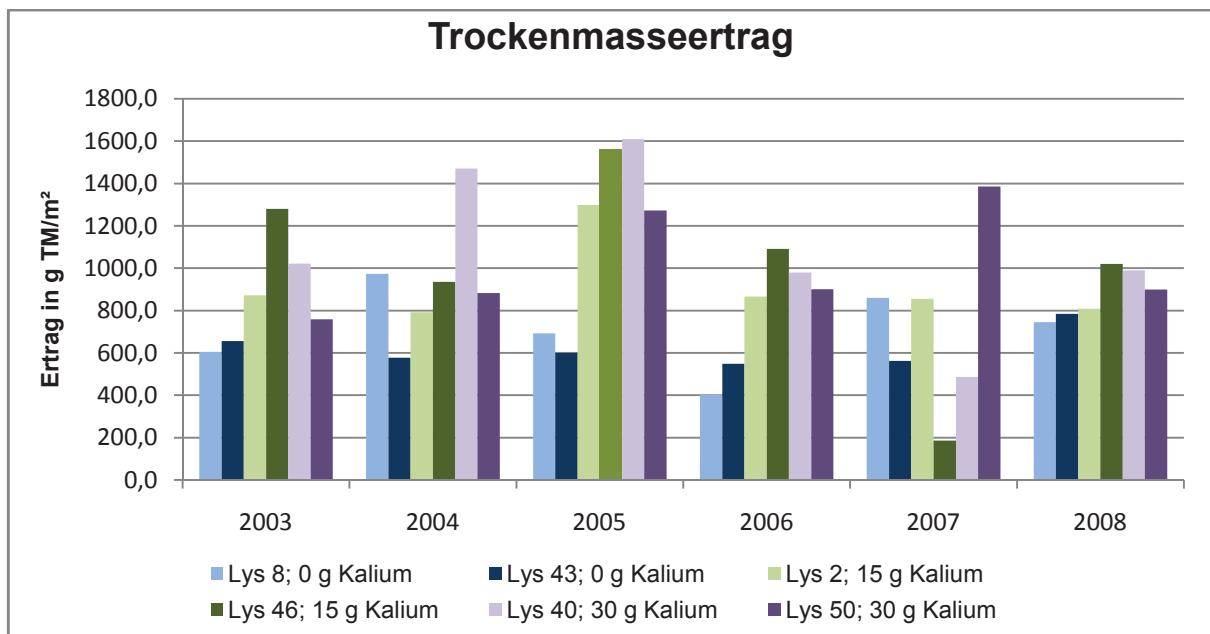


Abbildung 7: Jährlicher Trockenmasseertrag der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g TM/m² (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)

In diesem Kapitel werden die in den Lysimetern unter den verschiedenen Düngevarianten erzielten Trockenmasseerträge sowie die damit verbundenen Kalumentzüge durch das geerntete Pflanzenmaterial betrachtet. Zunächst liegt der Fokus dabei auf den Trockenmasseerträgen, da durch deren Betrachtung in erster Linie Rückschlüsse auf den Einfluss der Kaliumdüngung auf die Ertragsbildung getätigt werden können. Dazu wurden in der Abbildung 6 vorerst die mittleren Trockenmasseerträge der drei Düngevarianten dargestellt. Diese wurden aus den jährlich ermittelten Werten der beiden zugehörigen Lysimeter jeder Variante gebildet. Werden nun diese drei Mittelwerte der erzielten Trockenmasseerträge miteinander verglichen, ist ein unbestreitbares Ergebnis zu verzeichnen. Die Variante 1, die ohne Düngung belassen wurde, weist mit 667 g TM/m² den geringsten Trockenmasseertrag auf. Die Erträge der gedüngten Varianten (2 und 3) liegen beide weitaus höher als die der Variante 1. Mit 964 g TM/m² ist der Ertrag der Variante 2 rund 45 % höher als der der Variante 1. Der Trockenmasseertrag der Variante 3 liegt mit 1.055 g TM/m² sogar um 58 % höher als der der ungedüngten Variante. Demzufolge ist auch ein Ertragsunterschied zwischen den beiden gedüngten Varianten vorhanden. Der Ertrag der Variante 3, die im Vergleich zur Variante 2 (15 g Kalium/m²) mit der doppelten Düngergabe (30 g Kalium/m²) versehen wurde, ist jedoch nur um weitere 9 % höher als der Ertrag der Variante 2. Auf einem Hektar Niedermoorgrünland würden demnach ohne Düngung 6,7 t TM geerntet werden. Durch eine entsprechende Düngung kann dieser Ertrag nachweislich gesteigert werden. Bei der Variante 2 wären es bereits 9,6 t TM/ha und bei der dritten Variante 10,6 t TM/ha. Um die Aussagekraft der Mittelwerte in Abbildung 6 zu verstärken, sind in der Abbildung 7 die jährlichen Trockenmasseerträge der einzelnen Lysimeter dargestellt. In dieser Abbildung ist klar erkennbar, dass die Erträge der Lysimeter

der Variante 1 in vier der sechs Versuchsjahre deutlich unter den Erträgen der beiden anderen Varianten liegen. In dem Jahr 2004 sticht lediglich der Ertrag des ungedüngten Lysimeter 8 durch einen relativ hohen Wert von 973 g TM/m² heraus, da dieser in diesem Versuchsjahr nach dem Ertrag von Lysimeter 40 der zweithöchste ist. Dieser hohe Ertrag könnte auf äußere Umwelteinflüsse (Nährstoffeintrag durch Exkreme etc.) zurückzuführen sein. Im Jahr 2007 sind die Auffälligkeiten innerhalb der Erträge vermutlich mit der Neuansaat in den Lysimetern zu begründen. Diese wurde in dem Versuchsjahr in Lysimeter 2, 8, 40, 46 und 50 aufgrund von Auswinterungsschäden durchgeführt. Zusammenfassend ist zu vermerken, dass eine Kaliumdüngung in den mit Niedermoorgrünland versehenen Lysimetern maßgeblich die Ertragsbildung beeinflusst. Sowohl durch die in der Abbildung 6 aufgezeigten mittleren Erträge der drei Düngungsvarianten als auch durch die in der Abbildung 7 aufgezeigten jährlichen Erträge der einzelnen Lysimeter jeder Variante ist die positive Wirkung der Kaliumdüngung im Bezug auf die Ertragsbildung in bemerkenswerter Weise zu erkennen. Auch die statistische Auswertung der Daten der drei Varianten im Vergleich mit Hilfe des t-Tests⁶⁶ zeigt ein eindeutiges Ergebnis. Der Vergleich der Variante 1 mit der Variante 3 ergibt einen hochsignifikanten Unterschied, da ein p-Wert⁶⁷ von $p = 0,001$ ermittelt wurde. Der Vergleich der Variante 1 mit der Variante 2 zeigt mit einem p-Wert von $p = 0,012$ ebenfalls einen signifikanten Unterschied. Zwischen den beiden gedüngten Varianten konnte jedoch keine Signifikanz festgestellt werden ($p = 0,509$).

Werden nun die Kaliumgehalte der geernteten Trockenmasse von einem m² für die drei unterschiedlichen Varianten zur Auswertung hinzugezogen, wird ersichtlich, dass, wie vermutet und aus verschiedener Literatur bereits bestätigt, auf Niedermoorstandorten Kaliummangelbedingungen vorherrschen. Allein durch die Auswertung, der in Abbildung 8 gezeigten mittleren Kaliumgehalte der drei Varianten, kann diese Vermutung bestätigt werden. Die Mittel der Kaliumgehalte in der geernteten Trockensubstanz der verschiedenen Düngungsvarianten unterscheiden sich maßgeblich. Mit Steigerung der Kaliumaufwandmenge steigt auch der Gehalt an Kalium in dem Pflanzenmaterial. Demnach ist der Kaliumgehalt in der geernteten Trockenmasse der ungedüngten Variante mit Abstand am geringsten. Hier liegt der Gehalt an Kalium im Mittel bei nur 7 g. Der Gehalt, der bei der zweiten Variante ermittelt wurde, liegt bereits bei 18 g und ist somit mehr als doppelt so hoch. Das Ergebnis der Variante 3 sticht besonders heraus, da hier ein Mittelwert errechnet wurde, der mehr als viermal so hoch ist, wie der der Variante 1. Demzufolge unterscheiden sich auch die Gehalte der beiden gedüngten Varianten maßgeblich. Der Kaliumgehalt der Variante 2 liegt bei etwas weniger als nur Zweidritteln von dem Gehalt, der im Mittel bei der Variante 3 erhoben wurde. Durch die Betrachtung der in Abbildung 9 aufgezeigten jährlich

⁶⁶ Er kann verwendet werden, um zu bestimmen, ob zwei Stichproben sich statistisch signifikant unterscheiden.

⁶⁷ Für die Überprüfung des signifikanten Unterschieds wird ein Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ verwendet. Ist der p-Wert kleiner als der α -Wert, so ist das Testergebnis statistisch signifikant. Somit kann ausgeschlossen werden, dass die ermittelten Ergebnisse alleine auf einen Zufall basieren.

erhobenen Kaliumgehalte für jeden Lysimeter wird dieses Ergebnis bestätigt. Mit der Ausnahme von Lysimeter 46 im Jahr 2007 liegen die Kaliumgehalte in den ungedüngten Lysimetern immer unter denen, der gedüngten. Dieser Ausreißer ist vermutlich wieder mit der Neuansaat in diesem Versuchsjahr zu begründen. Auch die Kaliumgehalte der Variante 2 liegen, wie bereits anhand des gebildeten Mittelwertes ersichtlich wurde, fast in jedem Versuchsjahr um einiges unter denen der Variante 3. Die statistische Auswertung durch die Anwendung des t-Tests ergab folgende Ergebnisse: Der Vergleich der Variante 1 mit der Variante 3 zeigt einen signifikanten Unterschied ($p = 0,000$), der Vergleich von Variante 1 und Variante 2 ebenso ($p = 0,000$) und auch zwischen den beiden gedüngten Varianten wurde ein signifikanter Unterschied ermittelt ($p = 0,001$). Festzuhalten ist folgendes Ergebnis: Durch die Betrachtung der ausgewerteten Darstellungen in diesem Kapitel ist ein klarer Zusammenhang zwischen Kaliumdüngung und Kaliumgehalt der Trockenmasse sowie der Ertragsbildung zu erkennen (vgl. Abb. 6 bis 9). Die ungedüngte Variante ist dabei sowohl durch sehr niedrige Erträge als auch durch die niedrigsten Kaliumentzüge durch das Pflanzenmaterial gekennzeichnet. Wohingegen die beiden gedüngten Varianten mit deutlich höheren Kaliumgehalten und auch Erträgen auffallen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden gedüngten Varianten konnte nur bezüglich des Kaliumgehalts in der Trockenmasse, jedoch nicht bei der Betrachtung des Ertrags festgestellt werden.

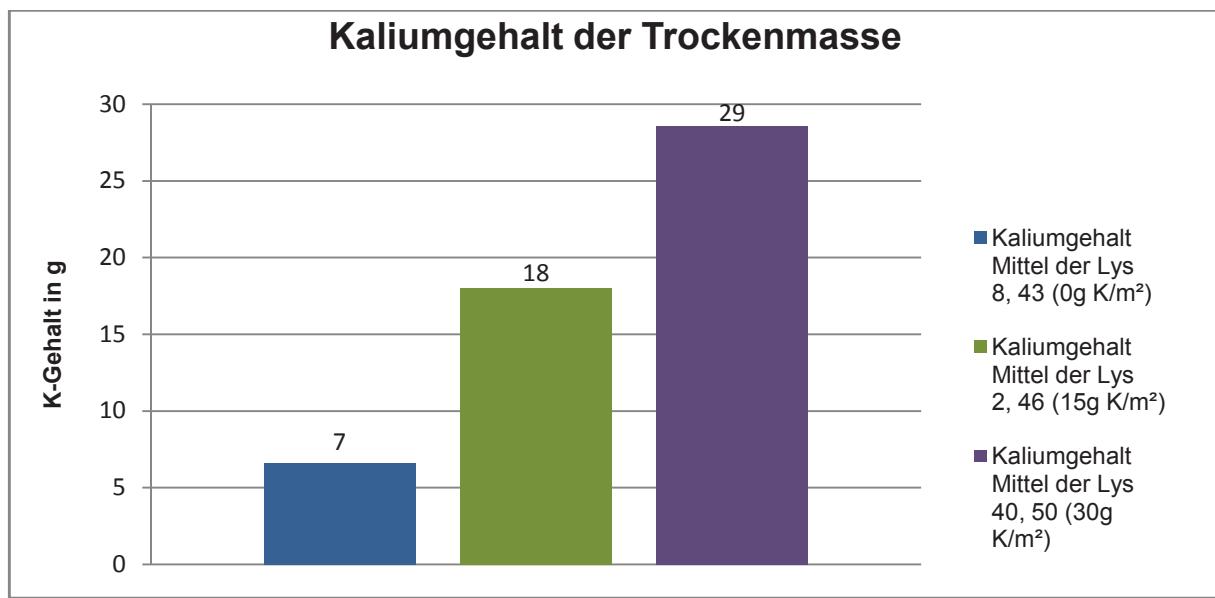


Abbildung 8: Mittel des Kaliumgehalts der von 1 m² geernteten Trockenmasse der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g

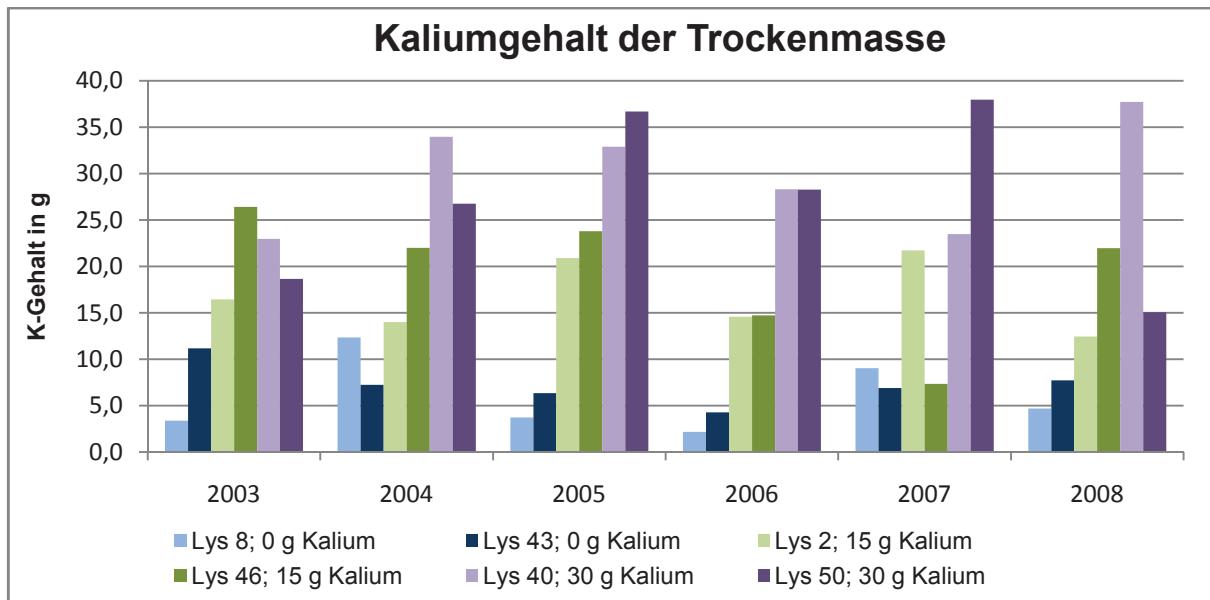


Abbildung 9: Jährlicher Kaliumgehalt der von 1 m² geernteten Trockenmasse der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)

8.4 Kalumbilanz

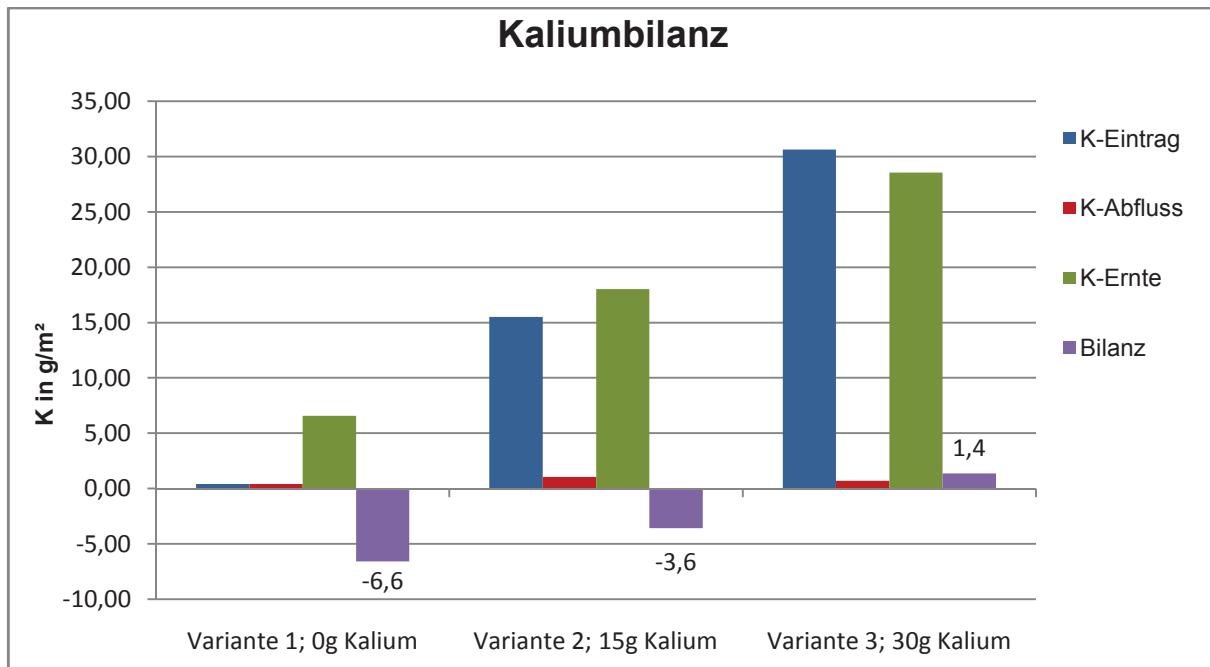


Abbildung 10: Kalumbilanz der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten im Mittel aus den Jahren 2003 bis 2008

In der oben aufgeführten Abbildung 10 wurde für jede Düngungsvariante eine Bilanz erstellt, um somit die Kaliummengen, die in den Lysimetern ein- und ausgetragen wurden, zusammenfassend betrachten und vergleichen zu können. Ebenso wird dadurch ein Überblick über die jeweiligen Größenordnungen ermöglicht. Die einzelnen Bilanzen für die unterschiedlichen Varianten setzen sich aus zuvor gebildeten Mittelwerten zusammen, welche aus den Daten der sechs Versuchsjahre der jeweiligen Lysimeter hervorgehen.

Um die Kalumbilanzen repräsentabel darzustellen, wurde der Kaliumeintrag, welcher sich aus der Düngermenge und der Menge an Kalium im Zuflusswasser zusammensetzt, für die einzelnen Varianten aufgezeigt. Außerdem mussten die Werte des Kaliumabflusses in das Grundwasser sowie der Kalumentzug über die geerntete Trockensubstanz mit in die Bilanz einbezogen werden. Die so entstandenen Bilanzen zeigen ein nicht unerwartetes Ergebnis. Die Kalumbilanz der Variante 1, die ohne Düngung belassen wurde, ist mit -7 g Kalium/m² zweifelsfrei als negativ anzusehen. Dabei erfolgt fast der gesamte Entzug an verfügbarem Kalium über das abgeerntete Pflanzenmaterial. Lediglich ein sehr geringer Teil von 0,4 g Kalium/m² geht durch Auswaschung verloren. Anders sieht es bei der Bilanz der Variante 2 aus. Durch den viel höheren Kaliumeintrag aus Düngung und Zuflusswasser (etwa 16 g) ist die Kalumbilanz dieser Variante zwar immer noch negativ, jedoch bereits deutlich verbessert. Abzüglich des Kalumentzugs über Auswaschung und geerntetem Pflanzenmaterial bleibt im Mittel ein Minus von 3,6 g Kalium/m² übrig. Hier liegt jedoch auch der Anteil an Kalium höher, der von den Pflanzen aufgenommen wurde. Über das geerntete Pflanzenmaterial wurden durchschnittlich 18 g Kalium/m² entzogen. Die insgesamt von den Pflanzen aufgenommene Menge an Kalium konnte demzufolge nicht vollständig durch die Kaliumdüngung kompensiert werden. Der Verlust durch die Auswaschung ist mit 1 g Kalium/m² nur gering am Entzug beteiligt. Die Kalumbilanz der Variante 3 hingegen fällt, bedingt durch den hohen Kaliumeintrag, positiv aus. Im Mittel wurde hier eine Bilanz von 1,5 g Kalium/m² errechnet. Das von einem m² geerntete Pflanzenmaterial der Variante 3 enthielt durchschnittlich 29 g Kalium. Die Kaliumauswaschung spielt wie bei der Variante 1 und 2 auch bei der letzten Variante nur eine untergeordnete Rolle, da der Mittelwert mit 0,7 g/m² nur sehr gering ausfällt. Zu bemerken ist, dass der Kaliumgehalt in der geernteten Trockensubstanz mit der Erhöhung der verfügbaren Kaliummenge von Variante 1 bis zu Variante 3 ansteigt. Sowohl bei der Variante 1 als auch bei der Variante 2 wird mehr Kalium durch den Pflanzenbestand entzogen als eingetragen wurde. Einzig bei der Variante 3 wird das Kalium nicht vollständig von den Pflanzen aufgebraucht. Das Ausmaß der Auswaschung verändert sich trotzdem nicht.

8.5 Stickstoffeintrag

In dem Diagramm der Abbildung 11 ist der Stickstoffeintrag durch das Zuflusswasser in die Lysimeter dargestellt. Dazu wurden Mittelwerte aus den erhobenen Daten der sechs Versuchsjahre für jede der drei Varianten gebildet. Diese Darstellung dient ausschließlich dazu, einen Überblick über das Ausmaß des Stickstoffeintrags durch das Zuflusswasser zu geben. Es soll verdeutlicht werden, wie gering der Anteil des eingetragenen Stickstoffs an dem Stickstoff ist, welcher aus der Torfmineralisation hervorgeht. Dies wird ersichtlich,

wenn die hier aufgeführten Werte mit den Werten des Stickstoffgehalts in der geernteten Trockenmasse (vgl. Abb. 15) und mit den Werten der Stickstoffauswaschung (vgl. Abb. 13) verglichen werden. Die Größenordnung, in der Stickstoff durch das Wasser eingetragen wurde, ist in allen drei Varianten sehr gering. Das Mittel der Variante 1 liegt bei $0,15 \text{ g/m}^2$, das der Variante 2 bei $0,19 \text{ g/m}^2$ und das der Variante 3 bei $0,22 \text{ g/m}^2$. Die leichte Steigerung der Werte mit der steigenden Düngergabe ist vermutlich auf den Mehrverbrauch an Zuflusswasser zurückzuführen. Werden nun die Mittelwerte des in der Abbildung 15 aufgezeigten Stickstoffgehalts in der von einem m^2 geernteten Trockensubstanz hinzugezogen (Variante 1: $16,7 \text{ g/m}^2$, Variante 2: $23,9 \text{ g/m}^2$, Variante 3: $26,1 \text{ g/m}^2$) und auch die Mittelwerte des Stickstoffaustrages pro m^2 aus der Abbildung 13 (Variante 1: $2,4 \text{ g/m}^2$, Variante 2: $1,3 \text{ g/m}^2$, Variante 3: $0,3 \text{ g/m}^2$), so ist deutlich erkennbar, dass die Stickstoffmengen, die in den Lysimetern der einzelnen Varianten zur Verfügung standen, weitaus über den durch das Zuflusswasser eingetragenen Mengen liegen. Demzufolge stammen nur etwa 1 % des in den Gefäßen vorhandenen Stickstoffs aus dem Zuflusswasser und der gesamte Rest aus den Mineralisationsvorgängen in den Lysimetern.

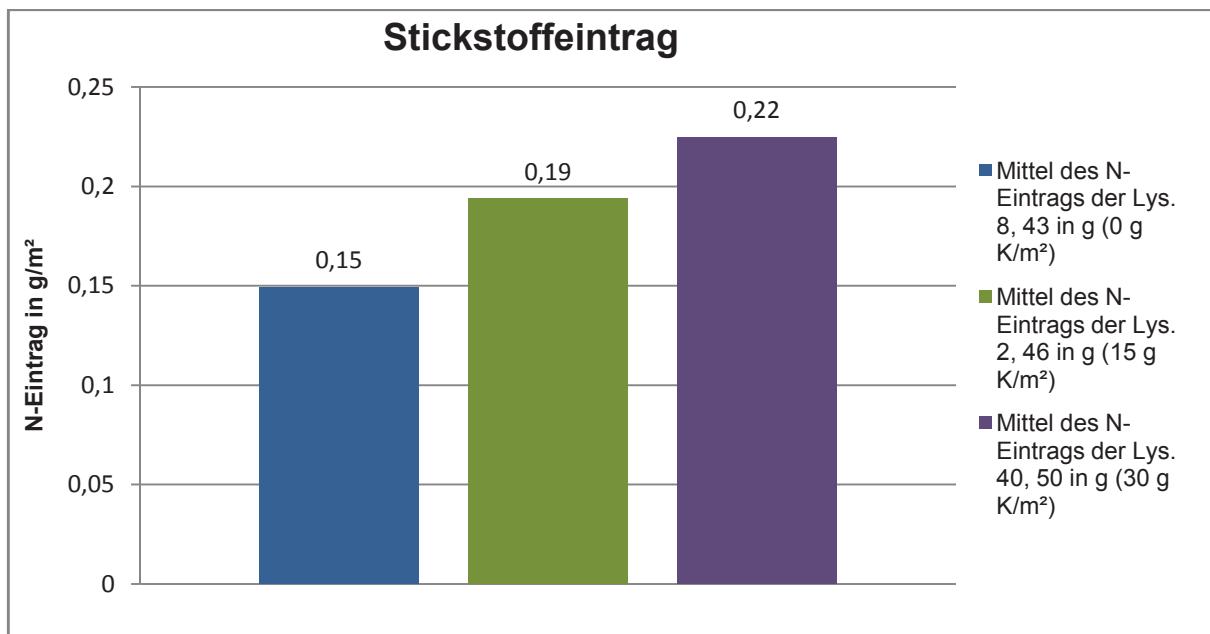


Abbildung 11: Mittel des Stickstoffeintrags aus dem Zuflusswasser der drei Varianten in g/m^2 in den Boden (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)

8.6 Stickstoffaustrag

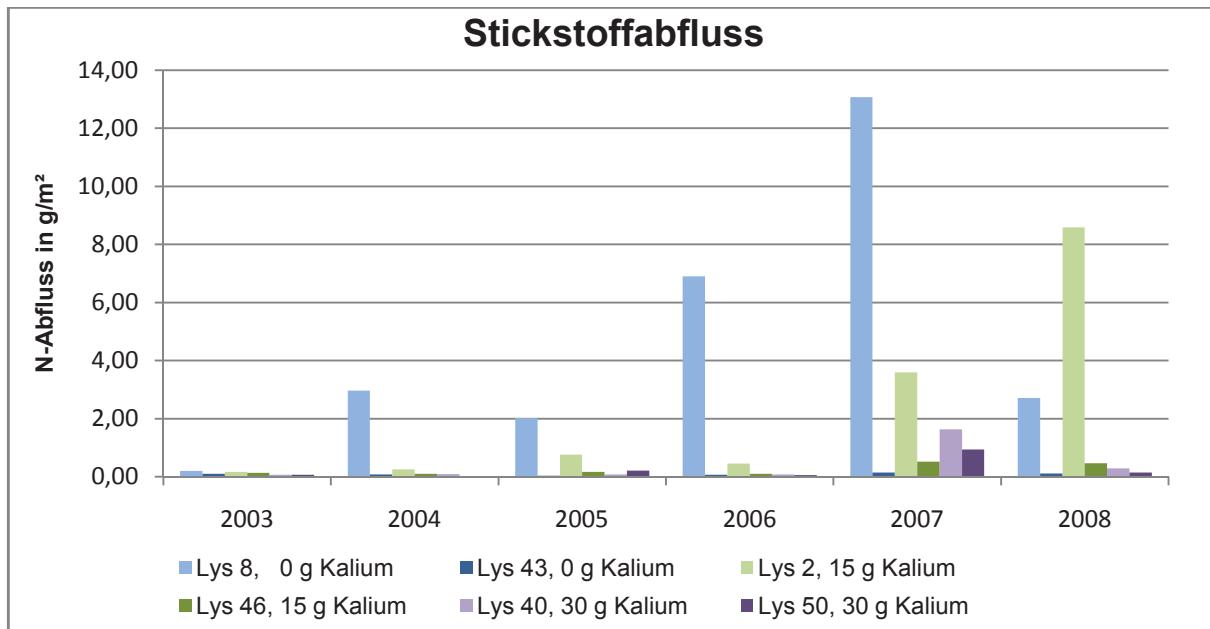


Abbildung 12: Jährlicher Stickstoffabfluss der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g/m² in das Grundwasser (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)

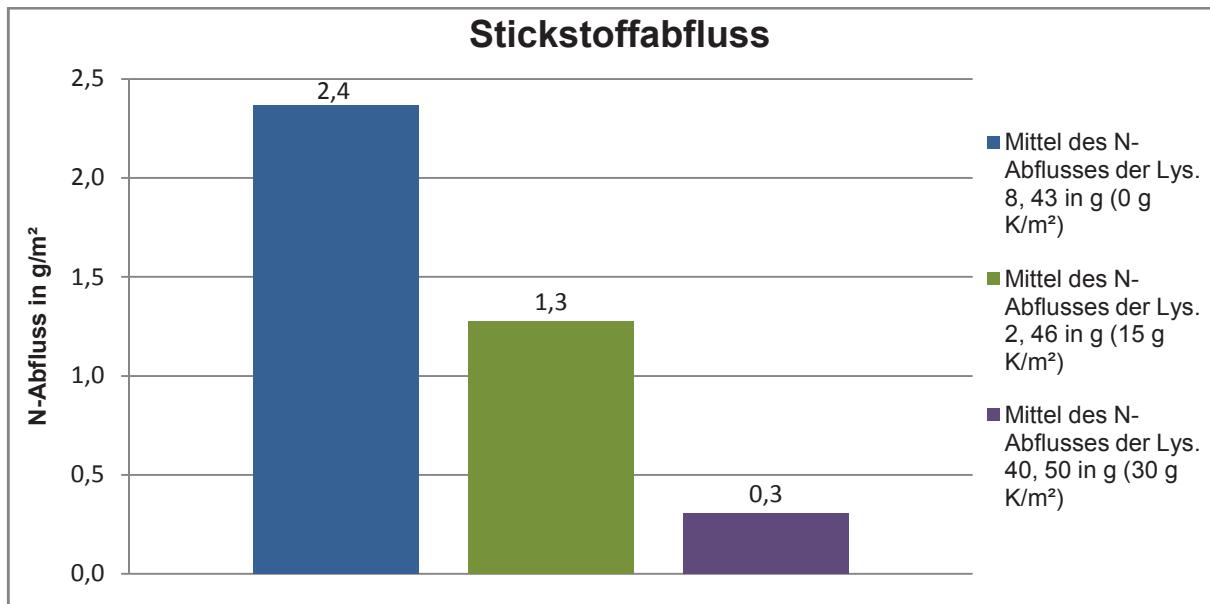


Abbildung 13: Mittel des Stickstoffabflusses der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten in das Grundwasser aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g/m²

In diesem Kapitel werden die erhobenen Daten des Stickstoffaustrages dargestellt und ausgewertet. Dazu wurden zwei Diagramme erstellt, die die Ergebnisse verdeutlichen sollen. In der Abbildung 12 wurden zunächst die jährlichen Stickstoffausträge von jedem Lysimeter aufgezeigt. Jedoch ist das aus diesen Werten hervorgegangene Diagramm recht unübersichtlich und demzufolge schwer analysierbar, da sich die Auswaschungsergebnisse

der Lysimeter sowohl zwischen den einzelnen Varianten als auch innerhalb dieser in ihrer Größenordnung stark unterscheiden. Allein bei der Betrachtung der Ergebnisse der Variante 1 ist dies bereits der Fall. Der Stickstoffaustausch, welcher in Lysimeter 8 ermittelt wurde, liegt meist mit deutlichem Abstand über dem, der in Lysimeter 43 ermittelt wurde. In Lysimeter 8 erreichte die Auswaschung einen Maximalwert von 13 g Stickstoff/m², wobei die maximale Auswaschung in Lysimeter 43 lediglich bei 0,14 g Stickstoff/m² lag. Vergleicht man die drei Varianten untereinander, ist ebenso kein eindeutiges Ergebnis zu erkennen. Festzuhalten ist nur, dass die Auswaschung in Lysimeter 8 in jedem Jahr höher liegt als in allen anderen Lysimetern, die zur Datenerhebung dienten. Danach folgten die Werte von Lysimeter 2 (Variante 2), die ebenfalls meist höher als die übrigen erhobenen Werte lagen. Allgemein betrachtet, waren die Stickstoffausträge in den Lysimetern der am höchsten gedüngten Variante 3 oftmals am niedrigsten. Überschaubarer wird das Ausmaß, wenn die in der Abbildung 13 dargestellten mittleren Stickstoffausträge für die drei verschiedenen Varianten zur Analyse hinzugezogen werden. Hier unterscheiden sich die drei Varianten in gewissem Maß. Der Stickstoffabfluss, der bei Variante 1 erzielt wurde, ist mit 2,4 g/m² am höchsten. Danach folgt der mittlere Stickstoffabfluss der Variante 2 mit 1,3 g/m², der wiederum im Vergleich zur ersten Variante etwa um die Hälfte geringer ausfällt. Größer ist der Unterschied von Variante 1 zur Variante 3. Mit 0,3 g/m² ist die Stickstoffauswaschung um das Achtfache geringer als in der Variante 1. Werden die beiden gedüngten Varianten (2 und 3) miteinander verglichen, so ist auch hier ein Unterschied zu erkennen. Der Stickstoffaustausch ist in der Variante 2 ca. viermal so groß, wie in der Variante 3. Durch eine statistische Auswertung mit dem t-Test konnte jedoch nur ein schwach signifikanter Unterschied ($p = 0,045$) beim Vergleich der Variante 1 und 3 ermittelt werden. Der Vergleich von Variante 1 mit Variante 2 ($p = 0,426$) und auch der von Variante 2 mit Variante 3 ($p = 0,201$) erbrachte in keinem Fall einen signifikanten Unterschied. Zusammenfassend sei folgendes Ergebnis festzuhalten: Die Stickstoffausträge der unterschiedlich stark gedüngten Varianten unterscheiden sich in ihrem Ausmaß bei der Betrachtung der Mittelwerte aus Abbildung 13 deutlich voneinander. Ohne Kaliumdüngung sind die Stickstoffausträge am höchsten, wobei sie mit steigender Kaliumdüngung absinken. Auf einen Hektar bezogen, würden bei der Variante 1 jährlich im Mittel 24 kg Stickstoff in das Grundwasser gelangen. Bei der Variante 2 durchschnittlich 13 kg und bei der Variante 3 nur etwa 3 kg. Statistisch konnte dieses Ergebnis jedoch nur beim Vergleich von Variante 1 mit Variante 3 abgesichert werden ($p = 0,045$).

8.7 Trockenmasseertrag und Stickstoffentzug

Bevor die Ergebnisse des Stickstoffgehalts in der geernteten Trockenmasse ausgewertet werden, muss eine bereits in dem Kapitel 6.3 getroffene Aussage bezüglich der erzielten Trockenmasseerträge erläutert werden. In diesem Kapitel wurde folgendes Ergebnis deutlich (vgl. Abb. 6 und 7): Die Kaliumdüngung in den mit Niedermoorgrünland versehenen Lysimetern beeinflusst die Ertragsbildung maßgeblich. Durch eine entsprechende Düngung kann der Ertrag nachweislich gesteigert werden. Im Vergleich der drei Varianten ergab sich ein bemerkenswertes Ergebnis. Die Variante 1, die ohne Düngung belassen wurde, weist mit 667 g TM/m² den geringsten Trockenmasseertrag auf. Die Erträge der gedüngten Varianten (2 und 3) liegen beide weitaus höher als die der Variante 1. Mit 964 g TM/m² ist der Ertrag der Variante 2 rund 45 % höher als der der Variante 1. Der Trockenmasseertrag der Variante 3 liegt mit 1.055 g TM/m² sogar um 58 % höher als der der ungedüngten Variante. Demzufolge ist auch ein Ertragsunterschied (nicht signifikant) zwischen den beiden gedüngten Varianten vorhanden. Der Ertrag der Variante 3, die im Vergleich zur Variante 2 (15 g Kalium/m²) mit der doppelten Düngergabe (30 g Kalium/m²) versehen wurde, ist jedoch nur um 9% höher als der Ertrag aus der Variante 2. Durch die unterschiedlich hohe Kaliumdüngung wird eine unterschiedlich hohe Stickstoffverwertung vermutet. Diese sollte mitunter der Grund für die verschieden hohen geernteten Trockenmasseerträge der drei Varianten sein und müsste anhand der Stickstoffgehalte in diesen ersichtlich werden.

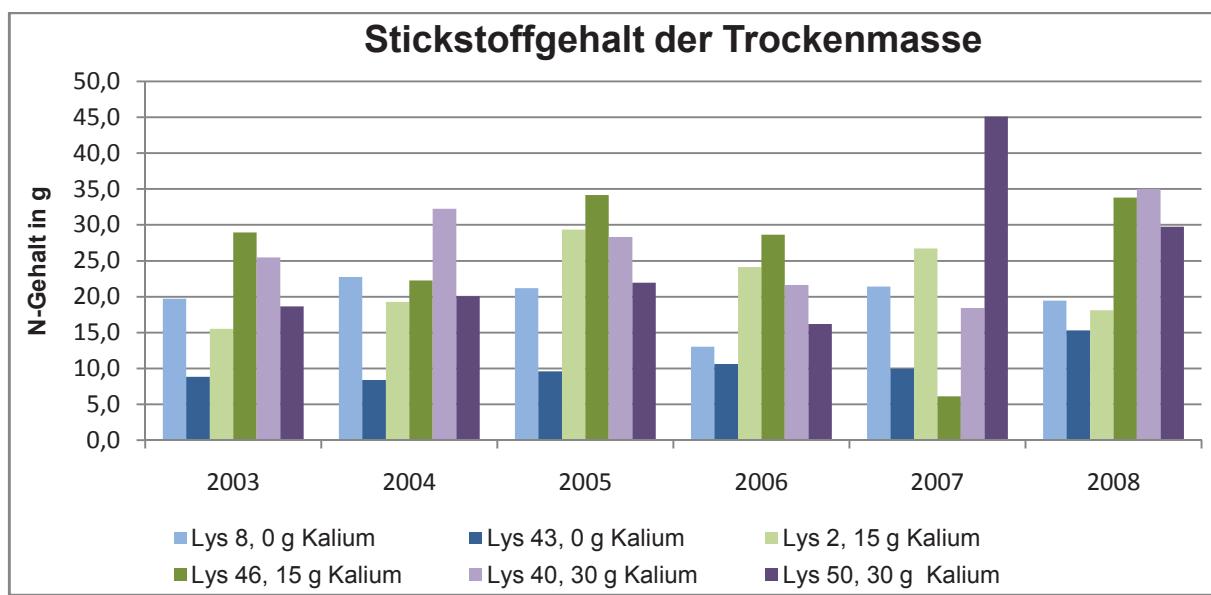


Abbildung 14: Jährlicher Stickstoffgehalt der von 1 m² geernteten Trockenmasse der unterschiedlich hoch gedüngten Lysimeter in g (Versuchszeitraum 2003 bis 2008)

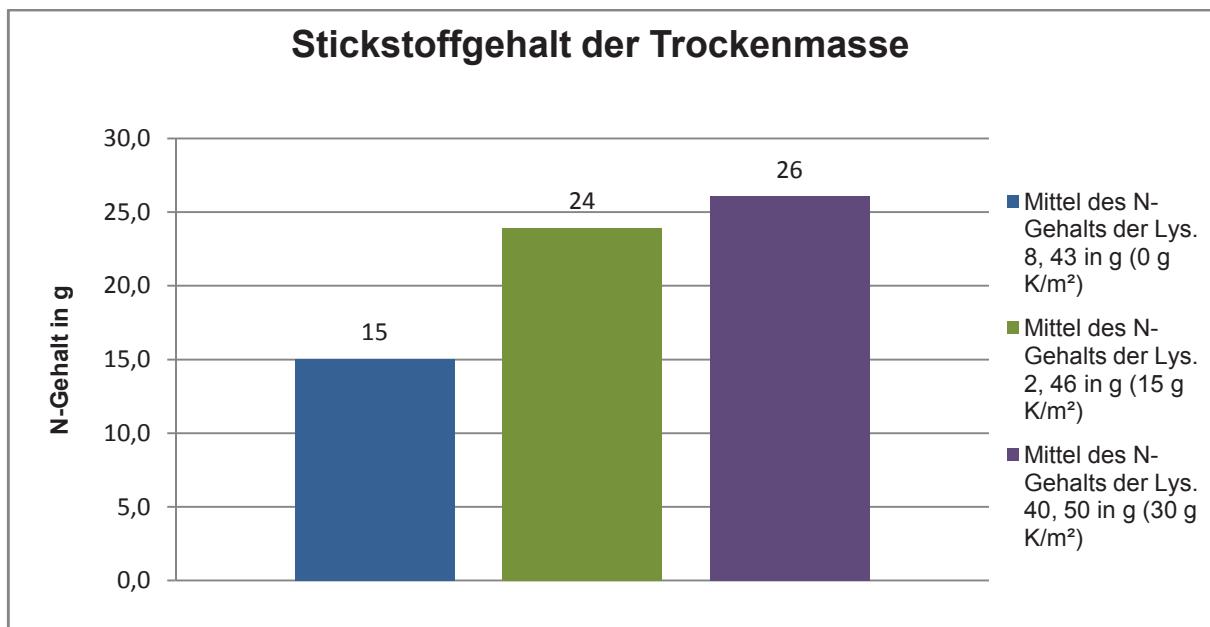


Abbildung 15: Mittel des Stickstoffgehalts der von 1 m² geernteten Trockenmasse der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten aus dem Versuchszeitraum 2003 bis 2008 in g

Betrachtet man dazu die in der Abbildung 14 aufgeführten jährlichen Stickstoffgehalte des von einem m² (Lysimeteroberfläche) geernteten Pflanzenmaterials, so trifft diese Vermutung meist zu. Lediglich die Ergebnisse von Lysimeter 8 stechen bei der Betrachtung heraus. Es wurden zwar in jedem Versuchsjahr in einigen Lysimetern der gedüngten Varianten die höheren Stickstoffmengen in der geernteten Trockensubstanz ermittelt, jedoch nicht in jedem Jahr in jedem der gedüngten Lysimeter. Allein in den zwei Versuchsjahren 2005 und 2006 sind die Werte aller Lysimeter der gedüngten Varianten höher, als die der ungedüngten. Der Stickstoffgehalt der Trockensubstanz von Lysimeter 43 hingegen liegt in fünf der sechs Versuchsjahre deutlich unter den Stickstoffgehalten der Trockensubstanz der gedüngten Lysimeter. Nur im Jahr 2007 wurde ein geringerer Wert in dem Lysimeter 46 (gedüngt mit 15 g Kalium/m²) ermittelt, der vermutlich auf die in diesem Jahr durchgeführte Neuansaat zurückzuführen war. Ein kontinuierlicher Unterschied im Vergleich der Werte der Variante 2 zur Variante 3 ist durch die Betrachtung der jährlich ermittelten Werte nicht zu erkennen. Die Stickstoffgehalte der geernteten Trockenmasse variieren in ihrem Ausmaß sowohl innerhalb der Variante von Jahr zu Jahr, als auch zwischen den beiden Varianten. Ein klares Maximum einer Variante über die sechs Versuchsjahre hinweg ist nicht zu erkennen. Ausschließlich die Tatsache, dass bei den gedüngten Varianten durchaus die höchsten Stickstoffgehalte in der geernteten Trockensubstanz ermittelt wurden, sei zu bemerken. Dieses Ergebnis wird deutlicher, wenn die Abbildung 14, in der die Mittelwerte für jede Variante dargestellt sind, hinzugezogen wird. Die beiden gedüngten Varianten unterscheiden sich in ihrer Größenordnung geringfügig, jedoch von der Variante 1 deutlich. So wurden bei der Variante 2 im Mittel 24 g in der geernteten Trockensubstanz festgestellt und bei der Variante 3 im Mittel 26 g. Die Variante 1 hingegen kommt über einen Mittelwert

von 15 g Stickstoff in der Trockensubstanz nicht hinaus. Damit liegt der Stickstoffgehalt der Variante 2 etwa 60 % höher und der Variante 3 um 73 % höher. Die statistische Auswertung mit Hilfe des t-Tests bestätigt das in den beiden Abbildungen (14, 15) dargestellte Ergebnis. Zwischen Variante 1 und Variante 2 ($p = 0,044$) sowie Variante 3 ($p = 0,013$) konnte jeweils ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Zwischen den beiden Varianten 2 und 3 jedoch nicht ($p = 0,533$). Wird nun ein Vergleich zwischen der Kaliumdüngung, dem Ertrag (vgl. Abb. 6), dem Stickstoffgehalt der von einem m^2 geernteten Trockenmasse (vgl. Abb. 15) und dem Stickstoffabfluss (vgl. Abb. 13) vorgenommen, so wird ein klarer Zusammenhang zwischen diesen Größen ersichtlich. Bei den mit Kalium gedüngten Varianten wurden höhere Erträge erzielt, wodurch auch gleichzeitig mehr Stickstoff über die von einem m^2 geerntete Trockensubstanz entzogen wurde. Folglich ergeben sich daraus auch geringere Stickstoffausträge (vgl. Abb. 13) in den Lysimetern der gedüngten Varianten.

8.8 Stickstoffbilanz

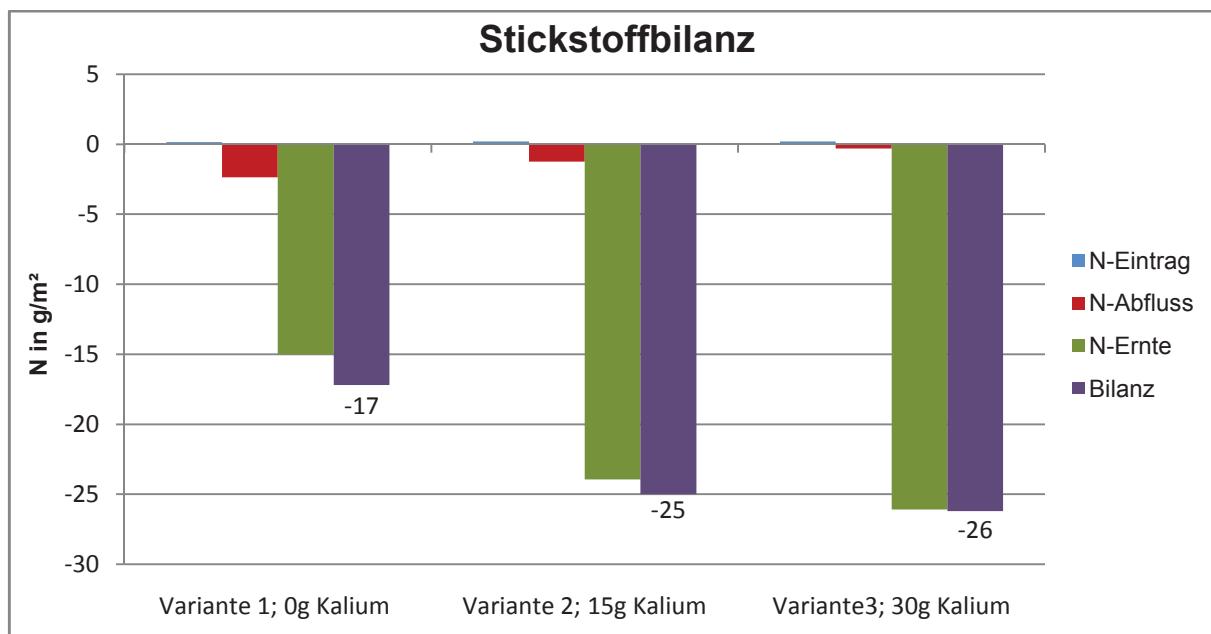


Abbildung 16: Stickstoffbilanz der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten im Mittel aus den Jahren 2003 bis 2008

Die in der Abbildung 16 dargestellten Stickstoffbilanzen der drei unterschiedlichen Varianten errechnen sich aus den zuvor gebildeten Mittelwerten, der von den jeweiligen Lysimetern ermittelten Daten aus den sechs Versuchsjahren. In die Berechnung wurden der Stickstoffeintrag durch das Zuflusswasser, der Stickstoffabfluss in das Grundwasser sowie der Stickstoffentzug über das geerntete Pflanzenmaterial mit einbezogen. Die so erstellten Bilanzen sollen dazu dienen, einen Überblick über die gesamten Stickstoffmengen zu geben, die im Mittel in den Lysimetern der drei Varianten zur Verfügung standen.

Außerdem verdeutlichen sie, in welchem Maß diese von den Pflanzen genutzt wurden oder der Auswaschung unterlagen. Betrachtet man die dargestellten Bilanzen, wird das Ausmaß an Stickstoff, welcher aus der Mineralisation stammt, gut ersichtlich, denn der Eintrag durch das Zuflusswasser ist mit Werten, die nicht über 0,2 g/m² liegen, sehr gering. Laut der Bilanzergebnisse stehen im Mittel jährlich 17 g Stickstoff/m² in den Lysimetern der Variante 1 zur Verfügung, die jedoch nicht im vollen Maß durch das geerntete Pflanzenmaterial aufgenommen und entzogen werden. Nur etwa 88 % (15 g) von dem vorhandenen Stickstoff werden über das Pflanzenmaterial entzogen. Der restliche Teil (ca. 12 %) geht durch die Auswaschung verloren. Bei der Variante 2 sind durchschnittlich etwa 25 g Stickstoff/m² und Jahr in den Gefäßen nutzbar. Jedoch werden hier bereits fast 96 % (24 g) durch die Pflanzen entzogen und weniger als 5 % unterliegen der Auswaschung. Die Variante drei zeichnet sich durch Auswaschungsergebnisse aus, die mit 0,3 g Stickstoff/m² (1 %) gegen Null gehen. Zu 99 % ist der jährlich vorhandene Stickstoff in den Lysimetern dieser Variante in dem geernteten Pflanzenmaterial zu finden. Damit verbessert sich die durchschnittliche Stickstoffausnutzung von der Variante 1 mit 88 % über die Variante 2 mit 96 % bis hin zur Variante 3 mit beachtlichen 99 %. Umgerechnet auf einen Hektar würden ohne Kaliumdüngung (Variante 1) 150 kg Stickstoff/ha (aus Torfmineralisation) von den Pflanzen aufgenommen werden. Bei der Variante 2, die mit 150 kg Kalium/ha gedüngt werden würde, wären es bereits 240 kg Stickstoff/ha und bei der Variante 3 (300 kg Kalium/ha) sogar 260 kg Stickstoff/ha.

8.9 Nährstoffgehalt im Sickerwasser

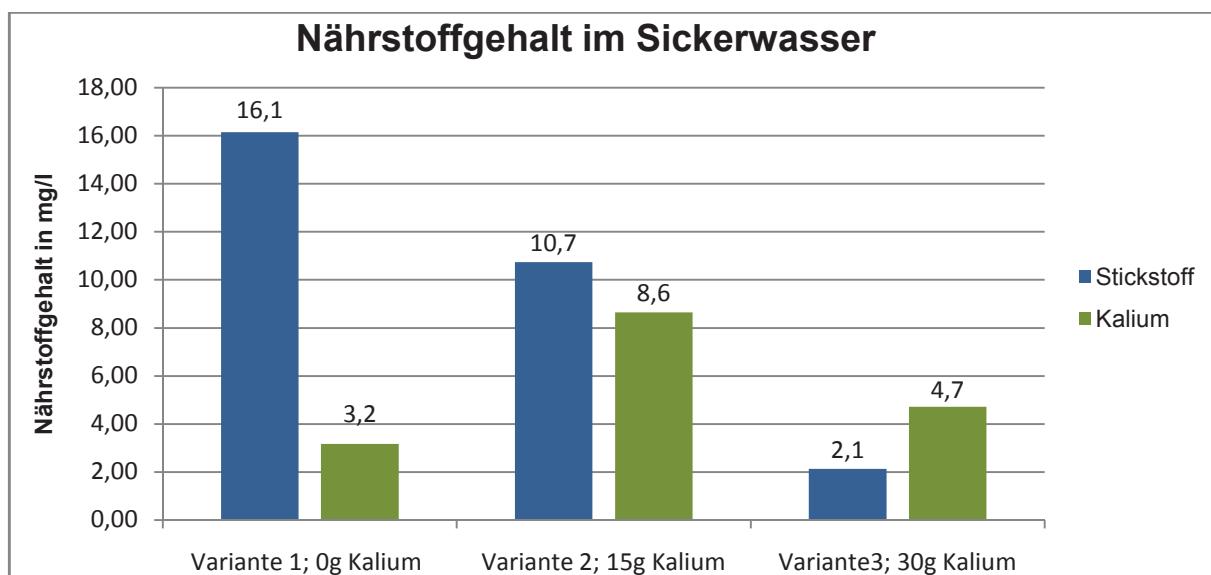


Abbildung 17: Stickstoff- und Kaliumgehalt im Sickerwasser der unterschiedlich hoch gedüngten Varianten in mg/l (Mittel der Jahre 2003 bis 2008)

In der Abbildung 17 sind die mittleren Nährstoffgehalte des Sickerwassers der drei verschiedenen Varianten dargestellt. Durch die Angabe der Werte in mg/l ist ein direkter Vergleich dieser mit den Richtwerten der Trinkwasserverordnung möglich. Betrachtet man die Nährstoffgehalte der unterschiedlichen Varianten, so sind innerhalb dieser deutliche Differenzen zu erkennen. Zunächst wird der Kaliumgehalt im Sickerwasser der drei Varianten miteinander verglichen. Dieser ist bei der Variante 1, die ohne Kaliumdüngung belassen wurde, mit etwa 3mg/l am geringsten. Die beiden gedüngten Varianten weisen hingegen höhere Kaliumgehalte im Sickerwasser auf. Beachtlich ist, dass der mittlere Kaliumgehalt der Variante 2, welche mit 15 g Kalium/m² gedüngt wurde, mit über 8 mg/l doppelt so hoch ist, wie der Kaliumgehalt der mit 30 g Kalium gedüngten Variante 3 (über 4 mg/l). Signifikante Unterschiede im Vergleich der drei Varianten konnten jedoch in keiner Weise ermittelt werden. Bei der Betrachtung der Stickstoffkonzentrationen im Sickerwasser sind ebenso beachtliche, jedoch nicht unerwartete Unterschiede zu verzeichnen. Der mittlere Stickstoffgehalt im Sickerwasser verringert sich von der Variante 1 bis hin zur Variante 3 maßgeblich. Der bei der Variante 1 ermittelte Gehalt an Stickstoff ist mit rund 16 mg/l mit Abstand am höchsten. Danach folgt die Stickstoffkonzentration der Variante 2 mit knapp 11 mg/l. Daraus ergibt sich eine Abnahme des Stickstoffgehaltes von der ersten zur zweiten Variante um ca. 31 %. Ein hochsignifikanter Unterschied ($p = 0,009$) geht aus dem Vergleich der Variante 1 mit der Variante 3 hervor. Da bei der dritten Variante im Mittel nur 2 mg/l errechnet wurden, ist die Konzentration an Stickstoff im Sickerwasser um das Achtfache geringer, als die der ersten Variante. Die Abnahme des mittleren Stickstoffgehaltes beträgt hier etwa 88 %. Auch der Vergleich der beiden gedüngten Varianten ist lohnenswert. Hier ist eine Verringerung von Variante 2 zu Variante 3 um 80 % zu verzeichnen. Signifikant unterscheiden sich diese jedoch nicht.

9 Diskussion

Um Niedermoorgebiete landwirtschaftlich nutzen zu können, ist eine Entwässerung (Melioration) unumgänglich. Nur auf diesem Weg werden die Flächen für das Nutzvieh betretbar und für die mächtigen landwirtschaftlichen Maschinen befahrbar. Durch die Entwässerung der Gebiete werden jedoch aerobe Bedingungen im Boden geschaffen, welche die Freisetzung verschiedener im Moorkörper gespeicherter Stoffe bewirken. Unter anderem wird der Stickstoff freigesetzt, welcher aus der Mineralisation des Torfes hervorgeht.⁶⁸ Aus diesem Zusammenhang ergeben sich vielseitige Folgen und Probleme, zu denen auch die Fragestellungen dieser Arbeit gehören. Zum einen sind die Landwirte aus

⁶⁸ Käding, H. (1999): Langfristige Grünlandversuche auf Niedermoore – ein fester Bestandteil der Futterbauforschung. In: 50 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue – Ergebnisse der Grünland- und Futterforschung. Hrsg: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue. S. 183

ökonomischer Sicht bestrebt, den freigesetzten Stickstoff möglichst vollständig zu nutzen. Zum anderen ist aus ökologischer Sicht eine Beeinträchtigung der Grundwasserqualität durch den Austrag des Stickstoffs sowie anderer Nährstoffe zu vermeiden. In dem Versuch, der in der Forschungsstation Paulinenaue durchgeführt wurde, sollte ermittelt werden, ob eine unterschiedlich hohe Kaliumdüngung von Niedermoorgrünland die Ausnutzung des aus der Torfmineralisation freigesetzten Stickstoffs durch die Pflanzen beeinflusst. Der Grundwasserstand wurde dabei auf 50 cm unter Flur eingestellt. Außerdem lag das Augenmerk auf eine mögliche Beeinträchtigung der Gewässerqualität durch den Eintrag des gedüngten Kaliums sowie des freigesetzten Stickstoffs.

Stickstoffausnutzung durch Kaliumdüngung

Um der Fragestellung nachzugehen, ob und in welchem Maß die Kaliumdüngung auf Niedermoorgrünland die Ausnutzung des aus der Mineralisation der organischen Substanz hervorgehenden Stickstoffs durch den Pflanzenbestand beeinflusst, wurden die Versuchsergebnisse aus den sechs Versuchsjahren im Kapitel 8 ausgewertet. Zunächst wurden dabei die Kaliumergebnisse betrachtet, da somit festgestellt werden kann, ob Kaliummangelbedingungen in den Lysimetergefäßern vorherrschen. Aus der Literatur geht hervor, dass Moorböden durch Kaliumarmut gekennzeichnet sind, da Kalium in der organischen Substanz durch fehlende Tonminerale nur sehr schwach gebunden wird und lediglich eine sehr geringe Nachlieferung erfolgt.⁶⁹ Eine Kaliumunterversorgung bewirkt bei den Kulturpflanzen Mängelscheinungen, welche besonders stark ausgeprägt sind, wenn zu große Mengen an Stickstoff zur Verfügung stehen. Wiederum begünstigt eine ausreichende Kaliumversorgung die Aufnahme des verfügbaren Stickstoffs aus dem Boden.⁷⁰ Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde schnell klar, dass es in den mit Niedermoorboden gefüllten Lysimetern ohne Kaliumdüngung zu einer deutlichen Unterversorgung des Grünlandbestands kommt. Unter den Bedingungen, wie sie in diesem Versuch vorherrschen, würden sehr geringe Kaliummengen für die Pflanzen bereitgestellt werden, wenn auf eine Düngung verzichtet wird. Betrachtet man dazu die Mengen an Kalium, welche in die einzelnen Lysimeter der unterschiedlichen Varianten über die Düngung und das Zuflusswasser eingetragen wurden (Abb. 2) und vergleicht diese mit den Kaliumausträgen (Abb. 4, 5), so ist deutlich zu erkennen, dass die Kaliumausträge sich trotz der stark unterschiedlich hohen Kaliumversorgung nur unwesentlich voneinander unterscheiden und in der Regel auf einem gleich niedrigen Niveau von unter 1 g/m² und Jahr liegen. Dieses Ergebnis lässt bereits eine Kaliumunterversorgung in den Lysimetern vermuten, da die Auswaschungsergebnisse mit enorm steigender Düngergabe

⁶⁹Schachtschabel, Paul et al (1976): Scheffer / Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 9. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. S. 222

⁷⁰Scheffer, F., Welte, Erwin (1955): Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde, II. Teil Pflanzenernährung. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. S. 124f

nicht anstiegen. Obwohl der in den Lysimetern vorhandene Moorböden durch seinen geringen Tongehalt als sorptionsschwach gilt und unter Einfluss einer Kaliumdüngung durchaus mit einer jährlichen Kaliumauswaschung von bis zu $3,6 \text{ g/m}^2$ charakterisiert wird.⁷¹ Auf einen Kaliummangel weist auch die Auswertung der Ergebnisse aus dem Kapitel 8.3 hin. Diese ergaben deutliche Unterschiede zwischen den drei Düngungsvarianten im Hinblick auf die Kaliumgehalte der Trockensubstanz sowie auf die Erträge. Bei der Auswertung der Abbildung 8 wurden zwischen allen drei Varianten hochsignifikante Unterschiede festgestellt. Mit steigender Kaliumgabe stiegen die Gehalte an Kalium in der von einem m^2 geernteten Trockensubstanz deutlich an. Die mittleren Gehalte stiegen von 7 g (Variante 1) auf 18 g (Variante 2) sowie auf 29 g (Variante 3) an, was vorerst darauf hin deutet, dass der Pflanzenbestand der Variante 1 und 2 nicht ausreichend mit Kalium versorgt wurde, da der Kaliumgehalt der beiden Varianten signifikant unter dem der Variante 3 liegt. Die Kaliumunterversorgung spiegelt sich auch in den erzielten Erträgen der unterschiedlichen Varianten wider (vgl. Abb. 6). Durch eine Kaliumdüngung konnten deutlich höhere Erträge erreicht werden, jedoch unterschieden sich die Erträge nur im Vergleich der Variante 1 (667 g TS/m^2) mit der Variante 2 (964 g TS/m^2) sowie mit der Variante 3 (1.055 g TS/m^2) signifikant voneinander. Demzufolge ist die Kaliumdüngung der Variante 2 bezüglich der Ertragsbildung als optimal anzusehen, da die erzielten Erträge der Variante 3 nicht signifikant höher liegen als die der Variante 2. Die erstellte Bilanz der drei Varianten (vgl. Abb. 10) zeigt ebenfalls ein deutliches Defizit ohne Kaliumdüngung sowie ein leichtes Defizit bei der Variante 2. Eine positive Bilanz ergab sich allein bei Variante 3. Zusammenfassend sei zu vermerken, dass es, wie vermutet und aus der Literatur bekannt, auf Niedermoorgrünland zu deutlichen Kaliummangelbedingungen kommt, wenn eine Kaliumdüngung ausbleibt. Daraus lässt sich ableiten, dass Kalium auf diesem Standort als ertragsbegrenzender Faktor gilt, da es, wie bereits erwähnt, bei einer Kaliumunterversorgung der Pflanzen zu deutlichen Mängelscheinungen kommt und die Stickstoffaufnahme negativ beeinflusst wird. Aus statistischer Sicht ist von den drei durchgeföhrten Varianten die Variante 2, welche aufgrund des Kaliums im Zuflusswasser tatsächlich mit etwa 16 g Kalium/m^2 anstatt mit nur 15 g Kalium/m^2 gedüngt wurde, als optimal einzustufen, da sich die Erträge der noch höher gedüngten Variante 3 (etwa 31 g Kalium/m^2) nicht signifikant von denen der zweiten Variante abheben.

Als nächstes werden die ausgewerteten Ergebnisse des Stickstoffs in den Vergleich einbezogen. Dadurch wird es möglich Zusammenhänge zwischen der Kaliumdüngung und der Stickstoffausnutzung zu erkennen. Stickstoff wird auf Niedermoorböden, welche zum Zwecke der landwirtschaftlichen Nutzung entwässert wurden, aufgrund der Mineralisation der organischen Substanz in sehr großen Mengen freigesetzt. Dabei bewegt sich

⁷¹ Blume, Hans-Peter et al. (2011): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Auflage. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim: S. 254

das Ausmaß im Bereich von 100 kg/ha bis zu 3200 kg/ha im Extremfall.⁷² Versuchsergebnisse aus Paulinenaue (ZALF) deuten auf eine Freisetzung von bis zu 500 kg/ha hin.⁷³

Die Stickstoffeinträge, welche durch das Zuflusswasser entstanden (vgl. Abb. 11), können aufgrund ihrer Geringfügigkeit vernachlässigt werden, wenn man berücksichtigt, wie niedrig der Anteil im Vergleich zu der gesamtverfügbaren Menge an Stickstoff in den Lysimetern ist (vgl. Abb. 16 Stickstoffbilanz). Die Auswertung der Daten der Stickstoffausträge brachte hervor, dass diese sowohl innerhalb, als auch zwischen den drei Varianten in den einzelnen Versuchsjahren stark variieren. So konnte statistisch lediglich ein signifikanter Unterschied der Austräge bei dem Vergleich der Variante 1 mit der Variante 3 festgestellt werden. Die Stickstoffausträge der dritten Variante waren im Mittel mit 0,3 g/m² deutlich geringer, als die der Variante 1 mit 2,4 g/m².

Vergleicht man nun die drei Varianten im Hinblick auf die unterschiedlich hohe Kaliumdüngung und betrachtet dabei die erzielten Trockenmasseerträge (vgl. Abb. 6 und 7) sowie die Gehalte an Stickstoff (vgl. Abb. 14 und 15) und Kalium (vgl. Abb. 8 und 9) in der geernteten Trockensubstanz, so wurde ein eindeutiges Ergebnis erzielt, was darauf hindeutet, dass die Kaliumdüngung die Aufnahme des aus der Mineralisation freigesetzten Stickstoffs positiv beeinflusst. Die mit Kalium gedüngten Varianten verzeichnen, wie bereits erwähnt, unbestreitbar die höheren Trockenmasseerträge, welche sich jedoch nur signifikant von der ungedüngten Variante unterscheiden. Die Variante 3 verzeichnet keine deutlich höheren Trockenmasseerträge im Vergleich zur Variante 2. Die Gehalte an Kalium und Stickstoff in der Trockensubstanz sind ebenso bei den gedüngten Varianten am höchsten. Bezuglich des Kaliums wurde sogar eine Steigerung des Gehalts von Variante 2 zu Variante 3 ermittelt, die statistisch abgesichert werden konnte. Der Gehalt an Stickstoff in der geernteten Trockensubstanz stieg jedoch nur signifikant beim Vergleich der Variante 1 mit der Variante 2 sowie mit der Variante 3. Die Betrachtung der beiden gedüngten Varianten zeigte, dass die Stickstoffgehalte der Variante 3 nicht signifikant höher liegen, als die der Variante 2. Festzuhalten ist demzufolge, dass durch die Kaliumdüngung der Kaliumversorgungszustand des Grünlandbestandes verbessert wird, was anhand der deutlich höheren Kaliumgehalte in der Trockensubstanz bei den mit Kalium gedüngten Varianten zu erkennen ist. Dies wiederum hat eine verbesserte Stickstoffaufnahme des Grünlandbestandes zur Folge, was sich in den höheren Erträgen und auch in den höheren Gehalten an Stickstoff in der geernteten Trockensubstanz widerspiegelt.

⁷² Kuntze, H. (1984): Bewirtschaftung und Düngung von Moorböden. –Berichte des Bodentechnologischen Instituts Nds. Landesamt für Bodenforschung 80 S.

⁷³ Behrendt, A., G. Schalitz, L. Müller und U. Schindler (2003): Nährstoffdynamik auf extensiv genutzten Niedermooren – Weide- und Lysimeterversuche-, 10. Gumpenstein Lysimetertagung. Hrsg.: Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein. S. 129ff

Ausschlaggebend für diesen Zusammenhang ist das „Gesetz vom Minimum“, was bereits im Jahr 1855 von dem deutschen Wissenschaftler Justus von Liebig entdeckt und beschrieben wurde. Es besagt folgendes: „Der Pflanzennährstoff, der im Verhältnis zum Bedarf in geringster Menge zur Verfügung steht, entscheidet über die Höhe des Ertrages. Der Ertrag steigt nicht, wenn andere Pflanzennährstoffe in größerer Menge zur Verfügung stehen.“⁷⁴ Die Pflanze ist dennoch in der Lage eine größere Menge eines bestimmten Nährstoffs aufzunehmen, als sie tatsächlich für die Ausbildung der an einem bestimmten Standort erzielbaren Produktionsleistung benötigt. Hierzu sei das „Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren – Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs“ zu nennen, dass von E. A. Mitscherlich aufgestellt wurde. Demnach nimmt der Ertrag bei einer kontinuierlich steigenden Nährstoffzufuhr immer geringer zu.⁷⁵ Diese beiden Gesetzmäßigkeiten seien zur Erläuterung der in diesem Versuch erzielten Ergebnisse bezüglich des Einflusses der Kaliumdüngung auf die Stickstoffausnutzung heranzuziehen. Daraus ergibt sich der Grund für den steigenden Ertrag bei einer Kaliumdüngung (vgl. Abb. 6). Denn Kalium ist, wie oben erwähnt, im Niedermoorboden nur in sehr geringen Mengen vorhanden und steht somit im Minimum und begrenzt dadurch die Produktionsleistung des Grünlandbestandes. Stickstoff hingegen ist aufgrund der Torfmineralisation in ausreichender Menge vorhanden, kann aber nur in größerer Menge aufgenommen werden, wenn Kalium nicht im Minimum steht, das Pflanzenwachstum begrenzt und damit die Stickstoffaufnahme einschränkt. Dieser Zusammenhang wurde klar durch den höheren Gehalt an Stickstoff in der geernteten Trockensubstanz der gedüngten Varianten ersichtlich (vgl. Abb. 15). Dass der Ertrag der Variante 3 sich trotz höherer Kaliumdüngung nicht signifikant von dem der Variante 2 unterscheidet (vgl. Kapitel 8.3), erklärt sich mit Hilfe des Gesetzes vom abnehmenden Ertragszuwachs sowie durch Betrachtung der Kalumbilanz (vgl. Abb. 10). Die Variante 2, die aufgrund des Kaliums im Zuflusswasser mit etwa 16 g Kalium/m² gedüngt wurde, zeigt mit -3,6 g Kalium/m² zwar eine negative Bilanz, jedoch heben sich die erzielten Erträge nur unwesentlich von den Erträgen der Variante 3 ab, die eine positive Bilanz von 1,4 g Kalium/m² verzeichnet. Das heißt, dass bereits bei der Variante 2 die von den Pflanzen benötigte Menge an Kalium für das Erreichen des unter diesen Bedingungen möglichen Ertragspotentials in den Lysimetern zur Verfügung steht. Bei der verfügbaren Kaliummenge bei Variante 3 nehmen die Pflanzen demzufolge mehr Kalium auf, als sie tatsächlich für die Ertragsbildung benötigen. Aus diesem Grund bleibt eine signifikante Ertragssteigerung von Variante 2 zu Variante 3 aus. Die Kaliumgehalte in der geernteten Trockensubstanz bei der Variante 3 sind deutlich höher (vgl. Abb. 8), denn wie bereits erwähnt, kann die Pflanze bestimmte Nährstoffe in größerer Menge aufnehmen, als sie für ihre Entwicklung benötigt.

⁷⁴ <http://www.agrilexikon.de/index.php?id=gesetzvomminimum> (29.01.2015; 11:15 Uhr)

⁷⁵ Schmalfuß, Karl (1958): Pflanzenernährung und Bodenkunde. 8. überarbeitete und ergänzte Auflage. S. Hirzel Verlag, Leipzig. S. 228f

Versuchsergebnisse eines Feldversuches, die ebenfalls darauf hinweisen, dass die Kaliumdüngung auf Niedermoorgrünland die Stickstoffausnutzung und damit den erzielten Ertrag verbessert, wurden vom Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft veröffentlicht. Demnach sank der Ertrag ohne eine Kaliumversorgung des Niedermoorgrünlandes bedingt durch die eingeschränkte Stickstoffausnutzung innerhalb von vier Jahren um bis zu 50 %. Gleichzeitig zeigte sich auch, dass ein Ertragsniveau, welches infolge einer angemessenen Kalium- und Stickstoffversorgung erzielt wurde, bei einer einseitigen Düngung mit Stickstoff nicht erreicht werden konnte.⁷⁶

Untersuchungen in mit Mais bestellten Moorlysimetern der Forschungsstation Paulinenaue zeigten, dass eine differenzierte Stickstoffdüngung (5 g/m² und 15 g/m²) jeweils zu gleichen Stickstoffentzügen über das Pflanzenmaterial führte, wenn eine Kaliumdüngung mit 20 g/m² praktiziert wurde. Die Erhöhung der Kaliumgabe auf 40 g/m² bewirkte bei der niedrigeren Stickstoffdüngung sogar fast eine Verdopplung der Stickstoffentzüge. Damit wurde deutlich, dass Kalium der limitierende Faktor in den Moorlysimetern war und die Stickstoffausnutzung beeinflusst. Ebenso zeigten Versuche in Moorlysimetern unter einem Wiesenrispenbestand ein ähnlich hohes Ausmaß der Stickstoffausnutzung, wie es in diesem Versuch bei der Variante ohne Kaliumdüngung ermittelt wurde (15 g Stickstoff/m²). Der Wiesenrispenbestand entzog ca. 16 g Stickstoff/m².⁷⁷ Dadurch wird auch noch einmal auf die Größenordnung der Stickstoffausnutzung ohne Kaliumdüngung aufmerksam gemacht. Gleichzeitig werden die in diesem Versuch ermittelten Ergebnisse in ihrer Aussagekraft verstärkt.

Beeinträchtigung der Gewässerqualität durch Kalium und Stickstoff

In Folge der Melioration der Niedermoore zum Zweck der landwirtschaftlichen Nutzung kommt es zu einer beachtlichen Moordegradierung, welche durch die Höhe des Grundwasserstandes und die eintretende Mineralisation bedingt wird. Dadurch wird bekanntlich Stickstoff freigesetzt, welcher bei einem Eintrag in bestimmter Größenordnung in die Umwelt zu einer Belastung führen kann.⁷⁸ Aus diesem Grund soll mit Hilfe der in diesem Versuch erzielten Versuchsergebnisse die Beeinträchtigung der Gewässerqualität durch den Eintrag des Stickstoffs untersucht werden. Außerdem wird das Kalium ebenso betrachtet, da in dem Versuch eine stark differenzierte Kaliumdüngung praktiziert wurde. Da Niedermoorböden grundsätzlich eher als sorptionsschwach gelten und unter landwirtschaftlicher Nutzung mit jährlichen Kaliumausträgen von bis zu 3,6 g/m² beschrieben

⁷⁶ Hertwig, Frank (o.D.): Bei der Düngung von Niedermoorgrünland auf Kalium nicht verzichten. Hrsg.: Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft, Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau, Referat Grünland und Futterwirtschaft, Paulinenaue. 8 S.

⁷⁷ Behrendt, A. (1995): Moorkundliche Untersuchungen an nordostdeutschen Niedermooren unter Berücksichtigung des Torfschwundes, ein Beitrag zur Moorerhaltung. Diss., Berlin, S. 119

⁷⁸ Scheller, Peter (2008): Untersuchungen zum Stickstoff-Überschuss und den Möglichkeiten seiner Verminderung in Futterbaubetrieben mit hohem Grünlandanteil auf Niedermoor. Diss. Gießen, S. 13f

werden⁷⁹, ist die Untersuchung unter dem Einfluss einer starken Düngung von besonderer Wichtigkeit. Um auf eine mögliche Beeinflussung der Gewässerqualität schlussfolgern zu können, werden zunächst die mittleren Kalium- und Stickstoffausträge (vgl. Abb. 5 und 13) der unterschiedlichen Varianten verglichen, da somit vorerst das Ausmaß jeder Variante verdeutlicht und ein Überblick geschaffen wird. Abschließend werden die Ergebnisse der mittleren Nährstoffgehalte pro Liter Sickerwasser betrachtet (vgl. Abb. 17). Dadurch kann eine Prognose bezüglich der Gefährdung der Gewässerqualität gegeben werden. Das Ausmaß des Kaliumaustrags ist dabei allgemein betrachtet mit einem Mittelwert, der zwischen 0,4 g Kalium/m² und 1 g Kalium/m² liegt in allen drei Varianten als niedrig einzustufen. Beim Stickstoff hingegen nehmen die Austräge ein größeres Ausmaß an und unterscheiden sich auch maßgeblich bei der Betrachtung der Mittelwerte. Die Variante 1 ist mit einem mittleren Stickstoffaustrag von 2,4 g/m² gekennzeichnet und bringt damit den höchsten Austrag hervor. Variante 2 zeigt hingegen einen Stickstoffaustrag von 1,3 g/m² und Variante 3 von nur 0,3 g/m². Statistisch abgesichert werden, konnten diese Unterschiede jedoch nur beim Vergleich der Variante 1 mit der Variante 3. Nur aus diesem Fall geht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Kaliumdüngung und Stickstoffaustrag hervor, der zeigt, dass durch die Kaliumdüngung der Austrag des Stickstoffs maßgeblich verringert werden kann. Ob es zur Beeinträchtigung bzw. Gefährdung der Gewässerqualität bei den jeweiligen Düngungsvarianten kommt, kann durch die Betrachtung der Ergebnisse zum Nährstoffgehalt pro Liter Sickerwasser besser geklärt werden. Wird hier auf die Werte des Kaliums geschaut, so fällt zunächst auf, dass die Variante 2 den höchsten Wert hervor bringt, obwohl die Variante 3 deutlich höher gedüngt wurde. Variante 1 zeigt eine mittlere Konzentration von ca. 3 mg/l, Variante 2 von 8 mg/l und Variante 3 von knapp 5 mg/l. Eine logische Erklärung dafür könnte die Verfälschung des Mittelwertes durch äußere Einflüsse sein. Auffällig erscheint, dass der Mittelwert nur aus dem einzigen Grund höher liegt, weil der Kaliumaustrag von Lysimeter 2 im Jahr 2005 stark nach oben ausreißt (vgl. Abb. 4). Ohne diesen Ausreißer würde der Mittelwert mit dem der Variante 3 gleich auf sein. Deshalb ist davon auszugehen, dass dieser hohe Wert das Resultat äußerer Einflüsse ist. Diese könnten zum Beispiel der Eintrag von Exkrementen oder ähnliches sein. Signifikant unterscheiden sich alle drei Varianten ohnehin nicht voneinander. Demzufolge kann keine Variante ermittelt werden, bei der die Austräge deutlich höher liegen. Werden nun die Konzentrationen im Sickerwasser mit dem Richtwert von 12 mg/l laut Trinkwasserverordnung⁸⁰ verglichen, so stellt sich heraus, dass bei keiner Variante dieser Richtwert weder erreicht noch überschritten wird. Zum Stickstoffgehalt: Die Konzentration des Stickstoffs im Sickerwasser ist bei der Variante 1 mit 16 mg/l am höchsten. Die Variante 2 brachte eine mittlere

⁷⁹ Blume, Hans-Peter et al. (2011): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Auflage. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim: S. 254

⁸⁰ http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/grundwasser/grundwasserbeschaffenheit/messergebnisse_landesweit/kaliumgehalte/38552.html (25.11.2014; 13:08 Uhr)

Konzentration von etwa 11 mg/l hervor und die Variante 3 von 2 mg/l. Wobei sich ausschließlich die Variante 1 signifikant von der Variante 3 unterscheidet. Das wiederum deutet darauf hin, dass Niedermoorgrünland bei dem die Kaliumdüngung ausbleibt auch die höchsten Stickstoffausträge verzeichnet. Um die Gefährdung für die Gewässerqualität einstufen zu können, müssen auch die Werte der Stickstoffausträge mit dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung verglichen werden. Da die Stickstoffbelastung der Gewässer in der Nähe entwässerter Niedermoorgebiete meist durch das Nitrat erfolgt⁸¹, werden die erzielten Sickerwasserkonzentrationen mit dem Grenzwert von 50 mg/l, der für das Nitrat gilt, verglichen. Außerdem geht aus der Nitratauswaschung ohnehin das größte Problem bezüglich des Umweltschutzes hervor.⁸² Bei der Betrachtung der mittleren Stickstoffkonzentration im Sickerwasser der drei Varianten wird klar, dass die Mittelwerte wie beim Kalium weder den Grenzwert erreichen noch überschreiten. Trotzdem wird auch deutlich, dass die Belastung der umliegenden Gewässer durch die Kaliumdüngung des Niedermoorgrünlandes verringert werden kann. Diese Aussage wird durch die oben dargestellten Zusammenhänge und Ergebnisse zum Thema –Stickstoffausnutzung durch Kaliumdüngung– verstärkt. Hier konnte nachgewiesen werden, dass die Kaliumdüngung die Stickstoffaufnahme der Pflanzen stark positiv beeinflusst, was für eine bessere Ausnutzung und gegen eine höhere Auswaschung des Stickstoffs spricht. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es weder durch das gedüngte Kalium noch durch den aus der Mineralisation hervorgehenden Stickstoff zu einer Überschreitung der Grenzwerte im Sickerwasser kommt. Trotzdem seien Überschreitungen der Grenzwerte in einzelnen Jahren nicht ausgeschlossen, da in der Darstellung zum Nährstoffgehalt im Sickerwasser ausschließlich mit gebildeten Mittelwerten gerechnet wurde. Verschiedene Versuchsergebnisse, die aus Untersuchungen einiger Moorabflüsse des Nordostdeutschen Tieflands hervorgehen, zeigen dennoch ähnliche Werte und verstärken somit die Aussagekraft der in diesem Versuch ermittelten Ergebnisse. Die Untersuchung zur Konzentration gelöster Stoffe in den Moorabflüssen in verschiedenen Zeiträumen sowie Untersuchungsgebieten weisen auf Nitratgehalte hin, die zwischen unter 0,01 mg/l und 14 mg/l schwanken. Die höchsten Werte wurden dabei in dem am stärksten entwässerten Untersuchungsgebiet ermittelt.⁸³ Trotz der ähnlichen Versuchsergebnisse muss bei dem Vergleich der Sickerwasserkonzentrationen der drei unterschiedlichen Düngungsvarianten mit den Grenzwerten laut Trinkwasserverordnung berücksichtigt werden, dass die Werte im Sickerwasser keines Falls mit den Werten in den umliegenden Gewässern eines Niedermoors gleichzusetzen sind. Um auf eine tatsächliche Gewässerbelastung schließen zu können, müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden, wozu unter anderem

⁸¹ Lüthardt, V. et al. (2014): Moore in Brandenburg und Berlin. Verlag Natur+Text GmbH, Rangsdorf: S. 220f

⁸² Blume, Hans-Peter et al. (2011): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Auflage. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim: S. 248ff

⁸³ Lüthardt, V. et al. (2014): Moore in Brandenburg und Berlin. Verlag Natur+Text GmbH, Rangsdorf: S. 222

die Verdünnung des Sickerwassers mit dem Grundwasser oder dem durchfließenden Wasser gehört.⁸⁴ Trotzdem sollten für eine praxisgerechte Interpretation der Versuchsergebnisse aus Lysimeteruntersuchungen stets Untersuchungen aus der Landschaft hinzugezogen werden. Denn ohne einen Bezug zu Ergebnissen aus Feldversuchen würde es mit großer Wahrscheinlichkeit zu Fehlerquellen führen. Generell ist zu sagen, dass Ergebnisse, die aus Lysimeterversuchen stammen, durch eine hohe Aussagekraft gekennzeichnet sind und bei Verknüpfung mit Feldversuchen direkt in die Praxis übertragen werden können. „Lysimeter eignen sich hervorragend, Stoffbilanzen zu erstellen, die sicherer als Wasserbilanzen in die Landschaft transformiert werden können. Über der Bodenoberfläche wirkende Lysimeterfehler wie Oaseneffekte, Turbulenzen und Randwirkungen beeinflussen Stoffbilanzen weniger als die Wasserbilanz, da die Stoffproduktion davon in geringem Maße betroffen ist. Zwar können auch hier laterale Stoffflüsse nicht berücksichtigt werden, doch ist davon auszugehen, dass Erosionsprozesse auf dem Grünland nur eine untergeordnete Rolle spielen.“⁸⁵

Dies gilt natürlich auch für die Ergebnisse zum Thema Stickstoffsäufnung durch Kaliumdüngung. Auch bei der Betrachtung dieses Zusammenhangs konnten Untersuchungen aus der Landschaft sowie aus Lysimetern hinzugezogen werden, die auf ähnliche Ergebnisse hinwiesen. Dadurch werden die zu diesem Thema aufgezeigten Zusammenhänge in ihrer Aussagekraft deutlich verstärkt und bestätigt. Die Bedingungen, wie sie in diesem Lysimeterversuch simuliert wurden, sind den Praxisbedingungen sehr ähnlich. Auch wenn die geplante Kaliumversorgung der Lysimeter leicht von den tatsächlichen abweichte. So wurden die Lysimeter der drei Varianten im Mittel mit 0,5 g bis 1 g Kalium/m² mehr versorgt, als ursprünglich geplant. Auf einen Hektar hochgerechnet entspräche das eine Abweichung von der geplanten Düngermenge um 5 kg bis 10 kg. Diese geringe Abweichung beeinflusst jedoch nicht die Aussagekraft der in diesem Versuch zur Klärung der Versuchsfragen benötigten Ergebnisse. Bestätigt werden die erzielten Versuchsergebnisse durch vom Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung (LELF) veröffentlichte Versuchsreihen zur Kaliumdüngung von Niedermoorgrünland. Darin wird darauf hingewiesen, dass sich die Kaliumdüngung auch auf Niedermoorgrünland wie üblich anhand des Entzugs über das Pflanzenmaterial orientiert. Eine nachhaltige Kaliumdüngung wird mit der Formel: „Entzug durch den Pflanzenertrag mal 20 g Kalium/kg Trockenmasse in der Pflanze“ beschrieben.⁸⁶ Bei der Betrachtung der in

⁸⁴ Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (2011): Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades. Boden→ Grundwasser; Sickerwasserprognose. Mainz: S. 6

⁸⁵ Schalitz, Gisbert et al (1996): Wasserverbrauch, Stoffaustausch, Ertrag und Qualitätsparameter nachwachsender Rohstoffpflanzen. In: ZALF-Bericht Nr. 26 Stoffhaushalt von Niedermooren und hydromorphen Mineralböden des nordostdeutschen Tieflandes. Hrsg.: Gisbert Schalitz, Axel Behrendt, Wolfgang Merbach und Manfred Fechner. Müncheberg S. 35

⁸⁶ Hertwig, Frank et al. (2006): Entzugsorientierte Düngung mit Kalium auf Niedermoorgrünland. In: Jahresbericht 2006. Hrsg.: Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V. 3 S.

diesem Versuch erzielten Trockenmasseerträge und dessen Kaliumgehalte wird die Formel für die Kaliumdüngung nach Entzug des LELFs bestätigt. Berechnet man für die drei Varianten den Entzug der über einem Kilogramm geernteter Trockenmasse entzogen wurde, so ergeben sich folgende Ergebnisse: Bei der Variante 1 wurden 10,5 g Kalium/kg Trockenmasse entzogen, bei der Variante 2 etwa 19 g Kalium/kg Trockenmasse und bei der Variante 3 etwa 27,5 g Kalium/kg Trockenmasse. Da sich der Ertrag von Variante 2 aus statistischer Sicht nicht signifikant von dem der Variante 3 unterscheidet, dient der bei dieser Variante erzielte Trockenmasseertrag von 0,964 kg/m² als Vergleichswert und bestätigt somit den Entzug von etwa 20 g/kg Trockenmasse trotz der gedüngten Menge an Kalium von nur 16 g/m². Zugleich wird dadurch deutlich, dass die Grünlandbewirtschaftung auf Niedermoorflächen ohne Kaliumdüngung, wie bei der Variante 1 dargestellt, nicht zu empfehlen sei, da das mögliche Ertragspotential nicht erreicht wird. Auch die Bewirtschaftung der Variante 3, die eine Düngung von 30 g Kalium/m² vorsieht, ist nicht empfehlenswert, da der Ertrag im Vergleich zur Variante 2, trotz der doppelt so hohen Kaliumdüngung, nicht signifikant gesteigert werden konnte.

10 Fazit

Eine Kaliumdüngung von Niedermoorgrünland beeinflusst die Ausnutzung des aus der Mineralisation des Torfes hervorgehenden Stickstoffs maßgeblich. Dies ist aus den dargestellten Versuchsergebnissen des sechsjährigen Lysimeterversuchs unbestreitbar zu entnehmen. Durch die Kaliumdüngung konnte sowohl die Stickstoffaufnahme, als auch der Trockenmasseertrag signifikant verbessert werden. Die gewählten Kaliummengen, welche zur Düngung der drei Varianten herangezogen wurden, erwiesen sich zur Versuchsauswertung als optimal, da eindeutige sich voneinander abgrenzende Ergebnisse erzielt wurden und dargestellt werden konnten. Außerdem zeigten Versuchsergebnisse aus Feldversuchen und anderen Lysimeteruntersuchungen ähnliche Ergebnisse bezüglich der Stickstoffausnutzung sowie der Ertragsbildung.

Aus pflanzenbaulicher Sicht ist die Variante 2 mit der Düngung von 15 g Kalium/m² zu empfehlen, da bei dieser Düngergabe bereits der höchste Ertrag erzielt wurde. Bei der Variante 3, die mit 30 g Kalium/m² gedüngt wurde, ergab sich eine klare Üerversorgung, da der Gehalt an Kalium in der geernteten Trockensubstanz zwar deutlich anstieg, jedoch der Ertrag nicht. Auch die Stickstoffaufnahme des Grünlandbestandes konnte durch diese sehr hohe Kaliumdüngung nicht verbessert werden.

Da andere Versuchsergebnisse auf einen Kalumentzug von 20 g/kg Trockenmasse hindeuten und die Kalumbilanz der Variante 2 leicht negativ ausfällt, könnte in Zukunft die Düngergabe der Variante 2 auf 20 g/m² erhöht werden.

Hinsichtlich der Beeinträchtigung der Gewässerqualität in Folge einer Kalium- oder Stickstoffauswaschung kann hervorgehend aus den Versuchsergebnissen der sechs Versuchsjahre zunächst von keiner Gefährdung dieser ausgegangen werden. Unter den Bedingungen, wie sie in diesem Versuch vorherrschten, wurden im Mittel keine erhöhten Nährstoffgehalte im Sickerwasser nachgewiesen, was auch auf keine negative Beeinflussung der Gewässerqualität schließen ließ. Weder das Kalium (trotz sehr hoher Düngung) noch der Stickstoff überschritt den Grenzwert laut Trinkwasserverordnung.

Quellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

AMBERGER, ANTON (1996): Pflanzenernährung. 4. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

ARBEITSKREIS FÜR BODENSYSTEMATIK DER DEUTSCHEN BODENKUNDLICHEN GESELLSCHAFT (1998): Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland, Kurzfassung. Mitteilung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft

BEHRENDT, A. (1995): Moorkundliche Untersuchungen an nordostdeutschen Niedermooren unter Berücksichtigung des Torfschwundes, ein Beitrag zur Moorerhaltung. Diss., Berlin.

BEHRENDT, A., G. SCHALITZ, L. MÜLLER UND U. SCHINDLER (2003): Nährstoffdynamik auf extensiv genutzten Niedermoorweiden –Weide- und Lysimeterversuche-, 10. Gumpensteinner Lysimetertagung. Hrsg.: Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein.

BEHRENDT, AXEL ET AL. (1999): 30 Jahre Paulinenauer Grundwasserlysimeter – eine Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse. Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Forschungsstation Paulinenaue.

BEHRENDT, AXEL ET AL. (2009): Die Paulinenauer Grundwasserlysimeteranlage Entstehung, Funktion und Ergebnisse. In: Symposium 60 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue. Hrsg.: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue.

BERGMANN, WERNER (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart.

BLUME, HANS-PETER ET AL. (2011): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und Bodenbelastung Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Auflage. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

FINCK, ARNOLD (2007): Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten. 6. Auflage. Gebrüder Borntraeger Verlag, Berlin, Stuttgart.

HERTWIG, FRANK (o.D.): Bei der Düngung von Niedermoorgrünland auf Kalium nicht verzichten. Hrsg.: Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft, Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau, Referat Grünland und Futterwirtschaft, Paulinenaue. 8 S.

HERTWIG, FRANK ET AL. (2006): Entzugsorientierte Düngung mit Kalium auf Niedermoorgrünland. In: Jahresbericht 2006. Hrsg.: Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V. 3 S.

KÄDING, H. (1999): Langfristige Grünlandversuche auf Niedermoore – ein fester Bestandteil der Futterbauforschung. In: 50 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue – Ergebnisse der Grünland- und Futterforschung. Hrsg: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue.

KAISER, TH. ET AL. (1999): Die räumliche Herleitung der Grünlandvegetation eines Niedermoorgebietes anhand abiotischer Standortkarten unter Berücksichtigung der Nutzungsfaktoren. In: 50 Jahre Wissenschaftsstandort Paulinenaue – Ergebnisse der Grünland- und Futterforschung. Hrsg.: Paulinenauer Arbeitskreis Grünland und Futterwirtschaft e.V.. Paulinenaue.

LAGHOFER, EDUARD (1991): Bodenphysikalische Aspekte bei der Erfassung von gelösten Stoffen mit Hilfe von Lysimetern. In: Bericht über die Gumpensteiner Lysimetertagung, Gumpenstein.

KUNTZE, H. (1984): Bewirtschaftung und Düngung von Moorböden. –Berichte des Bodentechnologischen Instituts Nds. Landesamt für Bodenforschung 80 S.

LANDESAMT FÜR UMWELT, WASSERWIRTSCHAFT UND GEWERBEAUFSICHT RHEINLAND-PFALZ (2011): Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades. Boden→ Grundwasser; Sickerwasserprognose. Mainz: S. 6

LEHR- UND VERSUCHSANSTALT FÜR GRÜNLAND UND FUTTERWIRTSCHAFT PAULINENAUE E.V. (1993): Jahresbericht 1993. Paulinenaue: LVGF

LUTHARDT, V. ET AL. (2014): Moore in Brandenburg und Berlin. Verlag Natur+Text GmbH, Rangsdorf.

MOORE IN BRANDENBURG. In: Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg, 19. Jhrg., Heft 3, 4 aus 2010. Hrsg.: LUA Landesumweltamt Brandenburg.

MUNDEL, G. (1976): Untersuchungen zur Torfmineralisation in Niedermooren. Archiv Acker-Pflanzenbau Bodenkunde Berlin 20.

MURER, ERWIN (2004): Feldlysimeter-Erfahrungen in den Pilotprojektgebieten in Oberösterreich. In: Landwirtschaft und Grundwasserschutz, Gumpenstein.

SCHACHTSCHABEL, PAUL ET AL. (1976): Scheffer / Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 9. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

SCHALITZ, GISBERT ET AL. (1996): 25 Jahre Lysimeterforschung in Paulinenaue und Neukonzipierung der Untersuchungen 1992. In: ZALF-Bericht Nr. 26 Stoffhaushalt von Niedermooren und hydromorphen Mineralböden des nordostdeutschen Tieflandes. Hrsg.: Schalitz et al. Müncheberg.

SCHALITZ, GISBERT ET AL. (1996): Wasserverbrauch, Stoffaustausch, Ertrag und Qualitätsparameter nachwachsender Rohstoffpflanzen. In: ZALF-Bericht Nr. 26 Stoffhaushalt von Niedermooren und hydromorphen Mineralböden des nordostdeutschen Tieflandes. Hrsg.: Gisbert Schalitz, Axel Behrendt, Wolfgang Merbach und Manfred Fechner. Müncheberg.

SCHALITZ, GISBERT ET AL. (1996): Zum Stellenwert der Lysimeteruntersuchungen in der Agrarlandschaftsforschung. In: ZALF-Bericht Nr. 26 Stoffhaushalt von Niedermooren und hydromorphen Mineralböden des nordostdeutschen Tieflandes. Hrsg.: Schalitz et al. Müncheberg.

SCHEFFER, F., WELTE, ERWIN (1955): Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde, II. Teil Pflanzenernährung. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

SCHELLER, PETER (2008): Untersuchungen zum Stickstoff-Überschuss und den Möglichkeiten seiner Verminderung in Futterbaubetrieben mit hohem Grünlandanteil auf Niedermoore. Diss. Gießen.

SCHILLING, GÜNTHER (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.

SCHMALFUß, KARL (1958): Pflanzenernährung und Bodenkunde. 8. überarbeitete und ergänzte Auflage. S. Hirzel Verlag, Leipzig.

SCHUBERT, SVEN (2006): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. 2. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

SUCCOW, M., JESCHKE, L. (1990): Moore in der Landschaft, Entstehung, Haushalt, Lebewelt, Verbreitung, Nutzung und Erhaltung der Moore. 2. Auflage. Urania-Verlag, Leipzig.

Internetquellen

Zeitz, Jutta et al (2012): Boden des Jahres 2012 – Niedermoor

[https://www.dbges.de/wb/media/Steckbrief_2012.pdf (05.11.2014; 12:02 Uhr)]

http://www.bund.net/themen_und_projekte/naturschutz/moore/moortypen/ (06.11.2014; 08:51 Uhr)

http://www.bfn.de/0311_landschaft.html?&no_cache=1&tx_lsprofile_pi1%5Blandschaft%5D=788&tx_lsprofile_pi1%5Bbundesland%5D=3&tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&tx_lsprofile_pi1%5Baction%5D=show&tx_lsprofile_pi1%5Bcontroller%5D=Landschaft&cHash=2e8dc1804630aa39ca286c2791e0461a (23.10.14; 09:31 Uhr)

http://www.bfn.de/0311_landschaft.html?&no_cache=1&tx_lsprofile_pi1%5Blandschaft%5D=787&tx_lsprofile_pi1%5Bbundesland%5D=3&tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&tx_lsprofile_pi1%5Baction%5D=show&tx_lsprofile_pi1%5Bcontroller%5D=Landschaft&cHash=2b0acb320e6b800d97ad0849fe290958 (23.10.14; 09:09 Uhr)

<http://www.oberes-rhinluch.de/naturschutz> (22.10.14; 13:25 Uhr)

http://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/psm_metaboliten/doc/fachtagungkurzfassung_psm_metaboliten.pdf (29.10.14; 09:43 Uhr)

<http://www.lenntech.de/pse/wasser/kalium/kalium-und-wasser.htm> (25.11.2014; 13:00 Uhr)

<http://www.lenntech.de/pse/wasser/stickstoff/stickstoff-und-wasser.htm> (03.12.2014; 12:48 Uhr)

http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/grundwasser/grundwasserbeschaffenhheit/messergebnisse_landesweit/kaliumgehalte/38552.html (25.11.2014; 13:08 Uhr)

<http://warl.de/index.php?modul=ModulService&action=HandleWasserlexikon#nitrat>
(05.01.2015; 07:17 Uhr)

<http://www.owa-falkensee.de/trinkwasserqualitaet.html> (05.01.2015; 07:38 Uhr)

<http://www.zalf.de/de/forschung/services/fos/bereiche/Seiten/paulinenaue.aspx> (01.08.13;
15:00 Uhr)

<http://www.agrilexikon.de/index.php?id=gesetzvomminimum> (29.01.2015; 11:15 Uhr)

<http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Wechsel-Eiszeit.html> (09.02.2015; 07:55 Uhr)

Anhang

Im folgenden Anhang werden alle Tabellen aufgeführt, aus denen die Werte für die erstellte Arbeit hervorgegangen sind.

Nährstoffflüsse der Lysimeter

Lysimeter	Jahr	N Eintrag g/m ²	N Austrag g/m ²	K Eintrag Dünger g/m ²	K Eintrag Wasser g/m ²	K Austrag g/m ²
Lys 2; 15g K	2003	0,27	0,16	15,0	0,51	0,34
	2004	0,23	0,26	15,0	0,58	0,94
	2005	0,23	0,77	15,0	0,55	4,93
	2006	0,18	0,45	15,0	0,43	0,43
	2007	0,03	3,60	15,0	0,09	1,77
	2008	0,01	8,59	15,0	0,30	0,84
Lys 8; 0g K	2003	0,40	0,19	0,0	0,78	0,48
	2004	0,23	2,97	0,0	0,58	0,59
	2005	0,11	2,02	0,0	0,26	0,36
	2006	0,26	6,90	0,0	0,63	0,50
	2007	0,13	13,08	0,0	0,27	0,90
	2008	0,02	2,71	0,0	0,36	0,51
Lys 40; 30g K	2003	0,41	0,07	30,0	0,78	0,39
	2004	0,24	0,09	30,0	0,61	0,43
	2005	0,26	0,08	30,0	0,63	0,45
	2006	0,23	0,07	30,0	0,56	0,35
	2007	0,04	1,63	30,0	0,11	1,72
	2008	0,07	0,29	30,0	0,88	1,00
Lys 43; 0g K	2003	0,32	0,10	0,0	0,62	0,19
	2004	0,09	0,08	0,0	0,23	0,25
	2005	0,05	0,04	0,0	0,11	0,18
	2006	0,13	0,07	0,0	0,32	0,21
	2007	0,02	0,14	0,0	0,04	0,32
	2008	0,02	0,11	0,0	0,71	0,42
Lys 46; 15g K	2003	0,58	0,13	15,0	1,11	0,36
	2004	0,23	0,10	15,0	0,58	0,43
	2005	0,23	0,16	15,0	0,57	0,37
	2006	0,27	0,10	15,0	0,64	0,26
	2007	0,05	0,52	15,0	0,17	1,38
	2008	0,02	0,46	15,0	0,70	0,55
Lys 50; 30g K	2003	0,26	0,13	30,0	0,45	0,27
	2004	0,20	0,10	30,0	0,50	0,53
	2005	0,49	0,16	30,0	1,16	1,14
	2006	0,35	0,10	30,0	0,84	0,44
	2007	0,11	0,52	30,0	0,34	1,13
	2008	0,05	0,46	30,0	0,82	0,65

Inhaltsstoffe der geernteten Trockenmasse

Lysimeter	Jahr	N ges. g/m ²	P ges. g/m ²	K ges. g/m ²	Ca ges. g/m ²
Lys 2; 15g K	2003	15,5	2,1	16,5	6,9
	2004	19,3	1,9	14,0	6,0
	2005	29,3	3,0	20,9	8,7
	2006	24,2	1,9	14,6	7,3
	2007	26,7	2,2	21,7	8,7
	2008	18,1	1,6	12,4	5,9
Lys 8; 0g K	2003	19,7	2,5	3,4	6,8
	2004	32,8	3,8	12,4	10,6
	2005	21,2	2,7	3,7	5,6
	2006	13,0	1,6	2,2	4,4
	2007	31,4	3,8	9,0	11,0
	2008	19,5	2,5	4,7	6,7
Lys 40; 30g K	2003	25,5	2,9	23,0	11,1
	2004	32,3	4,9	34,0	9,8
	2005	28,3	4,7	32,9	12,2
	2006	21,6	3,5	28,3	10,2
	2007	18,4	2,3	23,5	6,1
	2008	35,0	5,0	37,7	10,8
Lys 43; 0g K	2003	8,8	2,2	11,2	4,4
	2004	8,4	2,1	7,2	4,3
	2005	9,6	2,0	6,3	5,0
	2006	10,6	2,7	4,3	6,4
	2007	10,0	2,2	6,9	6,5
	2008	15,3	3,3	7,7	8,6
Lys 46; 15g K	2003	29,0	3,3	26,4	12,1
	2004	22,2	2,5	22,0	7,5
	2005	34,2	3,6	23,8	14,0
	2006	28,6	2,6	14,7	11,3
	2007	6,1	0,5	7,3	1,9
	2008	33,8	3,3	22,0	10,1
Lys 50; 30g K	2003	18,6	2,1	18,7	7,6
	2004	20,1	2,7	26,7	9,5
	2005	21,9	4,1	36,7	10,6
	2006	16,2	3,5	28,3	8,4
	2007	45,1	4,3	38,0	11,9
	2008	29,7	3,2	15,1	8,4

Erträge der Lysimeter

Lysimeter	Jahr	GM g/m ²	TM g/m ²
Lys 2; 15g K	2003	4137	871,6
	2004	3529	792,6
	2005	5980	1298,7
	2006	4058	865,8
	2007	5404	856,2
	2008	3515	808,1
Lys 8; 0g K	2003	2956	604,9
	2004	4563	973,6
	2005	2865	692,0
	2006	1747	404,0
	2007	5611	859,6
	2008	3075	744,6
Lys 40; 30g K	2003	5026	1021,2
	2004	7239	1471,1
	2005	8600	1609,3
	2006	5719	979,5
	2007	3729	486,0
	2008	5072	990,1
Lys 43; 0g K	2003	2578	655,8
	2004	1916	576,8
	2005	2436	600,3
	2006	2435	548,4
	2007	2657	562,7
	2008	3507	784,8
Lys 46; 15g K	2003	5909	1280,3
	2004	4835	936,1
	2005	7582	1562,4
	2006	4791	1090,6
	2007	1013	185,4
	2008	4877	1019,5
Lys 50; 30g K	2003	3759	758,7
	2004	3730	882,7
	2005	6434	1272,5
	2006	4863	900,5
	2007	8918	1386,3
	2008	4229	898,7

Wasser Zufluss / Abfluss / Evapotranspiration

Jahr	Monat	NS	Lyzr_2			Lyzr_3			Lyzr_40			Lyzr_43			Lyzr_46			Lyzr_50		
			Zufluss	Abfluss	ET	Zufluss	Abfluss	ET												
2003	Apr	13,9	25	3	35,9	21	1	33,9	28	13	28,9	6	5	14,9	78	38	53,9	12	1	24,9
	Mai	27,1	30	0	57,1	69	7	58,1	52	0	78,1	42	0	69,1	80	1	106,1	18	0	45,1
	Jun	26,3	39	0	65,3	88	1	112,3	99	1	124,3	92	0	118,3	113	0	129,3	28	0	64,3
	Jul	29,2	62	0	91,2	86	19	96,2	79	4	104,2	58	0	97,2	101	0	139,2	46	0	75,2
	Aug	19,7	71	0	90,7	109	8	120,7	105	1	123,7	110	3	126,7	167	3	183,7	62	0	81,7
	Sep	52,7	26	0	78,7	28	25	55,7	39	12	79,7	14	11	55,7	39	24	67,7	44	0	96,7
	Okt	32,1	23	0	55,1	15	19	28,1	20	9	43,1	3	3	32,1	12	16	29,1	42	2	72,1
	Nov	201,0	276,0	3,0	474,0	416,0	80,0	537,0	422,0	40,0	583,0	325,0	22,0	504,0	591,0	82,0	710,0	262,0	3,0	460,0
	Dec	24,1	37	11	50,1	33	8	49,1	29	1	52,1	17	4	37,1	38	20	42,1	10	1	33,1
	Jan	22,1	42	1	64,1	47	7	62,1	49	0	71,1	20	1	51,1	48	4	66,1	70	24	58,1
	Feb	47,9	55	13	89,9	36	1	82,9	61	2	106,9	23	3	67,9	46	2	91,9	41	4	84,9
2004	Jul	126,5	41	56	115,5	42	64	106,5	34	46	116,5	3	19	112,5	37	50	115,5	35	37	126,5
	Aug	44,6	74	13	105,6	91	17	118,6	87	3	128,6	38	8	74,6	90	13	121,6	80	6	118,6
	Sep	27,7	34	10	61,7	38	13	62,7	40	2	75,7	8	5	40,7	38	20	55,7	15	4	48,7
	Okt	33,7	15	14	34,7	17	24	26,7	19	6	46,7	0	9	24,7	9	8	34,7	6	7	32,7
	Nov	238,6	299,0	118,0	519,6	304,0	124,0	508,6	319,0	60,0	597,6	119,0	49,0	408,6	306,0	117,0	527,6	257,0	92,0	502,6
	Dec	8,6	81	26	63,6	50	18	40,6	81	13	76,6	3	12	-0,4	55	3	61,6	131	57	82,6
	Jan	69,8	58	32	95,8	20	3	86,8	58	0	127,8	17	7	79,8	46	8	107,8	121	36	104,8
	Feb	54,9	79	13	120,9	31	2	83,9	79	1	132,9	26	3	17,9	50	3	131,9	142	59	137,9
	Mar	119,9	28	46	101,9	13	31	101,9	26	31	114,9	7	12	114,9	40	28	121,9	81	92	105,9
	Apr	45,2	24	21	45,2	8	14	39,2	32	30	47,2	2	11	36,2	34	9	70,2	69	29	35,2
	May	43,2	18	13	45,2	11	9	45,2	32	3	72,2	7	28	22,2	27	14	66,2	59	30	72,2
2005	Okt	23,4	9	11	21,4	7	12	18,4	33	21	35,4	0	4	19,4	16	6	33,4	30	21	32,4
	Nov	265,0	297,0	162,0	500,0	140,0	89,0	416,0	341,0	99,0	607,0	62,0	77,0	350,0	309,0	81,0	593,0	633,0	374,0	624,0
	Dec	34,6	1	13	23,6	2	14	22,6	8	12	30,6	1	18	17,6	30	35	29,6	66	55	45,6
	Jan	42,5	20	3	59,5	96	45	92,5	58	5	95,5	7	54	-4,5	28	1	79,5	60	5	97,5
	Feb	23,3	38	0	61,3	97	48	72,3	64	7	80,3	43	2	64,3	63	0	86,3	71	0	94,3
	Mar	28,8	87	0	115,8	83	11	100,8	92	2	118,8	91	0	119,8	100	0	128,8	159	3	184,8
	Apr	79,0	27	1	105,0	15	17	77,0	24	11	92,0	9	2	86,0	36	14	101,0	34	9	104,0
	May	16,1	32	1	47,1	30	6	40,1	43	5	54,1	14	4	26,1	50	4	62,1	42	1	57,1
	Jun	34,2	23	1	56,2	11	8	37,2	11	3	42,2	3	1	36,2	28	2	60,2	11	0	45,2
	Jul	258,5	228,0	19,0	467,5	334,0	149,0	445,5	300,0	45,0	515,5	16,0	81,0	345,5	345,0	56,0	547,5	443,0	73,0	628,5
2006	Aug	2,4	29	12	19,4	147	87	62,4	33	16	19,4	12	6	8,4	20	9	13,4	85	77	10,4
	Sep	153,2	1	84	70,8	1	65	88,8	3	85	71,8	6	10	149,8	13	92	74,8	0	82	71,8
	Okt	186,2	1	61	126,3	0	90	96,2	15	132	69,3	0	18	168,3	15	132	69,3	5	66	125,3
	Nov	193,8	0	109	84,8	0	98	95,8	5	138	60,8	0	199	-5,2	6	154	45,8	12	106	99,8
	Dec	56,3	10	10	56,3	0	0	56,3	0	3	53,3	1	4	53,3	21	29	48,3	50	13	93,3
	Jan	79,9	4	12	71,9	0	1	78,9	0	19	60,9	0	3	76,9	4	33	50,9	19	11	87,9
	Feb	9,6	3	3	9,6	0	0	9,6	1	4	6,6	0	6	3,6	13	4	18,6	12	0	21,6
	Mar	682,1	48,0	291,0	429,1	149,0	341,0	489,1	57,0	397,0	342,1	19,0	246,0	455,1	92,0	453,0	321,1	183,0	355,0	510,1
	Apr	57,2	9	34	32,2	4	29	32,2	47	59	45,2	11	176	-107,8	6	21	42,2	32	29	50,2
	May	12,8	18	0	30,8	44	0	56,8	64	6	70,8	67	1	78,8	69	0	81,8	89	24	77,8
2007	Jun	25,6	52	22	55,6	48	6	67,6	87	1	111,6	93	16	102,6	103	1	121,6	97	44	78,6
	Jul	68,8	19	16	71,8	14	10	72,8	56	9	115,8	56	36	88,8	58	4	122,8	31	13	86,8
	Aug	59,8	9	0	65,8	1	0	60,8	32	5	86,8	36	27	68,8	28	5	82,8	23	1	81,8
	Sep	45,6	4	0	49,6	38	0	83,6	17	4	58,6	27	19	53,6	28	1	72,6	24	0	69,6
	Okt	67,6	0	22	45,6	1	37	31,6	1	42	25,6	2	58	11,6	2	39	30,6	0	23	34,6
	Nov	337,4	111,0	94,0	354,4	150,0	82,0	405,4	304,0	127,0	514,4	292,0	333,0	296,4	294,0	71,0	560,4	306,0	164,0	479,4

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit in die Hochschulbibliothek eingestellt wird.

Dominic Richter

Friesack, den 12.04.2015