Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

Landwirtschaftskammer Niedersachsen

GRUNDWASSERSCHUTZORIENTIERTE DAUERVERSUCHE

Berechnung des Wasserhaushaltes, der Nitratkonzentrationen und der Nitratfrachten am Standort Hamerstorf

Feldversuch Hamerstorf, Ölrettich am 02.01.2018

- Auswaschungsperiode 2016/2017 und 2017/2018 -

Anne Fiedler, Annegret Fier, Knut Meyer

LBEG
Stilleweg 2
D-30655 Hannover

Hannover, den 30.11.2018

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
2 Versuchsbeschreibung 1
2.1 Versuchsstandort und Versuchsaufbau 1
2.2 Datengrundlagen und Berechnungsmethoden 7
2.2.1 Nitratkonzentrationen 7
2.2.2 Nitratfrachten 7
3 Auswaschungsperiode 2016/2017 und 2017/2018 9
3.1 Witterungsverlauf 9
3.2 Wasserhaushaltsberechnungen 11
3.3 Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser 15
3.3.1 Zeitlicher Verlauf der Nitrat-N-Konzentrationen 15
3.3.2 Mittlere Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser 17
3.4 Nitrat-N-Frachten und N-Bilanzen 18
3.5 Nmin-Werte im Vergleich zu den N-Frachten 22
4 Ergebnistransfer 23
5 Zusammenfassung 24
6 Literatur 27

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage des Wasserschutzversuchs 643 Hamerstorf 2
Abb. 2: Versuchsaufbau des Wasserschutzversuchs 643 Hamerstorf, nicht maßstabsgerecht 3
Abb. 3: Schematischer Aufbau einer Saugsondenanlage, nicht maßstabsgerecht (AFFELT et al. 2018) 4
Abb. 4: Grasuntersaat im April 2016 nach Winterroggen (GPS), Grasuntersaat im Dezember 2016 nach Mais, Zwischenfrucht (konv) bzw. Grasuntersaat (gws) im Oktober 2017 nach Braugerste 6
Abb. 5: Wasserhaushalt der grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten 4 und 5 von Juli 2016 bis Juni 2018 (berechnet nach DVWK 1996) 12
Abb. 6: Wasserhaushalt der konventionell bewirtschafteten Variante 1 von Juli 2016 bis Juni 2018 (berechnet nach DVWK 1996) 13

Abb. 7: Wasserhaushalt der konventionell bewirtschafteten Varianten 3, 4 und 5 von Juli 2016 bis Juni 2018 (berechnet nach DVWK 1996) 13
Abb. 8: Verlauf der Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser (Saugsonden) in 8 dm Tiefe von September 2014 bis Juni 2018 15

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Fruchtartenabhängige Düngungsvarianten/-stufen 3
Tab. 2: Fruchtfolge Feldversuch Hamerstorf 5
Tab. 3: Beregnungstermine 2016 bis 2018 6
Tab. 4: Unkorrigierte Witterungsdaten der Wetterstation Hamerstorf von Juli 2016 bis Juni 2017 (ohne Beregnung) 9
Tab. 5: Unkorrigierte Witterungsdaten der Wetterstation Hamerstorf von Juli 2017 bis Juni 2018 (ohne Beregnung) 10
Tab. 6: Korrigierter monatlicher Niederschlag (P) inklusive Beregnung, aktuelle Verdunstung (ETa), mittlerer Bodenwasservorrat (W) und Sickerwasserrate (SR) in der Auswaschungsperiode 2016/2017 (6a) und 2017/2018 (6b) 11
Tab. 7: Mittlere Nitrat-N-Konzentrationen [mg/l] im Bodenwasser im Winterhalbjahr 2016/2017 (01.07.2016 bis 30.04.2017) und im Winterhalbjahr 2017/2018 (01.07.2017 bis 30.04.2018) 17
Tab. 8: Nitrat-N-Frachten [kg/ha] (Winterhalbjahr 2016/2017), Hauptfrucht Mais (konv) bzw. Mais und Grasuntersaat (gws) 18
Tab. 9: Nitrat-N-Frachten [kg/ha] (Winterhalbjahr 2017/2018), Hauptfrucht Braugerste und Zwischenfrucht (konv) bzw. Braugerste und Grasuntersaat (gws) 19
Tab. 10: Mittlere Nitrat-N-Frachten der Winterhalbjahre 2014/2015 bis 2017/2018 20
Tab. 11: N-Zufuhr (ausschließlich mineralisch), Erträge, N-Abfuhr und N-Bilanz in 2016 und 2017, sowie die Nitrat-N-Frachten in [kg/ha] im Winterhalbjahr 2016/2017 und 2017/2018 21
Tab. 12: Nmin-Werte (0 - 90 cm) nach der Ernte, Spätherbst-Nmin, Frühjahrs-Nmin und Nitrat-N-Frachten im Winterhalbjahr 2016/2017 und im Winterhalbjahr 2017/2018 22

Abkürzungsverzeichnis

Ah	Austauschhäufigkeit des Bodenwassers
C_{org}	organischer Kohlenstoff
ETa	aktuelle Verdunstung
ETp	potenzielle Verdunstung
FK_{We}	Feldkapazität in der effektiven Durchwurzelungstiefe
FM	Frischmasse
GPS	Ganzpflanzensilage
gws	grundwasserschutzorientiert bewirtschaftet
ha	Hektar
kg	Kilogramm
konv	konventionell bewirtschaftet
mg	Milligramm
m	Meter
mm	Millimeter
N	Stickstoff
NO_3	Nitrat
NO_3-N	Nitrat-Stickstoff
Nmin	mineralischer Stickstoff
P	korrigierter Niederschlag
SR	Sickerwasserrate
T	Lufttemperatur
TM	Trockenmasse
TVO	Trinkwasserverordnung
W	Bodenwasservorrat
We	effektive Durchwurzelungstiefe
ZF	Zwischenfrucht

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes „Landwirtschaftliche Bodennutzung und Gewässerschutz in Wasserschutzgebieten“ führt die Landwirtschaftskammer Niedersachsen nach § 28 des Niedersächsischen Wassergesetzes Versuche zur grundwasserschutzorientierten Landwirtschaft durch. Diese Versuche werden mit Mitteln aus der Wasserentnahmegebühr finanziert. Das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) ist innerhalb dieses Projektes für die Messung der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser und die Modellierung des Wasserhaushaltes zur Berechnung der Nitrat-N-Frachten zuständig.

Am Standort Hamerstorf werden seit Herbst 2014 die Auswirkungen grundwasserschutzorientierter Fruchtfolgegestaltung und langjährig unterschiedlich hoher Stickstoffdüngung (N-Düngung) auf die Nitratkonzentration im Sickerwasser untersucht. Es sollen belastbare Daten über die Auswirkung reduzierter und überhöhter N-Düngung gewonnen werden. Zudem wird der Frage nachgegangen, welche Auswirkungen diese Parameter auf die Stickstoffdynamik im Boden, die Erträge und Qualitätsparameter haben. Ziel des Versuches ist es, aus den gewonnenen Erkenntnissen Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Sickerwasserqualität abzuleiten. Um die Nitratkonzentrationen am Standort messen zu können, wurde im Herbst 2013 eine Saugsondenanlage zur Sickerwassergewinnung installiert. Der Feldversuch wurde im Jahr 2014 angelegt. In diesem Bericht werden der Versuchsaufbau und die Ergebnisse der Auswaschungsperioden 2016/2017 und 2017/2018 vorgestellt.

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Versuchsstandort und Versuchsaufbau

Der Wasserschutzversuch Hamerstorf (Versuch 643) ist auf einer Fläche der Versuchsstation Hamerstorf der Landwirtschaftskammer Niedersachsen angelegt. Die Versuchsstation befindet sich im östlichen Teil Niedersachsens im Landkreis Uelzen, ca. 10 km südwestlich der Stadt Uelzen (Abb. 1), 65 m über Normalnull. Die Ackerzahl im Bereich der Saugsondenanlage beträgt 47 (LBEGa 2016). Der in diesem Bereich der Versuchsfläche anstehende Boden ist ein Braunerde-Pseudogley aus schwach schluffigem Sand (weichselzeitlicher Geschiebedecksand) über schwach bis stark lehmigem Sand (saalezeitlicher Geschiebelehm). Die Gehalte an Phosphor, Kalium, Magnesium und der pH-Wert liegen im Oberboden in der Gehaltsklasse C

(Erhaltungsdüngung) nach LWK (2018). Der C_{org}-Gehalt des Oberbodens fällt in die Humusstufe 2 und entspricht ca. 1,5 % Humus (MÜLLER & WALDECK 2011). Die Feldkapazität (FK) in der effektiven Durchwurzelungstiefe (We = 8 dm) liegt bei 154 mm, der permanente Welkepunkt bei 22 mm. Die berechnete mittlere Sickerwassermenge beträgt 246 mm pro Jahr (LBEGb 2016). Die mittlere Austauschhäufigkeit (Sickerwasserrate geteilt durch die Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, kurz: Ah) beträgt 1,6. Diese Zahl gibt an, wie oft das Wasser im effektiven Wurzelraum im Jahr durch das zugeführte Niederschlagswasser ausgetauscht wird. Die Nitratauswaschungsgefährdung am Standort ist als hoch einzustufen (MÜLLER & WALDECK 2011). Detaillierte Ergebnisse der Bodenanalysen können dem Versuchsbericht mit den Ergebnissen der Auswaschungsperioden 2014/2015 und 2015/2016 entnommen werden (FIER & SCHÄFER 2016).

Die langjährige Jahresmitteltemperatur am Versuchsstandort liegt bei 8,5 °C (Mittelwert der DWD-Station Uelzen im Zeitraum 1961 - 1990, DWD 2016). An dieser Station fallen im langjährigen Mittel 622 mm [mm = l/m²] Niederschlag jährlich (Mittelwert der DWD-Station Uelzen im Zeitraum 1961 - 1990, DWD 2016). Die DWD-Station Uelzen liegt in der Nähe des Stadtteils Veerßen. An der, nur wenige Kilometer entfernten, DWD-Station Suderburg wurden in der Referenzperiode 1961 - 1990 bereits 723 mm Niederschlag gemessen (Mittelwert der DWD-Station Suderburg im Zeitraum 1961 - 1990, DWD 2016). Diese Station liegt deutlich näher an der Versuchsfläche Hamerstorf als die Station Uelzen und wird daher für Vergleiche herangezogen, es liegen jedoch keine langjährigen Temperaturdaten vor.

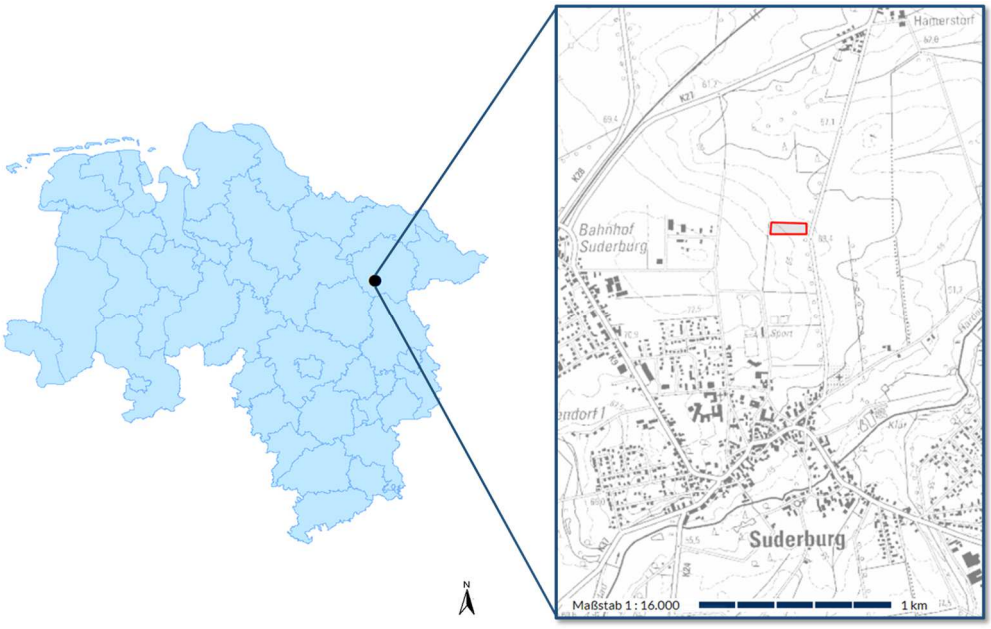

Abb. 1: Lage des Wasserschutzversuchs 643 Hamerstorf

Der Versuch ist als zweifaktorielle Spaltanlage angelegt (Faktor 1: Fruchtfolge, Faktor 2: N-Düngung). Die Fruchtfolge teilt sich auf in eine konventionelle Fruchtfolge (konv) und eine grundwasserschutzorientierte Bioenergiefruchtfolge (gws). Abbildung 2 zeigt die Verteilung der zwei Fruchtfolgevarianten und der 10 Düngungsvarianten (Angaben in kg N/ha) innerhalb der Versuchsanlage.

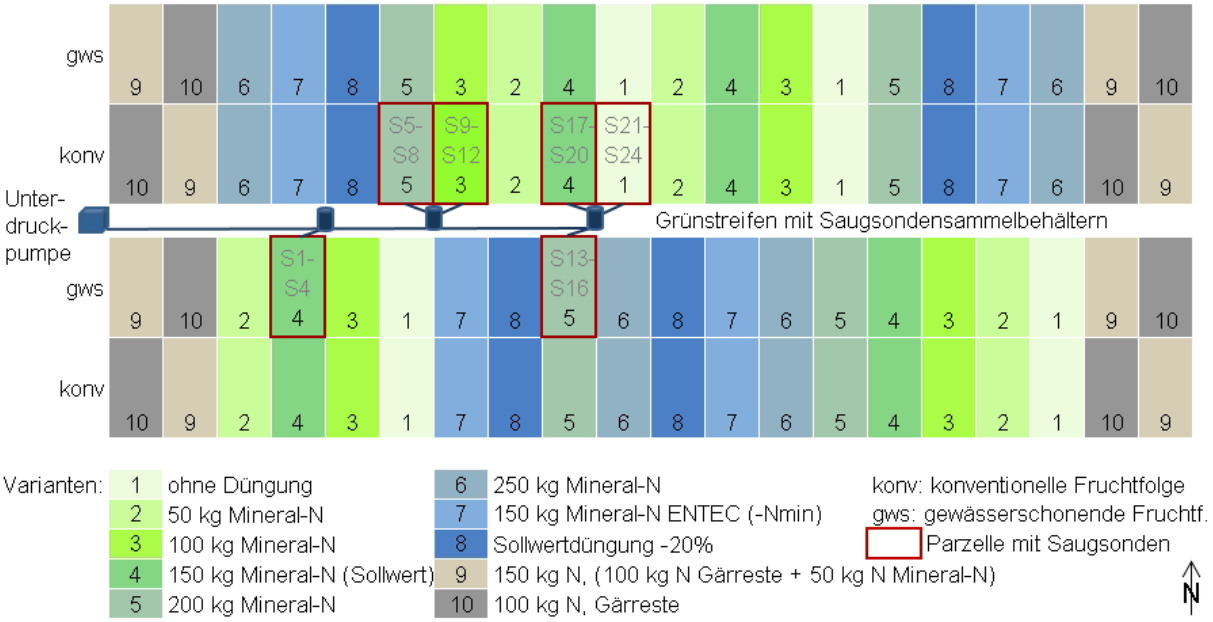

Abb. 2: Versuchsaufbau des Wasserschutzversuchs 643 Hamerstorf, nicht maßstabsgerecht

Je nach Fruchtart sind unterschiedliche Düngungsstufen vorgesehen. Tabelle 1 stellt die 10 Düngungsstufen für die im Versuch geplanten Fruchtarten dar.

Tab. 1: Fruchtartenabhängige Düngungsvarianten/-stufen

kg Stickstoff (N)/ha	Kartoffel	Winterroggen/Mais	Braugerste
Variante 1	0	0	0
Variante 2	80	50	40
Variante 3	120	100	80
Variante 4	160	150	120
Variante 5	200	200	160
Variante 6	240	250	200
Variante 7	180	140	120
Variante 8	Sollwert -20%	Sollwert -20%	Sollwert -20%
Variante 9	180 (120 Gärrest, 60 N)	140 (100 Gärrest, 40 N)	120 (80 Gärrest, 40 N)
Variante 10	120 Gärrest	100 Gärrest	80 Gärrest

In der konventionellen Fruchtfolge ist je eine Parzelle der Düngungsstufen 1, 3, 4 und 5 mit Saugsonden ausgestattet, in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge je eine Parzelle der Düngungsstufen 4 und 5. Jede der sechs Parzellen mit Saugsonden birgt zwei P80-Keramiksaugkerzen(-sonden) und zwei Borosilikatsaugkerzen mit 1 m Schaftlänge. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau einer Saugkerzenanlage. Der Einbau erfolgte auf 8 dm Tiefe, leicht schräg, mit einem Winkel von 10° zur Waagerechten, um einem Abfließen des Sickerwassers in den Kerzenschaft vorzubeugen. Die Spitze der Saugsonden ist von ungestörtem Boden umgeben. Durch den unterirdischen Einbau kann die Parzelle problemlos bewirtschaftet werden, lediglich auf eine Nmin-Probenahme muss im Bereich der Saugsonden verzichtet werden. Die Saugkerzen werden mittels einer Vakuumhauptleitung an eine zeitgesteuerte Unterdruckanlage der Firma UGT mit einem 20 Liter-Ausgleichsbehälter angeschlossen. Während des Betriebs liegt permanent ein Unterdruck von 0,2 bar (untere Schwelle) bis 0,3 bar (obere Schwelle) an. Durch den Ausgleichsbehälter ist die Vakuumversorgung der Anlage über lange Phasen konstant. Das gewonnene Sickerwasser wird in Flaschen aus Borosilikat gesammelt, die sich in drei Sammelbehältern befinden. Die Auffanggefäße werden während der Sickerwasserperiode ca. alle 14 Tage ausgetauscht und zur Nitratanalyse in ein Labor gebracht. Bei strengem Frost wird die Anlage ausgeschaltet, um eine Zerstörung der Auffanggefäße durch Frostsprengung zu verhindern. Außerdem würden die Unterdruckkabel an den Übergängen durch die Kälte undicht werden.

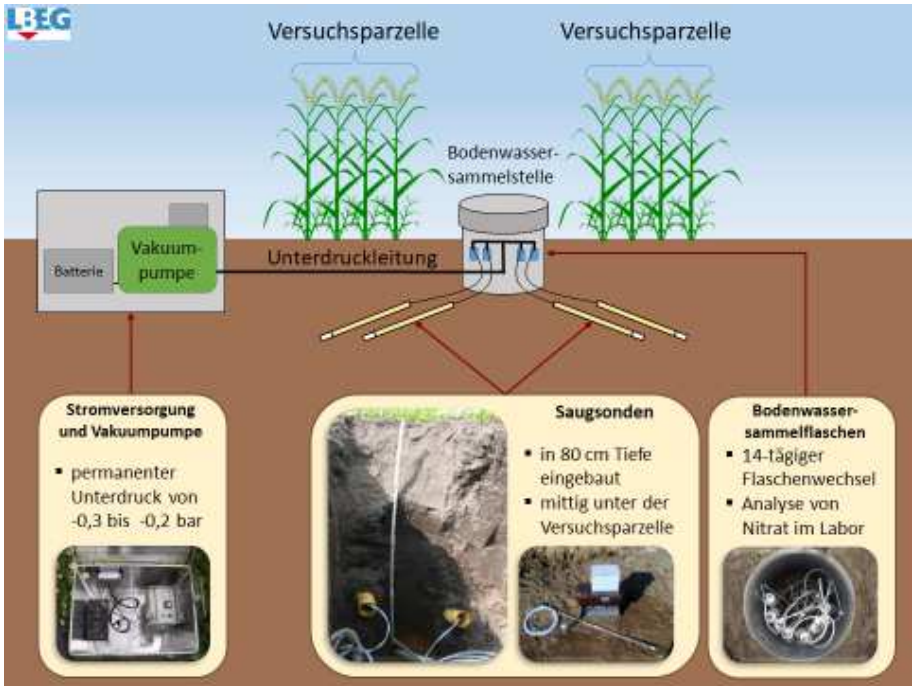

Abb. 3: Schematischer Aufbau einer Saugsondenanlage, nicht maßstabsgerecht (AFFELT et al. 2018)

Die Fruchtfolge des Feldversuchs sowie Saat- und Erntetermine sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tab. 2: Fruchtfolge Feldversuch Hamerstorf

Jahr	konventionell (konv)	Termine	grundwasserschutz-orientiert (gws)	Termine
2014	Kartoffeln	Saat: 24.04.14 Ernte: 24.09.14	Kartoffeln	Saat: 24.04.14 Ernte: 24.09.14
2015	Winterroggen	Saat: 07.10.14 Ernte: 13.08.15	Winterroggen (GPS), reduzierte Aussaatstärke und Grasuntersaat (Welsches Weidelgras)	Saat: 07.10.14 Ernte GPS: 21.06.15 1. Schnitt: 31.07.15 2. Schnitt: 17.09.15 3. Schnitt: 08.05.16
2016	Silomais	Saat: 10.05.16 Ernte: 30.09.16	Silomais mit Grasuntersaat (Welsches Weidelgras)	Saat: 10.05.16 Ernte: 30.09.16
2017	Braugerste und Zwischenfrucht (Ölrettich)	Saat: 28.03.2017 Ernte: 31.07.2017 Saat (ZF): 16.08.2017	Braugerste mit Grasuntersaat (Rotschwingel)	Saat: 28.03.2017 Ernte: 31.07.2017
2018	Kartoffeln (früh)	Saat: 18.04.2018 Ernte: 25.09.2018	Kartoffeln (sehr früh) mit Zwischenfrucht	Saat: 18.04.2018 Ernte: 16.08.2018 Saat (ZF): 18.08.2018

Am 10.05.2016 wurden beide Fruchtfolgevarianten mit Mais bestellt. Auf den gws-Varianten wurde zeitgleich eine Grasuntersaat (Welsches Weidelgras) etabliert, kurz zuvor, am 08.05.2016, ist die vorherige Grasuntersaat ein drittes Mal beerntet worden. Der Mais wurde am 30.09.2016 geerntet. Die Grasuntersaat auf der gws-Variante wurde nicht zusätzlich gedüngt und hat sich mäßig entwickelt (vgl. Abb. 4) und wurde erst kurz vor der Aussaat der Braugerste umgebrochen. Zusammen mit der Aussaat der Braugerste am 28.03.2017 wurde in der grundwasserschutzorientierten Variante erneut eine Untersaat (Rotschwingel) etabliert. Nach Ernte der Braugerste am 31.07.2017 erfolgte auf der konventionell bewirtschafteten Variante die Aussaat einer Zwischenfrucht (Ölrettich). Sowohl die Grasuntersaat als auch die Zwischenfrucht haben sich gut etabliert (vgl. Abb. 4). Die niedrigen Temperaturen im Februar 2018 haben allerdings zum Abfrieren der Zwischenfrucht geführt. Beide Kulturen wurden am 01.03.2018 mit Glyphosat abgetötet und Anfang April 2018 umgebrochen. Am 18.04.2018 wurde sowohl die frühe, als auch die sehr frühe Kartoffel gesetzt. In der grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Variante wurde nach der Ernte der sehr frühen Kartoffel (16.08.2018) am 18.08.2018 eine Zwischenfrucht gesät. Die frühe Kartoffelsorte auf der konventionell bewirtschafteten Variante wurde am 25.09.2018 geerntet (vgl. Tab. 2).

Grasuntersaat (Welsches Weidelgras)	
06.04.2016	06.12.2016
Zwischenfrucht (Ölrettich)	Grasuntersaat (Rotschwingel)
10.10.2017	

Abb. 4: Grasuntersaat im April 2016 nach Winterroggen (GPS), Grasuntersaat im Dezember 2016 nach Mais, Zwischenfrucht (konv) bzw. Grasuntersaat (gws) im Oktober 2017 nach Braugerste

In der Region Uelzen ist die Feldberegnung gängige Praxis. Um aus dem Feldversuch Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Praxis vor Ort ableiten zu können, wird dieser ebenfalls beregnet. Zudem garantiert die Beregnung die Etablierung der Untersaaten und Zwischenfrüchte und damit eine hohe Stickstoffaufnahme in die Pflanzen.

Tab. 3: Beregnungstermine 2016 bis 2018

Jahr	Datum	Menge [mm]
2016	15.07.2016, 26.07.2016, 17.08.2016	30
2017	30.05.2017, 20.06.2017	30
2018	30.05.2018, 06.06.2018, 18.06.2018, 26.06.2018, 05.07.2018, 20.07.2018, 27.07.2018	32

Die Landwirtschaftskammer Niedersachsen nimmt in jeder Variante Frühjahrs-, Ernte- und Herbst-Nmin-Proben. In der Variante 4 (entspricht annähernd dem N-Sollwert) werden in monatlichen Abständen Nmin-Proben gezogen (2014 in der Variante 5).

2.2 Datengrundlagen und Berechnungsmethoden

2.2.1 Nitratkonzentrationen

Die Sickerwassersammelflaschen der Saugsondenanlage werden in ca. 14-tägigem Rhythmus entleert und analysiert. Da an den Saugsonden permanent Unterdruck anliegt, ist das in den zwei Wochen gesammelte Sickerwasser häufig eine Mischprobe über den gesamten Zeitraum. Für die Berechnung von Nitratfrachten werden tägliche Nitratkonzentrationen benötigt, daher wird zwischen den Messterminen stufenweise interpoliert. Die am Probenahmetermin gemessene Nitratkonzentration wird an allen Tagen der zurückliegenden zwei Wochen angenommen. Nur wenn das Probenahmeintervall zwei Wochen deutlich überschreitet und die Anlage aufgrund von Dauerfrost oder Trockenheit abgestellt werden musste, wird im verbleibenden Zeitraum linear interpoliert. Treten Datenlücken von mehr als vier Wochen insbesondere zu Beginn der Sickerwasserbildung auf, wird fallbezogen entschieden, ob für diesen Zeitraum eine Auswertung der Frachten vorgenommen werden kann. Um die Nitratkonzentrationen der Varianten miteinander vergleichen zu können, werden mittlere Nitrat-N-Konzentrationen berechnet. Damit die Mittelwerte unabhängig von der Verteilung der gemessenen Nitratkonzentrationen sind, werden sie nicht direkt aus den interpolierten Tageswerten gebildet. Stattdessen wird die mittlere Nitrat-N-Konzentration aus der innerhalb eines Winterhalbjahres entstandenen Fracht dividiert durch die in diesem Zeitraum gebildete Sickerwassermenge errechnet:

$$NO_3\text{-N}\ [mg/l] = NO_3\text{-N-Fracht}\ [kg/ha] / (0{,}01 \times \text{Sickerwasser}\ [l/m^2]) \quad (1)$$

2.2.2 Nitratfrachten

Um Nitratfrachten abschätzen zu können, wird die tägliche im Boden gebildete Sickerwassermenge benötigt. Sie muss mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells modelliert werden. Viele der hierfür erforderlichen Eingangsdaten liefern die Wetterstationen der Hochschule Suderburg, die DWD Station Uelzen und die ISIP Wetterstation Hamerstorf. Im ersten Schritt wird die maximal mögliche Verdunstung (ETp) abgeschätzt. Sie gibt die Verdunstung bei unbegrenzt verfügbarem Bodenwasser unter Grünland und den gegebenen meteorologischen Bedingungen an. Sie wird nach WENDLING et al. (1991) aus dem Tagesmittel der Lufttemperatur und der Tagessumme der Globalstrahlung berechnet. Die gemessenen Niederschläge werden zum Ausgleich systematischer Messfehler mit Korrekturfaktoren nach RICHTER (1995) verrechnet. Die korrigierten Niederschläge (P) sind daher höher als die gemessenen Niederschläge. Die

tatsächliche Verdunstung (ETa) wird nach WENDLING et al. (1984) ermittelt und berücksichtigt den realen Wasservorrat im Boden, sie ist daher in der Regel niedriger als die potenzielle Verdunstung (ETp). Für die Varianten 4 und 5 (gws), 1 (konv) und 3 bis 5 (konv) werden separate Werte für die aktuelle Verdunstung, den Bodenwasservorrat und die Sickerwasserrate ausgegeben. Ein schlecht entwickelter Bestand verbraucht weniger Wasser als ein gut entwickelter Pflanzenbestand. Besonders auf der Variante 1 ist der Pflanzenbestand kümmerlicher und auch der Ertrag deutlich niedriger als auf den anderen Varianten. Dem wird Rechnung getragen, indem die aktuelle Verdunstung bzw. der in die Formel eingehende Bestandskoeffizient (kc) ertragsabhängig angepasst wird.

Die Wasserhaushaltsberechnung wird mit einem DVWK-Modell (1996) nach WENDLING et al. (1984) durchgeführt. Als Startwert wird der Bodenwasservorrat (W_i) der Wurzelzone (in Hamerstorf 8 dm) benötigt. Es wird angenommen, dass der Bodenwasservorrat am 01.03. eines Jahres Feldkapazität erreicht hatte (alternativ kann der Startwert aus den Trockenmassegehalten errechnet werden, die im Rahmen der Nmin-Beprobungen ermittelt wurden). Im Normalfall wird die Wasserhaushaltsberechnung kontinuierlich über mehrere Jahre fortgeführt, so dass ein Startwert nur einmalig zu Beginn benötigt wird. Zum Startwert W_i wird am Morgen des (i+1)-ten Tages der Niederschlag (P_i) addiert und die aktuelle/tatsächliche Verdunstung (ETa_i), sowie die Sickerwassermenge (SW_i) abgezogen. Übersteigt der Wassergehalt W_{i+1} des Bodens die Feldkapazität in der effektiven Durchwurzelungstiefe (FK_{We}), tritt Sickerwasser auf. Die täglichen Sickerwasserraten werden für die Auswaschungsperiode bzw. das Winterhalbjahr aufsummiert und bilden die jährliche Sickerwasserrate (SR) des Standortes. Ein Winterhalbjahr beginnt am 1. Juni und endet am 30. April des Folgejahres, da danach die Sickerwasser-konzentrationen nicht mehr durch die Vorfrucht, sondern bereits durch Düngung und Mineralisation der neuen Frucht beeinflusst sein können. Zur Berechnung von mehrjährigen Bilanzen werden zudem Sickerwassermengen, Nitratkonzentrationen und Frachten der gesamten Auswaschungsperiode von 1. Juli bis 30. Juni des Folgejahres berücksichtigt.

Zur Ermittlung der Nitrat-N-Frachten, die der Auswaschung unterliegen, werden die täglich berechneten Sickerwassermengen und die tageweise interpolierten Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser der Saugsonden miteinander verrechnet:

$$NO_3\text{-N-Fracht [kg/ha]} = \text{Sickerwasser [l/m²]} \times NO_3\text{-N [mg/l]} \times 0{,}01 \qquad (2)$$

Die täglichen Nitrat-N-Frachten eines Winterhalbjahres werden aufsummiert. Die Summe bildet die N-Auswaschung eines Winterhalbjahres. Eine detailliertere Beschreibung der Methodik zur Berechnung der Nitratfrachten findet sich im Bericht zum Zwischenfruchtversuch in Wehnen (AFFELT et al. 2018).

3 Auswaschungsperiode 2016/2017 und 2017/2018

3.1 Witterungsverlauf

Die Niederschlags- und Temperaturdaten werden von den Wetterstationen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen, der Ostfalia Hochschule Suderburg und des DWD (Deutscher Wetterdienst) zur Verfügung gestellt. In der Auswaschungsperiode 2016/2017 fielen vom 01.07.2016 bis 30.06.2017 insgesamt 704 mm Niederschlag (Tab. 4), in der Auswaschungsperiode 2017/2018 betrugen die Niederschläge 631 mm (Tab. 5). Die Beregnungsmengen (vgl. Tab. 3) sind in den Tabellen 4 und 5 nicht berücksichtigt.

Tab. 4: Unkorrigierte Witterungsdaten der Wetterstation Hamerstorf von Juli 2016 bis Juni 2017 (ohne Beregnung)

Monat	**Temperatur**	**Niederschlag**			**ETp$_{Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potenzielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm	[mm]
Juli 2016	18,7	40,2	64,8	62,0	109,5	-69,3
August	17,3	34,6	65,6	52,7	93,6	-59,0
September	16,6	22,7	55,6	40,8	72,4	-49,7
Oktober	8,8	41,4	49,6	83,5	25,2	16,2
November	3,5	53,4	66,4	80,4	15,2	38,2
Dezember	3,5	41,7	70,4	59,2	10,8	30,9
Januar	-0,5	62,6	64,7	96,8	11,2	51,4
Februar	2,5	40,6	43,3	93,8	17,6	23,0
März	7,0	61,6	55,0	112,0	49,6	12,0
April	7,3	58,2	54,3	107,2	61,8	-3,6
Mai	14,5	83,1	60,6	137,1	101,4	-18,3
Juni 2017	16,9	164,0	73,0	224,7	111,3	52,7
Juli-April	Ø8,5	∑ 457	Σ 590	77	∑ 467	∑ -10
Juli-Juni	**Ø9,7**	**∑ 704**	**Σ 723**	**97**	**∑ 680**	**∑ 24**

* (Mittelwerte 1961 - 1990 der Station Suderburg, DWD 2016)

Tab. 5: Unkorrigierte Witterungsdaten der Wetterstation Hamerstorf von Juli 2017 bis Juni 2018 (ohne Beregnung)

Monat	**Temperatur**	**Niederschlag**			**ETp$_{Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Sum-me	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potenzielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Juli 2017	17,3	124,1	64,8	191,5	100,3	23,8
August	17,1	59,8	65,6	91,2	92,2	-32,4
September	13,5	52,4	55,6	94,2	54,9	-2,5
Oktober	11,7	59,5	49,6	120,0	31,3	28,2
November	5,9	71,3	66,4	107,4	12,7	58,6
Dezember	3,9	54,2	70,4	77,0	9,0	45,2
Januar	3,3	75,6	64,7	116,8	11,3	64,3
Februar	-1,3	10,1	43,3	23,3	22,0	-11,9
März	2,0	59,7	55,0	108,5	36,1	23,6
April	11,9	44,3	54,3	81,6	79,4	-35,1
Mai	15,8	3,2	60,6	5,3	127,2	-124,0
Juni 2018	17,9	17,0	73,0	23,3	118,5	-101,5
Juli-April	Ø 8,6	∑ 611	Σ 590	104	∑ 449	∑ 162
Juli-Juni	**Ø 10,0**	**∑ 631**	**Σ 723**	**87**	**∑ 695**	**∑ -64**

* (Mittelwerte 1961 - 1990 der Station Suderburg, DWD 2016)

Für die Beurteilung der Nitratkonzentrationen ist besonders der Zeitraum vom 01.07. bis 30.04. eines Jahres (Winterhalbjahr) relevant. Im Winterhalbjahr 2016/2017 wurden 457 mm Niederschlag ermittelt (vgl. Tab. 4), im Winterhalbjahr 2017/2018 611 mm (vgl. Tab. 5). Im Winterhalbjahr 2016/2017 liegen die Niederschläge unter dem langjährigen Mittel (1961 - 1990) von 590 mm für diesen Zeitraum was ungefähr 77% des langjährigen Mittels ausmacht (DWD-Station Suderburg, DWD 2008). Das Winterhalbjahr 2017/2018 liegt mit der Niederschlagssumme von 611 mm oberhalb des langjährigen Mittels. Im Jahr 2017 sind die Monate Juni und Juli besonders niederschlagsreich. Sie machen durchschnittlich 200 % des langjährigen Mittels aus. Niederschlagsarm ist der Monat Februar 2018 mit 10,1 mm und 23,3 % des langjährigen Mittels. Die mittlere Temperatur in beiden Winterhalbjahren liegt mit 8,5 °C und 8,6 °C oberhalb des langjährigen Mittels von 7,4 °C für Juli bis April der Jahre 1961 bis 1990 der Station Uelzen (DWD 2016).

Zur Berechnung der ETp werden das Tagesmittel der Lufttemperatur und die Tagessumme der Globalstrahlung benötigt. Letzteres wird vom 01.01.2016 bis zum 22.03.2016 von der DWD Station Uelzen (ca. 7 km nordwestlich vom Versuchsfeld entfernt) übernommen. Ab dem 23.03.2016 stellt die Ostfalia Hochschule freundlicherweise die Globalstrahlungsdaten ihrer

direkt neben dem Feldversuch gelegenen Kompaktwetterstation zur Verfügung. Datenlücken werden dabei mit den Globalstrahlungsdaten der DWD Station Uelzen ergänzt. Die klimatische Wasserbilanz (KWB) wird aus dem Niederschlag abzüglich der potentiellen Verdunstung ermittelt. Fällt sie negativ aus, ist in diesen Monaten voraussichtlich kein oder nur wenig Sickerwasser gebildet worden.

3.2 Wasserhaushaltsberechnungen

In Tabelle 6 sind wichtige Ergebnisse der Wasserhaushaltsberechnung für die Auswaschungsperioden 2016/2017 und 2017/2018 aufgeführt: der nach RICHTER (1995) korrigierte monatliche Niederschlag (P), die aktuelle Verdunstung (Eta), der mittlere Bodenwasservorrat (W) und die Sickerwasserraten (SR) der verschiedenen Varianten.

Tab. 6: Korrigierter monatlicher Niederschlag (P) inklusive Beregnung, aktuelle Verdunstung (ETa), mittlerer Bodenwasservorrat (W) und Sickerwasserrate (SR) in der Auswaschungsperiode 2016/2017 (6a) und 2017/2018 (6b)

6a)

Monat	**P**	**ETa** gws Var. 4-5	**ETa** konv Var. 1	**ETa** konv Var. 3-5	**W** gws Var. 4-5	**W** konv. Var. 1	**W** konv. Var. 3-5	**SR** gws Var. 4-5	**SR** konv. Var. 1	**SR** konv. Var. 3-5
	[mm] bzw. [l/m²]									
Juli 2016	104,4	107,6	107,6	125,4	119,7	132,8	115,6	0,0	0,0	0,0
August	68,2	85,8	85,8	97,3	124,8	137,9	106,3	0,0	0,0	0,0
September	25,3	65,9	66,4	67,8	192,6	105,5	66,1	0,0	0,0	0,0
Oktober	47,0	25,0	16,4	16,0	81,1	98,4	59,8	0,0	0,0	0,0
November	62,1	15,2	9,9	9,9	122,9	142,7	108,1	0,0	10,7	0,0
Dezember	49,6	10,8	7,0	7,0	149,3	154,9	144,8	25,8	44,7	16,8
Januar	76,9	11,2	7,3	7,3	154,7	155,4	155,4	62,9	67,4	67,4
Februar	50,2	17,6	11,5	11,5	153,0	154,2	154,2	34,3	39,9	39,9
März	73,9	47,7	32,7	33,7	150,1	152,4	152,4	40,6	50,5	50,5
April	67,5	55,6	45,3	55,6	145,0	149,3	145,4	14,7	21,2	19,4
Mai	123,1	121,5	84,5	121,5	132,6	145,7	132,6	0,0	33,6	0,0
Juni 2017	210,9	149,9	98,3	149,9	129,5	151,3	129,5	0,0	56,7	0,0
Juli-April	∑625	∑443	∑390	∑431	Ø129	Ø138	Ø121	∑178	∑234	∑194
Juli-Juni	**∑959**	**∑715**	**∑573**	**∑703**	**Ø130**	**Ø140**	**Ø122**	**∑178**	**∑325**	**∑194**

6b)

Monat	**P**	**ETa** gws Var. 4-5	**ETa** konv Var. 1	**ETa** konv Var. 3-5	**W** gws Var. 4-5	**W** konv. Var. 1	**W** konv. Var. 3-5	**SR** gws Var. 4-5	**SR** konv. Var. 1	**SR** konv. Var. 3-5
	[mm] bzw. [l/m²]									
Juli 2017	137,1	120,4	83,6	120,4	143,8	152,7	144,1	80,7	119,1	80,7
August	66,0	92,2	55,3	55,3	125,5	143,8	140,8	0,0	11,0	4,8
September	58,4	54,9	46,7	46,7	103,8	140,5	140,5	0,0	0,0	0,0
Oktober	67,6	31,3	31,3	31,3	136,3	153,0	153,0	0,0	35,1	35,1
November	82,9	12,7	12,7	12,7	155,4	155,8	155,8	64,3	69,6	69,6
Dezember	64,4	9,0	9,0	9,0	154,9	154,9	154,9	47,7	47,7	47,7
Januar	92,8	11,3	11,3	11,3	156,2	156,2	156,2	82,2	82,2	82,2
Februar	12,5	22,0	22,0	22,0	148,0	148,0	148,0	12,9	12,9	12,9
März	71,6	36,1	10,8	10,8	144,6	149,9	149,9	1,8	25,0	25,0
April	51,4	63,3	35,9	35,9	145,7	150,1	150,1	26,5	53,5	53,5
Mai	35,6	103,3	95,4	95,4	86,8	94,0	94,0	0,0	0,0	0,0
Juni 2018	114,8	130,6	131,4	131,4	57,7	61,2	61,2	0,0	0,0	0,0
Juli-April	∑705	∑453	∑319	∑355	Ø141	Ø151	Ø149	∑316	∑456	∑411
Juli-Juni	**∑855**	**∑687**	**∑545**	**∑582**	**Ø129**	**Ø138**	**Ø137**	**∑316**	**∑456**	**∑411**

In den Abbildung 5 bis 7 sind die Werte aus den Tabelle 6a und 6b grafisch dargestellt. Zusätzlich ist die Feldkapazität in der effektiven Durchwurzelungstiefe (FK_{We}) abgebildet.

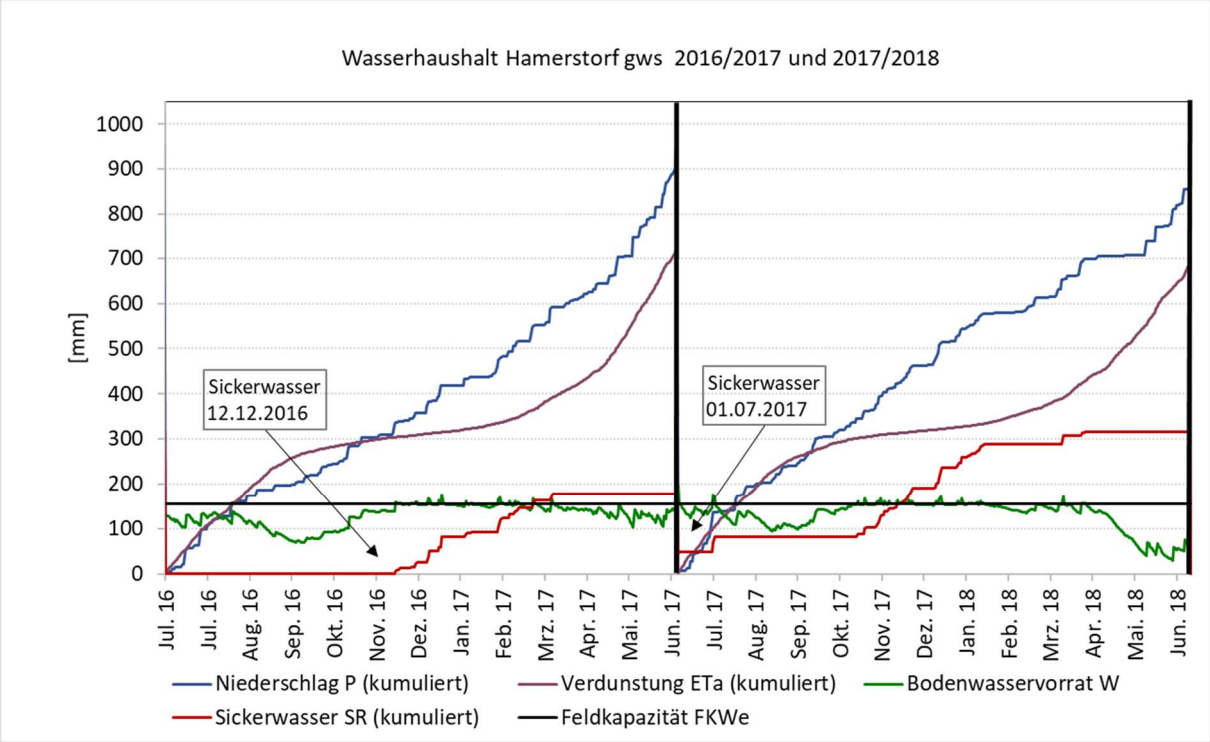

Abb. 5: Wasserhaushalt der grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten 4 und 5 von Juli 2016 bis Juni 2018 (berechnet nach DVWK 1996)

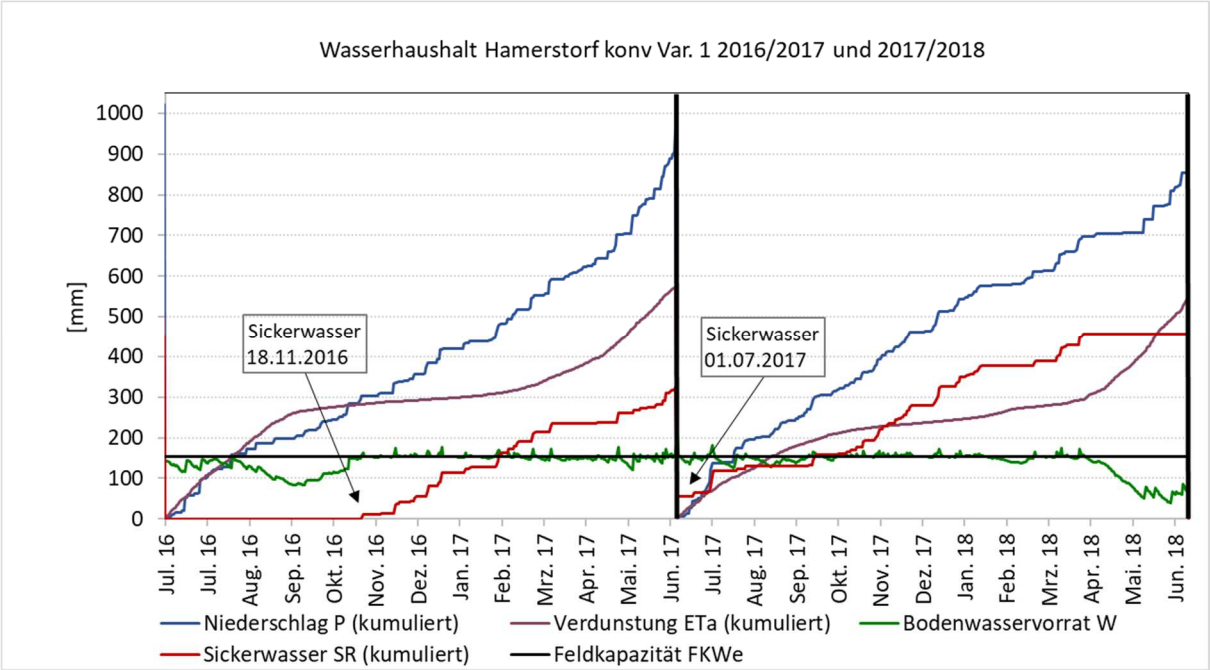

Abb. 6: Wasserhaushalt der konventionell bewirtschafteten Variante 1 von Juli 2016 bis Juni 2018 (berechnet nach DVWK 1996)

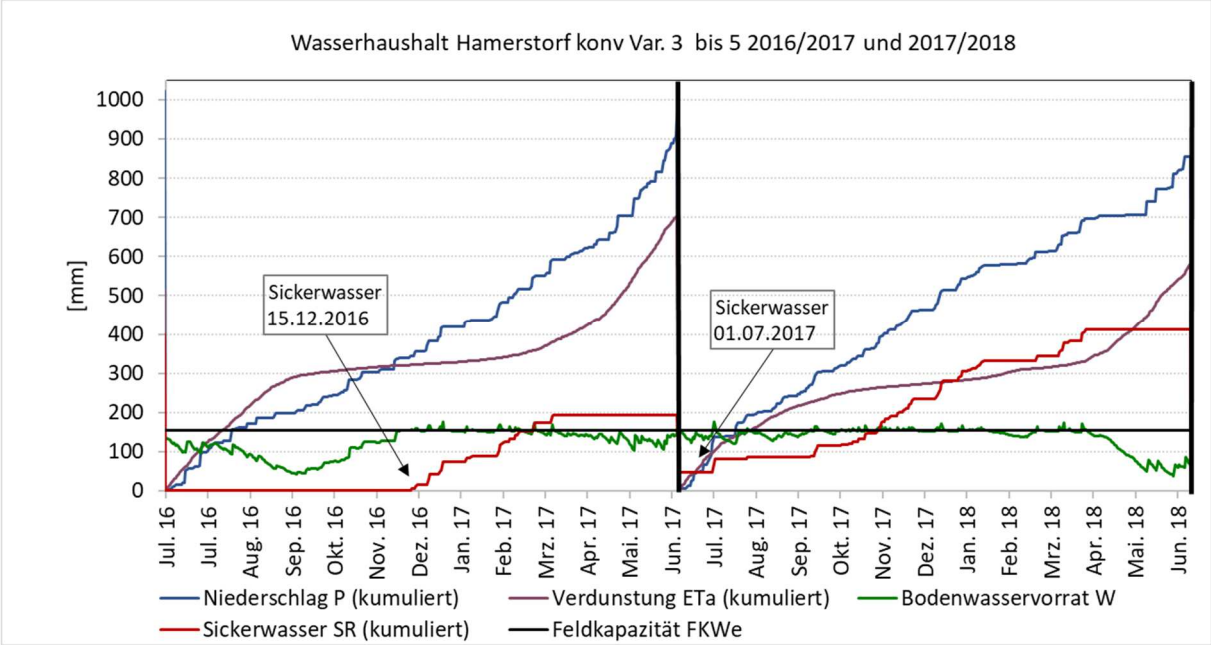

Abb. 7: Wasserhaushalt der konventionell bewirtschafteten Varianten 3, 4 und 5 von Juli 2016 bis Juni 2018 (berechnet nach DVWK 1996)

Der Herbst im Winterhalbjahr 2016/2017 ist ungewöhnlich trocken. Auf den konventionell bewirtschafteten Varianten 4 und 5 und den grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten 3 bis 5 beginnt die Sickerwasserperiode erst im Dezember 2016. Lediglich auf der

Variante 1 (konv) wird durch den geringeren Bedeckungsgrad bereits im November 2016 Sickerwasser gebildet.

Ende April 2017 endet die Sickerwasserbildung auf den Varianten 4 und 5 (gws) und den Varianten 3 bis 5 (konv). In den Monaten Mai und Juni 2017 fällt verhältnismäßig viel Niederschlag, sodass auf der Variante 1 (konv) durch die geringe Bodenbedeckung zusätzlich Sickerwasser auftritt. Mit einer Sickerwassermenge von 178 mm weisen die Varianten 4 und 5 mit grundwasserschutzorientierter Bewirtschaftung die niedrigste Sickerwassermenge auf. Auf Variante 1 (konv) fallen 234 mm und auf den Varianten 3 bis 5 (konv) fallen 194 mm Sickerwasser an. Die Austauschhäufigkeiten (Ah) auf der Variante 1 ist durch den geringeren Bedeckungsgrad mit 1,5 leicht höher als auf den anderen Varianten mit 1,2 (gws) und 1,3 (konv).

Im Winterhalbjahr 2017/2018 liegen die korrigierten Niederschläge mit insgesamt 705 mm über den korrigierten Niederschlägen (625 mm) des Winterhalbjahres 2016/2017. Durch anhaltend hohe Niederschläge tritt auf allen Varianten von Juni 2017 bis Mitte April 2018 annähernd durchgängig Sickerwasser auf. Im Winterhalbjahr 2017/2018 fällt 411 mm Sickerwasser auf den konventionell bewirtschafteten Varianten 3 bis 5 an. Das ist im Vergleich zum Winterhalbjahr 2016/2017 mehr als doppelt so viel. Mit 316 mm weisen die grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten deutlich weniger Sickerwasser auf. Die Variante 1 (konv) weist mit 456 mm die höchste Sickerwassermenge auf, da durch den geringeren Pflanzenbestand weniger Wasser verdunstet.

Die Austauschhäufigkeiten spiegeln die hohen Niederschläge wieder. Auf der konventionell bewirtschafteten Variante 1 beträgt sie 3 auf den grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten 4 und 5 beträgt sie 2,1 und auf den anderen Varianten 2,7. Der Bodenwasservorrat ist auf allen Varianten ähnlich. Durch die Zwischenfrucht auf den konventionellen Varianten und die Grasuntersaat auf der grundwasserschutzorientierten Varianten wurde im Winterhalbjahr 2017/2018 eine durchgehende Bodenbedeckung angestrebt.

3.3 Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser

3.3.1 Zeitlicher Verlauf der Nitrat-N-Konzentrationen

Die im Sickerwasser der Saugsonden gemessenen Nitrat-N-Konzentrationen (Nitrat-N bzw. NO_3-N = Menge an Stickstoff, die im Nitrat enthalten ist) aller Varianten sind in Abbildung 8 dargestellt.

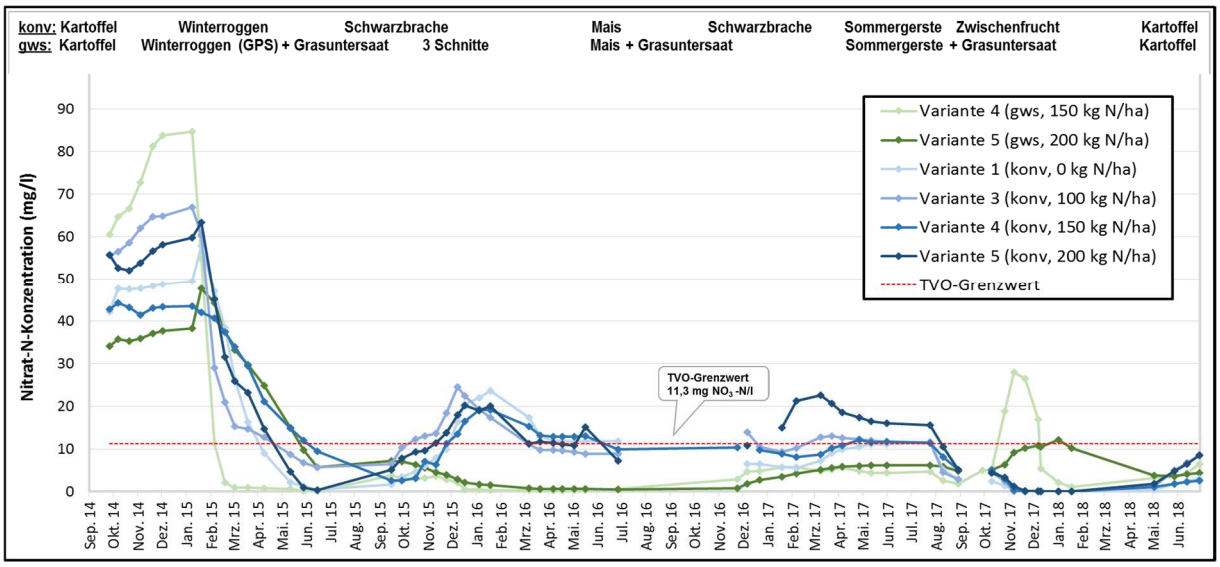

Abb. 8: Verlauf der Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser (Saugsonden) in 8 dm Tiefe von September 2014 bis Juni 2018

Auffällig sind die zu Beginn des Feldversuches sehr hohen Konzentrationen im Winterhalbjahr 14/15 nach Kartoffeln. Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TVO) von 11,3 mg NO_3-N/l (entspricht 50 mg NO_3/l) (TRINKWV 2018) wird um ein Mehrfaches überschritten (der Grenzwert findet bei Sickerwasser keine Anwendung und dient hier zur Orientierung). Anfang Februar 2015 gehen die Konzentrationen auf allen Varianten bedingt durch die Stickstoffauswaschung deutlich zurück. Ab Oktober 2015 sind zum ersten Mal deutliche Unterschiede zwischen konventioneller und grundwasserschutzorientierter Bewirtschaftung zu erkennen. Auf den grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten gehen die Konzentrationen kontinuierlich zurück und liegen ab Februar 2016 unter 1 mg NO_3-N/l. Die konventionell bewirtschafteten Varianten bewegen sich von Dezember 2015 bis Februar 2016 oberhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung.

Im Sommer und Herbst 2016 können auf Grund der geringen Bodenfeuchte keine Sickerwasserproben gewonnen werden. Im Winter und Frühjahr 2016/2017 bewegen sich die Konzentrationen der grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten um 5 mg NO_3-N/l und damit unter denen der konventionell bewirtschafteten Varianten. Offenbar hat die Grasuntersaat einen Teil des bodenbürtigen Stickstoffs aufgenommen. Vom Feldversuch Thülsfelde ist bekannt, dass in der Regel im Herbst nach Maisanbau die Konzentrationen im Sickerwasser ein Mehrfaches über den Grenzwert der TVO ansteigen und im Frühjahr bedingt durch die Auswaschung wieder unter den Grenzwert zurückgehen (NOLTEMEYER et al. 2018). Im Winterhalbjahr 2016/2017 fehlt ein starker Anstieg der Konzentrationen, stattdessen sind die Konzentrationen über einen langen Zeitraum erhöht. Es ist nicht genug Sickerwasser angefallen um den vorhandenen Stickstoff komplett auszuwaschen. Dies geschieht erst im September 2017, da im Spätsommer und Herbst ungewöhnlich viel Niederschlag fällt.

Ab Oktober 2017 ist eine Veränderung im Verlauf der Kurven zu erkennen. Die Konzentrationen auf den Varianten mit grundwasserschutzorientierter Bewirtschaftung steigen um ein Vielfaches an. Auffällig ist besonders Variante 4, da die Nitratkonzentrationen innerhalb von zwei Monaten über 25 mg NO_3-N/l erreichen. Variante 5 der grundwasserschutzorientierten Bewirtschaftung erreicht im Januar 2018 den TVO-Grenzwert. Im Gegensatz dazu liegen die Nitratkonzentrationen der konventionell bewirtschafteten Varianten von September 2017 bis Juni 2018 unter 1 mg NO_3-N/l. Warum reduziert die Zwischenfrucht nach der Braugerste die Nitratkonzentrationen stärker als die Grasuntersaat? Beide Kulturen haben sich gut entwickelt (vgl. Abb. 4). Eine mögliche Erklärung wäre, dass die seit 2014 angebauten Grasuntersaaten zu einer Anreicherung von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden geführt haben. Im Herbst 2017 kommt es dann durch die feuchte und verhältnismäßig warme Witterung zu einem Mineralisationsschub im Boden. Für belastbare Aussagen sind jedoch weitere Versuchsjahre notwendig.

3.3.2 Mittlere Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser

In Tabelle 7 sind die mittleren Nitrat-N-Konzentrationen im Bodenwasser der Saugsonden für das Winterhalbjahr 2016/2017 und 2017/2018 dargestellt.

Tab. 7: Mittlere Nitrat-N-Konzentrationen [mg/l] im Bodenwasser im Winterhalbjahr 2016/2017 (01.07.2016 bis 30.04.2017) und im Winterhalbjahr 2017/2018 (01.07.2017 bis 30.04.2018)

	mittlere Nitrat-N-Konzentration [mg/l]	
grundwasserschutzorientiert	2016/2017	2017/2018
Var. 4: 160 bzw. 150 kg N/ha	5	7
Var. 5: 200 kg N/ha	4	9
konventionell	2016/2017	2017/2018
Var. 1: ohne N	7	3
Var. 3: 120 bzw. 100 kg N/ha	11	2
Var. 4: 160 bzw. 150 kg N/ha	9	3
Var. 5: 200 kg N/ha	19	3

Im Winterhalbjahr 2016/2017 liegen die Konzentrationen der Varianten 4 und 5 mit grundwasserschutzorientierter Bewirtschaftung unter den Konzentrationen der konventionell bewirtschafteten Varianten. Ein Anstieg der Konzentration mit steigender Düngungsintensität ist nicht zu beobachten. Die geringen Nitrat-N-Konzentrationen im Sickerwasser sprechen für eine verstärkte Stickstoff-Aufnahme durch die Grasuntersaat. Die konventionell bewirtschaftete Variante 1 (ohne N-Düngung) weist eine mittlere Konzentration von 7 mg NO_3-N/l auf, welche unter dem Grenzwert von 11,3 mg NO_3-N/l der Trinkwasserverordnung (TRINKWV 2018) liegt. Mit zunehmender Düngungsintensität ist ein leichter Anstieg der Konzentrationen zu beobachten. Die höchste mittlere Konzentration weist Variante 5 (konv) mit 19 mg NO_3-N/l auf.

Auffällig im Winterhalbjahr 2017/2018 sind die sehr niedrigen Konzentrationen auf den konventionell bewirtschafteten Varianten. Diese befinden sich in einem Bereich von 2 bis 3 mg NO_3-N/l. Diese niedrigen Konzentrationen sind vermutlich auf die Wirkung der Zwischenfrucht nach der Braugerste zurück zu führen, die den Großteil des verfügbaren Stickstoffes in den Wintermonaten aufgenommen hat. Wie sich die Zwischenfrucht langfristig auf die Konzentrationen auswirkt, muss über mehrere Fruchtfolgen hinweg beobachtet werden.

Deutlich höher sind die mittleren Konzentrationen der grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten. Trotz Grasuntersaat steigen die Konzentrationen auf 7 bzw. 9 mg NO_3-N/l an.

3.4 Nitrat-N-Frachten und N-Bilanzen

In Tabelle 8 und 9 sind die monatlichen Nitrat-N-Frachten in 8 dm Tiefe für die beiden betrachteten Auswaschungsperioden aufgeführt.

Tab. 8: Nitrat-N-Frachten [kg/ha] (Winterhalbjahr 2016/2017), Hauptfrucht Mais (konv) bzw. Mais und Grasuntersaat (gws)

	gws		**konv**			
Monat	**Var. 4** 160 kg N	**Var. 5** 200 kg N	**Var. 1** 0 kg N	**Var. 3** 120 kg N	**Var. 4** 160 kg N	**Var. 5** 200 kg N
Juli 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aug.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sep.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Okt.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nov.	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0
Dez.	1,4	0,8	2,8	1,6	1,5	2,5
Jan.	3,6	2,2	3,8	6,4	5,9	10,7
Feb.	1,7	1,7	2,8	4,9	3,5	9,0
März	2,0	2,2	4,2	6,5	4,8	10,9
April	0,8	0,9	2,1	2,4	2,1	3,6
Mai	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0
Juni 2017	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0
Summe (Juli - April)	10	8	16	22	18	37
Summe (Juli - Juni)	10	8	27	22	18	37

Tab. 9: Nitrat-N-Frachten [kg/ha] (Winterhalbjahr 2017/2018), Hauptfrucht Braugerste und Zwischenfrucht (konv) bzw. Braugerste und Grasuntersaat (gws)

	gws		**konv**			
	Var. 4	**Var. 5**	**Var. 1**	**Var. 3**	**Var. 4**	**Var. 5**
Monat	150 kg N	200 kg N	0 kg N	100 kg N	150 kg N	200 kg N
Juli 2017	3,0	4,9	10,6	7,0	8,1	10,9
Aug.	0,0	0,0	0,3	0,1	0,2	0,2
Sep.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Okt.	0,0	0,0	0,7	1,4	1,5	1,4
Nov.	14,3	6,7	0,1	0,0	0,1	0,2
Dez.	3,0	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Jan.	1,1	8,4	0,1	0,0	0,0	0,0
Feb.	0,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
März	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3
April	0,8	1,3	0,3	0,6	0,5	0,8
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juni 2018	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe (Juli - April)	22	28	12	9	11	14
Summe (Juli - Juni)	22	28	12	9	11	14

Im Winterhalbjahr 2016/2017 wird der größte Teil der Fracht in den Monaten Dezember bis März gebildet, da in diesen Monaten hohe Sickerwasserraten und hohe Nitratkonzentration zusammentreffen. Im April gehen die Nitrat-N-Frachten bereits deutlich zurück. Anfang April 2017 tritt das letzte Mal in der Auswaschungsperiode 2016/2017 Sickerwasser auf. In der Summe erreichen die Frachten im Winterhalbjahr 2016/2017 Werte zwischen 8 kg N/ha (Var. 5, gws) und 37 kg N/ha (Var. 5, konv). Auf den konventionell bewirtschafteten Varianten kann 2016/2017 ein leichter Anstieg der Fracht mit steigender Düngungsstufe festgestellt werden.

Im Winterhalbjahr 2017/2018 wird auf den konventionell bewirtschafteten Varianten von Juli bis April Sickerwasser gebildet, so dass N-Fracht entstehen kann. Auf den gws-Varianten beginnt die Sickerwasserspende erst im November und endet ebenfalls im April. Zusätzlich wird im Juli 2017 Sickerwasser gebildet. Parallel zu den mittleren Nitrat-N-Konzentrationen sind auch die Nitrat-N-Frachten auf den grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten mit 22 kg N (Var. 4) und 28 kg N (Var. 5) deutlich höher als auf den konventionell bewirtschafteten Varianten mit 9 kg N (Var. 3) bis 14 kg N (Var. 5). Auf den konventionell bewirtschafteten Varianten kann 2017/2018 kein eindeutiger Anstieg der Fracht mit steigender Düngungsstufe festgestellt werden.

Erstmalig ist mit dem Ende der Auswaschungsperiode 2017/2018 der 4-gliedrige Fruchtfolgezyklus einmal vollständig durchlaufen. Wird die mittlere Nitrat-N-Fracht über alle 4 Jahre gebildet, weisen die grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten etwas niedrigere Frachten auf als die gleich hoch gedüngten konventionell bewirtschafteten Varianten (vgl. Tab. 10). Ob sich dieser Trend dauerhaft für die grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten einstellt, müssen die langjährigen Untersuchungen zeigen.

Tab. 10: Mittlere Nitrat-N-Frachten der Winterhalbjahre 2014/2015 bis 2017/2018

	Mittlere Nitrat-N-Frachten [kg/ha]
grundwasserschutzorientiert	2014/2015 bis 2017/2018
Var. 4: 160 bzw. 150 kg N/ha	43
Var. 5: 200 kg N/ha	38
konventionell	2014/2015 bis 2017/2018
Var. 1: ohne N	51
Var. 3: 120 bzw. 100 kg N/ha	56
Var. 4: 160 bzw. 150 kg N/ha	46
Var. 5: 200 kg N/ha	59

In Tabelle 11 ist dargestellt, wieviel mineralischer Stickstoff den Saugsondenparzellen in den Versuchsjahren 2016, 2017 und 2018 zugeführt wurde. Weiterhin sind die Erträge (jeweils der Mittelwert aus den vier Parzellen einer Variante) aufgeführt und die daraus resultierenden N-Entzüge und die N-Bilanz aus Zufuhr abzüglich Abfuhr. Die Erträge fallen relativ hoch aus, da die Kulturen durch die Beregnung optimal mit Wasser versorgt wurden und es sich um Exaktversuche handelt. In die letzte Spalte ist die Nitrat-N-Fracht der Winterhalbjahre 2016/2017 und 2017/2018 eingetragen.

Tab. 11: N-Zufuhr (ausschließlich mineralisch), Erträge, N-Abfuhr und N-Bilanz in 2016 und 2017, sowie die Nitrat-N-Frachten in [kg/ha] im Winterhalbjahr 2016/2017 und 2017/2018

	N-Düngungs-variante	N-Zufuhr Haupt-frucht[a]	N-Zu-fuhr Gras	Ertrag Haupt-frucht	N-Ab-fuhr Haupt-frucht	Ertrag Gras	N-Abfuhr Gras	N-Bilanz Zufuhr-Abfuhr	N-Fracht
	[kg/ ha]	[kg/ ha]	[kg/ ha]	[dt FM/ha]	[kg/ ha]	[dt TM/ha]	[kg/ ha]	[kg/ ha]	[kg/ ha]
gws 2016	Var. 4: 150	150	75[b]	632	203	32	57	-35	10
	Var. 5: 200	200	75[b]	715	276	34	53	-53	8
konv 2016	Var. 1: 0	0		498	158			-158	16
	Var. 3: 100	100		641	203			-103	22
	Var. 4: 150	150		702	237			-87	18
	Var. 5: 200	200		756	304			-104	37
gws 2017	Var. 4: 120	120		70	105			15	22
	Var. 5: 160	160		76	124			36	28
konv 2017	Var. 1: 0	0		19	28			-28	12
	Var. 3: 80	80		64	92			-12	9
	Var. 4: 120	120		70	111			9	11
	Var. 5: 160	160		71	122			38	14

[a] Hauptfrucht 2016 Mais (gws-Variante mit Grasuntersaat), 2017 Braugerste (gws-Variante mit Grasuntersaat, konv-Variante mit Zwischenfrucht)
[b] Düngergabe am 19.03.2016 vor dem 3. Schnitt (08.05.2016) der Grasuntersaat

Es fällt auf, dass alle N-Bilanzen im Jahr 2016 negativ sind, es wurde folglich mehr Stickstoff entzogen als zugeführt. Da beim Mais die gesamte Pflanze geerntet wird, sind die N-Abfuhren i.d.R. höher als bei Getreide. Bei der Bilanz der grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten ist zudem zu berücksichtigen, dass die bereits im Vorjahr 2-mal beerntete Grasuntersaat im März 2016 mit 75 kg N/ha in mineralische Form angedüngt und am 8.05. geschnitten wurde. Die Bilanz dieses Schnittes ist positiv, so dass die Gesamtbilanz im Vergleich zu den konventionell bewirtschafteten Varianten weniger stark negativ ausfällt. Die N-Frachten korrelieren 2016 nicht mit den N-Bilanzen.

Im Jahr 2017 weisen nur die niedrig gedüngten Varianten 1 und 3 mit konventioneller Bewirtschaftung negative Bilanzen auf. Die N-Frachten sind in diesen Varianten am niedrigsten, die Differenz zu den anderen konventionell bewirtschafteten Varianten ist allerdings nur gering. Die Bilanz der gws-Varianten ist nicht ungewöhnlich hoch und kann die gegenüber den konv-Varianten erhöhten Frachten nicht erklären.

Jährliche N-Bilanzen und N-Frachten zeigen in der Regel keine hohe Korrelation, da die Frachten von weiteren Faktoren, u.a. durch Witterung, Mineralisationsrate des Bodens und der

Bodenbelüftungsintensität durch Ernte und weitere Bodenbearbeitung, beeinflusst werden. Erst durch langjährige Auswertungen von N-Bilanzen und Frachten über alle Fruchtfolgeglieder werden Zusammenhänge deutlich. Im Rahmen der Bodendauerbeobachtung konnte bereits folgende Beobachtung gemacht werden: Auf Sandböden mit langjährig gleichbleibender Nutzung (keine Leguminosen, wenig Zwischenfruchtanbau) entspricht die Höhe des langjährigen mittleren N-Austrages mit dem Sickerwasser in etwa dem langjährigen mittleren Brutto-N-Bilanzsaldo (HÖPER et al. 2012).

3.5 Nmin-Werte im Vergleich zu den N-Frachten

Die Nmin-Werte, insbesondere die Herbst-Nmin-Werte, dienen der Wasserschutzberatung als Erfolgskontrolle. Der Wasserschutzversuch bietet die Möglichkeit, die per Saugsonden ermittelten Frachten mit der Nmin-Methode zu vergleichen. In Tabelle 12 sind die Nmin-Werte des Ernte-, Spätherbst- und Frühjahrs-Nmin in 0 bis 90 cm Tiefe, sowie die N-Frachten dargestellt.

Tab. 12: Nmin-Werte (0 - 90 cm) nach der Ernte, Spätherbst-Nmin, Frühjahrs-Nmin und Nitrat-N-Frachten im Winterhalbjahr 2016/2017 und im Winterhalbjahr 2017/2018

	Mais und Gras (gws) bzw. Mais (konv)	Ernte-Nmin 06.10.2016	Spätherbst-Nmin 23.11.2016	Differenz	Frühjahrs-Nmin 01.02.2017	N-Fracht
		[kg N/ha]	[kg N/ha]	[kg N/ha]	[kg N/ha]	[kg N/ha]
gws	Var. 4: 150 kg N	15	16	1	16	10
	Var. 5: 200 kg N	24	30	6	22	8
konv	Var. 1: 0 kg N	13	9	-4	26	16
	Var. 3: 100 kg N	15	13	-2	23	22
	Var. 4: 150 kg N	20	17	-3	20	18
	Var. 5: 200 kg N	22	24	2	21	37

	Braugerste und Gras (gws) bzw. Braugerste und ZF (konv)	Ernte-Nmin 02.08.2017	Spätherbst-Nmin 22.11.2017	Differenz	Frühjahrs-Nmin 14.03.2018	N-Fracht
		[kg N/ha]	[kg N/ha]	[kg N/ha]	[kg N/ha]	[kg N/ha]
gws	Var. 4: 120 kg N	16	11	-5	12	22
	Var. 5: 160 kg N	17	15	-2	11	28
konv	Var. 1: 0 kg N	18	10	-8	18	12
	Var. 3: 80 kg N	16	11	-5	20	9
	Var. 4: 120 kg N	17	12	-5	23	11
	Var. 5: 160 kg N	17	12	-5	28	14

Im Winterhalbjahr 2016/2017 sind die Ernte- als auch die Spätherbst-Nmin-Werte der gws-Varianten sehr ähnlich zu den Nmin-Werten der konventionell bewirtschafteten Varianten. Mit steigender Düngungsintensität nehmen die Nmin-Werte auf den konv-Varianten etwas zu. Wie die N-Frachten bewegen sich auch die Ernte- und Spätherbst-Nmin-Werte auf den hoch gedüngten Varianten 4 und 5 auf einem eher moderaten Niveau. Nach Mais werden am Standort Thülsfelde meist deutlich höhere Werte gemessen (NOLTEMEYER et al. 2018). Weitere Jahre müssen zeigen, ob allein die ungewöhnlich trockene Witterung im Herbst 2016 Auslöser hierfür ist.

Die Ernte- und Spätherbst-Nmin-Werte bei konventioneller und grundwasserschutzorientierter Bewirtschaftung im Winterhalbjahr 2017/2018 unterscheiden sich kaum voneinander und zeigen nur sehr geringe Abstände mit höchstens 5 kg N/ha zueinander auf. Die N-Frachten der konv-Varianten gleichen den Spätherbst-Nmin-Werten der konv-Varianten vom 22.11.2018 mit nur geringen Abweichungen. Die Frachten auf den gws-Varianten sind gegenüber den konv-Varianten erhöht. Die Nmin-Werte können in diesem Fall die Messungen zur N-Fracht nicht bestätigen. Der Frühjahrs-Nmin ist auf fast allen Varianten höher als der Spätherbst-Nmin, da mehr Stickstoff mineralisiert als verlagert wurde.

Anhand der Herbst-Nmin-Werte kann keine Aussage über die genaue Höhe der Nitrat-N-Frachten getroffen werden kann, da ein Nmin-Wert nur eine Momentaufnahme darstellt und nachträglich noch stattfindende N-Mineralisation nicht erfasst wird. In den vorangegangenen Jahren waren insbesondere die Spätherbst-Nmin-Werte gut geeignet die Unterschiede zwischen den Varianten darzustellen und die Richtung aufzuzeigen, in die sich die Frachten entwickeln werden.

4 Ergebnistransfer

In den Jahren 2014 bis 2018 wurden der Versuchsstandort Hamerstorf sowie die langjährigen Wasserschutzversuchsergebnisse mehrfach vorgestellt. Alle Vorträge und Auswertungen sind als Beratungsgrundlagen im Internet der LWK Niedersachsen veröffentlicht (www.lwk-niedersachsen.de).

06.03.2014 Feldbesichtigung Wehnen, EU-Kommission

26.06.2014 Feldtag Hamerstorf (Versuchsergebnisse 643)

23.09.2014 Feldtag Wehnen (für Kooperationslandwirte inklusive Kooperation Dümmer Landwirte) Zwischenfruchtversuch

24.09.2014 Feldtag Wehnen Kooperationslandwirte (Zwischenfruchtversuch)

03.12.2014 Beratertagung Verden (Beratungsträger Wasserschutz) Zwischenfruchtversuch

19.05.2015 AK Wasserschutz (Vorstellung Zwischenfruchtversuch war geplant, wurde aber wegen Gewitter abgebrochen – Ergebnisse wurden schriftlich mit dem Protokoll versandt)

15.06.2015 Feldtag Borwede (Ergebnisse Sickerwasseruntersuchungen)

05.11.2015 Arbeitskreis Wasserschutz (Ergebnisse Zwischenfruchtversuch)

15.06.2016 Feldtag Wehnen (Wasserkreis, Gewässerschutzberatung in der Zielkulisse der EG-Wasserrahmenrichtlinie)

16.06.2016 Feldtag Thülsfelde (Wasserkreis, Gewässerschutzberatung in der Zielkulisse der EG-Wasserrahmenrichtlinie)

21.06.2016 Feldtag Hamerstorf für Kooperationslandwirte, Beratungsträger Wasserschutz

01.06.2017 Feldtag Hamerstorf

06.09.2017 Informationsveranstaltung Landwirtschaft & Wasserschutz beim LBEG

26.09.2017 Beratertagung Wasserschutzberater LWK – Wasserschutzversuche

17.01.2018 Tagung Norddeutscher LWK in Hannover – Zwischenfruchtversuch

19.03.2018 Austausch mit LWK NRW – Vorstellung Zwischenfruchtversuch

25.04.2018 AK Wasserschutz

24.05.2018 Feldtag Wehnen

11.06.2018 Feldtag Hamerstorf

5 Zusammenfassung

Am Standort Hamerstorf werden seit Herbst 2014 die Auswirkungen grundwasserschutzorientierter Fruchtfolgegestaltung und langjährig unterschiedlich hoher Stickstoffdüngung auf die Nitratkonzentration im Sickerwasser untersucht. Ziel des Versuches ist es, aus den gewonnenen Erkenntnissen Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Sickerwasserqualität abzuleiten. Um die Nitratkonzentrationen am Standort messen zu können, wurden auf sechs Parzellen Saugsonden zur Sickerwassergewinnung installiert. In der konventionell bewirtschafteten Fruchtfolge (konv) wurden je eine Parzelle der rein mineralisch gedüngten

Varianten 1, 3, 4 und 5 mit 0 kg N/ha, 100 kg N/ha, 150 kg N/ha und 200 kg N/ha mit Saugsonden ausgestattet, in der grundwasserschutzorientierten Bioenergiefruchtfolge (gws) je eine Parzelle der mineralisch gedüngten Varianten 4 und 5 mit 150 kg N/ha und 200 kg N/ha. Mit Hilfe eines DVWK-Modells (1996) werden die Sickerwassermengen und nachfolgend die Nitrat-N-Frachten im Sickerwasser berechnet. Dieser Bericht betrachtet die Winterhalbjahre 2016/2017 und 2017/2018.

Am 10.05.2016 wurden beide Fruchtfolgevarianten mit Mais bestellt. Zeitgleich wurde auf den gws-Varianten eine Grasuntersaat (Welsches Weidelgras) etabliert. Die Ernte des Maises erfolgte am 30.09.2016 auf beiden Fruchtfolgevarianten. Die Grasuntersaat hat sich gut entwickelt und wurde erst kurz vor der Aussaat von Braugerste im darauffolgenden Frühjahr untergepflügt. Zusammen mit der Aussaat der Braugerste am 28.03.2017 wurde in der grundwasserschutzorientierten Variante erneut eine Untersaat (Rotschwingel) etabliert. Die Düngestaffel wurde für die Braugerste wie folgt angepasst: 0 kg N/ha, 80 kg N/ha, 120 kg N/ha und 160 kg N/ha für die Varianten 1, 3, 4 und 5. Auf beiden Varianten wurde die Braugerste am 31.07.2017 geerntet. Anschließend erfolgte die Aussaat einer Zwischenfrucht auf der konventionellen Variante, während die Grasuntersaat auf der gws-Variante stehen blieb. Weder Grasuntersaat noch Zwischenfrucht wurden zusätzlich gedüngt. Niedrige Temperaturen im Frühjahr 2018 führten zum Abfrieren der Zwischenfrucht. Vor der Aussaat der Kartoffel wurde die Grasuntersaat in den Boden eingearbeitet. Beide Kartoffelsorten (früh und sehr früh) wurden am 18.04.2018 gesetzt.

Die klimatischen Gegebenheiten der Winterhalbjahre 2016/2017 und 2017/2018 und die Auswirkung auf den Stickstoffhaushalt stellen sich wie folgt dar:

- Im Winterhalbjahr 2016/2017 fallen vom 01.07.2016 bis 30.04.2017 457 mm Niederschlag. Die berechnete Sickerwassermenge auf der grundwasserschutzorientierten Variante beträgt 234 mm. Auf der konventionell bewirtschafteten Variante 1 beträgt die Sickerwassermenge 178 mm, auf den Varianten 3 bis 5 194 mm.
- Im Winterhalbjahr 2017/2018 fallen vom 01.07.2017 bis 30.04.2018 611 mm Niederschlag. Die Sickerwassermenge beträgt 316 mm auf den grundwasserschutzorientierten Varianten 4 und 5, 456 mm auf der konventionell bewirtschafteten Variante 1 und 411 mm auf den konventionell bewirtschafteten Varianten 3, 4 und 5.

- Die mittleren Nitrat-N-Konzentrationen in den Saugsonden liegen im Winterhalbjahr 2016/2017 (Hauptfrucht Mais) zwischen 4 mg NO_3-N/l (Var. 5 gws) und 19 mg NO_3-N/l (Var. 5 konv) (vgl. Tab. 7). Es ist nur ein schwacher Anstieg der Konzentrationen mit steigender Düngungsintensität festzustellen.
- Im Winterhalbjahr 2017/2018 (Hauptfrucht Braugerste mit Zwischenfrucht) liegen die mittleren Nitrat-N-Konzentrationen auf den konventionell bewirtschafteten Varianten zwischen 2 mg NO_3-N/l (Var. 3) und 3 mg NO_3-N/l (Var. 4 und 5) (vgl. Tab. 7). Es ist kein deutlicher Anstieg der Konzentrationen mit steigender Düngungsintensität festzustellen. Auf den grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten (Hauptfrucht Braugerste mit Grasuntersaat) sind die Konzentrationen mit 7 mg NO_3-N/l (Var. 4) und 9 mg NO_3-N/l (Var. 5) auffallend höher.
- Die berechneten Nitrat-N-Frachten liegen im Winterhalbjahr 2016/2017 zwischen 8 kg N/ha (Var. 5 gws) und 37 kg N/ha (Var. 5 konv) (vgl. Tab. 8).
- Im Winterhalbjahr 2017/2018 liegen die berechneten Nitrat-N-Frachten bei 22 kg N/ha (Var. 4) und 28 kg N/ha (Var. 5) auf den grundwasserschutzorientiert bewirtschafteten Varianten und zwischen 9 kg N/ha (Var. 3) und 14 kg N/ha (Var. 5) auf den konventionell bewirtschafteten Varianten (vgl. Tab. 9).

Erstmalig ist mit dem Ende der Auswaschungsperiode 2017/2018 der 4-gliedrige Fruchtfolgezyklus einmal vollständig durchlaufen. Wird die mittlere Nitrat-N-Fracht über alle 4 Jahre gebildet, weisen die grundwasserschutzorientierten Varianten 4 und 5 mit 43 und 38 kg N/ha etwas niedrigere Frachten auf als die entsprechenden konventionell bewirtschafteten Varianten 4 und 5 mit 46 und 59 kg N/ha. Die weiteren Versuchsjahre müssen zeigen, ob sich dauerhaft niedrigere Frachten auf den gws-Varianten einstellen.

6 Literatur

AFFELT, L.; FIER, A.; HÖPER, H.; SCHÄFER, W. (2018): Grundwasserschutzorientierte Dauerversuche: Einfluss unterschiedlich gedüngter Zwischenfrüchte auf die Nitratkonzentration im Sickerwasser und die Nitratfrachten am Standort Wehnen. Auswaschungsperioden 2012/2013 bis 2016/2017. Hannover: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesregierung Deutschland. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Hannover, 438 S.

DWD (2016): Langjährige Mittelwerte des Stationsmessnetzes. Mittelwerte der Temperatur (in 2 m über dem Erdboden in Grad C) und des Niederschlags (Mittlere Monatssumme der Niederschlagshöhe in mm) für den Bezugsstandort am Ende der Referenzperiode 1961-1990. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
Link: https://rcccm.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/langj_mittelwerte.html am 9.11.2016

DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996. Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.

FIER, A. UND SCHÄFER, W. (2016): Grundwasserschutzorientierte Dauerversuche, Berechnung des Wasserhaushaltes, der Nitratkonzentrationen und der Nitratfrachten am Standort Thülsfelde - Auswaschungsperiode 2014/2015. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover und Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg.
Link: https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/77/nav/1667/article/29940.html am 13.12.2016

HÖPER, H.; HOFFMANN, M.; GROH, H.; SEVERIN, K.; ENGELKE, L.; PUVOGEL, V. (2012): Stoffbilanzen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. In: HÖPER, H., & MEESENBURG, H. [Hrsg.] (2012). GeoBerichte 23: Tagungsband 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. Hannover: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

LBEGa (2016): Bodenschätzungskarte im Maßstab 1:5000. NIBIS Kartenserver. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover. Link: http://nibis.lbeg.de/cardomap3/# am 9.11.2016

LBEGb (2016): Karten und Daten des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®. Fachanwendung MeMaS Lite. Berechnung der Sickerwasserrate. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover. Link: http://nibis.lbeg.de/cardomap3/# am 11.11.2016

LANDWIRTSCHAFTSKAMMER (LWK) [Hrsg.] (2018): Empfehlungen zur Grunddüngung. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover.
Link: http://www.lufa-nord-west.de/index.cfm/action/downloadcenter.html am 23.11.2016

MÜLLER, U. und WALDECK, A. (2011): Auswertungsmethoden im Bodenschutz – Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®. Geoberichte 19, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, 415 S.

NOLTEMEYER, L.; FIER, A.; MEYER, K. (2018): Berechnung des Wasserhaushaltes, der Nitratkonzentrationen und der Nitratfrachten am Standort Thülsfelde. Auswaschungsperioden 2016/2017 und 2017/2018. Hannover: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

RENGER, M. und WESSOLEK G. (1990): Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung. Mitt. Inst. für Wasserwesen, Univ. der Bundeswehr München, Heft 386 (1990), 295-307.

RENGER, M.; BOHNE, M.; FACKLAM, M.; HARRACH, T.; RIEK, W.; SCHÄFER, W.; WESSOLEK, G.; ZACHARIAS, S. (2009): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. In: WESSOLEK, G.; KAUPENJOHANN, M.; RENGER, M. (HRSG.) (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese, (Selbstverlag) TU Berlin, Band 40, S. 5-51.

RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, 93 S.

TRINKWASSERVERORDNUNG (TRINKWV) (2018): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch vom 3. Januar 2018. BGBl I, Nr. 2 S. 99ff.

WENDLING, U.; MÜLLER, J.; SCHWEDE, K. (1984): Ergebnisse von Verdunstungsmessungen über Gras mit einem Off-line-Datenerfassungssystem (2. Mitteilung). Z. Meteorol. 34, 190-202.

WENDLING, U.; SCHELLIN, H.-G.; THÖMÄ, M. (1991): Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. Z. Meteorol. 41, 468-475.