

Sickerwassermessungen: Aktuelles 2021/22 und Ausblick

Dr. Ines Bull

Die Untersuchungen zum Einfluss ackerbaulicher Bewirtschaftung auf NO_3^- -Konzentration und N-Fracht mit der Saugkerzenanlage in Gülzow wurden in der Sickerwasserperiode 2021/22 fortgeführt. In einer mehrjährigen Auswertung fließen diese mit den seit Herbst 2017/18 gesammelten Daten zusammen. Die Ergebnisse bestätigen Erkenntnisse zum hohen Einfluss des Kulturartenspektrums. Besonders hohe NO_3^- -Verlagerung folgt aus dem Anbau von Winterweizen (Vorfrucht Winterraps). Dagegen kann die NO_3^- -Verlagerung bei Zwischenfruchtanbau mit nachfolgender Sommerkultur unabhängig von der N-Düngungshöhe auf das Niveau ungedüngter Ackerflächen reduziert werden. Vom düngungsabhängigen mehrjährigen N-Saldo werden 10–20 % als N-Fracht mit dem Sickerwasser verlagert. Für die unvermeidbare N-Auswaschung unter Ackernutzung von Mineralbodenstandorten in Mecklenburg-Vorpommern wird ein Wert von 25–50 kg/ha und Jahr vorgeschlagen.

Ergebnisse der Sickerwasserperiode 2021/22

Die Sickerwasserperiode 2021/22 begann am Standort Gülzow am 5. November 2021 und endete am 23. Februar 2022. Zwischen diesen Terminen lagen jedoch auch mehrere Wochen ohne Sickerung. Die Sickerwassermenge betrug im gesamten Zeitraum insgesamt 152–162 mm (kulturartenabhängig). Die Bodenfeuchte ließ eine Probengewinnung von Ende September 2021 bis Anfang Mai zu. Alle ermittelten NO_3^- -Konzentrationen sind in der Abbildung 1 dargestellt. Der mittlere Verlauf ist linienhaft abgebildet.

Bei der Zusammenstellung der Werte mit Sickerwasserbildung in Abhängigkeit von den Düngungsvarianten zeigt sich ähnlich wie 2017/18 ein enges Zusammenliegen der mittleren 50 % der Werte aller Varianten. Beides waren Jahre mit mittlerer-hoher Sickerwasserbildung und einer hohen Anzahl an Messwerten. 2021/22 lag der Mittelwert der Messwerte ohne N-Düngung bei 55 mg/l NO_3^- . Die Maximalwerte der NO_3^- -Konzentrationen scheinen wie 2017/18 aber anders als 2019/20 und 2010/21 eine Abhängigkeit zum Düngungsniveau zu zeigen (Abb. 2 im Vergleich zu Abb. 16 auf Seite 50).

Abweichend zu 2017/18 fanden sich die Maximalwerte jedoch genau wie 2020/21 unter Wintertriticale (Vorfrucht Silomais) und nicht unter Winterweizen (Vorfrucht Winterraps). Die höchste gemessene NO_3^- -Konzentration lag 2021/22 bei 850 mg/l. Anders als in allen Vorjahren dieser Untersuchung unterschied sich die Verteilung der Messwerte zwischen Winterweizen (Vorfrucht Winterraps) und Wintertriticale (Vorfrucht Silomais) kaum. Die Ursache für die letzte Beobachtung ist in einzelnen Parzellen unter Wintertriticale zu finden, die über einen längeren Zeitraum sehr hohe NO_3^- -Konzentrationen aufwiesen. Ein Zusammenhang zu einer der Düngungsvarianten ist nicht wahrscheinlich (Abb. 1). Abgesehen davon bestätigen sich die Erkenntnisse der Vorjahre zur starken kulturartenbezogenen Abhängigkeit der NO_3^- -Konzentration zur angebauten Kulturart (Abb. 3).

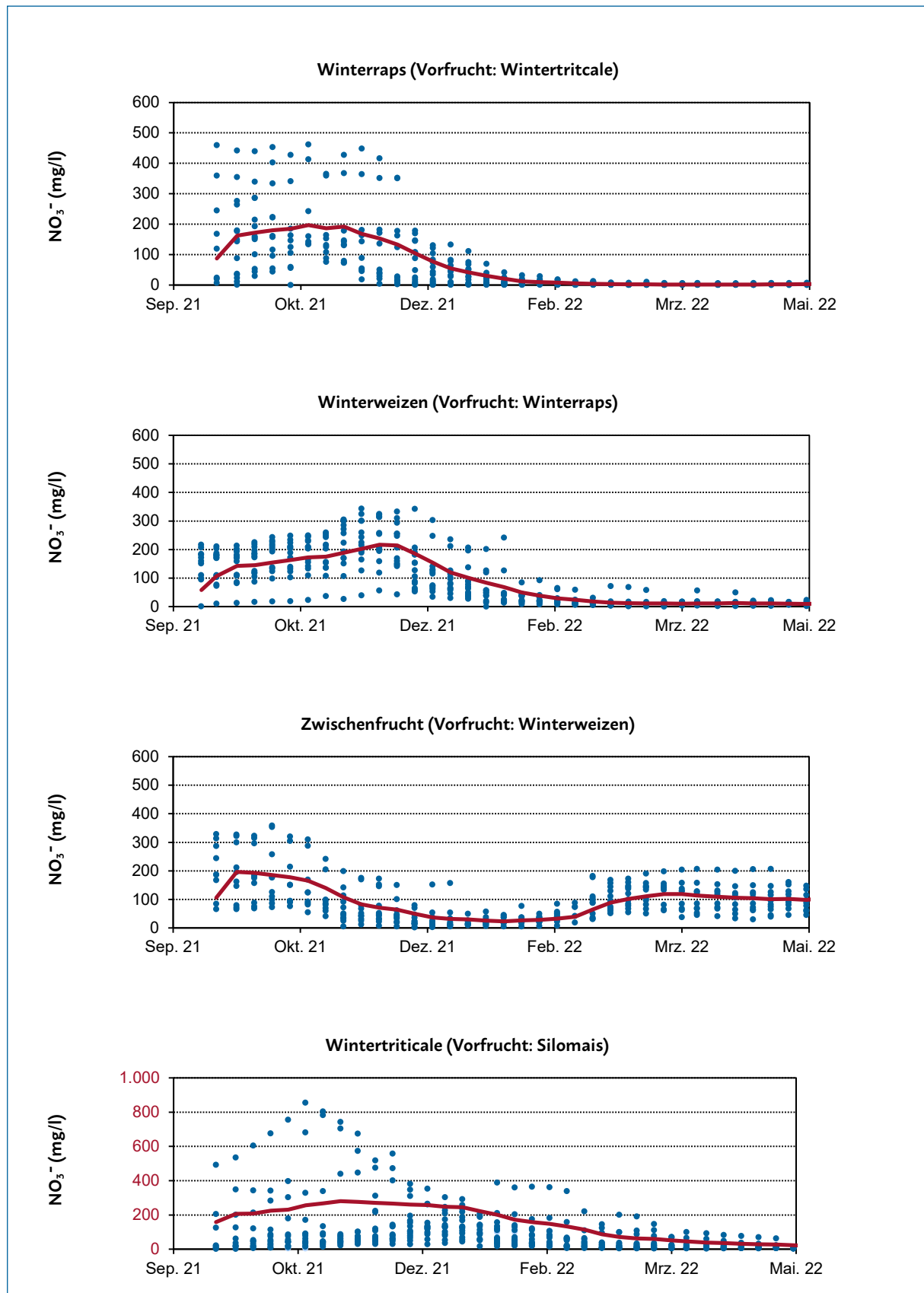


Abb. 1: NO_3^- -Konzentration im Bodenwasser in 60 cm Bodentiefe auf den vier Versuchsfeldern, dargestellt sind der gleitende Mittelwert über 3 Wochen (Linie) und alle einzelnen Messwerte, wöchentliche Probenahme

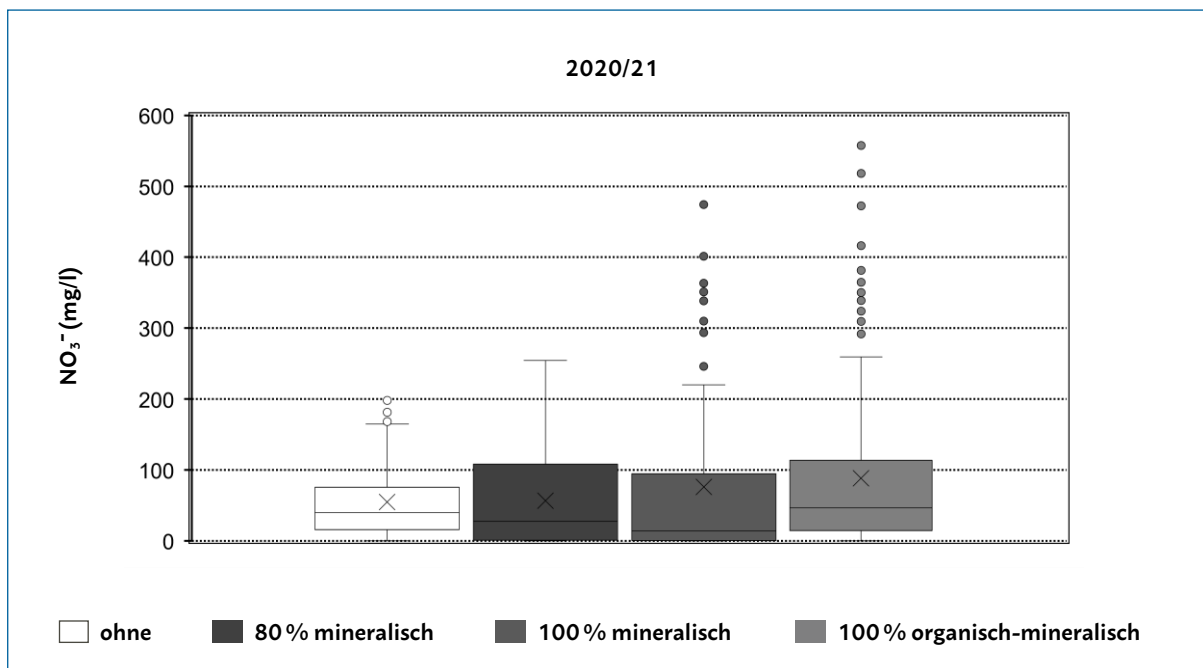


Abb. 2: NO₃⁻-Konzentration im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von der N-Düngung, Messwerte aller Kulturarten (x = Mittelwert, - = Median, boxplot = Interquartilsabstand, Whisker = 1,5-facher Interquartilsabstand, Punkte = Einzelwerte außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands), PG 7 und 12 zusammengefasst, Gülzow Sickerwasserperiode 2021/22

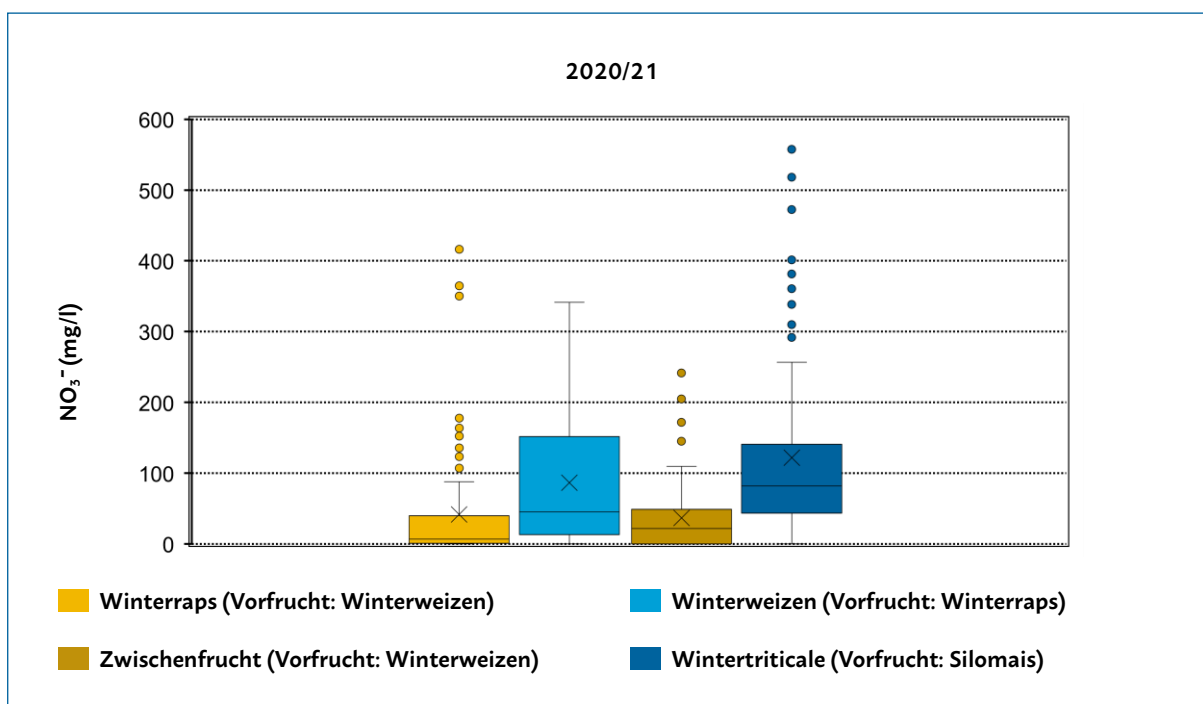


Abb. 3: NO₃⁻-Konzentration im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von der angebauten Kulturart, Messwerte aller Düngungsvarianten (x = Mittelwert, - = Median, boxplot = Interquartilsabstand, Whisker = 1,5-facher Interquartilsabstand, Punkte = Einzelwerte außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands), Gülzow Sickerwasserperiode 2021/22

Auswertung der mehrjährigen Ergebnisse 2017/18 bis 2021/22

In der Zeit zwischen N-Düngung im Frühjahr und der typischen N-Auswaschung über Winter unterliegt der Stickstoff Umsetzungsprozessen im Boden. Die N-Dynamik im Boden wird durch Standort- und Witterungsbedingungen sowie Bewirtschaftung beeinflusst. Gedüngter Stickstoff wird nur zum Teil direkt von den landwirtschaftlichen Kulturen aufgenommen. Wesentliche Teile des Pflanzen-Stickstoffs stammen aus dem Boden-N-Pool (PESCHKE, 2001 und 2002).

Der über Winter ausgetragene Stickstoff entstammt vor allem aus der Nitrifikation von organischem bodenbürtigen Stickstoff. Gedüngter Stickstoff wird dagegen überwiegend in den organischen Boden-N-Pool eingebaut. Anteile des Dünger-Stickstoffs sind noch mehrere Jahrzehnte nach der Düngung im Boden nachweisbar. Die N-Auswaschung aus dem Boden erfolgt durch Umsetzungsprozesse und mitnichten als einfaches Durchspülen überschüssigen Düngestickstoffs (WERISCH und BURGHARDT, 2021). Ein positiver Düngungs-N-Saldo wirkt also indirekt über eine – mehrjährige – Anreicherung des Boden-N-Pools. Ob und in welcher Höhe eine N-Auswaschung stattfindet, hängt dann vor allem von den Mineralisationsbedingungen und den Sickerwassermengen in einer konkreten Situation sowie der N-Aufnahme durch den Pflanzenbestand vor/während der Sickerwasserperiode ab. Der Einfluss der über Winter angebauten Kultur (oder Brache) auf die Höhe der N-Austräge ist seit langem bekannt (z. B. OEHMICHEN, 2000; HENKE et al., 2008).

Die Auswertungen der Sickerwasseruntersuchungen 2017/18 bis 2021/22 am Standort Gülzow zeigen ebenfalls, dass sich der Stickstoffaustrag aus Ackerflächen nicht einfach aus dem N-Saldo des vorangegangenen Jahres ableiten lässt. Mit der hohen Messwertanzahl der jüngsten Sickerwasserperiode wurde eine mehrjährige Analyse der Gülzower Daten sinnvoll. Es wird hier der Versuch unternommen, eine quantitative Einordnung der Einflussfaktoren Kultur, Düngung bzw. mehrjähriger N-Saldo für den Standort Gülzow vorzunehmen.

Bei der Ergebnisinterpretation muss unbedingt beachtet werden, dass die Werte in einer Bodentiefe von 60 cm ermittelt wurden. Sie dürfen nicht mit einer N-Auswaschung ins Drain- und Grundwasser gleichgesetzt werden. Gerade zum Ende der Sickerwasserperiode ist ein Wiederaufstieg des Stickstoffs mit zunehmender Evapotranspiration wahrscheinlich. Auch Denitrifikationsprozesse im Boden sind hier nicht berücksichtigt. Die schluffig-sandigen Böden im mittleren Mecklenburg-Vorpommern weisen allerdings durch ihre typisch hohen Bodenwasseraustauschraten ein hohes N-Auswaschungsrisiko auf (KNOBLAUCH et al., 2013). Für diese Standorte sollten die Werte deshalb das Risiko einer Verlagerung in Drain- und Grundwasser bei wassergesättigten Böden während der Vegetationspause und in Zeiten mit Sickerwasserbildung gut beschreiben.

Material und Methoden

Für die mehrjährige Auswertung wurden alle gemessenen NO_3^- -Konzentrationen in den Wochen, in denen nach der Modellierung mit METVER Sickerwasserbildung stattfand, verwendet (siehe auch Abschnitt „Bestimmung von Sickerwassermenge und N-Fracht“ auf Seite 35). Die dazugehörige N-Fracht berechnet sich aus der NO_3^- -Konzentration und der kulturartenabhängig modellierten Sickerwassermenge je Woche. Die mittlere NO_3^- -Konzentration ist ein mit der wöchentlichen Sickerwassermenge gewichteter Mittelwert einer Sickerwasserperiode. Der N-Saldo ergibt sich als Differenz zwischen gedüngtem Stickstoff und Stickstoff-Abfuhr mit dem Erntegut in einem Anbaujahr. Der mehrjährige N-Saldo wurde als arithmetischer Mittelwert aus den N-Salden der vier Anbaujahre vor der Probenahme gebildet (Ausnahmen: 2017/18 und 2018/19. Da der Versuch im Herbst 2015 neu angelegt wurde, konnten nur zwei bzw. drei Vorjahresergebnisse einbezogen werden.). Der mehrjährige N-Saldo soll hier als Kenngröße des Einflusses der N-Düngung auf das Mineralisierungspotenzial des Bodens genutzt werden. Alle Werte wurden parzellenbezogen berechnet.

Die statistische Auswertung führte Volker Michel, Sachgebiet Biostatistik und Sortenwesen der LFA, für den abhängigen Parameter NO_3^- -Konzentration durch. Die zugehörigen Werte für die N-Frachten wurden aus den Werten für die NO_3^- -Konzentration durch Multiplikation mit der kulturartenabhängigen Sickerwassermenge bestimmt. In die Varianzanalyse für den paarweisen Vergleich der Düngungsvarianten konnte das Jahr 2018/19 aufgrund trockenheitsbedingt fehlender Messwerte der NO_3^- -Konzentrationen nicht einbezogen werden. In diesem Jahr fand auch überhaupt keine Sickerwasserbildung statt. Die N-Fracht war damit in allen Varianten Null. Dagegen wurden die Ergebnisse 2018/19 bei der Berechnung der mehrjährigen N-Salden ungeachtet der hohen Werte dieses Trockenjahres berücksichtigt. Trotzdem bezieht sich die Regressionsanalyse des Zusammenhanges zwischen mehrjährigem N-Saldo und NO_3^- -Konzentration bzw. N-Fracht aufgrund nicht vorhandener NO_3^- -Messwerte nur auf die Jahre 2017/18, 2019/20, 2020/21 und 2021/22. Für die Varianz- als auch für die Regressionsanalyse wurde die Stationarität der Parzellen im Dauerversuch berücksichtigt (Anhang).

Ergebnisse

Abhängigkeit der NO_3^- -Konzentration und der N-Fracht von N-Düngung und Kultur

Die Auswertung der mittleren NO_3^- -Konzentrationen und der N-Frachten ergibt parallele Ergebnisse.

Der NO_3^- -Grenzwert 50 mg/l wird häufig und auch ohne N-Düngung überschritten. Die mittlere NO_3^- -Konzentration der geprüften Fruchtfolge beträgt im Versuchszeitraum in den Varianten nach 100 % DüV ca. 100 mg/l, in der Variante nach 80 % DüV 75 mg/l und ohne N-Düngung 56 mg/l.

Das Risiko hoher NO_3^- -Konzentrationen/N-Frachten besteht vor allem bei Winterweizen (Vorfrucht Winterraps) und Wintertriticale (Vorfrucht Silomais), wobei unter Winterweizen beim Düngeniveau 100 % die höchsten mittleren NO_3^- -Konzentrationswerte/N-Frachten ermittelt wurden. Die geringsten mittleren NO_3^- -Konzentrationen wurden unter Zwischenfrucht (Vorfrucht: Winterweizen) gemessen.

Die NO_3^- -Konzentrationen/N-Frachten der in der Fruchtfolge nach 100 % DüV gedüngten Varianten liegen während des Anbaus von Winterweizen (Vorfrucht Winterraps) signifikant mehr als doppelt so hoch wie die aller Düngungsvarianten während des Anbaus von Winterraps (Vorfrucht Wintertriticale) und Zwischenfrucht (Vorfrucht Winterweizen).

Da die Kulturarten nicht in Monokultur angebaut werden, muss die Bewertung auch auf der Ebene der Fruchtfolge erfolgen. Die Werte nivellieren sich dadurch, der Einfluss der Düngung bleibt aber erkennbar. Im Mittel der Versuchsjahre mit Sickerwasserbildung liegt die mittlere N-Fracht der geprüften Fruchtfolge bei Düngung nach 100 % DüV bei 30 kg/ha, die mittlere NO_3^- -Konzentration bei 100 mg/l. Ohne N-Düngung beträgt die N-Fracht 18 kg/ha, die mittlere NO_3^- -Konzentration 58 mg/l. Letztere sind jedoch nicht signifikant von denen der gedüngten Varianten unterscheidbar. Eine Auswertung zur Frage des Einflusses der organischen Düngung und ihres Düngungstermins erbrachte schon bei Bezug auf die einzelne Kulturart kein signifikant unterschiedliches Ergebnis im Vergleich zur rein mineralischen Düngung bei gleichem Düngungsniveau nach 100 % DüV.

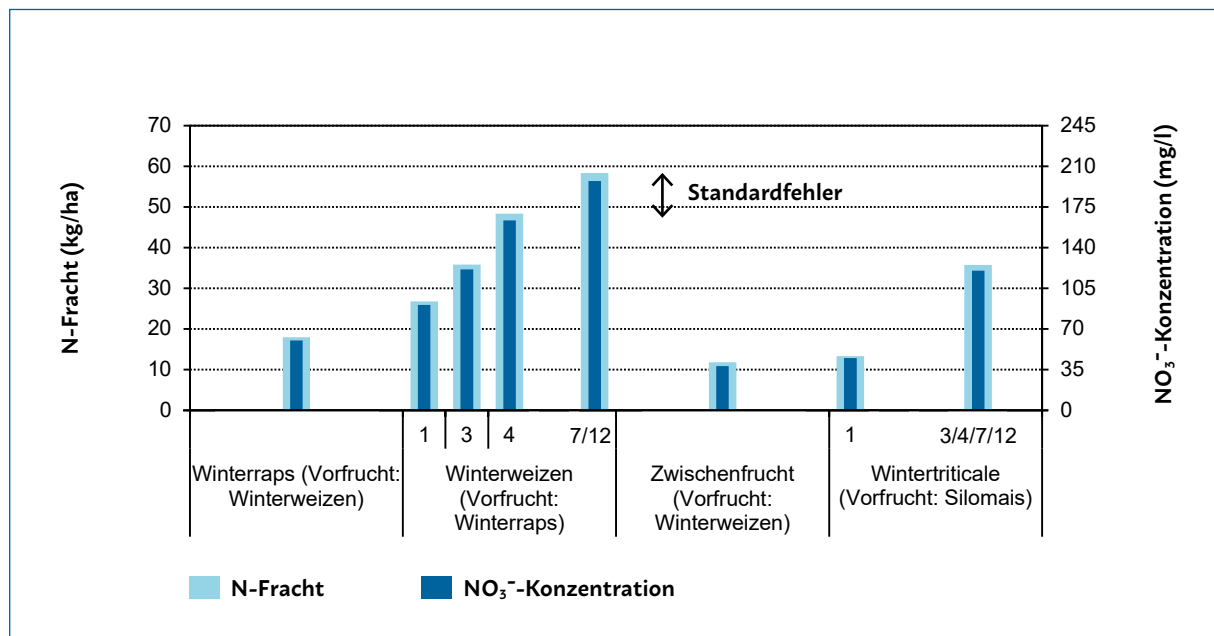


Abb. 4: NO_3^- -Konzentration und N-Fracht im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von der angebauten Kulturart und Düngung, 1 = ohne N-Düngung; 3 = 80 % mineralisch; 4 = 100 % mineralisch, 7 und 12 = 100 % organisch-mineralisch, Gülzow 11/2017–04/2022 (ohne hydrologisches Jahr 2018/19, da ohne Sickerwasserbildung)

Tab. 1: N-Fracht im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von der angebauten Kulturart und Düngung, Gülzow 11/2017–04/2022 (ohne hydrologisches Jahr 2018/19, da ohne Sickerwasserbildung)

	Winterraps (Vorfrucht: Winterweizen)	Winterweizen (Vorfrucht: Winterraps)	Zwischenfrucht (Vorfrucht: Winterweizen)	Wintertriticale (Vorfrucht: Silomais)
Ohne N-Düngung	18 kg/ha*Jahr	27 kg/ha*Jahr	12 kg/ha*Jahr	13 kg/ha*Jahr
80 % mineralisch		36 kg/ha*Jahr		36 kg/ha*Jahr
100 % mineralisch		48 kg/ha*Jahr		
100 % organisch-mineralisch Nur Frühjahr		58 kg/ha*Jahr		
100 % organisch-mineralisch Frühjahr + Herbst				

Tab. 2: Signifikanztabelle für die paarweisen Vergleiche zu Tab. 1 und Abb. 4 (alpha = 0,05)

	Winterraps (Vorfrucht: Winterweizen)	Winterweizen (Vorfrucht: Winterraps)	Zwischenfrucht (Vorfrucht: Winterweizen)	Wintertriticale (Vorfrucht: Silomais)
Ohne N-Düngung	c, d	c, d	c, d	d
80 % mineralisch	d	b, c, d	d	a, b, c
100 % mineralisch	c, d	a, b	d	a, b, c
100 % organisch-mineralisch Nur Frühjahr	d	a	d	b, c, d
100 % organisch-mineralisch Frühjahr + Herbst	c, d	a	c, d	b, c, d

Abhängigkeit der NO_3^- -Konzentration und der N-Fracht vom mehrjährigen N-Saldo

Mit steigendem mehrjährigen N-Saldo nehmen die NO_3^- -Konzentrationen/N-Frachten bei allen Kulturen außer bei Zwischenfrucht (Vorfrucht Winterweizen) zu. Ein um 10 kg/ha und Jahr verringerter mittlerer N-Saldo der Fruchtfolge führte unter Winterraps, Winterweizen und Wintertriticale zu einer Verringerung der NO_3^- -Konzentration um 0,2 bis 11,5 mg/l (im Mittel 3–8 mg/l) und zu einer Verringerung der N-Fracht um 0,05 bis 2,7 kg/ha und Jahr (im Mittel 1–2 kg/ha und Jahr). Ob dieser Zusammenhang unter Winterweizen stärker als bei Winterraps und Wintertriticale ist, ließ sich mit den vorhandenen Daten noch nicht belegen. Unter Zwischenfrucht hatte der N-Saldo keinen Einfluss auf die hier geringeren NO_3^- -Konzentrationen und N-Frachten. Diese Verhältnisse beziehen sich auf Jahre mit Sickerwasserbildung, da sie ohne die Werte des Trockenjahres 2018/19 berechnet wurden (Abb. 5, Abb. 6).

Im mehrjährigen Mittel der Anbaujahre 2017/18–2021/22 unter Einbeziehung des Trockenjahres 2018/19 ohne Sickerwasserbildung liegt die mittlere N-Fracht der geprüften Fruchtfolge um 0,2 kg/ha und Jahr niedriger (Abb. 7).

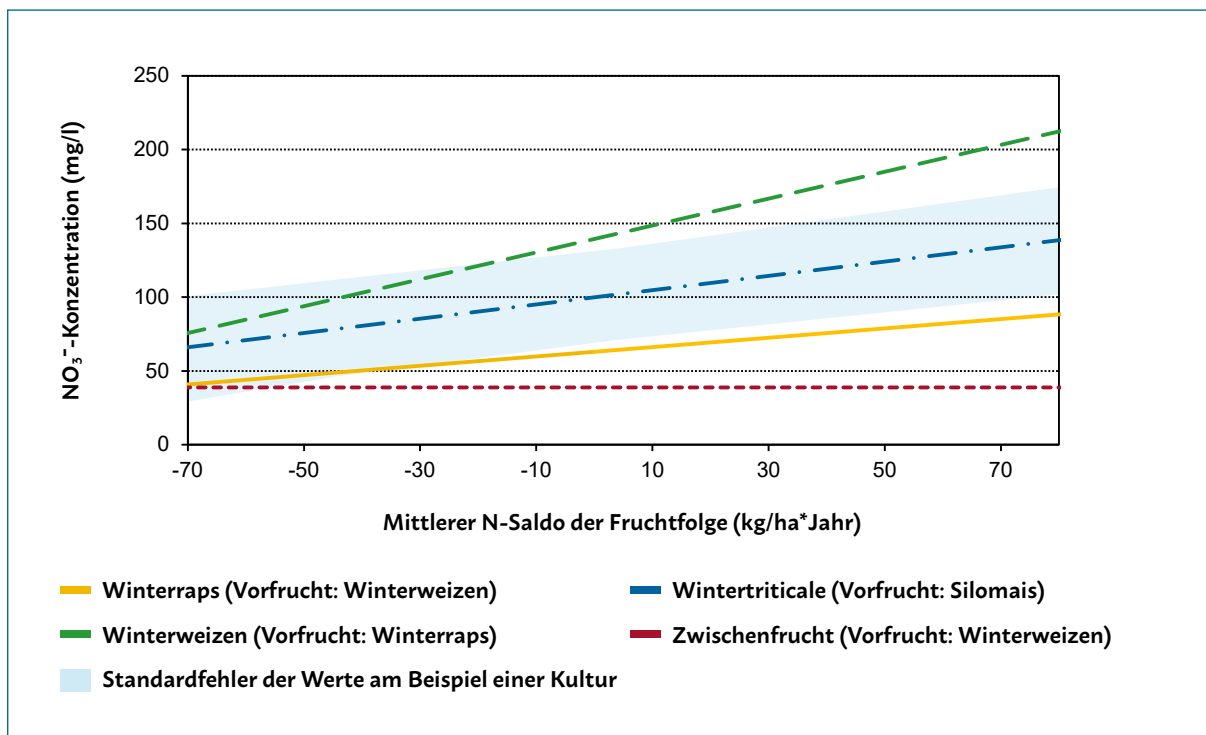


Abb. 5: NO₃⁻-Konzentration im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von Kultur und mittlerem N-Saldo der Fruchtfolge, Gülzow 11/2017–04/2022, (ohne hydrologisches Jahr 2018/19, da ohne Sickerwasserbildung)

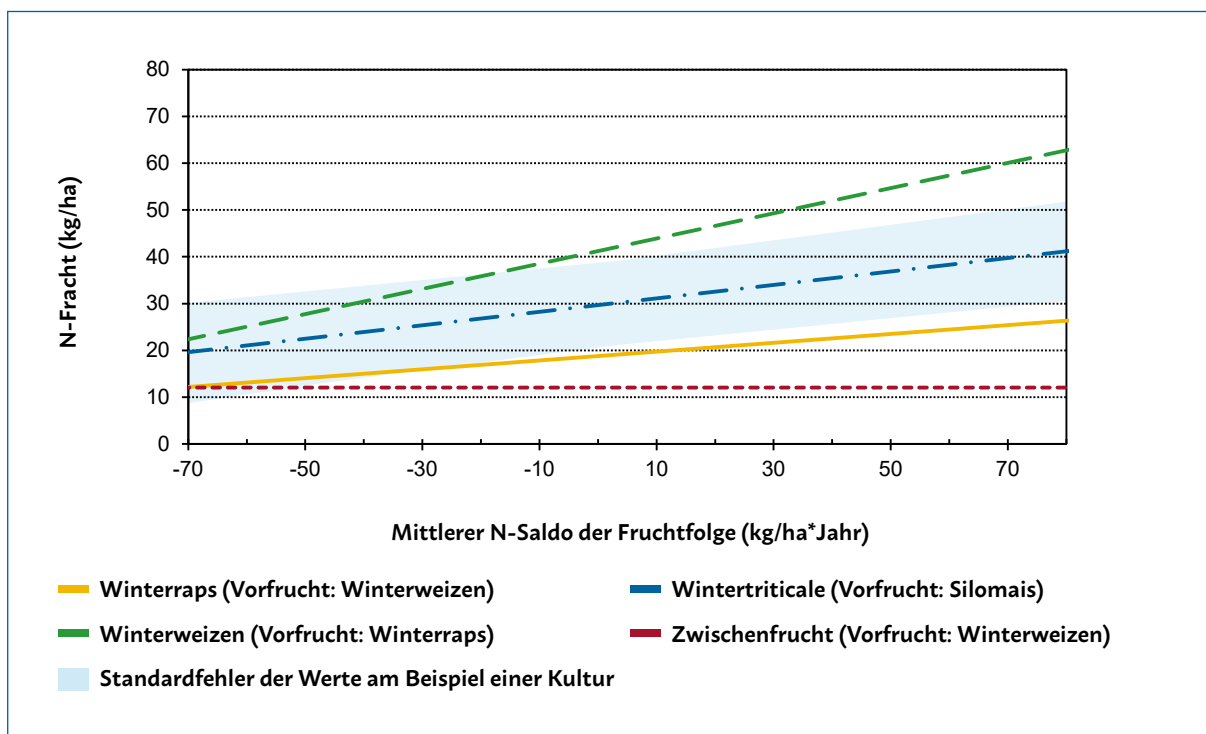


Abb. 6: N-Fracht im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit von Kultur und mittlerem N-Saldo der Fruchtfolge, Gülzow 11/2017–04/2022, (ohne hydrologisches Jahr 2018/19, da ohne Sickerwasserbildung)

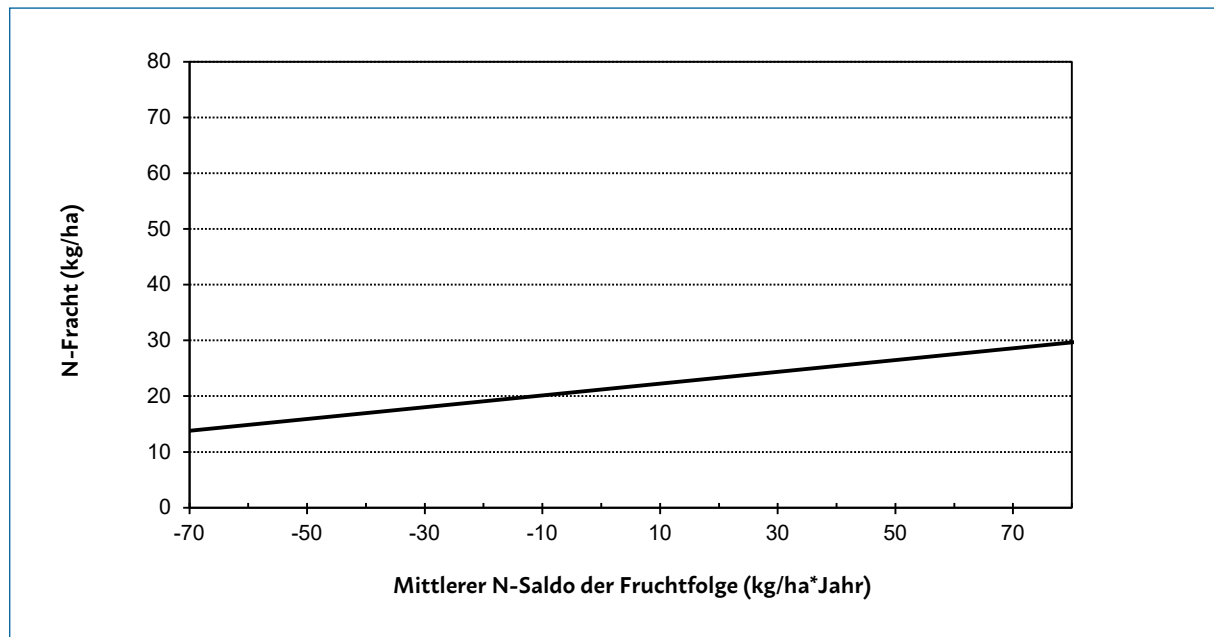


Abb. 7: Mittlere N-Fracht der Fruchtfolge Winterraps-Winterweizen (Zwischenfrucht)-Silomais-Wintertriticale im Sickerwasser in 60 cm Bodentiefe während der Sickerwasserperiode in Abhängigkeit vom mittleren N-Saldo der Fruchtfolge, Gülzow 11/2017–04/2022, (mit hydrologischem Jahr 2018/19)

Diskussion

Da die mit METVER für Gülzow modellierten Sickerwassermengen kaum Unterschiede in Bezug auf die Kulturart aufweisen und keine Ergebnisse für eine mögliche Beeinflussung der Sickerwassermenge in Bezug auf die N-Düngung vorliegen, führt die Auswertung der NO_3^- -Konzentrationen und N-Frachten zwangsläufig zu parallelen Ergebnissen. Aus Lysimeter-Untersuchungen mit unterschiedlichen Böden am Standort Brandis (Sachsen) ist bekannt, dass die Sickerwassermenge überwiegend von der Wasserspeicherkapazität der Böden, dem Ausschöpfungsgrad des Bodenwassers während der Vegetationsperiode und den Niederschlägen im Herbst und Winter abhängt. Dagegen ist der Einfluss des kulturartsspezifischen Wasserverbrauchs sehr gering (HAFERKORN, 2000). Auch ALBERS et al. (2020) fanden in Niedersachsen ähnlich wie in Gülzow parallele Verläufe von N-Frachten und NO_3^- -Konzentrationen. Ob gering gedüngte schwächere Bestände den Bodenwasservorrat weniger ausschöpfen oder durch höhere Evaporation aufgrund geringerer Bodenbedeckung zu niedrigeren Bodenwassergehalten führen, ist vermutlich situationsabhängig, kann aber mit den vorliegenden Daten nicht geprüft werden.

In der Lysimeter-Anlage Groß Lüsewitz wurden bei einer vergleichbaren Fruchtfolge etwas niedrigere NO_3^- -Konzentrationen und N-Frachten als in Gülzow gemessen. Die Maximalwerte lagen deutlich niedriger. Die gemessenen NO_3^- -Konzentrationen in 210 cm Tiefe lagen im Zeitraum von 2011/12–2020/21 zwischen 0,06–257 mg/l, die N-Frachten zwischen 0 und 81 kg/ha und Jahr, im Mittel bei 14 kg/ha und Jahr (MIEGEL et al., 2011–2021). Die geringeren Werte können aufgrund der größeren Messtiefe durch Denitrifikation beeinflusst sein. Es bestehen aber aufgrund der händischen Bewirtschaftung, der Lage der Lysimeter im Gelände u. ä. weitere methodische Unterschiede, die die Werte beeinflussen. Die hohen Spannweiten sowohl zwischen den Jahren als auch zwischen den einzelnen Lysimetern weisen ähnlich wie in Gülzow auf den hohen Einfluss von Boden und Witterung hin. Da in den Lysimetern nur eine Kulturart je Jahr angebaut wird, ist ein Kulturartenvergleich anhand der Lysimeter-Daten nicht möglich. KAHLE und MEHL (2014) belegten für einen anderen mecklenburgischen Standort den gegenüber der kultur- und jahresspezifischen Flächenbewirtschaftung überragenden Einfluss der Sickerwassermenge auf die N-Fracht. In Gülzow sind vor allem die Jahre 2018/19 ohne Sickerwasser und 2019/20 mit vergleichsweise hohen Werten auffällig. 2019/20 begann die Sickerung aufgrund der vorjährigen Trockenheit spät (Ende Januar) und auch während der Sickerwasserperiode konnten nur wenige Proben gewonnen werden. Ob nach einer Trockenperiode NO_3^- -Konzentration und N-Fracht erhöht sind, kann deshalb aus den Gülzower Daten nicht abgeleitet werden. Aussagen zu dieser These bedürfen einer längerfristigen Messreihe. HAVERKORN (2000) ermittelte für Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität im mitteldeutschen Trockengebiet bei intensiver landwirtschaftlicher Nutzung eine mittlere NO_3^- -Konzentration von 100 mg/l, dieser Wert

liegt auf dem gleichen Niveau wie der der Gülzower Düngungsvarianten nach 100 % DüV. Ob sich diese Werte mit der weiteren Sickerung in größere Bodentiefen verändern, müsste Gegenstand ergänzender Untersuchungen sein.

Höhere Düngung führt zu höherer NO_3^- -Konzentration und N-Fracht. Das lässt sich durch die Varianzanalyse für Wintertriticale (Vorfrucht Silomais) und Winterweizen (Vorfrucht Winterraps) nachweisen. Bei Winterraps (Vorfrucht: Wintertriticale) und Zwischenfrucht (Vorfrucht Winterweizen) erlauben die Versuchsdaten bislang keine gesicherten Aussagen. Ein Düngungseinfluss bei Winterraps ist anders als bei Zwischenfrucht nicht unwahrscheinlich, lässt sich mit unseren Daten aber nicht belegen. Unter im Herbst gut entwickelten Raps- und Zwischenfrucht-Beständen mit hoher N-Aufnahme wird die Düngungsintensität keinen oder nur geringen Einfluss auf den N-Austrag haben. Unter schwachen Beständen sind dagegen ähnliche Verhältnisse wie unter Wintergetreide zu erwarten. Darauf deuten auch die Ergebnisse für Winterraps und Zwischenfrucht in den einzelnen Versuchsjahren. Bis auf das Jahr 2019/20 lagen die NO_3^- -Konzentrationen und N-Frachten unter Winterraps (Vorfrucht Wintertriticale) und Zwischenfrüchten (Vorfrucht Winterweizen) immer auf ähnlich niedrigem Niveau. Die Vorwinterentwicklung der Zwischenfrüchte war in allen Versuchsjahren gut, Winterraps lief nur im Herbst 2019 aufgrund sehr trockenen Bodens schlecht auf. Nur 2019/20 liegen die unter Winterraps (Vorfrucht Wintertriticale) gemessenen NO_3^- -Konzentrationen deutlich über den unter Zwischenfrüchten (Vorfrucht Winterweizen).

Es sind also weniger die pauschalen Düngungshöhen als die angebauten Kulturen und ihre N-Aufnahme im Herbst und Winter für die NO_3^- -Konzentration im Sickerwasser entscheidend. Für den N-Austrag ist das Fruchtfolgeglied Winterraps-Winterweizen besonders kritisch. Gleichlautende Ergebnisse zum überragenden Einfluss der Kulturart insbesondere des Winterweizens (Vorfrucht Winterraps) berichten SIELING und KAGE (2006). Sogar der Effekt des N-Saldos (hier der Vorjahressaldo im Dauerversuch) auf die N-Fracht bewegt sich in einem sehr ähnlichen Niveau wie in Gülzow, nur 13 % (Winterraps, Vorfrucht Wintergerste) bis 25 % (Winterweizen, Vorfrucht Winterraps) des N-Saldo-Wertes werden ausgewaschen. In einer erweiterten Auswertung dieser Versuchsergebnisse schlussfolgern KAGE et al. (2022) „dass eine Minderung der Stickstoffdüngung unterhalb des Niveaus der DüV für Winterweizen und Winterraps nur einen sehr geringen Beitrag zur Verringerung der Stickstoffauswaschung leistet.“ Auch in weiteren Studien werden bei N-Düngungshöhen im empfohlenen Bereich bzw. nicht oberhalb des ökonomischen Optimums ähnlich geringe Effekte des N-Saldos auf die N-Fracht ermittelt (von 0 bis unter 20 %, ZHAO et al., 2022; DELIN und STENBERG, 2014; LORD und MITCHELL, 1998 – alle zitiert nach KAGE et al., 2022). Die in Gülzow gefundene Differenz zwischen N-Saldo und N-Austrag ist also nicht ungewöhnlich und scheint auch in der Höhe von 10–20 % der anderer Standorte mit höherem Auswaschungsrisiko zu entsprechen.

Landwirtschaftliche Kulturen werden überwiegend rotierend in einer mehrfeldrigen Fruchtfolge angebaut. Unter der Beachtung der Erkenntnisse von WERISCH und BURGHARDT (2021) über den Einbau des Dünger-N in den Boden-N-Pool wird in der vorliegenden Auswertung die Abhängigkeit von NO_3^- -Konzentration und N-Fracht zum mehrjährigen N-Saldo dargestellt. Der mehrjährige N-Saldo hat über die Einbeziehung der vorherigen vier Anbaujahre den Bezug zur vierfeldrigen Fruchtfolge im Versuch und sollte mit dem düngungsabhängigen Mineralisierungspotenzial des Boden-N-Pools am konkreten Standort korrelieren. Aufgrund des noch kurzen Versuchszeitraums kann noch nicht geprüft werden, ob ein noch längerfristiger N-Saldo besser für diese Analyse geeignet wäre. Anders als in Trockengebieten kommt es aber in Gülzow regelmäßig zu Sickerwasserbildung und N-Austrag. Die längerfristige N-Akkumulation der Bilanzüberschüsse wird in Gülzow um den N-Austrag verringert, was zumindest gegen einen unkorrigierten langfristigen N-Saldo als Bezugsgröße spricht.

Es ist außerdem, wie von KAGE et al. (2022) dargelegt, ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem N-Saldo und der NO_3^- -Konzentration bzw. der N-Fracht wahrscheinlich. Aber auch mit den Gülzower Daten kann bisher kein anderer Verlauf nachgewiesen werden, deshalb wird der Zusammenhang ebenso vereinfachend linear dargestellt. Für die Bewertung der Ergebnisse nach der Varianzanalyse, also den Vergleich jeweils zweier Düngungsvarianten, spielt der Verlauf keine Rolle.

Die positive Wirkung von Zwischenfrüchten bzw. Beständen mit hoher N-Aufnahme ist seit langem bekannt (z. B. SPIESS et al., 2011; FINCK und GUTSER, 2012). Insofern sind die niedrigen Werte unter Zwischenfrucht in Gülzow nicht überraschend. Die Abschätzung unvermeidbarer N-Austräge sollte jedoch nicht nur aus den Werten unter Zwischenfrucht abgeleitet werden, da eine ackerbauliche Flächennutzung nur mit Zwischenfrucht und Sommerkulturen

für Mecklenburg-Vorpommern absolut unrealistisch ist. Außerdem ist zu beachten, dass Null-Salden und viel mehr noch negative N-Salden langfristig zum Humusabbau führen und deshalb nicht angestrebt werden sollten. CHRISTENSEN et al. (2021) berechneten für Dänemark auf der Grundlage historischer Landnutzungsdaten eine mittlere NO_3^- -N-Konzentration unterhalb der Durchwurzelungszone für das Jahr 1900, welches als Referenz für den Zustand dänischer Küstengewässer für die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie genutzt wird. Diese NO_3^- -Konzentration liegt auf einem vergleichbaren Niveau wie Monitoring-Messwerte für den Zeitraum 2004–2016 (53 bzw. 62 mg/l), aber nur halb so hoch wie Messwerte von 1990–1994 (124 mg/l). Die dänischen Maßnahmen zur Reduzierung der N-Austräge aus der Landwirtschaft führten also zur messbaren Verringerung der NO_3^- -Konzentration im Sickerwasser. Trotzdem scheint es eine Grenze der NO_3^- -N-Konzentration zu geben, die bei Ackernutzung nicht unterschritten werden kann. KNOBLAUCH (2018) schätzt die unvermeidbare N-Auswaschung für Thüringer Ackerböden mit sehr geringen Bodenwasseraustauschraten im mehrjährigen Mittel auf 2–22 kg/ha und Jahr. Dabei sind 2 kg/ha und Jahr die im Lysimeter bei fachgerechter N-Düngung ermittelte N-Fracht mit einem Toleranzbereich von 20 kg für Praxisbedingungen. Es kann diskutiert werden, ob für eine mehrjährige Angabe der N-Fracht des Gülzower Versuches im Zeitraum 11/2017–04/2022 das hydrologische Jahr 2018/19 mitberücksichtigt werden sollte, auch wenn in diesem Jahr keine Sickerung stattfand. Im Mittel der Anbaujahre 2017/18 bis 2021/22 beträgt die N-Fracht über alle Kulturarten bei einem theoretischen N-Saldo von Null im Versuchszeitraum 21 kg/ha und Jahr. Das N-Saldo der geprüften Fruchtfolge bei rein mineralischer N-Düngung nach 100 % DüV liegt bei 17 kg/ha und Jahr. Dem entspricht eine mittlere N-Fracht von 23 kg/ha und Jahr. Werden nur Jahre mit Sickerwasserbildung betrachtet (ohne 2018/19), liegen diese Werte um ca. 5 kg/ha höher. Mit einem Toleranzbereich könnte die unvermeidbare N-Auswaschung in Jahren mit Sickerwasserbildung für Gülzow mit 25–50 kg/ha und Jahr angenommen werden. Die Notwendigkeit eines Toleranzbereiches ergibt sich für das Wirtschaften unter Praxisbedingungen (größere Einheiten, standörtliche Heterogenität, technische Grenzen), für die Annahme abweichender Standort- und Witterungsbedingungen, für andere Betriebsstrukturen (Kulturartenspektrum, Tierhaltung) und durch die Aussage-Unsicherheit aufgrund der noch kurzen Versuchsreihe in Gülzow. Die höheren Werte im Vergleich zu Thüringen erklären sich mit der höheren natürlichen Versickerung in Mecklenburg-Vorpommern. Im Sickerwasser wurden bei rein mineralischer N-Düngung nach 100 % DüV im Mittel 93 mg/l NO_3^- gemessen. Aufgrund der oben beschriebenen Abhängigkeit zur Sickerwasserrate werden die Werte der N-Auswaschung/N-Fracht bei höheren Sickerwasserraten und Sickerwasserbildung je Jahr vermutlich höher ausfallen. Die Gültigkeit der Werte für die unvermeidbare N-Auswaschung sollte deshalb weiter überprüft werden.

Die Versuchsergebnisse wurden in einem Dauerversuch auf einer Fläche ohne relevante N-Düngung vor Versuchsbeginn gewonnen. Trotzdem wurden auf Parzellen ohne N-Düngung N-Austräge festgestellt. Im Versuchszeitraum lagen diese im Mittel der geprüften Fruchtfolge im Durchschnitt der Jahre mit Sickerwasserbildung bei 18 kg/ha und Jahr. Diese Beobachtung und die nur anteilige Auswaschung des mehrjährigen N-Saldos gedüngter Varianten spricht gegen das Konzept eines Fließgleichgewichtes wie von OSTERBURG und RUNGE (2007) erwartet. Wahrscheinlich ist dieses nur in extrem langen Zeiträumen erreichbar. RAMSBECK-ULLMANN (2006) errechnete eine Zeitspanne von 300 Jahren bis zur Einstellung eines Systemgleichgewichtes.

Insgesamt beziehen sich die Ergebnisse auf eine Prüfung der Einflüsse von N-Düngung, mehrjähriger N-Bilanz und Kultur auf die NO_3^- -Konzentration/N-Fracht im Sickerwasser bei maximaler N-Düngungshöhe von 100 % DüV. Höhere N-Düngung mit höheren N-Bilanzsalden, ob aus der Vergangenheit oder aus aktuellen Fehlern, N-Einträge aus Punktquellen sowie Nährstoffausträge aus entwässerten Niedermoorflächen führen ebenfalls zu N-Verlagerung in Grund- und Oberflächenwasser. Ebenso kann der unbestrittene Einfluss der Bodenbearbeitung auf die NO_3^- -Konzentration nicht aus den vorliegenden Daten abgeleitet werden. Es wäre unzulässig, in der Landschaft gemessene NO_3^- -Werte allein mit den hier dargestellten Zusammenhängen zu beschreiben.

Schlussfolgerungen

- NO_3^- -Konzentrationen und N-Frachten werden in hohem Maß von der Sickerwassermenge bestimmt. Die Sickerwassermenge hängt überwiegend von der Wasserspeicherkapazität der Böden, dem Ausschöpfungsgrad des Bodenwassers während der Vegetationsperiode und den Niederschlägen im Herbst und Winter ab.
- Mittlere NO_3^- -Konzentrationen und N-Frachten zeigen überwiegend gleichlautende Abhängigkeiten von der Bewirtschaftung.

- Auf Standorten mit hohem N-Auswaschungsrisiko sind bei Ackernutzung und N-Düngung in der nach DüV 2017 zulässigen Höhe mittlere NO_3^- -Konzentrationen im Sickerwasser von 100 mg/l bei 60 cm Bodentiefe nicht ungewöhnlich. Dabei treten hohe Spannweiten zwischen den Jahren, im Jahresverlauf und zwischen unterschiedlichen Böden auf.
- Der bewirtschaftungsabhängige Einfluss auf NO_3^- -Konzentrationen und N-Frachten besteht vor allem in der Auswahl des Kulturartenspektrums. Insbesondere das N-Aufnahmevermögen des im Herbst/Winter auf dem Acker stehenden Pflanzenbestandes ist für die NO_3^- -Konzentration im Sickerwasser bedeutsam. Dabei ist der Anbau von Winterweizen nach Vorfrucht Winterraps besonders kritisch. Gut entwickelte Bestände mit hoher N-Aufnahme wie Winterraps und Zwischenfrüchte wirken reduzierend auf die NO_3^- -Konzentrationen.
- Auch der mehrjährige N-Düngungssaldo hat über die Anreicherung des Boden-N-Pools Einfluss auf NO_3^- -Konzentration und N-Fracht. Dabei erhöht sich an auswaschungsgefährdeten Standorten die N-Auswaschung um 10–20 % des mehrjährigen N-Saldos.
- Auch ohne N-Düngung sind N-Austräge nicht zu vermeiden.
- Davon abgeleitet wird für Mineralbodenstandorte in Mecklenburg-Vorpommern ein Wert für die unvermeidbare N-Auswaschung unter Ackernutzung von 25–50 kg/ha und Jahr vorgeschlagen. Dieser Wert ist jedoch durch die Auswertungsunsicherheit (nur ein Standort, nur vier Jahre mit Sickerwasserbildung) eingeschränkt und bedarf weiterer Überprüfung.
- Die N-Minderungsziele der Wasserrahmenrichtlinie werden nicht allein durch eine Reduzierung der N-Düngung um 20 % der nach DüV zulässigen Höhe für nicht gefährdete Gebiete erreicht werden. Sogar eine weitere Einschränkung der N-Düngungshöhe darüber hinaus ist in ihrer Wirkung begrenzt. Für sensible Gebiete kann eine Unterstützung der Landwirtschaftsbetriebe zur Verringerung des Winterweizen-Anbaus bzw. Ausdehnung des Anbaus von Zwischenfrüchten Vorteile bringen. Für eine relevante N-Aufnahme im Herbst müssen die Zwischenfrüchte aus überwiegend nichtlegumen Arten bestehen, ausreichend früh gesät und nicht vor Februar umgebrochen werden. Mit Winterraps und Ackergras können ähnlich positive Effekte wie mit Zwischenfrüchten erzielt werden.

Ausblick

- Trotz sorgfältiger Versuchsdurchführung und -auswertung bleiben wichtige Fragen offen, die zusätzlich zur Notwendigkeit der Ergebnisabsicherung weitere Untersuchungen erfordern.
- Offene Fragen:
 - Wie hoch ist der Einfluss des Standortes auf NO_3^- -Konzentrationen/N-Fracht im Sickerwasser?
 - Ist der Zusammenhang zwischen dem mehrjährigen N-Saldo und NO_3^- -Konzentrationen/N-Fracht unter Winterraps tatsächlich schwächer als unter Wintergetreide?
 - Unterscheiden sich die Wintergetreidearten in Bezug auf das N-Verlagerungsrisiko?
 - Wie wirken sich andere Vorfrüchte/Fruchtfolgen auf NO_3^- -Konzentrationen/N-Fracht aus (z. B. Wintergetreide nach Wintergetreide)?
 - Wie sind andere Kulturarten/Fruchtfolgen (z. B. Leguminosen, Winterroggen, Sommergetreide, Ackergras) unter den Standortbedingungen in Mecklenburg-Vorpommern einzuschätzen?
 - Gibt es einen nachweisbaren Unterschied zwischen mineralischer und organisch-mineralischer Düngung bei langfristiger Betrachtung?
 - Welchen Einfluss hat die Herbstdüngung auf den N-Austrag?
 - Wie sind andere Betriebsformen (reiner Marktfruchtanbau, höherer Anteil organischer Düngung, Ökologischer Landbau) zu bewerten?
 - Wie wirken sich ungewöhnliche Witterungsereignisse aus (z. B. Sickerwasserbildung im Sommer aufgrund von Starkregenereignissen)?
 - Durch den Klimawandel werden für Mecklenburg-Vorpommern eine Erhöhung der N-Mineralisationsrate im Herbst sowie ein Anstieg der Niederschlagsmengen im Herbst/Winter prognostiziert. Beides befördert die N-Verlagerung. In welcher Höhe werden diese Prozesse den NO_3^- -Austrag in Mecklenburg-Vorpommern beeinflussen? Werden dadurch Effekte von ackerbaulichen Wasserschutzmaßnahmen überlagert und unsichtbar?
 - Wie verändern sich die NO_3^- -Konzentration bei zunehmender Tiefenverlagerung des Sickerwassers unterhalb 60 cm Bodentiefe? Wie beeinflussen standortspezifische Bodeneigenschaften diese Prozesse (Stauwasserhorizonte, Drainagen)?

Lösungsansätze:

- Fortführung der intensiven Untersuchungen mit der Saugkerzenanlage in Gülzow zur weiteren Differenzierung und Absicherung der Ergebnisse sowie als Referenz für Ergänzungsuntersuchungen (drainfit in trial: mehr (normale) Jahre, mehr Witterungssituationen, geeignet zur Analyse von N-Düngungswirkungen)
- Ergänzung der Untersuchungen mit langfristigen Lysimeter-Messreihen
- Ergänzungsuntersuchungen auf Praxisflächen mit vereinfachter Methodik durch wiederholte punktuelle Messungen auf einer größeren Anzahl Standorte und Kulturarten (Drainfit in practice: mehr Standorte, mehr Fruchtfolgen, mehr Witterungssituationen, mehr Betriebsformen, nicht geeignet zur Analyse von N-Düngungswirkungen)

Weitere offene Fragen, ohne vorgeschlagenen Lösungsansatz:

- Lässt sich die Differenz zwischen mehrjährigem N-Saldo und N-Fracht erklären (ca. 10:1)?
- Woher stammt der ausgewaschene Stickstoff bei mehrjährig negativen N-Salden?

Literatur

Albers, M. C.; Peters, K.; Knigge-Sievers, A.; Noltemeyer, L.; Fier, A.; Bischoff, N.; Meyer, K. (2020): Grundwasser-schutzorientierte Dauerversuche. Thülsfelde (644). – Auswaschungsperioden 1998/1999 bis 2018/2019-. Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWKNI).

Christensen, B.; Pedersen, B.; Olesen, J.; Eriksen, J. (2021): Land-use and agriculture in Denmark around year 1900 and the quest for EU Water Framework Directive reference conditions in coastal waters. In: Ambio 50 (10), S. 1882–1893. DOI: 10.1007/s13280-021-01536-8.

Delin, S.; Stenberg, M., 2014: Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. Eur. J. Agron. 52, 291–296. 10.1016/j.eja.2013.08.007.

Finck, M.; Gutser, R. (2012): Nitratverlagerung – Bedeutung, Mechanismen und Lösungswege. In: Stickstoff – Bedeutung für Mensch und Umwelt. Tagungsband. Würzburg. Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), S. 63–74.

Haferkorn, U. (2000): Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes. Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Göttingen, Univ., Diss., 2000.

Henke, J.; Böttcher, U.; Neukam, D.; Sieling, K.; Kage, H. (2008): Evaluation of different agronomic strategies to reduce nitrate leaching after winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using a simulation model. In: Nutr Cycl Agroecosyst (82), S. 299–314.

Kage, H.; Rübiger, T.; Sieling, K. (2022): Stickstoffdüngung zu Winterraps und Winterweizen. Eine Evaluierung der Düngeverordnung, methodischer Aspekte der Auswertung von Düngeversuchen sowie der Beziehung zwischen Düngungshöhe und Stickstoffauswaschung. In: Berichte über Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft 100 (1), S. 1–38.

Kahle, P.; Mehl, D. (2014): Nitratausträge über Dränung landwirtschaftlich genutzter Böden in Mecklenburg-Vorpommern. Fallstudien. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft 7 (4), S. 198–205.

Knoblauch, S.; Albert, E.; Haferkorn, U.; Heyn, J.; Herold, L.; Lippold, T. et al. (Hg.) (2013): Wirkung landwirtschaftlicher Nutzung auf die N-Auswaschung anhand langjähriger Lysimetermessungen in Mittel- und Nordostdeutschland und Schlussfolgerungen für die Minimierung der N-Befrachtung der Gewässer. Kooperation Lysimeter. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft-mv.de/serviceassistent/download?id=1578674>.

- Knoblauch, S. (2018): Auswertung des Nitratreintrages über Sickerwasser mit Hilfe von Lysimeterdaten am Beispiel der Lysimeterstation Buttstedt. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft 11 (6), S. 31–38.
- Lord, E.I.; Mitchell, R.D.J., (1998): Effect of nitrogen inputs to cereals on nitrate leaching from sandy soils. *Soil Use Manage.* 14, 78–83. 10.1111/j.1475-2743.1998.tb00619.x.
- Miegel, K.; Zachow, B.; Klehr, W.; Jonas, M.: Ermittlung von Daten des Wasserhaushaltes an der Lysimeteranlage Groß Lüsewitz. Jahresberichte 2011–2021.
- Oehmichen, J. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. In: Lehrbuch des Pflanzenbaues, 1. Grundlagen.
- Osterburg, Bernhard; Runge, Tania (2007): Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer – eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. Braunschweig: Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) (Landbauforschung Völkenrode/Sonderheft, 307).
- Peschke, H. (2001): 15N-Tracertechnik in der Pflanzenbauforschung. In: *Acta agrar. Debr.* (1), S. 3–9. DOI: 10.34101/actaagrar/1/3600.
- Peschke, Heinz (2002): Untersuchungen mit 15N-Tracern in agrikulturchemischen Systemen. In: *Acta agrar. Debr.* 0 (8), S. 23–28. DOI: 10.34101/actaagrar/8/3546.
- Ramsbeck-Ullmann, M. (2006): Landnutzungswandel und Stickstoffauswaschung im Einzugsgebiet der Parthe. Dissertation. TU München.
- Sieling, K.; Kage, H. (2006): N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape – winter wheat – winter barley rotation. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* (115), S. 261–269.
- Spiess, E.; Prasuhn, V.; Stauffer, W. (2011): Einfluss von organischer und mineralischer Düngung auf die Nährstoffauswaschung. In: *Agrarforschung Schweiz* 2 (9), S. 376–381.
- Werisch, S.; Burghardt, D. (2021): Identification of mechanisms controlling nitrogen export from agricultural lysimeters. In: *Lysimeter und Bodenwasserhaushalt. Trockenheit – Bewässerung – Ertragssicherheit: 19. Gumpensteiner Lysimetertagung = Lysimeter and soil water management: drought – irrigation – yield stability.* Irdning-Donnersbachtal: HBLFA, S. 71–78.
- Zhao, J.; Pullens, J.W.M.; Sørensen, P.; Blicher-Mathiesen, G.; Olesen, J.E.; Børgesen, C.D. (2022): Agronomic and environmental factors influencing the marginal increase in nitrate leaching by adding extra mineral nitrogen fertilizer. *Agric. Ecosyst. Environ.* 327, 107808. 10.1016/j.agee.2021.107808.

Anhang

Varianzanalyse zum paarweisen Vergleich der Düngungsvarianten

The Mixed Procedure

Model Information

Dependent Variable	NO ₃
Covariance Structures	Variance Components, Compound Symmetry
Subject Effect	P
Estimation Method	REML
Residual Variance Method	Profile
Fixed Effects SE Method	Prasad-Rao-Jeske-Kackar-Harville
Degrees of Freedom Method	Kenward-Roger

Class Level Information

Class	Levels	Values
A	5	1 3 4 7 12
R	3	1 2 3
Feld	4	1 2 3 4
P	60	111 112 113 114 121 122 123 124 131 132 133 134 311 312 313 314 321 322 323 324 331 332 333 334 411 412 413 414 421 422 423 424 431 432 433 434 711 712 713 714 721 722 723 724 731 732 733 734 1211 1212 1213 1214 1221 1222 1223 1224 1231 1232 1233 1234
J	4	2018 2020 2021 2022
K	4	WRa WT WW ZWF
Number of Observations Read		240
Number of Observations Used		219
Number of Observations Not Used		21

Convergence criteria met.

Cov Parm	Subject	Estimate
Feld*J*K		3515.94
R*Feld		0
R*Feld*J*K		464.04
CS	P	354.38
Residual		6233.98

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
A*K	19	111	1.85	0.0259

Effect	A	K	Esti- mate StdErr	
A*K	1	ZWF	51	40
A*K	3	ZWF	19	39
A*K	4	ZWF	26	40
A*K	7	ZWF	39	39
A*K	12	ZWF	55	39
A*K	1	WW	90	39
A*K	3	WW	121	39
A*K	4	WW	163	42
A*K	7	WW	201	39
A*K	12	WW	193	40
A*K	1	WT	45	39
A*K	3	WT	133	39
A*K	4	WT	125	39
A*K	7	WT	118	39
A*K	12	WT	104	39
A*K	1	WRa	47	41
A*K	3	WRa	31	40
A*K	4	WRa	84	40
A*K	7	WRa	45	39
A*K	12	WRa	94	39

Regressionsanalyse zum Zusammenhang zwischen mehrjährigem N-Saldo und NO_3^- -Konzentration

The Mixed Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
A	5	1 3 4 7 12
R	3	1 2 3
Feld	4	1 2 3 4
P	60	111 112 113 114 121 122 123 ...
J	5	2018 2019 2020 2021 2022
K	4	WRa WT WW ZWF
Number of Observations Read		300
Number of Observations Used		219
Number of Observations Not Used		81

Type 3 Tests of Fixed Effects

	Num	Den		
Effect	DF	DF	F Value	Pr > F
K	4	11.9	8.83	0.0015
Saldo_MW*K	4	151	4.89	0.0010

Convergence criteria met.

Cov Parm	Subject	Estimate
Feld*J		3259,11
R*Feld		2,21E-14
R*Feld*J		389,44
CS	P	179,27
Residual		6378,39

Solution for Fixed Effects

Standard						
Effect	K	Estimate	Error	DF	t Value	Pr > t
K	WRa	62,9799	31,3059	11,9	2,01	0,0674
K	WT	99,8995	31,0592	11,5	3,22	0,0078
K	WW	139,42	31,4834	12,2	4,43	0,0008
K	ZWF	38,8255	31,3107	11,9	1,24	0,2389
Saldo_MW*K	WRa	0,3166	0,2939	186	1,08	0,2827
Saldo_MW*K	WT	0,4838	0,2339	167	2,07	0,0402
Saldo_MW*K	WW	0,9108	0,2372	174	3,84	0,0002
Saldo_MW*K	ZWF	-0,03540	0,2380	179	-0,15	0,8820

Least Squares Means

Standard							
Effect	K	Saldo_MW	Estimate	Error	DF	t Value	Pr > t
K	WRa	-100,0	31,3227	41,9679	32,3	0,75	0,4609
K	WT	-100,0	51,5223	40,3868	31,6	1,28	0,2114
K	WW	-100,0	48,3398	41,5985	34	1,16	0,2533
K	ZWF	-100,0	42,3650	41,2655	33,3	1,03	0,3120
K	WRa	-70,00	40,8198	36,6824	20,6	1,11	0,2786
K	WT	-70,00	66,0354	36,2805	21,1	1,82	0,0829
K	WW	-70,00	75,6642	37,2889	23	2,03	0,0542
K	ZWF	-70,00	41,3032	36,9745	22,4	1,12	0,2758
K	WRa	0,00	62,9799	31,3059	11,9	2,01	0,0674
K	WT	0,00	99,8995	31,0592	11,5	3,22	0,0078
K	WW	0,00	139,42	31,4834	12,2	4,43	0,0008
K	ZWF	0,00	38,8255	31,3107	11,9	1,24	0,2389
K	WRa	100,00	94,6371	43,8838	38,2	2,16	0,0374
K	WT	100,00	148,28	37,3162	23,5	3,97	0,0006
K	WW	100,00	230,50	37,1175	22,3	6,21	<0,0001
K	ZWF	100,00	35,2859	37,2974	23	0,95	0,3539